

Aus dem Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin  
und  
der Abteilung für Hygiene und Infektionsprävention

der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Nachweis von Schimmelpilzen in der Außenluft in Bezug auf die Siedlungsform

Inauguraldissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades der  
Medizin  
der Universitätsmedizin  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Nicolai Hagendorn  
aus Mannheim

Mainz, 2024

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild  
1. Gutachter: PD Dr. rer. nat. Bernd Roland Roßbach  
2. Gutachter: Dr. med. Regina Pietsch

Tag der Promotion: 20. Juni 2024

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	IX
1 Einleitung / Ziel der Dissertation .....	1
1.1 Hinführung.....	1
1.2 Historisches .....	1
2 Literaturdiskussion.....	5
2.1 Schimmel Definition.....	5
2.2 Spezies .....	7
2.2.1 Alternaria sp. ....	7
2.2.2 Aspergillus sp. ....	8
2.2.3 Cladosporium sp.....	9
2.2.4 Penicillium sp. ....	10
2.2.5 Rhizopus sp.....	11
2.2.6 Steriles Myzel .....	11
2.3 Messstrategie .....	12
2.3.1 Allgemeines.....	12
2.3.2 Vorgaben.....	12
2.3.3 Messverfahren.....	13
2.3.4 Konzentrationen und Spezies.....	14
2.4 Siedlung .....	21
2.5 Meteorologische Daten.....	22
3 Material und Methoden .....	24
3.1 Mainzer Messreihe .....	24
3.2 Probennahme Strategie.....	24
3.3 Wetterdaten.....	25
3.4 Luftkeimsammler .....	25

3.5	Nährmedien.....	26
3.6	Messstellen .....	27
3.6.1	Stadtgebiet .....	27
3.6.2	Grünfläche: Römerwall .....	28
3.6.3	Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße .....	30
3.6.4	Rheinufer: Stresemannufer.....	31
3.6.5	Lockere Bebauung: Weichselstraße 23 .....	32
3.6.6	Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße.....	33
3.6.7	Distanzen zwischen den Messstellen .....	34
3.7	Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen.....	35
4	Ergebnisse .....	37
4.1	Gesamtkeimzahlen im Jahresverlauf .....	37
4.2	Gesamtkeimzahl im Bezug zum Klima.....	38
4.2.1	Gesamtkeimzahl im Bezug zur Durchschnittstemperatur .....	38
4.2.2	Gesamtkeimzahl in Bezug zur relativen Luftfeuchtigkeit .....	40
4.3	Ergebnisse der einzelnen Messstellen.....	40
4.3.1	Messergebnisse Grünfläche: Römerwall .....	40
4.3.2	Messergebnisse dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße .....	41
4.3.3	Messergebnisse Rheinufer: Stresemannufer .....	41
4.3.4	Messergebnisse Lockere Bebauung: Weichselstraße 23 .....	42
4.3.5	Messergebnisse Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße.....	42
4.4	Zusammenschau einzelner Spezies für die gesamte Studie.....	43
4.4.1	Zusammenschau Cladosporium sp. ....	43
4.4.2	Zusammenschau Penicillium sp. ....	45
4.5	Zusammenschau der Messstellen .....	46
5	Diskussion .....	49
5.1	Allgemeines.....	49

5.2	Methodik.....	50
5.3	Ergebnisse .....	52
5.3.1	Jahresverlauf.....	52
5.3.2	Klima .....	53
5.3.3	Zusammenschau Cladosporium sp. ....	54
5.3.4	Zusammenschau Penicillium sp. ....	55
5.3.5	Zusammenschau der Messstellen .....	55
6	Zusammenfassung .....	57
	Literaturverzeichnis .....	X
	Danksagung.....	XVII
	Tabellarischer Lebenslauf .....	XVIII

## Abkürzungsverzeichnis

95.P	95. Perzentil
DG18	Dichloran-Glycerol 18% Agar
DIN	Deutsches Institut für Normung
KBE	Koloniebildende Einheiten
M	Median
Max.	Maximalwert
MCDA	Multicriteria decision analysis
MEA	Malzextrakt Agar
MVOC	Microbial volatile organic compounds
R&D	Research and Development
RFO	Relative frequency of occurrence
Sp.	Spezies, innerhalb der Gattung nicht weiter definiert
Spp.	Spezies pluralis
UMEG	Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg
WHO FPPL	World-Health-Organization fungal priority pathogens list

### Anmerkung:

Allgemeine Abkürzungen, wie "z. B." oder gängige Abkürzungen in Fußnoten wie z. B. „vgl.“ wurden explizit nicht im Abkürzungsverzeichnis aufgeführt.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Microscopic view of a 'hairy mould' colony described by Robert Hooke in 1665 (5).....	2
Abbildung 2: Pneumomycosis Aspergillina (6) .....	3
Abbildung 3: Werbeplakat der Schenley Laboratories: "Thanks to Penicillin he will come home" (11).....	4
Abbildung 4: Schimmelpilze kommen in Verschiedenen systematischen Gruppen vor (15) .....	6
Abbildung 5: Alternaria sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme) .....	7
Abbildung 6: Aspergillus sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme) .....	8
Abbildung 7: Cladosporium sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme).....	9
Abbildung 8: Penicillium sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme) .....	10
Abbildung 9: Rhizopus unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme) .....	11
Abbildung 10: Monatlicher Vergleich der Schimmelpilze in der Außenluft in Erfurt (43) .....	14
Abbildung 11: Jahreszeitlicher Verlauf der Gesamtschimmelpilze in der Außenluft am UMEG-Vorplatz (44).....	15
Abbildung 12: Jahreszeitlicher Verlauf von Aspergillus (Asp), Cladosporium (Clado) und Penicillium (Pen) auf DG18 in der Außenluft am UMEG-Vorplatz (45) .....	16
Abbildung 13: Cladosporium spp. in der Außen-/Innenraumluf über den Jahresverlauf (47) .....	19
Abbildung 14: Penicillium spp. in der Außen-/Innenraumluf über den Jahresverlauf (47) .....	19
Abbildung 15: Prozentuale Verteilung der Ascomyceten (48).....	20
Abbildung 16: Relative Häufigkeit des Vorkommens einzelner Ascomyceten (48) ...	21
Abbildung 17: Vergleich der Schimmelpilzkonzentrationen verschiedener Standorte im Frühjahr (a), Sommer (b) und Herbst (c) (49) .....	22
Abbildung 18: Meteorologische Daten Mainz Marienborn (56) .....	25
Abbildung 19: Kartenausschnitt Messgebiet Mainz (62) .....	28
Abbildung 20: Karte Grünfläche (63) .....	29
Abbildung 21: Messstelle Grünfläche .....	29
Abbildung 22: Karte Dichte Bebauung (64) .....	30
Abbildung 23: Messstelle dichte Bebauung.....	31

Abbildung 24: Karte Rhein (65) .....	31
Abbildung 25: Messstelle Rhein .....	32
Abbildung 26: Karte lockere Bebauung (66).....	32
Abbildung 27: Messstelle lockere Bebauung .....	33
Abbildung 28: Karte Gewerbegebiet (67) .....	34
Abbildung 29: Messstelle Gewerbegebiet .....	34
Abbildung 30: Gesamtkeimzahlen/m <sup>3</sup> der Messstellen .....	38
Abbildung 31: Gesamtkeimzahl/m <sup>3</sup> zur Durchschnittstemperatur .....	39
Abbildung 32: Gesamtkeimzahl/m <sup>3</sup> zur Luftfeuchtigkeit .....	40
Abbildung 33: Cladosporium sp. Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf .....	44
Abbildung 34: Penicillium sp. Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf .....	45
Abbildung 35: Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf.....	47
Abbildung 36: Multicriteria Decision analysis Rangliste (74).....	50

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Winter: Nachweishäufigkeit kultivierbarer Pilze in KBE/m <sup>3</sup> (47).....	17
Tabelle 2: Sommer: Nachweishäufigkeit kultivierbarer Pilze in KBE/m <sup>3</sup> (47) .....	17
Tabelle 3: Meteorologische Daten der Messtage über den Jahresverlauf (49) .....	23
Tabelle 4: Zusammensetzung MEA nach DIN ISO 16000-18 (60).....	26
Tabelle 5: Zusammensetzung DG18 nach DIN ISO 16000-18 (61).....	27
Tabelle 6: Verwendete Materialien.....	27
Tabelle 7: Messrahmen Römerwall.....	29
Tabelle 8: Messrahmen Dichte Bebauung.....	30
Tabelle 9: Messrahmen Rheinufer .....	31
Tabelle 10: Messrahmen Lockere Bebauung .....	32
Tabelle 11: Messrahmen Gewerbegebiet.....	33
Tabelle 12: Abstände der Messstellen .....	35
Tabelle 13: Zusammensetzung Lactophenolblaulösung (70).....	36
Tabelle 14: Übersicht Gesamtkeimzahlen .....	38
Tabelle 15: Übersicht Grünfläche in KBE/m <sup>3</sup> .....	40
Tabelle 16: Gesamtkeimzahl Spezies Grünfläche in KBE/m <sup>3</sup> .....	41
Tabelle 17: Übersicht Dichte Bebauung in KBE/m <sup>3</sup> .....	41
Tabelle 18: Gesamtkeimzahl Spezies Dichte Bebauung in KBE/m <sup>3</sup> .....	41
Tabelle 19: Übersicht Rheinufer in KBE/m <sup>3</sup> .....	41
Tabelle 20: Gesamtkeimzahl Spezies Rheinufer in KBE/m <sup>3</sup> .....	42
Tabelle 21: Übersicht Lockere Bebauung in KBE/m <sup>3</sup> .....	42
Tabelle 22: Gesamtkeimzahl Spezies Lockere Bebauung in KBE/m <sup>3</sup> .....	42
Tabelle 23: Übersicht Gewerbegebiet in KBE/m <sup>3</sup> .....	42
Tabelle 24: Gesamtkeimzahl Spezies Gewerbegebiet in KBE/m <sup>3</sup> .....	43
Tabelle 25: Cladosporium sp. Werte des Box-Plots in KBE/m <sup>3</sup> .....	43
Tabelle 26: Penicillium sp. Werte des Box-Plots in KBE/m <sup>3</sup> .....	45
Tabelle 27: Werte des Box-Plots in KBE/m <sup>3</sup> .....	47

## 1 Einleitung / Ziel der Dissertation

### 1.1 Hinführung

Wenn die meisten Personen das Wort Schimmel hören, denken sie an das Ärgernis verschimmelter Lebensmittel, die Schimmelflecken in der Ecke des Schlafzimmers oder den modrigen Geruch des alten Gewölbekellers. Nur die wenigsten beschäftigen sich weiter mit dem Ursprung des Schimmels. Schimmel gehört zur natürlichen Umgebung. Die Konzentration und Zusammensetzung der Schimmelpilze in der Außenluft ist regional unterschiedlich. Sie hängt vom Klima, der Jahreszeit, sowie unterschiedlichen Emissionsquellen ab. (1)

Für die meisten mag der Befall mit Schimmelpilzen lediglich ein Ärgernis sein. Für den Atopiker oder immunsupprimierten Patienten besteht darüber hinaus zusätzlich ein gesundheitliches Risiko. Jedoch gibt es für den gesundheitsschädlichen Aspekt keine definierten Beurteilungswerte. (2) Die wahrscheinlich häufigsten Beschwerden sind Irritationen der Augen, der Atemwege und allergische Reaktionen. (3)

Ziel dieser Dissertation ist es festzustellen, ob die Umgebung einen Unterschied in der Keimzahl und deren Zusammensetzung mit sich bringt. Um dies herauszufinden, wurden an fünf verschiedenen Messstellen mit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen im Mainzer Stadtgebiet jeweils einmal im Monat während eines Jahres Außenluftproben mittels Impaktionsverfahren gewonnen und analysiert.

### 1.2 Historisches

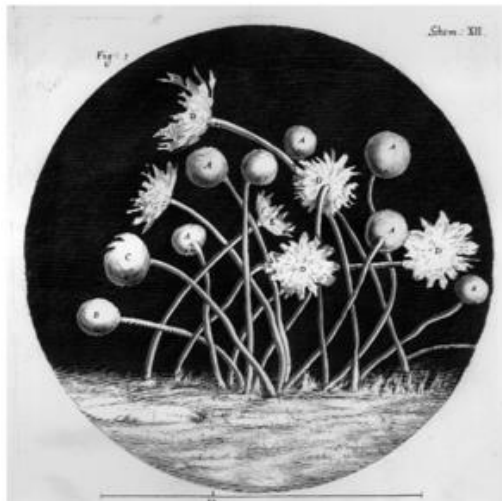
Bereits im Alten Testament der Bibel wird der Schimmelbefall eines Hauses beschrieben. Im 3. Buch Mose heißt es im 14. Kapitel, dass ein potenziell befallenes Haus von einem Priester besichtigt werden soll. Das weitere Vorgehen wird wie folgt erläutert:

*„37 Stellt er dabei fest, dass sich an den Mauern des Hauses grünlich gelbe oder rötliche Vertiefungen zeigen, die Mulden in der Mauer bilden, 38 so soll der Priester aus dem Haus hinausgehen und den Eingang für sieben Tage abschließen. 39 Am siebten Tag soll er wiederkommen. Stellt er bei der Besichtigung fest, dass sich das Übel an den Hausmauern ausgebreitet hat, 40 so ordne er an, die Steine, die vom Übel befallen sind, herauszureißen und sie vor die Stadt hinaus an einen unreinen Ort zu werfen. (...) 46 Jeder, der das*

*Haus während der Tage, an denen es durch den Priester verschlossen war, betreten hat, ist unrein bis zum Abend.“ (4)*

Auch ohne das Wissen der heutigen Naturwissenschaft besitzen zahlreiche alttestamentarische Beobachtungen bis in die heutige Zeit ihre Gültigkeit. Beispielsweise, dass zur Verhinderung einer Wiederbesiedlung kontaminierte Stoffe sicher entsorgt werden sollen und dass Personen beim Betreten des Hauses unrein, bzw. wissenschaftlich ausgedrückt, kontaminiert werden.

Erst im 17. Jahrhundert sollte es möglich werden, den Schimmelbefall mikroskopisch zu untersuchen. Die technischen Möglichkeiten, Linsen mit immer höheren Vergrößerungen zu bauen und die Entwicklung der Mikroskopie, begründen die frühen Schritte der Mikrobiologie. Die Väter der Mikroskopie Robert Hooke und Antoni van Leeuwenhoek beschreiben als Erste das mikroskopische Aussehen von Schimmelpilzen.



*Abbildung 1: Microscopic view of a 'hairy mould' colony described by Robert Hooke in 1665 (5)*

Die mikroskopische Erstbeschreibung stammt aus dem Jahre 1665 vom schottischen Universalgelehrten Robert Hook. In dessen Buch *Micrographia* beschreibt er einen Schimmelpilz, der sich später aller Wahrscheinlichkeit nach als *Mucor* bestimmen lässt. Das damals entstandene Bild ist in Abbildung 1 zu sehen. Wenige Jahre später wird diese Beschreibung durch Antoni van Leeuwenhoek bestätigt. (5)

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden durch Zoologen und Botaniker erstmals der Zusammenhang zwischen Schimmelpilzen und Erkrankungen hergestellt. 1847 beschreibt Theodor Sluyter in seiner Dissertation „den ersten sicher bestimmbareren Fall einer Lungenaspergillose beim Menschen“ und fertigte dabei die in Abbildung 2 abgebildete Zeichnung an. Diese legte er Rudolf Virchow vor. (6)

Virchow identifiziert den gefundenen Pilz als *Aspergillus* und nennt die durch Theodor Sluyter beschriebene Erkrankung „*pneumomycosis aspergillina*“, die sekundär auf Grund einer Pneumonie anderer Ursachen entstünde. Er führt für Erkrankungen, die durch Schimmelpilze hervorgerufen werden, den Begriff der Mykose ein. Gleichzeitig postuliert er, dass es bestimmten Voraussetzungen bedürfte an einer Mykose zu erkranken. In seiner Beschreibung zu Onychomykosen wird Virchow noch deutlicher:

„So ist also die Mykose Anfangs eine sekundäre, ein *Accidens*, wird aber später zu einer selbstständigen, zunehmenden Krankheitsursache.“ (7)

In einer Fallbeschreibung nennt Virchow, dass in der Wohnung der Patientin *Aspergillen* zu finden seien und führt somit die umweltmedizinische Komponente der Mykosen ein. (7)

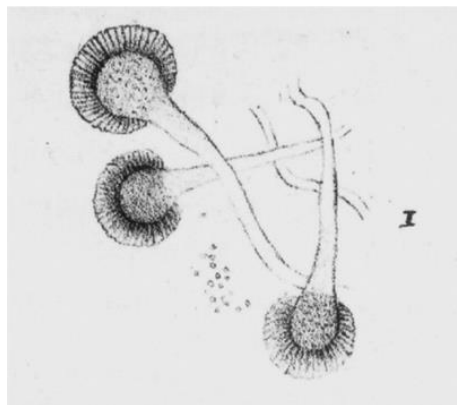


Abbildung 2: *Pneumomycosis Aspergillina* (6)

Somit erkennt Virchow an, dass durch Pilzbesiedlung Erkrankungen ausgelöst werden können, wohingegen er wenige Jahre später, der zum Ende der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts aufkommenden Bakteriologie als Krankheitsursache bis zu seinem Lebensende kritisch gegenübersteht.

*„Noch jetzt bin ich nicht von der spezifischen Natur dieser Mikroorganismen überzeugt“* (8)

In der Bakteriologie steht Virchow im Kontrast zu seinem Charité-Kollegen Robert Koch.

In Robert Kochs Vortrag zum 10. Medizinischen Kongress 1890 in Berlin stellt dieser fest, dass Bakterien eigenständige krankheitsauslösende Organismen sind und nicht zum Entwicklungskreis anderer Organismen, wie beispielsweise den Schimmelpilzen, gehören. Ebenfalls in diesem Vortrag enthalten sind Kochs Thesen zur Ursachen- und Wirkungsbeziehung von Krankheitserregern, die später als Henle-Koch Postulate bezeichnet werden sollten. (9)

Als die mikrobiologische Forschung voranschritt, kam es zu einem zufälligen und schicksalhaften Zusammenkommen zwischen der Bakteriologie und der Mykologie. Alexander Fleming forschte an *Staphylococcus aureus* und stellte im September 1928 eine Kontamination mit Schimmelpilzen fest, die das bakterielle Wachstum hemmte. Die Isolation des Pilzes ergab die Spezies *Penicillium notatum*, dessen bakteriostatische Substanz er als Penicillin betitelte. Er beschreibt die Sensibilität und die natürliche Resistenz einiger Bakterien, sowie die ersten Resistenzentwicklungen gegen Penicillin. (10)

Nur wenig später nach dessen Entdeckung beginnt die Gewinnung von Penicillin in großen Mengen. Die Amerikaner nutzen Penicillin im 2. Weltkrieg als Antiinfektivum für ihre verwundeten Soldaten. Die bahnbrechende Wirkung, erstmals pharmakologisch letale Infektionen verhindern zu können, brachte dem Penicillin den Beinamen „yellow magic“ ein. Wie in Abbildung 3 zu sehen, wurde der Erfolg Medienwirksam genutzt.



Abbildung 3: Werbeplakat der Schenley Laboratories: „Thanks to Penicillin he will come home“ (11)

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Schimmel Definition

Schimmel ist eine historisch gewachsene Begrifflichkeit und wird in verschiedenen Quellen unterschiedlich verwendet. Daher ist eine genaue Definition nur schwierig festzulegen.

Der Begriff Schimmel stammt aus dem Mittelhochdeutschen und wurde erstmals im 9. Jahrhundert als „Schimel“ erwähnt und für sichtbare, mit Feuchtigkeit in Verbindung gebrachten Flecken auf Materialien verwendet.

Heute wird der Begriff Schimmelfall weiter gefasst und neben den Schimmelpilzen als Leitorganismus, werden sowohl Aktinobakterien, Hefen, Protozoen und Milben unter dem Überbegriff zusammengefasst. (12)

Im Folgenden wird exemplarisch auf zwei Definitionen von Schimmelpilzen eingegangen. Kück et al. definieren Schimmelpilze über die Fähigkeit zur Bildung asexueller Sporen, saprophytischem und filamentösem Wachstum sowie ihrem ubiquitären Vorkommen. (13)

Fiedler und Wilhelm dagegen definieren Schimmelpilze wie folgt:

*„Schimmelpilze“ stellen keine taxonomisch klar definierte Einheit von Pilzen dar. (...) Unter dem Begriff Schimmelpilze werden folgende Organismen und biologische Strukturen zusammengefasst:*

- *Kultivierbare und nicht (mehr) kultivierbare Sporen und Konidien*
- *Myzel- und Hyphenfragmente*
- *Zellbestandteile*
- *Im weiteren Sinne auch Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen“ (14)*

Ein kurzer Exkurs in die Systematik der Pilze soll die Vielfalt der Schimmelpilze aufzeigen. Die Gruppe der Pilze besteht aus Oomycota (Algenpilze), Mycetozoa (Schleimpilzen) und Eumycota. Dabei handelt es sich nicht um eine monophyletische Gruppe, sondern um nicht näher verwandte Gruppen. (15) Im Folgenden wird ausschließlich auf Pilze aus der Gruppe der Eumycota eingegangen. Abbildung 4 soll zeigen, in welchen Gruppen zusätzlich Schimmelpilze vorkommen.

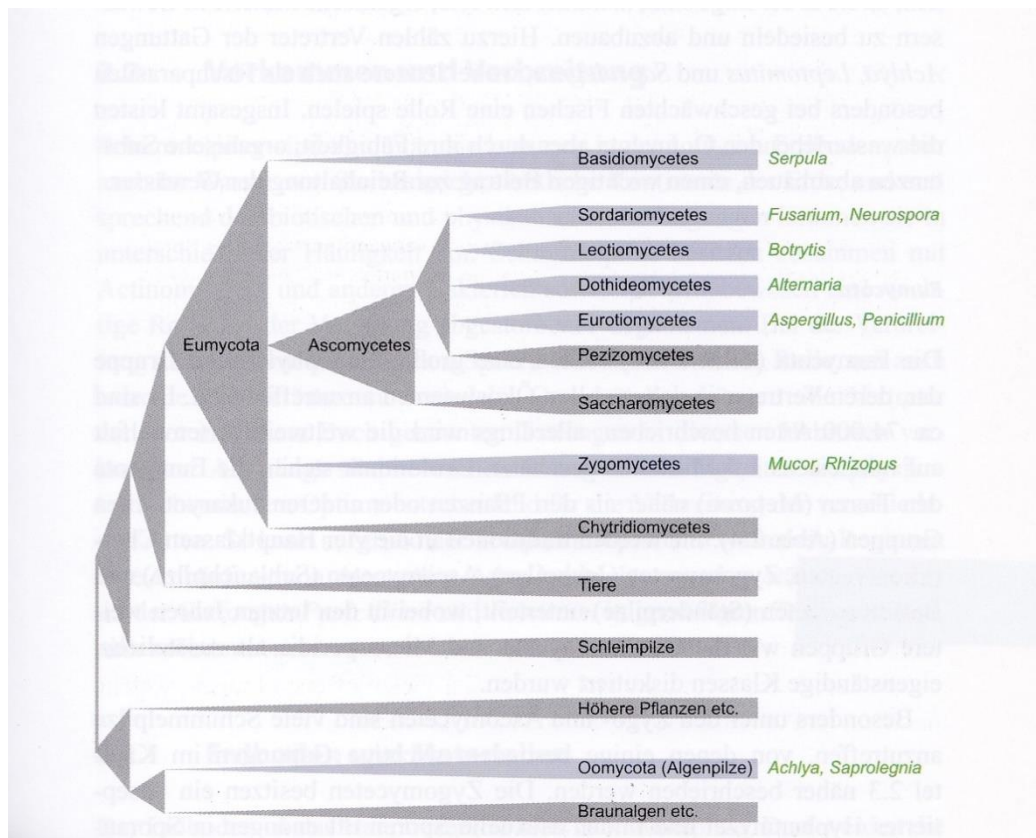


Abbildung 4: Schimmelpilze kommen in Verschiedenen systematischen Gruppen vor (15)

Schätzungsweise fallen unter die Eumycota 1,5 Millionen Arten. Diese unterteilen sich wiederum in vier Hauptklassen:

- Chytridiomyceten (Töpfchenpilze),
- Zygomyceten (Jochpilze),
- Ascomyceten (Schlauchpilze),
- Basidomyceten (Ständerpilze).

Zahlreiche Schimmelpilze finden sich unter den Zygomyceten und Ascomyceten. Für Zygomyceten ist ein unseptiertes Myzel und asexuelle Sporen, die aus Sporangien abgeschnürt werden, typisch. Ascomyceten besitzen ein septiertes Myzel und Konidiosporen. (16) Die zur Verbreitung der Schimmelpilze genutzten Sporen stammen in großer Zahl aus der asexuellen Vermehrung. Seltener bilden Schimmelpilze sexuelle Verbreitungsorgane in Form von Zygosporien und Ascosporen. Die Größe der Sporen liegt zwischen 2 - 30  $\mu\text{m}$ , sie werden windgetragen über große Strecken transportiert. (17) Daher gehören Schimmelpilzsporen zur natürlichen Umgebung. Deren Anzahl schwankt nach klimatischen Bedingungen zwischen 150  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter und 500  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Sommer. (18)

## 2.2 Spezies

### 2.2.1 Alternaria sp.

Der Ascomycet *Alternaria* besteht aus ca. 300 verschiedenen Arten. Die meisten sind Pflanzenpathogene. Die saprophytischen Arten kommen überwiegend im Erdboden vor. Gemeinsam ist allen Arten die grünbraune Färbung des Myzels, an dem sich die Konidiosporen mehrteilig und aneinandergereiht befinden. Auf Lebensmitteln bilden zahlreiche Arten Mykotoxine. (19) Für humanpathogene Spezies sind Hautinfektionen, chronische Sinusitiden sowie zahlreiche allergen wirkende Stoffe beschrieben. (20) *Alternaria* zeichnet sich durch ein schnelles Wachstum binnen fünf Tagen aus. Ein Wachstum findet bei Temperaturen von bis zu 30°C statt. (21) Die Kolonie wächst zumeist dunkelgrün bis dunkelbraun mit einem hellen Rand. Die Rückseite ist schwarz.

Mikroskopisch imponieren die braunen keulenförmigen Konidien, die in Abbildung 5 zu sehen sind. In den Konidien gibt es längs und quer verlaufende Septierungen. Sie sind entweder einzeln oder kettenförmig angeordnet. (22)



*Abbildung 5: Alternaria sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme)*

### 2.2.2 Aspergillus sp.

Die Gattung *Aspergillus* gehört zu den Ascomyceten. Umgangssprachlich werden Aspergillen auch als Gießkannenschimmel bezeichnet. Aspergillen werden in der Industrie vielfältig genutzt, beispielsweise als Modellorganismus in der Forschung, in der Lebensmittelindustrie zur Fermentation oder zur Herstellung von Statinen. (23) Von über 200 *Aspergillus* Arten sind ca. 20 medizinisch relevant. (24) Bei Aspergillosen handelt es sich um opportunistische Infektionen bei immunsupprimierten Personen. Invasive Aspergillosen sind häufig bei Transplantierten, Knochenmarktransplantierten und Krebspatienten zu finden. Des Weiteren sind Aspergillen häufig mit Allergien vergesellschaftet. (25) Die meisten Spezies sind schnellwachsend und reifen in drei Tagen aus. Makroskopisch sind die Kolonien flauschig. Zunächst sind sie weiß und werden schließlich gelb, grün bis hin zu schwarz. Die Rückseite ist weiß bis braun.

Mikroskopisch sind die Hyphen septiert, besitzen Konidophoren, Phialidien und die daraus entstehenden Konidien, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Die Konidien hängen kettenförmig aneinander. (26)

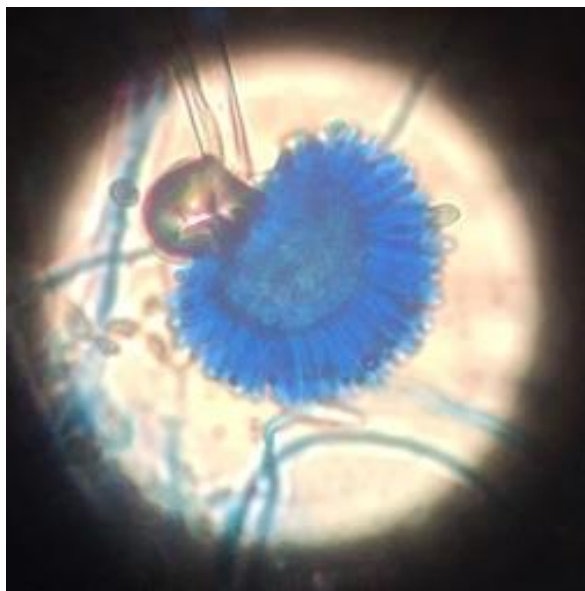


Abbildung 6: *Aspergillus* sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme)

### 2.2.3 Cladosporium sp.

Cladosporien gehören zur Klasse der Dothideomycetes. Diese sind häufig in sumpfigen Gebieten, Wäldern und Gärten anzutreffen. An diesen Orten machen sie bis zu 90% der außenluftgetragenen Schimmelpilze aus. (27)

Beim Wachstum entstehen charakteristische MVOCs, die den typisch muffigen Schimmelgeruch ausmachen. In Stockflecken, Fließenfugen und Tapeten sind Cladosporien häufig zu finden. (28)

Cladosporien reifen in sieben Tagen bei 25°C, nur vereinzelte Arten wachsen bei 37°C. Die Kolonie erscheint grün-braun bei einer schwarzen Rückseite. Die Hyphen sind septiert und bräunlich pigmentiert, die Konidophoren sind unterschiedlich lang, teilweise verzweigt und bilden rund-ovale Konidien aus. (29)

Abbildung 7 zeigt Cladosporium unter dem Mikroskop.



*Abbildung 7: Cladosporium sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme)*

#### 2.2.4 Penicillium sp.

Penicillium, auch als Pinselschimmel bezeichnet, gehört zur Gattung der Ascomyceten. Anhand der Morphologie lassen sich 235 verschiedene Penicillium Arten differenzieren. In der Regel kommt Penicillium in gemäßigten Klimazonen vor und bevorzugt ein kühleres Klima. Einige Arten besitzen die Fähigkeit zur sexuellen Vermehrung. Im Erdboden lassen sich Penicillien auch in tieferen Bodenschichten finden. In der Lebensmittelproduktion, sowie der Antibiotikaproduktion wird Penicillium eingesetzt. (30)

Bei mittlerem Feuchtigkeitsanspruch wächst Penicillium auf Baumaterial, verrottenden Pflanzen und Lebensmitteln. (31)

Die Kolonien wachsen binnen vier Tagen, die meisten Arten wachsen nicht bei Temperaturen um 37°C. Zunächst wächst die Kolonie weiß und schließlich blaugrün mit weißem Rand. Dabei besitzen die unterschiedlichen Spezies eine große Variabilität.

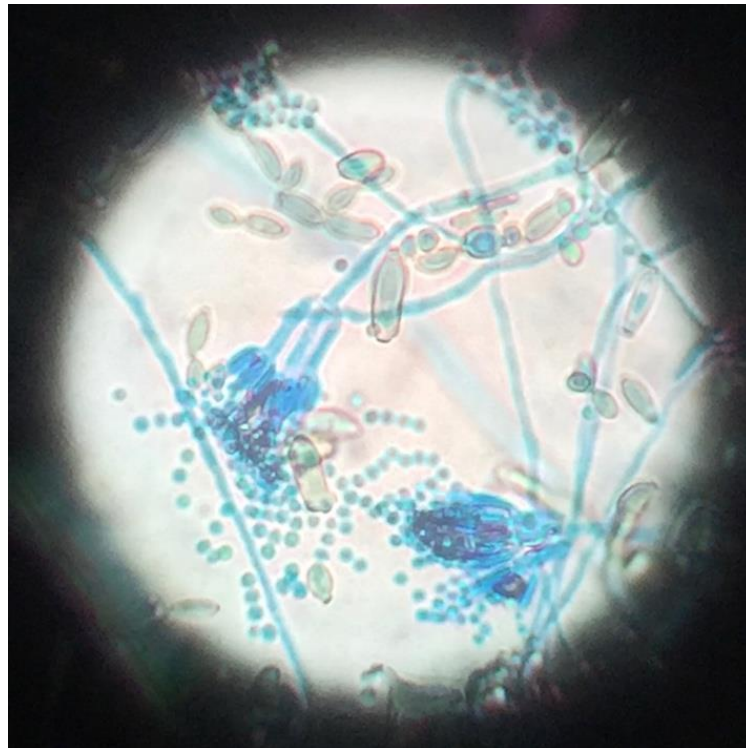


Abbildung 8: Penicillium sp. unter dem Mikroskop (eigene Aufnahme)

Mikroskopisch imponieren die septierten Hyphen, wie in Abbildung 8 zu sehen. Das pinselartige Aussehen kommt durch die Metula und die sich an den Philaden befindenden Konidiosporen zustande. (32)

### 2.2.5 Rhizopus sp.

Rhizopus gehört zur Klasse der Zygomyceten (Jochpilze). Im Substrat verankert sich Rhizopus über Rhizoidhyphen, an denen aufrechtstehende Sporangienträger mit blauschwarzen Sporangien ansetzen. Es handelt sich um einen auf Lebensmitteln und im Boden wachsenden Keim, der durch seine große Verbreitung häufig in Luftproben zu finden ist. (33)

Rhizopus ist binnen 4 Tagen schnellwachsend und viele Arten wachsen bei Temperaturen von 37°C.

Makroskopisch bilden sich dichte Kolonien, die durch Zuckerwatte-ähnliches Aussehen auffallen. An der Oberfläche sind die Kolonien zunächst weiß, dann grau bis gelbbraun. Die Unterseite ist grau bis braun.

Wie in Abbildung 9 zu sehen ist, fallen in der Mikroskopie die langen Sporangioophoren mit den dunkel pigmentierten Sporangien auf. An deren Basis sind wurzelartige Gebilde, die sogenannten Rhizoiden zu finden. Das Myzel ist unseptiert. (34)



*Abbildung 9: Rhizopus unter dem Mikroskop  
(eigene Aufnahme)*

### 2.2.6 Steriles Myzel

Unter Laborbedingungen bilden manche Pilze lediglich Hyphen. An diesen lässt sich keine Differenzierung feststellen, so dass makroskopisch und mikroskopisch keine Bestimmung möglich ist. (35)

## 2.3 Messstrategie

### 2.3.1 Allgemeines

Bei der Messung von luftgetragenen Schimmelpilzsporen können, je nach Fragestellung, entweder aktive oder passive Sammelmethoden angewandt werden.

Passive Messmethoden sind gravitationsbedingt und begünstigen größere Zellbestandteile. Diese lassen somit weniger auf die Gesamtbelastung der Luft schließen.

Bei aktiven Messungen wird ein bestimmtes Luftvolumen angesaugt und über einen Filter auf ein flüssiges Nährmedium (Impinger) oder auf ein Feststoffmedium (Impaktion) beaufschlagt.

Anees-Hill et al. untersuchten in einem systematischen Review luftgetragene Schimmelpilzsporen in Studien von 1987 bis 2020, dabei wurden 74 Studien inkludiert. Von diesen 74 betrachteten Studien wurden bei 65 das Impaktionsverfahren angewandt. Zur Pilzbestimmung wurde in 70 Studien, also 95%, die Lichtmikroskopie angewandt. Lediglich in 5% fand eine genbasierte Keimbestimmung statt. (36)

### 2.3.2 Vorgaben

Als Messverfahren wurde die Impaktion festgelegt. Zur Durchführung von Messungen in der Außenluft gibt es kein standardisiertes Verfahren. Gemäß der *DIN EN ISO 16000-19 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 19: Probennahmestrategie für Schimmelpilze* ist bei Innenraummessungen eine vergleichende Messung der Außenluft vorgesehen. (37) Deshalb wurde sich an den von der DIN definierten Verfahren der Innenluftverunreinigungen orientiert.

Unter einer Vielzahl von Methoden zur Bestimmung von Schimmelpilzen wird die größte Bedeutung der morphologischen und mikroskopischen Bestimmung zugeschrieben. Bei der Untersuchung von Raumluftproben wird je nach Fragestellung eine mehr oder weniger spezifische Bestimmung durchgeführt. In der DIN EN ISO 16000-19 wird für Kurzzeitmessungen das Impaktionsverfahren bevorzugt angewendet. Die Messdauer sollte eine Minute und ein Luftvolumen von 50 l nicht unterschreiten. Als Probenentnahmehöhe wird 0,75 Meter bis 1,5 Meter empfohlen. (38)

Die Impaktion beschreibt das Ansaugen eines definierten Luftvolumens über ein Medium. Auf Grund der Masseträgheit werden die Sporen auf dem Medium, bzw. einer

Agarplatte fixiert, wohin gegen die Luft ausgeleitet wird. Es werden Sporen in einer Größe von 1 bis 30 µm nachgewiesen. (39)

Zur Kultivierung und Bestimmung der Schimmelpilze wurde sich an der *DIN ISO 16000-17 Innenraumluftverunreinigungen – Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Kultivierungsverfahren* orientiert.

Als Agar wurde je eine MEA und eine DG18 Platte mit einem Durchmesser von 9 cm verwendet und bei  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  mit der Oberseite nach oben inkubiert. Die Agarplatten wurden im Zeitraum von zwei bis sieben Tagen mehrfach inspiziert, um den optimalen Zeitpunkt des Bewuchses zur Auswertung festzustellen. Diese fand ausschließlich auf dem am besten auszuwertenden Nährmedium statt. Die Bestimmung erfolgte anhand makroskopischer und mikroskopischer Eigenschaften. (40)

### 2.3.3 Messverfahren

Durch Messungen in einer Aerosolkammer verglichen Hass et al. die aktive Impaktion mit der passiven Sedimentation. Als Modellorganismen nutzen sie hierfür *Aspergillus niger* und *Staphylococcus aureus*. Für *A. niger* wurden bei der Impaktion nicht signifikant höhere Werte als bei der Sedimentation festgestellt. Es wird vermutet, dass der durch die Impaktion ausgelöste Stress auf *Aspergillus niger* keine Relevanz besitzt. Des Weiteren wurde das Wachstum auf MEA und DG18 Agar miteinander verglichen, auch hier bestand kein signifikanter Unterschied. (41)

Die Ergebnisse ließen sich im Feldversuch von Canha et al. bestätigen. Hier wurden ebenfalls aktive und passive Messungen miteinander verglichen. Die Gruppe um Canha untersuchte in der Innenluft von portugiesischen Grundschulen, jeweils eine im ländlichen und eine im urbanen Umfeld gelegen, die Konzentrationen von Schimmelpilzen, Bakterien und Pollen. Referenzmessungen der Außenluft fanden ebenfalls statt. Bakterien und Schimmelpilze wurden hier gemeinsam auf CRBA (Rose Bengal CAF Agar) und TSA (Trypton Soja Agar) beprobt. Hierfür wurde als Luftkeimsammler ein MAS 100 Eco in einer Höhe von 120 cm mit 100 l über eine Minute verwendet. Bei der passiven Methode wurden beide Agar für 15 min beprobt.

Die qualitativen Ergebnisse der passiven Messung korrelierten mit der aktiven Messung. Die Keimbelastung im Sommer war stets höher als die im Winter. Aussagen zur absoluten Höhe der Keimbelastung, bzw. der Unterschiede zwischen den städtischen und ländlichen Messungen, werden nicht getroffen. (42)

## 2.3.4 Konzentrationen und Spezies

Die Konzentration von Schimmelpilzen in der Außenluft schwankt über den Jahresverlauf. Die Konzentrationsangaben variieren in verschiedenen Quellen deutlich. Sporenkonzentrationen von  $\frac{150}{\text{m}^3}$  im Winter und  $\frac{500}{\text{m}^3}$  im Sommer geben Jansen und Pietzsch an. (2) Fiedler und Wilhelm nennen Unterschiede von  $100 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter und im Sommer  $2000 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Die Arten *Alternaria*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Epicoccum* treten in Zusammenhang mit der Vegetation in der Außenluft auf. Als ubiquitärer Bodenzpilz ist *Aspergillus* in geringen Konzentrationen von 5 bis  $10 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  anzufinden. (43)

In einer Untersuchung von Koch et al. wurden Staubproben aus Wohnungen in den Städten Hamburg und Erfurt miteinander verglichen. In Referenzproben der Außenluft konnte kein Unterschied in der Konzentration und im Keimspektrum zwischen den Städten festgestellt werden. Abbildung 10 zeigt monatsweise die Keimbelastung der Außenluft in Erfurt an.

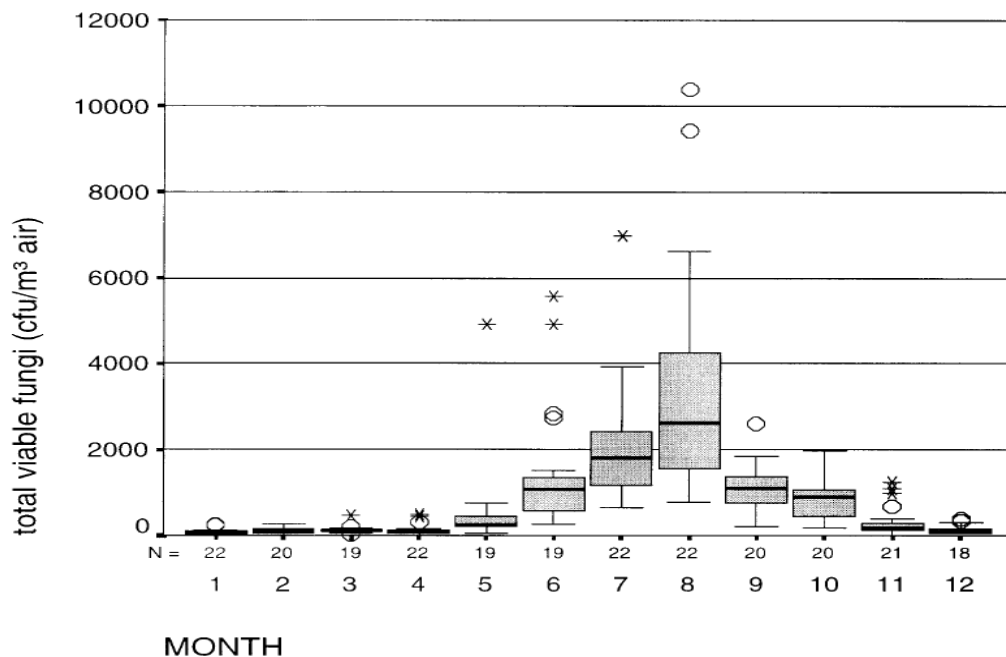


Abbildung 10: Monatlicher Vergleich der Schimmelpilze in der Außenluft in Erfurt (43)

Es wurden die Genera *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* und *Penicillium* gefunden. Es zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der ermittelten Keimzahl in der Außenluft und der des Staubes in den Innenräumen. Die höchste Keimzahl sowohl der Innenraumluft, wie auch der Außenluft wurde im August gemessen. (44)

Die Landesanstalt für Umwelt des Landes Baden-Württemberg hat die Konzentration von Schimmelpilzen in der Außenluft über das Jahr 2005 untersucht. Dies ist in Ab-

bildung 11 zu sehen. Gemessen wurde in Karlsruhe am Vorplatz des UMEG in der Nähe einer Gartenabfallannahmestelle mittels Gelatine/Polycarbonat Filtern. Die Konzentrationen waren im Jahresverlauf ansteigend. Im Januar und Februar wurden Werte zwischen 200 bis 700  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen. Im April, Mai und August stieg die Keimzahl auf 300 bis 1000  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Die höchsten Werte wurden im Oktober und November mit 4000 bis 7000  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  erreicht.

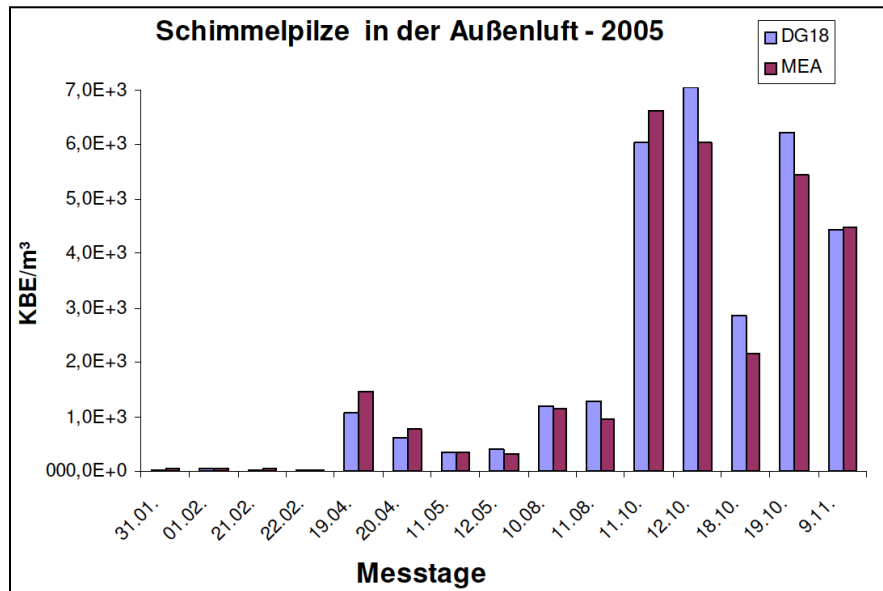


Abbildung 11: Jahreszeitlicher Verlauf der Gesamtschimmelpilze in der Außenluft am UMEG-Vorplatz (44)

Abbildung 12 zeigt die Konzentrationen der Schimmelpilzgattungen. Bestimmt wurden die Arten Aspergillus, Cladosporium und Penicillium. Auf die Konzentrationen von Alternaria, Eurotium und Hefen wurden auf Grund ihrer geringen Anzahl nicht weiter eingegangen. (45)

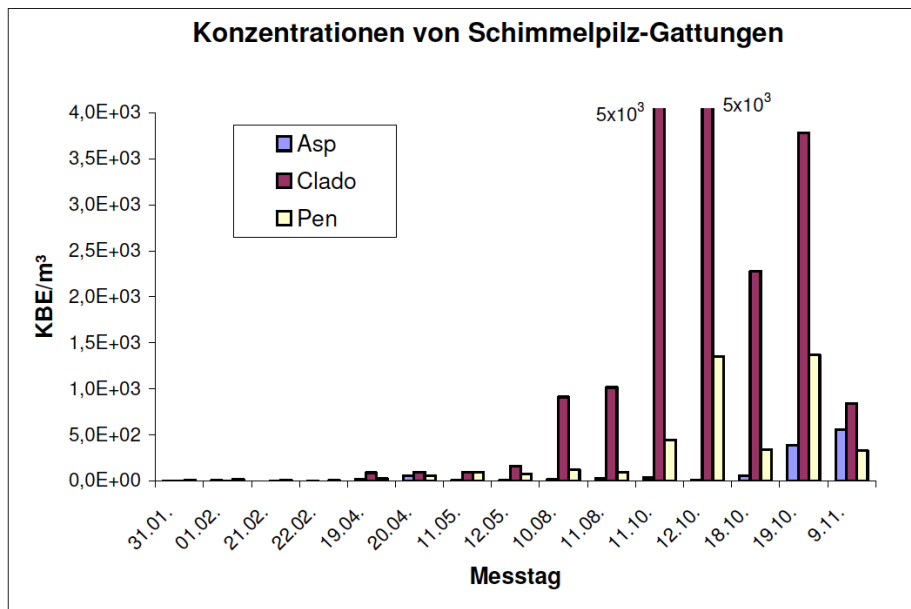


Abbildung 12: Jahreszeitlicher Verlauf von Aspergillus (Asp), Cladosporium (Clado) und Penicillium (Pen) auf DG18 in der Außenluft am UMEG-Vorplatz (45)

Segvić, Klarić und Pepeljnjak stellten in einer Untersuchung im Großraum Zagreb ähnliche Ergebnisse fest. Mittels Impaktionsverfahren wurden über einen Zeitraum von einem Jahr Proben in der Innenstadt von Zagreb, dem botanischen Garten und im bergigen Medvednica Nationalpark untersucht. Die höchsten Werte wurden im Sommer mit 110 bis 284  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und die kontinuierlich geringste Konzentration in der Bergregion gemessen. Alternaria, Cladosporium und Penicillium machten 30,4 bis 79,6% aller gefundenen Keime aus. Die übrigen Keime waren Aspergillus, Fusarium und sterile Myceten mit Werten von 11,1 bis 44%. (46)

Einen Vergleich zwischen den Regionen Mecklenburg- Vorpommern (ländlich), Berlin (Ballungsgebiet) und Baden-Württemberg (gemischt) untersuchte Trautmann in der 2005 veröffentlichten Studie „Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in der Luft“. Hierbei wurden 80 Wohnungen und die dazugehörige Außenluft von Angestellten des öffentlichen Dienstes im Winter (Januar bis März 2003) und im Sommer (Juni bis September 2003) untersucht. Gemessen wurde mittels eines Impaktionsverfahren mit einem MAS 100 Luftkeimsammler. Die verwendeten Volumina betragen 50 und 100 Liter, bzw. im Winter 200 Liter Luft, als Nährmedien wurden DG18 und MEA verwendet. Es wurde festgestellt, dass zwischen den Regionen nur leichte Abweichungen um die Medianwerte herum bestanden, sodass diese Werte zusammengefasst wurden. Die Tabelle 1 zeigt die Nacheishäufigkeit für kultivierbare Pilze in Koloniebildenden Einheiten pro Kubikmeter für den Winter und Tabelle 2 die Kultivierba-

## Literaturdiskussion

ren Pilze in Koloniebildenden Einheiten pro Kubikmeter für den Sommer an. Hierbei wird der Median (M), das 95. Perzentil und der Maximalwert (Max.) der Messergebnisse wiedergegeben.

Tabelle 2: Winter: Nachweishäufigkeit kultivierbarer Pilze in KBE/m<sup>3</sup> (47)

Pilze	Außenluft			
	M	95. P	Max	%
<i>Acremonium</i> spp.	0	0	5	3
<i>Alternaria</i> spp.	0	10	220	28
<i>Aspergillus flavus</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus fumigatus</i>	0	65	100	11
<i>Aspergillus nidulans</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus niger</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus ochraceus</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus penicillioides</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus restrictus</i>	0	0	60	1
<i>Aspergillus sydowii</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus versicolor</i>	0	0	70	1
<i>Aspergillus ustus</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus</i> spp.	8	20	40	81
Summe <i>Aspergillus</i>	10	81	130	84
<i>Aureobasidium</i> spp.	0	0	5	3
<i>Botrytis cinerea</i>	5	20	40	54
<i>Chaetomium</i> spp.	0	0	5	1
<i>Cladosporium</i> spp.	50	337	1060	98
<i>Engyodontium album</i>	0	0	0	0
<i>Eurotium amstelodamii</i>	0	2	110	5
<i>Eurotium herbariorum</i>	0	0	0	0
<i>Eurotium</i> spp.	10	30	60	85
Summe <i>Eurotium</i>	10	41	125	86
<i>Fusarium</i> spp.	5	40	300	75
<i>Mucor</i> spp.	0	5	10	6
<i>Rhizopus</i> spp.	0	5	50	6
Andere <i>Mucorales</i>	0	5	20	14
<i>Paecilomyces</i> spp.	0	0	5	1
<i>Penicillium brevicompactum</i>	0	80	3000	6
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0	2	355	5
<i>Penicillium expansum</i>	0	0	1140	4
<i>Penicillium glabrum</i>	0	0	0	0
<i>Penicillium olsonii</i>	0	0	55	4
<i>Penicillium</i> spp.	15	50	60	94
Summe <i>Penicillium</i>	20	217	3000	98
<i>Phialophora</i> spp.	0	0	0	0
<i>Scopulariopsis</i> spp.	0	0	0	0
<i>Stachybotrys chartarum</i>	0	0	0	0
<i>Trichoderma</i> spp.	0	0	20	0
<i>Wallemia sebi</i>	5	45	1140	67
Sterile Myzelien	5	80	300	54
Andere Spezies	8	26	440	85
Hefen spp.	5	115	280	67
Summe untypische Außenluft spp.	80	488	3040	96

Tabelle 1: Sommer: Nachweishäufigkeit kultivierbarer Pilze in KBE/m<sup>3</sup> (47)

Pilze	Außenluft			
	M	95. P	Max	%
<i>Acremonium</i> spp.	0	0	10	1
<i>Alternaria</i> spp.	20	80	140	77
<i>Aspergillus flavus</i>	0	20	40	32
<i>Aspergillus fumigatus</i>	10	45	100	79
<i>Aspergillus nidulans</i>	0	20	40	14
<i>Aspergillus niger</i>	10	40	120	65
<i>Aspergillus ochraceus</i>	0	20	60	9
<i>Aspergillus penicillioides</i>	0	0	10	1
<i>Aspergillus restrictus</i>	0	0	10	1
<i>Aspergillus sydowii</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus ustus</i>	0	0	0	0
<i>Aspergillus versicolor</i>	0	20	20	15
<i>Aspergillus</i> spp.	0	20	20	10
Summe <i>Aspergillus</i>	35	109	260	87
<i>Aureobasidium</i> spp.	0	0	0	0
<i>Botrytis cinerea</i>	0	20	20	9
<i>Chaetomium</i> spp.	0	0	0	0
<i>Cladosporium</i> spp.	980	4155	5600	82
<i>Eurotium amstelodamii</i>	0	0	60	1
<i>Eurotium herbariorum</i>	0	0	60	3
<i>Eurotium</i> spp.	0	29	40	48
Summe <i>Eurotium</i>	10	39	120	51
<i>Fusarium</i> spp.	80	200	500	96
<i>Engyodontium album</i>	0	0	0	0
<i>Mucor</i> spp.	0	20	20	23
<i>Rhizopus</i> spp.	0	20	20	42
Andere <i>Mucorales</i>	0	0	0	0
<i>Paecilomyces</i> spp.	0	10	40	11
<i>Penicillium brevicompactum</i>	0	49	120	25
<i>Penicillium chrysogenum</i>	0	20	60	21
<i>Penicillium expansum</i>	0	20	40	23
<i>Penicillium glabrum</i>	0	0	20	4
<i>Penicillium olsonii</i>	0	58	80	37
<i>Penicillium</i> pp.	20	98	400	70
Summe <i>Penicillium</i>	50	160	420	91
<i>Phialophora</i> spp.	0	0	0	0
<i>Scopulariopsis</i> spp.	0	0	0	0
<i>Stachybotrys chartarum</i>	0	0	0	0
<i>Trichoderma</i> spp.	0	20	20	11
<i>Wallemia sebi</i>	0	19	60	6
Andere Spezies	0	20	60	28
Sterile Myzelien	0	20	20	8
Hefen spp.	20	2000	2000	62
Summe untypischer Außenluft spp.	130	280	440	100

Insgesamt wurden 40 verschiedene Pilzarten differenziert. Die Gesamtkeimzahl im Sommer liegt deutlich über der Gesamtkeimzahl des Winters. Eine Konzentrationszunahme für Cladosporium und Fusarium, sowie für Hefen, liegt im Sommer vor, wohingegen die Konzentrationen für Aspergillus und Penicillium über das Jahr ähnliche Konzentrationen aufwiesen. In den Wintermonaten wurde eine höhere Anzahl an sterilen Myceten gemessen (M  $5 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; Max.  $300 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; 95.P  $80 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei sterilen Myceten in 54% der 80 Proben). Im Sommer lagen die Werte hingegen deutlich geringer. (M  $0 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; Max.  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; 95.P  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei sterilen Myceten in 8% der 80 Proben). Eine Fehlbestimmung wurde auf Grund der akkreditierungskonformen Arbeitsweise und Qualitätssicherungsmaßnahmen ausgeschlossen.

Im Folgenden sind die 95. Perzentilen und der Median der einzelnen Gattungen gegenübergestellt.

Für Alternaria wurde im Sommer ein 95.P von  $80 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu  $10 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter gemessen. Der Median beträgt im Sommer  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und im Winter  $0 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

Für Aspergillus wurde im Sommer ein 95.P von  $190 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu  $81 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter gemessen. Der Median beträgt im Sommer  $35 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und im Winter  $10 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

Für Cladosporium wurde im Sommer ein 95.P von  $4155 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu  $337 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter gemessen. Der Median beträgt im Sommer  $980 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und im Winter  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

Für Penicillium wurde im Sommer ein 95.P von  $160 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu  $217 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter gemessen. Der Median beträgt im Sommer  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und im Winter  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

In der Mehrzahl der Proben wurden Cladosporium und Penicillium gemessen, sodass diese gut miteinander zu vergleichen waren. Abbildung 13 bildet den Jahresverlauf von Cladosporium spp. ab und Abbildung 14 für Penicillium. (47)

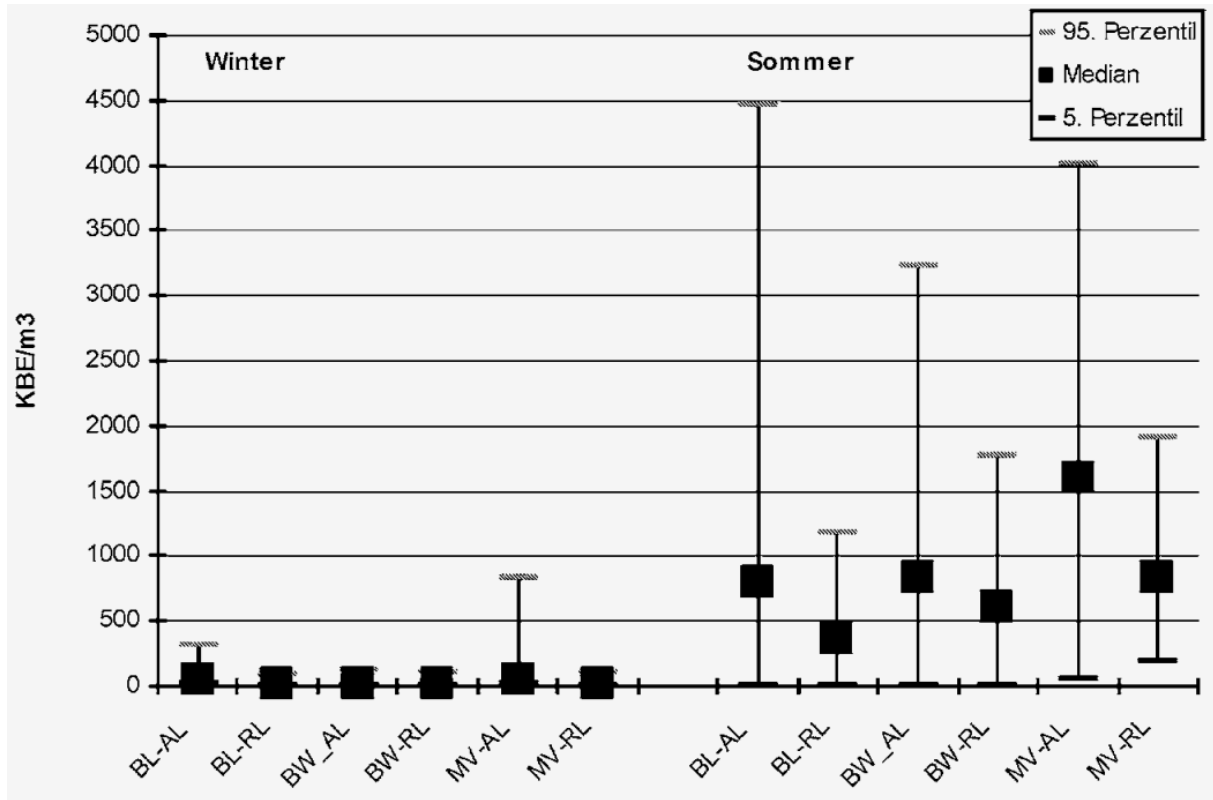


Abbildung 13: *Cladosporium* spp. in der Außen-/Innenraumluf über den Jahresverlauf (47)

AL: Außenluft; RL: Raumluf; BL: Berlin; BW Baden-Württemberg; MV Mecklenburg-Vorpommern

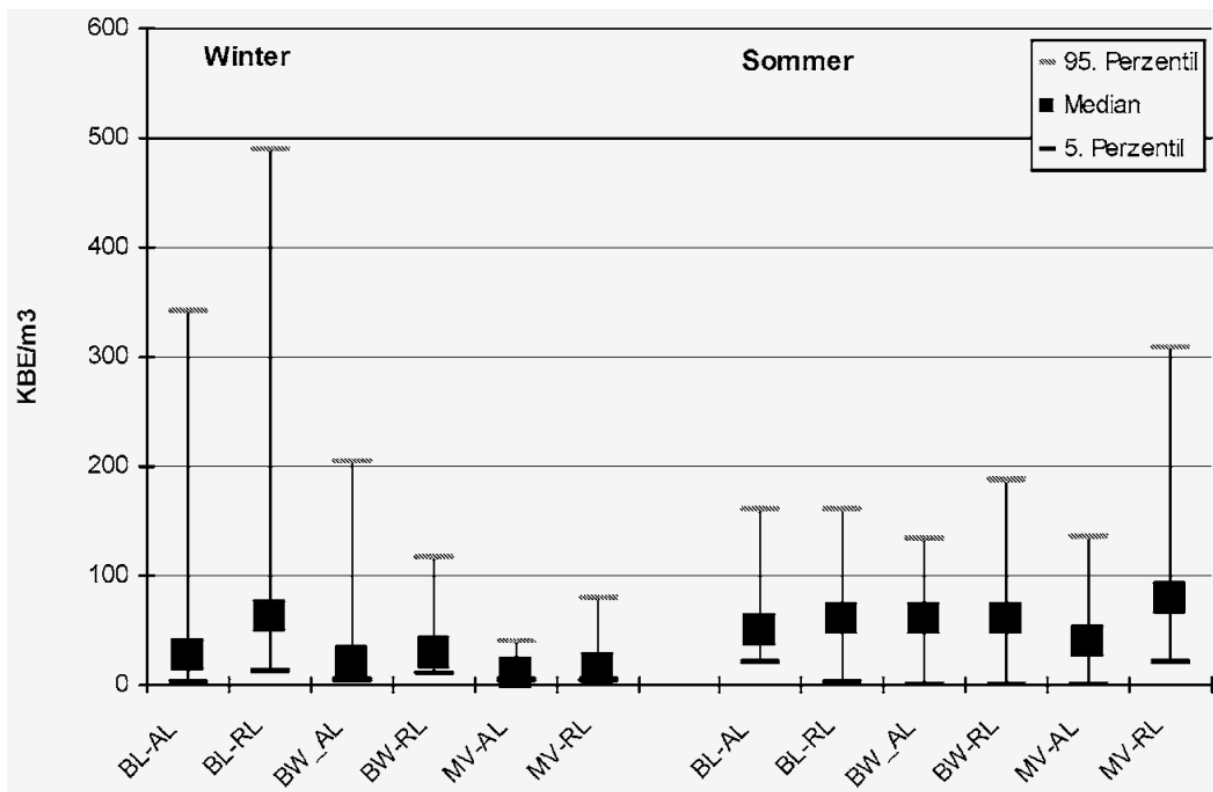


Abbildung 14: *Penicillium* spp. in der Außen-/Innenraumluf über den Jahresverlauf (47)

AL: Außenluft; RL: Raumluf; BL: Berlin; BW Baden-Württemberg; MV Mecklenburg-Vorpommern

Bei Cladosporium ähneln sich die Boxen insbesondere im Winter bei geringer Keimkonzentration stark. In den Sommermonaten zeigt sich eine etwas größere Spannweite. In der Berliner Raumluft ist eine Abweichung nach unten zu verzeichnen, wohingegen in der Mecklenburg-Vorpommern Außenluft eine Abweichung nach oben zu beobachten ist. Penicillium zeigt einen konstanteren Jahresverlauf, hier sind die Boxen sowohl im Winter wie auch im Sommer ähnlich.

Die Untersuchung „High diversity of fungi in air particulate matter“ aus dem Max Planck Institut für Chemie, den Instituten für Geowissenschaften und Botanik der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz untersuchte Luftproben auf Pilz-DNA. Die Messstelle befand sich auf einer Antenne 5 Meter oberhalb des Flachdaches des dreistöckigen Max Planck Instituts für Chemie. Über einen Zeitraum von einem Jahr wurde mit einem Filter, bei einer durchschnittlichen Messdauer von sieben Tagen und einem Luftvolumen von circa 3000 Kubikmetern, die auf Fieberglass-Filtern fixierte DNA bestimmt. Im nächsten Schritt wurden die Biodiversitätsindizes Shannon-Index, die daraus berechnete Evenness und Simpson-Index bestimmt. Zur groben Zusammensetzung der Luft wurden 64% Basidiomyceten, 34% Ascomyceten und 2% Fungi Incerate Sedis (früher Zygomyceten) bestimmt. Abbildung 15 zeigt die Zusammensetzung der Ascomyceten-Klassen.

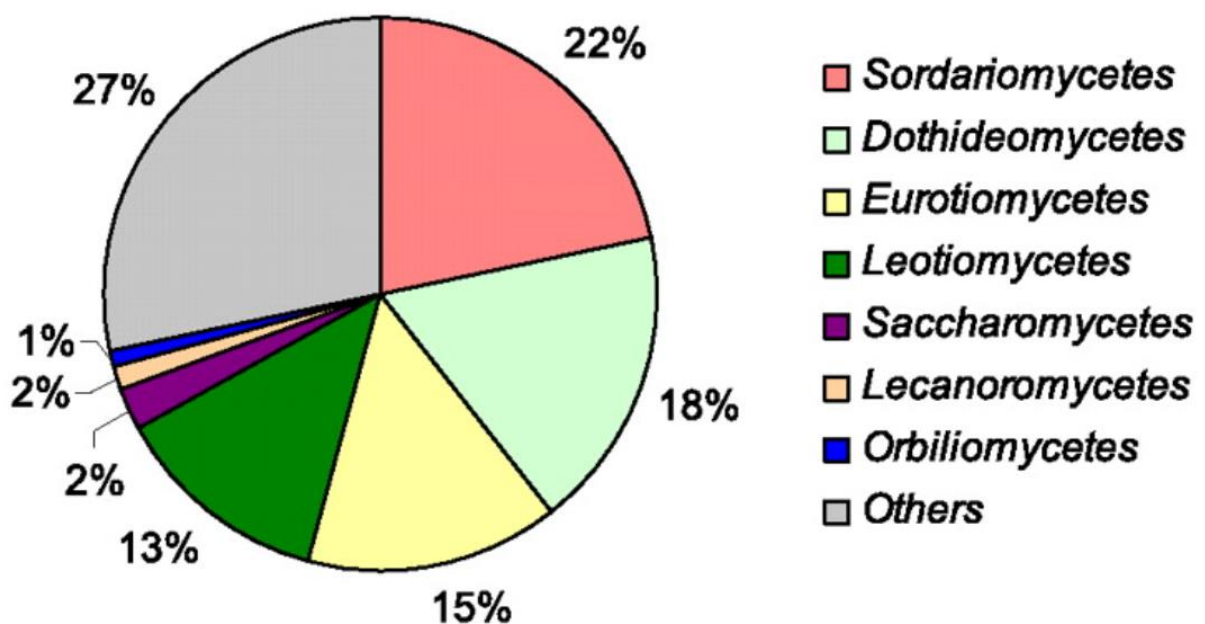


Abbildung 15: Prozentuale Verteilung der Ascomyceten (48)

Unter den bestimmten Ascomyceten machte die Klasse der Dothideomyceten 18% der gemessenen Keime aus. Zu den Dothideomyceten gehören die Spezies *Alternaria* und *Cladosporium*. Zu den 15% der gemessenen Eurotiomycetes gehören die Spezies *Aspergillus* und *Penicillium*.

Die relative Verteilung der Häufigkeit ausgewählter Spezies in den einzelnen Proben über den Jahresverlauf ist in Abbildung 16 abgebildet. Die insbesondere im Sommer am häufigsten auftretende Spezies ist *Cladosporium*, gefolgt von *Alternaria*. *Penicillium* hingegen tritt vermehrt in der kalten Jahreshälfte auf. (48)

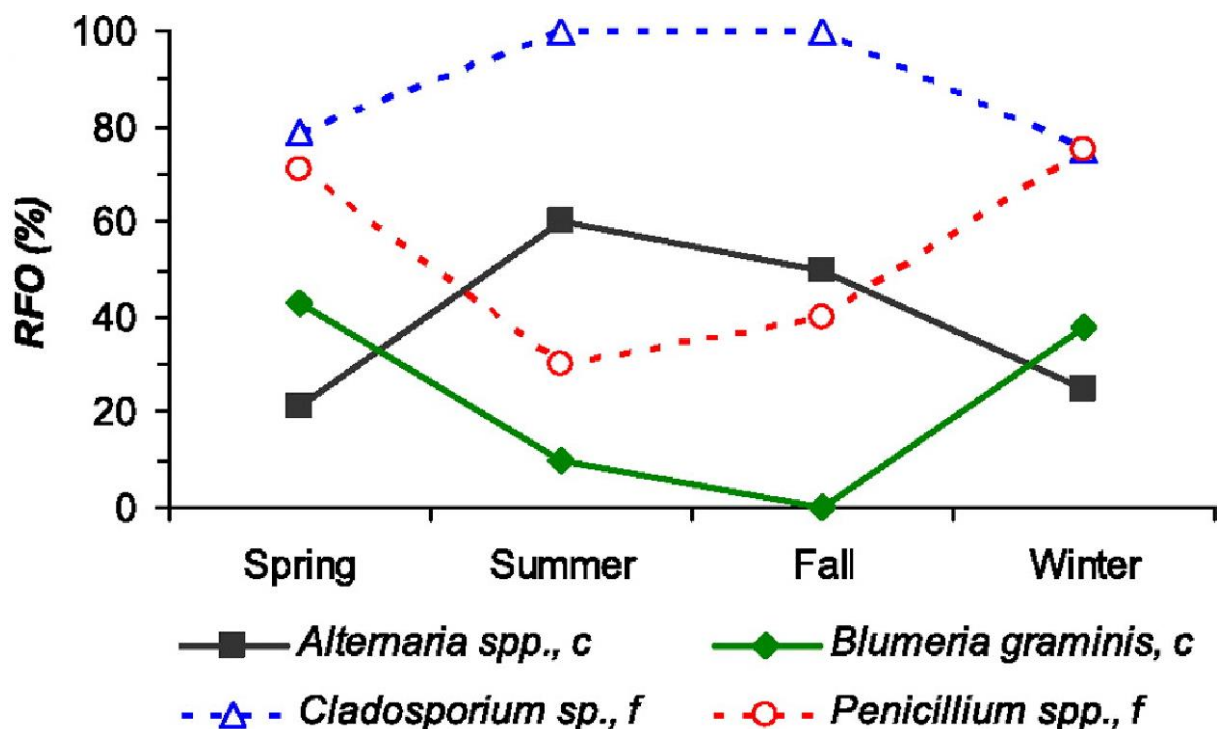


Abbildung 16: Relative Häufigkeit des Vorkommens einzelner Ascomyceten (48)

## 2.4 Siedlung

In einer weiteren Probenreihe des UMEG wurde der Einfluss der örtlichen Gegebenheiten auf die Schimmelpilzkonzentration in der Luft im Karlsruher Umfeld anhand von vier verschiedenen Messorten im Frühjahr, Sommer und Herbst 2003 untersucht. Es wurde jeweils an sechs Tagen pro Messabschnitt gemessen. Die Messung fand mittels Gelatine/Polycarbonat Filtern statt. Die örtlichen Gegebenheiten waren wie folgt:

- Ländlicher Messort: Wasserfläche, Felder, Wiesen
- Urbaner Messort: Durlacher Tor
- Emittentennaher Messort: Kompostsammelstelle
- Weiterer urbaner Messort: Karlsruher Zoo

Illustriert werden die Ergebnisse in Abbildung 17 a-c. Die höchsten Werte wurden in der Herbstmessung am 6. Oktober an allen vier Messorten gemessen und reichten von 8083 bis 13169  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Im Frühjahr und Sommer sind größere Unterschiede zwischen den Messstellen als im Herbst zu finden. Die Konzentrationen der urbanen Messstellen ähneln sich untereinander am meisten, wenn auch im Zoo niedrigere Werte gemessen wurden. Die Emissionen der Kompostsammelstelle scheinen keinen Einfluss auf die absolute Höhe der Schimmelpilzbelastung zu nehmen.

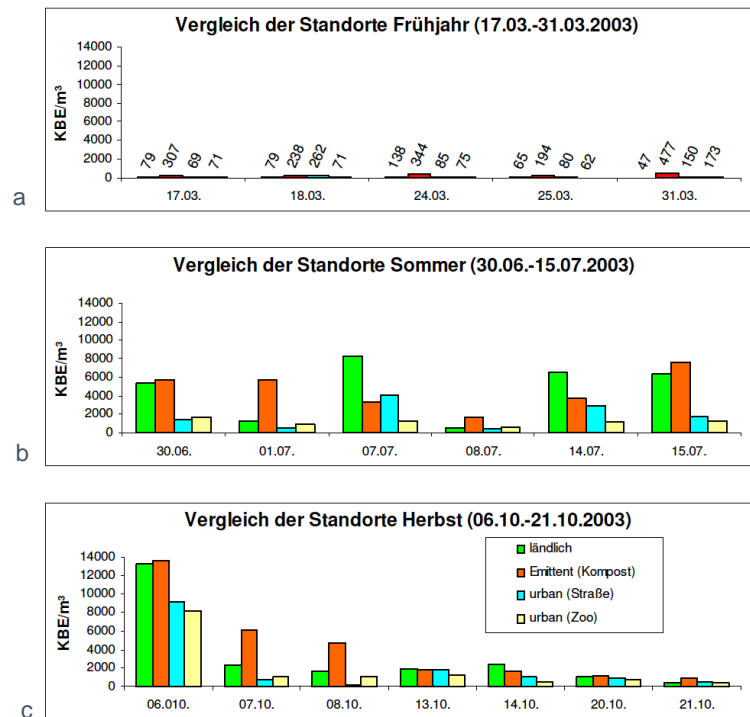


Abbildung 17: Vergleich der Schimmelpilzkonzentrationen verschiedener Standorte im Frühjahr (a), Sommer (b) und Herbst (c) (49)

Zur Differenzierung der Gattungen lässt sich zusammenfassen, dass am häufigsten Cladosporium gemessen wurde. Nur am Kompostplatz ist Aspergillus der dominierende Keim. Alternaria und Fusarium wurden mit kontinuierlich niedrigen Werten an allen Standorten über die Messzeiträume gemessen. Penicillium kommt in der Frühjahresmessung an allen vier Messorten gleichmäßig vor. (49)

## 2.5 Meteorologische Daten

Die Konzentration der Schimmelpilzsporen in der Außenluft hängt von den Wetterbedingungen ab. Im Sommer und zu Herbstbeginn, gelten nach Hitze und anschließendem Niederschlag die Werte als am höchsten, aber auch bei Trockenheit werden die Sporen durch den Wind verwirbelt. (50)

## Literaturdiskussion

Die klimatischen Bedingungen der im vorherigen Absatz erläuterten Messreihe des UMEG von 2003 sind in Tabelle 3 zu finden. Die mittlere Temperatur lag im Frühjahr zwischen 10 und 20°C, im Sommer zwischen 19 und 30°C und im Herbst zwischen 3 und 12°C. Die höchste Keimzahl wurde am 1. Tag der Herbstmessung festgestellt. Bei gleichen Temperaturen wurden im Frühjahr deutlich geringere Werte bestimmt. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit variierte an den Messstellen stark, dennoch korrelierte diese nicht mit der Keimzahl.

*Tabelle 3: Meteorologische Daten der Messtage über den Jahresverlauf (49)*

Datum	Mittlere Temperatur °C			Mittlere rel. Feuchte %			Meteorologie Raum Karlsruhe
	Ländl.	Emittent	Urban Z	Ländl.	Emittent	Urban Z	
17.03.-18.03.	9,7	9,5	11,0	52,8	-	49,9	sonnig, windstill
18.03.-19.03.	8,9	8,8	12,1	56,2	-	44,9	sonnig, windstill
24.03.-25.03.	14,4	10,9	16,9	45,7	35,3	43,2	sonnig, windstill
25.03.-26.03.	17,2	15,4	20,3	48,4	37,1	43,2	bewölkt, windstill
31.03.-01.04.	11,4	10,9	13,4	61,0	-	45,3	bewölkt, schwach windig
01.04.-02.04.	12,5	14,3	15,9	-	-	-	starker Regen, windig
30.06.-01.07.	-	25,8	-	66,5	64,4	65,8	Sonne, schwach windig
02.07.-03.07.	-	18,5	-	-	-	-	Regen, schwach windig
07.07.-08.07.	23,2	25,2	26,0	59,9	58,9	53,7	Sonnig, schwach windig
08.07.-09.07.	23,9	25,2	26,0	55,5	54,9	50,3	bewölkt, schwach windig
14.07.-15.07.	25,5	28,4	27,8	40,4	40,2	39,0	sonnig, windstill
15.07.-16.07.	27,3	30,2	29,8	38,7	43,2	37,3	sonnig, windstill
06.10.-07.10.	9,8	11,6	11,1	-	72,7	-	starker Regen, stürmisch
07.10.-08.10.	6,4	7,6	6,6	-	-	-	Regen, sehr windig
08.10.-09.10.	9,4	11,5	7,9	-	-	-	Sonnig, windig
13.10.-14.10.	9,1	11,2	11,5	74,8	68,1	67,1	sonnig, schwach windig
14.10.-15.10.	7,3	8,8	8,8	69,7	64,3	62,5	bewölkt, schwach windig
20.10.-21.10.	5,1	5,4	-	-	-	-	Regen, schwach windig
21.10.-22.10.	3,2	2,9	3,7	-	-	-	Regen, schwach windig

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Mainzer Messreihe

Die Messungen erfolgten einmal im Monat an fünf verschiedenen Außenluftmessstellen im Mainzer Stadtgebiet im Zeitraum vom 27.06.2018 bis zum 29.05.2019. Die Proben wurden im Labor der Abteilung für Hygiene und Infektionsprävention der Universitätsmedizin Mainz ausgewertet. Es wurde sich an der *DIN EN ISO 16000-18 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probennahme durch Impaktion* orientiert und auf die Besonderheiten der Außenluftmessungen angepasst.

Als Leitorganismen wurden kultivierbare Schimmelpilze bestimmt. (51)

Der Leitfaden *Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden* des Umweltbundesamts von November 2017 empfiehlt, für Innenraumluftgutachten eine Referenzbestimmung der Außenluftbelastung mit in die Analyse einzubeziehen, da diese über die Jahreszeit und Wohngegend variiert. (52)

Es wurden nur kultivierbare Schimmelpilze bestimmt. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Differenzierbarkeit der einzelnen Gattungen, der Nachteil hingegen liegt in der Nicht-Kultivierbarkeit einiger Pilzarten. (53)

Um die Gefahr der Kontamination des Labors durch Sporen zu verringern, fand die Bestimmung unter einer Sicherheitswerkbank Klasse 2 statt. (54)

#### 3.2 Probennahme Strategie

Die Messungen erfolgten jeweils in der 3. Woche des Monats. Die Probennahme konnte auf Grund der Wetterverhältnisse nicht genauer datiert werden. Voraussetzung für die Probengewinnung war das Nichtvorhandensein von Niederschlag. Die Messstellen wurden vormittags in gleicher Reihenfolge und etwa zur gleichen Uhrzeit angefahren und setzten sich wie folgt zusammen.

1. Grünfläche: Römerwall
2. Dichte Bebauung: Adam-Karrillon-Straße Ecke Leibnizstraße
3. Rheinufer: Stresemannufer
4. Lockere Bebauung: Weichselstraße 23
5. Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße

### 3.3 Wetterdaten

Schimmelpilzsporen besitzen meist einen Durchmesser von unter 10 µm und werden über weite Strecken in der Luft transportiert. (17) Daher ist es essenziell, bei der Messung die wettertechnischen Rahmenbedingungen zu bestimmen.

Vor Ort wurden unmittelbar vor der Probennahme mittels des Klima-Testgerätes „Testo 400“ die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit gemessen und dokumentiert. Dafür wurde der Mittelwert aus einer 10-sekündigen Messung verwendet.

Als Referenz zu den selbst erhobenen Klimadaten wurden die Daten der „Dienstleistungszentren Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz“ verwendet. Die genutzte Wetterstation befindet sich in Mainz-Marienborn. (55) Die hierbei erhobenen Daten der relativen Luftfeuchtigkeit, des mittleren Windes in 2,5m Höhe und der monatlichen Durchschnittstemperatur sind in Abbildung 18 zu sehen. (56)

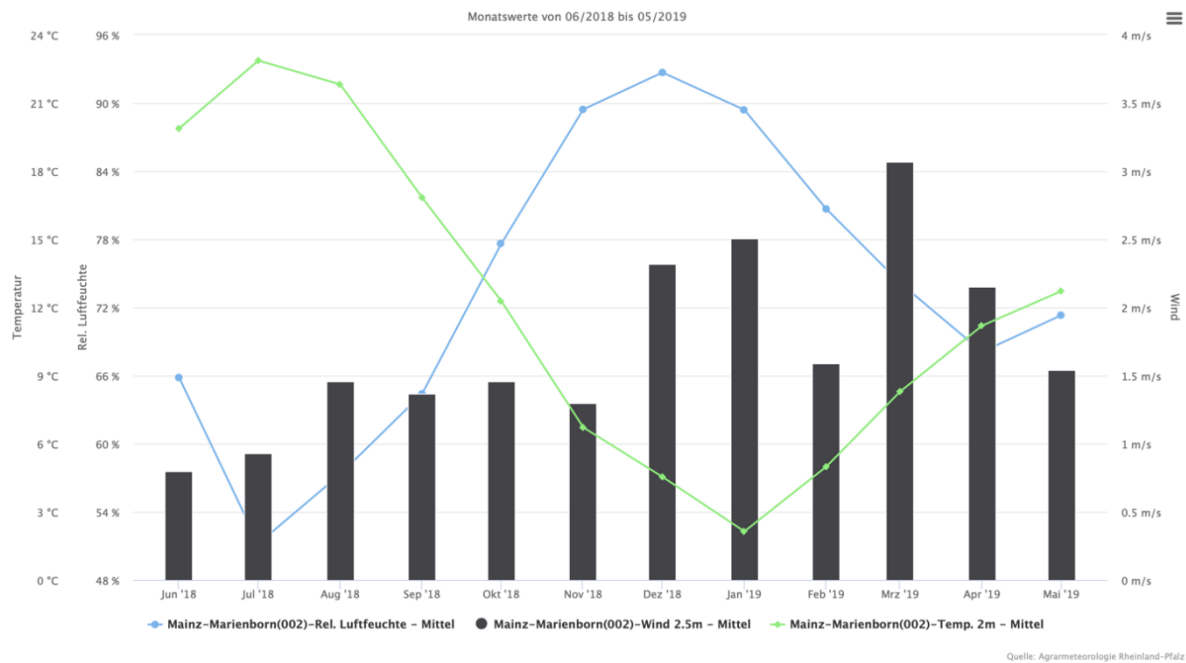


Abbildung 18: Meteorologische Daten Mainz Marienborn (56)

### 3.4 Luftkeimsammler

Die Proben wurden mittels des Lochimpaktors MAS-100 Eco gewonnen. Der Luftkeimsammler wurde auf einem Stativ in 150 cm Höhe aufgestellt. Von einer niedrigeren Höhe wurde auf Grund möglicher Staubverwirbelungen abgesehen. (57) Bei jeder Messstelle wurde ein sterilisierter 400 x 0,7 mm Lochdeckel verwendet.

Auf Grund der abteilungsinternen Verfahrensanweisung *Kurzanleitung MAS-100 eco - 7. Kurze Betriebsanleitung* für Referenzmessungen wird ein Luftvolumen von 100 l über eine Minute verwendet. (58)

### 3.5 Nährmedien

Die Agarplatten wurden in einer Kühltasche und für jede Messstelle einzeln in Kunststoffbeutel verpackt und transportiert. Als Agar wurde je eine MEA und eine DG18 Platte mit einem Durchmesser von 9 cm verwendet und bei  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  mit der Oberseite nach oben inkubiert. Die Agarplatten wurden im Zeitraum von zwei bis sieben Tagen mehrfach inspiziert, um den optimalen Zeitpunkt des Bewuchses zur Auswertung festzustellen. Diese fand ausschließlich auf dem am besten auszuwertenden Nährmedium statt. Die Bestimmung erfolgte anhand makroskopischer und mikroskopischer Eigenschaften. (40)

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen die Zusammensetzung der beiden verwendeten Nährmedien. DG18 ist besonders für xerophile Schimmelpilze geeignet.

Von der Messung mit verschiedenen Volumina, sowie der Feldblindwertprobe, wurde aus Gründen der Kostenreduktion abgesehen. (59)

Tabelle 4 zeigt die verwendeten Materialien der Messreihe an.

*Tabelle 4: Zusammensetzung MEA nach DIN ISO 16000-18 (60)*

<b>Verbindung</b>	<b>Menge</b>
Malzextrakt	30,0 g
Sojapepton	3,0 g
Agar	15,0 g
Destilliertes Wasser	1 000 ml

## Material und Methoden

Tabelle 7: Zusammensetzung DG18 nach DIN ISO 16000-18 (61)

Verbindung	Menge
Pepton <sup>a</sup>	5,0 g
Glukose	10,0 g
Kaliumdihydrogenphosphat (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	1,0 g
Magnesiumsulfat (MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O)	0,5 g
Dichloran (2,6-Dichlor-4-nitroanilin) 0,2 % (Massenanteil) in Ethanol (100 %)	1,0 ml
Chloramphenicol	0,1 g
Glyzerin	220 g <sup>b</sup>
Agar	15,0 g
Destilliertes Wasser	1 000 ml
<sup>a</sup> Unterschiedliche Peptone werden von unterschiedlichen Herstellern verwendet (z. B. Casein-Pepton, mycologische Peptone). Normalerweise beeinflusst das nicht die quantitativen Ergebnisse der Messungen, kann aber das Aussehen der Kolonien beeinflussen. Positivkontrollen zum Vergleich der Wiederfindung und des morphologischen Aussehens der Kolonien sind daher wichtig. <sup>b</sup> 18 % Massenanteil von ~1 220 g ergibt eine Endmasse von ~220 g.	

Tabelle 9: Verwendete Materialien

Verwendungszweck	Produkt	Hersteller
Klimamessgerät	Testo 400	Testo SE und Co KGaA
Luftkeimsammler	MAS-100 Eco	Merck
Stativ	Stativ Adapter für MAS-100 Eco	Merck
Lochdeckel	Perforierter Lochdeckel für MAS-100 Eco 400 Löcher x 0,7mm	Merck
Agar	MEA PO5055A	Oxoid/ Thermo Fischer
Agar	DG18 PO5088A	Oxoid/ Thermo Fischer
Mikroskop	Axioskop	Zeiss

### 3.6 Messstellen

#### 3.6.1 Stadtgebiet

Die Probenahme erfolgte monatlich an fünf verschiedenen Messstellen im Mainzer Stadtgebiet im Zeitraum vom 27.06.2018 bis zum 29.05.2019. Die ausgewählten Messstellen sollten möglichst heterogen sein und ein breites Spektrum des städtischen Lebens abbilden. Zur ersten Orientierung hierfür soll die Abbildung 19 dienen und das Mainzer Stadtgebiet mit dem einzelnen Messstellen zeigen. Die Punkte X<sub>1</sub>

bis X<sub>5</sub> markieren die einzelnen Messstellen, auf deren Charakteristika wird im Verlauf weiter eingegangen.

- X<sub>1</sub>: Grünfläche: Römerwall
- X<sub>2</sub>: Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße
- X<sub>3</sub>: Rheinufer: Stresemannufer
- X<sub>4</sub>: Lockere Bebauung: Weichselstraße 23
- X<sub>5</sub>: Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße

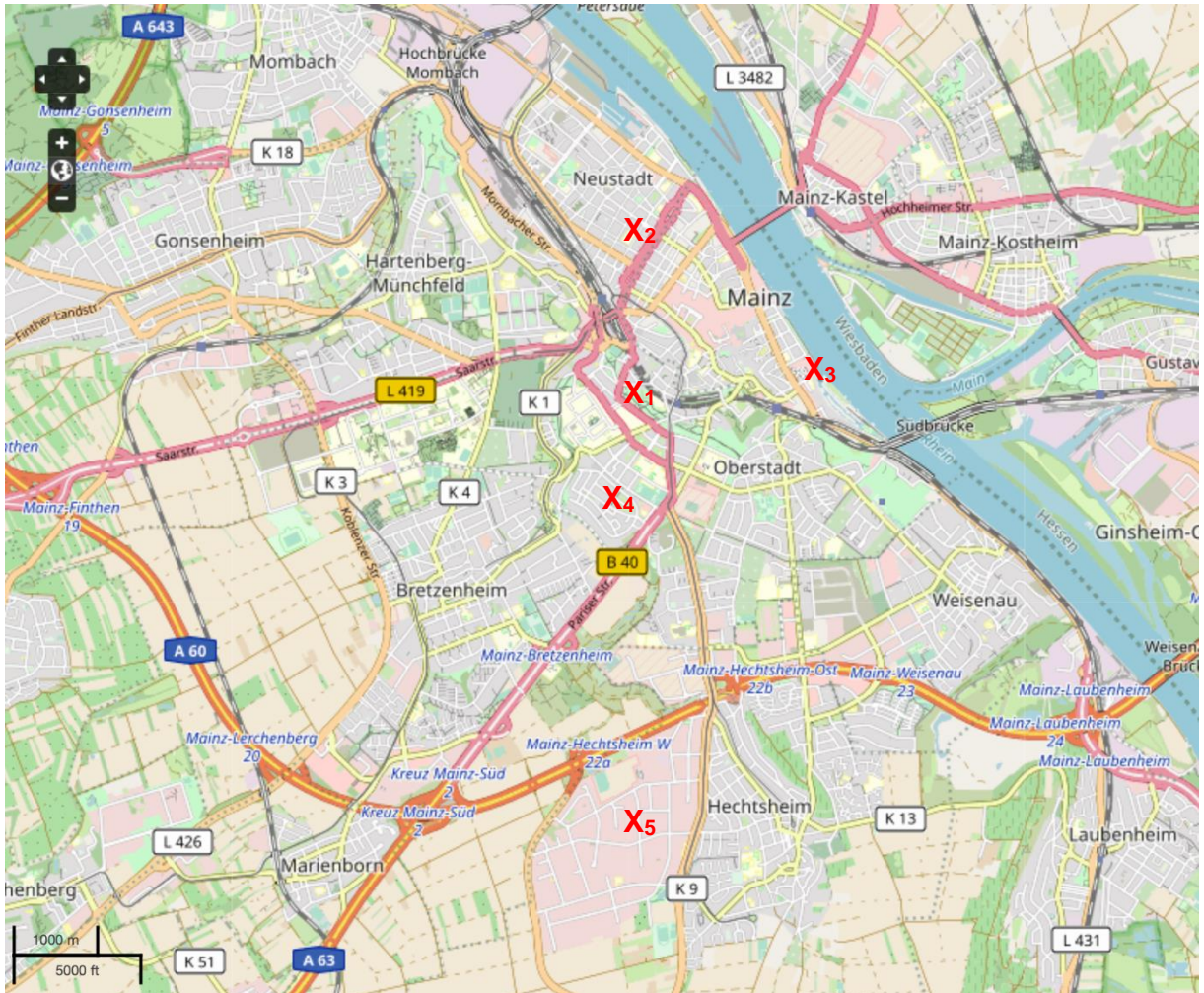


Abbildung 20: Kartenausschnitt Messgebiet Mainz (62)

### 3.6.2 Grünfläche: Römerwall

Die erste Messstelle befindet sich in der Grünanlage Römerwall vor dem Haupteingang der Universitätsmedizin. Abbildung 20 zeigt den Kartenausschnitt, in der sich die Messstelle befindet und durch den Punkt X<sub>1</sub> angezeigt wird. Im Hintergrund der in Abbildung 17 gezeigten Messstelle ist das Hochhaus am Augustusplatz zu sehen. In dieser Grünanlage befinden sich unterschiedliche Vegetationsformen. An den Rändern der Anlage sind diverse Busch-Arten zu finden. Der überwiegende Teil der An-

lage ist von diversen Laubbäumen überwachsen. Darunter befindet sich Rasenfläche, die von Schotterwegen und geteerten Wegen durchzogen wird. Ebenfalls im Bereich finden sich Anteile von Wildwuchs. In Tabelle 7 sind die Uhrzeiten der Messungen und die klimatischen Rahmenbedingungen zu sehen.

Tabelle 11: Messrahmen Römerwall

Uhrzeit	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %	Windgeschwindigkeit in m/s
08:40 - 10:40	7,83 - 27,47	41,03 - 62,53	0,35 - 1,25

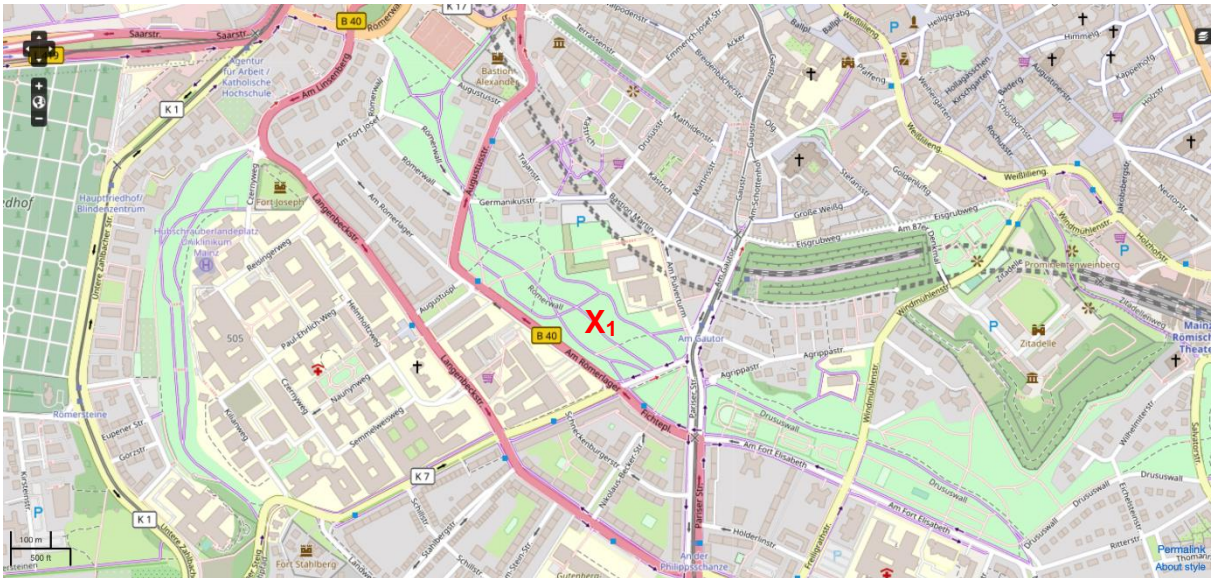


Abbildung 23: Karte Grünfläche (63)



Abbildung 24: Messstelle Grünfläche

3.6.3 Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße

Die Lage der zweiten Messstelle ist in Abbildung 22 zu sehen. Diese befindet sich in der Mainzer Neustadt. Die Messstelle auf der Karte zeigt der Punkt X<sub>2</sub>. Abbildung 23 zeigt den Luftkeimsammler bei der Messung. Hier liegt eine dichte Bebauung vor. An den Straßen befinden sich größere Wohnanlagen von zwei bis vier Stockwerken Höhe, diese umschließen einen Innenhof. Aufgelockert wird die Bebauung durch kleinere Grünflächen mit Bäumen.

Unmittelbar in der Nähe zur Messstelle liegt die Leibniz-Schule und die HS-Neustadt (Schillerschule). In Tabelle 8 sind die Uhrzeiten der Messungen und die klimatischen Rahmenbedingungen zu sehen.

Tabelle 14: Messrahmen Dichte Bebauung

Uhrzeit	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %	Windgeschwindigkeit in m/s
09:10 - 11:00	4,25 - 26,37	40,00 - 64,47	0,17 - 1,47

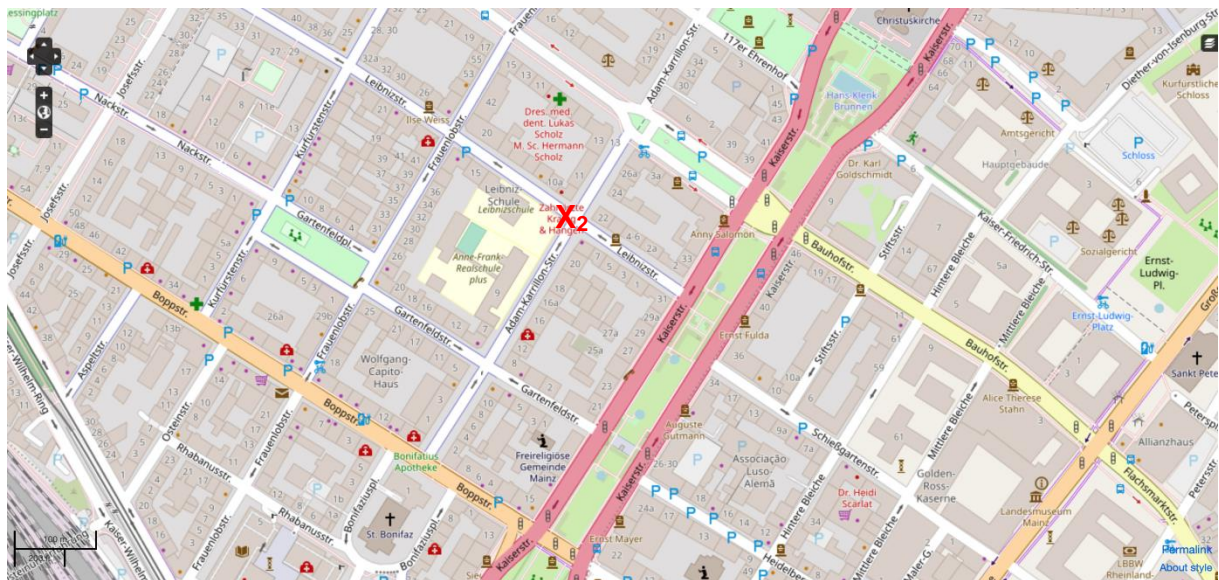


Abbildung 27: Karte Dichte Bebauung (64)



Abbildung 30: Messstelle dichte Bebauung

### 3.6.4 Rheinufer: Stresemannufer

Die 3. Messtelle liegt am Ufer des Rheins, an der Einmündung des Winterhafens. Die Messtelle befindet sich am Stresemannufer und unmittelbar vor der Malakoff Terrasse, wie durch den Punkt  $X_3$  in Abbildung 24 zu sehen ist. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 25 gezeigt. Gen Osten liegt der Rhein und gen Westen die Mainzer Stadt. Eine Übersicht über die Messbedingungen ist in Tabelle 9 zu finden.

Tabelle 17: Messrahmen Rheinufer

Uhrzeit	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %	Windgeschwindigkeit in m/s
09:40 - 11:20	4,07 - 27,97	44,00 - 69,87	0,56 - 2,66

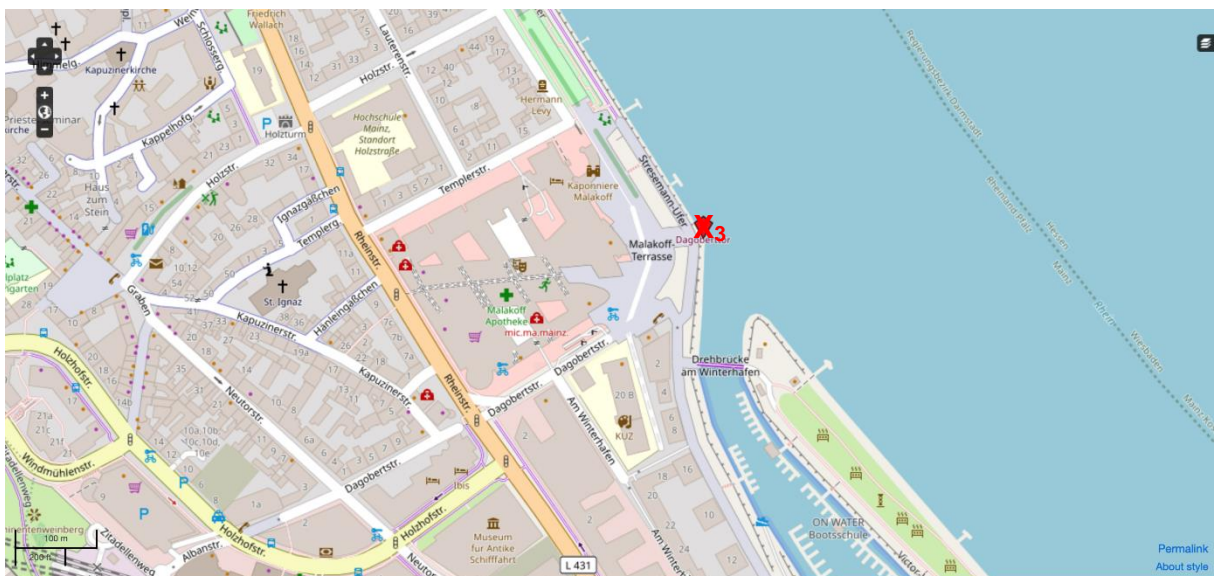


Abbildung 33: Karte Rhein (65)



Abbildung 34: Messstelle Rhein

### 3.6.5 Lockere Bebauung: Weichselstraße 23

Das schlesische Viertel, bzw. exemplarisch die Weichselstraße, zeichnet sich durch Einfamilienhäuser mit Gärten aus. Angrenzend zu der in Abbildung 26 markierte Messtelle X<sub>4</sub> befindet sich ein Fußgängerweg. Dieser ist eingebettet in eine schmale Rasenfläche mit Baumbewuchs. Die Situation vor Ort ist in Abbildung 27 zu sehen. Die gemessenen Klimaparameter sowie die Messzeiten sind in Tabelle 10 zu sehen.

Tabelle 20: Messrahmen Lockere Bebauung

Uhrzeit	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %	Windgeschwindigkeit in m/s
10:00 - 11:50	4,93 - 31,10	37,12 - 61,43	0,18 - 2,02

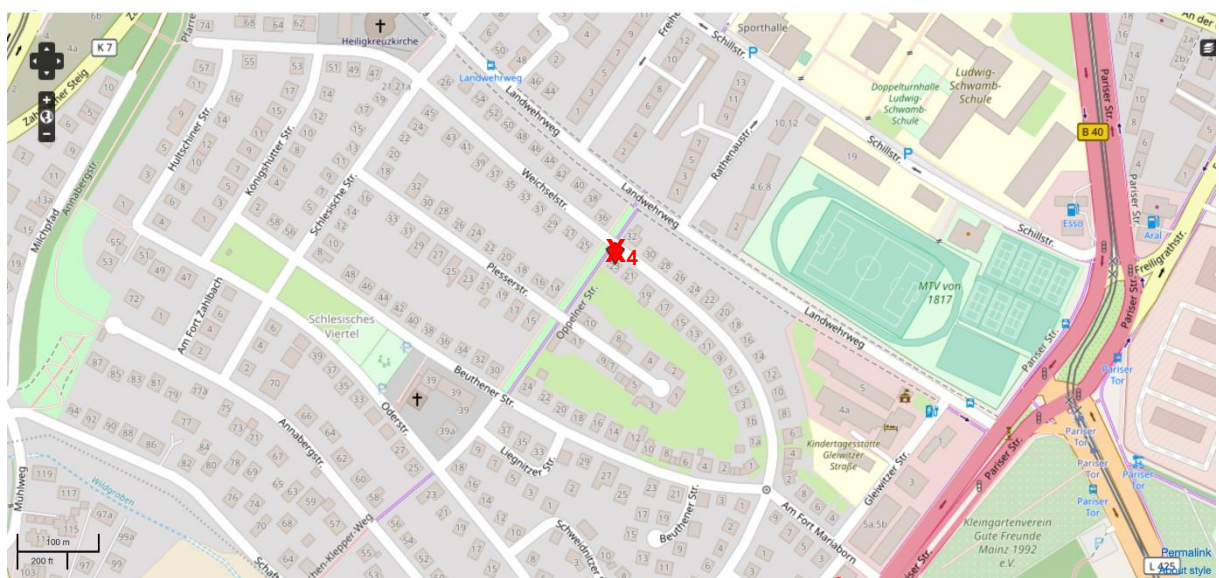


Abbildung 37: Karte lockere Bebauung (66)



Abbildung 38: Messstelle lockere Bebauung

### 3.6.6 Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße

Die 5. Messtelle liegt in Mainz Hechtsheim in einem Gewerbegebiet. Die in Abbildung 28 markierte Messtelle Punkt X<sub>5</sub> liegt zwischen einem Getränkemarkt, dem Berufsbildungszentrum der Handwerkskammer Rheinhessen und einem Logistikunternehmen. Bis auf wenige Büsche und Bäume ist kaum Vegetation vorhanden, wie in Abbildung 29 zu sehen ist.

Tabelle 11 zeigt die Rahmenparameter des Messortes an.

Tabelle 22: Messrahmen Gewerbegebiet

Uhrzeit	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %	Windgeschwindigkeit in m/s
10:20 - 12:10	4,67 - 29,93	33,65 - 63,12	0,16 - 2,07

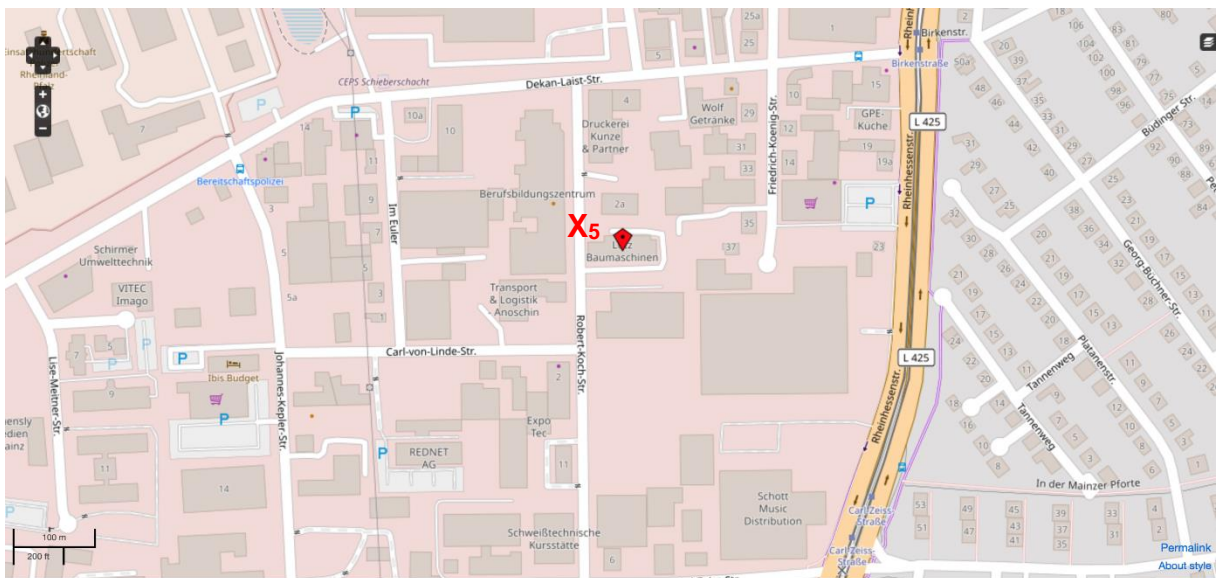


Abbildung 40: Karte Gewerbegebiet (67)



Abbildung 41: Messstelle Gewerbegebiet

### 3.6.7 Distanzen zwischen den Messstellen

Das Umweltbundesamt gibt an, dass Schimmelpilzsporen über weite Strecken vom Wind getragen transportiert werden, ohne die Distanzen genauer zu definieren (17). Die Tabelle 12 zeigt die Distanzen zwischen den einzelnen Messstellen. Mithilfe der Funktion „Entfernung messen“ von Google Maps wurden die Luftlinien zwischen den einzelnen Messstellen bestimmt. Der minimale Abstand zwischen zwei Messstellen ist von der Grünfläche Römerwall zur lockeren Bebauung in der Weichselstraße und beträgt 0,7 Kilometer. Die größte Distanz beträgt 4,4 Kilometer zwischen der dichten

Bebauung in der Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße und dem Gewerbegebiet in der Robert-Koch-Straße.

Tabelle 24: Abstände der Messstellen

	Messstellen	Distanz (km)
<b>Grünfläche: Römerwall</b>	Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße	1,4
	Rheinufer: Stresemannufer	1,4
	Lockere Bebauung: Weichselstraße 23	0,7
	Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße	3,0
<b>Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße</b>	Grünfläche: Römerwall	1,4
	Rheinufer: Stresemannufer	1,8
	Lockere Bebauung: Weichselstraße 23	2,0
	Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße	4,4
<b>Rheinufer: Stresemannufer</b>	Grünfläche: Römerwall	1,4
	Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße	1,8
	Lockere Bebauung: Weichselstraße 23	1,8
	Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße	3,5
<b>Lockere Bebauung: Weichselstraße 23</b>	Grünfläche: Römerwall	0,7
	Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße	2,0
	Rheinufer: Stresemannufer	1,8
	Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße	2,4
<b>Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße</b>	Grünfläche: Römerwall	3,0
	Dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße	4,4
	Rheinufer: Stresemannufer	3,5
	Lockere Bebauung: Weichselstraße 23	2,4

### 3.7 Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen

Nach erfolgter Probennahme wurden die Agarplatten mit der Oberseite nach oben im Brutschrank (40) bei  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  bebrütet. Eine Auswertung erfolgte zwischen dem 3. und 8. Tag. Hierbei war auf die unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten der Keime zu achten, bei einer zu frühen Auswertung ist noch keine Differenzierung der Pilze auszumachen und bei einer zu späten Auswertung ist die Agarplatte überwachsen. Die Auswertung erfolgte auf der am besten auszuwertenden Agarplatte. Eine Verrechnung fand nicht statt. (68) Die Gattungen wurden anhand der Zusammenschau ihrer makroskopischen und mikroskopischen Morphologie ermittelt. Makroskopisch wurde die Farbe der Ober- und Rückseite, die Beschaffenheit und die Wachstumsrate beobachtet. (69) Bei der mikroskopischen Identifikation wurde mittels Klebestreifenabrisspräparat und anschließender Färbung mit Lactophenolblau gearbeitet. Die Zusammensetzung der Lactophenolblaulösung ist in Tabelle 13 aus der DIN ISO 16000-20. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 20: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Bestimmung der Gesamtsporenzahl zu finden.

Tabelle 27: Zusammensetzung Lactophenolblaulösung (70)

Komponente	Menge
Baumwollblau	0,5 g
Milchsäure (80 % bis 85 % Massenanteil)	4,0 g
Phenol	4,0 g
Glycerin	8,0 g
Destilliertes Wasser	100 mL

Beim Klebestreifenabrisspräparat ist technisch ist darauf zu achten, den Klebestreifen nicht all zu fest auf die Kolonien aufzudrücken, um die Pilze und ihre Fruchtkörper nicht zu zerstören. Nach Ablösen des Klebestreifens von der Agarplatte wird dieser mit ein Tropfen Lactophenolblau auf ein Glasträger aufgebracht und unmittelbar mikroskopiert. Dabei ist auf die Beschaffenheit der Hyphen (septiert, nicht septiert, pigmentiert, nicht pigmentiert) und die Form der Konidien zu achten. (69)

Bei Unklarheiten wird eine Reinkultur angelegt und anschließend nach derselben Methodik bestimmt. Bei keiner zu erkennenden Differenzierung wird die Kolonie der Kategorie sterile Mycete zugeordnet. Eine weitere Artenspezifizierung wird nicht durchgeführt. (40)

Um die Vergleichbarkeit der Messungen verschiedener Volumina herstellen zu können, werden die Messergebnisse in  $\frac{n_{KBE}}{m^3 \text{ Luft}} (C_1)$  angegeben.

Dazu wird die Gesamtheit der Kolonien  $n_{KBE}$  addiert und durch das Gesamtvolumen  $V_1$  dividiert. (71)

$$C_1 = \frac{n_{KBE}}{V_1}$$

Als Hilfsmittel bei der Bestimmung wurde das Buch *Medical important fungus – a guide to identification* von Davise H. Larone genutzt. Zur internen Qualitätskontrolle wurden die Ergebnisse durch eine MTA gegengeprüft.

Die Datenauswertung fand deskriptiv mit Microsoft Excel statt. Aus den erhobenen Daten wurden die Gesamtkeimzahl, sowie die Quartile und der Median für die Boxplots berechnet. Die Grafiken wurden mit Microsoft Excel erstellt, einzig die Whisker der Boxplots wurden händisch in Microsoft Power Point eingetragen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Gesamtkeimzahlen im Jahresverlauf

Abbildung 30 zeigt den Verlauf in der absoluten Keimzahl der einzelnen Messstellen im Jahresverlauf von Juni 2018 bis Mai 2019. Von Beginn der Messung im Juni kommt es zu einem Anstieg der Keimzahlen zum Juli. Dabei stellen Juli und August 2018 die Monate mit der höchsten Keimbelastung dar. Der höchste Wert der gesamten Messreihe wurde im Juli 2018 in der lockeren Bebauung der Weichselstraße mit  $2940 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen. Der geringste Monatswert für den Juli 2018 wurde im Gewerbegebiet der Robert-Koch-Straße mit  $1380 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  festgestellt. Die Differenz zwischen diesen beiden Extremwerten beträgt  $1560 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Hier liegen die absoluten Keimzahlen am weitesten auseinander. Die Keimzahl in der Weichselstraße fällt von Juli auf August ab und stellt mit  $1180 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  den niedrigsten Wert der August-Messung dar. Der höchste Wert des Monats August wurde in der Grünfläche des Römerwalls gemessen und beträgt  $2560 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Somit beträgt die Differenz im August  $1380 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Im September kommt es dann an allen Messstellen zu einem Rückgang der Keimzahlen und im Oktober zu einem leichten Anstieg. Von November bis Januar sind die Keimzahlen abnehmend. Lediglich im November 2018 kommt es mit einer Keimzahl von  $1860 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  in der Robert-Koch-Straße zu einer starken Abweichung nach oben. Die geringste Keimzahl konnte im Januar 2019 gemessen werden. Die Differenz der Extremwerte liegt lediglich bei  $60 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei Werten zwischen  $140 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und  $80 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Im Februar steigen die Keimzahlen an und sind im März leicht rückläufig. Im April beträgt die Spannweite der Messungen ebenfalls  $60 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Im Vergleich zum März ist die Entwicklung der April-Keimzahlen je nach Messstelle individuell unterschiedlich zunehmend oder abnehmend. Im Mai sind die Keimzahlen aller Messstellen wieder zunehmend. Zusammenfassend wurden in den Sommermonaten die höchsten Keimzahlen und in den Wintermonaten die geringsten Keimzahlen gemessen. Der Verlauf der absoluten Keimzahl stellt sich im Groben bei allen Messstellen ähnlich dar.

Zur Übersicht sind die Gesamtkeimzahlen der monatlichen Messungen an allen fünf Messstellen über den Jahresverlauf in Tabelle 14 zusammengefasst.

## Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten bezüglich des Einflusses der Klimaparameter auf die Gesamtkeimzahl wird die Tabelle ebenfalls verwendet. Die Summen der monatlichen Messstellen, sowie die Klimaparameter der durchschnittlichen Monatstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit werden im Folgenden erläutert.

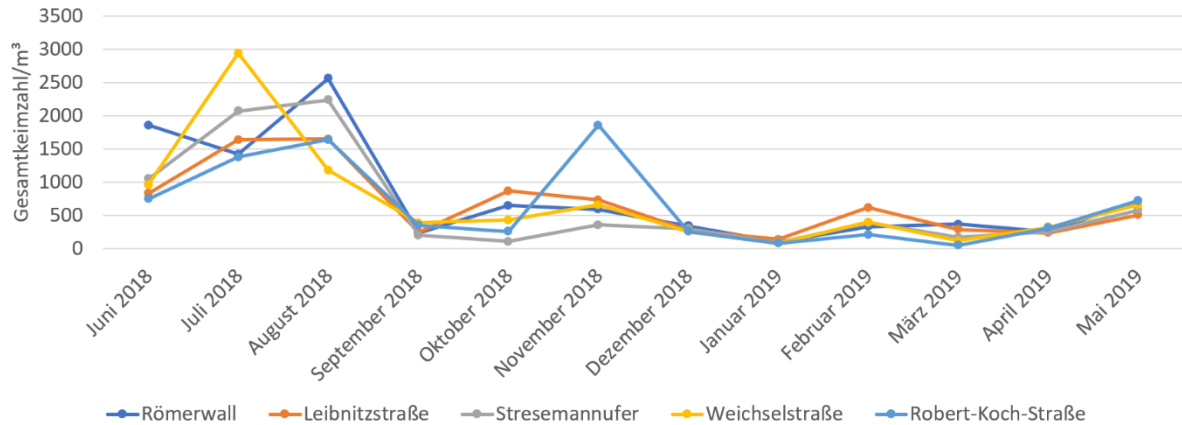


Abbildung 43: Gesamtkeimzahlen/m³ der Messstellen

Tabelle 30: Übersicht Gesamtkeimzahlen

Monat	Gesamtkeimzahl/m³						Klima	
	Summe aller Messstellen	Grünfläche Römerwall	Dichte Bebauung Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnitzstraße	Rheinufer Stresemannufer	Lockere Bebauung Weichselstraße 23	Gewerbegebiet Robert-Koch-Straße	Durchschnittliche Temperatur	Luftfeuchtigkeit
Juni 2018	5450	1860	830	1050	960	750	19,88	65,83
Juli 2018	9450	1420	1640	2070	2940	1380	22,87	51,21
August 2018	9270	2560	1650	2240	1180	1640	21,82	57,32
September 2018	1430	240	250	200	390	350	16,84	64,4
Oktober 2018	2320	650	870	110	430	260	12,28	77,63
November 2018	4200	590	730	360	660	1860	6,72	89,44
Dezember 2018	1440	340	280	300	260	260	4,54	92,69
Januar 2019	490	100	140	90	80	80	2,14	89,4
Februar 2019	1950	330	620	390	400	210	4,99	80,68
März 2019	1000	370	290	170	120	50	8,3	74,15
April 2019	1390	260	240	260	320	310	11,2	68,09
Mai 2019	3190	720	510	580	660	720	12,72	71,32
<b>Summe Gesamt</b>	<b>41580</b>	<b>9440</b>	<b>8050</b>	<b>7820</b>	<b>8400</b>	<b>7870</b>		

## 4.2 Gesamtkeimzahl im Bezug zum Klima

Die Wetterdaten sind von der Homepage [www.wetter.rlp.de](http://www.wetter.rlp.de) der Agrar Meteorologie des Landes Rheinland-Pfalz entnommen und stammen von der den Messungen am nächsten gelegenen Wetterstation in Mainz-Marienborn. (55) Die Gesamtkeimzahl ist die monatsweise Summation aller Messstellen.

### 4.2.1 Gesamtkeimzahl im Bezug zur Durchschnittstemperatur

Es wurde die durchschnittliche Monatstemperatur in einer Höhe von 2 Metern über dem Boden verwendet. In Abbildung 31 sind die Gesamtkeimzahlen pro Kubikmeter

## Ergebnisse

und die Durchschnittstemperatur gemeinsam aufgetragen. Die Rohdaten der Wetterstation und die jeweilige Monatssumme der Messstellen sind in Tabelle 14 zu sehen. Zu Beginn der Messreihe im Juni 2018 liegt bei einer Durchschnittstemperatur von 19,88 Grad Celsius die Gesamtkeimzahl bei  $5450 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Im Juli liegt mit einer Gesamtkeimzahl von  $9450 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  sowohl der höchste Wert als auch die höchste Durchschnittstemperatur von 22,87 Grad Celsius vor. Der August zeigt ähnlich hohe Werte beider Parameter an. Die Durchschnittstemperatur fällt von August mit 21,82 Grad Celsius auf 16,84 Grad Celsius im September. Dabei fällt die Gesamtkeimzahl von  $9270 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  auf  $1430 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Zum Oktober und November steigt die Gesamtkeimzahl wieder an. Im November zeigt sich in der Gesamtkeimzahl ein deutlicher Anstieg. Die Durchschnittstemperatur nimmt von August bis Januar konstant ab. Im Januar 2019 wird bei einer Durchschnittstemperatur von 2,14 Grad Celsius die niedrigste Temperatur und die niedrigste Gesamtkeimzahl mit  $490 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen. Im Februar steigen sowohl die Durchschnittstemperatur als auch die Gesamtkeimzahl an. Die Durchschnittstemperatur steigt von Januar bis zum Ende der Messreihe im Mai 2019 durchgehend an. Bei den Keimzahlen kommt es hingegen von Februar mit  $1950 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu einem Abfall auf  $1000 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im März. Im April und Mai sind die Keimzahlen wieder ansteigend. Zusammenfassend liegt die Annahme nahe, dass die Keimzahl grob mit der Temperatur zusammenhängt.

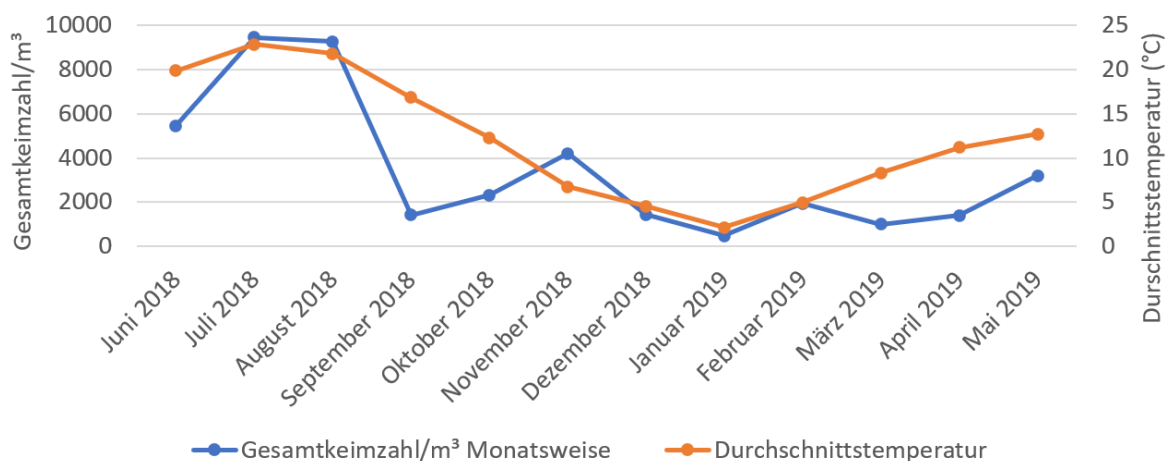


Abbildung 46: Gesamtkeimzahl/m<sup>3</sup> zur Durchschnittstemperatur

#### 4.2.2 Gesamtkeimzahl in Bezug zur relativen Luftfeuchtigkeit

Es wurde die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit der einzelnen Monate in einer Höhe von 2 Metern über dem Boden verwendet, die Rohdaten der Wetterstation sind in Tabelle 14 zu finden. Abbildung 32 zeigt den Verlauf der Gesamtkeimzahl und die der relativen Luftfeuchtigkeit an. Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt von Beginn der Messung im Juni 2018 von 65,83% auf ihren tiefsten Wert mit 51,21% im Juli ab und steigt dann kontinuierlich, bis der höchste Wert mit 92,69% im Dezember 2018 erreicht wird. Darauf kommt es bis April 2019 zu einem Rückgang der relativen Luftfeuchtigkeit bis auf 68,09%. Im Mai 2019 ist die relative Luftfeuchtigkeit wieder ansteigend. In der Betrachtung der Kurven der relativen Luftfeuchtigkeit und der Gesamtkeimzahl lässt sich optisch kein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern feststellen.

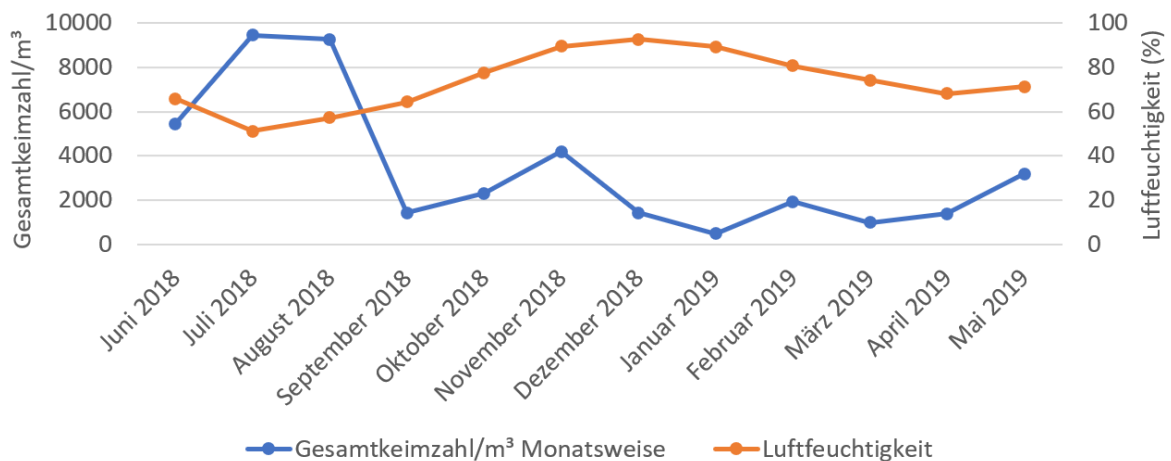


Abbildung 49: Gesamtkeimzahl/m³ zur Luftfeuchtigkeit

### 4.3 Ergebnisse der einzelnen Messstellen

#### 4.3.1 Messergebnisse Grünfläche: Römerwall

In Tabelle 15 ist die Übersicht der Messergebnisse der Grünfläche Römerwall zu sehen. Über die gesamte Messreihe wurde hier eine Keimzahl von gesamt  $9440 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen. In der absoluten Keimzahl stellt dies den höchsten Wert aller Messstellen dar.

Tabelle 33: Übersicht Grünfläche in KBE/m³

Summe Jahr	Minimalwert Monat	Maximalwert Monat
9440	100	2560
	Jan 19	Aug 18

## Ergebnisse

Eine Aufteilung der Gesamtzahl nach den gemessenen Spezies ist in Tabelle 16 zu sehen. Der Keim Rhizopus sp. Konnte dabei nur and der Messstelle am Römerwall festgestellt werden. Mit einer Gesamtkeimzahl von  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  wurde hier die geringste Anzahl von Aspergillus sp. und mit  $4450 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  die höchste Belastung mit Cladosporium gemessen.

Tabelle 36: Gesamtkeimzahl Spezies Grünfläche in KBE/m<sup>3</sup>

Alternaria sp.	Aspergillus sp.	Cladosporium sp.	Penicillium sp.	Rhizopus sp.	Sterile Mycete
350	20	4450	1380	10	3230

### 4.3.2 Messergebnisse dichte Bebauung: Ecke Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße

Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die Keimzahlen in der dichten Bebauung der Adam-Karrillon-Straße/Leibnizstraße. Mit  $8050 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  wurde hier die dritthöchste Keimzahl gemessen.

Tabelle 39: Übersicht Dichte Bebauung in KBE/m<sup>3</sup>

Summe Jahr	Minimalwert Monat	Maximalwert Monat
8050	140	1650
	Jan 19	Aug 18

Die Gesamtkeimzahl ist in Tabelle 18 aufgeschlüsselt. Von allen Messstellen wurde die höchste Keimzahl an Penicillium sp. in der dichten Bebauung mit  $1610 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen.

Tabelle 42: Gesamtkeimzahl Spezies Dichte Bebauung in KBE/m<sup>3</sup>

Alternaria sp.	Aspergillus sp.	Cladosporium sp.	Penicillium sp.	Rhizopus sp.	Sterile Mycete
610	140	2860	1610	0	2830

### 4.3.3 Messergebnisse Rheinufer: Stresemannufer

Mit  $7820 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  lag am Rheinufer die geringste Gesamtkeimzahl aller Messstellen der Messreihe vor.

In Tabelle 19 ist die Übersicht zu dieser Messstelle zu sehen.

Tabelle 45: Übersicht Rheinufer in KBE/m<sup>3</sup>

Summe Jahr	Minimalwert Monat	Maximalwert Monat
7820	90	2240
	Jan 19	Aug 18

## Ergebnisse

In Tabelle 20 sind die Messergebnisse nach Spezies aufgeteilt dargestellt.

Hier lag die Gesamtkeimzahl an Aspergillen mit  $190 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  am höchsten. Ebenso wurde hier mit  $3570 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  die höchste Keimzahl an sterilen Myceten gemessen.

Die geringste Menge an Cladosporium aller Messstellen wurde hier mit  $2780 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen.

Tabelle 48: Gesamtkeimzahl Spezies Rheinufer in KBE/m<sup>3</sup>

Alternaria sp.	Aspergillus sp.	Cladosporium sp.	Penicillium sp.	Rhizopus sp.	Sterile Mycete
160	190	2780	1120	0	3570

### 4.3.4 Messergebnisse Lockere Bebauung: Weichselstraße 23

Tabelle 21 gibt eine Übersicht über die Messstelle. Mit  $8400 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  über das Jahr wurde hier die zweit höchste Keimzahl aller Messstellen gemessen. Im Juli 2018 wurden mit gesamt  $2940 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  die höchste Keimbelastung für einen einzelnen Monat gemessen.

Tabelle 51: Übersicht Lockere Bebauung in KBE/m<sup>3</sup>

Summe Jahr	Minimalwert Monat	Maximalwert Monat
8400	80	2940
	Jan 19	Jul 18

Die Gesamtkeimzahl der Einzelspezies sind in Tabelle 22 zu sehen. In der Weichselstraße wurde mit  $760 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  die höchste Keimzahl an Alternaria sp. gemessen.

Tabelle 54: Gesamtkeimzahl Spezies Lockere Bebauung in KBE/m<sup>3</sup>

Alternaria sp.	Aspergillus sp.	Cladosporium sp.	Penicillium sp.	Rhizopus sp.	Sterile Mycete
760	30	3310	840	0	3460

### 4.3.5 Messergebnisse Gewerbegebiet: Robert-Koch-Straße

Tabelle 23 zeigt die Übersicht der Messstelle Gewerbegebiet in der Robert-Koch-Straße. Mit  $7870 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  wurde hier die dritthöchste Keimzahl über das Jahr gemessen.

Im März 2019 wurde die geringste Keimzahl aller Monatswerte mit  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen.

Tabelle 57: Übersicht Gewerbegebiet in KBE/m<sup>3</sup>

Summe Jahr	Minimalwert Monat	Maximalwert Monat
7870	50	1860
	Mrz 19	Nov 18

In der Gesamtkeimzahl in Tabelle 24 ist die geringste Belastung aller Messstellen mit Penicillium mit  $760 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu sehen. Ebenfalls wurden hier die geringsten Keimzahlen für Alternaria sp. mit  $140 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und sterilen Myceten mit  $2540 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gemessen.

Tabelle 60: Gesamtkeimzahl Spezies Gewerbegebiet in KBE/m<sup>3</sup>

Alternaria sp.	Aspergillus sp.	Cladosporium sp.	Penicillium sp.	Rhizopus sp.	Sterile Mycete
140	60	4370	760	0	2540

#### 4.4 Zusammenschau einzelner Spezies für die gesamte Studie

Im Folgenden werden die Spezies einzeln betrachtet. Es konnten in den Messungen nur Cladosporium und Penicillium mit ausreichender Regelmäßigkeit gemessen werden, sodass lediglich für diese beiden Arten Boxplots erstellt werden konnten. Die ermittelten Monatswerte der Messstellen wurden zur Erstellung eines Box-Plots verwendet. Dabei beträgt die Länge der Whisker den 1,5-fachen Interquartilsabstand. Bei der Berechnung ergibt sich für den unteren Whisker ein negativer Wert. Da dies keinen reellen Messwert darstellt, endet der untere Whisker auf der Nulllinie.

##### 4.4.1 Zusammenschau Cladosporium sp.

Im Folgenden sind die Werte für Cladosporium erläutert. Cladosporium sp. ist die am häufigsten bestimmte Schimmelpilzspezies der Messreihe. Bei insgesamt 60 Messungen konnten davon in 57 Messungen Cladosporium nachgewiesen werden. Tabelle 25 stellt die Grundlage für das Box-Plot Diagramm in Abbildung 33 dar.

Tabelle 63: Cladosporium sp. Werte des Box-Plots in KBE/m<sup>3</sup>

	Grünfläche Römerwall	Dichte Bebauung Leibnizstraße	Rheinufer Stresemannufer	Lockere Bebauung Weichselstraße	Gewerbegebiet Robert-Koch- Straße
Maximum	2200	1120	1440	720	1600
Oberer Whisker	599	749	559	1028	1478
3. Quartil	310	340	240	473	630
<b>Median</b>	<b>175</b>	<b>105</b>	<b>95</b>	<b>175</b>	<b>135</b>
1. Quartil	118	68	28	103	65
Minumum	30	30	0	0	0

Für die Messstelle Grünfläche am Römerwall beträgt der Median  $175 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Dies ist der höchste Median für Cladosporium. Der Interquartilsabstand beträgt  $192 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Das

1. Quartil beträgt  $118 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil  $310 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der höchste gemessene Wert beträgt  $2200 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und ragt deutlich über den oberen Whisker heraus. Die Messstelle Leibnizstraße Ecke Adam-Karrillon-Straße zeigt für die dichte Bebauung einen Median von  $105 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ , bei einem Interquartilsabstand von  $272 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Für das 1. Quartil beträgt der Wert  $68 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und für das 3. Quartil  $340 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

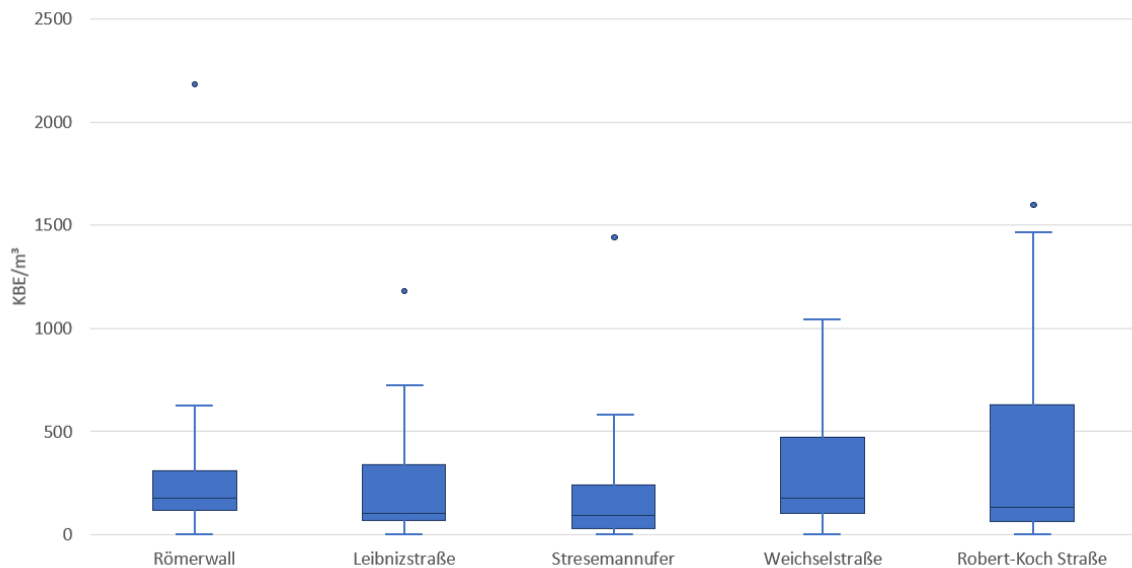


Abbildung 52: Cladosporium sp. Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf

Es liegt ein Ausreißer mit  $1120 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Am Stresemannufer am Rhein liegt der geringste Median mit  $95 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Der Interquartilsabstand beträgt  $212 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und reicht von  $28 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 1. Quartil zu  $240 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. Es liegt ein Ausreißer mit  $1440 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. In der lockeren Bebauung der Weichselstraße beträgt der Median  $175 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und bildet gemeinsam mit dem Römerwall den höchsten Median für Cladosporium. Der Interquartilsabstand beträgt  $370 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der Wert für das 1. Quartil beträgt  $103 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und  $473 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. Als einzige Messstelle liegt das Maximum hier binnen des oberen Whiskers. Die Messstelle Robert-Koch-Straße im Gewerbegebiet zeigt einen Median von  $135 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der Interquartilsabstand ist mit  $565 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  am größten. Das 1. Quartil beträgt  $65 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und  $630 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. Ein Ausreißer liegt mit  $1600 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  knapp oberhalb des oberen Whiskers. Die Differenz vom höchsten Median mit  $175 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zum niedrigsten Median mit  $95 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  beträgt  $80 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

#### 4.4.2 Zusammenschau Penicillium sp.

In diesem Abschnitt werden die Werte für Penicillium sp. erläutert. Tabelle 26 stellt dabei die Grundlage für das Box-Plot Diagramm in Abbildung 34 dar.

Tabelle 66: Penicillium sp. Werte des Box-Plots in KBE/m<sup>3</sup>

	Grünfläche Römerwall	Dichte Bebauung Leibnizstraße	Rheinufer Stresemannufer	Lockere Bebauung Weichselstraße	Gewerbegebiet Robert-Koch- Straße
Maximum	320	520	270	260	160
Oberer Whisker	439	449	284	159	153
3. Quartil	203	205	130	88	85
<b>Median</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>55</b>	<b>50</b>
1. Quartil	45	43	28	40	40
Minumum	0	20	0	0	0

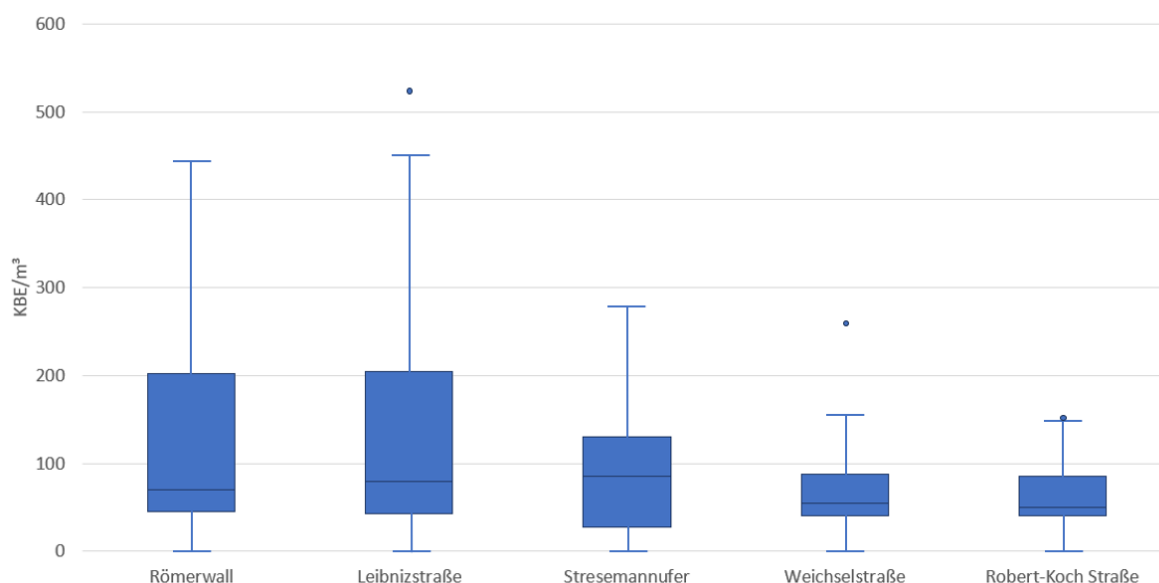


Abbildung 55: Penicillium sp. Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf

Bei der Messstelle am Römerwall liegt ein Median von  $70 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Der Interquartilsabstand beträgt  $158 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Das 1. Quartil beträgt  $45 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil  $203 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . In der dichten Bebauung der Leibnizstraße Ecke Adam-Karrillon-Straße beträgt der Median  $80 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ , bei einem Interquartilsabstand von  $162 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Für das 1. Quartil liegt ein Wert von  $43 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und für das 3. Quartil  $205 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Über den 1,5-fachen Interquartilsabstand liegt ein Maximum von  $520 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Am Stresemannufer beträgt der Median  $85 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ , dieser ist der höchste Wert für den Median in der Penicillium Zusam-

---

menschau. Der Interquartilsabstand beträgt  $102 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei Werten von  $28 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 1. Quartil und  $130 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. Die lockere Bebauung der Weichselstraße weist einen Median von  $55 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  auf. Der Interquartilsabstand beträgt  $48 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Das 1. Quartil liegt bei  $40 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil bei  $88 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Ein maximaler Ausreißer liegt bei  $260 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  vor. Die Gewerbegebiet Messstelle in der Robert-Koch-Straße zeigt einen Median von  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der Interquartilsabstand beträgt  $45 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Sowohl der Median als auch der Interquartilsabstand besitzen den geringsten Wert der Zusammenschau für Penicillium. Das 1. Quartil liegt bei  $40 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil bei  $85 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Knapp oberhalb des oberen Whiskers liegt das Maximum bei  $160 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Die Differenz vom höchsten Median mit  $85 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zum niedrigsten Median mit  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  beträgt  $35 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

#### 4.5 Zusammenschau der Messstellen

Im Folgenden werden die Messstellen einzeln betrachtet. Die Summen aller gemessenen Keime pro Monat werden addiert und die so ermittelten zwölf Monatswerte zur Erstellung eines Box-Plots verwendet. Diese sind in Abbildung 35 zu sehen. Dabei beträgt die Länge der Whisker den 1,5-fachen Interquartilsabstand. Bei der Berechnung ergibt sich für den unteren Whisker ein negativer Wert. Da dieser keinen reellen Messwert darstellt, wurde dieser als null festgelegt. Die zur Grundlage des Box-Plots verwendeten Zahlenwerte sind in Tabelle 27 abgebildet. Eine numerische Übersicht über die monatlichen Gesamtkeimzahlen zeigt Tabelle 14.

Tabelle 69: Werte des Box-Plots in KBE/m<sup>3</sup>

	Grünfläche Römerwall	Dichte Bebauung Leibnizstraße	Rheinufer Stresemannufer	Lockere Bebauung Weichselstraße	Gewerbegebiet Robert-Koch- Straße
Maximum	2560	1650	2240	2940	1860
Oberer Whisker	2696	1764	2065	1800	2723
3. Quartil	1245	860	933	885	1223
<b>Median</b>	<b>480</b>	<b>565</b>	<b>330</b>	<b>415</b>	<b>330</b>
1. Quartil	278	258	178	275	223
Minumum	100	140	90	80	50

Für die Messstelle Grünfläche - Römerwall liegt der Median bei  $480 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Damit ist er der zweithöchste Median der Messreihe. Der Interquartilsabstand beträgt  $967 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und reicht für das 1. Quartil von  $278 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu  $1245 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil.

In der dichten Bebauung der Leibnizstraße Ecke Adam-Karrillon-Straße beträgt der Median  $565 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Dies stellt den höchsten Wert der Mediane dar.

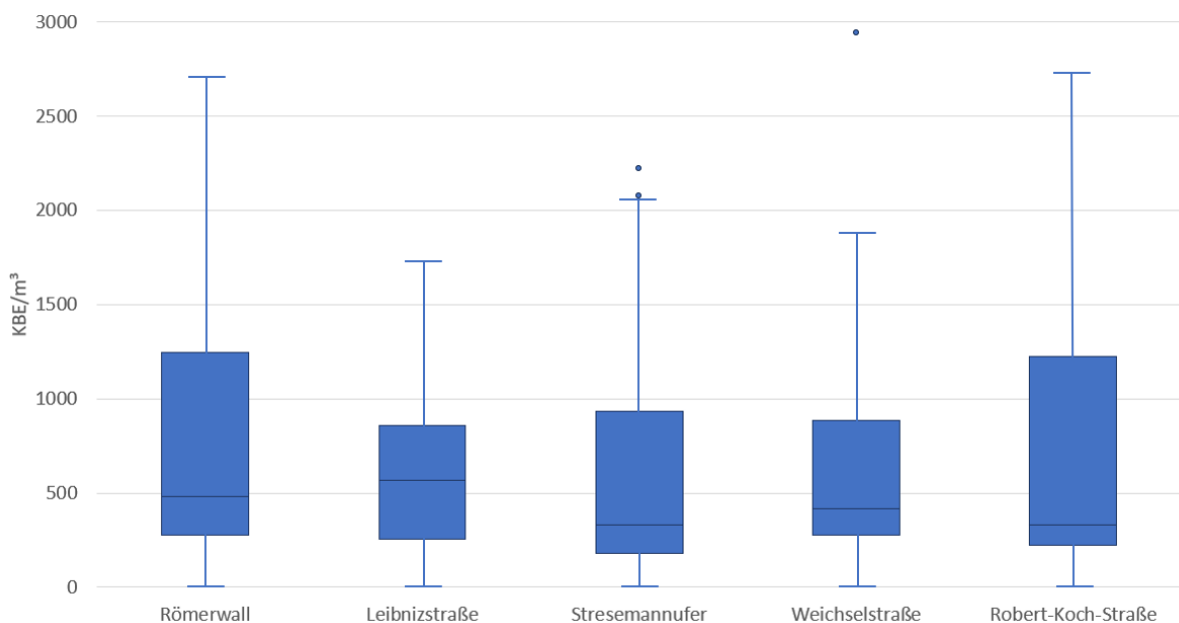


Abbildung 58: Zusammenschau der Messstellen über den Studienverlauf

Der Interquartilsabstand beträgt  $602 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und stellt somit den Wert mit der geringsten Spannweite der Messreihe dar. Das 1. Quartil beträgt  $258 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil  $860 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Die Messstelle Stresemannufer am Rhein bietet den kleinsten Median mit  $330 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der Interquartilsabstand beträgt  $755 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und reicht vom 1. Quartil mit  $178 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bis

---

zu  $933 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. In der Messung am Rheinufer gab es zwei Ausreißer über den 1,5-fachen Interquartilsabstand, der höchste dieser Ausreißer beträgt  $2240 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

An der Messstelle in der Weichselstraße beträgt der Median  $415 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für die lockere Bebauung. Der Interquartilsabstand beträgt  $610 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Das 1. Quartil liegt bei  $275 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil bei  $885 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Mit  $2940 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  gibt es an dieser Messstelle einen deutlichen Ausreißer nach oben. Im Gewerbegebiet in der Robert-Koch-Straße liegt der Median bei  $330 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und stellt gemeinsam mit dem Stresemannufer den geringsten Wert für den Median dar. Der Interquartilsabstand ist hier mit  $1000 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  am größten. Das 1. Quartil beträgt  $223 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das 3. Quartil  $1223 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ .

Zusammenfassend reicht der Median von  $330 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  am Rheinufer und im Gewerbegebiet bis zu  $565 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  in der dichten Bebauung der Leibnizstraße. Die Spannweite des Medians beträgt  $235 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Für das 1. Quartil beträgt die Spannweite  $100 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Am Rheinufer liegt das 1. Quartil mit dem niedrigsten Wert von  $178 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und das höchste am Römerwall mit  $278 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Für das 3. Quartil beträgt der höchste Wert am Römerwall  $1245 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und der niedrigste Wert in der Leibnizstraße  $860 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Die Spannweite beträgt somit  $385 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Der Interquartilsabstand reicht von maximal  $1000 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  in der Robert-Koch-Straße im Gewerbegebiet zu  $602 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  in der dichten Bebauung der Leibnizstraße.

## 5 Diskussion

### 5.1 Allgemeines

Bereits mit den unterschiedlichen Definitionen des Begriffs „Schimmelpilze“ beginnt die Vielfalt an unterschiedlichen Herangehensweisen und Schwerpunkten der Arbeit und Forschung mit Schimmelpilzen. Während das Umweltbundesamt den Schimmelbefall über die Funktion der Schimmelpilze als Leitorganismus definiert (12), definieren Kück et al. Schimmelpilze über die Beschreibung der biologischen Eigenschaften (13). Fiedler und Wilhelm beschreiben in ihrer Definition die fehlende taxonomische Einheit und die Bestandteile der Schimmelpilze (14). Es können keine gesundheitsbezogenen Richtwerte der Keimbelastung definiert werden, da die individuelle Empfindlichkeit und Exposition sehr unterschiedlich sind. Die Gesundheitsgefährdung reicht von Geruchswirkungen und allgemeinen Befindlichkeitsstörungen bis hin zu Allergien, einer erhöhten Infektanfälligkeit, Mykosen, toxischen Alveolitis, Organic Dust Toxic Syndrom (ODTS) und einer Mucous Membrane Irritation (MMI). (72) Dementsprechend ist eine Vergleichbarkeit schwer herzustellen, da es auf den genauen Untersuchungsauftrag und die damit verbundenen Beschwerden ankommt. Beispielsweise muss eine Schimmelpilzspezies, um eine Infektion auslösen zu können, bei 37°C Körpertemperatur wachsen können. In der vorliegenden Dissertation konnten lediglich die Gattungen der luftgetragenen Schimmelpilzsporen über die Zusammenschau der makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften der Keime bestimmt werden, sodass keine genauere Differenzierung der Spezies möglich war. Die Bestimmung der Gattungen deckt sich mit dem Vorgehen aus der in der Literaturdiskussion verwendeten Quellen. (43-47) Eine genauere Betrachtung des Krankheitswerts der einzelnen Gattungen, bzw. deren Spezies ist somit nicht möglich. Exemplarisch lässt sich hier die Gattung *Aspergillus* nennen, deren Krankheitswert bereits 1847 durch Sluyter und Virchow beschrieben wurde. (6, 7) Von schätzungsweise 180 *Aspergillus* Spezies konnten nur weniger als circa ein Viertel als Krankheitsauslöser identifiziert werden. (73) Die einzelnen *Aspergillus* Spezies besitzen eine unterschiedliche Virulenz, wobei *Aspergillus fumigatus* besonders hervorzuheben ist. Die World Health Organisation sieht generell eine zunehmende Gefahr durch invasive Pilzinfektionen und gab im Jahr 2022 die „WHO fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action“ (WHO FPPL) heraus. Hier-

bei wird *Aspergillus fumigatus* als der Pilz mit der dritthöchsten Pathogenität eingestuft. (74)

Von den Schimmelpilzen ist neben *Aspergillus fumigatus* noch die Ordnung Mucorales und die Gattung *Fusarium* in der FPPL zu finden. Die Priorisierung aus der multicriteria decision analysis (MCDA) der WHO ist in Abbildung 36 zu sehen und setzt sich aus dem Research and development (R&D) Rang und der Priorisierung bezüglich Public Health zusammen.

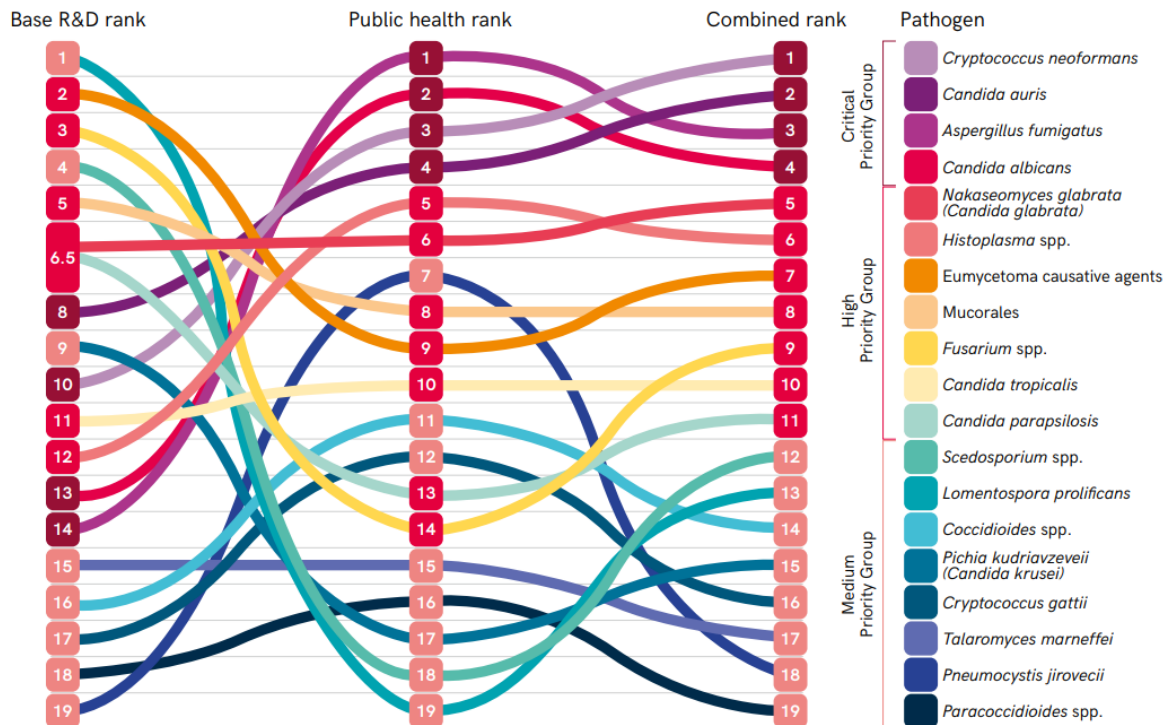


Abbildung 61: Multicriteria Decision analysis Rangliste (74)

## 5.2 Methodik

Absicht der vorliegenden Dissertation ist es, die Konzentration von kultivierbaren Schimmelpilzen in Abhängigkeit von der Siedlungsform festzustellen. Die Messungen fanden im öffentlichen Raum des Mainzer Stadtgebietes statt, somit wurden aus Gründen der Praktikabilität die Messungen als Kurzzeitmessungen durchgeführt. Auch wenn dies lediglich eine Momentaufnahme der Belastung mit Schimmelpilzsporen in der Luft darstellt, wird die Messmethode als ausreichend aussagekräftig betrachtet. Die DIN empfiehlt für Kurzzeitmessungen das Impaktionsverfahren anzuwenden. Das Messverfahren wird in der *DIN EN ISO 16000-18 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Probennahme durch Impaktion* beschrieben und festgelegt. Wie das systematische Review von Anees-Hill et al. darlegt, ist die Impaktion gängige Praxis zur Bestimmung luftgetra-

gener Schimmelpilzsporen. (36) In Abwandlung des Messverfahrens der DIN mit unterschiedlichen Volumina (57) wurde die Messung mit einem Luftvolumen von 100 Litern über eine Minute durchgeführt, dieses Volumen wurde gemäß der abteilungs-internen Verfahrensanweisung *Kurzanleitung MAS-100 eco - 7. Kurze Betriebsanleitung* als Standardvolumen für Referenzmessungen ausgewählt und genutzt. Die in der DIN empfohlene Feldblindwertprobe (57) wurde explizit nicht durchgeführt. Im Gegensatz zu den Messungen der Innenraumluft, unterliegen Messungen der Außenluft in hohem Maß den klimatischen Umgebungsbedingungen, sodass eine unterschiedlich intensive Impaktion des Nährmediums mit Sporen in Abhängigkeit zur Qualität des Windes vorliegt. Folglich ist eine Vergleichbarkeit der Keimbelastung bei Feldwindproben in der Außenluft nicht durchführbar. Die Bestimmung der Schimmelpilze erfolgte anhand der makroskopischen und mikroskopischen Zusammenschau auf dem Nährmedium, auf dem die beste Auswertung möglich war. (68) Dieses Vorgehen deckt sich ebenfalls mit dem systematischen Review von Anees-Hill et al.. Die Autoren fanden heraus, dass in den inkludierten Studien in 95% der Fälle eine lichtmikroskopische Keimbestimmung stattfand. (36) Als interne Qualitätskontrolle fanden parallel zur selbstständig durchgeführten Keimbestimmung regelmäßig Kontrollen durch die Kolleginnen des Labors statt. Die *DIN ISO 16000-17. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen – Kultivierungsverfahren* empfiehlt als idealen Bereich zur Bestimmung der Schimmelpilzarten eine Besiedlung mit 20 bis 40 Kolonien pro Agarplatte mit einem Durchmesser von 90mm. Als maximaler Bewuchs wird eine Besiedlung von 100 Kolonien empfohlen. Dieser Wert wurde in den Sommermonaten Juni bis August mehrfach überschritten. (40) Die stärkste Abweichung hierzu lag im Juli 2018 in der Weichselstraße vor. Hier liegt der Bewuchs der Agarplatte bei 294 Kolonien und somit circa dreifach höher als der empfohlenen maximalen Anzahl an Kolonien. Von den 294 gezählten Kolonien zeigten 240 Kolonien keine speziesspezifische Differenzierung, sodass diese als sterile Myceten bestimmt wurden. Die Untersuchung von Trautmann hingegen hatte in den Wintermonaten bei geringerer Gesamtkeimzahl eine höhere Anzahl an sterilen Myceten zu verzeichnen ( $5-300 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; 95.P 80,  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei sterilen Myceten in 54% der 80 Proben). Im Sommer lagen die Werte hingegen deutlich niedriger ( $0-20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ ; 95.P 20  $\frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  bei sterilen Myceten in 8% der 80 Proben). (47) Zusammenfassend liegt der hohe Anteil an sterilen Myceten in den Sommermonaten in den eigenen Messung während der Sommermonate wahrscheinlich an der hohen Koloniezahl der Agarplatten be-

gründet. Das Nichtverwenden unterschiedlicher Volumina muss daher kritisch betrachtet werden, auch wenn dies der Kostenreduktion der Datenerhebung dienlich war. Vermutlich hätte sich durch geringere Luftvolumina die Keimbestimmung in den Sommermonaten optimieren lassen.

Das Umweltbundesamt gibt an, dass Schimmelpilzsporen luftgetragen über große Distanzen transportiert werden können. (17) Diese Aussage wird allerdings nicht weiter präzisiert, sodass unklar bleibt, von welchen Distanzen hierbei auszugehen ist. Die Messstellen der Messreihe liegen zwischen 0,7 Kilometer und 4,4 Kilometer auseinander. Messungen in der Außenluft sind Umwelt- und Klimaeinflüssen unterworfen, inwiefern eine Transmission zwischen den einzelnen Messstellen vorliegt oder nicht, lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht beurteilen. Die gemessenen Parameter des Klima-Testgerätes „Testo 400“, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit, stellen lediglich Momentaufnahmen dar und haben ihre Berechtigung in Innenräumen. Betrachtet man die meteorologischen Daten der Wetterstation Mainz Marienborn (56), liegt der mittlere Wert für die Windgeschwindigkeit in 2,5 Metern Höhe in den Sommermonaten niedriger als im restlichen Jahresverlauf. Gleichwohl ist die Keimzahl in den Sommermonaten am höchsten ist.

### 5.3 Ergebnisse

#### 5.3.1 Jahresverlauf

Im Jahresverlauf zeigen die Messwerte eine erhebliche Variabilität. Die Gesamtkeimzahlen in den Sommermonaten Juli und August liegen deutlich höher als im restlichen Jahr. Ab September kommt es zu einem erheblichen Abfall der Keimzahl. Im November kommt es im Gewerbegebiet zu einem Ausreißer nach oben, der in einer hohen Keimzahl an *Cladosporium* sp. und insbesondere einer außergewöhnlich hohen Anzahl an sterilen Myceten begründet liegt. Im Januar werden die niedrigsten Konzentrationen gemessen. Für Herbst und Frühling finden sich keine wesentlichen Unterschiede. Alles in Allem zeigen sich die Keimzahlen über die verschiedenen Messstellen ähnlich. Bei den niedrigen Keimzahlen im Herbst, Winter und Frühjahr liegen die Gesamtkeimzahlen dichter beieinander als bei den hohen Keimzahlen im Sommer. Der jahreszeitliche Verlauf deckt sich mit den Ergebnissen aus der Literatur, wie etwa durch Jansen und Pietsch (2) und Fiedler und Wilhelm (43) beschreiben. Die Daten von Koch et al. aus der Erfurter Messreihe zeigen für August die höchsten Keimzahlen an. Von Mai bis August sind die Keimzahlen dort deutlich an-

steigend, kommen im August zur höchsten Keimzahl und fallen dann ab September deutlich ab. (44) In der Untersuchungsreihe „Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in Luft“ von Trautmann fanden die Messungen an 80 verschiedenen Messstellen statt. Allerdings wurde der Jahresverlauf lediglich zwischen Winter (Januar bis März) und Sommer (Juni bis September) aufgeteilt. Mit Ausnahme der sterilen Myzelien wurden durchweg im Sommer die höheren Werte gemessen. Das UMEG kommt hingegen zu anderen Ergebnissen. In der Messreihe „Schimmelpilzmessungen in der Außenluft im Jahrgang 2005“ mit nur einer einzelnen Messstelle werden die höchsten Keimzahlen im Oktober gemessen. Den Hauptteil der gemessenen Keime macht *Cladosporium* aus. Eine weitere Messreihe des UMEG „Schimmelpilzmessungen in der Außenluft, im Frühjahr, Sommer und Herbst 2003“ vergleicht verschiedene Siedlungsgebiete miteinander, hierbei finden sich bei der Messung am 06.10.2003 die höchsten Werte an allen vier Messstellen. Im Verlauf wird bei den meteorologischen Daten der Tag mit „starker Regen, stürmisch“ (75) beschrieben. Der deutliche Abfall der Gesamtkeimzahl aller Messstellen am Folgetag lässt vermuten, dass die Messung vor dem Niederschlag stattfand. Alle weiteren Messungen im Oktober zeigen ähnliche Keimzahlen an, die allesamt unter der hohen Keimzahl der Messung vom 06.10.2003 liegen. Zusammenfassend lässt sich das Maximum der Konzentration an Schimmelpilzen in der Außenluft für die Sommermonate aus der Literatur bestätigen.

### 5.3.2 Klima

Als äußeren Einfluss auf die Wachstumsbedingungen der ubiquitär vorkommenden Schimmelpilze gilt es die Klimaparameter mit in die Betrachtung zu ziehen. Die parallel zur Messung erhobenen Werte mit dem Klima-Testgerät „Testo 400“ sind lediglich eine Momentaufnahme, sodass deshalb der gemittelte Wert der Wetterstation verwendet wurde. Somit sind die klimatischen Umgebungsparameter, die auf die Schimmelpilze einwirken, breiter erfasst und können mit in die Betrachtung einfließen.

Wie allgemein anzunehmen, ist die Durchschnittstemperatur in den Sommermonaten am höchsten und nimmt dann zum Winter hin ab. Im vorangegangenen Kapitel ist bereits erläutert worden, dass die Keimzahl in den Sommermonaten am höchsten ist und zum Winter hin abnimmt. Der extreme Abfall der Gesamtkeimzahl im September 2018 fällt deutlich stärker aus als der Abfall der Durchschnittstemperatur. Hier ist fraglich, woran dies liegt. Als mögliche Erklärung kann der Niederschlag zwei Tage

vor der Messung in Betracht gezogen werden. Der Anstieg der Gesamtkeimzahl im November 2018 liegt in der Messstelle Gewerbegebiet Robert-Koch-Straße mit  $1860 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  begründet. Von den gemessenen Keimen zeigten  $1000 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  keine speziesspezifische Differenzierung, sodass diese den sterilen Myceten zugeordnet wurden. Eine offensichtliche umweltassoziierte Erklärung hierfür lässt sich nicht feststellen. Als Ursache denkbar wäre eine Kontamination der Agarplatte. Dieses ist jedoch als unwahrscheinlich zu betrachten, da beide Agarplatten einen gleichen Bewuchs aufwiesen. Ansonsten verhält sich der Verlauf der Gesamtkeimzahl und der durchschnittlichen Temperatur ähnlich. Zur relativen Luftfeuchtigkeit lässt sich weder ein positiver noch ein negativer Zusammenhang identifizieren. Der Einfluss des Niederschlags kann nicht näher betrachtet werden. Die Durchführung der Messung mit dem „MAS-100 Eco“ ist bei Regen nicht ohne weiteres möglich, da sich die Luftansaugung auf der Oberseite des Gerätes befindet. Des Weiteren ist auf Grund der Flugeigenschaften der luftgetragenen Schimmelpilzsporen nicht davon auszugehen, dass bei Vorliegen von starkem Niederschlag eine Keimbelastung der Luft festzustellen ist. In welchen zeitlichen Abständen zum Niederschlag mit einer Freisetzung von Sporen aus dem Myzel oder erneutes Aufwirbeln von Sporen aus der Umgebung zu rechnen ist, ist unklar. Diese dürfte sich je nach Spezies unterschiedlich gestalten, abhängig von Wachstumsgeschwindigkeit, Feuchtigkeitsanspruch und Temperaturoptimum. Wie zu erwarten, haben die klimatischen Parameter einen großen Einfluss auf die Anzahl der luftgetragenen Schimmelpilze. Es ist stark anzunehmen, dass die Temperatur in Abhängigkeit des individuellen Optimums der Schimmelpilzgattungen einen stark positiven Einfluss auf das Pilzwachstum hat. Des Weiteren benötigt jede Spezies ein gewisses Maß an Wasser zum Wachstum, daher haben Niederschlag und Luftfeuchtigkeit ebenfalls einen Einfluss auf das Pilzwachstum. Neben dem Wachstum muss es aber auch zu einer Verbreitung der Sporen kommen, dies geschieht luftgetragen über den Wind, sodass dieser ebenfalls nötig ist.

### 5.3.3 Zusammenschau Cladosporium sp.

Die am häufigsten bestimmte Schimmelpilzspezies ist Cladosporium sp.. In der Literatur lässt sich dieses Ergebnis bestätigen. Bei den Aufzählungen der am häufigsten vorkommenden Keime ist Cladosporium sp. durchweg zu finden. (43, 44, 45, 46, 49). Trautmann gibt in der Untersuchung „Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in der Luft“ ein Median von  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  im Winter und  $980 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für diese Spezies im

Sommer an. (47) Die ebenfalls in Mainz durchgeführte Untersuchung des Max Planck Institutes gibt gleichfalls *Cladosporium* sp. als den am häufigsten bestimmten Keim an. In der vorliegenden Messreihe liegen die Mediane der einzelnen Messstellen zwischen  $95 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und  $175 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Das Box-Plot Diagramm in Abbildung 33 zeigt eine große Ähnlichkeit zwischen allen 5 Siedlungsformen. Es lässt sich annehmen, dass die Siedlungsform keinen Einfluss auf die Höhe der Keimbelastung mit *Cladosporium* sp. hat.

#### 5.3.4 Zusammenschau *Penicillium* sp.

*Penicillium* sp. wird in der Messreihe kontinuierlich nachgewiesen. In der Literatur wird *Penicillium* sp. als ein häufig vorkommender Schimmelpilz beschrieben. (44, 45, 46). Bei der Messreihe auf dem Vorplatz des UMEG zeigt Abbildung 12, dass *Penicillium* am häufigsten in den Wintermonaten gemessen werden konnte. (45) Auch die Messung des Mainzer Max Planck Instituts für Chemie gibt das vermehrte Auftreten von *Penicillium* sp. in den Wintermonaten an. (48) Konträr dazu ist die Untersuchung von Trautmann. Hier wird der Median für die Wintermonate mit  $20 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und im Sommer mit  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  angegeben. Für die vorliegende Messreihe liegen die Mediane der einzelnen Messstellen von maximal  $85 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  zu minimal  $50 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  mit einer Spannweite von  $35 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  dicht zusammen. Aus diesem Grund ist für *Penicillium* sp. nicht davon auszugehen, dass die Siedlungsform einen Einfluss auf die Keimlast hat.

#### 5.3.5 Zusammenschau der Messstellen

Die Zusammenschau der Messstellen soll der direkte Vergleich der Messstellen untereinander sein. Zur Erstellung der Box-Plots in Abbildung 35 wurden die Summen der zwölf Monatswerte der Messreihen verwendet, sodass sowohl die niedrigen Keimzahlen der Wintermonate als auch die hohen Keimzahlen der Sommermonate betrachtet werden. Auf den ersten Blick gibt es keinen offensichtlichen Unterschied zu den Darstellungen der einzeln betrachteten Messstellen. Die Differenz zwischen den Extremwerten für das 1. Quartil beträgt  $100 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  und  $385 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$  für das 3. Quartil. Für den Median beträgt die Spannweite  $235 \frac{\text{KBE}}{\text{m}^3}$ . Folglich bewegen sich alle Boxen in ähnlichen Größenkategorien und es gibt keine extremen Abweichungen. Daher ist von keinem Einfluss der Siedlungsform auszugehen. Die Untersuchungsreihe „Hin-

tergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in der Luft“ für ländliche, städtische und gemischte Regionen von Trautmann mit 80 Messstellen konnte auch mit einer breiteren Stichprobe keinen wesentlichen Unterschied feststellen. (47)

Zur definitiven Beantwortung der Fragestellung ist eine noch deutlich breiter angelegte Datenerhebung notwendig. Die fünf verschiedenen Messstellen sind eine kleine Stichprobe des städtischen Habitats, hierzu ist eine größere Anzahl an Messstellen, sowie auch Wiederholungsmessungen pro Messstelle wünschenswert. Zur Beantwortung der Eingangsfrage, ob die Siedlungsform einen Einfluss auf die Keimzahl hat, legen die vorliegenden Daten den Schluss nahe, dass die Siedlungsform des Mainzer Stadtgebiets keinen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Keimzahl nimmt.

### 6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, festzustellen, ob die Siedlungsform innerhalb des Mainzer Stadtgebiets einen Unterschied in der Höhe der Keimzahl und deren Zusammensetzung mit sich bringt. Hierzu wurde an fünf Messstellen, bestehend aus einer Grünfläche, einer dichten Bebauung, einer lockeren Bebauung, dem Rheinufer und einem Gewerbegebiet über einen Zeitraum von 12 Monaten einmal monatlich mittels Impaktionsverfahren die Keimzahl bestimmt. Wie in der Literatur beschrieben, wurden auch in diesen Messreihen die höchsten Keimzahlen in den Sommermonaten Juli und August gemessen werden und die niedrigsten Keimzahlen in den Wintermonaten. Zur Vergleichbarkeit der Siedlungsformen wurden die Gesamtkeimzahlen betrachtet. Das vorgefundene Keimspektrum deckt sich mit den Angaben aus der Literatur. Betrachtet man die Umwelteinflüsse, so nimmt die Temperatur den stärksten Einfluss auf die Höhe der Keimzahl. Beim direkten Vergleich der fünf Messstellen konnten keine offensichtlichen Unterschiede zwischen den Siedlungsformen festgestellt werden. Auf Grund der vorliegenden Daten ist daher anzunehmen, dass die Siedlungsformen keinen Einfluss auf die Keimzahlen haben. Zur endgültigen Beantwortung der Einstiegsfrage ist eine größer angelegte Untersuchung wünschenswert. Eine Verallgemeinerung des Impacts der einzelnen Gattungen ist nicht möglich, da eine individuelle Risikoanalyse beispielsweise in Bezug auf eine Allergie oder einer möglichen Infektion durchgeführt werden müsste. Durch die WHO wurde 2022 auf die Gefahr der Pilzinfektionen hingewiesen. Mit der Herausgabe der „WHO fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action“ wurde gleichzeitig eine breitere Forschung in der Mykologie erfordert.

## Literaturverzeichnis

- 1 Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin GHUP e. V. (GHUP): Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen [Internet]. 04/2016 [zitiert am 01.02.2021]. URL: [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/161-001l\\_S2k\\_Schimmelpilzexposition-Innenraeume\\_2016-04.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/161-001l_S2k_Schimmelpilzexposition-Innenraeume_2016-04.pdf); 14
- 2 Jansen B, Pietsch M. Einführung in die Hygiene und Umweltmedizin. Görlitz: Senfkorn Verlag; 2003: 76.
- 3 Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin GHUP e. V. (GHUP): Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen [Internet]. 04/2016 [zitiert am 01.02.2021]. URL: [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/161-001l\\_S2k\\_Schimmelpilzexposition-Innenraeume\\_2016-04.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/161-001l_S2k_Schimmelpilzexposition-Innenraeume_2016-04.pdf): 5.
- 4 Universität Innsbruck. Die Bibel in der Einheitsübersetzung – Das Buch Levitikus, Kapitel 14, Vers 37- 46 [Internet]. 19.08.2008 [zitiert am 01.02.2021]. URL: <https://www.uibk.ac.at/theol/leseraum/bibel/lev14.html>.
- 5 Gest H. The discovery of microorganisms by Robert Hooke and Antoni Van Leeuwenhoek, fellows of the Royal Society. Notes Rec R Soc Lond. 2004 ;58(2):187-201. doi: 10.1098/rsnr.2004.0055.
- 6 Knoke M, Bernhardt H, Schwesinger G. Frühe Beschreibung einer pulmonalen Aspergillose 1847 aus Greifswald [Early description of a pulmonary aspergillosis 1847 from Greifswald]. Mycoses. 2003;46 Suppl 1:37-41. German. PMID: 12955852.
- 7 Virchow, R. Beiträge zur Lehre von den beim Menschen vorkommenden pflanzlichen Parasiten. Archiv f. pathol. Anat. 9, 557–593 (1856). <https://doi.org/10.1007/BF01879405>.
- 8 Virchow, R. Der Kampf der Zellen und der Bakterien. Archiv f. pathol. Anat. 101, 1–13 (1885). <https://doi.org/10.1007/BF01994999>.
- 9 Robert Koch: Über bakteriologische Forschung. In: Verhandlungen des X. Internationalen Medizinischen Kongresses, Berlin 1890. (Band I). Verlag von August Hirschwald, Berlin 1891, 650–660.
- 10 Alexander Fleming. Penicillin – Nobel Lecture [Internet]. 11.12.1945 [zitiert am 21.03.2021]. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/fleming-lecture.pdf>.

- 11 Autor unbekannt. Thanks to Penicillin he will come home. [Internet]. Shenley Laboratories INC. 1944 [abgerufen am 6.2.22]. URL: <https://www.nlm.nih.gov/exhibition/fromdnatobeer/exhibition-making-yellow-magic.html>.
- 12 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene – Kommission des Umweltbundesamtes. Leitfaden Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [Internet]. November 2017 [zitiert am 01.12.2020]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba\\_schimmelleitfaden\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf); 13.
- 13 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 1.
- 14 Fiedler K, Wilhelm M. Hygiene/Präventivmedizin/Umweltmedizin systematisch. 2. Auflage. Bremen: UNI-MED Verlag; 2011: 175.
- 15 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 11.
- 16 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 12.
- 17 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene – Kommission des Umweltbundesamtes. Leitfaden Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [Internet]. November 2017 [zitiert am 01.12.2020]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba\\_schimmelleitfaden\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf); 19.
- 18 Jansen B, Pietsch M. Einführung in die Hygiene und Umweltmedizin. Görlitz: Senfkorn Verlag; 2003: 76.
- 19 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 27.
- 20 Mahon RM, Lehmann DC. Textbook Of Diagnostic Microbiology. 6. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2019: 601.
- 21 Dermoumi H. Bestimmungsbuch für Pilze in der Medizin. Berlin: Lehmanns Media; 2008; 101.
- 22 Larone DH. Medically Important Fungy. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 281.
- 23 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 18-20.

- 24 Hof H. Glossar der medizinischen Mykologie. Linkenheim-Hochstetten: Aesopus; 2014: 24-28.
- 25 Mahon RM, Lehmann DC. Textbook Of Diagnostic Microbiology. 6. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2019: 599
- 26 Larone DH. Medically Important Fungy. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 281.
- 27 Paatsch Th. Cladosporium [Internet]. Datum unbekannt [zitiert am 10.12.2020]. URL: <http://www.schimmel-schimmelpilze.de/cladosporium.html>.
- 28 Dermoumi H. Bestimmungsbuch für Pilze in der Medizin. Berlin: Lehmanns Media; 2008: 98.
- 29 Larone DH. Medically Important Fungy. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 203.
- 30 Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze: Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3. Auflage. Heidelberg: Springer; 2009: 22.
- 31 Hof H. Glossar der medizinischen Mykologie. Linkenheim-Hochstetten: Aesopus; 2014: 102.
- 32 Larone DH. Medically Important Fungy. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 294.
- 33 Autor unbekannt. Lexikon der Biologie Rhizopus [Internet]. Spektrum Verlag 1999 [zitiert am 20.12.2021]. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/rhizopus/56783>.
- 34 Larone DH. Medically Important Fungy. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 176.
- 35 Hof H. Glossar der medizinischen Mykologie. Linkenheim-Hochstetten: Aesopus; 2014: 128.
- 36 Anees-Hill S, Douglas P, Pashley CH, Hansell A, Marczyklo EL. A systematic review of outdoor airborne fungal spore seasonality across Europe and the implications for health. Sci Total Environ. 20.04.2022;818:151716.
- 37 DIN ISO 16000-19. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 19: Probenahmestrategie für Schimmelpilze (ISO 16000-19: 2012). Berlin: Beuth; 2012: 8.
- 38 DIN ISO 16000-19. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 19: Probenahmestrategie für Schimmelpilze (ISO 16000-19: 2012). Berlin: Beuth; 2012: 11-12.
- 39 DIN ISO 16000-18. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Probennahme durch Impaktion (ISO 16000-18: 2011). Berlin: Beuth; 2012: 12.

- 40 DIN ISO 16000-17. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Kultivierungsverfahren (ISO 16000-17: 2008). Berlin: Beuth; 2012: 15-16.
- 41 Haas D, Galler H, Fritz C, Hasler C, Habib J, Reinthaler FF. Comparative study of impaction and sedimentation in an aerosol chamber using defined fungal spore and bacterial concentrations. *PLoS One*.19.12.2017, Korrigiert am 03.05.2018; DOI: 10.1371/journal.pone.0187039.
- 42 Canha, Nuno & Almeida, Susana & Freitas, M. & Wolterbeek, Hubert. (2015). Assessment of bioaerosols in urban and rural primary schools using passive and active sampling methodologies. *Archives of Environmental Protection*. 2015; DOI: 10.1515/aep-2015-0034.
- 43 Fiedler K, Wilhelm M. *Hygiene/Präventivmedizin/Umweltmedizin systematisch*. 2. Auflage. Bremen: UNI-MED Verlag; 2011: 175.
- 44 Koch A, Heilemann KJ, Bischof W, Heinrich J, Wichmann HE. Indoor viable mold spores - a comparison between two cities, Erfurt (eastern Germany) and Hamburg (western Germany). *Allergy*. 2000 Feb;55(2):176-80. doi: 10.1034/j.1398-9995.2000.00233.x.
- 45 Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. Schimmelpilzmessungen in der Außenluft im Jahresgang 2005 [Internet]. April 2006 [zitiert am 02.02.2021]. URL: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/76388>
- 46 Segvić Klarić M, Pepeljnjak S. A year-round aeromycological study in Zagreb area, Croatia. *Ann Agric Environ Med*. 2006;13(1):55-64. PMID: 16841873. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16841873/> [zitiert 27.02.2021]
- 47 Trautmann C, Gabrio T, Dill I, Weidner U, Baudisch C. Hintergrundkonzentrationen von Schimmelpilzen in Luft. Erhebung von Schimmelpilzkonzentrationen in Wohnungen ohne bekannte Schimmelpilzschäden in 3 Regionen Deutschlands. *Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz*. 2005; 48(1):12-20.
- 48 Fröhlich-Nowoisky J, Pickersgill DA, Després VR, Pöschl U. High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 4. August; 106(31):12814-9.
- 49 Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. Schimmelpilzmessungen in der Außenluft, im Frühjahr, Som-

- mer und Herbst 2003 [Internet]. Dezember 2004 [zitiert am 02.02.2021]. URL: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/50669>
- 50 Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF): Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen [Internet]. 04/2016 [zitiert am 01.02.2021]. URL: [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/161-001l\\_S2k\\_Schimmelpilzexposition-Innenraeume\\_2016-04.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/161-001l_S2k_Schimmelpilzexposition-Innenraeume_2016-04.pdf)
- 51 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene – Kommission des Umweltbundesamtes. Leitfaden - Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [Internet]. November 2017 [zitiert am 01.12.2020]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba\\_schimmelleitfaden\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf); 94.
- 52 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene – Kommission des Umweltbundesamtes. Leitfaden - Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [Internet]. November 2017 [zitiert am 01.12.2020]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba\\_schimmelleitfaden\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf); 103.
- 53 Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene – Kommission des Umweltbundesamtes. Leitfaden - Zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden [Internet]. November 2017 [zitiert am 01.12.2020]. URL: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba\\_schimmelleitfaden\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/uba_schimmelleitfaden_final_bf.pdf); 101.
- 54 Mahon RM, Lehmann DC. Textbook Of Diagnostic Microbiology. 6. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2019: 605.
- 55 Agrar Meteorologie Rheinland-Pfalz. Wetterstation Mainz-Marienborn [Internet]. [zitiert am 17.12.2021]. URL: <https://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/amweb/b5668ca644c432edc1257171002e8a2d?OpenDocument&TableRow=2.9#2>
- 56 Agrar Meteorologie Rheinland-Pfalz. Wetterstation Mainz-Marienborn [Internet]. [zitiert am 17.12.2021]. URL [https://dlr-web-daten1.aspdienste.de/httdocs/wdaasc/wdaa\\_chart.htm?v=002](https://dlr-web-daten1.aspdienste.de/httdocs/wdaasc/wdaa_chart.htm?v=002).
- 57 DIN ISO 16000-18. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Probennahme durch Impaktion (ISO 16000-18: 2011). Berlin: Beuth; 2012: 18.

- 58 MBV AG. Luftkeimsammler MAS-100 ECO [Internet]. [zitiert am 17.12.2021].  
URL: <https://www.mbv.ch/de/luftkeimsammler/mas-100-eco/>.
- 59 DIN ISO 16000-18. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Probennahme durch Impaktion (ISO 16000-18: 2011). Berlin: Beuth; 2012: 15.
- 60 DIN ISO 16000-18. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Probennahme durch Impaktion (ISO 16000-18: 2011). Berlin: Beuth; 2012: 14.
- 61 DIN ISO 16000-18. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 18: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Probennahme durch Impaktion (ISO 16000-18: 2011). Berlin: Beuth; 2012: 13.
- 62 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Messgebiet Mainz [Internet]. [zitiert am 18.04.2023]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=13&lat=49.98644&lon=8.30937&layers=B00TF>
- 63 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Römerwall [Internet]. [zitiert am 06.06.2022]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=16&lat=49.99365&lon=8.26482&layers=B00TT>
- 64 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Adam Karrillon Straße Ecke Leibnizstraße [Internet]. [zitiert am 06.06.2022]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=17&lat=50.00521&lon=8.26351&layers=B00TT>
- 65 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Stresemannufer [Internet]. [zitiert am 06.06.2022]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=17&lat=49.99588&lon=8.28213&layers=B00TT>
- 66 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Weichselstraße 23 [Internet]. [zitiert am 06.06.2022]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=17&lat=49.98747&lon=8.26104&layers=B00TT>
- 67 Open Street Maps (Cartographer). Kartenausschnitt Robert Koch Straße [Internet]. [zitiert am 06.06.2022]. URL: <https://www.openstreetmap.de/karte/?zoom=17&lat=49.96508&lon=8.2669&layers=B00TT>

- 68 DIN ISO 16000-17. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Kultivierungsverfahren (ISO 16000-17: 2008). Berlin: Beuth; 2012: 17.
- 69 Mahon RM, Lehmann DC. Textbook Of Diagnostic Microbiology. 6. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier; 2019: 610.
- 70 DIN ISO 16000-20. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 20: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen- Bestimmung der Gesamtsporenzahl (ISO 16000-20: 2014). Berlin: Beuth; 2015: 12.
- 71 DIN ISO 16000-17. Innenraumluftverunreinigungen – Teil 17: Nachweis und Zählung von Schimmelpilzen - Kultivierungsverfahren (ISO 16000-17: 2008). Berlin: Beuth; 2012: 18.
- 72 Gesellschaft für Hygiene, Umweltmedizin und Präventivmedizin GHUP e. V. (GHUP): Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen [Internet]. 04/2016 [zitiert am 01.02.2021]. URL: [https://www.awmf.org/uploads/tx\\_szleitlinien/161-001I\\_S2k\\_Schimmelpilzexposition-Innenraeume\\_2016-04.pdf](https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/161-001I_S2k_Schimmelpilzexposition-Innenraeume_2016-04.pdf): 4.
- 73 Larone DH. Medically Important Fungi. 5. Auflage. Washington: ASM Press; 2011: 281.
- 74 World Health Organization. Fungal priority pathogens list to guide research, development and public health action. Geneva: World Health Organization; 2022: 17.
- 75 Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. Schimmelpilzmessungen in der Außenluft, im Frühjahr, Sommer und Herbst 2003 [Internet]. Dezember 2004 [zitiert am 05.09.2023]. URL: <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/50669>; 15.

## Danksagung

Mein Dank gilt Herrn PD Dr. rer. nat. Roßbach für die Betreuung meiner Dissertation. Ohne Ihre offene Art und die Übernahme der Betreuung wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Liebe Frau Dr. med. Pietsch, für Ihre Unterstützung möchte ich Ihnen ganz besonders Danken. Trotz des schmerzlichen Verlustes Ihres Ehemannes standen Sie mir bei der Erstellung der Dissertation zur Seite. Ohne Ihr Zutun und Ihre Vermittlung an Herrn PD Dr. rer. nat. Roßbach als „neuen Doktorvater“ wäre die Fortführung dieses Projektes undenkbar gewesen.

Liebe Frau Rabas, vielen Dank für die herzliche Aufnahme im Labor und die große Unterstützung bei der Auswertung der Messergebnisse, sowie die vielen Motivationshilfen.

Ich möchte meiner Familie und meiner Partnerin für die Unterstützung bei allem Höhen und Tiefen der Erstellung der vorliegenden Arbeit danken.

Nicht zuletzt möchte ich meine Dankbarkeit dem viel zu früh verstorbenen Herrn OTA d.R. Prof. Dr. med. habil. Pietsch ausdrücken.

Für die Initiierung der vorliegenden Dissertation möchte ich Herrn OTA d.R. Prof. Dr. med. habil. Pietsch für die Überlassung des Themas danken. Sie werden mir sowohl als Doktorvater als auch für Ihr stets kameradschaftliches und offenes Ohr in bester Erinnerung bleiben. Ich hoffe sehr, dass mich Ihr Vorbild und die lehrreiche Zeit bei Ihnen in der Abteilung zu einem besseren Offizier und Arzt gemacht hat.

## Tabellarischer Lebenslauf

### Persönliche Daten:

Name: Nicolai Hagendorn  
Geburtsdaten: 07.04.1994 in Mannheim  
Staatsangehörigkeit: Deutsch  
Familienstand: Ledig

### Beruflicher Werdegang:

Assistenzarzt in der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin, Notfallmedizin und Schmerztherapie am Bundeswehr Zentralkrankenhaus Koblenz

- 2023 Erwerb der Zusatzbezeichnung Notfallmedizin
- 2023 Ernennung zum Oberstabsarzt
- 2021 Ernennung zum Stabsarzt
- 2021 Erteilung der Approbation
- 2021 Versetzung BwZKrhs Koblenz
- 2018 Ernennung zum Leutnant
- 2014 Versetzung zum Studienbeginn SanStff Mainz
- 2014 Dienstantritt im 6./SanLehrRgt Feldkirchen

### Studium:

Studium der Humanmedizin an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

- Mai 2021: 3. Staatsexamen mit Erteilung der Approbation
- Wintersemester 2020: 2. Staatsexamen
- Wintersemester 2017: Physikum
- Wintersemester 2014: Studienbeginn

### Schulische Ausbildung:

- 2013-2014 Franz-Anton-Mai Schule, Staatsexamen Rettungsassistent
- 2004-2013 Albertus-Magnus-Schule Viernheim, Abitur
- 2000-2004 Johannes-Kepler-Grundschule Heddesheim