

Aus dem Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene
der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Orientierende Untersuchungen zur Schimmelpilzbelastung bei Baumaßnahmen in
der Universitätsmedizin Mainz

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

Vorgelegt von

Katharina Reuther
aus Simmern (Hunsrück)

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Philipp Drees

Tag der Promotion: 09. Dezember 2025

Nachnutzungslizenz: Namensnennung, keine Bearbeitungen (CC-BY-ND-4.0)

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
1 Einleitung	4
2 Literaturdiskussion	6
2.1 Schimmelpilze	6
2.1.1 Morphologie	6
2.1.2 Systematik und Phylogenie	7
2.1.3 Vorkommen und Verbreitung	7
2.1.4 Wachstumsbedingungen	8
2.1.5 Einzelorganismen (relevanteste Schimmelpilze im Detail)	10
2.2 Ursachen für Schimmelpilzwachstum in Innenräumen	12
2.2.1 Feuchteschäden mit mikrobiologisch unbelastetem Wasser	13
2.2.2 Feuchteschäden mit mikrobiologisch belastetem Wasser und Fäkalschäden	13
2.2.3 Feuchteschäden durch Leckagen haustechnischer Anlagen	13
2.2.4 Feuchteindikatoren	13
2.3 Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen durch Schimmelpilze in Innenräumen	14
2.3.1 Allergische Reaktionen durch Aeroallergene	14
2.3.2 Irritative und toxische Reaktion durch Zellwandbestandteile und Stoffwechselprodukte	16
2.3.3 Mykosen	17
2.4 Arbeitsschutz	18
2.4.1 Gefährdungsbeurteilung	18
2.4.2 Schutzmaßnahmen	19
2.4.3 Staubschutzmaßnahmen der Unimedizin Mainz	22
3 Material und Methoden	25
3.1 Luftkeimsammler:	25
3.2 Art des Nährmediums und Identifizierung der Schimmelpilze:	26
3.3 Aufbau der Messungen und Identifizierung der Schimmelpilze:	26
3.4 Auswertung der Luftproben	28
4 Ergebnisse	30
4.1 Gesamtanzahl der Schimmelpilzporen	30
4.2 Schimmelpilzspektrum	31
4.3 Auswertung des Keimspektrums gemäß Bewertungshilfe UBA	32
4.4 Baustellen mit Mehrkammer-Schleusen	33
4.5 Keimspektrum bei Baustellen mit und ohne Feuchteschaden	33
4.6 Einfluss mobiler HEPA-Luftfilter und Abluftanlagen nach außen	34
5 Diskussion	36
5.1 Effektivität der untersuchten Staubschutzmaßnahmen (Feste Staubschutzwand vs. Folienabschirmung)	36
5.2 Einfluss von Mehrkammer-Schleusensystemen	37
5.3 Der Einflussfaktor Feuchtigkeit im Rahmen der Umbaumaßnahmen spielt eine relevante Rolle bei der Menge der Schimmelpilzbelastung bzw. bei der Art der Schimmelpilze	37
5.4 Einfluss von HEPA-Luftfiltern	38
5.5 Effektivität der Sanierungsarbeiten im Vorher/Nachher-Vergleich	39
6 Zusammenfassung	40

7	Literaturverzeichnis	42
8	Anhang	45
9	Danksagung	46
10	Tabellarischer Lebenslauf von Katharina Reuther	47

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AK	Abklatschplatte
KBE	Koloniebildende Einheit
DG18	Dichloran Glycerin 18% Platte
V	Volumen
MMI	Mucous Membrane Irritation
z.B.	zum Beispiel
Vgl.	Vergleich
Ca.	Circa
S.	Seite
spp.	Spezies
I	Konzentration innerhalb der Baustelle (Ref. 1) in KBE/m ³
A	Konzentration außerhalb der Baustelle (Ref. 2) in KBE/m ³
typ A	typische Außenluftarten bzw. -gattungen (extramurale Pilze wie Cladosporium, sterile Myzelien, ggf. Hefen, ggf. Alternaria, ggf. Botrytis)
untyp A	untypische Außenluftarten bzw. -gattungen (intramurale Pilze wie Pilzarten mit hoher Indikation für Feuchteschäden z. B. Acremonium spp., Aspergillus versicolor, A. penicillioides, A. restrictus, Chaetomium spp., Phialophora spp., Scopulariopsis brevicaulis, S. fusca, Stachybotrys chartarum, Tritirachium (Engyodontium) album, Trichoderma spp.)
Σuntyp A	Summe der untypischen Außenluftarten (andere als typ A)
Euntyp A	eine Art, die untypisch ist in der Außenluft mit guter luftgetragener Verbreitung
Euntyp AS	eine Art, die untypisch ist in der Außenluft mit schlechter luftgetragener Verbreitung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systematik der Schimmelpilze, stark vereinfacht; Rot: Hauptgruppen, gelb: wichtige Vertreter, modifiziert nach (1), S.11.....	7
Abbildung 2: a) Penicillium spp. makroskopisch auf DG-18-Agar, grau-grüne Kolonien; b) Penicillium spp. mikroskopisch.....	10
Abbildung 3: a) Aspergillus spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert; b) Aspergillus spp. mikroskopisch	11
Abbildung 4: Cladosporium spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert	11
Abbildung 5: a) Alternaria spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, mit orangenem Kreis markiert; b) Alternaria spp. mikroskopisch	12
Abbildung 6: a) Rhizopus spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert, schwarz kaffeesatzartig, b) Rhizopus spp. mikroskopisch	12
Abbildung 7: Einteilung der Gefährdungsklassen, modifiziert nach ((39), S. 16)	19
Abbildung 8: Beispiel für die Anwendung einer dünnen Folie	20
Abbildung 9: Installation von Be- und Entlüftungsrohren im Rahmen einer Baustelle mit fester Staubschutzwand in sensiblen OP-Bereich	21
Abbildung 10: Schleusensystem mit dicker Folie und Reißverschluss; a) außerhalb der Schleuse im Flurbereich, Blick auf Reißverschluss; b) Innerhalb einer Schleuse mit Abfallsack; c) Bauarbeiter mit Schutzausrüstung im Hauptbereich der Baustelle, rechts luftdicht verschlossene Abfallsäcke.....	23
Abbildung 11: linkes Foto: Installation einer festen Staubschutzwand mit integrierter Tür rechts; rechtes Foto: innerhalb der Baustelle mit fester Wand rechts und dicken Staubschutzfolien links	23
Abbildung 12: AERIAL AMH 100 Luftfilter, modifiziert nach (44)	24
Abbildung 13: Luftkeimsammler MAS-100 Eco von MBV.....	25
Abbildung 14: Impaktionsverfahren, schematisch, modifiziert nach (45)	25
Abbildung 15: Exemplarische Darstellung eines Messaufbaus zur Luftkeimmessung im OP-Bereich mit fester Staubschutzwand und Mehrkammerschleusensystem	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Feuchteansprüche der Schimmelpilze, modifiziert nach (9)	9
Tabelle 2: Wachstumstemperaturbereiche der Schimmelpilze, modifiziert nach (8)	9
Tabelle 3: Zusammenhänge zwischen Schimmelpilzexposition/Feuchtigkeit in Innenräumen und Krankheiten/Symptome, modifiziert nach (21-26)	14
Tabelle 4: Definition der Risikogruppen nach § 3, BioStoffV ((39), S. 26)	19
Tabelle 5: Bewertungshilfe kultivierbarer Schimmelpilze (KBE/m3) bei Luftkeimmessungen, modifiziert nach (9).....	28
Tabelle 6: Orientierungskonzentrationen ausgewählter Schimmelpilzspezies in der Außenluft in Abhängigkeit der Jahreszeit; modifiziert nach (9)	29
Tabelle 7: Orientierungskonzentrationen ausgewählter Schimmelpilzarten in Innenraumluft, modifiziert nach (9)	29
Tabelle 8: Auswertung Anzahl KBE/m3 innerhalb und außerhalb der Baustellen bei Abschirmung mit dicker Folie (1-12, türkis) und fester Staubschutzwand (13-25, pink), Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb	30
Tabelle 9: Auswertung Anzahl KBE/m3 vor (grün) und nach (gelb) der Umbaumaßnahmen; Staubschutzmaßnahmen mit dicker Folie (türkis) und fester Staubschutzwand (pink), Ref. 1 = vorher, Ref. 2 = nachher.....	31
Tabelle 10: Gesamtes Keimspektrum in KBE/m3 innerhalb und außerhalb der Staubschutzmaßnahmen, Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb	32
Tabelle 11: Auswertung der Baustellen hinsichtlich des messrelevanten und nicht- messrelevanten Keimspektrums, hellgrün = reine messrelevante Luftkeimreduktion, hellrot = reine messrelevante Luftkeimzunahme	32
Tabelle 12: Anzahl KBE/m3 bei Baustellen mit Schleusensystem aus dicker Staubschutzfolie; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb.....	33
Tabelle 13: Schimmelpilzspektrum in KBE/m3 im Vergleich zwischen Sanierung von Feuchteschäden und regulären Umbaumaßnahmen	34
Tabelle 14: Anzahl der KBE/m3 innerhalb und außerhalb der Baustellen mit Nutzung eines HEPA-Luftfilters; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, grün = OP-Bereich, orange = zusätzliche Abluftanlage nach außen, Normalbereich	35
Tabelle 15: Anzahl der KBE/m3 innerhalb und außerhalb der Baustellen ohne Nutzung eines HEPA-Luftfilters; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, grün = OP-Bereich.....	35

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben befasst sich mit der Belastung von Schimmelpilzen bei verschiedenen Baumaßnahmen innerhalb der Klinikgebäude der Universitätsmedizin Mainz. Schimmelpilze sind ubiquitär vorkommend und Teil der natürlichen Umwelt. Voraussetzungen für deren Wachstum sind verschiedene Faktoren wie eine ausreichende Feuchtigkeit, ein gutes Nährstoffangebot sowie optimale Temperatur- und pH-Wert-Bedingungen (1, 2) im Material oder an Oberflächen. Begünstigt wird das Auskeimen von Schimmelpilzen daher durch eine hohe Luftfeuchtigkeit, mangelnde Belüftung und kalte Bauteiloberflächen. Einen besonders geeigneten Lebensraum in Gebäuden, stellen das Mauerwerk, Tapeten, Holz sowie Isoliermaterialien dar, weshalb beispielsweise Wasserschäden und aufsteigende Feuchtigkeit, gefürchtete Risikofaktoren für das Entstehen von ‚Schimmel‘ sind (3).

Schimmelpilze und deren Sporen werden vor allem über den Luftweg übertragen, außerdem lagern sie sich in Staub ab (4). Sind Innenräume stark von Stäuben belastet, ist daher der Artenreichtum dann besonders hoch. Einige Einzelsporen besitzen einen aerodynamischen Durchmesser von $< 5 \mu\text{m}$, weshalb davon auszugehen ist, dass sie gut lungengängig sind (5).

Für Immungeschwächte, Patienten mit offenen Wunden oder anderweitig sensiblen Eintrittspforten oder im intraoperativen Bereich stellt bereits ein geringes Vorkommen von Schimmelpilzen und deren Bestandteilen (Sporen, Myzel, Toxine und andere Stoffwechselprodukte (5)) in der Umgebung eine erhebliche Gefährdung dar. Bei hohen Bioaerosolkonzentrationen wird dies auch für immunkompetente und gesunde Menschen zu einem Krankheitsrisiko. Als potentielle gesundheitliche Auswirkungen durch Schimmelpilze, werden chronische Bronchitis, Infektionen, Intoxikationen, Sensibilisierungen und Allergien, Schleimhautreizungen (Mucous Membrane Irritation, MMI), System-Mykosen, Geruchsbelästigungen sowie Befindlichkeitsstörungen in Betracht gezogen (5).

Im Jahre 2019 wurde in dem Kinderkrankenhaus „Seattle Children’s“ eine sehr hohe Schimmelpilzbelastung in den Operationssälen festgestellt. Seit 2001 gab es sieben Todesfälle, sowie 14 Aspergillus Infektionen, die damit in Verbindung gebracht werden. Grund hierfür waren vermutlich fehlerhafte Luftfilteranlagen, welche die Sporen der Schimmelpilze in den Operationsräumen verteilt haben (6).

Da in den Innenräumen der Universitätsmedizin Mainz aufgrund veralteter baulicher Gegebenheiten und Materialien bereits diverse Wasserschäden festgestellt wurden, ist es essenziell, diese zu sanieren, einem potenziellen Schimmelpilzbefall vorzubeugen oder diesen zu eliminieren. Für das beschriebene Vorhaben muss zwangsläufig das Mauerwerk probeweise eröffnet und eventuell komplett abgetragen werden, um die Ursache zu finden und zu beheben. Während dieses Vorgangs ist es möglich, dass bereits gewachsene Schimmelpilze und deren Bestandteile in die Umgebungsluft abgegeben werden oder die Bauarbeiter potenzielle Sporen mit Händen, Arbeitskleidung oder Werkzeugen verschleppen. In sensiblen Bereichen wie der Universitätsmedizin Mainz stellt dies eine besondere Herausforderung dar.

Bisher gibt es drei, in der Unimedizin Mainz verwendete, Abschirmmaßnahmen, um die betroffene Baustelle während der Baumaßnahmen zu isolieren und einer möglichen Ausbreitung von Schimmelpilzen entgegenzuwirken. Für die Sanierung in hochsensiblen Bereichen, wie zum Beispiel Operationssälen, werden feste Wände aus abwaschbarem Holz angebracht, die an vorher installierte Holzlatten geschraubt werden. Als zweite, zeitlich geringer aufwändige sowie kostengünstigere Möglichkeit, werden dicke Plastikfolien verwendet. Diese bringt man in weniger sensiblen Bereichen, ebenfalls mithilfe einer Ständerbauweise aus Holzbalken, an. Mit dem Abkleben der Außenseiten der Folie mittels starkem Gewebeklebeband wird diese luftdicht installiert. In normalen Bereichen der Klinik greift man auf dünnere Folien zurück, die lediglich an der Raumdecke und den Wänden seitlich befestigt werden. Nach unten hin liegen die Folien auf dem Boden auf und sind durchlässig. Zur Vervollständigung der Methoden, gibt es außerdem noch die Möglichkeit, keinerlei Abschirmmaßnahmen durchzuführen und die Baustelle offen zu lassen. Die zu sanierende

Wand ist in dem Fall nicht stark betroffen und es ist ausreichend, einen Dübel in die betroffene Wand einzudrehen und den Schaden zu eliminieren, statt diese grob zu eröffnen.

Die oben beschriebenen Methoden benötigen außerdem einen Zu- beziehungsweise Durchgang. Befindet sich der Schaden in einem Raum mit Fenstern, ist es möglich, die Baustelle komplett von innen abzuschirmen und über einen Zugang von außen zu betreten. Liegt dies nicht vor, wird in einer installierten Holzwand eine solide Tür eingebaut. Verwendet man die dicke Plastikfolie, wird ein Zugang mittels Reißverschlusses sichergestellt. In sensibleren Klinikbereichen ist es üblich, Mehrkammerschleusen zu installieren. Hierbei werden zwei bis drei Kammern mit Hilfe der dicken Plastikfolie hintereinandergeschaltet und abgeschirmt. Mittels Reisverschlussystem werden sie dann miteinander verbunden und zugänglich gemacht. Setzt man die Maßnahme der dünnen Plastikfolie ein, werden diese überlappend angebracht, sodass ein Eingang darüber oder durch Anheben der Folie gewährleistet ist.

Die Schimmelpilzbelastung wird außerdem unterschiedlich beeinflusst. Um die Ausbreitung während der Bauarbeiten einzudämmen, werden teilweise HEPA-Luftfilter der Firma Aerial eingesetzt. Man stellt sie in den betroffenen Räumen und auch in den einzelnen Kammern der Schleuse auf. Außerdem gibt es die Möglichkeit in hochsensiblen Bereichen Luftfilteranlagen nach außen zu installieren. Eine Alternative stellt ein Luftfilter dar der direkt an der Bohrmaschine angebracht wird, um die Partikel sofort abzusaugen. Es gibt auch Baumaßnahmen, bei denen auf einen Luftfilter verzichtet wird.

Einen vermutlich weiteren Einfluss in der Verbreitung der Schimmelpilze, haben die Bauarbeiter. Durch das Installieren einer Schleuse, soll gewährleistet werden, dass sich die größte Schimmelpilzbelastung im befallenen Raum befindet und mit zunehmender Entfernung der Kammern, weiter reduziert. Durch das Anziehen von persönlicher Schutzkleidung, bestehend aus Atemschutzmaske, Handschuhen, Ganzkörperschutzanzug, sowie Schuhstulpen, sollen im Rahmen des Arbeitsschutzes die Bauarbeiter sowie die Arbeitskleidung geschützt werden. Nach Beendigung der Baumaßnahmen, wird die potenziell kontaminierte Kleidung in der Schleuse abgelegt, die sich dem befallenen Raum am nächsten befindet und sofort in Abfallsäcken luftdicht verstaut. Nach gründlicher Händedesinfektion kann die nächste Kammer betreten werden. In den einzelnen Kammern sind, in den meisten Fällen, jeweils die oben beschriebenen Luftfilter installiert, sodass im äußersten Bereich der Schleuse keine Schimmelpilzbelastung mehr nachweisbar sein soll. Werden Händedesinfektion und korrektes Ablegen der Schutzkleidung jedoch fehlerhaft durchgeführt oder die Reisverschlüsse zwei benachbarter Kammern gleichzeitig geöffnet oder Fehler an anderer Stelle gemacht, ist eine Kontamination dennoch möglich.

Wie effektiv die jeweiligen Maßnahmen der Abschirmung sind und inwiefern diese durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, soll mit der geplanten Promotionsarbeit untersucht werden. Die Bestimmung von kultivierbaren Schimmelpilzsporen gilt als das derzeit am häufigsten angewandte Verfahren der Mikrobiologie (7). Mit Hilfe des sogenannten Impaktionsverfahren werden bestimmte Luftvolumina (V4) durch eine perforierte Platte mit definiertem Porendurchmesser auf ein Nährmedium (DG18-Agar) gesaugt. Dabei werden Referenzmessungen in verschiedenen Abständen zum Schaden vor, während und nach den Baumaßnahmen durchgeführt. Um Vergleichswerte zu erhalten, wird außerdem außerhalb, sowie innerhalb der Abschirmmaßnahmen gemessen. Damit eine Aussage über die Effektivität der errichteten Schleuse getroffen werden kann, führt man in Einzelmessungen, bei geschlossenen Reißverschlüssen, durch. Begonnen wird in der vom Schaden am weitesten entfernte Schleuse, um ein eventuelles Verschleppen zu vermeiden (7).

2 Literaturdiskussion

2.1 Schimmelpilze

2.1.1 Morphologie

Pilze werden zu den Eukaryoten gezählt. Das bedeutet, sie besitzen Zellen mit Zellkern und unterschiedlichen Organellen (Peroxisomen, Mitochondrien). Außerdem findet man eine Zellwand sowie eine oder mehrere Vakuolen vor, was sie von den tierischen Zellen unterscheidet.

Im Gegensatz zu Pflanzen, welche ebenfalls zu den Eukaryoten gehören, gewinnen Pilze ihre Energie nicht aus Photosynthese, sondern durch die Aufnahme energiereicher organischer Nährstoffquellen auf saprophytische oder parasitäre Lebensweise.

Schimmelpilze, als Teil der großen Gruppe der Pilze, zeichnen sich durch ihre Vielzelligkeit und die Bildung asexueller Sporen aus. Sie wachsen hauptsächlich saprophytisch, was bedeutet, dass sie abgestorbene organische Substanzen als Energiequellen nutzen. Zusätzlich lassen sich Schimmelpilze, wie die meisten Pilze, Algen und Moose, zur Gruppe der Thallophyten einteilen. Im Gegensatz zu höheren Pflanzen (Kormophyten) weist diese Gruppe keine Gliederung in Wurzeln, Sprosse und Blätter auf. Der Pilz-Thallus wird als Myzel bezeichnet, was das Vorkommen von filamentösen Zellfäden (Hyphen) beschreibt. Ein weiteres wichtiges Kriterium der Schimmelpilze ist die hohe Wachstumsgeschwindigkeit der „fast ausschließlich vegetativ wachsenden Myzelien“ ((4) S. 1) sowie der ausgeprägte und artenspezifische Sekundärmetabolismus.

Das vegetative Hyphenwachstum beschreibt die Bildung von langgestreckten Fäden. Sie wachsen entweder ungegliedert (unseptiert) oder durch Septen in Kompartimente unterteilt. Die Fäden wachsen an der Spitze der Hyphen und können sich zusätzlich an den Seitenwänden ausbilden. Dadurch, dass Hyphen in der Lage sind, aufeinander zu zuwachsen und zu fusionieren, entsteht ein netzartiges Geflecht, das sogenannte Myzel.

Die Bildung vegetativer Sporen stellt eine weitere Option der Pilzvermehrung dar. In den meisten Fällen geschieht dies asexuell. Das bedeutet, dass sich die Sporen rein mitotisch (genetisch vollständig identisch) teilen und vermehren. Sie dienen dann vor allem als Überdauerungsformen, aber auch zur schnellen und sehr weiten Verbreitung durch z.B. Wind. Die Sporen entstehen an der Spitze der Hyphe. Dies kann entweder endogen in Sporangien (z.B. Zygomyceten) geschehen, oder sie werden exogen (z.B. Ascomyceten) von Sporenträgern abgeschnürt, was man dann als Konidien bezeichnet.

Die Größenordnung der Schimmelpilzsporen liegt zwischen 2 – 30 µm (im Durchschnitt 10 µm; Vgl. menschliches Haar: 100 µm). Sie sind daher gut einatembare.

In Abhängigkeit der Wachstumsbedingungen sind die Hyphen zusätzlich in der Lage, selbst in Arthrosporen zu zerfallen, was eine weitere Überdauerungsform darstellt.

Die sexuelle Sporenbildung beschreibt die Karyogamie und die anschließende meiotische Vermehrung der Pilze. Dort kann es zur Rekombination von DNA-Material kommen, was dazu führt, dass genetisch verschiedene Individuen entstehen. Nicht für alle Pilzarten sind Stadien der sexuellen Vermehrung bekannt, was daran liegen könnte, dass diese nur unter bestimmten Umweltbedingungen stattfindet, „die unter Laborbedingungen nicht hergestellt werden können“ ((4) S. 7).

2.1.2 Systematik und Phylogenie

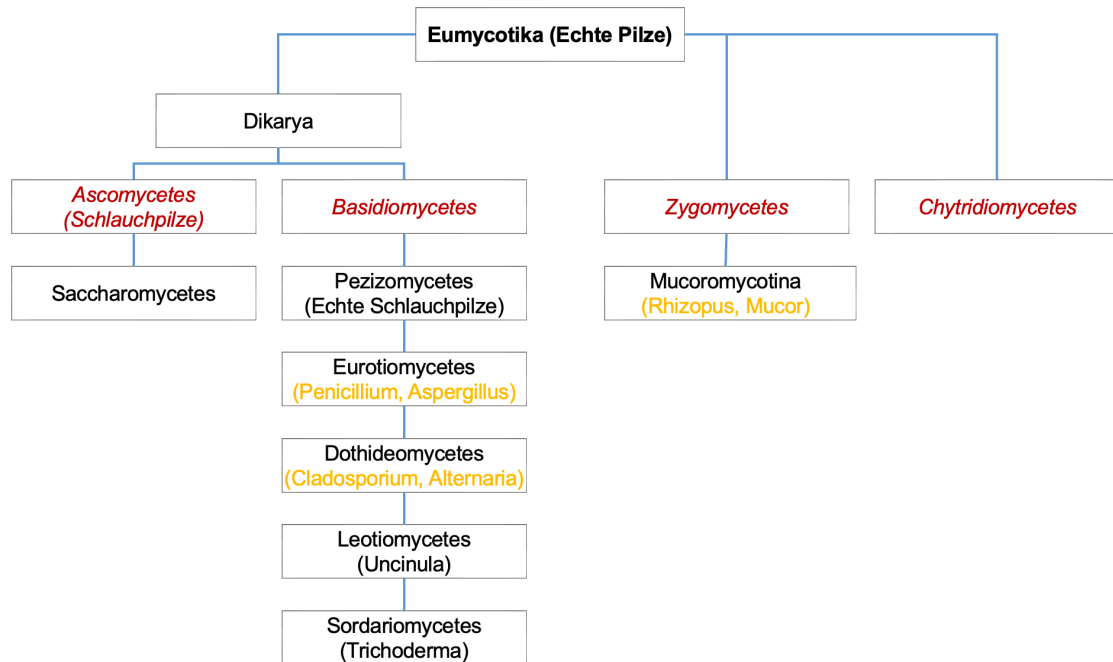


Abbildung 1: Systematik der Schimmelpilze, stark vereinfacht; Rot: Hauptgruppen, gelb: wichtige Vertreter, modifiziert nach (1), S.11.

Neben morphologischen Eigenschaften werden seit jüngerer Zeit auch physiologische sowie genetische Merkmale herangezogen, um die Abstammungsverhältnisse der Pilze besser zu verstehen. Es stellte sich heraus, dass sich Pilze in drei, nicht näher verwandte Hauptgruppen einteilen lassen. Man bezeichnet diese als Oomycota, Schleimpilze und Eumycota.

Die Schimmelpilze, welche im Rahmen der Dissertation von Relevanz sind, beschränken sich auf die Gruppe der Eumycota (siehe Tab. 1).

Unter Eumycota werden die sogenannten ‚echten Pilze‘ zusammengefasst, die ubiquitär in fast allen Ökosystemen vorkommen. Weltweit schätzt man die Artenvielfalt auf mindestens 1,5 Millionen (4). Die Eumycota stehen aus evolutionärer Sicht den Tieren näher als den Pflanzen. Unterteilen lassen sie sich in die folgenden vier Hauptklassen: Ascomycetes, Basidiomycetes, Zygomycetes und Chytridiomycetes. Die für die Messungen relevanten Schimmelpilze befinden sich vor allem in den Gruppen der Asco- und Zygomycetes. Unterscheiden lassen sich diese beiden Hauptgruppen insbesondere an der Myzel- sowie der Sporenbildung. Während sich das Myzel von Ascomyceten septiert darstellt und sie ihre Sporen asexuell und exogen als Konidien abschnüren, besitzen Zygomyceten ein unseptiertes Hyphenmyzel und bilden ihre Sporen asexuell, endogen in Sporangien.

2.1.3 Vorkommen und Verbreitung

Schimmelpilze kommen ubiquitär auf sämtlichen Erdkontinenten vor. Dennoch hängt ihre Besiedlung von verschiedenen abiotischen und biotischen Faktoren ab, wie beispielsweise dem Nährstoffangebot oder unterschiedlicher Temperaturoptima, die über die Häufigkeit des Vorkommens bestimmen.

Ihr Hauptreservoir ist der Erdboden. Hier spielt die Beschaffenheit der Böden eine tragende Rolle. So sind in Wiesenböden weniger Sporen zu finden als in Waldböden und die Myzel Dichte nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab.

Relevant für die Messungen der Dissertation im Innenraum ist die Tatsache, dass Schimmelpilze außerdem gehäuft in Bereichen mit hoher Staubbelastung vorkommen und sich in Gebäuden gut auf Mauerwerk, Putz, Tapeten, Anstrichen oder auch auf Holz und Isoliermaterialien ausbreiten. Dies betrifft sowohl den Privatbereich als auch alle öffentlichen Bereiche, was in sensiblen Arealen, wie Krankenhäusern, eine besondere Rolle spielt.

Die Verbreitung erfolgt in aller Regel über die Luft. Hierbei gibt es Differenzen zwischen der Außen- und Innenluft. Im Außenbereich beeinflussen zusätzlich noch Faktoren wie die Sonneneinstrahlung, Bewegung der Luft, Temperatur und Luftfeuchtigkeit die Ausbreitung der Sporen. So können sich die Sporen mit Hilfe ihrer Pigmentierung vor UV-Strahlen schützen. Es ist eine saisonale Rhythmik erkennbar, wodurch die Gesamtzahl der Sporen vor allem im Sommer ihren Höhepunkt erreicht. Durch Turbulenzen der Luft können Sporen dann zusätzlich noch mehrere Hunderte Kilometer weit getragen werden.

Im Innenbereich wird wiederum die Anhäufung von xerophilen Schimmelpilzen durch die Nutzung von Heizung im Winter stark positiv beeinflusst. Diese Flora ist dann gehäuft intramural anzutreffen. Sind Innenräume zusätzlich vermehrt mit Stäuben belastet, ist außerdem eine deutliche Zunahme der Artenvielfalt erkennbar.

2.1.4 Wachstumsbedingungen

Die Entstehung der Schimmelpilze findet in zwei Phasen statt. In der Wachstumsphase (vegetative Phase) entwickeln die Pilze ein aus Hyphen bestehendes Myzel aus. Dieses dient als Substratmyzel der Ernährung und wächst oftmals unbemerkt. Während der Vermehrungsphase (fruktive Phase) wächst an der Oberfläche des Nährsubstrates ein erhabenes Oberflächen- oder Luftmyzel. Die asexuellen Sporen werden in großer Anzahl produziert und bilden einen mit bloßem Auge sichtbaren, farbigen Rasen aus. Hierbei beeinflussen mehrere Faktoren das Wachstum.

2.1.4.1 Feuchte

Die bekanntermaßen wichtigste Ursache für Schimmelpilzwachstum ist eine erhöhte Feuchtigkeit. Beschreiben kann man den Feuchtigkeitsgehalt von Materialoberflächen unter Gleichgewichtsbedingungen mittels des a_w -Wertes, welcher die Wasseraktivität beschreibt.

$$a_w = p / p_0$$

p : Wasserdampfpartialdruck über dem Nährsubstrat bei gegebener Temperatur

p_0 : Sättigungsdampfdruck des reinen Wassers bei gegebener Temperatur

Gleichgewichtsbedingungen werden in der Praxis allerdings nur annäherungsweise erreicht, weshalb beispielsweise ein a_w -Wert von 0,8 etwa einer relativen Luftfeuchte von 80% an der Materialoberfläche entspricht. Schimmelpilze sind in der Lage die Feuchte sowohl aus dem Substrat als auch aus der Luft aufzunehmen. Nachdem das Myzel im Anschluss an die Keimung gebildet wurde, kann dieses mittels seiner Hyphen in die Poren von Baumaterialien eintreten und dort das Wasser aufnehmen.

Überaus gute Wachstumsbedingungen stellen Kondensation auf oder innerhalb des Materials dar. Eine relative Luftfeuchtigkeit von 70% bis 80% an der Oberfläche ist hierbei ausreichend. Verschiedene Schimmelpilzspezies besitzen demnach charakteristische Feuchtwerte, die die Intensität des Wachstums bestimmen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass unterhalb der Feuchtegrenze von 70% kein Wachstum stattfindet. Bei hohen Oberflächenfeuchten von mehr als 80% können jedoch nahezu alle Schimmelpilzarten wachsen (siehe Tabelle 1). Bei 100% relativer Feuchte an der Oberfläche liegt die obere Grenze des Wachstums für Schimmelpilze. Hier wachsen ausschließlich Bakterien (8).

Bezeichnung	Feuchteanspruch	Relative Feuchte (%)	Gleichgewichtsfeuchte a_w -Wert	Relativer Anteil vorkommender Schimmelpilze (%)
Xerophil	gering	55-65	0,65	5
Mesophil	mittel	65-85	0,85	85
Hydrophil	hoch	80-98	0,95	10

Tabelle 1: Feuchteansprüche der Schimmelpilze, modifiziert nach (9)

2.1.4.2 Temperatur / Licht

Da Schimmelpilze die unterschiedlichsten Lebensräume mit sehr schwankenden Umgebungstemperaturen besiedeln, besitzen sie einen weiten Temperaturbereich, in dem sie wachsen können. Während Pilze der Gattung *Penicillium* zu den mesophilen Vertretern gehören und dementsprechend hierzulande außerhalb von Räumen ihr Temperaturoptimum finden (vgl. Tabelle 2), präferieren thermophile Schimmelpilze wie *Aspergillus fumigatus* warme Breitengrade oder auch Kompostierungsanlagen (9). Die Mehrheit der Schimmelpilze finden sich jedoch im mesophilen Bereich wieder.

Bezeichnung	Wachstumstemperaturen in °C		
	Minimum	Optimum	Maximum
Mesophile Schimmelpilze	0-5	25-35	Ca. 40
Thermotolerante Schimmelpilze	0-5	30-40	Ca. 40
Thermophile Schimmelpilze	20-25	35-55	Ca. 60

Tabelle 2: Wachstumstemperaturbereiche der Schimmelpilze, modifiziert nach (8)

Licht und dessen Wellenlängen können durch Pilze wahrgenommen werden. Sie besitzen Rot-, Grün- oder Blaulichtrezeptoren und reagieren auf verschiedene Lichtqualitäten. Manche Vertreter der Gattungen *Penicillium* und *Aspergillus* bilden beispielsweise ihre Fruchtkörper vor allem im Dunkeln und ihre Konidiosporen bevorzugt im Licht, weshalb hier auch von einer Tag/Nacht-Rhythmik gesprochen werden kann. Zusätzlich ist bekannt, dass beispielsweise Zygomyceten einen positiven Phototropismus besitzen und demnach auf eine Lichtquelle zuwachsen können (4)

2.1.4.3 pH-Wert

Die meisten Schimmelpilze tolerieren einen sehr breiten pH-Wert Bereich zwischen 3 und 9. Hierbei findet das optimale Zellwachstum im eher sauren Bereich und die Synthese von „Sekundärmetaboliten, wie z.B. Mykotoxinen“ bevorzugt im basischeren Bereich statt. Dass es bei pH-Werten größer als 11 kaum ein Schimmelpilzwachstum gibt, macht man sich im Baubereich zu Nutze und streicht beispielsweise feuchte Lager- oder Kellerräume mit stark kalkhaltigen, also alkalischen, Anstrichen. Dieser Effekt ist aufgrund der Karbonatisierung durch in der Luft enthaltenes Kohlendioxid jedoch nur temporär (8). Eine optimale Wachstumsgrundlage für Schimmelpilze bieten Tapeten und Anstriche daher auch aufgrund ihrer pH-Werte zwischen 5 und 8.

2.1.4.4 Nährstoffe

Ein weiterer wesentlicher Faktor, der über einen bestimmten Zeitraum simultan mit den bereits genannten Voraussetzungen vorhanden sein muss, sind die Nährstoffe. Aus Hausstaub können Schimmelpilze beispielsweise Pollen, Hautschuppen oder Fasern als Quelle nutzen. Sie sind außerdem in der Lage aus Materialien wie Holz, Karton, Tapeten, Kunststoffen,

Mineralwolle, Farben oder Textilien essenzielle Nährstoffe zu filtern. Selbst auf Untergründen mit primär keinem Nährstoffgehalt, wie zum Beispiel Glas, können sie wachsen, sofern sich dort Stäube abgelagert haben (8).

2.1.5 Einzelorganismen (relevanteste Schimmelpilze im Detail)

2.1.5.1 *Penicillium spp.*

Nach aktuellem Stand sind 483 *Penicillium*-Arten beschrieben. 2014 waren es noch 354 verschiedene Arten, was einen Zuwachs um 36% bedeutet (10). Sie zählen zu den Ascomyceten und bevorzugen gemäßigte Klimaregionen mit niedrigeren Temperaturen. Sie bilden typischerweise Sporenträger, die sogenannten Konidiphoren, aus, welche dem *Penicillium* ihr charakteristisches Erscheinungsbild als Pinselschimmel geben (4). Neben dem ubiquitären Vorkommen in der Umgebungsluft, haben sie eine große Bedeutung in Bereichen wie Lebensmittelverderb, Biotechnologie, Pflanzenpathologie und der Medizin. Sie produzieren zahlreiche Sekundär Metabolite wie Mykotoxine (Patulin und Ochratoxin A) aber auch antibakterielle, immunsuppressive sowie cholesterinsenkende Substanzen. Hier nimmt das Penicillin als erstes Antibiotikum der Geschichte eine besondere Rolle ein (11). *Penicillium* wird mit der Entwicklung allergischer Erkrankungen in einen unmittelbaren Zusammenhang gebracht (12).

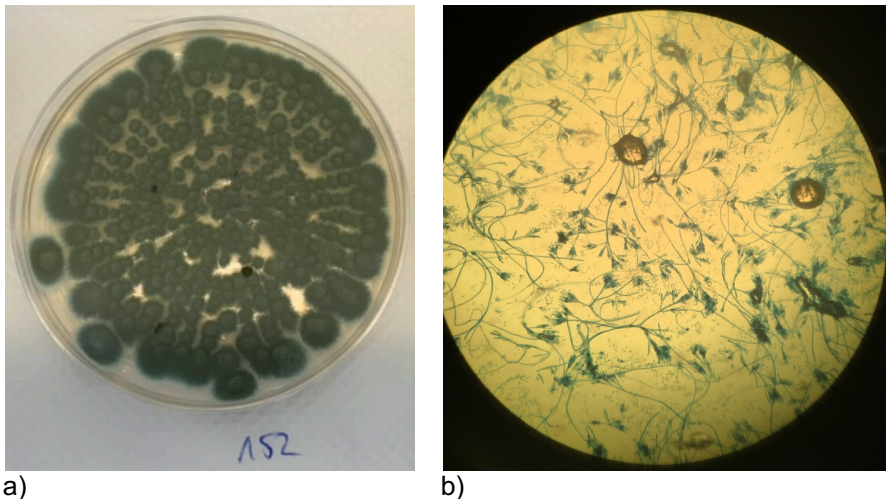
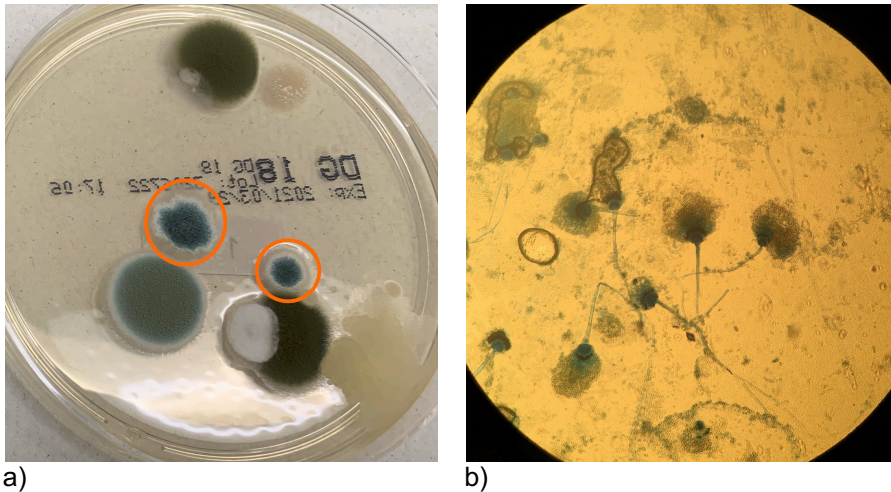


Abbildung 2: a) *Penicillium spp.* makroskopisch auf DG-18-Agar, grau-grüne Kolonien; b) *Penicillium spp.* mikroskopisch

2.1.5.2 *Aspergillus spp.*

Die am häufigsten in der Umgebung des Menschen und ubiquitär vorkommenden Schimmelpilze sind die der Gattung *Aspergillus* Spezies. Auch sie gehören zu den Ascomyceten und verschreiben mit einer Zahl von 446 bekannten Arten einen Zuwachs um 32% (2014: 339 Arten) (10). Allgemein bevorzugen sie tropische Klimazonen, wärmeerzeugende Substrate (4) wie beispielsweise Komposthaufen oder häufig auch Baustaub (13). Zumeist werden die Spezies *A. fumigatus*, *A. niger* oder *A. flavus* nachgewiesen. Aspergillen können Sporen ablösen und aufgrund ihres geringen Durchmessers von zwei bis vier Mikrometern durch Inhalation „bis in die Alveolen der menschlichen Lunge“ ((13), S. 8) gelangen. Bei immunologisch geschwächten Personen kann dies beträchtliche Folgen haben.



a) **Abbildung 3: a) *Aspergillus* spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert; b) *Aspergillus* spp. mikroskopisch**

2.1.5.3 *Cladosporium* spp.

Auch den Ascomyceten angehörig sind die Schimmelpilze der Gattung *Cladosporium* Spezies. Nach neuesten Erkenntnissen beläuft sich die Anzahl auf 218 beschriebene Arten (14). Sie leben saprophytisch, sind sowohl in terrestrischen als auch marinen Umgebungen sehr weit verbreitet und leben mit Tieren und Pflanzen in einer symbiontischen Beziehung. Zusätzlich gehören sie zu den mit am häufigsten in Innenräumen nachgewiesenen Schimmelpilzen (14). 90% aller luftgetragenen Schimmelpilze im Sommer gehen auf die *Cladosporium* Spezies zurück. Ihnen kann ein erhebliches allergenes Potenzial zugeschrieben werden.

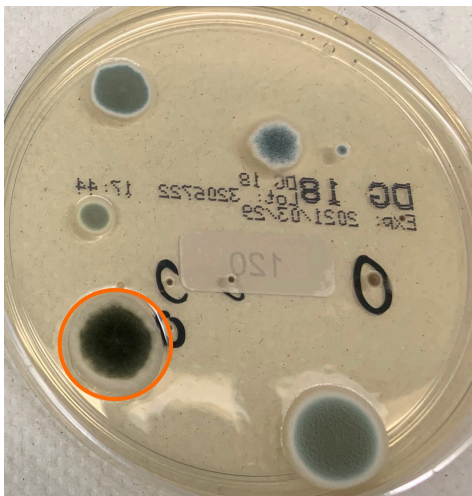


Abbildung 4: *Cladosporium* spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert

2.1.5.4 *Alternaria* spp.

Auch die *Alternaria* Spezies kann systematisch den Ascomyceten zugeordnet werden, hierbei ist *Alternaria alternata* der häufigste Vertreter. In den Hochsommer Monaten bilden sie ihr Maximum an Sporen aus und sind Verursacher allergischer Reaktionen (15). Sie sind sowohl in der Außenluft als auch in Innenräumen zu finden. Außerdem befallen sie Lebensmittel wie Obst, Gemüse und Nüsse. Von ihnen gebildete Mykotoxine sind für den Menschen toxisch und können unter Umständen zu einer Leukozytopenie führen. Ihr Wachstumsoptimum haben sie bei Temperaturen zwischen 25 und 27°C, wobei oberhalb von 32°C kein Wachstum mehr zu erwarten ist (4).

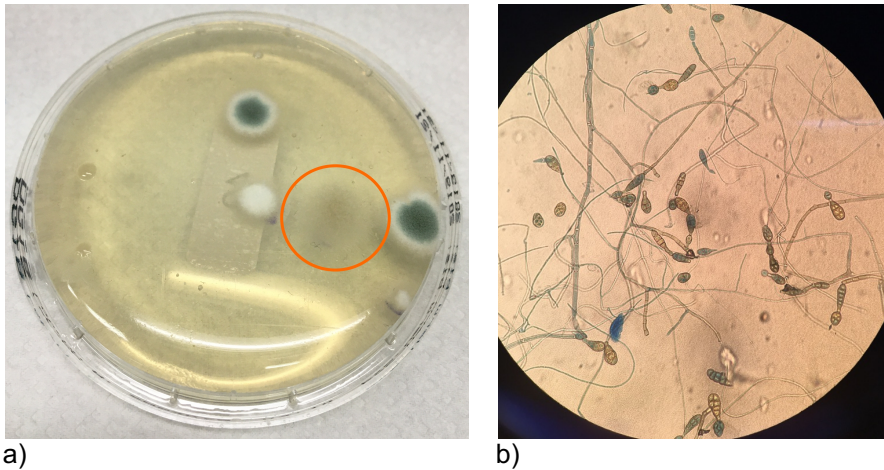


Abbildung 5: a) *Alternaria* spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, mit orangenem Kreis markiert; b) *Alternaria* spp. mikroskopisch

2.1.5.5 *Rhizopus* spp.

Auch *Rhizopus* Spezies gehören zu den Zygomyceten und können genauso wie die Sporen der *Mucor* Spezies selbst bei Temperaturen von -10°C noch keimfähig sein. In einer australischen Studie konnten im Jahre 2019 24 Spezies von mucoralen Organismen für das Auftreten von Mucormykosen bei Immunsupprimierten und Diabetikern verantwortlich gemacht werden. 48% davon wurden von *Rhizopus* spp. verursacht, gefolgt von *Mucor* spp. in 14% der Fälle (16). Wie die *Mucor* Spezies auch, haben *Rhizopus* Spezies allergenes Potenzial. Morphologisch unterscheiden sie sich von *Mucor* durch seine unverzweigten Sporangiothoren, während diese bei *Mucor* verzweigt sind. Außerdem kann *Rhizopus* im Gegensatz zu *Mucor* noch bei 40°C wachstumsfähig sein (17).

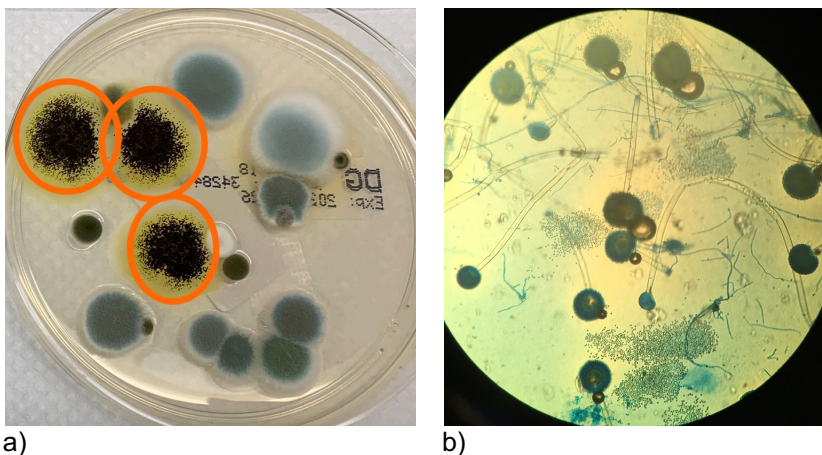


Abbildung 6: a) *Rhizopus* spp. makroskopisch auf DG-18-Agarplatte, orange markiert, schwarz kaffeefarbig; b) *Rhizopus* spp. mikroskopisch

2.2 Ursachen für Schimmelpilzwachstum in Innenräumen

Die Ursachen für Schimmelpilzbefall sind multipel. Die Kenntnis der Ursache vor den jeweiligen Sanierungsarbeiten ist Grundvoraussetzung, da nur so das eigentliche Problem sinnvoll behoben werden kann.

Allgemein lassen sich die Ursachen in absteigender Häufigkeit folgendermaßen untergliedern (vgl. (1)):

- | | |
|-----------------------|------|
| - Baumängel | 46 % |
| - Leckagen | 22 % |
| - Erhöhte Luftfeuchte | 19 % |
| - Falsche Möblierung | 13 % |

Im Rahmen der für die Dissertationsarbeit relevanten Messungen, waren hauptsächlich Wasserschäden und Leckagen Grund für Sanierungsarbeiten in den Räumlichkeiten der Universitätsmedizin.

2.2.1 Feuchteschäden mit mikrobiologisch unbelastetem Wasser

Eine der Hauptursachen für die Entwicklung von großflächigem Schimmelbefall, ist der Austritt von Trinkwasser. Der Schwerkraft folgend sammelt sich Wasser zunächst im Bereich des Fußbodens und in angrenzenden Strukturen. In Abhängigkeit der Wassermenge, des Alters des Schadens und der verwendeten Materialien, ist es möglich, dass der Wasserschaden sich zunächst unbemerkt ausbreitet. So kann sich das Wasser sekundär über „die Decke, über Schächte und Rohrdurchführungen in darunter liegende Stockwerke verteilen“ ((1), S. 131). Ein reiner Feuchteschaden mit mikrobiologisch unbelastetem Wasser führt zunächst nicht zwangsläufig zur Schimmelpilzbildung. Erst bei Kontakt mit verunreinigten Baumaterialien, kann es zu einem relevanten Wachstum von Schimmelpilzen kommen.

Die Art der verwendeten Baumaterialien spielen hier eine besondere Rolle. Rohdecken aus reinem Beton besitzen einen meist stark alkalischen pH-Wert, sodass ein Wachstum von Pilzen hier nur bei zusätzlicher Verunreinigung möglich ist.

Gipskartonplatten hingegen bieten aufgrund der beinhalteten Zellulose einen optimalen Nährboden für Toxin Bildner.

Zur technischen Trocknung dieser Feuchteschäden, ist nach aktuellen Erkenntnissen eine reine Überdruck-Trocknung, in von Menschen genutzten Bereichen, obsolet, auch diese eine schnellere Trocknung gewährleistet. Die Gefahr der Schadstofffreisetzung ist deutlich erhöht (18). Vielmehr sollte hier ein reines Unterdruck- oder ein kombiniertes Verfahren von Unter- und Überdruck eingesetzt werden.

2.2.2 Feuchteschäden mit mikrobiologisch belastetem Wasser und Fäkalschäden

In mit Fäkalkeimen belastetem Wasser sind nicht grundsätzlich Schimmelpilzbestandteile vorhanden. Dennoch stellt dieses Abwasser einen optimalen Nährboden für das Wachstum diverser Mikroorganismen dar. Bei anhaltender Feuchtebelastung ist die Gefahr für Schimmelwachstum stark erhöht. Sogar über die Trocknungsvorgänge hinaus, ist von einer Belastung mit Schimmelpilzbestandteilen auszugehen. Die kontaminierten Bereiche sollten in diesen Fällen gänzlich abgerissen werden, da eine Abdichtung von Randfugen zur weiteren unkontrollierten Verbreitung von Sporen, Bakterien und anderen mikrobiellen Bestandteilen führen kann (1, 18).

2.2.3 Feuchteschäden durch Leckagen haustechnischer Anlagen

Durch bereits kleinste Undichtigkeiten im Bereich von (Trink-)Wasserleitungen, Heizungsrohren oder beispielsweise in Badezimmern vorkommenden Silikonfugen, kann es zu unbemerktem Feuchteintritt in die umliegenden Materialien kommen. Der Schaden wird meist erst sekundär mit zeitlicher Latenz durch das Auftreten von sichtbarem Schimmel in anliegenden Räumen oder das Auftreten von Schimmelgeruch wahrgenommen (1).

2.2.4 Feuchteindikatoren

Einige Schimmelpilzarten treten bevorzugt bei Feuchteschäden auf. Überschreitet deren gemessene Konzentration die übliche Hintergrundkonzentration, so kann von Materialfeuchte ausgegangen werden. Diese Spezies werden als Feuchteindikatoren bezeichnet. Dazu zählen im Allgemeinen *Aspergillus* spp. oder *Penicillium* spp.. *Cladosporium* spp. sind vor allem in Hausstaub nachzuweisen. Um zwischen Kontamination und letztlich einem Schimmelpilzbefall zu unterscheiden, müssen Referenzmessungen zwischen dem vermeintlich befallenen Raum und einem Referenzraum durchgeführt werden ((8), S. 21-22).

2.3 Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen durch Schimmelpilze in Innenräumen

Das Wachstum von Schimmel und das Auftreten von erhöhter Feuchtigkeit in Innenräumen, konnte in zahlreichen Studien als Gesundheitsrisiko (insbesondere in Bezug auf den Respirationstrakt) eingestuft werden (Tabelle 3) Vor allem Kinder, die in einer feuchten und schimmelbelasteten Umgebung leben, sind hinsichtlich ihrer gesundheitlichen Entwicklung stark nachteilig betroffen (19). Es gilt als gesichert, dass die betroffenen Kinder vor allem zur Entwicklung eines Asthma bronchiale neigen (20). Es ist jedoch essenziell hierbei die Dauer und das Ausmaß der Exposition mit Bioaerosolen, sowie die individuelle Prädisposition der Personen mit zu betrachten. Neben immunsupprimierten Patienten sind auch Personen mit Zystischer Fibrose (Mukoviszidose) und Asthma bronchiale als gefährdete und demnach als besonders zu schützende Risikogruppen anzusehen (21).

Stärke des Zusammenhangs	Krankheiten/Symptome
Kausaler Zusammenhang	Exazerbation des Asthma bronchiale bei Kindern
Ausreichende Evidenz für Zusammenhang	<ul style="list-style-type: none"> - Allergische Atemwegserkrankungen - Asthma bronchiale (Manifestation, Progression, Exazerbation) - Allergische Rhinokonjunktivitis - Exogen Allergische Alveolitis (EAA) - Allergische bronchopulmonale Aspergillose (ABPA) - Chronische Bronchitis - Symptome und Infekte der (oberen) Atemwege - Dyspnoe - Atopisches Ekzem
Begrenzte Evidenz für Zusammenhang	Mucous Membrane Irritation (MMI)

Tabelle 3: Zusammenhänge zwischen Schimmelpilzexposition/Feuchtigkeit in Innenräumen und Krankheiten/Symptome, modifiziert nach (21-26)

2.3.1 Allergische Reaktionen durch Aeroallergene

2.3.1.1 Pathophysiologie und Diagnostik

Eine unabdingbare Voraussetzung für die Entwicklung allergischer Erkrankungen ist eine Sensibilisierung. Diese wiederum kann nur in Anwesenheit von entsprechenden Allergenen stattfinden und besitzt allein noch keinen Krankheitswert. Bei einem Erstkontakt mit den spezifischen Schimmelpilzantigenen, werden vom körpereigenen adaptiven Immunsystem, Antikörper gebildet. Im Falle einer Typ-I-Allergie vom Soforttyp handelt es sich um eine IgE-vermittelte Immunantwort. Es können aber auch Typ-III-Reaktionen, wie bei der exogen-allergischen Alveolitis, oder gemischte Reaktionen ausgelöst werden (22). Kommt es im Anschluss an die Sensibilisierung zu einem erneuten Kontakt mit dem Schimmelpilzallergen, folgt eine typische allergische Antwort des Körpers.

Für die Entwicklung einer symptomatischen Schimmelpilzallergie gibt es prädisponierende Faktoren die diese begünstigen: Neben der bereits beschriebenen, zwingend vorausgesetzten Sensibilisierung, besitzen Personen mit einer Atopie¹-Neigung oder bereits vorliegenden atopischen Erkrankungen ein erhöhtes Risiko (9). Zusätzlich sind die Sporen der zahlreichen

¹ Atopie: familiäre Disposition zur Entwicklung von Typ-I-Allergien (Soforttyp).

Schimmelpilzarten unterschiedlich potent und dosisabhängig hinsichtlich ihrer allergenen Wirkung (22).

Daten aus dem Kinder-Umwelt-Survey (KUS) 2003/06 zeigen, dass Kinder im Alter von 3-14 Jahren in Deutschland in circa 6% der Fälle gegen mindestens einen von vier untersuchten innenraumrelevanten Schimmelpilzen sensibilisiert waren. Außerdem wurde eine Zunahme der Sensibilisierung mit steigendem Alter festgestellt. Im Innenraum spielen diesbezüglich vor allem *Penicillium chrysogenum* (5%) und *Aspergillus versicolor* (2,3%) eine bedeutende Rolle. Bei 4,8% der Kinder wurde eine Sensibilisierung gegenüber *Alternaria alternata* und bei 2,1% bezüglich *Cladosporium herbarum* detektiert (23). Beides sind vor allem außenluftrelevante Schimmelpilze und bereits geringe Sporenkonzentrationen (10^2 - 10^3) sind bei sensibilisierten Personen ausreichend, um eine allergische Symptomatik hervorzurufen (8).

Rund 3-10% der Weltbevölkerung sind gegenüber Schimmelpilzen sensibilisiert. Dieser breite Prozentbereich kommt vor allem durch die bisher noch erschwerte und unzureichende Diagnostik, sowie die Varianz der in den Testsystemen verwendeten Pilzextrakten zustande (24). Diagnostisch ist es derzeit möglich nur circa 20 Schimmelpilzarten allergologisch mittels Haut-, Provokations- oder Bluttests zu testen, wobei „zwischen 80 und 340 Spezies als allergologisch relevant eingestuft“ werden ((25) S. 90). Ob eine Allergie nun aufgrund einer Innenraumbelastung oder der Außenluftexposition entstanden ist, kann damit nicht differenziert werden (8).

2.3.1.2 Allergische Rhinokonjunktivitis

Einen Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit oder Schimmel im Innenraum und der allergischen Rhinitis konnte in epidemiologischen Studien und Meta-Analysen durchgehend gezeigt werden (26). Hierbei handelt es sich um eine IgE vermittelte Typ-I-Reaktion. Die Symptomatik tritt daher innerhalb von Minuten auf und kann klinisch in eine saisonale, perenniale² oder berufsbedingte Form unterteilt werden. Während bei der saisonalen Form „Niesreiz, Sekretion [...], Obstruktion [...] [und] konjunktivale Reaktionen“ häufig in Verbindung mit „Asthma, Sinusitis und Hautreaktionen“ auftreten, dominiert bei der ganzjährigen Verlaufsform die „behinderte Nasenatmung“ als Leitsymptom. „Bronchiale Hyperreagibilität, ein Asthma bronchiale und/oder eine chronische Sinusitis“ können sich im Verlauf entwickeln ((9) S. 1312). Schimmelpilze der Außenluft wie *Alternaria alternata* und seltener *Cladosporium herbarum*, sind die häufigsten Verursacher.

2.3.1.3 Atopische Dermatitis

Das atopische Ekzem äußert sich durch „Trockenheit, Juckreiz und Hautausschläge“ (21). Auch hier besteht eine ausreichende Evidenz aus Studien und Analysen um die Dermatitis mit den Aeroallergenen der Schimmelpilze als Auslöser zu assoziieren (26).

2.3.1.4 Allergisches Asthma bronchiale

Ähnlich der allergischen Rhinitis lässt sich hier die durch außenluftrelevante Schimmelpilze verursachte, saisonale Form von dem perennialen, vor allem durch innenraumspezifische Schimmelpilze getriggerte allergische Asthma bronchiale unterscheiden (27).

Die Entstehung von Asthma, insbesondere bei Kindern die in einer häuslichen Umgebung mit erhöhter Feuchtigkeit und sichtbarem Schimmelbefall aufwachsen, wurde in zahlreichen Studien untersucht (20). Eine Assoziation gilt als gesichert. Sowohl *Alternaria alternata* als auch *Cladosporium* spp. nehmen hier die bedeutendsten Rollen ein (21).

Leitsymptome sind hierbei „Husten, Giemen, Atemnot oder thorakales Engegefühl [...] vorzugsweise nachts“ ((9) S. 1312).

² Perennial: ganzjährig

2.3.1.5 Exogen allergische Alveolitis (EAA)

Bei der EAA handelt es sich um eine große Gruppe verschiedenster, seltener Lungenerkrankungen. Durch die Inhalation von Aeroantigenen, die von Schimmelpilzen (aber auch von Vögeln, Bakterien etc.) stammen, wird nach einigen Stunden eine „allergisch bedingte Entzündungsreaktion der Alveolar Wand und des Interstitiums“ ausgelöst ((28), S. 52). Demnach spricht man hier von einer allergischen Reaktion vom Typ III und IV nach Coombs und Gell. Mehr als 40 Unterformen sind bekannt, wobei beispielsweise die Vogelhalterlunge und die Befeuchterlunge mit am häufigsten auftreten (29) und sie durch Bioaerosole von *Aspergillus spp.*, *Alternaria spp.* sowie *Penicillium spp.* verursacht werden (21). Die EAA ist eine anerkannte Berufskrankheit (BK Nr. 4201) und tritt entsprechend vorwiegend am Arbeitsplatz, mit einer Latenzzeit von 3-12 Stunden nach Antigenkontakt auf. Grippe-symptome mit Fieber und Schüttelfrost, sowie Belastungsdyspnoe und Husten sind Leitsymptome bei der akuten Verlaufsform. Davon abgrenzen lässt sich die häufiger im Kindesalter vorkommende chronische EAA, die sich hauptsächlich durch Belastungsdyspnoe auszeichnet (5). Das Auskultieren einer Sklerophonie³ stellt ein differenzialdiagnostisch wichtiges Kriterium dar, um die EAA von dem Organic Dust Toxic Syndrome (ODTS) abzugrenzen (28).

2.3.1.6 Allergische bronchopulmonale Aspergillose (ABPA)

Hauptsächlich Sporen von *Aspergillus fumigatus* sind dazu im Stande eine gemischte Typ-I- und Typ-III-Reaktion und damit eine ABPA zu triggern. Besonders häufig betroffen sind Patienten die an einer Cystischen Fibrose (CF) oder an Asthma bronchiale leiden, denn vor allem bei Ersterem können sich die Schimmelpilzbestandteile, begünstigt durch zähen Schleim, Mukosa Schäden und herabgesetzte mukoziliäre Clearance, gut im Respirationstrakt einnisten. Außerdem wurde eine familiäre Prädisposition bei HLA-DR₂ und HLA-DR₄-Typen festgestellt. Bis zu 30 % der CF-Patienten werden von *Aspergillus fumigatus* kolonisiert, was zu einer IgE, IgG und IgA Antikörper Bildung führt sowie durch Aktivierung von spezifischen CD₄⁺ TH₂-Zellen die Produktion von IL₄, IL₅ und IL₁₃ steigert (30). Durch das daraus entstehende Aufpotenzieren der Entzündungsreaktion wird „Bronchialepithel, Submukosa und das umliegende Lungenparenchym“ zerstört ((30), S.1004). Die Symptomatik zeichnet sich durch Husten, Verschlechterung des Allgemeinzustandes, Gewichtsabnahme, Hämoptysen oder zunehmender zähen Verschleimung aus (3).

Eine eindeutige Diagnose kann vielmehr durch das simultane Vorliegen von Haupt- und Nebenkriterien gestellt werden. Hierbei nehmen, neben den bereits genannten Risikogruppen, die allergologischen CAP-Testung mit rekombinanten Allergenen (rAsp f 4, rAsp f 6)⁴ und die Gesamt-IgE-Bestimmung eine wichtige Rolle ein.

Die ABPA sollte so früh wie möglich mit Kortikosteroiden und gegebenenfalls Itraconazol oder Omalizumab therapiert werden, um weiteren, fibrotischen Lungenschäden vorzubeugen (3, 30).

2.3.2 Irritative und toxische Reaktion durch Zellwandbestandteile und Stoffwechselprodukte

Bei einem Feuchte- oder Schimmelschaden sind, neben den allergologisch wichtigen Sporen, auch eine Vielzahl weiterer biogener Noxen bedeutsam. Diese werden mangels standardisierter Risikobewertung nicht routinemäßig untersucht.

Mykotoxine sind an Sporen, Myzel oder Zellbruchstücke gebundene, sekundäre Stoffwechselprodukte. Diese Abfallstoffe liegen meist in sehr niedrigen Konzentrationen im Hausstaub vor, „sodass akute toxische Wirkungen (Mykotoxikosen) nicht zu erwarten sind“ ((31), S. 31). In synergistischer Verbindung mit anderen Zellbestandteilen (z.B. Glucane) kann eine zytotoxische und immunmodulatorische Wirkung allerdings bisher nicht ausgeschlossen werden (22). Eine gesonderte Stellung nehmen Gliotoxine von *Aspergillus fumigatus* und die

³ Sklerophonie: endinspiratorisches Knisterrasseln

⁴ rAsp f: rekombinantes *Aspergillus fumigatus* Allergen

Satratoxine von *Stachybotryd chartarum* ein. Letztere konnten von 1993 bis 1994 mit Fällen von akuten Lungenblutungen bei 10 Kindern am Cleveland Children's Hospital assoziiert werden (32). Eine „routinemäßige Bestimmung von Mykotoxinen in der Innenraumluft“ ist aktuell aufgrund fehlender diagnostischer Bedeutung nicht sinnvoll. Außerdem ist „jeder relevante Schimmelbefall umgehend zu beseitigen [...] unabhängig davon ob Mykotoxine gebildet wurden oder nicht“ ((31) S. 31).

1,3-β-D-Glucan ist ein immunmodulatorischer Zellwandbestandteil von Pilzen und wurde hauptsächlich in Räumen mit mangelhafter Luftqualität gefunden. In diesem Zusammenhang wurden Rückschlüsse auf das Auftreten von Schleimhautreizungen und Müdigkeit gezogen (8).

MVOC (engl. Microbial Volatile Organic Compounds) sind gemischte flüchtige organische Verbindungen (Alkohole, Terpene, Ketone, Ester, Aldehyde). Sie werden von Schimmelpilzen gebildet und sind für den typischen Schimmelgeruch verantwortlich. Die Geruchswahrnehmungsschwelle liegt hierbei deutlich unter der toxischen Wirkschwelle, wodurch eine akute Gesundheitsgefährdung weniger in Frage kommt. Dennoch kann es durch die Geruchsentwicklung zu einer Belästigungsreaktion kommen, die sich durch eine „1. [...] emotionale Komponente (z.B. Gefühl der Verärgerung), 2. eine Interferenzkomponente (z.B. Behinderung von Entspannung) und 3. eine somatische Komponente (z.B. Übelkeit, Erbrechen, Kopfschmerzen)“ auszeichnet ((22) S. 78).

Als *PAMP* (Pathogen Associated Molecular Patterns) bezeichnet man Moleküle von Mikroorganismen. Zellwandbestandteile der Schimmelpilze, wie beispielsweise β-Glucane oder Phospholipomannane können vom angeborenen Immunsystem als PAMPs erkannt werden. Dies kann reizende oder entzündliche Prozesse aktivieren (33) und so zu unspezifischen Symptomen führen.

2.3.2.1 *MMI – Mucous Membrane Irritation / Chronische Bronchitis*

Die Symptome des MMI werden mit den oben genannten Noxen in Verbindung gebracht. Zusätzlich spielt möglicherweise noch die Freisetzung von Interleukinen und anderen Entzündungsmediatoren eine Rolle (21). In zahlreichen Studien konnte wiederholt gezeigt werden, dass bereits Schimmelpilzsporen-Konzentrationen im mittleren Bereich ($>10^3$ Sporen/m³) zu Schleimhautreizungen führen können (22). Vor allem bei Personen die berufsbedingt (Kompostarbeiter) mit erhöhten Konzentrationen konfrontiert sind, konnten diverse Reaktionen beobachtet werden. Diese äußern sich unspezifisch durch Brennen, Tränen und Jucken der Augen, Niesreiz, Sekretion und Verstopfung der Nase oder durch einen trockenen Rachen mit Räuspern (34). Eine Manifestation als chronischer Husten ist nicht auszuschließen (21). Im Unterschied zur allergischen Reaktion nehmen die Beschwerden, bei längerer und immer wieder stattfindender Aussetzung mit den biogenen Noxen, nicht zu. Nach Beendigung der Exposition sistieren die Symptome rasch.

2.3.2.2 *Organic Dust Toxic Syndrome / Toxische Alveolitis*

Übersteigen die Sporenkonzentrationen in organischen Stäuben Werte von über 10^9 Sporen/m³, kann es einige Stunden nach der Exposition zu Fieber und grippeartigen Symptomen kommen, die sich meist nach weniger als 24 Stunden selbst limitieren. In Ausnahmefällen können die Beschwerden bis zu sieben Tage anhalten (35). Da eine sehr hohe Keimkonzentration in Feinstäuben die Grundvoraussetzung ist, tritt die Erkrankung hauptsächlich arbeitsplatzbezogen auf und wird beispielsweise auch Getreide- oder Drescherfieber genannt. Das nicht-allergische ODTS ist nur schwer von der EAA abzugrenzen, tritt jedoch häufiger auf (9).

2.3.3 Mykosen

Exogene Mykosen sind insgesamt seltene Infektionen. Jedoch treten sie häufig bei stark immungeschwächten Menschen auf die sich beispielsweise in einer hämatoonkologischen Therapie mit Neutropenie sowie Chemotherapie befinden oder bei Patienten nach einer

Stammzelltransplantation. Personen mit Erkrankungen, die das Lungengerüst betreffen, wie die narbig verheilte Tuberkulose oder COPD, haben ebenso ein erhöhtes Risiko einer Schimmelpilzinfektion. Aspergillus Arten (*A. fumigatus* 41%, *A. flavus* 27%) sind hierbei die häufigsten Auslöser (8, 13). Prädilektionsstellen ist primär die Lunge, gefolgt von den Nasennebenhöhlen, dem Ohr und der Haut. „Über 50% der betroffenen Patienten stammten aus der Hämatologie/Onkologie“ ((21) S. 24, (13)), weshalb dieser Bereich als hochsensibel gilt. Da die aerogen aufgenommenen Schimmelpilzsporen jedoch auf den Schleimhäuten persistieren und hämatogen oder lymphogen streuen, können Mykosen, trotz maximaler Abschottung der Patienten nach Chemotherapie mit zeitversetzter Immunsuppression, auftreten. Renovierungs- und Sanierungsarbeiten in Krankenhäusern und im umgebenden Außenbereich stehen aufgrund erhöhter Staub- und Keimbelastung in einem gesicherten Zusammenhang mit nosokomialen Mykosen (13) und stellen die häufigste Ursache dar.

2.3.3.1 Invasive Aspergillose

Die Aspergillose spielt mit einem Auftreten von über 85% unter allen Mykosen die größte Rolle. Aerogen gelangen die Sporen vorwiegend in die Lunge und lösen hauptsächlich bei immunkomprimierten Patienten eine invasive pulmonale Aspergillose aus, die im Verlauf sekundär sämtliche Organe befallen kann. Hier sind bei Komplikationen im Endstadium vor allem das Gehirn und die Nieren betroffen. Meist konnte die Erkrankung bei Patienten mit AML⁵, ALL⁶ oder nach allogenen⁷ Stammzelltransplantationen nachgewiesen werden, denn eine lange Phase der Neutropenie (> 10 Tage, < 500 Zellen/mm³) nach Chemotherapie stellt weiterhin den wichtigsten Risikofaktor dar. Immungeschwächte Patienten werden (prophylaktisch) antimykotisch (Voriconazol) behandelt.

Die Symptome sind unspezifisch. Sprechen Personen mit neutropenem Fieber jedoch nicht auf ein Breitspektrum-Antibiotikum an, ist dies ein frühes Anzeichen für eine invasive Aspergillose. Generalisierte Krampfanfälle oder fokale neurologische Ausfälle können ein Hinweis auf eine späte Hirn-Manifestation sein (36). Die Letalität ist mit 30-95% sehr hoch (21).

2.3.3.2 Aspergillom

Auch Myzetom oder Pilztumor genannt, stellt das Aspergillom die nicht-invasive chronische Form der pulmonalen Aspergillose dar. Bereits existierende Höhlen, wie beispielsweise in der Lunge nach einer Tuberkulose Erkrankung, stellen Prädilektionsstellen dar. Die Myzelien sammeln sich dort an und bilden eine lokalisierte, kugelige Raumforderung. In fast 60% der Fälle sind Aspergillome in minderdurchbluteten Gewebshöhlen zu finden. Während es bei Hirnbefall zu fokalen neurologischen Defiziten bis hin zu erhöhtem Hirndruck kommen kann, stellt Hämoptysen bei Befall der Lunge und involvierten Bronchialgefäßen meist das erste klinische Symptom dar (37).

2.4 Arbeitsschutz

2.4.1 Gefährdungsbeurteilung

Bei der Sanierung eines Schimmelschadens kommt es zwangsläufig zu einer Gefährdung durch biologische Arbeitsstoffe. Eine vorherige Ortsbegehung ist für die Gefährdungsbeurteilung von großer Bedeutung. Es müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden, um die Mitarbeiter vor Ort sowie die umliegende Umgebung zu schützen.

Der Ausschuss für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS) ermittelt die Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) und teilt so die Schimmelpilze, nach den neuesten wissenschaftlich gesicherten Erkenntnissen, in Risikogruppen ein (Tabelle 4). Diese Einstufung hat der Arbeitgeber zu beachten und entsprechende Schutzvorkehrungen zu

⁵ AML: Akute Myeloische Leukämie

⁶ ALL: Akute Lymphatische Leukämie

⁷ Allogen: nicht körpereigen, sondern von genetisch passendem Fremdspender erhalten

treffen. In der TRBA 460 „Einstufung von Pilzen in Risikogruppen“ (38) sind die meisten Schimmelpilze in die Gruppen eins oder zwei nach §3 der Biostoffverordnung (BioStoffV) eingeteilt.

Definition der Risikogruppen	
Risikogruppe 1	Biologische Arbeitsstoffe, bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit verursachen.
Risikogruppe 2	Biologische Arbeitsstoffe, die eine Krankheit beim Menschen hervorrufen können und eine Gefahr für Beschäftigte darstellen können; eine Verbreitung der Stoffe in der Bevölkerung ist unwahrscheinlich; eine wirksame Vorbeugung oder Behandlung ist normalerweise möglich.

Tabelle 4: Definition der Risikogruppen nach § 3, BioStoffV ((39), S. 26)

2.4.2 Schutzmaßnahmen

Die Schutzmaßnahmen werden gemäß Gefährdungsklassen festgelegt. Diese müssen vom Arbeitgeber gestellt und von den Mitarbeitern entsprechend umgesetzt werden müssen.



Abbildung 7: Einteilung der Gefährdungsklassen, modifiziert nach ((39), S. 16)

Gemäß der TRBA 500 sind - unabhängig der Gefährdungsklassen - immer die grundsätzlichen „Allgemeine Hygienemaßnahmen“ zu befolgen. Hierzu gehört das Reinigen der Hände nach der Arbeit und vor Pausen. Eine geeignete Hautpflege der strapazierten Haut am Arbeitsende laut Hygiene- und Hautschutzplan ist essenziell. Auf das Rauchen, Essen, Trinken sowie den Kosmetika-Gebrauch sollte generell verzichtet werden (39). Bei Baustellen, welche ohne besondere Gefährdung eingestuft wurden, reichen die allgemeinen Hygienemaßnahmen aus.

Im Folgenden werden zum Zwecke der Übersicht die weiteren Schutzmaßnahmen hinsichtlich der jeweiligen Gefährdungsstufen dargestellt.

2.4.2.1 Gefährdungsklasse 1

Sofern eine Tätigkeit mindestens der Gefährdungsklasse 1 zugeordnet wurde, besteht durch die BG Bau die Empfehlung, zusätzlich zu den allgemeinen Hygienemaßnahmen der TRBA 500, folgende Schutzmaßnahmen zu treffen:

2.4.2.1.1 *Persönliche Schutzausrüstung:*

Die Bauarbeiter sind ab der ersten Gefährdungsklasse verpflichtet Atemschutzmasken zu tragen. Sofern die Tätigkeiten nur kurz andauern (< 2 Stunden, vgl. Abbildung 7) sollten Masken mit P2-Filter eingesetzt werden. Halbmasken mit TM2P-Partikelfilter sind den FFP-Einwegmasken überlegen und optimalerweise vorzuziehen. Die Atemschutzmasken sollten mindestens einmal täglich verworfen werden. Ein Ablegen verwendeter Masken sollte erst im unbelasteten Bereich stattfinden.

Augenschutz mit einer Schutzbrille findet vor allem bei Bauarbeiten mit der Gefahr der Spritzwasserbildung oder bei Arbeiten über Kopf mit Staumentwicklung Anwendung.

Außerdem sollte partikeldichte, luftdurchlässige Einwegschutzbekleidung, Kategorie III, Typ 5 mit Kapuze getragen werden, um eine Keimverschleppung zu minimieren.

Handschuhe aus beispielsweise Nitril Kautschuk mit gegebenenfalls Zwirnunterziehhandschuhen schützen vor entsprechendem Hautkontakt.

Es sind zusätzlich wasserabweisende Schutzschuhe zu verwenden. Alternativ ist es empfehlenswert, saubere Schuhe im unbelasteten Bereich vorzuhalten (40).

2.4.2.1.2 *Minimierung von Staub und Aerosolen (technische Maßnahmen)*

Um die Staubbelastung und die damit einhergehende erhöhte Konzentration an aerogenen Mikroorganismen zu reduzieren, müssen geeignete Verfahren angewandt werden. Das Befeuchten von Oberflächen, Tapeten oder befallener (Teppich-)Böden unmittelbar vor dem Abtragen ist eine Möglichkeit, um das Aufwirbeln von Staub zu minimieren. Zusätzlich kann locker anhaftender Schimmelpilzbefall vor Sanierung abgesaugt und somit die Oberfläche gereinigt werden. Das Nutzen von Geräten mit integrierter Absaugung hilft zusätzlich die Staubverbreitung zu minimieren.

Abbürsten, Dampf- oder Trockenstrahlen sind keine geeigneten Verfahren (40).

Um den Tätigkeitsbereich zu reinigen müssen zwingend Industriesauger mit Filtern der Staubklasse H eingesetzt werden (gemäß DIN EN 60335-2-69) (40).

Der Abtransport von anfallendem abmontiertem Material sollte in stabilen Plastiksäcken erfolgen. Diese Säcke müssen empfehlungsweise vor Verlassen des Baustellenbereichs abgesaugt werden, um eine Sporenverschleppung zu verhindern.

2.4.2.1.3 *Kontaminationsvermeidung unbelasteter Bereiche*

Zwangsläufig werden durch die Bauarbeiten Stäube und somit Sporen aufgewirbelt. Daher sollte eine Kontamination nicht betroffener Bereiche oder Gegenstände vermieden werden. Dies wird bewirkt indem der Schadensbereich staubdicht abgetrennt wird, sowie Möbel, Wände und Böden der näheren Umgebung abgedeckt werden. Das Abhängen mit einer dünnen Plastikfolie stellt eine Möglichkeit dar. Eine Schwarz-Weiß-Trennung kann hiermit nicht geschaffen werden.



Abbildung 8: Beispiel für die Anwendung einer dünnen Folie

Im Anschluss an die Sanierungsarbeiten muss der Arbeitsbereich gründlich gereinigt werden (40).

2.4.2.1.4 *Betriebsanweisung, Unterweisung und Organisation*

Ein weiterer essenzieller Punkt im Hinblick auf die erfolgreiche Kontaminationsvermeidung und Effektivität der Staubschutzmaßnahmen ist die verständliche Unterweisung der zuvor festgelegten Betriebsanweisung. Diese Betriebsanweisung wird vorab verschriftlicht und

ausgehängt, sodass zu jeder Zeit eine Einsichtnahme erfolgen kann. In dieser Anweisung werden die anzuwendenden Arbeitsschutzmaßnahmen festgelegt (u.a. besondere Hygienemaßnahmen, Desinfektion, Entsorgung). Außerdem muss die Aufbewahrung und Trennung kontaminierter Arbeits- bzw. Schutzkleidung von der Privatkleidung organisiert werden. Wasch- und Umkleidemöglichkeiten vor Ort müssen gewährleistet sein. Das Einbringen von Nahrungsmitteln, Tabak oder Getränken in den Baustellenbereich ist nicht gestattet (40).

2.4.2.2 Gefährdungsklasse 2

Sofern eine Tätigkeit der Gefährdungsklasse 2 zugeordnet wurde, besteht durch die BG Bau die Empfehlung, zusätzlich zu den allgemeinen Hygienemaßnahmen der TRBA 500 und den Maßnahmen der Gefährdungsklasse 1 (vgl. Kapitel 2.4.2.1), folgende Schutzmaßnahmen durchzuführen:

2.4.2.2.1 Persönliche Schutzausrüstung

Die persönliche Schutzausrüstung beinhaltet alle Maßnahmen der Gefährdungsklasse 1. Zusätzlich werden hinsichtlich des Atemschutzes mindestens P2-Masken mit Gebläseunterstützung aufgrund des geringeren Atemwiderstandes empfohlen. Sofern möglich sind jedoch Atemschutzhauben der Schutzstufe TH2P vorzugsweise zu verwenden (40).

2.4.2.2.2 Lüftungsmaßnahmen

Ab Gefährdungsklasse zwei sollte zusätzlich für eine sichere technische Be- und Entlüftung gesorgt werden (40). Insbesondere wenn der zu sanierende Bereich keine Fenster und somit direkten Zugang zur Außenluft hat. Hier müssen teilweise lange Strecken überwunden werden, was eine intensive vorherige Planung erfordert.



Abbildung 9: Installation von Be- und Entlüftungsrohren im Rahmen einer Baustelle mit fester Staubschutzwand in sensiblen OP-Bereich

2.4.2.2.3 Schwarz-Weiß-Trennung

Betroffene Baustellenbereiche müssen als Schwarz-Weiß-Bereich gekennzeichnet werden. Bei kleineren Räumen kann es unter Umständen ausreichend sein, diese abzudichten. Die kontaminierte Kleidung darf nicht im Weißbereich abgelegt werden. Auch Werkzeuge oder andere Arbeitsmittel müssen noch im Schwarzbereich abgesaugt und gereinigt werden (40).

2.4.2.3 Gefährdungsklasse 3

Sofern eine Tätigkeit der Gefährdungsklasse 3 zugeordnet wurde, besteht durch die BG Bau die Empfehlung, zusätzlich zu den allgemeinen Hygienemaßnahmen der TRBA 500 und den Maßnahmen der Gefährdungsklasse 1 und 2 (vgl. Kapitel 2.4.2.1 und 2.4.2.2), folgende Schutzmaßnahmen durchzuführen:

2.4.2.3.1 Lüftungsmaßnahmen

Ab Gefährdungsklasse zwei sollte zusätzlich für eine sichere technische Be- und Entlüftung des Baustellenbereichs gesorgt werden. Beim Leiten der Abluft muss sichergestellt werden,

dass keine Gefährdung Dritter entsteht, was ggf. eine Filterung der Abluft zur Folge haben muss (40).

2.4.2.3.2 Schwarz-Weiß-Trennung

Abhängig von der Kontamination und Exposition sollte der Übergang in den Weißbereich über Ein- oder Mehrkammerschleusensysteme stattfinden. Angrenzende Räumlichkeiten können dazu mit einbezogen werden (40). Die betroffenen Sanierungsbereiche werden daher sehr individuell aufgebaut, was eine gründliche Planung vorab erfordert.

2.4.3 Staubschutzmaßnahmen der Unimedizin Mainz

Die im Rahmen der Dissertation begleiteten Baustellen der Unimedizin Mainz haben sich auf folgende zwei verschiedene Arten der Staubschutzmaßnahmen konzentriert:

2.4.3.1 Staubschutzfolie mit Reißverschlussystem

Häufig wurden die Baustellen mittels dickerer Folien und starkem Fasertape von der Umgebung staubdicht abgetrennt. Um den zu sanierenden Bereich weiterhin betreten zu können, wurde zentral ein Reißverschluss installiert. Meist erfolgt dieser Aufbau im Rahmen eines Ein- oder Mehrkammer-Schleusensystems. Das bedeutet, es werden hintereinander geschaltete Kabinen mit Hilfe dieser Folienkonstruktion erschaffen. Jede einzelne besitzt einen separaten Reißverschluss. Dies dient vor allem dazu, eine mögliche Luftkeim- sowie direkte Keimverschleppung durch Schutz- oder Arbeitskleidung zu vermeiden. Zunächst sind alle Reißverschlüsse geschlossen. Das Baustellenpersonal legt außerhalb der ersten Schleusenkompartimente, die noch nicht kontaminierte, persönliche Schutzausrüstung an.

Beim Übergang von einer zur nächsten Schleusenkabine sind, bis auf die dafür notwendige Reißverschlussstür, alle anderen verschlossen. Die einzelnen Kabinen sind außerdem zum Teil mit HEPA-Luftfiltergeräten und Abfallbeuteln bestückt. In manchen Fällen werden weitere Schleusenkompartimente eingebaut, um diese als Ablageort für angefallenen, potenziell kontaminierten Müll in Säcken zu nutzen. Bei Verlassen des kontaminierten Hauptarbeitsbereichs, wird gemäß des Schleusensystems in der zur Baustelle am nächstgelegenen Kompartiment mit verschlossenen Reißverschlüssen, die Schutzkleidung vorsichtig abgelegt und in kräftigen Abfallsäcken verstaut. Es folgt das sofortige luftdichte Verschließen des Beutels. Nach kurzer Wartezeit kann der Übergang in die nächste Schleusenkabine erfolgen. Die Hände sollten desinfiziert und die Arbeitsschuhe gereinigt werden. Erst dann ist das endgültige Verlassen des Schleusensystems sinnvoll.

Damit dieses aufwendige System in der Praxis funktioniert, ist Mitarbeit und Verständnis des Personals gefordert.

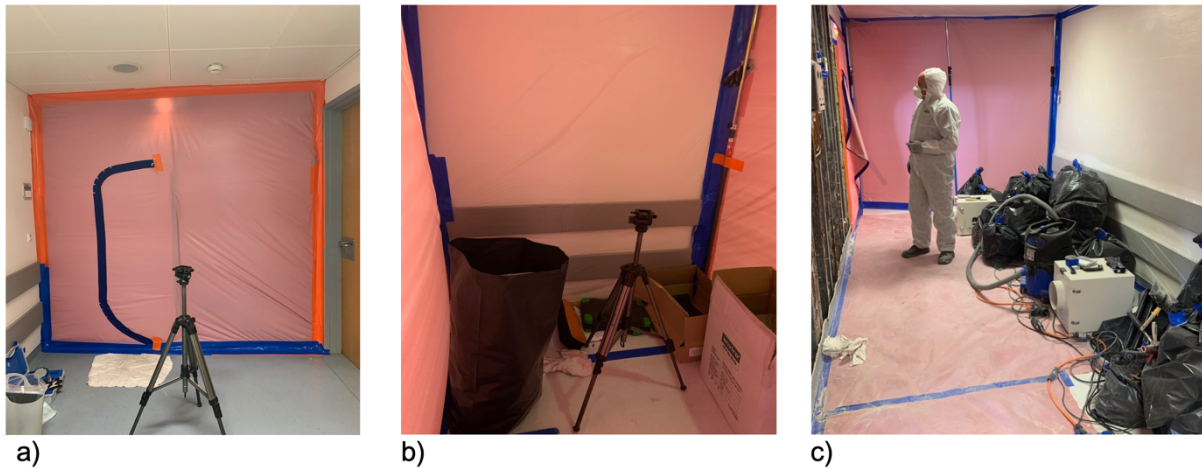


Abbildung 10: Schliessensystem mit dicker Folie und Reißverschluss; a) außerhalb der Schleuse im Flurbereich, Blick auf Reißverschlussystem; b) Innerhalb einer Schleuse mit Abfallsack; c) Bauarbeiter mit Schutzausrüstung im Hauptbereich der Baustelle, rechts luftdicht verschlossene Abfallsäcke

2.4.3.2 Feste Staubschutzwand

Fest installierte Wände werden vor allem bei Baustellen in sensiblen Arealen wie beispielsweise im Operationsbereich oder bei hoher, zu erwartender Keimbelastung mit hoch eingestufte Gefährdungsklasse, montiert. Dieses System ist sowohl kosten- als auch zeitintensiver im Aufbau. Innerhalb des Baustellenbereichs sind dann meist Kombinationen aus festen Staubschutzfolien, dünnen Folien zum Abhängen von Mobiliar und mitintegrierte, bereits vorhandene Zimmertüren zu finden.



Abbildung 11: linkes Foto: Installation einer festen Staubschutzwand mit integrierter Tür rechts; rechtes Foto: innerhalb der Baustelle mit fester Wand rechts und dicken Staubschutzfolien links

Zum Betreten der Baustelle wird ein Zugang entweder mittels fester, integrierter Tür oder einem Zugang von außen durch Fenster sichergestellt. Da diese Maßnahme meist bei einer hohen vermuteten Staub- und Keimbelastung angewendet, wird dringend darauf geachtet, dass eine suffiziente Be- und Entlüftung, wie in Kapitel 2.4.2.2.2 beschrieben, gewährleistet ist.

2.4.3.3 HEPA-Luftfilter

Auf den Baustellen im Bereich der Unimedizin Mainz werden Luftfiltergeräte der Firma AERIAL (AHM 100) verwendet, um die potenzielle aerogene Schimmelpilzbelastung im Baustaub zu minimieren.

Das Luftfiltergerät wird regelmäßig überprüft und die Luftfilter (Vor- und Hauptfilter) bei Bedarf ausgetauscht, um einen störungsfreien Betrieb zu garantieren.

Bei dem Vorfilter handelt es sich um einen G 4 Grobstaub Filter um zunächst für ein grobes Herausfiltern von größeren Teilchen zu sorgen.

Der Hauptfilter ist ein H 13 HEPA (High- Efficiency Particulate Air) Filter. Hierbei handelt es sich um ein hochwirksames Fasernetz welches kleinste Partikel aus der Umgebungsluft filtert. Die Normung und Klassifizierung von Filtern lässt auf das Filtervermögen zurückschließen. Es gibt Filterklassen von 1 – 17. Je höher die Zahl, desto höher das Filtervermögen. Demnach besitzt ein H 13 HEPA-Filter einen Abscheidegrad von 99,95% und einen Durchlassgrad von 0,05%.

Ein Wechsel des Filters sollte alle 6 – 12 Monate erfolgen.

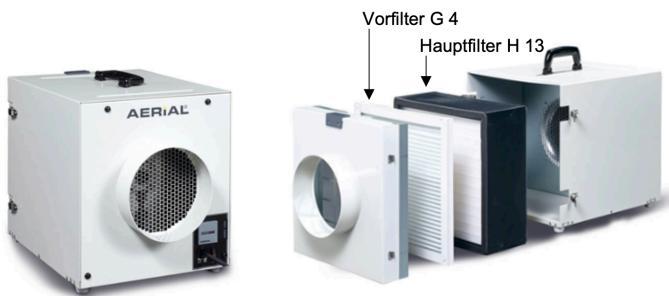


Abbildung 12: AERIAL AMH 100 Luftfilter, modifiziert nach (44)

3 Material und Methoden

Im Zeitraum Oktober 2019 bis März 2022 wurden Luftkeimproben von unterschiedlichen Baustellen in den Räumlichkeiten der Universitätsmedizin Mainz entnommen.

3.1 Luftkeimsammler:

Um die Anzahl sowie die Art der Schimmelpilze in der Umgebungsluft auf den Baustellen zu untersuchen, wird das Luftkeim-Sammelgerät MAS 100 Eco der Firma MBV verwendet. Im Verlauf stellt sich heraus, dass die Volumeneinstellung $V_4 = 100 \text{ l}$ in 1 Minute am effektivsten die Keime sammelt, ohne die Nährmedien im Anschluss zu überwuchern. In einigen Ausnahmefällen kann dies jedoch nicht komplett verhindert werden.

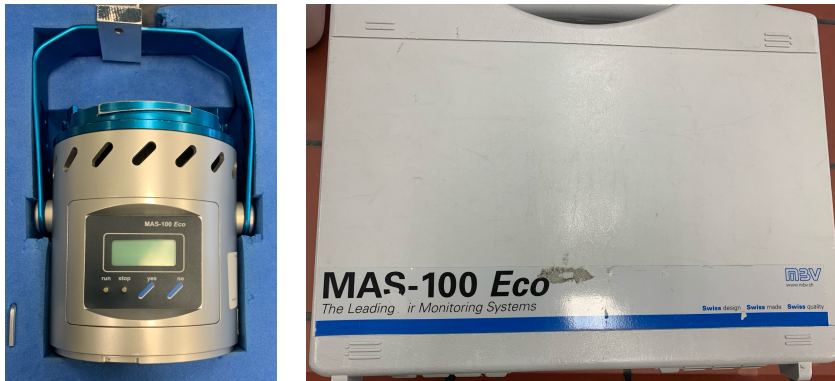


Abbildung 13: Luftkeimsammler MAS-100 Eco von MBV

Mit Hilfe des sogenannten Impaktionsverfahren werden bestimmte Luftvolumina (V_4) durch ein Loch Sieb (400 Löcher) mit definiertem Porendurchmesser (0,7 mm) auf das Nährmedium gesaugt. Luft und die Partikel darin werden dabei beschleunigt und auf eine Nährmedienplatte (DG18) unter dem Loch sieb geleitet. Aufgrund der Massenträgheit impaktieren Partikel oberhalb einer gewissen Größe auf das Nährmedium. Partikel, welche Mikroben tragen, werden nach ausreichender Inkubation als Kolonien sichtbar. Im Anschluss können diese gezählt und als KBE/ m^3 bestimmt werden. Die Partikelgröße, bei der 50% der Partikel impaktieren und die andere Hälfte im Luftstrom verbleibt, wird Abscheiderate d_{50} (μm) genannt (41).

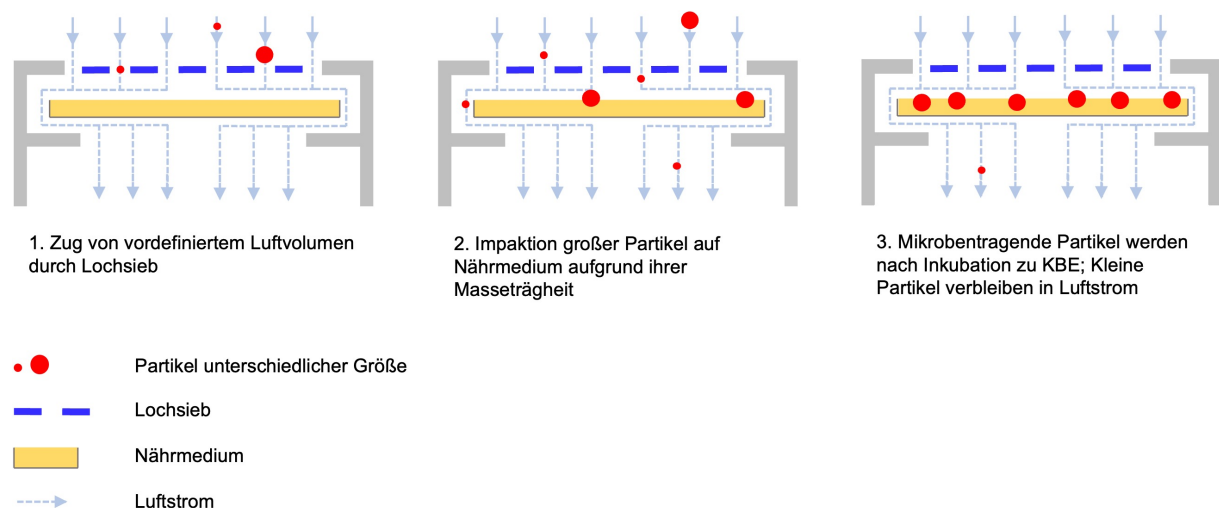


Abbildung 14: Impaktionsverfahren, schematisch, modifiziert nach (45)

3.2 Art des Nährmediums und Identifizierung der Schimmelpilze:

Zur Anzucht der Schimmelpilze wird DG18 (Dichloran Glycerin 18%) Agar verwendet. Dieser eignet sich besonders gut zur Anzucht xerophiler⁸ Schimmelpilze. Das enthaltene Pepton dient als Stickstoffquelle und das Glycerol vorrangig als Kohlenstoff- und Energiequelle. Aufgrund des niedrigen pH-Werts von 5,6 (+/- 2) und des zusätzlich enthaltenen Chloramphenicols wird außerdem das Bakterienwachstum gehemmt. Dichloran führt zur Unterdrückung des Wachstums apathogener Pilze und Hefen. (42)

Nach der Bebrütung bei ca. 25°C und einer Latenzzeit von fünf bis sieben Tagen, können die bewachsenen Agarplatten aus dem Brustschrank entnommen werden.

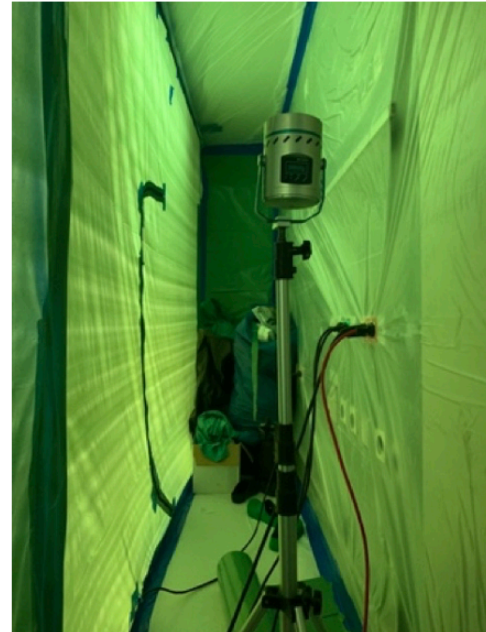
3.3 Aufbau der Messungen und Identifizierung der Schimmelpilze:

Zum Messen der Luftkeime mittels Luftkeim-Sammler wird ein Stativ verwendet. Dieses wird für jede Messung auf eine Höhe von 1,20 m eingestellt. Der Luftkeim-Sammler wird im Anschluss auf das Stativ aufgeschraubt, eine frische DG18-Agar Platte ohne Deckel eingelegt und mit einem sterilisierten Filter verschlossen. Die Tür oder Folie des zu messenden Raums/Schleusenabschnitts ist geschlossen. Liegt ein Schleusen-System im Bereich der Baustellen vor, werden diese Messungen von außen (außerhalb der Schleuse) nach innen (innerhalb der Schleuse bzw. des betroffenen Raumes) durchgeführt, um mögliche Messfehler zu reduzieren. Bei jeder Messung sind die Türen oder Reißverschlüsse der Schleusen geschlossen. Ohne Verzögerung wird die Messung mit dem voreingestellten Volumen (V4 – 100l/min für 1 Minute) gestartet. Im Anschluss werden die Filterdeckel entfernt, die verwendete DG18 Platte aus dem Messgerät entnommen und mit dem Deckel und einem Tape fest und luftdicht verschlossen.

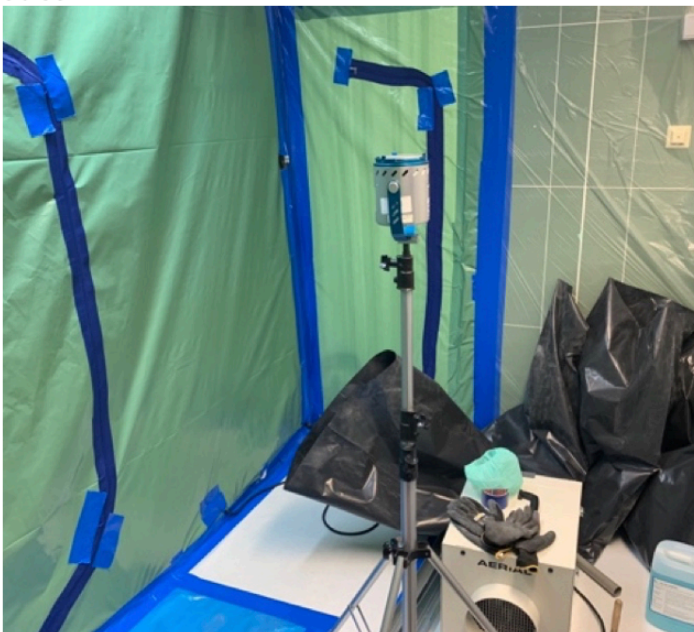
⁸ Xerophil: trockene Bedingungen bevorzugend



Feste Staubschutzwand mit Tür und Abluftleitung nach außen



Messung in 1. Schleuse



Messung in 2. Schleuse



Messung bei geöffneter Decke

Abbildung 15: Exemplarische Darstellung eines Messaufbaus zur Luftkeimmessung im OP-Bereich mit fester Staubschutzwand und Mehrkammerschleusensystem

Unmittelbar im Anschluss an die Entnahme der Proben, werden die impaktierten DG18-Agarplatten für mindestens fünf bis maximal sieben Tage im Brutschrank bei 36°C inkubiert.

Nach dieser Latenzzeit werden die Platten entnommen und das weitere Arbeiten erfolgt an einem entsprechenden Laborarbeitsplatz mit Luftabzug, um eine versehentliche, iatrogene Verbreitung von Sporen zu vermeiden.

Es zeigt sich meist ein buntes Bild verschiedener Schimmelpilzkolonien. Zunächst werden diese makroskopisch einander zugeordnet, ausgezählt und als KBE protokolliert. Die genaue Identifikation der einzelnen Kolonien erfolgt im Anschluss mittels Klebestreifenabriss Methode. Dazu wird mit Hilfe eines Klebestreifens ein Teil der zu untersuchenden Kolonie von der Agarplatte abgerissen. Diese Probe wird anschließend auf einen Objektträger gebracht und

gleichzeitig mit einem Tropfen Methylenblau eingefärbt, um die Schimmelpilze sowie deren Sporen unter dem Lichtmikroskop sichtbar zu machen und endgültig zu identifizieren.

3.4 Auswertung der Luftproben

Eine Beurteilung der Proben sollte gemäß der Leitlinie der UBA immer differenziert betrachtet werden. Die isoliert mathematische Betrachtungsweise und Risikoabschätzung der Luftproben ist nicht zielführend und sehr fehleranfällig, da es bei den Messungen zu teils drastischen zeitlichen und räumlichen Schwankungen in der KBE-Zahl kommen kann und die Baustellen jeweils oftmals unterschiedlich aufgebaut sind. Eine gesamte Betrachtung aller gewonnenen Informationen inklusive der Ortsbegehung ist unerlässlich, um Einzelfallentscheidungen treffen zu können. In der Leitlinie des Umweltbundesamtes werden Bewertungshilfen und Orientierungskonzentrationen dargelegt, um die erhobenen Messwerte orientierend einstuft zu können ((8) S. 115 – 118, S 182). Die Tabelle basiert auf Messungen der Schimmelpilzbelastung im Außen- und Innenbereich, um eine mögliche Innenraumquelle ausfindig zu machen. Eine spezielle Auswertungshilfe in Bezug auf Sanierungsarbeiten und der Effektivität der Staubschutzmaßnahmen in Hinblick auf die Verbreitung von Schimmelpilzsporen in der Luft, gibt es bislang nicht. Im Rahmen der Promotionsarbeit wurde die Bewertungshilfe des Umweltbundesamtes demnach modifiziert angewendet, um die Schimmelpilzbelastung im Vergleich orientierend auf Ihre Relevanz zu beurteilen.

Parameter	Hintergrundbelastung Innenraumquelle unwahrscheinlich	Innenraumquelle möglich	Innenraumquelle wahrscheinlich
Summe der KBE aller untypischen Außenluftarten	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 150 KBE/m ³ liegt $I\S_{\text{untyp A}} \leq A\S_{\text{untyp A}} + 150$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 150 KBE/m ³ und bis zu 500 KBE/m ³ liegt. $A\S_{\text{untyp A}} + 150 < I\S_{\text{untyp A}} \leq A\S_{\text{untyp A}} + 500$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 500 KBE/m ³ liegt. $I\S_{\text{untyp A}} > A\S_{\text{untyp A}} + 500$
eine Art der untypischen Außenluftarten mit guter luftgetragener Verbreitung z. B. <i>Aspergillus</i> spp., <i>Penicillium</i> spp.	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 50 KBE/m ³ liegt* $I\text{E}_{\text{untyp A}} \leq A\text{E}_{\text{untyp A}} + 50$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 50 KBE/m ³ und bis zu 100 KBE/m ³ liegt* $A\text{E}_{\text{untyp A}} + 50 < I\text{E}_{\text{untyp A}} \leq A\text{E}_{\text{untyp A}} + 100$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 100 KBE/m ³ liegt $I\text{E}_{\text{untyp A}} > A\text{E}_{\text{untyp A}} + 100$
<i>Cladosporium</i> sowie andere Pilzgattungen, die in der Außenluft erhöhte Konzentrationen erreichen können (z. B. sterile Myzelien, Hefen, <i>Alternaria</i> , <i>Botrytis</i>)	Wenn in der Innenraumluft nicht mehr Sporen einer Gattung als in der Außenluft vorliegen $I\text{typ A} \leq A\text{typ A}$	Wenn die Konzentration einer Gattung in der Innenluft über dem 1-fachen und bis zum 2-fachen der Außenluft liegt $A\text{typ A} < I\text{typ A} \leq A\text{typ A} \times 2$	Wenn die Konzentration einer Gattung in der Innenluft über dem 2-fachen der Außenluft liegt $I\text{typ A} > A\text{typ A} \times 2$
eine Art der untypischen Außenluftarten mit schlechter luftgetragener Verbreitung, z. B. <i>Phialophora</i> spp., <i>Stachybotrys chartarum</i>	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 30 KBE/m ³ liegt* $I\text{E}_{\text{untyp AS}} \leq A\text{E}_{\text{untyp AS}} + 30$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 30 KBE/m ³ und bis zu 50 KBE/m ³ liegt* $A\text{E}_{\text{untyp AS}} + 30 < I\text{E}_{\text{untyp AS}} \leq A\text{E}_{\text{untyp AS}} + 50$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 50 KBE/m ³ liegt* $I\text{E}_{\text{untyp AS}} > A\text{E}_{\text{untyp AS}} + 50$
eine Gattung (Summe der KBE aller zugehörigen Arten) der untypischen Außenluftarten	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft nicht über 100 KBE/m ³ liegt $I\text{E}_{\text{untyp G}} \leq A\text{E}_{\text{untyp G}} + 100$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 100 KBE/m ³ und bis zu 300 KBE/m ³ liegt $A\text{E}_{\text{untyp G}} + 100 < I\text{E}_{\text{untyp G}} \leq A\text{E}_{\text{untyp G}} + 300$	Wenn die Differenz der Konzentration zwischen Innenraumluft und Außenluft über 300 KBE/m ³ liegt $I\text{E}_{\text{untyp G}} > A\text{E}_{\text{untyp G}} + 300$

Tabelle 5: Bewertungshilfe kultivierbarer Schimmelpilze (KBE/m³) bei Luftkeimmessungen, modifiziert nach (9)

* Konzentrationen von unter 100 KBE/m³ bzw. unter 50 KBE/m³ lassen sich bei einem Probenvolumen von 100 l bzw. 200 l nicht mit einer ausreichenden Genauigkeit nachweisen, da erst ab einer Anzahl von 10 Kolonien pro Platte quantitativ mit ausreichender statistischer Sicherheit ausgewertet werden kann. Trotzdem kann der Nachweis einzelner Kolonien dieser Schimmelpilze ein erster Hinweis auf eine mögliche Innenraumquelle sein.

I Konzentration in der Innenraumluft / innerhalb der Baustelle (Ref. 1) in KBE/m³

A Konzentration in der Außenluft / außerhalb der Baustelle (Ref. 2) in KBE/m³

typ A typische Außenluftarten bzw. -gattungen (extramurale Pilze wie *Cladosporium*, sterile Myzelien, ggf. Hefen, ggf. *Alternaria*, ggf. *Botrytis*)

untyp A untypische Außenluftarten bzw. -gattungen (intramurale Pilze wie Pilzarten mit hoher Indikation für Feuchteschäden z. B. *Acremonium* spp., *Aspergillus versicolor*, *A. penicillioides*, *A. restrictus*, *Chaetomium* spp., *Phialophora* spp., *Scopulariopsis brevicaulis*, *S. fusca*, *Stachybotrys chartarum*, *Tritirachium (Engyodontium) album*, *Trichoderma* spp.)

- Σuntyp A Summe der untypischen Außenluftarten (andere als typ A)
- Euntyp A eine Art, die untypisch ist in der Außenluft mit guter luftgetragener Verbreitung
- Euntyp AS eine Art, die untypisch ist in der Außenluft mit schlechter luftgetragener Verbreitung

Zur Bewertung von mess- und kultivierbaren Schimmelpilzen in der Innenraum- sowie Außenluft, wurden Messungen der Hintergrundkonzentrationen über die Jahreszeiten hinweg in Deutschland vorgenommen (8). Hier handelt es sich nicht um absolute Grenzwerte, sondern um Orientierungskonzentrationen, um die eigenen Messungen mit dem ubiquitären Grundrauschen vergleichen und einschätzen zu können.

	Winter	Sommer	Sommer + Winter
	Median KBE/m ³	Median KBE/m ³	Median KBE/m ³
Alternaria spp.	0	20	5
Cladosporium spp.	50	980	100
Aspergillus spp.	10	35	15
Penicillium spp.	20	50	30
Rhizopus spp.	0	0	0
Sterile Myceten	5	0	0

Tabelle 6: Orientierungskonzentrationen ausgewählter Schimmelpilzspezies in der Außenluft in Abhängigkeit der Jahreszeit; modifiziert nach (9)

	Winter			Sommer			Sommer + Winter		
	5. Perzentil	Median	95. Perzentil	5. Perzentil	Median	95. Perzentil	5. Perzentil	Median	95. Perzentil
Alternaria spp.	0	5	49	0	5	40	0	5	40
Cladosporium spp.	0	30	927	0	440	1800	0	70	1588
Summe Aspergillen	0	18	131	5	25	250	0	25	201
Summe Eurotium	0	5	20	0	5	40	0	5	40
Summe Penicillien	5	50	354	5	60	225	5	55	281
Summe Zygomyceten (u.a. Mucor spp., Rhizopus spp.)	0	0	20	0	0	30	0	0	20
sterile Myzelien	0	0	11	0	0	20	0	0	20

Tabelle 7: Orientierungskonzentrationen ausgewählter Schimmelpilzarten in Innenraumluft, modifiziert nach (9)

4 Ergebnisse

4.1 Gesamtanzahl der Schimmelpilzporen

Über einen Zeitraum von 30 Monaten wurden insgesamt 25 Baustellen begleitet, um dort die Schimmelpilzbelastung mittels Luftkeimmessungen zu detektieren und die Effektivität der Staubschutzmaßnahmen zu untersuchen. Innerhalb der aktiven Baustellen wurde ein Median von 300 KBE/m³ (siehe Tabelle 8) gemessen. Außerhalb des abgeschirmten Bereichs konnten 450 KBE/m³ im Mittel gezählt werden. Vor den Umbaumaßnahmen lagen die Medianwerte in den geplanten Bereichen bei 90 KBE/m³. Nach Abschluss aller Maßnahmen wurden 80 KBE/m³ im Mittel ausgezählt (siehe Tabelle 9).

Bei den einzelnen Baustellen kamen primär zwei verschiedene Staubschutzmaßnahmen zum Einsatz, zum Teil auch in Kombination. Bei Maßnahmen mittels dicker Staubschutzfolie wurden während der Baumaßnahmen innerhalb der Baustelle 520 KBE/m³ im Median und außerhalb 7020 KBE/m³ gemessen.

Bei der Anwendung einer Staubschutzwand, konnten innerhalb 240 KBE/m³ und außerhalb 230 KBE/m³ im Mittel gezählt werden.

Baustellen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Summe	5. Perzentil	95. Perzentil	Median	
innerhalb	260	80	50	70	610	300	960	650	5000	4480	590	450	13500	61	4714	520	
außerhalb	100	110	30	30	560	940	3470	3470	5000	5000	450	90	19250	30	5000	505	
Δ Ref 1 - Ref 2	160	-30	20	40	50	-640	-2510	-2820	0	-520	140	360	Δ -5750	Δ 31	Δ -286	Δ 15	
Baustellen-Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25				
innerhalb	70	940	750	1400	70	230	240	70	280	390	130	120	560	5250	70	90	240
außerhalb	30	770	770	2850	0	810	700	700	0	0	40	120	230	7020	0	1626	230
Δ Ref 1 - Ref 2	40	170	-20	-1450	70	-580	-460	-630	280	390	90	0	330	Δ -1770	Δ 70	Δ -1536	Δ 10
														18750	KBE/m ³ gesamt innerhalb		300
														26370	KBE/m ³ gesamt außerhalb		450
														Δ -7620	Δ KBE/m ³ gesamt innerhalb/außerhalb		Δ -150

Tabelle 8: Auswertung Anzahl KBE/m³ innerhalb und außerhalb der Baustellen bei Abschirmung mit dicker Folie (1-12, türkis) und fester Staubschutzwand (13-25, pink), Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb

Gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes sind demnach bei den Baustellen 1, 6, 7, 8, 10, 12 (Folienabschirmung) sowie 14, 16, 18, 19, 20, 21, 22 und 25 (feste Staubschutzwand) messrelevante KBE-Differenzen kultivierbarer Schimmelpilze detektiert worden. Eine protektive Wirkung im Sinne einer relevanten Keimreduktion nach außen während der Umbaumaßnahmen ist somit in den Fällen 1, 12 (Folienabschirmung) sowie 14, 21, 22 und 25 (feste Staubschutzwand) gemessen worden.

Baustellen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Summe		5. Perzentil	95. Perzentil	Median
Vorher	20	100	70	30	30	450	690	630	190	190	2060	80		4540		25,5	1306,5	145
Baustellen-Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
Vorher	70	140	90	60	0	80	390	200	40	60	150	70	180	1530		24	276	80
Baustellen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Nachher	10	70	1450	40	540	70	880	880	80	80	280	20		4400		15,5	1136,5	80
Baustellen-Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
Nachher	70	580	460	940	30	480	130	50	10	0	40	0	180	2970		0	724	70
														6070	vorher			90
														7370	nachher			80
														Δ -1300	Δ Gesamt vorher/nachher			Δ 10
														Δ 140				Δ 65
														Δ -1440				Δ 10
Baustellen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Δ Ref 1- Ref 2	10	30	-1380	-10	-510	380	-190	-250	110	110	1780	60						
Baustellen-Nr.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25					
Δ Ref 1- Ref 2	0	-440	-370	-880	-30	-400	260	150	30	60	110	70	0					

Tabelle 9: Auswertung Anzahl KBE/m³ vor (grün) und nach (gelb) der Umbaumaßnahmen; Staubschutzmaßnahmen mit dicker Folie (türkis) und fester Staubschutzwand (pink), Ref. 1 = vorher, Ref. 2 = nachher

Gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes sind demnach bei den Baustellen 3, 5, 6, 7, 8, 11 (Folienabschirmung) sowie 14, 15, 16, 18, 19 und 20 (feste Staubschutzwand) messrelevante KBE-Differenzen detektiert worden. Eine protektive Wirkung im Sinne einer relevanten Keimreduktion nach Abschluss der Umbaumaßnahmen ist somit in den Fällen 6, 11 (Folienabschirmung) sowie 19 und 20 (feste Staubschutzwand) gemessen worden.

4.2 Schimmelpilzspektrum

Bei allen gemessenen Baustellen konnte ein ähnliches Schimmelpilzspektrum identifiziert werden. Jedoch mit jeweils unterschiedlicher Stärke der KBE/m³ im Vergleich der Messungen innerhalb der Baustellen und außerhalb der Staubschutzmaßnahmen in der direkten Umgebung. Das Spektrum der Schimmelpilze setzt sich im Allgemeinen aus Alternaria, Aspergillus, Cladosporium, Penicillium sowie Rhizopus Spezies zusammen (siehe Tabelle 10).

Gesamt-Keimspektrum		Summe in KBE/m ³	Median	5. Perzentile	95. Perzentile	Δ Ref 1- Ref 2
Alternaria spp.	innerhalb	20	0	0	8	20
	außerhalb	0	0	0	0	
Aspergillus spp.	innerhalb	300	0	0	48	100
	außerhalb	200	0	0	54	
Cladosporium spp.	innerhalb	2070	20	0	288	-90
	außerhalb	2160	30	0	280	
Penicillium spp.	innerhalb	15220	160	2	3726	-2200
	außerhalb	17420	90	0	4396	
Rhizopus spp.	innerhalb	20	0	0	8	-150
	außerhalb	170	0	0	8	
Sterile Mycete	innerhalb	1050	20	0	212	-1180
	außerhalb	2230	10	0	660	

Tabelle 10: Gesamtes Keimspektrum in KBE/m³ innerhalb und außerhalb der Staubschutzmaßnahmen, Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb

4.3 Auswertung des Keimspektrums gemäß Bewertungshilfe UBA

Bei der differenzierten Betrachtung der einzelnen Baustellen hinsichtlich des Keimspektrums innerhalb und außerhalb der Baustellen sowie der orientierenden Bewertung gemäß UBA-Leitfaden (8) ergibt sich folgende Auswertung:

	Cladosporium spp.	Sterile Mycete	Alternaria spp.	Aspergillus spp.	Penicillium spp.	Rhizopus spp.
1	+	+	0	+	-	0
2	+	-	0	0	+	0
3	+	0	0	0	0	0
4	-	-	0	0	0	0
5	+	0	0	0	-	0
6	-	-	0	0	+	0
7	-	-	0	0	+	0
8	+	-	0	0	+	0
9	-	0	0	0	+	0
10	0	0	0	0	+	0
11	+	+	0	0	-	+
12	+	+	0	-	0	-
13	0	+	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	-
15	+	+	0	0	-	0
16	0	0	0	0	+	0
17	0	-	0	0	-	0
18	+	+	-	0	+	+
19	+	+	0	0	+	0
20	+	+	0	0	+	0
21	-	-	0	0	-	0
22	-	-	0	0	-	0
23	0	0	0	0	-	0
24	+	-	0	0	0	0
25	-	-	-	0	-	0

Tabelle 11: Auswertung der Baustellen hinsichtlich des messrelevanten und nicht-messrelevanten Keimspektrums, hellgrün = reine messrelevante Luftkeimreduktion, hellrot = reine messrelevante Luftkeimzunahme

+ messrelevante Zunahme der KBE/m³ von innerhalb nach außerhalb der Baustelle gemäß Bewertungshilfe UBA-Leitfaden

- messrelevante Reduktion der KBE/m³ von innerhalb nach außerhalb der Baustelle gemäß Bewertungshilfe UBA-Leitfaden

0 nicht messrelevant gemäß Bewertungshilfe UBA-Leitfaden

Somit liegen die *Alternaria* spp, *Aspergillus* spp. und *Rhizopus* spp. in der Mehrheit der Fälle unterhalb der messrelevanten Grenze. Eine relevante Reduktion der Luftkeime und somit protektive Wirkung in Hinblick auf alle Spezies stellt sich bei den Baustellen 4, 17, 21, 22, 23 und 25 dar. Eine Zunahme hingegen bei den Baustellen 3, 13, 16, 19 und 20.

In Zusammenschau mit den Ergebnissen hinsichtlich der KBE-Gesamtzahl (Kapitel 4.1) ergibt sich somit eine protektive Wirkung in den Fällen 21, 22 und 25. Hierbei handelt es sich bei allen Messungen um Staubschutzmaßnahmen mittels fester Staubschutzwand, welche alle im Winter gemessen wurden. Zusätzlich wurde in Fall 22 und 25 eine zusätzliche dicke Folienabschirmung etabliert. Bei der Baustelle 22 handelt es sich um eine Baumaßnahme innerhalb eines sensiblen OP-Bereichs. Somit wurden hier zusätzlich eine Abluftleitung nach außen sowie HEPA-Luftfilter und ein Mehrkammerschleusen-System installiert. Es konnte eine absolute Keimreduktion auf 0 KBE außerhalb gemessen werden.

Die Gesamtbetrachtung der Baustellen nach Auswertung gemäß UBA bei denen eine Zunahme der KBE-Anzahl als auch der individuellen Schimmelpilzspezies gemessen wurde, ergibt eine fehlende protektive Wirkung in den Fällen 16, 19 und 20. Auch hier handelt es sich um reine Schutzmaßnahmen mittels fester Staubschutzwand, jedoch wurden alle im Sommer durchgeführt. In keiner der Umbaumaßnahmen wurde eine zusätzliche dicke Folie, HEPA-Filteranlagen, Abluftleitungen nach außen oder ein Mehrkammerschleusen-System etabliert.

4.4 Baustellen mit Mehrkammer-Schleusen

Bei neun Baustellen (Nr. 1, 4-6, 9-11, 18 und 22) wurden Schleusensysteme aus dicker Folie mit Reisverschluss-Durchgängen aufgebaut. Diese kamen vornehmlich bei Staubschutzmaßnahmen mittels dicker Folien-Abschirmung zum Einsatz. Bei den Baustellen 18 und 22 wurde trotz fester Staubschutzwand als äußere Abgrenzung ein Schleusensystem aus Folien innerhalb der Baustelle errichtet. Zumeist wurden die Baustellen mit Ein-, seltener mit Zwei- oder Dreikammer-Schleusen aufgebaut. Von außerhalb nach innerhalb der Baustelle sind die Schleusen mit den Ziffern eins bis drei in Tabelle 8 gekennzeichnet.

Baustellen mit Schleusensystem	1	4	5	6	9	10	11	18	22	Summe KBE/m ³	Median	5. Perzentil	95. Perzentil
Außerhalb Baustelle	100	30	560	940	5000	5000	450	810	0	12890	0	0	3985
Schleuse 1	100	50	3360	1110	5000	4480	150	1840	10	16100	0	0	4200
Schleuse 2	30	-	-	1110	-	-	-	-	20	1160	0	0	27,5
Schleuse 3	0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0	0
Innerhalb Baustelle	260	70	610	300	5000	4480	590	230	390	11930	0	0	3512,5
Δ Ref 1 - Ref 2	160	40	50	-640	0	-520	140	-580	390				

Tabelle 12: Anzahl KBE/m³ bei Baustellen mit Schleusensystem aus dicker Staubschutzfolie; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, Ref. 1 = innerhalb, Ref. 2 = außerhalb

Gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes sind demnach bei den Baustellen 1, 6, 10 (Folienabschirmung) sowie 18 und 22 (feste Staubschutzwand) messrelevante KBE-Differenzen detektiert worden.

4.5 Keimspektrum bei Baustellen mit und ohne Feuchteschaden

Der Großteil der Baustellen wurde zur Sanierung von Feuchteschäden eingerichtet. Somit handelte es sich bei 20 der gemessenen Baustellen um Wasserschäden. Bei den restlichen fünf Bauarbeiten wurden entweder Probeöffnungen zur Messung der Wand-/Boden-Feuchtigkeit errichtet oder reine Umbaumaßnahmen durchgeführt. Bei allen gemessenen Baustellen konnte ein ähnliches Schimmelpilzspektrum identifiziert werden (2).

Alternaria spp. wurde sowohl bei Feuchteschäden als auch bei regulären Umbaumaßnahmen in geringer, aber gleicher KBE-Anzahl (jeweils 10 KBE/m³) gemessen (siehe Tabelle 13) Ähnlich bei der *Aspergillus* spp.. Hier konnte in Summe der Keim Zahl bei Feuchteschäden eine KBE-Anzahl von 370 und bei allen anderen Umbaumaßnahmen von 130 KBE/m³ gemessen werden. Im Median ergab sich jedoch bei beiden Schadensarten eine Anzahl von 0 KBE/m³, im 95. Perzentil war sie ähnlich hoch mit 42 KBE/m³ bei Feuchteschäden und 55,5 KBE/m³ bei allen Übrigen.

Penicillin spp. und Cladosporium spp. wurden in Summe deutlich gehäuft bei Wasserschäden gemessen. Die KBE-Anzahl der Penicillin spp. bei Feuchte beträgt im Median 265 KBE/m³, die der Cladosporium spp. 30 KBE/m³. Bei den übrigen Baumaßnahmen lagen die Median-Werte der Penicillin spp. bei 40 KBE/m³. Die Cladosporium spp. berechnete sich auf 5 KBE/m³.

Die Rhizopus spp. war in Summe mit einer relevanten Konzentration (gemäß Leitfaden UBA) von 160 KBE/m³ bevorzugt in Baustellenbereichen ohne Feuchteschäden anzutreffen. Sterile Myceten wurden mit 20 KBE/m³ im Median diskret bevorzugt bei trockenen Baustellen vorgefunden. In der Summe der Keimkonzentration liegen die Werte der Sterilen Myceten jedoch nach dem UBA-Leitfaden im nicht-messrelevanten Bereich.

Bei Betrachtung der Gesamtkonzentrationen sind gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes demnach die Aspergillus spp, Cladosporium spp. und Penicillium spp. in messrelevanten Konzentrationen vermehrt bei den Baustellen mit Feuchteschaden detektiert worden.

Keimspektrum	Σ Feuchteschaden	Σ Kein Feuchteschaden	Median, Feuchteschaden	Median, kein Feuchteschaden	95. Perzentil, Feuchteschaden	95. Perzentil, kein Feuchteschaden
Alternaria spp.	10	10	0	0	0	5,5
Aspergillus spp.	370	130	0	0	42	55,5
Cladosporium spp.	4090	140	30	5	314	40
Penicillium spp.	31710	930	265	40	4943	374,5
Rhizopus spp.	30	160	0	0	10	88
Sterile Mycete	1720	1560	10	20	107,5	600

Tabelle 13: Schimmelpilzspektrum in KBE/m³ im Vergleich zwischen Sanierung von Feuchteschäden und regulären Umbaumaßnahmen

4.6 Einfluss mobiler HEPA-Luftfilter und Abluftanlagen nach außen

HEPA-Luftfilter wurden regelmäßig und vorrangig bei Baustellen mit Wasserschäden oder bereits makroskopisch sichtbarem Schimmelbefall eingesetzt. Bei elf von zwölf Baumaßnahmen mit Folien-Abschirmung und bei fünf von 13 Baustellen mit fester Staubschutzwand wurden jeweils HEPA-Filter genutzt. Im Rahmen der Arbeitssicherheit soll somit eine Reduktion u.a. der Keimbelastung während der Baumaßnahmen erzielt und die Mitarbeiter innerhalb der Baustelle geschützt werden. Die Filtergeräte wurden innerhalb der Baustellen sowie im Bereich der einzelnen Schleusenammern aufgestellt. In den Baustellen elf und zwölf (orange markiert) wurden zusätzlich noch Abluftanlagen nach außen (durch ein nahegelegenes Fenster) installiert. Wie in Tabelle 10 aufgezeigt, konnte in Zusammenschau aller Messungen, eine mediane KBE-Reduktion außerhalb der Baustelle um 70 KBE/m³ im Vergleich zum Innenbereich erzielt werden. Die absolute KBE-Gesamtanzahl zeigt im Inneren der Baustelle eine Reduktion der Keimbelastung um 5100 KBE/m³ im Vergleich zur Umgebungsluft außerhalb der Bauabschnitte. Bei den Baustellen, welche mittels fester Staubschutzwand abgeschirmt wurden, konnte eine mediane Keimreduktion von 350 KBE/m³ von innen nach außen gemessen werden. Für Folienabschirmungen liegt diese Anzahl bei 30 KBE/m³.

Gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes sind demnach bei den Baustellen 1, 6, 7, 8, 10, 12 (Folienabschirmung) sowie 14 und 22 (feste Staubschutzwand) messrelevante KBE-Differenzen detektiert worden.

Baustellen mit HEPA-Filter	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	22	23	Summe KBE/m ³	Median	5. Perzentil	95. Perzentil
KBE/m ³ innerhalb Baustelle (Ref. 1)	260	80	70	610	300	960	650	5000	4480	590	450	70	940	750	390	130	15730	105	0	3600
KBE/m ³ außerhalb Baustelle (Ref. 2)	100	110	30	560	940	3470	3470	5000	5000	450	90	30	770	770	0	40	20830	35	0	4617,5
Δ Ref.1 - Ref. 2	160	-30	40	50	-640	-2510	-2820	0	-520	140	360	40	170	-20	390	90	-5100	70	0	-1017,5
Median innerhalb	590											390								
Median außerhalb	560											40								
Δ	30											350								

Tabelle 14: Anzahl der KBE/m³ innerhalb und außerhalb der Baustellen mit Nutzung eines HEPA-Luftfilters; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, grün = OP-Bereich, orange = zusätzliche Abluftanlage nach außen, Normalbereich

Bei Baustellen ohne Nutzung von HEPA-Luftfiltern (siehe Tabelle 15), konnte im Vergleich keine mediane KBE-Reduktion erwirkt werden. Absolut berechnet, lag im Innenbereich eine um 2420 KBE/m³ geringere Keimanzahl im Vergleich zum Außenbereich vor. Aus arbeitsschutztechnischen Gründen ergab sich hier nur eine Baustelle mit Folienabschirmung ohne Einsatz eines HEPA-Filters. Bei acht von 13 Baumaßnahmen, bei denen eine feste Staubschutzwand etabliert wurde, kamen kein HEPA-Filter zum Einsatz.

Es handelte sich bei den Nummern 17 und 22 (grün markiert) zusätzlich um Baustellen in OP-Bereichen, welche jeweils mit separaten Abluft-Anlagen nach außen versorgt wurden. In beiden Fällen kann eine hundertprozentige Keimreduktion von innerhalb nach außerhalb der Baustellen gemessen werden.

Gemäß der orientierenden Bewertungshilfe der Leitlinie des Umweltbundesamtes sind demnach bei den Baustellen mit Folienabschirmung keine, sowie bei Baumaßnahmen mit fester Staubschutzwand in den Fällen 16, 18, 19, 20, 21 und 25 messrelevante KBE-Differenzen detektiert worden.

Baustellen ohne HEPA-Filter	3	16	17	18	19	20	21	24	25	Summe KBE	Median	5. Perzentil	95. Perzentil
KBE/m ³ innerhalb Baustelle (Ref. 1)	50	1400	70	230	240	70	280	120	230	3020	0	0	490
KBE/m ³ außerhalb Baustelle (Ref. 2)	30	2850	0	810	700	700	0	120	450	5440	0	0	782,5
Δ Ref.1 - Ref. 2	20	-1450	70	-580	-460	-630	280	0	-220	-2420	0	0	-292,5
Median innerhalb	50	230											
Median außerhalb	30	575											
Δ	20	-345											

Tabelle 15: Anzahl der KBE/m³ innerhalb und außerhalb der Baustellen ohne Nutzung eines HEPA-Luftfilters; türkis = dicke Folie, pink = feste Staubschutzwand, grün = OP-Bereich

5 Diskussion

5.1 Effektivität der untersuchten Staubschutzmaßnahmen (Feste Staubschutzwand vs. Folienabschirmung)

Im Allgemeinen wurde zusammengefasst bei allen Luftkeimmessungen keine absolute Reduktion der Schimmelpilzlast durch die Staubschutzmaßnahmen festgestellt. Wie in Tabelle 8 gezeigt, konnte nach den Bewertungskriterien des UBA, im Gegenteil, eine Zunahme der KBE-Last nach außerhalb um 150 KBE/m^3 im Median und absolut von 7620 KBE/m^3 detektiert werden. Jedoch gibt es einen Unterschied zwischen den zwei verschiedenen Staubschutzmaßnahmen. Denn bei der Anwendung einer Folienabschirmung betrug die absolute Zunahme der KBE von innerhalb der Baustelle nach außen in die direkte Umgebung einen Wert von 5750 KBE/m^3 . Wohingegen dieser Wert bei Anwendung einer festen Staubschutzwand, bei 1770 KBE/m^3 lag. Im Median konnte bei beiden Schutzmaßnahmen in der individuellen Betrachtung wiederum eine Reduktion von innen nach außen verzeichnet werden, jedoch liegen die Werte hier bei 15 KBE/m^3 (Folienabschirmung) und 10 KBE/m^3 (feste Staubschutzwand) und somit nach der orientierenden Auswertungshilfe des UBA in nicht-relevanten Wertebereichen.

Da außerhalb der Baustellen meist regulärer Patientenbetrieb während der Messungen herrschte, ist hier eine höhere Anzahl an KBE durch Luftverwirbelungen und das ubiquitäre Schimmelpilz-Vorkommen der natürlichen Umwelt ein möglicher Grund für die vermeintliche Zunahme der KBE-Zahl außerhalb. Hierfür ist Baustelle Nummer 16 exemplarisch. Es handelt sich um eine Baumaßnahme eines kleinen Abschnittes innerhalb eines Büros. Die Messung außerhalb der Baustelle wurde auf dem Flur vor dem betroffenen Büro (vor der festen Staubschutzwand) durchgeführt. Hier herrschte regulärer reger Patientenbetrieb.

Insgesamt fällt deutlich auf, dass die mediane Keimbelastung bei Baumaßnahmen mit Folienabschirmungen sowohl innerhalb (520 KBE/m^3) als auch außerhalb (505 KBE/m^3) deutlich über den Referenz-Messungen vor (90 KBE/m^3) und nach (80 KBE/m^3) den Bauarbeiten liegen. Die gemessene Keimbelastung im Median bei Schutzmaßnahmen mittels Staubschutzwand ist mit 240 KBE/m^3 innerhalb und 230 KBE/m^3 außerhalb ebenfalls höher als die gemessenen Referenzwerte, jedoch ist die Gesamt-Keimbelastung um 50 % niedriger als bei Folienmaßnahmen. Der absolute Wert der Zunahme der Keimbelastung (von innen nach außen) von 5750 KBE/m^3 im Vergleich zur Staubschutzwand mit 1770 KBE/m^3 lässt zusätzlich Rückschlüsse auf eine bessere Effektivität einer festen Staubschutzwand zu.

Betrachtet man die einzelnen Baustellen isoliert, so lässt sich nur bei zwei Baustellen mit Folienabschirmung und im Vergleich bei vier Baustellen mit fester Staubschutzwand eine relevante Keimreduktion von innen nach außen verzeichnen. Eine messrelevante Zunahme der Keimzahl bei Folienabschirmung und bei festen Staubschutzmaßnahmen kann bei beiden Verfahren in gleicher Häufigkeit detektiert werden. Diese vermeintlich zunehmende Keimbelastung von innerhalb nach außerhalb könnte jedoch ein Hinweis auf ein jahreszeitbedingt vermehrtes, ubiquitäres Schimmelpilzvorkommen sein und somit fälschlicherweise eine fehlende protektive Wirkung aufzeigen.

Einen weiteren Hinweis zur Ursache für eine geringere Schimmelpilzlast innerhalb der Baustelle, geben weitere vier Baustellen. Im Rahmen dieser Baumaßnahmen wurden zu den HEPA-Luftfiltern zusätzlich Industriestaubsauger eingesetzt, die während Bohrungen direkt am Ort des Schadens einer starken Staubentwicklung entgegenwirkten. Somit konnte mit Hilfe der Industriesauger in erster Instanz einer Verbreitung freigesetzter, mit Sporen beladener, Staubpartikel in die Umgebungsluft vorgebeugt werden. Die Keimreduktion innerhalb dieser Baustellen, könnte außerdem auf eine effektive Folienabdichtung hinweisen, wodurch die HEPA-Filter innerhalb dieses abgedichteten Raums für eine optimale Filterleistung sorgen können.

5.2 Einfluss von Mehrkammer-Schleusensystemen

In Zusammenschau aller Luftkeimmessungen wurde, wie in Tabelle 12 dargestellt, keine konsequente Reduktion der Schimmelpilz-Belastung im Vergleich erzielt. Bei fünf von neun Fällen mit etabliertem Schleusensystem wurden außerhalb, trotz ubiquitärem Schimmelpilz-Vorkommen und wie bereits unter 5.1. beschriebenen teils regen Luftverwirbelungen, eine geringere Keim Zahl gemessen als innerhalb. Eine relevante Keimreduktion gemäß der Orientierungshilfe des Umweltbundesamtes (vgl. (8), S 118) wurde lediglich in einem Fall verzeichnet. Eine Zunahme von innerhalb nach außerhalb hingegen bei zwei Baustellen.

Exemplarisch kommt es in einem Fall zu einer starken Zunahme der Keimbelastung im Bereich der ersten Schleusenkammer. Dies ist vor allem auf die Zwischenlagerung von Plastiksäcken mit schimmelpilz- und staubbelastetem Bauabfall in dieser Schleusenkammer zurückzuführen. In zwei Fällen werden aus dem gleichen Grund ebenfalls deutlich höhere Keimanzahlen im Bereich der ersten Schleusenkammer gemessen.

In vier von neun Fällen kann die Anzahl der Schimmelpilze von innerhalb der Baustelle bis zur ersten Schleusenkammer verringert werden, wobei orientierend hier nur die Differenzen von drei Fällen nach der UBA-Bewertungshilfe messrelevant sind. In allen vier Fällen wurden zusätzlich HEPA-Luftfilter in allen Schleusenkammern oder wie im Rahmen einer anderen Baustelle eine separat installierte Abluft-Anlage etabliert, was die Keimlast-Reduktion zusätzlich unterstützte. Kapitel 5.4 wird den Sachverhalt hinsichtlich der Luftfilter näher beleuchten.

Eine weitere mögliche Ursache für die Zunahme der Keimanzahl von innerhalb nach außerhalb ist außerdem, dass das Prinzip des Schleusensystems bei Baumaßnahmen häufig nicht korrekt durchgeführt wurde. Die einzelnen Kammern waren zum Teil gleichzeitig geöffnet. Eine mögliche Fehlerquelle ist hierbei die sprachliche Barriere oder mangelnde Anleitung der Bauarbeiter.

Das zeitintensive Installieren von Schleusen ist daher weiterhin als sinnvoll zu erachten, jedoch erscheint es sehr fehleranfällig und sollte niemals als alleiniges Mittel zur Schutzmaßnahme etabliert werden. Ein ausführliches Einarbeiten und regelmäßiges Überprüfen der Schleusensysteme ist dafür Grundvoraussetzung.

5.3 Der Einflussfaktor Feuchtigkeit im Rahmen der Umbaumaßnahmen spielt eine relevante Rolle bei der Menge der Schimmelpilzbelastung bzw. bei der Art der Schimmelpilze

Wie in Tabelle 13 dargestellt, gibt es deutliche Hinweise darauf, dass sich die Schimmelpilzart und auch die Keimanzahl bestimmter Spezies durch das Vorliegen von Feuchtigkeit bei Umbaumaßnahmen, von Baustellen ohne Feuchteschaden unterscheidet. In 20 von 25 Fällen, lag ein Wasserschaden vor, was zu entsprechenden Sanierungsarbeiten führte. Die *Cladosporium* spp. (Median: 30 KBE/m³) und *Penicillium* spp. (Median: 265 KBE/m³) wurden bevorzugt und mit deutlich erhöhter Anzahl bei Feuchteschäden gemessen. Bei der *Aspergillus* spp. konnte vor allem in Summe mit 370 KBE/m³ eine höhere Keimanzahl bei Vorkommen von Feuchte im Vergleich zu 130 KBE/m³ bei fehlendem Feuchteschaden nachgewiesen werden. Wie in Kapitel 2.2.4 bereits beschrieben, gelten *Aspergillus* spp. sowie *Penicillium* spp. als allgemeine Feuchteindikatoren (8). Sind diese Schimmelpilzspezies in auffallend erhöhter Konzentration messbar, so lag oder liegt gemäß des Leitfadens des Umweltbundesamtes mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Feuchteschaden vor (8). Durch die durchgeführten Messungen mit besonderer Betrachtung des Einflussfaktors Feuchtigkeit, konnten diese Ergebnisse reproduziert werden. Zusätzlich muss die Sporenverbreitung der einzelnen Schimmelpilze in Abhängigkeit ihrer Sporengröße mit betrachtet werden. Denn je kleiner die Sporen sind, desto besser ist ihre Flugfähigkeit. Dies führt somit zur besseren Verbreitung mit Vorkommen hoher Konzentrationen in der Umgebungsluft (8). Die *Penicillium* spp. sowie *Aspergillus* spp. sind jeweils Leitarten für trockene, gut flugfähige Sporen und wurden in den Messungen reproduzierbar in erhöhten Keimzahlen detektiert.

Im Bundesgesundheitsblatt wurde 2003 basierend auf einer Querschnittsstudie zusammengefasst, dass das Vorkommen von Feuchteschäden, unter Betrachtung multipler weiterer Variablen (demografische und sozioökonomische Merkmale, Expositionsfaktoren sowie Tabakkonsum als Risikofaktor für die Entwicklung von Atemwegserkrankungen), das Risiko für die Entwicklung eines Asthma bronchiale um 50 % erhöht. Die Entwicklung von Allergien, vor allem gegen Pollen und Milben, wird durch das Vorliegen von Feuchteschäden um 20 % und bei Schimmelpilzbefall um 30 % erhöht (43). Die protektive Bedeutung einer adäquaten Lüftung bei Feuchteschäden entweder über natürlichem Wege oder entsprechende Abluftanlagen, wurde in dieser Querschnittsstudie ebenfalls als unumstritten herausgearbeitet (43). In den durchgeführten Messungen konnte dies bei beiden Baustellen mit etablierter Abluftleitung nach außen innerhalb sensibler OP-Bereiche zu 100% reproduziert werden. Die Keimbelastung innerhalb der Baustelle betrug in beiden Fällen 0 KBE/m³.

In diesem Kontext betont das Umweltbundesamt jedoch, dass das alleinige Feststellen von Schimmelpilzquellen im Innenraum, nicht mit einer akuten Gesundheitsgefährdung der im Raum anwesenden Menschen gleichzusetzen ist. Hierbei spielt zusätzlich Expositionsdauer und Sensibilität der Raumnutzenden eine Rolle. Dennoch muss im Rahmen des Prophylaxe-Prinzips eine Sanierung des Schadens, unter Einhaltung der Schutzmaßnahmen, erfolgen (8).

5.4 Einfluss von HEPA-Luftfiltern

Im Rahmen der Baumaßnahmen wurden mobile HEPA-Luftfilter eingesetzt. Wie in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt, wurden Baustellen mit und ohne Einsatz von Luftfiltern untersucht. Bei zehn von 16 Maßnahmen mit Nutzung von HEPA-Luftfiltern, konnte eine Reduktion der Keimbelastung von innerhalb nach außerhalb gemessen werden, jedoch nur bei vier Baustellen mit Messrelevanz nach Auswertung mittels der UBA-Bewertungshilfe. In Zusammenschau aller Messungen ist im Median eine Reduktion der Schimmelpilzbelastung von innerhalb der Maßnahmen nach außerhalb um 70 KBE/m³ zu verzeichnen. Bei den Baustellen ohne HEPA-Filter konnte keine Gesamt-Reduktion dargestellt werden. Diese Ergebnisse geben dennoch Hinweise darauf, dass der Einsatz von HEPA-Filtern zusätzlich einen wichtigen Beitrag zur Verhinderung der Sporenverschleppung leistet. In Anlehnung an die Orientierungshilfe des Umweltbundesamtes zur Bewertung der Schimmelpilzbelastung (vgl. (8), S. 118), ist die mediane Keimreduktion mit 70 KBE/m³ im Umkehrschluss jedoch unterhalb der Relevanz-Grenze. Bei der differenzierten Betrachtung der einzelnen Abschirmmaßnahmen wird deutlich, dass die Nutzung der Luftfilter, vor allem im Rahmen fester Staubschutzwände, dennoch einen guten Effekt zeigt. Während hier die Keimanzahl innerhalb der Baustelle 390 KBE/m³ im Median beträgt und sich der allgemeinen Schimmelpilzlast (innerhalb) von 300 KBE/m³ annähert, liegt die Belastung bei Folienabschirmung mit 590 KBE/m³ deutlich höher. Die Effektivität dieser Luftfilter scheint diesbezüglich vor allem auf einer guten Raumabdichtung zu basieren.

Im Rahmen einer Baustelle ohne HEPA-Luftfilter ist zu verdeutlichen, dass eine Luftkeimreduktion von 70 auf 0 KBE/m³ von innerhalb nach außerhalb der Baustelle, auf die installierte Abluft-Anlage innerhalb eines OP-Bereichs nach außen zurückzuführen ist.

Bei vier Baumaßnahmen wurden zusätzlich Mehrkammerschleusen und in drei Fällen außerdem separate Abluftleitungen nach außen etabliert. In drei Fällen und somit in 60% der Fälle wurde die Keimbelastung von innerhalb nach außerhalb effektiv reduziert. Somit ergeben sich Hinweise darauf, dass, zusätzlich zum Einsatz von HEPA-Luftfiltern, das Aufbauen von Schleusensystemen sowie das Installieren von Abluft-Anlagen nach außen, eine Sporenverbreitung sehr effizient verhindert. Gerade in sensiblen Bereichen wie Operationssälen oder beispielsweise Stationen mit immunsupprimierten, onkologischen Patienten, ist eine gut vorausgeplante Kombination aus diesen Schutzmaßnahmen unerlässlich.

Im Kontext des Arbeitsschutzes wird mit der Anwendung von HEPA-Luftfiltern zwar einer starken Schimmelpilzbelastung während der Umbaumaßnahmen vorgebeugt, dennoch setzen

die Bauarbeiter sich im Allgemeinen einer erhöhten Belastung aus, was das Anwenden der persönlichen Schutzausrüstung, wie in Kapitel 2.4.2.1. beschrieben, unerlässlich macht.

5.5 Effektivität der Sanierungsarbeiten im Vorher/Nachher-Vergleich

Wie in Tabelle 9 dargestellt, konnten in den Referenzmessungen vor Beginn der Baumaßnahmen im Median 90 KBE/m^3 , nach Abschluss 80 KBE/m^3 , detektiert werden. Eine Reduktion um 10 KBE/m^3 ist als positiv zu verzeichnen, allerdings nach den orientierenden Bewertungskriterien des UBA nicht von Relevanz.

Die Sanierungsarbeiten dauerten in der Regel mehrere Wochen, teilweise Monate. Somit wurden beispielsweise Messungen zu einer Baustelle vor Beginn der Umbaumaßnahmen im Frühjahr durchgeführt. Nach Abschluss der Bauarbeiten nach mehreren Monaten wurden die Referenzwerte im Herbst gemessen. Mit dem Wechsel der Jahreszeit, verändert sich auch die ubiquitär vorkommende Menge an Schimmelpilzsporen in der natürlichen Umwelt mit der nachweislich höchsten KBE-Konzentration im Sommer und vor allem im Herbst (2).

Hervorzuheben ist die vorab deutlich geringere absolute KBE-Anzahl (1530 KBE/m^3) bei Baustellen mit fester Staubschutzwand im Vergleich zur Folien-Abschirmung (4540 KBE/m^3). Ein Erklärungsansatz ist, dass dieses Staubschutz-Modell vor allem in sensiblen Bereich wie Operations-Bereichen oder Laborbereichen aufgebaut wird. Aufgrund der dort bereits regulär eingebauten Filteranlagen befindet sich dort eine deutlich geringere allgemeine Sporenbelastung in der Umgebungsluft. Außerdem wurden in diesen Bereichen ein 2-Kammerschleusen System und mehrere HEPA-Luftfiltergeräte innerhalb der Baustelle mit einer Luftableitung nach außen installiert, was zusätzlich die deutliche Keimreduktion unterstützte.

Die mediane Schimmelpilzbelastung nach Abschluss der Bauarbeiten mit Folienabdeckung als Staubschutzmaßnahme, pendelt sich mit 80 KBE/m^3 genau im Bereich der abschließenden Gesamt-Referenzmessungen ein. Dies lässt Rückschlüsse ziehen, dass die Sanierung von Schäden in weniger sensiblen Klinikbereichen, zumindest keine Verschleppung von Schimmelpilzsporen verursacht und zu einer messbaren Keimreduktion führen kann.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Promotionsarbeit wurden über einen Zeitraum von 30 Monaten insgesamt 25 Baustellen begleitet, um dort zunächst orientierende Voruntersuchungen hinsichtlich der Schimmelpilzbelastung bei Sanierungs- und Umbaumaßnahmen in den Gebäuden der Unimedizin Mainz durch Luftkeimmessungen zu detektieren und die Effektivität der angewendeten Staubschutzmaßnahmen zu untersuchen.

Es ist zu verdeutlichen, dass Feuchteschäden in der Regel mit einer erhöhten Schimmelpilzbelastung und somit potenziell humanpathogenen Wirkungen einhergehen kann. Staubschutzmaßnahmen sind demnach essenziell im Sinne des Vorsorgeprinzips.

Die Untersuchungen unterlagen einer Vielzahl von messrelevanten Einflussfaktoren (bspw. Jahreszeit, Compliance / Kommunikation der Bauarbeiter, Patientenbetrieb). Unter Betrachtung der Baustellen in sensiblen Bereichen konnte herausgearbeitet werden, dass bislang zwingend eine Kombination mehrerer Vorkehrungen aus fester Staubschutzwand, Abluftleitungssystemen nach außen, die Installation von HEPA-Luftfiltern und das Etablieren von Mehrkammerschleusen notwendig ist, um eine relevante Keimreduktion zu erwirken und somit eine definitive Keimverschleppung zu verhindern. Eine isolierte Betrachtung der einzelnen Schutzmaßnahmen war im Rahmen der realen Baustellensituationen mit multifaktoriellen Einflüssen jedoch oftmals nur schwierig bis gar nicht möglich, weshalb die Voruntersuchungen und Messergebnisse zunächst orientierende Hinweise geben.

Streng nach der orientierenden Bewertungshilfe des UBA ausgewertet, konnte nur bei zwei Baustellen mit Folienabschirmung und nur bei vier mittels fester Staubschutzwand eine Reduktion der Schimmelpilzlast erwirkt werden. Eine Zunahme wurde hingegen bei vier Fällen mit Folie und vier Baustellen mit fester Wand gemessen. Letzteres könnte auf einer effektiven Raumabdichtung basieren, sodass sich die Abschirmmaßnahmen hinsichtlich ihrer Effektivität nicht unterscheiden. Die Messungen geben orientierende Hinweise darauf, dass die Installation von HEPA-Filtern besonders effektiv in Kombination mit einer suffizienten Raumabdichtung wirken könnte. Diesbezüglich sollte in zukünftigen spezifischeren Projekten besonderes Augenmerk auf die Qualität der Raumabdichtung in Zusammenwirken mit HEPA-Luftfiltern gelegt werden.

Die Messungen zu den Baustellen mit Schleusensystemen waren nicht eindeutig und anwenderbedingt sehr fehleranfällig. Um diesbezüglich eine richtige Aussage zur Effektivität der Schleusensysteme machen zu können, sind weitere Untersuchungen unter strengem Einhalten des Schleusenprinzips durch die Bauarbeiter nötig.

In den meisten Fällen handelte es sich um langfristige Dauerbaustellen was teilweise zu Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten führte. Dies ist fehleranfällig, weil die ubiquitäre Schimmelpilzkonzentration stark jahreszeitabhängig ist. Um bei zukünftigen Untersuchungen die Messungen vergleichbarer zu gestalten, könnte eine weitere Probeentnahme der Außenluft durchgeführt oder die Messungen zu Vorher/Nachher-Vergleichen bei kurzfristigeren Baustellen umgesetzt werden.

Genauso verhält es sich mit Messungen während des laufenden Patientenbetriebes und somit während realer Situationen. Wie bereits in Kapitel 5.1 dargestellt führt reger Patientenbetrieb in der direkten Baustellenumgebung zu Luftaufwirbelungen und folglich zu erhöhten Keimzahlen, was den direkten Vergleich zwischen innerhalb und außerhalb der einzelnen Baustellen verfälscht. In zukünftigen Projekten könnte dies verhindert werden, indem im Speziellen nur Baumaßnahmen betrachtet werden, bei denen umliegend kein Patientenbetrieb herrscht.

Unter Betrachtung der Baustellen mit Feuchteschäden zeigen die Ergebnisse, wie in Kapitel 5.3 dargelegt, ein wiederkehrendes Keimspektrum. Diese sogenannten Feuchteindikatoren konnten bei bekannten Feuchteschäden reproduzierbar nachgewiesen werden. Für zukünftige Untersuchungen könnte spezifisch betrachtet werden, ob die Konzentration der Feuchtigkeit

einen messrelevanten Einfluss auf die Luftkeimanzahl oder das Spektrum hat. Die reine Feuchtigkeitskonzentrationsmessung ist schneller und insgesamt weniger aufwendig durchgeführt als das Messen der Luftkeime mit Hilfe des Impaktionsprinzips. Sollte es hierbei deutliche Unterschiede der Schimmelpilzanzahl hinsichtlich der Feuchtigkeitskonzentrationen geben, könnten allein durch eine schnelle Vorabmessung der Feuchtigkeit, Rückschlüsse auf den Umfang des Schadens sowie die Auswahl der geeigneten Staubschutzmaßnahmen gezogen werden.

Das Umweltbundesamt betont in ihrem Leitfaden, dass es sich bei der Bewertungshilfe um orientierende Messwerte handelt, welche eine allgemeine Schimmelpilzbelastung anzeigen könnten und in keinem Fall als alleiniges Kriterium hinsichtlich eines Schadens herangezogen werden soll. Eine Auswertungshilfe speziell für Staubschutzmaßnahmen bei Sanierungsarbeiten in Innenräumen existiert bislang nicht. Bei den in der vorliegenden Dissertation durchgeführten Messungen, führt die Auswertung nach der UBA-Bewertungshilfe zu keinem aussagekräftigen Ergebnis. Daher ist es fraglich, ob die Bewertungshilfe hinsichtlich reeller Sanierungssituationen überhaupt sinnvoll und ausreichend anwendbar ist. Wasserschäden mit potenziell erhöhter Schimmelpilzbelastung und den daraus folgenden protektiven Sanierungsarbeiten in deutschen Kliniken sind keine Seltenheit, da es sich häufig um in die Jahre gekommene Gebäude handelt. Es sollten zukünftig weitere Luftkeimmessungen mit besonderem Schwerpunkt auf die entsprechenden Staubschutzmaßnahmen gelegt werden, um bereits vorhandene Bewertungshilfen strenger, differenzierter und somit aussagekräftiger anwenden zu können. Dies erscheint sinnvoll, um die passenden Staubschutzmaßnahmen bei den entsprechenden Sanierungsarbeiten kosteneffizienter und insgesamt effektiver anzuwenden.

7 Literaturverzeichnis

1. Tappler P, Twardik F, Schlacher R, Hengsberger H. Pilze in Innenräumen und am Arbeitsplatz. In: Hinker M, Seibert M, editors. 1st ed. 2013 ed. Vienna 2013.
2. Pongracic JA, O'Connor GT, Muilenberg ML, Vaughn B, Gold DR, Kattan M, et al. Differential effects of outdoor versus indoor fungal spores on asthma morbidity in inner-city children. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2010;125(3):593-9.
3. Wiesmüller GA, Heinzow B, Aurbach U, Bergmann KC, Bufe A, Buzina W, et al. Medical Diagnostics for Mold Exposure Indoors. *Pneumologie*. 2016;70(11):699-741.
4. Kück U, Nowrousian M, Hoff B, Engh I. Schimmelpilze : Lebensweise, Nutzen, Schaden, Bekämpfung. 3rd ed. ed. Berlin, Heidelberg 2009.
5. Umweltmedizin K. Schimmelpilzbelastung in Innenräumen – Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Maßnahmen. Robert Koch-Institut; 2007.
6. Times TS. State says Aspergillus mold discovered again at Seattle Children's hospital 2020 2020 [Available from: <https://www.seattletimes.com/seattle-news/health/state-says-aspergillus-mold-discovered-again-at-seattle-childrens-hospital/>].
7. Reinthaler FF, Haas D, Galler H. Pilze in Innenräumen und am Arbeitsplatz. In: Hinker M, Seibert M, editors. 1st ed. 2013 ed. Vienna 2013.
8. Dr. Moriske H-J, Dr. Szewzyk R, Dr. Tappler P, Dr. Valtanen K. Leitfaden zur Vorbeugung, Erfassung und Sanierung von Schimmelbefall in Gebäuden. Umweltbundesamt: Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes; 11/2017.
9. Schimmelpilzbelastung in Innenräumen – Befunderhebung, gesundheitliche Bewertung und Maßnahmen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*. 2007;50(10):1308-23.
10. Houbraeken J, Kocsubé S, Visagie CM, Yilmaz N, Wang XC, Meijer M, et al. Classification of Aspergillus, Penicillium, Talaromyces and related genera (Eurotiales): An overview of families, genera, subgenera, sections, series and species. *Stud Mycol*. 2020;95:5-169.
11. El Hajj Assaf C, Zetina-Serrano C, Tahtah N, Khoury AE, Atoui A, Oswald IP, et al. Regulation of Secondary Metabolism in the Penicillium Genus. *Int J Mol Sci*. 2020;21(24).
12. Belizario JA, Lopes LG, Pires RH. Fungi in the indoor air of critical hospital areas: a review. *Aerobiologia (Bologna)*. 2021;37(3):379-94.
13. Vonberg R-P, Gastmeier P. Aspergillen im Krankenhaus: Ergebnisse von Outbreak-Analysen. *Krankenhaus-Hygiene + Infektionsverhütung*. 2007;29(1):8-14.
14. Salvatore MM, Andolfi A, Nicoletti R. The Genus Cladosporium: A Rich Source of Diverse and Bioactive Natural Compounds. *Molecules*. 2021;26(13).
15. Aichinger G, Del Favero G, Warth B, Marko D. Alternaria toxins-Still emerging? *Compr Rev Food Sci Food Saf*. 2021;20(5):4390-406.
16. Jeong W, Keighley C, Wolfe R, Lee WL, Slavin MA, Kong DCM, et al. The epidemiology and clinical manifestations of mucormycosis: a systematic review and meta-analysis of case reports. *Clin Microbiol Infect*. 2019;25(1):26-34.
17. Ward J, Golubev M. Rhizopus [Homepage]. Mold Busters - Decontamination Experts 2005 [cited 2022. Available from: <https://library.bustmold.com/rhizopus/>].
18. Kautsch P, Hengsberger H. Untersuchungen zur Vermeidung von Schadstofffreisetzungen aus Fußbodenkonstruktionen insbesondere im Zuge von technischen Trocknungen von Wasserschäden. *Bauphysik Kalender 2018/2018*. p. 399-425.
19. Birmili W, Kolossa-Gehring M, Valtanen K, Dębiak M, Salthammer T. Schadstoffe im Innenraum – aktuelle Handlungsfelder. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*. 2018;61(6):656-66.
20. Tischer C, Chen CM, Heinrich J. Association between domestic mould and mould components, and asthma and allergy in children: a systematic review. *Eur Respir J*. 2011;38(4):812-24.

21. Wiesmüller GA, Heinzow B, Aurbach U, Bergmann KC, Bufe A, Buzina W, et al. AWMF-Schimmelpilz-Leitlinie „Medizinisch klinische Diagnostik bei Schimmelpilzexposition in Innenräumen“ AWMF-Register-Nr. 161/001 - Endfassung 2016 [Available from: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/161-001l_S2k_Schimmelpilzexposition-Innenraeume_2016-04.pdf].
22. Herr C, Eikmann T, Heinzow B, Wiesmüller G. Umweltmedizinische Relevanz von Schimmelpilzen im Lebensumfeld. *Umweltmed Forsch Prax Prof Dr med Caroline EW Herr*. 2010;15:76-83.
23. Szewzyk R, Becker K, Hünken A, Pick-Fuß H, Kolossa-Gehring M. Kinder-Umwelt-Survey (KUS) 2003/06: Sensibilisierungen gegenüber Innenraumschimmelpilzen: Gesundheitsforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung: Umweltbundesamt; 2011.
24. Mari A, Schneider P, Wally V, Breitenbach M, Simon-Nobbe B. Sensitization to fungi: epidemiology, comparative skin tests, and IgE reactivity of fungal extracts. *Clin Exp Allergy*. 2003;33(10):1429-38.
25. Steiß J-O. Asthma bronchiale und Schimmelpilzexposition im Kindes- und Jugendalter. *Umweltmed Forsch Prax*. 2011;16:89-94.
26. Mendell MJ, Mirer AG, Cheung K, Tong M, Douwes J. Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: a review of the epidemiologic evidence. *Environ Health Perspect*. 2011;119(6):748-56.
27. Mücke W, Lemmen C. Schimmelpilze: Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen: Ecomed; 2004.
28. Sennekamp J, Müller-Wening D, Amthor M, Baur X, Bergmann KC, Costabel U, et al. [Guidelines for diagnosing extrinsic allergic alveolitis (hypersensitivity pneumonitis) (German Extrinsic Allergic Alveolitis Study Group)]. *Pneumologie*. 2007;61(1):52-6.
29. Rolke M, Rumpf J, Kroidl R, Sennekamp J. Neue epidemiologische Daten zur exogen-allergischen Alveolitis in Deutschland. *Allergologie*. 2006;29:439-42.
30. Huttegger I, Cramer R, Eichler I, Müller F-M, Lindemann H, Griese M. Die allergisch-bronchopulmonale Aspergillose bei zystischer Fibrose. *Monatsschrift Kinderheilkunde*. 2006;154(10):1003-14.
31. Wiesmüller G, Heinzow B, Szewzyk R, Valtanen K, Hurraß J. Möglichkeiten und Grenzen der gesundheitlichen Bewertung von Schimmelexpositionen im Innenraum. *Der Bausachverständige*. 2017;4:26-34.
32. World Health Organization. Regional Office for E. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. Copenhagen: World Health Organization. Regional Office for Europe; 2009 2009.
33. Taghavi M, Khosravi A, Mortaz E, Nikaein D, Athari SS. Role of pathogen-associated molecular patterns (PAMPS) in immune responses to fungal infections. *Eur J Pharmacol*. 2017;808:8-13.
34. Bünger J, Schappler-Scheele B, Hilgers R, Hallier E. A 5-year follow-up study on respiratory disorders and lung function in workers exposed to organic dust from composting plants. *Int Arch Occup Environ Health*. 2007;80(4):306-12.
35. Madsen AM, Tendal K, Schlünssen V, Heltberg I. Organic dust toxic syndrome at a grass seed plant caused by exposure to high concentrations of bioaerosols. *Ann Occup Hyg*. 2012;56(7):776-88.
36. Schmiedel Y, Zimmerli S. Common invasive fungal diseases: an overview of invasive candidiasis, aspergillosis, cryptococcosis, and Pneumocystis pneumonia. *Swiss Med Wkly*. 2016;146:w14281.
37. Chakraborty RK, Baradhi KM. Aspergilloma. StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing
Copyright © 2022, StatPearls Publishing LLC.; 2022.
38. Arbeitsmedizin BfAu. TRBA 460, Einstufung von Pilzen in Risikogruppen. GMBI 2016, Nr. 29/30 vom 22.7.2016 ed2016.

39. Arbeitsmedizin BfAu. TRBA 500, Grundlegende Maßnahmen bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. GMBI. Nr. 15-20 ed: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin; 2012. p. 373 - 9.
40. Bau B. DGUV Information 201-028: Handlungsanleitung Gesundheitsgefährdung durch biologische Arbeitsstoffe bei der Gebäudesanierung. BG BAU ; 2006. p. 48.
41. Homepage MBV - Impaktionsverfahren [Available from: <https://www.mbv.ch/de/luftkeimsammler/mas-100-eco/>.
42. nach Deak Hdl. DG 18-Agar mit Chloramphenicol.
43. Brasche S, Heinz E, Hartmann T, Richter W, Bischof W. Vorkommen, Ursachen und gesundheitliche Aspekte von Feuchteschimmeln in Wohnungen. Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz. 2003;46:683-93.

8 Anhang

8.1 Erklärung

Ich, Katharina Reuther, erkläre hiermit, dass die vorgelegte Dissertation von mir selbstständig, ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Alle von mir benutzten Veröffentlichungen, ungedruckten Materialien, sonstige Hilfsmittel sowie Textstellen, die ich wörtlich oder inhaltlich aus gedruckten oder ungedruckten Arbeiten übernommen habe, habe ich als solche gekennzeichnet und mit den erforderlichen bibliographischen Angaben nachgewiesen. Unterstützungsleistungen, die ich von anderen Personen erhalten habe, wurden in der Dissertationsschrift als solche benannt.

Die Dissertation wurde bei keiner anderen Fakultät oder einem anderen Fachbereich vorgelegt, weder im In- noch im Ausland.

Überdies bin ich nicht im Besitz eines anderen Doktorgrades.

Ich habe bisher kein Promotionsverfahren erfolglos beendet.

Mir ist bekannt, dass die Zulassung zur Promotion zu versagen ist, wenn die

Unterlagen unvollständig oder die Angaben unrichtig sind. Ich bin darüber informiert, dass ich zur Führung des Dokortitels erst mit Aushändigung der Promotionsurkunde berechtigt bin.

9 Danksagung

Die Danksagung wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.

10 Tabellarischer Lebenslauf von Katharina Reuther

Der Lebenslauf wurde aus Gründen des Datenschutzes entfernt.