



Zur Erlangung des Grades  
eines  
Bachelor of Engineering (B.Eng)

von Herrn Sven Friedrich

geboren am: 01.10.1993  
in: Iserlohn

vorgelegte Abschlussarbeit:

Thema:

Untersuchung der Schadstoffbelastung im Bereich der  
Klärschlammverbrennungsanlage Łódź

Erstprüfer: Herr Prof. Dr.-Ing. D. Heinz, FB INW  
Zweitprüfer: Herr Dr inż. Robert Cichowicz, TU Łódź

Merseburg, 29. August 2016



**Aufgabenstellung**  
**für die Bachelorarbeit (B. Eng.)**  
**von Herrn Sven Friedrich**  
**(Matrikel 20354)**

**Thema:**            **Untersuchung der Schadstoffbelastung im Arbeitsbereich einer Klärschlammverbrennungsanlage**

**Betreuer:**        Herr Prof. Dr.-Ing. D. Heinz  
                      Herr Dr.-Ing. R. Cichowicz, TU Lodz

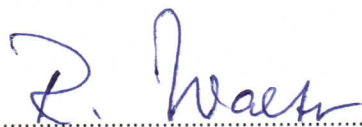
**Aufgabenstellung**

Im Rahmen der Bachelorarbeit ist die Schadstoffbelastung im Arbeitsbereich der Klärschlammverbrennungsanlage der Gemeinschaftskläranlage Łodz zu untersuchen und zu bewerten.

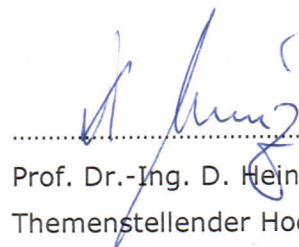
**Schwerpunkte**

- Gesundheitsrisiken durch Luftschadstoffe in Arbeitsbereichen
- Darstellung der Lage der Kläranlage und Beschreibung des Prozesses der Abfallverbrennung als Ursache für die Emissionen
- Beschreibung der verwendeten Messverfahren und -geräte
- Planung, Durchführung und Auswertung der Messungen
- Vergleichende Bewertung der Untersuchungsergebnisse mit einzuhaltenden Arbeitsplatzgrenzwerten nach polnischen und deutschen Vorschriften
- Zusammenfassende Bewertung der gewonnenen Versuchsergebnisse und Diskussion von Möglichkeiten zur Minderung von Schadstoffbelastungen

abzugebende Exemplare:        2 + PDF-Datei



.....  
Prof. Dr. rer. nat. R. Walter  
Vorsitzende des Prüfungsausschusses



.....  
Prof. Dr.-Ing. D. Heinz  
Themenstellender Hochschullehrer



## **Selbständigkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Merseburg, 29.08.2016

# Inhaltsverzeichnis

0	Einleitung.....	13
1	Aufgabenstellung .....	16
2	Gegenstand der Betrachtung: GOŚ ŁAM.....	17
2.1	Lage.....	17
2.2	Abwasserbehandlung .....	17
2.3	Thermische Klärschlammbehandlung in der GOŚ ŁAM.....	20
2.4	Abgasreinigung .....	25
3	Durchführung der eigenen Messungen .....	31
3.1	Messpunkte .....	31
3.2	Verwendete Messgeräte .....	32
3.2.1	Feinstaubmessung.....	33
3.2.2	Babuc A, Multi-data logger und angeschlossene Messgeräte .....	33
4	Charakteristische Größen.....	39
4.1	Emissionen.....	39
4.2	Transmission.....	39
4.3	Immissionen .....	43
4.4	Immissionen am Arbeitsplatz .....	43
5	Dioxine und Furane .....	45
5.1	Aufbau und Einteilung .....	45
5.2	Giftigkeit und deren Bewertung (TEF, TEQ) .....	46
5.3	Emission/ Maßnahmen zu Emissionsminderung .....	48
5.4	Verbreitung in der Nahrungskette .....	49
5.5	Richt-/Grenzwerte .....	51
6	Staub.....	53
6.1	Gefahrenpotenzial .....	53
6.2	Quellen .....	54
6.3	Grenzwerte .....	55
7	Mikrobiologie .....	57

7.1	Vorkommen von Mikroorganismen .....	57
7.2	Bakterien-Pilz -Messung .....	58
8	Schwermetalle.....	61
8.1	Charakterisierung und Definition .....	61
8.2	Emission.....	61
8.3	Wirkung auf den Menschen, Pflanzen .....	61
8.4	Grenzwerte .....	62
9	Thermische Behaglichkeit .....	65
9.1	Begriffsbestimmung .....	65
9.2	Beurteilungsmaßstäbe PMV, PPD und WBGT .....	66
10	Auswertung.....	69
10.1	Dioxine und Furane .....	69
10.2	Staub.....	70
10.2.1	Emission.....	70
10.2.2	Immission.....	71
10.3	Auswertung Sonstiger Messungen mit Babuca-A .....	73
10.4	Mikrobiologie.....	73
10.5	Schwermetalle .....	76
10.5.1	Klärschlamm der GOS Lam .....	76
10.6	Thermische Behaglichkeit.....	77
10.6.1	WBGTI <-> WBGTE.....	77
10.6.2	WBGTeff.....	77
10.6.3	PMV und PPD.....	78
10.7	Auswertung Thermische Behaglichkeit .....	79
11	Literaturverzeichnis .....	80

# Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Kläranlage (Mai 2009) /11/ .....	17
Abbildung 2: Verfahrensschema der GOŚ ŁAM übersetzt von /13, S. 3/ .....	20
Abbildung 3: Prozess der thermischen Klärschlammbehandlung /10, S. 10/ .....	21
Abbildung 4: Aufbau des Wirbelschichtofens nach /18/ .....	23
Abbildung 5: Links: einzelne Düse, Mitte: Düsenboden von der Windbox aus /10, S. 29/, rechts: Düsenboden von oben /11/ .....	24
Abbildung 6: NO <sub>x</sub> -Reduktion in Abhängigkeit von der Temperatur /20/ .....	26
Abbildung 7: Stickoxid Emission .....	27
Abbildung 8: Reaktionspfade der Schwefeloxide mit Natriumhydrogencarbonat (ohne die Berücksichtigung der Nebenprodukte CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O) /25, S. 623/ .....	29
Abbildung 9: Die wichtigsten Zirkulationszellen der Atmosphäre /35/ .....	40
Abbildung 10: Dauer der Austauschprozesse /36, S. 4/ .....	40
Abbildung 11: Ausbreitungstypen /40, S. 129/ .....	42
Abbildung 12: Aufbau Dioxine und Furane /44/ .....	45
Abbildung 13: Zusammensetzung der täglichen Dioxin-, Furan- und PCB -Belastung /56/ .....	50
Abbildung 14: Eindringtiefe von Staub /61/ .....	53
Abbildung 15: Einatembarer Staub nach DIN EN 481 /62, S. 6/ .....	54
Abbildung 16: PMV und PPD Beurteilungsskala /81, S. 6–9/ .....	67
Abbildung 17: Dioxin und Furan Konzentrationsentwicklung .....	70
Abbildung 18: Staubemission beider Linien bezogen auf 11 % O <sub>2</sub> .....	71
Abbildung 19: Staubimmission .....	72
Abbildung 20: Zusammenhang rel. Feuchtigkeit und dry-wet-Bulb Temperatur .....	73
Abbildung 21: Pilze Außen      Abbildung 22: Bakterien Außen .....	75
Abbildung 23: Pilze Innen      Abbildung 24: Bakterien Innen .....	75
Abbildung 25: Beurteilung mit WBGT /33, S. 11/ .....	78
Abbildung 26: PMV und PPD Auswertung .....	79



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zulauf zur Kläranlage (2012 - 2015) /14/ .....	18
Tabelle 2: Charakterisierung der Messpunkte .....	32
Tabelle 3: verwendete Abkürzungen - Psychrometer nach /31, S. 119/ .....	35
Tabelle 4: verwendete Abkürzungen -Strahlungstemperatur und WBGT .....	37
Tabelle 5: Ausbreitungstypen /39, S. 11–13/ .....	41
Tabelle 6: verschiedene TEF z.B. nach /23, Anhang VI TEIL 2; 46, Anhang; 47, Anhang; 48/ ..	47
Tabelle 7: Verwendung der verschiedenen TEF .....	48
Tabelle 8: Erforderlich AEI Reduzierung PM 2,5 /60, S. 34/ .....	56
Tabelle 9: Formelzeichen Mikrobiologie /69, S. 21/ .....	58
Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte Schwermetalle /24, 20 f.; 23, S. 68/ .....	63
Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte nach TA Luft /49, 50 f./ .....	64
Tabelle 12: Energieumsatz nach DIN EN 27243 aus /79, S. 4; 80, S. 24/ .....	65
Tabelle 13: WBGT-Referenztemperaturen /33, S. 11; 79, S. 6/ .....	68
Tabelle 14: Formelzeichen-Umrechnung Sauerstoffgehalt /24, S. 30/ .....	71
Tabelle 15: Auswertung Mikrobiologie .....	74
Tabelle 16: Beurteilung der Belastungssituation Mikrobiologie /67/ .....	74
Tabelle 17: Schwermetalle im Klärschlamm /10, S. 5; 2, S. 4–5/ .....	76

## Formelverzeichnis

[1 ] NOx Oxidation mit Harnstoff.....	26
[2 ] NOx Oxidation mit Ammoniak .....	26
[3 ] Aktivierung von Natriumhydrogencarbonat .....	28
[4 ] Reaktion mit HF .....	28
[5 ] Reaktion mit HCl .....	28
[6 ] Reaktion mit SO <sub>2</sub> .....	28
[7 ] Reaktion mit SO <sub>2</sub> +0,5 O <sub>2</sub> .....	28
[8 ] Reaktion mit SO <sub>3</sub> .....	28
[9 ] Sättigungsdampfdruck (eine Phase) .....	35
[10 ] Korrekturfaktor (Druck).....	35
[11 ] Sättigungsdampfdruck (real) .....	36
[12 ] Psychrometergleichung (Assman).....	36
[13 ] relative Luftfeuchtigkeit .....	36
[14 ] Taupunkt .....	36
[15 ] WBGTI.....	37
[16 ] WBGTE.....	38
[17 ] Strahlungswärme (freie Konvektion) .....	38
[18 ] Strahlungswärme (erzwungene Konvektion).....	38
[19 ] Bakterien/Pilz Bestimmung (DIN EN 13098).....	58
[20 ] PPD .....	66
[21 ] Umrechnung auf den Bezugssauerstoff.....	71
[22 ] Bakterien Bestimmung (PN-Z-04111).....	74
[23 ] Pilz Bestimmung (PN-Z-04111).....	74

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	deutsch
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe
AGW	Arbeitsplatz Grenzwert
BAT-Werte	Biologische Arbeitsstoff-Toleranz-Werte
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutz-Verordnung
CAF	Bekleidungsanpassungsfaktor
cfm	Kubikfuß pro Minute
DIN	Deutsches Institut für Normung
dl-PCB	Dioxin ähnliche polychlorierte Biphenyle
EGW	Einwohner Gleichwert
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GOŚ ŁAM	Gemeinschaftskläranlage des Ballungsraums Łódz
MAK-Werte	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
NOx	Stickoxide
PCB	polychlorierte Biphenyle
PCDD	polychlorierten Dibenzo-p-dioxinen
PCDF	polychlorierten Dibenzofuranen
PM 2,5/10	Partikeldurchmesser 2,5/10 µm
PMV	Vorausgesagtes mittleres Votum
PPD	Vorraussichtlicher Prozentsatz unzufriedener
SCR	Selektive katalytische Reduktion
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

TDI	tolerierbare tägliche Aufnahmemenge
TEF	Toxizitätsäquivalenzfaktor
TEQ	Toxizitätsäquivalent
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TWI	tolerable wöchentliche Aufnahme
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WBGT	Wet Bulb Globe Temperatur
WBGTE	WBGT mit Sonneneinstrahlung berechnet
WBGTeff	effektive WBGT
WBGTI	WBGT ohne Sonneneinstrahlung berechnet
WBGT-Index	Wet Bulb Globe Temperatur-Index
WHO	Weltgesundheitsorganisation

## 0 Einleitung

Da Wasser nur begrenzt zur Verfügung steht, ist es erforderlich, dieses nach dem Gebrauch zu reinigen, um es wieder verwenden zu können. Im heutigen Abwasser ist eine Vielzahl an Schadstoffen enthalten, die entfernt werden sollen. Es werden immer neue Materialien entwickelt, deren Einfluss nicht immer abzusehen ist. Ein Großteil dieser Schadstoffe gelangt während der Abwasserreinigung in den Klärschlamm. In einem Bericht des Umweltbundesamtes wird der Klärschlamm als **„Schadstoffsенke für unerwünschte Abwasserinhaltsstoffe aus Haushalten, Gewerbe und diffusen Quellen“** /1, S. 33–34/ bezeichnet. Für die Entscheidung, wie der Klärschlamm weiterverwendet werden soll und kann, ist es notwendig, dessen Zusammensetzung und Eigenschaften zu kennen. Eine wichtige Rolle spielen dabei Schwermetalle, Dioxine und Furane. Da diese nicht abgebaut werden können, reichern diese sich in der Umwelt an. Die Anreicherung kann im Boden, in der Luft, im Wasser und im Grundwasser erfolgen. Infolgedessen auch in der Nahrungskette.

Eine Möglichkeit, wie die Nährstoffe aus dem Klärschlamm weiter genutzt werden können, ist die Ausbringung von Klärschlamm als Dünger auf landwirtschaftliche Flächen. In den letzten Jahren wurde diese jedoch immer weiter reglementiert. Die Vorschriften sind in der AbfKlärV zu finden. /2/ Diese ist die Umsetzung der Richtlinie 86/278/EWG. /3/ Werden diese Grenzwerte und Vorschriften eingehalten, spricht nichts gegen eine Nutzung als Dünger. Doch zumindest in Deutschland ist ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammnutzung politisch angestrebt. Gleichzeitig soll die Rückgewinnung von Nährstoffen, insbesondere Phosphor, intensiviert werden. /4, S. 120/. Die Rückgewinnung von Phosphor als einen der wichtigsten Düngerbestandteile soll die Abhängigkeit von Importen reduzieren. Ein genaues Datum, bis zu dem der Ausstieg erreicht werden soll, ist gegenwärtig noch nicht festgelegt. Der Ausstiegswunsch geht mit immer strengeren Grenzwerten in der Klärschlammverordnung (/2/) einher. Wenn die landwirtschaftliche Nutzung jedoch komplett verboten wird, entfällt einer der **„am häufigsten und regelmäßig kontrollierten Sekundärrohstoffdünger“** /1, S. 33/, der den Stickstoff auf direktem Weg im Stoffkreislauf gehalten hat.

Eine Alternative zur landwirtschaftlichen Nutzung ist die Kompostierung von Klärschlamm. Dafür ist es notwendig, diesem Strukturmaterial zuzugeben. Die Kompostierung kann in Bioreaktoren oder Mieten erfolgen. Das erhaltene Produkt wird als Klärschlammkompost bezeichnet. /5/ Doch auch für Klärschlammkompost gilt die Klärschlammverordnung. /2, §2 Abs. 2/ Durch den Abbau von organischen Stoffen während der Kompostierung kann die Konzentration nicht abbaubarer Stoffe im Produkt zunehmen, da diese bezogen auf die Trockensubstanz angegeben werden. Da der Klärschlammkompost immer noch unter die Klärschlammverordnung fällt, steht zu erwarten, dass bei einem Verbot der landwirtschaftlichen Nutzung auch diese Möglichkeit wegfällt.

Ein weiteres Verfahren ist die Klärschlammvererdung. Bei diesem Verfahren wird zuvor stabilisierter Schlamm (aerob oder anaerob) intervallweise in ein Becken gepumpt. Das Becken muss über ein Drainagesystem verfügen und ist mit Sumpfpflanzen bepflanzt. Meistens ist dies Schilf. Das Schilf lockert den Boden auf, bietet einer Vielzahl an Mikroorganismen einen Lebensraum und verdunstet Wasser. Die Standzeit ist abhängig vom Betrieb, beträgt aber ca. 10 Jahre. Das Volumen kann in diesem Zeitraum um ca. 98 % reduziert werden. Nach dieser Zeit muss das Becken ausgeräumt werden. Das entstandene Produkt, es wird als Klärschlammkompost bezeichnet, kann dann nachkompostiert oder direkt als Dünger verwendet werden. /6/ Die TU Braunschweig hat Bedenken bei der Entsorgungssicherheit, da das Endprodukt nach ihrer Ansicht immer noch Klärschlamm ist. /7/ Im Gegensatz zum Klärschlammkompost ist die Klärschlammkomposterde nicht explizit in der AbfKlärV aufgeführt. Allerdings wird in dieser Klärschlammkomposterde über die Weise seiner Gewinnung, unabhängig von der Behandlung definiert. /2, §2 Abs. 2/

Nach einem Verbot der landwirtschaftlichen Nutzung von Klärschlamm und infolgedessen wahrscheinlich auch der Produkte, die daraus direkt erzeugt werden (Klärschlammkompost und Klärschlammkomposterde) gibt es nur noch ein weiteres Verfahren, mit dem Klärschlamm weiter behandelt werden kann. Dies ist die thermische Klärschlammbehandlung. Die Phosphatrückgewinnung aus der Asche ist derzeit noch nicht wirtschaftlich: Die Verfahren sind noch nicht ausgereift. /8, S. 23/ Aber auch weil das Konkurrenzprodukt Rohphosphat billiger gewonnen werden kann. Dies könnte sich bei knapper werdenden Vorkommen und abnehmender Qualität jedoch ändern. /9, S. 760/

Eine Übergangslösung ist die Lagerung von Klärschlamm-Asche auf Deponien. Allerdings muss in diesem Fall darauf geachtet werden, dass diese rückholbar gelagert wird. Auf diese Weise ist es möglich die Inhaltsstoffe zurückzugewinnen, sobald entsprechende Verfahren zur Verfügung stehen.

Ein Verfahren der thermischen Klärschlammbehandlung wird in der Gemeinschaftskläranlage in Łódź angewandt. Es erfolgt eine Zersetzung in einem Wirbelschichtofen bei bis zu 850 °C. Der Verbrennung schließt sich eine mehrstufige Abgasreinigung an. Die Abgasreinigung beginnt mit dem SNCR-Verfahren schon im Ofen. Es folgt eine Zyklon Batterie, eine chemische Reinigung mit Natriumhydrogencarbonat und Aktivkohle und abschließend eine Filterung mit Taschenfiltern. /10/

Das Arbeitsklima beeinflusst neben der Gesundheit der Mitarbeiter auch deren Leistungsfähigkeit. Daher ist es notwendig, diese zu überwachen. Das Gefahrenpotenzial ist am Arbeitsplatz besonders hoch, da die Arbeitnehmer diesen Bedingungen sehr lange

ausgesetzt sind. So machen insbesondere persistente Stoffe auch bei niedriger Konzentration auf die Dauer krank. Die zulässige Konzentration von Gefahrenstoffen wird in der TRGS 900 in Form von Arbeitsplatzgrenzwerten angegeben. Neben den Stoffen haben auch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit einen Einfluss auf das Wohlbefinden des Menschen. Dies wird unter dem Begriff der thermischen Behaglichkeit zusammengefasst. Neben den Umgebungsbedingungen ist die thermische Behaglichkeit von der Art der Arbeit und dem damit verbundenen Energieumsatz, sowie von der Bekleidung und der daraus resultierenden Isolierung abhängig.

# 1 Aufgabenstellung

Diese Arbeit befasst sich mit den Arbeitsbedingungen im Gebäude der thermischen Klärschlammbehandlung der Gemeinschaftskläranlage GOŚ ŁAM. Je höher man sich im Gebäude befindet, desto höher ist die Temperatur. Ob die Arbeitsschutzvorschriften eingehalten werden, ist schwer abzuschätzen. Es ist das Ziel dieser Arbeit, die Arbeitsplatzbedingungen im Gebäude zu bewerten und - wenn nötig - Optimierungsvorschläge zu entwickeln. Der Schwerpunkt wird dabei auf der Untersuchung der thermischen Behaglichkeit anhand der verschiedenen Temperaturen und den daraus resultierenden Indizes liegen. Um dieses Ziel zu erreichen, soll an acht Messpunkten, die im gesamten Gebäude verteilt sind, die Trockentemperatur, die Feuchttemperaturen und die Globetemperatur gemessen werden. Aus diesen Werten lassen sich die relative Feuchtigkeit, der Wet Bulb Globe Temperatur-Index (WBGT-Index), sowie das PMV (Vorausgesagtes mittleres Votum) und PPD (Vorraussichtlicher Prozentsatz unzufriedener) berechnen. Mittels eines einfachen Verfahrens erfolgt die Erfassung der Bakterien und Pilze in der Luft. Des Weiteren erfolgt eine Messung des Staubes in der Luft. Dies erfolgt mit einem Partikelzähler, weshalb nur die einzelnen Messergebnisse untereinander verglichen werden können. Neben der Durchführung der eigenen Messung und deren Analyse werden auch die vom Kläranlagenbetreiber zur Verfügung gestellten Daten zu den Staubemissionen sowie die Untersuchungsergebnisse zu den Schwermetall-, Dioxin- und Furan-Emissionen analysiert.



## 2 Gegenstand der Betrachtung: GOŚ ŁAM



Abbildung 1: Übersicht der Kläranlage (Mai 2009) /11/

### 2.1 Lage

Łódź liegt zentral in Polen. Es ist mit über 722.000 Einwohner im Jahr 2012 die drittgrößte Stadt Polens./12/ Die Gemeinschaftskläranlage GOŚ ŁAM (Grupowej Oczyszczalni Ścieków Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej) liegt südwestlich von Łódź, Sanitariuszek 66, 91-867 Łódź, am südlichen Ufer des Flusses Ner. Der Ner mündet in die Warthe, diese wiederum in die Oder und schließlich in die Ostsee. Da die Kläranlage am tiefsten Punkt des Ballungsraumes von Łódź liegt, ist die Zuführung eines Großteils des Wassers aus dem 366 Hektar großen Einzugsgebiet über Freispiegelleitungen möglich. Im Einzugsgebiet leben etwa 820.000 Menschen. /13, S. 1/

### 2.2 Abwasserbehandlung

Die Kläranlage wird ausschließlich für die Behandlung von kommunalem Abwasser genutzt. Sie reinigt mehr als die Hälfte des in der Region Łódź anfallenden Abwassers und ist für einen Trockenwetterabfluss von 215.300 m<sup>3</sup>/d und einem Einwohnergleichwert (EGW) von 1.026.260 ausgelegt. Die Auslastung lag laut der online veröffentlichten Kurzbeschreibung

(Krótki opis) in den letzten fünf Jahren nur bei durchschnittlich 195.000 m<sup>3</sup>/d, wovon der Trockenwetterabfluss ca. 170.000. m<sup>3</sup>/d ausmacht. /13, S. 1/ Neben der Kurzbeschreibung veröffentlicht die Kläranlage auf der Homepage für jedes Jahr einen ausführlichen Bericht. Darin sind unter anderem die ankommenden Volumenströme ausgewiesen. Seit 2013 hat der Tagesmittelwert immer weiter abgenommen. Im Jahr 2015 betrug die Auslastung nur ca. 70 %. /14/

Tabelle 1: Zulauf zur Kläranlage (2012 - 2015) /14/

<b>Jahr</b>	<b>Tagesmittelwert [m<sup>3</sup>/d] (min - max)</b>	<b>Stundenmittelwert [m<sup>3</sup>/h] (min - max)</b>
2012	175708 (115000 - 536200)	7321(1700 - 54800)
2013	193482 (106.000 - 597.500)	8062 (2300 - 65600)
2014	168564 (111800 - 508100)	7024 (2200 - 54300)
2015	153048 (104000 - 360500)	6377 (2200 - 34400)

Nicht jede Reinigungsstufe kann gleich viel Wasser reinigen. Limitierend für eine vollständige Reinigung ist die biologische Reinigungsstufe. Diese ist für einen Durchsatz von bis zu 215.300 m<sup>3</sup>/d ausgelegt. Der maximale Stundenvolumenstrom darf 11.500 m<sup>3</sup>/h nicht überschreiten. Wird mehr Wasser der Kläranlage zugeführt, kann lediglich eine mechanische Reinigung erfolgen. Dies ist bis zu 450.00 m<sup>3</sup>/h möglich. Eine Zuführung zum ersten Rechen ist sogar bis zu 819.000 m<sup>3</sup>/h möglich. Der Überschuss wird nach dem ersten Rechen oder nach der mechanischen Reinigung über je einen Bypass direkt in den Vorfluter eingeleitet. /15/

Die erste Reinigungsstufe ist eine mechanische. Sie besteht zuerst aus einen stabilen Rechen. Dieser soll die weiteren Apparate vor Beschädigungen schützen. Der Abstand der Stäbe beträgt 100 mm. Anschließend wird der Strom für die Behandlung durch feinere Rechen auf bis zu vier Linien aufgeteilt. Diese Rechen haben nur noch eine Spaltweite von 5 mm. Das Rechengut wird gewaschen, anschließend desinfiziert und schließlich gelagert, bis es der Verbrennung zugeführt werden kann. Zum Schutz vor Geruchsemissionen ist dieser Prozess eingehaust. Die abgesaugte Luft wird mit einem Biofilter gereinigt. Als nächstes wird der Sand in einem Sandfang entfernt. Der abgesetzte Sand wird abgepumpt und anschließend gewaschen. Der gewaschene und wieder entwässerte Sand enthält weniger als 3 % organisches Material und kann somit auf eine Deponie verbracht werden. Das Wasser gelangt

anschließend in bis zu sechs Vorklärbecken mit einer Kapazität von je 4.000 m<sup>3</sup>. In diesen setzen sich ungelöste Stoffe ab, die mit einem Räumler am Boden der Pumpe zugeführt werden. Dieser Primärschlamm wird dann der Schlammeindickung zugeführt und anschließend dem Fermenter. Zeitgleich wird an der Oberfläche das aufgeschwommene Fett abgezogen. Dieses wird ebenfalls dem Fermenter zugeführt. /13, S. 2/

Die biologische Reinigung erfolgt mit einer vorgeschalteten Denitrifikation. Zusätzlich erfolgt eine Phosphorelimination. Die biologische Reinigung erfolgt in sieben Belebtschlammbecken. Jedes hat eine Kapazität von ca. 4.000m<sup>3</sup>. Für die biologische Phosphorentfernung benötigen die Bakterien einen Wechsel zwischen anaeroben und anoxischen oder aeroben Bedingungen. Unter anoxischen Bedingungen wird das gelöste Phosphat aufgenommen. Dabei wird Energie verbraucht. Gleichzeitig findet eine Zunahme der Biomasse statt. Unter anaeroben Bedingungen erfolgt eine Rücklösung des eingelagerten Phosphats, um Energie zu gewinnen. Die Phosphatreduzierung erfolgt dementsprechend über den Austrag mit der Biomasse. Aus der sich anschließenden Denitrifikation erfolgt eine Rückführung des Wassers zum Beginn der Phosphorentfernung. In der folgenden Abbildung RW I. /13/

In der Denitrifikation wird Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) durch Denitrifikanten zu elementarem Stickstoff (N<sub>2</sub>) reduziert. Der Stickstoff entweicht in die Luft. Das benötigte Nitrat wird durch eine Rückführung des Wassers nach der Nitrifikation zurück zur Denitrifikation bereitgestellt (RW II). Die Denitrifikation erfolgt nur unter anoxischen Bedingungen. Anoxisch bedeutet, dass kein freier, sondern nur gebundener (z.B. NO) Sauerstoff vorhanden ist. Wenn freier Sauerstoff vorhanden wäre, würden die Mikroorganismen zuerst diesen anstatt des Nitrats als Elektronenakzeptor nutzen, da damit mehr Energie gewonnen werden kann.

Der nächste Schritt ist die Nitrifikation. Dabei erfolgt durch die Mikroorganismen Nitrosomonas und Nitrobacter die Oxidation von Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) zu Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Die Umsetzung geschieht über den Zwischenschritt des Nitrits (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>). Hierfür werden aerobe Bedingungen benötigt. /16/

An die Nitrifikation schließt sich das Nachklärbecken an. Hiervon gibt es erneut sieben Stück mit einer Fläche von 2.160 m<sup>2</sup>. Das gereinigte Abwasser gelangt anschließend in den Vorfluter Ner. Ein Teil des Schlammes aus dem Nachklärbecken wird in die Denitrifikation und Phosphatelimination zurückgeführt (Rücklaufschlamm). Auf diese Weise stehen immer genügend Mikroorganismen für den Abbau zur Verfügung. Der andere Teil wird als Überschussschlamm der Schlammbehandlung zugeführt. Bei der geplanten Beschickung mit 215,3 m<sup>3</sup>/d beträgt die gesamte Aufenthaltszeit des Schlammes 15,5 h, im anaeroben Becken 1,9 Stunden, im anoxischen 6,0 Stunden und im aeroben 7,6 Stunden. /13; 17/

Normalerweise ist der Einsatz einer externen Kohlenstoffquelle bei einer vorgeschalteten Denitrifikation nicht notwendig. Lediglich bei einer nachgeschalteten Denitrifikation ist die Zuführung einer externen Kohlenstoffquelle notwendig, da bei dieser Anordnung ein Großteil des Kohlenstoffs bereits während der Nitrifikation abgebaut wurde. Für die Denitrifikation wird jedoch Kohlenstoff als Elektronendonator benötigt. /16/

KB = Phosphorentfernung

KDN = Denitrifikation

KN = Nitrifikation

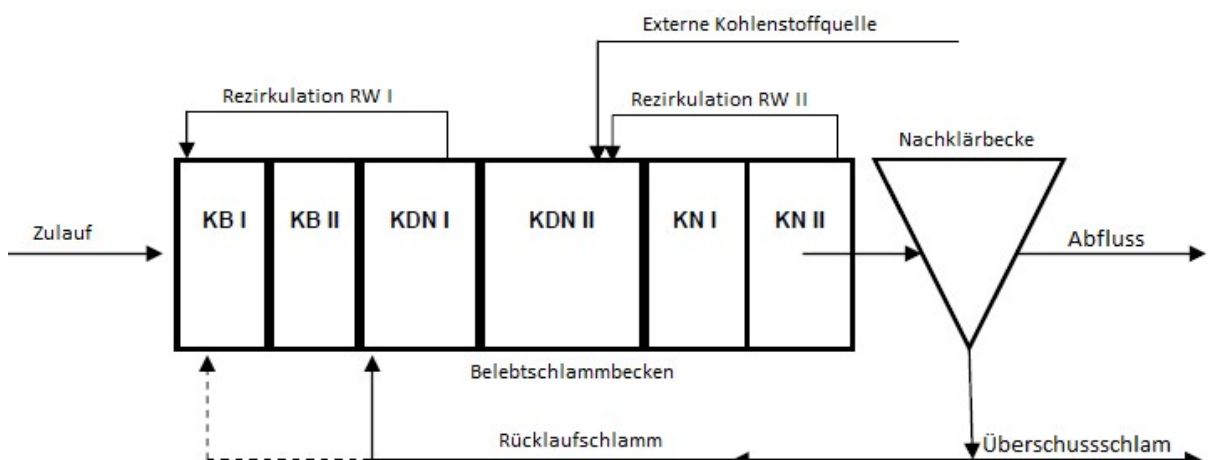


Abbildung 2: Verfahrensschema der GOŚ ŁAM übersetzt von /13, S. 3/

### 2.3 Thermische Klärschlammbehandlung in der GOŚ ŁAM

Der gesammelte Schlamm wird zuerst mittels Schwerkraft in zwei Konzentratoren mit einer Kapazität von je 539 m<sup>3</sup> vorkonzentriert, bevor er anschließend eingedickt und dem Fermenter zugeführt wird. Die Eindickung erfolgt auf fünf Bandrocknern mit einer Kapazität von je 91,5 m<sup>3</sup>/h. Zur weiteren Stabilisierung wird der Schlamm dann dem Fermenter zugeführt, in dem unter mesophilen Bedingungen (35 - 38 °C) eine Methangärung erfolgt. Es gibt insgesamt vier Gärkammern mit einer Kapazität von je 10.000 m<sup>3</sup>. Das entstandene Biogas muss noch entschwefelt werden. Dies geschieht in zwei Reaktoren mit je 800 m<sup>3</sup>/h, die mit Eisen(III)oxid gefüllt sind. Nach der Entschwefelung wird es zur Energieerzeugung in einem Blockheizkraftwerk verbrannt. /13, S. 4/

Die Behandlung des Klärschlammes und des Rechenguts erfolgt thermisch. Die Anlage ist auf 84.000 t Schlamm und Rechengut/Jahr ausgelegt. Davon sind lediglich 2.000 t Rechengut mit

einem Wassergehalt von ca. 80 %. Den größten Teil macht der fermentierte Schlamm mit 82.000 t im Jahr und einem geringfügig niedrigeren Wassergehalt von ca. 78 % aus./10, S. 4/

Die Behandlung erfolgt entsprechend dem folgendem Schaubild. Es sind zwei parallel arbeitende Linien eingerichtet, die gleichmäßig beschickt werden sollen:

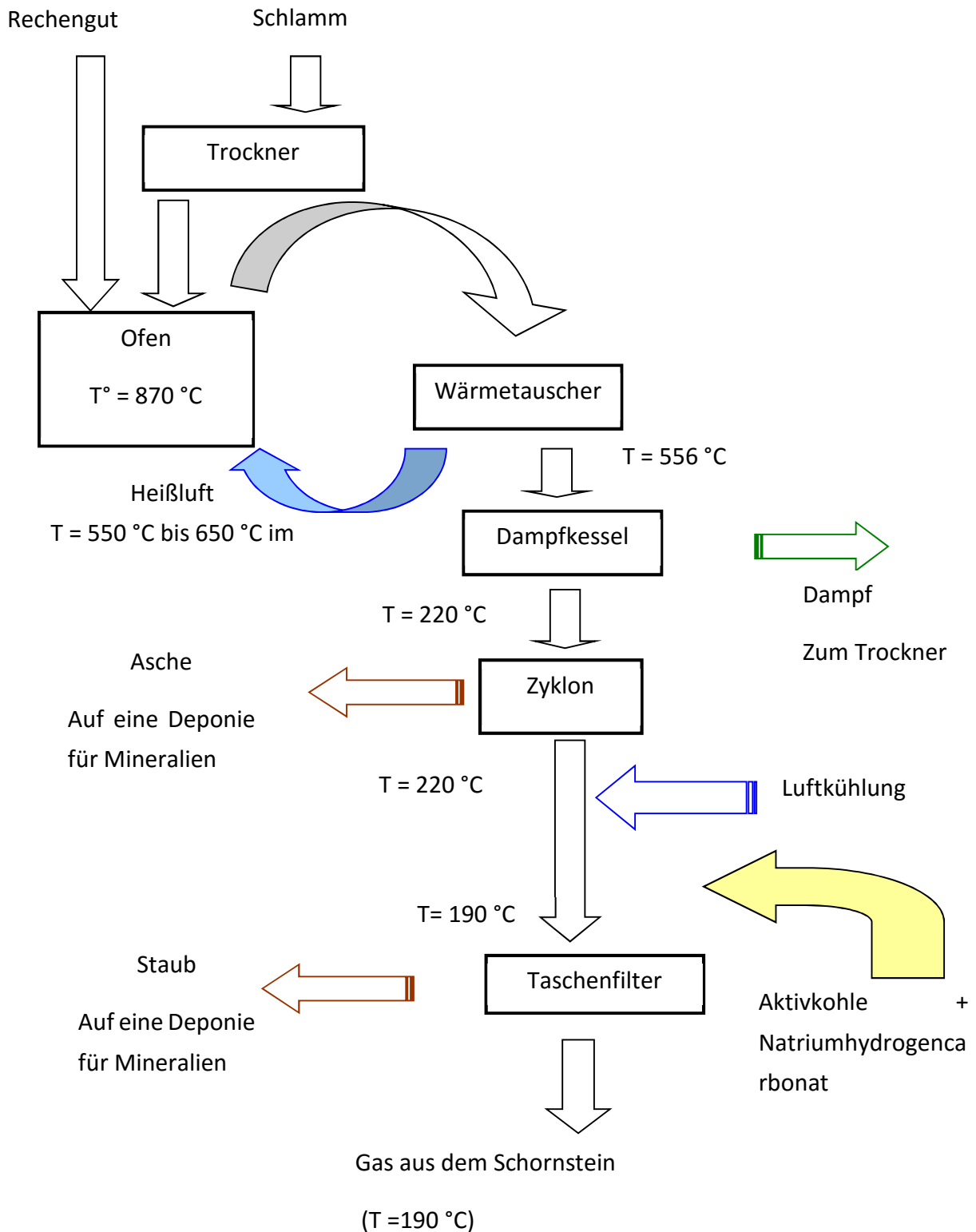


Abbildung 3: Prozess der thermischen Klärschlammbehandlung /10, S. 10/

Der Schlamm wird vorgetrocknet. Dies geschieht durch zwei parallel arbeitende Bandtrockner. Dadurch steigt der Trockensubstanzgehalt des Schlamms von 20 - 22 % auf 28 % an. Die dafür benötigte Energie wird im Dampfkessel erzeugt. Um dessen Betriebsweise zu verstehen, ist es notwendig, auf einen Teil des Verfahrens zur Wärmerückgewinnung vorzugreifen: dem geschlossenen Dampfkreislauf. Durch die Verbrennung steht gemäß des geplanten Nennbetriebs ein Abgasvolumenstrom von  $10283 \text{ m}^3_n/\text{h}$  mit einer Temperatur von  $556 \text{ }^\circ\text{C}$  zur Verfügung, der auf  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  abgekühlt werden kann. /10, S. 42/ Bei der Darstellung des verwendeten Apparates wird davon ausgegangen, dass das Abgas mit  $645 \text{ }^\circ\text{C}$  zur Verfügung steht. /10, S. 40/ Die Wärme wird genutzt, um das Prozesswasser zu verdampfen und mit dem Dampf den Schlamm vorzutrocknen. Es werden  $2800 \text{ kg/h}$  Nassdampf mit einer Temperatur von  $184 \text{ }^\circ\text{C}$  bei einem Druck von 10 bar produziert. Das dafür zur Verfügung stehende Prozesswasser hat nach dem Entgasen eine Temperatur von  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Um eine Korrosion zu verhindern, muss die Temperatur jedoch im gesamten Dampfkessel über  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  liegen. Daher muss das Prozesswasser noch auf  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  erwärmt werden. Dies geschieht durch die Ausnutzung der Kondensationswärme des Dampfes nach dem Trockner. Im Dampfkessel steht eine Überträgerfläche von  $421 \text{ m}^2$  zur Verfügung. /10, S. 41/ Der wieder kondensierte Dampf sowie das Sumpfprodukt des Dampfkessels werden diesem erneut zugeführt, um einen geschlossenen Kreislauf zu erhalten.

Verfolgt man den Prozess der Schlammbehandlung weiter, gelangt man zur eigentlichen thermischen Behandlung. Diese erfolgt in einem Wirbelschichtofen. Der Wirbelschichtofen der Firma Veolia ist in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Die Luft durchströmt diesen von unten nach oben. Der Apparat kann in drei verschiedene Bereiche eingeteilt werden: Windbox, Wirbelschicht und Freeboard.

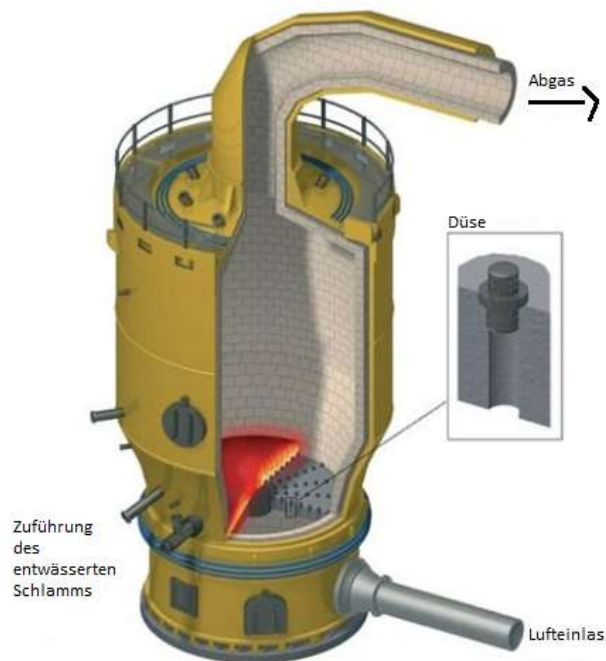


Abbildung 4: Aufbau des Wirbelschichtofens nach /18/

Als erstes gelangt die Luft in eine Windbox. Diese dient der gleichmäßigen Verteilung der Luft über die gesamte Fläche des Düsenbodens. Die bereitgestellte Luft hat eine Temperatur von 550 - 560 °C. Die Einstellung erfolgt in Abhängigkeit von den Anforderungen des zugeführten Materials. Die Temperatur wird durch einen Luft/Abgas-Rohrbündelwärmetauscher erhalten. Mit dem Wärmetauscher wird unter Nennbedingungen ein Luftvolumenstrom von 6148 m<sup>3</sup><sub>n</sub>/h zugeführt, wobei die Luft von ca. 40 °C auf die benötigte Temperatur erhitzt wird. Der Wärmetauscher hat eine Wärmeüberträgerfläche von 139 m<sup>2</sup>. Die Anlagendaten des ausgewählten Wärmetauschers gehen von einer Abkühlung des Abgases von 910 °C auf 645 °C aus. /10, S. 39–40/ In der Projektauslegung wird das Abgas von 870 °C auf 556 °C abgekühlt. /10, S. 42/ In Abhängigkeit vom gewählten Gasstrom und der Temperatur kann eine Leistung von ca. 1,45 MW übertragen werden. /10, S. 39/ Damit der Prozess gestartet werden kann, befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite des Einlasses ein Startbrenner. Dessen Aufgabe ist es, die Luft vorzuerhitzen, wenn dies durch den Wärmetauscher nicht möglich ist, z.B. nach langen Stillstandszeiten aufgrund von Reparaturen oder beim ersten Start der Anlage.

Die erwärmte Luft aus der Windbox wird als nächstes durch den Düsen besetzten, gewölbten Boden gepresst und gelangt in die Wirbelschicht. Die Düsen sind auf der gesamten Fläche des Bodens in regelmäßigem Abstand angeordnet. Einerseits sorgen sie mit den kleinen Löchern im oberen Teil für eine gute Verteilung der Luft im gesamten Bett, andererseits wird verhindert, dass der Sand des Bettes in die Windbox gelangt. /10/





Abbildung 5: Links: einzelne Düse, Mitte: Düsenboden von der Windbox aus /10, S. 29/, rechts: Düsenboden von oben /11/

Die Wirbelschicht ist im Ruhezustand, bei ausgeschalteter Luft, einen Meter hoch. Der verwendete Sand ist annähernd reines Siliziumoxid. Die Korngrößenverteilung liegt zwischen 0,8 - 2,6 mm Korndurchmesser. 50 Ma-% davon liegen in einem Bereich von 1,3-1,6 mm. Durch das Einschalten der Luft steigt die Höhe des Bettes auf 1,5m. Aufgrund von Erosionsprozessen geht ein Massenstrom von ca. 1 kg/h verloren und muss ergänzt werden. In einem Jahr sind dies immerhin 8,56 t. /10, S. 33–34/ Das Sandbett wird als Wirbelschicht bezeichnet, da es durch die Luft aufgewirbelt wird und dadurch die Eigenschaften einer siedenden Flüssigkeit annimmt. Die Oberfläche gleicht einer horizontalen Ebene.

Der Klärschlamm und das Rechengut werden geringfügig oberhalb des Wirbelbettes aufgegeben. In der Wirbelschicht sind optimale Bedingungen für den Kontakt zwischen der Luft und dem Schlamm bzw. Rechengut gegeben. Des Weiteren wird eine gleichmäßige Verteilung über die gesamte Oberfläche der Schicht erreicht. Die Wirbelschicht hat eine Temperatur von bis zu 750 °C. Die große Masse des Sandes dient gleichzeitig auch als Wärmespeicher, der Schwankungen aufgrund von unterschiedlicher Zusammensetzung des zugeführten Gutes ausgleicht. Auf diese Weise ist die Realisierung eines autothermen Prozesses möglich. Als autotherm wird ein Prozess bezeichnet, bei dem eine exotherme und eine endotherme Reaktion gleichzeitig ablaufen, und es dadurch nicht nötig ist zusätzlich Wärme von extern zuzuführen. Sollte dennoch der Fall eintreten, dass eine autotherme Prozessführung aufgrund von nicht ausreichend guten thermischen Eigenschaften des Feeds möglich ist, besteht die Möglichkeit, zusätzliche Energie durch das Einspritzen von Kraftstoff bereitzustellen./10, S. 29/

Der in der Wirbelschicht begonnene Prozess der thermischen Behandlung wird oberhalb der Wirbelschicht fortgeführt. Dieser Teil des Apparates wird auch als Freeboard oder einfach nur als Körper bezeichnet. In diesem Bereich steigt die Temperatur auf über 850 °C. Damit der Behälter diesen Temperaturen standhält, ist er mit einer feuerfesten Innenauskleidung versehen. Bei diesen Temperaturen wird dann auch nahezu das gesamte organische Material



umgesetzt. Das Wasser ist bereits auf der Oberfläche des Wirbelbettes verdunstet. Die Menge an organischen Bestandteilen wird auf unter 3 % reduziert. /10, S. 30/

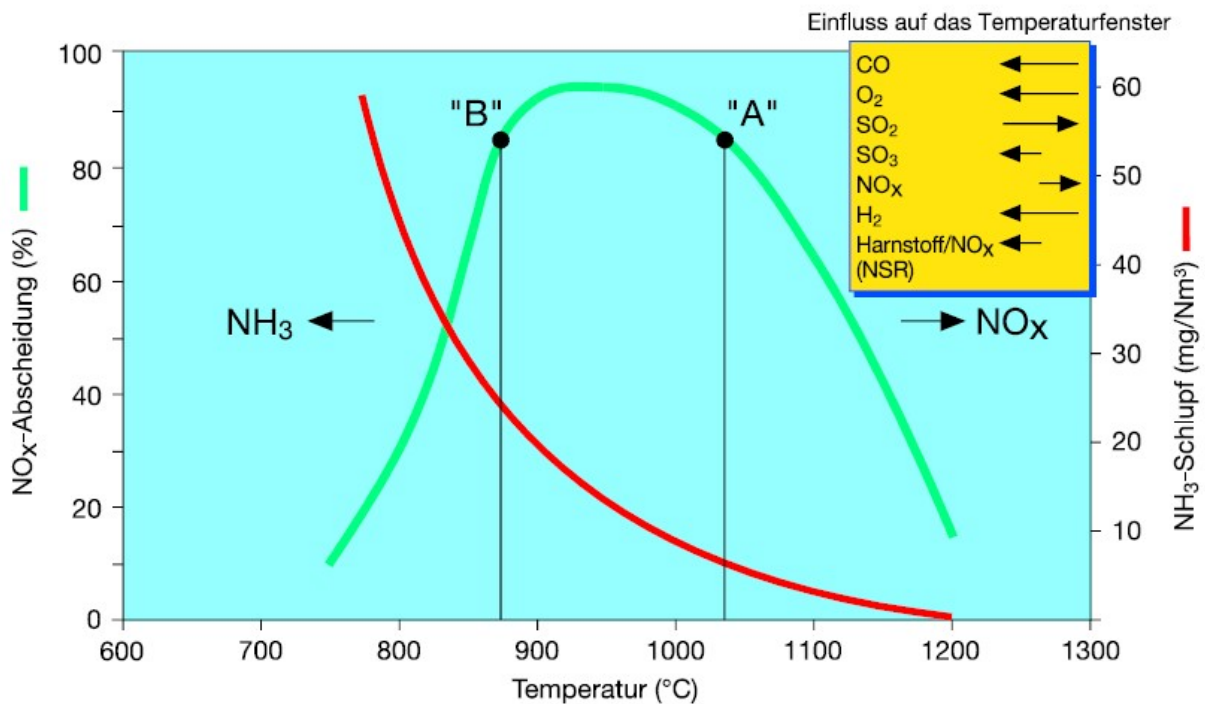
Im oberen Teil des Reaktors besteht zudem die Möglichkeit, Ammoniakwasser einzusprühen, um die NO<sub>x</sub>-Emissionen zu steuern. Die Entfernung erfolgt selektiv und nicht katalytisch. Diese wird im Zuge der Abgasreinigung ausführlich beschrieben.

Das Abgas verlässt den Reaktor über den oberen Teil, Kopf genannt. Von diesem gelangt es in den schon beschriebenen Wärmetauscher für die Erhitzung der Fluidisierungsluft. Damit die Überhitzung des Wärmetauschers verhindert wird, befindet sich im Kopf des Reaktors eine Sprinkleranlage, die sich automatisch einschaltet, wenn eine festgelegte Temperatur überschritten wird. Nach dem Wärmetauscher schließt sich der ebenfalls bereits dargestellte Dampfkessel mit dem geschlossenen Dampfkreislauf an, bevor das Abgas in die Abgasreinigung gelangt. /10/

## 2.4 Abgasreinigung

Die Abgasreinigung erfolgt nach dem Wirbelschichtofen in drei Schritten. Bereits im Wirbelschichtofen erfolgt die Abgasbehandlung mittels SNCR-Verfahren. Das SNCR steht hierbei für selektive nichtkatalytische Reduktion. Dieses Verfahren ist jedoch nur eine Sekundärmaßnahme. Zu den Primärmaßnahmen zählt die Steuerung des Luftüberschusses und der Temperatur im Wirbelschichtofen. Ziel der Steuerung ist die Einhaltung der Stickoxid-(NO<sub>x</sub>)-Grenzwerte. Dafür wird im oberen Teil des Wirbelschichtofens 25 %iges Ammoniakwasser eingedüst. Als Reduktionsmittel können alternativ auch gasförmiges Ammoniak oder Harnstoff verwendet werden. Neben dem einzelnen Einsatz besteht auch die Möglichkeit, verschiedene Reduktionsmittel zu kombinieren. Hierdurch kann das wirksame Temperaturfenster erweitert und somit eine Steigerung der NO<sub>x</sub>-Reduktion erreicht werden. Dass eine Kombination der verschiedenen Reduktionsmittel bei richtigem Einsatz einen Vorteil bietet, liegt an den unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Reduktionsmittel. Insbesondere wird hierbei der Wasseranteil berücksichtigt. Durch einen höheren Wasseranteil dauert es länger, bis eine Reaktion erfolgt. Hierdurch ist es mit einer Eindüsung möglich, eine größere Eindringtiefe zu erreichen. Des Weiteren ist es möglich, das Reduktionsmittel bei höheren Temperaturen einzudüsen, wenn bis zum Verdampfen des Wassers das optimale Reaktionsfenster erreicht wird. Das optimale Temperaturfenster für die Reduktion liegt zwischen 900 und 1050 °C. /19, S. 603/ In einer anderen Quelle gibt derselbe Autor ein Temperaturfenster von 900 - 1100 °C /20, S. 1/ an. Generell ist das SNCR-Verfahren in einem Bereich von 850 - 1050 °C anwendbar. /21, S. 358/ Wird das optimale Temperaturfenster verlassen, nimmt die NO<sub>x</sub>-Reduktion ab. Der Ammoniak-Schlupf sinkt bei steigenden

Temperaturen. Daher wird der obere Temperaturbereich dieses Fensters angestrebt. Der Einfluss der Temperatur auf die NO<sub>x</sub>-Konzentration wird in Abbildung 6 veranschaulicht.

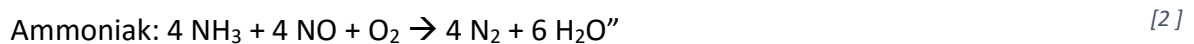
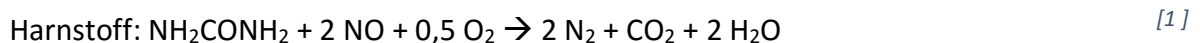


"A"- Optimale Temperatur für SNCR alleine (niedriger Ammoniak Schlupf)

"B"- Optimale Temperatur für SNCR + SCR (hoher Ammoniak Schlupf)

Abbildung 6: NO<sub>x</sub>-Reduktion in Abhängigkeit von der Temperatur /20/

Das eingedüστε Reduktionsmittel reagiert auch mit den gasförmigen Bestandteilen des Abgases, z.B. mit HCl oder SO<sub>2</sub>. /22/ Im Temperaturfenster erfolgt jedoch primär in Abhängigkeit des gewählten Reduktionsmittels folgende Reaktion: /19, S. 603/



Durch das SNCR-Verfahren werden mittels eines Reduktionsmittels die NO<sub>x</sub> zu ungefährlichem elementarem Stickstoff oxidiert. Bei der Auswahl des Reduktionsmittels darf jedoch nicht das deutlich erhöhte Gefahrenpotential vergessen werden, das von Ammoniak im Vergleich zu Harnstoff ausgeht. Demzufolge unterscheiden sich die Sicherheitsanforderungen.

Mit dem SNCR-Verfahren können Emissionskonzentrationen von 120 -180 mg/m<sup>3</sup> erreicht werden. /21, S. 519/ In einer holländischen Klärschlammverbrennungsanlage konnte die Konzentration nach einem bei 850 - 950 °C betriebenen Wirbelschichtofen auf unter 70 mg/m<sup>3</sup> gesenkt werden. /21, S. 162/ Dies liegt deutlich unter den Grenzwerten. 400 mg/m<sup>3</sup> am Tag sind bei Anlagen mit einer Nennkapazität von 6 t/h zulässig. /23, S. 68/, 200 mg/m<sup>3</sup>

am Tag nach der 17. BImSchV (< 50 MW) und EU 2010/75 (>6t/h oder neu). /24, S. 10; 23, S. 68/ Für Anlagen größer als 50 MW lässt die 17. BImSchV lediglich 150 mg/m<sup>3</sup> am Tag zu. /24, S. 68/ Des Weiteren ist in der 17. BImSchV ein Grenzwert für Ammoniak (10 mg/m<sup>3</sup>) festgelegt, der speziell für diese Art der Abgasreinigung gilt. /24, S. 10/ Ein solcher Grenzwert ist in der EU Richtlinie nicht zu finden. Diesen Wert (der in Polen nicht gilt), überschreitet die Anlage nahezu kontinuierlich, wodurch jedoch die Einhaltung des NOx-Grenzwertes wahrscheinlicher ist.

Im normalen Betrieb werden diese Grenzwerte deutlich unterschritten. Durch die Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt treten Überschreitungen auf, wenn der O<sub>2</sub>-Gehalt im Abgas größer als 15 % ist. Ab 20 % Sauerstoff ergeben sich durch die Struktur der Formel bedingt negative Werte. Die Formel wird in 10.2.1 erläutert.

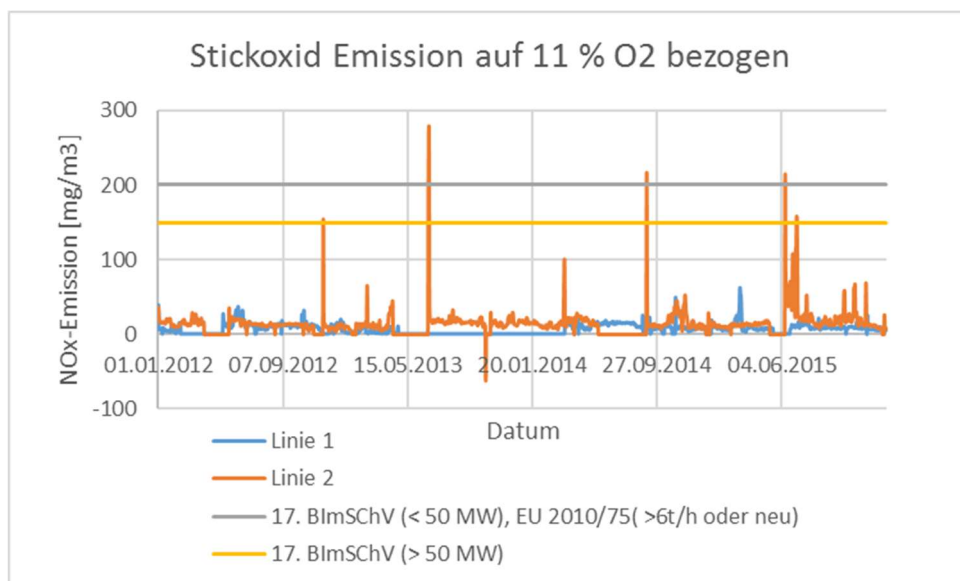


Abbildung 7: Stickoxid Emission

Das erste Abgasreinigungsverfahren nach dem Wirbelschichtofen sind zwei in Reihe geschaltete Zyklone. Diese sind, wie der Abbildung 3 zu entnehmen ist, erst nach der zweistufigen Wärmerückgewinnung angeordnet. Trotzdem beträgt die Temperatur am Einlass noch 220 °C. Ausgelegt sind die Zyklone für maximal 260 °C. Der garantierte Wirkungsgrad beträgt 94 %. /10, S. 44/ Im Zyklon werden zum größten Teil die mineralische Fraktion sowie ein Großteil der Schwermetalle abgeschieden. Eine besonders hervorzuhebende Ausnahme ist hierbei das Quecksilber. Dieses wird nicht abgeschieden, da es unter den Bedingungen nicht als Feststoff vorliegt. /19/ Die Abscheidung erfolgt aufgrund der Fliehkraft, durch welche die schweren Partikel an die Wand des Zyklons geschleudert werden, und der Schwerkraft, weshalb die Partikel von der Wand herunterfallen. Anschließend werden diese über eine Zentralschleuse ausgetragen. Der Austrag wird als Asche bezeichnet. Die Lagerung der Asche erfolgt in einem Silo, das beheizt werden kann, um eine Kondensation zu verhindern. Durch

Kondensation könnte es zum Verklumpen der Asche kommen. Dies würde zu Problemen beim Entleeren des Silos führen, z.B. durch Kernfluss. Die Asche wird beim Austrag aus dem Silo automatisch auf eine Feuchte von 64 % eingestellt. Es wird von einem Bedarf von ca.  $0,48 \text{ m}^3_{\text{Prozesswasser}}/\text{m}^3_{\text{Asche}}$  ausgegangen. Die tatsächliche Menge sollte nach dem Betriebsstart bestimmt werden. Durch das Befeuchten wird zum einen die Staubentwicklung reduziert, zum anderen bietet die so behandelte Asche bessere Einbaubedingungen auf der Deponie. /10, S. 45/

Der zweite Schritt der Abgasreinigung ist die Entfernung saurer Verbindungen. In erster Linie HCl, HF und SO<sub>2</sub>. Die Entfernung dieser Stoffe erfolgt durch das Einbringen von Natriumhydrogencarbonat. Um eine möglichst große Oberfläche zu erhalten, wird das Natriumhydrogencarbonat als erstes gemahlen und anschließend entgegen der Strömungsrichtung in den Abgasstrom eingespritzt. Die Temperatur des Abgasstromes sollte zu diesem Zeitpunkt nur noch 190 °C betragen. Dies wird durch das Mischen des Abgases mit Zuluft erreicht. Als erstes wird das Natriumhydrogencarbonat thermisch aufgespalten. Dieser Vorgang wird auch als Aktivierung bezeichnet. /10, S. 46/



Das dadurch entstandene Natriumcarbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) reagiert im Anschluss mit den sauren Bestandteilen des Abgases. /25, S. 622/



Diese Reaktionen mit den Schwefeloxiden sind auch noch einmal in der Abbildung 8 veranschaulicht. Hierbei sind die Nebenprodukte CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O nicht dargestellt. Es wird von einem Verbrauch von 53,22 kg<sub>NaHCO<sub>3</sub></sub>/h unter Nennbedingungen ausgegangen. Die tatsächlich benötigte Menge ist jedoch neben Abgasvolumenstrom auch von der Zusammensetzung des Abgases abhängig.

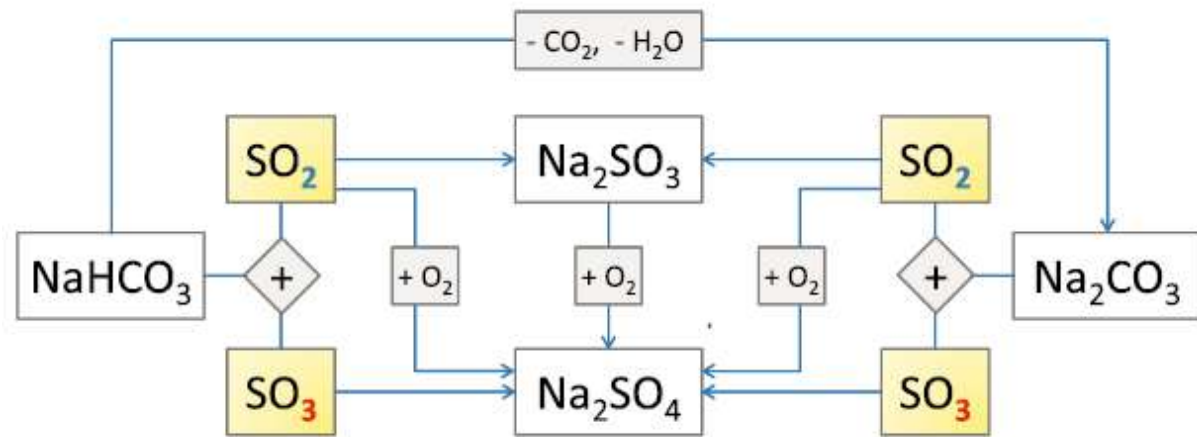


Abbildung 8: Reaktionspfade der Schwefeloxide mit Natriumhydrogencarbonat (ohne die Berücksichtigung der Nebenprodukte  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$ ) /25, S. 623/

Zeitgleich mit der Neutralisation der sauren Verbindungen erfolgt die Entfernung von Quecksilber mittels Aktivkohle. Hierfür wird pulverige Aktivkohle auf dem Weg zur Einspritzung mit dem Natriumhydrogencarbonat vermischt und anschließend gemeinsam eingedüst. Es wird von einem Verbrauch von  $175 \text{ mg}_{\text{Aktivkohle}}/\text{m}^3_{\text{Abgas}}$  ausgegangen. Dies entspräche beim Nennbetrieb einem Massenstrom von  $2,03 \text{ kg}_{\text{Aktivkohle}}/\text{h}$ . /10, S. 62/

Die letzte Reinigungsstufe ist ein Taschenfilter. Dessen Aufgabe ist es, die Einhaltung der geforderten Grenzwerte sicherzustellen. In dieser Stufe werden die Partikel abgetrennt, die durch die Zyklone nicht abgetrennt werden konnten. Des Weiteren werden die Reaktionsprodukte der vorangegangenen chemischen Reinigungsstufe abgetrennt. Der Filter hat 160 Teflon-Taschen mit einer gesamten Filterfläche von  $301 \text{ m}^2$ . Er weist einen Reinigungsgrad von 99,9 % auf. /10, S. 51/ Die Taschen werden von außen nach innen durchströmt. Während des Betriebs lagern sich auf der Außenseite der Filter beständig Asche und Reaktionsprodukte ab. Es entsteht ein Filterkuchen. Dieser muss von Zeit zu Zeit entfernt werden, um einen zu großen Anstieg des Druckverlustes zu verhindern. Neben dem Druckverlust steigt aber auch der Abscheidegrad bei einer Zunahme des Filterkuchens. Um den Filterkuchen abzuschütteln, wird der Filter mit Druckluftstößen zurückgespült. Ein Kondensieren aus der Rückspülluft wird verhindert, indem diese vorgeheizt wird. Der abgefallene Filterkuchen wird im unteren Bereich des Filters gesammelt und anschließend ausgetragen. Der Austrag wird als Staub bezeichnet. Wie auch bei der ausgetragenen Asche erfolgt die Lagerung in einem beheizbaren Silo, bis der Staub für den Abtransport angefeuchtet wird. Für den Staub wird ein Feuchtigkeitsgehalt von 41 % angestrebt. Es wird mit einem Prozesswasserbedarf von  $0,25 \text{ m}^3_{\text{Prozesswasser}}/\text{m}^3_{\text{Staub}}$  geplant.

Das fertig gereinigte Abgas wird für jede Linie über einen 25 m hohen Schornstein emittiert. Im Schornstein erfolgt noch eine Messung der wichtigsten Abgasparameter. Zu diesen zählen

die Stoffparameter Gesamtstaub, NO<sub>x</sub>, HCl, CO, TOC, HF, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> und CO<sub>2</sub> sowie die Geschwindigkeit, Temperatur, der statische Druck und die Feuchtigkeit des Abgases. /10, S. 35–59/

## 3 Durchführung der eigenen Messungen

Es wurden insgesamt zwei verwertbare Messungen durchgeführt, die erste am 22.4.2016 in der Zeit von 9 - 13 Uhr und die zweite am 16.06 ungefähr zu derselben Zeit. Bei der ersten Messung waren beide Linien in Betrieb, bei der zweiten nur eine. Die zweite musste gewartet werden. An acht Punkten im Gebäude sowie an den vier Ecken des Gebäudes und an einem weiteren Punkt draußen in direkter Nähe des Gebäudes sollten Messungen mit dem Babuc A, Multi-data logger und den daran angeschlossenen Messgeräten sowie eine Staubmessung durchgeführt werden. Zusätzlich wurden noch die Luftgeschwindigkeit und für die Messpunkte Außen auch die Windrichtung bestimmt.

### 3.1 Messpunkte

Die Messung erfolgt in dem Gebäude, in dem die thermische Abfallbehandlung mittels Wirbelschichtöfen stattfindet. Um eine gute Vorstellung von der Temperatur-, Feuchtigkeits- und Feinstaubverteilung zu erhalten, war geplant, an acht Messpunkten im Gebäude sowie an einem direkt außerhalb zu messen, sowie außen an jeder Ecke des Gebäudes. Die Messungen innen erfolgen auf sechs der insgesamt elf Ebenen. Die Messung erfolgt aufgrund des verwendeten Messgeräts in einer Höhe von ca. 1,5 m über der jeweiligen Ebene. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Höhen sind die Höhen der Ebenen, nicht die tatsächlichen Messhöhen. Die Lage der Messpunkte ist auch in dem im Anhang befindlichen Schnitt des Gebäudes samt Anlagen dargestellt. Die mit den römischen Ziffern I- IV versehen Messpunkte wurden außerhalb des Gebäudes an den jeweiligen Ecken gemessen. Der Messpunkt V ist auf einer Ebene vor dem Gebäude ermittelt worden. Für die Messpunkte im Inneren des Gebäudes gilt, dass sich die Messpunkte mit ungeraden Nummern immer auf der Gebäudeseite mit den Wirbelschichtöfen befinden. Die Messpunkte mit den geraden Nummern befinden sich auf der anderen Seite des Gebäudes, zwischen den Schornsteinen. Eine kurze Charakterisierung ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 2: Charakterisierung der Messpunkte

Messpunkt	Höhe [m]/ Himmelsrichtung	Eigenschaften
I	SO	
II	SW	
III	NW	
IV	NO	
V	5,9/ N	Außerhalb des Gebäudes, zwischen den Silos für die Aktivkohle und dem Natriumhydrogencarbonat, sowie in der Nähe der Entladevorrichtung des Asche- und Staubsilos
1	0	Ebenerdig zwischen den beiden Wirbelschichtöfen
2	0	Ebenerdig zwischen den beiden Schornsteinen, sowie in direkter Nähe zu der Wärmepumpe
3	5,3	Zwischen den Wirbelschichtöfen
4	5,9	Auf der ersten Ebene zwischen den Wirbelschichtöfen
5	9,3	Zwischen den Wirbelschichtöfen, dritte Ebene
6	9,3	In der Nähe der beiden Schornsteine. Auf der Höhe der Oberseite der Taschenfilter. Erneut erfolgt die Messung mittig in der Halle, zwischen den beiden Linien
7	11,6	Höchster Punkt, knapp unterhalb des Kopfes der beiden Wirbelschichtöfen
8	11,6	Höchster Punkt auf der Seite mit den Schornsteinen, ebenfalls mittig

Aufgrund der langen Einstellzeit des globe-Thermometers war es nicht möglich, an allen Punkten zu messen. An den Punkten 5,8 und V erfolgte lediglich die Staubmessung.

### 3.2 Verwendete Messgeräte

An dieser Stelle werde ich nur auf das Messgerät zur Feinstaubmessung sowie auf die am Babuc A, Multi-data logger angeschlossenen Messgeräte eingehen.



### 3.2.1 Feinstaubmessung

Die Messungen wurden mit dem iclean®-PCM-Partikelzähler an den oben genannten Messpunkten durchgeführt. Die Messdauer betrug jeweils zehn Minuten am ersten Termin und fünf am zweiten. Eine Reduzierung der Messzeit war erforderlich, um alle Messpunkte beproben zu können. In dieser Zeit wurde jedes neu angezeigte Messergebnis für die spätere Auswertung aufgeschrieben und für die Mittelwertbildung berücksichtigt. Das Messergebnis wird alle sechs Sekunden aktualisiert, sodass am Ende für die Auswertung 100 bzw. 50 Messergebnisse zur Verfügung stehen. Das Probenvolumen beträgt 1 cfm = cubic feet per minute = Kubikfuß pro Minute. Die Anzeige erfolgt digital in der Einheit Partikelkonzentration pro Liter Luft, maximal sind 7 Stellen möglich. Die angezeigte Einheit wird durch eine Umrechnung erhalten. Der Messbereich des Messgerätes reicht von einem Partikeldurchmesser von 0,3 µm bis zu 25 µm. An der Messgrenze wird jeweils noch eine Zähleffizienz von 50 % garantiert. Bei einer Überschreitung von 70.000 Partikeln pro Litern nimmt die Messgenauigkeit ab, das Ergebnis wird geringer als die tatsächliche Konzentration dargestellt. /26/

Das Probenvolumen wird mit einer im Gerät befindlichen Mikropumpe durch eine Isokinetische Ansaugdüse angesaugt. Auf diese Weise werden Turbulenzen verhindert. In einer Messkammer wird die angesaugte Luft mit einem IR-Laserdiode bestrahlt. Beim Auftreffen des Laserstrahls auf ein Partikel wird dieser durch Beugung, Brechung und Reflexion aufgestreut. Diese Streulichtimpulse werden mit einer Photodiode erfasst, anschließend in elektrische Signale umgewandelt und digital dargestellt. Die untere Messgrenze begründet sich durch die Zählschwelle. Um Fehler durch elektrisches Rauschen zu vermeiden werden nicht alle Impulse, die bei der Photodiode ankommen, weiterverarbeitet, sondern nur diejenigen, die die Zählschwelle überschreiten. Bei immer kleiner werdenden Partikeldurchmessern nimmt der auftreffende Streulichtimpuls immer weiter ab, bis dieser unter die Zählschwelle fällt und deshalb nicht mehr weiterverarbeitet wird. Eine weitere Kenngröße von Partikelzählern ist das Auflösungsvermögen. Dieses findet nur Berücksichtigung, wenn die Partikel gemäß der Größe in Fraktionen eingeteilt werden, denn dieser gibt an, wie klein die einzelnen Fraktionen maximal sein dürfen, um diese noch unterscheiden zu können. /27, S. 192/

### 3.2.2 Babuc A, Multi-data logger und angeschlossene Messgeräte

Das BABUC/A ist ein Datenaufnehmer der Firma LSI LASTEM s.r.l. mit bis zu elf verschiedenen Eingängen und der Möglichkeit - je nach verbautem Speicher (64 Kb/128 Kb/256 Kb) - 20.000/50.000/110.000 Messwerte zu speichern. /28, S. 8/ Die Daten der angeschlossenen Messgeräte können zeitgleich gespeichert und dargestellt werden. Insgesamt gibt es mehr als

70 verschiedene Sonden /29, S. 8/, die mit dem Datenaufnehmer verbunden werden können. In unserem Versuchsansatz war auf dem Dreifuß (BVA 304) die Halterung (BVA 306) angebracht. /29, S. 8/ Neben dem BABUC/A waren auf diesem nur drei Messgeräte montiert. Die jedoch zum Teil mehrere Messwerte liefern oder in Kombination für die Berechnung weiterer Kenngrößen dienen. Die Anzeige im Display erfolgt mit einer Nummer, die den verwendeten Eingang und somit die zugehörige Messsonde charakterisiert, sowie mit einer Abkürzung für die Messgröße. Des Weiteren wird die Einheit mit angezeigt.

Das verwendete Psychrometer trägt den Sensorcode BSU 102. /28, S. 72/ Das Psychrometer hat zwei Temperatursensoren: einen feuchten und einen trockenen. Beide sind separat eingehaust, um diese vor Wärmestrahlung zu schützen. Die trockene Temperatur wird mit TDRYB abgekürzt, was für "temperature dry bulb" steht. Die feuchte Temperatur wird mit TWETB abgekürzt. Dies bedeutet "temperature wet bulb". Die Beschreibung als "bulb" bezieht sich auf das Vorratsgefäß bei Thermometern und dessen Zustand bei der Messung. Beide Thermometer werden mit einer Geschwindigkeit von ca. 4m/s zwangsbelüftet. Mit dem trockenen Temperatursensor wird die Lufttemperatur gemessen. Der zweite Temperatursensor ist mit einem saugfähigem Material überzogen, das mit destilliertem Wasser befeuchtet wird. Daher wird diese als Feuchttemperatur bezeichnet. Üblicherweise wird Baumwolle für den Überzug verwendet. Während der Messung muss dafür gesorgt werden, dass der Überzug und somit das Thermometer ständig feucht sind. Wenn die Luft am feuchten Temperatursensor vorbeigeführt wird, verdunstet das Wasser. Aufgrund des Energiebedarfs der Verdunstung sinkt die gemessene Temperatur. Demnach ist die Temperaturabnahme ein Maß dafür, wieviel Wasser verdunsten kann. Die Menge des verdunstenden Wassers ist abhängig von der relativen Feuchtigkeit der zugeführten Luft. Diese bestimmt, wieviel Wasser die Luft noch aufnehmen kann, bevor sich eine vollständige Sättigung einstellt. Sobald eine vollständige Sättigung erreicht ist, wird kein Wasser mehr aufgenommen. Der Sättigungszustand ist temperatur- und druckabhängig. Mit steigender Temperatur kann absolut mehr Feuchtigkeit aufgenommen werden. Bei der gleichen Menge Wasser in der Luft ist die relative Luftfeuchtigkeit demnach bei hohen Temperaturen geringer als bei einer niedrigeren. Es gilt: je größer die Differenz zwischen der Trocken- und der Feuchttemperatur, desto geringer ist die relative Luftfeuchtigkeit. Wenn die trockene Temperatur und die Temperaturdifferenz zur Feuchttemperatur bekannt ist, kann die relative Feuchtigkeit aus der Psychrometertafel abgelesen werden. Diese gibt es als Tabelle oder als Grafik. Alternativ kann sie auch berechnet werden. /29, S. 8/

Für die Berechnung muss zuerst der Sättigungsdampfdruck berechnet werden. Dafür stehen verschiedene empirische Formeln zur Verfügung. Eine Übersicht hat die University of Colorado Boulder veröffentlicht: <http://cires1.colorado.edu/~voemel/vp.html> /30/ Es wird

unterschieden, ob sich die Formel auf eine Sättigung über Wasser oder Eis bezieht. Im Folgenden werden immer die Formeln für Wasser verwendet. Diese unterscheiden sich von den auf Eis bezogenen anhand der Koeffizienten. Der Bezug auf Wasser wird durch den Index w hervorgehoben.

Im folgenden Abschnitt werden folgende Formelzeichen verwendet. Dabei ist besonders darauf zu achten, auf welche Temperatur sich der jeweilige Wert bezieht.

Tabelle 3: verwendete Abkürzungen - Psychrometer nach /31, S. 119/

Abkürzung	Einheit	Name
$e_w$	hPa	Sättigungsdampfdruck in einer reinen Phase; nur t oder $t_w$ abhängig
$e'_w$	hPa	Sättigungsdampfdruck in einer reinen Phase, Temperatur und Druck abhängig
$e'$	hPa	Tatsächlicher Dampfdruck; t, $t_w$ und p abhängig
f(p)		Korrekturgleichung Druck, Temperatur vernachlässigt
P	hPa	Luftdruck
T	°C	Lufttemperatur (dry bulb Temperatur)
$t_d$	°C	Taupunkt
$t_w$	°C	Feuchttemperatur (wet bulb Temperatur)
U	%	Relative Feuchtigkeit

Im Folgenden wird die Formel aus dem „Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation“ zur Berechnung des Sättigungsdampfdrucks verwendet. Diese Formel unterscheidet sich lediglich durch die Koeffizienten von der Buck- und der Magnus-Tetens Formel. /30/

Der Sättigungsdampfdruck in einer reinen Phase ist lediglich von der Trockentemperatur abhängig. Die Temperatur wird in °C eingesetzt. /31, S. 119/

$$e_w(t) = 6,112 * e^{\left(\frac{17,62*t}{243,12+t}\right)} \quad [9]$$

Bei feuchter Luft wird eine Anpassung an den Druck und die Temperatur vorgenommen. Da der Temperatureinfluss deutlich geringer ist als der Druckeinfluss, wird nur der letztere berücksichtigt. /31, S. 119/

$$f(p) = 1,0016 + 3,15 * 10^{-6} * p - 0,074 * p^{-1} \quad [10]$$

Daraus ergibt sich dann eine Druck- und Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdrucks:  
/31, S. 119/

$$e'_w(p, t) = e_w(t) * f(p) \quad [11]$$

Für Psychrometer nach Assman ist nachfolgende Formel angegeben, um den Dampfdruck der Luft zu bestimmen. Ganz wichtig ist, dass die Temperatur in °C eingesetzt wird. Des Weiteren ist zu beachten, dass sich das  $e'_w$  in diesem Fall auf die Feuchttemperatur bezieht. Die Einheit des Dampfdrucks richtet sich danach, in welcher Einheit der zuvor berechnete Sättigungsdampfdruck eingesetzt wird, meistens wird Hektopascal(hPa) verwendet. /31, S. 119/

$$e' = e'_w(p, t_w) - 6,53 * 10^{-4} * (1 + 0,000944 * t_w) * p * (t - t_w) \quad [12]$$

Die vorangehende Berechnung ermöglicht es, im nächsten Schritt die relative Luftfeuchtigkeit und den Taupunkt zu berechnen. Die relative Luftfeuchtigkeit wird berechnet aus dem Verhältnis des tatsächlichen Sättigungsdampfdrucks zum in diesem Zustand maximal möglichem Sättigungsdampfdruck. Die Angabe erfolgt in Prozent. Neben der Abhängigkeit von der Temperatur ist die relative Luftfeuchtigkeit auch vom Luftdruck abhängig. /31, S. 119/

$$U = \frac{e'}{e'_w(p, t)} * 100 \quad [13]$$

Der Taupunkt ist die Temperatur, von der aus die Luft nicht weiter abgekühlt werden kann, ohne dass ein Phasenwechsel von gasförmig zu flüssig erfolgt. An diesem Punkt beträgt die relative Feuchtigkeit 100 %. Das überschüssige Wasser wird bei einer weiteren Abkühlung als Tauwasser abgeschieden. Der Taupunkt berechnet sich auf Basis der Gleichung für den maximalen Sättigungsdampfdruck. /31, S. 119/

$$t_d = \frac{243,12 * \ln\left(\frac{e'}{6,112 * f(p)}\right)}{17,62 - \ln\left(\frac{e'}{6,112 * f(p)}\right)} \quad [14]$$

Das zweite Messgerät, Sensorcode BSU121, wird auch verwendet, um eine Feuchttemperatur zu messen. /28, S. 72/ Allerdings erfolgt in diesem Fall keine Zwangsbelüftung wie bei dem Psychrometer, sondern lediglich eine freie Belüftung durch die Umgebungsluft. /29, S. 9/ Die Temperaturmessung beruht auf denselben Grundlagen wie die des zuvor beschriebenen

Psychrometers. Die ermittelte Temperatur ist für die Berechnung der WBGT wichtig, die zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit dient. Die Berechnungsvorschriften dazu finden sich nach der Vorstellung des nächsten Messgeräts.

Das dritte verwendete Messgerät mit dem Sensor Code BST 131, ist das Globe-Thermometer. /28, S. 72/ Im Deutschen auch als Kugelthermometer bezeichnet. Es dient dazu, die Wärmestrahlung zu ermitteln. Es handelt sich hierbei um eine schwarze Kugel mit einem Temperatursensor in der Mitte. Es wird ein Durchmesser von 15 cm empfohlen. Allerdings ist auch jeder andere Durchmesser möglich, da dieser in der Berechnung berücksichtigt wird. Bei steigendem Durchmesser sinkt der Einfluss der Lufttemperatur und der Luftgeschwindigkeit./32, S. 20/ Die Kugel weist einen Emissionsgrad von 98 % auf, weshalb sie näherungsweise als schwarzer Strahler betrachtet werden kann. Die Globe-Temperatur wird auch verwendet, um die Wet Bulb Globe Temperatur (WBGT) zu berechnen.

Die WBGT wird aus der Feuchttemperatur bei natürlicher Belüftung und der Globetemperatur berechnet. Eine Schwierigkeit kann hierbei die relativ lange Einstellzeit des Globe-Thermometers sein. Diese kann 20-30 Minuten betragen. /32, S. 24/ Für die Berechnung des WBGT ist zu berücksichtigen, ob die Sonne auf die Kugel scheint.

Im folgenden Abschnitt werden folgende Formelzeichen verwendet.

Tabelle 4: verwendete Abkürzungen -Strahlungstemperatur und WBGT

Abkürzung	Einheit	Name
D	m	Kugeldurchmesser
$t_a$	°C	Lufttemperatur
$t_g$	°C	Kugeltemperatur
$t_r$	°C	Mittlere Strahlungstemperatur
WBGTE	°C	WBGT mit Sonneneinstrahlung
WBGTI	°C	WBGT ohne Sonneneinstrahlung
$\epsilon_g$		Emissionsgrad der geschwärzten Kugel
$v_a$	m/s	Luftgeschwindigkeit im Bereich der Kugel

Beim verwendeten Messgerät wird die WBGT ohne Sonneneinstrahlung als WBGTI ausgewiesen. Der Wert der bei WBGTE ausgegeben wird, bezieht die Außentemperatur (dry bulb-Temperatur) mit ein. Die nachfolgenden Formeln sind von den Formelzeichen her an diese Darstellung angepasst. Dies weicht insofern von der Norm ab, als in dieser für beide Formeln WBGT verwendet wird. /33, S. 6/

$$WBGTI = 0,7 * t_{nw} + 0,3 * t_g \quad [15]$$

$$WBGTE = 0,7 * t_{nw} + 0,2 * t_g + 0,1 * t_a \quad [16]$$

Neben der WBGT kann die mittlere Strahlungstemperatur aus der Globe-Temperatur berechnet werden. Die mittlere Strahlungstemperatur kann ebenfalls zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit herangezogen werden. /29, S. 10/ Die Beurteilung erfolgt über das vorausgesagte mittlere Votum (PMV) und den voraussichtlichen Prozentsatz unzufriedener Menschen (PPD), in deren Berechnung die mittlere Strahlungstemperatur mit eingeht. Bei der Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur wird unterschieden, ob es sich um freie oder erzwungene Konvektion handelt.

Bei einer freien Konvektion berechnet sich die Strahlungswärme nach der folgenden Gleichung. Diese geht davon aus, dass es keine Luftbewegung gibt. /32, S. 22/

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{0,25 * 10^8}{\varepsilon_g} * \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} * (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad [17]$$

Bei einer erzwungenen Konvektion ist der Hauptunterschied, dass die Luftgeschwindigkeit ( $v_a$ ) berücksichtigt wird. /32, S. 22/

$$\bar{t}_r = \left[ (t_g + 273)^4 + \frac{1,1 * 10^8 * v_a^{0,6}}{\varepsilon_g * D^{0,4}} * \left( \frac{|t_g - t_a|}{D} \right)^{\frac{1}{4}} * (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad [18]$$

Die Berechnung und Verwendung des PMV und PPD ist bei der Bestimmung der thermischen Behaglichkeit unter 9.2 aufgeführt.

## 4 Charakteristische Größen

### 4.1 Emissionen

Als Emission wird das Freisetzen von Stoffen bezeichnet. Die Angabe erfolgt meistens bezogen auf einen trockenen Volumenstrom unter Normbedingungen. Teilweise erfolgt ein Bezug auf einen Sauerstoffgehalt von 11 % im Abgas.

Bei den Quellen werden Punkt-, Flächen-, Linien- und Raumquellen unterschieden. Ein Beispiel für eine Punktquelle ist z.B. die Emission aus einem Schornstein. Die Emission, die z.B. von einem Klärbecken ausgeht, wird als Flächenquelle erfasst. Das bedeutendste Beispiel für Linienquellen sind Straßen- und Bahnverkehr. Die Raumquellen werden dadurch charakterisiert, dass diese keiner bestimmten Quelle zugeordnet werden können, meist aber die Emission mit einer begrenzten räumlichen Ausdehnung auftritt. /34, S. 4–9/

Bei der Vorgabe der Grenzwerte steht der Stand der Technik im Vordergrund. Der Stand der Technik wird in den jeweiligen BImSchV und Anlagen oder in Verwaltungsvorschriften wie der TA Luft näher erläutert. Des Weiteren gibt es für den praktischen Einsatz VDI-Richtlinien und -Handbücher und DIN-Normen. Die vom VDI herausgegebenen Werke besitzen jedoch keinen Gesetzescharakter, müssen also nicht eingehalten werden, sondern sind als Leitlinien und Hilfestellungen zu verstehen, die sich in der Praxis bewährt haben.

### 4.2 Transmission

Nach der Emission erfolgt die Transmission. Dies meint die Ausbreitung in der Atmosphäre. Während der Ausbreitung erfolgt zum einen eine Verdünnung, zum anderen können die emittierten Stoffe chemisch und oder physikalisch verändert werden. Die Ausbreitung ist in erster Linie von den gegebenen meteorologischen Bedingungen abhängig. Die Ausbreitung erfolgt größtenteils nur bis zur Tropopause. Dies ist die Grenze zwischen der Troposphäre und der darüber liegenden Stratosphäre. Die Grenzschicht wird durch die Umkehr des Temperaturgradienten gekennzeichnet. Bis zur Tropopause nimmt die Temperatur mit zunehmender Höhe ab. Danach stagniert sie, bevor sie danach vorübergehend ansteigt. Die Tropopause liegt auf einer Höhe zwischen 8 km an den Polen und 17 km am Äquator. Aufgrund von unterschiedlich hoher Sonneneinstrahlung ist die Temperatur unterschiedlich hoch und somit auch der Partialdruck. Um einen Druckausgleich zu erreichen, bilden sich Strömungen aus, die für einen Stofftransport sorgen. Die durch die Luftströmung ausgebildeten Zellen sind im nachfolgenden Schaubild dargestellt. Auf diese Weise kann ein Stofftransport zwischen Äquator und den Polen erfolgen.

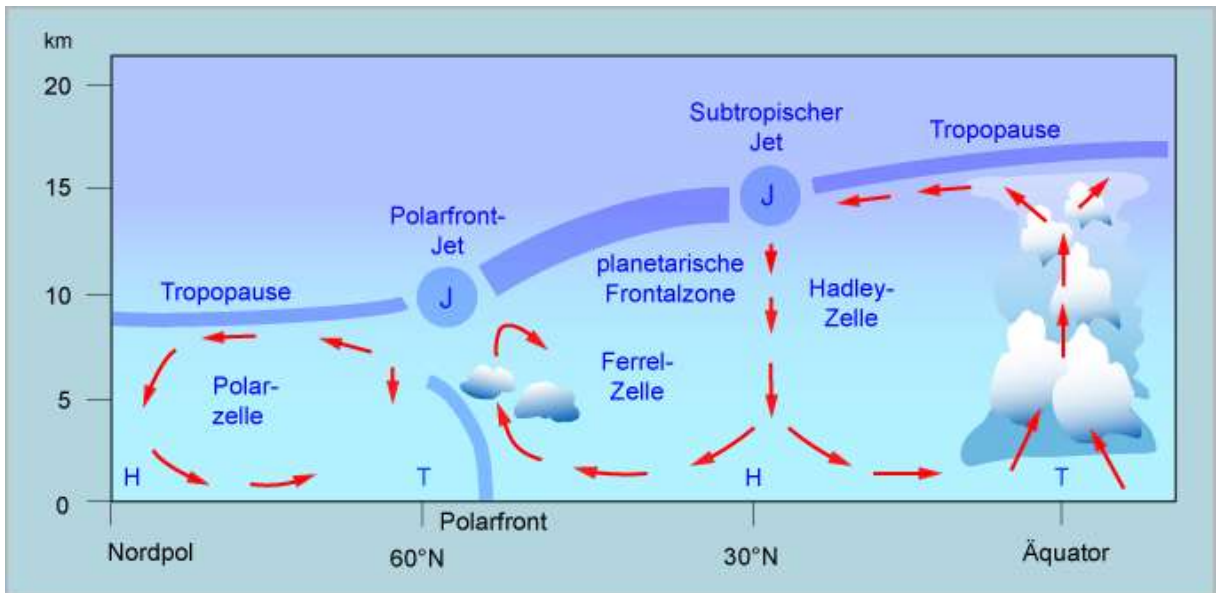


Abbildung 9: Die wichtigsten Zirkulationszellen der Atmosphäre /35/

Die Ausbreitung ist relativ langsam, wenn man sie mit der Ausbreitung entlang der geografischen Breite vergleicht. Diese wird maßgeblich durch die Rotation der Erde bestimmt. Ein besonderes Hindernis für den Stofftransport ist am Äquator gegeben. Dadurch dauert der Transport von einer Hemisphäre in die andere deutlich länger.

Im folgenden Bild ist dargestellt, wie lange die Ausbreitung dauert.

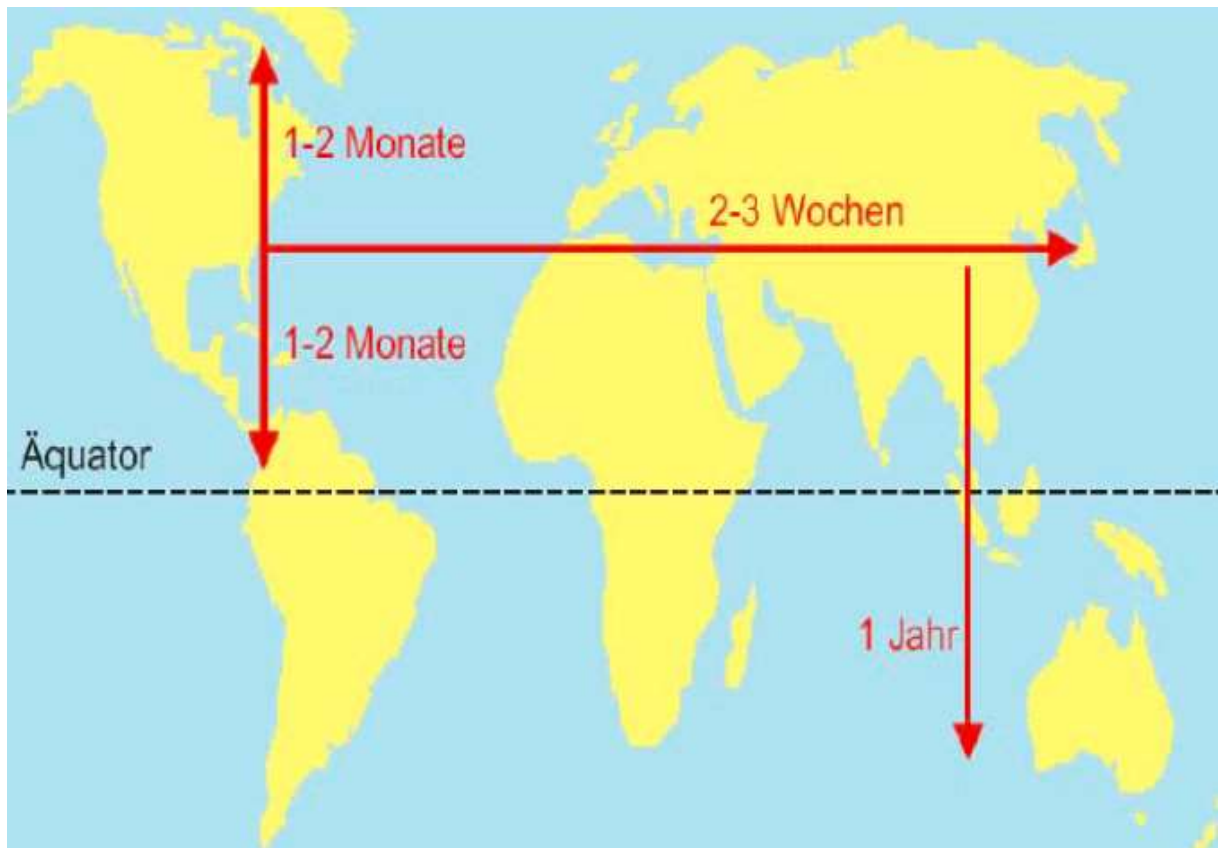


Abbildung 10: Dauer der Austauschprozesse /36, S. 4/



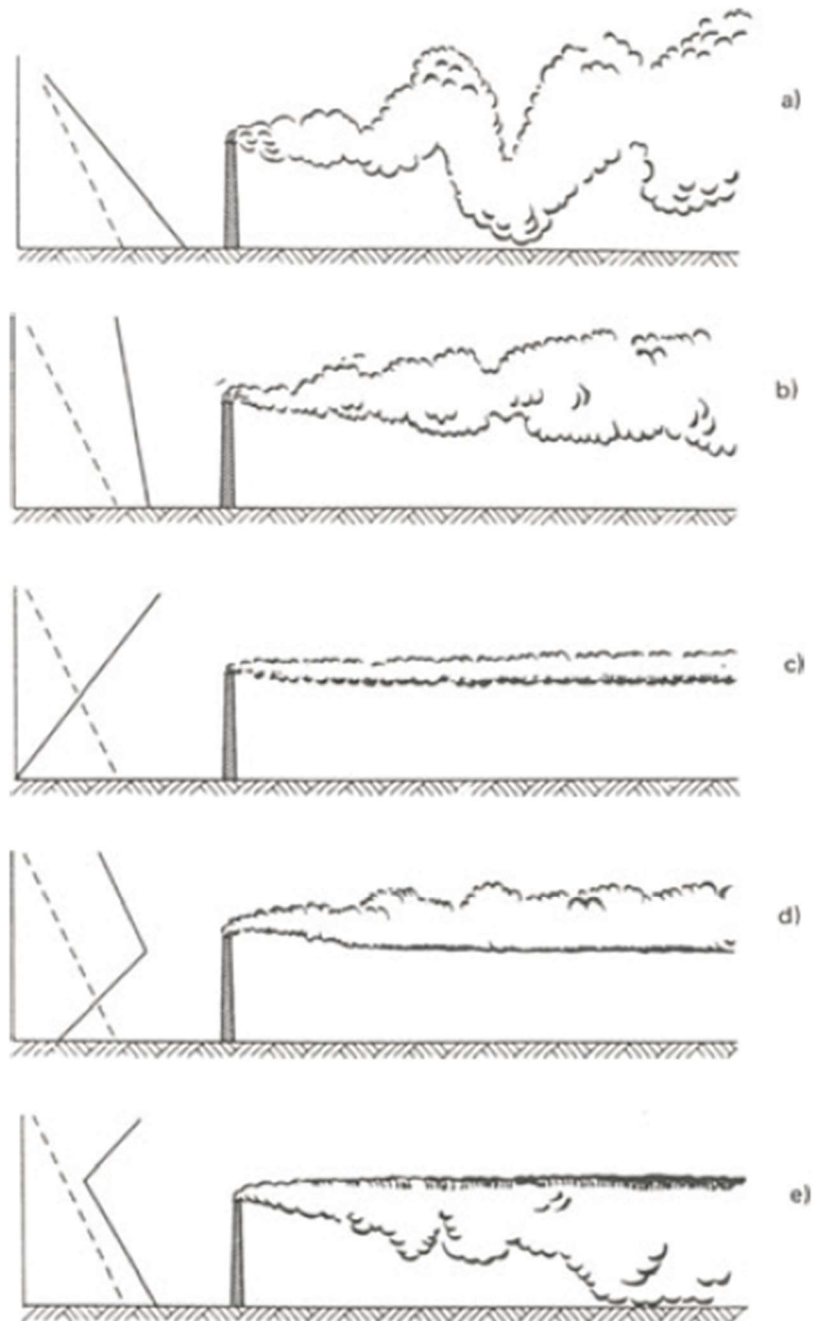
Die Darstellung dieser Ausbreitungswege veranschaulicht, dass die Emissionen ein globales Problem sind.

Bei einer örtlich begrenzteren Betrachtung ist die Ausbreitung abhängig von der Luftschichtung und deren Stabilität. Die jeweilige Schichtung kann an der Ausbreitung des Abgases aus einem Schornstein erkannt werden. Die verschiedenen Ausbreitungsarten lassen sich charakteristischen Stabilitätsklassen zuordnen. Die Einteilung anhand der Stabilität umfasst sechs Klassen: von sehr stabil (Kennzahl 1, Klassenbezeichnung I) bis hin zu sehr labil (Kennzahl 6, Klassenbezeichnung V). /37, S. 2/

Die fünf verschiedenen Typen der Abgasfahnausbreitung sind in der nachfolgenden Grafik dargestellt. Bei dem im linken Teil befindlichen Koordinatensystem ist auf der x-Achse die Temperatur, nach rechts zunehmend, und auf der y-Achse die Höhe aufgetragen. Die gestrichelte Linie stellt das Verhalten bei trocken-adiabaten Bedingungen dar. Eine Inversion ist die Umkehr des normalen Temperaturgefälles. Dadurch bildet sich eine Sperrschicht aus, wodurch der Stofftransport unterbunden wird. /38, S. 40/

Tabelle 5: Ausbreitungstypen /39, S. 11–13/

Abkürzung	Name	Eigenschaften	Stabilität der Schichtung
a	Looping	Bodenberührung nach kurzer Zeit möglich, schnelle Verdünnung	Leicht bis mittelstark labil
b	Conning	Recht geringe Verdünnung, keine Bodenberührung, schwache vertikale Temperaturabnahme	Neutral bis leicht stabil
c	Fanning	Geringe verdünnung, hohe Konzentration auch weit entfernt	Stabil, Inversion
d	Lofting	Bodeninversion, durch die Inversion erfolgt eine Ausbreitung nur nach oben	
e	Fumigation	Höheninversion, durch die Inversion erfolgt eine Ausbreitung nur nach unten → sehr hohe Konzentrationen am Boden → Ungünstig	



Ausbreitungstypen: Ausbreitung von Rauchteilchen aus einem Fabrikrauchfang bei verschiedenen Schichtungen. Links im Bild werden die Schichtungsverhältnisse angegeben: durchgezogene Linie: Temperatur, gestrichelte Linie: Trockenadiabate. Die vertikale Ausbreitung nimmt mit zunehmender Stabilität in den Fällen a bis c ab. Eine Höheninversion ist eine Sperre für Vertikalbewegungen, sie beeinflusst die Atmosphäre in verschiedener Weise, je nachdem ob sie unter oder über der Rauchfangspitze liegt (Fall d bis e). (Aus: Liljequist GH, Cehak K (1984) Allgemeine Meteorologie, 3. Aufl., Vieweg, Braunschweig Wiesbaden)

Abbildung 11: Ausbreitungstypen/40, S. 129/

### 4.3 Immissionen

Immission ist das Einwirken von Luftschadstoffen nach der Transmission. Ziel des Immissionsschutz ist es, *„Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“* /41, S. 5/. Die Immissionsgrenzwerte gelten immer für ein bestimmtes Schutzgut und können sich im Vergleich zu anderen Schutzgütern unterscheiden.

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) wird durch die Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) konkretisiert. Die TA Luft ist eine Verwaltungsvorschrift dazu. Wenn die Gesundheit des Menschen betroffen ist, gibt es in den meisten Fällen Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Diese Werte orientieren sich bei der Festlegung der Konzentration in erster Linie am Gefahrenpotential, das vom jeweiligen Stoff ausgeht. Es wird jedoch nicht berücksichtigt, ob diese Konzentrationen technisch überhaupt erreicht werden können, bzw. mit einem zumutbaren Aufwand. Daher liegen diese Werte teilweise deutlich unter den gesetzlich verbindlichen.

Die Angabe erfolgt als Massenkonzentration (z.B. mg/m<sup>3</sup>) oder bei Staub auch als Niederschlagsmessung (z.B. g/(m<sup>2</sup>d)).

### 4.4 Immissionen am Arbeitsplatz

Für die Beurteilung der Immissionen am Arbeitsplatz gelten andere Anforderungen als generell für Immissionen. Für die Beurteilung werden Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) verwendet. Diese sind in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) enthalten. Die TRGS werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) erarbeitet und beständig aktualisiert. Die AGW ersetzen seit der großen Überarbeitung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) die MAK-Werte (Maximale Arbeitsplatz-Konzentration). Die MAK-Werte können größtenteils immer noch zur Beurteilung herangezogen werden, da diese in die Neufassung übernommen wurden. Offiziell sind jedoch nur noch die AGW gültig und auch nur diese werden aktualisiert.

Die AGW sollen die Arbeitnehmer vor Gesundheitsschäden durch Einatmen der Stoffe am Arbeitsplatz schützen. Daher beziehen sich die AGW auf die gängige Schichtlänge von acht Stunden in einer Fünf-Tage-Woche und einem lebenslangen Arbeiten unter diesen Bedingungen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Schichtmittelwerte. Kurzzeitige Überschreitungen dieser Werte sind vier Mal pro Schicht zulässig. Die Höhe der zulässigen Überschreitung wird durch einen Überschreitungsfaktor angegeben. Der Überschreitungsfaktor kann maximal 8 sein. Die Länge der Überschreitungszeit, auch als

Kurzzeitwertphase bezeichnet, richtet sich danach, welcher der zwei Stoffgruppen der Stoff zugeordnet wurde. In der ersten Kategorie I, *„Stoffe bei denen die lokale Wirkung grenzwertbestimmend ist oder atemwegssensibilisierende Stoffe“* /42, S. 3/ darf die Überschreitungszeit 15 Minuten nicht überschreiten. Des Weiteren ist es möglich, dass ein Momentanwert angegeben ist, zu erkennen an „= =“. Dieser Momentanwert darf nicht überschritten werden. Bei der Kategorie II, *„Resorptiv wirksame Stoffe“*/42, S. 4/, darf die Überschreitungszeit länger als 15 min sein. Allerdings darf das Produkt aus dem tatsächlichen Überschreitungsfaktor und der Dauer nicht größer sein als der angegebene Überschreitungsfaktor. Unabhängig von der Länge und Dauer der Überschreitung darf der angegebene Schichtmittelwert nicht überschritten werden. /42/

## 5 Dioxine und Furane

### 5.1 Aufbau und Einteilung

Umgangssprachlich wird häufig nur der Begriff Dioxine verwendet. Unter diesen Begriff fallen insgesamt 210 Stoffe, die sich in zwei Gruppen einteilen lassen. „75 polychlorierten Dibenzop-dioxinen (PCDD) und 135 polychlorierten Dibenzofuranen (PCDF)“ /43, S. 3/ PCDDs und PCDFs sind jeweils eine Gruppe tricyclischer aromatischer Verbindungen, die sich durch den mittleren Ring unterscheiden. Bei den Furanen sind zwei Benzolringe mit einer Sauerstoffbrücke verbunden, bei den Dioxinen sind es zwei Sauerstoffbrücken. Bei beiden Gruppen können bis zu acht Wasserstoffatome durch Halogene (z.B. Chlor) ersetzt werden, wodurch die Vielzahl an Möglichkeiten zustandekommt. In der folgenden Grafik sind die Kohlenstoffatome, an denen eine Substitution des Wasserstoffs durch ein Halogen erfolgen kann, mit Nummern versehen worden.

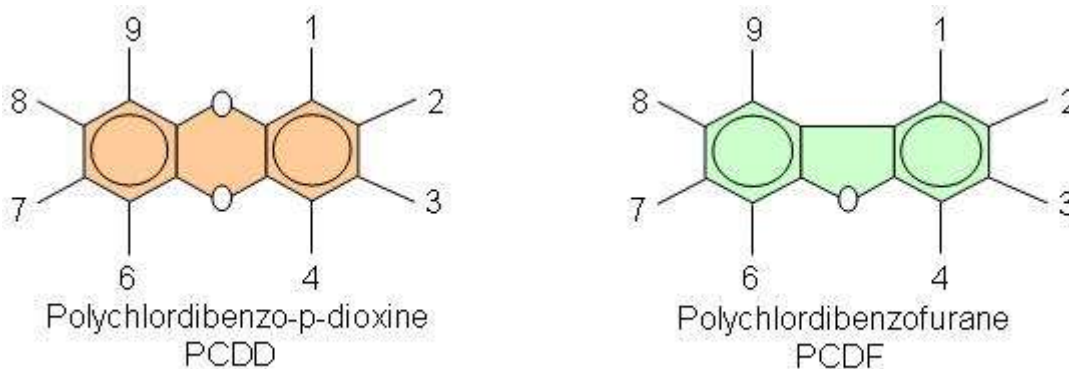


Abbildung 12: Aufbau Dioxine und Furane/44/

Besonders gefährlich sind 17 Verbindungen, die an den Stellen zwei, drei, sieben und acht chloriert sind. Die giftigste Verbindung ist das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin. Dieses ist auch als „Seveso-Dioxin“/“Seveso-Gift“ bekannt. Der Name stammt von einem schweren Chemieunfall, bei dem dieser Stoff freigesetzt wurde. Am 10. Juli 1976 fanden in Seveso, einer Stadt nördlich von Mailand, durch die fehlerhafte Bedienung einer Anlage zur Trichlorphenol-Herstellung ungewollte Reaktionen statt. Infolgedessen kam es zur Freisetzung von 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin. Die Bevölkerung wurde erst zwei Wochen später evakuiert und informiert. Eine ähnliche Struktur wie Dioxine und Furane haben einige polychlorierte Biphenyle (dioxin-like-PCB oder dl-PCB). Relevant sind 12 von 209 möglichen. Die anderen sind in diesem Zusammenhang nicht relevant, da sie andere Eigenschaften haben. Die zwölf Dioxin-Ähnlichen können in zwei Gruppen unterteilt werden, die mono-ortho und die non-ortho-dl-PCB. Das giftigste ist das PCB 126. /45, S. 8/

## 5.2 Giftigkeit und deren Bewertung (TEF, TEQ)

Für die 17 gefährlichsten Dioxine und Furane wurden von der WHO (World Health Organisation= Weltgesundheitsorganisation) 1998 und 2005 Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF= toxic equivalency factor) bekanntgegeben. Zwischen diesen beiden Veröffentlichungen gab es jedoch keine neuen Erkenntnisse zu den Stoffen. Es erfolgte lediglich eine Änderung der Berechnungsweise. Das Bundesamt für Risikobewertung lehnt diese neuen Werte ab. Die TEF bewerten die Giftigkeit der einzelnen Stoffe. Als Referenz hierfür wurde das giftigste 2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin gewählt. Diesem wird ein TEF von eins zugeordnet. Die meisten Werte wurden bei der Aktualisierung von 2005 unverändert gelassen, nur die Werte von vier Dioxinen oder Furanen wurden verändert. Neben den Werten für die Dioxine und Furane sind auch 12 Werte für dl-PCB angegeben. Bei diesen wurden mehrere Werte aktualisiert. Neben den TEF-Werten der WHO gibt es noch weitere. Betrachtet werden im Folgenden aber nur die zwei Versionen von der WHO, sowie eine zusätzliche die vom Namen her nicht näher charakterisiert ist. /43/

In der folgenden Tabelle 6 sind alle Dioxine, Furane und dioxinähnliche Biphenyle sortiert nach der jeweiligen Stoffgruppe mit Namen, Abkürzung sowie mit drei verschiedenen TEF. Wenn es Änderungen der TEF gab, sind diese Fett hervorgehoben. Bei der TEF, wie sie z.B. in der TA Luft verwendet werden, sind keine Werte für die dioxinähnlichen Biphenyle angegeben, da für diese keine vorgeschrieben sind. In der darauffolgenden Tabelle 7 ist angegeben, in welchen Normen die verschiedenen TEF verwendet werden. Dabei handelt es sich nur um die Normen, die in diesem Kapitel genannt wurden.

Tabelle 6: verschiedene TEF z.B. nach /23, Anhang VI TEIL 2; 46, Anhang; 47, Anhang; 48/

		Name	Abkürzung	Äquivalenzfaktoren		
				TEF	WHO-TEF 1998	WHO-TEF 2005
<b>Dioxine</b>		2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin	2378-TCDD	1	1	1
		1,2,3,7,8 – Pentachlordibenzodioxin	12378-PeCDD	0,5	1	1
		1,2,3,4,7,8 – Hexachlordibenzodioxin	123478-HxCDD	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,6,7,8 – Hexachlordibenzodioxin	123678-HxCDD	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,7,8,9 – Hexachlordibenzodioxin	123789-HxCDD	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,4,6,7,8 – Heptachlordibenzodioxin	1234678-HpCDD	0,01	0,01	0,01
		Octachlordibenzodioxin	OCDD	<b>0,001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>
<b>Furane</b>		2,3,7,8 – Tetrachlordibenzofuran	2378-TCDF	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,7,8 – Pentachlordibenzofuran	12378-PeCDF	0,05	<b>0,05</b>	<b>0,03</b>
		2,3,4,7,8 – Pentachlordibenzofuran	23478-PeCDF	0,5	<b>0,5</b>	<b>0,3</b>
		1,2,3,4,7,8 – Hexachlordibenzofuran	123478-HxCDF	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,6,7,8 – Hexachlordibenzofuran	123678-HxCDF	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,7,8,9 – Hexachlordibenzofuran	123789-HxCDF	0,1	0,1	0,1
		2,3,4,6,7,8 – Hexachlordibenzofuran	234678-HxCDF	0,1	0,1	0,1
		1,2,3,4,6,7,8 – Heptachlordibenzofuran	1234678-HpCDF	0,01	0,01	0,01
		1,2,3,4,7,8,9 – Heptachlordibenzofuran	1234789-HpCDF	0,01	0,01	0,01
		Octachlordibenzofuran	OCDF	<b>0,001</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>
<b>Biphenyle</b>	<b>non ortho</b>	3,3',4,4'-Tetrachlorbiphenyl	PCB 77		0,0001	0,0001
		3,4,4',5-Tetrachlorbiphenyl	PCB 81		<b>0,0001</b>	<b>0,0003</b>
		3,3',4,4',5-Pentachlorbiphenyl	PCB 126		0,1	0,1
		3,3',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl	PCB 169		<b>0,01</b>	<b>0,03</b>
	<b>mono ortho</b>	2,3,3',4,4'-Pentachlorbiphenyl	PCB 105		<b>0,0001</b>	<b>0,00003</b>
		2,3,4,4',5-Pentachlorbiphenyl	PCB 114		<b>0,0005</b>	<b>0,00003</b>
		2,3',4,4',5-Pentachlorbiphenyl	PCB 118		<b>0,0001</b>	<b>0,00003</b>
		2,3',4,4',5'-Pentachlorbiphenyl	PCB 123		<b>0,0001</b>	<b>0,00003</b>
		2,3,3',4,4',5-Hexachlorbiphenyl	PCB 156		<b>0,0005</b>	<b>0,00003</b>
		2,3,3',4,4',5'-Hexachlorbiphenyl	PCB 157		<b>0,0005</b>	<b>0,00003</b>
		2,3',4,4',5,5'-Hexachlorbiphenyl	PCB 167		<b>0,00001</b>	<b>0,00003</b>
		2,3,4,5,3',4',5'-Heptachlorbiphenyl	PCB 189		<b>0,0001</b>	<b>0,00003</b>

Tabelle 7: Verwendung der verschiedenen TEF

TEF	WHO-TEF 1998	WHO-TEF 2005
EU 2010/75 (/23, Anhang 6 Teil 2/)	EG 199/2006 Zitat aus (EG) Nr. 466/2001 (/46/)	EU 1259/2011 (/47, Anhang/)
TA Luft /49, S. 235/	EG 1881/2006 (alt)	EG 1881/2006 (aktualisiert) (/50/)
Klärschlammverordnung (/2, S. 17/)		17. BImSchV (/24, S. 21–22/)
Dz. U. 2011 Poz. 558 (/51, S. 5642/)		2013/711/EU (/52, Anhang/)
Dz. U. 2005 Poz. 2181 (/53, S. 17043/)		

Zum Vergleich verschiedener Zusammensetzungen und zur einfacheren Abschätzung der Giftigkeit wird ein Toxizitätsäquivalent (TEQ=Toxic equivalency factor) verwendet. Dies ist die Summe aus dem Messwert multipliziert mit dem jeweiligem TEF. Der TEQ soll der Giftigkeit einer äquivalenten Menge des giftigsten Dioxins, dem Seveso-Dioxin, entsprechen und so den Vergleich verschiedener Zusammensetzungen ermöglichen. Die TEQ-Angaben kann auf eine unterschiedlich große Summe bezogen werden. Die kleinste Gruppe wird abgekürzt mit WHO-PCDD/F-TEQ. Diese bezieht sich lediglich auf die 17 besonders gefährlichen Dioxine und Furane. Die Angabe WHO-PCDD/F-PCB-TEQ bezieht zusätzlich noch die 12 dl-PCB mit ein, so dass bei diesem Parameter insgesamt 29 Stoffe berücksichtigt werden. Ein Rückschluss, welche TEF den jeweiligen TEQ-Angaben zugrundeliegen, ist anhand der Abkürzungen nicht möglich. /43/

Des Weiteren gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, Messwerte zu berücksichtigen, die unterhalb der Bestimmungsgrenze liegen. Bei der TEQ-A wird die Bestimmungsgrenze anstelle des Messwertes mit dem TEF multipliziert. Für die Bestimmung des TEQ-B werden diese Werte nicht berücksichtigt. Dies erfolgt durch die Multiplikation mit 0. Die TEQ-C wird ermittelt, indem mit der halben Bestimmungsgrenze anstatt des Messwerts multipliziert wird. Liegt der Messwert über der Bestimmungsgrenze sind TEQ-A/B/C gleich groß. /54/ Wenn nicht alle Messwerte über der Bestimmungsgrenze liegen resultiert daraus TEQ-A > TEQ-C > TEQ-B.

### 5.3 Emission/ Maßnahmen zu Emissionsminderung

Dioxine und Furane haben keinen Nutzen für die Industrie, weshalb sie auch nie gezielt hergestellt wurden. Dioxine können jedoch immer als Nebenprodukt bei hohen Temperaturen entstehen, wenn Chlor und Kohlenstoff beteiligt sind, bevorzugt in einem Temperaturbereich



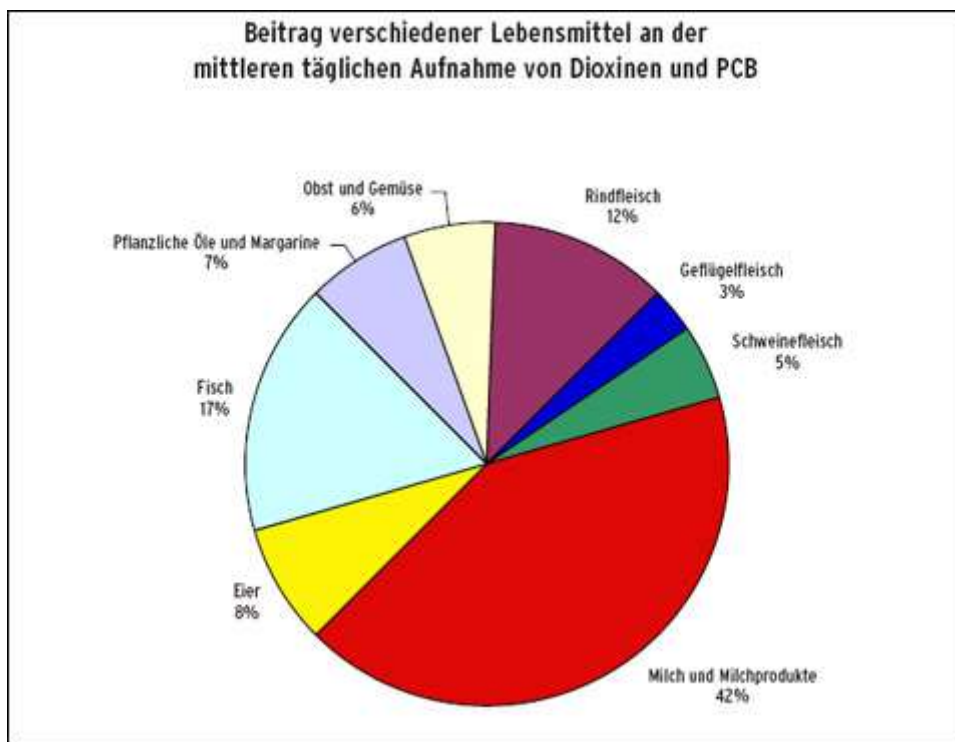
zwischen 300 °C und 400 °C. Aber die Entstehung ist bis zu einer Temperatur von 800 °C möglich, da sie erst ab da zersetzt werden. Dementsprechend können Dioxine z.B. bei der Abfallverbrennung, Metallherstellung oder der Chlorchemie entstehen. Nicht zu vergessen sind neben der möglichen Entstehung bei industriellen Prozessen auch die Entstehungsmöglichkeit in privaten Öfen und Kaminen. /34, S. 475; 44/ PCB wurden in den 1980er in vielen Bereichen eingesetzt, z.B. „*Transformatoren, elektrischen Kondensatoren, in Hydraulikanlagen als Hydraulikflüssigkeit, sowie als Weichmacher in Lacken, Dichtungsmassen, Isoliermitteln und Kunststoffen*“ /44/

Eine Möglichkeit die Entstehung von Dioxinen und Furanen zu verhindern ist, soweit möglich, keine halogenhaltigen Stoffe, insbesondere Chlor und Brom, zu verwenden. Wenn ein Verzicht oder Austausch dieser Stoffe nicht möglich ist, besteht auch die Möglichkeit, die Bedingungen der Verbrennung zu optimieren. Dies betrifft insbesondere die Temperatur, Verweilzeit und Durchmischung. Neben katalytischen, adsorptiven Verfahren, der Oxidation mit H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> lässt sich die Konzentration auch mit Gewebefiltern verringern. Das beruht auf der Anhaftung von Dioxinen und Furanen an die Partikel und der gemeinsamen Abscheidung. /34, S. 477/

#### 5.4 Verbreitung in der Nahrungskette

Die emittierten Dioxine und Furane verbreiten sich über die Luft und lagern sich im Boden ab. Aufgrund der sehr geringen Abbaugeschwindigkeit erfolgt dort eine Anreicherung. Die Gefahr ist jedoch nicht, Dioxine über die Luft oder das Wasser aufzunehmen, sondern über die Nahrung. Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen geht davon aus, dass der über Wasser und Luft aufgenommene Anteil kleiner als 5 % ist./44/ Dies deckt sich mit den Angaben des Bundesinstituts für Risikobewertung und dem Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Diese geben insbesondere die Nahrung als Ursprung der Aufnahme an, der Anteil soll ca. 90 % betragen. /34, S. 474; 43, S. 1/ Das Umweltbundesamt nimmt den über die Nahrung aufgenommenen Anteil mit > 90 % an, berücksichtigt neben Dioxinen und Furanen aber auch dl-PCB. Eine Aufnahme in Pflanzen ist aufgrund der lipophilen Eigenschaft nicht von Bedeutung. Lipophil bedeutet, sie sind gut in Fett, aber nicht in Wasser löslich. Die Löslichkeit in Fett nimmt mit steigender Chlorierung zu. Es kann jedoch sein, dass an Pflanzen haftender Boden belastet ist, und auf diese Weise eine Belastung erfolgt. Mit der Nahrung nehmen Tiere belastete Bodenpartikel auf. Die Menge der Aufnahme ist von der jeweiligen Art abhängig. Besonders Wild oder Tiere die draußen gehalten werden, sind einer höheren Belastung ausgesetzt. Die Anreicherung erfolgt im Fleisch und Fett der Tiere, gelangt aber auch in tierische Produkte wie z.B. Milch und Eier. Im Verlauf der Nahrungskette nimmt die eingelagerte Konzentration immer weiter zu.

Infolgedessen erfolgt die Aufnahme hauptsächlich über „*fetthaltige tierische Lebensmittel wie Milch, Fleisch, Fisch und Eier.*“/55, S. 27/ Den Hauptanteil machen hierbei Fleisch und Milchprodukte aus. Dabei spielt zum einen die Höhe der Belastung eine Rolle, aber auch die durchschnittliche Aufnahmemenge des jeweiligen Lebensmittels.



© www.umweltbundesamt.de, modifiziert

Abbildung 13: Zusammensetzung der täglichen Dioxin-, Furan- und PCB-Belastung/56/

Die Gefahr dieser Stoffe geht von der Anreicherung im Körper aus. Das giftigste Dioxin, 2,3,7,8 TCDD hat im körperfett des Menschen eine Halbwertszeit von ca. 7 Jahren. In einem anderen Dokument gibt das Umweltbundesamt diesen Wert mit ca. 10 Jahre an, für Männer und für Frauen./45, S. 9/ Die längste Halbwertszeit beträgt ca. 20 Jahre. Diese wird von dem 2,3,4,7,8 PeCDF erreicht. /55/ Diesem ist ein TEF von 0,5(1998) oder 0,3 (2005) zugeordnet. Somit ist es halb oder ca. ein Drittel so gefährlich wie das gefährlichste Dioxin.

In Tierversuchen an Ratten wurde festgestellt, dass zu den chronischen Wirkungen von Dioxinen und Furanen der negative Einfluss auf die Reproduktion, das Immunsystem, das Nervensystem und den Hormonhaushalt zu zählen sind. Besonders gefährdet sind Leber und Schilddrüse./57, S. 2/ In der MAK- und BAT-Wert Listen 2015 wird 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin der Kategorie 4 zugeordnet. /58, S. 173/ Bei einer Einhaltung der MAK-Werte ist bei diesen Stoffen jedoch nicht von einer erhöhten Gefahr, an Krebs zu erkranken, auszugehen, da diese nicht primär genotoxisch wirken. Der MAK-Wert ist mit  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ mg/m}^3$  angegeben./58, S. 140/ In der TRGS 905 wird es als krebserzeugend eingestuft./59, S. 4/

Zudem gibt es noch akute Wirkungen, die z.B. nach einem Unfall wie in Seveso auftreten. Dies ist in erster Linie Chlorakne./45, S. 9/

## 5.5 Richt-/Grenzwerte

Es gibt verschiedene Arten von Richtwerten sowie verbindliche Grenzwerte, die vor Dioxinen und Furanen schützen sollen. Dabei werden verschiedene Ansätze zur Festlegung der Werte gewählt. Der erste bezieht sich auf die Menge, die in einer gewissen Zeit aufgenommen werden darf. Diese werden von der WHO veröffentlicht. Hierbei wird zwischen „*tolerabler wöchentlicher Aufnahme (TWI) von 14 pg WHO-TEQ/kg Körpergewicht*“ /46, S. 1/ und der „*maximal tolerierbare tägliche Aufnahmemenge von 1-4 Pikogramm WHO-TEQ je Kilogramm Körpergewicht (pg WHOTEQ/kg KG*“ /43, S. 1/ = TDI = tolerable daily intake) unterschieden. Weitere Grenzwerte dieser Art hat die Scientific Committee on Food (SCF) mit einem TWI von 14 pg WHO-PCDD/F-PCB-TEQ pro kg und die FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) mit einer „*vorläufige tolerierbare monatliche Aufnahme (provisional tolerable monthly intake; PTMI) von 70 pg WHO-PCDD/F-PCB-TEQ pro kg Körpergewicht und Monat*“ veröffentlicht. /57, S. 3/ Bei diesen Werten wird angenommen, dass bei einer lebenslangen Aufnahme keine gesundheitlichen Schäden entstehen. Angestrebt wird weniger als 1 pg WHO-PCDD/F-PCB-TEQ/kg KG und Tag. /45, S. 27/ Für Schwangere und Kinder sind diese Werte nicht anwendbar, deren Werte sollten geringer sein.

Ein weiterer Ansatz ist die Überwachung besonders anfälliger Lebensmittel sowie von Futtermitteln. Eine Besonderheit gilt bei den Werten für Fische. Aufgrund des stark unterschiedlichen Fettgehalts werden deren Angaben nicht auf die Fettmasse, sondern auf das Frischgewicht bezogen. Für die wichtigsten Lebensmittel wurden von der EU-Kommission Verordnungen erlassen, die einen Höchstgehalt für spezifische Lebensmittel angeben. Auf die 2005 WHO-TEF bezieht sich die aktuellste, seit 01.01.2012 gültige Verordnung EU 1259/2011. Bei der älteren Verordnung, der EG 1881/2006 gibt es zwei verschiedene Versionen, die gleich genannt werden und lediglich durch das Erscheinungsdatum zu unterscheiden sind. Die ältere vom 20.12.2006 bezieht sich noch auf die WHO TEF von 1998. Die Aktualisierung vom 01.09.2014 auf die 2005er TEF. Neben den gesetzlich verbindlichen Höchstwerten gibt es noch die Auslösewerte. Diese liegen ca. 25-30 % niedriger als die Höchstwerte. /56/ Sie dienen als Frühwarnsystem, sind jedoch nicht verbindlich. Die Auslösewerte orientieren sich am Gehalt, der während der Herstellung nicht verhindert werden kann. Dieser wird als Hintergrundbelastung bezeichnet. Die aktuellen Werte sind in der Empfehlung 2013/711/EU veröffentlicht. Die dort genannten Werte beziehen sich auf die 2005er WHO-TEF. /52, Anhang/

Die zulässigen Emissionen sind in der Ersten Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, besser bekannt als Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, kurz TA Luft angegeben. Angestrebt wird  $0,1 \text{ ng/m}^3$  oder auch  $0,25 \mu\text{g/h}$ . Die Probennahmezeit sollte zwischen 6 und 8 h liegen. Bei einigen Anlagen zur Behandlung von Eisen oder auch Nichteisenmetallen sind ebenfalls  $0,1 \text{ ng/m}^3$  anzustreben, es sind jedoch  $0,4 \text{ ng/m}^3$  zulässig. /49/ Die Berechnung erfolgt, wie bei der Vorstellung der WHO-TEF und TEQ beschrieben, aus dem Multiplizieren der einzelnen Messwerte mit den dazugehörigen Äquivalenzfaktoren und anschließendem Aufsummieren aller Produkte. Es werden nur die 17 Dioxine und Furane berücksichtigt. Allerdings wird nicht einer der WHO-TEF verwendet, sondern die in der TA Luft Tabelle 20 angegebenen. Diese sind auch in der Tabelle 6 als TEF bezeichnet. Diese TEF sind zum größten Teil identisch mit den WHO-TEF von 1998. Unterschiede gibt es bei OCDD und OCDF. Diese sind eine 10er Potenz größer, 0,001 anstatt 0,0001. Dadurch sind nur geringere Konzentrationen zulässig als bei der Verwendung des WHO-TEF. Mit dieser Vorschrift in der TA Luft wird die Richtlinie 2010/75/EU, vom 24.11.2010 umgesetzt. In der Richtlinie wird der Grenzwert  $0,1 \text{ ng/m}^3$  direkt auf den Normzustand bezogen. /23, Anhang VI Teil 3/ In der TA Luft wird bei der Angabe nicht direkt angegeben, dass es sich auf den Normzustand bezieht. Am Anfang wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich alle Werte auf den Normzustand beziehen, sofern nichts anderes angegeben wird. Die polnische Dz. U. aus dem Jahr 2005 mit der Nummer (Poz.) 2181 /53/, sowie die aus dem Jahr 2011 mit der Nummer (Poz.) 558 /51/ beziehen sich auf dieselbe Messzeit, denselben Grenzwert und dieselben TEF wie die TA Luft. Allerdings wird hierbei explizit darauf hingewiesen, dass sich die Konzentration auf einen Sauerstoffgehalt von 11 % im Abgas bezieht. Dies wird mit  $\text{ng/m}^3_u$  dargestellt. In der 17. BImSchV werden alle 29 Stoffe mit den WHO-TEF von 2005 verwendet. Trotzdem gilt derselbe Grenzwert, sowie die Bedingung 11 %  $\text{O}_2$  im Abgas /24, S. 21–22/. Von dieser Vorschrift können Ausnahmen zugelassen werden, wenn diese z.B. die zuvor genannte Richtlinie 201/75/EU einhalten und weitere Maßnahmen zu Emissionsschutz getroffen wurden. /24, S. 17–18/.

PCB sind in Deutschland seit 1978 zuerst nur in offene Anlagen, ab 1989 auch in geschlossenen Anlagen, bis 2010 nahezu komplett verboten worden. Nur in besonderen Fällen und in geringen Volumina ist ihr Einsatz noch gestattet. Weltweit wurden die PCBs durch die Stockholmer Konvention verboten. Diese trat am 17. Mai 2004 in Kraft. Inzwischen ist diese von 180 Ländern ratifiziert worden. /45, 12 f./

## 6 Staub

### 6.1 Gefahrenpotenzial

Die Staubpartikel werden anhand des (aerodynamischen) Durchmessers unterschieden. Bei Feinstaub erfolgt die Angabe meistens als PM 10 oder PM 2,5. Die Zahl bedeutet nach der 39. BImSchV, dass es sich um Partikel handelt, die einen gröÙenselektierenden Lufteinlass passieren, der für den angegebenen aerodynamischen Durchmesser einen Abscheidegrad von 50 % erreicht./60, S. 5/ Noch kleinere Partikel werden als ultrafeine Partikel bezeichnet. Diese können sogar in den Blutkreislauf gelangen. Die folgende Abbildung zeigt, wie weit die Partikel, in Abhängigkeit von dem Partikeldurchmesser in die Atemwege vordringen können.

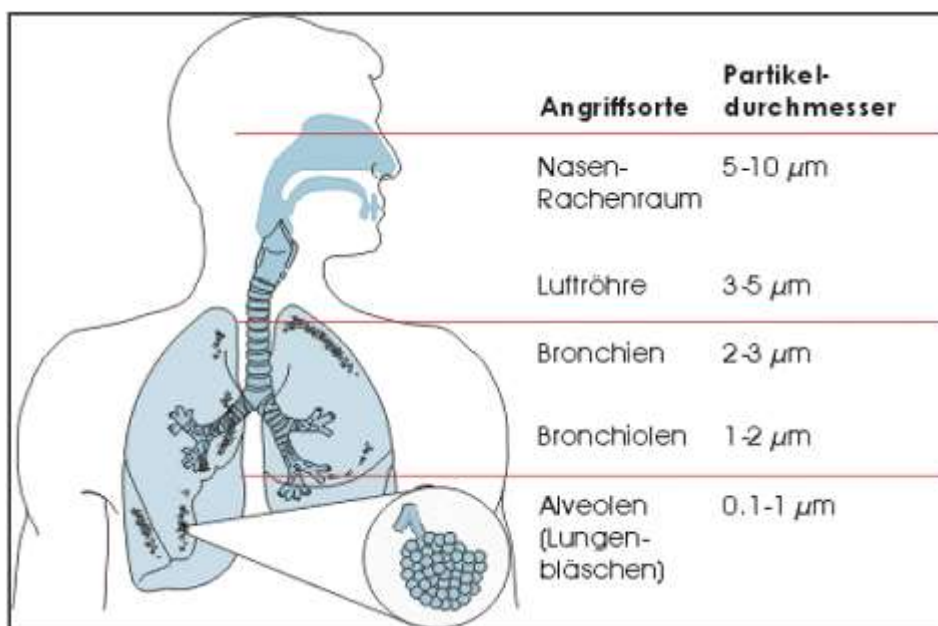


Abbildung 14: Eindringtiefe von Staub /61/

In der DIN EN 481 wird die Staubaufnahme über die Atemwege in Abhängigkeit vom aerodynamischen Durchmesser der Partikel dargestellt, siehe dazu Abbildung 15. /62, S. 6/ Auf dem obigen Bild scheinen sehr kleine Durchmesser erforderlich zu sein, damit die Partikel weit in die Atemwege eindringen können. Aus der folgenden Grafik ist jedoch ersichtlich, dass bereits bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm 50 % der Partikel weiter als zum Kehlkopf, also in Luftröhre gelangen können. Bei einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 sind es sogar ca. 93 %. Von den Partikeln mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm gelangen nur 1,3% bis in die nicht cillierten Luftwege, den Lungenbläschen. Die 50 %-Grenze liegt bei dieser Konvention bei einem aerodynamischen Durchmesser von 4 µm. Bei einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm sind es ca. 83 %. Partikel größer als 16 µm gelangen nicht mehr in die Lungenbläschen. Dass auch Fraktionen mit einem größeren

Durchmesser tief in die Atemwege eindringen können, liegt daran, dass nicht alle Partikel gleich groß sind. Es bildet sich eine Korngrößenverteilung aus.

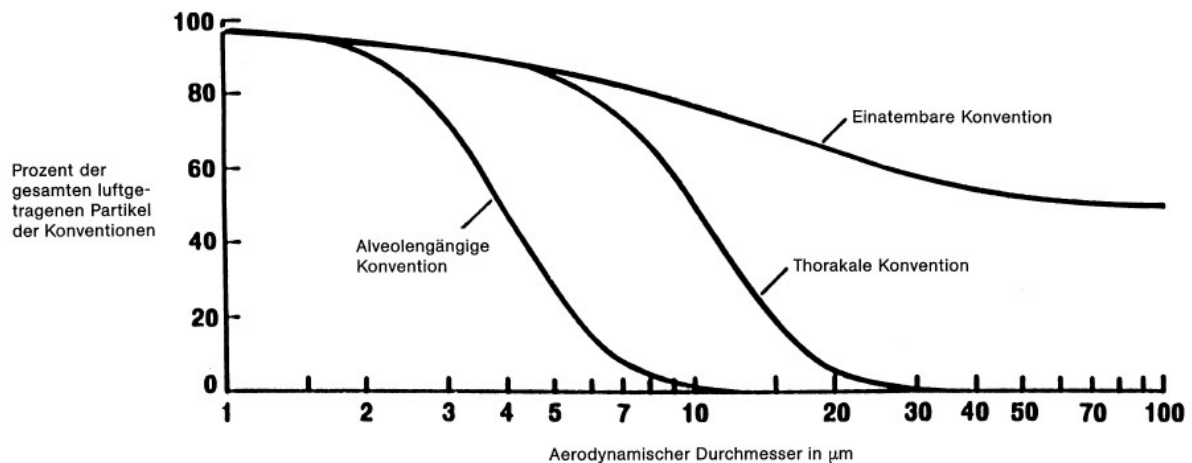


Bild 1: Die einatembare, thorakale und alveolengängige Konvention in Prozent der gesamten luftgetragenen Partikel

Abbildung 15: Einatembarer Staub nach DIN EN 481 /62, S. 6/

Bisher gibt es in der der Literatur noch keinen einheitlichen Schwellenwert, ab dem die Staubkonzentration als gesundheitsschädlich zu betrachten ist. Es steht jedoch fest, dass ein Zusammenhang zwischen Erkrankungen und einer hohen Staubkonzentration besteht. Eine hohe Staubkonzentration, insbesondere PM 2,5, kann eine Vielzahl von Krankheiten auslösen oder zu mindestens deren Entstehen begünstigen. Dazu gehören nach /63, S. 233–234/und /61/ z.B. Asthma, Bronchitis Thrombose, Atherosklerose („Gefäßverkalkung“), Lungenentzündung, Krebs in den Atemwegen, insbesondere Lungenkrebs, Herzinfarkt, oxidativer Stress und Allergien.

## 6.2 Quellen

Für Staub und Feinstaub gibt es verschiedene Quellen. Der größte Teil ist anthropogen. Eine der Hauptquellen ist der Verkehr. Im Straßenverkehr entsteht Feinstaub durch Reifen-, Straßen- und Bremsenabrieb sowie durch Abgase der Fahrzeuge, insbesondere Dieselfahrzeuge. Durch den Verkehr kann jedoch auch die Feinstaubbelastung indirekt durch das Aufwirbeln von Partikeln in der Nähe der Fahrbahn erhöht werden. Eine weitere wichtige Quelle sind Verbrennungsprozesse allgemein. In Abhängigkeit vom verbrannten Materials können sich ganz unterschiedliche Stoffe an den Staub anlagern, wodurch das Gefahrenpotential stark gesteigert wird. In diesem Fall gelten dann nicht nur die Grenzwerte für Staub, sondern auch für den angelagerten Stoff. Dies könnten z.B. Schwermetalle sein.

### 6.3 Grenzwerte

Bei der folgenden Betrachtung der Grenzwerte wird immer von Staub ohne gefährliche Stoffe wie z.B. Schwermetalle ausgegangen.

Für staubförmige Emissionen ist in der TA Luft ein zulässiger Massenstrom von 0,20 kg/h oder eine Massenkonzentration von 20 mg/m<sup>3</sup> angegeben. /49, S. 49/ Die 17. BImSchV lässt für den Gesamtstaub lediglich 5 mg/m<sup>3</sup> als Tagesmittelwert und 20mg/m<sup>3</sup> als Halbstundenmittelwert zu. Für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung unter 50 MW ist eine höhere Konzentration zulässig, es gelten 10 mg/m<sup>3</sup>. /24, S. 9–10/.In der Richtlinie 2010/75/EU wird diese Konzentration ohne Berücksichtigung der Feuerungswärmeleistung zugelassen. Der Halbstundenmittelwert ist mit 30 mg/m<sup>3</sup> angegeben./23, S. 68/

Für die Staub(PM 10)-Immission sind in der TA Luft und 39.BImSchV identisch ein Jahresmittelwert und ein Tagesmittelwert zum Schutz der menschlichen Gesundheit angegeben. Mit der 39. BImSchV wurde die Richtlinie 2008/50/EG umgesetzt, weshalb die Grenzwerte der deutschen Vorgabe sich auch in der polnischen Gesetzgebung wiederfinden. Im Jahresmittel ist eine Immission von 40 µg/m<sup>3</sup> zulässig. Eine Überschreitung dieses Wertes ist nicht zulässig. Der Tagesmittelwert ist 50 µg/m<sup>3</sup>, pro Jahr sind 35 Überschreitungen zulässig. Für PM 2,5 werden in der TA Luft keine Grenzwerte aufgeführt. /49, S. 21; 60, S. 34/ In der 39. BImSchV werden Zielwerte angegeben. Nach der dort angegebenen Definition muss der Zielwert ebenso wie Grenzwerte eingehalten werden. Diese Anforderung wird jedoch dadurch relativiert, dass sie nur notwendig ist, wenn die Möglichkeit dazu besteht. Bis zum ersten Januar 2015 betrug der Zielwert 25 µg/m<sup>3</sup> gemittelt auf ein Jahr, seitdem gilt dieser als Grenzwert. /60, S. 6/ Darüberhinaus soll die PM 2,5 Konzentration weiter reduziert werden. Dafür gibt es eine Zielvorgabe für das Jahr 2020. Das Ziel wird als AEI (Average Exposure Indicator, Indikator für die durchschnittliche Exposition) ausgedrückt. Der AEI bezieht sich immer auf die Mittelwerte der drei letzten Jahre. Bereits ab 01.01.2015 gilt ein AEI von 20 µg/m<sup>3</sup>. Der ab 2020 für das jeweilige Land geltende Grenzwert ist abhängig von dem AEI von 2010, also den Mittelungswerten von 2008 bis 2010. Dabei gilt, dass Länder mit einer höheren Konzentration stärker reduzieren müssen, als Länder die bereits eine relativ niedrige Konzentration haben. Wird bis 2020 mindestens einmal eine Konzentration von 8,5 µg/m<sup>3</sup> erreicht und die folgenden Konzentrationen gleich oder darunter gehalten, muss keine weitere Reduzierung erfolgen. Die andernfalls erforderliche Reduzierung ist in der folgenden Tabelle dargestellt. /60, S. 34–35/

Tabelle 8: Erforderlich AEI Reduzierung PM 2,5 /60, S. 34/

Ziel, auf das die Exposition gegenüber dem WIE 2010 reduziert werden soll	
Ausgangswert in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Reduktionsziel
< 8,5 = 8,5	0 %
= 8,5 - < 13	10 %
= 13 - < 18	15 %
= 18 - < 22	20 %
> 22	Alle angemessenen Maßnahmen um da Ziel von $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu erreichen

Das niedersächsische Umweltministerium gibt folgende Daten für Deutschland an: Der AEI des Jahres 2010 betrug  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die daraus resultierende Reduzierung muss 15 % betragen. Der AEI im Jahr 2020 darf also nicht größer als  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sein./64/ Entsprechende Werte für Polen waren nicht herauszufinden.

Die WHO empfiehlt, um die Gesundheit mit Sicherheit zu schützen für PM 10  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Jahresmittelwert und  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Tagesmittelwert empfohlen. Bei dem PM 2,5 sind es  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Jahresmittelwert und  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  als Tagesmittelwert. /63, S. 278–288/ Im Vergleich zu den bereits genannten vorgeschriebenen Werten sind diese deutlich geringer angesetzt.

Zum Schutz vor erheblichen Belästigungen oder Nachteilen wird neben dem Immissionswert auch noch ein Wert für den Staubbiederschlag angegeben. Der Grenzwert in der TA Luft beträgt  $0,35 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ , gemittelt auf ein Jahr. /49, S. 23/

Der AGW wird in der TRGS 900 angegeben. Dabei wird zwischen der einatembaren- (E-Staubfraktion) und der alveolengängigen- (A-Staubfraktion) Staubfraktion unterschieden. Der zulässige AGW für die E-Fraktion ist  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ , für die A-Fraktion sind nur  $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$  zulässig. /42, S. 16/



# 7 Mikrobiologie

## 7.1 Vorkommen von Mikroorganismen

Bakterien und Pilze kommen überall auf der Welt vor. Durch spezielle Anpassungen können diese auch an lebenswidrig erscheinenden Orten, wie z.B. an den Schwarzen Rauchern in der Tiefsee oder im Eis der Arktis und Antarktis vorkommen. Ein wichtiges Kriterium, die Mikroorganismen einzuteilen, bietet daher ihr bevorzugtes Temperaturspektrum. Beginnt man bei den niedrigen Temperaturen, sind als erstes die psychophilen Mikroorganismen zu nennen. Deren Temperaturoptimum liegt um die 4 °C, aber auch tiefe Minusgrade sind für spezialisiertere Arten kein Problem. Als nächstes folgen die Mikroorganismen, die mittlere Temperaturen bevorzugen, die mesophilen Mikroorganismen. Deren Optimum liegt bei 39 °C. Da dies sehr dicht an der Körpertemperatur des Menschen liegt, nutzt diese Gruppe auch gerne den menschlichen Körper als Lebensraum. Je nach Art kann dies jedoch den Menschen krank machen. Andere Arten sind für den Menschen notwendig, wie z.B. Darmbakterien. Würde man alle Zellen eines Menschen zählen, so wären nur 10 % menschlich, der Rest sind Bakterien. Auch „leben“ auf und in jedem Menschen mehr als 10.000 verschiedenen Arten, die meisten davon im Verdauungstrakt. Reicht eine Temperatur von 60 °C zur Abtötung der meisten Mikroorganismen aus, fühlen sich die thermophilen Mikroorganismen erst bei dieser Temperatur so richtig wohl. Alle Mikroorganismen, deren Temperaturoptimum 60 °C überschreitet, werden als hyperthermophil bezeichnet. /65, S. 2; 66, S. 7/

Neben der Temperatur gibt es in unserer normalen Umgebung noch weitere Faktoren, die das Vorhandensein von Mikroorganismen beeinflussen. Einen wichtigen Einfluss hat die UV-Strahlung. Die UV-A Strahlung tötet die Mikroorganismen verhältnismäßig langsam ab und führt beim Menschen nur zu einem Sonnenbrand. Die energiereichere, und somit weitaus gefährlichere UV-B Strahlung, tötet Mikroorganismen schnell ab und kann beim Menschen zu Hautkrebs führen.

Die Mikroorganismen schweben bevorzugt nicht einfach durch die Luft, sondern heften sich an die Partikel in der Luft an, da diese ihnen Schutz bieten, z.B. vor der Sonneneinstrahlung. Infolgedessen hat die Partikelzahl in der Luft einen Einfluss auf die Anzahl der Mikroorganismen in der Luft. Die Partikelzahl hängt wiederum mit dem Regen zusammen, denn der Regen wäscht einen Teil der Partikel aus der Luft aus.

Wenn man die Anzahl von Mikroorganismen reduzieren will, kann man sich die bereits beschriebenen Gegebenheiten zunutze machen. Dies bedeutet, dass die Anzahl der Mikroorganismen durch Bestrahlung, hohe oder niedrige Temperaturen, aber auch durch Filtration reduziert werden kann. Der Aufwand, und somit die Kosten, nehmen jedoch exponentiell zu, je höher die Anforderungen an die Reinheit der Luft werden.

## 7.2 Bakterien-Pilz -Messung

Die Durchführung und Auswertung der eigenen Messungen erfolgten nach PN-Z04111-02 und PN 89/Z-04111/03. /67; 68/ Allerdings gibt es diese veralteten, sehr einfachen Vorschriften nur in Polen. In der DIN EN 13098 wird eine andere Berechnungsvorschrift angegeben, um die Zahl koloniebildender Einheiten in einem Kubikmeter Luft zu bestimmen. Diese Gleichung beruht darauf, dass die Proben mit einem Impinger-Probenahmegerät oder ein Filter-Probenahmegerät genommen wurden. /69, S. 21/

Tabelle 9: Formelzeichen Mikrobiologie /69, S. 21/

C	Konzentration
$\Sigma C$	Summe aller ausgezählten Kolonien
D	Verdünnungsfaktor, der ersten auszählbaren Verdünnung
$n_1$	Mehrdachbestimmungen, der ersten auszählbaren Verdünnung
$n_2$	Mehrdachbestimmungen, der zweiten auszählbaren Verdünnung
$V_0$	Gesamtvolumen der flüssigen Suspension in Millimeter
$V_i$	Auf die Agarplatte ausgebrachtes Volumen in Millimetern
$V_a$	Gesamtvolumen der gesammelten Luft, in Kubikmeter

$$C = \frac{\Sigma C * V_0}{V_1(n_1 + 0,1 * n_2)d * V_a} \quad [19]$$

Zu diesem Thema hat der VDI mehrere Reihen herausgegeben, die das erforderliche Vorgehen von der Planung über die Durchführung bis hin zur Auswertung darstellen. Die Vorschriften, wie die Messung zu erfolgen hat, sind in den Blättern der VDI-Reihe 4251 aufgeführt. Für die Anwendung im Bereich der Kläranlage bietet sich /70/ an. In der Reihe 4252 wird dann das Verfahren und in der Reihe 4253 die Auswertung beschrieben. Das Blatt zwei bezieht sich dabei immer auf die Pilze, und das Blatt drei auf die Bakterien.

Die Erfassung der Bakterien könnte nach VDI 4252 Blatt 3 mittels Impinger in einer Höhe von 1,5 m erfolgen. In den Impinger wird ein definierter Luftstrom gesaugt. Dieser wird durch eine Impingerkapillare in Kochsalzlösung eingedüst. Der angesaugte Luftvolumenstrom ist so zu

wählen, dass in der Kapillare Schallgeschwindigkeit erreicht wird. Auf diese Weise werden die in der Luft befindlichen Bakterien in die Kochsalzlösung abgeschieden. /71/

Die Dauer der Probennahme sollte dabei zwischen 10 und 60 Minuten liegen. Die sich anschließenden Schritte der Probenaufbereitung, um die Einheit KBE/m<sup>3</sup> zu erhalten, werden in VDI 4253 Blatt 3 beschrieben. Besonders zu beachten ist hierbei die Anlegung der Verdünnungsreihe. Diese wird erstellt, indem jeweils 1 ml der vorherigen Verdünnung mit 9 ml Kochsalzlösung verdünnt wird. Die Verdünnungsreihen werden auf Nährböden ausgestrichen und bei 22 °C 7 Tage oder bei 36 °C 44 Stunden bebrütet. Für einen Nährboden mit 80 mm Durchmesser sollte die Zahl der Bakterienkolonien zwischen 20 und 150 liegen. Es werden maximal zwei Verdünnungsstufen berücksichtigt. /72/ In der Richtlinie ist auch eine Formel angegeben, um die KBE/m<sup>3</sup> zu berechnen. Allerdings weicht diese Formel von der in der DIN angegebenen ab.

Für die Bestimmung der Pilze könnte die VDI-Richtlinie 4252 Blatt 2 herangezogen werden. Diese empfiehlt die Probennahme in einer Höhe von 1,5 m mit einem Polycarbonatfilter mit einer Porengröße von 0,8 µm und darüber einem Gelatinefilter mit einer Porengröße von 3 µm. Da die Luft von unten in den Probenahmekopf gesaugt wird, trifft diese zuerst auf den Gelatinefilter. Da Gelatinefilter bei einer hohen Luftfeuchtigkeit aufgelöst werden können, dient der Polycarbonatfilter gleichzeitig als Stütze und Sicherheitsfilter. Die Probennahmezeit sollte zwischen zehn Minuten und 24 Stunden liegen. /73/ Für die Kultivierung wird in VDI 4253 Blatt 2 DG-18-Agar vorgeschrieben. Platten mit diesem Nährboden können bereits fertig gekauft oder nach Anleitung in der Richtlinie selbst hergestellt werden. Damit die Erstellung einer Verdünnungsreihe, wie im vorherigen Teil bei den Bakterien beschrieben, erfolgen kann, ist es notwendig, die auf den Filtern befindlichen Pilze zu lösen. Dafür werden die Filter glatt in einen Weithals-Erlenmeyerkolben gelegt. Dazu werden 10 ml Kochsalzlösung (0,9 % NaCl mit 0,01 % Tween® 80) gegeben. Darin werden die Filter bei 35-40 °C 15 Minuten geschüttelt. Nach dem Herstellen der Verdünnungsreihe werde 0,1 ml der jeweiligen Stufe auf einem Boden verteilt. Es ist eine Dreifachbestimmung vorzunehmen. Mesophile Schimmelpilze werden bei 25 °C inkubiert. Die Auszählung erfolgt ab dem zweiten Tag alle ein bis zwei Tage, bis zu sieben Tage. Die Inkubation thermotoleranter Schimmelpilze erfolgt bei 37 °C. *Aspergillus fumigatus* wird bei 45 °C inkubiert. Aufgrund des schnellen Wachstums der thermotoleranten Pilze erfolgt deren Auszählung letztmalig am dritten Tag. Durch Bewegung der Agarplatten können aus freigesetzten Sporen Sekundär-Kolonien entstehen. Diese dürfen nicht ausgezählt werden. /74/ Die für die KBE-Berechnung angegebene Formel weicht erneut von der Vorgabe in der Norm ab.

Für die Auswertung der eigenen Messungen wird ein einfacheres Verfahren angewandt, mit dem die Berechnung der Anzahl an Bakterien und Pilze in einem Kubikmeter Luft möglich ist. Eine Petrischale mit entsprechendem Nährboden wird für 15 Minuten geöffnet. Anschließend wird die Petrischale wieder verschlossen. Bakterien werden bei 37 °C für 24–48 h, Pilze 10 Tage bei 25 °C inkubiert. Anschließend erfolgt eine Auszählung der entstandenen Kolonien. Für die Bestimmung der Bakterienanzahl in 1 m<sup>3</sup> Luft wird die Koloniezahl in die Gleichung von Omeliański mit den Modifikationen von Gogoberize eingesetzt. /67; 68/ Diese ist ausführlich bei der Auswertung der mikrobiologischen Untersuchung dargestellt.

## 8 Schwermetalle

### 8.1 Charakterisierung und Definition

Die Definition von Schwermetallen ist nicht eindeutig. Die Definition kann über das Atomgewicht, die Ordnungszahl, die chemischen/toxikologischen Eigenschaften, sowie über die Dichte erfolgen. 2002 hat die IUPAC eine Zusammenstellung der in der wissenschaftlichen Literatur gefundenen Definitionen veröffentlicht. Insgesamt wurden 38 Definitionen aus den fünf Klassen gefunden, sowie zwei vor 1936 gebräuchliche. In den meisten Fällen werden Schwermetalle über die Dichte definiert. Dabei werden verschiedene Werte zur Charakterisierung herangezogen. Bei diesen beginnt die Bezeichnung als Schwermetall ab einer Dichte von  $3,5 \text{ g/cm}^3$  oder maximal ab einer Dichte von  $7 \text{ g/cm}^3$ . Die meisten Quellen geben den Beginn mit  $5 \text{ g/cm}^3$  an. Anders als der Name vermuten lässt, werden nicht nur Metalle unter diesem Begriff zusammengefasst, sondern auch Halbmetalle. Des Weiteren ist dieser Begriff mit einer negativen Konnotation belegt. Oft werden Schwermetalle als giftig angesehen, doch es gibt auch Elemente, die essentiell für den Menschen sind. Diese „guten“ Schwermetalle werden auch als Spurenelemente bezeichnet./75, S. 641; 76/ Als Beispiel sei hierfür Eisen genannt. Mit einer Dichte von über  $7,4 \text{ g/cm}^3$  fällt es unter die gebräuchlichste Definition eines Schwermetalls.

### 8.2 Emission

Schwermetalle kommen natürlich in unterschiedlicher Konzentration in den verschiedenen Bodenarten vor. Der größte Teil der anthropogen emittierten Schwermetalle stammt aus Verbrennungsprozessen, insbesondere der Kohle- und Öl-Verbrennung. /77/ Durch das Verbot des verbleiten Benzins konnten die Emissionen des Straßenverkehrs und auch die gesamten Schwermetallemissionen gesenkt werden.

### 8.3 Wirkung auf den Menschen, Pflanzen

Da Schwermetalle nicht abgebaut werden können, reichern sich diese ähnlich wie die Dioxine und Furane in der Nahrungskette an. Pflanzen nehmen diese über den Boden auf, sind jedoch nicht immer für die Pflanze schädlich, sodass die größte Gefahr in der weiteren Anreicherung in der Nahrungskette besteht. Bei Menschen können Schwermetalle zur Schädigung des Nervensystems führen, sowie auf Herz, Kreislauf, Nieren, Leber und Magen schädigende Wirkung haben. /78, S. 143–146/

## 8.4 Grenzwerte

Eine gemeinsame Betrachtung der Emissionswege der Schwermetalle und deren Wirkung auf die menschliche Gesundheit ist nicht möglich, da diese Stoffe keine spezifischen Eigenschaften haben. Die meisten werden als kanzerogen eingestuft oder stehen zumindest im Verdacht. In der MAK- BAT-Werte Liste 2015 werden Arsen, Cadmium, Chrom(VI) Nickel und deren jeweilige Verbindungen zur Kategorie 1 gezählt. Blei und dessen Verbindungen werden der Kategorie 2 zugeordnet. Der Kategorie 1 und 2 werden Stoffe zugeordnet, bei denen am Menschen oder durch Tierversuchen nachgewiesen wurde, dass diese krebserregend sind. Für diese Stoffe wird kein MAK und auch kein BAT-Werte vergeben. Dies liegt daran, dass selbst die kleinsten Konzentrationen nicht als gefahrlos angesehen werden können. Die Schwermetalle Quecksilber und Selen, die der Kategorie 3B zugeordnet werden, sind nur nicht höher eingestuft, da hierfür nicht genügend Untersuchungsergebnisse verfügbar sind. Es liegen jedoch Anzeichen für eine krebserzeugende Wirkung vor. Aus diesem Grund ist die Einstufung vorläufig. Der MAK-Wert für diese beiden Stoffgruppen wird mit  $0,02 \text{ mg/m}^3$  angegeben. /58, S. 134–136/ In der TRGS 900 ist der gleiche Wert für Quecksilber angegeben. Für Selen wird allerdings  $0,05 \text{ mg/m}^3$  angegeben. /42, S. 39/

Emissionswerte für wenige Schwermetalle werden in der 17. BImSchV angegeben. Diese regelt die „Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen“ /24, S. 1/ In der Verordnung wird der Begriff Schwermetalle wie selbstverständlich verwendet ohne eine genaue Definition anzugeben, welche Stoffe dazu gezählt werden. Die Angabe der Grenzwerte erfolgt dann unter der Überschrift der krebserzeugenden Stoffe in der Anlage 1. Die Schwierigkeit bei der Bewertung der Schwermetallemissionen ist, dass die angegebenen Grenzwerte sich immer auf eine Gruppe von Stoffen beziehen. Das bedeutet, dass die Summe der Konzentrationen aller Stoffe in der jeweiligen Gruppe nicht größer als der Grenzwert sein darf. Teilweise sind die Stoffe auch mehr als einer Gruppe zugeordnet. Insgesamt werden vier Gruppen verwendet, wobei eine davon Dioxine und Furane sind. Wie in der Verordnung werden unter den Namen der Elemente auch die dazugehörigen Verbindungen verstanden. Für Quecksilber und seine Verbindungen ist ein Halbstundenmittelwert von  $0,05 \text{ mg/m}^3$ , ein Tagesmittelwert von  $0,03 \text{ mg/m}^3$  und ein Jahresmittelwert von  $0,01 \text{ mg/m}^3$  vorgeschrieben. Es gilt entweder die eine oder die andere c-Gruppe.

Die Gruppen c sind nicht in 2010/75/EU enthalten, bei der Gruppe b ist Zinn nicht mit dabei. /23, S. 68/

Tabelle 10: Emissionsgrenzwerte Schwermetalle /24, 20 f.; 23, S. 68/

	Stoffe	Emissionsgrenzwert [mg/m <sup>3</sup> ]
	Quecksilber	0,05
a	Cadmium + Thallium	0,05
b	Antimon + Arsen + Blei + Chrom + Cobalt + Kupfer + Mangan + Nickel + Vanadium + Zinn	0,5
c	Arsen (außer Arsenwasserstoff) + Benzo(a)pyren + Cadmium + wasserlösliche Cobaltverbindungen + Chrom(VI)verbindungen (außer Bariumchromat und Bleichromat)	0,05
c	Arsen + Benzo(a)pyren + Cadmium + Cobalt + Chrom	0,05

Im Bericht für die Kläranlage finden sich Grenzwerte für jeden einzelnen der dort gemessenen Stoffe. Es fehlt jedoch eine Angabe, auf welcher Basis die angegebenen Konzentrationen beruhen. Für Cadmium, Thallium und Quecksilber ist eine Konzentration von 0,05 mg/m<sup>3</sup> angegeben. Es wird jedoch nicht aufgeführt, ob es für diese als Summe gilt oder für jedes einzelne. Für die anderen gemessenen Stoffe (Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium) ist laut dieser Quelle eine Konzentration von 0,5 mg/m<sup>3</sup> zulässig.

Bei den Immissionen gibt es verschiedene Grenzwerte. Der erste Unterschied wird schon an der Einheit deutlich. Zum einen ist dies die Schadstoffdeposition. Diese wird in der Einheit µg/(m<sup>2</sup>d) angegeben. Eine Schadstoffdeposition ist die Ablagerung des Stoffes. Infolgedessen kann es zur Anreicherung oder zur Ausbreitung und also der Belastung des Bodens, Wassers oder Grundwassers führen. Das andere ist die als Konzentration angegebene Immission, z.B. mg/m<sup>3</sup>. In der TA Luft sind für Schwermetalle in der anorganischen Staubfraktion Grenzwerte angegeben. Wie bereits die Emissionen in der 17. BImSchV werden auch die Immissionen in der TA Luft in drei Gruppen eingeteilt. Ebenfalls analog beziehen sich die Konzentrationsangaben immer auf die Summe der Konzentration aller Stoffe der jeweiligen Gruppe. Eine Ausnahme bildet die als Klasse I bezeichnete Gruppe. In dieser gelten diese für jeden einzelnen Stoff. Liegen Stoffe der Klasse I und II vor, gelten die Werte der Klasse II. Wenn Stoffe der Klasse III mit vorliegen, gelten deren Grenzwerte. Fett sind die in den erhaltenen Daten enthaltenen Stoffe. /49/

Tabelle 11: Emissionsgrenzwerte nach TA Luft /49, 50 f./

Klasse	Stoffe	Massenstrom [g/h]	Massenkonzentration [mg/m <sup>3</sup> ]
I	<b>Hg, Tl</b>	0,25	0,05
II	<b>Pb, Co, Ni, Se, Te</b>	2,5	0,5
III	<b>Sb, Cr, CN, F, Cu, Mn, V, Sn</b>	5	1

Arsen, Cadmium und Nickel sind den krebserregenden Stoffen zugeordnet und werden in der TA Luft unter 5.2.7.1.1 der Klasse I zugeordnet. Diese ist identisch mit der zuerst genannten c-Gruppe der 17. BImSchV.

Die Immissionswerte sind nicht in einer einzigen Vorschrift zusammengefasst, sondern in verschiedenen zu finden. Die Vorgaben der EG 2008/50 und der EG 2004/107 wurden in der 39. BImSchV umgesetzt. Es ist jedoch nicht für alle in den Berichten über die Emission der Kläranlage angegebenen Stoffe auch ein Immissionsgrenzwert vorhanden.

Neben den Immissionsgrenzwerten gibt es auch zu manchen Stoffen Depositionswerte. Da diese in den Berichten für die Kläranlage jedoch nicht gemessen wurden, werden die hier auch nicht berücksichtigt.

Obwohl es nur für wenige Schwermetalle Emissionsgrenzwerte gibt, werden die Emissionsdaten von Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Selen, Quecksilber und Zink gesammelt. Dies geschieht im Rahmen des *The European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) durch das Centre on Emission Inventories and Projections(CEIP)*. Diese beruhen auf dem UNECE-Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP). Das 1983 in Kraft getretene Abkommen wurde mittlerweile von 51 Ländern ratifiziert. Die Daten dieser 51 Länder von 1990 bis momentan 2014 sind im Internet [abrufbar](http://webdab.umweltbundesamt.at/official_country_trend.html?cgiproxy_skip=1) unter [http://webdab.umweltbundesamt.at/official\\_country\\_trend.html?cgiproxy\\_skip=1](http://webdab.umweltbundesamt.at/official_country_trend.html?cgiproxy_skip=1).

Im Gegensatz zu den Emissionen werden die Immissionen von den einzelnen Bundesländern eigenständig erfasst und veröffentlicht. Eine einheitliche Veröffentlichung erfolgt nicht. Des Weiteren werden unterschiedliche Messverfahren eingesetzt.



## 9 Thermische Behaglichkeit

### 9.1 Begriffsbestimmung

Die thermische Behaglichkeit ist keine Größe, die allgemeingültig gemessen oder berechnet werden kann, vielmehr ist es eine subjektive Größe. Die Haupteinflussgrößen auf die thermische Behaglichkeit sind Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und die Wärmestrahlung. Wenn man versucht es objektiv zu sehen, kann man davon ausgehen, dass im thermisch behaglichem Bereich der Wärmehaushalt des Menschen ausgeglichen ist. Dies bedeutet, dass die erzeugte und die abgegebene Wärme im Gleichgewicht stehen. Daraus resultieren weitere Einflussgrößen, die jedoch nur abgeschätzt werden können. Auf der wärmeproduzierenden Seite ist dies der Energieumsatz. Der Energieumsatz setzt sich aus einem Grundumsatz und einem aktivitätsabhängigen Teil zusammen. DIN EN 27243 teilt den Energieumsatz in fünf Stufen ein. Der Energieumsatz wird in  $W/m^2$  oder in met (metabolic rate = Grundumsatz/Stoffwechselrate) angegeben. Dabei ist  $1 \text{ met} = 58,2 \text{ W/m}^2$ . Diese reichen von 0, einem ruhenden Zustand bis hin zu Stufe 4, einem sehr hohen Energieaufwand. Die in der folgenden Tabelle dargestellten Werte sind der VDI 3802 Blatt 1 entnommen. Diese ist übersichtlicher, weist jedoch weniger Beispiele als die DIN auf. /79, S. 4; 80, S. 23–24/

Tabelle 12: Energieumsatz nach DIN EN 27243 aus /79, S. 4; 80, S. 24/

Stufe	Durchschnittlicher Energieumsatz		Beispiele
	In $W/m^2$	In W (bei einer mittleren Körperoberfläche von $1,8 \text{ m}^2$ )	
0: Ruhend	65	117	Ruhen
1: Geringer Energieumsatz	100	180	Ruhiges Sitzen
2: Mittlerer Energieumsatz	165	297	Andauernde Hand-, Arm-, Bein-, Rumpfarbeit
3: Hoher Energieumsatz	230	414	Schwere Arm-, Rumpfarbeit
4: Sehr hoher Energieumsatz	290	522	Sehr schwere Tätigkeit mit maximaler Geschwindigkeit

Auf der Seite des Energieverlusts steht diesem die getragene Kleidung gegenüber. Diese führt zu einer Isolation und verhindert, dass Wärme abgegeben werden kann. Angegeben wird diese in  $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$  oder mit der Einheit clo. Dieses leitet sich von clothing value ab. 1clo entspricht dabei  $0,155 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ . Die Isolationswerte für Arbeitskleidung und alltägliche Bekleidung können aus der Tabelle C.1 der DIN EN ISO 7730 entnommen werden. /81, S. 23/

## 9.2 Beurteilungsmaßstäbe PMV, PPD und WBGT

Eine Möglichkeit, die thermische Behaglichkeit zu bewerten, ist der dimensionslose PMV-Index. PMV steht dabei für Predicted Mean Vote = Vorausgesagtes mittleres Votum. Das dadurch erhaltene Ergebnis soll dem Urteil einer großen Menschenmenge entsprechen. Die Einteilung erfolgt in die sieben Kategorien, die in der nachfolgenden Abbildung 16 auf der linken Seite aufgeführt sind. Die Bestimmung erfolgt iterativ über ein Gleichungssystem. Das Gleichungssystem berücksichtigt die sechs Hauptparameter. Für jeden dieser Parameter ist ein Anwendungsbereich angegeben. Der Index ist nicht dafür ausgelegt, extreme Situationen zu bewerten. Daher sollte die Anwendung nur von der Stufe -2 bis zur Stufe + 2 erfolgen. Die sechs Hauptparameter und deren Grenzwerte sind:

<i>„Energieeinsatz:</i>	$46-232 \text{ W/m}^2 = 0,8 - 4 \text{ met}$
<i>Bekeidungsisolation:</i>	$0-0,310 \text{ K}/(\text{Wm}^2) = 0 - 2\text{clo}$
<i>Lufttemperatur:</i>	$10 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Mittlere Strahlungstemperatur:</i>	$10 - 40 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>relative Luftgeschwindigkeit:</i>	$0 - 1 \text{ m/s}$
<i>Wasserdampfpartialdruck:</i>	$0 - 2700 \text{ Pa}''/81, \text{ S. } 7/$

Im direkten Zusammenhang damit steht der PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Dieser berechnet die Anzahl der voraussichtlichen Personen, die mit den Umgebungsbedingungen unzufrieden sind. Die Angabe der Unzufriedenen erfolgt quantitativ. Die Einteilung erfolgt wie beim PMV in der 7-stufigen Skala. Als unzufrieden werden alle betrachtet, die -3, -2 +2, +3 angeben. Die PPD-Bestimmung erfolgt aus dem zuvor bestimmten PMV-Index. Die Bestimmung erfolgt über die Formel. /73, S. 8/

$$PPD = 100 - 95 * e^{(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2)} \quad [20]$$

Aus dieser Gleichung resultiert die in der nachfolgenden

Abbildung 16 auf der rechten Seite dargestellte Glocken-Kurve.

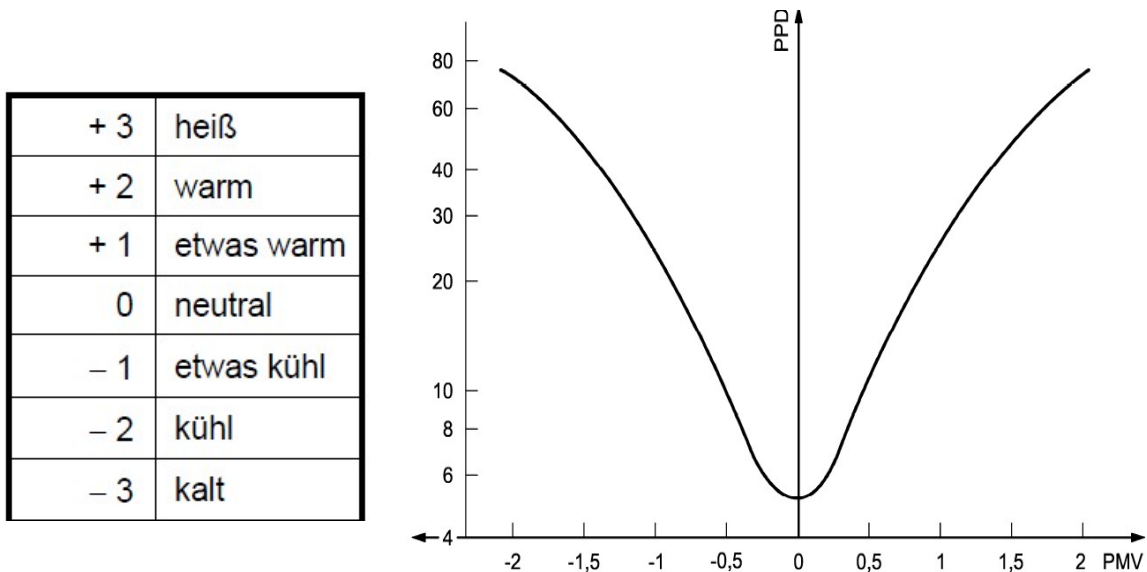


Abbildung 16: PMV und PPD Beurteilungsskala /81, S. 6–9/

Neben der thermischen Unbehaglichkeit des gesamten Körpers, wie es der PMV und der PPD ausdrückt, kann die thermische Unbehaglichkeit auch lokal hervorgerufen werden. Die lokale Unbehaglichkeit resultiert z.B. aus Zugluft oder aus zu hohen vertikalen Temperaturunterschieden. Die vertikalen Unterschiede resultieren aus zu warmen oder zu kalten Decke oder Böden. Diese werden vor allem bei leichten, meist sitzenden Tätigkeiten wahrgenommen.

Eine weitere Möglichkeit der Bewertung der thermischen Behaglichkeit ist die WBGT (Wet bulb globe temperature). Sie ist nur ein Maß dafür, ob eine Wärmebelastung vorliegt oder nicht. Des Weiteren ist diese für den warmen und heißen Bereich gedacht und daher eigentlich nicht für den thermisch behaglichen Bereich geeignet. Die Berechnungsvorschriften dazu finden sich bei der Vorstellung der verwendeten Messgeräte. Um die tatsächliche Wärmebelastung eines Menschen besser darzustellen, wird die  $WBGT_{eff}$  verwendet. Diese berücksichtigt noch die Kleidung. Dafür werden Kleidungsanpassungsfaktoren (CAF) verwendet. Diese sind im Anhang F der DIN EN ISO 7243 für einige Varianten dargestellt. Bei normaler Berufskleidung, ist dieser Faktor null, da diese als Referenzwert verwendet wird. Die Einbeziehung erfolgt durch Addition zum WBGT. /33, S. 8–21/ Die DIN EN 27243 soll in Zukunft durch DIN EN ISO 7243 ersetzt werden, die bisher nur als Entwurf vorliegt. Bisher wurde DIN EN 27243 aber noch nicht zurückgezogen und es wurde auch noch kein Datum für die Zurückziehung bekanntgegeben. Der Energieumsatz wird unterschiedlich angegeben. In der

DIN EN erfolgt eine Bereichsangabe, in der DIN EN ISO ist ein einzelner Wert angegeben. Der einzelne Wert entspricht näherungsweise dem Mittelwert des angegebenen Bereichs. Die eine Angabe erfolgt als WBGT und die andere als  $WGT_{eff}$ . Einen Unterschied dürfte das nicht ausmachen, da normale Arbeitskleidung angenommen wird, deren CAF=0 ist. Bei den Referenzgrenzwerten/Richtwertem gibt es zwischen diesen beiden Normen geringfügige Unterschiede. Eine Übersicht ist in der Nachfolgenden Tabelle gegeben. /33, S. 11; 79, S. 6/

Tabelle 13: WBGT-Referenztemperaturen /33, S. 11; 79, S. 6/

Norm	Energieumsatz Klasse				
	0	1	2	3	4
DIN EN 27243 hitzeklimatisiert	33,00	30,00	28,00	25,00	23,00
DIN EN ISO 7243 hitzeklimatisiert	32,40	30,90	28,30	25,80	23,50
DIN EN 27243 nicht hitzeklimatisiert	32,00	29,00	26,00	22,00	18,00
DIN EN ISO 7243 nicht hitzeklimatisiert	30,10	28,30	25,10	22,00	19,20

# 10 Auswertung

## 10.1 Dioxine und Furane

Im folgenden Diagramm ist die Entwicklung der emittierten Dioxinkonzentration in den Jahren 2012 und 2013 dargestellt. In diesem Zeitraum wurden vier Messungen durchgeführt. Es erfolgte in jedem Jahr eine Messung in der ersten Jahreshälfte (März oder Juni), sowie eine am Jahresende. Die Messungen erfolgten nicht immer zur gleichen Tageszeit. Da die Anlage jedoch für einen dauerhaften Betrieb ausgelegt ist, wird dieser Einfluss vernachlässigt. Bei der Anlage soll die Verteilung gleichmäßig auf beiden Linien erfolgen. Aus diesem Grund sind die dargestellten Größen wenn möglich der Mittelwert aus beiden Linien. Am 02.12.2013 wurde nur die Linie 2 gemessen. Um hervorzuheben, welchen Unterschied es macht, auf welche Bedingungen die gemessene Größe bezogen wird, sind im Diagramm vier signifikante Bedingungen dargestellt. Zum einen ist dies die Konzentration unter Messbedingungen. Die zweite Größe bezieht sich auf Normalbedingungen (273K, 101,3 kPa). Die dritte Größe sind die Vertragsbedingungen, bei denen zusätzlich zu den Normalbedingungen ein maximaler Wasserdampfgehalt von 5g/kg<sub>Abgas</sub> festgelegt wurde. Die letzte Größe ist die für den Vergleich mit den Vorschriften notwendige Beziehung auf einen Sauerstoffgehalt von 11 % im Abgas. Bei allen Größen mit Ausnahme der letzten fällt auf, dass diese Punkte sich gleich zueinander verhalten. Die Vertragsbedingungen und Normalbedingungen sind dicht beieinander. Dies lässt auf einen geringen Wasserdampfgehalt schließen. Die Messbedinugungskurve ist vor allem bei den ersten Werten deutlich von den beiden anderen entfernt. Dies resultiert aus der bei der Messung abweichenden Temperatur und Druck. Die auf den Sauerstoffgehalt bezogene Größe ist bei der Messung am 18.03.2012 deutlich weiter von den anderen entfernt. Dies resultiert aus einer geringfügig höheren Sauerstoffkonzentration. Wenn man sich den Trend insgesamt betrachtet, nimmt die Dioxin- und Furan-Konzentration bei 11 % O<sub>2</sub> stetig ab. Diese Reduzierung wäre jedoch nicht notwendig gewesen, da am Anfang der Grenzwert von 0,1 ng/m<sup>3</sup> um ca. das 15-fache unterschritten wurde. Am 02.12.2013 wäre sogar eine 70-fach größere Konzentration zulässig gewesen.

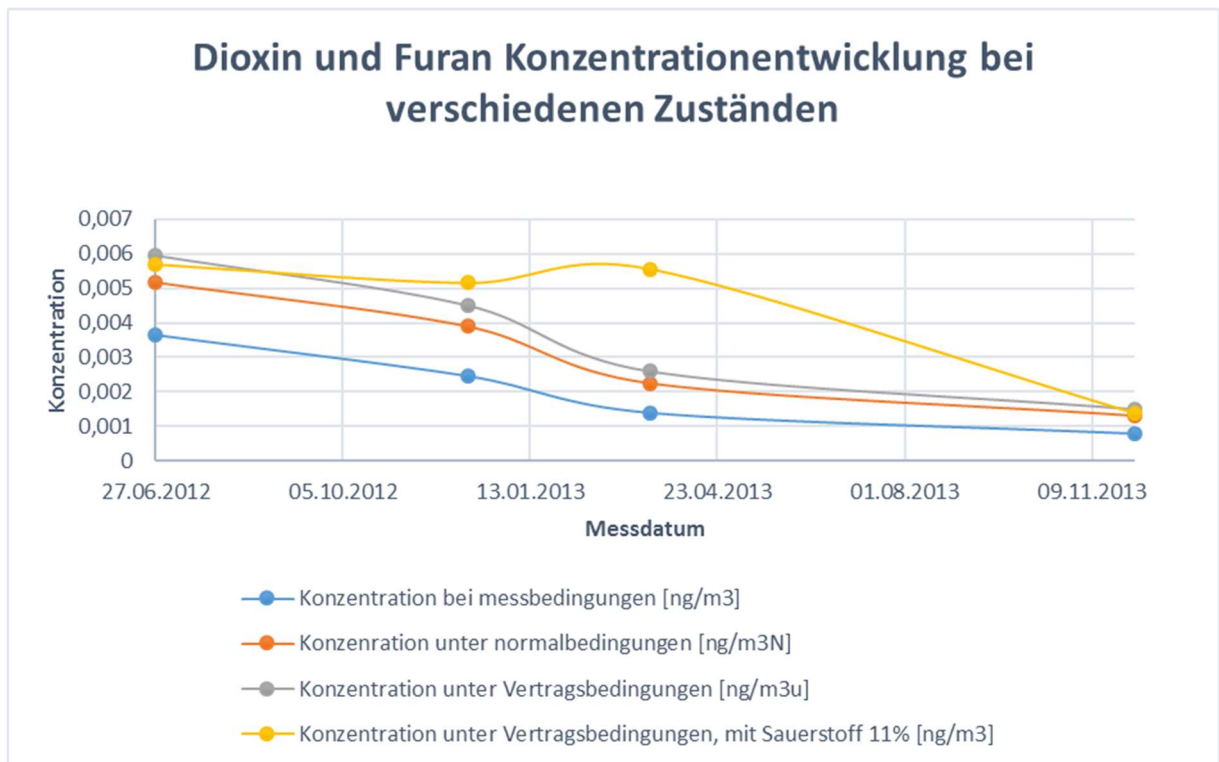


Abbildung 17: Dioxin und Furan Konzentrationsentwicklung

Auf eine Auswertung der Analyse der Probenzusammensetzung wird verzichtet, da in den meisten Fällen nicht gemessen werden konnte, bzw. nur eine Angabe erfolgt, dass die Konzentration unter einem Wert liegt. Dieser Wert resultiert aus dem Produkt des Volumenstroms und der kleinsten Konzentration, die mit dem Messverfahren nachgewiesen werden kann.

## 10.2 Staub

### 10.2.1 Emission

Die Emissionsmesswerte der Tagesmittelwerte von 01.01.2012 bis zum 31.12.2015 sind für beide Linien der Kläranlage im nachfolgenden Diagramm dargestellt. Um einen Vergleich mit dem Grenzwert durchführen zu können, ist die Umrechnung auf einen Bezugssauerstoff von 11 % erforderlich. Die Berechnungsvorschrift dafür ist unter anderem in der 17. BImSchV und Richtlinie 2010/75/EU angegeben. Dabei werden folgende Formelzeichen verwendet. /23, S. 75; 24, S. 30/

Tabelle 14: Formelzeichen-Umrechnung Sauerstoffgehalt /24, S. 30/

Abkürzung	Einheit	Name
$E_B$	$\text{mg}/\text{m}^3$	Massenkonzentration, bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
$E_M$	$\text{mg}/\text{m}^3$	gemessene Massenkonzentration
$O_B$	%	Bezugssauerstoffgehalt, in diesem Fall 11 %
$O_M$	%	gemessener Sauerstoffgehalt

/24, S. 30/

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} * E_M \quad [21]$$

Die 17. BImSchV schreibt für den Gesamtstaub eine maximale Konzentration von  $5 \text{ mg}/\text{m}^3$  vor. Weil die Wirbelschichtöfen jeweils eine Wärmeleistung von max. 4,07 MW haben und damit unter der Bezugsgröße von 50 MW liegt, gilt vom zuvor genannten Wert abweichend, für diese ein Grenzwert von  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ . /10, S. 26; 24, S. 9–10/ Dieser Grenzwert wurde während der gesamten Zeit nicht überschritten.

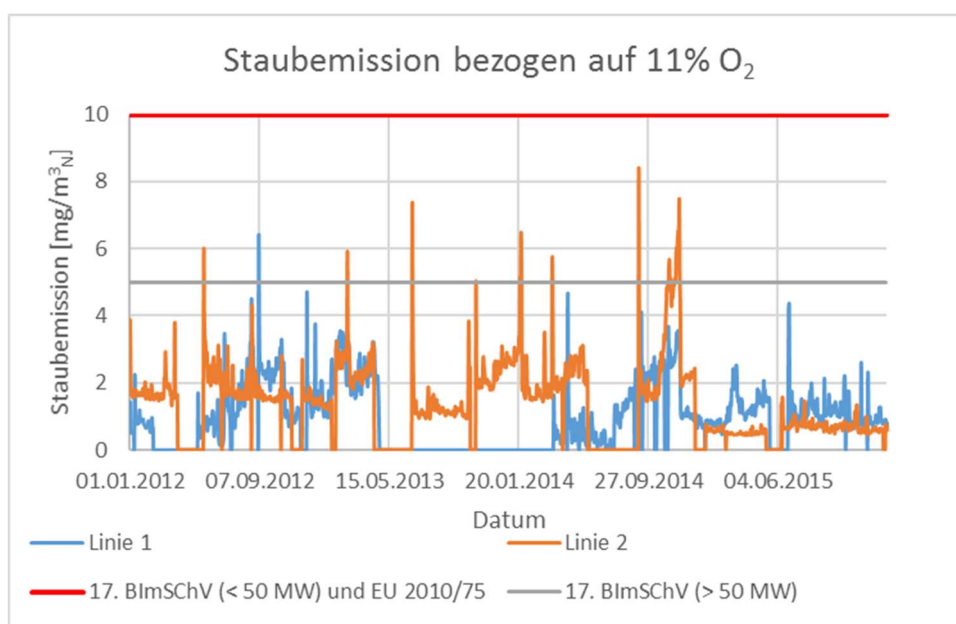


Abbildung 18: Staubemission beider Linien bezogen auf 11 %  $O_2$

### 10.2.2 Immission

Bei der ersten Messung waren beide Linien in Betrieb, bei der zweiten Messung nur eine. Aus diesem Grund ist es nicht zu empfehlen, einen Mittelwert zu bilden. Stattdessen bietet es sich an, den Einfluss unterschiedlich vieler betriebener Linien zu betrachten. Da für jeden

Betriebszustand nur eine Messung vorliegt, handelt es sich lediglich um eine Momentaufnahme. Diese ist nicht repräsentativ. Hinzu kommt, dass während der zweiten Messung, bei der nur eine Linie in Betrieb war, an der anderen Wartungsarbeiten durchgeführt wurden. Auch ist es nicht möglich, die gemessenen Werte mit den Immissions- oder Arbeitsplatzgrenzwerten zu vergleichen. Der Vergleich ist nicht möglich, da die Werte mit einem Partikelzähler ermittelt wurden. Dieser gibt die Werte in der Einheit Partikel/m<sup>3</sup> an. Eine weitere Schwierigkeit würde der Messbereich darstellen. Dieser entspricht keiner der üblichen Klassen (PM 2,5, PM 10 oder Gesamtstaub). Die Umrechnung in eine mit den Vorgaben vergleichbare Form wäre nur möglich, wenn sowohl die Partikelgrößenverteilung als auch das mittlere Gewicht der Partikel in den einzelnen Fraktionen bekannt wäre.

Besonders auffallend sind die Punkte 2 und 4 am 22.4. An diesen wurden ca. 275.000 Partikel/m<sup>3</sup> gezählt. Die beiden Messpunkte liegen auf derselben Seite des Gebäudes, zwischen den beiden Schornsteinen. Wichtiger dürfte jedoch die Tatsache sein, dass diese auch zwischen den Taschenfiltern der beiden Linien liegen. Durch die periodische Rückspülung könnte es zu einer Aufwirbelung von Staub kommen. Zumindest an Punkt vier wurde auch am 16.6. eine erhöhte Staubkonzentration nachgewiesen. Am Punkt zwei ist jedoch keine erhöhte Konzentration gemessen worden. Auffallend ist auch, dass am Punkt 5, 7 und 8 die Konzentration bei dem Betrieb einer Linie größer ist, als beim Betrieb beider Linien.

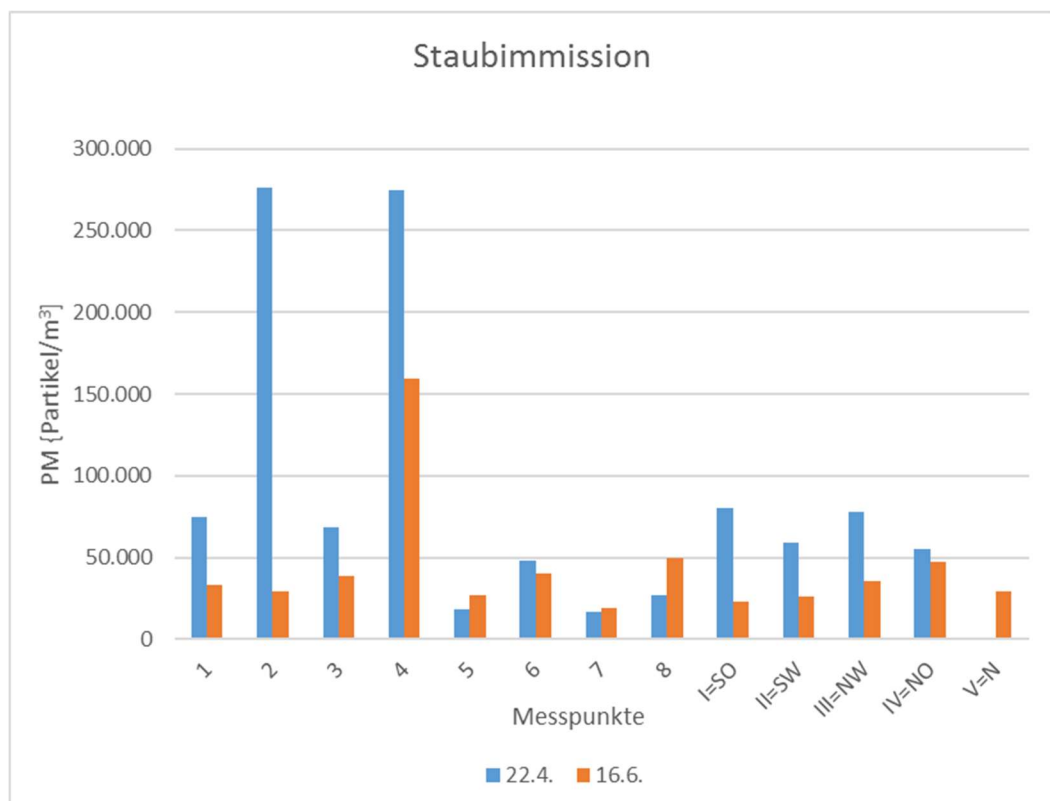


Abbildung 19: Staubimmission



### 10.3 Auswertung Sonstiger Messungen mit Babuca-A

Aufgrund der Berechnung der relativen Feuchtigkeit aus der Trocken- und Feuchttemperatur - insbesondere aus deren Differenz - lag es nahe, dass zwischen diesen ein Zusammenhang besteht. Dieser Zusammenhang konnte bei der Zugrundelegung aller Messdaten beobachtet werden. Es ist möglich eine lineare Trendlinie in das Diagramm zu legen. Wenn man die Daten einzeln betrachtet (nach Datum und Außen oder Innen getrennt), sind Unterschiede in der Abweichung von der Linearität festzustellen. Insbesondere die Trendlinie vom 22.4. stimmt sehr genau mit der gesamten Trendlinie überein. Die Trendlinien vom 16.6. innen und außen sind annähernd parallel verschoben. Lediglich die Trendlinie vom 22.4. innen weicht sowohl bei der Steigung als auch beim y-Achsenabschnitt ab.

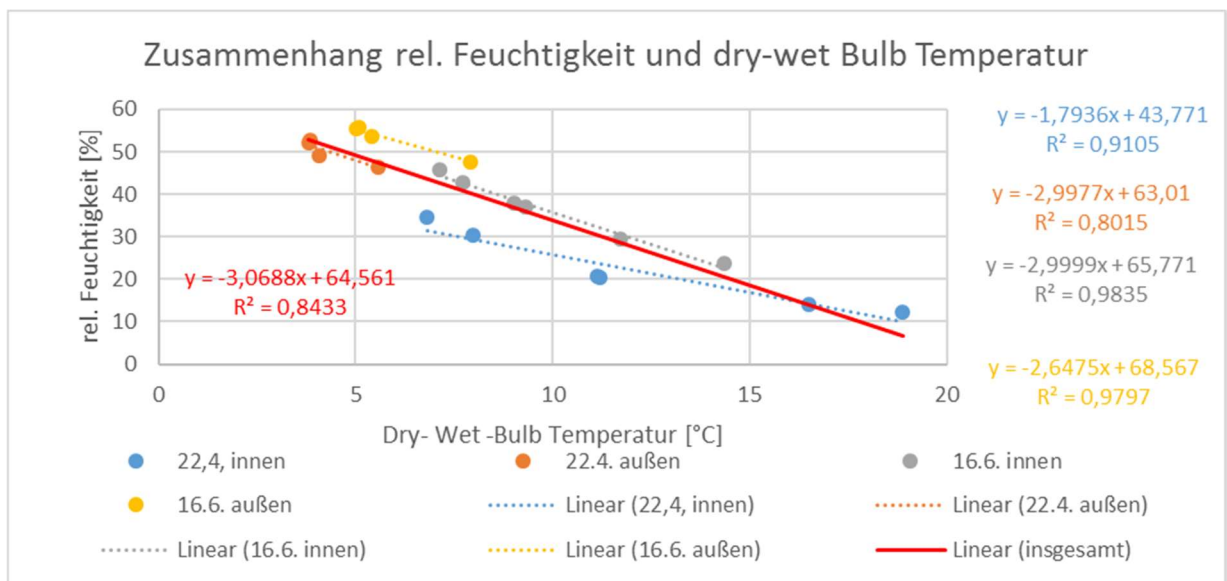


Abbildung 20: Zusammenhang rel. Feuchtigkeit und dry-wet-Bulb Temperatur

### 10.4 Mikrobiologie

Obwohl die Gleichungen auf den ersten Blick verschieden aussehen, sind beide doch identisch. Dies liegt zum großen Teil auch daran, dass unterschiedliche Zeichen für annähernd dasselbe verwendet werden.

Dabei ist

Y/Z: Anzahl der Bakterien/Pilze je  $m^3$

X/a: Anzahl der gezählten Kolonien

r: Radius der verwendeten Petrischale Angegeben in cm. In unserem Fall 4,5 cm

t: Expositionszeit, eingesetzt in Minuten. Diese betrug 15 Minuten.

Der letzte Unterschied der beiden Formeln ist der verwendete Faktor. Ob mit fünf im Zähler multipliziert wird oder durch 0,2 im Nenner dividiert führt zum selben Ergebnis. /67; 68/

**Bakterien:**

$$Y = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot X}{\pi \cdot r^2 \cdot t} \quad [22]$$

**Pilze:**

$$Z = \frac{a \cdot 10^4}{\pi \cdot r^2 \cdot 0,2 \cdot t} \quad [23]$$

Tabelle 15: Auswertung Mikrobiologie

Messpunkt		Bakterien		Pilze	
		Anzahl	[Bakterien/m <sup>3</sup> ]	Anzahl	[Pilze/m <sup>3</sup> ]
SO	I	16	838	50	2620
SW	II	10	524	62	3249
NW	III	9	472	32	1677
NO	IV	17	891	38	1991
1		37	1939	21	1100
		19	996		

In der PN-Z-04111-02 wird die Belastungssituation der Luft in drei Klassen eingeteilt. Bei den außen gemessenen Werten liegt keine Belastungssituation vor. Die beiden Proben, die an dem Messpunkt eins im Inneren des Gebäudes gemessen wurden, unterscheiden sich sehr stark. Auf der einen konnten sich doppelt so viele Kolonien entwickeln wie auf der anderen. Anhand von nur zwei Proben kann nicht abgeschätzt werden, welche die tatsächliche Belastungssituation genauer widerspiegelt. Es bestünde die Möglichkeit, einen Mittelwert aus beiden zu bilden. Ob dieser die Belastungssituation besser widerspiegelt als eine der beiden Proben ist jedoch fraglich.

Tabelle 16: Beurteilung der Belastungssituation Mikrobiologie /67/

[KBE/m <sup>3</sup> ]	Bakterien	Pilze
Keine Belastung	< 1000	3000 - 5000
Mittlere Belastung	1000 - 3000	5000 - 10000
Hohe Belastung	< 3000	<10000

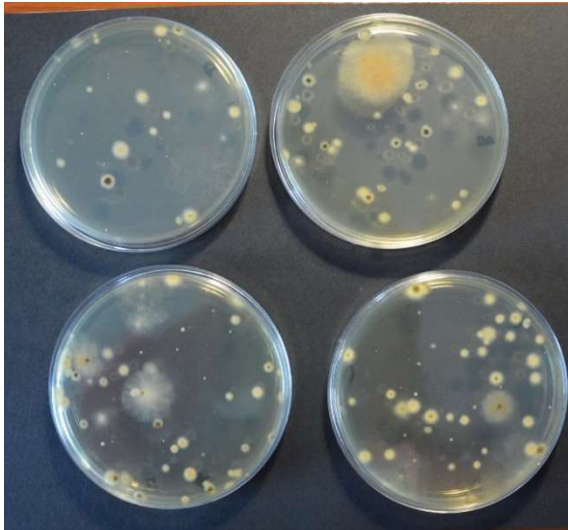


Abbildung 21: Pilze Außen

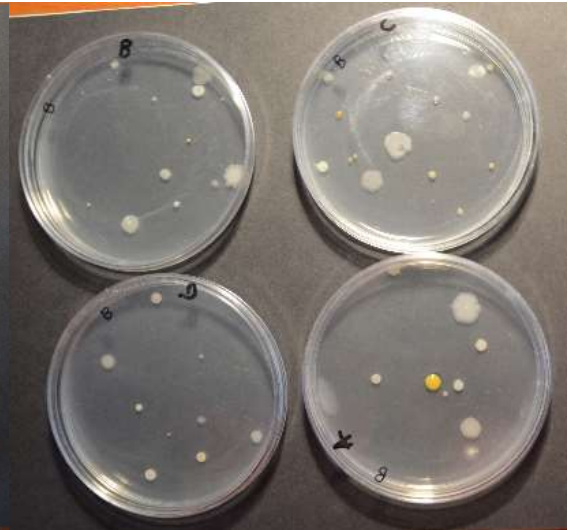


Abbildung 22: Bakterien Außen

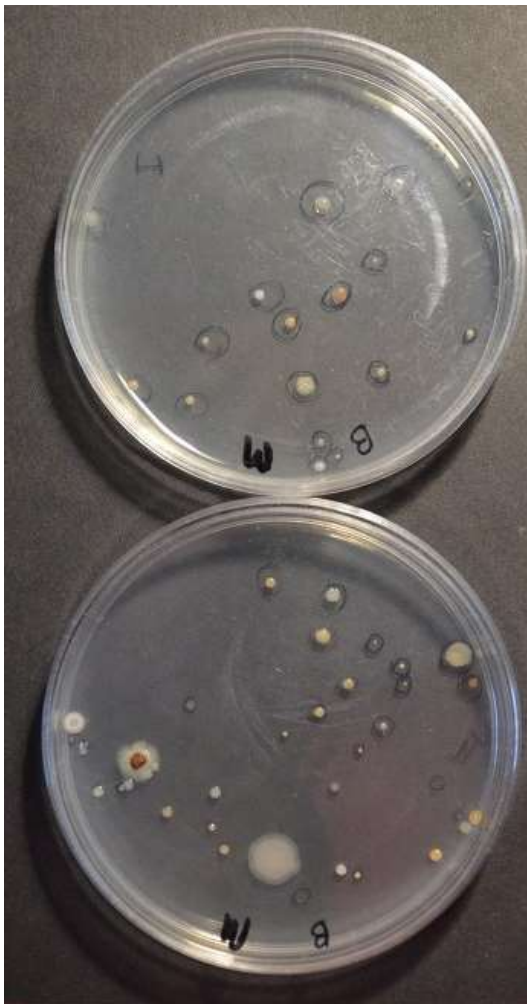


Abbildung 23: Pilze Innen



Abbildung 24: Bakterien Innen

## 10.5 Schwermetalle

Die Auswertung der Messung in den Berichten ist schon durch das durchführende Ingenieurbüro erfolgt. Dieses kam zu dem Ergebnis, dass keine Überschreitung festzustellen ist. Dies wird auch an den verwendeten Einheiten deutlich. Die Emissionsgrenzwerte sind in  $\text{mg}/\text{m}^3$  angegeben. Bei den Messungen war die Konzentration in den meisten Fällen jedoch so gering, dass diese unter der Nachweisgrenze im  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  lag.

### 10.5.1 Klärschlamm der GOS Lam

Im Klärschlamm wurden die in Tabelle 17 dargestellten Schwermetalle nachgewiesen. Die nachgewiesenen Konzentrationen an Schwermetallen stünden einer Nutzung als Dünger nicht im Weg. Bei den Schwermetallen darf kein Wert überschritten werden. Bereits eine einzelne Überschreitung würde zu einem Verbot des Ausbringens führen. Des Weiteren gilt es zu überprüfen, ob auch die weiteren Parameter der Vorabuntersuchung, die mindestens alle 6 Monate zu wiederholen ist, die Anforderungen erfüllen. /2, §3 Abs 5/ Neben den dort aufgeführten Grenzwerten gibt es auch noch Grenzwerte für PCB, PCDD/PCDF und AOX. Neben diesen Grenzwerten, die den Klärschlamm betreffen muss der Boden, auf den ausgebracht werden soll, spezifische Anforderungen erfüllen, die mindestens alle 10 Jahre zu wiederholen sind.

Dieser Untersuchungsaufwand lässt die Verbrennung des Klärschlammes als einfachere Lösung erscheinen.

Die in Klammern angegebenen Grenzwerte bei Cadmium und Zink gelten, wenn der Klärschlamm auf leichte Böden mit einem Tongehalt unter 5 % und einem pH-Wert von 5-6 ausgebracht werden soll. /2, S. 5/

Tabelle 17: Schwermetalle im Klärschlamm /10, S. 5; 2, S. 4-5/

	Grenzwert [mg/kg TS]	Gemessen [mg/kg TS]
Blei	900	57,06
Cadmium	10 (5)	5,84
Chrom	900	207,55
Kupfer	800	413,49
Nickel	200	138,92
Quecksilber	8	3,19
Zink	2500 (2000)	1553,73

## 10.6 Thermische Behaglichkeit

### 10.6.1 WBGTI <-> WBGTE

Der Einfluss der Sonneneinstrahlung ist im Gebäude so gering, dass die größte Abweichung 0,75 °C (Messpunkt 3, 22.4.) betrug. Erwartungsgemäß ist der Einfluss der Sonneneinstrahlung bei den draußen gemessenen Werten größer. Insbesondere trifft dies auf den 16.6. zu. An diesem Tag stand das Messgerät öfters in der Sonne. Dies spiegelt sich auch in den Messergebnissen wieder. An drei der vier Ecken tritt ein Unterschied von mehr als einem Grad auf. Der größte Unterschied wurde am Punkt II = SW gemessen. Der Unterschied beträgt hier 1,69 °C.

### 10.6.2 WBGTeff

Bei der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit mit der WBGT kommt es darauf an, welche Arbeitsaktivität und Bekleidungssituation angenommen wird. Für die folgende Betrachtung wird standardmäßige Arbeitskleidung angenommen. Dadurch gilt  $WBGT = WBGT_{eff}$ . Da insbesondere bei den innen gemessenen Werten ein detaillierter Vergleich mit den Richtwerten erforderlich ist, und bei diesen der Unterschied zwischen WBGTI und WBGTE sehr gering ist, erfolgt die folgende Betrachtung nur auf Grundlage der WBGTI-Werte. Die WBGTE-Werte sind trotzdem im sich anschließenden Diagramm enthalten.

Die Auswahl des Arbeitsniveaus gestaltet sich schwieriger, da dieses auch wechseln kann. Für die folgende Betrachtung wird ein Energieumsatz der Klasse drei angenommen. Als Beispiel für diese Klasse werden in der DIN EN ISO 7243 Tragen schwerer Materialien, Sägen und die Arbeit mit einem Vorschlaghammer verstanden. Die Klasse 3 entspricht einem Energieumsatz von 230 W/m<sup>2</sup> oder bei einer angenommenen Körperfläche von 1,8 m<sup>2</sup> 415 W. /80, S. 24; 33, S. 20/ Angewandt werden im Folgenden die Richtwerte aus der DIN EN ISO 7243. Dabei wird unterschieden zwischen hitzeklimatisiert und nicht hitzeklimatisiert.

Unter akklimatisierten Bedingungen wird bei einer Aktivität der Stufe drei lediglich an Punkt 7 der Richtwert überschritten. Mit 24,83 und 26,67 °C liegen die Messwerte von Punkt 6 aber sehr dicht an dem Richtwert. Bei der höchsten gemessenen Temperatur, am Punkt 7 29,17 am 22.4., wäre nur Arbeit der Klasse 1 bei einer Hitzeakklimatisation, anderenfalls nur eine Arbeit der Klasse null zu empfehlen. Bei der zweiten Messung an diesem Punkt wurden 27,98 °C gemessen. Für diese Temperatur wird unter Hitzeakklimatisation eine Tätigkeit maximal Klasse zwei und wenn keine Hitzeakklimatisation vorliegt der Klasse eins empfohlen. Neben den Messpunkten 6 und 7 wurde auch an Punkt drei am 16.6 der Richtwert für nichtklimatisierte Personen überschritten (23.64 °C). Am 16.6 lag der Messwert von Punkt vier (21,44 °C) nur knapp unter dem Richtwert (22 °C). An den anderen Messpunkten werden die

Empfehlungen für eine Arbeit der Klasse drei eingehalten, meistens sogar deutlich unterschritten. Bei dieser Betrachtung wird jedoch nicht das thermische Unbehagen aufgrund eines horizontalen Temperaturgefälles berücksichtigt.

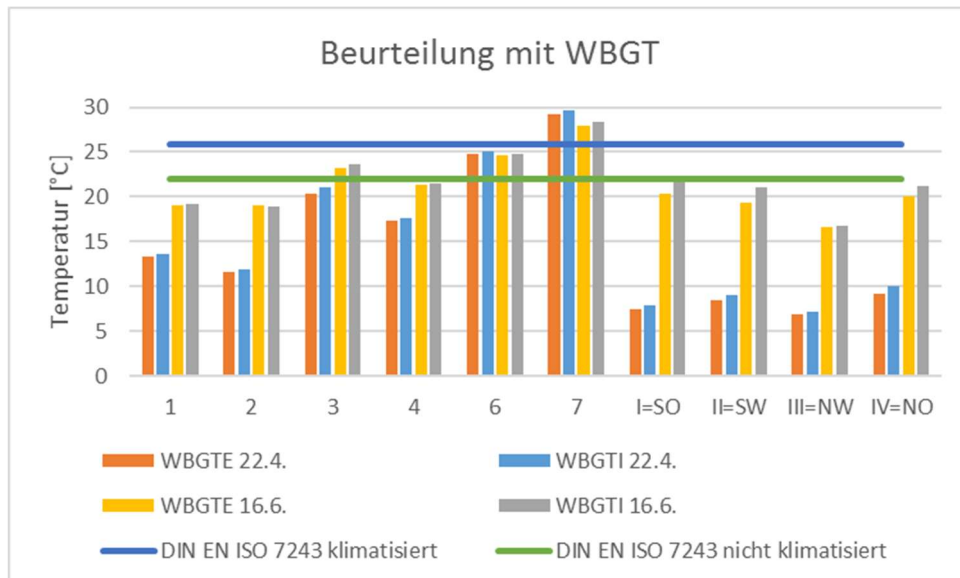


Abbildung 25: Beurteilung mit WBGT /33, S. 11/

### 10.6.3 PMV und PPD

Für die folgenden Bestimmungen wird  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ (m}^2\text{K)/W}$  angenommen. Dies entspricht näherungsweise der Arbeitskleidung. /81, S. 23/ Des Weiteren wird wie zuvor ein Energieumsatz von  $230 \text{ W/m}^2$  angenommen. Die Berechnung erfolgte mit dem BNB-Tool Thermischer Komfort des Fraunhofer Instituts. /82/ Das Ergebnisse des Berechnungsprogramm stimmen mit den Beispielergebnissen aus der DIN EN ISO 7730 überein. /81, S. 29/ Für die Berechnung war die Eingabe der Lufttemperatur, der Kugeltemperatur, der relativen Feuchtigkeit, der Luftgeschwindigkeit sowie des Kleidungsfaktors erforderlich. Die Berechnung erfolgte mit den Messdaten, die vom Babuc A ausgegeben wurden.

Die Bedingungen hätten nur am 22.04.2016 an den außen gemessenen Punkten die Mehrheit zufriedengestellt. Zu allen anderen Messzeiten und Messpunkten wird das PMV mit mindestens zwei angegeben. Für einen Großteil der Messwerte ist noch nicht einmal die Beurteilungsskala ausreichend. Das voraussichtlich kein thermisch behagliches Klima empfunden wird, kann aus einer der verschiedenen Einflussgrößen resultieren oder aber aus einer Kombination.

Da es schwierig ist, den Energieumsatz zu bestimmen, ist im Vergleich zu dem zuvor genannten auch eine Bestimmung mit einem mittleren Energieumsatz ( $165 \text{ W/m}^2$ )

durchgeführt worden. Bei dieser treten auch negative Werte für den PMV auf. Die äußeren Bedingungen liegen nach der Änderung des Energieumsatzes alle im neutralen Bereich, um 0 herum. Lediglich alle Messwerte vom 16.6. im Inneren des Gebäudes erfüllen die Anforderungen an die thermische Behaglichkeit nicht. Dies könnte zum einen aus der zum Teil deutlich höheren Luftgeschwindigkeit am 16.6. resultieren. Die erhöhte Luftgeschwindigkeit resultierte aus den geöffneten Türen. Zum anderen lagen die Temperaturen über denen vom 22.4, obwohl nur eine Linie in Betrieb und die andere gewartet wurde. Dies liegt höchstwahrscheinlich an der 10 °C wärmeren Außenluft.

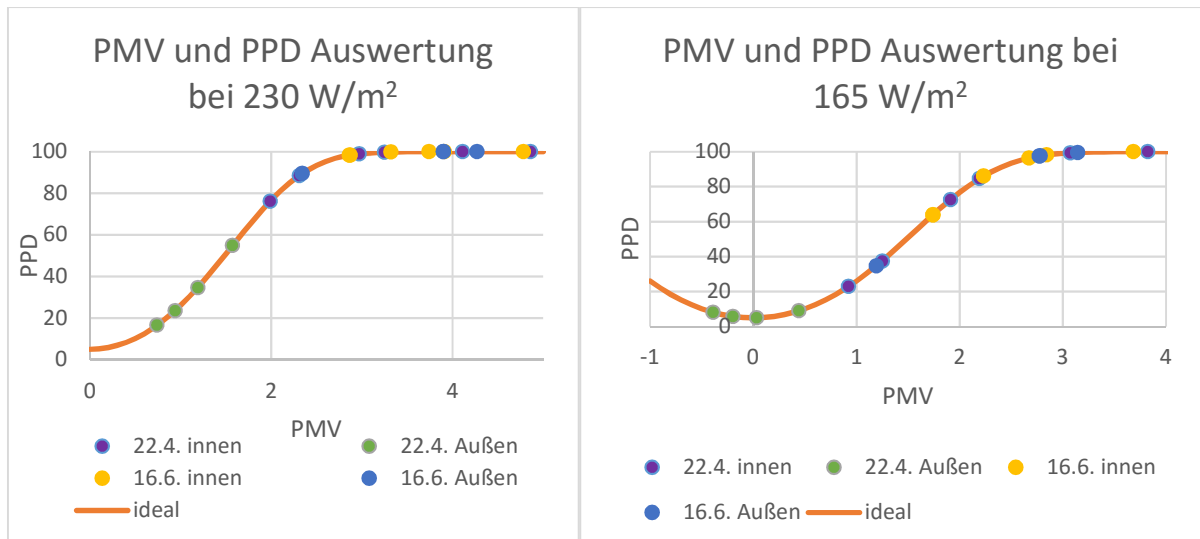


Abbildung 26: PMV und PPD Auswertung

## 10.7 Auswertung Thermische Behaglichkeit

Die im vorangegangenen Teil betrachteten Untersuchungsmethoden der thermischen Behaglichkeit veranschaulichen, wie schwer diese objektiv zu bewerten ist. Obwohl bei beiden Methoden nahezu dieselben Messgrößen und dasselbe Verständnis von thermisch behaglich zugrunde gelegt werden, sind die Ergebnisse gegensätzlich.

Bei der Beurteilung der thermischen Behaglichkeit mit dem WBGT ist es eine Ausnahme, dass der behagliche Bereich verlassen wird. Bei der Beurteilung mittels PMV und PPD ist jedoch die thermische Behaglichkeit eine Ausnahme.

## 11 Literaturverzeichnis

- 1 Benjamin Wiechmann, Claudia Dienemann, Dr. Christian Kabbe, Simone Brandt, Dr. Ines Vogel, Dr. Andrea Roskosch (2013): KLÄRSCHLAMMENTSORGUNG. in der Bundesrepublik Deutschland. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klaerschlammentsorgung\\_in\\_der\\_bundesrepublik\\_deutschland.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/klaerschlammentsorgung_in_der_bundesrepublik_deutschland.pdf), zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 2 AbfklärV: Klärschlammverordnung vom 15. April 1992 (BGBl. I S. 912), die zuletzt durch Artikel 74 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 3 86/278/EWG: Richtlinie 86/278/EWG des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/1986/278/oj>, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 4 Schmolke, Oliver (18. Legislaturperiode): Deutschlands Zukunft gestalten. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 5 Dr. Christoph Scheffknecht (2005): Klärschlammkompost - Abbauverhalten von Schadstoffen während der Kompostierung. Online verfügbar unter <https://www.vorarlberg.at/pdf/klaerschlammkompost.pdf>, zuletzt geprüft am 29.07.2016.
- 6 Ingenieurbüro Blumberg Ökotechnologie: Klärschlammvererdung. Online verfügbar unter <http://blumberg-engineers.com/de/10/klaerschlammerdung>, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 7 Zusammenfassung @ TU Braunschweig. Online verfügbar unter <https://www.tu-braunschweig.de/isww/forschung/vererdung/zusammenfassung>, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 8 Dr.-Ing. David Montag, Dipl.-Ing. Wibke Everding, Dipl.-Ing. Susanne Malms, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp, Dipl.-Geoök. Joachim Reinhardt, Dipl.-Biol. Horst Fehrenbach, Dr. Ute Arnold, Dr. Manfred Trimborn, Prof. Dr. Heiner Goldbach, Prof. Dr. Wolfgang Klett, Thomas Lammers (2015): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz, zuletzt geprüft am 28.07.2016.
- 9 Stemann, Jan; Kabbe, Christian; Adam, Christian: Phosphorrückgewinnung im Rahmen der Klärschlammbehandlung. – das EU-Projekt P-REX –. Online verfügbar unter [http://www.vivis.de/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&download=2](http://www.vivis.de/index.php?option=com_phocadownload&view=category&download=2)



83:klaerschlammbehandlungphosphorrueckgewinnung&id=61:klaerschlammltemid=221, zuletzt geprüft am 29.07.2016.

10 inż. Jacek Syga (2009): OPIS TECHNICZNY. Instalacja termicznego przekształcania osadów i skratek (ITP) -Technologia.

11 Rozbudowa i modernizacja Oczyszczalni Ścieków w Łodzi - Strona główna (2012). Online verfügbar unter <http://www.itpo.uml.lodz.pl/galeria-zdjec.html>, zuletzt aktualisiert am 14.06.2012, zuletzt geprüft am 26.07.2016.

12 UNdata | record view | City population by sex, city and city type. Online verfügbar unter [http://data.un.org/Data.aspx?d=POP&f=tableCode%3a240%3bcountryCode%3a616&c=2,3,6,8,10,12,14,16,17,18&s=\\_countryEnglishNameOrderBy:asc,refYear:desc,areaCode:asc&v=1](http://data.un.org/Data.aspx?d=POP&f=tableCode%3a240%3bcountryCode%3a616&c=2,3,6,8,10,12,14,16,17,18&s=_countryEnglishNameOrderBy:asc,refYear:desc,areaCode:asc&v=1), zuletzt geprüft am 11.07.2016.

13 GOŚ ŁAM: Krótki opis GOŚ ŁAM. Online verfügbar unter <http://www.gos.lodz.pl/pliki/page/pliki/43/5444016a19eeezal2.pdf>, zuletzt geprüft am 25.07.2016.

14 Dane Technologiczne - Grupowa Oczyszczalnia Ścieków w Łodzi Sp. z.o.o. Online verfügbar unter [http://www.gos.lodz.pl/dane-technologiczne\\_4,43.html](http://www.gos.lodz.pl/dane-technologiczne_4,43.html), zuletzt geprüft am 20.07.2016.

15 Oczyszczalnia - Grupowa Oczyszczalnia Ścieków w Łodzi Sp. z.o.o. Online verfügbar unter [http://www.gos.lodz.pl/oczyszczalnia\\_4.html](http://www.gos.lodz.pl/oczyszczalnia_4.html), zuletzt geprüft am 28.07.2016.

16 Denitrifikation (2009). Online verfügbar unter <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/d/denitrifikation.htm>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2009, zuletzt geprüft am 26.08.2016.

17 Mateusz Pomiotło: Oczyszczalnia ścieków w Łodzi | kierunekwodkan.pl. Online verfügbar unter <http://www.m.kierunekwodkan.pl/artukul,3057,oczyszczalnia-sciekow-w-lodzi.html>, zuletzt geprüft am 30.06.2016.

18 Veolia Water Technologies | Pyrofluid™ | Applications. Online verfügbar unter [http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/pyrofluid/en/features\\_and\\_benefits.htm](http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/pyrofluid/en/features_and_benefits.htm), zuletzt geprüft am 30.06.2016.

19 Bernd von der Heide: Möglichkeiten und Grenzen der SNCR-Verfahrens. Abfallwirtschaft- und Energiekonferenz Berlin 30. - 31.01.2012 (Band 9). Online verfügbar unter [http://www.ms-umwelt.de/downloads/Moeglichkeiten\\_und\\_Grenzen\\_der\\_SNCR\\_Verfahren\(Berlin2012\).pdf](http://www.ms-umwelt.de/downloads/Moeglichkeiten_und_Grenzen_der_SNCR_Verfahren(Berlin2012).pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2016.

- 20 Bernd von der Heide: Das SNCR-Verfahren - Verfahrenstechnische Grundlagen. Online verfügbar unter [http://www.ms-umwelt.de/downloads/Das\\_SNCR-Verfahren\\_-\\_Verfahrenstechnische\\_Grundlagen.pdf](http://www.ms-umwelt.de/downloads/Das_SNCR-Verfahren_-_Verfahrenstechnische_Grundlagen.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 21 Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration (2006). Online verfügbar unter [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi\\_bref\\_0806.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf), zuletzt geprüft am 05.08.2016.
- 22 Krüger, Sascha; Krüger, Jörg; Karau, Friedrich: Probleme bei der Messung von Ammoniakslupf, zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 23 2010/75/EU: Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung). Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>, zuletzt geprüft am 01.08.2016.
- 24 17. BImSchV (02.05.2013): Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV). Online verfügbar unter [https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv\\_17\\_2013/gesamt.pdf](https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_17_2013/gesamt.pdf), zuletzt geprüft am 07.07.2016.
- 25 Quicker, Peter; Rotheut, Martin; Athmann, Uwe; Schulten, Marc: Abgasreinigung mit Natriumhydrogencarbonat. Analyse und Bewertung, zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 26 Der icleen® PCM Partikelzähler: Präzise Erfassung von partikelförmigen Luftfremdstoffen, zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 27 J. Gebhart (1989): Funktionsweise und Eigenschaften optischer Partikelzähler.
- 28 LSI LASTEM s.r.l (Hg.) (2008): User's manual code MW6040. B A B U C /A/M. A portable instrument for acquisition, display, storage and processing. Online verfügbar unter [http://www.lsi-lastem.it/WebDocument/INSTUM\\_00055\\_en.pdf](http://www.lsi-lastem.it/WebDocument/INSTUM_00055_en.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 29 LSI LASTEM s.r.l: Environmental monitoring stations. MW8505-01/07. Online verfügbar unter [http://www.extratech.it/Microclima/3de\\_BABUC\\_mw8505.pdf](http://www.extratech.it/Microclima/3de_BABUC_mw8505.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2016.
- 30 Water Vapor Pressure Formulations (2015). Online verfügbar unter <http://cires1.colorado.edu/~voemel/vp.html>, zuletzt aktualisiert am 22.09.2015, zuletzt geprüft am 31.07.2016.
- 31 Guide to meteorological instruments and methods of observation (2008). 7th ed. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO, no. 8).

- 32 DIN EN ISO 7726, 2002-04: Umgebungsklima - Instrumente zur Messung physikalischer Größen.
- 33 DIN EN ISO 7243, 2015-08-Entwurf: Ergonomie der thermischen Umgebung – Ermittlung der Wärmebelastung durch den WBGT-Index (wet bulb globe temperature).
- 34 Brauer, Heinz (1996): Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Band 3: Additiver Umweltschutz: Behandlung von Abluft und Abgasen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- 35 Wiki Klimawandel (2016): Tropopause. Unter Mitarbeit von Dieter Kasang. Online verfügbar unter <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Ferrel-Zelle>, zuletzt aktualisiert am 26.05.2016, zuletzt geprüft am 04.07.2016.
- 36 Prof. Dr. rer. nat. Ralph Säuberlich: IMSCH\_02\_ATMOSPHÄ,,RE\_II.pdf. Material zur Vorlesung: Immissionsschutz. Online verfügbar unter [http://web.hs-merseburg.de/~saeuberl/VO\\_IMMSSCH/IMSCH\\_02\\_ATMOSPH%c3%84RE\\_II.pdf](http://web.hs-merseburg.de/~saeuberl/VO_IMMSSCH/IMSCH_02_ATMOSPH%c3%84RE_II.pdf), zuletzt geprüft am 04.07.2016.
- 37 VDI-Richtlinie 3782 Blatt 6 Entwurf, 2015-11: Umweltmeteorologie - Atmosphärische Ausbreitungsmodelle; Bestimmung der Ausbreitungsklassen nach Klug/Manier.
- 38 Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hg.): Begriffsbestimmungen zur Ausbreitungsrechnung. Online verfügbar unter [http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/ausbreitungsrechnung/glossar\\_internet.pdf](http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/ausbreitungsrechnung/glossar_internet.pdf), zuletzt geprüft am 05.07.2016.
- 39 Prof. Dr. rer. nat. Ralph Säuberlich: IMSCH\_03\_TROPOSPHÄ,,RE.pdf. Material zur Vorlesung: Immissionsschutz. Online verfügbar unter [http://web.hs-merseburg.de/~saeuberl/VO\\_IMMSSCH/IMSCH\\_03\\_TROPOSPH%c3%84RE.pdf](http://web.hs-merseburg.de/~saeuberl/VO_IMMSSCH/IMSCH_03_TROPOSPH%c3%84RE.pdf), zuletzt geprüft am 05.07.2016.
- 40 Bahadir, Müfit; Parlar, Harun; Spittler, Michael (2000): Springer Umweltlexikon. 2.Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-56998-2>.
- 41 BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 76 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.
- 42 TRGS 900 (29.06.2015): TRGS 900 Arbeitsplatzgrenzwerte. Online verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/TRGS/pdf/TRGS->

900.pdf;jsessionid=B34B09253DC939BA2BEB00367FA228EF.1\_cid343?\_\_blob=publicationFile&v=21, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

43 Auswirkung veränderter Toxizitätsäquivalentfaktoren (TEF) auf die Toxizitätsäquivalente (TEQ) der Weltgesundheitsorganisation - Stellungnahme Nr. 011/2007 des BfR vom 14. Februar 2007. Online verfügbar unter [http://www.bfr.bund.de/cm/343/bfr\\_raet\\_von\\_einer\\_uebernahme\\_der\\_neuen\\_toxizitaetsaequivalentfaktoren\\_ab.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/343/bfr_raet_von_einer_uebernahme_der_neuen_toxizitaetsaequivalentfaktoren_ab.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

44 Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV): LANUV: FAQ Dioxine, Furane und PCB. Online verfügbar unter <https://www.lanuv.nrw.de/umwelt/gefahrstoffe/faq-dioxine-furane-und-pcb/>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

45 Umweltbundesamt (2013): Dioxine und dioxinähnliche PCB in Umwelt und Nahrungsketten. Januar 2014. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/>, zuletzt geprüft am 30.06.2016.

46 199/2006/EG: VERORDNUNG (EG) Nr. 199/2006 DER KOMMISSION vom 3. Februar 2006 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 466/2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln hinsichtlich Dioxinen und dioxinähnlichen PCB. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/199/oj>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

47 1259/2011/EU: VERORDNUNG (EU) Nr. 1259/2011 DER KOMMISSION vom 2. Dezember 2011 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 hinsichtlich der Höchstgehalte für Dioxine, dioxinähnliche PCB und nicht dioxinähnliche PCB in Lebensmitteln. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2011/1259/oj>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

48 The 2005 World Health Organization Re-evaluation of Human and Mammalian Toxic Equivalency Factors for Dioxins and Dioxin-like Compounds ToxSci Advance Access, 7 July 2006. Online verfügbar unter [http://www.who.int/ipcs/assessment/tef\\_values.pdf](http://www.who.int/ipcs/assessment/tef_values.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

49 TA Luft (24.07.2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft. Online verfügbar unter [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Luft/taluft.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft.pdf), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

50 1881/2006/EG: VERORDNUNG (EG) Nr. 1881/2006 DER KOMMISSION vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in

Lebensmitteln. Online verfügbar unter <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1881/oj>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

51 Dz. U. 2011 poz. 558: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 22 kwietnia 2011 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji, zuletzt geprüft am 23.08.2016.

52 2013/711/EU: Empfehlung der Kommission vom 3. Dezember 2013 zur Reduzierung des Anteils von Dioxinen, Furanen und PCB in Futtermitteln und LebensmittelnText von Bedeutung für den EWR. Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32013H0711>, zuletzt geprüft am 28.08.2016.

53 Dz. U. 2005 poz.2181: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 grudnia 2005 r. w sprawie standardów emisyjnych z instalacji. Online verfügbar unter <http://dziennikustaw.gov.pl/du/2005/2181/D2005260218101.pdf>, zuletzt geprüft am 23.08.2016.

54 Umweltbundesamt: Dioxindatenbank des Bundes und der Länder. Toxizität und Bewertung (Berechnungsmodelle) (3). Dioxindatenbank des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter [http://www.dioxindb.de/f\\_stoffe\\_teqs3.html](http://www.dioxindb.de/f_stoffe_teqs3.html), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

55 Umweltbundesamt: Dioxindatenbank des Bundes und der Länder. Dioxinkonzentrationen in Lebensmitteln. Dioxindatenbank des Bundes und der Länder. Online verfügbar unter [http://www.dioxindb.de/f\\_umwelt\\_mensch.html](http://www.dioxindb.de/f_umwelt_mensch.html), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

56 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Dioxine und PCB. Verbraucherschutz vor Umweltkontaminanten in Lebensmitteln. Internetseite des Bundesumweltministeriums - BMUB. Online verfügbar unter [www.bmub.bund.de/P1396/](http://www.bmub.bund.de/P1396/), zuletzt geprüft am 01.07.2016.

57 Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR): Fragen und Antworten zu Dioxinen und PCB in Lebensmitteln. Aktualisierte FAQ des BfR vom 13. April 2012. Online verfügbar unter <http://www.bfr.bund.de/cm/343/fragen-und-antworten-zu-dioxinen-und-pcb-in-lebensmitteln.pdf>, zuletzt geprüft am 01.07.2016.

58 Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hg.) (2015): MAK- und BAT-Werte-Liste 2015. Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

59 TRGS 905: TRGS 905 Verzeichnis krebserzeugender, keimzellmutagener oder reproduktionstoxischer Stoffe, zuletzt geprüft am 11.07.2016.

- 60 39. BImSchV (02.08.2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen. Online verfügbar unter [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv\\_39/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_39/gesamt.pdf), zuletzt geprüft am 08.07.2016.
- 61 LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2011): Wirkungen auf den Menschen (Startseite LUBW > Themen > Luft > Luftqualitaet > Relevante Luftschadstoffe > Feinstaub ). Online verfügbar unter <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18796/>, zuletzt aktualisiert am 10.03.2011, zuletzt geprüft am 16.07.2016.
- 62 DIN EN 481, 1993-09: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel.
- 63 Chan, Margaret (2006): Air quality guidelines. Global update 2005 ; particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
- 64 Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (2016): Indikator für die durchschnittliche Exposition PM<sub>2,5</sub> (AEI) | Nds. Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Online verfügbar unter [http://cms2.niedersachsen.de/umweltbericht/luft/luftqualitaetsindikatoren/indikator-exposition/indikator-fuer-die-durchschnittliche-exposition-pm25-aei-139584.html?\\_psmand=10](http://cms2.niedersachsen.de/umweltbericht/luft/luftqualitaetsindikatoren/indikator-exposition/indikator-fuer-die-durchschnittliche-exposition-pm25-aei-139584.html?_psmand=10), zuletzt aktualisiert am 16.02.2016, zuletzt geprüft am 15.07.2016.
- 65 Hemmung des Wachstums. Hitze, Bestrahlung und Filtration. Online verfügbar unter <http://www.staff.uni-mainz.de/freesec/Download/Mikrobiologie/Mikrobio-Anfaengeruebung/Hemmung%20Wachstum.pdf>, zuletzt geprüft am 26.07.2016.
- 66 Jenal, Urs: Der Mensch und seine Mikroorganismen: Interaktionen zwischen Krankheit und Wohlbefinden (Wieviel Mensch ist ein Mensch?). Biozentrum Universität Basel, zuletzt geprüft am 26.07.2016.
- 67 PN-Z-04111-02:1989: Ochrona czystości powietrza -- Badania mikrobiologiczne -- Oznaczenie liczby bakterii w powietrzu atmosferycznym (imisja) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną.
- 68 PN-Z-04111-03:1989: Ochrona czystości powietrza -- Badania mikrobiologiczne -- Oznaczenie liczby grzybów mikroskopowych w powietrzu atmosferycznym (imisja) przy pobieraniu próbek metodą aspiracyjną i sedymentacyjną.

- 69 DIN EN 13098, 2001-02: Arbeitsplatzatmosphäre - Leitlinien für die Messung von Mikroorganismen und Endotoxin in der Luft; Deutsche Fassung EN 13098:2000.
- 70 VDI 4251 Blatt 4, 2015-07: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Ermittlung der Vorbelastung.
- 71 VDI 4252 Blatt 3, 2008-08: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Aktive Probenahme von Bioaerosolen - Abscheidung von luftgetragenen Bakterien mit Impingern nach dem Prinzip der kritischen Düse.
- 72 VDI 4253 Blatt 3, 2008-08: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft Verfahren zum quantitativen kulturellen Nachweis von Bakterien in der Luft Verfahren nach Abscheidung in Flüssigkeiten.
- 73 VDI 4252 Blatt 2, 2004-06: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft Aktive Probenahme von Bioaerosolen Abscheidung von luftgetragenen Schimmelpilzen auf Gelatine/Polycarbonat-Filtern.
- 74 VDI 4253 Blatt 2, 2004-06: Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Verfahren zum kulturellen Nachweis der Schimmelpilz-Konzentrationen in der Luft - Indirektes Verfahren nach Probenahme auf Gelatine/Polycarbonat-Filtern.
- 75 Ortanderl, Stefanie; Ritgen, Ulf (2014): Chemie für Dummies. Das Lehrbuch ; [von den Grundlagen bis zur Kernchemie; auf einen Blick: das Periodensystem und chemische Bindungen verstehen; Biochemie, Organische und Anorganische Chemie begreifen; die Grundlagen von Analytischer und Technischer Chemie kennenlernen; mit vielen Übungsaufgaben samt Lösungen]. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH (... für Dummies).
- 76 Duffus, John H.: "Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report).
- 77 Schwermetall-Emissionen (2016). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/luftschadstoff-emissionen-in-deutschland/schwermetall-emissionen>, zuletzt aktualisiert am 10.07.2016, zuletzt geprüft am 10.07.2016.
- 78 Brauer, Heinz (1997): Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik. Band 1: Emissionen und ihre Wirkungen. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-59197-6>.
- 79 DIN EN 27243, 1993-12: Warmes Umgebungsklima Ermittlung der Wärmebelastung des arbeitenden Menschen mit dem WBGT-Index (wet bulb globe temperature).
- 80 VDI 3802 Blatt 1, 2014-09: Raumluftechnische Anlagen für Fertigungsstätten.

81 DIN EN ISO 7730, 2006-05: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit.

82 BNB Tool - Fraunhofer IBP (2016). Online verfügbar unter <http://www.ibp.fraunhofer.de/de/produktentwicklungen/software-fuer-die-praxis/bnb-tool.html>, zuletzt aktualisiert am 19.08.2016, zuletzt geprüft am 21.08.2016.



