

# Auswirkung von Stadtbäumen auf den Feinstaubgehalt in München

- Eine Literaturrecherche mit Messreihe und sozioempirischer Befragung -

als

Bachelorarbeit

der Studienfakultät für Forstwissenschaft  
und Ressourcenmanagement  
der Technischen Universität München

vorgelegt von

Martin Alexander Honold

Die Bachelorarbeit wurde angefertigt am  
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde  
der Technischen Universität München  
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2  
85354 Freising

Leiter der Arbeit: Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Pretzsch  
Betreuer: Jens Dallhausen

Freising, im Juni 2016

Wer Lust hat an der Weisung des Herrn, der ist wie ein Baum, gepflanzt an den Wasserbächen, der seine Frucht bringt zu seiner Zeit und seine Blätter verwelken nicht und alles was er da tut, das lässt der Herr gelingen.

Psalm 1, 3

# Danksagung

Danken möchte ich Gott, der mir das Leben auf dieser unvergleichlichen Erde geschenkt hat und mir immer wieder von Neuem die Chance gibt meine Fähigkeiten und Talente für Ihn und die Menschen einzusetzen.

Weiter möchte ich meinen Eltern Rainer Schmidt-Honold und Vera Honold danken, die mich immer unterstützt- und die mir so viel Positives mit auf meinen Weg gegeben haben.

Auch meinem Bruder Clemens möchte ich danken für all seine Nähe und Hilfe.

Danken möchte ich der Arbeitsgemeinschaft Francesco und Chiara und besonders meinem Mentor Dr. Eberhard Weiger, die mich all die Jahre fördern und mir helfen immer mehr mein volles Potential zu leben.

In gleicher Verbundenheit möchte ich auch dem Mann und Lebensgefährten meiner Mutter Dr. Dr. Wolfgang Maletius danken.

Für die tolle Betreuung und die große Hilfe beim Erstellen dieser Bachelorarbeit möchte ich mich auch bei Jens Dahlhausen und bei Dr. Thomas Rötzer, sowie bei Astrid Moser bedanken.

Ein Dank geht auch an Prof. Weber aus Braunschweig, der die Messungen in München begleitete und die Messgeräte für die Untersuchung zur Verfügung stellte.

Weiter möchte ich Gerhard Schütze und Martin Nickel danken, die bei der Erstellung des Fragebogens eine große Hilfe waren.

Besonders möchte ich mich schließlich bei Prof. Pretzsch bedanken, der der Leiter der Arbeit war und mich beim Erstellen dieser Bachelorarbeit stets begleitete und förderte.

# Abstract

Urban particulate air pollution is a serious health issue in modern rural societies. Especially the regulation of particulate matter concentrations via European limits, in 2005 for PM 10 and in 2015 for PM 2,5, remains a key problem for many cities. That is why new methods and strategies have to be developed in an attempt to solve the difficulty. The current bachelor thesis aims to address the relationship between urban trees and pollution levels in a metropolis such as Munich. The thesis begins with a general review of literature, followed by the presentation of field measurement results obtained in Munich and in the end a survey enlarges the scientific research by adding a social-empirical perspective on the topic. The research of literature shows, that trees and green belts have a positive effect on particulate matter concentrations in cities. The efficiency of this effect is closely connected to tree species and planting design, as well as surrounding architecture and local climate. At a leaf scale approach conifers turn out to be most efficient in reducing PM while at the scale of whole planting configurations, mixed stands composed out of conifers and deciduous trees, show to have the highest potential for reducing particulate matter. Capability of trees to reduce PM can be determined by using field measurements, as well as by using experimental methods and computer based mathematical simulations. Because of the different methods and multiple influences on the results of this measurements, comparison among the studies can not be completed without critical reflection. Field measurements in Munich show filtration efficiencies up to 20 % for Luv – Lee based values at four different urban sites. In these measurements increasing wind speed and tree crown volume show a positive correlation to reduction potential. Results of the survey demonstrate that concrete filtering mechanism of city trees is unknown, while people always establish a connection between city trees and air quality improvement. Furthermore, the inhabitants of Munich appreciate the presence of trees within their city. It points out that trees in rural areas next to social functions, provide many ecosystem services like reduction of particulate matter and that's why city trees are important enrichments for cities like Munich.

# Zusammenfassung

Ein umweltpolitisches Thema das in den letzten Jahren, aufgrund seiner großen Gefahr für die menschliche Gesundheit verstärkt die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf sich zog, ist das Thema Feinstaub. Die Einhaltung der 2005 aufgestellten EU weiten Grenzwerte für PM 10 sowie die 2015 erfolgte Verschärfung der EU Richtlinie durch Grenzwerte für PM 2,5, stellen für viele Großstädte ein ernstes Problem dar. Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich vor diesem Hintergrund mit der Fragestellung in wie weit Stadtbäume einen Einfluss auf den Feinstaubgehalt in Großstädten wie München haben können. Hierbei bietet eine Literaturrecherche zu Beginn der Arbeit, einen allgemeinen Überblick. Daran anschließend, vertieft die Präsentation einer Messreihe in München die Thematik, worauf abschließend neben den naturwissenschaftlichen Standpunkten, die Arbeit durch eine sozial-empirische Sichtweise, in Form einer Befragung, angereichert wird. Die Literaturrecherche zeigt, dass Stadtbäume im Allgemeinen eine positive Auswirkung in Form eines Filtereffektes auf die Feinstaubkonzentration in Städten haben. Die Stärke dieses Filtereffektes hängt hierbei, von der untersuchten Baumart, der Pflanzstruktur, sowie von den jeweiligen Umgebungsbedingungen, wie der Architektur und dem lokalen Klima, des betrachteten städtischen Standortes ab. Die Filterleistung von Stadtbäumen kann durch Feldmessungen, sowie Experimentelle- und Rechensimulationsbasierte Methoden, ermittelt werden. Durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen und die vielen Einflussfaktoren bei der Erfassung der Filterleistung, sind die Ergebnisse der einzelnen Studien jedoch nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar. Koniferen weisen auf Blattebene die höchsten Filterwerte auf, während sich auf Ebene des Pflanzverbandes, eine Mischung aus Koniferen und Angiospermen als am effektivsten erweist. Die in München durchgeführten Feldmessungen an vier verschiedenen Standorten ergeben Luv – Lee Filterwerte von bis zu 20 %, die sowohl von der Windstärke als auch vom jeweiligen Kronenvolumen abhängig sind. Die Befragung lässt erkennen, dass der Mechanismus der Feinstaubfilterung von Stadtbäumen den Befragten nicht bekannt ist, jedoch Stadtbäume stets mit einer Verbesserung der Luftqualität in Verbindung gebracht werden und Münchner Bürgerinnen und Bürger Bäume in der Stadt sehr schätzen. Stadtbäume können neben einer Vielzahl von Ökosystemdienstleistungen und

sozial- gesellschaftlichen Funktionen auch die Feinstaubkonzentration in Großstädten reduzieren und so den Städten und der Gesundheit der Allgemeinheit zu Gute kommen.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	3
Abstract .....	4
Zusammenfassung.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
A Einleitung .....	11
B Hauptteil.....	13
I. Literaturrecherche.....	13
1. Vorgehen in der Literaturrecherche.....	13
2. Ergebnisse der Literaturrecherche und Diskussion der Ergebnisse .....	14
2.1 Feinstaub Allgemein .....	14
2.1.1 Begriffsdefinition.....	14
2.1.2 Produzenten und Vorkommen .....	19
2.1.3 Schädlichkeit von Feinstaub .....	22
2.1.4 Messung von Feinstaub.....	26
2.1.5 Rechtsgrundlagen bezüglich des Feinstaubes.....	30
2.1.6 Räumliche Variabilität von Feinstaub im Stadtgebiet .....	33
2.1.7 Beziehung von Feinstaub und Stadtklima .....	34
2.2 Stadtbäume als Feinstaubfilter .....	37
2.2.1 Stadtbäume Partikelquellen oder Senken ?.....	37
2.2.2 Der Filtermechanismus von Bäumen .....	38
2.2.2.1 Antransport .....	38
2.2.2.2 Ablagerung .....	40
2.2.2.3 Abtransport .....	42
2.2.3 Faktoren für die Filterleistung von Bäumen.....	44
2.2.3.1 Klimatische Faktoren .....	44
2.2.3.1.1 Partikelkonzentration.....	44
2.2.3.1.2 Windeinwirkung .....	49
2.2.3.1.3 Niederschlagsereignisse .....	52
2.2.3.2 Biotische Faktoren.....	54
2.2.3.2.1 Größe der Blatt/Nadelfläche .....	54
2.2.3.2.2 Feinheit der Blätter und Nadeln.....	59

2.2.3.2.3	Struktur der Blattoberfläche .....	61
2.2.3.2.4	Haardichte .....	65
2.2.3.2.5	Anhaftungseigenschaften von Blattflächen .....	67
2.2.3.2.6	Wachsgehalt .....	71
2.2.3.2.7	Stomata .....	77
2.2.3.2.8	Größe der Stamm und Astfläche .....	80
2.2.3.3	Pflanzenanordnung und Umgebungsbedingungen .....	85
2.2.3.3.1	Pflanzstruktur .....	85
2.2.3.3.2	Bestandesdichte .....	90
2.2.3.3.3	Bebaute Umgebung und ihre Architektur .....	93
2.2.2.3.4	Pflanzvorschlag .....	96
2.2.4	Erfassung der Filterleistung .....	99
2.2.4.1	Theoretische Grundlagen der Partikeldeposition .....	99
2.2.4.2	Erfassungsmethoden .....	103
2.2.4.2.1	Experimentelle Methoden .....	104
2.2.4.2.1.1	Windtunnel Studien .....	104
2.2.4.2.1.2	Chamber Studien .....	105
2.2.4.2.1.3	Modell Studien .....	107
2.2.4.2.2	Feld Methode .....	108
2.2.4.2.2.1	Gravimetrisch- Numerische Studien .....	108
2.2.4.2.2.2	Magnetische Studien .....	112
2.2.4.2.2.3	Konzentrationsbasierte Studien .....	113
2.2.4.2.3	Rechen- und Simulationsbasierte Methode .....	115
2.2.4.2.3.1	Mikrometrologische Studien .....	115
2.2.4.2.3.2	Mathematische Studien .....	117
2.2.4.2.3.3	Hochrechnungs Studien .....	120
2.2.5	Vergleich der unterschiedlichen Erfassungsmethoden .....	122
2.2.5.1	Probleme im Vergleich der unterschiedlichen Methoden .....	122
2.2.5.2	Kenngrößen als Anhaltspunkte .....	124
2.2.5.3	Kompromiss – Gesamtbild .....	124
2.2.6	Vergleich von unterschiedlichen Baumarten .....	128
2.2.6.1	Baumartenspezifische Filterwerte .....	128
2.2.6.2	Präsentation der Ergebnisse .....	129
2.2.6.3	Koniferen .....	142
2.2.6.4	Angiospermen .....	146



2.2.7 Mischung der Baumarten als effiziente Alternative.....	148
II. Messung .....	151
1. Einleitung.....	151
2. Material und Methoden .....	152
2.1 Messaufbau und Durchführung der Messung.....	154
2.2 Auswertung der Daten .....	159
2.3 Einteilung in Windklassen .....	161
2.4 Abschätzung des filternden Kronenvolumens.....	162
3. Ergebnisse.....	165
3.1 Filtereffekt und Standorte .....	165
3.2 Filtereffekt und Windstärke .....	167
3.3 Filtereffekt in Abhängigkeit von Standorten und Windklassen.....	169
3.4 Filtereffekt und Kronenvolumen .....	173
3.5 Filtereffekt nach Feinstaubfraktion .....	174
4. Diskussion .....	175
4.1 Kritische Würdigung des Datenmaterials.....	176
4.2 Gesamtbetrachtung der Filterleistung .....	177
4.3 Filterleistung und Windgeschwindigkeit bei einheitlichem Standort .....	178
4.4 Filterleistung und Kronenvolumen bei einheitlichen Windklassen.....	180
4.5 Filterung und Qualität des gefilterten Feinstaubes.....	181
5. Zusammenfassung.....	181
1. Einleitung.....	183
2. Material und Methoden .....	184
2.1 Entwurf des Fragebogens .....	184
2.2 Durchführung der Befragung.....	187
2.3 Kategorisierung und Auswertung der gewonnenen Daten.....	190
3. Ergebnisse .....	195
4. Diskussion .....	209
5. Zusammenfassung .....	212
C Schluss .....	214
Literaturverzeichnis.....	216
Abbildungsverzeichnis.....	229
Tabellenverzeichnis .....	232
Anhang .....	233
1. Fragebogen.....	233

2. Bilder der Fragen 8, 10, 13 .....	237
3. Selbständigkeitserklärung .....	243

# A Einleitung

Bäume in Städten haben nicht nur ein ästhetisches Erscheinungsbild, sie erfüllen auch eine Vielzahl von Aufgaben und Funktionen, die der Stadt und den darin lebenden Menschen zu Gute kommen.

Dies zeigen viele verschiedene Studien, die sich in den vergangenen Jahrzehnten mit dem Thema Stadtbäume intensiv beschäftigt haben.

Hierbei stellt sich heraus, dass Bäume im städtischen Bereich Ökosystemdienstleistungen, wie: Temperatenausgleich, Erhöhung der Luftfeuchte, Wasserrückhaltung und -Speicherung, Sauerstoff Produktion, Aufnahme- und langfristige Bindung von Kohlenstoffdioxid, sowie Reduktion von Stickstoffoxiden, Reduktion von Schwefeldioxid und Reduktion von bodennahem Ozon, erfüllen (Mc Pearson et al., 1994; Nowak et al. 2013; Janhäll, 2015). Darüber hinaus haben Bäume jedoch auch Funktionen, die von gesellschaftlicher-, sozialer Relevanz sind, so ermöglicht die Pflanzung und Pflege von Bäumen und städtischem Grün, Arbeitsplätze, weiter stellen Grünstreifen mit Bäumen, einen Raum für Erholung- und sportliche Betätigung, sowie für Erziehung und Bildung dar (Körner et al., 2008). Zudem werden mit Erfolg in den USA bereits gezielt öffentliche Stadtbaumprojekte durchgeführt, in denen Bäume gemeinsam gepflanzt und gepflegt werden, um die Nachbarschaft und das gemeinsame Zusammenleben in Stadtgebieten zu stärken (Alliance for Community trees, 2016).

Ein umweltpolitisches Thema, das in den letzten Jahren verstärkt im Fokus des öffentlichen Interesses lag, ist das Thema Feinstaub. So haben deutschlandweit besonders die Großstädte Probleme, die 2005 eingeführten und 2015 verschärften Feinstaubgrenzwerte der EU Richtlinien einzuhalten. In vielen Städten wurden aus diesem Grund bereits Umweltzonen eingerichtet und es wird weiter nach Maßnahmen und Wegen gesucht, die Feinstaubkonzentration in Innenstädten zu reduzieren (Umweltbundesamt, 2008).

Zahlreiche Studien, im Zeitraum der letzten zwanzig Jahre zeigen, dass Stadtbäume neben all den bereits genannten Funktionen, auch in Bezug auf den so

gesundheitsrelevanten Feinstaubgehalt der Luft, eine bedeutende Auswirkung haben können.

Doch wie genau wirken sich Stadtbäume auf die Feinstaubkonzentration der Stadtluft aus ?

Handelt es sich dabei um einen positiven oder negativen Effekt ?

Welches sind die Faktoren die in diesem Prozess eine Rolle spielen ?

Lässt sich diese Auswirkung quantitativ durch Messungen in einer Stadt wie München erfassbar machen ?

Und wie bekannt ist den Münchner Bürgerinnen und Bürgern dieses Phänomen ?

Die vorliegende Bachelorarbeit möchte all diesen Fragen genauer nachgehen.

Hierzu sei nun zuerst ganz allgemein der aktuelle Kenntnisstand der Forschung, im folgenden Rechercheteil der Arbeit, dargelegt. Daran anschließend wird die Durchführung und Auswertung einer Messreihe in München vorgestellt. Im dritten Teil der Arbeit sei dann abrundend eine, im Rahmen dieser Bachelorarbeit, in München durchgeführte, sozial empirische Befragung präsentiert.

# B Hauptteil

## I. Literaturrecherche

### 1. Vorgehen in der Literaturrecherche

In der nun folgenden Literaturrecherche werden verschiedene wissenschaftliche Quellen, die für die Fragestellung dieser Arbeit von Bedeutung sind, zusammengetragen und untereinander verglichen. Die Recherche umfasst zum einen Monographien in gebundener Form, wie Standardwerke, Lehrbücher, Kommissions- und Tagungsberichte, und Dissertationen. Zum anderen finden in dieser Literaturrecherche auch viele digitale Quellen Verwendung. Diese sind wissenschaftliche Artikel aus dem online Angebot verschiedener Verlage für Fachzeitschriften, darüber hinaus Daten, Karten, Abbildungen und Texte aus seriösen und öffentlichen Internetseiten und Enzyklopädien, sowie ausschließlich in digitaler Form zugängliche Veröffentlichungen, wie E-Medien.

Die gewonnene Information in Form von: Monographien, Standardwerke, Lehrbücher, Kommissions- und Tagungsberichte, wurden systematisch in Suchmaschinen gesucht, in digitaler- und ausgedruckter Form gesammelt und durch direkte und indirekte Zitate, sowie durch Abbildungen in die Arbeit eingebaut. Die bei der Recherche verwendeten Internetsuchmaschinen waren für die Suchanfragen nach Artikeln und Aufsätzen in Fachzeitschriften aus dem Internet: „Web of Knowledge“ (Thoms Reuter) und „Google Scholar“ (Google). Für die Aqoise von Fachliteratur in gebundener Form und Dissertationen, wurden die direkt an der Bibliothek der Technischen Universität München integrierten Suchmöglichkeiten: „OPAC“ und „Gateway Bayern“ (Verbundkataloge verschiedener Bibliotheken) angewandt. In diesem Rahmen wurde auch die Option der Bestellung von Büchern aus anderen Bibliotheken als der Universitätsbibliothek Weihenstephan, über Fernleihe, genutzt.

Allgemein ist bezüglich der Literaturrecherche zu erwähnen, dass zum gewünschten Themenfeld: „Beziehungen zwischen Feinstäuben und Bäumen“, sehr wenig deutsche Fachliteratur vorhanden war. Aus diesem Grund wurde für die Erstellung dieser Arbeit überwiegend wissenschaftliche Information aus englischsprachiger Fachliteratur studiert und in den folgenden Themenpunkten eingearbeitet, was die Recherche und

Beschäftigung mit dem gewählten Thema zwar intensiver gestaltete, jedoch die Ergebnisse allgemein anerkannter, verbindlicher und aussagekräftiger werden lässt.

## 2. Ergebnisse der Literaturrecherche und Diskussion der Ergebnisse

### 2.1 Feinstaub Allgemein

#### 2.1.1 Begriffsdefinition

Waren Feinstäube aus natürlichen Quellen und im Zuge der Industrialisierung, auch aus anthropogenen Quellen, schon seit je her in der Atmosphäre der Erde vorhanden, so wurde diese besonders feine Fraktion des Staubes doch erst 1987 im Rahmen der Einführung eines Luftqualitätsstandards in Amerika NAAQS (National Ambient Air Quality-Standard) durch die amerikanische Umweltschutzbehörde EPA (Environmental Protection Agency) erstmals vom Menschen schriftlich in Form einer Definition erfasst. In dieser Definition ist der aerodynamische Durchmesser eines Partikelteilchens von besonderer Bedeutung. Dieser beschreibt den Durchmesser, den eine Kugel der Dichte  $1 \text{ g/cm}^3$  haben müsste, um in einem identischen Luftgemisch die gleiche Sinkgeschwindigkeit aufzuweisen wie der betrachtete Partikel (Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, 2007a). Anders als alle anderen Immissionsmessungen der Luftverschmutzung dieser Zeit und anders als der erste NAAQS von 1971, beschreibt das Übereinkommen von 1987 Feinstaub nicht als Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser zwischen 20 und 50 Mikrometer, die mit Hilfe eines eher willkürlichen Messsystem erfasst wurden und TSP (Total Suspended Particles) genannt wurden, sondern erfasst vielmehr die wesentlich feineren Fraktionen des Feinstaubes mit einem aerodynamischen Durchmesser von 15 Mikrometern und kleiner. Diese Änderung der Beobachtungsgenauigkeit von Stäuben in der Luft ist auf vermehrte wissenschaftliche Studien, im Bereich der gesundheitlichen Auswirkung von Feinstaub, zurückzuführen (Lippmann, 2002). Diese Studien, die zum Teil schon in der Zeit vor dem ersten NAAQS von 1971 veröffentlicht wurden, stellten fest, dass vermehrt die kleinen Partikel des Staubes von den oberen Atemwegen des Menschen aufgenommen werden und, dass

somit speziell die feinen Anteile des Feinstaubes für die Gesundheit des Menschen eine große Gefahr darstellen. Auf Grundlage dieser Forschungsergebnisse, beschloss EPA 1987 die Anwendung eines Messsystems, das den, für die Gesundheit des Menschen bedeutenden Anteil des Feinstaubes stärker erfassen sollte. In diesem Zusammenhang wurden die Messeinrichtungen zur Erfassung von Feinstaub, nun an das Abscheideverhalten der oberen Atemwege des Menschen angepasst. Hierbei wurde auf das Phänomen eingegangen, dass speziell Feinstäube mit einem aerodynamischen Durchmesser feiner als 15 Mikrometer von den oberen Atemwegen des Menschen aufgenommen werden können, dass jedoch auch körpereigene Filter zur Reinigung der eingeatmeten Luft, wie zum Beispiel Nasenharre und Schleimhäute, existieren. Da diese körpereigenen Filter vermehrt die größeren Anteile des eingeatmeten Feinstaubes aussondern, wandten einige Wissenschaftler zur Ermittlung der, für die menschliche Gesundheit besonders gefährlichen Fraktionen des Feinstaubes, die Funktion einer Trennkurve an, in welcher die Partikel je nach ihrem aerodynamischen Durchmesser, zu einem bestimmten Prozentsatz Aufnahme in die Berechnung fanden. Innerhalb eines aerodynamischen Durchmessers bis zu 1 Mikrometer wertet diese Funktion einen Anteil von 100 % der Partikel dieses Bereiches als aufgenommen, wohingegen die Kurve Partikel eines aerodynamischen Durchmessers ab 15 Mikrometer und größer zu einem Anteil von 0 % als aufgenommen einstuft. Bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometer erreicht die Trennkurve ihren Mittelwert, an dem 50 % der Partikel aufgenommen und 50 % der Partikel abgeschieden werden. Von diesem Mittelwert der Trennkurve, an dem der aerodynamische Durchmesser 10 Mikrometer beträgt, leitet sich auch der Name der Klassifizierung PM<sub>10</sub> ab. Technisch gesehen wird die Abscheidefunktion mit Hilfe eines größenselektierenden Lufteinlasses am Messgerät erreicht (BMLFUW, 2014). PM<sub>10</sub> stellt die Masse eben nur dieser Partikel innerhalb eines beliebigen Luftgemisches dar, die unter Anwendung der beschriebenen Trennkurve Einlass in das Messgerät und somit in die nachgebildeten oberen Atemwege finden und deren mittlere Abscheidefunktion bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 Mikrometer liegt. Da PM<sub>10</sub> im Bereich der oberen Atemwege in den menschlichen Körper gelangt, wird diese Fraktion des Staubes auch als thorakaler Schwebestaub, bezeichnet.

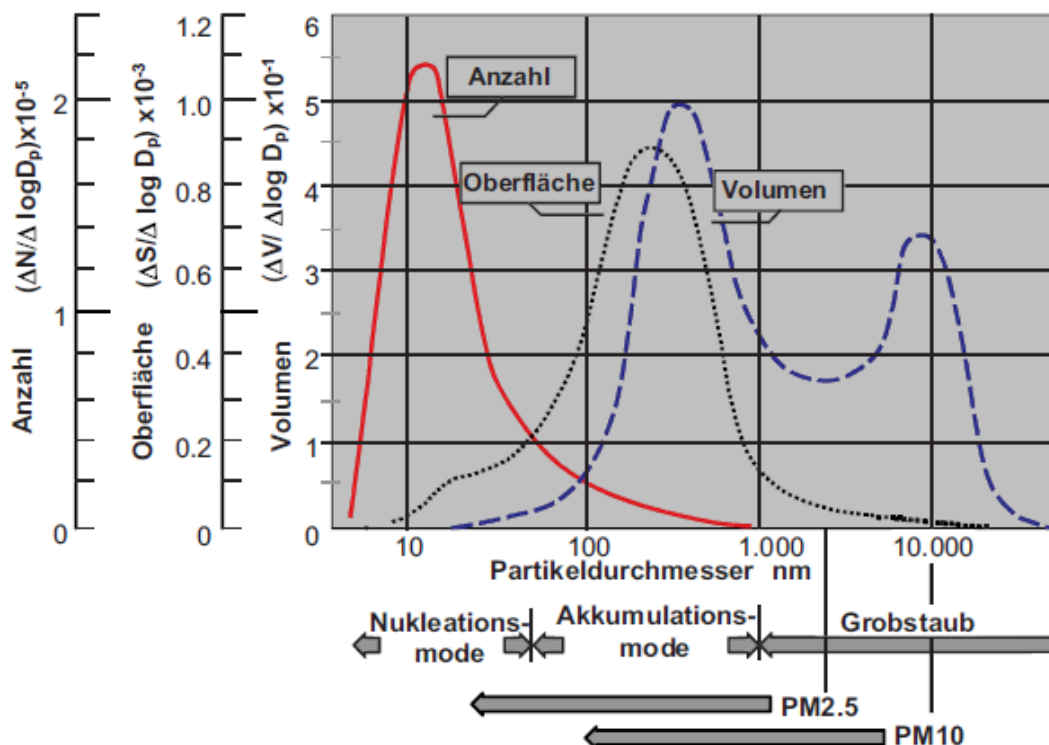
Weitere wissenschaftliche Studien belegten, dass speziell der Bereich der Partikelgröße unter einem aerodynamischen Durchmesser von 3,5 Mikrometer die größte Gefahr für

die menschliche Gesundheit darstellt. Die bereits verwendeten PM 10 Messgeräte jedoch konnten diesen besonders feinen Anteil des PM10 Staubes nur sehr ungenügend erfassen, da die relativ geringe Masse selbst vieler kleiner Partikel unter einem aerodynamischen Durchmesser von 3,5 Mikrometer einen unbeachtlichen Anteil im Verhältnis zu den größeren, und dadurch auch schwereren Partikeln in einem Durchmesserbereich von 3,5 – 15 Mikrometer, ausmachten. Aus diesem Grund beschloss die amerikanische Umweltbehörde die Messgenauigkeit von Schwebestäuben in einer dritten Revision des NAAQS von 1997 zu erweitern. Das zusätzlich zu PM 10 neu angewandte Messsystem PM2,5 sollte dabei auch auf dem Prinzip einer Trennkurve aufbauen. Diese Trennkurve nun sollte den Anteil der Feinstaubpartikel erfassen, welcher nicht nur in der Lage war, durch die oberen Atemwege zu gelangen, sondern auch noch tiefer, bis in die Lungengegend und durch die Lungenbläschen (Alveolen) hindurch, eindringen konnte. Hierbei war die Trennkurve jedoch eine steilere, als im Falle des PM10, da die Alveolen ein anderes Abscheideverhalten aufweisen, als die oberen Atemwege. So wird beispielsweise bei einer Partikelgröße von unter 0,5 Mikrometer ein Anteil von 100 % in die Berechnung mit einbezogen wohingegen bei einem Durchmesser von größer 3, 5 Mikrometern bereits 0 % der Partikel als aufgenommen gelten. Ihren Mittelwert erreicht die Trennkurve von PM2,5 Partikeln bei einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 Mikrometern, nach dem die Klassifikation auch benannt ist, und an welchem 50 % der Partikel als abgeschieden gelten wohingegen 50 % in die Berechnung miteingehen (BMLFUW, 2014). Wurde im Falle des PM10 der Anteil des Staubes erfasst, der in die oberen Atemwege eingeatmet werden kann (thorakaler Staub), so sollte PM2,5 für die Bestimmung des Anteiles eingesetzt werden, der noch weiter in den menschlichen Körper und bis in die Lungenbläschen eindringen kann (alveolengängiger Staub). Im Laufe der Zeit, gelang es Wissenschaftlern dann, eine starke Korrelation zwischen speziell den feinsten Anteilen, des PM 2,5 und der gesundheitlichen Gefahr für den Menschen, herzustellen.

Immer mehr Forschungsberichte beabsichtigten aus diesem Grund statt einer auf die Masse der Teilchen gestützten Messmethode eine rein quantitative Methode vorzuschlagen, bei welcher die Anzahl der Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser nur in einem Bereich unterhalb von 0,1 Mikrometer, erfasst werden sollte. Diese neue Methode der Messung unterhalb eines sehr kleinen Durchmessers, jedoch ohne eine Aufteilung in Größenfraktionen, bot sich auch deshalb an, weil die Massen der

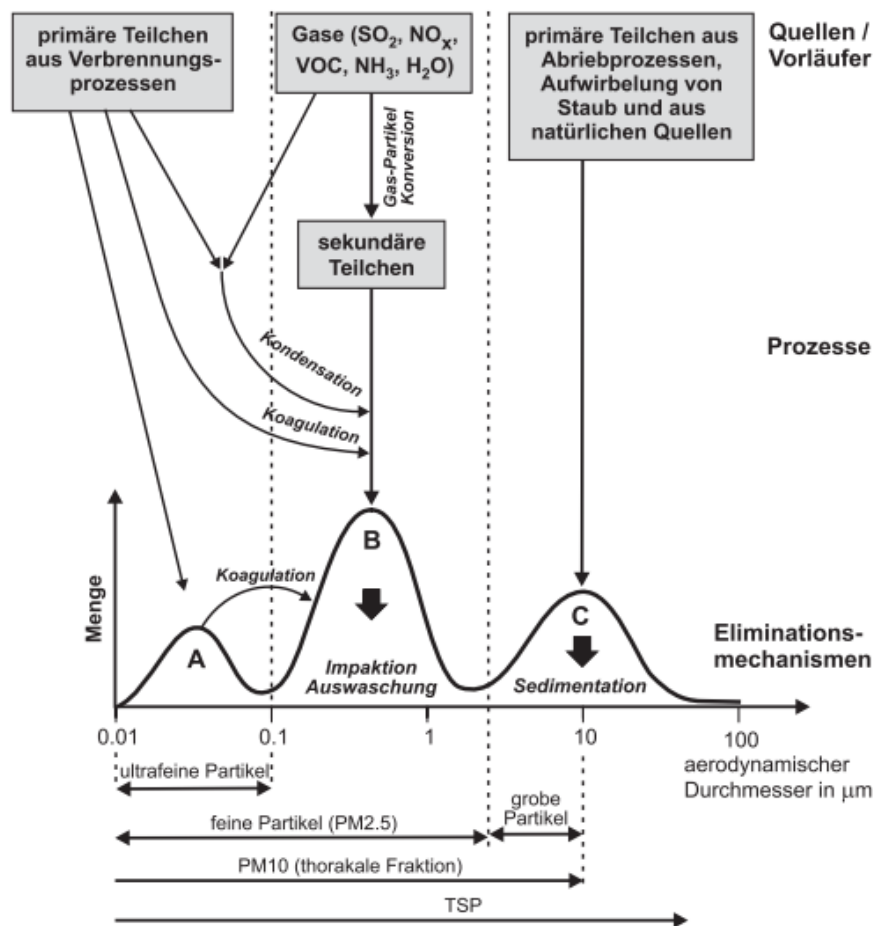


Partikel unter einem aerodynamischen Durchmesser von 0,1 Mikrometern nur mit enorm großen Mengen des Stoffgemisches ermittelt werden konnten. Auch wenn die Einstellungs- und Erfassungsfeinheit der Messgeräte in den meisten Fällen von Messgerät zu Messgerät je nach Hersteller unterschiedlich waren, pendelte sich eine obere Messgrenze von 0,1 Mikrometern ein. Diese bislang feinste Sorte des messbaren Feinstaubes bekam den Namen: Ultrafine Particulates (UFP). Dieser feinste Anteil des Feinstaubes unterteilt sich in einen Anteil von einer aerodynamischen Durchmessergröße bis zu 0,08 Mikrometer (=80 Nanometer), die sogenannte Nukleationsmode (von lateinisch: Nukleus = Kern) und in einen etwas größeren Anteil, der Akkumulationsmode (von lateinisch: accumulare = anreichern) die sich in einem Größenbereich von 0,08 Mikrometern bis 1 Mikrometer befindet und sich damit bereits über die Definitionsgrenze der UFP hinausbewegt (Bruckmann et al., 2010). Während die Anzahl der Feinstaubpartikel im Bereich der Nukleationsmode enorm hoch ist, nimmt diese mit steigendem Partikeldurchmesser ab, wohingegen das Volumen und die damit korrelierende Masse mit steigendem Durchmesser zunehmen (Abb. 1).



**Abbildung 1. Begriffsdefinition Feinstaub**  
(Gemeinschafts-Arbeitsausschuss: Feinstäube; 2010)

Neben den primären Partikeln, die meist bei Verbrennungs- und Abriebvorgängen, aus natürlichen- oder anthropogenen Quellen stammen, gibt es auch sekundäre Partikel, die aus Kondensation von unterschiedlichen primären Partikeln oder auch durch Reaktionsmechanismen bei der Agglomeration von Gasen (Vorläufergasen), gebildet werden. Solche Vorläufergase können: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O und VOC (Volatile Organic Compounds) sein. Abbildung 2 bietet so einen Überblick möglicher Entstehungswege von Feinstaubpartikeln, wobei die besonders häufig auftretenden feinsten Partikel (Nukleationsmode) eine bedeutende Rolle spielen, da sie sich durch Koagulations- und Kondensationsmechanismen, zu größeren Partikeln verbinden können (Akkumulationsmode).



**Abbildung 2. Entstehungswege des Feinstaubes**

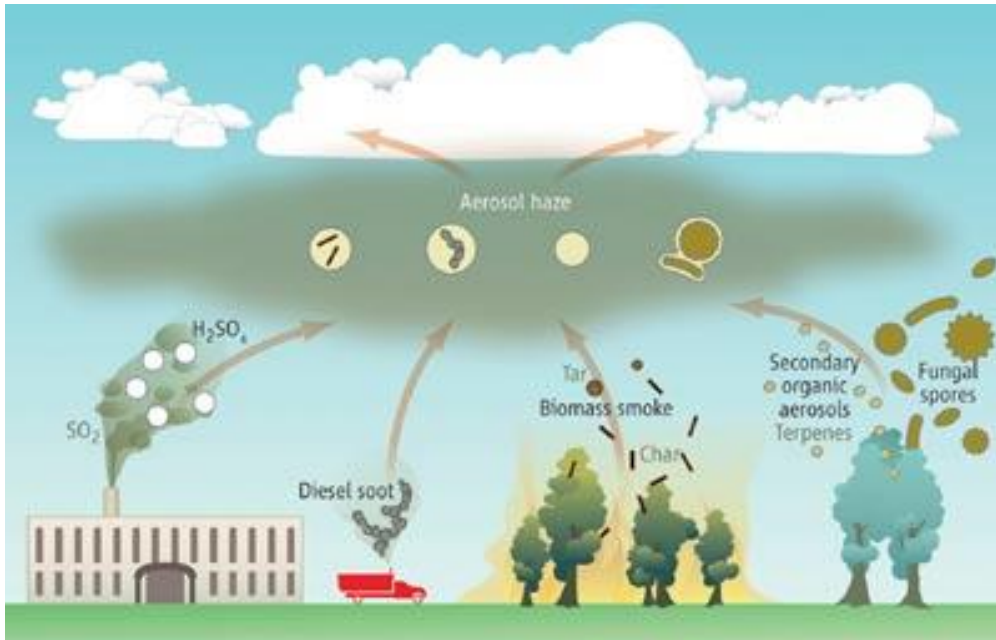
(Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, 2007b)

## 2.1.2 Produzenten und Vorkommen

„Without sources there would be no emissions, and without emissions there would be no pollution“, mit diesen Worten beschreibt Oke in seinem Standardwerk über das Klima in Städten: “The Boundary Layer Climates“, den Zusammenhang von Verschmutzungsquellen und Luftverunreinigungen (Oke, 1987).

Feinstaub-Verunreinigungen der Luft können zum einen aus natürlichen Quellen und zum anderen aus vom Menschen verursachten – anthropogenen - Quellen kommen. Im Bereich der natürlichen Quellen können Feinstäube durch: Vulkanausbrüche, Winderosionen, Wald- und Buschbränden, Aufwirbelung von Salzen aus den Meeren, Pollen und Teilchenproduktion von Pflanzen und anderen Lebewesen, sowie sekundär, aus flüchtigen organischen Verbindungen von Vegetation (sogenannten Volatile Organic Compounds VOC`s), entstehen.

Vom Menschen verursachte Feinstaub Quellen sind hingegen: Verkehr, Kraft- und Heizanlagen, Abfallverbrennungen, Schüttumschläge, industrielle Prozesse, wie Metall- und Stahlerzeugung und deren Verarbeitung, Erdenindustrie, Landwirtschaft, sowie die Tierhaltung, die durch große Mengen gasförmiger Ausstöße (wie beispielsweise Ammoniak), eine bedeutende Quelle von sekundär gebildeten Feinstäuben ist (UBA, 2015). Abbildung 3 gibt einen Überblick einiger dieser Feinstaubquellen.



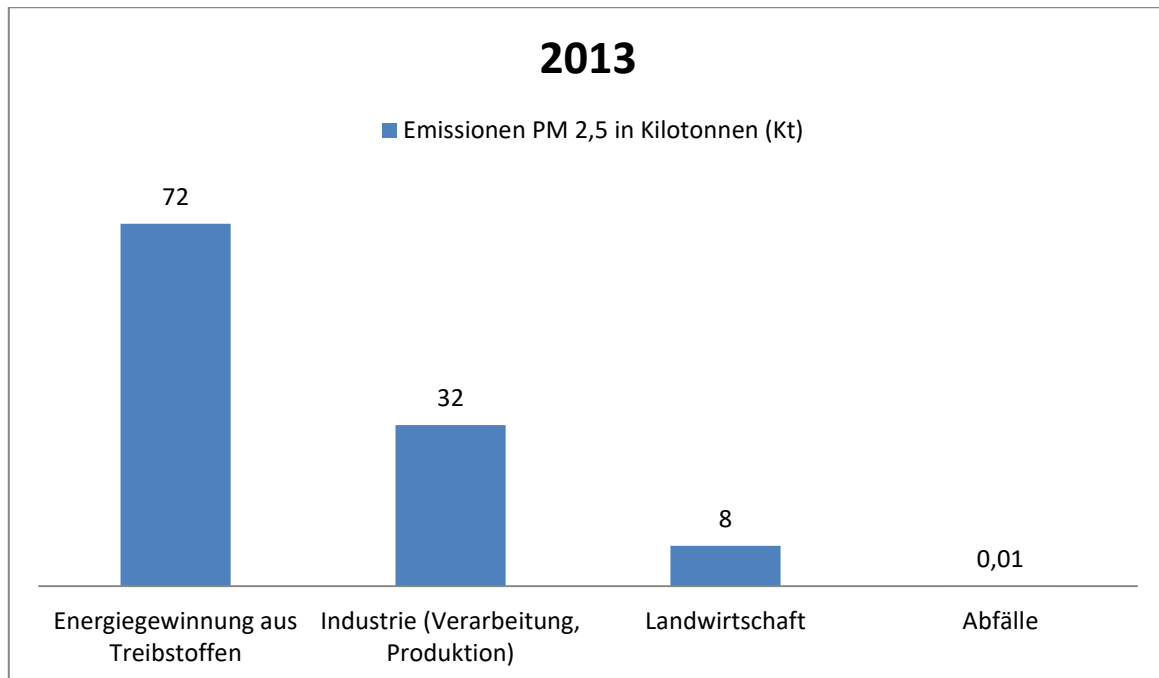
**Abbildung 3. Einige Feinstaubquellen im Überblick**  
(Huey et al., 2009)

Bezüglich der Unterscheidung von natürlichen und anthropogenen Feinstaubquellen ist weiter auch die Beschaffenheit und Zusammensetzung, der ausgestoßenen Partikel zu nennen. So bestehen anthropogene Feinstaubpartikel im Allgemeinen aus wesentlich toxischeren Inhaltsstoffen als Feinstäube aus natürlichen Quellen. Zudem sind die vom Menschen verursachten Feinstäube meist deutlich feiner als Partikel, die in der Natur auftreten (Beckett et al., 1998). Abbildung 4 verdeutlicht die unterschiedlichen Partikelgrößen von natürlich und anthropogen freigesetztem Feinstaub.

Quelle		Partikelgröße
Natürliche Quellen	Bodenerosion	1 – 150 µm
	Sandstürme	1 – 150 µm
	Vulkanasche	0,005 – 150 µm
	Maritimes Aerosol (Meersalz)	1 – 20 µm
	Asche aus Waldbränden	0,005 – 30 µm
	Biogene Stäube (Pollen, Schimmelpilzsporen, Milbenexkreme)	2 – 50 µm
Anthropogene Quellen	Stationäre Verbrennung (Heizung, Energieerzeugung)	0,005 – 2,5 µm
	Mobile Verbrennung (Verkehr)	0,005 – 2,5 µm
	Verhüttung	0,1 – 30 µm
	Industrielle Prozesse (Metallverarbeitung)	0,005 – 2,5 µm
	Schüttgutumschlag	10 – 150 µm
	Zigarettenrauch	0,02 – 10 µm

**Abbildung 4. Partikelgröße des natürlichen und anthropogenen Feinstaubes** (Valet, 2005)

In Deutschland setzten sich wichtige anthropogen verursachte Anteile des PM 2,5 Feinstaubes für das Jahr 2013, wie in Abbildung 5 beschrieben zusammen.

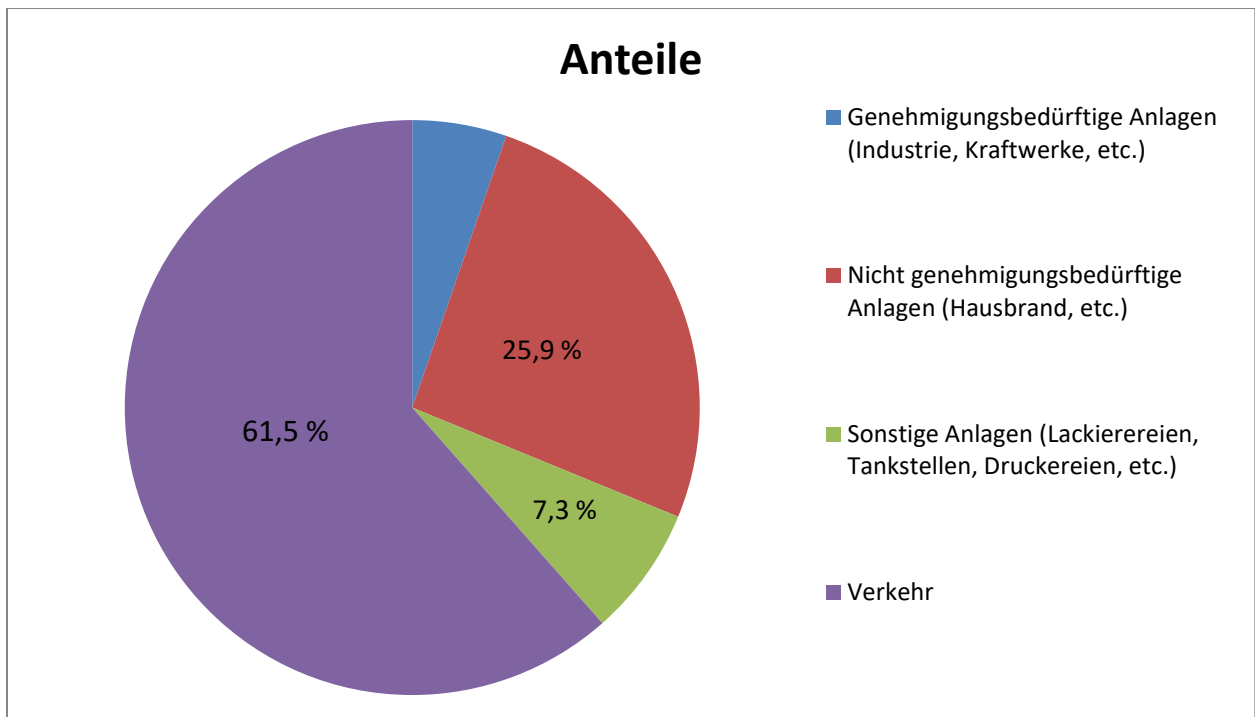


**Abbildung 5. Wichtige PM 2,5 Emissionen 2013 in Deutschland aufgeteilt nach Verursachern**

(Auf Datengrundlage von: Umweltbundesamt, 2015)

Hierbei ist zu erwähnen, dass die im Bereich „Energiegewinnung aus Treibstoffen“ größtenteils aus: Energieindustrie (10 Kt), häuslichem Verbrauch (33 Kt) und Transport (25 Kt), besteht (Umweltbundesamt, 2015).

Für die entsprechende Situation in einer Großstadt wie München, ist der Anteil des, durch Transport- und Verkehr verursachten Feinstaubes, noch stärker ausgeprägt. So zeigt eine, in Abbildung 6, illustrierte Zusammenstellung der Feinstaubquellen in München, deutlich, dass der Verkehr der größte Feinstaubproduzent in München ist. Hierbei stammt der vom Verkehr produzierte Feinstaub, zum einen aus den Abgasen der Verkehrsmittel, zum anderen aus Abriebprozessen während der Fahrt und aus Aufwirbelungen (Maier, 2007). Wichmann beschreibt weiter, dass speziell die Dieselabgase in diesem verkehrsbedingten Anteil des Feinstaubes eine entscheidende Rolle spielen (Wichmann, 2011, Internetveröffentlichung).



**Abbildung 6. Feinstaubquellen für München**

(Referat für Gesundheit und Umwelt München, 2015)

### 2.1.3 Schädlichkeit von Feinstaub

Der Grund, weshalb Feinstaub in den letzten Jahren zu einem sehr bedeutenden Thema in der Medizin, der Umweltpolitik und innerhalb der gesamten Gesellschaft geworden ist, ist seine Auswirkung auf den Menschen. Einer der, für den menschlichen Körper elementarsten Vorgänge, ist die Atmung. Kein Mensch kann sich diesem überlebenswichtigen Mechanismus und dem dadurch aufgenommenen Medium Luft, mit den darin enthaltenen Stoffen, entziehen.

Die Auswirkungen von Feinstaub auf den menschlichen Körper werden bereits seit einigen Jahrzehnten in den verschiedensten Studien untersucht. So berichten zahlreiche epidemiologische Studien, wie auch experimentelle Befunde, über Zusammenhänge zwischen erhöhten Feinstaubkonzentrationen in der Luft und gesundheitlichen Folgen für den menschlichen Organismus (Maier, 2007). Diese Auswirkungen lassen sich

sowohl in Kurzzeiteffekte, als auch in Langzeiteffekte, unterteilen. Hierbei verursachen die Kurzzeiteffekte überwiegend reversible- und Langzeiteffekte meist irreversible negative Veränderungen und Schäden (Wolf-Benning, 2007).

So berichten Anderson et al. für die Kurzzeiteffekte einen deutlichen Zusammenhang zwischen Krankenhausaufenthalten und Feinstaubgehalt (Anderson et al., 2001), sowie Peters et al. über Zusammenhänge von Symptomen im Atemtrakt und Feinstaub (Peters et al., 1997). Weiter stellen Peters et al. einen zeitlich sehr hochaufgelöste Korrelation zwischen Feinstaubwerten und ansteigender Herzfrequenz dar (Peters et al., 2015).

Für die Langzeiteffekte erkennen Dockery et al. 1993 in einer groß angelegten Studie über einen Zeitraum von 16 Jahren, einen Zusammenhang zwischen Feinstaubexposition und Mortalität (Dockery et al., 1993). Darüber hinaus betont die Europäische Gesellschaft für Kardiologie (European society of cardiology) in einer aktuellen Stellungnahme, dass der Zusammenhang zwischen Feinstaubaufnahme und Herz-Kreislauf-Erkrankungen, als wissenschaftlich gesichert gilt und fordert die Politik dazu auf, die Gesundheit der Bevölkerung durch angemessene Gesetzgebung, zu schützen (European society of cardiology, 2015).

Weiter zeigen Pope und Dockery in ihrer umfangreichen Literaturrecherche auf, dass Feinstaubexposition zu einer Vielzahl von Erkrankungsmustern im gesamten physiologischen Kreislauf des Menschen führen kann. So zeigt ihre Recherche, dass Feinstaubbelastung, neben Erkrankungen der Lunge, auch die Qualität des Blutes und die Sauerstoffversorgung des Gehirns beeinträchtigen, sowie die Herzleistung herabsetzen und das Immunsystem schwächen kann (Pope und Dockery, 2006).

Die meisten Studien zeigen weiter, dass besonders Risikogruppen von den negativen gesundheitlichen Auswirkungen von Feinstaub betroffen sind. Zu den sogenannten Risikogruppen zählen: Kinder, ältere Menschen, sowie durch Krankheit geschwächte Bevölkerungsgruppen.

Eine Übersicht von kurzzeitigen und langzeitigen Effekten bietet Tabelle 1.

**Tabelle 1. Gesundheitliche Auswirkungen in Zusammenhang mit Feinstaub**

(In Anlehnung an WHO, 2004)

<b>Kurzzeiteffekte</b>	<b>Langzeiteffekte</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Hustenreize</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Symptome im unteren Atemtrakt</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Atemnot</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reduzierte Lungenfunktion</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Kreislauf Probleme</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Chronische Bronchitis</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Entzündungen der Lunge</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Reduziertes Immunsystem</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Vermehrte Krankenhausaufenthalte</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Herz- Kreislauf Erkrankungen</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Erhöhte Medikamenteneinnahme</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lungenkrebs, Todesfälle</li></ul>

Während für das Entstehen von Kurzzeiteffekten sehr hohe Feinstaubkonzentrationen von Nöten sind, so treten Langzeiteffekte im menschlichen Körper bereits bei niedrigen Dosen, die über einen langen Zeitraum aufgenommen werden, auf (Pope und Dockery, 2006) (Maier, 2007).

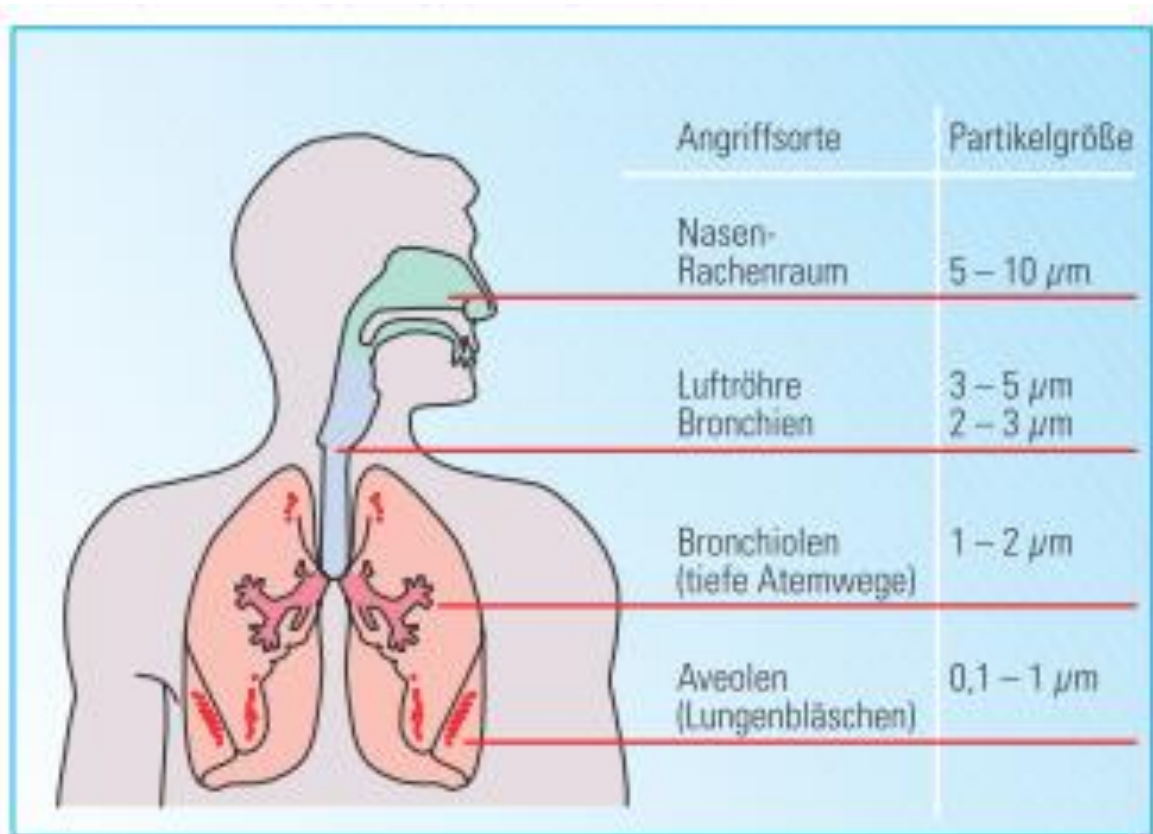
Ein wesentlicher Faktor für die gesundheitliche Auswirkung ist neben der Dauer der Feinstaub Exposition, auch die Partikelgröße.

Weisen Lipfert und Wyzga darauf hin, dass die gesundheitliche Gefahr des Grobstaubes in vielen epidemiologische Studien aufgrund von Messungenauigkeiten unterschätzt werden würde (Lipfert und Wyzga, 1995), zeigen doch die meisten Untersuchungen, dass die gesundheitliche Gefahr der Staubpartikel mit sinkendem aerodynamischen Durchmesser stetig steigt.

So ist beispielsweise die Risiko Zunahme pro 10 mg/m<sup>3</sup> für die größere Feinstaubfraktion PM 10, mit 0,6 % Zunahmewahrscheinlichkeit an Mortalität und 0,9 % Zunahme an Herz-Lungen Erkrankungen (WHO, 2004) deutlich geringer, als die Risiko Zunahme pro 10 mg/m<sup>3</sup> der feinen Fraktion PM 2,5, die für die Mortalität Werte von 6,2 % und für Herz-Lungen Erkrankungen einen Wert von 9,3 %, ergibt (Pope et al., 2002).

Die Tatsache, dass kleine Partikel schädlicher sind, ist zum einen darauf zurück zu führen, dass Partikel mit kleineren Durchmessern tiefer in den Atemtrakt und die Lunge aufgenommen werden können (Siehe Grafik 7).





**Abbildung 7. Größenselektierter Einlass von Partikeln in den Atemtrakt des Menschen**

(Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2010)

Zum anderen führen viele Autoren diesen Zusammenhang auch auf das erhöhte Oberflächen/Volumen Verhältnis bei kleinen Partikeln zurück. Dieses Verhältnis führt dazu, dass feine Partikel, im Vergleich zu gröberen Partikeln, eine bedeutend größere Kontaktfläche mit der Umgebung, und damit eine erhöhte Reaktionsfähigkeit, im menschlichen Körper aufweisen (Siehe Tabelle 2.)

**Tabelle 2. Exponentiell steigende Partikeloberfläche und Partikelanzahl bei sinkendem Partikeldurchmesser**

(Maier, 2007, S. 85)

<b>Partikel- Durchm (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Anzahl pro 10 <math>\mu\text{g}</math></b>	<b>Partikeloberfläche pro 10 <math>\mu\text{g}</math> (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>
2.5	1	15
1.0	19	60
0.1	19100	600
0.01	19 200 000	12 064

## 2.1.4 Messung von Feinstaub

In Deutschland ist das Messnetz zur Erfassung der Luftqualität in die zwei Bereiche: Bund und Länder, unterteilt. Die Messstandorte des Umweltbundesamtes umfassen derzeit sieben Stationen und dienen der Überprüfung der Einhaltung der EU Grenzwerte (UBA, 2016). Die Messstationen der Bundesländer werden von den jeweils zuständigen Behörden betrieben und zeichnen im Gegensatz zu den bundesweiten Messwerten auch die Luftqualität an stark verschmutzten städtischen Gebieten auf. Bayern hat derzeit 50 Messstationen, von denen jedoch nur fünf Stationen den Feinstaubgehalt der Luft über einen längeren Zeitraum (von sechs Jahren), aufzeichnen (2 x München, 2 x Augsburg, 1 x Nürnberg) (Bay. Landesamt für Umwelt, 2015). Abbildung 8 zeigt hingegen alle aktuellen Messstationen des Lufthygienisches Landesüberwachungssystem Bayern (LÜB).



**Abbildung 8. Übersicht der LÜB Messstationen**

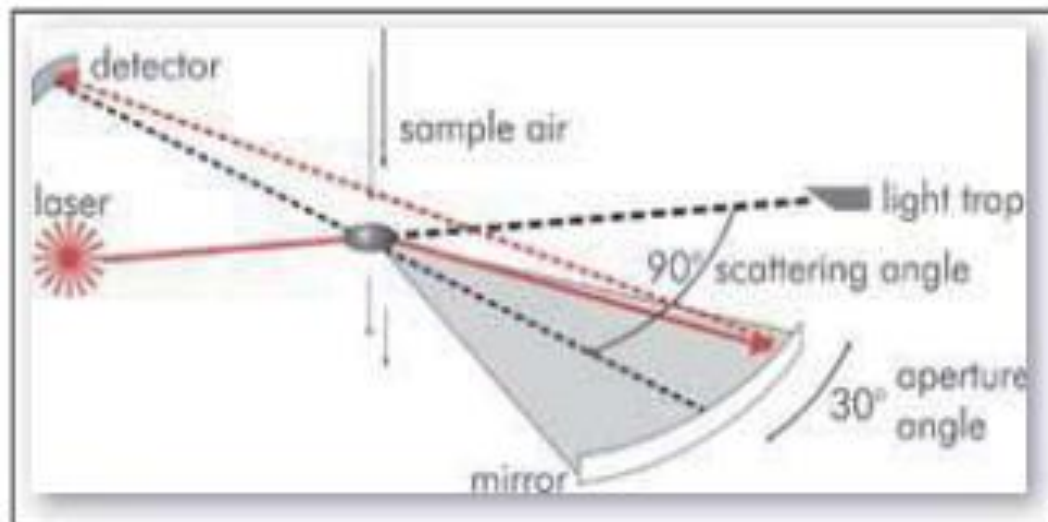
(Bay. Landesamt für Umwelt, 2015)

Zur Erfassung von Feinstäuben gibt es verschiedene Methoden. Eine der grundlegendsten Messmethode ist ein Verfahren, in denen die Partikel zuerst durch verschiedene mechanische Verfahren gefiltert werden und anschließend die Partikelmasse nach Größenfraktionen gravimetrisch ermittelt wird. Weitere Methoden

beruhen auf elektrostatischen Messprinzipien, sowie auf Streulichtphotometrie. Zudem treten Erfassungsmethoden mit Hilfe von Laserstrahlpartikelzählung und durch Kondensationspartikelzähler auf (Maier, 2007).

Für die, im zweiten Teil dieser Arbeit durchgeführten Messungen, sind die Laserpartikelzählung und die Kondensationspartikelzählung von Bedeutung, weshalb im Folgenden kurz auf diese beiden Erfassungsmethoden von Feinstäuben eingegangen werden soll.

Im Messprinzip der Laserpartikelzählung, werden Feinstäube aus der Außenluft durch einen Grobfilter angezogen und ihre Partikelanzahl pro Luftvolumen im Gerät erfasst. (Siehe Abb. 9)



**Abbildung 9. Messprinzip der Laserpartikelzählung**

(Grimm Aerosol Technik GmbH, 2008)

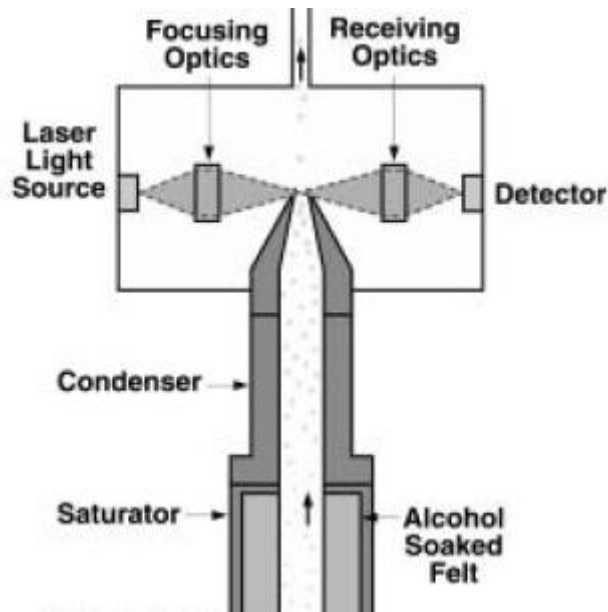
In diesem Mechanismus beleuchtet ein Laser-Lichtstrahl die im Luftstrom vorbeifließenden Partikel. Der Lichtstrahl des Lasers wird durch den Kontakt mit dem Partikel abgelenkt und von einem eingebauten Spiegel zu einem Detektor umgeleitet. Die Laserimpulse an dem Detektor sind hierbei je nach Größe des beleuchteten Partikels verschieden stark ausgeprägt. Der Detektor kann so die unterschiedlichen Signale verschiedenen Größenfraktionen des Feinstaubes zuordnen (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>; PM<sub>1</sub>). Alle

sechs Sekunden wandelt das Gerät automatisch die vom Detektor ermittelten größenspezifischen Partikelanzahlen in Massenwerte um, sodass das Gerät in einer Feinauflösung von sechs Sekunden die Partikelmasse von PM 10, PM 2,5 und PM 1 pro 1 m<sup>3</sup> Luft erfassen kann. Das Gerät kann Partikel in einem Durchmesserbereich von 0,25µm – 32 µm, erfassen (Grimm Aerosol Technik GmbH, 2008).

Das Prinzip der Kondensationspartikelzählung beruht auf einem ähnlichen Mechanismus. Auch in diesem Verfahren werden Feinstäube aus der Umgebungsluft angezogen und durch grobe Filter verfeinert. Anders als in der Laserpartikelzählung ist das Messergebnis bei der Kondensationspartikelzählung keine Massenangabe von einzelnen Feinstaubfraktionen pro 1 m<sup>3</sup> Luft, sondern eine Teilchenanzahl, der im betrachteten Luftvolumen enthaltenen einzelnen Partikel.

Die Ermittlung der Teilchenzahl wird in diesem Verfahren durch eine Kernkondensation der Partikel mit anschließender Streulichtmessung, erreicht.

Hierbei werden die einzelnen Partikel, um besonders die feinen Fraktionen sichtbar zu machen, in isopropanolhaltiger Luft erhitzt und hernach schnell abgekühlt, sodass eine Kernkondensation entsteht, die Partikeldurchmesser ansteigen und auf diese Weise auch die besonders feinen Partikel in der Streulichtmessung ihrer Teilchenanzahl nach, erfasst werden können (Abbildung 10). Die vom Detektor erfasste Anzahl von Partikelteilchen erscheint pro Sekunde neu auf dem Display. Das Gerät kann die Anzahl von Partikelteilchen in einem Durchmesserbereich von 0,01 µm bis zu ca. 1 µm, ermittelten (TSI Incorporated, 2002).



**Abbildung 10. Auszug des Messaufbaues der Kondensationspartikelzählung**

(TSI Incorporated, 2002, Internetveröffentlichung „CPC Model 3007“)

## 2.1.5 Rechtsgrundlagen bezüglich des Feinstaubes

Der erste in Europa durchgesetzte Grenzwert für den Feinstaubgehalt der Luft, erfolgte in der EU Richtlinie 1999/30/EG. In diesem, für alle Mitgliedstaaten der Europäischen Gemeinschaft verbindlichen Dokument wird ein maximaler Tagesgrenzwert (24-Stunden Mittel) für PM 10, von  $50 \text{ mg/m}^3$  und ein maximaler Jahresgrenzwert (Mittel des Kalenderjahres) für PM 10, von  $40 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ , erlassen (EU Richtlinie 1999/30/EG, Artikel 5). Der Tagesgrenzwert darf hierbei 35 mal pro Jahr überschritten werden, wohingegen der leichter einzuhaltende Jahresgrenzwert von  $40 \text{ }\mu\text{g/m}^3$  nicht überschritten werden darf. Weiter bestätigt diese Richtlinie die Bestimmungen, die bereits in einer früheren Richtlinie von 1996 erlassen wurden und die besagen, dass Mitgliedstaaten in besonders belasteten Gebieten sogenannte Maßnahmenpläne zur Verbesserung der Luft in diesen Gebieten, aufzustellen haben (EU Richtlinie 1996/62/EG, Artikel 8). Beinhaltet die Richtlinie 1999/30/EG noch keinen verbindlichen Grenzwert für die Feinstaubfraktion PM 2,5, so legt die Richtlinie doch bereits fest, dass Mitgliedsstaaten verpflichtet sind die PM 2,5

Feinstaubkonzentrationen zu erfassen und diese Ergebnisse der Kommission zu übermitteln (EU Richtlinie 1996/62/EG, Artikel 5).

Um das Europäische Recht in nationales Recht zu überführen, erfolgte 2002 eine Novellierung des 22. Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG), der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) und der Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Hierbei ist die BImSchV, eine Rechtsverordnung zur Durchführung des BImSchG. Sie enthält Grenzwerte und regelt die Umsetzung des BImSchG in der Praxis (Wolf-Benning, 2006). Bei der TA Luft handelt es sich um eine Verwaltungsvorschrift, die unter anderem den Umgang mit genehmigungspflichtigen Anlagen, regelt.

Mit der EU Richtlinie 2008/50/EG, die 2008 erlassen wurde, kam zu dem bisherigen Grenzwert für PM 10 Partikel nun auch ein Grenzwert für PM 2,5 Partikel hinzu, der dazu beitragen soll, die städtischen Hintergrundbelastung an PM 2,5 Partikeln, zu reduzieren (Umweltbundesamt Österreich, 2016). Diese Vereinbarung der Europäischen Gemeinschaft sieht für alle Mitgliedsstaaten zum einen, einen maximalen PM 2,5 Zielwert (im Jahresmittel), von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für das Jahr 2010, sowie ein nationales Ziel für die Reduktion der PM 2,5 Feinstaubexposition bis 2020 vor, zum anderen jedoch auch eine Verpflichtung für den Dreijahresmittelwert der Jahre 2013 – 2015, von  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM 2,5; sowie einen maximalen Jahresgrenzwert von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM 2,5, der ab 2015 allgemein Gültigkeit hat (EU Richtlinie 2008/50/EG, Anhang XIV).

Die erwähnte Reduktion der Feinstaubexposition mit dem zeitlichen Ziel bis 2020, richtet sich hierbei, nach dem jeweiligen Verschmutzungsgrad der einzelnen Mitgliedsstaaten, der durch einen sogenannten „Indikator für die durchschnittliche Exposition“ (AEI), in einem Dreijahresmittel (mit den Stichjahr 2008 - 2010) ermittelt wird. Zur Errechnung des Reduktionszieles der Feinstaubexposition dienen die in Tabelle 3., dargestellten Stufeneinteilungen. Für Deutschland ergab sich 2010 ein Dreijahresmittelwert (2008 - 2010, von  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , weshalb Deutschland seinen Feinstaubgehalt bis 2020 mindestens um 15 % reduzieren muss (Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz, 2016).

**Tabelle 3. Reduktionsziele der Feinstaubexposition für 2020,  
in Abhängigkeit des Dreijahresmittels 2008-2010**

(EU Richtlinie 2008/50/EG)

Nationales Ziel für die Reduzierung der Exposition

Ziel für die Reduzierung der Exposition gegenüber dem AEI 2010		Jahr, in dem das Ziel für die Reduzierung der Exposition erreicht werden sollte
Ausgangskonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reduktionsziel in Prozent	2020
< 8,5 = 8,5	0 %	
> 8,5 — < 13	10 %	
= 13 — < 18	15 %	
= 18 — < 22	20 %	
$\leq 22$	Alle angemessenen Maßnahmen, um das Ziel von $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erreichen	

Die Kommission möchte weiter prüfen ob es möglich ist, eine Reduzierung des einzigen langfristig bindenden Grenzwertes für PM 2,5 (Jahresmittelgrenzwert) von  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab 2015, auf  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ab 2020 durchzuführen (EU Richtlinie 2008/50/EG, Anhang XIV).

Die EU Richtlinie 2008/50/EG wurde 2010 im 39. BfSchG und in der 39. BfSchV, in nationales Recht überführt. Somit gilt nun neben den, aus Richtlinie 1999/30/EG übernommen beiden PM 10 Grenzwerten auch ein Jahresmittelgrenzwert von derzeit  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PM 2,5.

Stellt die neue EU Richtlinie von 2008, zwar eine Verbesserung der Situation, im Vergleich zu den Jahren davor dar, so orientiert sich dennoch auch dieses Übereinkommen an einem Messprinzip (Partikelmasse / Luftvolumen), das nach den Ergebnissen vieler verschiedener Studien, nur ungenügend dafür geeignet ist, die größte vom Feinstaub ausgehende Gefahr für die menschliche Gesundheit - seine Partikeloberfläche und seine Partikelanzahl - zu erfassen. Aus diesem Grund wird in der aktuellen wissenschaftlichen Fachliteratur immer wieder die Stimme laut, die Messverfahren, die derzeit in der Gesetzgebung festgelegt sind, zu erneuern (Gabrio,



2007). So warnt zum Beispiel auch einer der führenden Inhalationsbiologen Joachim Heyder in einem Zeitungsinterview davor, dass „Milliardeninvestitionen in die Luftreinhaltung, das gesundheitspolitische Ziel weitgehend verfehlen könnten, weil man die falschen Parameter misst. Sind nämlich die ultrafeinen Partikel die Hauptgefahr, dann brauchen wir völlig andere Grenzwerte“ (Heyder; 2005).

## 2.1.6 Räumliche Variabilität von Feinstaub im Stadtgebiet

Unterschiedliche Standorte in Städten (Straßen, Plätze, Parks) weisen eine unterschiedliche Feinstaubbelastung auf. Hierbei treten allgemein höhere Werte an den Standorten auf, die sich in direkter Nähe zu Feinstaubquellen, wie beispielsweise Straßen, Industriegebieten und Verbrennungsanlagen, befinden (Oke, 1987). So zeigt beispielsweise eine Untersuchung zur Effektivität der Umweltzone in München, die Wichmann 2007 bis 2009 durchführte, dass die gemessenen Feinstaubkonzentrationen direkt an dicht befahrenen Straßen der Innenstadt, wie der Prinzregentenstraße oder der Landshutheralle, höher sind als Messungen mit einer gewissen Distanz zu direkten Feinstaubquellen, in Johanneskirchen, das von dicht befahrenen Straßen entfernt, den städtischen Hintergrundwert des Feinstaubes, repräsentiert (Wichmann; 2009). Doch nicht nur die Quantität des auftretenden Feinstaubes, sondern auch seine Qualität sind bei der Betrachtung, des innerhalb der Stadt auftretenden Feinstaubes, zu berücksichtigen. Wie Oke in seinem bereits zitierten Standardwerk für das städtische Klima: „Boundary Layer Climates“ beschreibt, ist das Auftreten des Feinstaubes zum einen von der Distanz zur jeweiligen Quelle, zum anderen von der Größe der Feinstaubpartikel abhängig. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser größer 10 Mikrometer treten so nur innerhalb der näheren Umgebung, der Feinstaubquellen auf, wohingegen Partikel im Größenbereich kleiner 10 Mikrometer nicht ausschließlich in der Nähe der Quellen, sondern auch in größerer Entfernung zu diesen vorhanden sein können. Als in dieser Hinsicht räumlich ungebunden, beschreibt Oke im Besonderen die Partikel des Durchmesserbereiches  $< 1$  Mikrometer, die in einem sehr großflächigen Umkreis um die jeweilige Feinstaubquelle auftreten können und somit im gesamten Stadtgebiet unabhängig vom Standort der verursachenden Quelle, angetroffen werden können. Dies führt Oke darauf zurück, dass Partikel mit einem größeren Durchmesser

eine größere Masse aufweisen, damit schwerer sind und sich nicht so leicht räumlich in der Luft ausbreiten können wie feinere Partikel mit kleineren Durchmessern, die bessere Flugeigenschaften haben (Oke, 1987). In ihrem Absinkverhalten bei trockenen Luftbedingungen, können Partikel, die größer als 10 Mikrometer sind, nur einige Minuten in der Luft schweben, bevor sie in der näheren Umgebung der Quelle durch Gravitation auf dem Boden abgelagert werden.

Während ihrer Flugphase können sie nur von Winden beeinflusst werden, wohingegen die Fraktion  $<10$  Mikrometer, bereits von leichten Luftturbulenzen und von Thermik stark in ihrem Absinkverhalten beeinflusst wird und schon durch feine Luftdynamik am Absinkvorgang gehindert werden kann. Die Partikelfraktion  $< 1$  Mikrometer schließlich weist so günstige Flugeigenschaften auf, dass sie bis zu einigen Tagen, Wochen und Monaten, in der Luft schweben kann und bei fehlender Luftturbulenz sogar dichte Dunstwolken produziert (Oke, 1987).

## 2.1.7 Beziehung von Feinstaub und Stadtklima

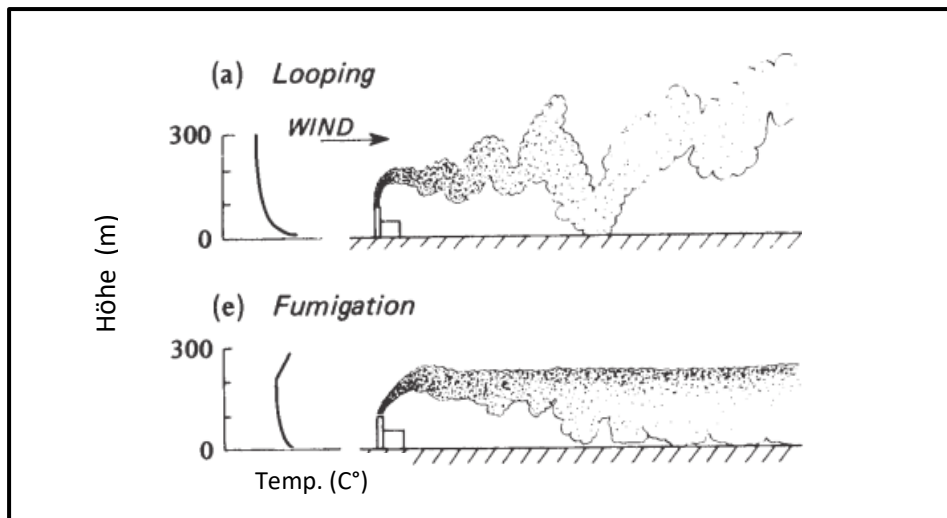
Ein weiterer Aspekt für das Auftreten von Luftverschmutzung in Städten ist neben der Größe der Partikel auch das Klima der Stadt.

Hierbei ist zunächst der Zusammenhang von Temperatur und Feinstaubkonzentration zu erwähnen. So berichten Beckett et al. davon, dass 12 % der Probleme mit Luftverschmutzungen in Städten, durch stark erhöhte Lufttemperaturen in Städten verursacht werden (Beckett et al, 1998). Nowak et al. führen dies darauf zurück, dass die Aktivität und Reaktionsfähigkeit von gasförmigen Partikelvorläufern, wie VOC's bei höheren Temperaturen entsprechend zunehmen (Nowak et al., 1997). Darüber hinaus können auch Luftaustauschprozesse innerhalb der Stadt, den Feinstaubgehalt und sein Auftreten im städtischen Bereich steuern. Hierbei spielen auch Windschneisen (stetige Luftströmungswege, die den Luftaustausch zwischen Stadt und Umland sicherstellen), eine wichtige Rolle. Sind diese Luftaustauschwege im Allgemeinen positiv für die Luftqualität der Innenstadt, so können diese Luftaustauschbahnen auch negative Folgen

für manche Gebiete innerhalb der Stadt haben. So stellen zum Beispiel Wichmann et al. 2009 in einer Studie über die Folgen der Einrichtung der Umweltzone in München fest, dass die Feinstaubwerte an einem Standort (Luise Kieselbach Platz) im Vergleich zu anderen gleichartigen Plätzen innerhalb Münchens, besonders hoch sind, weil dieser Ort im Gebiet einer Hauptwindschneise gelegen ist, durch die ein Großteil der Stadtluft in die umliegenden ländlichen Regionen strömt und somit erhöhte Werte an diesem Standort (Luise Kieselbach Platz) auftreten (Wichmann, 2009). Neben den horizontalen Austauschbahnen besteht jedoch auch eine weitere, vertikale Möglichkeit des Abtransportes und der Verdünnung von Feinstaubkonzentrationen. So ist die Grenzschichthöhe (Boundary Layer Hight), als die Höhe der turbulenten Luftschicht, innerhalb der eine Luftumverteilung und Verdünnung der Feinstaubkonzentrationen, stattfindet, von entscheidender Bedeutung. Die Höhe dieser Grenzschicht, hängt hierbei hauptsächlich davon ab, ob und in welchem Ausmaß, erwärmte Luftschichten von der Bodenoberfläche in die Atmosphäre aufsteigen und dadurch eine Durchmischung und Umverteilung der Schichtung erzielen können oder nicht (Oke, 1987).

Besonders hohe Grenzschichten bilden sich meist an warmen Sommertagen. Demgegenüber können nachts und speziell in den kälteren Jahreszeiten Herbst und Winter, sehr niedrige Grenzschichten auftreten, da Inversionen das Aufsteigen von warmen bodennahen Luftschichten verhindern (Häckel, 1985). Situationen mit hohen Feinstaubkonzentrationen treten aus diesem Grund besonders häufig in den Jahreszeiten Winter und Herbst auf.

Einen Eindruck dieser beiden Situationen bietet Abbildung 11, in der das Verhalten der Schadstoffe in hoher und niedriger Grenzschicht, sowie die jeweilige Temperatur in der entsprechenden Höhe dazu angegeben sind.



**Abbildung 11. Instabile und Stabile Schichtung**

Höhe Grenzschichten durch Konvektion (a) und niedrige Grenzschichten durch Inversionen (e), sowie der Temperaturverlauf der beiden Situationen

(Oke, 1987, S.324)

Weiter ist es auch die Luftfeuchte, die den Feinstaubgehalt in der Luft beeinflusst. Je höher die Luftfeuchte, desto weniger befinden sich kleine Feinstaubpartikel in der Luft, da die kleinen Partikel unter feuchten Bedingungen verkitten und zusammen größere Partikel bilden und so durch ihre größer gewordene Masse schneller absinken und sich leichter auf Oberflächen ablagern (Lobis, 2006).

Weiter sind es vor allem auch die Niederschlagsereignisse, die die Konzentration des gesamten Feinstaubes, der kleinen und der größeren Partikel, stark reduzieren können. So stellt beispielsweise Schulze in einer Untersuchung in Berlin fest, dass die PM 10 Konzentration direkt nach Niederschlagsereignissen je nach Standort zwischen 14 % und 50 % reduziert sind (Schulze, 2002).

## 2.2 Stadtbäume als Feinstaubfilter

### 2.2.1 Stadtbäume Partikelquellen oder Senken ?

Der Vorgang bei der Aufnahme und Wiederabgabe von Partikeln, der zwischen Baum und Atmosphäre stattfindet, ist ein äußerst umfangreicher, vielschichtiger und interessanter Prozess.

So ist zunächst eine These von Nowak et al. zu nennen, in der die Autoren die Auffassung vertreten, dass Bäume sowohl Feinstaubsenken, als auch Feinstaubquellen sein können. Der gängigen Meinung, dass Bäume reine Feinstaubsenken seien, setzen Nowak et al. somit eine konträre Anschauung entgegen. Dies begründen Nowak et al., indem sie die Ausscheidung der VOC s (Volatile Organic Compounds), also die Ausscheidung von flüchtigen, organischen Verbindungen, bei Bäumen thematisieren und deutlich machen, dass viele Partikel in der Luft (Nukleationsmode) durch die Kondensation von Vorläufergasen, wie zum Beispiel VOC s, an feinsten Partikeln, entstehen (Nowak et al., 2013). So schreibt auch Oke in seinem Standardwerk: „Boundary Layer Climates“, dass feinste Feinstaubpartikel auch allein durch Vorläufergase zum Beispiel in photochemischem Smog, entstehen können (Oke; 1987). Weiter kann auch der Flug von Pollen im Frühjahr zu einem Anstieg des Feinstaubes speziell im größeren Bereich (> PM 10) beitragen (Beckett et al.; 1998).

Jedoch ist diese Tatsache, dass Bäume auch Feinstaubquellen sein können, angesichts der stark überwiegenden Feinstaubfilterfunktion von Bäumen, in welcher der Baum eine deutliche Feinstaubsenke darstellt, zu vernachlässigen. Wie Nowak et al. in ihrer Studie über die Feinstaubfilterfunktion von Stadtbäumen in amerikanischen Großstädten feststellen, liegen die Depositionsmengen pro Jahr in einem Bereich zwischen 4,7 Tonnen Feinstaub der Klasse PM<sub>2,5</sub>, in Syracuse und 64,5 Tonnen in Atlanta. Weiter berichten Mc Pherson et al. mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von 234 Tonnen Feinstaub der Klasse PM<sub>10</sub> in Chicago, ebenfalls von solch hohen Filterleistungen von Stadtbäumen (Mc Pherson et al.; 1994).

Doch wieso überhaupt, kann Vegetation und speziell ein Stadtbaum in der Lage sein, effektiv Feinstäube aus der Luft zu filtern ?.

Roupsard et al. beantworten diese Frage, mit ihrer Feststellung, dass sich Feinstäube 10 bis 30 mal effektiver an Vegetationsoberflächen ablagern können, als an den übrigen, in einer Stadt auftretenden, Beton-, Asphalt- und Glasflächen (Roupsard et al., 2013).

Speziell Bäume sind auf Grund ihrer strukturreichen, rauhen und großen Gesamtoberfläche prädestiniert dazu, Feinstäube in gasförmiger- (Vorläufgase), flüssiger- (in H<sub>2</sub>O gelöste Feinstäube) und fester Form (Partikel), aufzunehmen und als Feinstaubsenken zu agieren (Manning und Feder, 1980). Zu der besonders geeigneten Struktur und der Größe, kommt bei Bäumen noch der Aspekt hinzu, dass die vertikale Ausprägung der Blätter nicht auf einer horizontal Ebene verläuft, sondern vertikal und damit genau in einem senkrechten Winkel zu feinstaubhaltigen Luftströmen, ausgerichtet ist, was die Filterfähigkeit von Bäumen stark prägt.

Die Fläche, die bei Bäumen als Depositionsfläche effektiv wirksam ist, ist zunächst die gesamte oberirdische Körperoberfläche des Baumes, in der der Stamm mit seiner Borke und allen starken und feinen Ästen, sowie Zweigen, bis hin zu den Blättern inbegriffen ist. Im Frühjahr und Sommer können diese Oberflächen zudem durch Knospen, Blütenstände und Samenanlagen, sowie im Herbst auch durch die Fruchtstände und Früchte des Baumes, erweitert werden. Hierbei bilden jedoch die Blätter und Nadeln der Bäume den größten Anteil der Oberfläche, da diese durch ihre, im Verhältnis zu den anderen Organen des Baumes, besonders kleinräumigen Formen, ein sehr großes Oberflächen zu Volumen - Verhältnis aufweisen und somit auf sehr geringem Raum besonders große Oberflächen erzeugen können.

## 2.2.2 Der Filtermechanismus von Bäumen

### 2.2.2.1 Antransport

Im Prozess der Feinstaubfilterung von Bäumen sind zunächst die grundlegenden Mechanismen zu beschreiben, die bei einem Kontakt eines Partikels mit einer Oberfläche, wie einem Baum und seinen Blättern bzw. Nadeln, stattfinden.

Auf einen Partikel wirken in seinem Flug durch die Atmosphäre verschiedene Kräfte. Im Wesentlichen setzen sich diese Kräfte, aus seiner eigenen Schwerkraft, die den

Absinkvorgang des Partikels beeinflusst, und aus der, den Partikel antreibenden kinetischen Energie des Windes, zusammen. Diese Kräfte können den Partikel sowohl vertikal als auch horizontal beschleunigen und abbremsen können (Chamberlain, 1975).

Die erste Form der Partikelablagerung auf der Baumoberfläche, die vorwiegend bei windstillen Luftverhältnissen auftritt, ist der Prozess der *Sedimentation*. Hierbei werden Partikel durch Gravitation aus der Atmosphäre auf der Baumoberfläche abgelagert. Dieses Prinzip der Filterung ist vor allem bei großen Partikeln eines Durchmessers  $>10\mu\text{m}$ , von Bedeutung (Litschke und Kuttler, 2008).

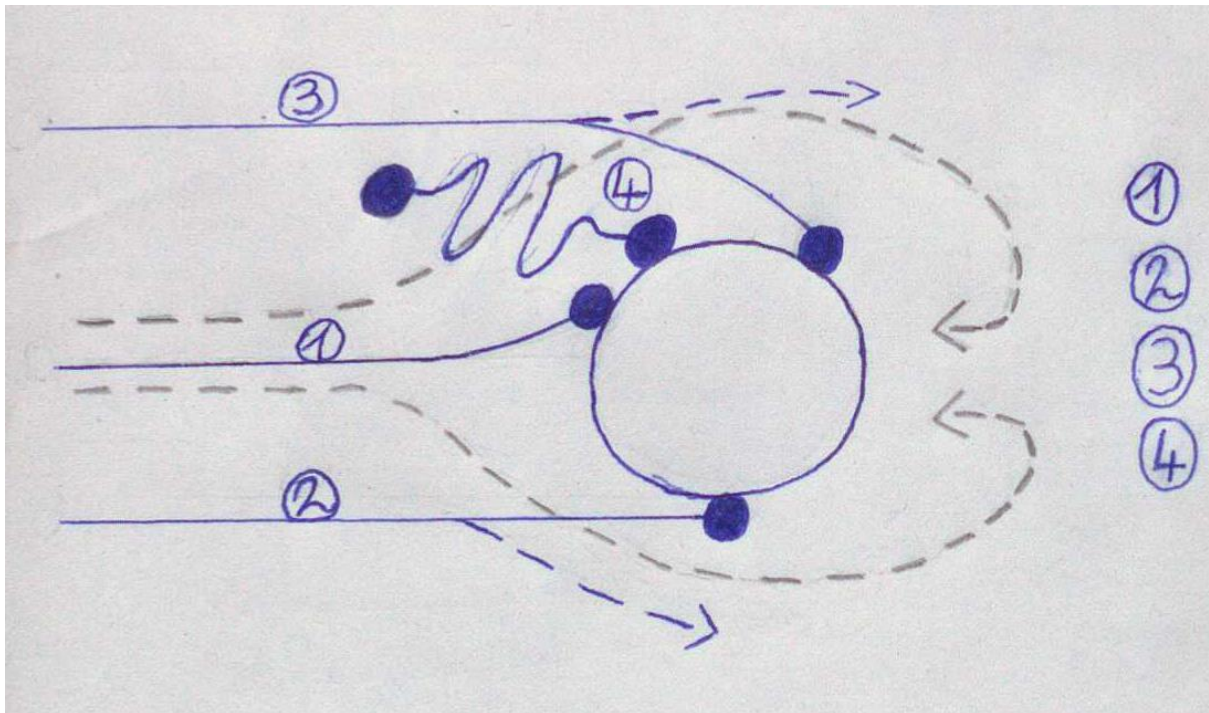
In Verhältnissen mit Turbulenz und Windeinfluss tritt zudem ein direktes Abfangen von Partikeln, als ein weiterer Mechanismus im Geschehen der Partikelablagerung an der Baumoberfläche auf. In diesem Prozess werden Partikel von Windströmungen und Turbulenzen so nahe an die Oberfläche eines Objektes herantransportiert, dass die Partikel die Oberfläche berühren und an ihr haften bleiben. Diesen Vorgang beschreiben die verschiedensten Autoren als *direct interception* (Chamberlain und Little, 1981). Ein weiterer ähnlicher Prozess der Partikelablagerung ist zudem die Ablagerung eines Partikels, aufgrund seiner Trägheitskraft. In diesem Mechanismus werden einzelne Partikel von Wind und Turbulenz beschleunigt, auf ein Objekt zugetrieben, und von den Luftströmungen, die um das Objekt auftreten, zunächst seitlich abgeleitet. Ihre Trägheitskraft ist jedoch so groß, dass die Partikel die Luftströmungen durchbrechen und sich an das jeweilige Objekt anlagern können oder in den windstillen Bereich hinter das Objekt gelangen und sich dort durch Wirbeleffekte an das Objekt anlagern können. Dieser Vorgang wird in der Fachliteratur allgemein als *inertial impaction* bezeichnet (Chamberlain und Little, 1981). Weiter kann die Deposition von Feinstäuben auch durch elektrostatische Effekte *electrostatical attraction* begünstigt werden (Beckett et al., 1998).

Diese drei zuletzt betrachteten Ablagerungsformen, treten alle meist in einem Größenbereich zwischen  $< 10\mu\text{m}$  und  $> 1\mu\text{m}$  Partikeldurchmesser auf. Wesentlich kleinere Partikel weisen eine andere Art der Deposition auf. So können sich Partikel ab einem Durchmesser von  $< 1\mu\text{m}$ , beim Vorgang der Deposition ähnlich wie Gase verhalten und aufgrund ihrer Teilchenbewegung und eines Diffusionsgradienten, zwischen Blattfläche und näherer Umgebungszone auf die Blattoberfläche und weiter

ins Blattinnere diffundieren. Dieser Vorgang wird hierbei als *brownian motion* bezeichnet (Chamberlain und Little, 1981).

In der Natur ist der Depositionsprozess von Partikeln an der Baumoberfläche jedoch ein dynamisches Geschehen, bei dem alle erwähnten Mechanismen in fließenden Übergängen auftreten (Beckett et al.; 1998).

Abbildung 12. verdeutlicht diese vier Depositionsmechanismen schematisch.



**Abbildung 12. Depositionsmechanismen**

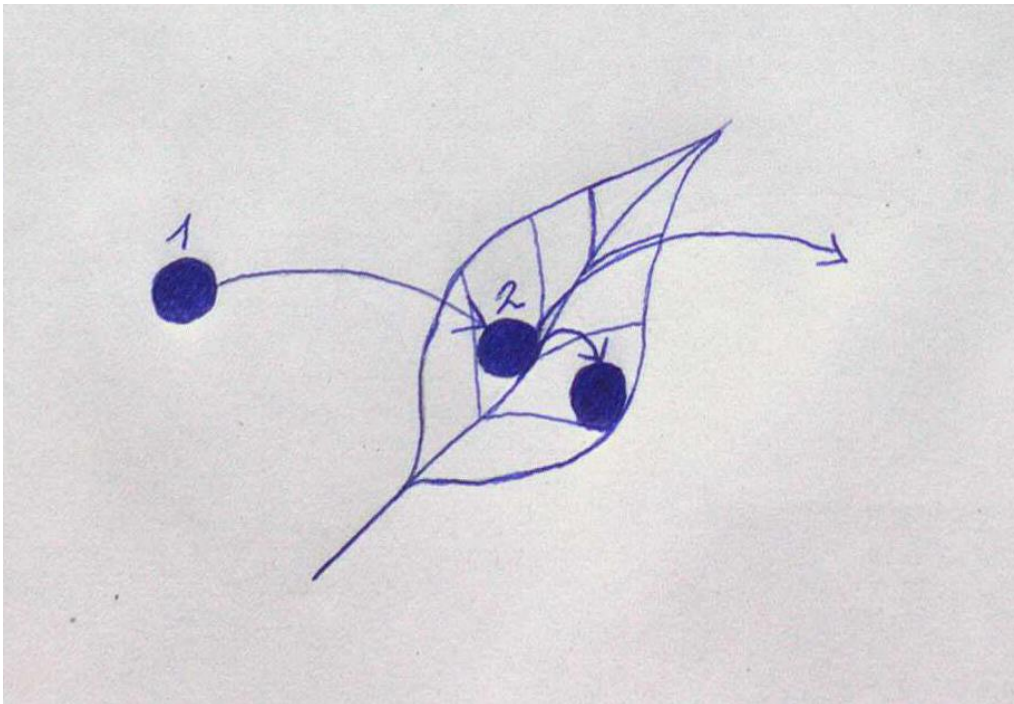
**1 = Direct interception, 2 = Inertial impaction, 3 = Electrostatic attraction,  
4 = Brownian motion**

Frei nach (Boubel et al.1994, S. 463)

## 2.2.2.2 Ablagerung

Darüber hinaus können sich Partikel beim Aufprall auf die Blattoberfläche mit anderen bereits vorhandenen Partikeln agglomerieren und größere Verbände eingehen, wieder vom Blatt abspringen, oder bereits vorhandene Partikel durch Saltation von ihrem Platz verdrängen. Den Vorgang der Saltation veranschaulicht Abb. 13.





**Abbildung 13. Mechanismus der Saltation**

Nach erfolgtem Transport auf die Baumoberfläche, können die Partikel dann, nachdem sie bei Laubbäumen zuerst die Haarschicht der Blätter durchdrungen haben, zum einen oberflächlich, und zum anderen tiefgehend, abgelagert werden. Im Prozess der oberflächlichen Deposition, lagern sich die Partikel hierbei verstärkt an Unebenheiten der Blattoberfläche an.

Partikel die tiefgehender von der Blattoberfläche aufgenommen werden, können hingegen zunächst in die epikutikulare Wachsschicht der Blatt-/Nadelfläche aufgenommen werden, von dort aus weiter in die Kutikula vordringen und somit langfristig im Blatt/ in der Nadel, gebunden werden.

Darüber hinaus ist es einigen Partikeln auch möglich, durch die stomatären Spaltöffnungen der Blätter und Nadeln, weiter ins Blattinnere zu gelangen und dort ebenfalls langfristig im Blatt / in der Nadel gebunden zu sein. Dies kann auf direktem Weg, durch die geöffneten Spaltöffnungen, oder indirekt durch die Aufnahme von gelösten Partikeln, erfolgen.

Wenn Partikel erst einmal auf Oberflächen abgelagert sind, so benötigt es relativ große Kräfte, diese wieder zu entfernen, da die Partikel bereits feste Zusammenschlüsse mit der Blattoberfläche gebildet haben und die unmittelbare Blattoberfläche einen windgeschützten Bereich (laminare Grenzschicht) darstellt (Lyons und Scott, 1990; Chamberlain, 1975). Dennoch werden einige Partikel, wie das folgende Kapitel beschreibt, von der Baumoberfläche abtransportiert.

### 2.2.2.3 Abtransport

Auch im Prozess des Abtransportes von Feinstäuben von der Baumoberfläche, treten verschiedene Mechanismen auf. So werden beispielsweise oberflächlich abgelagerte Partikel bei starken Windereignissen, von der Blatt / Nadeloberfläche aufgewirbelt und abtransportiert, was in der Fachliteratur, als *resuspension* bezeichnet wird. Die Rate der, durch *resuspension* abtransportierten Partikel beträgt hierbei je nach Baumart, Windstärke und Einwirkungsdauer Werte zwischen 22 - 47 % der, auf dem Blatt /der Nadel vorhandenen Menge an Feinstaub (Pulmann, 2009).

Ein weiterer Mechanismus, der für den Abtransport von oberflächlich gebundenen Feinstäuben eine wichtige Rolle spielt ist die Abwaschung des Feinstaubes durch Niederschlagsereignisse. Hierbei können sowohl feste, als auch gasförmige und bereits gelöste Partikel, von der Baumoberfläche abgewaschen werden.

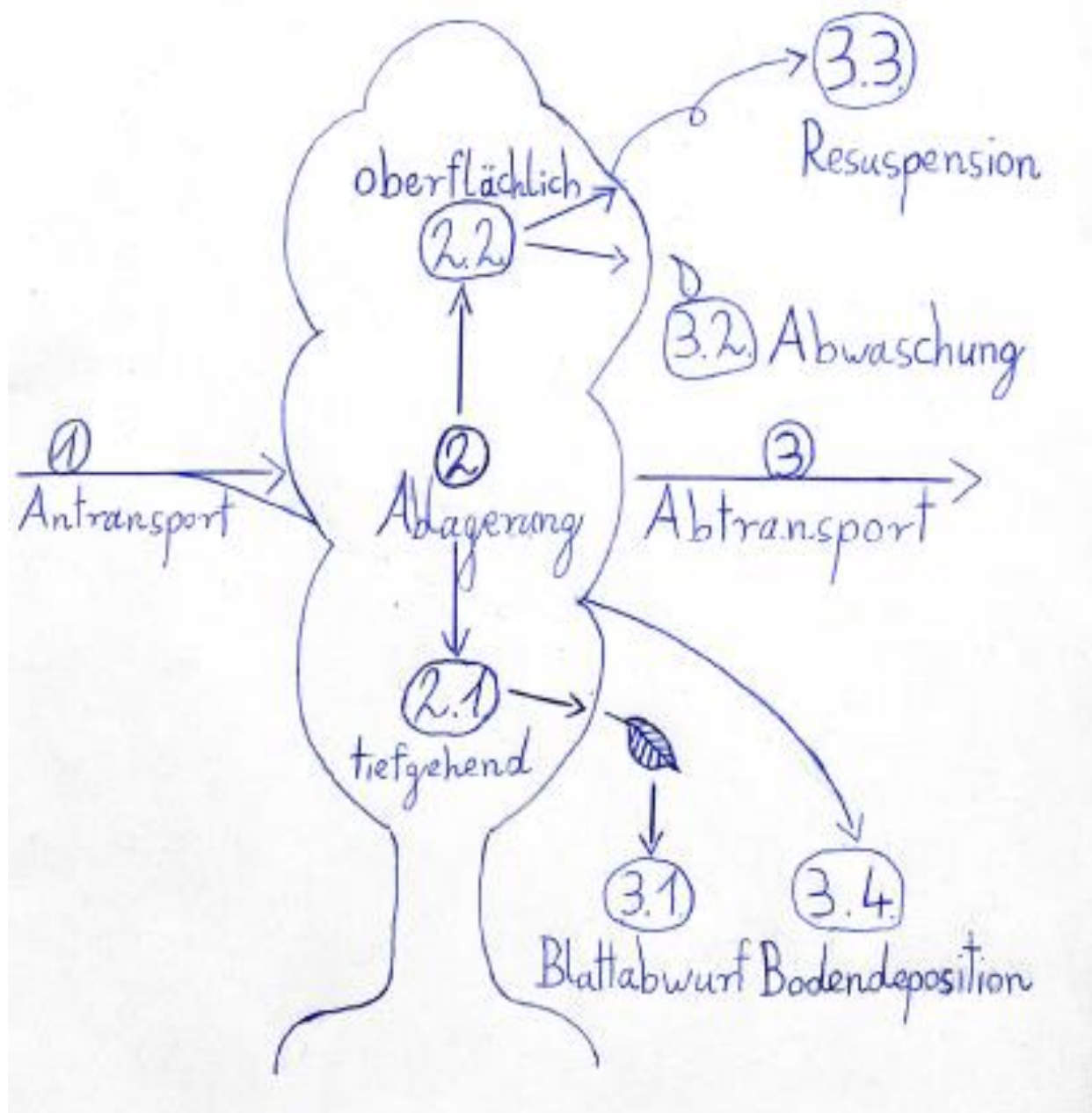
Der Mechanismus, der für tiefgehend gebundene Partikel am meisten Bedeutung hat, ist der Laubfall / Nadelabwurf. Können tief gebundene Partikel oft nicht durch Wind oder Niederschlag, von der Baumoberfläche entfernt werden, so werden doch alle auf dem Blatt gebundenen Feinstäube im Vorgang des Laubfalls bei wechselgrünen Laubbäumen jedes Jahr und bei immergrünen Koniferenarten, alle 2 bis 8 Jahre (Matyssek et al., 2010), vom Baum abgestoßen. Unter Berücksichtigung der hoch toxischen chemischen Bestandteile der Feinstaubpartikel, empfehlen Dzierzanowski et al. sogar, die mit Partikeln angereicherten Blätter, im Herbst nach dem Blattabwurf einzusammeln und getrennt und unter Beobachtung zu kompostieren (Dzierzanowski et al., 2011).

Zuletzt spielt auch noch der Vorgang der Bodendeposition, im Bezug auf die Feinstaubreduzierung durch Bäume, eine Rolle. So zeigen beispielsweise Donat und

Ruck, dass Bäume durch ihre vielschichtigen Oberflächen, erhöhte Turbulenzen in ihrem Umkreis auslösen und dies zu erhöhter Deposition von Partikel im nahen Bodenbereich führen kann (Donate und Bruck; 1999).

Eine Zusammenfassung des gesamten Filtermechanismus und der drei Teilschritte in diesem Prozess stellt Abbildung 14. dar.

**Abbildung 14. Der Filtermechanismus von Bäumen**



Nach der Betrachtung des Filtermechanismus als ganzen, wird nun in den Folgenden Kapiteln genauer auf die Faktoren eingegangen, die die Feinstaubfilterleistung von Bäumen beeinflussen.

## 2.2.3 Faktoren für die Filterleistung von Bäumen

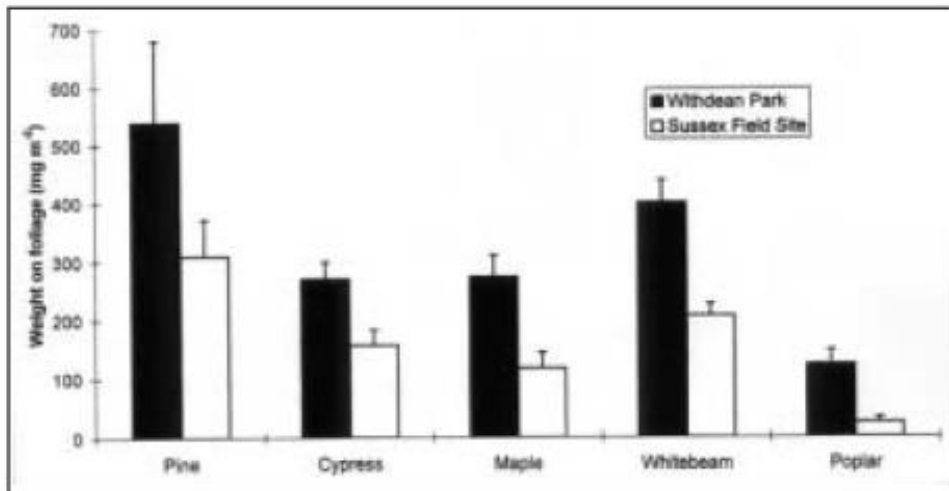
### 2.2.3.1 Klimatische Faktoren

#### 2.2.3.1.1 Partikelkonzentration

Einer der wichtigsten Faktoren für die Feinstaubfilterleistung von Stadtbäumen ist die Partikelkonzentration der Umgebungsluft. So erkennen alle recherchierten Studien einen eindeutigen Trend, dass die gefilterte Feinstaubmenge an Standorten mit hohen Feinstaubkonzentrationen größer ist, als an Standorten mit geringeren Konzentrationen.

Bereits 1973 erkennt so zum Beispiel Gregory, dass Lycopodium Sporen (Durchmesser ca. 30  $\mu\text{m}$ ) mit einer steigenden Distanz zur Feinstaubquelle, stark reduzierte Fangeffizienz und Depositionsgeschwindigkeit an Vegetationsoberflächen aufweisen, da der eintretende Verdünnungseffekt, die Filterleistung reduziert. So stellt Gregory fest, dass die Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) in 2,5 Metern Distanz zur Feinstaubquelle mehr als doppelt so hohe Werte aufweist, als die Depositionsgeschwindigkeit in 10 Metern Entfernung zur Feinstaubquelle (Gregory, 1973).

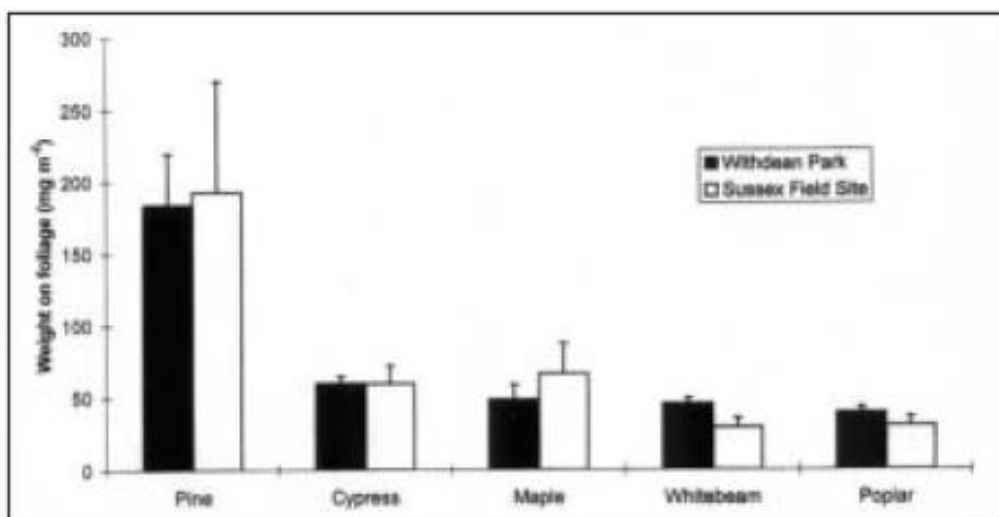
Weiter erkennen Beckett et al. in einer Untersuchung an zwei verschiedenen stark verschmutzten Standorten, dass die Bäume mit höherer Umgebungskonzentration an Feinstaub, mehr PM<sub>10</sub> Partikel ablagern, als identische Spezies in weniger verschmutzten Gebieten (Abb. 15).



**Abbildung 15. Filterleistung in Abhängigkeit der PM 10 Konzentration**

Withdean Park = Stadtmitte, mit hohen Partikelkonzentrationen und Sussex Field Site = Stadtrand, mit niedrigeren Partikelkonzentrationen, für *Pinus nigra*, *X Cupressocyparis leylandii*, *Acer campestre*, *Sorbus aria* (Echte Mehlbeere), *Populus deltoides x trichocarpa* (Beckett et al., 2000a)

In ihrer Untersuchung beobachteten Beckett et al. jedoch auch, dass dieser Effekt für die feineren PM 2,5 Partikel nicht sichtbar ist (Abb. 16).



**Abbildung 16. Filterleistung in Abhängigkeit der PM 2,5 Konzentration**

Withdean Park = Stadtmitte, mit hohen Partikelkonzentrationen und Sussex Field Site = Stadtrand, mit niedrigeren Partikelkonzentrationen, für *Pinus nigra*, *X Cupressocyparis*

leylandii, Acer campestre, Sorbus aria (Echte Mehlbeere), Populus deltoides x trichocarpa (Beckett et al., 2000a)

Beckett et al. führen dieses zunächst überraschende Ergebnis darauf zurück, dass im Gegensatz zu großen PM10 Partikeln, die feinen Partikel wie PM2,5 nicht nur im Umkreis ihrer Quellen, sondern auch in größeren Entfernungen dazu (Stadttrand) auftreten können (Kapitel 2.1.6). Somit ist in dieser Studie ein echter Unterschied der Partikelkonzentration zwischen den beiden Standorten nur für die Partikel der Größenklasse PM10, zu verzeichnen, für welche die konzentrationsabhängige Filterleistung auch beobachtet werden kann.

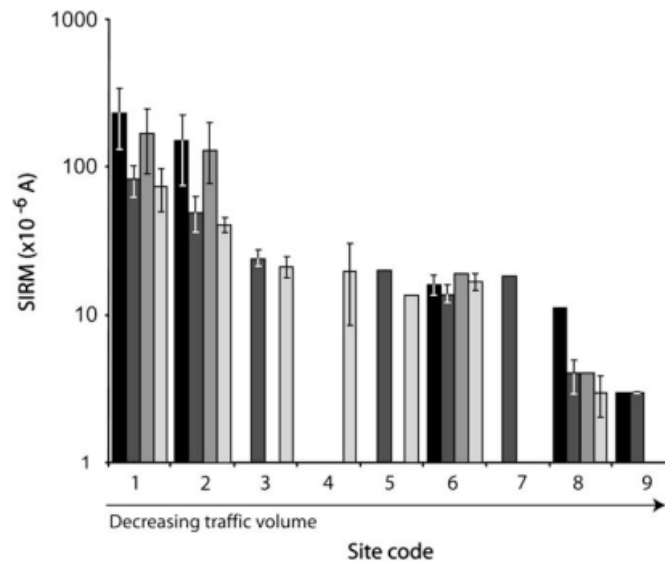
Size fraction ( $\mu\text{m}$ )	Year	Distance from the source of PM emission (m)						
		3	15	50	100	200	300	500
10-100	2010	22.6a $\pm$ 2.3	29.7a $\pm$ 3.3	7.4b $\pm$ 0.4	6.9b $\pm$ 0.2	6.2b $\pm$ 0.2	6.6b $\pm$ 0.6	5.9b $\pm$ 0.8
	2011	30.3a $\pm$ 1.6	27.1a $\pm$ 1.2	11.4b $\pm$ 0.5	11.9b $\pm$ 0.3	11.1b $\pm$ 0.4	10.5b $\pm$ 0.2	12.1b $\pm$ 0.2
2.5-10	2010	3.8a $\pm$ 0.2	4.3a $\pm$ 0.3	3.8a $\pm$ 0.3	4.3a $\pm$ 0.6	3.1a $\pm$ 0.7	3.6a $\pm$ 0.3	3.7a $\pm$ 0.8
	2011	12.0a $\pm$ 0.8	11.1a $\pm$ 0.4	5.6bc $\pm$ 0.3	7.9b $\pm$ 0.3	5.2bc $\pm$ 0.3	3.0c $\pm$ 0.2	4.2c $\pm$ 0.4
0.2-2.5	2010	1.5a $\pm$ 0.1	1.6a $\pm$ 0.1	0.9a $\pm$ 0.1	1.1a $\pm$ 0.1	0.8a $\pm$ 0.0	0.9a $\pm$ 0.1	1.1a $\pm$ 0.1
	2011	1.5a $\pm$ 0.1	1.9a $\pm$ 0.1	1.1a $\pm$ 0.1	1.8a $\pm$ 0.1	1.3a $\pm$ 0.1	1.2a $\pm$ 0.0	1.1a $\pm$ 0.0

**Abbildung 17. Partikelkonzentration und**

Brauner Balken = Partikel im Durchmesserbereich > 2,5 $\mu\text{m}$  bis < 100 $\mu\text{m}$ ; Gelber Balken = Durchmesserbereich > 0,2 bis < 2,5 (Popek et al; 2015)

Doch auch Popek et al. beobachten die bereits aufgezeigte Verhältnismäßigkeit, bezüglich feiner Partikel. So stellen Popek et al. fest, dass die Depositionsmenge der Größenklassen > 2,5 $\mu\text{m}$  bis < 100 $\mu\text{m}$  einen deutlichen Trend mit steigender Distanz zur Straße und damit mit einer Abnahme der Feinstaubkonzentration verzeichnen, als dies Partikel des Durchmesserklasse > 0,2 bis < 2,5 tun (Abbildung 17.)

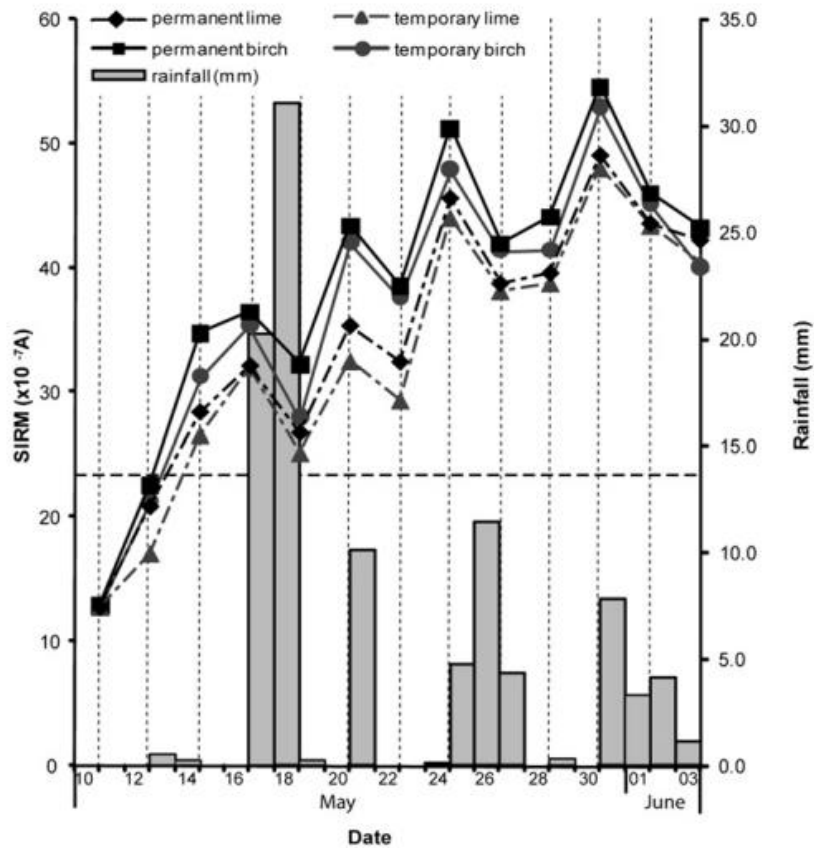
Weiter beobachten Mitchel und Maher einen Anstieg der Feinstaubdeposition bei Bäumen aufgrund steigender Partikelkonzentrationen der Umgebungsluft, die durch erhöhten Straßenverkehr verursacht werden (Mitchell und Maher, 2009) (Abb. 18).



**Abbildung 18. Feinstaubfilterung in Abhängigkeit von verkehrsgesteuerter Umgebungskonzentration**

SIRM (Wert des Blattmagnetismus) entspricht der Feinstaubdepositions­menge auf der Blattoberfläche, diese fällt mit abnehmendem Straßenverkehr (Mitchell und Maher, 2009, S. 2098)

Darüber hinaus erkennen Mitchel et al. in einer weiteren Untersuchung, dass die von Partikeln freien Blattflächen besonders schnelle Filteranstiege im Vergleich zu Blattoberflächen aufweisen, die bereits zu einem gewissen Teil mit Partikeln bedeckt sind. Dies verdeutlicht auch Abbildung 19., die zeigt, dass die zu Beginn der Untersuchung noch partikelfreien Blattflächen, zwanzig Tage (10.5. – 30.5.), einen deutlichen Anstieg der Depositionsmenge aufweisen, nach dieser Zeitspanne jedoch kein weiterer großer Anstieg mehr zu verzeichnen ist. An diesem Punkt ist somit eine Sättigung der Blattfläche an Partikeln erreicht und es herrscht ein Gleichgewichtszustand mit der umgebenden Partikelkonzentration der Luft. Dieser Gleichgewichtszustand ist jedoch dynamisch, was bedeutet, dass die Depositionsmenge der Blattoberfläche durch Außeneinflüsse, wie Niederschlags- und Windereignisse, jederzeit wieder abgesenkt werden kann, um sich dann erneut auf dem Sättigungsniveau, einzupendeln (Mitchel et al., 2010).



**Abbildung 19. Erreichen des Sättigungsniveaus der Blattfläche**

SIRM (Wert des Blattmagnetismus = Feinstaubdepositionsmenge), Sättigungspunkt nach ca. 20 Tagen erreicht, auf dem Weg zur Sättigung verzögert Neiderschlag immer wieder das Erreichen des Sättigungspunktes (Mitchel et al., 2010).

Weiter spricht sich auch Pulmann dafür aus, dass Sättigungsniveaus der Blattflächen vorherrschen und dafür verantwortlich sind, welche Depositionsmengen von einem Baum aufgenommen werden können (Pulmann, 2009).

Darüber hinaus beobachten auch Wang et al. in einer Untersuchung in Peking, dass kurz nach der Entwicklung der Blätter im Frühling ein schneller Anstieg der Depositionsmenge auf der Blattoberfläche, innerhalb von sieben Tagen, eintritt und sich ein Sättigungsniveau bei 10 % - 50 % Partikelbedeckung der Blattfläche, einstellt. Wang et al. führen diese schnelle Sättigung der Blattfläche mit Partikeln, auf die hohe Feinstaubbelastung in Peking zurück (Wang et al., 2015).



## 2.2.3.1.2 Windeinwirkung

Neben der umliegenden Partikelkonzentration der Luft ist auch die Einwirkung von Windereignissen ein weiterer klimatischer Faktor der die Feinstaubfilterleistung von Stadtbäumen, beeinflusst.

Die recherchierten Studien, stellen alle einen Anstieg der Filterleistung mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten fest.

So beobachten beispielsweise Freer-Smith et al. einen deutlichen Anstieg der Feinstaubfilterleistung der Blätter mit zunehmender Windgeschwindigkeit. In dieser Studie werden verschiedene Baumarten in einem Windtunnel, verschiedenen Windstärken ausgesetzt, wobei ein eindeutiger Wind abhängiger Trend der Filterleistung, zu erkennen ist (Siehe Abbildung 20)

	$\mu$ (ms <sup>-1</sup> )	<i>Q. petraea</i>	<i>A. glutinosa</i>	<i>F. excelsior</i>	<i>A. pseudo-platanus</i>	<i>P. menziesii</i>	<i>E. globulus</i>	<i>F. nitida</i>
Mean $V_{gel}$ (cm s <sup>-1</sup> )	3	0.831 (0.956)	0.125 (0.057)	0.178 (0.56)	0.042 (0.027)	1.269 (1.167)	0.018 (0.007)	0.041 (0.004)
	6	1.757 (2.582)	0.173 (0.055)	0.383 (0.124)	0.197 (0.123)	1.604 (0.668)	0.029 (0.005)	0.098 (0.024)
	9	3.134 (4.305)	0.798 (0.424)	0.725 (0.275)	0.344 (0.94)	6.04 (3.998)	0.082 (0.009)	0.234 (0.040)
Mean Cp (%)	3	0.277 (0.319)	0.042 (0.019)	0.059 (0.022)	0.014 (0.009)	0.423 (0.389)	0.006 (0.002)	0.014 (0.001)
	6	0.293 (0.430)	0.029 (0.009)	0.064 (0.021)	0.033 (0.021)	0.267 (0.111)	0.005 (0.001)	0.016 (0.004)
	9	0.348 (0.478)	0.089 (0.047)	0.081 (0.031)	0.038 (0.10)	0.671 (0.444)	0.009 (0.001)	0.026 (0.004)

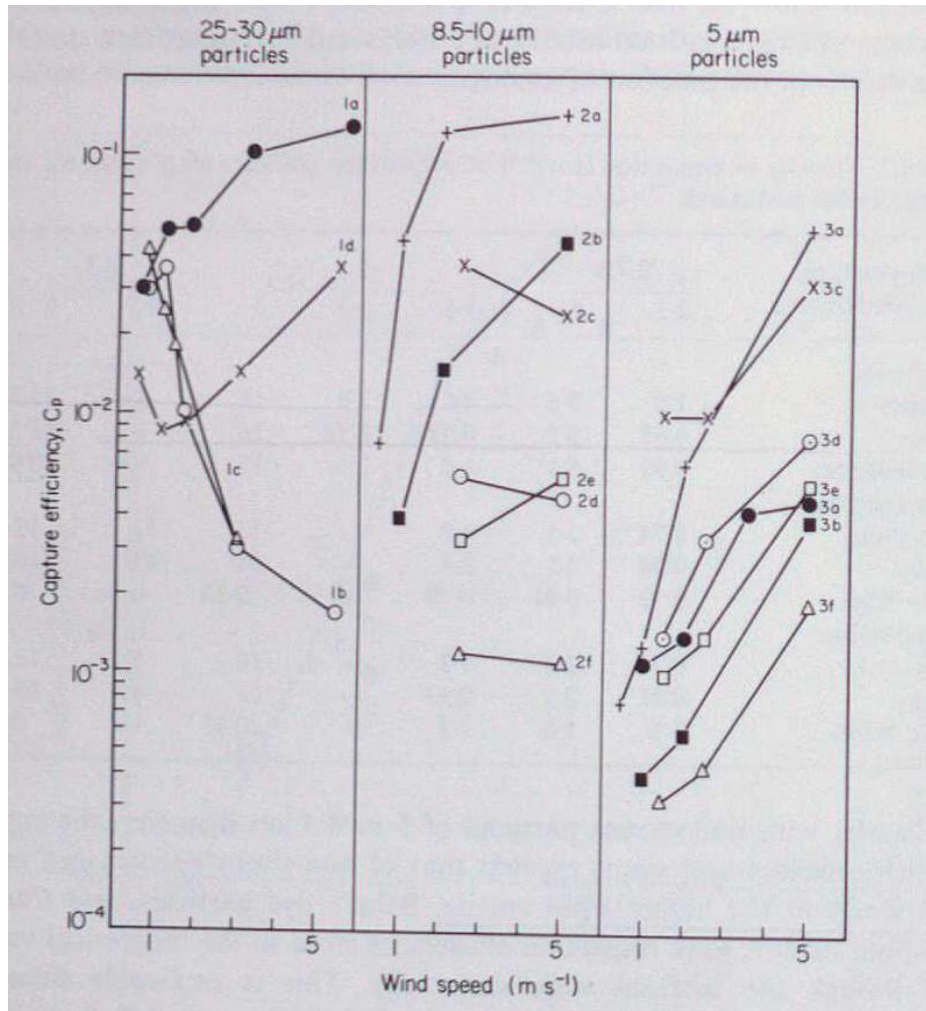
**Abbildung 20. Ansteigende Fangeffizienz (Cp) und Depositionsgeschwindigkeit (Vg) mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten, zwischen  $u = 3$  und  $u = 9$  m s<sup>-1</sup>**

(Freer-Smith et al., 2004, S. 177)

Weiter berichten zum Beispiel auch Belot et al. von diesem Zusammenhang. In ihrer Untersuchung in Waldbeständen stellen sie fest, dass die am höchsten positionierten Kronenschichten, aufgrund der höheren Windgeschwindigkeiten auf 10 Metern Höhe im Vergleich zu Blattflächen auf 5 Metern über dem Erdboden, die größten Filterwerte aufweisen (Belot et al., 1994).

Schließlich präsentiert auch Chamberlain ein sehr aussagekräftiges Bild bezüglich des Zusammenwirkens von Wind und Filterleistung, indem er Ergebnisse aus verschiedenen Studien zusammenträgt und feststellt, dass die Fangeffizienz von Vegetation, bis zu einer

Windgeschwindigkeit von  $5 \text{ m s}^{-1}$ , stets mit steigendem Wind zunimmt (Chamberlain, 1981) (Abb. 21).

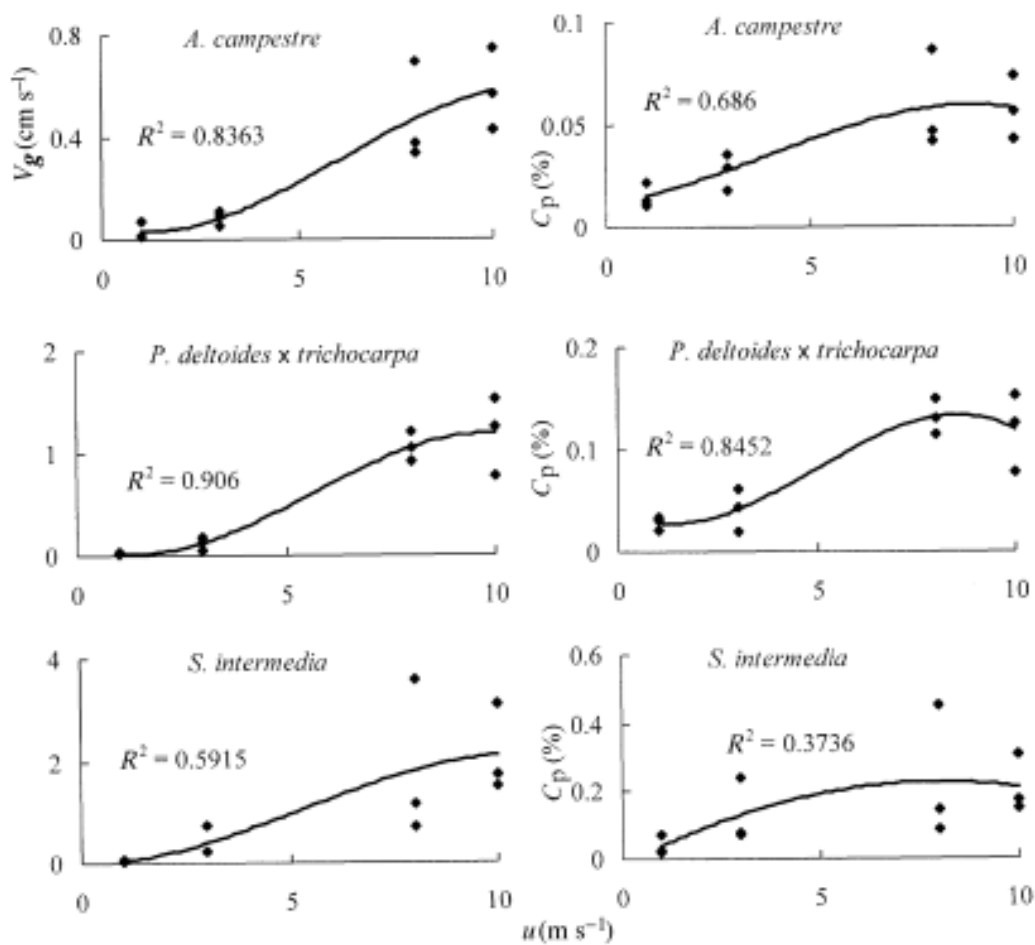


**Abbildung 21. Positive Korrelation von Fangeffizienz und Windgeschwindigkeit in verschiedenen Studien**

Grafische Darstellung der Ergebnisse aus fünf unterschiedlichen Studien mit Angabe der Partikelgröße (Chamberlain, 1981, S. 154)

Doch der Anstieg der Filterleistung mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt nicht ins Grenzenlose. So stellen Beckett et al. fest, dass die Fangeffizienz und die Depositionsgeschwindigkeit, von Bäumen bei Windgeschwindigkeiten über einen bestimmten Punkt hinaus, nicht weiter ansteigen, sondern eher eine leichte Abnahme der Filterleistung eintritt. Zum einen führen Beckett et al. diesen Plateau-effekt darauf zurück, dass Blätter bei hohen Windgeschwindigkeiten die Blattflächen parallel zur

Windrichtung ausgerichtet werden und so die, für die Deposition, zur Verfügung stehende Blattfläche minimiert wird. Zum anderen führen Beckett et al. den Plateaueffekt darauf zurück, dass mit steigendem Wind auch der Anteil der, durch *resuspension* aufgewirbelten Partikel, zunimmt und sich somit ein Gleichgewichtszustand zwischen abgelagerten und aufgewirbelten Partikeln auf der Blattoberfläche ergibt (Beckett et al. 2000b). Der Plateaueffekt ist in Abbildung 22 erkennbar.



**Abbildung 22. Plateaueffekt der Fangeffizienz ( $C_p$ ) und Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) bei Windstärke  $10 \text{ m s}^{-1}$  für verschiedene Baumarten**

(Beckett et al. 2000b, S. 1000)

Schließlich gelangen auch Chamberlain und Little zu diesem Ergebnis. So berichten sie davon, dass in Experimenten, bei denen Nadelflächen mit Hilfe von Vaseline künstlich klebrig gemacht werden, bedeutend größere Filterleistungen aufweisen, als gleichwertige unbehandelte Nadelflächen. Chamberlain und Little führen diese Beobachtung auf eine reduzierte *resuspensions* Rate an den mit Vaseline klebrig gemachten Nadelblattflächen zurück. Ihre Interpretation wird dadurch noch verstärkt, dass dieser Effekt mit steigenden Windgeschwindigkeiten größer wird (Chamberlain und Little, 1981).

Neben Beckett et al. und Chamberlain und Little teilt darüber hinaus auch Pulmann diese beschriebene Auffassung (Pulmann, 2009).

### 2.2.3.1.3 Niederschlagsereignisse

Neben der Umgebungskonzentration und der Windeinwirkung, ist weiter der Niederschlag ein wichtiger abiotischer Faktor bei der Einschätzung, der Filterfähigkeit von Bäumen. Sind die ersten beiden Faktoren, mehr für die Aufnahme Menge des Feinstaubes von Bedeutung, so steht der Niederschlag in enger Verbindung zu der Menge an Feinstaub die der Baum aus der Umgebungsluft entnehmen und filtern kann. Im Bezug auf den Effekt den Regenereignisse auf die Depositionsmenge der Blattoberfläche haben, besteht in der aktuellen Fachliteratur ein breites Spektrum an Auffassungen.

So ist zunächst eine Ansicht von Wang et al. zu nennen, der in seiner Untersuchung feststellt, dass Niederschlagsereignisse zu erhöhten Depositionsmengen auf der Blattfläche führen. Diese Beobachtung führen Wang et al. darauf zurück, dass Regentropfen bei ihrem Flug durch die Atmosphäre, Partikel aufnehmen. Treffen diese, in den Regentropfen gelösten Feinstäube auf die Blattoberfläche, bleiben diese dann, nach erfolgter Verdunstung des Wassers, als fleckenförmige Feinstaubagglomerate zurück. Wang et al. schließen mit der Bemerkung, dass bei Abschätzungen der Auswirkung von Regenereignissen auch die Intensität des Ereignisses sowie seine Dauer beobachtet werden müssen (Wang et al., 2015).

Dem gegenüber vertreten Saebo et al. und Nowak et al. die Auffassung, dass bereits bei kleinen Regenereignissen, ein bedeutender Reinigungsprozess der Blattfläche auftritt und die dort gebundenen Partikel abwäscht (Saebo et al., 2012) (Nowak et al., 2013).

Weiter stellen Mitchel und Maher in ihrer Studie fest, dass die magnetisch erfassten Depositionswerte (SIRM - Werte) auf der Blattfläche bei Niederschlagsereignissen um 12 % – 64 % reduziert werden (Mitchel und Maher, 2009). Zudem stellt auch Pulmann in ihrer Untersuchung fest, dass Regenereignisse zwischen 83% und 89% der ursprünglichen Depositionsmenge, von der Blattfläche abwaschen können (Pulmann, 2009).

Schließlich stellen Freer-Smith et al. in ihrer Veröffentlichung fest, dass bei Regenereignissen die Partikel mit großen Durchmessern auf der Blattoberfläche verbleiben, während der wasserlösliche Anteil, der besonders feinen Partikel (UFP), von den Blattfläche abgewaschen wird (Abb. 23)

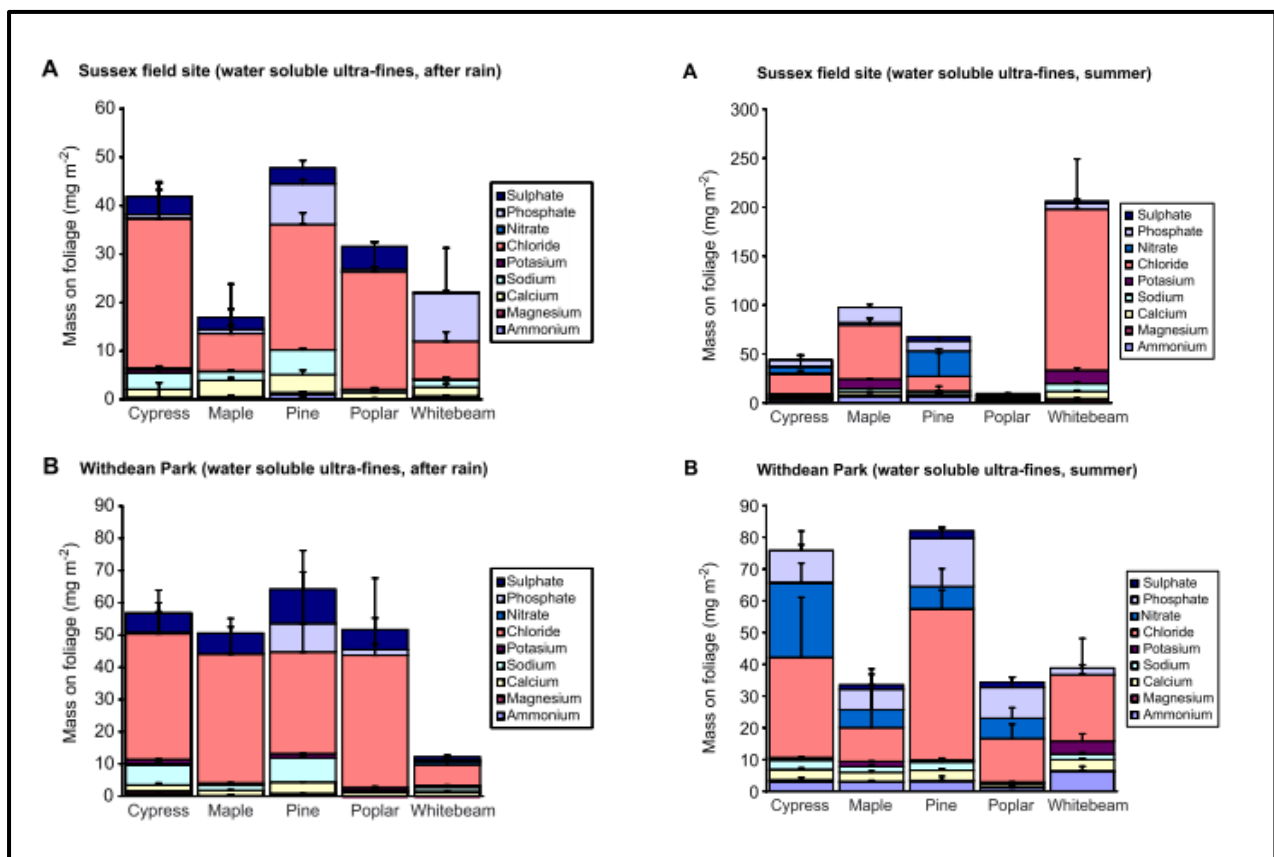


Abbildung 23. Unterschiedliche Abwascheffekt der feinen Partikel (UFP) bei

Im linken Bildteil befinden sich die Depositionsmengen, direkt nach einem Regenereignis, Im rechten Bildteil ist die gleiche Feinstaubfraktion ohne Niederschlagsereignis abgebildet, (A) und (B) sind als identische Standorte jeweils miteinander vergleichbar, In (A) und in (B) weisen die einzelnen Baumarten überwiegend kleinere Partikelmassen im linken Bildteil (nach Niederschlag) auf, als im rechten Bildteil (ohne Niederschlag) (Freer-Smith et al., 2005, S. 164).

Zusammenfassend ist den verschiedenen Ansichten der Literatur zu entnehmen, dass Niederschläge grundsätzlich einen Abwascheffekt auf die Feinstaubmenge der Blattoberfläche haben. Dieser Effekt hängt jedoch neben der Häufigkeit der Niederschlagsereignisse auch von deren Intensität und Dauer, sowie von der Wasserlöslichkeit der Partikel auf der Blattoberfläche ab.

Abschließend ist also festzustellen, dass Blattflächen in ihrem Filterungsprozess einen Sättigungspunkt erreichen können, ab welchem alle, auf der Blattfläche verfügbaren freien Plätze vergeben sind und keine, oder nur noch bedingt Partikel aufgenommen werden können. Diese hohe Partikelmenge der Blattfläche, wird durch Wind- (erhöhte resuspension) und Niederschlagsereignisse (Abwaschung) unterschritten, worauf von neuem der Prozess der Anreicherung beginnen kann und erneut ein Sättigungsniveau erreicht wird. Dieses Verhalten kann somit mit einem dynamischen Gleichgewicht verglichen werden.

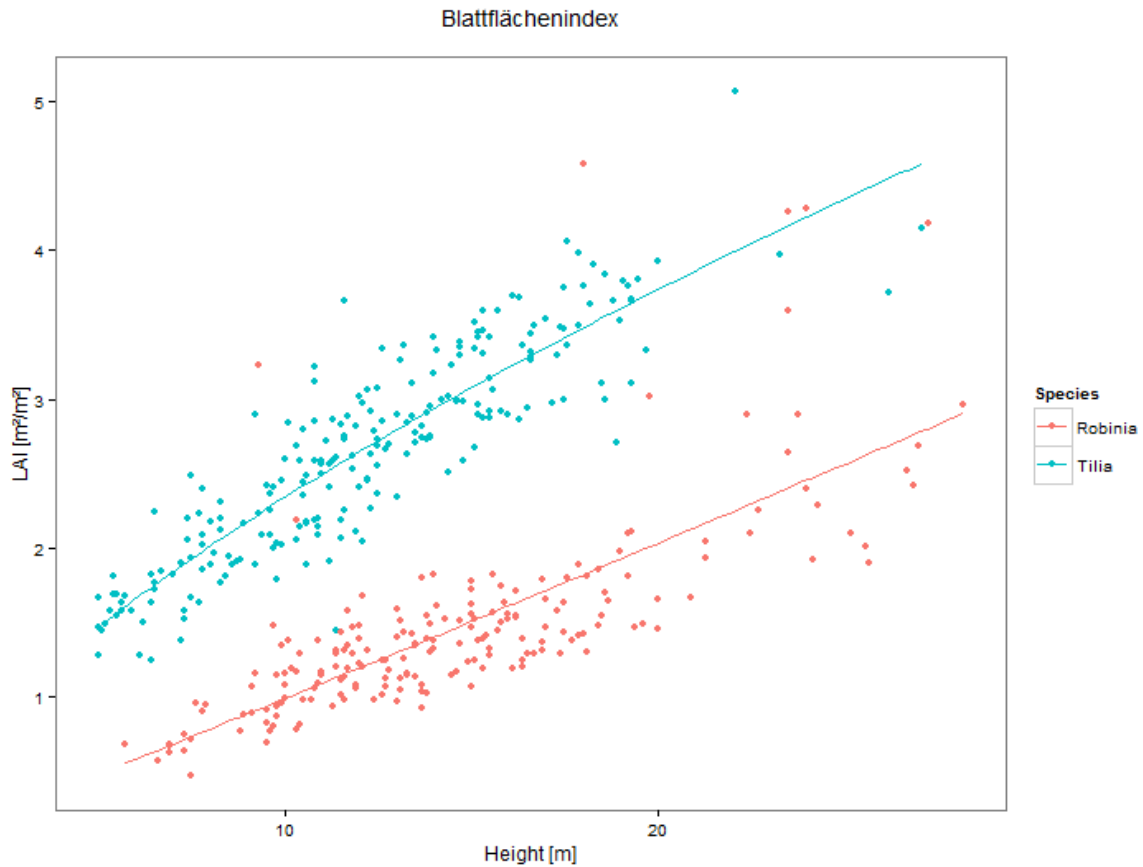
## 2.2.3.2 Biotische Faktoren

### 2.2.3.2.1 Größe der Blatt/Nadelfläche

Da die Blätter /Nadeln des Baumes die Organe mit der größten Gesamtoberfläche des Baumkörpers darstellen, ist ihre gemeinsame Oberflächengröße auch für die Filterleistung des Baumes von erheblicher Bedeutung. So spricht sich zum Beispiel Popek et al. 2015 dafür aus, dass größere Kronenflächen mehr Feinstaub aufnehmen können, als kleine (Popek et al.; 2015). In Ergänzung dazu stellen auch Pyatt und Haywood fest, dass die Baumgröße ein wichtiger Parameter für die GesamtfILTERleistung von Baumindividuen ist (Pyatt und Haywood, 1989) (Abb. 24, 25).

Ein Wert, mit welchem die Blattfläche eines Baumes abgeschätzt und mit den Blattflächen anderer Bäume verglichen werden kann, ist der Blattflächenindex (leaf area index = LAI). Er symbolisiert für Laubbäume die einseitige Blattfläche im Verhältnis zu der, vom Baum überschatteten Grundfläche und für Nadelbäume die projizierte Nadelfläche im Verhältnis zu der vom Baum überschatteten Grundfläche (Breuer; 2003; LAI). Der LAI wird in der Einheit ( $m^2/m^2$ ) erfasst, jedoch meist ohne Einheit, als eine Kennzahl angegeben. Neben dem LAI wird in der englischsprachigen Fachliteratur für die Beschreibung von Verhältnismäßigkeiten zwischen Kroneneigenschaften und Filtereffizienz auch der Öfteren der Kronendeckungsgrad (crown density = CD) angegeben. Der Kronendeckungsgrad kann für die Ermittlung der, in einer Krone vorhandenen Biomasse, auch eine wichtige Kennzahl sein. In der recherchierten englischsprachigen Literatur, wird der Kronendeckungsgrad (crown density = CD) hierbei als der Anteil des gesamt in die Krone einstrahlenden Lichtes definiert, der durch die Pflanzenmaterie wie Blätter und Äste (lebend und abgestorben) davon abgehalten wird, die Bodenoberfläche zu erreichen (USDA; 2016). Der Kronendeckungsgrad wird in Prozent angegeben.

Da der Blattflächenindex (LAI) mit steigender Höhe des Baumes stetig zunimmt, kann geschätzt werden, dass die Filterleistung aufgrund der größer werdenden Blattfläche, mit wachsender Baumgröße proportional mitwächst (Abb. 24).

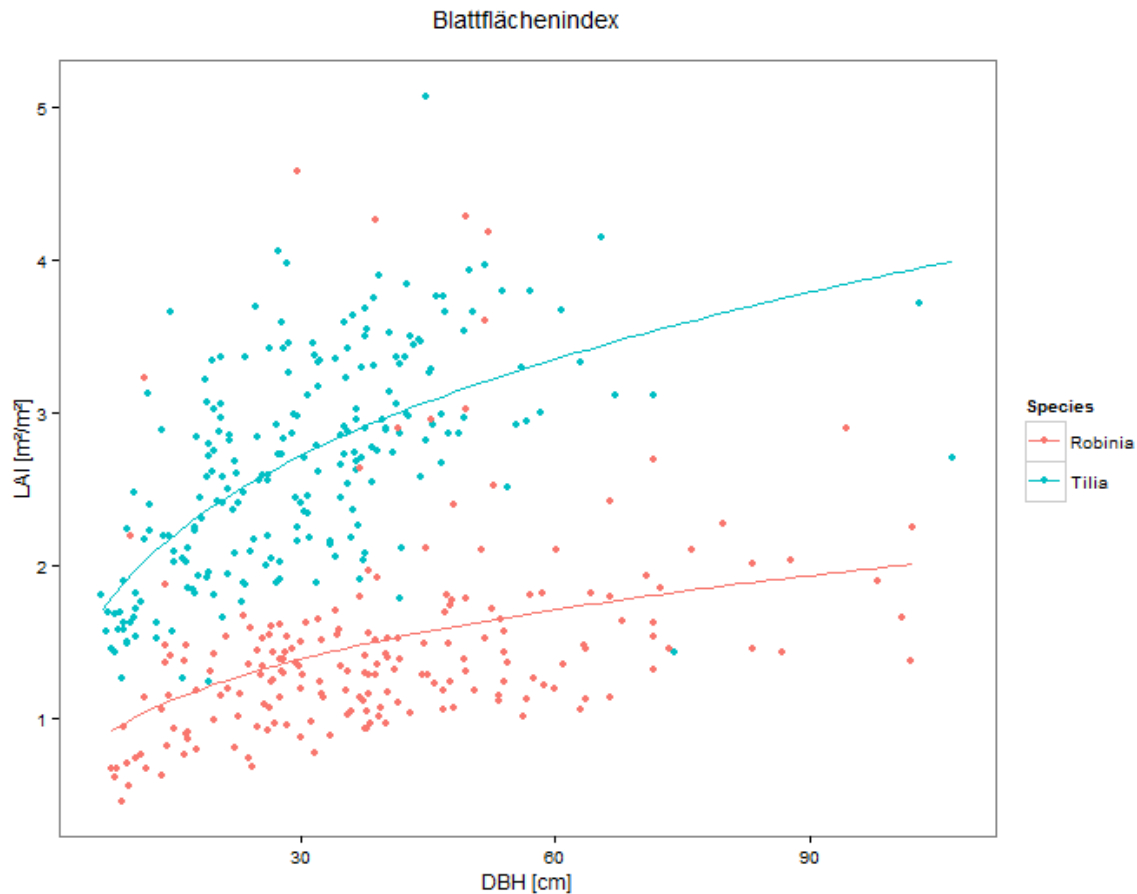


**Abbildung 24. Korrelation zwischen Baum Höhe und LAI**

Stadtbäume (*Tilia cordata* und *Robinia pseudoacacia*) aus München und Würzburg von:  
(Moser et al. 2015 )

Da mit steigender Höhe des Baumes auch der BHD des Baumes mitwächst, kann weiter auch eine Korrelation zwischen BHD und LAI sichtbar gemacht werden (Abb. 25). Da der LAI als eine Kenngröße der Blattfläche, in direktem Zusammenhang mit der möglichen Depositionsmenge an Feinstaub steht, kann weiter eine Korrelation zwischen BHD und Filterleistung des Baumes vermutet werden.





**Abbildung 25. Korrelation zwischen BHD (DBH) und LAI**

Stadtbäume (*Tilia cordata* und *Robinia pseudoacacia*) aus München und Würzburg von:  
(Moser et al 2015)

Die aufgestellten Hypothesen, dass BHD und LAI in Zusammenhang mit der Filterleistung von Bäumen stehen, werden auch im Kreise der wissenschaftlichen Fachliteratur geteilt.

So bestätigt zum Beispiel eine Studie aus China (Peking), in der die Struktur (BHD; LAI; CD) verschiedener Grünstreifen auf ihre Feinstaubfilterkapazität geprüft wurden, dass BHD, LAI und CD (Kronendeckungsgrad) wichtige Faktoren in der Bestimmung der Filterleistung von Beständen und Einzelbäumen darstellen und mit steigendem LAI, CD und BHD, die Filterkapazität von Bäumen zunimmt. Liu beobachtet so einen Spearmans Rangkorrelationskoeffizient ( $\rho = Rho$ ) von  $p = 0,691$ , für den Zusammenhang zwischen LAI und Filterwirkung und für den Kronendeckungsgrad (CD) einen Zusammenhang von  $p = 0,773$ . Der Spearmans Rangkorrelationskoeffizient für die Korrelation zwischen BHD und Filterwirkung schließlich ist  $p = 0,621$ . Liu stellt darüber hinaus fest, dass die

Filterwerte für die Monate, in denen am meisten Belaubung vorhanden ist (Sommer), deutlich höher sind, als die Filterwerte der Monate mit weniger Belaubung (Frühjahr, Herbst, Winter). Liu schließt in seiner Studie, dass die Ausprägung und Größe der Krone (hier die Kenngrößen: LAI; Kronendeckungsgrad) die wichtigsten Parameter bei der Bestimmung der Feinstaubfilterleistung sind (Liu et al.; 2015).

Ein ganz ähnliches Ergebnis beobachten auch Hirabayashi et al., in einer Studie aus den USA, in der an der Weiterentwicklung eines Computerprogramms (I – Trees) gearbeitet wird, dass der Erfassung von positiven Umwelteffekten von Stadtbäumen dient. So beobachten Hirabayashi et al., dass die Feinstaubdepositionsgeschwindigkeiten von den untersuchten Grünflächen stets mit steigendem LAI mitwachsen und somit auch eine Korrelation zwischen Baumgröße (BHD) und Filterwirkung besteht (Hirabayashi et al.; 2014).

Neben der Gesamtblattfläche und Größe der Belaubung, ist jedoch auch die Position der Belaubung und der Kronenansatz für die Filterleistung von Bäumen entscheidend, da in direkter Nähe zu Feinstaubquellen (z.B.: auf Auspuff Höhe), erhöhte Feinstaubbelastungen auftreten als in größeren Höhen. So stellen Mitchel und Maher fest, dass die auf dem Baum abgelagerte Feinstaubmenge auf einer Höhe von 0,3 Metern um einen Faktor von 100 größer ist, als die abgelagerten Feinstaubmengen auf einer Höhe von 1,5 bis 2 Metern. Weiter erkennen Hofmann et al. in einer Studie von 2013, dass der untere Bereich der Krone (ca. 5 Meter) stets deutlich höher mit Feinstaub belastet ist als der höher gelegenen Bereiche der Krone (ca. 10 Meter) (Hofman et al.; 2013). Von diesen Ergebnissen berichten überdies auch Badrulla et al., die in ihrer Studie auf 1 Meter Baumhöhe die größten Feinstaubmengen und mit zunehmender Höhe abnehmende Werte beobachten (Badrulla et al.; 2014). Stadtbäume mit einem niedrigen Kronenansatz oder Ästen im Stammbereich (sogenannten Wasserreißern) können somit durch die hohen Feinstaubkonzentrationen in Bodennähe große Partikelmengen filtern und einen wichtigen Beitrag zur Feinstaubreduktion in einem, für den Menschen sehr wichtigen Bereich, leisten (Kopfhöhe).

Insgesamt ist zu erkennen, dass die Filterfähigkeit eines Stadtbaumes mit steigender Gesamtblattfläche, als die, hauptsächlich für die Deposition zur Verfügung stehende Oberfläche, steigt und somit auch mit den Kennzahlen: Blattflächenindex (LAI) und Kronendichte (CD) zunimmt. Neben der Größe der Gesamtblattfläche ist für die, für den

Menschen wichtige Filterfähigkeit von Feinstäuben, jedoch auch die Position der Belaubung und der entsprechende Kronenansatz, von Bedeutung.

### 2.2.3.2.2 Feinheit der Blätter und Nadeln

Neben der Größe der gesamten Blattoberfläche (Vergleichskennzahlen: BHD, LAI und CD), ist für die Filterleistung von Bäumen jedoch auch die Feinheit der Blätter und Nadeln (Kronenarchitektur) von großer Bedeutung. So stellen zum Beispiel Song et al. fest, dass die Baumart *Pinus tabulaeformis* auf der Ebene des gesamten Baumes betrachtet ( $\mu\text{g}/\text{tree}$ ), besonders viel Feinstaub filtert, während auf der Ebene der einzelnen Blätter ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), diese Baumart auffallend wenig Feinstaubdeposition zeigt. Dem gegenüber weist *Juniperus formosana* eine, auf der Blattebene betrachtet besonders große Filterleistung auf, während *J. formosana* bei der Betrachtung der gesamten Baumebene kleinere Filterwerte als *Pinus tabulaeformis* erkennbar werden lässt. Song führt die besonders große Filterleistung von *Pinus tabulaeformis* auf dessen deutlich größere Gesamtblattfläche zurück. Die hohe Filterleistung von *J. formosana* auf der Blattebene hingegen begründen Song et al. mit einer günstigeren (feineren, dichterem) Kronenarchitektur (Song et al.; 2015).

In Anlehnung an diese Ergebnisse ist allgemein festzustellen, dass kleine Blätter und speziell die sehr fein strukturierten Nadelblätter, eine größere Filterleistung aufweisen, als Laubblätter. So stellen Beckett et al. 2000b in einer Studie fest, dass Koniferen (Bsp. Kiefern, Zypressen), aufgrund ihrer feinstrukturiert angeordneten Blattflächen, die höchsten Filterleistungen zeigen (Beckett et al.; 2000b). Weiter erwähnen auch Yang et al. in einer Studie, in der 100 Baumarten durch Kategorisierung ihrer Eigenschaften bezüglich der Feinstaubfilterung, auf ihre Eignung zum Einsatz in Städten untersucht wurden fest, dass sowohl die Blattform und -struktur, als auch die Blattgröße wichtige Merkmale bei der Beurteilung der Filtereffizienz sind. Hierbei bewerten Yang et al. kleine und strukturreiche Blätter höher, als große und ungegliederte Blattflächen (Yang et al; 2015). Darüber hinaus nennen Räsänen et al. die Blatt/Nadelgröße als wichtigstes Kriterium beim Vergleich von Filterwerten zwischen Koniferen und Angiospermen. In ihrer Studie über die Filtereffizienz von verschiedenen Baumarten, stellen Räsänen et al. fest, dass *Pinus sylvestris* deutlich besser abschneidet als *Tilia vulgaris*, *Betula pendula*

und *Betula pubescence*. Das gute Ergebnis von *Pinus sylvestris* führen auch Räsänen et al. auf die feinere Blattstruktur der Koniferenarten zurück (Räsänen et al.; 2013). Weiter berichten Thao-Nguyen et al. in einer 2014 veröffentlichten Arbeit davon, dass mit steigenden Blattgrößen die Filtermenge an Feinstaub pro cm<sup>2</sup> Blattfläche abnimmt. Was somit auch wieder bedeutet, dass kleine und feine Blattflächen eine größere Filterkapazität aufweisen, als einheitlich große Blätter (Thao-Nguyen et al.; 2014). Demgegenüber kann 2012 Saebo et al. in einer Studie keinen besonders starken Zusammenhang zwischen Blattgröße und Filterkapazität erkennen. So ergibt seine Untersuchung für die Korrelation zwischen Feinstaubmenge und Blattgröße statistische Werte von ( $P \leq 0,49$ ) (Saebo et al.; 2012).

In einer Studie von 2003 jedoch, erkennen Freer-Smith et al. wieder einen Zusammenhang zwischen Blattgröße und Filterleistung. In dieser Untersuchung kommen sie zu dem Ergebnis, dass Koniferen eine deutlich größere Depositionsgeschwindigkeit und Filtereffizienz aufweisen als Angiospermen. Dies führen Freer-Smith et al. zum einen darauf zurück, dass Koniferen mit vielen kleinen Nadeln insgesamt gesehen größere Oberflächen aufweisen, als Angiospermen mit großen Blättern und zum anderen darauf, dass die Kronenarchitektur der Koniferen durch die kleineren und dichten Nadeln auch struktureicher ist, als die der angiospermen Kronen und somit günstigere aerodynamische Depositions- und Filtervoraussetzungen gegeben sind (Freer-Smith et al.; 2004).

Eine Studie, die ebenfalls diese These stützt wurde 2011 von Dzierzanowski et al. veröffentlicht. In ihrer Untersuchung stellen Dzierzanowski et al. fest, dass Sträucher (*Physocarpus opulifolius* und *Spiraea japonica*) bei einem Vergleich der Feinstaubfilterwerte pro cm<sup>2</sup> Blattfläche mit Bäumen (*Platanus hispanica*, *Fraxinus excelsior*, *Acer campestre*) sehr gut abschneiden. Hierbei stellt sich *Spiraea japonica* sogar als insgesamt effektivste Art dar. Dzierzanowski et al. führen das gute Abschneiden des Strauches ebenfalls auf die dichte Belaubung des Strauches mit kleinen Blättern zurück (Dzierzanowski; 2011). Schließlich zeigt auch eine Untersuchung von Przybysz et al., dass bei einem Vergleich von drei immergrünen Pflanzenarten (*Pinus sylvestris*, *hedera helix*, *Taxus baccata*), *Pinus sylvestris*, sowohl in stark, als auch in schwach verschmutzten Gebieten, die höchste Feinstaubfilterleistung aufweist. Wie die bereits genannten Autoren führen auch Przybysz et al. dieses Ergebnis auf die besonders

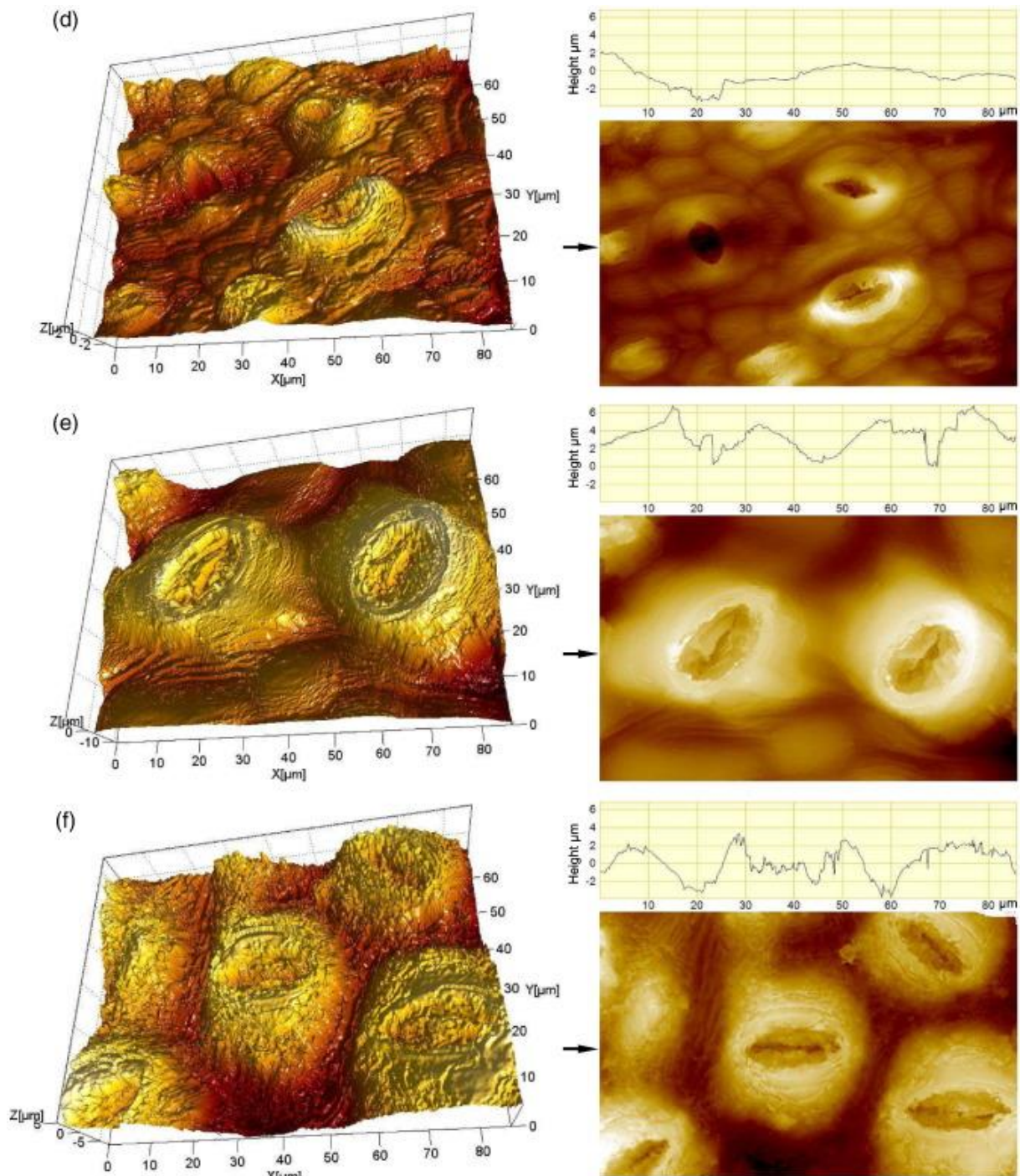
feine, strukturreiche und somit Luftturbulenzen und Deposition begünstigende, Blattflächengestaltung von *Pinus sylvestris* zurück (Pryzbysz et al.; 2014).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die recherchierten Studien feine und strukturreiche Belaubung, für die Bindung von Feinstäuben als besonders geeignet einstufen. Hierbei stellen die meisten Autoren fest, dass bei identischer Gesamtblattfläche, zahlreiche und feine Laubblätter einen stärkeren Filtereffekt zeigen, als wenige und dafür große Laubblätter. Die besonders feinen und kleinräumigen Koniferen Nadeln weisen jedoch im Vergleich zu Laubblättern noch eine deutlich größere Filterleistung auf. Diesen Effekt führen die meisten Autoren auf erhöhte kleinräumige Turbulenzen an Bäumen mit vielfältiger Kronenarchitektur zurück, die die Deposition von Feinstäuben begünstigen.

### 2.2.3.2.3 Struktur der Blattoberfläche

Für die Deposition von Partikeln auf der direkten Blattoberfläche ist neben den abiotischen Faktoren und den bisher genannten biotischen Faktoren, auch die Oberflächenstruktur des Blattes von großer Bedeutung. In einer Literaturrecherche stellen Beckett et al. 1998 fest, dass die Feinstaubfiltereffektivität im Allgemeinen an den Bäumen besonders hoch ist, deren Blattflächen rau oder klebrig sind (Beckett et al., 1998). Doch dieser Zusammenhang kann nicht in allen Studien bestätigt werden, wie es eine Untersuchung von Saebo et al. zeigt. Kann diese Studie zwar einen Zusammenhang zwischen der Haardichte der Blätter und der gefilterten Feinstaubmenge herstellen, so lässt der Datensatz jedoch keine deutliche Korrelation zwischen Grad der Oberflächenstruktur und Feinstaubfiltermenge erkennen (Saebo et al., 2012). Dem gegenüber, können Pyatt und Haywood eine Verbindung zwischen Oberflächenstruktur und Filtereffizienz feststellen. In ihrer Studie, stellen sie nämlich bei einem Vergleich von unterschiedlichen Vegetationsoberflächen fest, dass Blätter mit rauen und strukturierten Oberflächen bei der Feinstaubfilterung effektiver sind, als glatte Blattflächen (Pyatt und Haywood, 1989). Für die Oberflächenrauigkeit von Bedeutung sind hierbei auch die, auf dem Blatt etwas erhöht positionierten Stomata (Abb. 26).

So berichten Burkhardt et al. in einer Veröffentlichung davon, dass bei Koniferennadeln, die in einem Windtunnel besonders feinem Feinstaub (ca. 0,5 µm) ausgesetzt wurden, vermehrt Partikelablagerungen, um die, auf der Blattoberfläche erhöht gelegenen Spaltöffnungen der Stomata, erkennbar sind (Burkhardt et al., 1995). Auch Babaoglu-Aydas et al. berichten, in einer Studie über die Ablagerung von Schwermetallen auf Pflanzen von diesem Effekt. So stellen sie fest, dass auf der gesamten Blattfläche von *Alyssum corsicum* (Halbstrauchgewächs) mit die höchsten Ablagerung von Nickel an den etwas herausragenden Stomata, gefunden werden konnten (Babaoglu-Aydas; et al., 2013). Dieses Phänomen beschreiben auch Zhang et al. in einer Studie aus China, in der auch sie feststellen, dass die höchsten Partikelansammlungen, um die, aus der Blattfläche erhöhten Stomata, vorherrschen. Weiter erkennen Zhang et al in ihrer Studie auch den bereits erwähnten generellen Zusammenhang, dass Baumarten mit einer rauen Oberflächenstruktur deutlich mehr Feinstaub akkumulieren, als Bäume mit einer glatten und unstrukturierten Oberfläche. Die Untersuchung lässt weiter einen Zusammenhang zwischen Grad der Verschmutzung der Umgebungsluft und Ausprägung der Blattstruktur erkennen. So beschreiben Zhang et al., dass Individuen der gleichen Baumart in stärker verschmutzten Umgebungen eine rauer ausgeprägte Oberfläche aufwiesen, als bei nur leicht verunreinigten Umgebungsbedingungen (Zhang et al, 2015,).



**Abbildung 26. Oberflächenrauigkeit durch Stomata**

Links: Dreidimensionale Oberflächenansicht und Rechts: Höhenprofil der Blattoberfläche von *Ulmus pumila* (abaxial) (Aus: Wang et al., 2015, S. 428)

Weiter berichten Mo et al. 2015 im Rahmen einer, in Peking durchgeführten Studie, von Differenzen in der Feinstaubfilterung bei Bäumen, die auf unterschiedliche Oberflächenstrukturen ihrer Blätter zurückzuführen sind. Hierbei stellen sie fest, dass

sich die größten Mengen an Feinstaub stets in den Rillen und Vertiefungen der Blattflächen akkumulieren (Mo et al., 2015). Ähnliches berichten auch Tomasevic et al., in einer, in Belgrad durchgeführten Studie, stellen Sie fest, dass der Feinstaub nicht gleichmäßig auf der gesamten Blattfläche verteilt ist, sondern gehäuft entlang der Blattadern an Blattober- und unterseiten auftritt (Tomasevic et al.; 2005).

Überdies berichten auch Freer-Smith et al. von Unterschieden bei der Filterung von Feinstaub (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, UFP), die auf die Rauheit und Oberflächenstruktur der Blätter zurückzuführen sind. So zeigen ihre, in England durchgeführte Studie, dass *Sorbus aria* eine deutlich größere Filtereffektivität aufweist, als *Populus deltoids x trichocarpa*. Freer-Smith et al führen diesen Unterschied ebenfalls auf die morphologischen Blattunterschiede zurück und verweisen darauf, dass die einheitlich, glatten Oberflächen der Blätter von zum Beispiel *Populus deltoids x trichocarpa*, dazu führen, dass antransportierte Partikel in einem, bei diesen glatten Blättern auftretenden Luftstrom, um die Blattfläche herum fliegen, ohne darauf abgelagert zu werden. Wohingegen zum Beispiel *Sorbus aria* durch seine rauere Blattoberfläche, die diese Baumart speziell auf der Blattunterseite (abaxial) aufweist, eine erheblich größere Filtereffizienz zeigt (Beckett et al., 2000a). Von besonders rauen Oberflächenstrukturen der Blattunterseiten (abaxial), berichten auch Wang et al. in einer 2015 veröffentlichten Studie, in der drei Baumarten bezüglich ihrer Filterleistung verglichen werden, kommen sie zu dem Ergebnis, dass die Oberflächenstruktur bei allen untersuchten Baumarten (*Ulmus pumila*, *Salix babylonica*, *Gynkgo biloba*) auf der Blattunterseite stets rauer ist als auf der Blattoberseite (Wang et al., 2015). Ferner berichten Brakke et al. in ihrer Studie über die Lichtreflexion von Blattober- und unterseiten, dass die abaxialen Blätter von Angiospermen stets eine rauere Struktur aufweisen als die adaxialen Blätter (Brakke et al., 1993).

Trotz der höheren Strukturvielfalt der abaxialen Oberfläche im Verhältnis zu den adaxialen Blattflächen, sind jedoch hohe Feinstaubfiltermengen der Blattunterseite untypisch, da der trocken abgelagerte- (durch die Luft), sowie der feucht niedergeschlagene Feinstaub (durch Regenauswaschung der Luft), in seinem Depositionsvorgang durch die Atmosphäre, durch die Schwerkraft bewegt, meist von oben nach unten sinkt, somit zuerst auf die Blattoberseite (adaxial) trifft und sich dort, trotz der weniger rauen Oberfläche als auf der abaxialen Seite der Blätter, verstärkt ablagert.



Diesbezüglich berichten Wang et al in ihrer 2015 veröffentlichten Studie von Filterwerten der abaxialen Blattflächen von 3% - 35% des gesamten Filterwertes (Wang et al.; 2015). Und auch in einer früheren veröffentlichten Studie von 2006, beobachten Wang et al., dass die Filtermenge der Blattunterseite nur etwa 17 % der gesamt, vom Blatt gefilterten Menge, ausmacht (Wang et al., 2006). Weiter erkennen auch Zampieri et al. in ihrer Studie aus Brasilien, dass die Blattoberseiten (adaxial), von *Tibouchina granulosa* (eine Strauchpflanze der Familie Melastomataceae), sogar 4,5 mal größere Feinstaubfilterwerte aufweist, als die Blattunterseiten (abaxial) (Zampieri et al., 2013). Auch Tomasevic et al. beschreiben in ihrer, bereits etwas weiter oben erwähnten Studie, in der zwei Laubbäume in Belgrad miteinander verglichen wurden, dass die höheren Feinstaubwerte bei beiden Bäumen (*Aesculus hippocastanum* und *Corulus colurna*) an den Blattoberseiten (adaxial) gemessen wurden (Tomasevic et al.; 2005).

Neben den bisher eher quantitativen Ergebnissen, macht 1975 Chamberlain jedoch auch eine qualitative Aussage. So macht Chamberlain in seinen Untersuchungen die Beobachtung, dass die Mikrostruktur des Blattes in besonderer Weise Einfluss auf die Aufnahme der feinsten Fraktionen des Feinstaubes an Pflanzenoberflächen hat (Chamberlain; 1975)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Oberflächenstruktur des Blattes, ein wichtiger Faktor der Feinstaubdeposition von Blättern/ Nadeln ist. Strukturreiche Oberflächen können hierbei vermehrt Partikel aufnehmen, als glatte und unstrukturierte Flächen. Besonders für feine Partikel ist das Vorhandensein von Oberflächenstruktur von Bedeutung.

#### 2.2.3.2.4 Haardichte

Neben der Oberflächenbeschaffenheit der Blätter spielt bei der Feinstaubfiltereffizienz auch die Behaarung der Blätter eine wichtige Rolle. Blatthaare (Trichome) gehören zum primären Abschlussgewebe von Pflanzen. Sie können in ihrer Form, Größe und Länge stark variieren. Meist nimmt die Anzahl der, auf dem Blatt befindlichen Haare mit der Entwicklung des Blattes ab, wobei das Blatt zunehmend verkahlt (Bsp.: Gattung *Fagus*, Gattung *Platanus*). Bei anderen Arten bleibt die Behaarung jedoch auf der

Blattunterseite erhalten (Gattung *Populus*) oder findet seine Überreste entlang der Blattadern (auch hier meist auf der Blattunterseite), wie dies zum Beispiel bei Arten der Gattung *Tilia* und *Alnus* der Fall ist (P. Schütt; 1978). Blatthaare (Trichome) treten vorwiegend bei Angiospermen im Gegensatz zu Koniferen auf, die keine Blatthaare aufweisen. Sie können an Knospen, Zweigausläufern oder Blattflächen auftreten. An Blättern erhöhen die Blatthaare die Oberfläche der Laubblätter erheblich und bilden einen erhöhten zirkulationsberuhigten Bereich in Nähe der Blattoberfläche (Laminare Grenzschicht) (Von Sengbusch; 2004). All dies hat Auswirkungen auf die Eigenschaften der Blätter, wenn sie als Depositionsflächen für Partikel fungieren. So beobachten zum Beispiel Saebo et al. eine Korrelation zwischen Haardichte und der gefilterten Feinstaubmenge (Saebo et al.; 2012). Auch Thao-Nguyen et al berichten 2014, in einer Studie aus Peking, in der vier Laubbaumarten miteinander verglichen wurden, von einer Korrelation zwischen Feinstaubfiltermenge und Haardichte der Blattfläche. Besonders stark waren hierbei die Zusammenhänge von speziell der größten und der mittleren betrachteten Feinstaubfraktion (in diesem Fall: 100- 10 $\mu$ m und 10-3 $\mu$ m) und der deponierten Menge des Feinstaubes. Weiter führen auch Beckett et al. 2000a in einer Studie, in der fünf verschiedene Baumarten miteinander verglichen werden, hohe Filterwerte der Baumart *Sorbus aria* im Bereich der Feinstaubfraktion PM10 auf die hohe Dichte von Haaren auf der Blattunterseite zurück (Beckett et al.; 2000a). Chamberlain und Little behandeln in ihrer ausführlichen Literaturrecherche ebenfalls den Zusammenhang von Filterwerten und Haardichte auf der Blattoberfläche. Hierbei erwähnen sie Ergebnisse einer Studie von Tauber, der bei einem Vergleich der Filtereffizienz von verschiedenen Bäumen auf beharrten Zweigen der Gattung *Sorbus*, etwa 40000 Pollen Sporen auffand, wohingegen er auf eher glatten und unbehaarten Zweigen der Gattung *Pendula*, nur einige hundert Pollen Sporen ausmachen konnte (Tauber; 1967). Weiter erwähnen Chamberlain und Little eine Studie von Roberts et al, die die Konzentration von Blei an Bäumen testet, die in der näheren Umgebung einer industriellen Bleiquelle angesiedelt sind. Hierbei beobachten Roberts et al Werte, die an den Blättern behaarter Bäume der Gattung *Betula*, fünf mal höhere Bleimengen aufweisen, als die Werte von unbehaarten Blättern der Gattung *Acer* (Roberts et al.; 1975). Dem gegenüber stellen Chamberlain und Little eine Studie von White und Turner, in der verschiedene Baumarten unter Einfluss von NaCl Tropfen (in Wasser gelöst), auf ihre Filterleistung hin untersucht werden. Hierbei berichten White und Turner davon, dass *Corylus avellana*, eine Baumart mit vielen Haaren auf der Blattfläche, am wenigsten

effizient die NaCl Tröpfchen aufnimmt. Am effizientesten stellen sich in dieser Untersuchung hingegen die Baumarten heraus, die keine oder wenige Haare auf der Blattfläche aufweisen. Diese beiden Baumarten sind *Fraxinus excelsior* und *Betula pendula* (White und Turner; 1970). Chamberlain und Little stellen abschließend die Vermutung auf, dass Haare an der Blattoberfläche dazu führen, dass Feinstaub in feuchter Form (wie NaCl Tropfen in Niederschlägen oder in Nebel); weniger effizient aufgenommen werden kann und eher durch die Harre davon abgehalten wird auf die unmittelbare Blattoberfläche zu gelangen, sowie sich dort abzusetzen. Für die Fangeffizienz von trockenen Partikeln, jedoch sehen Chamberlain und Little in Haaren einen großen Vorteil, weil diese dazu führen, dass wenn der Partikel einmal die, durch die Haare größer werdende laminare Grenzschicht, der Blattoberfläche durchdrungen hat, dieser nicht mehr so leicht von Außeneinflüssen wiederaufgewirbelt werden kann (weniger bounce-off) (Chamberlain und Little; 1981).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass Haare an Blättern (Trichome), zum einen die Oberfläche des Blattes vergrößern, zum anderen jedoch auch die laminare Grenzschicht der Blattoberflächen erhöhen. Somit ist der Widerstand für Partikel, sich auf die Blattfläche abzusetzen größer, jedoch können die Partikel, wenn sie einmal in die laminare Grenzschicht aufgenommen wurden, nicht mehr in großen Mengen von ihr entfernt werden, da der annähernd turbulenzfreie Raum innerhalb der laminaren Grenzschicht die Partikel von neuer Aufwirbelung, durch Einflüsse von außen (wie zum Bsp. Wind) schützt.

### 2.2.3.2.5 Anhaftungseigenschaften von Blattflächen

Neben den Haaren auf der Pflanzenoberfläche, sind auch die Anhaftungseigenschaften der Blattflächen beim Depositionsvorgang von Partikeln ein sehr wichtiger Parameter. Die Anhaftungseigenschaften von Blattflächen können neben der vorhandenen Nektarmenge auf der Blattfläche auch von der Blattfeuchte, durch Tau, Nebel oder Regen mitbestimmt werden.

Einer der ersten Autoren, der den Zusammenhang zwischen klebrigen Blattoberfläche und verstärkter Partikelablagerung wissenschaftlich beobachtete, ist Tauber. Bereits

1967, spricht er sich in einer Untersuchung über Pollenflüge bei verschiedenen Baumarten dafür aus, dass klebrige Blattflächen mehr dazu fähig sind, Partikel auf ihrer Blattoberfläche zu binden, als glatte Blattflächen (Tauber; 1967). Auch Gregory stellt 1973 in seinem Standardwerk: „The Mikrobiology of the Atmosphere“ fest, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Partikel auf einer Oberfläche gebunden werden kann, stark zunimmt, wenn die Blattflächen klebrige Eigenschaften aufweisen. In seinem Windtunnel-Experiment, setzt Gregory Lycopodium (Bärlapp) Sporen zum einen Blattflächen von *Vicia faba* (Ackerbohne) und *Solanum tuberosum* (Kartoffel) und zum anderen, einer präparierten klebrigen Oberfläche aus. Hierbei stellt er fest, dass die Effizienz die 30µm großen Lycopodium Sporen aufzufangen, bei der klebrigen Oberfläche deutlich höher ist, als an den Blattflächen der beiden Feldfrüchte. Die Studie zeigt zudem, dass sich die Differenz von klebenden zu nicht klebenden Oberflächen mit zunehmender Windstärke verstärkt, was sich durch stärkere Abpralleffekte (bounce-off) der nicht klebrigen Oberflächen gegenüber der klebrigen Oberflächen bei zunehmendem Wind, erklären lässt (Gregory; 1973). Zu einer ähnlichen Annahme gelangen 2000 auch Beckett et al., die annehmen, dass für Oberflächen ohne klebrige Eigenschaften, die Abprallwahrscheinlichkeit (bounce-off rate) mit steigendem Wind stetig zunimmt und somit von Oberflächen ohne klebrige Eigenschaften weniger Partikel gebunden werden können, als von Oberflächen mit klebrigen Eigenschaften (Beckett et al.; 2000b). Einige Autoren sehen in der erhöhten Klebrigkeit von Blattflächen, neben der quantitativen erhöhten Filterleistung auch eine Verbindung mit der Filterwirkung für eine bestimmte Partikelgröße.

Während, die Oberflächenstruktur und Rauheit der Blattfläche besonders die Filterleistung der feinen Fraktionen des Feinstaubes ( $\leq$  PM<sub>2,5</sub>) positiv beeinflusst, spielen für die Ablagerung der größeren Feinstaubfraktionen ( $\geq$  PM<sub>10</sub>), die Anhaftungseigenschaften, wie Nektargehalt und Feuchte der Blattfläche vermehrt eine wichtige Rolle.

Dies stellt zum Beispiel Chamberlain bereits 1975 in einer Studie, in der er natürliche Gräser und klebrig präparierte Gräser, bezüglich ihrer Feinstaubfilterleistung von Lycopodium (Bärlapp) Sporen untersucht, fest. In seinem Experiment erkennt er, dass das künstlich klebrig gemachte Gras eine viel höhere Filterleistung für die Lycopodium (Bärlapp) Sporen der Größe 30µm und 90µm ( $>$  PM<sub>10</sub>) zeigt, als das natürliche Gras. Für Lycopodium (Bärlapp) Sporen der Größe 5µm, 2µm und 1µm konnte Chamberlain

jedoch erkennen, dass nun die klebrig präparierten Gräser weniger Feinstaub aufnahmen, als die natürlichen Gräser, die in diesem Größenbereich ( $\leq \text{PM}_{2,5}$ ) durch ihre strukturierte Oberfläche im Vorteil waren (Chamberlain; 1975). Erneut erkennen Chamberlain und Little 1981, den Zusammenhang zwischen Klebrigkeit und erhöhten Filterwerten. In einem Windtunnel-Experiment, bei dem Nadeln der Gattung Pinus, mit klebriger Vaseline präpariert und später Styropor Partikeln der Größen  $2,75\mu\text{m}$ ,  $5\mu\text{m}$  und  $8,5\mu\text{m}$  ausgesetzt wurden, stellen sie so fest, dass die Ergebnisse für die, mit Vaseline klebrig gemachten Kronenflächen, stets eine deutlich höhere Fangeffektivität aufweisen, als unbehandelte Nadeln der gleichen Gattung. Die Werte von Chamberlain und Little zeigen, dass bei gleicher Windstärke ( $u= 5 \text{ ms}^{-1}$ ), jedoch größer werdenden Partikel ( $2,75\mu\text{m}$ ;  $5\mu\text{m}$  und  $8,5\mu\text{m}$ ), das Verhältnis (NS/S = Non Sticky /Sticky) der Depositionsgeschwindigkeiten ( $V_g$  in  $\text{cm s}^{-1}$ ) von klebrig präparierten Pflanzenteilen (NS) und natürlich belassenen Pflanzenteilen (S), mit steigender Partikelgröße zunehmen (Tab. 4). Dies ist damit zu begründen, dass an den unbehandelten (nicht klebenden) Nadeln ein Abpralleffekt (erhöhte bounce-off Effekt) stattfindet, der mit steigender Windgeschwindigkeit und Größe der Partikeldurchmesser zunimmt, wohingegen die, mit Vaseline bestrichenen Nadeln, durch ihre hohe Anheftungskraft so gut wie keine Partikel durch diesen Effekt des Abpralles verlieren (Chamberlain und Little 1981).

**Tabelle 4. Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$  in  $\text{cm s}^{-1}$ ) von Styropor Partikeln**

(A.C. Chamberlain und P. Little, 1981, S. 153)

Particle size ( $\mu\text{m}$ ) Wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ )	2.75		5			8.5	
	2.5	5	1.5	2.5	5	2.5	5
<b>Pine shoots:</b>							
needles	1.0	5.6	1.6	2.6	15	9.6	11.7
stems	0.63	3.2	0.59	0.98	16	6.2	15.5
whole shoots	0.93	5.1	1.5	2.5	15	9.4	12.0
<b>Isolated needles:</b>							
non-sticky	0.74	2.5	1.9	—	13	13	12
sticky	0.94	3.1	2.4	—	64	43	110
ratio NS/S	0.79	0.81	0.79	—	0.20	0.30	0.11
<b>Isolated stems:</b>							
non-sticky	0.73	2.4	1.2	—	14	5.1	13
stickv	0.41	2.5	0.93	—	23	4.8	25
ratio NS/S	1.8	1.0	1.3	—	0.61	1.1	0.52

Neben den erhöhten Anhaftungseigenschaften, die auf hohen Nektargehalt an der Blattoberfläche beruhen, ist jedoch auch die Feuchtigkeit des Blattes für die Anhaftungseigenschaft der Oberfläche und damit für die Deposition von Partikeln und ihren Vorläufergasen, von großer Bedeutung. Diesen Zusammenhang erkennen 1987 Pye et al, die neben rauen Oberflächen, auch nasse Oberflächen, als die Flächen ansehen, auf denen sich Partikel am häufigsten ablagern (Pye et al.; 1987). Während Nektar, als zuckerhaltiges und damit stark bindendes und klebriges Sekret im Allgemeinen nur bei Angiospermen vorkommt, kann diese Einwirkung von Feuchte in Form von Wasser, auch auf der Nadeloberfläche von Koniferen, deren Anhaftungseigenschaften vergrößern. So stellen auch Fowler und Unsworth 1974, speziell für gasförmige Partikelvorläufer wie  $\text{SO}_2$  einen Zusammenhang zwischen Filtereffizienz und Blattfeuchtigkeit fest. In ihrer Studie erkennen Fowler und Unsworth, dass befeuchteter Weizen (*Triticum spec.*) höhere Depositionsgeschwindigkeiten für  $\text{SO}_2$  aufweist als trockene Individuen der gleichen Gattung (Fowler und Unsworth, 1974). Auch Chamberlain bestätigt dieses Ergebnis 1975. In seiner Untersuchung benutzt Chamberlain ebenfalls Weizen (*Triticum spec.*) und stellt fest, dass die, im Windtunnel freigelassenen Lycopodium (Bärlapp) Sporen auf befeuchtetem Weizen die fünffache Fangeffizienz von nicht befeuchteten gleichen Individuen, aufweisen (Chamberlain, 1975). Darüber hinaus berichtet Chamberlain von einer an jungen Sämlingen der Gattung Pinus durchgeführten Studie. Hierbei beobachtet Chamberlain, dass unter Freisetzung von Lycopodium Sporen, die Depositionsgeschwindigkeit an Nadeln des Sämlings, nach Befeuchtung mit  $\text{H}_2\text{O}$ , stark erhöhte Werte aufweisen. Hierbei sind die Depositionswerte an den Nadeln feuchter Pinus Sämlinge achtmal höher, als die Werte von trockenen Sämlingen (Chamberlain; 1975).

Es ist festzustellen, dass hohe Anhaftungseigenschaften der Blattfläche die Partikeldeposition befördern. Eine hohe Anhaftungseigenschaft kann durch Nektar, sowie einen Feuchtfilm nach Regen, Tau oder Nebel, erreicht werden. Die erhöhten Anhaftungseigenschaften bewirken eine reduzierte Wiederaufwirbelung der Partikel und sind für größere Partikel stärker von Bedeutung als für kleine.

## 2.2.3.2.6 Wachsgehalt

Neben der Oberflächenstruktur, der Haardichte und dem Nektargehalt der Blattoberfläche, die für die Ablagerung der Partikel an der direkten Oberfläche des Blattes von großer Bedeutung sind, spielt auch die Eigenschaft der inneren Blattstrukturen, speziell für die dauerhafte Anhaftung und für die Aufnahme eines Partikels in die äußersten Schichten des Blattes, eine bedeutende Rolle. So ist zum Beispiel die Ausprägung der Epicuticularwachse, die der Kuticula aufgelagert sind, für die Erfassung der Filterkapazität des Blattes eine wichtige Größe. Diese Wachse schützen die Pflanze durch ihre hydrophoben Eigenschaften zum einen vor Verdunstung, und durch ihre stark reflektierende Fläche vor Überhitzung, zum anderen dienen sie der Pflanze jedoch auch als Fraß- und Infektionsschutz. Die Epiticularwachse umschließen wie die Kuticula sowohl die Blattober- (axial), als auch die Blattunterseite (abaxial) bei Angiospermen wie Koniferen und umfassen somit das gesamte Blatt, beziehungsweise die gesamte Nadel. (Matyssek et al.; 2010). Beim Depositionsvorgang kann sich ein ablagernder Partikel, nachdem er die Haarschicht durchdrungen hat, entweder auf die epikutikulare Wachsschicht anheften, oder ins Innere dieser Wachsschicht aufgenommen und damit langfristig gebunden werden. Viele Studien beleuchten den Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Epicuticularwachsen auf dem Blatt und der Menge der Partikel, die sich auf oder in diese Wachse abgelagert haben, indem sie die gefilterte Feinstaubmenge in ein Verhältnis zu der Menge an Epicutikularwachsen auf der Blattoberfläche setzen. So stellen beispielsweise A. Saebo et al. in einer Studie, in der sie 22 Baum- und 25 Straucharten miteinander vergleichen fest, dass eine positive Korrelation zwischen der, auf dem Blatt vorhandenen Menge an Wachsen, und der gefilterten Feinstaubmasse vorliegt (Saebo et al.; 2012). Auch Thi Thanh Thao Nguyen et al. verzeichnen in einer Studie, in der acht Stadtbaumarten in Peking bezüglich ihrer Feinstaubfilterleistung verglichen werden, dass der Wachsgehalt der Blätter ein wichtiges Kriterium für die Filterleistung von allen Feinstaubfraktionen ist (Thao-Nguyen et al.; 2014). Auch Popek et al. bestätigen dieses Bild mit einer 2015 veröffentlichten Studie. In ihrer, in Warschau durchgeführten Untersuchung, zeigen Popek et al. nämlich, dass die Wachsmenge an Blättern der Baumart *Tilia cordata* in bedeutender Korrelation zu der gefilterten Feinstaubmenge steht. Die Korrelation bewegt sich hierbei in einem Bereich von  $R = 0,82$  bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha =$

0,01. In ihrer Studie gelangen Popek et al. überdies eine bisher noch nicht erkannte Beziehung zwischen dem Wachsgehalt der Blätter und der gefilterten Feinstaubmenge herzustellen, indem sie feststellen, dass die Wachsmenge nicht nur in Relation zu der Menge an gefiltertem Feinstaub steht, sondern die Wachsmenge auf der Blattfläche sogar mit steigendem Grad der Verschmutzung der Umgebungsluft zunimmt (R. Popek et al.; 2015).

Zu einer, von diesen Ergebnissen abweichenden Ansicht, gelangen Dzierzanowski et al., die in einer zweijährigen Studie vier verschiedene Baumarten in Warschau miteinander vergleichen und keine allgemeine Korrelation zwischen Wachsmenge und Feinstaubmasse erkennen können. In Ihrer Studie gelingt Dzierzanowski et al. lediglich die Beobachtung, einer Korrelation zwischen der Menge an Epicuticularwachsen und der feinsten betrachteten Feinstaubfraktion (in diesem Fall  $0,2 - 2,5 \mu\text{m} = <PM_{2,5}$ ). Diese Korrelation bewegt sich in einem Bereich von  $R= 0,79$  bei  $n=8$  Individuen. Dzierzanowski et al. weisen verstärkt darauf hin, dass für die Filtereffizienz die chemische Zusammensetzung und die Struktur der Wachsschicht von stärkerer Bedeutung seien, als die reine Menge des Wachses (Dzierzanowski et al.; 2011). Zu einem ebenfalls von den drei zuerst genannten Studien abweichenden Ergebnis gelangen in einer früheren Studie von 2013 auch Popek et al.. In dieser früheren Untersuchung, in der sieben verschiedene Baumarten über drei Jahre miteinander verglichen wurden, kommen Popek et al. zu der Annahme, dass es keinen direkten Zusammenhang zwischen Wachsmenge und der gesamt betrachteten Feinstaubfiltermenge für alle Fraktionen gibt. Doch wie Dzierzanowski et al., gelangen es auch Popek et al., für die feinste Fraktion des gefilterten Feinstaubes eine Korrelation zwischen vorhandener Wachsmenge auf der Blattfläche und der feinsten Fraktion des gefilterten Feinstaubes (in diesem Fall  $2,5 - 10 \mu\text{m} = \geq PM_{2,5}$ ), sichtbar zu machen, auch wenn diese Korrelation mit  $R= 0,54$ , bei  $n=8$  Individuen schwach ist. Wie bereits Dzierzanowski et al., betonen auch Popek et al. in diesem Zusammenhang, dass für die Filtereffizienz mehr die Chemie, Struktur und Rauheit der Wachse anstelle ihres reinen Gewichtes, von Bedeutung seien (Popek et al.; 2013). Zu einem sich dieser Ansicht anschließenden Ergebnis gelangen auch Jouraeva et al., die bei dem Vergleich der Baumarten *Tilia x euchlora* und *Pyrus calleryana* feststellen, dass obwohl *Pyrus calleryana* die größere Menge an Wachsen aufweist als *Tilia x euchlora*, die Linde diejenige Baumart ist, die mehr Feinstaub akkumulieren kann. Darüber hinaus



beschreiben Kaupp et al. ein ähnliches Bild, indem sie die Verbindung von Epicuticularwachsmenge und gefiltertem Feinstaub zurückstellen und eher auf einen Zusammenhang zwischen Filtereffizienz und der Struktur und den Bestandteilen der Wachsschicht und der Kuticula verweisen (Kaupp et al.; 2000). Auch Jouraeva et al. schließen mit der Bemerkung, dass noch mehr Forschung über die Chemie und Struktur der Wachse von Nöten ist um noch eindeutigere Aussagen über ihren Beitrag bei der Feinstaubfilterung treffen zu können (Jouraeva et al., 2002).

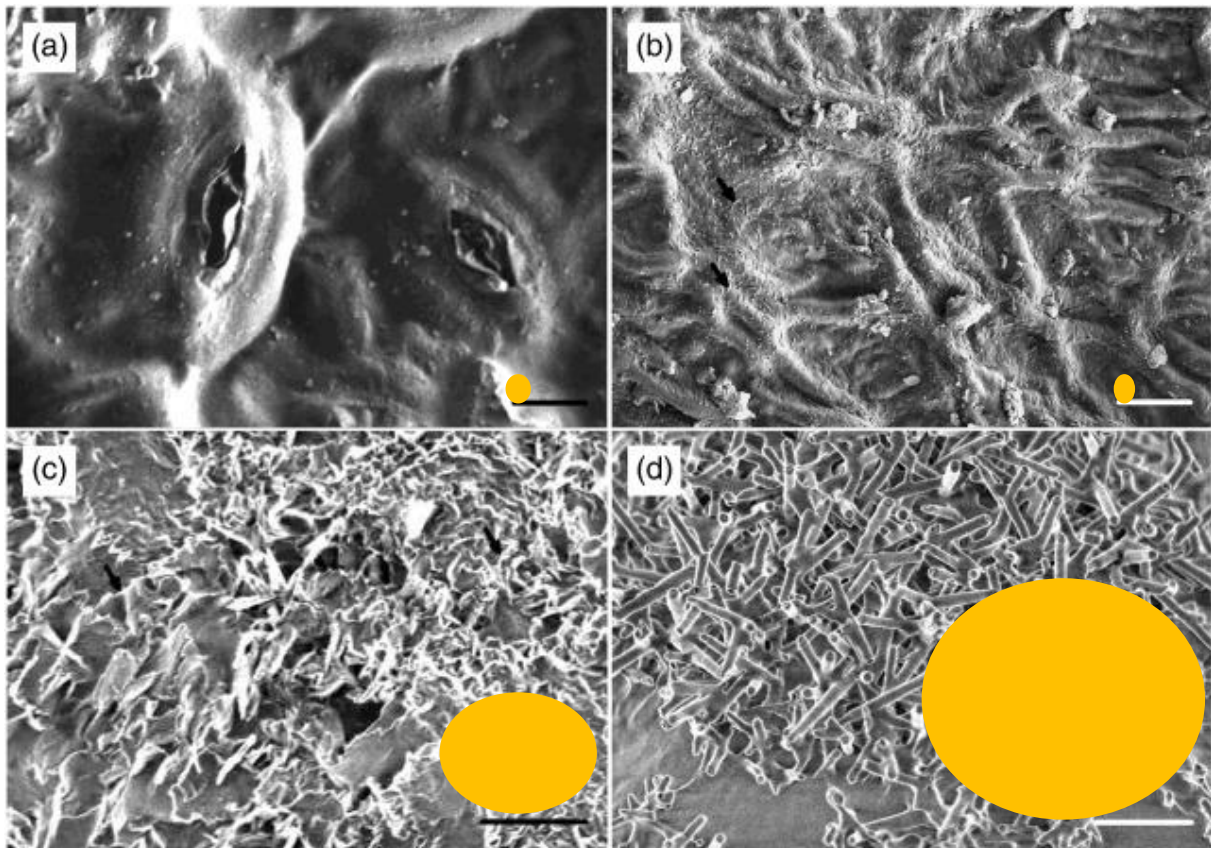
Diesem Aufruf kommen 2015 Wang et al. in einer Studie über die Akkumulierung von Feinstaub auf der Oberfläche von Blättern nach. Für Wang et al. sind bei der Beschreibung der Filtereffizienz eines Blattes die Stärke der Anhaftung zwischen Partikel und Blattoberfläche das entscheidende Kriterium. Diese Kraft resultiert aus der Bindungsstärke, die zwischen den Molekülen der Blattoberfläche und damit zu allererst der Wachsschicht und den Molekülen der Partikel herrscht. Wang erklärt diese Bindungskraft, als ein Produkt, das sich zum einen aus der chemischen Zusammensetzung der sich verbindenden Moleküle von Wachsschicht und Partikeln, und zum anderen aus der, für diese Verbindung zur Verfügung stehenden Kontaktfläche ergibt. Je größer diese Kontaktfläche ist, desto mehr Möglichkeit besteht für die Moleküle, eine Bindung mit der jeweils anderen Grenzfläche einzugehen.

In seiner Untersuchung finden Wang et al. keine besonders starke Korrelation zwischen der Oberflächenrauigkeit der Epicuticularwachse und der Filtereffizienz der Blätter (für *Ulmus pumila*:  $R=0,649$ ; für *Salix babylonica*:  $R=0,393$  und für *Gynkgo biloba*:  $R= 0,380$ ). Diese fehlende Korrelation erklären Wang et al. damit, dass bei einer extrem hoch aufgelösten Betrachtung unter dem Mikroskop (Abb. 1. Bild d.) eine raue Mikrostruktur der Epicuticularwachse auf der Blattoberfläche, die zuvor genannte Kontaktfläche zwischen Partikel und Wachsschicht, - für Partikel der Größe  $PM_{2,5}$  - begrenzt und somit auch die Bindungskraft zwischen Molekülen der Wachsschicht und Molekülen der Partikel verringert wird. Dies führt nun dazu, dass sich die Partikel der Größe  $PM_{2,5}$  und größer nicht langfristig an die Epicuticularwachsschicht anlagern können, sondern verhältnismäßig schnell durch klimatisch Außeneinwirkungen, wie zum Beispiel Wind, wieder von der Blattoberfläche entfernen.

Dem gegenüber jedoch eine, in der Mikrostruktur glatte Oberfläche der Epicuticularwachse (Abb. 27 d), eine größere Kontaktfläche [für Partikel der Größe

PM<sub>2,5</sub>] aufweist und somit stärkere Bindungskräfte zwischen den Molekülen der obersten Wachsicht des Blattes und denen der Partikel ermöglicht (Wang et al.; 2015). Auch Blanusa et al. stehen dieser Auffassung des Zusammenhangs von Struktur der Oberflächen Wachse und Partikelfilterung nahe. So kommen sie ebenfalls in ihrer Studie von 2015 zu der Überzeugung, dass raue Strukturen im Mikrobereich der Epikutikularwachse, zu geringeren Kontaktflächen und zu schwächeren Bindungskräften zwischen Oberflächen der Wachsichten des Blattes und Oberflächen der Partikel, führen (Blanusa et al.; 2015).

Von geringen Kontaktflächen durch Mikrorauheit der Kutikula und Wachsicht, berichten auch Lobis und Kappis et al. Anders als Wang et al. und Blanusa et al, sehen diese Untersuchungen, die Mikrostruktur der Blattflächen, für die Filterung von Feinstaub, jedoch als gut an. Lobis und Kappis et al. berufen sich dabei auf den Selbstreinigungseffekt, mit dem mikrostrukturierte Blattflächen, Feinstäube bei Niederschlägen, effektiv von ihrer Oberfläche abwaschen können (Lotus-Effekt). Lobis und Kappis et al. zeigen auf, dass sich auf den gereinigten Blattflächen wieder verstärkt neue Partikel ablagern können und so erhöhte Filterwerte erreicht werden (Lobis, 2006; Kappis et al.; 2007).



**Abbildung 27. Mikrostruktur der Epicuticularwaxschicht, Kreise entsprechen der Größe eines durchschnittlichen PM<sub>2,5</sub> Partikels**

a) Glatte Wachsfläche von *Ulmus pumila* (abaxial) = Große Kontaktfläche; d) Sehr Raue und Röhrenartige Struktur von *Ginkgo biloba* (abaxial) = Kleine Kontaktfläche; b) Gegeraute Struktur von *Salix babylonica* (adaxial) = Begrenzte Kontaktfläche; c) Gegeraute Struktur von *Salix babylonica* (abaxial) = Begrenzte Kontaktfläche

(Wang et al.; 2015; S. 421)

Insgesamt ist festzuhalten, dass die im Wachs befindliche Menge des Feinstaubes (in-wax pm) im Verhältnis zu den direkt auf der Oberfläche abgelagerten Anteilen des Feinstaubes (surface pm) deutlich geringer ist. So berichten Y. Song et al. bei einer Studie in China von einem Anteil von 23 %, der an und in der Wachsfläche abgelagerten Partikel; R. Popek et al., von einem Anteil zwischen 45 % und 31% und Thao-Nguyen et al., von einem Anteil von 20,1 % bis 37,3 % (Song et al., 2015); (Popek et al., 2015); (Thao-Nguyen et al., 2014). Jedoch gibt es in diesem Verhältnis je nach Baumarten variierend auch Unterschiede, sodass für manche Baumarten auch höhere Feinstaubwerte in der Wachsfläche als außerhalb verzeichnet wurden, wie es

beispielsweise Saebo et al. für *Betula pendula* feststellen konnten (Saebo et al., 2012). Trotz der meist vorhandenen Differenz zwischen den Filteranteilen von direkter Blattoberfläche und den in der Wachsschicht eingelagerten Partikeln, spielt gerade dieser, im Wachs gebundene Anteil, bei der Filterfunktion der Bäume, eine entscheidende Rolle, da bei diesem Anteil durch die guten Hafteigenschaften und den Einschluss in die Wachsschicht keine weitere Aufwirbelung von der Baumoberfläche stattfinden kann und die Partikel somit bis zum Blattabwurf am Baum gebunden sind (Song et al., 2015). R. Popek et al. gehen in ihrer 2015 erschienen Arbeit sogar soweit, nur die im Wachs gebundene Feinstaubmenge als die nachhaltig aus der Luft entfernte und gefilterte, ansehen (R. Popek et al., 2015).

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass den Epikutikularwachsen bei der Filterung von Feinstäuben eine besondere Rolle zukommen, indem sie speziell die feinen Partikel  $< \text{PM}_{2,5}$  effektiv filtern und diese gleichzeitig auf und in ihrer lipophilen Schicht langfristig binden können. Hierbei sind neben der Menge der Epikutikularwachse auch deren chemische Zusammensetzung und Mikrooberflächenstruktur entscheidend. Die Mikrostruktur bewirkt einerseits eine geringere Bindung der Partikel, andererseits jedoch eine Selbstreinigung. Während einige Autoren dies, für die Filterung als nachteilig ansehen, schätzen andere Autoren dies als einen Vorteil bei der Filterung ein.

Anders als es bei der Blattoberfläche (in einem viel größeren Betrachtungsmaßstab, von einigen Zentimetern bis Millimetern) der Fall war, sind nun für die Mikrostruktur der Epikutikularwachse (in einem Maßstab von nur wenigen Mikrometern), raue Oberflächen für die Filtereffizienz nicht nur von Vorteil.

Da gerade die feinste Fraktion des Feinstaubes  $\text{PM}_{2,5}$  und feiner, für die menschliche Gesundheit die gefährlichste ist, sind die verhältnismäßig hohen Filterwerte der Wachsschicht im Bereich der Fraktion  $< \text{PM}_{2,5}$ , sowie die langfristige Bindung in diesen Epicuticularwachsen, wichtig.

## 2.2.3.2.7 Stomata

Als Stomata bezeichnet man die linsenförmigen Spaltöffnungen von Pflanzen, die in der Epidermis (äußerstes Abschlussgewebe) der Blätter und Nadeln angebracht sind. Stomata treten bei Laubbäumen und Sträuchern fast ausschließlich auf der Blattunterseite (abaxial) auf. Auch bei Nadelbäumen treten die Stomata meist auf der Nadelunterseite auf, wobei die Stomata bei Gattungen wie Thuja und Juniperus communis (Wacholder) zum Großteil an der Blattoberseite angelagert sind (P. Schütt et al., 1978). Die Spaltöffnungen der Nadelblätter lagern zudem vermehrt Wachse in ihren Stomata- Vorhöfen ein, was zu typischen weißen Wachsstreifen auf der Nadelunterseite führt. Stomata erreichen auf den Blattflächen bei Bäumen meist eine Anzahl von mehreren Hundert Stück pro mm<sup>2</sup> (Matyssek et al.; 2010). Das flächenmäßiges Auftreten der Stomata macht im Durchschnitt nur etwa 1- 3% der gesamten Blattfläche aus, welche jedoch von großer Bedeutung für die Filterleistung ist (P. Schütt et al., 1978).

Wie bereits erwähnt, spielen die Stomata eine wichtige Rolle in der Struktur und Topographie der Blattoberfläche, was sie zu einem wertvollen Faktor für die Feinstaubdeposition auf der unmittelbaren Blattoberfläche werden lässt (Vgl.: Burkhardt et al., 1995; Zhang et al, 2015; Babaoglu-Aydaz; et al., 2013).

Doch darüber hinaus können die Stomata auch für den Vorgang der Aufnahme von Partikeln ins Pflanzeninnere fungieren. So berichten Thompson et al. in ihrer Studie über die Verträglichkeit von Feinstaub bezüglich der Fotosynthese bei Stadtbäumen und Sträuchern, dass feine Partikel ( $\leq$  PM<sub>2,5</sub>) in die Vorhöfe der Stomata eindringen können (Thompson; 1984). Ricks und Williams bestätigen 1974 diese Auffassung, indem sie beobachten, dass Partikel nicht nur um die Stomata gehäuft auftreten, sondern tatsächlich in die Zwischenräume der Stomata eindringen können und dort dazu beitragen, dass die Schließfähigkeit, des Spaltöffnungsapparates nachlässt (Williams und Ricks; 1974; S. 94). Williams konnte diese Beobachtung bereits schon 1971 in einer Studie an Quercus petraea machen (Williams; 1971).



**Abbildung 28. Partikel um Stomata von *Quercus petraea*  
Lichtmikroskopische Aufnahme (Ricks und Williams, 1974, S. 92)**



**Abbildung 29. Partikel in Stomata von *Quercus petraea*  
Elektronenmikroskopische Aufnahmen (Ricks und Williams, 1974, S. 93)**

Darüber hinaus erwähnen Beckett et al., 1998, dass Blätter mit hoher stomatärer Leitfähigkeit durch ihre erhöhte Transpiration, die Deposition von Partikeln an der Blattoberfläche positiv beeinflussen (Beckett et al.; 1998). Bei dieser Feststellung ist neben den erweiterten Spaltöffnungen, bei Blättern mit hoher stomatärer Leitfähigkeit, auch ein weiterer Mechanismus von Bedeutung. So erklären Tong et al., dass Partikel vom Feuchtfilm - der durch die Wasserdampfabgabe bei der Transpiration um die Spaltöffnungen herum entsteht - verstärkt angezogen werden können. In einem weiteren Schritt können die gelösten Partikel dann über die Stomata auch ins Pflanzeninnere transportiert werden (Tong et al; 1991). Dieser Effekt müsste folglich um die Stomata herum am größten sein, sie sind doch bei der Transpiration die Verbindungsleitungen zwischen Pflanze und Außenluft und somit der erhöhten Luftfeuchte, durch die Transpiration stärker ausgesetzt als die übrigen Blattbereiche. Dieser von Tong et al. beschriebene Mechanismus kann für die wasserlöslichen Partikel von besonderer Bedeutung sein (speziell: Sulfate und Nitrate) (Beckett et al.; 1998).

Chamberlain und Little beschreiben überdies, dass sich besonders feine Partikel, die kleiner als  $1\ \mu\text{m}$  sind, beim Vorgang der Deposition, ähnlich wie Gase (Bsp.:  $\text{SO}_2$ ) verhalten und nach erfolgter Ablagerung auf der Oberfläche in die dort vorhandene Materie hineindiffundieren. Die Art der Bewegung mit der diese feinen Partikel, ähnlich wie Gase, hierbei bewegt werden, nennt man Brownsche Molekularbewegung. Je kleiner Partikel sind, desto größer wird der Anteil, der Brownschen Molekularbewegung an ihrer Gesamtbewegung. Partikel, die sich in diesem Größenspektrum ( $< 1\ \mu\text{m}$ ) an und in Oberflächen ablagern, weisen sehr starke Bindungskräfte auf und können im Regelfall nicht durch Außeneinflüsse wieder von der Blattoberfläche entfernt werden (Chamberlain und Little; 1981).

Neben Partikeln unterschiedlicher Größe (vermehrt kleine), gelangen jedoch auch verstärkt gasförmige Partikelvorläufer, über die Stomata ins Innere der Pflanzen. Sind ihre Diffusionswiderstände bei der Aufnahme über die Stomata doch noch geringer als die, von selbst sehr kleinen, Festkörper ( $\text{PM} < 1\ \mu\text{m}$ ).

So berichten zum Beispiel Treesubstorn und Thiravetyan in ihrer Studie, in der sie die Filterwirkung von Zimmerpflanzen (*Dracaena sanderiana*) bezüglich des gasförmigen Partikelvorläufers Benzol (karzinogen) untersuchen, von der entscheidenden Rolle der Stomata bezüglich der Filterwirkung. In Ihrer Studie erkennen sie, dass Benzol als

Partikel bildendes Gasgemisch (Vorläufergas), über die Stomata in das Blatt und ins Innere der Pflanze vordringen kann. Weiter beobachten Treesubstorn und Thiravetyan, dass die Aufnahme ins Innere der Pflanze nur tagsüber funktioniert, da nachts die Stomata geschlossen sind. Insgesamt gesehen stellen die Autoren fest, dass bis zu 54 % des gesamten, von der Blattfläche gefilterten Benzols, von den Stomata ins Innere der Pflanze aufgenommen werden, wohingegen 46 % nicht über die Stomata in das Blattinnere aufgenommen werden, sondern sich in der Wachsschicht an der Blattoberfläche ablagern. Beim Vergleich verschiedener Zimmerpflanzen, erwies sich eine Spezies, die besonders viele Stomata aufweist, als effektivster Filter (Treesubstorn und Thiravetyan, 2012). Auch Sriprapat und Thiravetyan berichten in einer Studie von der großen Bedeutung der Stomata bei der Filterung von Luftschadstoffen. In ihrer Arbeit, untersuchen sie gleichfalls Zimmerpflanzen auf ihre Filterleistungen gegenüber aromatischen Kohlenwasserstoffen (BTEX = **B**enzol, **T**oluol, **E**thylbenzol und **X**ylol), die als Vorläufergase für Partikel fungieren. Hierbei stellen sie fest, dass 80 %, des gesamt von den Blattflächen gefilterten Benzols, direkt von den Stomata aufgenommen und ins Pflanzeninnere weitergeleitet wurden (Sriprapat und Thiravetyan; 2013).

Insgesamt ist festzustellen, dass Stomata die Feinstaubdeposition befördern. Zum einen gelingt dies durch ihre strukturreiche Morphologie an der Blattoberfläche und zum anderen (für besonders feine Partikel) auch durch ihre stomatären Öffnungen, die für gelöste und feine- feste Partikel, einen Weg ins Innere des Blattes darstellen.

### 2.2.3.2.8 Größe der Stamm und Astfläche

Neben der Größe und Morphologie der Blatt -und Nadelfläche, die in den vorausgegangenen Kapiteln genauer behandelt wurden, sind für die Feinstaubfilterleistung von Bäumen jedoch auch die weiteren oberirdischen Organe, wie Stamm und Ast, von großer Bedeutung. Sind ihre Gesamtoberflächen aufgrund des kleineren Oberflächen / Volumenverhältnisses zwar nicht so groß, wie die der Blätter und Nadeln, so sind sie doch für die Gesamtoberfläche des Baumes erheblich und bei



Angiospermen, im Winterhalbjahr (bei fehlenden Blättern) sogar die einzige Oberfläche die sich zur Feinstaubablagerung anbietet. So berichten Chamberlain und Little, in einer 1981 veröffentlichten Studie von beachtlichen Depositionsgeschwindigkeiten an Stämmen und Ästen im Vergleich mit Nadeln an Bäumen der Gattung Pinus (Kiefer). Hierbei kommen Chamberlain und Little zu dem Ergebnis, dass die Depositionsgeschwindigkeit pro Flächeneinheit, bei Partikeln der Größe 2,75  $\mu\text{m}$  und einer Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s, die Depositionsgeschwindigkeit ( $V_d$ ) für Nadeln bei 1 cm/s liegt, wobei  $V_d$  für die Stammfläche mit 0,63 m/s nicht weit davon entfernt liegt und  $V_d$  für Zweige und Äste sogar 0,93 m/s beträgt (Chamberlain und Little; 1981). Weiter stellen Carter et al., in einem Experiment von 1965, indem die Fangeffizienz von dünnen Ästen, Zweigen (1,6 – 7 mm Durchmesser) und Blättern von *Prunus armeniaca* (Aprikose) erfasst wurden, fest, dass die Fangeffizienz pro Flächeneinheit bei Zweigen und Ästen sogar noch größer ist, als an Blattflächen (Carter; 1965). Weiter berichtet auch Tauber 1967 von beachtlichen Pollenablagerungen auf Zweigen einer Weidenart (*Salix cinerea*). Hierbei stellt Tauber fest, dass etwa 40.000 Pollen auf einem 15 cm langen und 2-3 mm breiten Zweig, gezählt werden konnten (Tauber; 1967). Weiter berichten White und Turner in einer Studie von 1970 von einem Windtunnelexperiment, in dem die unterschiedliche Fangeffizienz von Blättern und Zweigen (mit Durchmesser 0,6-10 mm), miteinander verglichen werden. Hierbei wurden Bäume der Gattungen *Fraxinus spec.*; *Quercus spec.*; *Betula spec.* und *Corylus spec.* miteinander unter Freisetzung von feinen, flüssigen NaCl Partikeln verglichen (Tabelle 5).

**Tabelle 5. Größe der Fangeffizienz von Zweigen in Abhängigkeit ihres Durchmessers**

Species	Leaves	Branches average diameter (mm)			
		0.6	3.6	5.8	10.0
Ash	0.034	0.064	0.027	0.027	0.008
Oak	0.016	0.17	0.019	0.019	0.00
Birch	0.032	0.063	0.133	0.028	0.052
Hazel	0.010	0.061	0.002	0.014	0.002
<b>Mean</b>		<b>0.090</b>	<b>0.045</b>	<b>0.022</b>	<b>0.015</b>

$C_p$  = Fangeffizienz (Filtermenge pro Flächeneinheit, Konzentration- und Windgeschwindigkeit der Partikel) angegeben in Prozent.  
(White und Turner 1970)

An der Untersuchung von White und Turner werden zwei Verhältnismäßigkeiten besonders deutlich. So zeigt sie zum einen, dass Blätter in ihrer Fangeffizienz (Filtermenge/Flächeneinheit) unter der Fangeffizienz von Zweigen der Größenordnung 0,6 mm Durchmesser liegen. Zum anderen zeigt die Untersuchung, dass diese Fangeffizienz der Zweige jedoch mit steigendem Durchmesser von 0,6 mm bis 10 mm, stetig abnimmt (Siehe Mean Werte: 0,090; 0,045; 0,022; 0,015 bei steigenden Zweigdurchmessern).

Ein ebenfalls großes Filterpotenzial der Stamm und Astflächen erkennen auch Freer-Smith et al. 2004 in einer Untersuchung. So stellen sie in ihrer Studie fest, dass bei den meisten der betrachteten Laubbaumarten (*Acer pseudoplatanus*, *Eucalyptus globulus*; *Ficus nitida*, *Fraxinus excelsior*) die Fangeffizienz der Stammflächen pro Flächeneinheit deutlich größer ist, als die der Blattflächen. Für *Alnus glutinosa* berichten Freer-Smith et al. ähnliche Werte zwischen Blatt- und Stammfläche. Demgegenüber stellen Freer-Smith et al. für *Pseudotsuga menziesii* eine größere Fangeffizienz der Blattflächen gegenüber der Stamm- und Astfläche, fest. Freer-Smith et al führen die hohe Fangeffizienz einiger Baumarten im Bereich der Stämme auf schmale und strukturreiche Ast- und Kronenarchitekturen zurück, die bei Laubbäumen stärker ausgeprägt sind als bei

Nadelbäumen (Freer-Smith et al.; 2004). Ähnlich wie bei der Morphologie von Blättern und Nadeln zeichnet sich somit auch für Stammflächen ein Trend ab, dass feine, schmale und strukturreiche Formen besonders geeignete Depositionsoberflächen für Feinstaub haben.

Sind die berichteten höheren Werte der Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz von Zweig-, Ast- und Stammflächen im Vergleich zu den Blättern/Nadeln zwar bemerkenswert und korrekt, so ist doch zu erwähnen, dass bei einer Betrachtung der Gesamtfiltermenge des ganzen Baumes nicht nur die Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz, die beide pro Flächeneinheit ermittelt werden, sondern auch die Größen der jeweiligen Flächen von Bedeutung sind. In dieser großräumigen Betrachtung, der Filterleistung des gesamten Baumes sind es somit die Krone und die Blätter, die durch ihre großen Oberflächen den überwiegenden Teil der Baumoberfläche ausmachen und die etwas geringeren berichteten Depositionsgeschwindigkeiten und Fangeffizienzen weit kompensieren.

Chamberlain und Little gehen so davon aus, dass Blatt- und Nadelflächen gesamt gesehen 60 – 80 Prozent der Feinstaubmenge des Baumes aus der Luft filtern (Chamberlain und Little; 1981). Tabelle 6 zeigt die Anteile von Blatt-/Nadel-, Zweig- und Stammflächen, an der Gesamtfiltermenge der Gattungen *Fagus spec.*; *Populus spec.*; *Urtica spec.* (Nesselbaum); *Pinus spec.* und *Prunus spec.* (Aprikose).

**Tabelle 6. Prozentuale Anteile der Gesamtfilterleistung von Blättern/Nadeln, Stämmen und Zweigen**

TABLE 9.3. Mean percentage of total catch intercepted by leaf laminas, needles, petioles and stems.

Particle size	Plant part	Beech	White poplar	Nettle	Pine	Apricot
<i>Little (1977); Little &amp; Wiffen (1977); Little (unpublished)</i>						
0.3 $\mu\text{m}$	leaf laminas	80	75	83	—	—
	petioles	15	12	7	—	—
	stems	6	14	10	—	—
0.2 $\mu\text{m}$	leaf laminas	88	77	86	—	—
	petioles	7	—	6	—	—
	stems	5	11	8	—	—
2.75 $\mu\text{m}$	leaf laminas	63	74	68	—	—
	petioles	30	11	16	—	—
	needles	—	—	—	97	—
	stems	7	15	16	3	—
5.0 $\mu\text{m}$	leaf laminas	71	57	82	—	—
	petioles	23	27	7	—	—
	needles	—	—	—	98	—
	stems	6	16	11	2	—
8.5 $\mu\text{m}$	leaf laminas	63	45	68	—	—
	petioles	17	29	11	—	—
	needles	—	—	—	97	—
	stems	20	26	20	3	—
<i>Carter (1965)</i>						
8.1 $\times$ 4.4 $\mu\text{m}$ (ascospore octads)	leaf laminas	—	—	—	—	81
	petioles	—	—	—	—	13
	stems	—	—	—	—	6

Die Daten von Little (Pine) und Carter (Apricot) entsprechen den bereits weiter oben zitierten Werten, sind in dieser Grafik jedoch nicht in Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz, sondern in Anteilen an der Gesamtfiltermenge des Baumes angegeben (Chamberlain und Little; 1981; S. 158)

Insgesamt ist festzustellen, dass die Stamm und Astflächen auch einen Anteil bei der Filterleistung haben. Angiospermen weisen hier, durch ihre struktureicheren Formen im Vergleich zu Koniferen, Vorteile auf. Bei der Betrachtung der Filterleistung des gesamten Baumes, überwiegt jedoch die Filterleistung der Blatt- und Nadelflächen, durch die höhere Gesamtfläche.

## 2.2.3.3 Pflanzanordnung und Umgebungsbedingungen

### 2.2.3.3.1 Pflanzstruktur

Neben der GesamtfILTERleistung von einzelnen Bäumen, die wie in den vorausgegangenen Kapiteln gezeigt, von vielen Faktoren abhängig ist, spielt auch die Struktur und Lage der grünen Umgebung neben und unter den Bäumen, für die Feinstaubreduktion von ganzen Grünstreifen eine Rolle. Hierbei ist zunächst die Position der Grünstreifen in unmittelbarer Nähe zu gegebenen Feinstaubquellen von großer Bedeutung. Direkte Umgebungen von Luftverschmutzungsquellen (Straßen, Fabriken) weisen besonders hohe Feinstaubkonzentrationen auf (noch kein Verdünnungseffekt in der Luft). Pflanzungen in geringer Distanz zu den örtlichen Verunreinigungsquellen sind deshalb sehr effektiv in ihrer FILTERleistung, da zum einen eine erhöhte Feinstaubkonzentration auf die Blattflächen trifft und zum anderen die Partikel nicht nur die äußeren Oberflächen des Baumes, sondern die gesamte Baumoberfläche, auch in ihrer Tiefe durchdrungen wird und sich somit im gesamten Kronenraum und Stammbereich ablagern können (Etyemezian et al.; 2004). Weiter vertreten Madders und Lawrence in einer Studie über städtische Vegetation und ihre Bedeutung für die Luftreinhaltung, die Auffassung, dass Vegetation in nächster Nähe zu Straßen die höchsten FILTERwerte aufweist und die Wirkung einer Pufferzone entlang von Straßen zeigen (Madders und Lawrence; 1981). Zur Überzeugung, dass die FILTERleistung von Bäumen direkt neben Feinstaubquellen am größten ist, gelangen auch Tallis et al., in einer Studie zur Feinstaubfilterung von Stadtbäumen entlang von Straßen in London (Tallis et al.; 2011). Weiter belegt die hohen FILTERwerte entlang von Luftverschmutzungsquellen auch eine Studie von Spitsyna und Skripalschikova. So stellen die Autoren 1991 fest, dass mehr als 50 % der großen Menge an Feinstäuben einer Kohlemine (252 kg ha<sup>-1</sup> am Beginn des Waldrandes in einem Sommer), von einem, in nächster Umgebung gepflanzten und nur 15 Meter im Durchmesser breiten Birkenbestand, gefiltert wurde (Spitsyna und Skripalschikova; 1991).

Darüber hinaus sind grundsätzlich größere Pflanzflächen in der Lage, höhere Feinstaubmengen zu filtern. So stellen beispielsweise Brantley et al. in einer Studie entlang einer Autobahn in den USA fest, dass mit steigender Breite eines Baumbestandes neben der Autobahn, ein größerer Filtereffekt für PM 2,5 und Black Carbon (besonders

kohlenstoffhaltiger Feinstaub der Fraktion  $\leq 2,5\mu\text{m}$ ) auftritt (Brantley et al.; 2014). Weiter kommt auch Litschke und Kuttler in ihrer Literaturrecherche zum Thema Feinstaub zu der Schlussfolgerung, dass nur groß angelegte Pflanzflächen in ihrer Feinstaubfiltereffektivität von PM10 besonders effektiv sind und messbare Luftverbesserungen erzielen (Litschke und Kuttler; 2008).

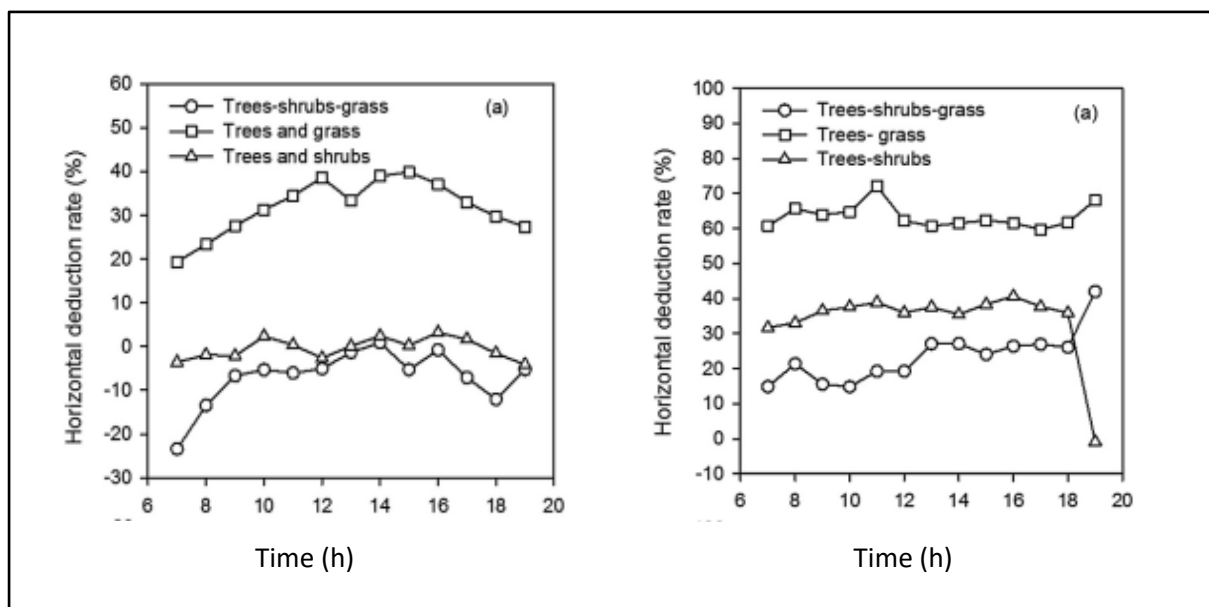
Diese Ergebnisse sind auch in Übereinstimmung, mit den gemachten Aussagen, zur Blatt-/ Nadelfläche und ihrer Verbindung zur Feinstaubfiltereffizienz. Konnte in einem vorangehenden Kapitel beleuchtet werden, dass die Größe der Blattfläche in Zusammenhang zur Filterwirkung steht, so kann weiter abgeleitet werden, dass große Vegetationsflächen durch ihre erhöhte Gesamtblatt- /Nadelfläche ebenfalls größere Mengen an Feinstaub filtern können, als kleine Pflanzflächen.

Da jedoch in Städten nur begrenzt Platz und Fläche für Pflanzungen zur Verfügung steht, ist bei der Raum- und Landschaftsplanung eine geeignete Größe der Pflanzfläche zu finden, die auch noch den verschiedenen anderen Interessen in der Stadt Rechnung trägt. Aus diesem Grund ist es bei innerstädtischen Verhältnissen wichtig, eine maximale Filterwirkung durch Vegetation mit möglichst geringem Flächenverbrauch zu gestalten.

Stellen die meisten Wissenschaftler in der Literatur zwar fest, dass neben der Auswahl von speziellen Baum- und Straucharten, auch die Pflanzanordnung und ihre Struktur für die Filterleistung von großer Bedeutung sind, so machen nur sehr wenige Autoren konkrete Vorschläge zur Gestaltung solcher Grünstreifen. Weiter sind die Antworten der Autoren, die diesen Aspekt beleuchten, sehr verschiedenartig. So stellen Liu et al. in ihrer 2015 veröffentlichten Studie über den Zusammenhang von Vegetationsstruktur und Filterleistung fest, dass Bäume, verglichen mit anderen Vegetationsformen, die größte Filterwirkung haben und die Korrelation zwischen Filterleistung und Höhe einer Krautschicht unter einem Kronenschirm nur sehr schwach ausgeprägt ist. Was darauf hindeuten könnte, dass die Krautschicht an sich nicht besonders zur Filterung von Stäuben beiträgt. Dennoch betonen Liu et al. die Aufgabe der Krautschicht, die darin besteht den, von den Bäumen abgewaschenen und unter den Bäumen abgelagerten Feinstaub, vor erneuter Wiederaufwirbelung zu schützen und langfristig zu binden (Liu et al.; 2015).

Weiter erkennen Chen et al. in einer Studie in Peking, bei der sie verschiedene Pflanzstrukturen miteinander vergleichen, dass alle Pflanzenkombinationen: Bäume-

Grass; Bäume-Sträucher; Bäume- Sträucher- Grass, für die Fraktion der TSP Partikel (auch größere Partikel erfasst), eine positive horizontale Filterleistung, von 10 – 60 % aufweisen (Siehe Abb. 30, rechtes Bild). Jedoch erkennen Chen et al., dass der horizontale Filtereffekt für die Fraktion der PM 2,5 Partikel (feinere Fraktion), nicht so deutlich ausgeprägt ist, sondern eher eine Erhöhung der Feinstaubkonzentration vorhanden ist (Siehe Abb. 30, linkes Bild). Dieser Effekt, der Feinstaubanreicherung zeigt sich bei den voluminösen Pflanzkombinationen Bäume-Sträucher-Grass und Bäume-Sträucher am ausgeprägtesten. Lediglich die winddurchlässige und gut durchlüftete Pflanzkombination Bäume-Grass, verzeichnet neben den erhöhten TSP Filterwerten auch hohe PM 2,5 Filterwerte (Chen et al.; 2016). Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass die Messwerte bei Chen et al. nur unter metrologischen Bedingungen ohne eindeutige Windverhältnisse aufgenommen wurden, was die Erfassbarkeit des Filtereffekts stark einschränkt und die Aussagekraft dieser Ergebnisse abschwächt.



**Abbildung 30. Filterwirkung verschiedener Pflanzgemeinschaften**

Im linken Bildteil: Filterwirkung für PM 2,5; Im rechten Bildteil: Filterwirkung für TSP, negative Werte symbolisieren eine Zunahme der Feinstaubkonzentration durch die Vegetation (Chen et al.; 2016; S. 204)

Brantley et al. stellen 2014 in einer weiteren Studie fest, dass Baumreihen der Gattungen *Acer* und *Quercus* mit vorhandener, darunter gepflanzter Vegetation, entlang einer Straße durchschnittlich 12 % und maximal sogar 22 % Black Carbon (besonders Kohlenstoff haltiger Feinstaub) filtern können (Brantley et al.; 2014). Was ebenfalls für die Eignung von mehrstufigen Pflanzanordnungen spricht. Auch Freer-Smith et al. kommen 2004 zu dem Schluss, dass ein Pflanzmodell, in dem mehrere Schichten von Vegetation vertreten sind, günstige Bedingungen für die Feinstaubdeposition aufweist. So empfiehlt er die Pflanzung von niedrigen Sträuchern und Büschen an vorderster Stelle, die dann von Laubbäumen abgelöst- und dahinter von Koniferenarten ergänzt werden. Hierbei sind für Freer-Smith et al. eine Mischung von Koniferen, als auch Angiospermen von Bedeutung (Freer-Smith et al.; 2004).

Weiter belegt eine Studie von Saebo et al., in der 22 Baum und 25 Strauch Arten miteinander verglichen werden, die guten Filtereigenschaften von Büschen und Sträuchern (Saebo et al.; 2012). Ebenfalls heben Thompson et al. die Rolle von Sträuchern bei der Feinstaubfilterung hervor, indem sie feststellen, dass beachtlich hohe Partikelmassen auf Büschen entlang von Straßen zu finden sind (Thompson et al.; 1984). Dieses Ergebnis bestätigt auch eine Studie von Popek et al., in der 7 Baum- und 6 Straucharten bezüglich ihrer Filterleistung miteinander verglichen sind. Die Studie zeigt, dass die zwei effektivsten Arten Sträucher sind (Popek et al.; 2013). Aus diesem Grund sprechen sich Saebo et al., wie bereits Freer-Smith et al. und Brantley et al. für gemischte Grünflächen aus den effektivsten Baum- und Sträucher Arten, aus.

Neben den genannten Bestandsformen könnten für eine größere Feinstaubfilterung von Grünflächen auch Kletterpflanzen, wie *Hedera helix* (Efeu), von großer Bedeutung sein. Zum einen können diese Kletterpflanzen die Oberflächen von glatten Flächen durch ihre Blattfläche stark erhöhen, zum anderen können diese Pflanzen jedoch auch Gebiete und Positionen begrünen, die sonst nicht zu begrünen wären, wie beispielsweise Wände und Fassaden (Siehe Abb. 31 a)

Für Bäume könnten so Kletterpflanzen, wie *Hedera helix* einen Vorteil in Bezug auf die Feinstaubfilterung bieten, da diese die Oberfläche des Stammes und der stärkeren Äste bedeutend vergrößern und somit die Gesamtfilterkapazität des Baumes erhöhen können (Siehe Abb. 31 b). So stellen beispielsweise Bartfelder und Köhler 1987 fest, dass *Hedera helix* eine glatte Oberfläche (Wand) um den Faktor 2,6 bis 7,7 vergrößern kann,



was eine beachtliche Vergrößerung an Oberfläche darstellt (Bartfelder und Köhler; 1987; 3. Ausschreibung). Weiter findet Ottelé in einer Studie über Fassadenbegrünungen eine Filterung von  $1,47 \times 10^{10}$  Feinstaubpartikeln, pro Quadratmeter Blattfläche (Ottelé et al.; 2010). Darüber hinaus zählt Sternberg, in einer Studie zur Filterleistung von *Hedera helix* eine Anzahl von  $2,9 \times 10^{10}$  Partikeln, der Größenordnung  $< 2,5 \mu\text{m}$  pro Quadratmeter Blattfläche (Sternberg; 2010). Auch wenn *Hedera helix* bei einem Vergleich mit *Pinus sylvestris* und *Taxus baccata* nicht so hohe Filterwerte pro  $\text{cm}^2$  Nadelfläche aufweist, wie die beiden Baumarten, so ist die Kletterpflanze doch ein wichtiger Filter, da sie Positionen begrünen kann, die ohne eine solche Kletterpflanze unbegrünt bleiben würden (Przybysz; 2014).



**Abbildung 31. Hedera Helix als filtereffiziente Ergänzung im Stamm-, Astbereich (b) und an Wänden (a)**

(Ottelé et al.; 2010; S. 156)

In Bezug auf die Lage der, in diesem Kapitel beschriebenen, filtereffektiven, Pflanzstrukturen, betonen Saebø et al., dass die Grünflächen als Schutzzonen zwischen besonders sensiblen Gebieten (Krankenhäusern, Kindergärten; Wohngebieten) und Straßen gepflanzt werden sollten. Eine Idee, die auch 1998 Broadmeadow et al. einbringen (Broadmeadow et al.; 1998). Saebø et al. beschreiben, dass diese Grünflächen in ihrer Funktion als schützende Vegetationsstreifen zum einen den, mit Partikeln

beladenen Wind von diesen Gebieten ablenken, und zum anderen hohe Feinstaubkonzentrationen filtern können (Saebo et al.; 2012). Diese beiden Schutzmechanismen von Vegetationsbarrieren (Wind-/ Partikelablenkung und Feinstaubfilterung) nennen 2015 auch Janhäll et al., indem sie beschreiben, dass Vegetationsbarrieren so gepflanzt sein sollten, dass sie die feinstaubhaltige Luft filtern-, oder den Luftstrom über das zu schützende Areal lenken können (Janhäll; 2015). Für die Filterleistung von Grünstreifen spielt darüber hinaus jedoch auch die Dichte der jeweiligen Grünfläche eine bedeutende Rolle. Auf diesen Aspekt sei nun im Folgenden genauer eingegangen.

### 2.2.3.3.2 Bestandesdichte

Eine Möglichkeit, die Kronendichte/ Belaubungsdichte von Bäumen anzugeben ist die Ermittlung des LAD Wertes (Leaf Area Density). Der LAD- Wert repräsentiert den Leaf Area Index (LAI Wert) in Bezug auf eine bestimmte Höhe (h) des Baumes. Somit ist der LAD definiert als:  $LAI / h$ . Der LAD wird meist in der Einheit ( $m^2 m^{-3}$ ) angegeben (Matyssek et al.; 2010).

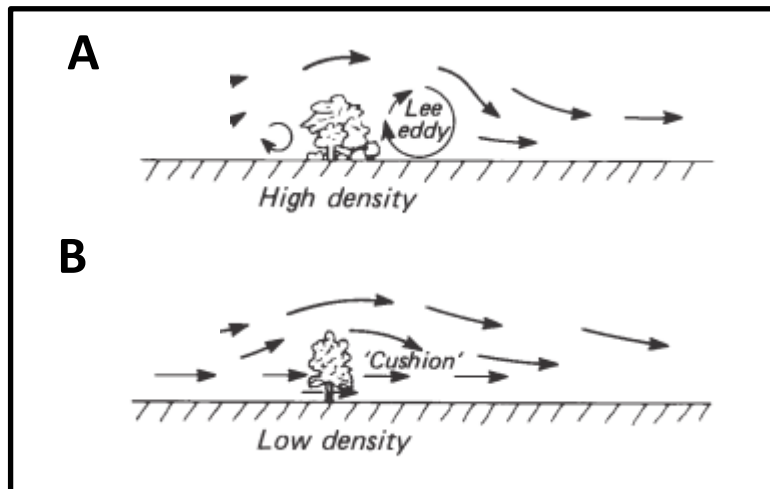
Bei der Recherche der derzeit veröffentlichten Literatur konnte bezüglich des speziellen Zusammenhangs von Kronendichte und Feinstaubfilterung ein Mangel an ausführlich dokumentierten, nachvollziehbaren und einheitlichen Vergleichskennzahlen (wie dem LAD), festgestellt werden. Der überwiegende Teil der Veröffentlichungen erfasst überdies die Kronendichte lediglich mit sprachlichen Beschreibungen. Diese Beobachtung machen 2015 auch Janhäll et al., die die Lage wie folgt schildern: „There is a need for standardised measurements of vegetation density, increasing comparability between studies“ (Janhäll; 2015).

Im Folgenden Abschnitt kann die Kronendichte deshalb nur so genau beschrieben, wie es die derzeitige Literatur zulässt.

In einer Studie von 2015, stellen Chen et al. fest, dass bei einer Untersuchung der PM 10 Belastung von Fußgängerwegen entlang von Straßen, kleine Bäume und Büsche, bei dichter Belaubung (und somit relativ hohem LAI), die beste Filtereffizienz aufweisen (zwischen 7 % bis 15 % weniger PM 10 in der umgebenden Luft) (Chen et al.; 2016). Auch Lin et al. stellen in einer Studie, in der zwei Koniferen (Gattung Pinus und Gattung

Juniperus) miteinander verglichen werden fest, dass bei steigender Dichte, der Belaubung an den, im Windtunnel beobachteten Ästen, die Depositionseffizienz für Partikel  $< 1 \mu\text{m}$  (UFP), zunimmt (Lin et al., 2012). Schließlich stellen auch Liu et al. in einer Studie fest, dass die Filterfähigkeit von Baumbeständen innerhalb der Stadt, mit steigender Kronendichte, zunehmen (Liu et al., 2015).

Von einem neuen Aspekt, in Bezug auf die Dichte von Pflanzungen, berichten Tiwary et al. in einer Studie über die bereits weiter oben angesprochenen Vegetationsbarrieren. Hierbei stellen Tiwary et al. fest, dass Luftströmungen von besonders dichter Vegetation mehr nach oben abgelenkt werden, während eher niedrige Vegetationsdichten die Luftströmungen verstärkt aufnehmen und filtern können. So beobachten Tiwary et al., in einer Untersuchung an Hecken, dass Hecken der Gattung *Taxus*, mit einer hohen Dichte, nur maximal 3 % Feinstaub der Größe  $< 15 \mu\text{m}$  Durchmesser filtern, da die Luftströmungen durch die hohe Dichte mehr nach oben abgelenkt-, als von den Bäumen aufgenommen und gefiltert werden. Dem gegenüber weisen weniger dichte, und für die anströmende Luft besser passierbare Hecken der Gattung *Ilex spec.* (Stechpalme), eine maximale Filtereffektivität von 18 % - und noch weniger dichte Individuen der Gattung *Crataegus* (Weißdorn), eine noch höhere maximale Filterleistung von 27 % auf (Tiwary et al., 2005). Den Effekt, dass dichtere Vegetation Luftströmungen stärker ablenkt als aufnimmt bestätigen 1987 auch Oke. In seinem Standardwerk beschreibt der Autor, dass dichte Vegetation (Bsp. mit Unterwuchs und hohem LAD) zwar verstärkt die Luftströmungen, vom zu schützenden Objekt abhält, jedoch weniger diese Luftströmungen aufnimmt. Demgegenüber leiten Vegetationsbarrieren mit geringerer Dichte (Bsp. ohne Unterwuchs und weniger LAD) zwar die Luftbewegungen weniger zur Seite ab, jedoch können diese einen größeren Anteil der Luftströmung abfangen und somit auch mehr Luft filtern (Oke; 1987). Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 32. verdeutlicht.



**Abbildung 32. Ablenkung (A) und Aufnahme (B) in Abhängigkeit der Dichte**

(Nägeli, 1964)

Bei der Betrachtung der Dichte, ist jedoch auch die Abhängigkeit gegenüber der Höhe der umgebenden Windgeschwindigkeit zu nennen. Während dichte Pflanzungen bei eher geringen Windstärken von den Luftströmen nicht durchdrungen werden können und abgelenkt werden, sind starke Luftströmungen und Winde in der Lage, selbst dichte Vegetation zu durchströmen. Somit hat auch dichte Vegetation, bei hohen Windgeschwindigkeiten, eine bedeutende Filterwirkung.

Dem gegenüber können Grünflächen mit geringer Dichte die Feinstäube bei niedrigen Windgeschwindigkeiten effektiv filtern, während bei hohen Windstärken, der Filtereffekt dieser Pflanzungen wesentlich geringer ist als dies bei Vegetation mit einer höheren Dichte der Fall wäre (Chen et al.; 2016). Mit dem Thema der Beziehung zwischen Pflanzungen und Windstärke, beschäftigt sich das anschließende Kapitel genauer.

### 2.2.3.3.3 Bebaute Umgebung und ihre Architektur

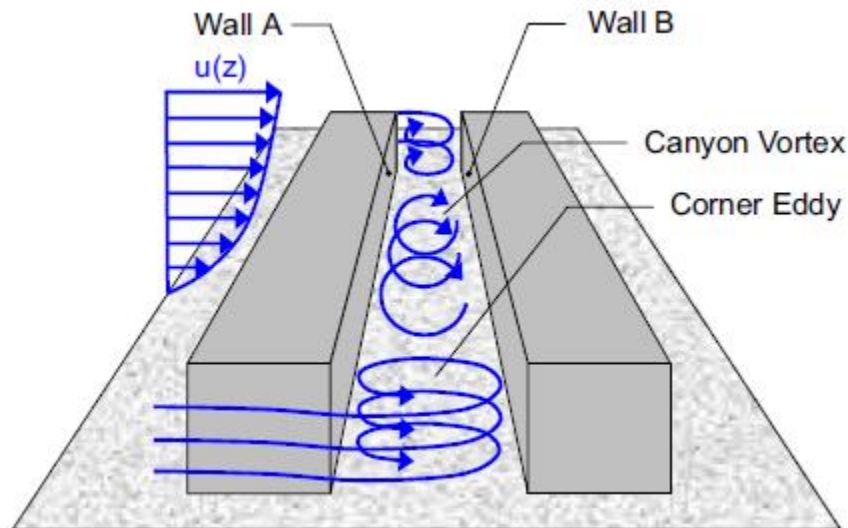
Bei der Gestaltung von filtereffektiven Pflanzanordnungen ist neben der Pflanzstruktur und Dichte der Pflanzungen, auch auf die klimatischen Umgebungsbedingungen (hauptsächlich Windeinflüsse und Turbulenzen) des jeweiligen Pflanzortes (Straßen, Plätze oder Parks), zu achten. Diese hängen stark von der Umgebung des jeweiligen städtischen Gebietes ab. Die Turbulenzen und Windströmungen in bebauten Gebieten setzen sich so hauptsächlich zum einen aus der geografischen Lage (Bsp. Ausrichtung einer Straße bezüglich Windrichtung) und zum anderen aus der Architektur (H / W – Wert zwischen Gebäuden und Straßen; Dächer Formen der Häuser) zusammen (Oke, 1987).

Die Dichte der Pflanzengemeinschaften sollte sich hierbei an der vorhandenen Stärke der Turbulenzen und Durchlüftung, anpassen.

Sind die Turbulenzen eines Stadtgebietes sehr reduziert (Straßenschluchten), so sind an diesen Standorten vermehrt weniger dichte Pflanzungen sinnvoll, wohingegen an Turbulenz reichen Standorten mit viel Windeinfluss (entlang breiter Straßen, an Parks und Plätzen), dichte Pflanzungen für die Feinstaubreduktion von Vorteil sind.

So stellen beispielweise Jin et al. in einer Studie, in der Feinstaubwerte von eng bebauten Straßen in Shanghai, ohne und mit Bäumen bepflanzt, mit einander verglichen werden fest, dass besonders dichte Baumkronen, zu erhöhten Feinstaubwerten, im Bereich unter den Kronen führen. Jin et al. führen diese negative Korrelation auf einen Stau effekt zurück, der sich an Standorten mit geringer Luftzirkulation (Häuserschluchten), unter dichten Kronen bilden kann. Jin et al. erwähnen weiter, dass der Anstieg der erhöhten Feinstaubwerte unter der Krone zuerst mit steigendem LAI und Kronendeckungsgrad zunimmt, bis dieser Anstieg sich an einem bestimmten Punkt, von LAI (5 – 6) und Kronendeckungsgrad (40 % – 50 %), mit dem Effekt der Feinstaubanreicherung an den Blättern der Krone aufhebt und die Feinstaubkonzentration unter der Krone vorerst nicht mehr weiter steigt. Bei weiter ansteigenden Kronendichten - über diesen Punkt hinaus - treten in Jin et als. Untersuchung jedoch wieder steigende Feinstaubwerte im Bereich unter der Krone auf. Jin et al. stellen gesamt gesehen fest, dass die Feinstaubkonzentration an eng bebauten Straßen (Straßenschluchten) ohne Alleebäume geringer ist, als die Konzentrationen an

vergleichbaren Straßen mit dichten Alleebäumen (Jin et al., 2014). Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangen auch Hofmann et al., in einer Studie von 2013, in der mit Platanen (*Platanus x acerifolia*) eine Untersuchung an Straßenschluchten durchgeführt wurde. Hofman et al. führen diesen Anstieg im unteren Bereich der Platanen, auf einen Stau effekt des Feinstaubes im Bereich unter den Kronen zurück. Auch Hofman et al. erklären diesen Stau effekt durch fehlende Turbulenzen und Windeinflüsse, die durch die Kronenräume im Inneren der Straßenschlucht verursacht werden. Dabei folgert diese Studie, dass bei der Bepflanzung von Straßenschluchten auf niedrige Kronendichten der Bäume geachtet werden sollte, um dadurch eine ausreichende Belüftung, Turbulenz und somit auch genügend Feinstaubreduktion im Schluchtenbereich zu erzielen. Weiter sollten die Abstände zwischen den einzelnen Baumkronen und die Abstände zu den Wänden der Straßenschlucht bewusst groß gewählt werden (Hofman et al.; 2013). Den Effekt der reduzierten Windgeschwindigkeit und Turbulenz aufgrund von Vegetation an Straßenrändern und den damit einhergehenden Anstiegen von Feinstaub beschreibt darüber hinaus auch eine Studie von Wesseling et al. (Wesseling et al., 2008). Weiter stellen auch Gromke und Ruck 2007 in einer Modellstudie fest, dass speziell in Straßenschluchten Bäume nicht zu dicht gepflanzt und nicht zu hoch sein sollten, da dies sonst zur Abbremsung von Turbulenzen und Lufteinströmungen an den Eingängen der Straßenschlucht (Abschirmung von Corner Eddy), und zur Abbremsung von den von oben einfallenden Luftströmungen (Abschirmung von Canyon Vortex) führt (Siehe Abb. 33). Die Folge dieser Reduktion an Turbulenz und Luftbewegung im Inneren der Straßenschlucht sind dann hohe Feinstaub Werte, da die Luftströmungen den Feinstaub nicht abtransportieren können (Gromke und Ruck; 2007).



**Abbildung 33. Luft Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten**

(Gromke und Ruck; 2007; S. 3289)

Aus diesem Grund empfehlen auch Vos et al. sehr aerodynamische Pflanzanordnungen, die aus schmalen Hecken und vereinzelt Bäumen bestehen und in denen genügend Luftaustausch gesichert ist (Vos; 2013).

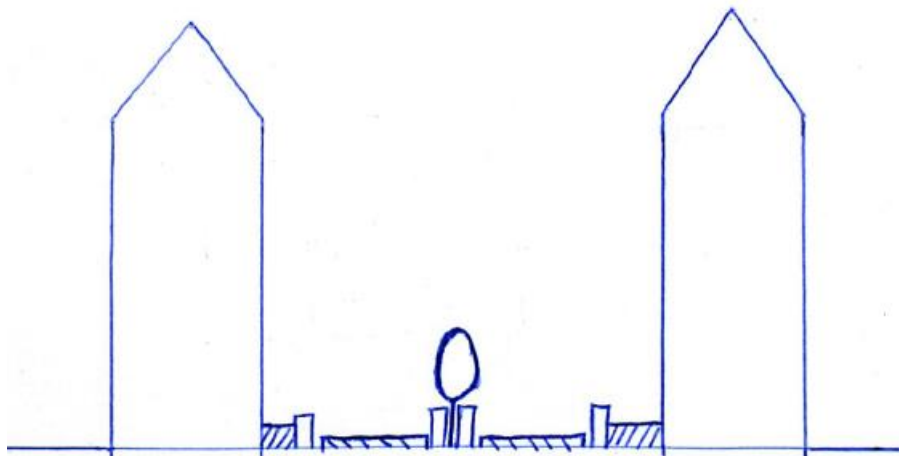
Insgesamt ist festzustellen, dass dichte Kronen, bis zu einem gewissen Grad, einen positiven Effekt auf die Feinstaubanreicherung zeigen. Durch zu hohe Kronendichten kann jedoch die Windgeschwindigkeit stark abgebremst werden, weshalb der antransportierte Feinstaub nicht ins Innere der Krone aufgenommen und nicht vom Baum gefiltert werden kann. Speziell an Standorten in Straßenschluchten, mit enger und großer Bebauung (hoher  $H/W$  - Wert), können hohe Kronendichten und niedrige Pflanzabstände, sowie fehlende Abstände zwischen den Gebäudewänden und den Baumkronen, jedoch reduzierten Luftaustausch und fehlende Turbulenzen verursachen und dadurch eine Ansammlung von erhöhten Feinstaubkonzentrationen im Bereich unterhalb der Kronen bewirken.

## 2.2.2.3.4 Pflanzvorschlag

Die in den drei vorherigen Kapiteln erhaltenen Informationen bezüglich der Pflanzanordnung und den Umgebungsbedingungen, seien nun zusammenfassend in den Abbildungen 34 bis 37, schematisch dargestellt.



Hierbei können natürlich Mischformen zwischen den empfohlenen Pflanzmodellen, je nach Umgebungsbedingungen (H / W - Wert, Turbulenz und Windeinfluss) des städtischen Gebietes, auftreten.

Ist der Grad der Versiegelung sehr hoch und sind die Gebäude eng und groß gebaut (kleiner H / W - Wert), so ist eine niedrige Vegetation aus Hecken neben den Straßenrändern und Fußgängerwegen angemessen, um die geringe Luftzirkulation nicht zu gefährden, sondern aufrecht zu erhalten. Bäume sollten bei diesem Bebauungstyp nur vereinzelt gepflanzt werden und schmale Kronen haben (Abb. 34).



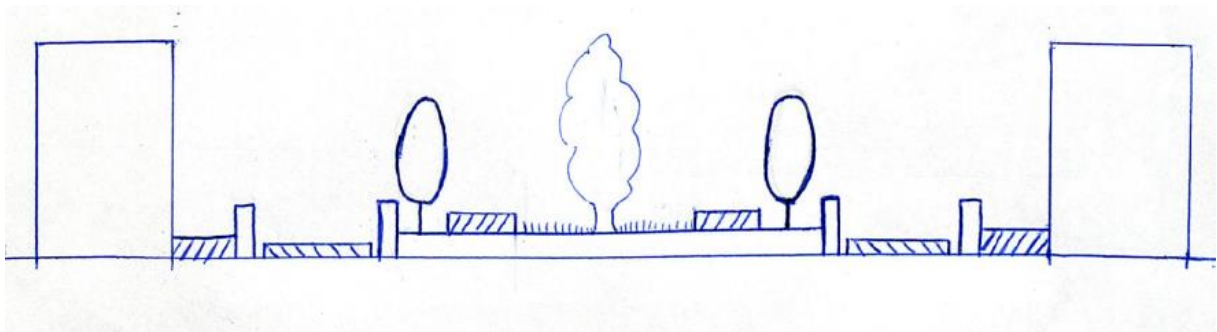
**Abbildung 34. Pflanzmodell für enge Häuserschluchten mit großem H/W - Wert**

Vegetation aus: Niedrigen Hecken, vereinzelt Laubbäumen mit schmalen Kronen.

 = Fußgängerweg ;  = Straße



Für Umgebungsbedingungen mit kleinen  $H / W$  - Werten an breiten, offenen Straßen oder Plätzen, sind größere Hecken neben den Straßenrändern und den Fußgängerwegen, zur Filterung der Autoabgase auf Höhe der Feinstaubquellen (Auto-, Auspuffhöhe) von Bedeutung. Die Bäume schließen sich mit ihren Kronen direkt auf Höhe der Hecken an, sodass die Gesamtkronenmasse von Hecken und Bäumen ein Kontinuum bildet und so einen effektiven Schutzfilter bietet. In Mitten der Fläche befindet sich ein Grünstreifen mit zum Teil auch größeren Bäumen, sowie Grasflächen und feinstaubbindender Krautschicht. Die Feinstaubfilterung ist durch Vegetationsbarrieren zwischen Straßen und Fußwegen gegeben und gleichzeitig ist die stärkere Luftturbulenz dieser Flächen nicht durch extrem dichte Bepflanzung gefährdet (Abb. 35).



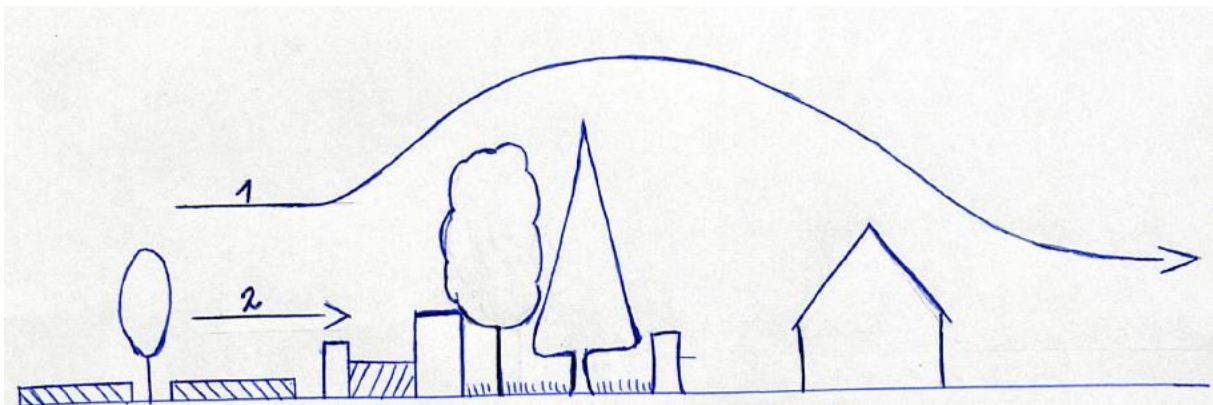
**Abbildung 35. Pflanzmodell für Straßen und Plätze mit niedrigen  $H / W$  - Werten**

Vegetation aus: Größeren Hecken neben Straßenrändern und Fußwegen, sowie Grünstreifen in der Mitte. Bäume willkommen.

 = Fußgängerweg ;  = Straße

In besonders schützenswerten Gebieten mit deutlichen Windeinflüssen, sind Vegetationsstreifen dichter zu gestalten, um zum einen die bereits beschriebene Wind-/Partikelablenkung (1) und zum anderen eine erhöhte Filterung von Feinstaub (2) sicher zu stellen. Neben Hecken, die direkt an den Straßen angrenzen, sollten auch besonders große und dichte Hecken zwischen Fußgängerweg und dem Beginn der zu schützenden

Flächen gepflanzt werde. An diese Hecken anschließend sollten, wie es: Freer-Smith et al. 2004; Brantley et al. 2014 und Saebo et al. 2012; beschreiben, Laubbäume und daran anschließend Koniferen, folgen. Bei diesem Pflanzmuster erhöht auch der Effekt der unterschiedlichen Kronenhöhen von Laubbäumen und Koniferen, die Dichte und Blattmasse, des Schutzstreifens. Der Schutzstreifen aus Bäumen, könnte durch eine relativ hohe Krautschicht (zur Verhinderung von Wiederaufwirbelung) unterbaut sein. Im Anschluss daran könnte erneut eine Hecken- bzw. Strauchfläche folgen um die Filtereffizienz zu erhöhen und den Schutzwall abzuschließen (Abb. 36).



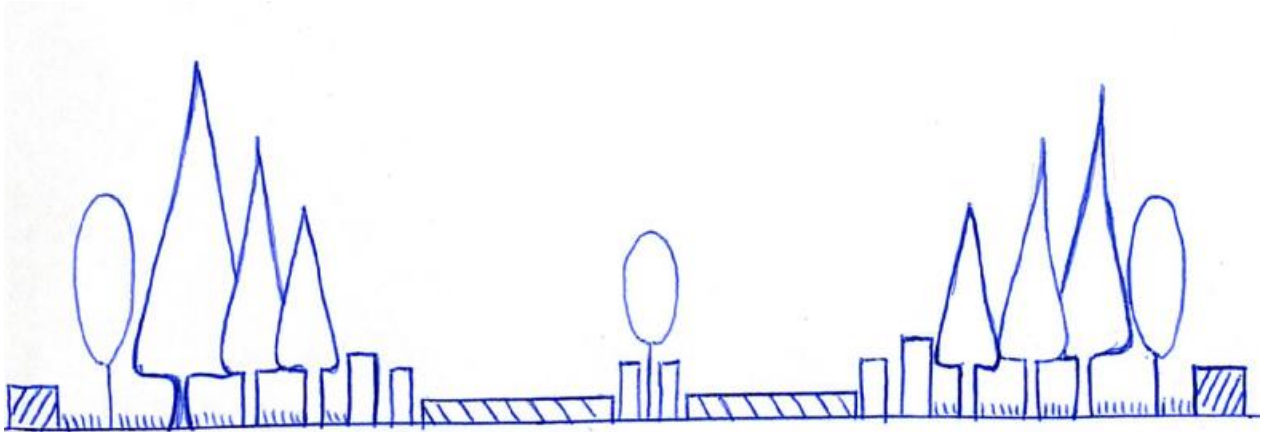
**Abbildung 36. Vegetationsbarrieren in Windrichtung vor sensiblen Gebieten (Kindergärten, Krankenhäusern, Wohngebieten)**

Schutzstreifen mit effektivsten Straucharten als größer werdende und dichte Hecken in Pflanzgemeinschaft mit Laub- und Nadelbäumen, sowie ausgeprägter Krautschicht.

▨ = Fußgängerweg ; ▨ = Straße ; 1 = Aerodynamische Funktion ; 2 = Filterfunktion



Die Pflanzanordnungen an großen Feinstaubquellen (stark befahrenen Straßen, Industriegebieten), die durch ihre meist offene Lage, noch stärkeren Windeinflüssen (als Abb. 35), ausgesetzt sind, weisen keine Gefahr auf, durch zu geringe Durchlüftung, erhöhte Feinstaubwerte aufzuweisen. Aus diesem Grund sollten diese Flächen, die höchste Vegetationsdichte aufweisen. Hierbei begünstigen ebenfalls, eng an die örtlichen Feinstaubquellen gepflanzte Hecken, die von der Straßenoberfläche, einen geschlossenen Übergang zum Kronenansatz, der Bäume ermöglichen, die Feinstaubfilterung, des Schutzstreifens. Den Hecken können Baumreihen mit zunehmend größer werdenden

Bäumen folgen. Hierbei sind bei diesen Umgebungsbedingungen (Hohe Konzentrationen und kontinuierliche Windeinflüsse), für die Feinstaubfilterung, besonders dicht gepflanzte Koniferen mit hohem LAD (LAI/ Höhe= Dichte) am effektivsten. Auch in dieser Pflanzkombination sollte eine hohe Kraut- und Strauchschicht unter den Bäumen eine erneute Wiederaufwirbelung, von, um den Bäumen abgelagerten Partikeln, verhindern (Abb 37).



**Abbildung 37. Pflanzmodell für Luftfilterzonen an starken Feinstaubquellen neben bedeutenden Feinstaubquellen, wie stark befahrenen Straßen (Mittlerer Ring, Autobahnen) oder Industriegebieten**

Vegetation mit: dichten, größer werdenden Hecken, nah an Quellen, vorwiegend dichte und große Nadelbäume mit dichter Krautschicht als Unterwuchs.

 = Fußgängerweg ;  = Straße

## 2.2.4 Erfassung der Filterleistung

### 2.2.4.1 Theoretische Grundlagen der Partikeldeposition

Mit die ersten Wissenschaftler, die sich bereits ab den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts, mit dem Phänomen, der Partikelablagerung auf Pflanzenoberflächen eingehend beschäftigten waren P. H. Gregory und A. C. Chamberlain.

So beschreibt Chamberlain bereits 1953 die Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) (velocity of deposition), von Partikeln an Pflanzen Oberflächen, als die Anzahl aller deponierter Partikel ( $N$ ) pro Flächeneinheit ( $A$ ) in Abhängigkeit der umgebenden Partikelkonzentration ( $X$ ), ( $X$  = Partikelanzahl pro  $m^3$  Luft multipliziert mit der Aussetzungsdauer dieser Konzentration in s).  $V_g$  wird durch Kürzung der Einheiten in Gleichung (1) in  $cm\ s^{-1}$  angegeben.

$$V_g = N / (X A) \quad (1)$$

Weiter ist die Aufnahmeeffizienz von Pflanzenoberflächen ( $C_i$ ) (impaction efficiency), gegenüber Partikeln von großer Bedeutung, da gemäß Gleichung (1) nur die, auf der Pflanzenoberfläche abgelagerten Partikel, in die Berechnung der Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ), eingehen. Die Aufnahmeeffizienz von Pflanzenoberflächen ( $C_i$ ) ist ein Verhältnis, welches den Zusammenhang von allen, von der Pflanzenoberfläche aufgenommenen Partikeln gegenüber allen, in Ausrichtung auf die Pflanzenoberfläche freigelassenen Partikeln, beschreibt (Chamberlain; 1975).

Sowohl in der Natur als auch im Labor werden jedoch nicht alle, von der Pflanzenoberfläche aufgenommenen Partikel auch gefangen und langfristig gebunden. Ein gewisser Teil der Partikel wird vielmehr immer nach erfolgter Aufnahme, durch die bereits beschriebenen Mechanismen: Abprall von der Oberfläche, durch Rückstoß (bounce - off) und Aufwirbelung von der Oberfläche durch Wind (blow - off), von der Pflanzenoberfläche entfernt werden.

Aus diesem Grund definiert Gregory 1973 in seinem Standardwerk: „The Microbiology of the Atmosphere“, die Fangeffizienz ( $C_p$ ) (trapping efficiency) von Partikeln an Pflanzenoberflächen, die nur den Anteil der wirklich von der Pflanzenoberfläche aufgenommenen und zudem auch gefangenen Partikeln, berücksichtigt.

In ihrer Formel unterscheidet sich die Fangeffizienz ( $C_p$ ) nur dadurch von der Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ), dass die jeweilige Windgeschwindigkeit ( $u$ ) in  $m\ s^{-1}$  Berücksichtigung innerhalb der Gleichung findet. Durch mathematische Kürzung

entfallen in Gleichung (2) alle Einheiten, weshalb die Fangeffizienz ( $C_p$ ) ohne Einheiten, als eine Kennzahl angegeben wird.

$$C_p = N / (X u A) \quad (2)$$

Das Verhältnis der beiden Gleichungen (1) und (2) lässt sich daher wie folgt interpretieren.

$$C_p = V_g / u \quad (3)$$

All die, bisher beschriebenen Gleichungen haben vorwiegend Bedeutung für die Partikel einer Größenordnung von bis zu  $\geq 1 \mu\text{m}$ , im Durchmesser. Für Partikel dieser Größenordnung sind die, bereits weiter oben beschriebenen Depositionsmechanismen: Sedimentation, Aufprall und Trägheitsablagerung, zutreffend. Für Partikel mit einem Durchmesser  $< 1 \mu\text{m}$ , sind diese Mechanismen jedoch nicht mehr gültig. So stellen Chamberlain und Little 1981 fest, dass sich solch feine Partikel mit Durchmessern  $< 1 \mu\text{m}$  mehr wie Gase, als Partikel verhalten und durch die sogenannte Brownsche Bewegung an der Pflanzenoberfläche abgelagert werden. Bei diesem Mechanismus handelt es sich um einen Ausgleichsprozess, der zwischen den Partikeln und den Pflanzenoberflächen stattfindet und auf Konzentrationsunterschieden beruht. Aus diesem Grund kann die Deposition dieser feinen Partikel, nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit, durch die oben genannten Gleichungen (1) und (2) beschrieben werden. Für die Erfassung der Geschwindigkeit dieses Ausgleichsprozesses wird ein Diffusionskoeffizient ermittelt. Bei der Ermittlung dieses Koeffizienten spielen neben der Größe und der Form des Partikels eine Reihe weiterer Faktoren, wie zum Beispiel auch der Druck und die Temperatur eine Rolle. Dieser Koeffizient wird als Flächeneinheit pro Zeiteinheit ausgedrückt und beträgt für echte Gase  $= 0,1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  und für gasähnliche Partikel mit Durchmesser  $0,1 \mu\text{m} = 7 \times 10^{-6}$  (Chamberlain und Little; 1981).

Ein Zusammenhang, der sowohl für die Partikel mit Durchmesser  $\geq 1 \mu\text{m}$ , als auch für die Partikel mit Durchmessern  $< 1 \mu\text{m}$  gilt, ist Gleichung (4). Wobei  $F_{flux}$ , in  $(\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$  der Fluss, oder die Menge Feinstaub bedeutet, die sich in einer bestimmten Zeit, bei einer gegebenen Umgebungskonzentration (C) und einer von der Pflanzenoberfläche, der Partikelgröße und der Mikrometrologie abhängiger Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ), absetzt (Beckett et al.; 2000b).

$$F_{flux} = C \times V_g \quad (4)$$

Diese Formel findet in vielen unterschiedlichen Methoden, der Messung von Filterleistungen von Bäumen Anwendung. Möchte man nun die Filterleistung der gesamten Blattfläche, eines Baumes bei einer bekannten Blattflächengröße (A), ermitteln, so ist Gleichung (4) einfach mit der Größe dieser Fläche zu multiplizieren. Gleichung (5) stellt somit die Filtermasse pro Zeiteinheit, der Blattfläche des gesamten Baumes, dar.

$$F_{flux (Baumebene)} = C \times V_g \times A \quad (5)$$

Eine weitere wichtige Größe für die Erfassung der Partikel Deposition von großen wie feinen Partikeln auf Objektflächen, ist die Stoksche Zahl ( $S_t$ ).

Die Stoksche Zahl ( $S_t$ ) beschreibt, den Zusammenhang zwischen den Objekt Dimensionen (Größe der Blätter und Nadeln) und der Partikeldeposition, aus physikalisch – aerodynamischer Sicht.

Somit ist die Stoksche Zahl ( $S_t$ ) eine wichtige Einflussgröße für die Aufnahmeeffizienz ( $C_i$ ), von Partikeln auf Pflanzenoberflächen. ( $S_t$ ) setzt sich aus, dem Verhältnis von Stoppdistanz (S), eines Partikels in der Luft und der, für das betrachtete Objekt charakteristischen Größendimension (L) zusammen.

$$S_t = S/L \quad (6)$$

Die charakteristische Größendimension (L) ist hierbei der, in cm angegebene mittlere Durchmesser des Objektes (mittlerer Durchmesser der Nadeln und Blätter) (Beckett et al., 2000b).

Die Stoppdistanz (S) symbolisiert die horizontale, von einem Partikel zurückgelegte Strecke, bei einer eindimensionalen Windgeschwindigkeit (u) und der Erdbeschleunigung (g). Auch (S) wird in der Einheit cm angegeben, weshalb sich die Einheiten in Gleichung (4) kürzen und somit die Stoksche Zahl ( $S_t$ ) ohne Einheiten angegeben wird.

$$S = v_s u / g \quad (7)$$

Hierbei ist  $v_s$  die Sinkgeschwindigkeit des betrachteten Partikels in der Luft, für dessen Erfassung neben dem Durchmesser und Dichte des Partikels, auch die Dichte und die Viskosität der Luft eine Rolle spielen (Chamberlain und Little, 1981).

## 2.2.4.2 Erfassungsmethoden

Bei der Beschreibung der Feinstaub Filterwirkung von Bäumen werden in der Literatur die verschiedensten Methoden angewandt. Diese hängen in ihrem Umfang und ihrer Komplexität davon ab, wie genau das untersuchte Phänomen der Feinstaubfilterung durch Vegetation, beleuchtet werden soll. Hierbei ist im Allgemeinen festzustellen, dass die Aussagekraft einer Studie und deren Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen, mit dem Umfang der mit berücksichtigten Faktoren, steigt.

## 2.2.4.2.1 Experimentelle Methoden

Mit die frühesten Studien, die über das Phänomen der Filterfähigkeit von Bäumen durchgeführt wurden, sind experimentelle Studien. Diese lassen sich im Rahmen der recherchierten Literatur grob in drei Klassen: Windtunnel- Studien, Chamber- Studien und Modell -Studien, unterteilen. Eine Besonderheit der experimentellen Untersuchungen besteht darin, dass sie unter bekannten und gleichbleibenden Umgebungsbedingungen, durchgeführt werden, die zudem noch frei einstellbar sind.

### 2.2.4.2.1.1 Windtunnel Studien

Die wahrscheinlich frühesten Autoren, die sich der Erfassung der Filterleistung, durch Windtunnel -Messungen näherten, sind Gregory und Chamberlain. Neben Gregory und Chamberlain führten diese Art der Messung die verschiedensten Autoren durch. So auch in den letzten Jahrzehnten verstärkt Beckett et al. und Freer-Smith et al.. Da bei Windtunnel Studien die Möglichkeit besteht, die verschiedenen Parameter, wie: Partikelkonzentration, Partikelgröße, Windrichtung, Windstärke, Luftfeuchte, und Temperatur genau zu erfassen und einstellen zu können, sind die erfassten  $V_g$  und  $C_p$  Ergebnisse sehr genau und können als Musterwerte für Rechenmodelle in Computerprogrammen, zur Erfassung von Depositionsmengen, eingesetzt werden (Beckett et al., 2000b). Beckett et al. ermittelt die Feinstaubdeposition an jungen Topfpflanzen in Windtunneln der Größen Dimensionen: 0,62 x 0,62 x 4 Meter. Hierbei produzieren Beckett et al. und Freer-Smith et al. in ihren Studien NaCl Partikel mit einer Dampfmaschine und erfassen die durchschnittliche Partikelgröße, durch Beobachtungen mit Mikroskopen. Die Partikelkonzentration und die Windgeschwindigkeit können von der Maschine gesteuert werden. Die Filtermenge an Feinstaub wird, durch das Abwaschen, der gesamten Blattfläche der Topfpflanzen mit einer bestimmten Menge an destilliertem Wasser, direkt nach dem Experiment, mit besonders feinen Instrumenten im Labor, ermittelt. Hierbei gibt es verschiedene Wege die Feinstaubfiltermenge festzustellen. So verwenden beispielsweise Beckett et al. und Freer-Smith et al. eine Herleitung der Masse, die auf NaCl Konzentrationsunterschieden, in der gelösten Flüssigkeit basieren (mit Spektrometern ermittelt) (Beckett et al., 2000b; Freer-Smith

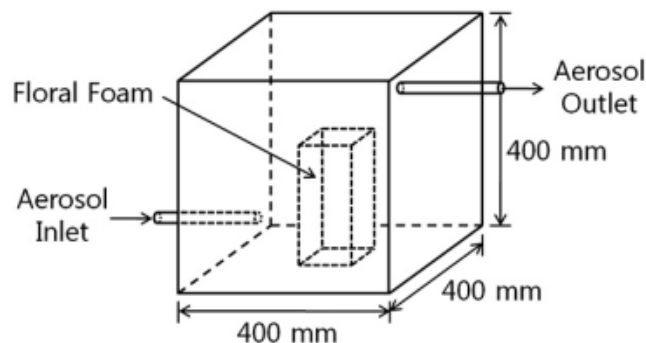


et al., 2004). Die Blattfläche der Proben erfassen die meisten Experimente noch vor den genauen Untersuchungen, in Form des LAIs von Kamera Aufnahmen.

Insgesamt gesehen ist es durch Windtunnel Studien somit möglich die in 2.2.4.1 genannten Bestandteile der Formeln  $V_g$  und  $C_p$  anhand der, im Experiment berücksichtigten Einflussgrößen wie: Partikelkonzentration, Partikelgröße, Windgeschwindigkeit, Abgelagerte Feinstaubmenge und LAI, zu ermitteln.

### 2.2.4.2.1.2 Chamber Studien

Eine weitere, im Labor durchgeführte Methode der Erfassung, der Filterleistung, sind die „Chamber methods“, oder zu deutsch: „Box Studien“. Repräsentanten dieser Methode sind Studien von Hwang et al., 2011; Lin et al., 2012 und Huang et al., 2013. Bei dieser Art von Studien, werden meist, durch Verbrennung erzeugte Feinstaubpartikel in eine Kammer mit jeweils einem Ein- und Ausflussventil, eingeleitet (Abb. 38). Im Inneren der Kammer befinden sich dendrologische Proben mit Nadeln oder Blättern, deren Filterfähigkeit untersucht werden soll (Floral Foam).



**Abbildung 38. Aufbau „Chamber Method“ - Box Studie**

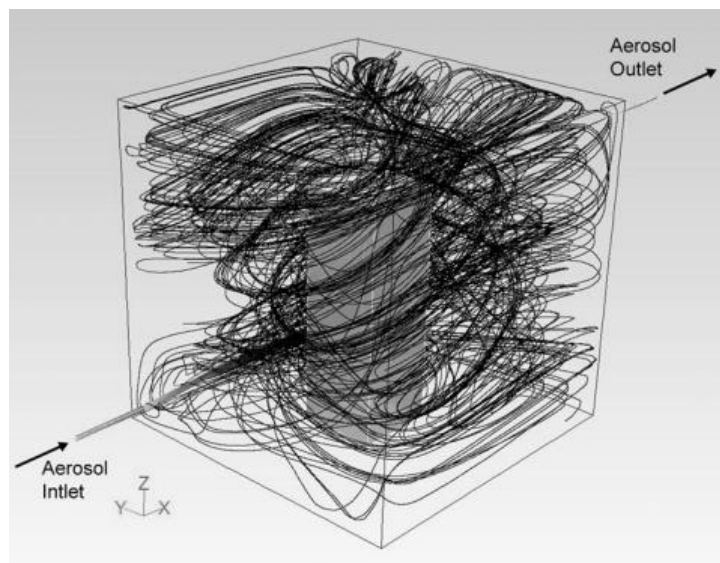
(Hwang et al., 2011, S. 6989)

Ein Vorteil der Box-Studien, ist die Simulation der unterschiedlichen Strömungsrichtungen die beim Depositionsvorgang im Freien, auf die Blätter und Nadeln, einwirken. Diese Simulation gelingt durch die Wahl einer Kammer, als Untersuchungsraumlichkeit, durch die die eingelenkten Luftströme in verschiedene

Richtungen abgelenkt werden und so von vielen Richtungen her die Blätter oder Nadeln umströmen (Abb. 39). Wie viele Messmethoden, beruht auch die Box Studie auf einer Umstellung von Formel (4), die auch für die Ermittlung von  $V_g$  und  $C_p$  Werten in Windtunneln Verwendung findet:

$$V_g \text{ (m s}^{-1}\text{)} = \text{Flux (}\mu\text{g m}^{-2}\text{ s}^{-1}\text{)} / \text{Concentration (}\mu\text{g m}^{-3}\text{)}.$$

Der Flux wird hierbei nicht aus einer abgewaschenen Menge an Feinstaub, sondern aus einer Konzentrationsdifferenzen ermittelt. Die Partikelkonzentration (in: Partikel Anzahl/m<sup>3</sup> oder Partikel Masse/m<sup>3</sup>) kann am Ein- und Ausflussventil der Box, durch Messungen ermittelt werden. Indem die Differenz der beiden Konzentrationsmessungen gebildet wird, kann der gefilterte Feinstaub, in Anzahl oder in Masse pro: Blattfläche, Umgebungskonzentration, Fließgeschwindigkeit und Dauer, ermittelt werden (Hwang et al., 2011).



**Abbildung 39. Simulation verschiedener Luftströmungsrichtungen**

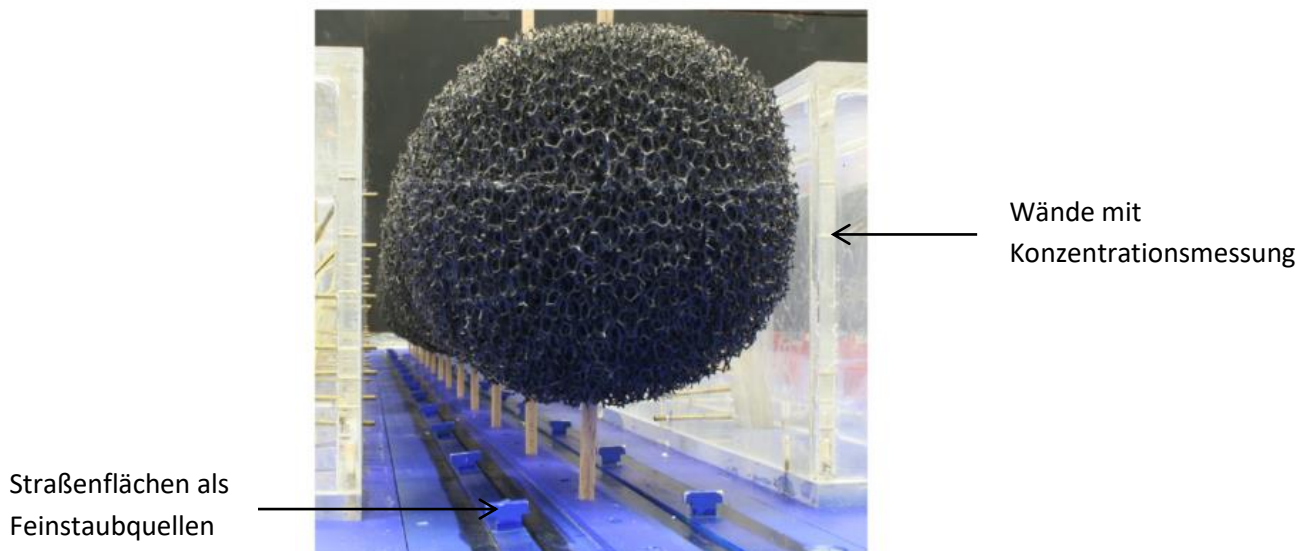
(Hwang et al.; 2011; S. 6990)

### 2.2.4.2.1.3 Modell Studien

Eine weitere experimentelle Methode nach Windtunnel und Box -Untersuchungen, sind Modell -Studien. Sie sind eher selten, so konnten in der recherchierten Literatur nur zwei Autoren gefunden werden, die diese Art von Studien durchführen. Dennoch fallen diese Studien, durch ihren Ansatz, die Realität (Gebäude, Straßen, Bäume) nachzubauen und dadurch die Auswirkungen von Bepflanzungen in bestimmten Stadtgebieten sichtbar zu machen, besonders auf. Hierbei können unterschiedliche Szenarien modelliert- und miteinander verglichen werden.

Die Tisch Modell Studien können in einem Windtunnel stattfinden, wobei sich die Windgeschwindigkeit aus der Strömungsgeschwindigkeit des Windtunnels ergibt und die Feinstaubpartikel durch Einflussstellen am Boden, dem Modell zugegeben werden (Gromke und Ruck, 2007), oder ein Gasgemisch als Feinstaubäquivalent verwendet wird und bereits in der beschleunigten Luft enthalten ist (Donate und Bruck, 1999).

Die Unterschiede der einzelnen Szenarien, bezüglich des Feinstaubgehalts werden durch die Messung von Partikelkonzentrationen im Modell, wie beispielsweise durch Messinstrumente an den modellierten Hauswänden (Abb. 34), ermittelt. (Gromcke und Ruck, 2007, S. 3287–3302; Donate und Bruck, 1999).



**Abbildung 33. Ansicht in Modell Aufbau**

(Gromke und Ruck, 2007, S. 3290)

## 2.2.4.2.2 Feld Methode

Studien nach der Feld Methode sind die am häufigsten verwendeten Untersuchungen zur Bestimmung der Filterfähigkeit von Bäumen. Neben den experimentellen Windtunnel Studien gehören auch die Feld Studien zu den frühesten Untersuchungsformen, zur Einschätzung der Filterleistung von Bäumen. So berichtet bereits 1975, Chamberlain von solchen Feldstudien. Feld Studien sind ein großer Sammelbegriff unterschiedlicher Varianten von Studien, die sich in drei kleinere Gruppen: Gravimetrisch- Numerische Studien, Magnetische Studien und Konzentrationsbasierte Studien, unterteilen lassen. Gegenüber allen anderen Methoden ist die Feld Methode eine Methode, die die Feinstaub Filterung von Bäumen, innerhalb lebendiger Systemen, direkt und unter ganz realen Bedingungen erfasst.

### 2.2.4.2.2.1 Gravimetrisch- Numerische Studien

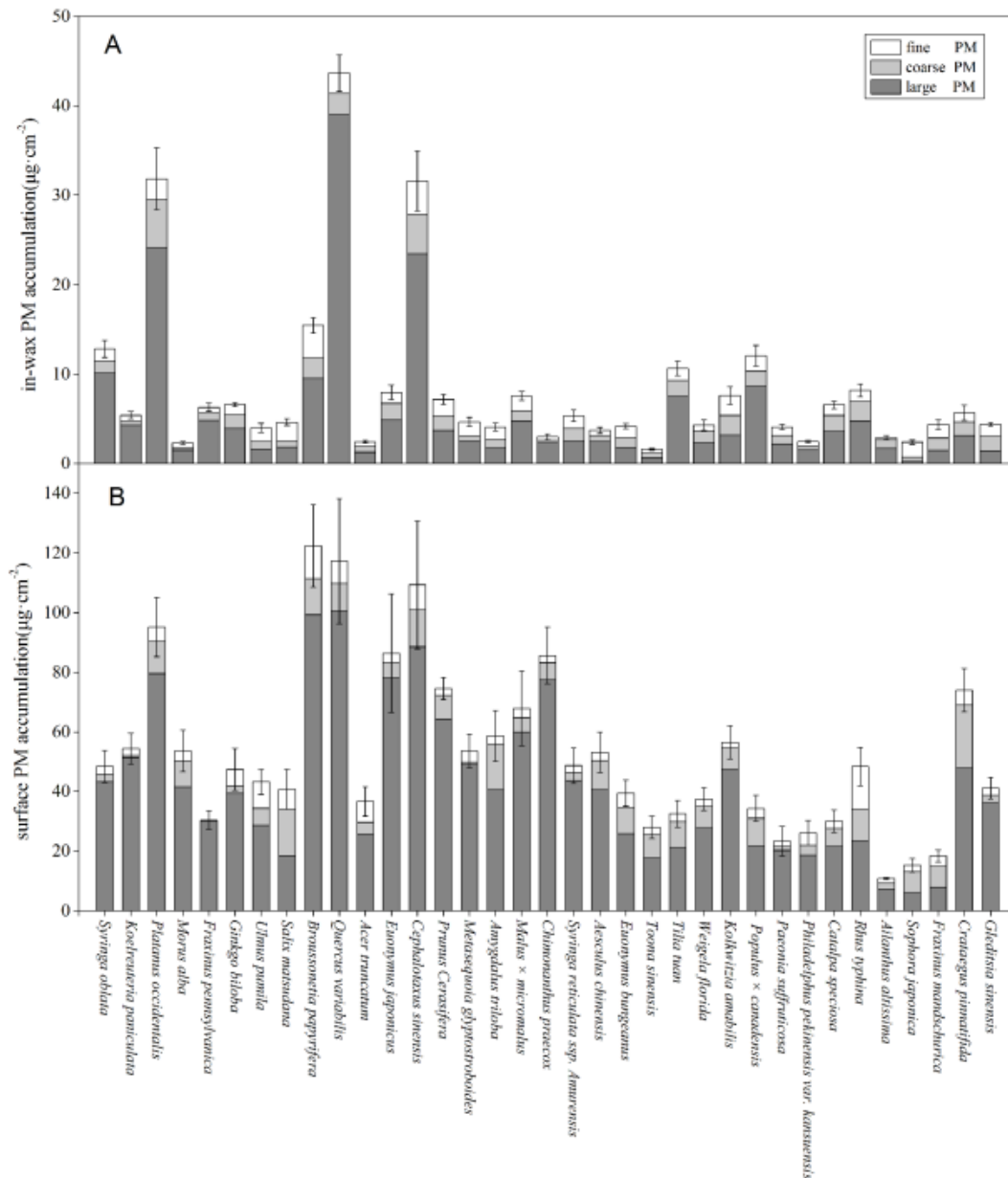
Neben den gravimetrischen Studien, also den Studien, die auf Masse und Schwerkraft beruhen, treten in der Literatur auch numerische, auf Mikroskopie basierende Studien auf. Während das Ziel der gravimetrischen Studien darin besteht, speziell die Partikelmassen (in:  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) und die Beschaffenheit des Feinstaubes (Stärke der einzelnen Größenfraktionen) zu ermitteln, stellen numerische Studien vielmehr die Anzahl von Partikeln pro Blattfläche fest. Die gravimetrischen Studien sind die, in der aktuellen Literatur, am häufigsten auftretenden Studien. Gravimetrische Feldstudien gehen meist über einen längeren Zeitraum von einigen Monaten bis Jahren (Popek et al., 2013; Sgrigna et al., 2015; Saebo et al., 2012).

In dieser Variante von Studien, werden meist von verschiedenen Bäumen einer Art, einzelne Blattproben entnommen, die über den ganzen Baum verteilt sind und somit insgesamt eine repräsentative Mengen der Feinstaubablagerung auf der Baumoberfläche, ergeben. Nach der Probenahme werden die zu untersuchenden Blattproben direkt in ein Labor gebracht, in welchem die genaue Untersuchung der Blätter oder Nadeln stattfindet.

Im Labor findet so die Bestimmung der abgelagerten Feinstaub Menge und deren Beschaffenheit, statt. Auch bei den gravimetrischen Studien werden, wie in den Windtunnel Experimenten hierbei, zuerst die Partikel mit einer fixen Menge destilliertem Wasser von den Blatt- und Nadel Flächen abgewaschen, bevor diese Flüssigkeit dann durch verschiedene Filter läuft, die den Feinstaub je nach Studie in verschiedene Größen (Fraktionen) einteilt. Hierbei gibt es unterschiedliche Methoden die abgelagerte Menge pro Feinstaubfraktion fest zu stellen. Während die Windtunnel Studien eher über Konzentrationsdifferenzen die Partikel Masse bestimmen, ermitteln die gravimetrischen Studien, die geringen Massen der Feinstäube durch direktes Wiegen der Feinstaubfilter vor und nach dem Durchfluss der Flüssigkeit, mit speziellen analytischen Wagen, um die geringen Massen der Feinstäube zu erfassen (Dzierzanowski et al., 2011). Einige wenige Studien ermitteln die Feinstaubmasse zudem durch mikroskopische Analysen. So errechnen Terzaghi et al. die Masse von deponierten Partikeln, indem sie die Partikelanzahl pro Blattfläche und deren Durchmesser mit Hilfe von mikroskopischen Aufnahmen ermitteln, sowie eine bestimmte Dichte der Partikel annehmen (Terzaghi et al., 2013).

Einige Feldstudien jedoch, gehen in ihrer Beobachtungsgenauigkeit noch einen Schritt weiter, indem sie neben den festen abgelagerten Partikeln zudem auch die Menge der wasserlöslichen Partikel durch spektrometrische und chromatographische Methoden ermitteln (Freer-Smith et al, 2005; Zhang et al., 2015).

Zudem unterscheiden viele Studien der gravimetrischen Methode die abgelagerte Feinstaubmenge in „surface particulate matter“ und in „in-wax particulate matter“, also einem Oberflächen Anteil und einem Anteil der Partikel, der in der Wachsschicht abgelagert ist (Thao-Nguyen et al., 2014; Popek et al., 2015; Dzierzanowski et al., 2011). Das Freisetzen der Partikel, die sich in der Wachsschicht befinden, wird in diesem Vorgang in einem zweiten Schritt des Abwaschens erst mit Hilfe von Chloroform, einem starken Lösungsmittel, möglich (Saebo, 2012, S. 348).



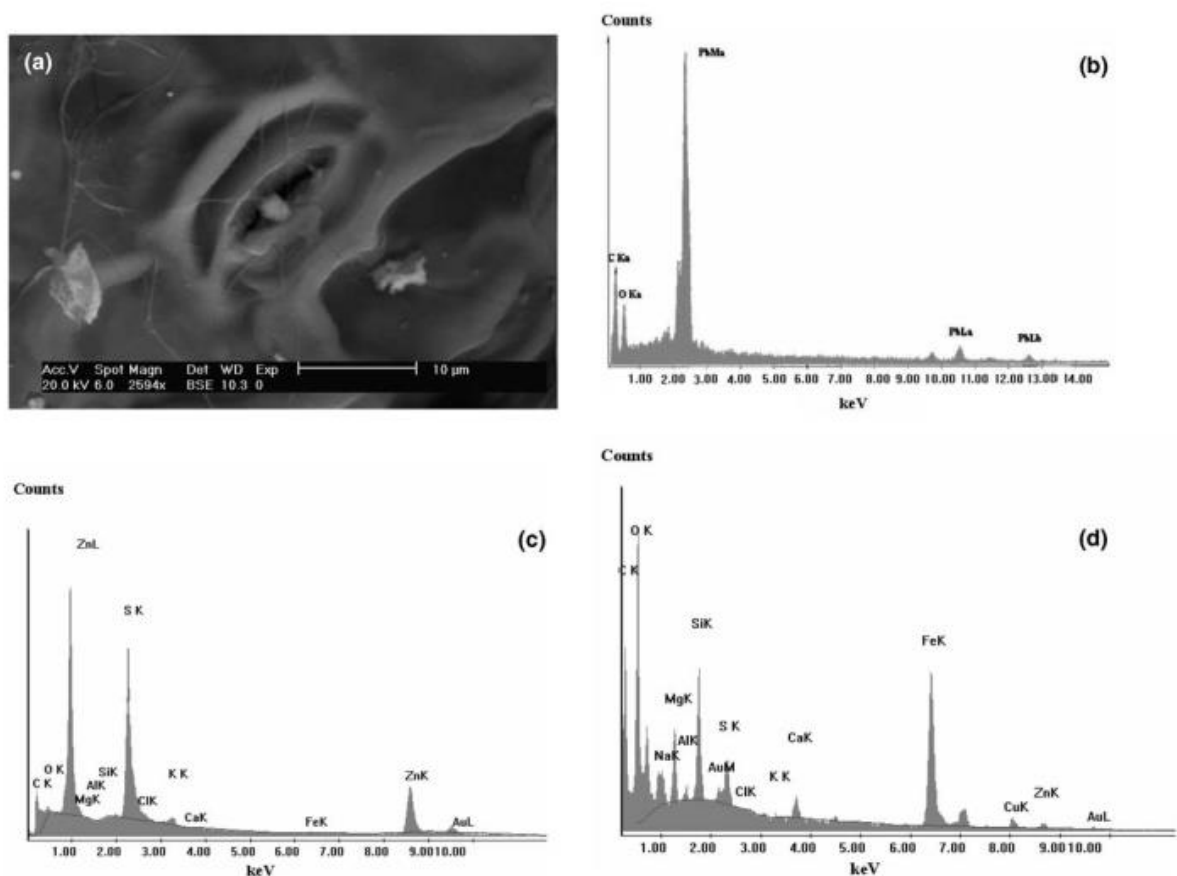
**Abbildung 40. Ergebnispräsentation einer gravimetrischen Studie**

Aufteilung in Oberflächen- und Wax Schicht Partikel, sowie in drei Größenfraktionen

(Mo et al. , 2015, S. 6)

Wie oben bereits erwähnt treten neben den gravimetrischen, auch numerische, auf Mikroskopie basierte Studien auf. Diese Art von Studien ist weniger häufig, als die gravimetrischen Untersuchungen. Diese Studien unterscheiden sich von den oben genannten Methode nur darin, dass die Blattflächen nicht abgewaschen werden, sondern aus der Mitte der Blätter, Proben geschnitten werden, die dann später unter dem Elektronen Mikroskop analysiert werden. Hierbei verwenden die meisten Autoren

eine Software zur leichteren Bild Auflösung und Partikel Erfassung auf den elektromikroskopischen Bildern (Song et al., 2015; Wang et al., 2015; Sternberg et al., 2010; Zampieri et al., 2013). Viele der Studien erfassen neben der Anzahl der Partikel auch deren chemische und elementare Zusammensetzung. Hierbei kommen neben den Elektronenmikroskopen auch spektroskopische Methoden (energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDAX)), zum Einsatz (Sternbegr et al., 2010; Tomasevic et al., 2005). (Siehe Abb. 8). Die Erfassung der Partikel Anzahl gewichtet im Vergleich zur gravimetrischen Methode stärker die besonders feinen Partikel, die für die Gesundheit des Menschen von größerer Bedeutung sind als die großen Partikel. Dies ist mit ein Grund weshalb diese Art von Studien besonders interessant sind.



**Abbildung 41. Elektronenmikroskopische Aufnahme von Partikeln und deren chemische Zusammensetzung**

(a) Elektronenmikroskopisches Bild einer Spaltöffnung auf der Blattunterseite von *A. hippocastanum*, (b) Spektroskopische Auswertung des Blei reichen Partikels in der Mitte der

Spaltöffnung (c) Spektroskopische Auswertung des linken größeren Partikels (d)  
Spektroskopische Auswertung des eisenhaltigen rechten Partikels  
(Tomasevic et al., 2005, S. 756)

## 2.2.4.2.2.2 Magnetische Studien

Eine weitere Erfassungsvariante, die der Feld Methode zugeordnet werden kann, sind die Studien die auf Magnetismus beruhen. Diese Art von Studien diente ursprünglich der Erfassung der in einem bestimmten Gebiet vorherrschenden Feinstaubbelastung, da die, auf den Blättern von Bäumen vorhandene magnetische Restremanenz (ähnlich wie auch die Feinstaubmenge) zum einen Rückschlüsse über die Feinstaubkonzentration an einer speziellen Lokalität (Standort des Baumes) zulässt und zum anderen die Feinstaubgehalt auf einer, für Passanten sehr wichtigen Höhe (Blätter auf Kopfhöhe), repräsentiert (Mitchel und Maher, 2009).

Doch bald wurde die Fähigkeit dieser Methode erkannt auch den Filtereffekt von unterschiedlichen Bäumen zu quantifizieren (Mitchel et al., 2010). Das System ähnelt dabei sehr dem bereits beschriebenen Vorgehen in gravimetrisch- numerischen Verfahren Studien. So werden ebenfalls über den gesamten Baum verteilt Blattproben entnommen und im Labor untersucht, mit deren Hilfe man hofft, auf die Gesamtfilterung des Baumes schließen zu können. Hierbei besteht der Unterschied zu gravimetrisch-nummerischen Variante nur darin, nicht die Menge des Feinstaubes, sondern, mit Hilfe von speziellen Geräten, die magnetischen Eigenschaften, des Blattes zu untersuchen und zu klassifizieren. Da eisenhaltige Partikel besonders starke magnetische Eigenschaften aufweisen stechen diese bei dieser Untersuchungsart des Blattes besonders hervor. Hierbei ist festzustellen, dass gerade diese eisenreichen Partikel aus Verbrennungsprozessen in Motoren freierwerden (Industrie und Auto Abgase) und somit gute Zeiger für den, für den Menschen besonders gefährlichen Feinstaub sind (Hofmann et al., 2013).



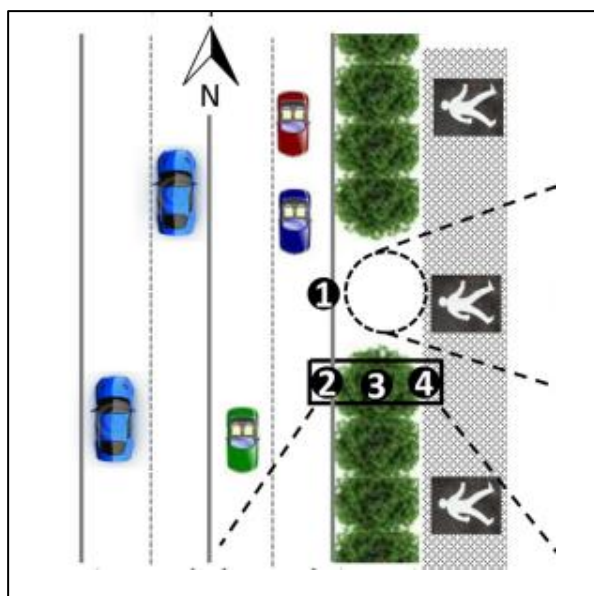
### 2.2.4.2.2.3 Konzentrationsbasierte Studien

Schließlich gibt es im Bereich der Feld Methode auch die konzentrationsbasierten Studien. Sie beinhalten eine Messmethode der Feinstaubfilterleistung von Bäumen, die den Messungen in Kapitel II. dieser Bachelor Arbeit, von allen bisher behandelten Erfassungsmethoden, am meisten entspricht.

Die konzentrationsbasierten Studien beruhen darauf, die Feinstaubkonzentration mit den gleichen Geräten zu messen, wie Studien von Klimametrologen über das Thema Feinstaub, und wie städtische Überwachungsstationen des Umweltbundesamtes. Es handelt sich dabei meist um die in Kapitel 2.1.4, dargestellte Feinstaubmessinstrumente, die den Feinstaub in seine Größenklassen aufteilen und in Masse pro Volumeneinheit angeben. Hierbei wird die Feinstaubfilterleistung *in – sito*, also direkt am Ort des Geschehens, am Standort des Baumes im städtischen Gebiet erfasst, indem die Feinstaubkonzentrationen aus der Luft im Einflussbereich des Baumes, mit den Feinstaubkonzentrationen ohne Einflüsse von Vegetation, verglichen und die Differenzen analysiert werden.

Die einzelnen Messsysteme und ihr Aufbau können sich hierbei, jedoch von einander unterscheiden. Messen einige Systeme die Feinstaubdifferenz in horizontaler Ausrichtung vor- und hinter den Bäumen (Luv- und Lee Messungen) (Al-Dabbous und Kumar, 2014; Baldauf et al., 2008; Brantley et al., 2014; Liu, 2015), so erfassen andere Studien die Feinstaubkonzentration je nach betrachteter Höhe am Baum und beleuchten somit den vertikalen Filtereffekt des Baumes (Jin et al., 2014; Chen et al., 2016). Abbildung 42. und 43. geben einen grafischen Eindruck der beiden unterschiedlichen Varianten.

In ihren Messungen kommen Al-Dabbous und Kumar hierbei auf Filterwerte zwischen 14 und 37 Prozent (Al-Dabbous und Kumar, 2014). Baldauf et al. stellen in ihrer Studie entlang einer Hauptstraße Filterwerte für Feinstaubkonzentrationen von 15 – 50 Prozent fest (Baldauf et al., 2008). Zudem kommen Halley et al. bei ihrer Untersuchung entlang einer Schnellstraße auf Filterwerte von bis zu 22 Prozent.

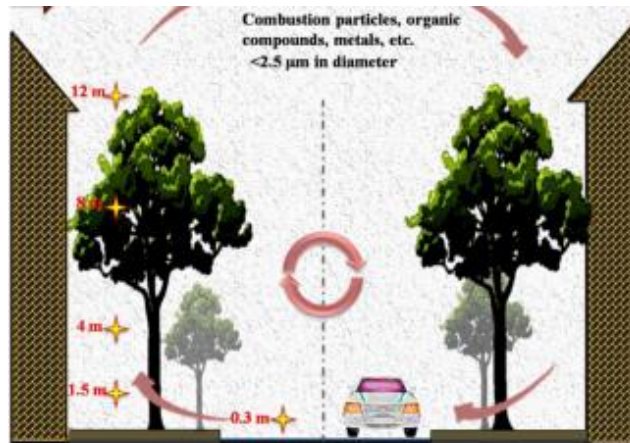


**Abbildung 42. Horizontale Filtermessung**

Die Zahlen: 1, 2, 3, 4 symbolisieren die Position der Konzentrationsmessungen  
(Vor-, hinter- und in der Mitte des Baumes)

(Al-Dabbous und Kumar, 2014, S. 116)

Doch auch die Autoren der vertikalen Messanordnung verzeichnen Filterwerte. So stellen Jin et al. in ihrer Straßenschlucht Studie fest, dass die Feinstaubkonzentrationen auf Höhen unterhalb der Krone stets höher sind, als Konzentrationen auf 12 Metern (Jin et al., 2014). Auch Chen et al. stellen zu 10 bis 40 Prozent niedrigere Filterwerte auf einer Höhe von 1,5 Metern (unter der Krone), als auf 3 Metern (in Höhe der Krone) fest (Chen et al., 2016).



**Abbildung 43. Vertikale Filtermessung**

Die sternförmigen Symbole entsprechen den vertikal verteilten Messpunkten

(Jin, 2014, S. 280)

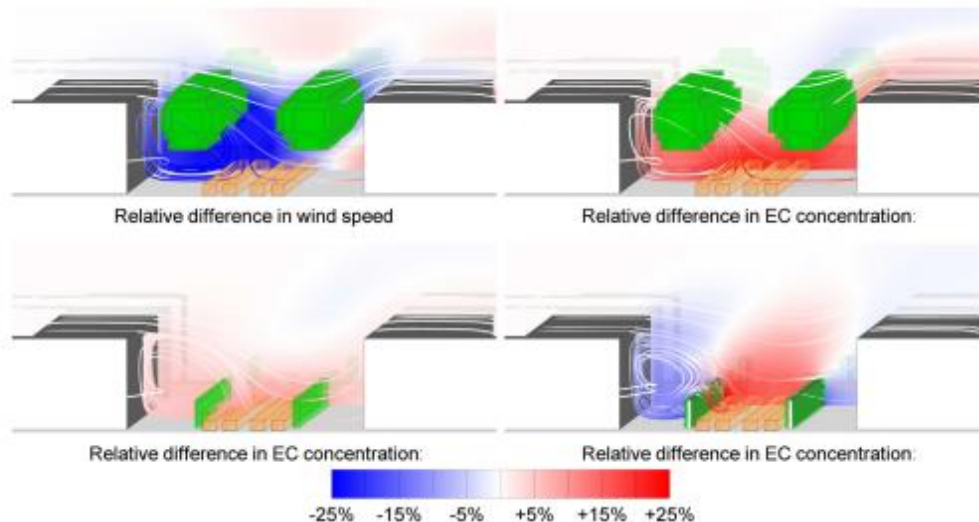
## 2.2.4.2.3 Rechen- und Simulationsbasierte Methode

### 2.2.4.2.3.1 Mikrometrologische Studien

Im Gebiet der Mikrometrologischen Studien ist die häufigste Untersuchungsart die sogenannte Eddy – Kovarianz Methode. Diese Methode wird in der Klimametrologie häufig angewandt, sowohl um Energie-, als auch Stoffflüsse in atmosphärischen Austauschprozessen, zu untersuchen. Bei der Eddy – Kovarianz Methode handelt es sich hierbei um eine Methode, die auf Grundlage von mikrometrologischen Gleichungen, die Daten eines Anemometers (3x Dimensionales Windmessgerät) und eines Feinstaub Konzentrationsmessgerätes, auswertet und dabei vertikale Depositionsflüsse auf die verschiedensten Oberflächen (somit auch Bäume) erfasst (Bleyl et al., 2002). Gallagher et al. ermitteln mit Hilfe dieser Methode Depositionsgeschwindigkeiten von  $1 \text{ cm s}^{-1}$  in Douglasien Beständen und Hicks stellt für die Deposition von schwefelhaltigen Partikeln an Kiefern, eine Geschwindigkeit von  $0,7 \text{ cm s}^{-1}$  fest (Gallagher et al., 1997; Hicks et al.; 1982).

Eine ebenfalls auf der Grundlage von mikrometrologischen Gleichungen entwickelte Methode, ist die Profile Methode. Auch sie diene ursprünglich dazu vertikale Energie- und Stoffflüsse in der Metrologie zu erfassen. Da auch die Profile Methode eine klimametrologische Erfassungsvariante darstellt, benötigt man für die Anwendung, wie auch für die Eddy – Kovarianz Methode, klimatische Daten wie: Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur, thermische Stabilität der Luftschicht und Feinstaubkonzentration. Hierbei wird die vertikale Depositionsmenge aus einem Diffusionsgradienten und einem Konzentrationsgradienten, erfasst (Nicholson, 1988). Everett et al. messen so Depositionsgeschwindigkeiten für gasförmige ( $\text{SO}_4$ )<sup>2-</sup> Partikel an Gräsern in Höhe von  $1,4 \text{ cm s}^{-1}$ . Weiter messen Sievering et al. mit dieser Methode an Weizen, Depositionswerte von  $0,1 - 1,2 \text{ cm s}^{-1}$ . (Everett et al., 1979; Sievering et al., 1982). Ein Nachteil dieser Methode ist, dass sie nicht in dicht bepflanzter oder besiedelter Umgebung ausgeführt werden kann, da die Messung eine relativ freie und homogene Umgebungsfläche benötigt (Peters und Eiden; 1992).

Eine weitere Variante Stoffflüsse, wie partikelförmige Luftverschmutzungen in der Atmosphäre zu erfassen, ist die Anwendung des „ENVI-met“ Modells. Dieses Modell ist ein frei im Internet verfügbares Simulationsmodell, speziell für die Untersuchung der Austauschprozessen zwischen Pflanzen und der Atmosphäre in städtischen Gebieten (ENVI-met; 2016). Die aktuellste Version dieses Simulationsmodells zeichnet sich durch eine sehr hohe räumliche und zeitliche Präzession, der Vorhersage aus. Das System beruht, wie die beiden ersten Modelle, ebenfalls auf metrologischen Gleichungen, zur Erfassung von Feinstäuben. Hierbei wird das Vorhandensein von Vegetation durch weitere Gleichungen ergänzt. Zudem werden dem System noch Informationen über das zu analysierende Umfeld, wie Gebäude und Straßen zugeordnet. Das Ergebnis dieser Methode ist keine Depositionsgeschwindigkeit sondern die räumliche Simulation von Feinstaubkonzentrationen in einem speziellen Gebiet (Abb. 44). Die speziellen metrologischen Bedingungen im Zeitraum der Untersuchung, fließen auch in dieser Erfassungsmethode, mit in die Berechnung ein (Vos et al.; 2013, S. 114).



**Abbildung 44 Simulationsergebnis von ENVI-met  
Vergleich von Feinstaubgehalt einer Straßenschlucht mit und ohne Bäume, EC  
(Elementarer Kohlenstoff) entspricht dem Feinstaubgehalt**

(Vos et al.; 2013, S. 114)

### 2.2.4.2.3.2 Mathematische Studien

Neben den mikrometrologischen Herangehensweise, ist eine weitere Rechen- und Simulationsbasierte Methode Feinstaubdeposition zu beschreiben, die Annäherung an den Ablagerungsprozess über eine Vielzahl von mathematischen Gleichungen. Im Unterschied zu den vorherigen mikrometrologischen Studien, sind diese Untersuchungen noch mathematischer ausgerichtet. Hierbei ist die zentrale Gleichung dieser mathematischen Methode, eine an Formel (4) angelehnte:

$$F_{\text{flux}}(d_p) = C(d_p, z) \times V_g(d_p, z).$$

Wobei  $d_p$ , dem Partikeldurchmesser und  $z$ , der Messhöhe über dem Boden, entsprechen (Peters und Eiden; 1992). Je nach Ausführlichkeit der Studie, beziehen die Autoren unterschiedliche viele Gleichungen, in die Rechnung mit ein, die die einzelnen Prozesse beim Vorgang der Partikeldeposition und ihre abhängigen Variablen, repräsentieren. Peters und Eiden zum Beispiel erstellen ein sehr detailliertes Modell. So findet in ihrer Berechnung auch die Mikrorauheit der Krone und die Blattoberflächenbeschaffenheit Berücksichtigung. Das Rechenmodell beschreibt mit Hilfe von Gleichungen, zum einen

den makroskopischen Transfer Prozess, von Partikeln aus der Atmosphäre hin zum Baumkörper und zum anderen, den mikroskopischen Transfer Prozess, von Partikeln auf die Blattoberfläche. Das Modell berücksichtigt Partikeldurchmesser und Windgeschwindigkeiten und ergibt Depositionsgeschwindigkeiten in einem Bereich von  $0.01 \text{ cm s}^{-1}$  –  $70 \text{ cm s}^{-1}$  (Peters und Eiden; 1992). Eine weitere mathematische Arbeit, die sowohl den makroskopischen, als auch den mikroskopischen Prozess im Vorgang der Ablagerung von Partikeln auf der Baumoberfläche, berücksichtigt, ist eine Untersuchung von Bache et al. Dieser errechnet in seinem mathematischen Modell für einen Kiefernbestand, eine Depositionsgeschwindigkeit, von  $1 \text{ cm s}^{-1}$  bei einem Partikel Durchmesser von  $5 \text{ }\mu\text{m}$  und einer Windgeschwindigkeit von  $0,6 \text{ m s}^{-1}$  (Bache et al.; 1979).

Eine weitere Form der mathematischen Methode, ist das sogenannte „Big Leaf Model“ nach Baldocchi et al. 1987 und Hicks et al. 1982 (Siehe Abb. 45.). Dieses System beschreibt speziell den Prozess der Aufnahme von besonders feinen, festen und gasförmigen Partikeln. Hierbei bildet das System ein Kontinuum von Konzentrationen und Diffusionswiderständen ab, das die Partikel bei ihrem Weg, von der Atmosphäre über die Baumkrone ( $R_{\text{aerodynamic}}$ ), durch die Laminare Grenzschicht der Blattoberfläche ( $R_{\text{boundary}}$ ) bis hin zur Blattfläche ( $R_{\text{canopy surface}}$ ), durchlaufen. Hierbei ist der Widerstand der Blattfläche ( $R_{\text{canopy surface}}$ ), in: 1. Widerstand der Kutikula, 2. Widerstand der Stomata und 3. Widerstand des Mesophylls, untergliedert. Weiter ist die Deposition an Stammflächen und auf dem nahen Erdboden, mit den Widerständen  $R_{\text{stem}}$  und  $R_{\text{soil}}$ , sowie die Partikelablagerung auf anderen Pflanzenteilen, mit dem Widerstand  $R_{\text{other}}$ , gekennzeichnet.

Jedem Übergangswiderstand sind in diesem System mathematische Gleichungen zugeordnet, die mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes gelöst werden. Die Gleichungen sind dabei gasspezifisch und das System berücksichtigt, auch metrologische Einflüsse, wie Temperatur, Druck, Luftfeuchte und Windstärke. Das System schätzt in Anlehnung an Formell (4), die stündlich abgelagerte Partikelmasse ( $F_{\text{flux}}$ ), als das Produkt aus der umgebenden Partikelkonzentration ( $C$ ) und der Depositionsgeschwindigkeit der jeweils betrachteten Gase oder feinen Partikel ( $V_g$ ) (Taylor et al., 1994).

## Big Leaf Model

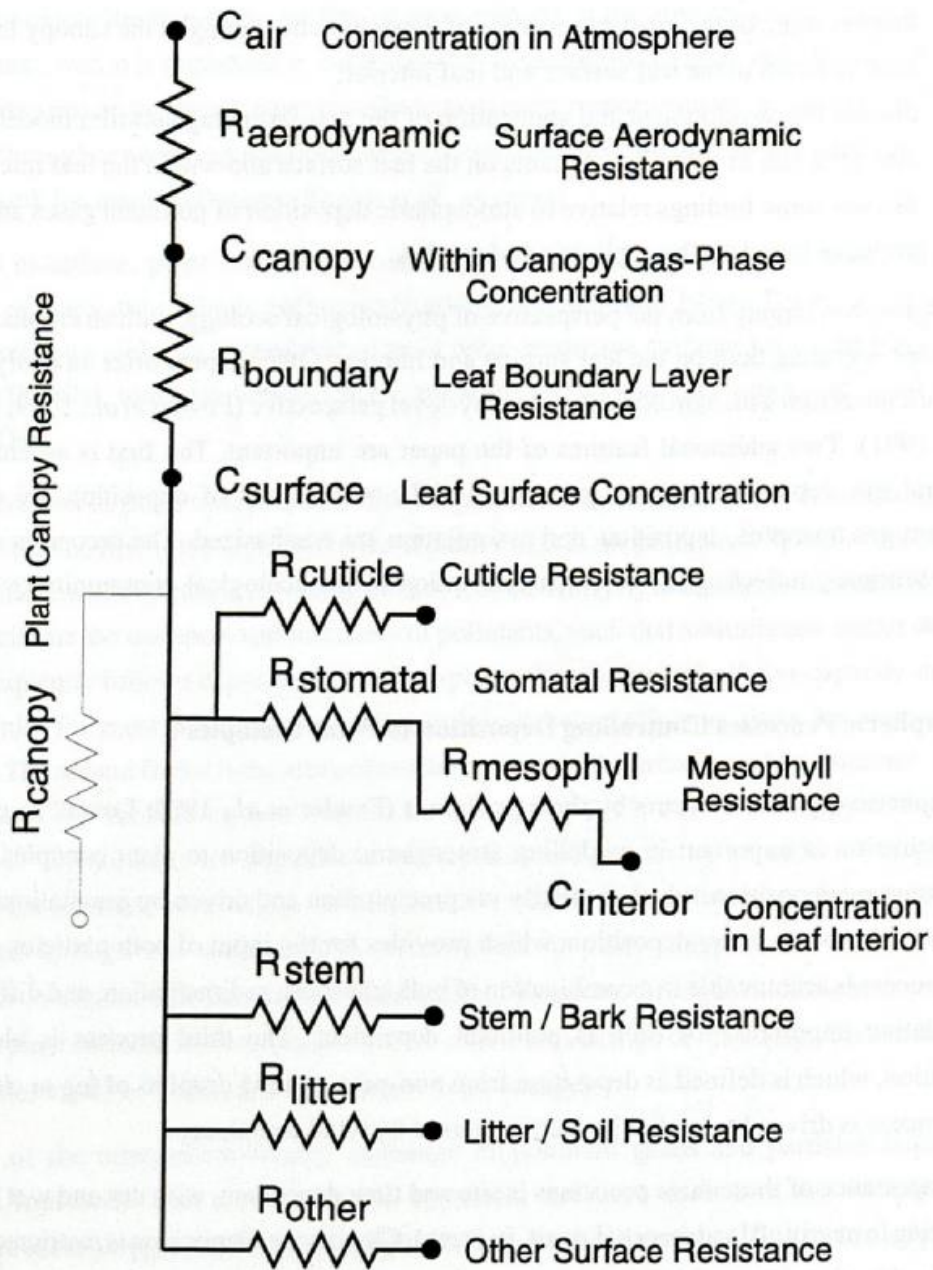


Abbildung 45. Big Leaf Model

(Taylor et al., 1994, S.18)

### 2.2.4.2.3.3 Hochrechnungs Studien

Eine weitere Form der Rechen- und simulationsbasierten Methode, zur Erfassung der Feinstaubfilterung von Bäumen, ist eine Hochrechnung auf größere Flächen in Städten. Auch diese Simulation beruht hierbei auf Formell (4):  $F_{\text{flux}} = C \times V_g$ .

Hierbei wird die Depositionsgeschwindigkeit in einigen Studien, baumartenspezifisch aus Literaturangaben, übernommen, oder in anderen Studien mit Hilfe des „Big Leaf Models“ und aktuellen metrologischen Daten, errechnet (Nowak et al.; 2013; Hirabayashi et al.; 2014). Die Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) wird dann in Gleichung (4), zusammen mit dem, von städtischen Klimastationen erfassten Konzentrationswert (C), eingesetzt und somit der Depositionsfluss  $F_{\text{flux}}$  ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) errechnet. Von dieser, auf der Blattfläche abgelagerten Menge an Feinstaub, wird hierauf ein gewisser Prozentsatz je nach Baumart und aktueller Windstärke abgezogen, was die Resuspension (Wiederaufwirbelung von der Blattfläche) repräsentieren soll. Die entsprechenden Prozentanteile, in Abhängigkeit zur vorherrschenden Windstärke entnehmen die meisten Studien anderer Fachliteratur über Resuspension.

Nach Niederschlagsereignissen gilt die noch vorhandene Feinstaubmenge ( $F_{\text{flux}}$  - Resuspension), als von der Blattfläche abgewaschen und als gefiltert. Hierzu werden Niederschlagsdaten der städtischen Klimastationen genutzt. Nach Niederschlagsereignissen wird die, auf dem Blatt vermutete Feinstaubmenge auf null gesetzt. Nach dem Regenereignis beginnt die Feinstaubanreicherung wieder von neuem. Die zur Anreicherung auf der Blattfläche zur Verfügung stehende Zeit beträgt somit die Länge des Abstandes zwischen zwei Niederschlagsereignissen. Die Werte der abgewaschenen Feinstaubmengen werden notiert und über die Länge des Untersuchungszeitraumes aufaddiert.

In einem weiteren Schritt ermitteln die Studien dieser Methode die in einem gesamten Stadtgebiet vorhandene Grünfläche, wobei unter anderem auch Computerprogramme wie GIS (Geo Informations System) Verwendung finden (Hirabayashi et al.; 2014). Im Zuge dieses Schrittes werden mit Hilfe von Parzelleneinteilung der Gesamtgrünfläche, Stichproben entnommen um Aussagen über die Qualität (wie: Art, Ausmaße, Vitalität) der vorhandenen städtischen Grünflächen zu treffen. Mit Hilfe dieser Angaben leiten die



Autoren Werte über die Blattflächen von verschiedenen Baumarten, innerhalb der einzelnen Parzellen ab, die dann auf die gesamte Stadtfläche aufgerechnet werden.

Um die Filterleistung einer Baumart pro Stadtfläche zu erhalten, wird die angereicherte Feinstaubmenge je Baumart  $F_{flux}$  (ermittelt aus baumartspezifischer Depositionsgeschwindigkeit  $V_g$  und repräsentativen Umgebungskonzentrationen  $C$ ), und nun mit der, für die jeweilige Baumart errechneten Gesamtblattfläche in der Stadt und mit der Anreicherungszeit zwischen den einzelnen Niederschlagsereignissen, multipliziert.

Einige Untersuchungen ermitteln nun weiter, neben der Menge an Feinstaub, auch die prozentuale Feinstaubreduktion, die die Stadtbäume für eine Stadt erzielen können. Hierzu wird, die von allen Baumarten gemeinsam gefilterte Menge einer Stadt, in Relation zu der, in der Luft dieser Stadt vorherrschenden Feinstaubmenge gesetzt und ein prozentualer Anteil errechnet. Um die, in der Stadtluft auftretende Menge an Feinstaub zu erfassen, nutzen die Autoren eine Annäherung, über die gemessene Feinstaubkonzentration am Boden und die Höhe (in Metern) der turbulenten Grenzschicht der Luft (Boundary Layer Hight). Die Grenzschichthöhe der dynamischen Luftschicht über einer Stadt (Boundary Layer Hight), gibt dabei Auskunft über die Größe der turbulenten Luftzone, die durch ihre stete Durchmischung, einen Verdünnungseffekt des Feinstaubes erzielen kann und somit die bodennahen Feinstaubmengen innerhalb der Stadtluft reduziert (McPherson et al.; 1994).

Nowak et al. ermitteln so 2013 eine prozentuale PM 2,5 Reduktion, von 0,24 % in Atlanta, was 64,5 gefilterten Tonnen PM 2,5 jährlich entspricht (Nowak et al.; 2013). Weiter erfassen Nowak et al. 2006 eine von Bäumen ausgelöste Luftverbesserung von 0,003 %, bezüglich Feinstaub in Portland, was in dieser Stadt jährlich 449 Tonnen PM 10 entspricht (Nowak et al; 2006). Darüber hinaus stellt McPherson eine Luftverbesserung von 0,4 % in Chicago fest, was einer gefilterten PM 10 Menge von 8,9 Tonnen pro Tag entspricht (McPherson et al.; 1994). Diese Werte mögen zunächst gering wirken, sind jedoch von großer Wichtigkeit, da diese Feinstaubmenge nicht in großen Höhen innerhalb der turbulenten Luftzone, sondern auf der Erdoberfläche, auf Kopfhöhe der Menschen gefiltert wird und nur gegenüber der Gesamtmenge des Feinstaubes (Feinstaub auch in größeren höhen innerhalb der Boundary Layer Hight mit erfasst), relativ kleine prozentuale Filteranteile erreicht.

Zudem beleuchten einige Studien die von Bäumen gefilterte Feinstaubmenge auch in Zusammenhang mit gesundheitlichen Auswirkungen in der Bevölkerung, wobei diese Studien sich auf Ergebnisse medizinischer Untersuchungen bezüglich Feinstaub und den damit verknüpften gesundheitlichen Folgen, stützen. So stellen Nowak et al. fest, dass die Filterleistung von Bäumen in New York - die mit 37, 4 Tonnen des feinen und leichten Feinstaubes PM 2,5, eine sehr bedeutende Menge ist - dazu beiträgt, dass pro Jahr in etwa 7,6 Menschenleben, in dieser sehr Bevölkerungsstarken Stadt gerettet werden können (Nowak et al.; 2013). Ein ähnliches Ergebnis erhalten Tiwary et al., die in ihrer Studie in London eine 100 km<sup>2</sup> große Fläche mit 25 % Anteil an Grünfläche analysieren, und feststellen, dass Bäume in diesem Gebiet jährlich 90, 4 Tonnen PM 10 filtern, was in diesem Gebiet einer Anzahl von zwei geretteten Menschenleben entspricht (Tiwary et al.; 2009).

## 2.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Erfassungsmethoden

### 2.2.5.1 Probleme im Vergleich der unterschiedlichen Methoden

Die drei, im vorherigen Kapitel beschriebenen Messmethoden: Experimentelle Methode, Feld-Methode und Rechensimulationsbasierte Methode, sind sehr unterschiedlich und differieren in ihrer Vorgehensweisen sehr stark voneinander.

Aus diesem Grund sind Vergleiche der Filterleistung zwischen den einzelnen Studien der unterschiedlichen Methoden, an sich zunächst nicht möglich. Ist es doch beispielsweise nicht möglich die, über Abwaschung ermittelte Feinstaubmenge aus einer Gravimetrisch- nummerischen Methode, mit einem Simulationsbild der Verteilung von Feinstaubkonzentrationen aus einer Studie der Rechensimulationsbasierten Methode, zu vergleichen. Doch auch Vergleiche von Studienergebnissen ein und der selben Erfassungsmethode, können bisweilen als nicht zielführend eingestuft werden. So sind beispielsweise innerhalb der Feld Methode Filter Studien, die auf Konzentrationsunterschieden in Luv und Lee basieren (Angabe der Filterleistung in

Prozent) nicht vergleichbar mit Studien die auf Gravimetrisch-nummerischen Messungen beruhen (Angabe der Filtermenge in  $\mu\text{g cm}^{-2}$  oder Partikelanzahl in  $\text{N cm}^{-2}$ ). Weiter können auch Unterschiede bei der Messung des abgelagerten Feinstaubes, innerhalb einer Studienart dazu führen, dass Studienergebnisse nicht miteinander verglichen werden können. Innerhalb der gravimetrisch - numerischen Studien ist so der Vergleich von gefiltertem Feinstaub aus Untersuchungen, die die Feinstaubmenge mit Hilfe von Wagen, gravimetrisch ermitteln und Untersuchungen, die die Anzahl der Feinstaubpartikel pro Blattfläche mikroskopisch bestimmen, nicht möglich. Dies stellen auch Dzierzanowski et al. fest, die in ihrer Studie sowohl eine gravimetrische Untersuchung, zur Bestimmung der Feinstaubmasse, als auch eine numerische Untersuchung zur Bestimmung der Partikel Anzahl und Größenverteilung durchführen (Dzierzanowski et al., 2011).

Zudem ist im Gebiet der Gravimetrisch - numerischen Studien, der Vergleich von identischen Baumarten, aus verschiedenen Studien nicht brauchbar, da die erzielten Depositionsmengen an unterschiedlichen Plätzen, mit unterschiedlichen Feinstaubkonzentrationen über verschiedene Zeiträume hinweg ermittelt werden.

Darüber hinaus tragen unterschiedliche klimatische Bedingungen bei der Datenerhebung der einzelnen Studien dazu bei, dass die erzielten Feinstaubmengen nicht miteinander vergleichbar sind, auch wenn die Feinstaubmenge in beiden Studien durch identische Blattflächen geteilt werden. Zu diesem Ergebnis gelangen auch Saebo et al., die in ihrer Veröffentlichung erwähnen, dass die gefilterten Feinstaubmengen in Studien, die über einen identischen Zeitraum ermittelt werden, auf Grund von verschiedenen klimatischen Bedingungen, wie unterschiedliche Niederschlagsverteilung zwischen den Studien, voneinander abweichen (Saebo et al.; 2012).

## 2.2.5.2 Kenngrößen als Anhaltspunkte

Eine Abhilfe aus dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Dilemma bietet die Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) zusammen mit der, ihr verwandten Fangeffizienz ( $C_p$ ). Diese Kenngrößen, die den komplexen Vorgang der Feinstaubfilterung, vereinfacht in Zahlen ausdrücken und somit wissenschaftlich erfassbarer und vergleichbarer machen, werden nicht von allen, jedoch von einigen der recherchierten Studien angegeben. Somit ist nur ein gewisser Teil der recherchierten Literatur bezüglich der Feinstaubfilterung miteinander zu vergleichen. Die Werte, Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz können in verschiedenen Untersuchungsmethoden ermittelt werden. Experimentelle Methoden, Feld Methoden, Rechensimulationsbasierte Methoden. Hierbei wird ein Vergleich nicht nur innerhalb einer identischen Studienart, sondern auch ein Vergleich von Studien aus verschiedenen Erfassungsgruppen (Experimentelle Methode, Feld Methode, Rechensimulationsbasierte Methode), möglich.

## 2.2.5.3 Kompromiss – Gesamtbild

Sind die Kenngrößen Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz im Vergleich von unterschiedlichen Veröffentlichungen zur Filterleistung von Stadtbäumen zwar wichtige Größen, so ist jedoch auch ihre Aussagekraft stark eingeschränkt.

Hierbei ist zuerst auf die Einschränkungen einzugehen, die sich ganz grundlegend aus der Errechnung der beiden Größen  $V_g$ , Gleichung (1) und  $C_p$ , Gleichung (2), ergeben.

So stellen alle, für die Feinstaubfilterung von Bäumen, wichtigen Faktoren, die in den Gleichungen zur Herleitung von  $V_g$  und  $C_p$  keine Berücksichtigung finden (Klima, Pflanzanordnung, Umgebungsbebauung), bereits an sich eine Einschränkung der Aussagekraft dieser beiden Vergleichskenngrößen, dar. Weiter stellt auch die Tatsache eine Einschränkung dar, dass die  $V_g$  und  $C_p$  Kenngrößen meist nicht die Filterleistung der Stamm- und Astflächen, miteinbeziehen.

Darüber hinaus, ist auch die Größe, der bei der Untersuchung betrachteten Partikel, ein ganz wichtiger Faktor für die miteinander verwandten Kennzahlen  $V_g$  und  $C_p$ .

So ergeben beispielsweise eine bestimmte Anzahl an Partikeln mit großen Durchmessern eine viel höhere Masse pro Blattfläche und somit viel höhere  $V_g$  und  $C_p$  Werte, als eine identische Anzahl von kleineren Partikeln.

Diesen Zusammenhang betonen unter anderem auch Dzierzanowski et al., sowie Song et al. (Dzierzanowski et al.; 2011; Song et al.; 2015). Song et al. stellen in ihrer Untersuchung, in der sowohl die Feinstaubmasse, als auch die Anzahl der Partikel analysiert wurde fest, dass die Fraktion des Feinstaubes unterhalb eines Durchmessers von  $2,5 \mu\text{m}$ , nur 2,09 % zur gesamten Masse des Feinstaubes auf dem Blatt beiträgt, während diese feine Fraktion einen Anteil der Partikel Anzahl von 96 % ausmachen (Song et al.; 2015).

Ein weiterer wichtiger Faktor, der nur in einer der beiden Kenngrößen mit berücksichtigt wird, ist die, zur Zeit der Datenerhebung vorherrschende Windgeschwindigkeit. Ist der Wind in der Ermittlung der Fangeffizienz ( $C_p$ ) ein wichtiger Bestandteil der Herleitungsgleichung (2), so ist diese, für die Filtermenge eines Baumes wichtige Größe nicht in der Formel für die Depositionsgeschwindigkeit (1) berücksichtigt. Zu dieser Erkenntnis gelangen auch Gallagher et al., die den Faktor Windgeschwindigkeit in ihrem Vergleich von Depositionsgeschwindigkeiten aus unterschiedlichen Studien, zu einem der wichtigsten Gründe für die großen Unterschiede zwischen den einzelnen  $V_g$  Werten erklären (Gallagher et al.; 1997). Zudem stellen auch Freer-Smith et al., in ihrer Studie über die Depositionsgeschwindigkeiten von verschiedenen Baumarten fest, dass die Windgeschwindigkeit zu einem der wichtigsten Gründe für die, zum Teil großen Unterschiede der veröffentlichten  $V_g$  Werte, verschiedener Studien zu zählen ist (Freer-Smith et al.; 2005) (Vgl. auch Kapitel: 2.2.3.1.1).

Neben der fehlenden Angabe der Windgeschwindigkeit ist eine weitere Unsicherheit der Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz die, bereits vor dem Beginn der Messungen, auf der Blattoberfläche vorhandene Menge an Partikel. Werden die Pflanzen für beispielsweise die Windtunnel Studien, zwar in einem jungen Zustand frisch aus Pflanzschulen entnommen (Beckett et al.; 2000b), so ist doch zu einer großen Wahrscheinlichkeit bereits eine gewisse - wenn auch geringe - Menge an Partikeln auf der Blattoberfläche vorhanden, was das Messergebnis verfälschen kann. Dieser unberücksichtigte Faktor in der Ermittlung der beiden Kennwerte dürfte auch in

Ergebnissen aus Studien der Feld Methode eine Rolle spielen, da auch dort die bereits auf der Blattfläche vorhandene Menge an Feinstaub nicht erfasst wird.

In ihrer Studie erwähnen Freer-Smith et al. zudem, dass die Ergebnisse von Studien, die die Depositionsgeschwindigkeit im Inneren des Bestandes messen, nicht vergleichbar mit Studien sind, die die Depositionsgeschwindigkeit am Rande eines Bestandes oder auf einer freistehenden Fläche in städtischer Umgebung ermitteln, da die Kontaktflächen zwischen Baum und Atmosphäre, sowie die Windgeschwindigkeiten, an Waldrändern und städtischen Flächen, deutlich größer sind als im dichten Bestandes Inneren (Freer-Smith et al.; 2005). Diesen Punkt greifen zudem auch Gallagher et al. in ihrer Studie auf, indem sie erwähnen, dass einige Studien primär die vertikale Filterleistung von Bäumen bestimmen (Studien im Bestand), während andere Untersuchungen, sowohl die horizontale als auch die vertikale Filterleistung feststellen (Studien im städtischen Raum, oder am Bestandesrand) (Gallagher et al.; 1997).

Ein weiterer limitierender Faktor der Aussagekraft der Kenngrößen ist zudem, die unterschiedliche Erfassungsart der Blattfläche, die sowohl in Gleichung (1), für die Depositionsgeschwindigkeit, als auch in Gleichung (2), für die Fangeffizienz, eine wichtige Rolle spielt. So zeigen Freer-Smith et al., sowie Beckett et al., dass ein Vergleich von Studien, bei denen die Blattfläche aus einzelnen gemessenen Blattflächen ermittelt wird und Studien bei denen die Blattfläche als Kronenprojektionsfläche aufgefasst wird, nicht möglich ist. Dies begründen Freer-Smith et al. damit, dass die über die Kronenprojektionsfläche ermittelten  $V_g$  und  $C_p$  Werte größer sind als die Werte, die über die einzelnen Blattflächen ermittelt sind, da die, auf dem gesamten Baum abgelagerte Feinstaubmenge, durch eine geringere Fläche (Kronenprojektionsfläche und nicht Gesamtblattfläche) geteilt wird (Freer-Smith et al.; 2005; Beckett et al.; 2000b).

Da die Kenngrößen nicht nur aus Studien der Experimentellen Methode erfasst werden, sondern auch aus Untersuchungen der Rechensimulationsbasierten Methode und der Feld Methode, sind weiter die klimatischen Bedingungen, wie Temperatur, Wind und Luftfeuchte für die, in den Studien, der Feld Methode festgestellte Filtermenge und damit für die Werte der beiden Kenngrößen aus diesen Studien, entscheidend.

Überdies stellt Nicholson fest, dass mikrometrologische Studien der Rechensimulationsbasierten Methode, mehr die Deposition der Partikel im unteren Mikrometer Bereich erfassen und die Deposition von größeren Partikeln in ihren

Rechnungen weniger stark mit einbeziehen. Weiter vermutet Nicholson auf Grund der bisweilen großen Diskrepanzen auch Fehlannahmen in den Rechensystemen zur Erfassung der Depositionsgeschwindigkeit (Nicholson; 1988).

In Anlehnung daran stellen Gallagher et al. in ihrer mikrometrologischen Studie zur Messung von vertikalen Depositionsgeschwindigkeiten in einem Bestand fest, dass Studien der Feld Methode generell größere Depositionsgeschwindigkeiten messen, als Studien der Rechensimulationsbasierten Methoden vorhersagen (Gallagher et al.; 1997). Dieses Ergebnis bestätigen auch Ruijgrok et al. in ihrem Vergleich von Depositionswerten aus Feld Methode und Depositionswerten der Rechensimulationsbasierten Methode (Ruijgrok et al. ;1994).

Ein zusätzlicher Faktor der Unsicherheit der Kenngrößen  $V_g$  und  $C_p$  stellen Unterschiede in der Ermittlung der Feinstaubmenge auf der betrachteten Blattfläche dar. Während Studien wie Beckett et al., 2000b; Freer-Smith et al. 2004; sowie White und Turner, 1970; die Depositionsmasse durch gravimetrische Methoden messen und auf Grundlage dieser Masse die Depositionsgeschwindigkeit berechnen, benutzen Terzaghi et al. - wie bereits im Kapitel zur Feld Methode (Gravimetrisch- numerische Studien), beschrieben - eine auf Mikroskopie gestützte Ermittlung der Feinstaubmasse und der, mit der die Autoren später die Depositionsgeschwindigkeit errechnen. Die verschiedenen Vorgehensweisen und ungleichen Bedingungen führen in einem Vergleich der Depositionsgeschwindigkeiten der Studien somit zu stark differierenden Werten, die nicht mehr allein auf die unterschiedlichen Baumarten zurückzuführen sind. Zudem berichten erneut Gallagher et al., über Unterschiede von Depositionswerten, die sich durch verschiedene Auflösungsgenauigkeiten der Feinstaubpartikel, beispielsweise bei gravimetrischen Gewichtsbestimmung über Abwaschen der Partikel, erklären lassen (Gallagher et al.; 1997).

Wie die meisten Autoren, die sich in ihren Arbeiten mit der Deposition von Partikeln beschäftigen, fällt auch Nicholson der Mangel an ausführlich dokumentierten und einheitlichen Vorgehensweisen bei der Erfassung von Depositionsgeschwindigkeiten, auf. So schreibt Nicholson: „...it is impracticable, if not impossible to demonstrate the nature of discrepancies in all previous field studies,...” (Nicholson; 1988; S. 2662).

Im Bewusstsein all der genannten Unsicherheiten, bezüglich der Aussagekraft der beiden Kenngrößen, sei nun im Folgenden Kapitel ein Vergleich der

Feinstaubfilterleistung von unterschiedlichen Baumarten, über eine Anzahl von Studien hinweg gegeben, der maßgeblich auf Grundlage der beiden Vergleichsgrößen, Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) und Fangeffizienz ( $C_p$ ), gegründet ist.

## 2.2.6 Vergleich von unterschiedlichen Baumarten

### 2.2.6.1 Baumartenspezifische Filterwerte

Aufgrund ihrer genetischen verankerten, morphologischen Ähnlichkeiten, weisen Bäume einer bestimmten Spezies ähnliche Filterleistungen auf.

Diese baumartenspezifischen Filtereigenschaften bedeuten hierbei jedoch nicht, dass die, in den jeweiligen Studien, an unterschiedlichen Individuen ermittelten Filterwerte, bei selben Baumart immer genau miteinander übereinstimmen, sondern, signalisieren mehr einen baumartenspezifischen Trend, anhand dessen die verglichenen Spezies in eine Reihenfolge eingeordnet werden können (A. Saebo et al., 2012; Popek et al., 2013; Thao-Nguyen et al., 2014).

Die an die Baumart gebundenen Unterschiede bei der Feinstaubanreicherung variieren hierbei nicht nur zwischen Laub und Nadelbäumen sondern unterscheiden sich auch erheblich zwischen den einzelnen Spezies einer bestimmten Gattung.

Im Folgenden sei nun, mit den Kenngrößen Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz, sowie in Grafik 49, mit der Depositionsmasse, stets ein Vergleich der Filterleistung verschiedener Baumarten durchgeführt, der auf Blattebene stattfindet. Im Anschluss daran sei von diesen Ergebnissen ausgehend, der Betrachtungsmaßstab von der Blatt- auf die Baumebene geweitet, und einige Gedanken zur Filterleistung von Angiospermen und Koniferen, auf der Ebene des gesamten Baumes, offengelegt.



## 2.2.6.2 Präsentation der Ergebnisse

Um einen Vergleich der Filterleistung auf Grundlage der Kenngrößen Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz durchzuführen wurden zunächst alle, in der recherchierten Fachliteratur, bezüglich bestimmter Baumarten, gefundenen  $V_g$  und  $C_p$  Werte in Tabelle 8 aufgelistet, sowie die wichtigsten Zusatzinformationen über die betrachtete Partikelgröße, die vorherrschende Windgeschwindigkeit; Partikelgröße; sowie die Methode und Art der Erfassung, falls vorhanden, mit beigefügt.

Hierauf wurden alle aus der Literatur entnommenen Kennwerte in Abbildung 46. zusammengefasst. Da innerhalb der Kennwerte, die Partikelgröße und im Fall der Depositionsgeschwindigkeit auch die Windgeschwindigkeit, in der Definition dieser beiden Kennwerte nicht mit berücksichtigt sind (siehe Gleichung 1 und 2), wurden diese beiden Informationen, so weit in den Studien mit angegeben, in die Übersicht integriert.

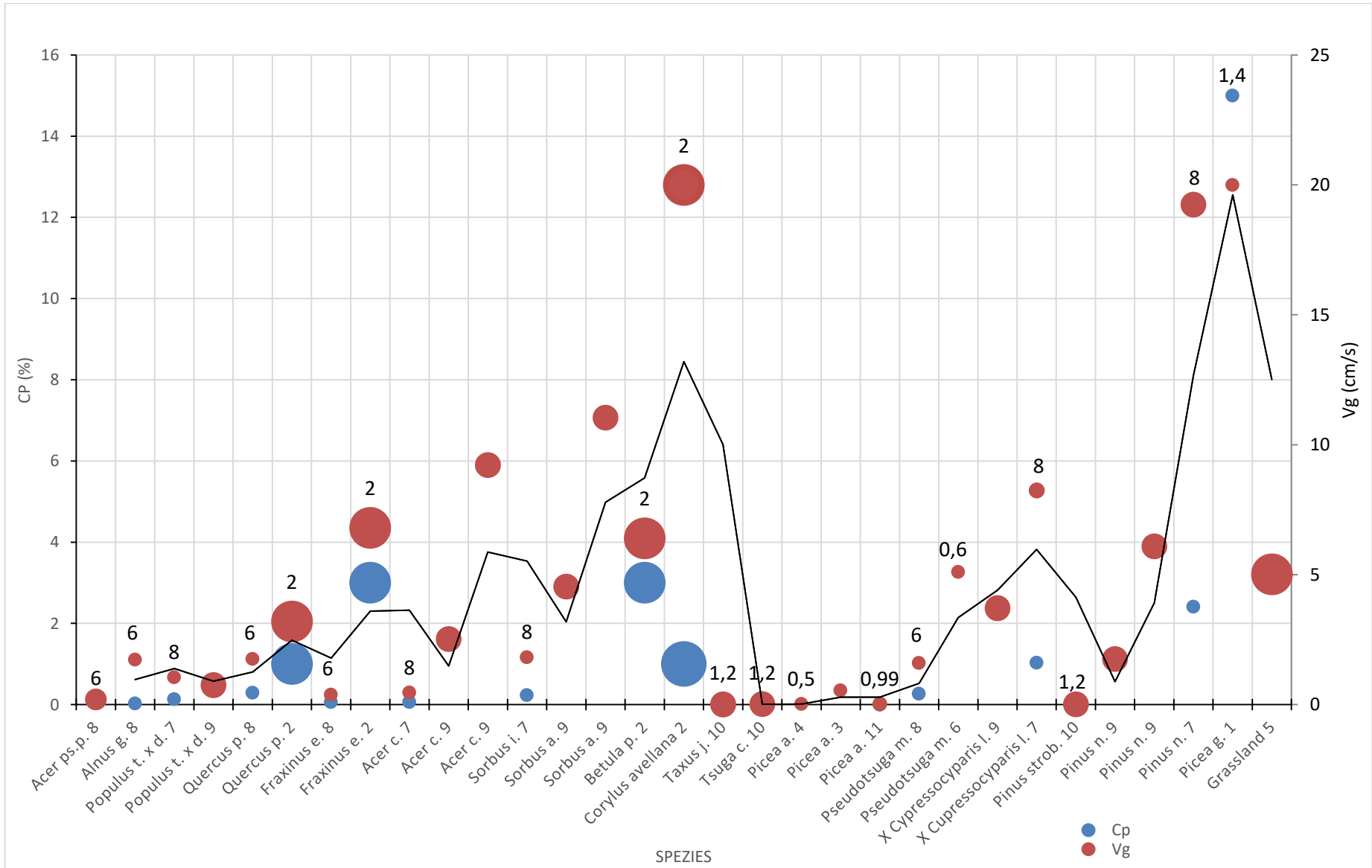
In der Grafik sind so Partikelgrößen, in Form von größeren oder kleineren Punkten und die Windgeschwindigkeit, in Zahlenwerten über dem jeweiligen Wert der Depositionsgeschwindigkeit, dargestellt.

**Tabelle 7. Zusammenstellung von Werten und Angaben zu Fangeffizienz und Depositionsgeschwindigkeit aus verschiedenen Studien**

Nummer	Autor	Spezies	Ort	Partikelgröße: Dp (µm)	Windgeschwindigkeit: u (m/s)	Fangeffizienz: Cp (%)	Depositionsgeschwindigkeit: Vg (cm/s)	Erfassungsmethode, Studienart
1.	Hori (1953)	Picea glehnii	Windtunnel	20	1,4	15	20	Experimentelle Methode, Windtunnel
2.	White und Turner (1970)	Fraxinus excelsior, Quercus petraea, Betula pubescens, Corylus avellana	Bestand	0,1 – 20	2	F: 3 Q: 1 B: 3 C: 1	F: 6,8 Q: 3,2 B: 6,4 C: 20	Feld Methode, Gravimetrisch
3.	Bunzl et al. (1989)	Picea abies	Bestand	Verschiedene	Verschiedene	-	0,55	Feld Methode, Gravimetrisch
4.	Peters und Eiden (1992)	Picea abies	Modell Rechnung	1	0,5	-	0,02	Rechensimulationsbasierte Methode, Mathematische Studie
5.	QUARG (1996)	Grassfläche	Feld	0,01 – 12	-	-	0,02 -10	Feld Methode, Gravimetrisch
6.	Gallagher et al. (1997)	Pseudotsuga menziesii	Bestand	0,01 - 10	0,6	-	0,1 - 10	Rechensimulationsbasierte Methode Mikrometrologische Studie, (Eddy corelation)
7.	Beckett et al.	Pinus nigra,	Windtunnel	0,8 (1)	1,3,	Pinus: 0,13 – 2,8	Pinus: 0,13 – 28,05 X Cupressocyparis: 0,08 –	Experimentelle Methode; Windtunnel Studie

	(2000b)	X Cupressocyparis leylandii, Sorbus intermedia, Acer campestre, Populus trichocarpa x deltoids			8, 10	X Cupressocyparis: 0,08 - 1,22 Acer: 0,02 - 0,06 Sorbus: 0,04 - 0,21 Populus: 0,03 - 0,12	12,2 Acer: 0,03 - 0,57 Sorbus: 0,04 - 2,11 Populus: 0,03 - 1,18	
8.	Freer-Smith et al. (2004)	Quercus petrea, Alnus glutinosa, Fraxinus excelsior, Acer pseudoplatanus, Pseudotsuga menziesii,	Windtunnel	0,8 (1)	3, 6, 9	Quercus: 0,277 - 0,348 Alnus: 0,042 - 0,089 Fraxinus: 0,059 - 0,081 Acer: 0,014 - 0,038 Pseudotsuga: 0,423 - 0,671	Quercus: 0,831 - 3,134 Alnus: 0,125 - 0,798 Fraxinus: 0,178 - 0,725 Acer: 0,042 - 0,344 Pseudotsuga: 1,269 - 6,04	Experimentelle Methode, Windtunnel Studie
9.	Freer-Smith, Beckett und Tailor (2005)	Pinus sylvestris, X Cypressocyparis leylandii, Acer campestre, Populus trichocarpa	England, „Sussex Withdean Park“ (hohe Luftverschmutzung), „Sussex field site“ (niedrige Verschmutzung)	Drei Klassen:  < 10, (Pm10)  <2,5>0,1 (Pm2,5)  < 0,1 (UFP)	?	- (da kein Wind gegeben)	<u>Sussex:</u> Pinus: Pm10: 2,79 Pm2,5: 1,75 UFP: 36,24 X Cypressocyparis: Pm10: 3,43 Pm2,5: 4,58 UFP: 33,72 Acer: Pm10: 3,64 Pm2,5: 9,22 UFP: 31,72	Feld Methode, Gravimetrische Studie

		deltoides, Sorbus aria					Populus: Pm10: 0,57 Pm2,5: 0,81 UFP: 25,43 Sorbus: Pm10: 5,35 Pm2,5: 11,04 UFP: 27,2 <u>Withdean Park:</u> Pinus: Pm10: 4,65 Pm2,5: 6,09 UFP: 29,88 X Cypressocyparis: Pm10: 6,15 Pm2,5: 3,71 UFP: 19,49 Acer: Pm10: 1,75 Pm2,5: 2,52 UFP: 11,6 Populus: Pm10: 0,44 Pm2,5: 0,75 UFP: 12,3 Sorbus: Pm10: 3,25 Pm2,5: 4,54 UFP: 16,94	
10.	Pullmann (2009)	Pinus strobus, Tsuga canadensis, Taxus (Tsuga) Japonica	Windkanal	3,0	1,2		Pinus: 0.0108 Tsuga: 0.0193 Taxus: 0.0058	Experimentelle Methode, Windtunnel
11.	Belot et al. (1994)	Picea abies	Bestand	0,4 - 1	0,99	0,00026	0,0258	Experimentelle Methode, Numerisch



**Abbildung 46. Studienübergreifender Vergleich der Cp und Vg Werte verschiedener Baumarten unter Einbezug von Partikelgröße und Windstärke**

## Legende zu Abbildung 46

### Literaturverweis:

1 = Hori, T.; 1953    2 = White, E.J.; Turner, F.; 1970    3 = Bunzl, K. et al.; 1989    4 = Peters, L.; Eiden, R.; 1992    5 = Quality of Urban Air Group (QUARG); 1996  
6 = Gallagher, M.W. et al.; 1997    7 = Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor, G.; 2000b; 8 = Freer-Smith, P.H.; El-Kathib, A.A.; Taylor, G.; 2004;  
9 = Freer-Smith, P.H.; Beckett, K.P.; Taylor, G.; 2004;    10 = Pulmann, M.; 2009;    11 = Belot, Y. et al.; 1994;

### Partikelgröße:

Die Größe des Kreises entspricht dem Durchmesser der erfassten Partikel. Hierbei sind Werte aus der Literatur bei denen Partikel.

0 bis 1 Mikrometer Partikeldurchmesser = Kleiner Kreis

0 bis 10 Mikrometer Partikeldurchmesser = Mittlerer Kreis

10 bis 20 Mikrometer Partikeldurchmesser = Großer Kreis

### Windstärke:

Soweit aus der Literatur ersichtlich, über den entsprechenden  $V_g$  und  $C_p$  Werten in ( $m\ s^{-1}$ ), für die jeweilige Baumart aus der entsprechenden Studien, mitangegeben.

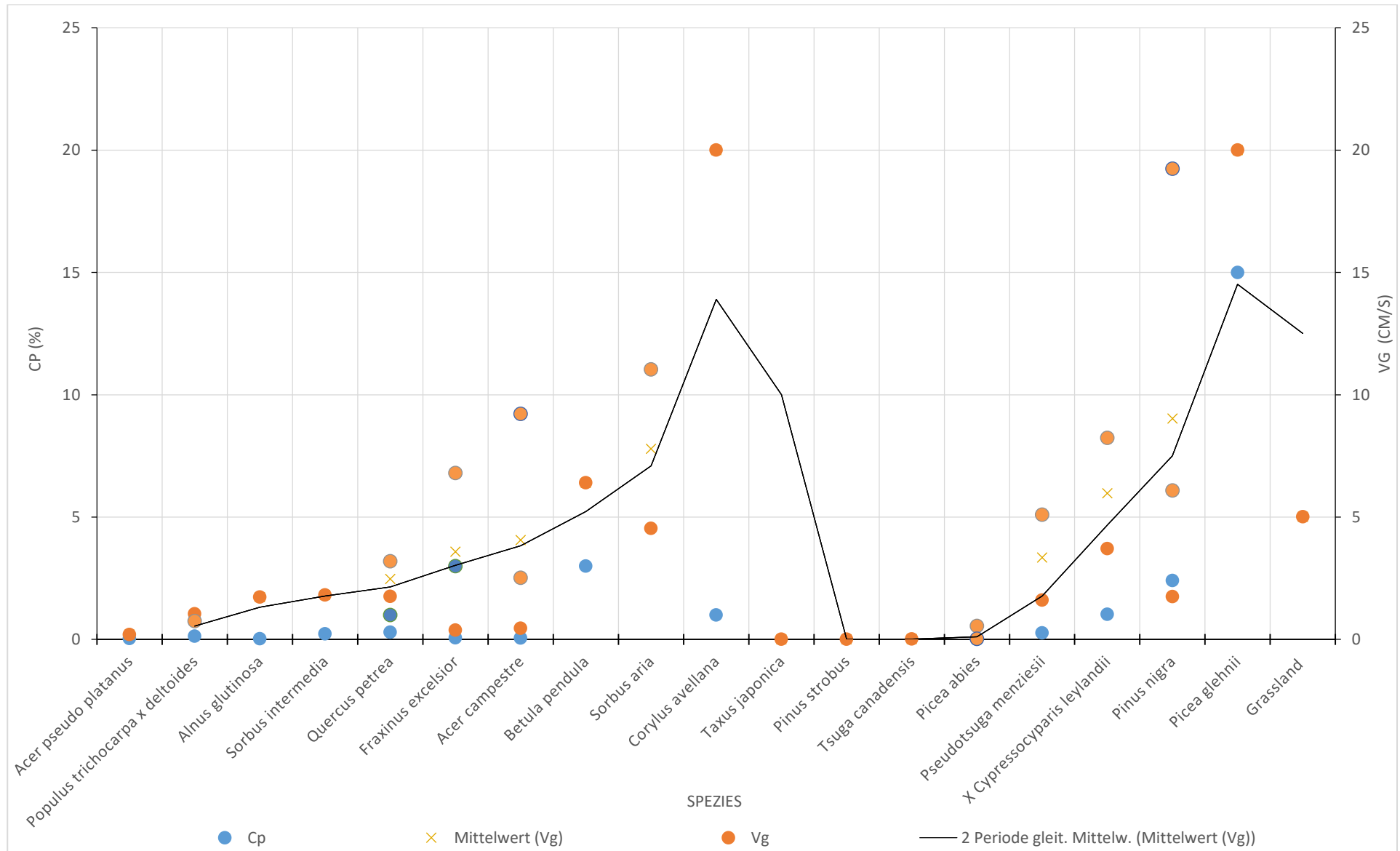
### Zusatz:

Für die Werte, der Studie (Freer-Smith, P.H.; Beckett, K.P.; Taylor, G.; 2004) sind nur die Werte für Partikel der Größenklasse  $P_{m\ 2,5}$  angegeben.

In Abbildung 46 sind im linken Teil der Grafik, ausschließlich Laubbaumarten angeordnet, während sich im rechten Teil der Grafik, Koniferen Arten befinden. Abbildung 46 zeigt, dass die Werte für Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz pro Baumart meist relativ nah beisammen liegen, da sich eine hohe Fangeffizienz im Allgemeinen, in hohen Depositionsgeschwindigkeiten äußert. Ein klarer Zusammenhang zwischen Partikelgröße, sowie Windgeschwindigkeit und den Filterwerten, ist im Vergleich der unterschiedlichen Studien nicht ersichtlich, da Studien mit großem Partikeldurchmesser und hohen Windgeschwindigkeiten, sowohl hohe als auch sehr niedrige Werte aufweisen. Dies könnte mit den, in Kapitel 2.2.5.3 genannten Einschränkungen bei der Vergleichbarkeit der Kennwerte, zusammenhängen. Weiter zeigt die Grafik, dass die Schwankungen der  $V_g$  und  $C_p$  Werte zwischen den Studien auch innerhalb ein und der selben Art, bisweilen stark sein können. So weichen zum Beispiel die Werte aus verschiedenen Studien für die Baumart *Fraxinus excelsior*, stark voneinander ab. Diese studienspezifischen Unterschiede sind weiter auch bei den Werten für *Acer campestre*, zu sehen. Eine Ursache dieser Schwankungen innerhalb dieser Baumarten könnten, die zuvor beschriebenen Unterschiede der Erfassungsmethoden sein.

Abbildung 46 macht überdies deutlich, dass es sowohl innerhalb der Laubbäume als auch innerhalb der Koniferen Arten gibt, die sich besonders gut für die Filterung von Feinstäuben eignen.

In einer weiteren, etwas veränderten Darstellung die ebenfalls auf den Ergebnissen aus Tabelle 8 beruht, sei nun im Folgenden die Frage, welche der Baumarten eine besonders hohe Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz aufweisen, genauer beleuchtet.



**Abbildung 47. Studienübergreifender Trend der Filterwerte von verschiedenen Baumarten**



Abbildung 47. zeigt wie auch Abbildung 46., eine Übersicht aller recherchierten Depositionsgeschwindigkeiten und Fangeffizienzen, die aus der Literatur für einzelne Baumarten entnommen wurden. Für Baumarten bei denen mehr als ein Wert für die Depositionsgeschwindigkeit in der Recherche gefunden werden konnte, ist zudem ein Mittelwert aus den verschiedenen Studienergebnissen angegeben. Diese Mittelwerte sind durch eine Linie des gleitenden Mittelwertes der 2 Periode (Mittelwerte zwischen jeweils zwei der gebildeten Mittelwerte von (VG), miteinander verbunden), miteinander verbunden, sodass ein Trend zwischen Angiospermen und Koniferen, sowie zwischen einzelnen Arten, deutlicher sichtbar wird.

Auch in dieser Grafik sind im linken Bildteil erneut die Angiospermen, nach ihren Depositionsgeschwindigkeiten aufsteigend angeordnet, während im rechten Teil der Grafik, die Koniferen Arten, ebenfalls aufsteigend abgebildet sind.

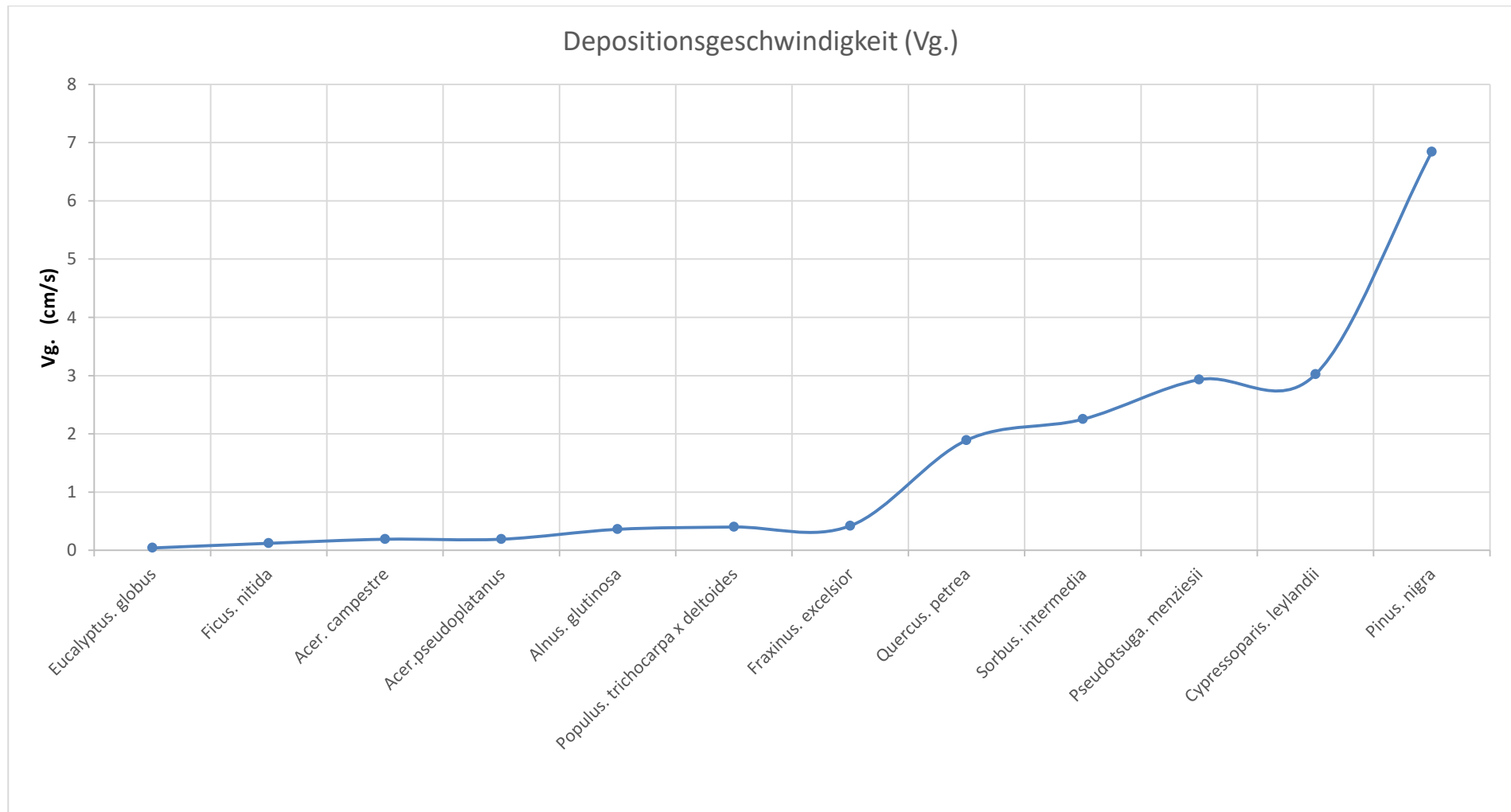
Zudem ist auch im rechten Grafik Teil, die Depositionsgeschwindigkeit für eine Grasfläche angegeben, die mit  $5 \text{ cm s}^{-1}$ , einen relativ hohen Filterwert aufweist.

Bei den Laubbäumen gehören *Corylus avellana*, *Betula pendula* und *Sorbus aria* zu den effektivsten Filter Arten, während die Koniferen mit den Arten *Picea geinii*, *Pinus nigra* und *X Cypressocyparis leylandii*, die höchsten Filterwerte aufweisen.

Insgesamt zeichnet sich zudem ein leichter Trend ab, dass die Mittelwerte der Koniferen Arten etwas höher sind, als die der Angiospermen.

Im Anschluss an diese studienübergreifenden Übersichten sind weiter noch zwei Grafiken beigefügt, die sich auf die Ergebnisse von jeweils zwei groß angelegten Studien, beziehen und die, durch ihren großen Umfang an unterschiedlichen Baumarten, ebenfalls Aussagen über einen baumartspezifischen Filter Trend, machen können.

Während es sich bei der ersten dieser beiden Studien, um einen Vergleich, auf Grundlage von einheitlichen Kenngrößen – in diesem Fall nur die Depositionsgeschwindigkeit (Vg) - handelt, basiert die zweite dieser Studien auf einem Vergleich von Depositionsmengen, da diese Studie zum Typ der, bereits beschriebenen, Gravimetrisch-nummerischen Studien gehört. Ein Vergleich, der Depositionsmengen ( $\mu\text{g cm}^{-2}$ ) der verschiedenen Baumarten, ist hierbei möglich, da es sich nur um eine einzige Studie handelt.



**Abbildung 48. Übersicht der Depositionsgeschwindigkeiten einer Windtunnelstudie**

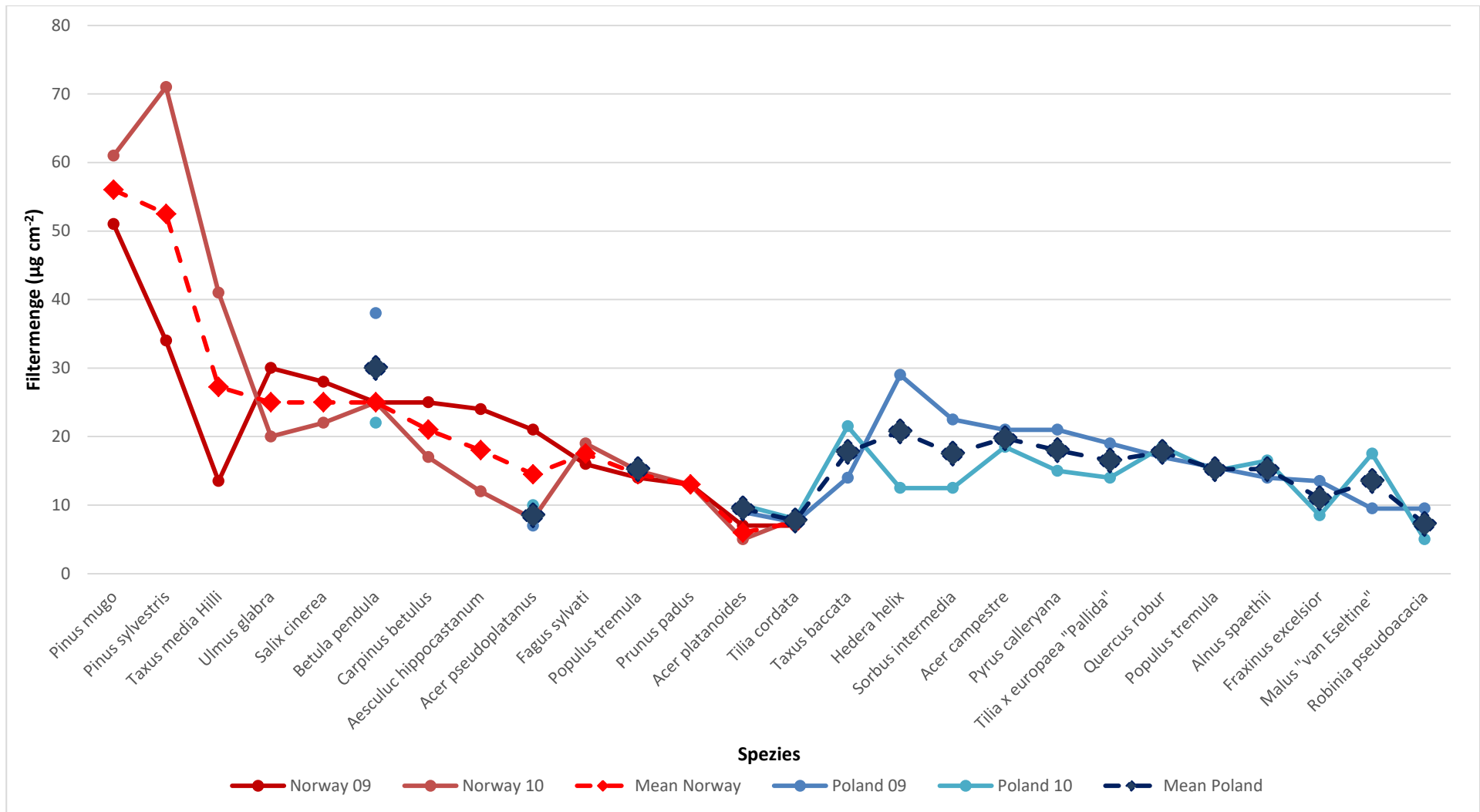
Datengrundlage (Freer-Smith et al.; 2004)

Grafik 48 zeigt die Depositionsgeschwindigkeit verschiedener Baumarten. Die drei effektivsten Spezies stellen mit: *Pseudotsuga menziesii*, *Cypresoparis leylandii* und *Pinus nigra*, Nadelbaumarten dar. Hieran schließen sich erst die Laubbäume mit *Sorbus intermedia*, *Quercus petraea* und *Fraxinus excelsior*, an.

Somit macht Grafik 48., erneut den bereits beobachteten Trend, dass Nadelbäume höhere Depositionsgeschwindigkeiten als Laubbäume aufweisen, deutlich.

Weiter seien nun die Ergebnisse der bereits erwähnten Gravimetrisch-nummerische Studie in Grafik 49 veranschaulicht.

Die Studie umfasst eine Zeitspanne von zwei Jahren und beinhaltet hierbei Messungen an zwei Standorten (zum einen in Norwegen und zum anderen in Polen). Da die beprobten Stadtbäume in Polen und Norwegen, in beiden Jahren, jeweils die gleichen Individuen sind, kann der baumartspezifische Trend, zum einen für den Standort in Polen und zum anderen für den Standort in Norwegen, ermittelt werden.



**Abbildung 49. Baumartenspezifischer Trend einer großen Gravimetrisch-nummerischen Studie**

Datengrundlage (Saebo et al.; 2012)

In Abbildung 49, lässt sich für die Ergebnisse aus Norwegen feststellen, dass die Koniferen mit den Baumarten: *Pinus mugo*, *Pinus sylvestris* und *Taxus media Hilli*, die höchsten Depositionsmenge in den beiden Jahren 2009 und 2010 aufweisen. Dem gegenüber zeigt der baumartspezifische Trend beider Jahre, für die Messungen in Polen, dass *Acer campestre*, sowie *Hedera helix* als Kletterpflanze, die größten Filtermengen aufweisen. Im Bereich der Laubbäume weist darüber hinaus, an beiden Standorten *Betula pendula*, eine beachtlich hohe Filterleistung auf.

Die Baumarten *Tilia cordata* und *Aesculus hippocastanum*, an denen im zweiten Teil dieser Arbeit Messungen durchgeführt werden, weisen jedoch in dieser Studie eine eher geringe Filterleistung im Bereich der Laubbäume auf.

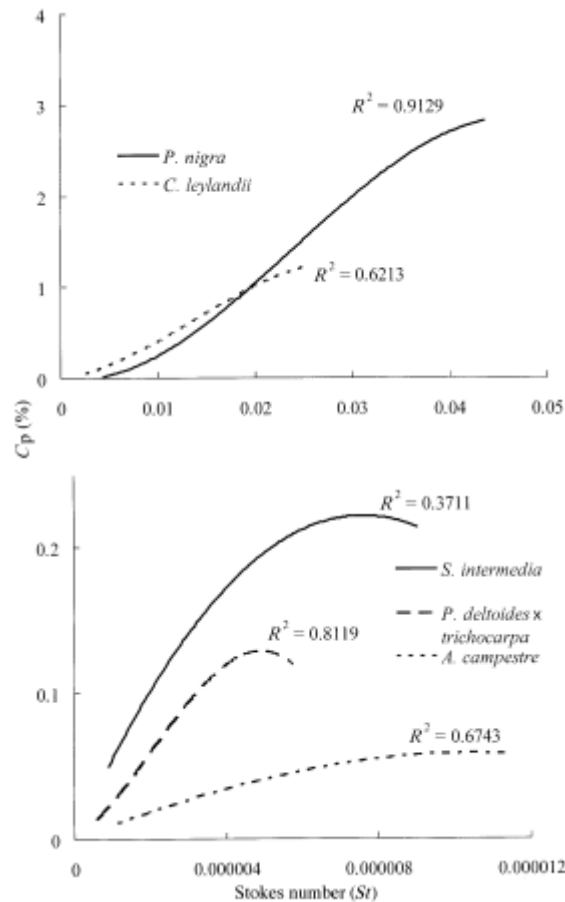
### 2.2.6.3 Koniferen

Zusammenfassend betrachtet, zeigen die Ergebnisse; des vorangegangenen Kapitels, dass innerhalb der Koniferen vor allem die Arten: *Cypresocyparis leylandii*, *Picea gehnii*, *Pinus nigra*, *Pinus mugo*, *Pinus sylvestris* und *Pseudotsuga menziesii*, die höchsten Depositionsgeschwindigkeiten und Fangeffizienzen pro Blattfläche, aufweisen.

Weiter fällt auf, dass die Koniferen Arten durchschnittlich die höchsten Depositionsgeschwindigkeit und Fangeffizienz aufweisen. Dieser Trend zeigt sich sowohl in der Betrachtung der einzelnen Studien, in denen eine optimale Vergleichbarkeit besteht; als auch in den studienübergreifenden Abbildungen, in denen selbst mit der Angabe durch die Kenngrößen  $V_g$  und  $C_p$ , einige Unsicherheiten beim Vergleich zwischen den einzelnen Studien existieren.

Beckett et al.; Freer-Smith et al. und Chamberlain et al.; führen diese erhöhten Depositionsgeschwindigkeiten und Fangeffizienzen, auf die besonders günstigen Blattformen von Koniferen zurück, die durch ihre kleinräumigen und strukturreichen Nadeln, viele feine Turbulenzen erzeugen, die es den Partikeln erlauben, sich leichter auf der Blattoberflächen abzulagern (Beckett et al., 2000b; Freer-Smith et al, 2003; Chamberlain und Little, 1981).

Eine Kennzahl die diese Verhältnismäßigkeit ausdrückt, ist die, bereits in einem vorherigen Kapitel, beschriebene Stocksche Zahl ( $St$ ), die die Fähigkeit von Körpern beschreibt, als Depositionsplattformen für Partikel zu fungieren. Da diese Kennzahl unter anderem von den Größendimensionen der Depositionsobjekte abhängig ist, erreicht die Stocksche Zahl ( $St = \text{Stoppdistanz } (S) / \text{Dimensionsgröße } (L)$ ) bei den feineren Koniferen Nadeln höhere Werte, als bei den großflächigen Blättern von Angiospermen. Abbildung 50, verdeutlicht diesen Zusammenhang, dass Koniferen höhere Werte der Kennzahl  $St$  aufweisen als Angiospermen und somit auch eine größere Fangeffizienz  $C_p$  zeigen als Angiospermen.



### Abbildung 50. Zusammenhang von Fangeffizienz (Cp) und Stokes number (St)

Koniferen (im oberen Bildteil) weisen deutlich höhere Werte der Stokes number auf als Angiospermen (im unteren Bildteil) und haben dadurch eine größere Fangeffizienz (Beckett et al.; 2000b; S. 1001)

Waren die Ergebnisse in den vorhergegangenen Abbildungen, vermehrt auf die Filterleistung pro einheitliche Blattfläche ausgerichtet und fanden diese Vergleiche damit auf der Blattebene statt, so kann auch eine Betrachtung der Filterleistung auf Baumebene angestrebt werden. Bei dieser, geräumigeren Betrachtung spielen neben den bereits in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Aspekten (zum Beispiel Feinheit und Morphologie der Blätter), auch eine Reihe anderer Faktoren, eine wichtige Rolle.

So zum Beispiel die Gesamtblattfläche des Baumes. In diesem Punkt ist nun darauf aufmerksam zu machen, dass Koniferen im Allgemeinen, eine deutlich größere

Gesamtblattfläche aufweisen, als Angiospermen (Mattysek et al., 2010). Durch die erhöhte Blattfläche ist es den Koniferen möglich, insgesamt eine größere Feinstaubmenge, als Angiospermen pro Zeiteinheit (= Flux) auf ihren Nadeln abzulagern. Dies geht auch aus der bereits gezeigten Gleichung (5) hervor:

$$F_{flux(Baumebene)} = C \times Vg \times A.$$

Unter Zunahme dieses Aspektes, der Gesamtblattfläche (A), steigen die, bereits auf Blattebene beobachteten leicht höheren Filterwerte der Koniferen, im Vergleich zu Angiospermen nun für die Betrachtung auf Baumebene, über diesen Trend hinaus, deutlich an.

Dieser Effekt könnte selbst dann noch beobachtet werden, wenn die Filterwerte pro Blattfläche nur gleich groß, oder sogar kleiner, als die Filterwerte der Laubbaumarten wären, da die größere Gesamtblattfläche der Koniferen dies kompensieren würde.

Neben der Gesamtblattfläche als solches, ist jedoch auch die Dauer der belaubten Phase in die Überlegung mit ein zu beziehen. Auch in diesem Punkt sind Koniferen im Vorteil, da sie durch ihre immergrünen Nadeln, ganzjährig belaubt sind und somit im Gegensatz zu Angiospermen, auch im Winterhalbjahr eine sehr große Depositionsoberfläche aufweisen können. Da die Feinstaubkonzentrationen, wie im allgemeinen Rechercheteil über Feinstaub, bereits beschrieben, durch Inversionen in dieser Jahreszeit oft hoch sind, können Koniferen im Winterhalbjahr deshalb einen wichtigen Beitrag zur Feinstaubreduzierung leisten.

Was für die Betrachtung der Filterleistung auf Baumebene weiter von Bedeutung ist, ist das Wachstum der verschiedenen Baumarten, da die filternde Wirkung von Vegetation in Städten möglichst bald einsetzen soll; wie zum Beispiel im Fall einer Heckenpflanzung, die ein neugebautes Wohngebiet vor der nahen Hauptstraße schützen soll. Hierbei haben die meisten Koniferen Arten, durch ihr schnelles Wachstum einen Vorteil (Godzik et al., 1979).

Jedoch weisen Koniferen neben all diesen Vorteilen, über einen längeren Zeitraum- und auf Baumebene betrachtet, auch Nachteile auf. Einer der größten Nachteile, stellt der fehlende jährliche Blattabwurf gegenüber Laubbäumen dar. So können Koniferen die nicht durch Wind oder Regen gelösten Feinstäube, nicht einfach mit dem Blattabwurf im Herbst abwerfen. Vielmehr werden diese Feinstäube auf der Nadeloberfläche erst mit



dem Abwurf einzelner Nadeln - ca. alle 7 Jahre - (Matyssek et al. 2010), entfernt und beeinträchtigen bis zu diesem Zeitpunkt die Aufnahme neuer Feinstäube auf der Nadel und somit auch die Filterleistung der Koniferen. Zudem sind die Koniferen dadurch über längere Zeitspannen toxischen Feinstäuben auf ihrer Nadeloberfläche und in der Kutikula ausgesetzt, was die Koniferen schädigen kann (Beckett et al.; 1998).

Ein weiterer negativer Aspekt der Koniferen ist der eingeschränkte Luftaustausch den die dichten Koniferen Arten, in eng bebauten Gebieten, verursachen können. So ist es speziell in eng bebauten, städtischen Gebieten (Häuserschluchten) möglich, dass die immergrünen und dichten Koniferen, besonders an windstillen Tagen und Inversionswetterlagen im Winter, die Durchlüftung an diesen Orten hemmen- und somit den lokalen Feinstaubgehalt erhöhen können.

Was in der Betrachtung des baumartspezifischen Filtertrends auf Baumebene, zudem, von Bedeutung ist, ist die Filterleistung der Ast und Stammflächen, der verschiedenen Baumarten. Ist die Filterleistung der Stamm- und Ast Flächen, zwar im Vergleich zur Filterleistung der Blätter, aufgrund des geringeren Anteils an der Gesamtoberfläche des Baumes, zu vernachlässigen (Chamberlain und Little; 1981), so kann die Stamm- und Astfläche doch für die Betrachtung der GesamtfILTERleistung eines Baumes, nennenswert sein. Wie in einem vorherigen Kapitel beschrieben, ist für diese Bestandteile des Baumes, die Filterleistung von Nadelbäumen, im Vergleich zu Laubbäumen, durch das Fehlen von strukturreichen und feinverzweigten Stamm- und Astflächen, reduziert, was ebenfalls einen Nachteil der Koniferen darstellt.

Ein weiterer negativer Aspekt, bezüglich des Einsatzes von Koniferen, zur Reduzierung von Feinstaub in der Stadt, ist die Empfindlichkeit von Koniferen gegenüber Luftverschmutzungen (Beckett et al., 1998).

Tabelle 9 gibt zusammenfassend einen Überblick über die Vor- und Nachteile von Koniferen, in Bezug auf die Filterleistung über einen längeren Zeitraum und auf Baumebene betrachtet.

**Tabelle 8. Vor- und Nachteile der Filterleistung von Koniferen im Vergleich zu Angiospermen**

Vorteile Koniferen	Nachteile Koniferen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Filterwerte pro Blattfläche</li> <li>• Hohe Gesamtblattfläche</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kein jährlicher Blattabwurf</li> <li>• Luftstaugefahr</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• In Winterhalbjahr belaubt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fehlende strukturreiche Stamm-, Astfläche</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schnellwüchsig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anfälligkeit gegenüber Luftverschmutzungen</li> </ul>

## 2.2.6.4 Angiospermen

Im Bereich der Angiospermen zeigen die Ergebnisse der Abbildungen dass die Arten: *Corylus avellana*, *Betulia pendula*, *Sorbus aria*, *Sorbus intermedia*, *Quercus petraea*, *Acer campestre* und *Fraxinus excelsior*, sowie als belaubte Kletterpflanze *Hedera helix*, zu den effektivsten Arten, zählen.

Im Zuge dieses Vergleiches wird jedoch, wie im vorherigen Kapitel erwähnt festgestellt, dass die Angiospermen Baumarten, sowohl in den studienübergreifenden Abbildungen, als auch in den Übersichten einzelner Studien, im Verhältnis zu Koniferen, reduzierte Filterleistungen aufweisen.

Diese geringere Filterleistung ist hauptsächlich auf die größeren Dimensionen der Blätter, im Vergleich zu den feineren Nadeln der Koniferen, zurückzuführen. Hierbei bewirken die großflächigeren Formen der Blätter, dass die Luftströmungen vermehrt in wenigen einheitlichen Bahnen, stromlinienförmig, um die Blattformen fließen und sich dadurch weniger feine Turbulenzen um die Blätter herum bilden, die eine Partikelablagerung befördern würden (Beckett et al., 2000b; Freer-Smith et al, 2003; Chamberlain und Little, 1981).

Doch neben den Filterwerten auf der Blattebene, weist die Filterleistung von Angiospermen auch auf Bauebene, aufgrund der kleineren Gesamtblattflächen der meisten Arten, im Vergleich zu Koniferen, geringere Filterleistungen auf.

Ein weiterer Nachteil der Angiospermen gegenüber den Koniferen, stellt die Länge der belaubten Phase bei Angiospermen Arten dar. Durch den Blattabfall im Herbst verlieren so die Laubbäume ihre flächenmäßig größte und damit wichtigste Depositionsoberfläche, in einer Jahreszeit, die häufig besonders hohe Feinstaubkonzentrationen in Bodennähe hervorruft. Dies führt dazu, dass das Minimum, der Filtereffizienz von Laubbäumen in einer, für die Reduktion von Feinstäuben, besonders wichtigen Zeit, liegt.

Ein weiterer negativer Aspekt der Laubbaumarten ist das langsamere Wachstum der Bäume. Während viele Koniferen Arten schnell eine Größe erreichen, in der sie effektiv zur Luftreinigung beitragen können dauert, diese Phase bei Laubbäumen meist deutlich länger (Godzik et al., 1979).

Neben den Nachteilen der Laubbaumarten im Vergleich zu Koniferen, weisen die Laubbaumarten jedoch auch eine Reihe von Vorteilen auf.

So stellt der Rhythmus des Blattabwurfs bei Angiospermen einen großen Vorteil dar, da die Laubbäume die jährlich angereicherten, nicht durch Wind oder Regen gelösten Feinstäube, mit dem Blattabwurf im Herbst einfach beseitigen können. Dies führt dazu, dass jedes Jahr neu, Partikel auf den Blattflächen abgelagert werden können ohne, dass alte Feinstäube die Ablagerung von neuen Partikeln beeinträchtigen würden, oder dem Baum schaden könnten (Beckett et al, 1998).

Ein weiterer Vorteil von Laubbaumarten im Vergleich zu Koniferen ist, die verringerte Luftstaugefahr. Durch ihre meist weniger dichten Kronenstrukturen, ist die Gefahr erhöhter Feinstaubkonzentrationen in Gebieten mit enger Bebauung, reduziert.

Wie im vorherigen Kapitel für die Nadelbäume erwähnt, ist die Filterleistung der Stamm und Astfläche bei Angiospermen Arten größer als bei Koniferen, was speziell für das Winterhalbjahr, in der die Stamm- und Astfläche die einzige Depositionsoberfläche des Baumes ist, von großer Bedeutung sein kann.

Als ein weiterer Vorteil der Angiospermen ist zudem auch die Widerstandsfähigkeit der Laubbaumarten, gegenüber städtischen Luftverschmutzungen aller Art zu nennen. Diese ermöglicht den Laubbäumen kontinuierlich zu wachsen und Feinstäube ohne Schäden anzureichern (Beckett et al., 1998).

Tabelle 10 gibt zusammenfassend einen Überblick über die Vor- und Nachteile der Angiospermen, in Bezug auf die Filterleistung über einen längeren Zeitraum auf Baumebene betrachtet.

**Tabelle 9. Vor- und Nachteile der Filterleistung von Angiospermen im Vergleich zu Koniferen**

<b>Vorteile Angiospermen</b>	<b>Nachteile Angiospermen</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Jährlicher Blattabwurf</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Geringere Filterwerte pro Blattfläche</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Strukturreiche Stamm- Astfläche</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Niedrigere Gesamtblattfläche</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Keine Luftstaugefahr</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Keine Belaubung im Winterhalbjahr</b></li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Gegenüber Partikel sehr robust</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Langsameres Wachstum</b></li> </ul>

## 2.2.7 Mischung der Baumarten als effiziente Alternative

Aus den Ergebnissen der beiden vorigen Kapitel wird deutlich, dass sowohl Koniferen als auch Angiospermen, Eigenschaften aufweisen, die sich positiv auf die Filterleistung auf Baumebene und damit auch auf Ebene des Pflanzverbandes, in welchem die jeweiligen Koniferen oder Angiospermen gepflanzt sind, auswirken.

Pflanzungen die dem Stil einer Monokultur (nur Koniferen oder nur Laubbäume) ähneln, können somit nur die Vorteile einer dieser Baumarten, jedoch nicht die Vorteile beider Baumarten, ausnutzen. Zugleich treten die negativen Aspekte der jeweiligen Baumart in solchen Bepflanzungsweisen, durch die Häufung gleicher Arten auf engem Raum, verstärkt auf.

Aus diesem Grund ist für eine optimale Filterleistung, eine Baumartenmischung anzustreben, was auch Freer-Smith et al.; Saebo et al. und Brantley et al. empfehlen (Freer-Smith et al.; 2004; Saebo et al.; 2012; Brantley et al., 2014).

Ist die Filterleistung pro Blattfläche zwar in Pflanzungen die aus Koniferen bestehen höher, als die Filterleistung pro Blattfläche in gemischten Pflanzungen, so hat doch diese gemischte Pflanzgemeinschaft Vorteile, die eine Pflanzung rein aus Koniferen, nicht aufweisen kann.

So weist die gemischte Pflanzstruktur, eine effizientere Verteilung der Gesamtblattfläche pro Grundfläche auf, da die unterschiedlichen Kronenformen von Koniferen und Angiospermen sich einander in einer optimaleren Weise anpassen als dies in Reinbeständen geschehen kann. Dadurch kann die gemischte Pflanzform eine hohe Blatt-/Depositionsfläche auf engem Raum, erreichen und so auch in Innenstädten Feinstaub effektiv filtern (bei reichlichem Luftaustausch). Diese gemischte Pflanzform hat weiter den Vorteil, dass sie ganzjährig begrünt ist (Nadeln im Winter) und gleichzeitig die Feinstaubpartikel, die sich nicht vom Regen abwaschen lassen, durch den Blattabwurf im Herbst, vollständig in den Boden abgeben können, sodass im neuen Jahr die Feinstaubanreicherung auf den Blättern, wieder von Neuem – und somit effektiver – ablaufen kann.

Können die Blattfläche und die Dichte dieser gemischten Pflanzungen - je nach Pflanzabstand - im Sommer, wenn Nadeln und Blätter gleichzeitig vorhanden sind, relativ hoch sein und damit die Durchlüftung an Plätzen mit enger Bebauung, einschränken; so ist doch in den Wintermonaten, die verstärkt eine Gefahr für die Feinstaubkonzentrationen in Bodennähe darstellen, eine optimale Durchlüftung durch das Fehlen der Laubblätter, sichergestellt. Zugleich ist die Filterleistung der Laubbäume in dieser Zeit jedoch, durch die strukturreiche Stamm- und Astflächen immer noch – wenn auch geschwächt – vorhanden und kann zur Gesamtfiltereffizienz der Pflanzgemeinschaft auf Bestandesebene beitragen.

Darüber hinaus können die gemischten Pflanzungen, vom schnellen Wachstum vieler Koniferen Arten profitieren, während die Vitalität und die Resistenz der gemischten Bestände gegenüber Luftverschmutzungen, durch die Laubbaumarten, erhöht werden. Zuletzt sind auch aufgrund anthropogener Veränderungen, wie dem Klimawandel und Schadstoffeinträgen in Ökosysteme, Pflanzgemeinschaften aus gemischten Baumarten sinnvoll. So spricht sich 2008 auch Pretzsch für eine solche Bestandesform aus: „Angesichts zunehmender Störungen der Waldökosysteme durch Stoffeinträge und

Klimaveränderungen werden die Vorteile der Risikostreuung durch Mischung künftig vermutlich steigen“ (Pretzsch, 2005).

Tabelle 11 stellt die genannten Ergebnisse in einer Übersicht bewertend dar.

**Tabelle 10. Bewertung der Feinstaubfilterung von Rein- und Mischbeständen nach einzelnen Faktoren**

Faktoren	Gemischte Baumarten	Monokultur Koniferen	Monokultur Angiospermen
Filterleistung / Blattfläche	• Effektiv (0)	• Sehr effektiv (+)	• Mäßig (-)
Blattfläche/ Flächen- verbrauch	• Sehr effizient (+)	• Ineffizient (-)	• Ineffizient (-)
Dauer der Belaubung	• Ganzjährig (+)	• Ganzjährig (+)	• Halbjährig (0)
Blattabwurf	• Jährlich (+)	• Alle 7 Jahre (-)	• Jährlich (+)
Durchlüftung (Sommer)	• Reduziert (-)	• eingeschränkt (0)	• Optimal (+)
Durchlüftung (Winter)	• Optimal (+)	• Eingeschränkt (-)	• Zu hoch (0)
Wachstum/ Zeit	• Hoch (0)	• Sehr hoch (+)	• Mäßig (-)
Vitalität	• Sehr vital (+)	• Mäßig (0)	• Mäßig (0)
Gesamt	(++++)	(0)	(-)

## II. Messung

### 1. Einleitung

Wie die im ersten Teil dieser Arbeit durchgeführte Literaturrecherche zeigt, kann für die Filterleistung eines Stadtbaumes, eine ganze Fülle von verschiedenen Faktoren (klimatische-,biotische-, umgebungsbedingte Faktoren), eine wichtige Rolle spielen.

Die hier dargelegte Messreihe hat jedoch lediglich das Ziel, den Filtereffekt von Stadtbäumen in einer, in München durchgeführten Messreihe, quantitativ erfassbar zu machen.

Um den Filtereffekt der Stadtbäume in der Folgenden Untersuchung deutlicher sichtbar zu machen, seien auf die Faktoren Windstärke und Blattfläche eingegangen.

Die Ausgangshypothesen sind hierbei,

(1) dass die Filterleistung mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt und

(2) dass die Filterwirkung bei Stadtbäumen von der Größe des Kronenvolumens abhängt.

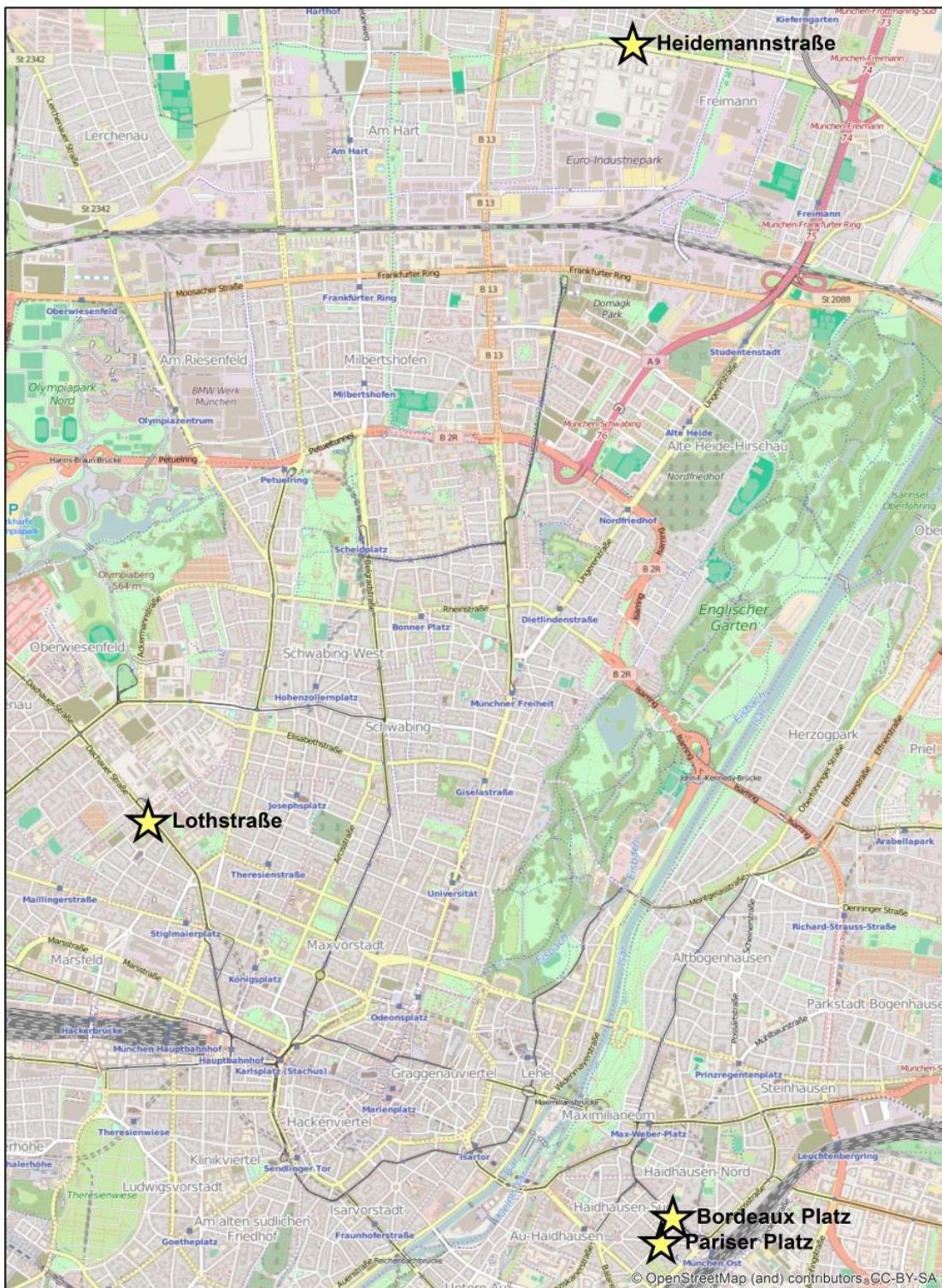
## 2. Material und Methoden

Hierzu wurden an vier verschiedenen Standorten in München, im Zeitraum: Juli bis August 2015, an insgesamt zehn Tagen, Messungen durchgeführt. Abbildung 51 gibt einen Überblick, dieser Standorte. Während die Standorte Bordeaux Platz und Pariser Platz, beide in Wohngebieten mit mäßigem Verkehr und somit geringen Feinstaubkonzentrationen gelegen sind (Haidhausen), sind die Standorte Heidemannstraße und Lotstraße, die direkt an dicht befahrenen Hauptstraßen gelegen sind (Heidemannstraße und Dachauerstraße), hohen Feinstaubkonzentrationen ausgesetzt.

Die Messungen wurden zudem über die verschiedenen Tageszeiten Morgens, Mittags, Abends (von ca. 8:00 bis 18:00) verteilt durchgeführt, um neben den verschiedenen Standorten (Wohngebiet, Hauptstraße) auch die unterschiedliche Verkehrsdichte und damit unterschiedliche Feinstaubkonzentrationen, mit zu berücksichtigen.

Die Messungen wurden hierbei pro Standort an je einem Individuum durchgeführt. Bei den Stadtbäumen handelte es sich um drei Winter Linden (*Tilia cordata*) und eine gewöhnliche Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*). Eine genauere Charakterisierung der vier Individuen bietet Tabelle 12.





**Legende**

★ Messstandorte

0 0,5 1 2 3 4 Kilometer



**Abbildung 51. Standorte der Messung**

(Erstellt mit Arc GIS)

**Tabelle 11. Baumdaten**

Ort	Spezies	BHD (cm)	Höhe (m)	Kronen- durchmesser (m)	Kronen- ansatz (m)
Bordeauxplatz	Tillia cordata	27,2	14,4	8,9	5,4
Pariserplatz	Tillia cordata	41,7	16,4	10,1	4,2
Heidemannstraße	Tillia cordata	24,1	8,3	4,6	3,7
Lothstraße	Aesculus hippo- Castanum	95,8	20,4	13,7	2,2

Die Erfassungen der Baumparameter in Tabelle 12, beruhen hierbei auf Messungen - zum einen mit Maßbändern und zum anderen mit „Vertex Höhenmessgerät“ (Ultraschallmessprinzip) - die 2015, im Rahmen zweier Dissertationen an der TU München, von Astrid Moser und Jens Dallhausen, durchgeführt wurden.

## 2.1 Messaufbau und Durchführung der Messung

Die durchgeführte Art der Messungen entspricht der in Kapitel beschriebenen Feldmethode. Die Ermittlung der Filterleistung der Stadtbäume erfolgte hierbei durch Messung der Feinstaub Konzentrationen, in Windrichtung vor, und hinter den Baumkronen (Luv- und Lee Messung). Bei den verwendeten Feinstaubmessgeräten handelt es sich um zwei verschiedene Geräte, die auf zwei unterschiedlichen Messprinzipien beruhen, die bereits in Kapitel 2.1.4, beschrieben wurden (Laserpartikelzählung und Kondensationspartikelzählung). Während das eine Gerät - EDM Grimm 107 - (Abb. 52), die Partikelmasse einzelner Feinstaubfraktionen (PM10;

PM<sub>2,5</sub>; PM<sub>1</sub>) pro Volumeneinheit Luft erfasste, ermittelte das andere Gerät – CPC „TSI 3007“ – (Abb. 53), nicht die Masse des Feinstaubes, sondern errechnete die Anzahl, aller pro Volumeneinheit Luft, vorhanden Partikel.



**Abbildung 52. Environmental Dust Monitor (Model: Grimm 107)**  
(Grimm Aerosol Technik GmbH, 2008)



**Abbildung 53. Condensation Particle Counter (Model: TSI 3007)**  
(TSI Incorporated, 2002)

Für den Vorgang der Messung waren pro Baum insgesamt vier Messgeräte gleichzeitig im Einsatz. Der Aufbau und die Durchführung wurde hierbei stets vom gleichen Personenkreis durchgeführt. Die zwei unterschiedlichen Messgeräte zusammen, bildeten je ein Set, das zum leichteren Hantieren und wegen des besseren Schutzes in einem Werkzeugkasten eingebaut wurde. Vor Beginn des Messaufbaus wurde mit Hilfe von Seifenblasen und Windfähnchen, die Windrichtung bestimmt und daraufhin der Messaufbau begonnen. Die beiden Sets wurden pro Messung gleichzeitig vor und hinter dem Baum (Luv und Lee Richtung) positioniert. Dabei wurden die beiden Sets in den beiden Werkzeugkisten, durch eine Schraubvorrichtung, auf einem Teleskopstab mit Bodenverankerung fixiert (Abbildung 54).



**Abbildung 54. Mess-set in Werkzeugkasten auf Teleskopstab**

Die Messgeräte wurden zum einen auf einer Höhe von 2 Metern über dem Erdboden positioniert, zum anderen, mit Hilfe des Teleskopstabes jedoch auch auf eine Höhe von 4,75 Metern, in den Bereich des Kronenansatzes, ausgefahren, um dort die Filterwirkung der Blätter zu erfassen. Hierbei waren 4,75 Meter die maximale Höhe, auf die die Geräte

aus Gründen der Stabilität und der Sicherheit, ausgefahren werden konnten. Bei der Positionierung der Geräte wurde darauf geachtet, dass der Abstand zwischen Baumkrone und Messinstrumenten stets möglichst klein und in den verschiedenen Durchgängen einheitlich war.



**Abbildung 55. Feinstaub Messung in direkter Nähe zum Baum (hier auf Luv Seite, vor dem Baum)**

Die Intensität einer Messserie an einem Standort betrug zehn Messwiederholungen, wobei auf eine Messung auf 2 Meter Höhe, eine Messung auf 4,75 Meter im Bereich des Kronenansatz, folgte und somit für eine Messserie an einem Standort fünf Messungen auf 2- und fünf Messungen 4,75 Metern Höhe durchgeführt wurden.

Die Dauer einer dieser Messungen betrug hierbei jeweils fünf Minuten.

Da die Messgeräte ununterbrochen die Feinstaubkonzentrationen aufzeichneten, wurde die genaue Uhrzeit, zu welcher sich die Geräte in der gewünschten Position befanden (Start und Ende der fünf Minuten), mit einer Stoppuhr erfasst und schriftlich festgehalten.

Auf Grundlage dieser schriftlich festgehaltenen Start- und End Uhrzeiten, konnten die, für den Untersuchungszeitraum relevanten Werte, den Messgeräten später entnommen werden.

Neben der Start und End Uhrzeit einer jeden fünf Minuten Messung, wurde weiter auch noch die, in diesem Zeitintervall vorherrschende Windstärke mit Hilfe eines Handwindmessgerätes („Testo 425“) ermittelt und schriftlich festgehalten. Außerdem wurden auftretende Störquellen und außergewöhnliche Ereignisse, wie zum Beispiel Transporter, die auf den Messplatz fahren, notiert. Die Messungen die durch solche Außeneinflüsse verfälscht wurden, machten sich in hohen negativen Filterwerten bemerkbar und blieben bei der Auswertung der Daten unberücksichtigt.



**Abbildung 56. Durchführung der Messung auf x Metern im Kronenansatz**

## 2.2 Auswertung der Daten

Da die Messgeräte die Feinstaubwerte zum einen im Sekundentakt (CPC Model 3007) und, zum anderen alle sechs Sekunden, aufzeichneten (Grimm EDM 107), konnten nicht alle dieser zeitlich hochaufgelösten Werte einzeln ausgewertet werden, sodass über den

Zeitraum einer Messung (fünf Minuten), jeweils Mittelwerte der Massenkonzentrationen von PM 10; PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>1</sub> (Gerät: Grimm EDM 107), (sowie Mittelwerte der Partikelanzahlen pro Volumeneinheit (Gerät: CPC Model 3007)), gebildet wurden.

Diese Mittelwerte dienten als Datengrundlage der weiteren Auswertung. So wurde in einem zweiten Schritt die Differenz dieser Mittelwerte zwischen den Geräten der Luv und der Lee Seite ermittelt. Das hieraus resultierende Ergebnis wurde als die, vom Baum gefilterte Feinstaub Konzentration angesehen.

War es zu Beginn der Messung noch die Absicht gewesen, die Werte der Messung auf 2 Meter, als Referenzmessung (ohne Blätter als Filterfläche), im Vergleich zu den Messungen auf 4,75 Meter (mit Blättern als Filterfläche) zu nutzen, so stellte sich bald heraus, dass der Filtereffekt der oberen Messungen (auf Höhe des Kronenansatzes) zwar durchschnittlich größer war, als die Feinstaubreduktionen auf einer Höhe von 2 Metern, jedoch auch diese Werte auf 2 Metern, deutliche Feinstaubreduktionen verzeichneten.

Da unklar war wie dieser Filtereffekt zustande kam, wurde darauf verzichtet genauer auf die Filterwerte auf 2 Metern Höhe einzugehen. Eine mögliche Begründung dieser Effekte ist, dass sich die Auswirkung der Krone auch in dieser Höhe bemerkbar macht.

Im Folgenden werden daher nur die Werte der Messungen auf 4,75 Metern für die Betrachtungen verwendet.

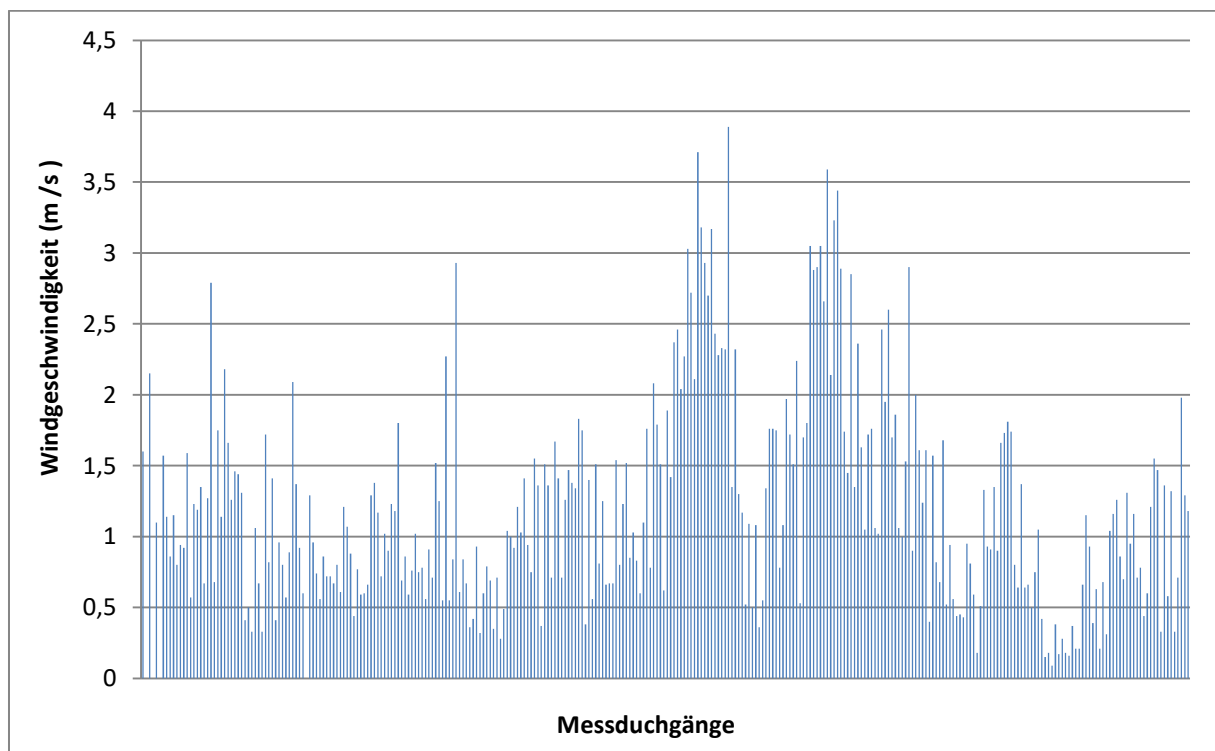
Um die Feinstaubfilterung der Bäume unabhängig von der, zum jeweiligen Zeitpunkt, am jeweiligen Ort, vorherrschenden Umgebungskonzentration an Feinstaub, miteinander vergleichen zu können, wurden diese absoluten Filterwerte relativiert und in Prozent ausgedrückt, wobei die Feinstaubkonzentrationen der windzugewandten Luv Seite, als 100 Prozent angesehen wurden.

Da die Werte der Partikelanzahlen pro Volumen (CPC Geräte), mit den Werten der Massenkonzentration pro Volumen (EDM Geräte) für die Feinstaubfraktion PM<sub>1</sub>, ein ähnliches Bild, und keinen weiteren Mehrwert, in Bezug auf die Ermittlung des Depositionsverhaltens, von feinen Partikeln lieferten, wird im Folgenden nur auf die Werte der Massenkonzentrationen der Feinstaubfraktionen PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>1</sub>, eingegangen.



## 2.3 Einteilung in Windklassen

Um den Filtereffekt nach Hypothese (1), in Abhängigkeit der erfassten Windstärken leichter untersuchen zu können, wurden ausgehend von allen, im Untersuchungszeitraum auftretenden, Windgeschwindigkeiten, Windklassen gebildet. Abbildung 57 bietet einen Überblick, über alle Windgeschwindigkeiten, die während der zehn Messtage an den vier verschiedenen Standorten auftraten.



**Abbildung 57. Übersicht aller aufgetretenen Windgeschwindigkeiten zur Klasseneinteilung**

Der Großteil dieser Windwerte bewegt sich in einem Rahmen zwischen 0 bis  $1 \text{ m s}^{-1}$ . Um jedoch die stärkeren Windgeschwindigkeiten auch in die Betrachtung mit ein zu beziehen und gebührend zu berücksichtigen, wurde die Windklasseneinteilung so gewählt, dass auch die höheren Werte, trotz ihrer kleineren Anzahl in verschiedene Klassen eingeordnet wurden. Aus diesem Grund ergibt sich folgende Klasseneinteilung: Klasse 1: 0 – 0,5; Klasse 2: 0,5 – 1; Klasse 3: 1 – 1,5; Klasse 4: 1,5 – 2,0; Klasse 5: 2,0 – 2,5; Klasse 6: 2,5 – 3,0; Klasse 7: 3,0 – 4.

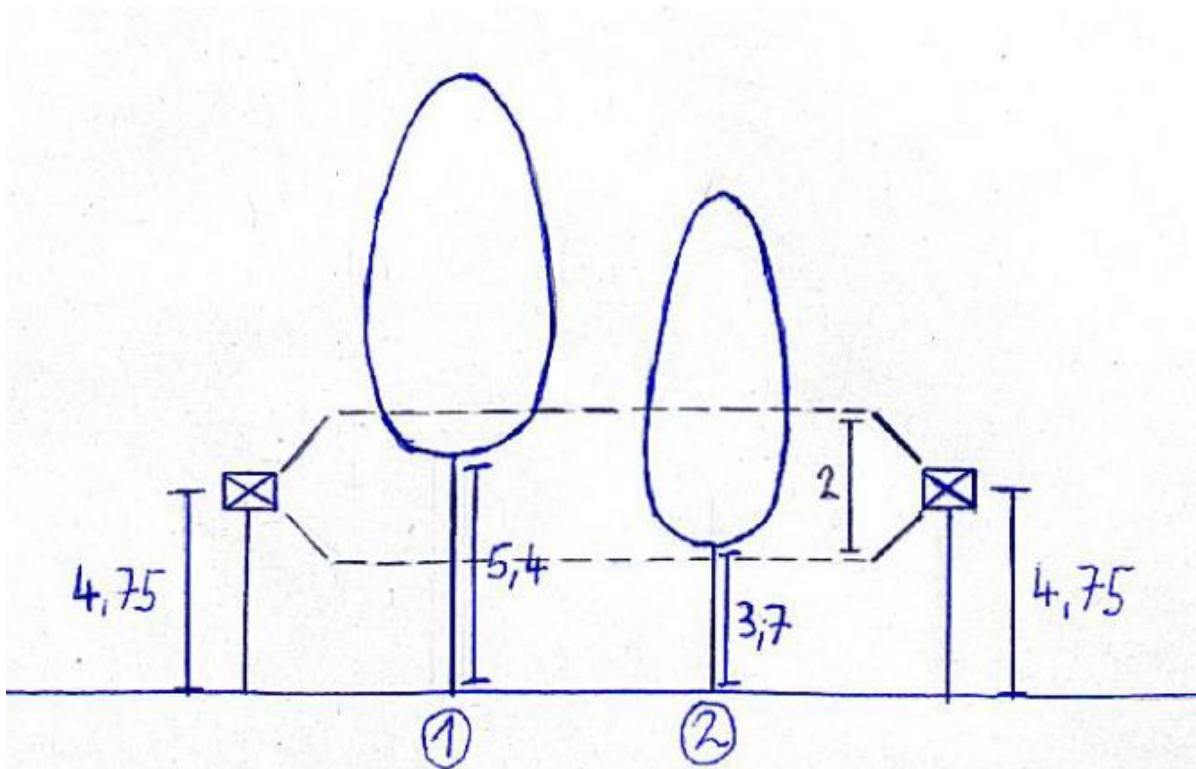
Die Untersuchung der Windabhängigkeit der Filterwerte (Hypothese 1), erfolgte jeweils einzeln nach den verschiedenen Standorten (mit jeweils standortspezifischen Kronenvolumen), um eine Vermischung der beiden Faktoren „Windgeschwindigkeit“ und „Kronenvolumen“, zu verhindern.

## 2.4 Abschätzung des filternden Kronenvolumens

Darüber hinaus wurden die Blattflächen zwischen den zwei Messgeräten (Luv und Lee), abgeschätzt, um den Zusammenhang von Kronenvolumen und Filterwerten, nach Hypothese (2) zu testen. In diesem Zusammenhang musste zuerst abgeschätzt werden, wie viel, dieser Blattfläche tatsächlich Auswirkung auf die Feinstaubreduktion hatte. Hierbei wurde vermutet, dass die Blattflächen, in einem Bereich von 1 Meter über bis 1 Meter unter der Höhe der Messgeräte (=2 Meter), Einfluss auf die Filterleistung hatten. Da die Messgeräte aus Sicherheitsgründen nur bis auf 4,75 Meter ausgefahren werden konnten, konnten bei der Messung des Filtereffektes, lediglich die Auswirkungen der Blätter, im untersten Kronenbereich, erfasst werden.

Die Einschätzung des Volumens, dieser untersten Kronenteils, erfolgte in einer stark vereinfachten Art und Weise. So wurde das Volumen der Krone zwischen den beiden Messgeräten, mit Hilfe eines Zylinders beschrieben. Hierbei wurde die Grundfläche des Zylinders mit  $A = \pi \times r^2$  ermittelt, wobei r, der jeweilige Kronenradius des Baumes (Kronendurchmesser /2) war.

Um aus der Zylinderfläche, auf einen Körper mit einem bestimmten Volumen zu schließen wurde die Zylinderfläche weiter mit der Höhe h, des, für die Filterung effektiven unteren Kronenraumes, multipliziert. Hierbei stellte h, die Höhe des belaubten Kronenraumes, in dem Bereich Messgeräthöhe  $\pm$  1 Meter = 2 Meter (Auswirkungsspielraum nach oben und unten), dar. Da der belaubte Kronenraum der untersuchten Individuen zum einen weniger als 1 Meter unterhalb der Messhöhe (auf 3,7 Meter), und zum anderen erst über der Messhöhe (auf 5,4 Meter) ansetzte, wurde Höhe h, als die Differenz zwischen der Messgeräthöhe + 1 Meter (= 5,75 Meter) und der Höhe des jeweiligen Kronenansatzes, ermittelt (Abbildung 58).



**Abbildung 58. Aufbau der Messung und Abschätzung der filtereffizienten Kronenhöhen der Standorte: 1 = Bordeaux Platz und 2 = Heidemannstraße**

Um Hypothese (2) untersuchen zu können, wurde hierauf das Volumen der jeweiligen Zylinder, dem Kronenvolumen des jeweiligen filtereffektiven Kronenraumes, gleichgesetzt.

Da die Kronenformen der beiden beprobten Baumarten *Tilia cordata* und *Aesculus hippocastanum* stark voneinander abwichen – bei *Aesculus hippocastanum* im unteren Kronenbereich nur Außen Blätter und Innen ohne Blätter, bei *Tilia cordata* im unteren Kronenbereich Blätter gleichmäßiger verteilt – konnte für die Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Kronenvolumen und Feinstaubfiltereffekt lediglich ein Vergleich der Individuen der Baumart *Tilia cordata*, vorgenommen werden.

Hierbei wurde sich weiter auf die Standorte beschränkt, an welchen die einheitlichsten Windrichtungen auftraten, um die Messunsicherheiten, durch wechselnde Windrichtungen, so gering wie möglich zu halten. Diese Standorte waren, aufgrund ihrer architektonischen Lage, zum einen der Bordeaux Platz und zum anderen die Heidemannstraße.

Die Kronen Volumen dieser zwei Standorte wurden berechnet und sind in Tabelle 13, dargestellt.

**Tabelle 12. . Berechnung des filtereffektiven Kronenvolumens in Form eines Zylinders**

<b>Ort</b>	<b>A Zylinder (m<sup>2</sup>)</b>	<b>h Zylinder (m)</b>	<b>V Zylinder (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Bordeaux Platz</b>	62,21	0,35	21,77
<b>Heidemann Straße</b>	16,62	2,05	34,07

Um den Zusammenhang zwischen Filterleistung und Blattfläche, testen zu können, musste weiter der zweite wichtige Einflussfaktor auf die Filterleistung – die Windklasse – mit berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde für die Testung des Zusammenhangs eine einheitliche Windstärke beobachtet. Da die unteren Windklassen, die Klassen, mit den höchsten Stichprobenumfängen waren, wurden hierfür die Windklassen 2 – 4 ausgewählt. Für diese Auswahl sprach neben der hohen Stichprobenanzahl, auch die Häufigkeitsverteilung innerhalb der drei Windklassen, die zwischen den Standorten Heidemannstraße und Bordeaux Platz für diese drei Windklassen, annähernd gleich ausgeprägt war, und somit ähnliche Windstärken für den Vergleich der beiden Kronenvolumen, angenommen werden konnten. Windklasse 1 wurde hierbei nicht in Betracht gezogen, da die dort auftretenden Windgeschwindigkeiten zu gering sind den Filtereffekt gut sichtbar zu machen.

Die im Anschluss an die Probenahme erfolgte Auswertung der Daten, in Form von Diagrammen und prozentualen Angaben, wurde mit dem Computer Programm Excell 2010, durchgeführt.

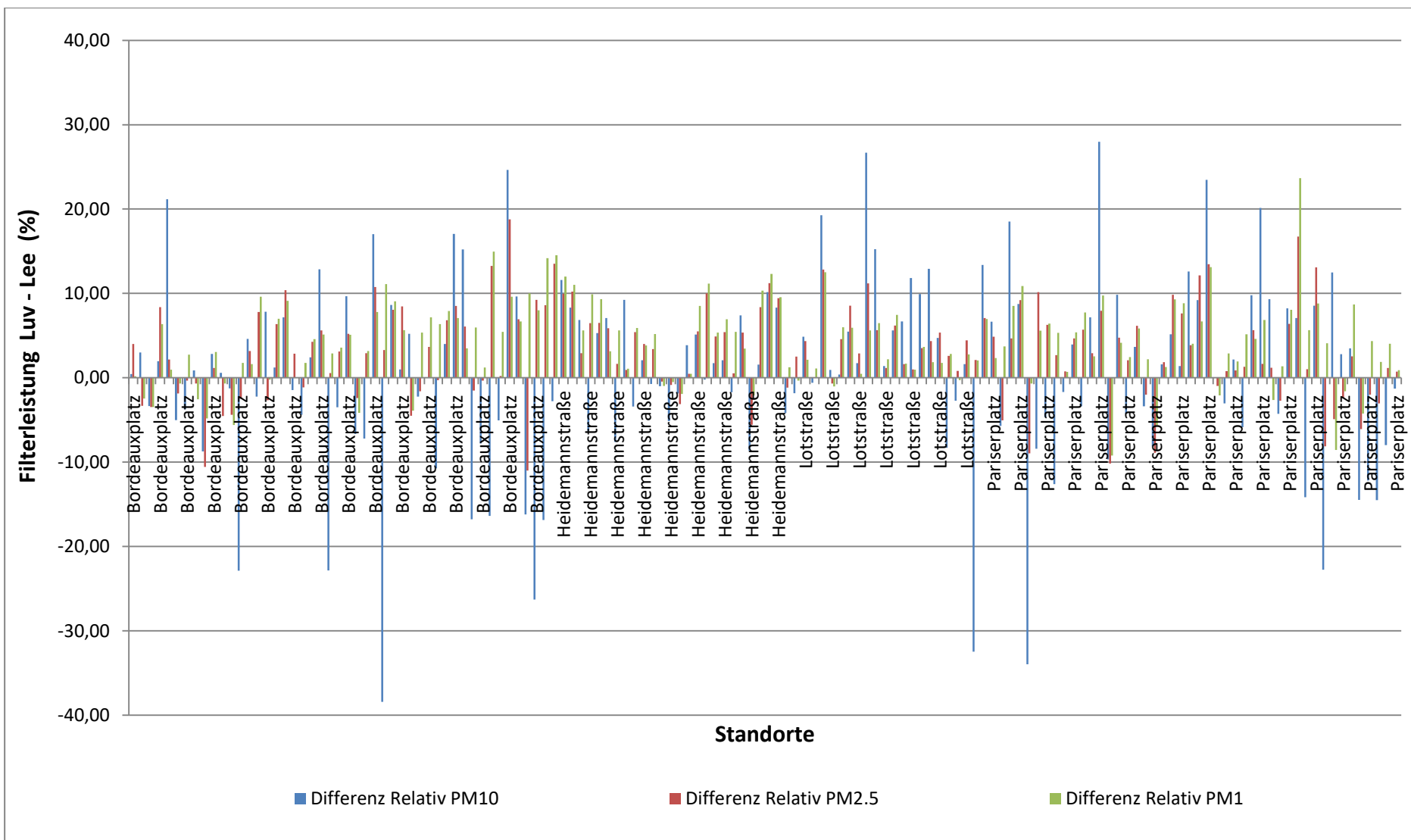
## 3. Ergebnisse

### 3.1 Filtereffekt und Standorte

Abbildung 60 zeigt die prozentuale Filterleistung der Feinstaubfraktionen PM<sub>10</sub>; PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>1</sub> aller vier Standorte, aus Messungen im Bereich des Kronenansatzes auf 4,75 Metern (n=142 Messungen).

Es ergibt sich das Bild, das der Großteil der fünfminütigen Messungen, eine deutliche Filterleistung aller Fraktionen (PM<sub>10</sub>; PM<sub>2,5</sub>; PM<sub>1</sub>) aufweist, jedoch manche Werte eine nur schwach ausgeprägte-, oder sogar deutlich negative Filterleistung zeigen.

Die Filterwerte schwanken hierbei sowohl zwischen den verschiedenen Standorten, als auch innerhalb der einzelnen Standorte, erheblich.



**Abbildung 59. Relative Filterleistungen aller Standorte (n = 142)**

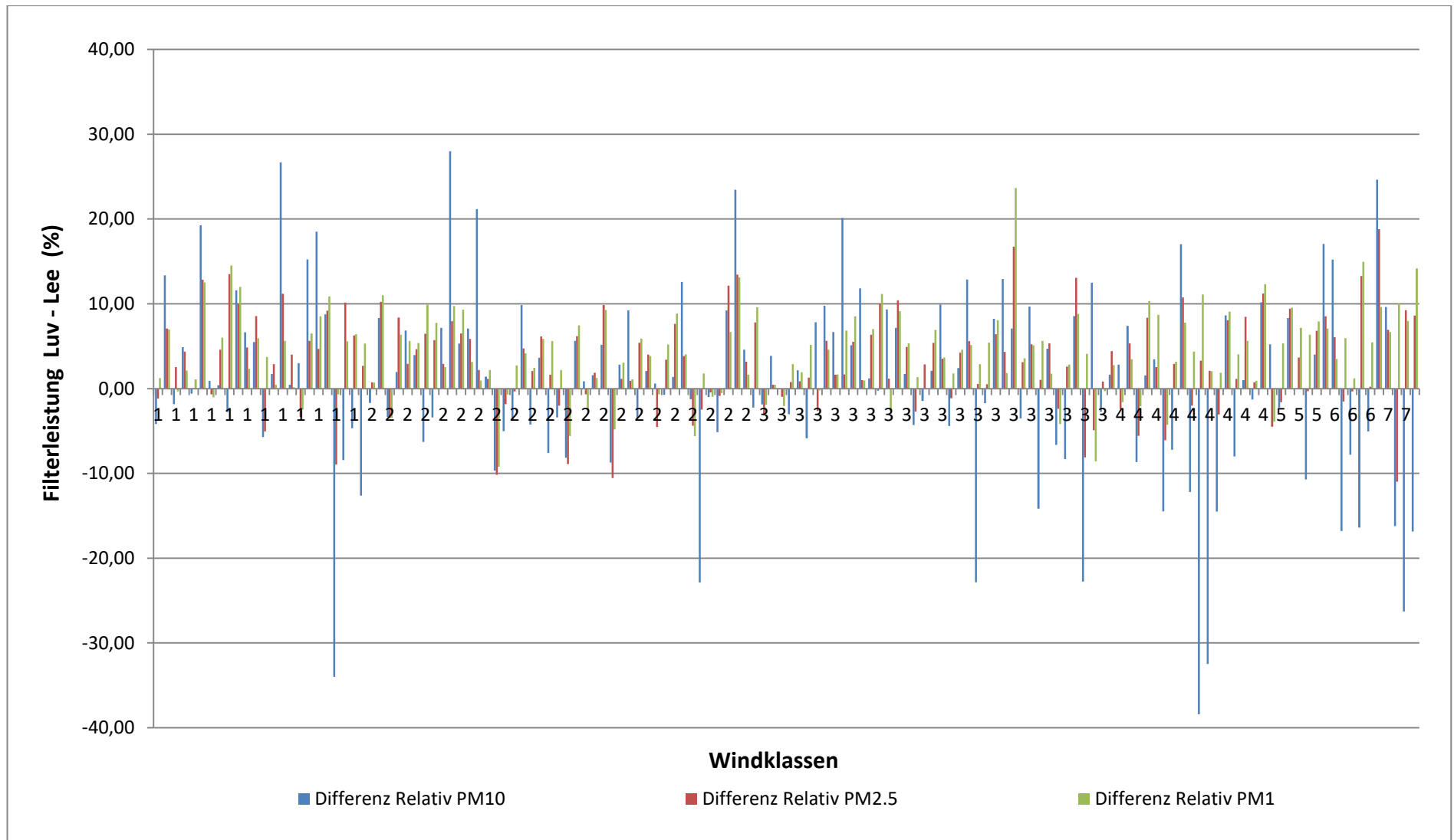
## 3.2 Filtereffekt und Windstärke

Im Folgenden seien nun die, in Material und Methoden, gebildeten Windklassen in die Betrachtung der Filterleistungen mit eingebunden.

So stellt Abbildung 60 die prozentuale Filterleistung der drei Feinstaubfraktionen, unter Berücksichtigung der Windklassen 1 - 7 dar. Die Reihenfolge der einzelnen Filterwerte innerhalb einer Windklasse entspricht hierbei aufsteigend, der Größe der tatsächlichen Windgeschwindigkeiten, sodass die Werte der X-Achse kontinuierlich ansteigen. Diese aufsteigende Anordnung innerhalb der einzelnen Windklassen ist auch in den darauf folgenden Grafiken beibehalten.

Wie in der vorhergehenden Darstellung beträgt die Anzahl der hier präsentierten Messungen ebenfalls 142.

Die Grafik zeigt erneut, den bereits beobachteten Filtereffekt, jedoch sind große und geringe Filterwerte sowohl in niedrigen als auch in hohen Windklassen aufzufinden.



**Abbildung 60. Prozentuale Filterleistung nach Windklassen über allen Standorten (n = 142)**



### 3.3 Filtereffekt in Abhängigkeit von Standorten und Windklassen

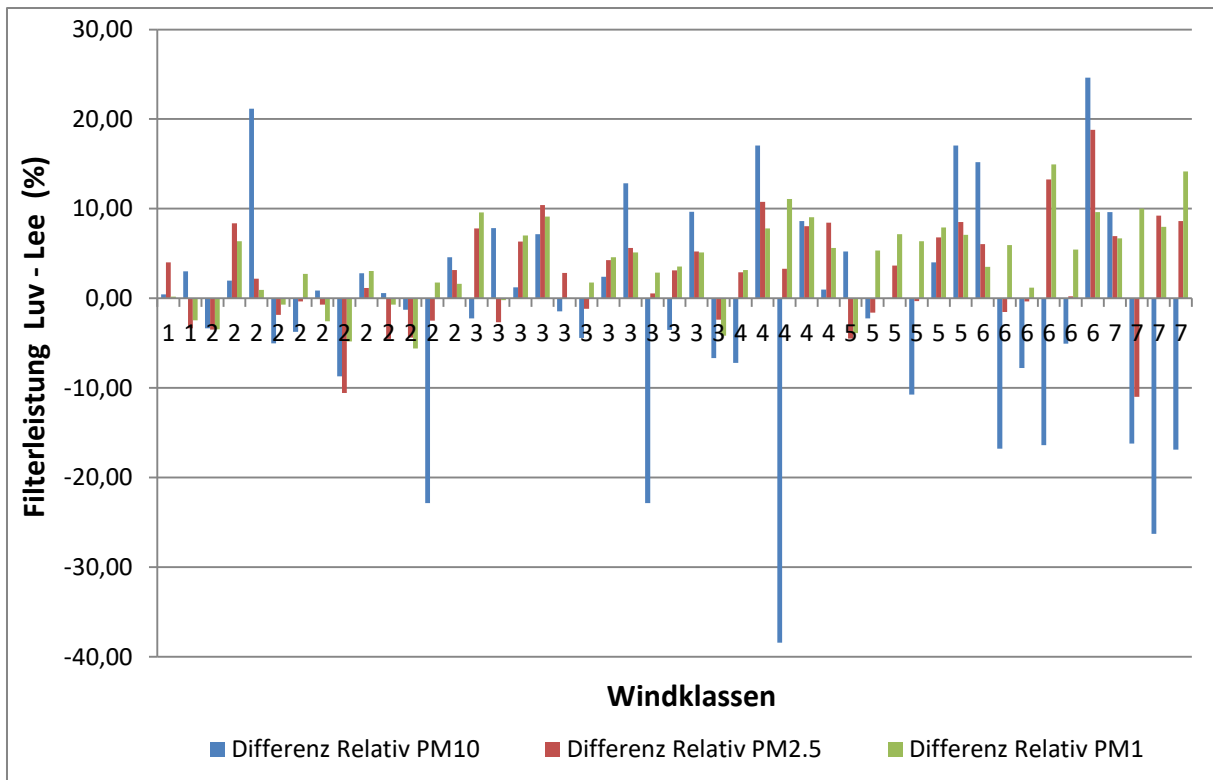
Die im Folgenden beschriebenen Abbildungen 61 – 64 stellen nun die Kombination der beiden, bisher betrachteten Einflussgrößen „Standort“ und „Windklasse“, in jeweils einer Grafik dar.

So gibt Abbildung 61 Aufschluss über die windabhängige Filterleistung des Standortes Bordeaux Platz.

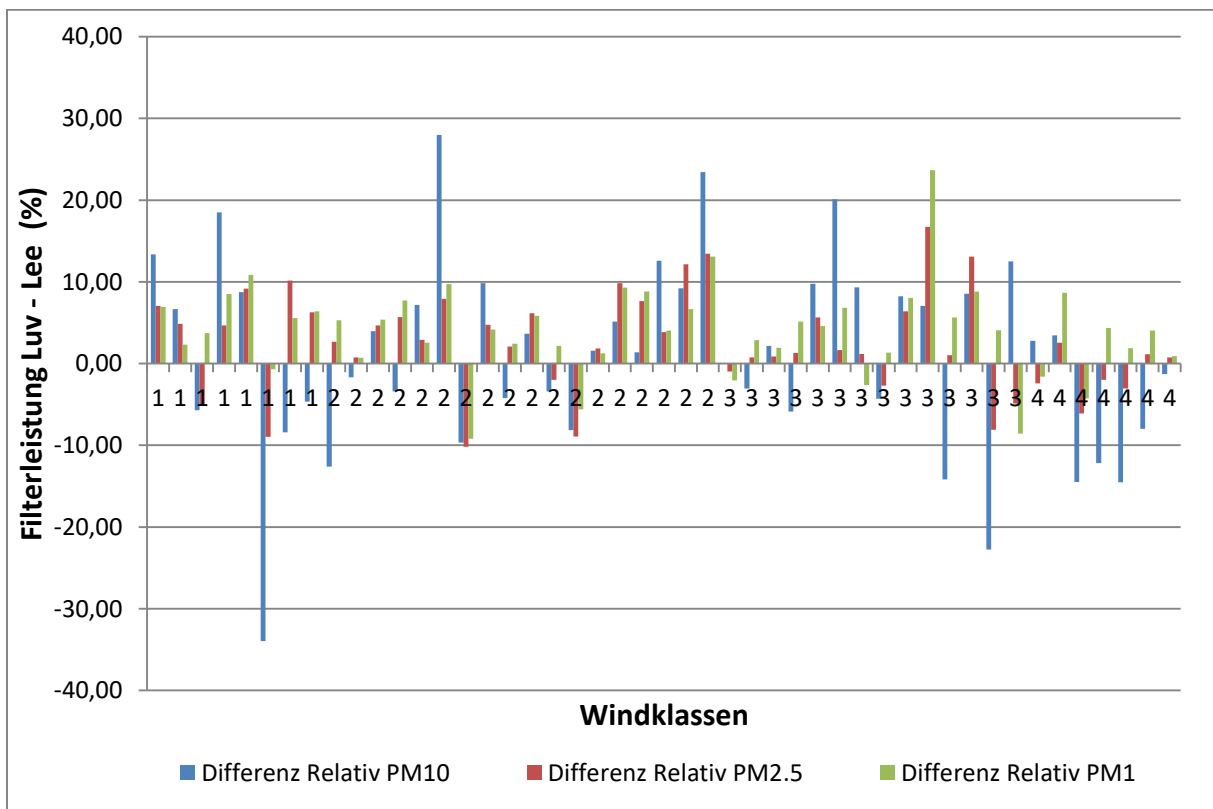
Die Ergebnisse dieser Übersicht zeigen (im Vergleich zu Grafik 60) den Trend, dass die Filterleistung mit steigendem Wind zunimmt. Die Anzahl der Messungen beträgt hierbei für den Bordeaux Platz  $n = 47$ .

Abbildung 62 verdeutlicht hingegen die prozentualen Filterleistungen in Abhängigkeit der Windklassen vom Standort Pariser Platz.

Die ermittelten Werte weisen, jedoch für diesen Standort keinen eindeutigen windabhängigen Trend, auf, da sowohl im Bereich der hohen-, als auch im Bereich der niedrigeren Windgeschwindigkeiten, hohe Filterwerte liegen. Die Anzahl der betrachteten Messungen liegt hierbei, wie bereits am Bordeaux Platz bei  $n = 47$ .



**Abbildung 61. Bordeaux Platz Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=47)**



**Abbildung 62. Pariser Platz Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=47)**

Im Anschluss an die zwei Standorte Bordeaux Platz und Pariser Platz, die entlang kleinerer Straßen, in einem Wohnviertel (Haidhausen) positioniert sind, werden nun im Folgenden, die Ergebnisse der Standorte Lotstraße und Heidemannstraße, die in direkter Nähe zu dicht befahrenen Hauptstraßen (Dachauerstraße und Heidemannstraße), gelegen sind, analysiert.

Grafik 63 stellt so, die windabhängigen Ergebnisse der Filterleistung für den Standort Lotstraße dar und zeigt, dass die kontinuierlich höchsten Filterwerte im Bereich zunehmender Windgeschwindigkeiten von 2 – 3 liegen, wohingegen für besonders kleine Windgeschwindigkeiten, jedoch auch für die Windklasse 4, geringere Werte auftreten. Die Anzahl der Messungen beträgt  $n = 22$ .

Weiter sind die Filterwerte des Standortes Heidemannstraße, unter Berücksichtigung der aufgetretenen Windklassen in Abbildung 64 zu sehen. Aus dieser Grafik ist ersichtlich, dass zwar einzelne hohe Filterwerte für die Windklasse 1 vorherrschen, jedoch der Großteil der erhöhten Filterwerte, bis zu einem Wert von über 10 Prozent, erst bei höheren Windgeschwindigkeiten, in größeren Windklassen auftritt. Die Anzahl der Messungen für die Heidemannstraße liegt bei  $n = 26$ .

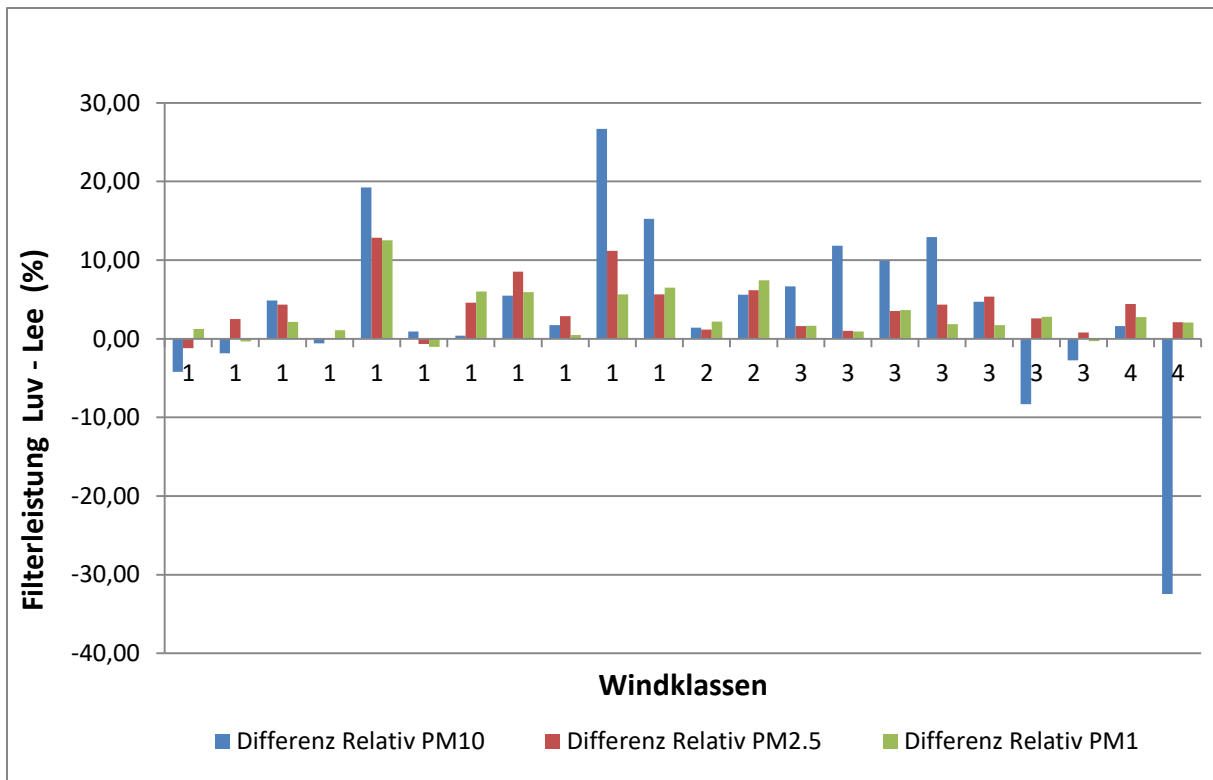


Abbildung 63. Lotstraße Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=22)

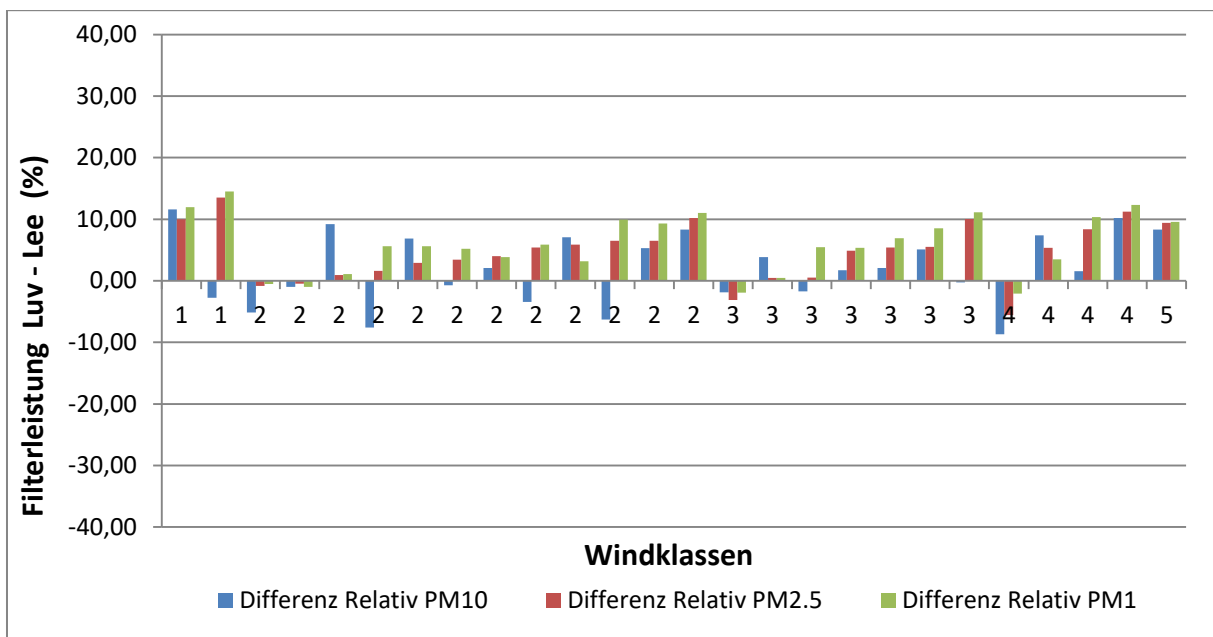


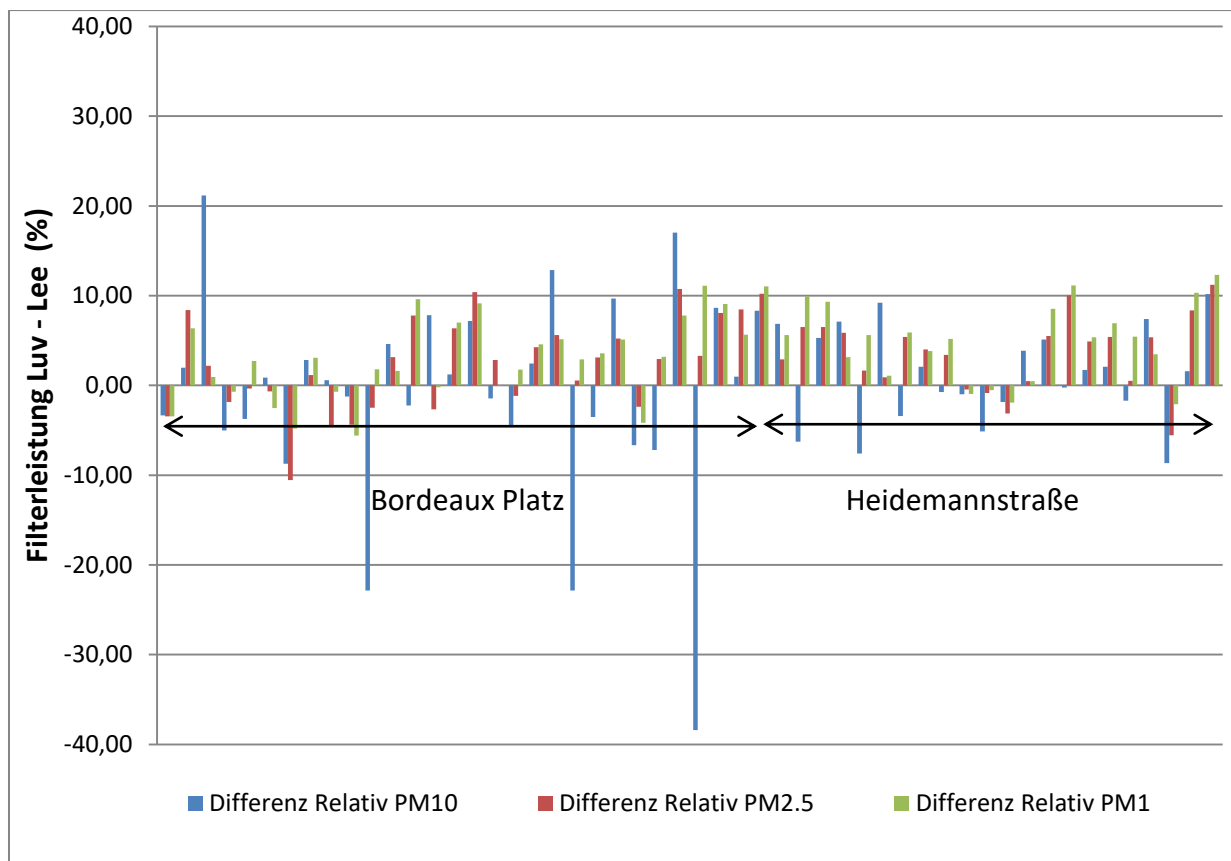
Abbildung 64. Heidemannstraße prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=26)

### 3.4 Filtereffekt und Kronenvolumen

Abbildung 65 zeigt, die prozentuale Filterleistung der drei Feinstaubfraktionen in den Windklassen 2, 3 und 4.

Die Anzahl der fünfminütigen Messungen beträgt in diesem Windklassenbereich für die Heidemannstraße 23 und für den Bordeaux Platz 29.

Die Grafik zeigt, dass die Filterwerte für den Standort Bordeaux Platz mit einem geschätzten Kronenvolumen von 21,77 m<sup>3</sup>, insgesamt niedrigere Filterwerte aufweist, als die Werte des Standorts Heidemannstraße, die mit einem geschätzten Kronenvolumen von 34,07 m<sup>3</sup>, durchschnittlich höhere Filterwerte verzeichnen.



**Abbildung 65. Prozentuale Filterleistung in Abhängigkeit des Kronenansatzes bei einheitlichen Windklassen (n = 52)**

Den in Grafik 65 gezeigten Trend, bekräftigt Tabelle 14, indem die Mittelwerte aller Feinstaubfraktionen für die beiden Standorte, dargestellt sind. Die Werte zeigen, dass die durchschnittlichen Filterwerte des Standortes Heidemannstraße (Kronenvolumen 34,07 m<sup>3</sup>) bei gleichen Windstärken, höher sind als die Filterwerte des Bordeaux Platzes (Kronenvolumen 21,77 m<sup>3</sup>).

**Tabelle 13. Durchschnittliche prozentuale Filterwerte in Abhängigkeit des Kronenvolumens bei einheitlichen Windklassen 2 – 4**

Ort	Kronenvolumen (m <sup>3</sup> )	n	PM10 (%)	PM2,5 (%)	PM 1 (%)
Bordeaux Platz	21,77	29	0,04	2,87	3,83
Heidemann Straße	34,07	23	1,48	3,87	5,18

### 3.5 Filtereffekt nach Feinstaubfraktion

Tabelle 15, gibt einen Überblick über den Filtereffekt aller verschiedenen Standorte (n = 142), in Abhängigkeit der unterschiedlichen Feinstaub Fraktionen (Größenklassen: PM 10; PM2,5 und PM1).

Die deutlich höchsten prozentualen Filterwerte treten am Standort Bordeaux Platz mit 3,11 %, für die Feinstaubfraktion PM 1 auf. Auch am Standort Pariser Platz treten die mit Abstand höchsten Filterwerte für die Fraktion PM 1 auf. Der Standort Lotstraße zeigt seine höchsten Filterwerte im Bereich PM 2,5. Und abschließend weisen für den Standort Heidemannstraße erneut die Fraktionen PM 2,5 und PM 1, die mit Abstand größten prozentualen Filterwerte auf, wobei die Filterleistung für PM 1 sogar noch höher ist, als die Filterleistung für PM 2,5.

Die Ergebnisse zeigen, dass die höchsten Filterwerte für alle Stadtbäume im Bereich der feinsten Feinstaubfraktionen: PM 2,5 und PM 1 liegen. Dieser Effekt kann über alle Standorte hinweg beobachtet werden. Die drei Individuen der Spezies *Tilia cordata*, weisen hierbei, für die allerfeinste Feinstaubfraktion PM 1, die mit Abstand höchsten Filterwerte auf.

**Tabelle 14. Durchschnittliche prozentuale Filterleistung nach Feinstaubgrößen und Standorten, n<sub>gesamt</sub> = 142**

Ort \ Feinstaubgrößen	Bordeaux- Platz (n=47)	Pariser- Platz (N=47)	Lotstraße (N=22)	Heidemann- Straße (N=26)
<b>Messungen</b>	47	47	22	26
PM 10	-1,39 %	1,10 %	3,60 %	1,97 %
PM 2,5	1,98 %	2,78 %	<b>3,81 %</b>	4,69 %
PM 1	<b>3,11 %</b>	<b>4,00 %</b>	3,04 %	<b>5,97 %</b>

## 4. Diskussion

Im Anschluss an die Präsentation der Daten sollen die Ergebnisse nun im Folgenden diskutiert werden.

## 4.1 Kritische Würdigung des Datenmaterials

Die vorliegenden Daten haben den Vorteil, dass sie im Gegensatz zu den weiter oben beschriebenen Studien der Experimentellen- und der Rechensimulationsbasierten Methode, nicht unter Laborbedingungen, oder in Simulationen errechnet wurden, sondern an lebenden Organismen und unter realen Bedingungen - also „in situ“ - erfasst wurden. Mit diesem Vorteil gehen jedoch auch einige Unsicherheiten einher.

So ist zuerst die, in der Literaturrecherche dargestellte Fülle der Faktoren zu nennen, die einen Einfluss auf die Filterleistung haben können. Diese verschiedenen Faktoren konnten, mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit und des Kronenvolumens, in dieser Messung nicht berücksichtigt werden. Doch auch die berücksichtigten Faktoren beinhalten ein gewisses Maß an Unsicherheit. Ist die Windgeschwindigkeit durch Mittelwerte in den fünfminütigen Messintervallen zwar annähernd erfasst, so liegt doch eine gewisse Ungenauigkeit in der zeitlichen Auflösung dieser Werte. So kann ein, ein minütiges Starkwindereignis mit hohen Filterleistungen, durch eine vierminütige windstille Phase relativiert werden, sodass die hohen Windgeschwindigkeiten und großen Filterleistungen während Starkwindereignissen, in der Gesamtbetrachtung der Mittelwerte, nicht mehr auffallen. Zudem traten auch Änderungen, der Windrichtung auf. Wurde zwar auf diese Richtungswechsel durch Umkehrung der Luv und Lee Messgeräte so gut als möglich eingegangen, so traten doch bisweilen Situationen auf, in denen der Wind während der Messdauer von fünf Minuten abrupt drehte und somit die Messergebnisse verfälscht wurden.

Darüber hinaus stellen auch unerfasste Störeinflüsse (wie zum Beispiel Zigarettenrauch), Fehlerquellen in der Erfassung des Filtereffektes, dar.

Eine weitere Ungenauigkeit bezüglich der Ermittlung der Filterleistung ist damit gegeben dass die Auswirkung eines Großteils der Krone, auf Grund der begrenzten Möglichkeit in diesen Höhen so aufwendige Messungen durchzuführen, nicht erfasst werden konnte und somit nur der Filtereffekt des untersten Kronenbereiches (Kronenansatz) erfasst werden konnte.

Schließlich stellen die relativ kleinen Stichprobenanzahlen – auch wenn jeder Wert jeweils eine Dauer von fünf Minuten abdeckt – ein gewisses Maß an Unsicherheit dar.



Im Bewusstsein all dieser Unsicherheiten sei im Folgenden auf die Ergebnisse der Messung eingegangen.

## 4.2 Gesamtbetrachtung der Filterleistung

Die Gesamtübersicht aller aufgetretenen Filterwerte zeigt insgesamt deutlich, dass bei allen untersuchten Stadtbäumen ein Filtereffekt verzeichnet werden konnte (Grafik gesamt). Die Werte der prozentualen Filterleistung (zwischen Luv und Lee) reichen hierbei, über alle Standorte betrachtet, von annähernd 0 bis über 20 Prozent. Darüber hinaus treten jedoch vereinzelt auch negative Filterwerte auf. Diese können zum einen durch nicht erfasste Störquellen, die während der Messung auftraten, erklärt werden. Zum anderen können die negativen Filterleistungen jedoch auf zu geringe Windgeschwindigkeiten, und wechselnde Windrichtungen während der fünfminütigen Messungen, zurückgeführt werden, die dazu führten, dass sich die Luv und Lee Seiten, vertauschten und die Ergebnisse somit verfälscht wurden.

Damit wird eine große Ähnlichkeit zu den Ergebnissen einer Studie, von Brantley et al. sichtbar. So verzeichnet diese Untersuchung, in der ebenfalls die prozentuale Filterleistung einer Baumgruppe erfasst wurde, maximale Filterleistungen von bis zu 22 %. Jedoch zeigen auch die Ergebnisse von Brantley et al., dass zum Teil negative Filterwerte auftraten, die Brantley et al. gleichfalls auf wechselnde Windrichtungen zurückführen (Brantley et al., 2014).

Hingegen von höheren Reduktionswerten, über 22% hinaus, berichten Al-Dabbous und Kumar, die feststellen, dass Stadtbäume mit einem Kronendurchmesser von 2,20 m, die parallel zu einer Straße gepflanzt sind, bis zu 37 % der Partikel Anzahl, reduzieren. Auch Al-Dabbous und Kumar, bemerken hierbei, dass die höchsten Filterwerte bei eindeutigen und einheitlichen Windrichtungen aus Richtung der Partikelquelle (Straße) auftreten und negative Werte nur bei Windeinflüssen aus anderen Richtungen vorkamen (Al-Dabbous und Kumar, 2014).

Ebenfalls von solch hohen Filterwerten berichten Chen et al., die für die PM 2,5 Filterwirkung einer Baumgruppe entlang einer Straße, Reduktionswerte von bis zu 40

%, erfassen. Hierbei erwähnen auch Chen et al., die Windabhängigkeit dieser Art der Feldmessung (Chen et al., 2016).

Neben der Beobachtung des Filtereffekts über alle Standorte hinweg, fällt jedoch auch auf, dass kein Trend, wie in der Einleitung vermutet (Hypothese 1), bezüglich der Blattfläche (hier repräsentiert durch die einzelnen Standorte mit verschiedenen großen Blattflächen) und der Filterleistung vorliegt (Abb. 59). Zudem fällt in Abb. 60 auch kein Trend zwischen den Windgeschwindigkeiten und der Filterleistung nach Hypothese (2) auf.

Da die unterschiedlichen Feinstaubkonzentrationen an den verschiedenen Standorten, durch die prozentuale Ausdrucksweise, der Filterleistung, nicht dafür verantwortlich gemacht werden können, liegt ein Grund für dieses Ergebnis sicherlich darin, dass in Abb. 59 der Faktor „Windstärke“ nicht berücksichtigt wurde und in Abb. 60, der Faktor „Standorte“ (entspricht der Blattfläche), keine Beachtung fand.

Aus diesem Grund ist eine gemeinsame Betrachtung dieser beiden Faktoren „Wind“ und „Standorte“, die sowohl die Windklassen, als auch die Standorte - und damit die filtereffektive Kronenvolumen der einzelnen Bäume - berücksichtigt, eine Grundvoraussetzung für die Ableitung eines windspezifischen-, sowie eines blattflächenabhängigen Filtertrends nach Hypothese (1) und (2), ist.

Diese mehrdimensionale Perspektive auf die Filterleistung – unter Berücksichtigung beider Einflussgrößen - ist die Aufgabe der beiden sich anschließenden Kapitel.

### 4.3 Filterleistung und Windgeschwindigkeit bei einheitlichem Standort

Wie im Literaturteil dieser Arbeit, gezeigt werden konnte, hat Wind eine sehr bedeutende Auswirkung auf die Filterleistung eines Stadtbaumes. Im Folgenden sei deshalb auf Hypothese (1) eingegangen.

Stellte soeben die Betrachtung der Filterwerte über alle Standorte hinweg, keine klare Abhängigkeit der Filterwerte, gegenüber der Windklassen dar, so zeichnet sich bei einer

Betrachtung für die jeweiligen Standorte - aufgrund der dann einheitlichen Kronenvolumen - ein leichter Trend zwischen Filterwerten und Windklassen ab.

So zeigen, die oben dargestellten Ergebnisse, dass für die Messungen am Bordeaux Platz (n=47), ein deutlicher Zusammenhang zwischen Filterwerten und Windgeschwindigkeit, zu erkennen ist (Abb. 61). Dieser Effekt wird am Bordeaux Platz, dadurch begünstigt, dass der Wind, aufgrund der Längsausrichtung des Platzes, überwiegend aus einer einheitlichen Richtung kommt.

Im Gegensatz dazu, zeigen die Ergebnisse für den Standort Pariser Platz (n=47), keine eindeutigen Übereinstimmungen von Filtereffekt und Windstärke (Abb. 62). Dies kann im Fall des Pariser Platzes unter anderem auf seine Lage und Funktion, als Kreisverkehr, zurückgeführt werden. So war es vor allem bei starken Windeinflüssen oft nicht möglich, eine eindeutige Richtung des Windes festzustellen, da die verschiedenen Straßen, den Wind stromförmig auf den runden Platz hin zu transportierten, und sich auf dem Pariser Platz selbst, somit zirkulierende Wind Verwirbelungen bildeten, die das Messergebnis verfälschten.

Für die beiden, direkt an Hauptstraßen gelegenen und dadurch höher belasteten Standorte Lotstraße und Heidemannstraße, ergaben sich eine ähnliche Situation wie für die beiden bereits betrachteten Standorte.

Kamen die Winde an der Heidemannstraße, aufgrund der offenen Lage neben einer breiten Straße meist eindeutig aus einer Richtung, so waren die Windrichtungen im Fall der Lotstraße wieder wechselhaft.

Die wechselnden Winde am Standort Lotstraße sind hierbei unter anderem auf die Lage an einer Kreuzung zurückzuführen, durch welche bisweilen verschiedene Luftströmungen aus den beiden sich kreuzenden Straßen aufeinander trafen und Verwirbelungen erzeugten, die ebenfalls dazu führten dass sich Lee- und Luv Seite, während der Messung, vertauschten.

Auch, wenn auf diese Richtungswechsel durch Umkehrung der Luv und Lee Messgeräte so gut als möglich eingegangen wurde, traten häufig Situationen auf, in denen der Wind während der Messdauer von fünf Minuten abrupt drehte und somit die Messergebnisse verfälscht wurden.

All dies spiegelt sich unter anderem auch in den Filterwerten der beiden Standorte wieder. So zeigen die Ergebnisse für den Standort Lothstraße (n=22), nur einen sehr beschränkten Zusammenhang zwischen Windklassen und Filterwerten (Abb. 63). Demgegenüber weisen die Ergebnisse der Heidemannstraße (n=26) mit ihren gleichmäßigeren Windverhältnissen, einen klareren Trend des Zusammenhangs zwischen Filterleistung und Windklassen, auf (Abb. 64). Die günstigeren Windverhältnisse sind hierbei hauptsächlich auf die Lage dieses Standortes, direkt neben einer breiten und offenen Hauptstraße, mit eindeutiger Windrichtung, zurückzuführen.

## 4.4 Filterleistung und Kronenvolumen bei einheitlichen Windklassen

Wie die Literaturrecherche im ersten Teil der Arbeit aufzeigte, ist bei der Filterung, neben der Windgeschwindigkeit auch die, zur Filterung zur Verfügung stehende Kronenvolumen, von Bedeutung. Um Hypothese (2) zu untersuchen, wurde ebenfalls eine zweidimensionale Sichtweise auf die Filterleistung der Bäume, eingenommen, die sowohl den Faktor „Kronenvolumen“ (entspricht dem jeweiligen Standort), als auch den Faktor „Windstärke“ (entspricht den Windklassen), mit berücksichtigt.

Durch die Betrachtung der Filterleistung, der verschiedenen Standorte - mit verschiedenen Kronenvolumen - bei einer einheitlichen Windklasse, ist es somit möglich, Rückschlüsse darüber zu ziehen, in wie weit sich andere Einflüsse, als die Windgeschwindigkeit, auf die Filterleistung auswirken.

In diesem Punkt soll sich hierbei jedoch nur auf die Auswirkung des Kronenvolumens konzentriert werden. Die in Material und Methoden geschätzten Kronenvolumen, ermöglichen hierbei die Betrachtung dieses Zusammenhangs.

Die dargelegten Ergebnisse, der beiden, für die Untersuchung von Hypothese (2) ausgewählten Standorte, Bordeaux Platz und Heidemannstraße, in den Windklassen 2 bis 4, zeigen einen Trend, dass ein hohes Kronenvolumen eindeutiger und höhere Filterwerte aufweist als ein niedriges Kronenvolumen. Da es sich beim Vergleich in Abb. 65., um zwei Individuen der gleichen Baumart (*Tilia cordata*), handelt, kann eine

annähernd gleichen Blattfläche pro Einheit Kronenvolumen vermutet werden und somit, vereinfachend ein direkter Zusammenhang zwischen filtereffektivem Kronenvolumen und filtereffektiven Blattfläche der beiden Individuen, gebildet werden. Diesen Trend, dass größere Kronenvolumen mit hohen Gesamtblattflächen eine größere Filterleistung aufzeigen, als Stadtbäume mit geringeren Kronenvolumen und kleineren Gesamtblattflächen, bestätigen auch die Ergebnisse der Literaturrecherche in Kapitel 2.2.3.2.1.

## 4.5 Filterung und Qualität des gefilterten Feinstaubes

Ein Zusammenhang, der im Gegensatz zu den oben beschriebenen Trends, sowohl für die Betrachtung einzelner Standorte und Windklassen, als auch für die Betrachtung über alle Standorte und Windklassen hinweg, beobachtet werden konnte, ist der Zusammenhang zwischen Filterung und Qualität des gefilterten Feinstaubes.

So konnte der deutliche Trend beobachtet werden, dass die prozentuale Filterleistung aller Bäume, mit der Feinheit der betrachteten Partikel anstieg (Tab. 15).

Dies bedeutet, dass Stadtbäume ein großes Potential haben, die für die menschliche Gesundheit besonders gefährlichen Feinstaubfraktion PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>1</sub>, zu reduzieren.

Mit diesem Ergebnis stimmen die ermittelten Daten, mit einer Vielzahl anderer Untersuchungen in diesem Gebiet überein. So betonen Nowak et al., die Bedeutung von Bäumen bei der Feinstaubfilterung von Partikeln der Fraktion PM<sub>2,5</sub> (Nowak et al., 2013). Weiter berichten Song et al. davon, dass speziell feine Partikel vermehrt auf der Blattfläche abgelagert werden können (Song et al., 2015). Schließlich stellen auch Freer-Smith et al. fest, dass die allerfeinsten Partikel am effektivsten auf den Blattflächen von Stadtbäumen abgelagert werden (Freer-Smith et al. 2005).

## 5. Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die, in München durchgeführte Feldmessung, auf Basis von Konzentrationsunterschieden zwischen der Luv- und Lee Seite von

Bäumen der Arten *Aesculus hippocastanum* und *Tilia cordata*, den Filtereffekt von Stadtbäumen, quantitativ erfassbar machen konnte.

Da bei Feldmessungen wie dieser, sehr viele verschiedene Faktoren Einfluss, auf das Ergebnis der Feinstaubfilterung haben, und nicht alle dieser Faktoren berücksichtigt werden können, sind mit der Erfassung der Filterleistung in dieser Messung auch hohe Unsicherheiten verbunden.

Die in der Einleitung formulierte Hypothese (1), dass die Filterleistung von Bäumen mit steigender Windgeschwindigkeit zunimmt, konnte bei der Betrachtung einzelner Standorte - dadurch einheitliches Kronenvolumen -, bestätigt werden.

Weiter konnte auch Hypothese (2), dass die Filterleistung mit steigendem Kronenvolumen – und der damit einhergehenden größeren Blattfläche – zunimmt, bei einheitlichen Windstärken und für Individuen der Spezies *Tilia cordata*, bestätigt werden.

Schließlich lässt die Messreihe das bereits aus anderen Studien bekannte Bild ersichtlich werden, dass die Filterung von Bäumen, für die allerfeinsten Partikel, besonders effektiv ist.

Dies deutet auf das große Potential hin, welches Stadtbäume für die Reduktion dieser, durch ihre Feinheit, besonders gesundheitsgefährlichen Feinstaubfraktionen PM 2,5 und PM 1, haben.

# III. Befragung

## 1. Einleitung

Wurde das Thema Feinstaubfilterung durch Bäume in den vorherigen Kapiteln durch eine Literaturrecherche erläutert und durch eine Messreihe in München ergänzt, so soll das Thema nun auch von einer sozialwissenschaftlicher Sicht her beleuchtet werden.

Die folgende sozial empirische Befragung hat das Ziel, sich der Frage: „Wissen Münchner Bürgerinnen und Bürger um die positive Wirkung von Stadtbäumen auf den Feinstaubgehalt in der Luft ihrer Stadt?“ durch unterschiedliche Fragestellungen zu nähern und diese Kernfrage schließlich zu beantworten.

Hierbei lagen dieser Befragung drei Hypothesen zugrunde.

Diese sind, dass:

(1) die meisten Bürgerinnen und Bürger den Zusammenhang zwischen Reduktion des Feinstaubgehaltes und Stadtbäumen, nicht herstellen können.

(2) die Bürger und Bürgerinnen, die sich oft im Grünen aufhalten, vermehrt einen Zusammenhang zwischen Feinstaubreduktion und Stadtbäumen herstellen können.

(3) die Bevölkerung Bäume im Stadtbild als sehr positiv wahrnimmt.

## 2. Material und Methoden

Der Ablauf der Untersuchung lässt sich grob in die Punkte: 1. Entwurf des Fragebogens, 2. Testdurchläufe am Lehrstuhl, 3. Durchführung der Befragung und 4. Kategorisierung und Auswertung der Daten, aufteilen. Im Folgenden seien nun diese vier Punkte genauer dargestellt.

### 2.1 Entwurf des Fragebogens

Um die Zielfrage der Befragung beantworten zu können, mussten zunächst geeignete Fragen ausgedacht und formuliert werden, mit deren Hilfe die Zielfrage beantwortet werden konnte. Hierbei stellte sich zu Beginn die Aufgabe, zu entscheiden, ob die einzelnen Fragen geschlossen- (Auswahl bestimmter Antwortmöglichkeiten), oder offen (freie Formulierung der Antworten durch die Befragten) gestaltet sein sollten.

Während geschlossene Fragen im Allgemeinen leicht auszuwerten sind, stellen offen formulierte Fragen, für die Auswertung eine Herausforderung dar. So muss, bei der Auswertung von offenen Fragen, für jede Frage ein Kategoriensystem gebildet werden, mit dessen Hilfe man alle Antworten einer bestimmten Klasse, zuordnen kann.

Dennoch wurde sich im vorliegenden Fragebogen für eine Mischung von offen- und geschlossen gestellten Fragen entschieden. Dies liegt darin begründet, dass die Befragten bei offenen Fragestellungen mit ins Geschehen eingebunden, sowie motiviert werden, sich selbst Gedanken zu machen und eigenständige Antworten zu geben. Im Gegensatz dazu können geschlossen- und starr formulierte Fragen die befragten Personen oft einschüchtern und verunsichern, was zu geratenen Antworten führen- oder dazu verleiten kann, in der Weise zu antworten, wie es sich der jeweilige Fragesteller von seinem Gegenüber erhofft.

Zu diesem sehr offenen Stil der Befragung, wurde in drei der 14 Fragen des Bogens, auch mit Bildern gearbeitet, um die Teilnehmer noch intensiver in das Thema des Fragebogens einzubeziehen. So konnten die Befragten in diesen Fragen ihre Antworten anhand von farbigen Abbildungen auswählen.



Nach der Entscheidung über den Stil der Fragen, wurden die einzelnen Fragesätze formuliert. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass die befragten Personen den Zusammenhang zwischen Feinstaub und Stadtbäumen nicht bereits aus der Fragestellung entnehmen konnten. Aus diesem Grund wurden die Fragen so gewählt, dass sich durch die Verwendung von verschiedenen Fragen der Beantwortung der Zielfrage angenähert wurde- und diese schließlich geklärt werden konnte.

Nach einigen Testdurchläufen des Fragebogens, am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München, wurde außerdem schnell klar dass neben der geschickten Formulierung der Fragesätze, auch die Anordnung und die Reihenfolge der einzelnen Fragen eine große Bedeutung für die unvoreingenommene Beantwortung der Fragen hatte. Aus diesem Grund wurde die Reihenfolge der einzelnen Fragen systematisch angeordnet. Die Idee hinter dieser Anordnung war dabei, von allgemeinen Fragen über das Thema Luftqualität mehr und mehr auf die speziellen Fragen des Fragebogens zu kommen und erst ganz gegen Ende des Fragebogens, nachdem der Zusammenhang von Feinstaubreduktion und Bäumen aufgeklärt wurde, den Aspekt der Wahrnehmung von Stadtbäume mit in die Fragestellung einzubauen.

Im Folgenden seien nun die einzelnen Frageabschnitte kurz vorgestellt.

Zu Beginn des Fragebogens wurden all jene Fragen gestellt, die die befragten Personen nach ihrer subjektiven Einschätzungen, bezüglich der Luftqualität in München, interviewten. Solche Fragen waren: 1. Wenn ich an die Luft in München denke, dann...?; 2. Die Luftqualität in München bedeutet für mich...?; 3. Am besten ist die Luftqualität in München in...?; 4. Am schlechtesten ist die Luftqualität in München in...?; 5. Bitte geben Sie der Luftqualität in München eine Schulnote.

Hierauf folgten Fragen, die sich verstärkt damit beschäftigten, was die Befragten bereits über das Thema Feinstaub gehört hatten, und welches Wissen bezüglich dieses Themas vorhanden war. Zu diesen Fragen gehörten die Folgenden: 6. Was wirkt sich ihrer Meinung nach am stärksten positiv auf die menschliche Gesundheit aus: a) CO<sub>2</sub> Reduktion, b) Feinstaubreduktion, c) Reduzierung von groben Rußpartikeln ?; 7. Haben Sie schon einmal von Feinstaub gehört...? – wenn Ja – in welchem Zusammenhang haben sie davon gehört...?; 8. Was sind ihrer Meinung nach die zwei größten Feinstaubquellen in München: a) Flugzeuge, b) Hausbrand, c) Industrie, d) Autos ?

Nach diesen mehr auf das individuelle Wissen ausgelegten Fragen, folgte eine kurze Erklärung, zum Thema Feinstaub, falls diese notwendig war. Die Erklärung diente hierbei dazu eine einheitliche Wissensbasis aller Befragten für die Beantwortung der sich anschließenden Fragen sicherzustellen.

Nach der Hinführung zum Thema „Feinstaub“ zielte der Fragebogen nun in besonderer Weise darauf ab, sich der Beantwortung der Zielfrage der Untersuchung, sowie der damit verwandten Hypothese (1), durch verschiedene weitere Fragestellungen zu nähern.

So beinhaltete der folgende Teil nun die Fragen: 9. Der Feinstaubgehalt im Stadtinneren kann gesenkt werden, indem...?; 10. Was meinen Sie trägt effektiv zur Reduzierung von Feinstaub in Städten bei: a) Gewässer, b) Straßenreinigung, c) Blätter, d) Rußpartikelfilter ?; Wenn in dieser Frage der Begriff „Blätter“ genannt wurde, wurde eine weitere Frage angehängt: Sie sagten soeben „Blätter“, wie stellen sie sich die Senkung des Feinstaubgehaltes durch Blätter genau vor...?.

11. Wenn Sie Bürgermeister/in wären was würden Sie tun, um den Feinstaubgehalt in München zu beeinflussen...?. An Frage 11 anschließend erfolgte erneut, falls nötig, eine kurze Aufklärung des Filtermechanismus von Stadtbäumen, um alle Befragten auf die nächste Frage vorzubereiten: 12. Welchem der folgenden Bäume trauen sie die höchste Filterleistung zu: a) Linde b) Robinie c) Kastanie ?.

Um die Ergebnisse der besonders für die Zielfrage relevanten Fragen: 9 bis 11, auf Hypothese (2) testen zu können, folgte eine weitere Frage: 13. Suchen Sie: a) oft-, b) gelegentlich-, oder c) selten eine Grünfläche mit Bäumen in der Stadt auf ?.

Schließlich folgte noch eine Frage, zur Untersuchung von Hypothese (4): Frage 14. Wenn ich einen Baum in der Stadt sehe, empfinde ich es als....?

Neben all diesen Fragen wurden zur Vollständigkeit des Fragebogens einige anonymisierte personenbezogene Daten (Altersgruppe und Geschlecht) der Befragten erhoben und im Vorspann des Fragebogens notiert.

## 2.2 Durchführung der Befragung

Im Anschluss an die Entwurf- und Testphase, folgte die Durchführung der Befragung. Diese fand an neun Tagen im Zeitraum 14. August 2016 bis 29. August 2016 in München, statt. Die Befragungsorte waren zum einen ein Wohnviertel Haidhausen (im Gebiet der Messstandorte „Bordeaux Platz“ und „Pariser Platz“) und zum anderen die belebte Münchner Innenstadt am Rindermarkt (nahe des Marienplatzes), sowie am Geschwister- Scholl- Platz vor der Ludwig Maximilians Universität, statt (siehe Abbildung 66 ).



**Legende**



**Abbildung 66. Übersicht der Befragungsorte**

(Erstellt mit ArcGIS)

Bei der Befragung wurde eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Alters und der Geschlechter angestrebt. Aus diesem Grund wurden zu Beginn der Erhebung Altersgruppen gebildet, die ein repräsentatives Bild der Bevölkerung widerspiegeln sollten. Hierbei wurden folgende Altersgruppen berücksichtigt: Die Jugendlichen und jungen Erwachsenen, in der Altersgruppe < 25, hieran anschließend die Gruppe der 25

bis 45 Jährigen, weiter die Altersgruppe, der 46 – 65 Jährigen und schließlich die Gruppe der Rentner und Senioren > 65.

Insgesamt wurden 80 Personen befragt, jede Altersgruppe bestand aus 10 männlichen und 10 weiblichen Befragten (siehe Tab. 16).

**Tabelle 15. Gleichverteilung der Befragten nach Geschlechtern und Altersgruppen**

<b>Alter\ Geschlecht</b>	<b>&lt; 25</b>	<b>25 - 45</b>	<b>46 - 65</b>	<b>&gt; 65</b>
<b>Weiblich</b>	10	10	10	10
<b>Männlich</b>	10	10	10	10

Um ein möglichst repräsentatives Bild aller Bevölkerungsgruppen zu gewährleisten, wurde die Befragung zu unterschiedlichen Tageszeiten, durchgeführt. So wurden die Erhebungen zum einen Vormittags und Mittags, zum anderen jedoch auch Nachmittags und Abends ermittelt. Durch diese zeitliche Streuung der Untersuchungen konnten sowohl Hausfrauen, Senioren, weiter auch Schüler und Studierende, sowie Arbeitende befragt werden.

Die Befragung wurde mündlich durchgeführt und die Antworten zeitgleich in die, dafür vorgesehenen Fragebögen eingetragen (Fragebogen siehe Anhang). Hierbei wurde aus Gründen der Gleichgewichtung für jede befragte Person stets die erste Antwort erfasst. Lediglich in Frage 9 und 11 wurden, wegen der Fülle an Antworten, die zwei ersten genannten Stichworte, festgehalten. In diesen Fragen wurde jedoch die Antwort von Befragten, die nur eine Antwort nannten nicht einfach, sondern, um eine Gleichgewichtung aller Befragten sicherzustellen, doppelt gewertet.

## 2.3 Kategorisierung und Auswertung der gewonnenen Daten

Im Anschluss an die Datenerhebung erfolgte die Kategorisierung und Auswertung, sowie die Darstellung der Ergebnisse. Hierbei wurden zunächst die verschiedenen Ergebnisse für jede Frage auf einem extra Blatt gesammelt und anhand dieser unterschiedlichen Antworten ein geordnetes Kategoriensystem entworfen, dass allen Antworten, entsprechend ihrem Inhalt, je eine Kennzahl - mit Ausnahme von Frage 9 und 11, hier waren es zwei Kennzahlen - zuordnete.

Im Folgenden wird dieses Kategorisierungssystem und die in den Fragen vergebenen Kennzahlen nach der Reihenfolge der einzelnen Fragen, beschrieben.

### Frage 1.

In Frage 1: „Wenn ich an die Luft in München denke, dann...?“, ist das Kategorisierungssystem wie folgt ausgelegt:

1.0. stellt alle negativen-, 2.0. alle neutralen- und 3.0. alle positiven Assoziationen, dar. Hierbei wurden 1.0. zusätzlich in 1.1., als stark negative- und in 1.2., als schwach negative Assoziationen unterteilt. Auch in 3.0. ist diese erweiterte Aufteilung in 3.1., als schwach positive- und in 3.2., als stark positive Assoziationen, durchgeführt.

### Frage 2.

Die Frage 2: „Die Luftqualität in München bedeutet für mich“? ist in die Kategorien: 1.0., für hohe Bedeutung, 2.0., für gemäßigte bis neutrale Bedeutung und 3.0., für geringe Bedeutung, unterteilt.

### Frage 3.

Frage 3 ist zielgerichtet auf die Fragestellung des Fragebogens: „Wissen die Münchner Bürgerinnen und Bürger um die positive Filterwirkung von Stadtbäumen auf den Feinstaubgehalt in der Stadt“, kategorisiert. So bedeutet 1.0., dass die Antwort auf die Frage: „Am besten ist die Luftqualität in München in...“, das Thema „Natur“ und „Grünflächen“ beinhaltet, 2.0. stellt dagegen die Antworten dar, die diese Themen nicht

in der Beantwortung enthalten. Die Feindifferenzierung in Kategorie 1.0. teilt sich dann weiter in 1.1., als „Englischer Garten“, 1.2., als „Nymphenburgerschlosspark“ und in 1.3., als „Isarauen innerhalb Münchens“, auf. In Kategorie 2.0., bei der die Antwort nicht die Themen „Natur“, oder „Grünflächen“ beinhalteten, stellen 2.1. „Orte und Gebiete außerhalb Münchens“ und 2.2. „Orte und Gebiete im Stadtinneren von München“, dar.

#### Frage 4.

Bei Frage 4: „Am schlechtesten ist die Luftqualität in München in...?“, stellt die Kategorie 1.0. alle Antworten dar, die Orte oder Gebiete aus dem innerstädtischen Zentrum Münchens, im genaueren Bereiche innerhalb des Mittleren Ringes, beinhalten. In der Kategorie 2.0. sind hingegen alle Antworten zusammengefasst, die Orte oder Gebiete außerhalb des Mittleren Ringes oder den Mittleren Ring an sich thematisieren -nennen. In 1.0. sind die Antworten weiter in die drei Bereiche: 1.1. Straßen im Zentrum, 1.2. Sonstige Orte im innerstädtischen Bereich und 1.3. U-Bahnstationen, unterteilt. Auch die Antworten in 2.0. sind noch weiter differenziert, so umfasst die Kategorisierungsziffer 2.1. den Mittleren Ring, sowie die Autobahnen und die Ziffer 2.2. die Industriegebiete des Münchner Nordens. Zuletzt steht die Ziffer 9.9. für alle Befragungen die bei Frage 4 keine Antwort erhielten.

#### Frage 5.

Die Frage 5: „Bitte geben Sie der Luftqualität in München eine Schulnote...?“, wurde entsprechend der Vergabe von Schulnoten mit Kategorien, von 1 bis 6, aufgeteilt.

#### Frage 6.

In Frage 6: „Was wirkt sich Ihrer Meinung nach am positivsten auf die menschliche Gesundheit aus?“, repräsentierte die Kategorie 1.0. alle Antworten, die die Lösung a) mit „CO<sub>2</sub> Reduzierung“ angaben, 2.0. alle Antworten, die die Lösung b) mit „Feinstaubreduzierung“ nannten und 3.0. alle Antworten, die die Lösung c) mit „Reduzierung von groben Rußpartikeln“, als richtig annahmen.

#### Frage 7. 1.

Bei Frage 7.1.: „Haben Sie schon einmal von Feinstaub gehört...?“, wurde nach den zwei möglichen Antworten kategorisiert, die „Ja“ und „Nein“ waren, wobei die Ziffer 1.0. für die Antwort „Ja“ und die Ziffer 2.0. für die Antwort „Nein“ codiert wurden.

#### Frage 7.2.

Um die vielen unterschiedlichen Zusammenhänge, in denen die Befragten in der Frage: „In welchem Zusammenhang haben sie von Feinstaub gehört...?“ angaben, mit dem Thema Feinstaub in Berührung gekommen zu sein, sichtbar zu machen, ist die Kategorisierung bei dieser Frage so gestaltet, dass die Vielfalt der Antworten erhalten bleibt. Die Ziffer 1.0. steht somit dafür, dass die Befragten mit dem Thema Feinstaub in Zusammenhang mit Gesundheitsgefahr, in Berührung gekommen sind, 2.0. steht für die Assoziation mit Umwelt-/Luftverschmutzung, 3.0. für die Bekanntheit durch Messungen und Grenzwerte, 4.0. für den Zusammenhang mit Autos und Umweltplaketten, 5.0. für Bekanntheit durch die Industrie, 6.0. für Haushalte, 7.0. für den Zusammenhang mit Baustellen und die Ziffer 8.0. für alle Befragten, denen der Begriff Feinstaub ohne einen Zusammenhang oder eine Assoziation, eingefallen war.

#### Frage 8.

In Frage 8: „Was sind ihrer Meinung nach die zwei größten Feinstaubquellen in München?“, wurde die Kategorisierung anhand von Lösungspaaren durchgeführt. Die Reihenfolge, welcher der Begriffe zuerst und welcher als zweites genannt wurden spielen dabei keine Rolle, sondern nur die Wahl des Paares. Die Codierungsziffer 1.0. ist somit repräsentativ für alle Antworten, die „Flugzeuge“ und „Hausbrand“ beinhalten, 2.0. codiert alle Antworten, die „Flugzeuge“ und „Industrie“ angeben, 3.0. alle, die „Autos“ und „Flugzeuge“, 4.0. alle, die „Autos“ und „Industrie“ darstellen, sowie 5.0. alle die „Autos“ und „Hausbrand“ nennen und 6.0. alle die „Industrie“ und „Hausbrand“ beinhalten.



## Frage 9.

Die Frage 9: „Der Feinstaubgehalt im Stadtinneren kann gesenkt werden, indem...“ beinhaltet ein sehr breites Antworten Spektrum, da die Befragten zu dieser Frage viele unterschiedliche Ideen einbrachten und zudem in dieser Frage die ersten zwei Antworten der befragten Personen in die Auswertung mit aufgenommen wurden. Sie ist im ersten Schritt in zwei Kategorien gefasst. Kategorie 1.0. umfasst alle Antworten die in erster Linie eine Einschränkung der Feinstaubquellen als hilfreich ansehen, Kategorie 2.0. diejenigen Antworten, die die Reduktion des Feinstaubgehaltes mit Hilfe von speziellen Maßnahmen, als nützlich erachten. Weiter sind diese zwei Kategorien intern, jeweils noch genauer differenziert. Die Ziffer 1.1. bezeichnet die Reduzierung des Automobilverkehrs, wobei die Ziffer 1.1.1. speziell den PKW Anteil und die Ziffer 1.1.2. speziell den LKW Anteil des Verkehrs betreffen. Darüber hinaus wird die Reduzierung und Einschränkung des Flugverkehrs mit der Ziffer 1.2. gekennzeichnet. Reduzierungen im Bereich der Industrie sind mit der Ziffer 1.3. und Reduzierungen von Bauvorhaben mit den Ziffern 1.4., codiert. Weiter sind in Kategorie 1.0. Reduzierungen im Bereich Konsum, durch die Ziffern 1.5. für Reduzierung von Zigarettenrauch, 1.6. für die Reduzierung von zu hohem Fleischkonsum und 1.7. für die Reduzierung von offenen Feuerstellen, gekennzeichnet. Die weitere Differenzierung der speziellen Maßnahmen in 2.0. sieht wie folgt aus: 2.1. steht für alle Antworten, die Bäume pflegen, erhalten oder pflanzen beinhaltet, 2.2. für alle Antworten die sich auf den Einsatz von Filtertechniken beziehen, 2.3. für alle Antworten, die umweltfreundliche Mobilitätstechnologien vorschlagen, 2.4. für alle Antworten, die erneuerbare Energien fordern, 2.5. für alle Antworten, die die Förderung der öffentlichen Verkehrsmittel, befürworten, 2.6. für alle Antworten die, den Ausbau der Fußgänger- und Radinfrastruktur nennen, 2.7. für alle Antworten, in denen die öffentliche Bildungsarbeit im Bereich Feinstaub und die Kommunikation der Politik mit den Bürgerinnen und Bürgern vor Ort eine wichtige Rolle spielen, 2.8. für alle Antworten, die Geschwindigkeitsbegrenzungen innerhalb der Stadt favorisieren, 2.9. für alle Antworten, die sich für die Verlegung von Straßen in Tunnel unter der Erdoberfläche aussprechen, sowie 2.10. für alle Antworten, die Straßenreinigung als zielführend erachten und 2.11. für alle Antworten, die stärkere Kontrollen der bereits vorhandenen Feinstaubgrenzwerte fordern. Als Ziffer 9.9. wurden alle Antworten kategorisiert, die angeben, dass nicht noch mehr getan werden könne als bisher bereits getan wurde, um den Feinstaub zu reduzieren.

Frage 10.

In dieser Frage: „Was meinen Sie trägt am meisten zur Reduzierung von Feinstaub in Städten bei?“, wurde das Kategorisierungssystem erneut auf die Beantwortung der Zielfrage, nach dem Bekanntheitsgrad der Feinstaubfilterfunktion von Stadtbäumen in der Bevölkerung, ausgerichtet. So stellen alle Antworten, die die Antwortmöglichkeit c) (=Blätter), enthalten, die Kategorie 1.0. dar, wohingegen alle Antworten, die c) (=Blätter) nicht enthalten, in die Kategorie 2.0. eingeordnet werden. Um die Bekanntheit des Filtermechanismus noch genauer zu differenzieren, ist 1.0. in zwei weitere Gruppen unterteilt. So bedeutet die Ziffer 1.1., dass der Filtermechanismus der befragten Person bei genauerer Nachfrage auch bekannt ist, wohingegen 1.2. bedeutet, dass der Filtermechanismus nicht bekannt ist.

Frage 11.

Das Kategorisierungssystem dieser Frage entspricht, da die zwei Fragen sehr eng miteinander verbunden sind, dem Kategorisierungssystem in Frage 9. Wegen der großen Vielfalt der Antworten wurden auch in dieser Frage, wie in Frage 9, die zwei ersten Antworten der befragten Personen in die Auswertung mit aufgenommen.

Frage 12.

In dieser Frage: „Welcher der folgenden Baumarten trauen Sie die höchste Feinstaubfilterleistung zu?“, ist das Codierungssystem entsprechend der drei möglichen Baumarten 1.0. für a) Linde, 2.0. für b) Robinie und 3.0. für c) Kastanie, gewählt.

Frage 13.

Auch in dieser Frage: „Wie oft suchen Sie eine Grünfläche mit Bäumen in der Stadt auf?“, ist das Kategorisierungssystem in Anlehnung an die drei möglichen Antworten, mit 1.0. für a) = „oft“, 2.0. für b) = „gelegentlich“ und mit 3.0. für c) = „selten“, gegliedert.

Frage 14.

In Frage 14: „Wenn Ich einen Baum in der Stadt sehe empfinde ich es als...?“, wurden alle Antworten, die mit einer positiven Emotion verbunden waren, mit 1.0., alle neutralen Emotionen mit 2.0. und alle negativen mit 3.0., gekennzeichnet. Hierbei wird auf Grund der meist sehr positiven Emotionen die Kategorie 1.0. in drei weitere

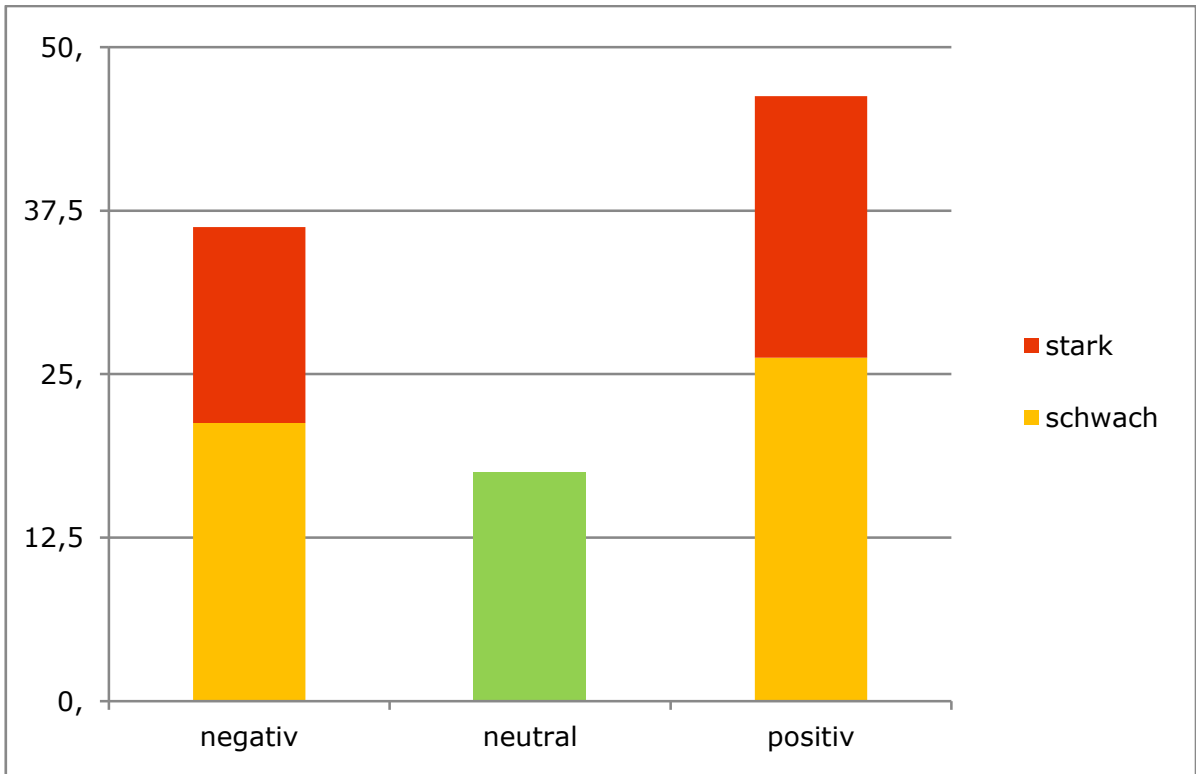
Kategorien differenziert. Die Ziffer 1.1., umfasst somit alle „begeisterten“ Antworten, 1.2. alle „erfreuten“ und 1.3. alle „gemäßigt – positiven“ Emotionen.

In nächsten Schritt wurden dann alle diese Kennzahlen in das Computer Programm Excell 2010 eingetragen. In diesem Programm erfolgte nun die weitere Auswertung der Daten, sowie die Erstellung von Diagrammen. Zur Darstellung der jeweiligen Häufigkeiten der einzelnen Antworten wurden die Werte in diesen Diagrammen in Prozent angegeben.

Im Folgenden sind nun die mit Hilfe der Kategorisierung ermittelten Ergebnisse nach der Reihenfolge der einzelnen Fragen dargestellt. Hierbei sind die einzelnen Kategorien nicht als Ziffern dargestellt, sondern in Worten ausgeführt.

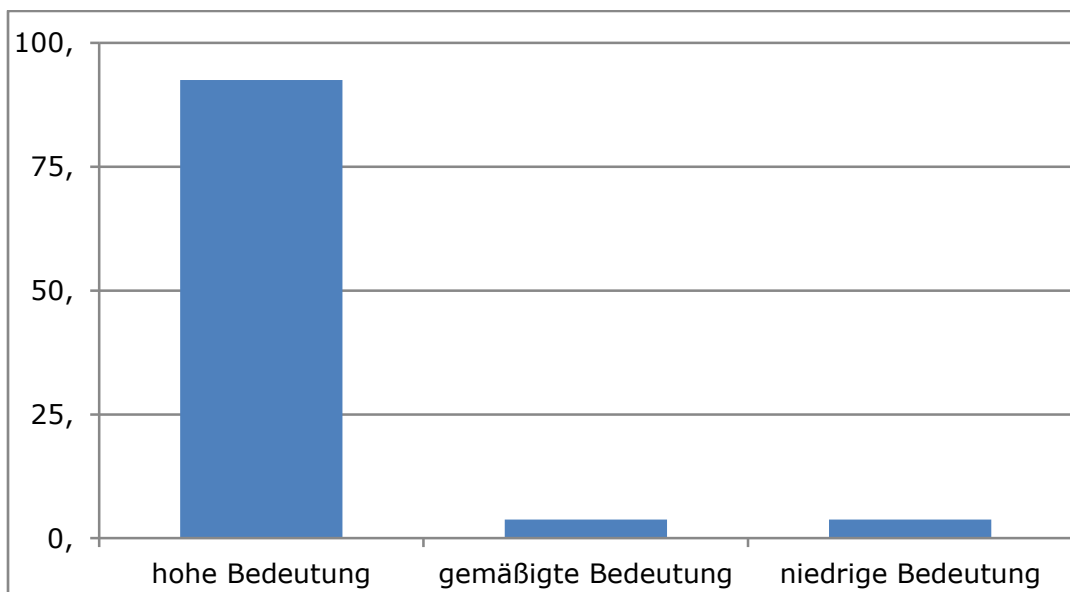
### 3. Ergebnisse

Die Ergebnisse von Frage 1 (Wenn ich an die Luft in München denke, dann...?), sind in Abbildung 67 dargestellt. 35 % der Befragten antworten mit einer stark- bis schwach negativen Aussage, wohingegen über 45 % mit einer schwach- beziehungsweise stark positiven Erwiderung antworten. Nur 17,5 % haben bei dieser Frage eine neutrale Assoziation.



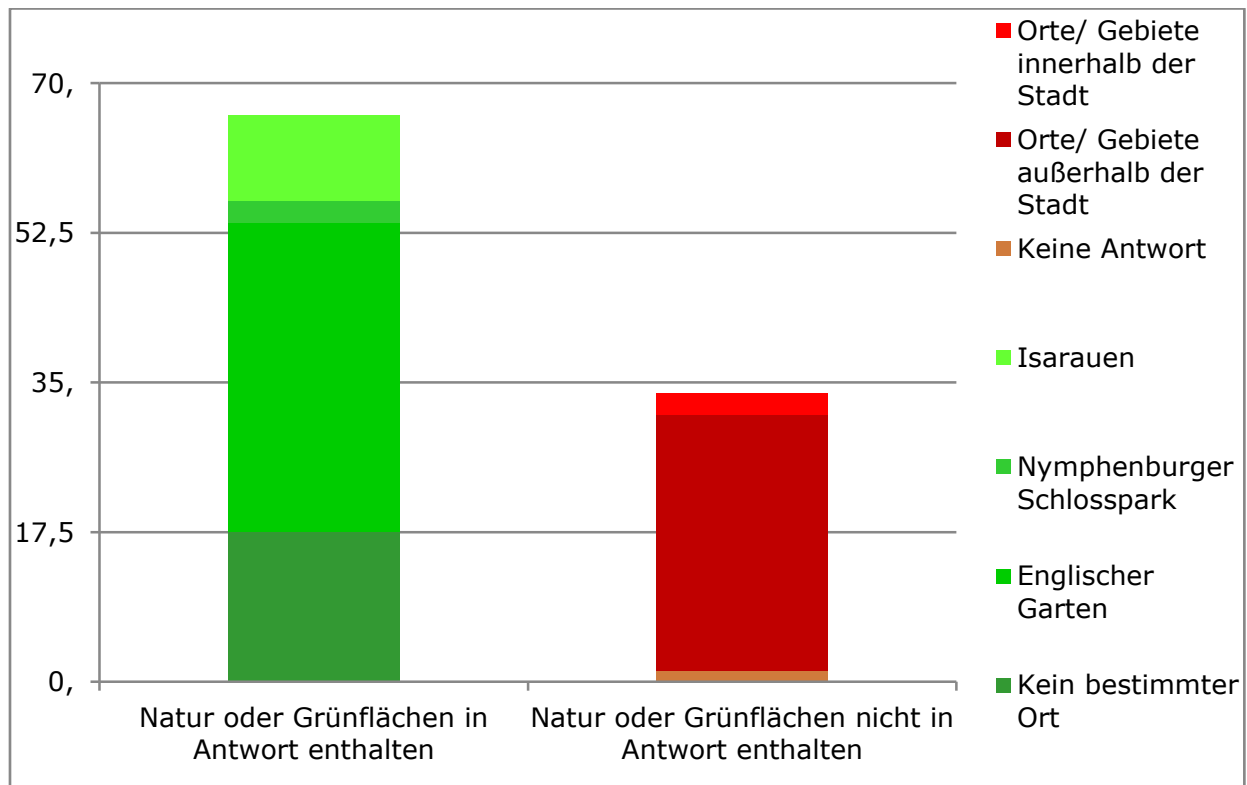
**Abbildung 67. Ergebnisse für Frage 1 (n=80)**

Auf Frage 2 (Die Luftqualität in München bedeutet für mich...?), antworten über 90 % der Bürgerinnen und Bürger damit, dass die Luftqualität für Sie eine hohe Bedeutung hat. Lediglich 3,75 % geben eine gemäßigte, beziehungsweise eine niedrige Bedeutung an (Abb. 68).



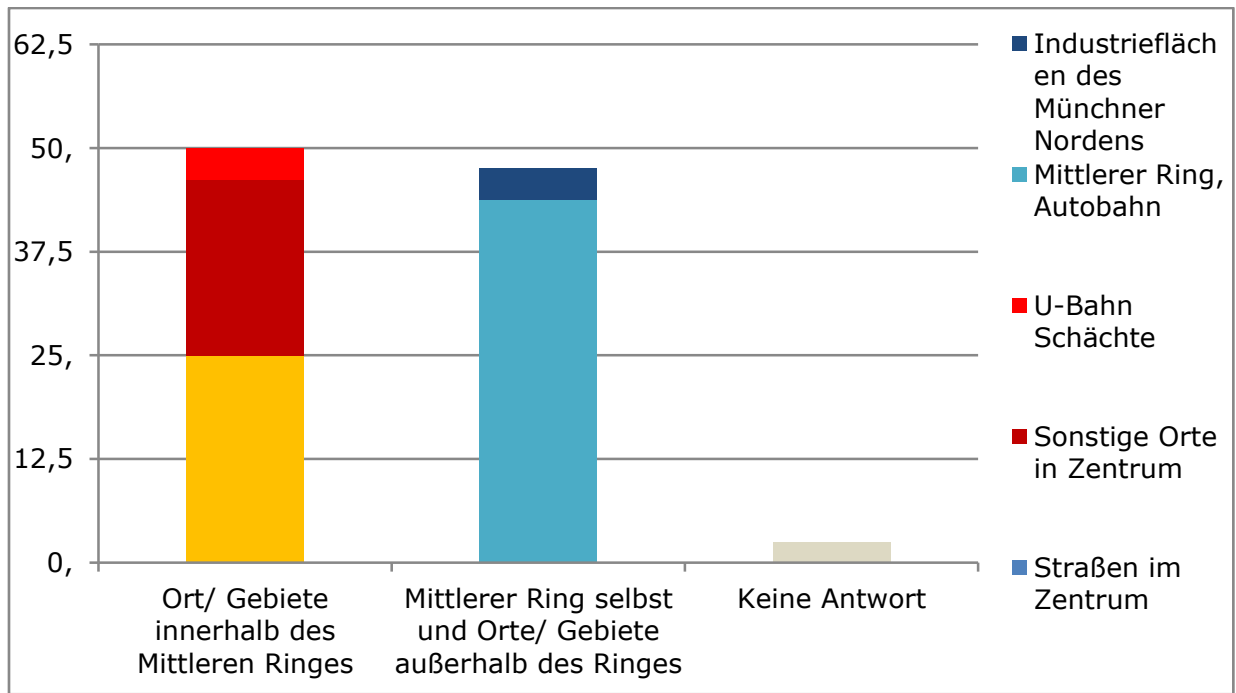
**Abbildung 68. Ergebnisse der Frage 2 (n=80)**

Auf Frage 3 (Am besten ist die Luftqualität in München in...?), antworten über 65 % der Befragten mit einer Antwort, in der Natur oder Grünflächen enthalten sind. Hierbei sind der Englische Garten mit 36,25 % und die Isarauen, mit 10 % die Spitzenreiter. Nur knapp über 33 % der Antworten, enthalten nicht explizit Natur oder Grünflächen in ihrem Wortlaut. Jedoch auch in dieser Gruppe dominieren Orte und Gebiete außerhalb der Stadt mit 30 % (Abb. 69).



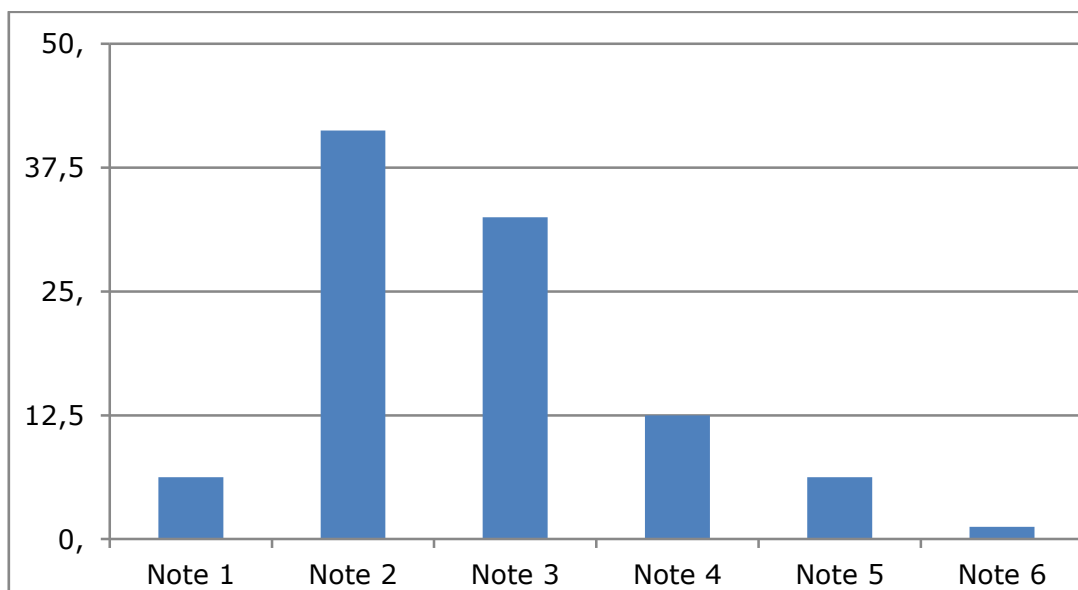
**Abbildung 69. Ergebnisse für Frage 3 (n=80)**

Im Gegensatz zur vorherigen-, nennen in Frage 4 (Am schlechtesten ist die Luftqualität in München in...?), 50 % der Befragten, Orte oder Gebiete innerhalb der Stadt beziehungsweise innerhalb des Mittleren Ringes. Als bestimmte Orte werden ausdrücklich nur Straßen im Zentrum mit 25 % und U-Bahn Schächte mit 3,75 %, genannt. In der Rubrik „Mittlerer Ring selbst und Orte und Gebiete außerhalb des Ringes“, schätzen 43,75 % der Befragten die Luftqualität direkt am Mittleren Ring, sowie an der Autobahn, und nur 3,75 % im Industriegebiet des Münchner Nordens, als am schlechtesten ein (Abb. 70).



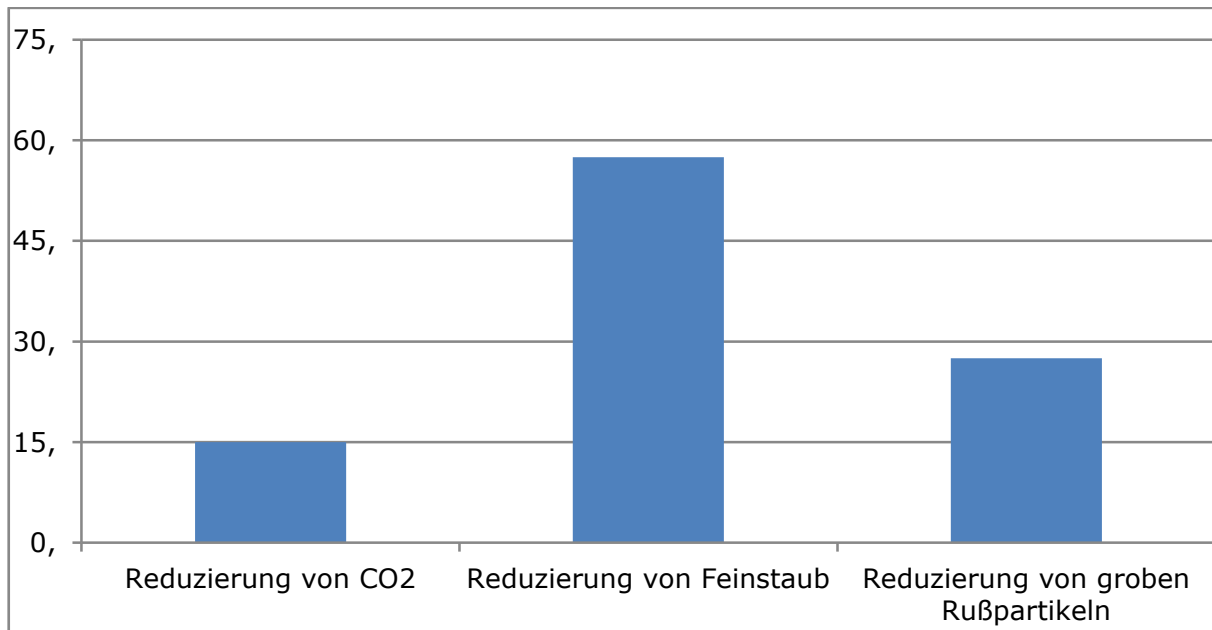
**Abbildung 70. Ergebnisse für Frage 4 (n=80)**

Die Ergebnisse von Frage 5 (Bitte geben Sie der Luftqualität in München eine Schulnote), sind Abbildung 71, zu sehen. Die durchschnittliche Gesamtnote beläuft sich hierbei auf 2,75.



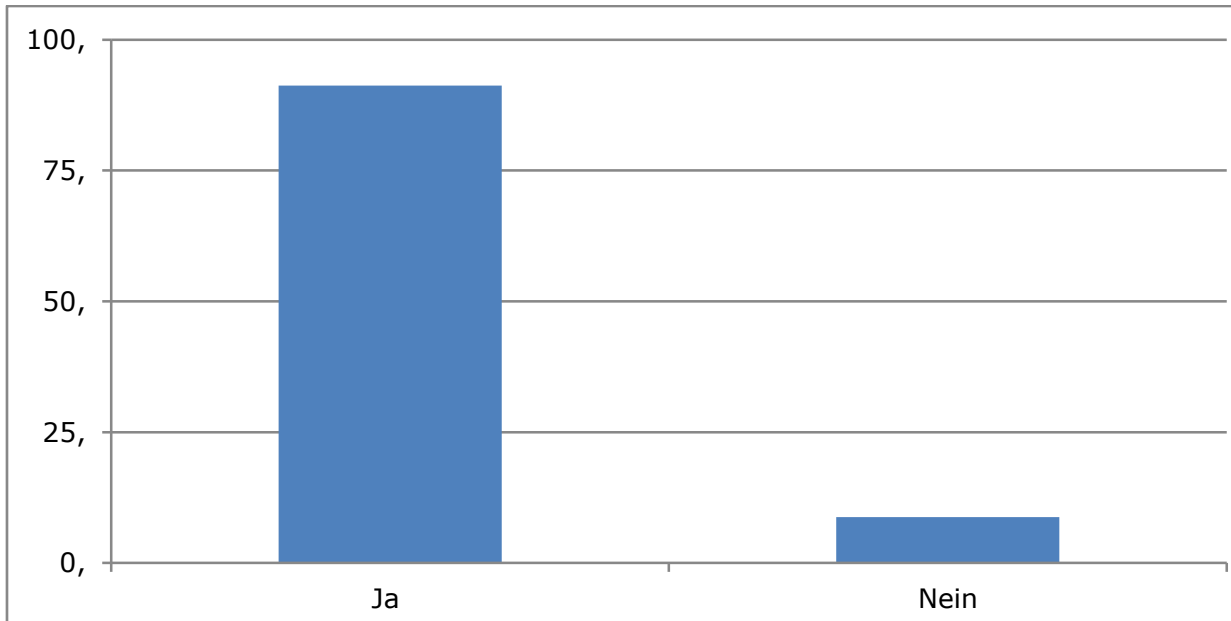
**Abbildung 71. Ergebnisse für Frage 5 (n=80)**

Die erste Wissensfrage, stellt Frage 6 (Was wirkt sich ihrer Meinung nach am stärksten positiv auf die menschliche Gesundheit aus...?), dar. Diese Frage beantworteten mit 57, 5 %, die meisten Befragten mit Feinstaub. Die Reduzierung von groben Rußpartikeln war hingegen mit 27, 5 %, schwächer ausgeprägt (Abb. 72).



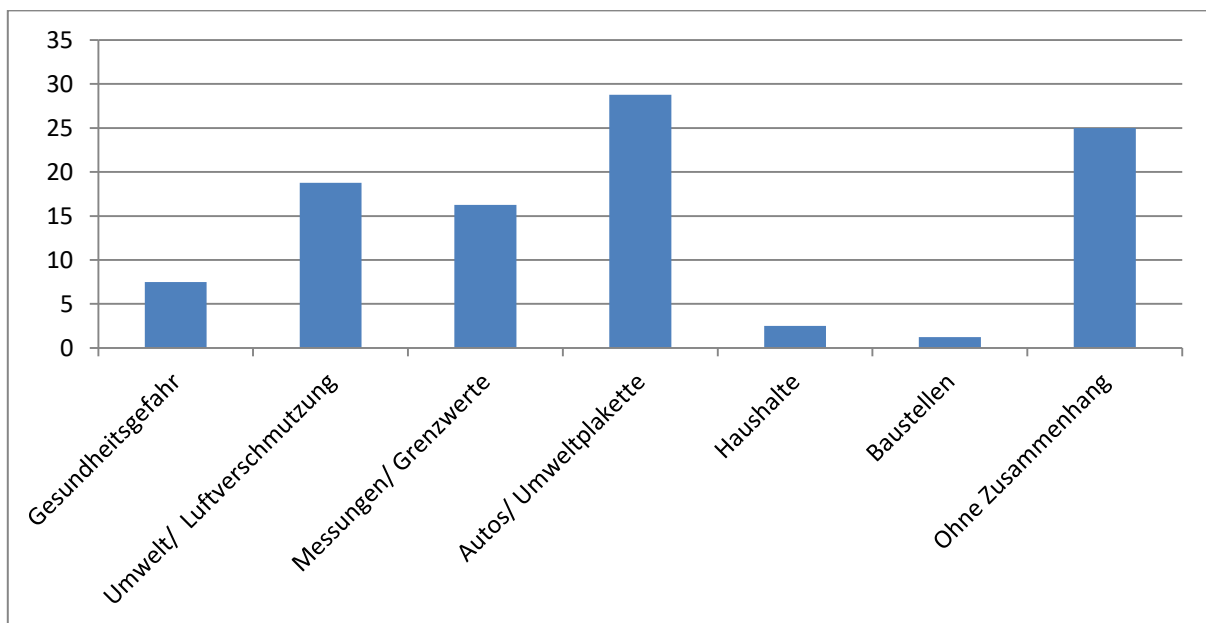
**Abbildung 72. Ergebnisse für Frage 6 (n=80)**

Die daran anschließende weitere Wissens zum Thema Feinstaub, Frage 7.1 (Haben Sie schon einmal von Feinstaub gehört ?), beantwortete der deutlich überwiegende Teil der Befragten mit 91,25 %, mit Ja (Abb. 73).



**Abbildung 73. Ergebnisse der Frage 7.1 (n=80)**

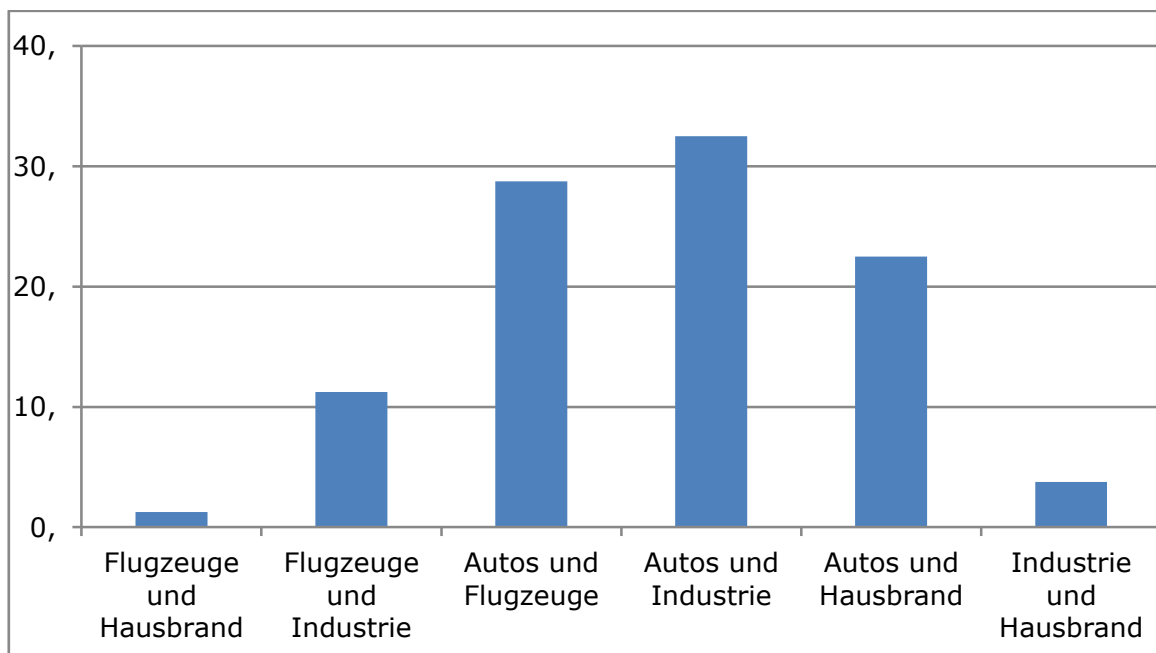
Im zweite Teil dieser Frage 7. 2 (Wenn Ja – in welchem Zusammenhang haben Sie davon gehört...?), waren die häufigsten Antworten mit 28,75 %, im Zusammenhang mit Autos und Umweltplakette, zu 18,75 % im Zusammenhang mit Umwelt- und Luftverschmutzung, sowie zu 16,25 % im Zusammenhang mit Messungen/Grenzwerte“ (Abb. 74).



**Abbildung 74. Ergebnisse für Frage 7.2 (n=80)**



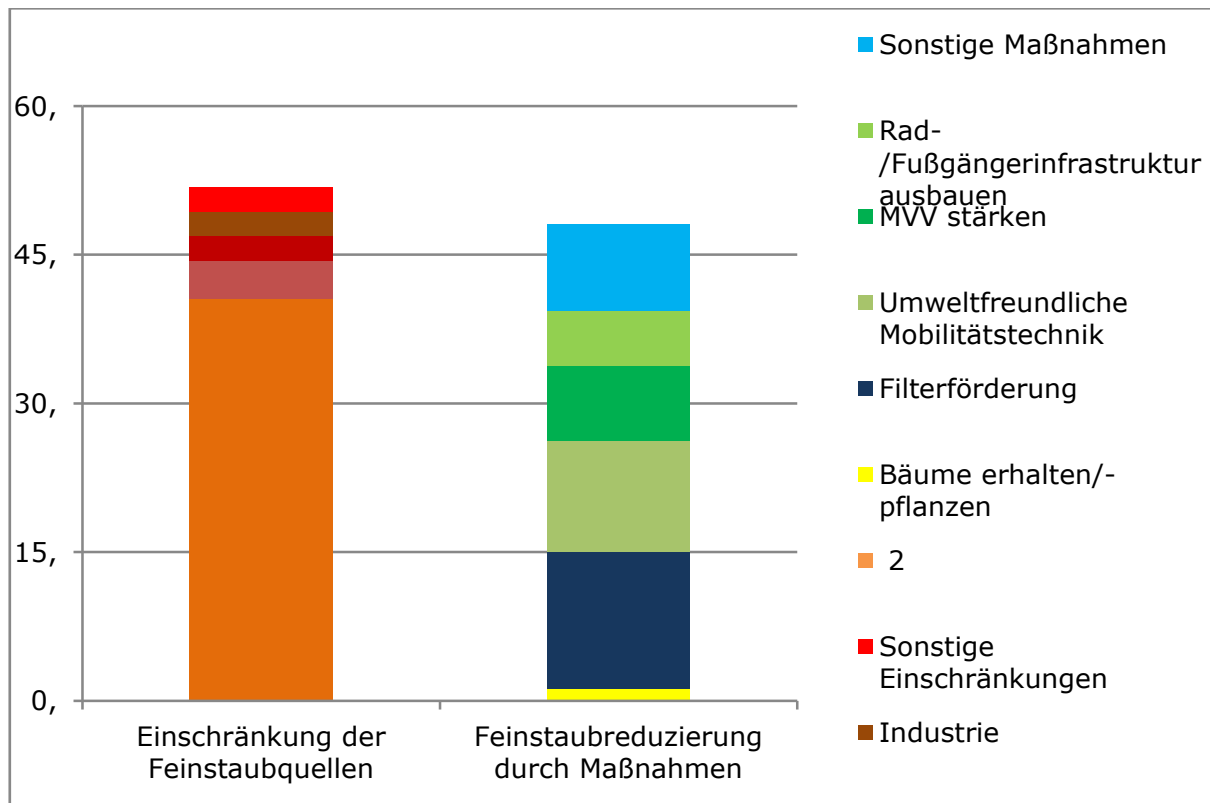
Die letzte Wissensfrage stellte Frage 8 (Was sind Ihrer Meinung nach die größten zwei Feinstaubquellen in München ?), dar. Als die größte Feinstaubquelle in München, wurde, überwiegend das Auto genannt. So antworteten 32,5 % mit Autos und Industrie, 28,75 % mit Autos und Flugzeuge-, sowie 22,5 % mit Autos und Hausbrand (Abb. 75).



**Abbildung 75. Ergebnisse für Frage 8 (n=80)**

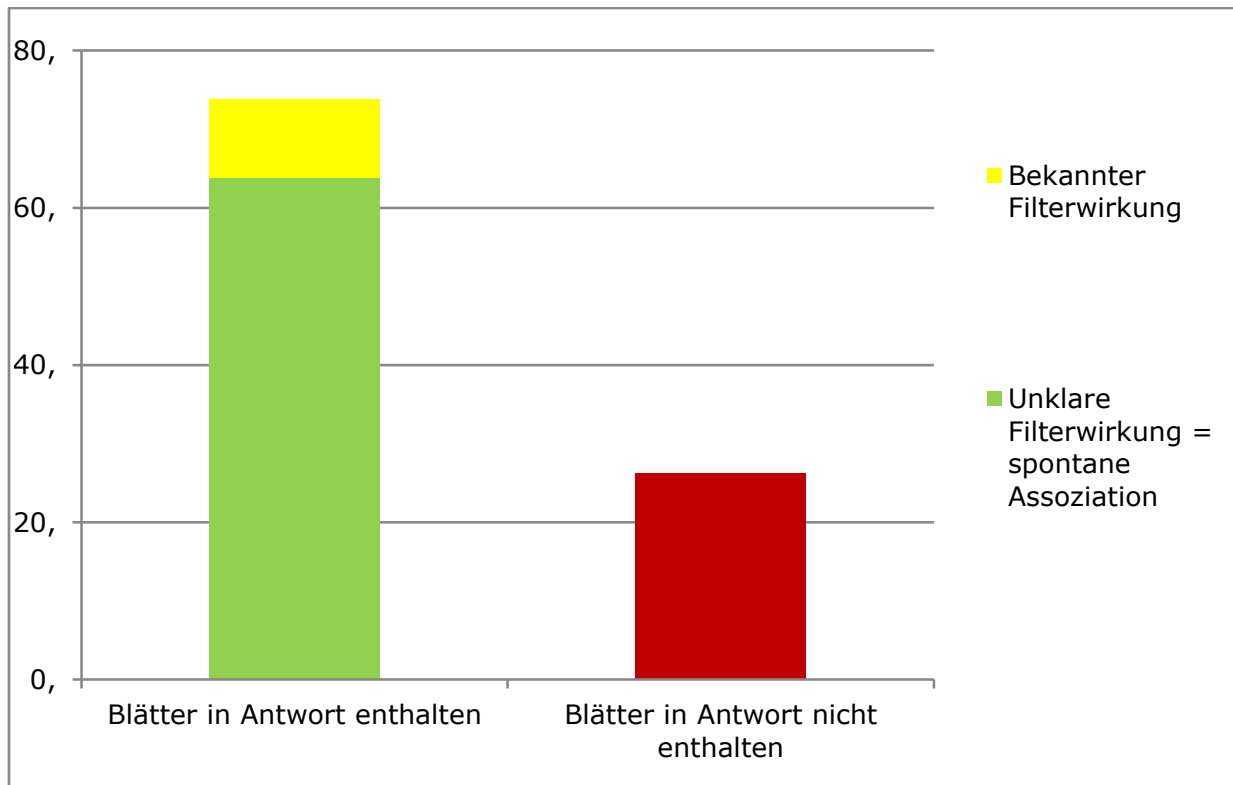
Mit Frage 9 (Der Feinstaubgehalt im Stadtinneren kann gesenkt werden, indem...?), kam nun die erste für die Zielfrage des Fragebogens besonders bedeutsame Frage auf. Die Münchner Bürgerinnen und Bürger bezogen sich in ihren Antworten zum einen auf die Einschränkung von Feinstaubquellen (knapp über 50 %) und zum anderen auf Maßnahmen, mit deren Hilfe die Feinstaubkonzentration reduziert werden könnte (etwas unter 50 %). Sowohl der Großteil der Einschränkungen, als auch der Maßnahmen beziehen sich hierbei auf den Automobil Sektor. Über 40 % sprechen sich so für eine Reduktion des PKW Verkehrs in der Stadt aus, während sich bei den Maßnahmen, 13,75 % eine Förderung von Filtern und 11,25 %, eine umweltfreundliche Mobilitätstechnik wie zum Beispiel Elektroautos, wünschen. Weiter erwähnen 7,5 % die Stärkung des öffentlichen Nahverkehrs (MVG).

Jedoch nur 1,25 % der Befragten würden für eine Reduktion des Feinstaubgehaltes Bäume erhalten oder neu pflanzen (Abb. 76).



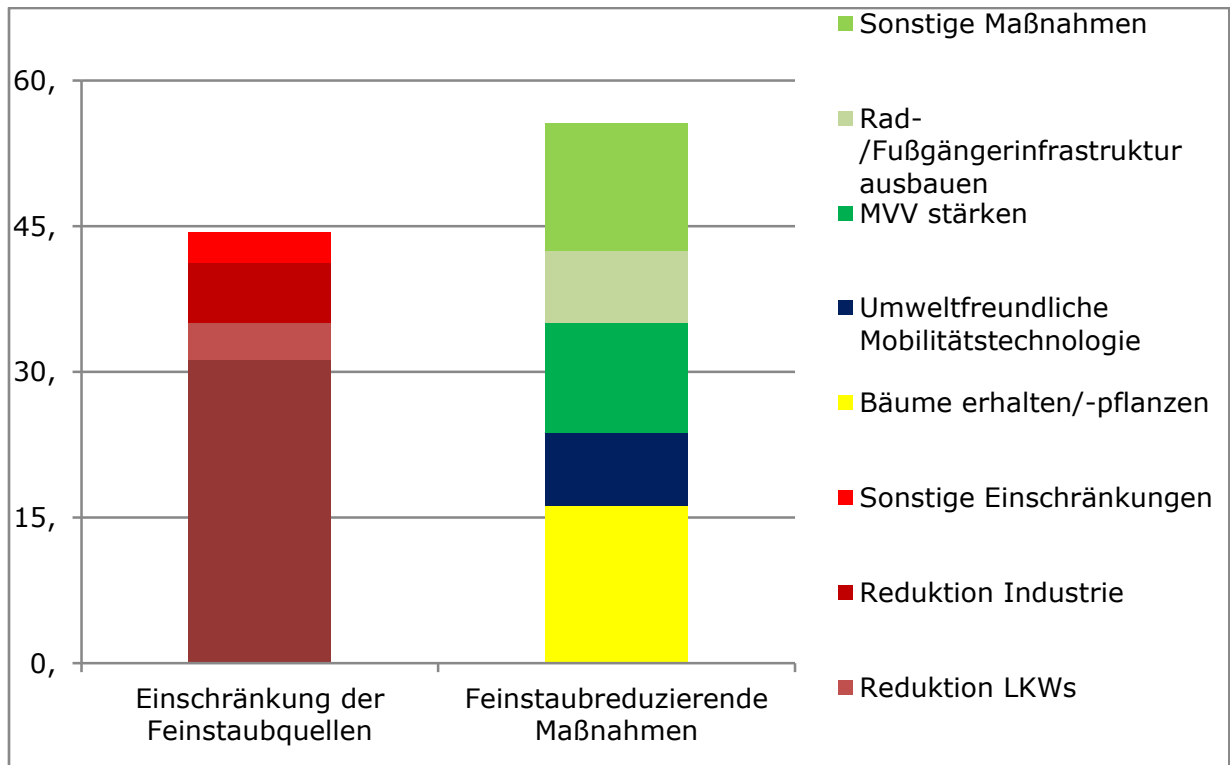
**Abbildung 76. Ergebnisse der Frage 9 (n=80)**

Eine weitere Frage, die genau den Kern der Zielfrage dieses Fragebogens trifft, ist Frage 10 (Was meinen Sie trägt effektiv zur Reduktion von Feinstaub in Städten bei...?). Hierbei wurden den Befragten folgende Begriffe in Bildern gezeigt: a) Gewässer, b) Straßenreinigung, c) Blätter, d) Rußpartikelfilter. Hierbei konnten die Befragten die ihrer Meinung nach effektivsten Optionen auswählen. Die Ergebnisse zeigen, dass über 70 % der Antworten Blätter als für die Reduktion des Feinstaubes effektiv ansehen. 26,25 % der Befragten hingegen nennen in ihrer Antwort nicht die Option Blätter. Hierbei ist jedoch zu erkennen, dass innerhalb der Antworten mit Blättern nur lediglich 10 % der Befragten, der Prozess des Filtermechanismus bekannt ist. 63,75 % der Befragten hingegen nennen die Option Blätter aufgrund einer spontanen Assoziation (Abb. 77).



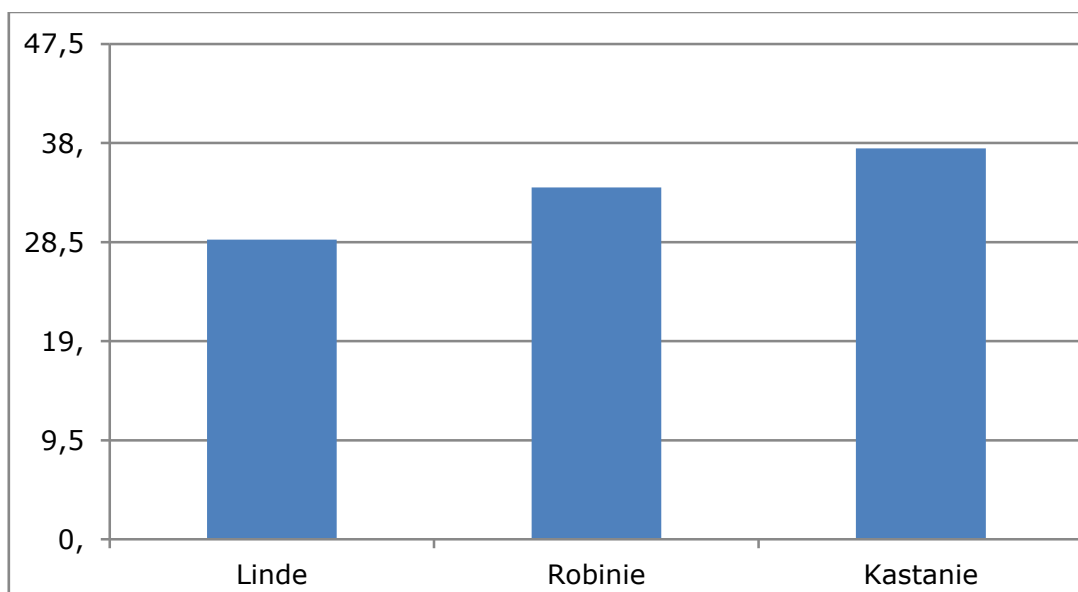
**Abbildung 77. Ergebnisse für Frage 10 (n=80)**

Auch Frage 11 (Wenn sie Bürgermeister(in) wären, was würden Sie tun, um die Luftqualität in München zu beeinflussen...?), ist eine weitere, in besonderer Weise wichtige Frage, für den Fragebogen. Die Art der Antworten entspricht hierbei der von Frage 9. Jedoch sind die Häufigkeitsverteilungen anders verteilt. Bleibt zwar im Vergleich zu Frage 9, die hohe Anzahl der Antworten im Bereich Einschränkung des Automobil Sektors (über 30 %) erhalten, so geben nun 16,25 % an, in der Rolle des Bürgermeisters, Bäume, als Feinstaubreduzierende Maßnahme pflanzen- und anzupflanzen zu wollen. Dies ist ein deutlich höherer Prozentsatz als in Frage 9 (Abb. 78).



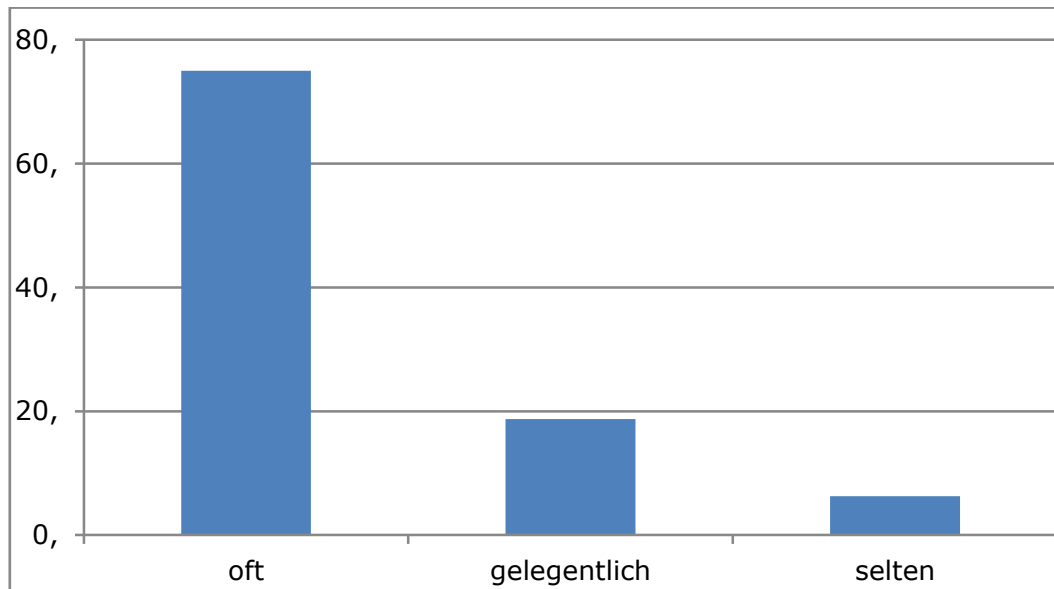
**Abbildung 78. Ergebnisse für Frage 11 (n=80)**

Die Befragten sprechen sich in Frage 12 (Welcher Baumart trauen Sie die größte Feinstaubfilterleistung zu?), mit 37,5 % am meisten für Kastanie aus, während die Robinie mit 33,75 % den zweiten Rang erhält und die Baumart Linde mit 28,75 % schließlich den dritten- (Abb. 79).



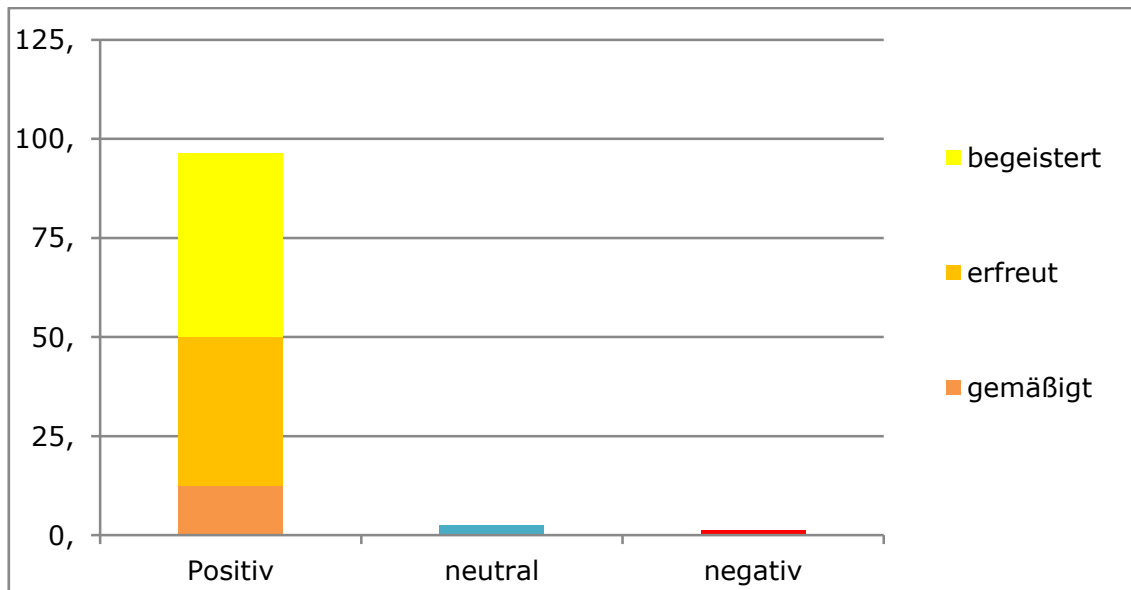
**Abbildung 79. Ergebnisse für Frage 12 (n=80)**

Weiter geben in Frage 13 (Wie häufig suchen Sie eine Grünfläche mit Bäumen in der Stadt auf ?), 75 % der Befragten an, eine Grünfläche mit Bäumen oft-, 18,75 % gelegentlich- und 6,25 % selten zu besuchen (Abb. 80).



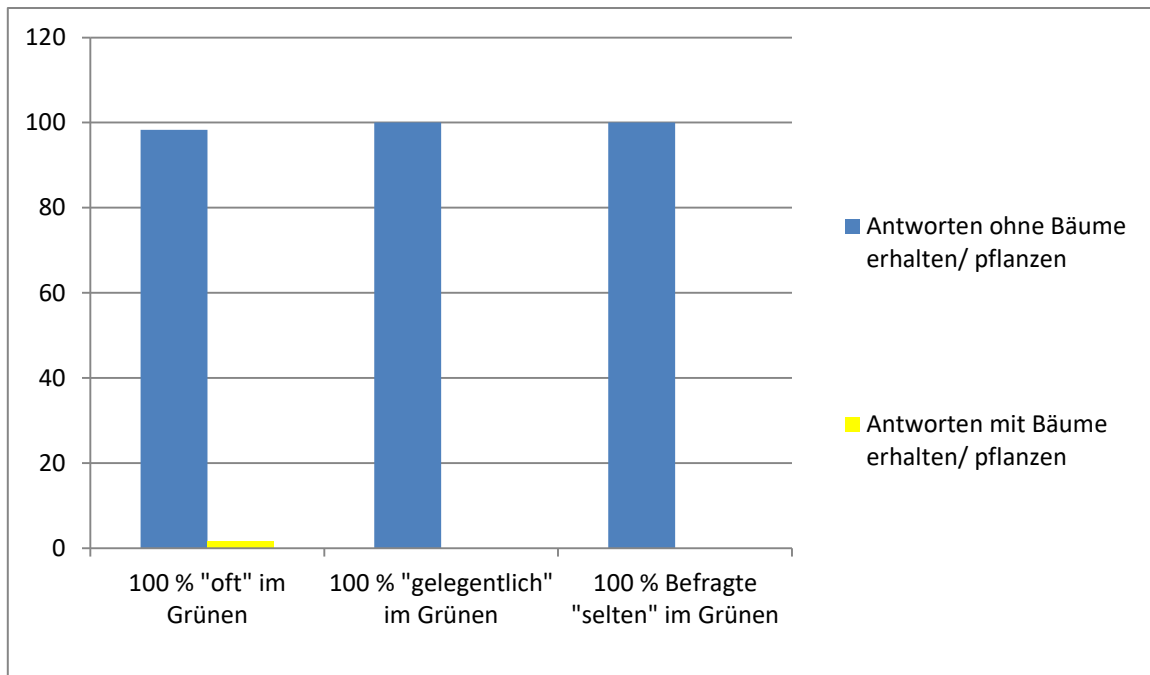
**Abbildung 80. Ergebnisse für Frage 13 (n=80)**

In der letzten Frage des Fragebogens, in Frage 14 (Wenn Sie einen Baum in der Stadt sehen empfinden Sie es als...?), gibt der größte Teil der Befragten, mit 96,25 % an, Bäume in der Stadt, als positiv zu empfinden. Hierbei sind sogar 46,25 % der Befragten, in ihrer Antwort regelrecht begeistert, und 37,5 % erfreut über Bäume in der Stadt (Abb. 81).



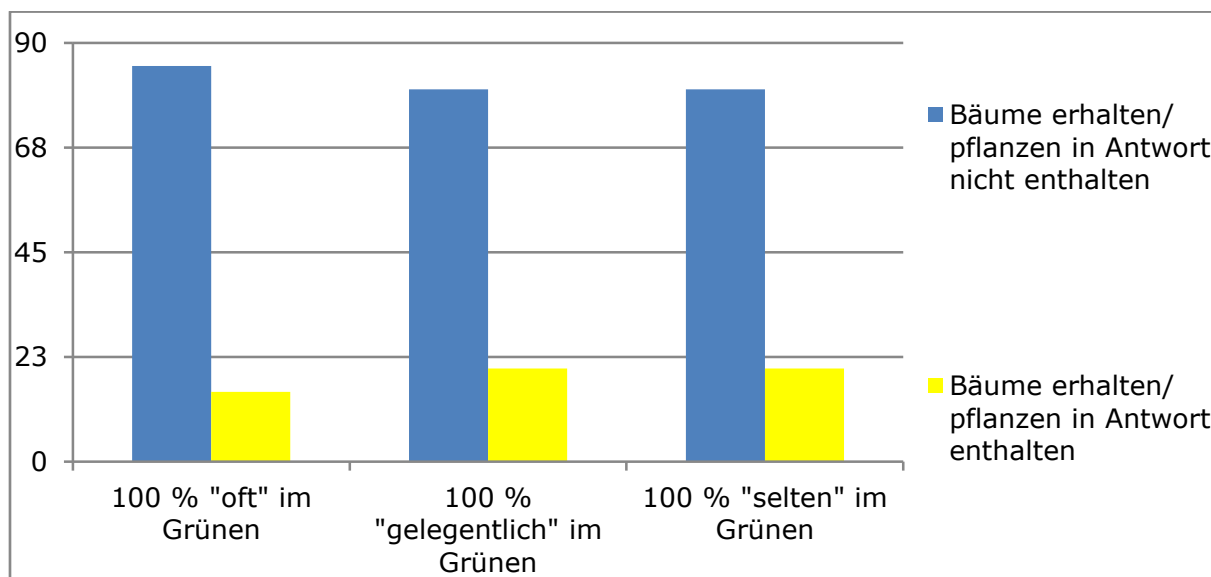
**Abbildung 81. Ergebnisse für Frage 14. (n=80)**

Für die Untersuchung von Hypothese (2) wurden die nun folgenden Fragen, unter Berücksichtigung der Angaben, in Frage 13, betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Befragten (1,25 %), die in Frage 9, einen Zusammenhang zwischen Stadtbäumen und Feinstaubreduktion herstellen konnten, in Frage 13 angaben, in der Stadt oft Grünflächen mit Bäumen aufzusuchen (Abb. 82).



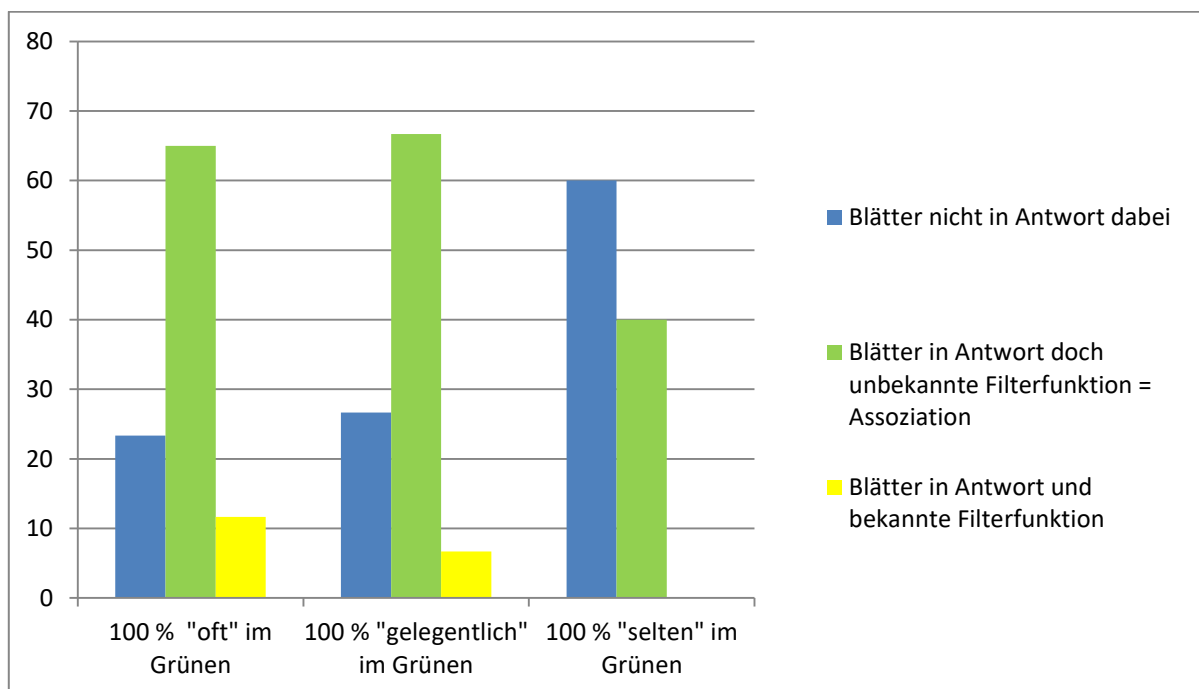
**Abbildung 82. Ergebnisse für Frage 9 unter der Berücksichtigung der Angaben in Frage 9 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5)**

Demgegenüber zeigt Frage 11 diesen Zusammenhang nicht auf, so ist Abbildung 83 zu entnehmen, dass das Gegenteil der Fall ist.



**Abbildung 83. Ergebnisse für Frage 11 unter Berücksichtigung der Angaben in Frage 13 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5)**

Im Anschluss hieran stellt die gleiche Betrachtung für die Ergebnisse von Frage 10 jedoch erneut fest, dass Befragte die oft oder gelegentlich städtisches Grün aufsuchen, vermehrt den Zusammenhang zwischen Feinstaubreduktion und Stadtbäumen herstellen können, als dies für Befragte der Fall ist, die nur selten eine Grünfläche aufsuchen. Weiter ist den Befragten die oft im Grünen sind, der Filtermechanismus zu 11,7 % bekannt, während er zu 0 % den Befragten, die selten im Grünen sind bekannt- und zu 6,7 % denjenigen geläufig ist, die gelegentlich im Grünen sind (Abb. 84).



**Abbildung 84. Ergebnisse für Frage 10 unter Berücksichtigung der Angaben in Frage 13 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5)**

Neben dem Zusammenhang zwischen der Aufenthaltshäufigkeit im Grünen und den getätigten Antworten wurde weiter noch ein Zusammenhang zwischen dem Alter sowie dem Geschlecht der Befragten und ihren Antworten untersucht. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht extra grafisch dargestellt.

Hierbei wurde zwischen Alter und dem Bewusstsein des Filtereffektes von Bäumen kein klarer Zusammenhang ersichtlich, jedoch konnte bei der Betrachtung der Geschlechter



ein leichter Trend beobachtet werden, dass weibliche Befragte vermehrt einen Zusammenhang zwischen Bäumen und Feinstaubreduktion herstellen konnten.

## 4. Diskussion

Für die Diskussion der zuvor präsentierten Ergebnisse sind einige Aspekte zuerst kritisch anzumerken. So ist die Datenerhebung durch die Tatsache gehemmt, dass für die einzelnen Fragen nur jeweils die erste der gegebenen Antworten (in Frage 9 und 11 waren es die zwei ersten) für die Auswertung Verwendung finden konnte. Viele der konstruktiven und interessanten Beiträge der befragten Bürgerinnen und Bürger konnten dadurch leider nicht in die Ergebnispräsentation aufgenommen werden, was einen Informationsverlust darstellt.

Die Ergebnisse des ersten Frageabschnittes über die subjektive Einschätzung der einzelnen Befragten zum Thema Luftqualität, sowie die Bedeutung, die die Befragten dem Thema Luft zusprechen, zeigen, dass die Luftqualität, ein sehr wichtiges Thema für die Münchner Bürgerinnen und Bürgern ist (Frage 2). Weiter ist aus diesem ersten Abschnitt ersichtlich, dass ein Großteil der Befragten die Luftqualität als nicht besonders schlecht und eher positiv empfindet (Abb. 67). Hierbei beläuft sich die Durchschnittsnote sogar auf 2,75 (Abb. 71). Während die Befragten, Orte innerhalb der Stadt als Gebiete mit besonders schlechter Luft ansehen und hierbei, besonders Straßen, als am meisten verschmutzt wahrnehmen, schätzen die Befragten Orte außerhalb der Stadt und speziell Grüninseln in der Stadt, als von der Luftqualität her am saubersten ein (Abb. 69). Dies lässt ein erstes Anzeichen davon geben, dass die Bevölkerung unbewusst oder zum Teil auch bewusst die Natur, Grünflächen, Wälder, Parks und damit auch Bäume, als ein Luftreinigendes Moment, im Gegensatz zur „verschmutzten Stadt“, erkennen, und somit den zu untersuchenden Zusammenhang indirekt herstellen können.

Die anschließenden Wissensfragen, lassen insgesamt das Bild aufkommen, dass es große Wissensunterschiede, innerhalb der Bevölkerung, über das Thema Feinstaub gibt. Während manchen Mitbürgern und Mitbürgerinnen das Stichwort Feinstaub völlig fremd ist, zeigen andere ein bereits sehr fundiertes und sicheres Wissen in diesem

Bereich auf. Diese Unterschiede könnten unter anderem auch dadurch bedingt sein dass mit dem Wechsel der verschiedenen Befragungsorte ein ständiger Wechsel des „Befragungsklientels“ einherging.

Zudem zeigen die weiteren Wissensfragen, dass den Befragten das Thema Feinstaub zum größten Teil durch die Umweltplakette, die Umweltzone, sowie durch Grenzwerte und Messungen, bekannt ist. Dies spiegelt sich auch in der Beurteilung der größten Feinstaubquellen in München wieder, wobei die meisten Befragten (richtig) Autos, zu den größten Feinstaubquellen zählen (Abb. 75). Diese Ergebnisse sind mit großer Sicherheit auf die, Ende 2008, in München durchgesetzte Umweltzone, und die ständigen Messungen zur Einhaltung der EU Richtlinien, an den Messstationen der Stadt, zurückzuführen, welche auch in den Medien entsprechend kommuniziert wurden.

Die, für die Kernfrage des Fragebogens besonders wichtigen Fragen 9 bis 11, beantworten die Befragten unterschiedlich. Während in Frage 9 nur 1,25 % damit antworten, Bäume für die Senkung des Feinstaubgehalts, erhalten oder neu pflanzen zu wollen, sprechen sich in Frage 11 bereits 16,25 % für eine derartige Meinung aus. Diese Diskrepanz könnte damit erklärt werden, dass zwischen den beiden Fragen 9 und 11, in Frage 10 (Was meinen Sie trägt effektiv zur Reduktion von Feinstaub in Städten bei...?), verschiedene Bilder gezeigt wurden, unter denen auch ein Bild mit Blättern, abgebildet war. Dieses Bild, mit Blättern in den Hinterköpfen vieler Befragter, könnte in Frage 11 dazu geführt haben, dass deutlich mehr Befragte, als in Frage 9, in ihrer Antwort Bäume und Blätter einbringen.

Frage 10 selbst, ist die Schlüsselfrage der Befragung, in welcher den Befragten, ohne es zu sehr aufzudrängen, eine Option geöffnet wird, dass Bäume einen Einfluss auf die Feinstaubreduktion in Städten haben könnten. Hierbei ist die Reihenfolge der Reduktionsauswirkung der einzelnen Antwortmöglichkeit unwichtig, wichtig bei dieser Frage ist vielmehr ob die Befragten sich überhaupt einen Zusammenhang, zwischen Bäumen und Feinstaub vorstellen können oder nicht. Das Ergebnis dieser Frage zeigt, dass in der Tat viele der Befragten wirklich sofort eine Verbindung zwischen Stadtbäumen und der Feinstaubreduktion herstellen. Hieraus wird jedoch nicht klar, ob diese Antwort eine intuitive Assoziation war, oder ob die Befragten eine konkrete Idee und Vorstellung dahinter hatten. Doch die darauf folgende Frage (Sie haben gerade Blätter als Reduktionsoption angegeben, dürften wir weiter nachfragen, wie stellen sie

sich dies genau vor ?), bringt diesbezüglich Klarheit. Es zeigt sich, dass die meisten Befragten auf diese Frage in der Weise antworten, dass sie die bereits getätigte Aussage zurücknehmen und anfügen, die Filterwirkung sei ja nur für CO<sub>2</sub> zutreffend. So ergibt sich, dass nur 10 % der Befragten, der Filtermechanismus wirklich bekannt ist, während 63,75 % der Befragten der Mechanismus letztendlich nicht bekannt ist, und daraus gefolgert werden kann, dass diese 63,75 % der Befragten aus einer spontanen Assoziation heraus den Zusammenhang - richtig - herstellten.

Somit lässt sich die Zielfrage der Untersuchung, entgegen Hypothese (1) beantworten, indem festgestellt werden kann, dass die meisten Bürgerinnen und Bürger einen Zusammenhang zwischen Feinstaubreduktion und der Präsenz von Stadtbäumen herstellen können, auch wenn der Mechanismus der Filterung den Bürgerinnen und Bürgern meist nicht bekannt ist und größtenteils auf einem richtigen Bauchgefühl beruht.

Die an diesen Kern des Fragebogens anschließenden Fragen, beschäftigen sich zum einen damit, eine Baumart mit besonders effektiver Filterleistung auszuwählen. Hierbei wählen die meisten Befragten die Kastanie, die durch ihre großen und einheitlichen Blätter, in der Filterleistung, erst nach Robinie und nach Linde, einzuordnen ist. Dieses Ergebnis ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Befragten die Kastanie, durch ihre breiten Blätter, als besonders effektiv, einordneten.

Zum anderen beantworten diese sich anschließenden Fragen jedoch auch Hypothese (3), indem in diesem letzten Abschnitt des Bogens, festgestellt werden kann, dass die Befragten, Bäume im Stadtinneren als sehr positiv wahrnehmen und oft Grünflächen, mit Bäumen in der Stadt, aufsuchen (Abb. 80, 81). Dieses Bild, der positiven Wahrnehmung von Grünflächen, im städtischen Raum, zeichnet sich auch in anderen veröffentlichten Studien zum Thema Waldwahrnehmung ab. So stellt Suda et al., in einer 2010, in Berlin durchgeführte Studie fest, dass über 65 % der befragten Passanten, eine positive Assoziation zum Thema Wald und Grünflächen im Umkreis und innerhalb der Stadt haben. Weiter macht die Studie deutlich, dass es vor allem die gute Luft in der Umgebung dieser grünen Plätze ist, die die städtische Bevölkerung an diesen Orten am meisten schätzt (Suda et al., 2010). Weiter stellt eine, im Rahmen eines Bachelorprojektes am Lehrstuhl für Forst und Umweltpolitik der TU München, durchgeführte Studie, zum Thema Waldwahrnehmung in der Stadt Freising, fest, dass

bei 160 Befragten, 17,5 % der Teilnehmer, angeben Freising ohne seine Grünflächen und Bäume in-, und im Umkreis der Stadt, zu verlassen und in eine andere Stadt zu ziehen (unveröffentlicht).

Für die Untersuchung von Hypothese (2) lässt sich durch eine weitere Betrachtung, der Fragen (Abb. Frage 9 und 10) feststellen, dass tatsächlich ein leichter Trend zwischen der Aufenthaltshäufigkeit im Grünen und der Herleitung eines Zusammenhangs zwischen Feinstaubreduktion und Stadtbäumen, besteht. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass für die Betrachtung dieser Hypothese, keine Gleichverteilung gegeben war, da 75 % der Befragten angaben, oft im Grünen zu sein, wohingegen 18,75 % gelegentlich- und nur 6,25 % selten angaben. Die Untersuchung dieser Hypothese könnte auch dadurch beeinflusst sein, dass in Frage 13 (Wie oft suchen sie eine Grünfläche auf...?), viele Befragte mehr ihren Wünschen-, als der Realität nach, antworteten und somit, auch Personen die nur gelegentlich oder selten eine Grünfläche mit Bäumen in der Stadt aufsuchen, zu den Antworten derer gezählt wurde, die sich häufig im Grünen aufhalten.

## 5. Zusammenfassung

Die Untersuchung stellt eine sozial-empirische Befragung von 80 Münchner Bürgerinnen und Bürgern, in einer Quotenstichprobe (Gleichverteilung der Geschlechter und Altersgruppen), mit der Zielfrage: „Wissen Münchner Bürgerinnen und Bürger um die positive Wirkung von Stadtbäumen, auf den Feinstaubgehalt in der Luft ihrer Stadt?“, dar.

Um die Daten für eine Ergebnispräsentation verwenden zu können, musste der Datensatz auf die wesentlichsten Kernaussagen heruntergebrochen werden. Diese Kernaussagen sind, dass ein Großteil der Münchner Bürgerinnen und Bürger, einen Zusammenhang zwischen der Reduktion von Feinstaub und Stadtbäumen herstellen kann, dieser Zusammenhang jedoch nicht auf einem genauen Wissen über den Filtermechanismus, als viel mehr, auf einer Assoziation und spontanen Einschätzung der befragten Personen, beruht.

Aus diesem Grund muss die einleitende Hypothese (1), dass die meisten Bürgerinnen und Bürger keinen Zusammenhang zwischen Reduktion des Feinstaubgehaltes und

Stadtbäumen, herstellen können, abgelehnt werden. Hypothese (2), dass die Bürger und Bürgerinnen, die sich oft im Grünen aufhalten, vermehrt einen Zusammenhang zwischen Feinstaubreduktion und Stadtbäumen herstellen können, kann hingegen durch einen leichten Trend dieses Zusammenhangs, bestätigt werden. Schließlich kann Hypothese (3), dass die Bevölkerung Bäume in der Stadt als sehr positiv wahrnimmt auf eine besonders eindrückliche Weise bestätigt werden. Hiermit liegt dieses Ergebnis in Übereinstimmung mit bereits veröffentlichten Studien zu diesem Thema.

# C Schluss

Um nun im Folgenden die Bachelorarbeit abzuschließen, sei erneut die einleitende Fragestellung, ob Stadtbäume eine Auswirkung auf den Feinstaubgehalt in Städten haben, aufgegriffen.

Die in Kapitel I dargelegten Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche dienen der allgemeinen Beantwortung dieser Frage. Diese zentrale Einleitungsfrage kann mit der Feststellung beantwortet werden, dass Stadtbäume eine positive Auswirkung auf den Feinstaubgehalt in Städten haben.

So reduzieren Stadtbäume und städtisches Grün, im Allgemeinen den Feinstaubgehalt der Stadt Luft, sodass generell ein Filtereffekt von Stadtbäumen gegeben ist. Dieser Filtereffekt hängt hierbei in seiner Stärke von der jeweiligen Baumart und Pflanzanordnung, sowie von den jeweiligen Umgebungsbedingungen, wie dem lokalen Klima und der Architektur, des betrachteten städtischen Standortes ab.

Weiter konnte in Kapitel II der Bachelorarbeit, die Frage, ob sich die Auswirkung von Stadtbäumen auf den Feinstaubkonzentration in München auch quantitativ durch Messungen erfassbar machen lässt, mit Ja beantwortet werden.

Die Ergebnisse in Kapitel II zeigen, dass die, in der Literatur bislang noch nicht sehr häufig durchgeführte konzentrationsbasierten Messmethode, einen Zusammenhang zwischen Stadtbäumen und der Feinstaubkonzentration, in Form eines Filtereffektes von bis zu 20 % erkennen lässt.

Schließlich fließt in Kapitel III, durch die Darstellung einer Befragung von Münchner Bürgerinnen und Bürgern, neben den naturwissenschaftlichen Ergebnissen aus Literaturrecherche und Messreihe, auch noch eine sozial-empirische Sichtweise auf das Thema, in die Arbeit mit ein. Die hierbei interessante Frage, ob die Feinstaubfilterwirkung durch Bäume, den Münchner Bürgerinnen und Bürgern bekannt ist, lässt sich mit Nein beantworten. So ergibt die Befragung, dass dem Großteil der Befragten der Filtereffekt von Stadtbäumen bezüglich Feinstaub in seinem Mechanismus nicht bekannt ist, die Bürgerinnen und Bürger jedoch Stadtbäume stets mit einer

Verbesserung der Luftqualität in Verbindung bringen, weshalb die meisten Befragten den Filtereffekt vermuten. Darüber hinaus macht die Befragung deutlich wie sehr Münchner Bürgerinnen und Bürgern Stadtbäume schätzen.

Die vorliegende Bachelorarbeit möchte somit, in Übereinstimmung mit einer Vielzahl von Autoren der wissenschaftlichen Fachliteratur, sowie auch im Einklang mit der Ansicht der Bürgerinnen und Bürger Münchens, die Pflanzung von Bäumen und die Begrünung des Stadtinneren von München, den verantwortlichen Politikern, der Stadtverwaltung, sowie den Stadtplanern, ans Herz legen. Die in der Literaturrecherche zusammengefassten, bereits aus anderen Veröffentlichungen vorhandenen Erkenntnisse, können hierbei ein Anhaltspunkt bei der Baumartenwahl und der Gestaltung dieser Grünflächen sein.

Abschließend ist festzustellen, dass Bäume und städtische Grünflächen, einen gewissen Beitrag zur Feinstaubreduktion leisten-, jedoch nicht das vorhandene Problem der hohen Feinstaubkonzentrationen in Großstädten wie München lösen können. Aus diesem Grund ist es die Aufgabe, Verantwortung und Pflicht der lokalen Politik, den Ausstoß und die Quellen von Feinstäuben, im Interesse der Gesellschaft zu reduzieren.

# Literaturverzeichnis

Al-Dabbous, A.N.; Kumar, P.; 2014; "The influence of roadside vegetation barriers on airborne nanoparticles and pedestrians exposure under varying wind conditions"; in: Atmospheric Environment; Band: 90; S. 113 - 124

Anderson, H.R.; Bremner, S.A.; Atkinson, R.W.; Harrison, R.M; Walter, S.; 2001; "Particulate matter and daily mortality and hospital admissions in the west midlands conurbation of the United Kingdom: associations with fine and coarse particles, black smoke and sulphate"; in: Occupational and Environmental Medicine; Band: 58; S. 504 - 510

Alliance for Community trees; 2016; "About us"; URL: <http://actrees.org/about-us/> am: 23.06.2016

Babaoglu Aydas, S.S.; Acik, L.; Leduc, D.; Adigüzeil, N.; Ellialtioglu, S.S.; Suludere, Z.; Kadioglu, Y.K.; 2013; "Localization and distribution of nickel and other elements in in-vitro grown *Alyssum corsicum* exhibiting morphological changes in trichomes: initial insights into molecular mechanisms of nickel hyperaccumulation"; in: Turkish Journal of Botany, Band: 37, S. 1115 - 1124

Bache, D.H.; 1979; „Particulate Transport within plant canopies – II, prediction of deposition velocities”; in: Journal of Atmospheric Environment; Band: 13; S. 1681 - 1687

Badrulla, A.; Halik, U.; Aishan, T.; Ubul, A.; Zhayimu, K. and Hua, J.; 2014; "Patterns of dust retention by five common tree species for urban greening in Aksu City, Northwest China[J]"; in: CJPE, Band: 38; Heft: 9; S. 970-977.

Bartfelder, F., Köhler, M., 1987, Experimentelle Untersuchungen zur Funktion von Fassadenbegrünungen. Förderungsprogramm der Freien Universität Berlin für junge Wissenschaftler 3. Ausschreibung.

Baldauf, R.; Thoma, E.; Khlystov, A.; Isakov, V.; Bowker, G.; Long, T.; Snow, R.; 2008; "Impacts of noise barriers on near-road air quality"; in: Atmospheric Environment; Band: 42; S. 7502-7507

Baldocchi, D.D.; Hicks, B.B.; Camara, P.; 1987; "A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces"; in: Atmospheric Environment; Band: 21, S. 91-101.

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit; 2010; „Feinstaub“; in: Daten+Fakten+Ziele; Abbildung S. 3

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), 2015, "Langfristige Entwicklung der Schadstoffbelastung an den bayerischen LÜB-Messstationen Langzeitverläufe für PM 2,5", Herausgeber: LfU, S. 1-4



Beckett, K. P.; Freer-Smith, P. H.; Taylor, G.; 1998; "Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution"; in: Environmental Pollution (99); S. 347-360

Beckett, K.P.; Free-Smith, P.; Taylor, G.; 2000a); "Effective tree species for local air quality management"; in: Journal of Arboriculture 26/1; S. 12 - 19

Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor G.; 2000b); "Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and wind speed"; in: Global Change Biology 6; S. 995 - 1103

Belot, Y.; Camus, H.; Gauthier, D.; Caput, C.; 1994; "Uptake of small particles by tree canopies"; in: Total Environment; Band: 157; S. 1 - 6

Blanusa, T.; Fantozzi, F.; Monaci, F.; Bargagli, R.; 2015; " Leaf trapping and retention of particles by hol oak and othercommon tree species in Mediterranean urban environments"; in: Urban forestry and urban greening; Band: 14; S. 1095- 1101

Bleyl, M.R.; 2002; „Experimentelle Bestimmung der Depositionsgeschwindigkeit luftgetragener Partikel mit Hilfe der Eddy - Kovarianzmethode über einem Fichtenbestand im Solling“; Georg-August-Universität zu Göttingen; S. 1- 149

Bouble, R.W.; Fox, D.L.; Turner, D.B.; Stern, A.C.; 1994; "Fundamentals of Air Pollution"; in: Academic Press; San Diego

Brakke, T.W.; William, P.; Erbe, W.; Erbe, E.F.; Harnden, J.M.; 1993 ;"Seasonal Variation in the Structure and Red Reflectance of Leaves from Yellow Poplar, Red Oak, and Red Maple"; in: Remote Sensing of Environment, Band: 43, Heft: 2, S.: 115 - 130

Brantley, H.L., Hagler, G.S.W., Deshmukh, P.J., Baldauf, R.W., 2014; "Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter"; in: Sci. Total Environment, Band: 468, S. 120 - 129.

Breuer, L.; Frede H-, 2003; "PlaPaDa - an online plant parameter data drill for eco-hydrological modelling approaches";

URL: <http://www.staff.uni-giessen.de/~gh1461/plapada/lai/lai.html>; am: 20.3.2016

Broadmeadow, M.; Beckett, K.P.; Jackson, S.; Freer-Smith, P.; Taylor, G.; 1998; " Trees and pollution abatement"; S. 39-43; in: Forest Research Annual Report and Accounts; HMSO, London; England

Bruckmann P. et all.; 2010; „Vorkommen von Feinstäuben und die Maßstäbe ihrer Bewertung“, in: Statuspapier Feinstaub, Seite: 12

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Österreich (BLFUW); 2014; „Feinstaub“; in: Ministerium für ein lebenswertes Österreich; URL: <http://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/luft-laerm-verkehr/luft/immissionsschutz/Feinstaub.html> (6. November 2015)

Bunzl, K.; Schimmack, W.; Kreutzer, K.; Schierl, R.; 1989; "Interception and retention of Chernobyl-derived <sup>134</sup>, <sup>137</sup>- Cs and <sup>100</sup>- Ru in a spruce stand"; in: The Science of the Total Environment; Band: 78; S. 77 - 87

Burkhardt, J.; Peters, K.; Crossley, A.; 1995; "The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles"; in: Journal of Experimental Botany; Band: 46; No. 288; S.: 823-831

Chamberlain, A.C.; 1975; „The movement of particles in plant communities“; in: Monteith, J.L. (Herausgeber); Vegetation and the Atmosphere; Vol. 1. Academic Press; London; Seiten: 155 – 203

Chamberlain A.C.; Little. P.; 1981; "Transport and capture of particles by vegetation"; S. 147 – 174; in: The 21<sup>st</sup> Symposium of the British Ecological Society; "Plants and their atmospheric environment"; Blackwell scientific publications; Edinburgh

Chen, X.; Pei, T.; Zhou, Z.; Teng, M.; He, L.; Luo, M.; Liu, X.; 2016; "Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM<sub>10</sub>): A street scale investigation in Wuhan, China"; in: Urban forestry and urban greening; Band: 14; Heft: 2; S. 354-360

Dockery, Pope, A. C. Xu, X.P.; Spengler, J.D.; Ware, J.H.; Fay, M.; Ferris, B.; Speizer, E.; 1993; "an association between air pollution and mortality in six US cities; in: New England Journal of Medicine; Band: 329; S. 1753 – 1759

Donate, J.; Bruck, B.; 1999; "Simulated ground deposition of fine airborne particles in array of idealized tree crowns"; Journal of Boundary-Layer Meteorology: Band: 93; S. 469-492

Dzierzanowski, K.; Popek, R.; Gawronska, H.; Saebo, A.; Gawronski, S.W.; 2011; "Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species"; in: International Journal of Phytoremediation; Band: 13; S. 1037 – 1046

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Hrsg.: Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2007 a, „Feinstaub in der Schweiz, Statusbericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL)“, Bern Seite: 22

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Hrsg.: Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2007 b, „Feinstaub in der Schweiz, Statusbericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL)“, Bern Seite: 24, Abb. 3

ENVI-met; 2016; "ENVI-met 4. - A holistic Microclimate Modelling System"; URL: <http://www.model.envi-met.com/hg2e/doku.php?id=root:start>; am: 07.05.2016

Etyemezian, V., Ahonen, S., Nikolic, D., Gillies, J., Kuhns, H., Gillette, D., Veranth, J.; 2004; „Deposition and removal of fugitive dust in the arid Southwestern United States: measurements and model results“, in: Journal of Air Waste Management Association; Band: 54; S.: 1099 - 1111.

EU Richtlinie 1999/30/EG - über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft; URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:163:0041:0060:DE:PDF> am: 20.04.2016

EU Richtlinie 1996/62/EG - über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität; URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0062&from=DE> am: 20.04.2016

EU Richtlinie 2008/50/EG - über Luftqualität und saubere Luft für Europa; URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:DE:PDF> am: 20.04.2016

European society of cardiology, 2015, "Expert position paper on air pollution and cardiovascular disease"; in: European heart journal; Band: 36; S. 83 - 93

Everett, R. G.; Hicks, B. B.; Berg, W. W.; Winchester, J. W.; 1979; "An analysis of particulate sulphur and lead gradient data collected at Argonne National Laboratory"; in: Atmospheric Environment; Band: 13; S. 931-934.

Fowler, D.; Unsworth, M.H.; 1974; "Dry deposition of sulphur dioxide on wheat"; In: Nature; Band: 249; Heft 24; S.: 389-390

Freer-Smith, P.H.; El-Khatib, A.A.; Taylor, G.; 2004; "Capture of particulate pollution by trees: A comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species"; in: Water, Air and Soil Pollution 155; S. 173 - 187

Freer-Smith, P.H.; Beckett, K.P.; Tailor G.; 2005; "Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* X *trichocarpa* 'Beaupre', *Pinus nigra* and X *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment"; in: Environmental Pollution 133; S. 157 - 167

Gabrio, T.; 2007; "Feinstaub und Gesundheit"; in: Umed Info 19. (Landes Gesundheitsamt Baden Württemberg); S. 7 - 29

Gallagher, M.W.; Beswick, K.M.; Duyzer, J.; Westrate, H.; Choularton, T.W.; Hummelshoj, P.; 1997; "Measurements of aerosol fluxes to Speulder forest using a micrometeorological technique"; in: Atmospheric Environment 31/3; S. 359 - 373

Gemeinschafts-Arbeitsausschuss: Feinstäube; 2010; "Status Papier Feinstaub"; S. 12

Godzik, S.; Florkowski, T.; Piorek, S.; Sassen, M.A.; 1979; "An attempt to determine the tissue contamination of *Quercus robur* L. and *Pinus sylvestris* L. foliage by particulates from zinc and lead smelters; in: Environmental Pollution; Band: 18; S. 97-106

Grimm Aerosol Technik GmbH, 2008, Produktbroschüre: „Grimm EDM 107“, URL: [http://wiki.grimm-aerosol.de/images/9/9d/GRIMM\\_Data\\_Sheet\\_-\\_107.pdf](http://wiki.grimm-aerosol.de/images/9/9d/GRIMM_Data_Sheet_-_107.pdf); am: 25.05.2016

Gregory, P.H; 1973; „The Microbiology of the Atmosphere“; 2. Auflage; Leonard Hill; Aylesbury

Gromke, C.; Ruck, B.; 2007; “Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field”; in: Atmospheric Environment; Band. 41; S. 3287- 3302

Häckel, H.; 1985; „Meteorologie“; Ulmer-Verlag; Stuttgart; S. 37

Heyder, J.; 2005; „Ignoranz vom Allerfeinsten“; in: Zeit; Ausgabe: 04.05.2005 Nr.19; URL: [http://www.zeit.de/2005/19/Feinst 8aube](http://www.zeit.de/2005/19/Feinst%20staube); am: 23.04.2016

Hirabayashi, S.; Kroll, N. C.; Nowak, DJ.; 2014; “Development of a distributed air pollutant dry deposition modeling framework”; in: Environmental Pollution; Band: 171; S. 9-17

Hicks, B. B.; Hess G. D.; Wesely M. L.; 1982; „Analysis of flux-profile relationships above tall vegetation an alternative view“; in: Q. J. R. met. Society; Band: 105; S. 1074-1077

Hofmann, J.; Stokkaer, I.; Snauwaert, L.; Samson R.; 2013; „Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles“ ; in: Environmental Pollution; Band: 183; S. 123-132

Hofmann, J.; Harm, H. ; Calders, K.; Wittenberghe, S.V.; Wuyts, K., Samson, R.; 2014; “On the relation between tree crown morphology and particulate matter deposition on urban tree leaves: A ground-based LiDAR approach”, in: Atmospheric Environment; Band: 99; S. 130 - 139

Hori, T.; 1953; “Studies of Fogs in relation to Fog Preventing Forests”; Tanne Trading Co; Sapporo

Huang, C.W.; Lin, M.Y.; Khlystov, A.; Katul, G.; 2013; “The effects of Leaf Area Density variation on the particle collection efficiency in the size range of ultrafine particulates (UFP)”; in: Environmental science and technology; Band: 47; Heft: 20; S. 11607-11615

Huey, P. et al., 2009, aus: Science ORF, 2009, “Wie Feinstaub entsteht”, URL: <http://sciencev2.orf.at/stories/1633829/> am: 03.05.2016

Hwang, H.J.; Yook, S.J.; Ahn, K.H.; 2011; “Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves”; in: Atmospheric Environment; Band: 45; S. 6987-6994

Jin, S.; Guo, J.; Wheeler, S.; Kan, L.; She, S.; 2014; “Evaluation of impacts of trees on PM2.5 dispersion in urban streets”; in: Atmospheric Environment; Band: 99; S. 277-287

Joshi, S.V.; Ghosh, S.; 2014; “On the air cleansing efficiency of an extended green wall: A CFD analysis of mechanistic details of transport processes”; in: Journal of Theoretical Biology, Band: 361; S.: 101-110

Jouraeva, V.A.; Johnson, DL.; Hasset, JP.; Nowak, D.J.; 2002; "Differences in accumulation of PAHs and metals on the leaves of *Tilia x euchlora* und *Pyrus calleryana*"; in: *Environmental Pollution*; Band: 120; Heft: 2; S. 331-338

Janhäll, S.; 2015; "Review on urban vegetation and particle air pollution e Deposition and dispersion"; in: *Atmospheric Environment*; Band: 105; S. 130 - 137

Kappis, C.; Gorbachevskaya, O.; Valbuena, R.; Schreiter, H.; 2007; „Studie zum wissenschaftlichen Kenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (Qualitativ und Quantitativ) von Pflanzen“; Verein zur Förderung agrar- und stadtoökologischer Projekte e.V. (A.S.P.) und Universität Berlin; S. 173

Kaupp, H.; Blumenstock M.; McLachlan, Ms.; 2000; „Retention and mobility of atmospheric particle-associated organic pollutant PCD/Fs and PAHs on maize leaves“; in: *New Phytological Journal*; Band: 148; Heft: 3; S. 473-480

Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umweltschutz; (2000?); in: [www.muenchen.de](http://www.muenchen.de) - das offizielle Stadtportal; URL: [http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft\\_und\\_Strahlung/Luftverunreinigungen/Feinstaub.html](http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft_und_Strahlung/Luftverunreinigungen/Feinstaub.html) (6. Januar 2016)

Lin, M.; Katul, G.G.; Khlystov, A.; 2012; „A branch scale analytical model for predicting the vegetation collection efficiency of ultrafine particles“; in: *Atmospheric Environment*; Band: 51; S. 293 - 302

Lippmann, Morton; 2002; "Total Suspended Particles (TSP)"; in: *Encyclopedia of Public Health*; URL: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-3404000854.html>, am: 4.11.2015

Lipfert, F.W.; Wyzga R.E.; 1995; „Air pollution and mortality: issues and uncertainties“; in: *Journal of Air & Waste Management Association*; Band: 45; S. 949 - 966

Litschke, T.; Kuttler, W.; 2008; "On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review"; in: *Meteorologische Zeitschrift*, Band: 17; Heft: 3; S. 229-240

Liu, X.; Yu, X.; Zhang, Z.; 2015; "PM 2.5 Concentration Differences between Various Forest Types and Its Correlation with Forest Structure"; in: *Atmosphere*; Band: 6; S. 1801-1815

Lyons, T.J.; Scott, W.D.; 1990; "Principles of air pollution meteorology"; Belhaven Press; London

Lobis, V.; 2006; „Feinstaub und Vegetation - die neuen Feinstaubrichtwerte der EU als Impuls für mehr Grün in den Städten“; *Umweltpreis 2006 der Region Trentino/Südtirol*; URL: [http://www.studiolobis.it/Pubblicazioni/Lobis\\_Feinstaub%20und%20Gruen\\_Umweltpreis%202006.pdf](http://www.studiolobis.it/Pubblicazioni/Lobis_Feinstaub%20und%20Gruen_Umweltpreis%202006.pdf), am: 04.06.2016

Madders, M.; Lawrence, M.G.; 1981; "The role of woodland in air pollution control"; *Quarterly journal of forestry*; Band: 76; S. 256-261

Maier, K.; 2007; "Feinstaub und Gesundheit"; in: *Umed Info 19*. (Landes Gesundheitsamt Baden Württemberg); S. 71 – 91

- Manning, W.J.; Federer, W.A.; 1980; "Biomonitoring Air Pollution with plants; Applied science publisher"; London
- Matyssek, R.; Fromm, J.; Rennenberg, H.; Roloff, A.; 2010; „Biologie der Bäume“; 1. Auflage; Ulmer Verlag; Stuttgart; S. 92
- Mc Pherson, E.G.; Nowak, D.J.; Rowntree, R.E.; 1994; "Chicago's Urban Forest Ecosystems: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project"; in: USDA General Technical Report NE-186; Aus: Beckett, K.P.; Freer-Smith, P.H.; Taylor G.; 2000; "Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed"; in: Global Change Biology 6; S. 995 – 1103
- Mo, L.; Ma, Z.; Xu, Y.; Sun, F.; Liu, X.; Chen, J.; Yu, X.; 2015; „Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China“; in: PLOS ONE; S. 1 – 18; (DOI:10.1371/journal.pone.0140664)
- Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H.; 2015; „ Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments“; in: Urban forestry and urban greening; Band: 14; S. 1110–1121
- Mitchell, R.; Maher, B.A.; 2009; „Evaluation and application of biomagnetic monitoring of traffic- derived particulate pollution“; in: Atmospheric Environment; Band: 43; S. 2095 – 2103
- Mitchell, R.; Maher, B.A.; Kinnersley, R.; 2010; „Rates of particulate pollution deposition onto leaf surfaces: temporal and inter-species magnetic analyses“; in: Environmental Pollution; S. 1 - 7
- Nägeli, W.; 1946; „Weitere Untersuchungen über die Windverhältnisse im Bereich von Windschutzanlagen“; in: Mitteilungen der Schweizer Anstalt für Forstliches Versuchswesen, Zürich; Band: 24; S. 659 - 737
- Nicholson, K.W.; 1988; "The dry deposition of small particles: A review of experimental measurements"; in: Journal of Atmospheric Environment; Band: 22; S. 2653 - 2666
- Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz; 2016; „Indikator für die durchschnittliche Exposition PM<sub>2,5</sub> (AEI)“; URL: <http://www.umwelt.niedersachsen.de/umweltbericht/luft/luftqualitaetsindikatoren/indikator-exposition/indikator-fuer-die-durchschnittliche-exposition-pm25-aei-139584.html> , am: 26.05.2016
- Nowak, D.J.; Mc Hale, P.J.; Ibarra, M.; Crane, M.; Stevens, J.C.; Luley, K.; 1997; "Modeling the effects of urban vegetation on air pollution"; in 22<sup>nd</sup> NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modeling and its Application, S. 276 – 282
- Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; 2006; "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States"; in: Urban Forestry and Urban Greening; Band: 4; S. 115 - 123.
- Nowak, D.J.; Hirabayashi, S.; Bodine, A.; Hoehn, R.; 2013; "Modeled PM<sub>2,5</sub> removed by trees in ten US cities and associated health effects"; in: Environmental Pollution; Band: 178; S. 395 - 402

Oke, T.R.; 1987; "Boundary Layer Climates"; Routledge Taylor & Francis Group; 2. Edition; S. 435; also published in the Taylor & Francis e-Library; 2002; (ISBN 0-203-40721-0 Master e-book ISBN)

Ottelé, M.; Van Bohemen, H.; Fraaij, A.L.A.; 2010; "Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls"; in: Ecological Engineering; Band: 36; S. 154–162

Peters, A.; Dockery, D.W.; Heinrich J.; Wichmann, E.H.; 1997; „Short-term effects of particulate air pollution on respiratory morbidity in asthmatic children”; in: European Respiratory Journal, Band: 10; S. 873 - 879

Peters, A.; Hampel, R.; Cyrys, J.; Breitner, S.; Geruschkat , U.; Kraus, U.; Zareba W.; Schneider, A.; 2015; "Elevated particle number concentrations induce immediate changes in heart rate variability: a panel study in individuals with impaired glucose metabolism or diabetes"; in: Particle and fibre toxicology; Band: 12, Heft: 7; S. 1 - 11

Peters, K.; Eiden,R.; 1992; "Modelling the dry deposition velocity of aerosol particles to a spruce forest"; in: Atmospheric Environment 26/14; S. 2555 - 2564

Pope, C.A.; Burnett, R.T.; Thun, M.J.; Krewski, D.; K., I.; T., G. ; 2002; "Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution"; in: Journal of American Medicine Association; Band: 287; S. 1132 - 1141

Pope, C.A.; Dockery, D.W.; 2006; "Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect"; in: Journal of Air & Waste Management Association; Band: 56; S. 709 - 742

Popek, R.; Gawronska, H.; Wrochna, M.; Gawronski, S.W.; Saebo, A.; 2013; in: "Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes – a 3-year study"; in: International Journal of Phytoremediation 15; S. 245 - 256

Popek, R.; Gawronska, H.; Gawronski, S.W.; 2015; " The level of particulate matter on foliage depends on the distance from the source of emission"; in: International Journal of Phytoremediation; Band: 17; S. 1262 - 1268

Pretzsch, H.; 2005; „Wachstum von Rein- und Mischbestanden bei veranderten Umweltbedingungen“; in: AFZ, der Wald; Heft: 9; S. 465-468

Przybysz, A.; Saebo, A.; Hanslin, H.M.; Gawroński, S.W.; 2014; "Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time"; in: Total Environment; Band: 481; S. 360 - 369

Pulmann, M.; 2009; "Conifer PM 2,5 Deposition and Re-suspension in Wind and Rain Events"; Master`s thesis; Cornell University USA; S. 29 Veroffentlichung der Universitat im Internet: <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/11239> (21.11.2015)

Pyatt, F.B.; Haywood, W.J.; 1989; "Air borne particulate distributions and their accumulation in tree canopies, Nottingham, UK"; in: The Environmentalist; Band 9, Heft: 4; S.: 291-298

Pye, K.; 1987; "Aeolian Dust and Dust Deposits"; Cambridge Press; Cambridge

Quality of Urban Air Group (QUARG); 1996; "Third report to the Department of the Environment, Airborne Particulates Matter in the United Kingdom"; HMSO; London S. 176 pp.

Räsänen, J.V.; Holopainen, T.; Joutsensaari, J.; Ndam, C.; Pasanen, P.; Rinnan, A.; Kivimäenpää, M.; 2013; „Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees“; in: Environmental Pollution; Band: 183; S. 64 - 70

Referat für Gesundheit und Umwelt München; 2015; „Wer verursacht Feinstaub“; URL: [http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft\\_und\\_Strahlung/Luftverunreinigungen/Feinstaub.html](http://www.muenchen.de/rathaus/Stadtverwaltung/Referat-fuer-Gesundheit-und-Umwelt/Luft_und_Strahlung/Luftverunreinigungen/Feinstaub.html) am: 20.05.2016

Roberts, T.M.; 1975; "A review of some biological effects of lead emissions from primary and secondary smelters"; International Conference of Heavy metals in the Environment; University of Toronto; Volume: 2; Part: 2; S.:503-532

Roupsard, P., Amielh, M., Maro, D., Coppalle, A., Branger, H., 2013; "Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces"; Journal of Aerosol Science; Band: 55, S. 12 - 24

Ruijgrok, W.; Tieben, H.; Eisinga, P.; 1994; „Dry deposition of acidifying and alkaline particles to Douglas fir- a comparison of measurements and model results“; in: KEMA Report Dutch Priority Programme on Acidification, *rep. 20159-KES/MLU 94-3216 83397. KC. 17-94P02*, Arnhem, Netherlands, 199

Saebo, A.; Popek, R.; Nawrot, B.; Hanslin, HM.; Gawronska, H.; Gawronski, AW.; 2012; "Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces"; in: Total Environment; Band: 427-428; S. 347 - 354

Schulze, E.; 2002, „Einfluss von Regen und Luftfeuchtigkeit auf die PM10 - Emission und - Immission“; Technische Universität Dresden; S. 90; URL: <http://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/publikationen/Ganze%20Arbeit%20ohne%20Anhaenge.pdf>, am: 01.05.2016

Schütt, P.; Koch, W.; 1978; "Allgemeine Botanik für Forstwirte, Ein Leitfaden für Studium und Praxis"; Verlag: Parey; Hamburg-Berlin; 1. Auflage; S. 265

Sgrigna, G.; Saebo, A.; Gawronski, S.; Popek, R.; Calfapietra, C.; 2015; " Particulate matter deposition on Quercus ilex leaves in an industrial city of central Italy"; in: Environmental Pollution; Band: 197; S. 187-194

Sievering, H. ; 1982; "Profile measurements of particle dry deposition velocity at an air-land interface"; in: Atmospheric Environment; Band: 16; S. 301-306



Song, Y.; Maher, B.A.; Li, F.; Wang, X.; Sun, X.; Zhang, H.; 2015; „Particulate matter deposition on leaf of five evergreen species in Beijing China: Source identification and size distribution”; Band: 105; S. 53 - 60

Spitsyna, N.T.; Skripal'shchikova, L.N.; 1991; “ Phytomass and dust accumulation of birch forests near open-pit mines”, in: soviet journal of Ecology; Band: 22; S. 354-359

Sriprapat, W.; Thiravetyan, P.; 2013; “Phytoremediation of BTEX from Indoor Air by *Zamioculcas zamiifolia*”; in: Watter Air and Soil Pollution; Band: 224; Artikel Nr.: 1482; S. 1-9

Sternberg, T.; Viles, H.; Cathersides, A.; Edwards, Mo.; 2010; “Dust particulate absorption by ivy (*Hedera helix* L) on historic walls in urban environments”; in: Sc. Total Environment; Band: 409; S. 162-168

Suda, M.; Krause, E.; 2010; “Die Berliner und ihr Wald“; in: LWF aktuell; Band: 75; S. 56 - 59

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., Freer-Smith, P.; 2011; “Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments”; in: Landscape and Urban Planning; Band: 103, Heft: 2; S. 129 – 138

Taylor, G.E.; Constable, J.V.H.; S. 15-39; in: Percy, K.E.; 1994; “Air pollutants and the cuticle”; Springer Verlag; Berlin

Tauber, H.; 1967; “Investigations of the mode of pollen transfer in forested areas”; in: Review of Palaeobotany Palynology; Band 3; S.: 3277–286

Terzaghi, E.; Wild, E.; Zacchello, Cerabolini, B.EL.; Jones, K.C.; Guardo, A.D.; 2013; “Forest Filter Effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs”; in: Atmospheric Environment; Band: 74; S. 378-384

Thao-Nguyen, T. T.; Xin Xiao Yu; Hong Xia Zhang; 2014; “Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in epicuticular waxes of urban forest species in summer and fall in Beijing, China”, in Internationla Journal of Science 4/3; S. 12-22

Thompson, J.R.; Mueller, P.W.; Fliückigert, W.; Rutter, A.J.; 1984; „The Effect of Dust on Photosynthesis and its Significance for Roadside Plants”; in: Environmental Pollution (Series A); Band: 34; S. 171-190

Tiwary, A., Morvan, H.P., Colls, J.J., 2005. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *J. Aerosol Sci.* 37, 990 e 1015.

Tiwary, A.; Sinnett, D.; Peachey, C.; Chalabi, Z.; Vardoulakis, S.; Fletcher, T.; Leonardi, G.; Grundy, C.; Azapagic, A.; Hutchings, T.; 2009; “An integrated tool to asses the role of new planting in Pm 10 capture and the human health benefits: a case study in London”; in: Environmental Pollution; Band: 157; S. 2645-2653

Tomasevic, M.; Vukmirovic, Z.; Rajsic, S.; Tasic, M.; Stevanovic, B.; 2005; "Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area"; in: Chemosphere; Band: 61; S. 753-760

Tong, S.T.Y.; 1991; "The retention of copper and lead particulate matter in plant foliage and forest soil", in: Environment International; Band: 17, S. 31-37

Treesubstorn, C. und Thiravetyan, P.; 2012, "Removal of benzene from indoor air by *Dracaena sanderiana*: Effect of wax and stomata", in: Atmospheric Environment, Band: 57, S. 317-321

TSI Incorporated, 2002, Produktbroschüre: „CPC Model 3007“, URL: <http://www.cirrus.ucsd.edu/pages/instruments/Manual-3007.pdf> , am: 25.05.2016

Umweltbundesamt; 2008, „Kurzinformation zum Thema, Umweltzonen in Deutschland“; URL: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/umweltzonen.pdf>, am: 23.06.2016

Umweltbundesamt; 2015; „Emissionen von Luftschadstoffen – Emissionsentwicklung 1990-2013 von klassischen Luftschadstoffen“; URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>; am: 27.05.2016

Umweltbundesamt; 2016; „Luftmessnetze der Bundesländer“; URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/messenbeobachteneuberwachen/luftmessnetze-der-bundeslaender> , am: 25.05.2016

Umweltbundesamt Österreich, 2016, „Feinstaub - Ziele für PM 2,5“, URL: <http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/luft/luftschadstoffe/staub/pm25/>, am: 26.05.2016

USDA (United States Department of Agriculture); 2016; "Crown density"; URL: [http://fhm.fs.fed.us/pubs/fhncs/chapter2/crown\\_density.htm](http://fhm.fs.fed.us/pubs/fhncs/chapter2/crown_density.htm); am: 22.3.2016

Valet, P.-M.; 2005; „Tagung, UMEG Karlsruhe: Entwicklung der Luftschadstoffbelastung in Städten und Gemeinden - Messergebnisse und deren Bewertung- “; URL: [http://sixcms.regionstuttgart.de/sixcms\\_upload/media/365/valet\\_umeg\\_luftreinhalteung\\_280605.ppt.pdf](http://sixcms.regionstuttgart.de/sixcms_upload/media/365/valet_umeg_luftreinhalteung_280605.ppt.pdf); am: 27.05.2016

Von Sengbusch, P.; 1996-2004; Botanik online; Epidermis: Trichome; URL: <http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d05/05a.htm> ; am: 10.3.2016

Vos, P.E.J.; Maiheu, B.; Vankerkom, J.; Janssen, S.; 2013; "Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?"; in: Environmental Pollution; Band: 183; S. 113-123

Wang, L.; Liu, L.; Gao, S.; Hasi, E.; Wang, Z.; 2006; „Physiochemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surfaces of urban plants in Beijing“; in: Journal of Environmental Sciences; Band: 18; Heft: 5; S. 921-926

Wang, L.; Gong, H.; Liao, W.; Wang, Z.; 2015; “Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion”; in: Science of the Total Environment; Band: 532; S. 420-434

Wania, A.; Bruse, M.; Blond, N.; 2012; „Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations“; in: Journal of environmental management; Band: 94; Heft: 1; S. 91-101

Wesseling, J., Beijk, R., Kuijeren, N.V., 2008. Effecten van groen op de luchtkwaliteit, status 2008. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 3720 BA, Bilthoven, S. 1-64

White, E.J.; Turner F.; 1970; “A method of estimating income of nutrients in a catch of airborne particles by a woodland canopy”; Journal of Applied Ecology 7, 441 – 461

WHO; 2004; „Health aspects of air pollution – Results from the WHO Project „Systematic Review of health aspects of air Pollution in Europe“; World Health Organisation

Wichmann H.E.; Cyrus J.; Peters A.; 2009; „Umweltzone München – Eine erste Bilanz“; in: Umweltmed Forsch Prax 14 (3); S. 127- 132

Wichmann, E.; 2011; „Pressekonferenz: Umweltzonen aus Sicht des Gesundheitsschutzes“; URL: [http://www.duh.de/uploads/tx\\_duhdownloads/Wichmann\\_2011\\_04\\_Umweltzonen\\_DUH\\_Berlin.pdf](http://www.duh.de/uploads/tx_duhdownloads/Wichmann_2011_04_Umweltzonen_DUH_Berlin.pdf); am: 27.05.2016

Williams, R.J.H.; Lloyd, M.M.; Ricks, G.R.; 1971; “Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland 1., some effects on leaves of Quercus petraea”; in: Environmental Pollution; Band: 2; S. 57-68

Williams, R.J.H.; Ricks, G.R.; 1974; “Effects of atmospheric pollution on deciduous woodland 2., effects of particulate matter upon stomatal diffusion resistance in leaves of Quercus petraea”; in: Environmental Pollution; Band: 6; S. 87-109

Wolf-Benning, U.; 2006; “Kleinräumige und zeitliche Variabilität von Feinstaub und Grobstaub sowie Stickstoffdioxid in Berlin”; in: Berliner Geografische Arbeiten; Band: 105; S. 1 - 133

Yang, J.; Chang, Y.; Yan, P.; 2015; “ Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM 2,5 pollution”; in: Atmospheric pollution research; Band: 6; S. 267-277

Zampieria, M.C.T.; Sarkisa, J.E.S.; Pestana, R.C.B.; Tavares, A.R.; Melo-de-Pinnac, G.F.A.; 2013; “Characterization of Tibouchina granulosa (Desr.) Cong. (Melastomataceae) as a bioindicator of air pollution and quantification of particulate matter adsorbed by leaves”; in: Ecological Engineering; Band: 61; S.: 316–327

Zhang, W.K.; Wang, B.; Niu, X.; 2015; "Study on the Adsorption Capacities for Airborne Particulates of Landscape Plants in Different Polluted Regions in Beijing (China)"; in: International Journal of environmental research and public health; Band: 12; S. 9623 - 9638

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Begriffsdefinition Feinstaub (Gemeinschafts-Arbeitsausschuss: Feinstäube; 2010).....	17
Abbildung 2. Entstehungswege des Feinstaubes .....	18
Abbildung 3. Einige Feinstaubquellen im Überblick (Huey et al., 2009) .....	20
Abbildung 4. Partikelgröße des natürlichen und anthropogenen Feinstaubes (Valet, 2005).....	20
Abbildung 5. Wichtige PM 2,5 Emissionen 2013 in Deutschland aufgeteilt nach Verursachern ..	21
Abbildung 6. Feinstaubquellen für München .....	22
Abbildung 7. Größenselektierter Einlass von Partikeln in den Atemtrakt des Menschen .....	25
Abbildung 8. Übersicht der LÜB Messstationen.....	27
Abbildung 9. Messprinzip der Laserpartikelzählung.....	28
Abbildung 10. Auszug des Messaufbaues der Kondensationspartikelzählung.....	30
Abbildung 11. Instabile und Stabile Schichtung.....	36
Abbildung 12. Depositionsmechanismen .....	40
Abbildung 13. Mechanismus der Saltation .....	41
Abbildung 14. Der Filtermechanismus von Bäumen .....	43
Abbildung 15. Filterleistung in Abhängigkeit der PM 10 Konzentration .....	45
Abbildung 16. Filterleistung in Abhängigkeit der PM 2,5 Konzentration .....	45
Abbildung 17. Partikelkonzentration und .....	46
Abbildung 18. Feinstaubfilterung in Abhängigkeit von verkehrsgesteuerter Umgebungskonzentration.....	47
Abbildung 19. Erreichen des Sättigungsniveaus der Blattfläche .....	48
Abbildung 20. Ansteigende Fangeffizienz ( $C_p$ ) und Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten, zwischen $u = 3$ und $u = 9 \text{ m s}^{-1}$ .....	49
Abbildung 21. Positive Korrelation von Fangeffizienz und Windgeschwindigkeit in verschiedenen Studien .....	50
Abbildung 22. Plateaueffekt der Fangeffizienz ( $C_p$ ) und Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ ) bei Windstärke $10 \text{ m s}^{-1}$ für verschiedene Baumarten .....	51
Abbildung 23. Unterschiedliche Abwascheffekt der feinen Partikel (UFP) bei .....	53
Abbildung 24. Korrelation zwischen Baum Höhe und LAI .....	56
Abbildung 25. Korrelation zwischen BHD (DBH) und LAI .....	57
Abbildung 26. Oberflächenrauigkeit durch Stomata .....	63
Abbildung 27. Mikrostruktur der Epicuticularwachse, Kreise entsprechen der Größe eines durchschnittlichen PM 2,5 Partikels .....	75
Abbildung 28. Partikel um Stomata von <i>Quercus petraea</i> Lichtmikroskopische Aufnahme (Ricks und Williams, 1974, S. 92) .....	78
Abbildung 29. Partikel in Stomata von <i>Quercus petraea</i> Elektronenmikroskopische Aufnahmen (Ricks und Williams, 1974, S. 93) .....	78
Abbildung 30. Filterwirkung verschiedener Pflanzgemeinschaften .....	87
Abbildung 31. <i>Hedera Helix</i> als filtereffiziente Ergänzung im Stamm-, Astbereich (b) und an Wänden (a).....	89
Abbildung 32. Ablenkung (A) und Aufnahme (B) in Abhängigkeit der Dichte .....	92

Abbildung 33. Luft Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten .....	95
Abbildung 34. Pflanzmodell für enge Häuserschluchten mit großem H/W - Wert.....	96
Abbildung 35. Pflanzmodell für Straßen und Plätze mit niedrigen H / W - Werten .....	97
Abbildung 36. Vegetationsbarrieren in Windrichtung vor sensiblen Gebieten (Kindergärten, Krankenhäusern, Wohngebieten) .....	98
Abbildung 37. Pflanzmodell für Luftfilterzonen an starken Feinstaubquellen neben bedeutenden Feinstaubquellen, wie stark befahrenen Straßen (Mittlerer Ring, Autobahnen) oder Industriegebieten.....	99
Abbildung 38. Aufbau „Chamber Method“ - Box Studie.....	105
Abbildung 39. Simulation verschiedener Luftströmungsrichtungen .....	106
Abbildung 40. Ergebnispräsentation einer gravimetrischen Studie .....	110
Abbildung 41. Elektronenmikroskopische Aufnahme von Partikeln und deren chemische Zusammensetzung .....	111
Abbildung 42. Horizontale Filtermessung.....	114
Abbildung 43. Vertikale Filtermessung .....	115
Abbildung 44. Simulationsergebnis von ENVI-met Vergleich von Feinstaubgehalt einer Straßenschlucht mit und ohne Bäume, EC (Elementarer Kohlenstoff) entspricht dem Feinstaubgehalt.....	117
Abbildung 45. Big Leaf Model .....	119
Abbildung 46. Studienübergreifender Vergleich der Cp und Vg Werte verschiedener Baumarten unter Einbezug von Partikelgröße und Windstärke .....	133
Abbildung 47. Studienübergreifender Trend der Filterwerte von verschiedenen Baumarten ..	136
Abbildung 48. Übersicht der Depositionsgeschwindigkeiten einer Windtunnelstudie.....	138
Abbildung 49. Baumartenspezifischer Trend einer großen Gravimetrisch-nummerischen Studie .....	140
Abbildung 50. Zusammenhang von Fangeffizienz (Cp) und Stokes number (St).....	143
Abbildung 51. Standorte der Messung.....	153
Abbildung 52. Environmental Dust Monitor (Model: Grimm 107) (Grimm Aerosol Technik GmbH, 2008) .....	155
Abbildung 53. Condensation Particle Counter (Model: TSI 3007) (TSI Incorporated, 2002) ....	155
Abbildung 54. Mess-set in Werkzeugkasten auf Teleskopstab .....	156
Abbildung 55. Feinstaub Messung in direkter Nähe zum Baum (hier auf Luv Seite, vor dem Baum) .....	157
Abbildung 56. Durchführung der Messung auf x Metern im Kronenansatz .....	159
Abbildung 57. Übersicht aller aufgetretenen Windgeschwindigkeiten zur Klasseneinteilung...	161
Abbildung 58. Aufbau der Messung und Abschätzung der filtereffizienten Kronenhöhen der Standorte: 1 = Bordeaux Platz und 2 = Heidemannstraße .....	163
Abbildung 59. Relative Filterleistungen aller Standorte (n = 142).....	166
Abbildung 60. Prozentuale Filterleistung nach Windklassen über allen Standorten (n = 142)..	168
Abbildung 61. Bordeaux Platz Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=47).....	170
Abbildung 62. Pariser Platz Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=47).....	170
Abbildung 63. Lotstraße Prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=22) .....	172
Abbildung 64. Heidemannstraße prozentuale Filterleistung nach Windklassen (n=26).....	172
Abbildung 65. Prozentuale Filterleistung in Abhängigkeit des Kronenansatzes bei einheitlichen Windklassen (n = 52) .....	173
Abbildung 66. Übersicht der Befragungsorte .....	188

Abbildung 67. Ergebnisse für Frage 1 (n=80) .....	196
Abbildung 68. Ergebnisse der Frage 2 (n=80) .....	196
Abbildung 69. Ergebnisse für Frage 3 (n=80) .....	197
Abbildung 70. Ergebnisse für Frage 4 (n=80) .....	198
Abbildung 71. Ergebnisse für Frage 5 (n=80) .....	198
Abbildung 72. Ergebnisse für Frage 6 (n=80) .....	199
Abbildung 73. Ergebnisse der Frage 7.1 (n=80) .....	200
Abbildung 74. Ergebnisse für Frage 7.2 (n=80) .....	200
Abbildung 75. Ergebnisse für Frage 8 (n=80) .....	201
Abbildung 76. Ergebnisse der Frage 9 (n=80).....	202
Abbildung 77. Ergebnisse für Frage 10 (n=80) .....	203
Abbildung 78. Ergebnisse für Frage 11 (n=80) .....	204
Abbildung 79. Ergebnisse für Frage 12 (n=80) .....	204
Abbildung 80. Ergebnisse für Frage 13 (n=80) .....	205
Abbildung 81. Ergebnisse für Frage 14. (n=80) .....	206
Abbildung 82. Ergebnisse für Frage 9 unter der Berücksichtigung der Angaben in Frage 9 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5).....	207
Abbildung 83. Ergebnisse für Frage 11 unter Berücksichtigung der Angaben in Frage 13 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5).....	207
Abbildung 84. Ergebnisse für Frage 10 unter Berücksichtigung der Angaben in Frage 13 (n „oft im Grünen“ = 60; n „gelegentlich im Grünen“ = 15; n „selten im Grünen“ = 5).....	208

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Gesundheitliche Auswirkungen in Zusammenhang mit Feinstaub .....	24
Tabelle 2. Exponentiell steigende Partikeloberfläche und Partikelanzahl bei sinkendem Partikeldurchmesser .....	26
Tabelle 3. Reduktionsziele der Feinstaubexposition für 2020, in Abhängigkeit des Dreijahresmittels 2008-2010 .....	32
Tabelle 4. Depositionsgeschwindigkeit ( $V_g$ in $\text{cm s}^{-1}$ ) von Styropor Partikeln.....	69
Tabelle 5. Größe der Fangeffizienz von Zweigen in Abhängigkeit ihres Durchmessers.....	82
Tabelle 6. Prozentuale Anteile der GesamtfILTERleistung von Blättern/Nadeln, Stämmen und Zweigen .....	84
Tabelle 7. Zusammenstellung von Werten und Angaben zu Fangeffizienz und Depositionsgeschwindigkeit aus verschiedenen Studien .....	130
Tabelle 8. Vor- und Nachteile der FILTERleistung von Koniferen im Vergleich zu Angiospermen	146
Tabelle 9. Vor- und Nachteile der FILTERleistung von Angiospermen im Vergleich zu Koniferen	148
Tabelle 10. Bewertung der Feinstaubfilterung von Rein- und Mischbeständen nach einzelnen Faktoren .....	150
Tabelle 11. Baumdaten.....	154
Tabelle 12. . Berechnung des filtereffektiven Kronenvolumens in Form eines Zylinders.....	164
Tabelle 13. Durchschnittliche prozentuale FILTERwerte in Abhängigkeit des Kronenvolumens .	174
Tabelle 14. Durchschnittliche prozentuale FILTERleistung nach Feinstaubgrößen und Standorten, $n_{\text{gesamt}} = 142$ .....	175
Tabelle 15. Gleichverteilung der Befragten nach Geschlechtern und Altersgruppen .....	189



# Anhang

## 1. Fragebogen

Zielfrage: Wissen die Münchner Bürger um die positive Wirkung von Bäumen auf die Feinstaubrate in Ihrer Stadt ?

### I. Angaben zur Person

Datum:.....

Ort:.....

Wohnort/Stadtteil:.....

Sonstiges:.....

	< 25	25 - 45	46 - 65	> 65
Weiblich				
Männlich				

### II. Befragung

Kategorisierungskennzahlen für Auswertung

1. Wenn ich an die Luft in München denken, dann...

2. Die Luftqualität in München bedeutet für mich...

3. Am besten ist die Luftqualität in München in...

4. Am schlechtesten ist die Luftqualität in München in...

5. Bitte geben Sie der Luftqualität in München eine Schulnote.

6. Was wirkt sich Ihrer Meinung nach am stärksten positiv auf die menschliche Gesundheit aus:

a) CO<sub>2</sub> Reduzierung

b) Feinstaub Reduzierung

c) Reduzierung von groben Rußpartikeln.

7. Haben Sie schon einmal von Feinstaub gehört...

7.1 Ja: , Nein:

7.2 Wo ?

7.3 Und in welchem Zusammenhang?...

### Kurze Erklärung von Feinstaub für die weiteren Fragen

8. Was sind Ihrer Meinung nach die größten zwei Feinstaubquellen in München

a) Flugzeuge

b) Hausbrand

c) Industrie

d) Autos

9. Der Feinstaubgehalt im Stadtinneren kann gesenkt werden, indem...

10. Was meinen Sie trägt am effektivsten zur Reduzierung von Feinstaub in Städten bei:

a) Gewässer

b) Straßenreinigung

c) Blätter -> wenn Ja, wie stellen Sie sich diesen Reduktionsmechanismus vor ?

d) Rußpartikelfilter

11. Wenn Sie Bürgermeister/in wären, was würden Sie tun um die Luftqualität in München zu beeinflussen...

Kurze Erklärung von Zusammenhang: Stadtbäume – Feinstaubgehalt

12. Die Stadt München möchte Ihren Feinstaubgehalt im Stadtinneren mit Hilfe von Bepflanzungen senken.

Sie haben nun die Wahl:

- 12.1 Wie sollte das Grün zur Reduzierung von Feinstaub ihrer Meinung nach aussehen...
12. 2 Wo würden Sie die Pflanzungen durchführen...
13. Welchem der folgenden Bäume trauen sie die höchste Feinstaubfilterleistung zu ?
- a) Linde    b) Robinie    c) Kastanie
14. Ich suche:
- a) oft-
- b) gelegentlich-
- c) selten-
- eine Grünfläche mit Bäumen in der Stadt auf
15. Wenn Ich einen Baum in der Stadt sehe empfinde Ich es als...

Herzlichen Dank für`s Mitmachen

## 2. Bilder der Fragen 8, 10, 13

### Flugzeuge



### Industrie



### Autos



### Hausbrand



# Gewässer



# Straßenreinigung



# Blätter



# Rußpartikelfilter



# Linde





# Robinie



# Kastanie



### 3. Selbständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen sind, wurden als solche eindeutig kenntlich gemacht-, sowie alle benutzten Hilfsmittel angegeben.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift