

# **Desinfektion und Geruchsneutralisation durch chemisch-physikalische Verfahren wie Ionisierung – Ozonisierung – Fogging**

**M. Blei, M. Rüdiger**

## **1. Grundlagen zur Sanierung von Gebäudeschäden**

Unter dem Begriff Gebäudesanierung werden Maßnahmen und Tätigkeiten zusammengefasst, die zur Schaffung gesunder Lebensverhältnisse in Räumlichkeiten beitragen. Grundlage hierfür bilden Richtlinien, worin alle zur Sanierung eines Schadens notwendigen Maßnahmen, unter Berücksichtigung gesetzlicher Regelwerke zu Abfallrecht, Arbeitsschutz, Umweltrecht, Gefahrstoffen, biologischen Arbeitsstoffen, etc. sowie Normen und andere Vorschriften zusammengefasst sind. Für diese Arbeit sind im Speziellen die Sanierungsmaßnahmen von Brand- und Brandfolgeschäden nach den Richtlinien der VdS 2357 [1], sowie die Sanierung mikrobiologischer Schäden an Gebäuden durch die Gefährdungsbeurteilung nach der Biostoffverordnung von Bedeutung. Beispiele für die bei solchen Sanierungsmaßnahmen wichtigsten Regelwerke und Richtlinien stellen die Baustellenverordnung (BaustellV) [2], Biostoffverordnung (BioStoffV) [3], TRGS-Vorschriften [4], [5], [6], TRBA-Vorschriften [7], [8], und das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) [9], dar.

### **1.1 Brandschadensanierung**

Eine Verbrennung ist eine exotherme Reaktion von brennbarem Material und Sauerstoff (Oxidation), wobei unter Idealbedingungen vor allem Wasser und Kohlendioxid entstehen. Reale Verbrennungsvorgänge erfolgen hinsichtlich ihres Temperaturverlaufes und der

Sauerstoffversorgung nicht optimal (unvollständige Verbrennung). Es kann eine Vielzahl an geruchlich intensiven und stofflich nur bedingt bekannten Brandfolgeprodukten entstehen, deren Gefahrenpotenzial sehr schwer einzuschätzen ist. Diese durch thermische Zersetzungsprozesse (Pyrolyse und Crackvorgänge) und De-Novo-Synthese entstandenen Stoffgruppen können u.a. toxische, krebserzeugende, ätzende, umweltgefährdende und wassergefährdende Eigenschaften besitzen. Typische Vertreter solcher Brandfolgeprodukte stellen halogenierte Verbindungen wie Chlorwasserstoff (HCl) oder Bromwasserstoff (HBr), Polycyclische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polyhalogenierte Dibenzo-p-dioxine (PHDD) bzw. Dibenzofurane (PHDF) dar [1]. Falls nicht unmittelbar nach dem Brandereignis Trocknungsmaßnahmen zur Beseitigung von Löschwasser eingeleitet werden, ist ein mögliches Gefährdungspotential durch Wachstum von Bakterien und Schimmelpilzbefall zu beachten (BGI 858) [10].

### **1.2 Sanierung von mikrobiologischen Schäden**

Bei der Sanierung mikrobiologischer Schäden in Gebäuden sind, abhängig von der jeweiligen Schadensursache, verschiedene Schadensbilder wie z.B. Schimmelpilzbildung, Bildung holzerstörender Pilze, Wachstum von Bakterien, etc. zu beachten. Sanierungsarbeiten, bei denen man mit diesen mikrobiologischen Keimen in Kontakt kommt, müssen nach Biostoffverordnung in gezielte bzw. nicht gezielte Tätigkeiten eingeteilt werden und sind entsprechend ihres Infektionsrisikos in die jeweilige Risikogruppe einzugliedern [11].

Um eine mikrobiologische Sanierung richtig durchzuführen, ist zusätzlich eine Einordnung

in vier Schutzstufen notwendig, welche alle festgelegten und empfohlenen technischen, organisatorischen und persönlichen Sicherheitsmaßnahmen zum Schutz der Beschäftigten umfassen. Zusätzlich müssen bei der Gefährdungsbeurteilung und der Wahl der geeigneten Schutzmaßnahmen nach der Biostoffverordnung die toxischen und sensibilisierenden Wirkungen der biologischen Arbeitsstoffe beachtet werden.

Bei der Sanierung von mikrobiologischen Schäden in Gebäuden hat man es in der Regel mit nicht gezielten Tätigkeiten zu tun, da die Spezies der Mikroorganismen, das Ausmaß des Befalls oder die Dauer der Sanierungsmaßnahmen nicht bekannt oder nur schwer abzuschätzen sind. Weiterhin treten bei der Gebäudesanierung meistens Mikroorganismen der Risikogruppen 1 und 2 auf, wobei die der Risikogruppe 2 sehr breit gefächert und vielfältig sind. So findet man z.B. Mikroorganismen, wie hautbesiedelnde Pilze oder Darmbakterien wieder, die unter besonderen Voraussetzungen zu Erkrankungen führen können bis hin zu Erregern, die grundsätzlich Krankheiten verursachen, gegen die es allerdings wirksame Therapien oder Impfmöglichkeiten gibt. Mikroorganismen der Risikogruppe 3 sind bei Gebäudesanierungsarbeiten nicht zu erwarten und die der Risikogruppe 4 kommen normalerweise in Deutschland nicht vor [3].

Prinzipiell können sich Mikroorganismen nur entwickeln, wenn die Grundvoraussetzungen gegeben sind, also ein wachstumsförderndes Milieu vorhanden ist. Neben einem geeigneten Nährboden aus organischem Material (Kohlenhydrate, Proteine, etc.) und entsprechenden Temperaturen ist vor allem ungebundenes Wasser im Substrat für das Wachstum essentiell. Bei einer Sanierung, bei der Mikroorganismen auf Dauer entfernt werden sollen,

muss also zuerst eine auf diese Wachstumsbedingungen ausgerichtete Ursachenforschung mit anschließender Auswertung und eventueller Behebung des Problems stattfinden, bevor die sanierungstechnischen Maßnahmen abgeschlossen werden können.

## 2. Theoretische Grundlagen der Plasmaphysik

Der Begriff Plasma umschreibt im physikalischen Sinne mehr oder weniger stark ionisierte Gase, welche freie Ladungsträger wie Ionen und Elektronen sowie Photonen und neutrale Teilchen (Atome, Moleküle, Radikale) mit hoher mittlerer kinetischer Energie enthalten. Zum vollständigen Verständnis der komplexen Eigenschaften eines Plasmas muss auf fast alle physikalischen Sachgebiete wie statistische Mechanik, Hydrodynamik, Thermodynamik, Elektrodynamik sowie die Kern- und Atomphysik zurückgegriffen werden [12].

**Niederdruckplasmen** oder auch Nichtgleichgewichtsplasmen gehören in der Regel zu den nicht thermischen Plasmaverfahren. Hier findet eine gezielte Einspeisung von Energie für eine effiziente Ionisation ohne wesentliche Temperaturerhöhung statt. Initiiert werden kann dieser Prozess z.B. durch das Anlegen einer elektrischen Spannung, energiereiche Teilchenstrahlung oder elektromagnetische Strahlung [13]. Des Weiteren befinden sich die Ionen und Elektronen nicht im thermischen Gleichgewicht, da die Energiequelle zwar auf beide gleichsam einwirkt, die Elektronen jedoch auf Grund ihrer geringeren Masse und Größe schneller beschleunigen als die schwereren Ionen. Demzufolge haben die Elektronen nach der Maxwell'schen Grundgleichung der kinetischen Gastheorie im Vergleich zu den Ionen und Neutralteilchen eine viel höhere Temperatur [14]. Bei künstlich erzeugten

Niederdruckplasmen können z.B. Temperaturen der Elektronen von einigen Elektronenvolt (mehreren 10.000 K) generiert werden, während die Temperaturen von Ionen und Neutralgas nur wenig über der Zimmertemperatur liegen, wodurch auch thermisch sensible Materialien mit dieser Art Plasma bearbeitet werden können.

Mit **Atmosphärendruckplasma** oder auch Normaldruckplasma wird der Fall beschrieben, bei dem der Druck ungefähr dem der umgebenden Atmosphäre entspricht. Da zur Generierung kein Reaktionsgefäß zur Aufrechterhaltung bestimmter Druckniveaus benötigt wird, besitzt es großes technisches Potential. Nutzt man nun zur Generierung eine Glimmentladung oder eine Koronaentladung, weist das Atmosphärendruckplasma viele Eigenschaften von Niederdruckplasmen, vor allem aber die der homogenen „kalten“ Gasentladung auf [15].

Signifikant für **Hochdruckplasmen** ist der erhöhte Druck des Gases im Reaktionsbehälter, wodurch die Dichte der Ladungsträger stark zunimmt und dem entsprechend relativ häufig Stoßprozesse stattfinden. Darauf basierend kommt es zur Angleichung der Temperaturen von Elektronen, Ionen und Neutralgas. Das vollständige thermische Gleichgewicht zeichnet sich durch eine einheitliche kinetische Temperatur aller Plasmateilchen aus. Die Temperatur der Elektronen ist dabei bestimmend [16].

## 2.1 Stoß- und Zerfallsprozesse an Oberflächen

Zur Ausbildung und Erhaltung eines Plasmas sind elementare Stoß- und Zerfallsprozesse

der Plasmateilchen, teilweise unter Aussendung von Photonen, von größter Bedeutung. Die Effekte, welche durch diese Reaktionsmechanismen auf Oberflächen einwirken können, sind dabei ganz unterschiedlicher Natur. Durch den Aufprall von angeregten und dadurch beschleunigten Teilchen findet ein kontinuierliches mechanisches Herausschlagen von Oberflächenpartikeln auf atomarer Ebene statt, deshalb spricht man auch von Mikrosandstrahlen. Gleichzeitig kommt es durch das ionisierte Gas zu chemischen Prozessen, wodurch wiederum Atome und Moleküle von der Oberfläche abgetragen werden. Die teilweise bei Stoßprozessen entstandene UV-Strahlung entfaltet, besonders bei organischen Oberflächen ihre Wirkung, da sie langkettige Kohlenstoffverbindungen, wie geruchsintensive Brandrückstände und Makromoleküle wie Zellulose besonders effektiv aufbrechen kann.

## 2.2 Grundlagen der Ozonierung

Ozon ist die allotrope Modifikation des Sauerstoffs, und besteht aus drei Atomen.

Da Ozon thermodynamisch instabil ist, das Gleichgewicht also bei Raumtemperatur nahezu vollständig auf der Seite des Sauerstoffs liegt, ist eine thermische Herstellung ineffektiv. Aufgrund seiner kinetisch metastabilen Eigenschaften zerfällt es jedoch bei milden Temperaturen unter Zufuhr elektrischer, photochemischer oder chemischer Energie nur langsam wieder zu Sauerstoff.

Unter Ausschluss konkurrierender Zerfallsprozesse durch Licht oder Radikale, wird für Ozon in der Literatur eine Lebensdauer von etwa 20 min [17] bis zu 1 Monat [18] angegeben. Erhöht sich der Einfluss dieser Parameter, nimmt die Lebensdauer des Ozons entsprechend ab [17].

Eine Methode zur Erzeugung von Ozon in Luft ist die stille elektrische Entladung, auch dielektrische Barriereentladung genannt.

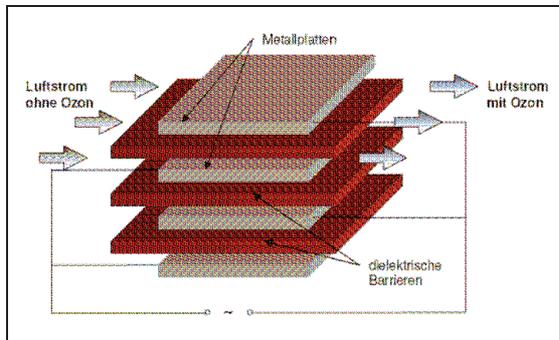


Abbildung 1: Ausschnitt eines Plattenkondensators zur Generierung von Ozon aus Luft, bestehend aus dielektrischen Barrieren, Metallplatten an die eine Wechselspannung angelegt ist und dazwischen liegenden Gasräumen, welche von einem Luftstrom passiert werden. Durch die Wechselspannung wandern die Elektronen immer wieder zwischen den dielektrischen Barrieren und den Metallplatten hin und her, wobei sie den luftdurchströmten Gasraum passieren müssen.

Sie kann, wie in Abbildung 1 gezeigt, mit Plattenkondensatoren erfolgen, welche durch eine dielektrische Barriere getrennt sind, wobei die Aufgabe dieser Barriere in der Vermeidung von Funken- und Bogenentladungen besteht. Aufgrund der angelegten Wechselspannung wandern die Elektronen in Form von Mikroentladung oder als homogene Entladung immer zwischen der Barriere und der Metallplatte hin und her, wobei sie den luftdurchströmten Gasraum passieren müssen und dort durch zufällige Zusammenstöße Moleküle spalten. Die dabei unter anderem entstehenden Sauerstoffatome reagieren anschließend mit Sauerstoffmolekülen aus der Luft und es entsteht Ozon [18].

Die Funktionsweise des Siemens'schen Ozonisators basiert auf dem gleichen Prinzip, nur wird hier einem zwischen zwei coaxialen Glasröhren hindurch strömenden trockenem Luftstrom elektrische Energie zugeführt. Die innere

Röhre ist innen und die äußere außen mit einer Metallelektrode belegt, so dass beim Anlegen einer Hochspannung eine stille elektrische Entladung stattfindet, wodurch die zur Bildung von Ozon notwendigen Sauerstoffatome entstehen [19] [20].

Eine weitere Variante Ozon zu erzeugen, erschließt sich durch die Eigenschaften einer Koronaentladung. Wenn zwischen gekrümmten Elektroden eine Hochspannung angelegt wird, entsteht ein stark inhomogenes elektrisches Feld, wobei es in den Bereichen hoher Feldstärke durch Kollisionen beschleunigter Elektronen mit Molekülen und Atomen des Gases zu schwach-bläulichen Leuchterscheinungen, auch Korona genannt, kommt. Teilweise werden bei solchen Zusammenstößen erneut Elektronen freigesetzt. Außerhalb des Bereiches hoher Feldstärke neigen die Elektronen dazu, sich an Moleküle und Atome anzulagern, wodurch diese nun negativ geladene Teilchen in Richtung der Elektroden beschleunigen und wiederum Neutralteilchen durch Stöße aus ihrer Ruhebewegung ablenken. Dabei ist die Geschwindigkeit der Ionen zwischen den Elektroden relativ gering [21]. Weiterhin ist die Polarität der Korona für die Bildung von Ozon essentiell, da sich die Anteile der positiven und negativen Ladungsträger im Plasma stark unterscheiden. Bei negativer Korona werden die Elektronen in Bereiche schwächerer Feldstärke hin beschleunigt, die positiven Ionen hingegen schlagen auf ihr auf und erzeugen dadurch weitere Elektronen. Ein zusätzlicher für die Ozonbildung positiver Nebeneffekt bei negativer Korona ist die freiwerdende UV-Strahlung und die daraus resultierende Photoionisation [22].

Weitere Verfahren zur Ozongenerierung sind beispielsweise die Photoinduktion mit UV-Licht, Elektronenstrahlbeschuss durch be-

schleunigte Elektronen, thermische Funken- und Lichtbogenentladung oder Radiolyse durch Produkte radioaktiver Zerfallsreaktionen. Der Gebrauch von reinem Sauerstoff als Gasstrom ist dabei für die Ozongewinnung immer effektiver als Luft, da diese für die Erzeugung der gleichen Menge deutlich mehr Energie verbraucht und unerwünschte Nebenprodukte wie Stickoxide mitgebildet werden.

Bei der Behandlung durch Atmosphärendruckplasma besitzen vor allem die bei der Generierung entstehenden Ionen und die dadurch frei werdende elektromagnetische Strahlung Einfluss auf den Desinfektionsgrad der mikrobiologischen Belastung und die Spaltungsprozesse chemischer Verbindungen. Die Ionen sind daran auf verschiedene Art und Weise beteiligt. Durch Ionenbeschuss (physikalisches Ätzen) können die Oberflächen mikrobiologischer Zellen zerstört oder abgetragen und die Ketten chemischer Verbindungen gespalten werden. Der Grad der Wirkung durch den Ionenbeschuss hängt dabei jedoch maßgeblich von der Energie der Ionen ab. Weiterhin können durch Ionen und radikale Verbindungen chemische Reaktionen mit Atomen und Molekülen aus der Oberfläche von Mikroorganismen und chemischen Verbindungen stattfinden (chemisches Ätzen). Da bei der Plasmagenerierung unter Atmosphärendruck Luft als Gas für die Herstellung verwendet wird, spielt vor allem die Oxidation durch chemisch aggressive Sauerstoffverbindungen eine große Rolle. Der schädigende Einfluss solcher Verbindungen wird von einigen Forschergruppen als maßgeblicher Wirkmechanismus bei der Plasmasterilisation eingestuft [23].

Weiterhin entsteht bei der Plasmabildung auch elektromagnetische Strahlung, die zur Desinfektion von Materialien und zur Spaltung chemischer Verbindungen beiträgt. Insbesondere

von der kurzwelligen energiereichen UV-Strahlung ist eine keimtötende Wirkung bekannt. Durch die elektrischen Wechselfelder, welche zur Generierung von Plasma notwendig sind, entsteht zudem Mikrowellen- oder Hochfrequenzstrahlung, wobei deren Einfluss auf Mikroorganismen und chemische Verbindungen noch unbekannt ist.

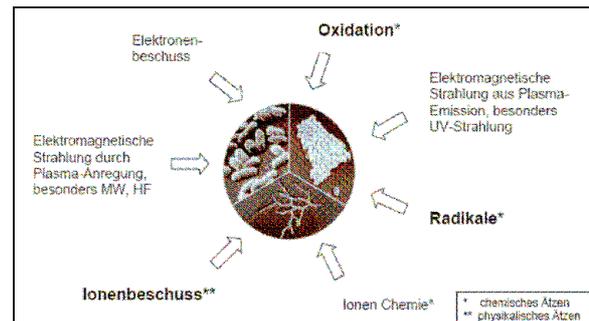


Abbildung 2: Mögliche Wirkmechanismen bei der Nutzung von Atmosphärendruckplasmen auf die mikrobiologischen Belastungen und chemische Verbindungen (in Anlehnung an Hägele, Niederdruck-Plasmasterilisation)

### 2.3 Schadstoffabbau durch Ozon

Ozon wurde in der Trinkwasseraufbereitung bereits im vorigen Jahrhundert eingesetzt. Die erste Ozonierungsanlage wurde 1893 in Oudshoorn (Holland) zur Entkeimung von Rheinwasser errichtet [24]. Dabei war zunächst die keimtötende und vireninaktivierende Wirkung des Ozons von Interesse, die ein Vielfaches gegenüber der Wirkung anderer Desinfektionsmittel, z.B. des Chlors, beträgt [25] [26].

Ungesättigte aromatische organische Verbindungen, welche Substituenten besitzen, reagieren innerhalb kurzer Zeit mit Ozon. Beispiele solcher Verbindungen sind Mercaptane, Amine und Phenole. Auch polyaromatische Kohlenwasserstoffe reagieren gut [27]. Bei der Betrachtung der Reaktion von Ozon mit Schadstoffen können zwei unabhängige Reaktionswege unterschieden werden. Neben der

oben geschilderten Reaktion des "reinen" Ozons mit Schadstoffen gibt es noch einen zweiten Reaktionsweg, in dem zunächst ein Zerfall des Ozonmoleküls zu Hydroxylradikalen erfolgt [28]. Diese äußerst reaktionsfreudigen Radikale besitzen ein noch höheres Redoxpotential und reagieren mit fast allen organischen Verbindungen um mehrere Zehnerpotenzen schneller als das reine Ozon.

## 2.4 Industrielle Nutzung

Plasmatechnik ist eine Querschnittstechnologie und wird bei der Produktion und Anwendung vieler technischer Erzeugnisse wie z.B. Computerchips, Leuchtdioden, Industriediamanten, Energiesparlampen, Polymerfolien, Analysegeräten, Brennstoffzellen, Plasmabildschirmen, etc. verwendet, wobei die vielseitigen Eigenschaften spezifisch und für die jeweiligen Erzeugnisse und Produktionsschritte individuell genutzt werden [11]. So kommen z.B. bei der Oberflächenbehandlung oder bei der Abgasreinigung die thermischen und chemischen Vorteile zum Einsatz. In der Biotechnologie, der Medizintechnik und der Verpackungsindustrie werden Plasmen vor allem wegen ihrer desinfizierenden Wirkung zur Sterilisation von Geräten, Materialien und Produkten verwendet [12].

## 3. Experimentelle Durchführung zur Desinfektion von Materialien im Modellversuch

Für die verschiedensten Anwendungen wurden unterschiedliche Materialien mit einer Suspension aus Schimmelpilzsporen beimpft, kultiviert und anschließend mit dem nicht thermischen Plasma über einen bestimmten Zeitraum mit definierten Ozon- bzw. Ionenkonzentrationen begast.



Abbildung 3: Ionisationsröhren (ionair.ch)

Von den begasten Materialien wurden nach definierten Zeiträumen mittels Malzextrakt-Agar und Chloramphenicol-Agar (DG18) Abdruck- und Materialproben entnommen und bei 24° C über 7 Tage in einem Brutschrank kultiviert. Um diese mit den Ausgangskonzentrationen vergleichen zu können, wurden von den jeweiligen nicht behandelten Materialien ebenfalls Proben genommen und unter den oben genannten Bedingungen kultiviert.

## 3.1 Verwendete Materialien oder Substrate

Um die Ergebnisse der Versuche auf die Anwendung bei der Sanierung von mikrobiologischen Schäden übertragen zu können, wurden häufig in Gebäuden vorkommende Materialien, wie Holz, Gipskarton, künstliche Mineralfaser, Teppich und Styropor als Substrat für die Schimmelpilze gewählt. Hierbei sollte festgestellt werden, inwiefern das Material auf dem der Schimmelpilz wächst, Einfluss auf dessen Zerstörung durch nichtthermische Plasmaverfahren besitzt. Gleichzeitig kann durch diese Methode ein erster optischer Eindruck gewonnen werden, inwieweit das Plasma strukturzerstörende Eigenschaften auf das Material aufweist.

### 3.2 Verwendete Schimmelpilzarten

Für die Versuchsreihe zur Desinfektion von Materialproben mittels Plasmatechnik wurden verschiedene Schimmelpilze auf spezifischen Nährboden, wie Malzextrakt-Agar (MEA), Czapek Hefeextrakt-Agar (CYA), Creatin-Agar (CREA) bei Temperaturen von 5, 25 und 37° C kultiviert. Die Bestimmung der einzelnen Schimmelpilzarten konnte anhand makroskopischer Merkmale der Schimmelpilzkolonien, wie Größe, Gestalt, Farbe und besonderen Ausprägungen sowie nach Anfertigung von Schnitt- und Zupfpräparaten durch mikroskopische Merkmale der Sporen, Sporenträger und Pilzfäden vorgenommen werden. Aus den kultivierten Schimmelpilzen wurden Arten der Gattungen *Cladosporium*, *Penicillium*, *Mucor*, *Stachybotrys* und *Verticillium* ausgewählt, da diese häufig in sanierungsbedürftigen Gebäuden vorkommen und teilweise allergenes sowie toxisches Potential besitzen.

### 4. Ergebnisse zur Desinfektion mikrobiologischer Schäden durch Ozon

Die Ausgangskonzentrationen der koloniebildenden Einheiten (KBE) sind abhängig von den jeweiligen Materialeigenschaften der verwendeten Substrate, wie bspw. Nährstoffgehalt, Oberflächenstruktur und Substratfeuchte. Vergleicht man die unbehandelten Referenzwerte stellt man fest, dass sich beispielsweise auf Holz über einen bestimmten Zeitraum mehr KBE etablierten als auf Styropor. Abbildung 4 macht die Reduktion dieser nach 24, 72 und 100 Stunden Ozonexposition im Vergleich zur unbehandelten Referenzprobe deutlich.

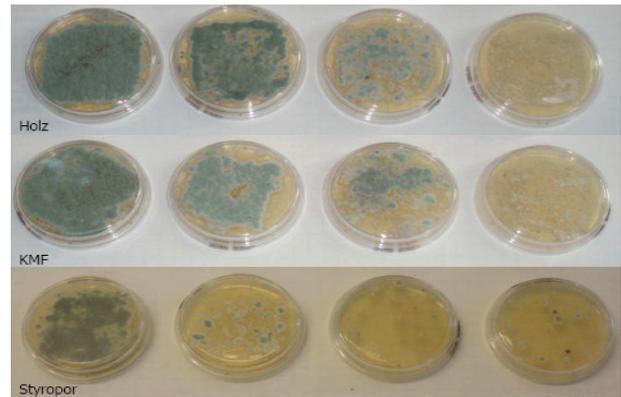


Abbildung 4: Abdruckplatten von Holz, künstlicher Mineralfaser und Styropor nach Ozonbegasung

Die Bilder zeigen von links nach rechts die unbehandelten Referenzen, sowie die Abdruckplatten nach 24, 72 und 100 Stunden

Einen weiteren Einfluss auf die Reduktion der KBE haben die physikalischen Parameter der Umgebung, wie z.B. relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur, frei verfügbares Wasser etc. Diagramm 1 zeigt die maximale Reduktion der koloniebildenden Einheiten auf den Abdruckplatten nach max. Ozonexposition innerhalb der durchgeführten Versuchsreihen über den Versuchszeitraum von etwa 80 Stunden. Hierbei wird deutlich, dass auf Styropor, Teppich und künstlicher Mineralfaser nach maximal 72 Stunden keine koloniebildenden Einheiten mehr detektiert werden konnten.

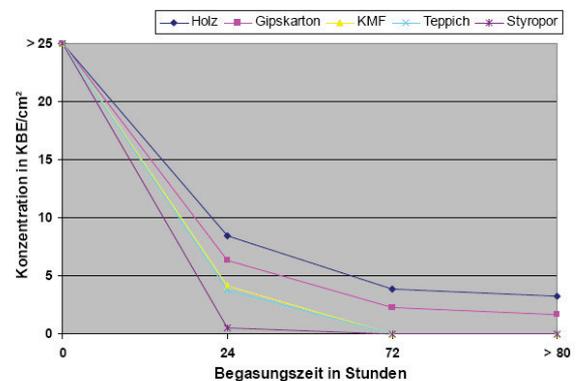


Diagramm 1: Reduktion der Kolonie bildenden Einheiten für die verwendeten Materialien bei maximaler Ozonkonzentration über den Begasungszeitraum von > 80 Stunden

## **5. Chemisch-physikalische Desinfektion mikrobiologischer Schäden durch Foggingverfahren**

Ein Fogger, auch thermischer Vernebler genannt, wandelt auf einer heißen Oberfläche die zu vernebelnde Flüssigkeit zu Gas um. Dabei wird die Flüssigkeit durch eine Düse gepresst, wobei es zu feinsten Tröpfchen kondensiert und so den Nebel bildet. Dieses Aerosol verteilt sich gleichmäßig wie ein Gas und wird von porösen Oberflächen durch Kapillarwirkung wie eine Flüssigkeit aufgesaugt. Je nach Einsatz arbeiten Fachfirmen mit unterschiedlich trockenen oder feuchten Nebeln. In einem trockenen Nebel teilt sich ein einziger Milliliter Flüssigkeit auf fast zwei Milliarden Tröpfchen von etwa zehn Mikrometern Durchmesser auf und vergrößert so seine Kontaktfläche auf 0,6 Quadratmeter. Um in einem normalen Raum von der Decke bis zum Boden zu sinken, brauchen diese Tröpfchen ganze 17 Stunden. Da sie so lange schweben und so weit verteilt werden, können die Teilchen besonders gut in Hohlräume vordringen und dort Schimmel oder Geruchsmoleküle bekämpfen. Beim Feuchtnebel sind die Teilchen bis zu 30 Mikrometer groß. Mit ihnen lassen sich Oberflächen gezielt behandeln: Auf glatten Oberflächen bilden sie einen nicht wahrnehmbaren Film, von porösen werden sie aufgesogen.

Vernebelt werden meist Mittel auf Basis organischer Peroxide. Sie sind Allroundtalente, denn sie töten Mikroorganismen wie Schimmelpilze ab und neutralisieren gleichzeitig Geruchsmoleküle. Sie überlagern nicht einfach wie ein Parfum mit Duftstoffen den unerwünschten Geruch, sondern reagieren mit den Geruchsmolekülen, wandeln sie durch diese katalytische Oxidation in geruchsneutrale Mo-

leküle (bspw. Alkohole) um und verdunsten dann.

Die Schwebstoffe sind so fein, dass sie leicht in die Atemwege vordringen und in die Blutbahn gelangen können. Daher sollte man nur mit Atemschutz und Schutzkleidung foggen. Geeignet sind dafür Firmen, die für Wasserschadenssanierung oder Schimmelbeseitigung zertifiziert sind. Sie kümmern sich auch darum, vor dem Fogging die eigentliche Ursache für den Geruch bzw. die Schimmelbildung, z. B. versteckte Wasserschäden oder Baumängel, zu finden und zu beseitigen, damit das Schimmel- oder Geruchsproblem nicht nach einiger Zeit erneut auftritt. Außerdem sorgen sie dafür, dass die Nutzer der betroffenen Räume so wenig wie möglich beeinträchtigt werden. Das Inventar kann in der Regel vollständig im betroffenen Raum verbleiben. Es reicht, nachdem der Raum vollständig eingenebelt wurde, ihn 24 Stunden nicht zu betreten. Dann wird gründlich gelüftet, und der Raum kann wieder uneingeschränkt genutzt werden.

Wasserstoffperoxid ist neben Ozon eines der stärksten Oxidationsmittel, zudem ätzend und brandfördernd. Das Peroxid bewirkt, besonders in der extremen Feinverteilung in winzigste Tröpfchen, dass Gerüche von Brandschäden bis hin zum muffigen Wasserschaden abgebaut werden. Zudem kann es sehr wirksam als Desinfektionsmittel zur Abtötung von Schimmelpilzen und Schimmelpilzsporen eingesetzt werden.

Der Chemikaliennebel wirkt schneller als Ozon und dringt in kleinste Ritzen und Poren vor. Sinnvollerweise vernebelt man das Wasserstoffperoxid nur dort, wo es keinen Schaden

anrichten kann. Am besten in großen Räumen, die frei von Gegenständen sind und wo die Oberflächen keinerlei nach der Behandlung sichtbar werdenden Reaktionen mit dem oxidierenden Medium eingehen können. Auf Mauerwerk, Putz und Beton hinterlässt das Peroxid keine sichtbaren Spuren. Glänzende Oberflächen von Metallen hingegen verlieren, nach einer Behandlung mit Wasserstoffperoxid diese Eigenschaft.

## 6. Zusammenfassung

Eine Schimmelpilzsanierung ist eng verbunden mit der Sanierung von Wasserschäden und den damit einhergehenden Trocknungsmaßnahmen. Gleiches gilt auf Grund von Löschwassereintrag auch für die Sanierung von Brandschäden. Bereits bei der Schadensmeldung muss kompetent und qualifiziert entschieden werden, welche Maßnahmen entsprechend der geltenden Richtlinien und Normvorschriften zu ergreifen sind, um eine fachgerechte Sanierung des Schadens durchführen zu können.

In der Praxis erfolgt die Begutachtung von Brand- und mikrobiologischen Schäden oft rein sensorisch und optisch. Nach Einschätzung von Praktikern werden aufgrund des unsicheren Befundes häufig ohne Notwendigkeit Einrichtungen, Lagervorräte etc. verworfen. Ein besserer Kenntnisstand würde künftig sicher zu zielgerichteter Sanierung und möglicher Weiternutzung, beispielsweise von Baumaterialien und Inneneinrichtungen beitragen.

Die Maßnahmen einer Sanierung von Schimmelpilzen beinhalten deren Desinfektion und das Inaktivieren der Stoffwechselprodukte (Mykotoxine) durch chemische oder physikalische Verfahren sowie die anschließende mechanische Reinigung der Oberflächen der be-

fallenen Materialien, Baustoffe und Bauteile. Mobiliar und andere Haushaltsgegenstände, die einer Sporenbelastung ausgesetzt waren, müssen ebenfalls gereinigt werden, um eine erneute Sporendrift nach der Sanierung des Gebäudes zu vermeiden.

Darüber hinaus gibt es verschiedene komplementäre Reinigungsverfahren in der Schimmelpilzsanierung.

An Brandschadenstellen hingegen bleibt bei unzureichender Sanierung über lange Zeit ein typischer, intensiver Brandgeruch erhalten, dessen chemischen Ursachen bisher nicht systematisch untersucht sind. Weiterhin können die toxikologischen Wirkungen der geruchsbildenden Substanzklassen sensorisch nicht beurteilt werden. Daher ist es kaum möglich, zielgerichtete Sanierungsverfahren ohne chemische Untersuchungen (bei Löschwassereintrag mikrobiologische Untersuchungen) zu erarbeiten.

Eine Ozonisierung von mikrobiologischem Befall und chemischen Verbindungen im Rahmen einer Sanierung hängt von mehreren Parametern ab. Hierbei spielen die Stoffe in und auf den zu behandelnden Materialien bzw. der umgebenen Luft (inhibierend und katalysierend wirkende Substanzen), die Temperatur, die Durchmischung und viele weitere Einflüsse eine große Rolle. Unter idealen Bedingungen entsteht bei einer Ozonisierung lediglich Wasser und Kohlendioxid. Praktisch können aber, beispielsweise bei zu niedriger Ozonkonzentration oder einer zu geringen Behandlungszeit, zahlreiche stofflich nur bedingt bekannte Umwandlungsprodukte mit wiederum toxischen Eigenschaften entstehen.

Vergleicht man die Ergebnisse der durchgeführten unterschiedlichen Ozonierungs- und Ionisationsversuche, stellt man fest, dass – im Gegensatz zur thermischen Verneblung von sauerstoffaktiven Substanzen – die Reduktion der Kolonie bildenden Einheiten auf Oberflächen fast ausschließlich durch die Ozonkonzentration bestimmt wird.

Die verwendeten Materialien, auf denen die Mikroorganismen wachsen sowie die Dauer und Konzentration der Ozonierung haben dabei Einfluss auf die Wirksamkeit der überprüften nicht thermischen Plasmaverfahren.

Die getesteten Verfahren werden nach Optimierung der eingesetzten Prototypen, wie in anderen industriellen Bereichen auch, eine Ergänzung oder Alternative zu bisher eingesetzten Verfahren in der Desinfektion und Geruchsneutralisation von Fußbodenkonstruktionen und den angrenzenden weiteren Materialarten darstellen.

#### **Literaturverzeichnis**

- [1] VdS 2357, (2007), *Richtlinien zur Brandsanierung, Schadensverhütung im Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.*,
- [2] *Baustellenverordnung (BaustellV)*, Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Baustellen, 1998 (BGBl. I S. 1283), geändert durch Artikel 15 der Verordnung 2004 (BGBl. I S. 3758)
- [3] *Biostoffverordnung (BioStoffV)* vom 27. Januar 1999, *Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen*
- [4] TRGS 542, *Technische Regeln für Gefahrstoffe, Sanierung und Arbeiten in kontaminierten Bereichen*
- [5] TRGS 900, *Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz "Luftgrenzwerte -MAK- und TRK- Werte"*
- [6] TRGS 905, *Verzeichnis Krebs erzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe*
- [7] TRBA 400, *Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen bei der Gebäudesanierung, Arbeitskreis (AK) „Gebäudesanierung“ des Sachgebietes (SG) „Mikrobiologie im Tiefbau“ des Fachausschusses (FA) „Tiefbau“, 1. Auflage 2005*
- [8] TRBA 500, *Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe, Allgemeine Hygienemaßnahmen: Mindestanforderungen*
- [9] *Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)* vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit*
- [10] BGI 858, *Gesundheitsgefährdungen durch biologische Arbeitsstoffe bei der Gebäudesanierung – Handlungsanleitung zur Gefährdungsbeurteilung nach Biostoffverordnung (BioStoffV)*
- [11] ABl. EG Nr. L335 S.179, *Richtlinie der Kommission 97/65/EG* vom 26. November 1997
- [12] H. Drost, *Plasmachemie*, Akademie-Verlag, Berlin (1978)
- [13] Y.V. Plyuto, I.V. Babich, R.A. Sheldon, *Applied Surface Sciences*, (1999)
- [14] G. Hertz, R. Rompe, *Einführung in die Plasmaphysik und ihre technische Anwendung*, Akademie-Verlag, Berlin (1968)
- [15] S. Kanazawa, M. Kogoma, T. Moriwaki, S. Okazaki, *Stable glow plasma at atmospheric pressure*, *Journal of Physics D: Applied Physics* (1988)
- [16] G. Zheng, B. Ma, J. Rong, J. Wang, R. Hong, *Proceeding of ISPC-12*, Minneapolis, (1995)
- [17] J. G. Anderson, *Free Radicals in the Earth's Atmosphere*, *Annual Review of Physical Chemistry*, (1987)
- [18] J. Franzke, M. Miclea, K. Kunze, K. Niemax, *Die dielektrisch behinderte Entladung – ein Mikrochip-Plasma für die Diodenlaser Atomabsorptionsspektrometrie*; Institut für Spektrochemie and Angewandte Spektroskopie, Bunsen-Kirchhoff-St. 11; 44139 Dortmund
- [19] Siemens, W., *Poggendorfs Ann. Phys. Chem.* 1857
- [20] Möller, M., *Das Ozon- einen chemisch-physikalische Einzeldarstellung*; Druck und Verlag Fr. Vieweg & Sohn; Braunschweig 1921.
- [21] Schweitzer, H., *Annalen der Physik - Über die Aufladung kleiner Schwebeteilchen in der Korona – Entladung*; Kaiser-Wilhelm-Institut für physikalische Chemie und Elektrochemie, Berlin-Dahlem 2006
- [22] Hohn. *Dissertation, Hochdruckmikroentladungen mit hohem Gasfluss- Eine Quelle zur Erzeugung von Ionen und spinpolarisierten metastabilen Atomen*; Frankfurt am Main 2002
- [23] M. Moisan, J. Barbeau, J. Pelletier, N. Philip, B. Saoudi, *Plasmasterilisation: Mechanisms, potential and shortcomings*. In *Le Vide: Sci., Techn. Appic (Numéro Spécial: Actes de Colloque)*, Seiten 11-18
- [24] Evans, F. L., *Ozone in water and wastewater treatment*, Ann Arbor, Mich. 1975

[25] Kurzmann, G. E., Ozon in der Wasseraufbereitung. In: Chem. Ind. 16 (1974), S. 502

[26] Hoff, J. C.: Strengths and Weaknesses of Using  $C \cdot t$  Values to Evaluate Disinfection Practise, Proceedings of the AWWA Seminar Assurance of Adequate Disinfection, or  $C \cdot t$  or not  $C \cdot t$ , American Water Works Association, Denver, CO, (1987) S. 49-65

[27] Hoigne, J., Bader, H.: Rate Constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water I +II, Water Research, 17, (1983), 173-194

[28] Hoigne, J., Bader, H.: The role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions Water Research, 10, (1976), 377-386

---

## Holzerstörende Pilze – Teil 2

H. Lierke

### 6. Rechtliche Situation bei Befall durch den Echten Hausschwamm

Bei einem Befall eines Gebäudeteils durch Pilze, insbesondere bei dem Verdacht eines Sachverständigen für Holz- und Bautenschutz auf das Vorkommen des Echten Hausschwammes, ist nach DIN 68 800 eine einwandfreie Identifizierung notwendig.

Ohne moderne molekularbiologische Methoden für eine Bewertung bezieht sich sämtliche Bestimmungsliteratur lediglich auf das Vorhandensein von Fruchtkörpern bzw. auf Merkmale (z.B. Schnallenform, -häufigkeit, Kristallbildung, Skeletthyphen), die das Mycel der Pilze nach der Isolation und während des Wachstums auf einem künstlichen Medium (Agar-Agar) aufweist. In der Praxis ist es aber wichtig, befallenes Bauholz auch ohne Fruchtkörper einschätzen zu können. Oftmals dienen dem Gutachter lediglich entnommene Mycelstückchen innerhalb eines würfelbruchartig zerfallenen Holzes als Vorlage zur Identifikation. In diesen Fällen passt das Aussehen der Hyphen auf keine vergleichbare Art innerhalb der Bestimmungsschlüssel, d.h. bei Nichtvorhandensein von Fruchtkörpern ist keine 100 %ige Bestimmung der Pilzart realisierbar und wie von der DIN 68 800 gefordert, wird zugunsten des Echten Hausschwammes ent-

schieden. Dies bedeutet aufgrund der damit verbundenen Folgemaßnahmen oft eine gravierende finanzielle Mehrbelastung für den Eigentümer.

### 7. Gesundheitliche Bewertung bei Auftreten von Holzerstörern in Gebäuden

Es ist davon auszugehen, dass bei einem großflächig auftretenden Befall Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Sporen oder Hyphenbruchstücke bei Aufenthalt im Befallsbereich nicht auszuschließen sind. Konidien und Sporen (Echter Hausschwamm 9-12 x 4-6  $\mu\text{m}$ , (WEISS et al. 2000) können über große Entfernungen hinweg von Luftbewegungen transportiert werden. Diese können über die Atemluft in den menschlichen Körper gelangen und allergische Reaktionen (mykogene Allergien) oder Erkrankungen der Atemwege verursachen. Die allergische Alveolitis wird von jeder Art biologischem Staub mit Teilchengröße < 10  $\mu\text{m}$  (wie auch Sporen) ausgelöst. Im Allgemeinen sind die mittleren und oberen Atemwege sowie das Lungenparenchym betroffen. Ein Nachweis für eine Allergie gegen Hausschwammsporen ist erfolgt (BRYANT UND ROGERS 1991). Dabei wurden im Blut von Patienten spezifische Immunglobuline nachgewiesen (O'BRIEN et al. 1978).

Bei intensivem Befall durch Schimmelpilze können Stoffwechselprodukte des Sekundärbefalls Kopfschmerzen und Übelkeit hervorru-