

Wissenschaftliche Erforschung der Ursachen der Belagsbildung auf Membrandruckluftbelüftungselementen in Abwasserreinigungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung

Abschlussbericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Projekt Nr. 20326
Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wagner, Dipl.-Ing. Peter Looch



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut **WAR**



Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wagner
Dipl.-Ing. Peter Loock

Abschlussbericht des Forschungsprojektes:

"Wissenschaftliche Erforschung der Ursachen der Belagsbildung auf Membrandruckluftbelüftungselementen in Abwasserreinigungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung",
gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Projekt-Nr. 20326

eingereicht im Mai 2009

Technische Universität Darmstadt
Institut WAR – Institut für Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik,
Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung
Fachgebiet Abwassertechnik
Petersenstraße 13
64287 Darmstadt

Tel.: 06151-163759
Fax: 06151-163758
Email: m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de
<http://www.iwar.bauing.tu-darmstadt.de>



Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	6
1.1	Einführung in die Thematik	6
1.2	Problemstellung und Motivation der Arbeit	6
1.3	Gliederung des Berichtes	7
2	<i>Grundlagen der Druckluftbelüftung</i>	8
2.1	Aufgaben der feinblasigen Druckluftbelüftung	8
2.2	Formen feinblasiger Belüftungselemente	9
2.3	Werkstoffe feinblasiger Belüftungsmembranen	9
2.3.1	Keramik	10
2.3.2	Silikon	10
2.3.3	EPDM	11
2.4	Grundlagen der Sauerstoffzufuhr mit Druckluftbelüftungssystemen	12
2.4.1	Sauerstoffübergang an der Phasengrenzfläche Wasser-Luft	12
2.4.2	Kennwerte der Sauerstoffzufuhr	14
2.5	Luftdruck in Druckluftbelüftungssystemen	15
2.6	Druckluftherzeugung	16
2.6.1	Drehkolbengebläse	18
2.6.2	Turboverdichter	19
2.6.3	Betriebsverhalten	20
2.7	Energiebedarf und Kosten der Belüftung	20
3	<i>Stand des Wissens</i>	23
3.1	Beläge auf feinblasigen Membranbelüftungselementen	23
3.1.1	flächendeckender Biofilm	23
3.1.2	Beläge an und in den Belüftungsschlitzen	23
3.2	Beständigkeit der Membranwerkstoffe	25
3.3	betriebliche Druckverluste	25
3.4	Anstieg des Energiebedarfs der Belüftung durch Belagsbildung	26
4	<i>Durchgeführte Untersuchungen</i>	28
4.1	Druckverlust- und Sauerstoffzufuhrmessungen	28
4.1.1	Bestimmung des betrieblichen Druckverlustes	28
4.1.2	Bestimmung der Sauerstoffzufuhr und des Druckverlustes im Labor	30
4.2	Reinigung der Belüftungselemente	34
4.2.1	Hochdruckbehandlung	34
4.2.2	Handreinigung	34
4.2.3	Druckschlagbehandlung	34
4.2.4	Eindüsung von Ameisensäure	36
4.3	Werkstoffuntersuchungen	36
4.3.1	Materialhärte	36
4.3.2	Extrahierbare Bestandteile des EPDM	37
4.3.3	Dehnungsverhalten	37
4.4	Untersuchung der Beläge	39

4.4.1	Semiquantitative Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der Membranablagerungen	39
4.4.2	Mikroskopie	39
4.5	Bestimmung des Energiebedarfs der Belüftung unter Betriebsbedingungen	40
4.5.1	Bestimmung des erforderlichen Luftvolumenstrom	40
4.5.2	Bestimmung des Überdrucks	41
5	<i>Darstellung und Diskussion der Ergebnisse</i>	42
5.1	Druckverlust im Neuzustand	42
5.2	Druckverlust unter Betriebsbedingungen	43
5.2.1	Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembran	43
5.2.2	Belüftungselemente mit Silikonmembran	46
5.2.3	Entwicklung in den ersten Betriebswochen	48
5.2.4	Belüftungspausen und „Freiblasen“	49
5.2.5	Mittel- und Extremwerte des Versuchsbetriebes	50
5.2.6	Vergleich mit Literaturdaten	52
5.3	Sauerstoffausnutzung und Druckverlust gebrauchter Belüftungselemente	55
5.4	Vergleich der Ergebnisse von Labor- und Betriebsmessungen	56
5.5	Ermittlung des Energiebedarfs	57
5.5.1	Sensitivitätsanalyse - Einflüsse auf den Energiebedarf	57
5.5.2	Veränderung des Energiebedarfs durch die Belagsbildung	59
5.6	Hochdruckbehandlung der Belüftungsmembranen	61
5.6.1	Vorversuche	61
5.6.2	Schäden durch Behandlungsfehler	63
5.7	Druckschlagbehandlung	64
5.7.1	Druckschlagbehandlung unter Laborbedingungen	64
5.7.2	Druckschlagbehandlung unter Betriebsbedingungen	66
5.8	Reinigungserfolg der Behandlungsmaßnahmen	69
5.8.1	Sauerstoffausnutzung und Druckverlust	69
5.8.2	Zusammenfassung und Analyse der Reinigungsergebnisse	72
5.8.3	Betrieblicher Druckverlust gereinigter Belüftungselemente	73
5.8.4	Behandlung geschrumpfter EPDM-Belüftungsmembranen	74
5.9	Veränderung der Membranwerkstoffe	75
5.9.1	Materialhärte und extrahierbare Bestandteile	75
5.9.2	Dehnungsverhalten	76
5.10	Zusammensetzung der Beläge	79
5.10.1	Biofilm auf der Belüftungsmembran	79
5.10.2	in den Belüftungsschlitzen	85
6	<i>Kostenabschätzung</i>	89
6.1	Energiekosten	89
6.2	Kosteneinsparung durch Belüftungspausen	89
6.3	Energiekosteneinsparung durch Reinigungsmaßnahmen	90
6.4	Nutzungsdauer der Belüftungselemente	91
7	<i>Schlussfolgerungen und Ausblick</i>	92
7.1	Belag in den Belüftungsschlitzen	92
7.2	Biofilm auf der Belüftungsmembran	92
7.3	Veränderung der Belüftungsmembranen	92

7.4	Druckverlust unter Betriebsbedingungen	93
7.5	Reinigung	94
7.6	Schlussfolgerungen für den praktischen Betrieb	94
7.7	Offene Fragen – Forschungsbedarf	95
7.7.1	Grundlagen der Druckluftbelüftung	95
7.7.2	Prozess der Belagsbildung	95
7.7.3	Behandlungsmaßnahmen	95
8	Zusammenfassung	97
8.1	Ergebnisse des Forschungsprojektes	97
8.2	Schlussfolgerungen für die Praxis	99
8.3	Weiterer Forschungsbedarf	99
	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>101</i>
	<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>103</i>
	<i>Symbole und Abkürzungen</i>	<i>103</i>
	<i>Literaturverzeichnis</i>	<i>104</i>
	<i>Aus dem Projekt hervorgegangene Veröffentlichungen</i>	<i>111</i>
	<i>Anhang</i>	

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Das Belebungsverfahren wird heute weltweit in verschiedenen konstruktiven und verfahrenstechnischen Ausprägungen zur Reinigung von kommunalem und industriellem Abwasser eingesetzt. Die Kernkomponenten des Belebungsverfahrens sind das belüftete Belebungsbecken und das Nachklärbecken. Das Belüftungssystem versorgt das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch mit dem für den biologischen Abbau der Schmutzstoffe erforderlichen Sauerstoff. Bei nicht ausreichender Leistung des Belüftungssystems fällt die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken auf Werte nahe oder gleich Null ab. Dadurch wird die Geschwindigkeit der biologischen Umsatzprozesse stark reduziert. Eine nicht unter allen Betriebsbedingungen ausreichende Belüftungsleistung gefährdet daher den Reinigungserfolg der biologischen Abwasserreinigung. Insbesondere in Abwasserreinigungsanlagen mit Stickstoff- und Phosphorelimination sind ein ausreichend bemessenes und betriebssicheres Belüftungssystem wesentliche Voraussetzungen für die Einhaltung geringer Ablaufkonzentrationen. Bei den heute üblichen Abwasserreinigungsanlagen mit Nitrifikation/Denitrifikation und getrennter anaerober Schlammbehandlung werden 40 % bis 50 % des Energiebedarfs der Abwasserbehandlung bzw. etwa 16 kWh/(E·a) für die Belüftung aufgewendet [Reichert, 2001].

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass Anlagenplaner und -betreiber dem Betrieb und der Optimierung des Belüftungssystems als Kernkomponente des Belebungsverfahrens besondere Aufmerksamkeit widmen müssen. Aufgrund der hohen Effizienz hat sich in Europa weitgehend die Druckluftbelüftung mit feinblasig abgasenden Belüftungselementen mit einer geschlitzten, flexiblen Belüftungsmembran aus Elastomeren durchgesetzt. Werden die Belüftungselemente mit Druckluft beaufschlagt, dann dehnen sich die Belüftungsmembranen aus, so dass sich die Schlitze öffnen und die Druckluft feinblasig austreten kann. Wird die Belüftung abgestellt, dann schließen sich die Schlitze, so dass kein Belebtschlamm ins Innere der Belüftungselemente und des Rohrleitungssystems eindringen kann. Somit ist auch eine intermittierende Belüftung möglich.

1.2 Problemstellung und Motivation der Arbeit

Seit einigen Jahren wird (vorwiegend bei Belüftungssystemen mit EPDM-Membranen) von einem plötzlichen Rückgang der Leistung des Belüftungssystems nach wenigen Betriebsjahren, z.T. aber auch nur wenigen Monaten berichtet. In diesen Fällen ist sowohl der Druckverlust der Belüftungselemente erhöht, als auch die Sauerstoffzufuhr herabgesetzt. Um trotzdem eine ausreichende Sauerstoffversorgung des belebten Schlammes im Belebungsbecken zu erreichen, müssen die Druckluftherzeuger trotz des erhöhten Differenzdrucks größere Luftvolumenströme erzeugen. Dies kann zur Überlastung und zur Beschädigung der Druckluftherzeuger führen. Zusätzlich zu den erhöhten Energiekosten aufgrund des ansteigenden Energiebedarfs entstehen weitere Kosten für den Austausch oder die Reinigung der Belüftungselemente. Die Prozesse, die die Leistungsfähigkeit feinblasiger Belüftungssysteme beeinträchtigen, wurden bisher nur wenig untersucht. Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes wurden diese nun sowohl qualitativ als auch quantitativ beschrieben und Gegenmaßnahmen dargestellt. Dabei wurden sowohl EPDM- als auch die mittlerweile genauso üblichen Silikonmembranen untersucht.

1.3 Gliederung des Berichtes

In Kapitel 2 werden zunächst die Grundlagen der feinblasigen Druckluftbelüftung in der Abwassertechnik beschrieben und dabei sowohl die Randbedingungen ihres Betriebes als auch energetische und finanzielle Aspekte betrachtet. In Kapitel 3 sind die wesentlichen bisherigen Erkenntnisse zu den während des Betriebes an den Belüftungselementen auftretenden Veränderungen als Literaturübersicht dargestellt. In Kapitel 4 werden die Methoden und die Vorgehensweisen der durchgeführten Untersuchungen beschrieben, deren Ergebnisse in Kapitel 5 dargestellt und diskutiert. Eine Abschätzung der Kosten wird in Kapitel 6 durchgeführt. Die Schlussfolgerungen aus den Untersuchungsergebnissen werden in Kapitel 7 gezogen. Den Abschluss des Berichtes bildet die Zusammenfassung in Kapitel 8.

2 Grundlagen der Druckluftbelüftung

2.1 Aufgaben der feinblasigen Druckluftbelüftung

Die meisten modernen Abwasserreinigungsanlagen arbeiten mit dem aeroben Belevungsverfahren als biologischer Reinigungsstufe. Eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen in der biologischen Stufe ist für das Funktionieren der Abwasserreinigung unbedingt erforderlich. Hierfür wird zumeist eine feinblasige Druckluftbelüftung eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird atmosphärische Luft in Form von Blasen (Blasendurchmesser $\sim 2,5$ mm) in das Belevungsbecken eingebracht. Während des Aufstiegs der Blasen an die Wasseroberfläche wird ein Teil des Luftsauerstoffs dem umgebenden belebten Schlamm zugeführt. Gleichzeitig wird so auch das Belevungsbecken durchmischt, so dass in ständig belüfteten Becken keine zusätzlichen Rührwerke erforderlich sind.

Im Vergleich zu anderen Belüftungsverfahren verspricht die feinblasige Druckluftbelüftung vor allem einen geringeren Energiebedarf sowie wenig Geruchs- und Aerosolbildung am Belüftungsbecken. Außerdem verursachen die i.d.R. in geschlossenen Räumen untergebrachten Druckluftherzeuger keine außerhalb der Abwasserreinigungsanlage wahrnehmbare Geräuschbelästigung.

Der Energiebedarf der feinblasigen Druckluftbelüftung wird durch folgende vier Faktoren bestimmt:

➤ Sauerstoffbedarf

Der Sauerstoffbedarf hängt von der Größe, dem Belastungszustand und der Betriebsweise der Belevungsstufe ab und wird im Rahmen dieser Arbeit als gegeben angesehen, da diese Thematik nicht im Fokus der durchgeführten Untersuchungen liegt.

➤ Ausnutzung des in der Druckluft enthaltenen Sauerstoffs

Nur ein Teil des in der Druckluft enthaltenen Sauerstoffs geht in den belebten Schlamm über. Der Rest tritt wirkungslos an der Wasseroberfläche aus. Je weitgehender der Sauerstoff aus der Druckluft ausgenutzt wird, umso geringer wird der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom. Die Ausnutzung des in der Druckluft enthaltenen Sauerstoffs hängt von vielen veränderlichen und auch unveränderlichen Faktoren ab. In besonderem Maße wird sie aber durch die Qualität der Belüftungselemente und deren Veränderung im Betrieb bestimmt. Die Untersuchung des Betriebsverhaltens der Belüftungselemente ist ein Schwerpunkt der praktischen Untersuchungen dieses Projektes; daher werden in den Kapiteln 2.2 bis 2.4 zunächst die Grundlagen des Aufbaus von feinblasigen Belüftungselementen und feinblasigen Belüftungssystemen beschrieben.

➤ Differenzdruck bei der Druckluftherzeugung

Damit Druckluft ins Wasser gelangt, muss als Gegendruck zumindest der hydrostatische Wasserdruk oberhalb der Luftaustrittsöffnung überwunden werden. Dies ist physikalisch nicht vermeidbar. Hinzu kommen in der Praxis die Druckverluste in der Rohrleitung und der Druckverlust der Belüftungselemente. Da der Energiebedarf der Druckluftherzeuger näherungsweise proportional zur erzeugten Druckdifferenz zunimmt, sollten die Druckverluste in den Rohrleitungen und der Druckverlust der Belüftungselemente möglichst gering sein. Die Grundlagen hierzu werden in den Kapiteln 2.5 und 2.6 erläutert. Die Untersuchung des Druckverlustes der Belüftungselemente ist ein weiterer Schwerpunkt dieses Projektes.

➤ Wirkungsgrad der Druckluftherzeugung

Der Wirkungsgrad der Druckluftheizer hängt sowohl von Ihrer Bauart als auch vom Differenzdruck und dem Luftvolumenstrom ab. Um die Auswirkungen von Veränderungen an den Belüftungselementen auf den Energiebedarf der Belüftung zu ermitteln, wird in Kapitel 2.6 vertieft auf die Wirkungsweise der Druckluftheizer eingegangen. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4.5 ein theoretisches Modell zur Berechnung des Energiebedarfs im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse aufgestellt. Mit dem gleichen Modell werden in Kapitel 5.5 auch die Veränderungen des Energiebedarfs und der Betriebskosten durch die Veränderung der Belüftungselemente im Betrieb berechnet.

2.2 Formen feinblasiger Belüftungselemente

Im Wesentlichen sind drei Bauformen feinblasiger Belüftungselemente bekannt [Wagner und Loock, 2005b]:

- Rohre,
- Dome (Keramik) bzw. Teller (Belüftungsmembran) und
- Platten.

Keramische Rohrbelüfter und Rohrbelüfter aus starrporösem Plastikmaterial bestehen aus dem eigentlichen Belüfterelement, einer inneren Zugstange mit Endkappe, Dichtungen und Anschlussgewinde. Elemente mit perforierter flexibler Belüftungsmembran werden aus einem Stützrohr (PVC oder Polypropylen) mit großen Luftverteilungsöffnungen oder Kanälen gefertigt, über die die Belüftungsmembran gezogen wird. An den Enden des Stützrohres werden Schellen zum Fixieren der Belüftungsmembran angebracht.

Als Belüfterdome werden kreisförmige Elemente aus Aluminiumoxid oder Keramik bezeichnet. Tellerbelüfter sind ebenfalls in Abhängigkeit des Belüftermaterials unterschiedlich aufgebaut. Gewöhnlich wird dünnes scheibenförmiges, keramisches oder starrporöses Material in eine Haltevorrichtung eingesetzt. Dagegen werden perforierte flexible Belüftungsmembranen über eine Haltevorrichtung gespannt. Die Belüftungsmembran wird zur Abdichtung auf die Haltevorrichtung aufgeschraubt oder geklemmt.

Als Plattenbelüfter werden Belüftungselemente aus gelochtem Folienmaterial bezeichnet, die auf eine große Metall- oder glasfaserverstärkte Kunststoffplatten gespannt werden (bekannt als Plattenbelüfter aus Folienmaterial). Die Bezeichnung Platten wird weiterhin auch für flache rechteckige Elemente aus Keramik- oder perforierter flexibler Belüftungsmembran mit einer Länge von 1,00 bis 1,50 m und einer Breite von 10 cm gebraucht. Die Elemente werden in einen Edelstahlrog gespannt und auf die Luftverteilungsleitung aufgeschraubt. Ein anderes Plattenbelüftungssystem besteht aus einer Grundplatte mit den Abmessungen 0,15 x 0,65 m oder 0,20 x 1,1 m, auf die eine perforierte flexible Belüftungsmembran aufgespannt wird [Wagner und Loock, 2005b].

2.3 Werkstoffe feinblasiger Belüftungsmembranen

Feinblasige Belüftungselemente können in drei Kategorien eingeteilt werden (Boyle, 1989):

- Elemente aus Keramik,
- Elemente aus porösem Plastik und
- Elemente mit perforierter Belüftungsmembran.

Parallel zur Entwicklung von Belüftungselementen aus porösem Plastik wurden Elemente mit perforierter Belüftungsmembran auf den Markt gebracht. Schon vor 40 Jahren wurden perforierte Elemente aus Plastikmaterial oder teilweise aus Kord hergestellt. Diese Elemente haben sich im Betrieb aber nicht bewährt. Bedeutend bessere Ergebnisse wurden mit Belüftungselementen mit flexibler Belüftungsmembran erzielt. Zum einen wurden Elemente aus Polyvinylchlorid (PVC) entwickelt, zum anderen Elemente aus Elastomeren (z.B. EPDM). Den Elementen aus Polyvinylchlorid werden Weichmacher zugegeben, damit sich ein weiches, elastisches Material ergibt. Patentrechtlich geschützte Zusätze verstärken bei den Elementen aus Elastomeren deren flexible Eigenschaften. Je nach Herstellungsprozess werden die flexiblen Belüftungsmembranen gelocht bzw. geschlitzt. Werden die Belüftungselemente mit Luft beaufschlagt, dehnen sich die Öffnungen der Löcher oder Schlitze aus, wobei sich die größten Öffnungen bei höchstem Luftvolumenstrom ergeben. Nach Abstellen der Gebläse schließen sich die Öffnungen, so dass kein Belebtschlamm in die Elemente eindringen kann. Damit ist ein intermittierender Betrieb (z.B. im Nitrifikations-/Denitrifikationsbereich) gewährleistet [Wagner und Look, 2005b]. Einige Hersteller bauen dennoch zusätzliche Rückschlagventile in die Belüftungselemente ein. Heute werden vorrangig geschlitzte Belüftungsmembranen aus EPDM-, Silikon- und teilweise auch aus PU-(Polyurethan) Werkstoffen eingesetzt.

2.3.1 Keramik

Ausgangsmaterialien für Elemente aus Keramik sind Aluminiumoxide, Aluminiumsilikate und Silikate. Die aus diesen Materialien geformten Elemente werden bei Temperaturen über 1.000 °C gebrannt. Der Porendurchmesser hängt von der Größe und Klassierung des Ausgangsmaterials ab und kann etwa über eine Größenordnung einer halben Zehnerpotenz streuen, wobei Porendurchmesser von 40 bis 140 μm üblich sind. Probleme ergeben sich bei Elementen aus Keramik vorrangig durch Verstopfung, so dass der Druckverlust zunimmt [Wagner und Look, 2005b].

2.3.2 Silikon

Silikon ist die Bezeichnung für synthetische Polymere, bei denen Siliziumatome über Sauerstoffatome zu Molekülketten verknüpft sind. Diese Struktureinheiten werden als Siloxane bezeichnet. Die restlichen freien Valenzelektronen der Siloxane sind dabei durch Kohlenwasserstoffreste (R) abgesättigt (Formel: $[\text{R}_2\text{SiO}]_n$). Die exakte Bezeichnung lautet daher Poly(organo)siloxane oder wiederum kurz Siloxane [Rochow, 1991].

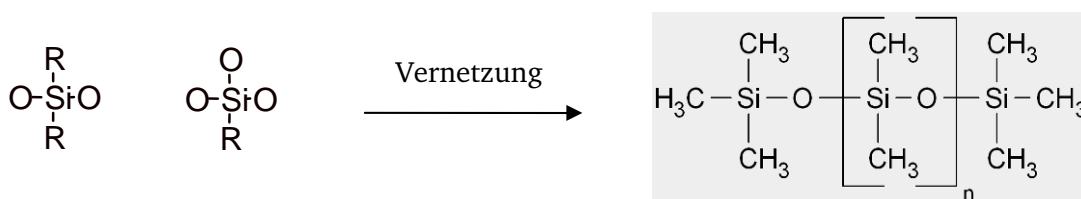


Abbildung 1: Di- und trifunktionelle Einheiten von Siloxan und Poly(dimethyl)siloxan [Rochow, 1991]

Trifunktionelle Siloxaneinheiten ermöglichen eine räumliche Vernetzung. Silikone sind physiologisch inert und daher sehr gut gegen Befall durch Mikroorganismen beständig. Außerdem sind sie Wasser abweisend und anti-adhäsiv. Im Gegensatz zu EPDM ist Silikon auch gegen Fett und Öle beständig, hat dafür aber schlechtere mechanischen Eigenschaften wie z.B. eine geringere (Weiterreiß-)Festigkeit und einen höheren Preis [Moneke, 2004]. Die mechanischen Eigenschaften der Silikone, werden durch die Zugabe von Additiven wie (auch bei EPDM) erheblich verbessert, so dass mittlerweile auch Silikonwerkstoffe eine hohe Weiterreißfestigkeit erzielen [v. Consbruch, 2001].

2.3.3 EPDM

Das Elastomer EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer) ist ein so genanntes statistisches Copolymer. Statistische Copolymer sind Polymere (Makromoleküle), die aus mehr als einer Struktureinheit bestehen, wobei die Struktureinheiten innerhalb des Makromoleküls regellos (statistisch) aufeinander folgen. Bei Terpolymeren besteht das Makromolekül aus genau 3 verschiedenen Struktureinheiten. Diese sind, wie die Bezeichnung EPDM bereits sagt, Ethylen, Propylen und Dien. Dabei sind Ethylen (C_2H_4 , heute als Ethen bezeichnet) und Propylen (C_3H_6 , heute als Propen bezeichnet) bereits chemisch eindeutig definierte Einzelmoleküle. Dien ist demgegenüber der Oberbegriff für Kohlenwasserstoffe mit zwei Kohlenstoff-Doppelbindungen. EPDM kann unter Verwendung von drei verschiedenen Dienen hergestellt werden. Dies sind Ethylidennorbornen (ENB), Dicyclopentadien (DCP) und 1,4-Hexadien (s. Abbildung 2).

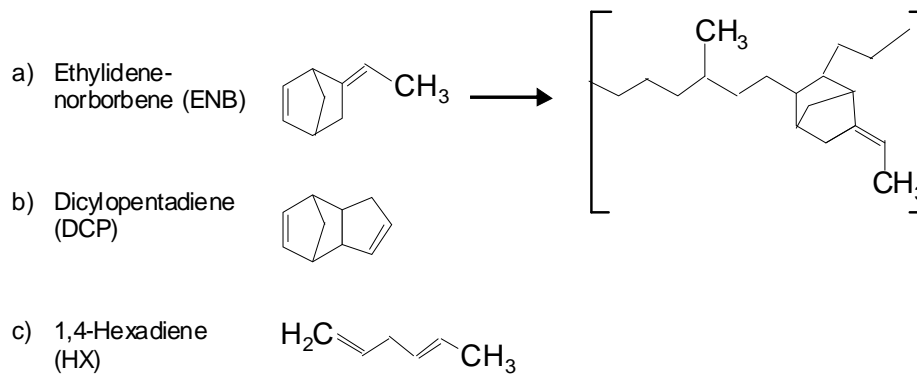
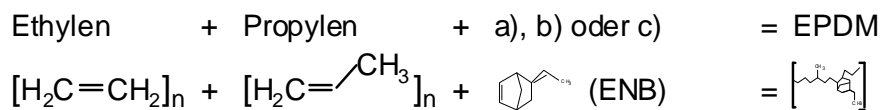


Abbildung 2: Grundstrukturen des EPDM [nach Moneke, 2004]

Zur Einstellung der gewünschten Materialeigenschaften des EPDM lassen sich folgende Parameter bereits durch die geeignete Wahl der Mischungsverhältnisse verändern [Moneke, 2004]:

- Ethylen/Propylen-Verhältnis
Hohe Ethylen-Anteile bewirken eine höhere Kristallinität des EPDM. Hierdurch steigen die Festigkeit, die Härte, die Elastizität, die Formstabilität und die Weiterreißfestigkeit an.
- Molekulargewicht (Kettenlänge)
Eine höhere Molekülmasse bewirkt eine Zunahme der Viskosität, der Zugfestigkeit und auch der Bruchdehnung.
- Vernetzung
Je stärker die Molekülketten vernetzt sind, umso höher ist die Reißfestigkeit.
- Dien-Gehalt
Ein höherer Dien-Gehalt bewirkt eine höhere Festigkeit. Die Alterungs-, Witterungs- und Ozonbeständigkeit nimmt aber dabei ab. [Röthmeyer und Sommer, 2001]

Außerdem können dem EPDM noch weitere Additive hinzugefügt werden, die ebenfalls die Materialeigenschaften in alle Richtungen sowohl kurz- als auch langfristig beeinflussen können [Moneke, 2004]:

- Füllstoffe (hauptsächlich Ruß, aber auch Asche und Kalziumcarbonat)
- Weichmacher (paraffinische Öle ca. 99 %, naphthenische Öle ca. 1 %)
- Vulkanisierhilfsmittel
- (Bio-)Stabilisatoren
- Weitere, wie z.B. Entformungshilfsmittel, UV-Schutz

Eine typische Zusammensetzung eines EPDM-Werkstoffs ist in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Typische Zusammensetzung einer EPDM-Mischung [Edel, 2001]

Bestandteil	Gew.-%
Kautschuk (EPDM)	32,8
Füll- und Verstärkungsstoffe (Ruß, Kieselsäure)	42,7
Weichmacher (paraffinisches Öl)	19,7
Vulkanisationshilfsmittel	3,3
Beschleuniger	1,3
Vulkanisiermittel (Schwefel)	0,2

Reines EPDM ist sehr gut beständig [Moneke, 2004]. Die Beständigkeit der gehandelten EPDM-Werkstoffe wird besonders durch die Menge und die Art der als Weichmacher eingesetzten paraffinischen Öle bestimmt. Da zwischen dem Weichmacher und dem EPDM keine stabile chemische Verbindung besteht, sondern der Weichmacher nur lose zwischen den EPDM-Polymerketten eingelagert ist, kann er langsam durch Diffusion ins umgebende Medium entweichen. Daher ist die Haltbarkeit von weichmacherhaltigen EPDM-Werkstoffen begrenzt [von Consbruch, 2001 und Edel, 2001]. Daneben beeinflusst auch die Qualität der Rohstoffe, insbesondere die Reinheit der Füllstoffe (besonders Ruß) und der Einsatz von (Bio-)Stabilisatoren die Haltbarkeit [Moneke, 2004]. Mögliche Formen des mikrobiellen Angriffs auf Kunststoffe sind [nach Flemming, 1994]:

- direkter mikrobieller Abbau als Kohlenstoff oder Stickstoffquelle
- indirekte Schädigung durch Stoffwechselprodukte (Säure-Angriff, enzymatischer Abbau der Weichmacher)
- Kombination der Einflüsse

Zusammenfassend ist fest zu stellen, dass es zu vielfältigen Wechselwirkungen der EPDM-Werkstoffe mit ihrer Umgebung kommen kann. Dabei kann es sowohl zu physikalischen-, als auch zu chemischen und biologischen Reaktionen oder kombinierten Reaktionen kommen. Genauere Aussagen hierzu sind nur mit sehr spezifischen Fachkenntnissen möglich. Zudem herrscht an dieser Stelle großer Forschungsbedarf sowohl auf der mikrobiologischen Seite als auch auf der Seite der Materialtechnik.

2.4 Grundlagen der Sauerstoffzufuhr mit Druckluftbelüftungssystemen

2.4.1 Sauerstoffübergang an der Phasengrenzfläche Wasser-Luft

Der für die feinblasige Druckluftbelüftung relevante Sauerstoffübergang findet an der Phasengrenzfläche zwischen Wasser und Luft an der Oberfläche der aufsteigenden Gasblasen statt. Er steigt proportional zum Sauerstoffsättigungsdefizit der flüssigen Phase, welches sich aus der Differenz zwischen der Sauerstoffsättigungskonzentration C_s [mg/l oder g/m³] und der aktuell vorliegenden Sauerstoffkonzentration C_L ergibt. Der Sauerstoffübergang durch die Phasengrenzfläche A [m²]

kann mit dem flüssigkeitsseitigen Stoffaustauschkoeffizient k_L [m/s] je Zeiteinheit (als Massestrom m in g/s) wie folgt berechnet werden [ATV,1997]:

$$m = k_L \cdot A \cdot (C_s - C_L) \quad [\text{g/s}]$$

Dividiert man diese Gleichung durch das belüftete Wasservolumen V und definiert man A/V als spezifische Phasengrenzfläche a , ergibt sich:

$$dc/dt = k_L \cdot a \cdot (C_s - C_L) \quad [\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$$

Das Produkt aus dem flüssigkeitsseitigen Stoffaustauschkoeffizient k_L und der spezifischen Phasengrenzfläche a wird als Belüftungskoeffizient $k_L a$ bezeichnet. Zur Beschreibung des Stoffübergangs und des Stoffübergangskoeffizienten existieren verschiedene Modelle, von denen nachfolgend die besonders bekannte Penetrationstheorie [Higbie, 1935] vorgestellt wird.

Die Penetrationstheorie geht von der Vorstellung aus, dass aus dem Kern der zu belüftenden Flüssigkeit einzelne Flüssigkeitselemente durch Turbulenz an die Phasengrenzflächen gelangen. Dort nehmen diese durch instationäre, molekulare Diffusion (molekularer Diffusionskoeffizient D_m) innerhalb einer Verweilzeit t_k [s] eine bestimmte Menge Sauerstoff auf und verschwinden wieder im Kern der Flüssigkeit. Abbildung 3 zeigt die Penetrationstheorie in schematischer Darstellung. Entsprechend der folgenden Gleichung kann der flüssigkeitsseitige Stoffaustauschkoeffizient k_L berechnet werden:

$$k_L = 2 \cdot \sqrt{\frac{D_m}{\pi \cdot t_k}} \quad [\text{m/s}]$$

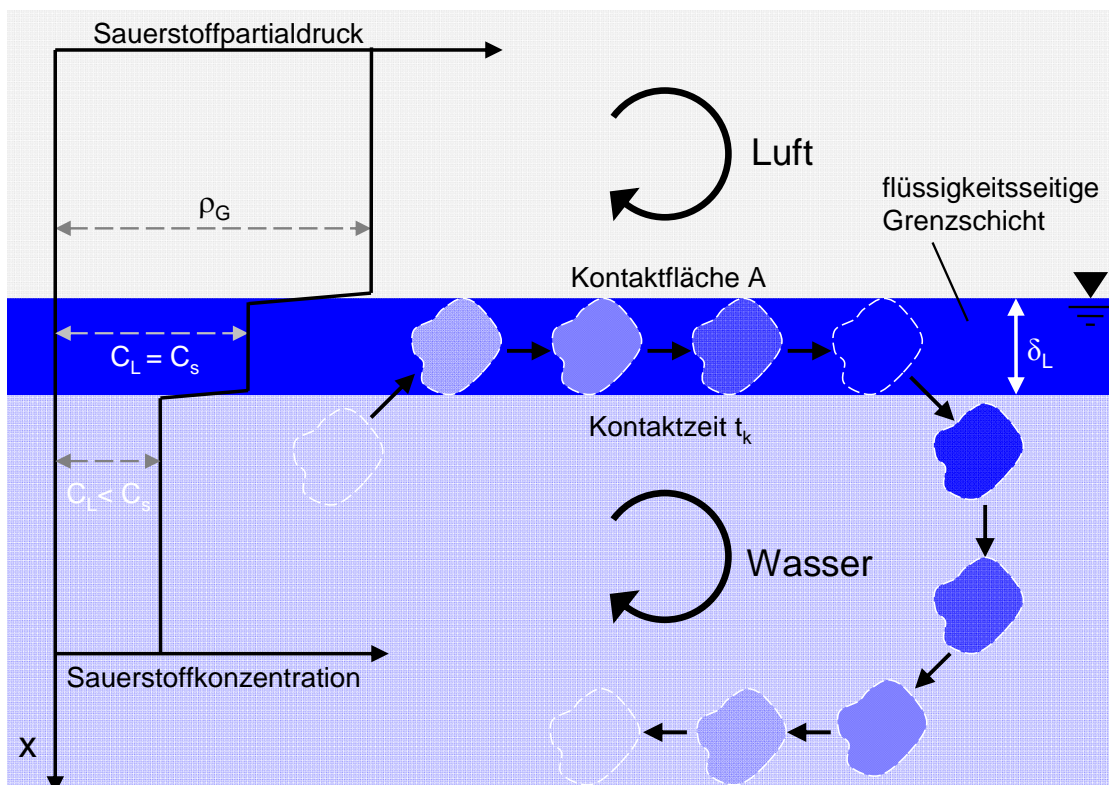


Abbildung 3: Penetrationstheorie (δ_L = Dicke der Grenzschicht, ρ_G = Sauerstoffpartialdruck)

Da sich der flüssigkeitsseitige Stoffaustauschkoeffizient k_L und die spezifische Phasengrenzfläche a nicht mit vertretbarem messtechnischem Aufwand direkt bestimmen lassen, werden diese Parameter in der Praxis lediglich zusammengefasst als Belüftungskoeffizient $k_L a$, wie in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt, bestimmt.

2.4.2 Kennwerte der Sauerstoffzufuhr

Die Bewertung der Leistung von Belüftungssystemen erfolgt über die Bilanzierung der in ein belüftetes Beckenvolumen pro Zeiteinheit eingetragenen Masse Sauerstoff. Gemäß dem DWA-Merkblatt M 209 wird die unter Normbedingungen je Stunde ins Wasser eingetragene Masse Sauerstoff bestimmt als Sauerstoffzufuhr:

- Standard-Sauerstoffzufuhr SOTR kg O₂/h
(Standard Oxygen Transfer Rate)

Für die Sauerstoffzufuhr SOTR gilt mit dem belüfteten Beckenvolumen V und dem Sauerstoff-Sättigungswert $C_{s,20}$ [DWA-M 209]:

$$\text{SOTR} = \frac{V \cdot k_L a_{20} \cdot C_{s,20}}{1000} \quad \text{kg/h}$$

Atmosphärische Luft enthält unter Normbedingungen 299 g O₂/m³. Bei Druckluftbelüftungssystemen wird ein möglichst weitgehender Übergang dieses, in den im Becken aufsteigenden Luftblasen enthaltenen Sauerstoffs, ins umgebende Wasser angestrebt. Für diesen Zusammenhang werden Kennwerte zur Sauerstoffausnutzung definiert [DWA-M 209]:

- spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr SSOTR g O₂/(m_{Luft}³·m_{Einblastiefe})
(Specific Standard Oxygen Transfer Rate)
- spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung SSOTE %/m_{Einblastiefe}
(Specific Standard Oxygen Transfer Efficiency)

Zum Vergleich einzelner Belüftungselemente wie auch von Belüftungssystemen eignen sich gleichermaßen die spezifische Standard-Sauerstoffzufuhr SSOTR und die spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung SSOTE. Sie lassen sich bei bekannter Einblastiefe auch direkt ineinander umrechnen. In dieser Arbeit wird im Weiteren ausschließlich auf die spezifische Standard-Sauerstoffausnutzung SSOTE eingegangen. Sie bezeichnet denjenigen Anteil des Sauerstoffs, der beim Blasenanstieg je Meter Aufstiegsweg vom Blaseninnere ins Wasser übergeht. Die spezifische Sauerstoffausnutzung SSOTE wird mit der Einblastiefe h_D , dem auf Standardbedingungen bezogenem Luftvolumenstrom $Q_{L,St}$ und dem Sauerstoffgehalt der Luft von 0,299 kg/m³ berechnet [DWA-M 209]:

$$\text{SSOTE} = \frac{100 \cdot \text{SOTR}}{h_D \cdot (Q_{L,St} \cdot 0,299)} \quad \text{%/m}$$

Der Energiebedarf von Belüftungssystemen wird über den Sauerstoffertrag an Hand des Verhältnisses von Sauerstoffzufuhr SOTR in kg O₂/h und der dafür erforderlichen elektrischen Leistung des Belüftungssystems P in kW bewertet:

➤ Sauerstofftrag SAE $\text{kg O}_2/\text{kWh}$

$$\text{SAE} = \frac{\text{SOTR}}{P} \quad \text{kg O}_2/\text{kWh}$$

2.5 Luftdruck in Druckluftbelüftungssystemen

Damit aus den Belüftungselementen am Boden des Belebungsbeckens Luft austreten kann, muss die zugeführte Druckluft mehrere Widerstände in Form von Überdruck überwinden. Dies sind im Einzelnen:

➤ hydrostatischer Wasserdruck $p_{\text{hydrostatisch}}$

Der hydrostatische Wasserdruck ergibt sich aus der Höhe der Wassersäule oberhalb der Schlitzöffnungen der Belüftungselemente. Dieser Abstand wird als Einblastiefe h_D [m] bezeichnet. Der hydrostatische Wasserdruck entspricht 98,1 mbar/m und ist in der Regel während der Lebensdauer einer Abwasserreinigungsanlage gleich und schwankt im Tagesverlauf aufgrund des sich ändernden Beckenzulaufs nur um wenige Zentimeter.

$$p_{\text{hydrostatisch}} = f(h_D) = h_D \cdot 98,1 \text{ mbar/m [mbar]}$$

➤ Rohrleitungsverlust $p_{\text{Rohrleitung}}$

Der Rohrleitungsverlust entsteht durch die Reibungskräfte an den Rohrwänden der Luftleitungen und den Einbauten wie z.B. Schiebern oder Krümmungen. Er ist von der Ausführung des Rohrsystems (Rohrdurchmesser und -länge, Größe und Bauart von Schiebern, Krümmungen, Vibrationsdämpfer, sonstige Einbauten etc.) abhängig und lässt sich daher nicht mit einer allgemein gültigen Formel berechnen. Als Reibungsverlust ist er von der Fließgeschwindigkeit, also direkt vom Luftvolumenstrom Q_L abhängig. Bei der Auslegung der Druckluftleitungen ist ein maximaler Rohrleitungsverlust von 50 mbar anzustreben [DIN 19569-3].

$$p_{\text{Rohrleitung}} = f(\text{Rohrsystem}; Q_L)$$

➤ Druckverlust der Belüftungselemente $p_{\text{Belüftungselemente}}$

Der Druckverlust der Belüftungselemente ergibt sich idealisiert aus einem statischen und einem vom Luftvolumenstrom abhängigen, dynamischen Anteil. Bevor überhaupt Luft aus den Belüftungselementen austreten kann, muss zunächst ein statischer Mindestdruck zum Aufspannen der Belüftungsmembranen und zum Öffnen der Schlitze sowie evtl. vorhandener Rückschlagventile aufgebracht werden. Mit steigendem Luftvolumenstrom nimmt der Druckverlust der Belüftungselemente aufgrund der zunehmenden Fließgeschwindigkeit innerhalb des Belüftungselementes und vor allem in den Belüftungsschlitzen zu. Im einfachsten Fall ergibt sich hieraus eine lineare Abhängigkeit des Druckverlustes der Belüftungselemente vom Luftvolumenstrom. Jeder Belüftungselementtyp hat abhängig von seiner Bauart, Geometrie und Zahl der Schlitze bzw. Löcher, Dicke und Material der Belüftungsmembran und der im Betrieb auftretenden Veränderungen einen anderen Druckverlust. Mögliche Werte liegen zwischen 15 und 250 mbar und übliche Werte bei 20 bis 120 mbar.

$$p_{\text{Belüftungselemente}} = f(\text{Belüftungselementtyp und -zustand}; Q_L)$$

Von den Druckluftherzeugern muss ein Differenzdruck erzeugt werden, der der Summe der oben genannten Drücke entspricht:

$$\begin{aligned}
 p &= p_{\text{hydrostatisch}} + p_{\text{Rohrleitung}} + p_{\text{Belüftungselemente}} \\
 &= 98,1 \text{ mbar/m} \cdot h_D + f(Q_L)_{\text{Rohrleitung}} + f(Q_L)_{\text{Belüftungselemente}} \quad [\text{mbar}]
 \end{aligned}$$

2.6 Druckluftherzeugung

Es existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Aggregaten zur Erzeugung von Druckluft. Aufgrund der in Abwasserreinigungsanlagen üblichen Drücke- und Luftvolumenströme können dort nur Drehkolbengebläse oder Turboverdichter sinnvoll zur Erzeugung der für die Belüftung der biologischen Stufe erforderlichen Druckluft eingesetzt werden [Jacoby, 2003]. Vereinzelt kommen auch Schraubenverdichter zum Einsatz. Diese werden aber aufgrund der geringen Relevanz hier nicht näher betrachtet. Der Vorgang der Druckluftherzeugung kann durch zwei Grundprinzipien erfolgen. Entweder nach dem Verdrängungsprinzip bei (Dreh-)Kolbenverdichtern (Abbildung 4) oder durch die Umwandlung von kinetischer Energie in Druck bei Turboverdichtern.

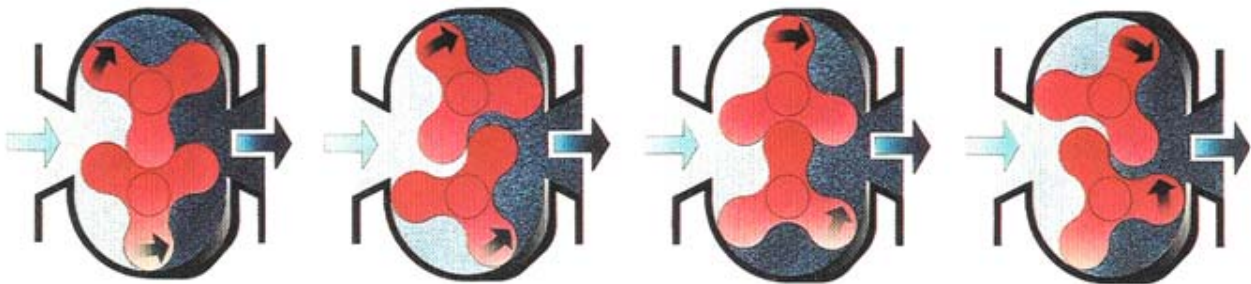


Abbildung 4: Funktionsweise des Drehkolbens



Abbildung 5: Drehkolben, Verdichterstufe und vollständiges Gerät mit Schallhaube [Aerzener]

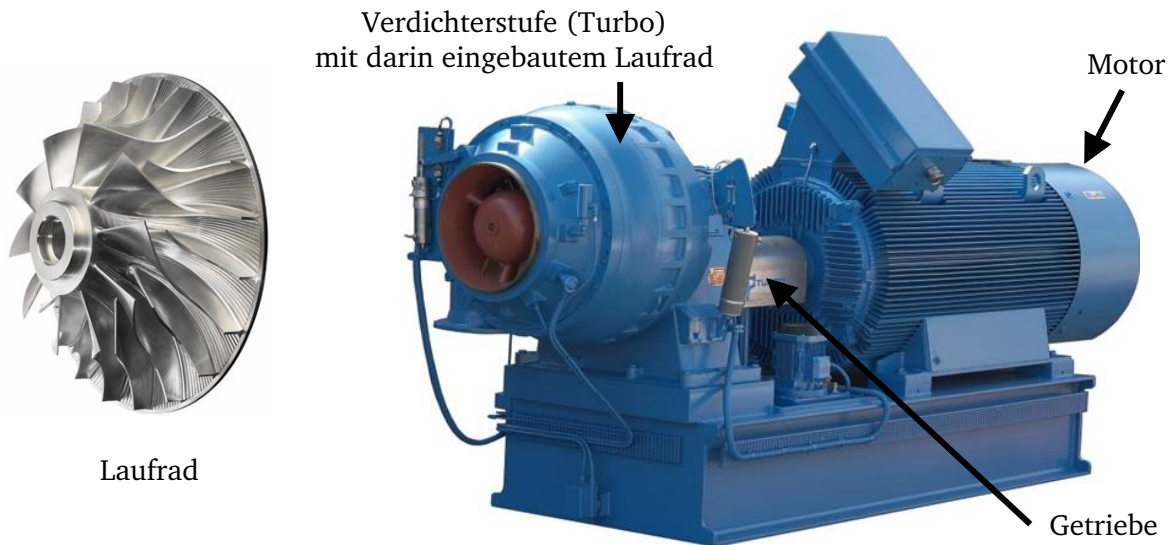


Abbildung 6: Turboverdichter; ausgebautes Laufrad und vollständiges Aggregat [HV-Turbo]

Drehkolbengebläse können für Luftvolumenströme von 100 bis 6.000 m³/h wirtschaftlich eingesetzt werden [Thiele, 2003]. Ihr maximaler Förderdruck beträgt aus thermischen Gründen ca. 1.000 mbar entsprechend einer Einblastiefe im Belebungsbecken von etwa 8 m. Turboverdichter erreichen bis zu 2 bar Differenzdruck und Luftvolumenströme bis 50.000 m³/h [Jacoby, 2003]. Ihr Wirkungsgrad ist höher, sie sind dafür aber technisch komplexer und somit teurer. Sie werden daher nur bei mittleren und großen Abwasserreinigungsanlagen ≥ 50.000 EW eingesetzt [Jacoby, 2003]. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die unterschiedlichen Wirkungsgrade.

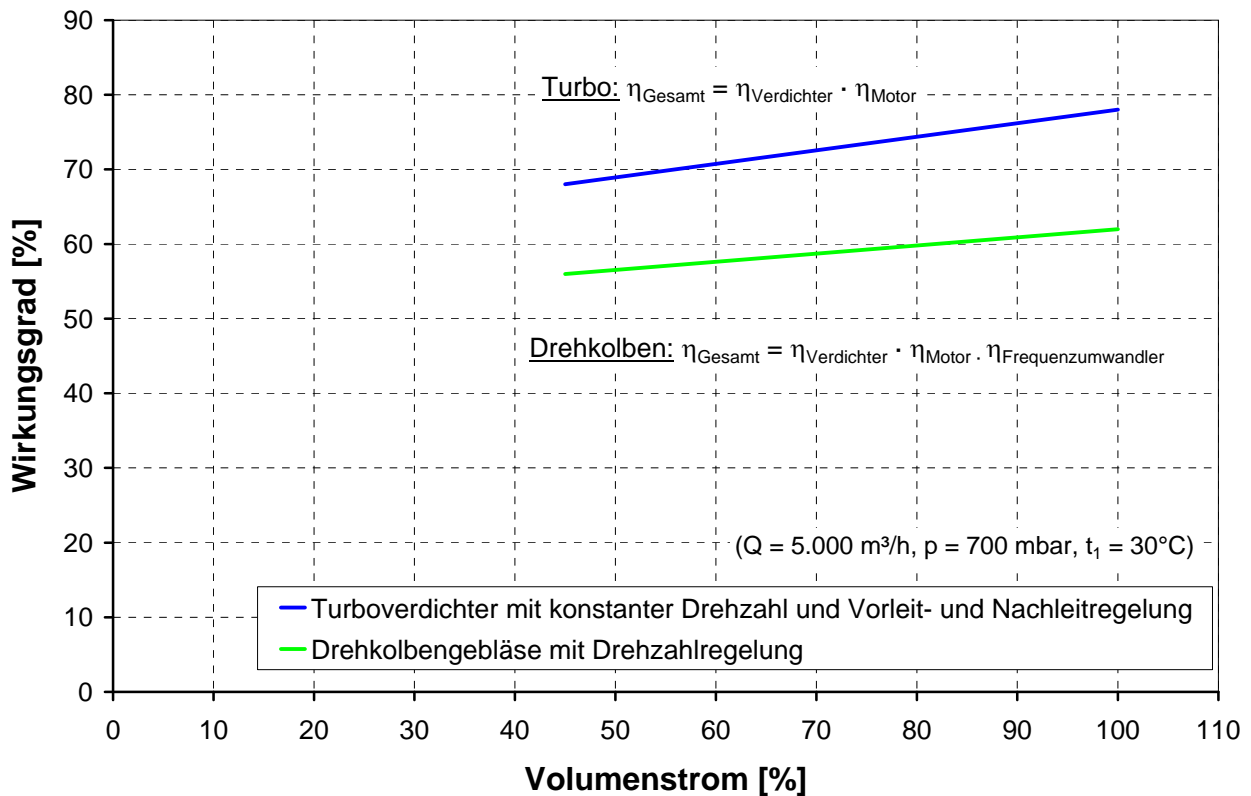


Abbildung 7: Wirkungsgrade von Turboverdrichtern und Drehkolbengebläsen [nach Jacoby, 2003]

Beim Vergleich der Werte ist zu berücksichtigen, dass auf den meisten Abwasserreinigungsanlagen mit Drehkolbengebläsen nur ein (kleiner) Teil der Gebläse mit Frequenzumformern (FU) zur Anpassung des Luftvolumenstroms ausgestattet wird. Die übrigen, konstant laufenden Gebläse ohne FU, haben einen höheren Wirkungsgrad als in Abbildung 7 dargestellt. Bei geringerem Differenzdruck werden zudem die Unterschiede zwischen den Systemen kleiner [Thiele, 2003].

2.6.1 Drehkolbengebläse

Der Leistungsbedarf von Drehkolbengebläsen ergibt sich aus der Multiplikation des theoretischen Luftvolumenstroms Q_0 mit dem Differenzdruck Δp zuzüglich der Verluste P_v [Westphal, 1995]:

$$P_D = Q_0 \cdot \Delta p + P_v \quad [W]$$

mit:

P_D	Kupplungsleistung bei Drehkolben	[W]
P_v	Verluste	[W]
Q_0	theoretischer Luftvolumenstrom = $(q_0 \cdot n)$	[m ³ /s]
q_0	Kammervolumen	[m ³]
n	Drehzahl	[1/s]
Δp	Differenzdruck	[N/m ² , 1 mbar entspricht 100 N/m ²]

Der tatsächlich erzeugte Luftvolumenstrom Q_1 ist jedoch aus verschiedenen Gründen (Spaltverluste, Kammerfüllungsgrad, Rückströmung) etwas geringer. Dies wird mit dem volumetrischen Wirkungsgrad η_{vol} berücksichtigt [Westphal, 1995].

$$P_D = \frac{Q_1 \cdot \Delta p}{\eta_{vol}} + P_v \quad [W]$$

mit:

Q_1	nutzbarer Luftvolumenstrom = $\eta_{vol} \cdot Q_0$	[m ³ /s]
η_{vol}	volumetrischer Wirkungsgrad	[-]

Die Verluste P_v betragen 3 bis 5 % [Thiele, 2003]. Der volumetrische Wirkungsgrad η_{vol} ergibt sich aus der rein empirischen Formel [Westphal, 1995]:

$$\eta_{vol} = 0,85 - 0,13 \cdot (\Delta p - 0,4) + 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot (n - n_m) + 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot (\Delta p - 0,4) \cdot (n - n_m)$$

mit:

Δp	Differenzdruck	[bar]
n	betriebliche Drehzahl	[1/min]
n_m	maximale Drehzahl	[1/min]

Die Formel zeigt, dass der volumetrische Wirkungsgrad η_{vol} ausgehend von 85 % um ca. 1,3 % je 100 mbar Differenzdruck abnimmt. Der Einfluss der Drehzahl ist dagegen sehr gering.

2.6.2 Turboverdichter

Der Leistungsbedarf von Turboverdichtern ergibt sich wie folgt [Westphal, 1995]:

$$P_T = Q_1 \cdot p_1 \cdot 3,5 \cdot \left[\left(\frac{p_1 + \Delta p}{p_1} \right)^{0,2857} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_{is}} + P_v \quad [\text{W}]$$

mit:

P_T	Kupplungsleistung bei Turboverdichtern	[W]
Q_1	nutzbarer Luftvolumenstrom	[m ³ /s]
p_1	Ansaugdruck	[N/m ² , 1 mbar entspricht 100 N/m ²]
Δp	Differenzdruck	[N/m ²]
η_{is}	isentropischer Wirkungsgrad	[-]
P_v	Verluste (Lager, Zahnräder, Dichtungen)	[W]

Die Verluste P_v betragen 3 bis 6 % der Kupplungsleistung und sind bei größeren Verdichtern kleiner. Der isentropische Wirkungsgrad η_{is} lässt sich nicht mit einfachen Mitteln berechnen, so dass man auf Herstellerangaben angewiesen ist. Jacoby [2003] gibt für Turboverdichter mit Vor- und Nachleitregelung Wirkungsgrade von 82 und 85,5 % bei 45 % bzw. 100 % Luftvolumenstrom an.

Die Berechnungsformeln für die Leistung der Drehkolbengebläse (Kapitel 2.6.1) und der Turboverdichter stimmen darin überein, dass unter Vernachlässigung der Verlustleistung P_v die erforderliche Kupplungsleistung P_D bzw. P_T linear mit dem nutzbaren Luftvolumenstrom Q_1 ansteigt. Berechnet man die erforderliche Kupplungsleistung für beide Systeme für den gleichen Luftvolumenstrom und variable Differenzdrücke, wie z.B. in Abbildung 8 dargestellt, dann wird auch die annähernd lineare Abhängigkeit der Kupplungsleistung vom Differenzdruck deutlich. Bei hohen Differenzdrücken fallen die Kurven für Drehkolbengebläse und Turboverdichter zunehmend auseinander. Dies zeigt, dass Turboverdichter besonders bei hohen Differenzdrücken effizienter arbeiten als Drehkolbengebläse.

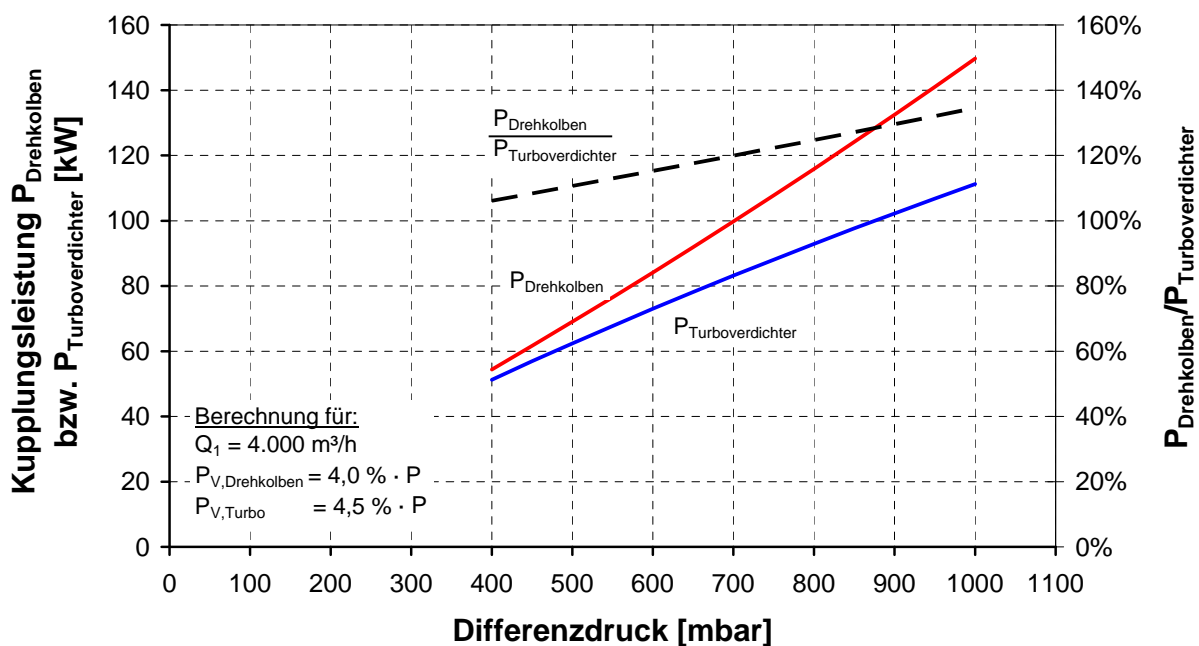


Abbildung 8: Kupplungsleistung von Drehkolbengebläsen und Turboverdichtern

2.6.3 Betriebsverhalten

Da im Zusammenhang mit „Belagsbildung“ auch vom Ausfallen der Druckluftherzeuger bzw. der Überlastung der Gebläse berichtet wird [Wagner, 2004, Jardin, 2004], soll auch hierauf kurz eingegangen werden.

➤ Turboverdichter

Bei Erreichen der Leistungsgrenze reißt die Luftströmung im Verdichter ab. Daraufhin fallen Druck und Luftvolumenstrom schlagartig ab, so dass die Strömung wieder anlaufen kann, bis kurze Zeit später erneut die Leistungsgrenze erreicht wird und sich der Vorgang wiederholt („Pumpen“). Das Erreichen der Leistungsgrenze muss durch die elektronische Steuerung wegen der Gefahr von Beschädigungen verhindert werden [Jacoby, 2003].

➤ Drehkolbengebläse

Bei Drehkolbengebläsen ist der maximale Luftvolumenstrom weitgehend unabhängig vom Gegendruck. Der maximale Luftvolumenstrom ist durch die Motordrehzahl und die Übersetzungsverhältnisse des Antriebes festgelegt. Bezüglich des Gegendrucks sind die Drehkolbenverdichter selbst, d.h. wenn ausreichend Motorleistung zur Verfügung steht, allein durch die Temperaturerhöhung bei der Verdichtung begrenzt. Hier liegen die Grenzen bei 110-115 K (ca. 140° C Ablufttemperatur), entsprechend ca. 1.000 mbar Gegendruck. Werden diese Grenzen überschritten, dann können sich die Gehäuse verziehen. Da die Wärme nahezu ausschließlich über die geförderte Druckluft abgeführt wird, wird die kritische Temperaturerhöhung bei geringen Luftvolumenströmen schon sehr viel früher erreicht [Thiele, 2003]. D.h. bei hohen Luftvolumenströmen sind hohe Drücke für die Drehkolben (nicht die Motoren) weniger kritisch als bei niedrigen Luftvolumenströmen. Moderne Drehkolbengebläse verfügen über Temperatursensoren die das Überhitzen des Gebläses anzeigen. Zudem stellt sich bei hoher Belastung das Problem der Motorkühlung. Bei großem Luftvolumenstrom und gleichzeitig hohem Gegendruck heizen sich die Motoren bereits stark auf. Ist das Kühl- luftgebläse des Motors fest mit der Motorwelle verbunden, dann lässt bei geringer Motordrehzahl die Kühlung nach. In diesem Fall können auch niedrige Luftvolumenströme kombiniert mit hohem Gegendruck kritisch sein.

2.7 Energiebedarf und Kosten der Belüftung

Da der Energiebedarf der Belüftung in der Regel den größten Anteil des Energiebedarfs der biologischen Abwasserreinigung darstellt, wurden hierzu viele Untersuchungen durchgeführt. Die große Streubreite der dargestellten Ergebnisse zeigt, wie stark der Energiebedarf der Belüftung letztendlich von der Anlagenausstattung und der Betriebsweise des Einzelfalls abhängt. Aber auch die genaue Abgrenzung der Belüftung gegenüber anderen Einrichtungen bereitet Schwierigkeiten. So werden häufig Kosten und Energiebedarf der Belüftung zusammen mit denen von anderen beim Belebungsverfahren erforderlichen Aggregaten (z.B. Rührwerke, Rücklaufschlammumpen, Nachklärbeckenräumer) zusammengefasst. Zum belüftungsspezifischen Kennwert Sauerstofftrag SAE [kg O₂/kWh] der zum Vergleich der Belüftungssysteme genutzt wird (z.B. Wagner, 2001), legt die definierende DWA-Richtlinie M-209 eindeutig fest, dass neben dem Stromverbrauch des Belüftungssystems selbst auch der Stromverbrauch für Rührwerke und Brückenantriebe, die der Belüftung dienen, mit eingerechnet werden muss. Für die Bau-, Umbau- und Erweiterungs- bzw. Reparaturkosten von Belüftungssystemen gibt es vergleichsweise wenige Anhaltspunkte (Tabelle 4). Nachfolgend sind die Literaturangaben zusammengestellt:

Tabelle 2: Energiebedarf der Belüftung

Angabe	Quelle
17,2 bis 25,8 kWh/(E·a) (Angabe als Energiebedarf der Belebungsstufe) 73 % des Energiebedarfs von Abwasserreinigungsanlagen durch Belebung	Bohn, 1998
60 bis 70 % des Energiebedarfs der biologischen Stufe 50 bis 60 % des Energiebedarfs von Abwasserreinigungsanlagen	Meyer, 1998
13,7 kWh/(E·a) = 55 % des Energiebedarfs von Abwasserreinigungsanlagen (Die in der Quelle berechnete energieeffiziente Modellkläranlage mit 100.000 EW enthält eine nachgeschaltete Flockungsfiltration. Ohne diese ergibt sich ein Anteil der Belüftung am Energiebedarf von 60 %.)	MURL, 1999
40 bis 50 % des Energiebedarfs von Belebungsanlagen durch Belüftung 16 kWh/(E·a) im Mittel für Belüftung von Anlagen der Größenklassen IV und V	Reichert, 2001
55,6 % des Energiebedarfs von Abwasserreinigungsanlagen	Metcalf und Eddy, 2004
50 bis 90 % des Energiebedarfs von Abwasserreinigungsanlagen	EPA, 1989
2,0 bis 2,7 kg O ₂ /kWh bei flächendeckenden feinblasigen Belüftungselementen 2,0 bis 2,5 kg O ₂ /kWh bei Umwälzung und feinblasiger Belüftung	Wagner, 2001
Zielwerte des Energiebedarfs der Belüftung nach Größenklassen gem. AbwV, für Belebungsanlagen mit getrennter Schlammbehandlung ≤ 14 kWh/(EW·a) für Größenklasse III ≤ 12 kWh/(EW·a) für Größenklasse IV ≤ 10 kWh/(EW·a) für Größenklasse V	LfU, 1998

Tabelle 3: Betriebskosten der Belüftung

Angabe	Quelle
16 % der Betriebskosten von Abwasserreinigungsanlagen für Belüftung	Bohn, 1998
15 % der Betriebskosten der Abwasserbehandlung sind (Gesamt-)Energiekosten	MURL, 1999
Energie- und Wasserkosten in den Größenklassen I bis V betragen 12,3 %; 13,2 %; 16,1 %; 16,0 % und 12,6 % der Betriebskosten von Abwasserreinigungsanlagen	Reicherter, 2003
50 % geringere Energiekosten bei feinblasiger Belüftung als bei „ineffizienter Belüftung“. (Die EPA lässt offen, welche Techniken darunter zu verstehen sind.)	EPA, 1989

Tabelle 4: Bau- und Umbaukosten für Druckluftbelüftungssysteme

Tätigkeit/Bauteil	Kosten und Erläuterung
Austausch der Rohrbelüfter (ohne Umbauten)	6.500 € für 14.000 EW (entspricht 0,46 €/EW) 35.000 € für 115.000 EW (entspricht 0,30 €/EW) [Jardin, 2004]
Austausch und Erweiterung des feinblasigen Belüftungssystems, zusätzliche nicht näher beschriebene Nebenarbeiten	50.000 € für 13.000 EW (entspricht 3,8 €/EW) Steinmetz, 2006 berichtet von einer Amortisationsdauer der Umbaukosten von 2 bis 3 Jahren bei erzielten Energiekosteneinsparungen von 20.000 €/a. Daraus lassen sich Umbaukosten von ca. 50.000 € abschätzen.
Austausch und Erweiterung des feinblasigen Belüftungssystems	Angebote nach Ausschreibung für 650.000 bis 1.050.000 DM für 150.000 EW (entspricht 2,22 bis 3,58 €/EW) [Reinhardt, 2001]
Luftleitung Belebungsbecken	200 €/m (für Edlestahlleitungen) [Sander, 2003]
Belüftung und Umwälzung	35 €/m ³ _{Belebungsbeckenvolumen}) [Sander, 2003]
Belebungsbecken	spez. Investitionskosten für Belebungsbecken (nur Maschinenteknik + Elektrotechnik, ohne Bautechnik) = 50 bis 150 €/m ³ , Kostenfunktion für Ausstattung des Belebungsbeckens mit Maschinenteknik $Y = 783,46x^{-0,2809}$ €/m ³ [Reicherter, 2003]
Säureeindüsung zur Reinigung der Belüftungselemente mit Essigsäure	2000 €; Die Belüftungselemente der dargestellten Versuchsanlage mit PU-Belüftungsmembran können nur mit Essigsäure und nicht mit Ameisensäure gereinigt werden. [Doppler, 2004]

3 Stand des Wissens

3.1 Beläge auf feinblasigen Membranbelüftungselementen

3.1.1 flächendeckender Biofilm

Während des Betriebes unterliegt die dem Abwasser zugewandte Oberfläche der Belüftungsmembran biologischen und physikalisch-chemischen Effekten die aus dem Betrieb des Belebungsverfahrens resultieren. Im belebten Schlamm als Nähr- und Impfmedium ist der Aufwuchs eines Biofilms unvermeidlich. Seine Eigenschaften hängen vom Membranwerkstoff, der Oberflächenbeschaffenheit und dem Nährstoffangebot ab. In diesen Biofilm lagern sich weitere Partikel ein, die entweder den im Biofilm lebenden Bakterien als Nährstoffe dienen oder als inertes Material im Biofilm verbleiben und so seine Dicke und Stabilität vergrößern [von Hoessle, 2004, Flemming 1994]. Zusätzlich zum Biofilm können auf der Membranoberfläche Ablagerungen von Fällungsprodukten wie Calciumhydroxid und Eisen- bzw. Aluminiumverbindungen, die aus den Inhaltstoffen des Abwassers stammen oder als Fällmittel dem Belebtschlamm zugegeben wurden entstehen [Frey, 2004].

3.1.2 Beläge an und in den Belüftungsschlitzten

In einigen Fällen wurden Biofilme beobachtet, die ausgehend von der Membranoberfläche gegen die austretende Druckluft in die Belüftungsschlitzte hinein wachsen konnten und schließlich bis auf die Rückseite der Belüftungsmembran, d.h. auf die dem Stützkörper zugewandte Luftseite gelangten. Abbildung 9 zeigt die Außen- und Innenseite einer belegten EPDM-Belüftungsmembran. Die Bildung von Belägen auf EPDM-Belüftungsmembranen ist unabhängig von der Form der Belüftungselemente (Rohre, Teller oder Platten) [Wagner, 2003].

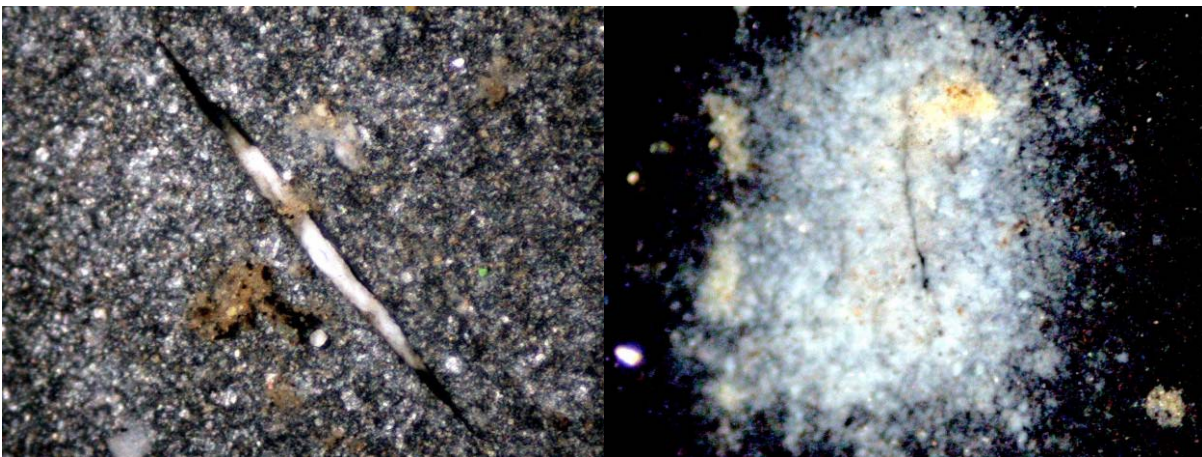


Abbildung 9: Außenseite (links) und Innenseite (rechts) im Bereich des Belüftungsschlitzes einer belegten EPDM-Membran [Wagner, 2003]

Das Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch enthält aufgrund der Atmungsaktivität der Mikroorganismen einen hohen Gehalt an Kohlendioxid. Die Luft aus der Pore hat einen sehr geringen Kohlendioxidgehalt. Beim ersten Kontakt Luft - Wasser tritt nach Frey, 2003 nun örtlich ein rascher Transport von CO_2 aus dem Wasser in die Luft auf, wodurch der pH-Wert steigt und die Löslichkeit von Kalziumcarbonat sinkt. Unter der Annahme, dass während der Blasenablösung immer eine kleine Menge Wasser in die Belüftungsschlitzte eindringt und die Schlitzwände mit Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch benetzt sind, tritt die Abscheidung von Kalk bereits innerhalb der Belüftungsschlitzte auf [Frey, 2004]. Abbildung 10 zeigt diesen Vorgang schematisch.

3.2 Beständigkeit der Membranwerkstoffe

Vielfach wurde beobachtet, dass Belüftungsmembranen aus EPDM-Werkstoffen nach einiger Betriebszeit aushärten [Wagner und von Hoessle, 2003a und 2003b; Edel, 2001; Frey, 2004]. Parallel zur Zunahme der Härte wird dabei auch das Schrumpfen der Belüftungsmembranen beobachtet. Die Materialhärte wird zumeist als Shore-A Härte (s. Kapitel 4.3.1 Materialhärte) bestimmt. Selten werden Zugversuche nach DIN 53 455 durchgeführt [Frey, 2004 und Krampe, 2007] bei denen aber keine Materialhärte, sondern die Dehnung des Materials unter Zugspannung ermittelt wird.

Die Zunahme der Härte wird zumeist auf das Herauslösen der Weichmacher aus dem Membranwerkstoff zurückgeführt. Der Weichmachergehalt ist nicht direkt zu bestimmen und kann daher nur näherungsweise über den Gehalt der mit einem Lösungsmittel aus der Werkstoffprobe extrahierbaren Substanzen bestimmt werden [Edel, 2001]. Da die Weichmacher per Diffusion aus dem EPDM-Werkstoff entweichen können (s. auch Kapitel 2.3.3), ist die Haltbarkeit von EPDM-Belüftungsmembranen zeitlich begrenzt [von Consbruch, 2001 und Edel, 2001]. Einige Autoren gehen auf Grund der z.T. sehr kurzen Lebensdauer der Belüftungsmembranen darüber hinaus davon aus, dass einzelne Bakterien in der Lage sind den Weichmacher aktiv aus dem Membranwerkstoff heraus zu lösen [von Consbruch, 2001] oder sogar in ihrem Stoffwechsel als Kohlenstoffquelle zu nutzen [Wagner, 2003a].

3.3 betriebliche Druckverluste

2005 wurde vom DWA-Landesverband Baden-Württemberg eine Umfrage über den Stand der Belüftungstechnik auf den Kläranlagen in Baden-Württemberg durchgeführt. Dabei wurden von den Kläranlagenbetreibern u.a. detaillierte Einzelheiten über die Belüftungselemente abgefragt. In nachfolgender Abbildung sind die Mediane des betrieblichen Druckverlustes der Belüftungselemente unterteilt nach Form und Material dargestellt. Weiterhin ist die Anzahl der ausgewerteten Daten angegeben [Krampe et al., 2007].

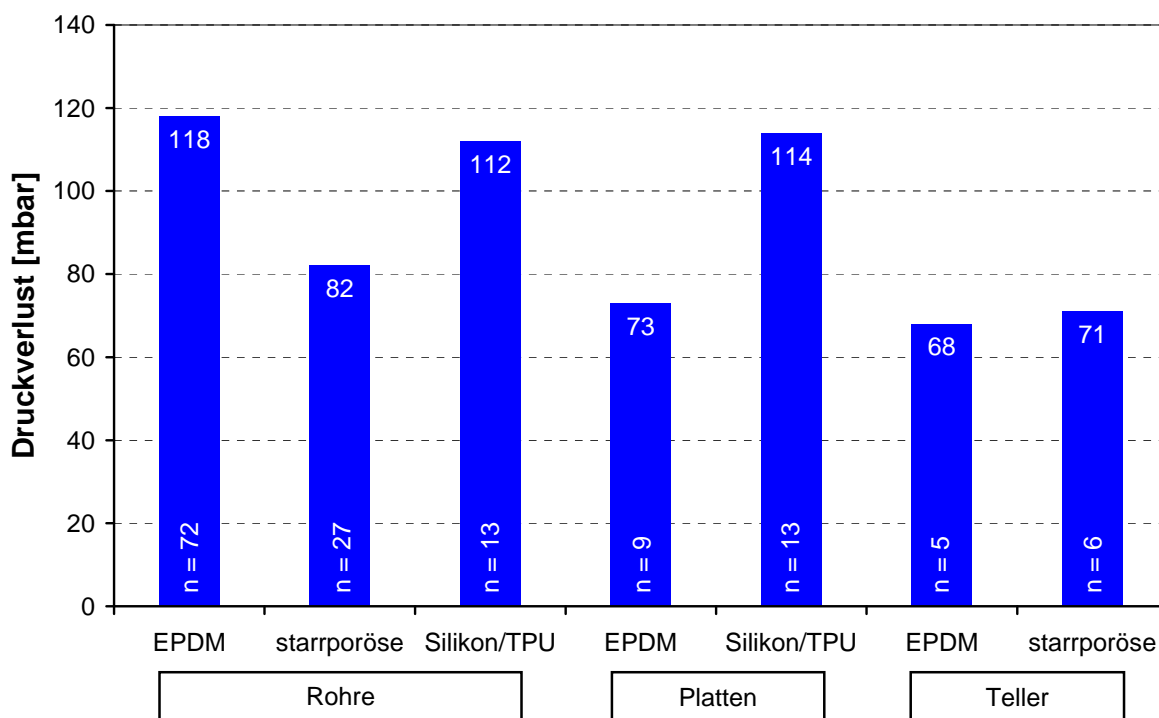


Abbildung 12 betriebliche Druckverluste [nach Daten von Krampe et al., 2007] (TPU = thermoplastisches Polyurethan)

Krampe weist ausdrücklich darauf hin, dass es sich bei den Daten um Medianwerte handelt. 50% der ausgewerteten Anlagen weisen demnach sogar einen höheren Druckverlust auf als in Abbildung 12 angegeben. Im Jahr 2003 wurde in Österreich von den Kläranlagennachbarschaften eine große Umfrage zur Ermittlung des Zustands der Belüftungssysteme durchgeführt. Hierbei wurden u.a. auch die Drücke der Belüftungssysteme abgefragt. Die genauen Daten bezüglich des Druckes sind nicht veröffentlicht; lediglich eine statistische Auswertung der Abwasserreinigungsanlagen mit den Bewertungen „Druck zu hoch“ oder „kein erhöhter Druck“ findet sich bei Frey, 2005. Da viele der Druckangaben nicht plausibel oder unvollständig waren, wurden auf 26 Abwasserreinigungsanlagen vor Ort Begehungen und Kontrollmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 13 dargestellt. Es fällt auf, dass die Druckverluste sowohl im Neuzustand, als auch im Betrieb sehr stark streuen. Dabei schwankt der Druckverlust im Betrieb zwischen dem (unveränderten) Ausgangsdruck des Neuzustandes (Nr. 4) und dem vierfachen Wert (Nr. 25).

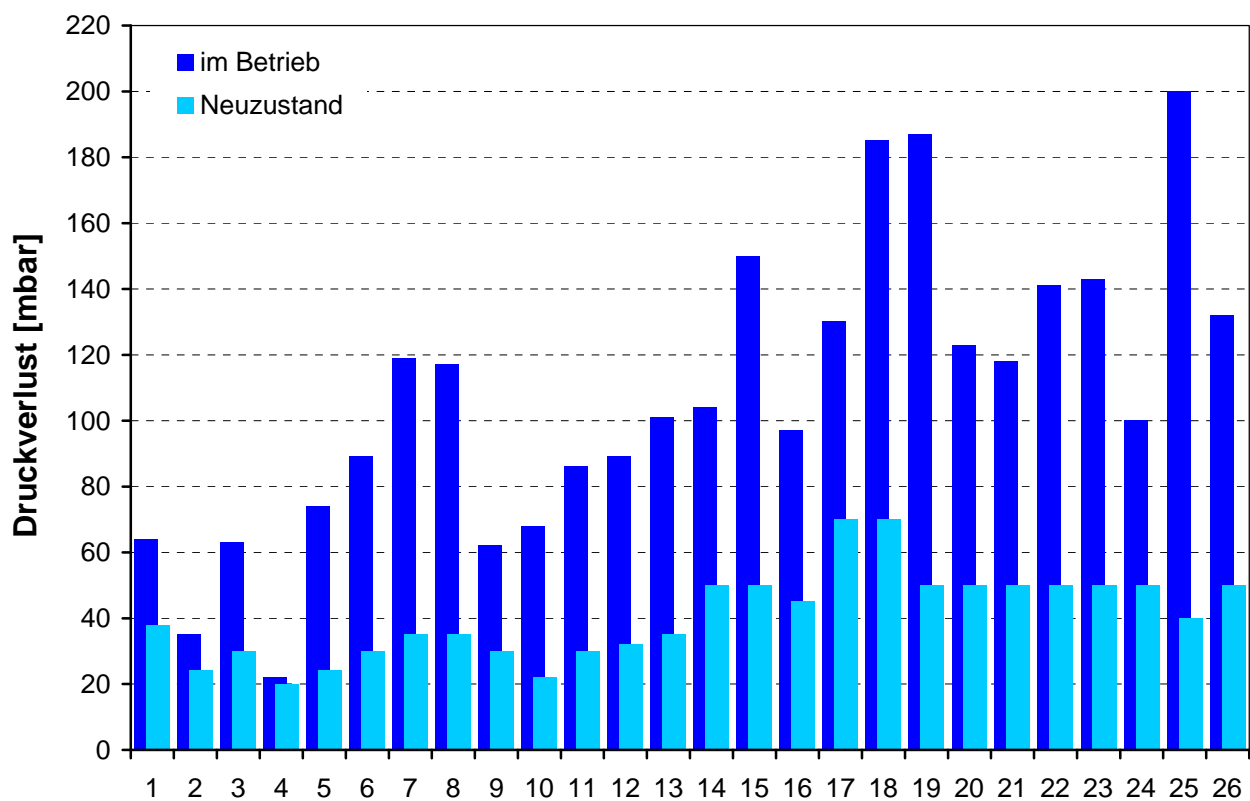


Abbildung 13: Druckverluste neuer und gebrauchter Belüftungselemente [nach Frey, 2005]

3.4 Anstieg des Energiebedarfs der Belüftung durch Belagsbildung

Jardin, 2004 berichtet von einer Abwasserreinigungsanlage des Ruhrverbandes, die erhebliche Probleme mit dem Belüftungssystemen zu bewältigen hatte. Da trotz maximaler Gebläseleistung nicht mehr genügend Sauerstoff ins Belebungsbecken eingetragen wurde, konnte eine ausreichend Reinigungsleistung, aufgrund der bei geringen Sauerstoffkonzentrationen beeinträchtigten Nitrifikation, nicht mehr aufrechterhalten werden. Hohe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte waren die Folge. Die Belüftungselemente wurden durch baugleiche Elemente, jedoch mit Silikonmembranen ersetzt.

Auch auf anderen Anlagen des Ruhrverbandes konnten ähnliche Probleme, die z.T. sogar zum Ausfall der überlasteten Druckluftheizer führten, beobachtet werden. Nach dem Austausch der jeweils stark belegten EPDM-Belüftungselemente durch Elemente mit Silikonmembranen traten die Probleme nicht mehr auf [Jardin, 2004; Jardin und Overfeld, 2003]. Die Betrachtung des Energieverbrauchs der Belüftung und der Kosten für Belüftungsenergie (s. Abbildung 14) zeigt, dass sich der Austausch von Belüftungselementen mit hohem Druckverlust und geringer Sauerstoffausnutzung innerhalb kurzer Zeit durch die Einsparung von Energiekosten amortisieren kann.

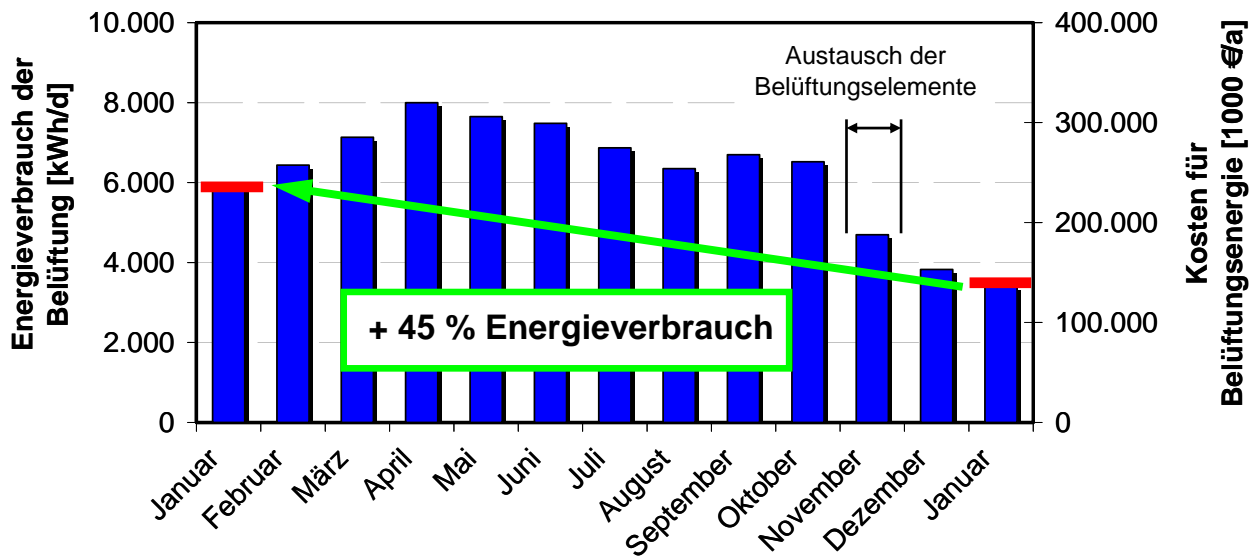


Abbildung 14: Energiebedarf eines Belüftungssystems bei starker Belagsbildung [nach Jardin, 2004]

4 Durchgeführte Untersuchungen

4.1 Druckverlust- und Sauerstoffzufuhrmessungen

4.1.1 Bestimmung des betrieblichen Druckverlustes

Um den Druckverlust von Belüftungselementen unter Betriebsbedingungen beobachten und analysieren zu können, wurden in den Nitrifikationsbecken von drei Abwasserreinigungsanlagen (Versuchsstände A, B, C) zusätzliche Belüftungselemente an Versuchsständen betrieben. 9 verschiedenen Bauarten wurden jeweils paarweise auf herausnehmbaren Trägern zusätzlich zu den bereits im Belebungsbecken vorhandenen Belüftungselementen installiert. Folgende Bauformen und Membran-Werkstoffe wurden dabei eingesetzt:

Rohrbelüfter:

- EPDM-Typ I schwarze EPDM-Membran
- EPDM-Typ II EPDM-Membran, Produktionsdatum 1999
- Silikon-Typ I weiße Silikonmembran
- Silikon-Typ II farblose, durchscheinende Silikonmembran

Tellerbelüfter:

- EPDM-Typ I schwarze EPDM-Membran
- EPDM-Typ II schwarze EPDM-Membran, „mikrobenbeständiger“ Werkstoff
- Silikon blaue Silikonmembran

Plattenbelüfter:

- EPDM schwarze EPDM-Membran
- Silikon schwarze Silikonmembran

Für die Versuche wurden gezielt Abwasserreinigungsanlagen ausgewählt, bei denen bereits früher Probleme mit Belüftungselementen auftraten. Die Einblastiefe der Belüftungselemente beträgt je nach Versuchsstand zwischen 0,5 oder 0,75 m. Jedes Belüftungselement ist mit jeweils einer eigenen Zuluftleitung, einer Entwässerungsleitung sowie einer eigenen Luftvolumenstrommessung versehen (s. Abbildung 17 bis Abbildung 15). Der Druck an den Belüftungselementen wird mit einem mobilen Druckmessgerät bestimmt, das zwischen den zur Druckmessung vorgesehen Anschlüssen umgesteckt wird. Während der Messung der Druckverluste werden neben dem Überdruck und dem Luftvolumenstrom auch der Wasserstand sowie die Luft- und Wassertemperaturen zur Berechnung des dem Belüftungselement zugeführten Betriebsluftvolumenstroms aufgezeichnet. Bei jeder Messung wurden fünf Luftvolumenströme in Höhe von 20, 40, 60, 80 und 100 % des vom Hersteller empfohlenen maximalen Luftvolumenstroms für den Dauerbetrieb eingestellt (Tabelle 6). Da sich bei der Änderung des Luftvolumenstroms der endgültige Druckverlust erst mit einiger Verzögerung einstellt, erfolgte die Ablesung der Messwerte erst ca. 15 Minuten nach Einstellung des Luftvolumenstroms.

Die Druckluft für Versuchsstand A konnte zunächst dem Druckluftnetz der Abwasserreinigungsanlage entnommen werden. Im Laufe der Versuche musste aufgrund von Betriebsänderungen der Abwasserreinigungsanlage ein eigenes Drehkolbengebläse installiert werden. Versuchsstand B wurde von Beginn an mit einem eigenen Drehkolbengebläse ausgestattet. Für Versuchsstand C konnte die Druckluft während der gesamten Versuchsdauer dem Druckluftnetz der Abwasserreinigungsanlage entnommen werden. Die Kenndaten der Abwasserbehandlungsanlagen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.



Abbildung 15: Versuchsstand A und dort eingebaute Tellerbelüfter



Abbildung 16: Versuchsstand B und dort eingebaute Plattenbelüfter



Abbildung 17: Versuchsstand C und dort eingebaute Rohrbelüfter

Tabelle 5: Kenndaten der Abwasserreinigungsanlagen an denen die Versuchsstände betrieben wurden

Abwasserreinigungsanlage	A	B	C
Ausbaugröße E	8.000 E	50.000 E	89.000
mittlere Auslastung	75 %	70 %	85 %
Vorklärung	ja	nein	ja
N-Elimination	vorgeschaltete Denitrifikation/Nitrifikation		
P-Elimination	Bio-P + Fällung mit AlCl ₃	Fällung mit Aluminiumsalzen	Bio-P + Fällung mit FeCl ₃
Schlamm- behandlung	keine, Schlamm wird abgefahren	Faulung	Faulung
mittleres Schlammalter t _{TS}	20 d	12 d	12 d
mittlerer Feststoffgehalt im Belebungsbecken TS _{BR}	3,5 kg/m ³	3 kg/m ³	3,5 kg/m ³
Kenndaten nach Angaben des Betriebspersonals			

4.1.2 Bestimmung der Sauerstoffzufuhr und des Druckverlustes im Labor

Im Reinwasser steigt bei der Belüftung des sauerstofffreien Versuchswassers (Absorptionsmessung) die Sauerstoffkonzentration C_t durch die Absorption des Luftsauerstoffs entsprechend einer Sättigungsfunktion auf den Sauerstoffsättigungswert C_s an [DWA, 2007]:

$$C_t = C_s - (C_s - C_0) \cdot e^{-k_L a \cdot t} \quad \text{mg/l}$$

mit:

$$\begin{array}{ll} C_0 & \text{mg/l} \quad \text{Konzentration an gelöstem Sauerstoff im Wasser zum Zeitpunkt } t = 0 \\ k_L a & \text{1/h} \quad \text{Belüftungskoeffizient in Reinwasser} \end{array}$$

Bei der Desorptionsmessung wird im Gegensatz zur Absorptionsmessung das Versuchswasser zunächst mit Reinsauerstoff belüftet. Durch den hohen Sauerstoffpartialdruck des Reinsauerstoffs steigt die Sauerstoffkonzentration im Messwasser auf Werte oberhalb der natürlichen Sättigungskonzentration an. Das übersättigte Versuchswasser wird danach mit atmosphärischer Luft belüftet. Der im Messwasser im Überschuss gelöste Sauerstoff wird dabei wieder desorbiert bis wieder die Sauerstoffsättigungskonzentration erreicht ist. Aus dem gemessenen Verlauf der Sauerstoffkonzentration in Reinwasser lässt sich mittels nichtlinearer Regression der Belüftungskoeffizient $k_L a$ berechnen. Dieser wird auf Standardbedingungen (Wassertemperatur $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, Normaldruck $p_0 = 1.013 \text{ hPa}$, Sauerstoffkonzentration 0 mg/l [DIN 1343, DWA-Merkblatt M-209]) normiert. Hierfür ist die Messung des Luftdrucks und der Wassertemperatur erforderlich. In Abbildung 18 sind die Verläufe der Sauerstoffkonzentration, wie sie sich bei der Durchführung von Absorptionsmessungen und Desorptionsmessungen ergeben, zum Vergleich dargestellt.

Die Bestimmung der Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente erfolgte in den Laborräumen des Instituts WAR in einem zylindrischen Wasserbehälter mit 90 cm Innendurchmesser und 1,1 m Höhe. Die Belüftungselemente wurden jeweils einzeln eingebaut und an die Zuluftleitung sowie die Messgeräte angeschlossen. Die Druckluft wurde von 2 Drehschieberverdichtern erzeugt, die mit Überdruckventilen ausgestattet sind, so dass der Luftvolumenstrom mit einem Nadelreguliertventil stufenlos zwischen 0 und 12 m³/h eingestellt werden konnte. Da die Konstruktionshöhe der Belüfteranschlüsse ca. 10 cm beträgt, ergeben sich bei einem Wasserstand von 1 m eine Einblastiefe von ca. 90 cm und ein belüftetes Wasservolumen von 750 l.

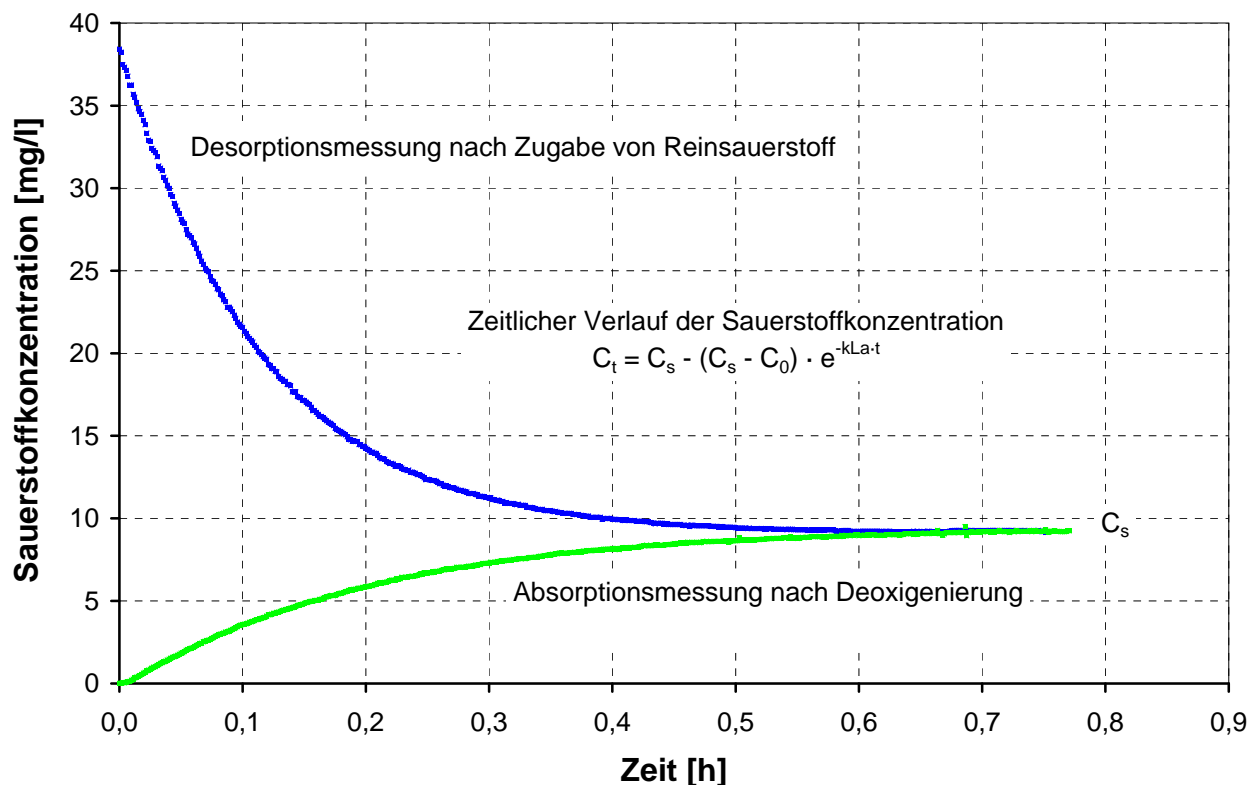


Abbildung 18: Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei Sauerstoffzufuhrmessungen

Da aufgrund der Beckengröße der Einsatz von demineralisiertem Wasser nicht praktikabel erschien, wurde als Versuchswasser Darmstädter Leitungswasser genutzt, das vor der ersten Messung mindestens drei Tage lang belüftet wurde. Während dieser Zeit wird die im Trinkwasser gelöste Kohlenensäure ausgestrippt, so dass aufgrund der Veränderung des Kalk-Kohlenensäure-Gleichgewichts die im Trinkwasser enthaltene Wasserhärte als weißer Belag auf den Behälterwänden und dem Belüftungselement ausfällt. Das verkalkte Belüftungselement kann danach nicht mehr für Versuche benutzt werden. Mit diesem Messwasser können dann ohne Gefahr weiterer Kalkablagerungen auf den Belüftungselementen Sauerstoffzufuhrversuche durchgeführt werden. Das Messwasser wurde ausgetauscht sobald eine Trübung oder Verunreinigung feststellbar war. Alle Belüftungselemente wurden vor dem Eintauchen ins Messwasser vorsichtig mit Trinkwasser abgespült um den Eintrag von Verschmutzungen zu minimieren.

Die Sauerstoffzufuhrmessungen wurden entsprechend dem DWA-Merkblatt M 209 als Desorptionsmessungen nach Anhebung des Sauerstoffgehaltes durch Zugabe von Reinsauerstoff durchgeführt und ausgewertet. Hierzu wurde bei jeder Messung der Verlauf der Sauerstoffkonzentration mit drei Sauerstoffelektroden quasi-kontinuierlich (alle 5 s) aufgezeichnet. Zusätzlich wurden periodisch die Parameter

- betrieblicher Luftvolumenstrom,
- atmosphärischer Luftdruck,
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Zuluft- und Wassertemperatur
- und der Überdruck in der Rohrleitung aufgezeichnet.

Zu Beginn jeder Messreihe wurde außerdem der Wasserstand bei ausgeschalteter Belüftung bestimmt. Anhand der aufgezeichneten Daten wurden anschließend die Sauerstoffzufuhrausnutzung und der Druckverlust der Belüftungselemente bestimmt. Dabei wurde die Sauerstoffausnutzung immer dem auf Standardbedingungen bezogenen, normierten Luftvolumenstrom gegenüber gestellt, mit dem der für die Sauerstoffzufuhr maßgebliche Massenstrom des Sauerstoffs indirekt erfasst wird [ATV Merkblatt M 209] (Beispiel s. Abbildung 20). Der Druckverlust wurde demgegenüber auf den betrieblichen Luftvolumenstrom des Belüftungselementes bezogen, da damit indirekt der Einfluss der Fließgeschwindigkeit in den Luftschlitzen richtig erfasst wird, die als maßgeblicher Faktor den Druckverlust des Belüftungselementes bestimmt.

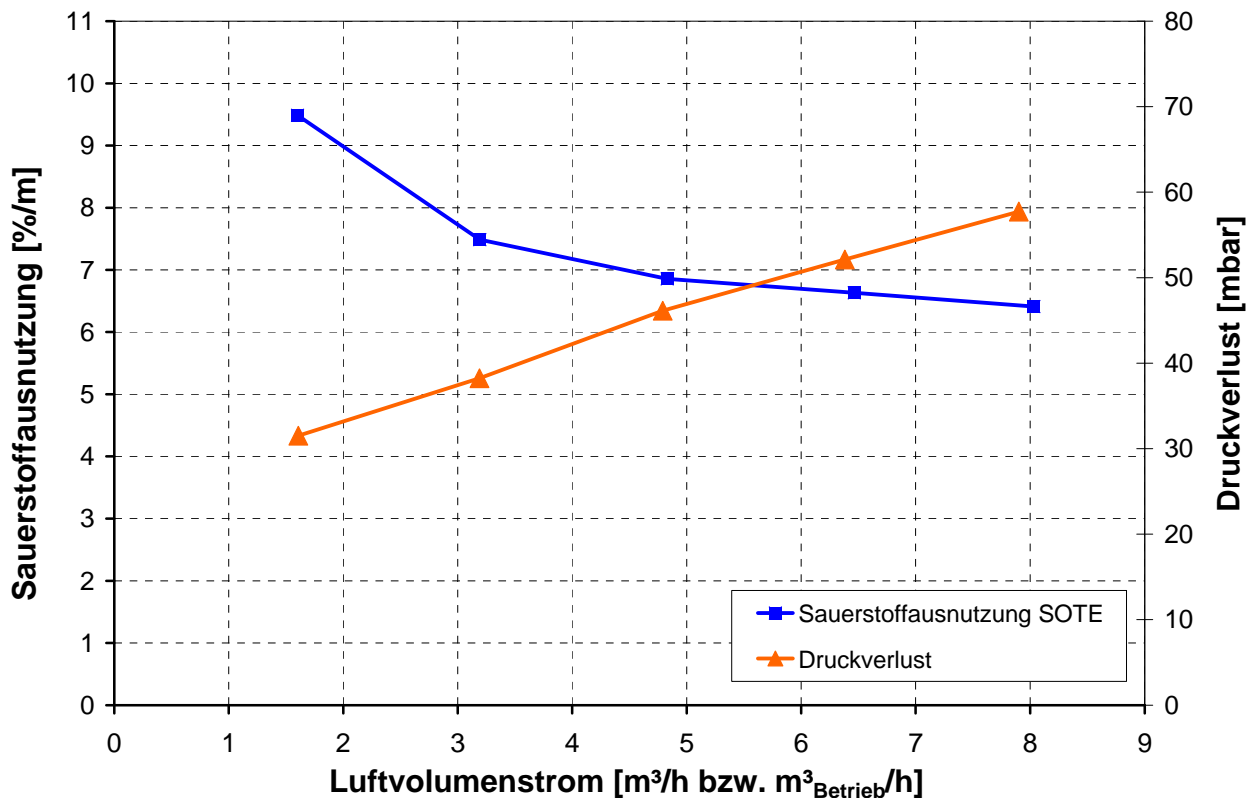


Abbildung 20: Sauerstoffausnutzung und Druckverlust eines Belüftungselementes (Beispiel)

Je Belüftungselement wurden fünf Messungen bei verschiedenen Luftvolumenströmen innerhalb der vom Hersteller für den Dauerbetrieb empfohlenen minimalen bis maximalen Luftvolumenströme durchgeführt. Die Messreihe beginnt immer mit dem höchsten Luftvolumenstrom. Neue Belüftungselemente wurden vor der ersten Messung mindestens 48 Stunden lang mit dem höchsten für die Messungen vorgesehenen Luftvolumenstrom betrieben. Gebrauchte Belüftungselemente werden in gereinigtem Abwasser gelagert und einige Stunden vor der Messung mit 50 % des maximalen Luftvolumenstroms in Betrieb genommen. Aufgrund der dargestellten Versuchsbedingungen sind die Ergebnisse nicht dazu geeignet direkt auf die Bedingungen im großtechnischen Belebungsbecken übertragen zu werden. Die Ergebnisse erlauben aber dennoch eine Aussage über die relative Veränderung der Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente und sind daher ein geeignetes Mittel, die Leistungsfähigkeit der neuen und belegten Belüftungselemente im direkten Vergleich zu bewerten.

4.2 Reinigung der Belüftungselemente

4.2.1 Hochdruckbehandlung

Die Hochdruckbehandlung wird entweder mit einer konventionellen Fächerdüse oder mit einer rotierenden Hochdruckdüse (als Dreckfräse bezeichnet) durchgeführt. Infolge der Bündelung des Hochdruckstrahls auf einer kleinen Fläche kann die Behandlungswirkung verstärkt werden. Um dennoch eine flächige Behandlung zu erreichen, wird der Hochdruckstrahl in eine schnelle, nicht mehr sichtbare Rotation versetzt, so dass er auf der zu reinigenden Oberfläche einen Kreisbogen beschreibt [Kärcher, 2007]. Es wurden Hochdruckreiniger mit einem Arbeitsdruck von 80 und 150 bar eingesetzt. Der Sprühabstand zwischen der Hochdruckdüse und der Belüftungsmembran betrug ca. 15 cm. Während der Reinigung wurden die Belüftungselemente mit hohem Luftvolumenstrom beaufschlagt. Der Ablauf der Hochdruckbehandlung und die Funktionsweise der Dreckfräse sind in Abbildung 21 dargestellt.

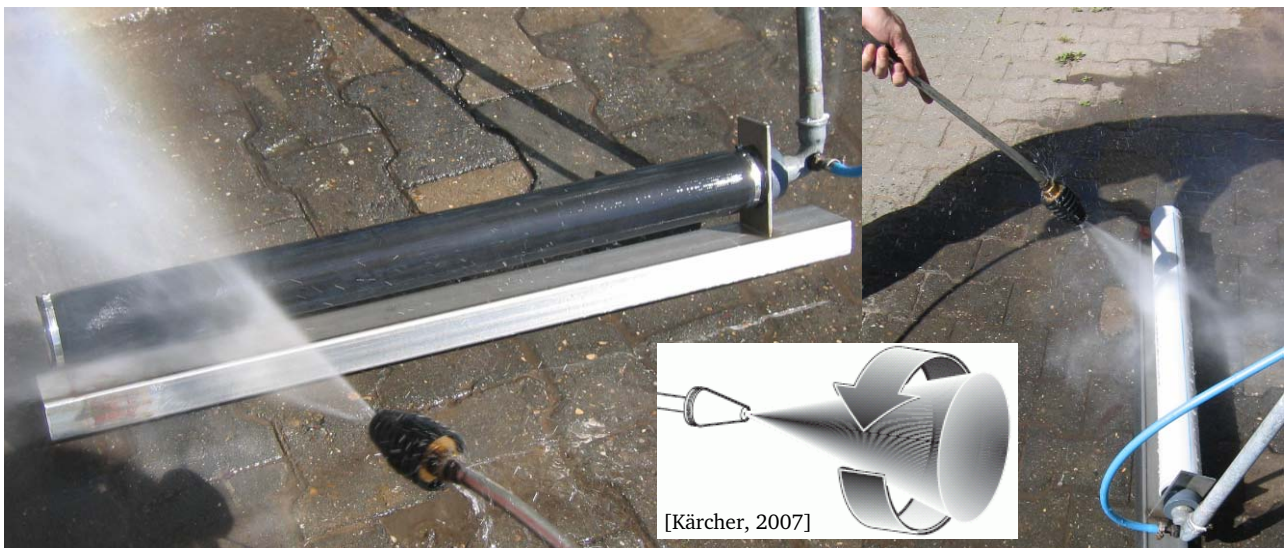


Abbildung 21: Hochdruckbehandlung von Rohrbelüftern; Funktion der Dreckfräse

4.2.2 Handreinigung

Die Belüftungselemente wurden mit einer Waschbürste und Handwaschpaste mit leichtem Druck abgebürstet, bis keine Belagsreste mehr auf der Belüftungsmembran zu erkennen waren. Während der Reinigung werden die Belüftungselemente mit Luft beaufschlagt. Dies entspricht der von den Herstellern empfohlenen Vorgehensweise [Klos, 2007]. Nach der Reinigung wurden die Belüftungselemente gründlich mit Leitungswasser abgespült und anschließend ca. eine Stunde bei mittlerem Luftvolumenstrom in Trinkwasser betrieben, um vor der anschließenden Sauerstoffzufuhrmessung Schmutzreste und Reste der Handwaschpaste ausreichend abzuspülen. Der Reinigungsablauf und die erforderlichen Hilfsmittel sind in Abbildung 22 dargestellt.

4.2.3 Druckschlagbehandlung

Bei den Versuchen zur Reinigung mittels Druckschlag wurde die in Abbildung 23 dargestellte Druckschlagarmatur in die Luftleitung zum Belüftungselement eingebaut. Durch eine Zeitschaltuhr wird das Magnetventil alle 5 Minuten für 20 Sekunden eingeschaltet und öffnet die Luftleitung zur Atmosphäre hin. Der in der Leitung vorhandene Druck entweicht dann schlagartig durch das Magnetventil; es entsteht der gewünschte Druckschlag. Danach entweicht die nachströmende Druckluft

in die Atmosphäre, bis sich nach 20 s das Ventil schließt. Dann baut sich der Druck wieder auf und die Druckluft strömt ungehindert weiter zum Belüftungselement. Bei den jeweils mit einem einzelnen Belüftungselement durchgeführten Druckschlagversuchen wurde ein mittlerer Luftvolumenstrom von 3 m³/h eingestellt.



Abbildung 22: Plattenbelüfter vor, während und nach der Reinigung mit der Handbürste



Abbildung 23 Druckschlagarmatur

4.2.4 Eindüsung von Ameisensäure

Die Belüftungselemente wurden während der Säureeindüsung in Trinkwasser mit etwa 10 cm Wasserüberstand betreiben. Die 98 %-ige Ameisensäure wird mit Hilfe einer druckluftgetriebenen Nebeldüse in die Zuleitung zum Belüftungselement eingedüst. Dabei wird der Überdruck auf der Druckluftleitung kontinuierlich beobachtet. Die Eindüsung der Ameisensäure wird in Schritten zu je 5 ml durchgeführt und so lange wiederholt, bis keine Druckänderung mehr zu beobachten ist. Der Versuchsaufbau der Säureeindüsung ist in Abbildung 24 mit allen Zuleitungen und Anschlüssen dargestellt.

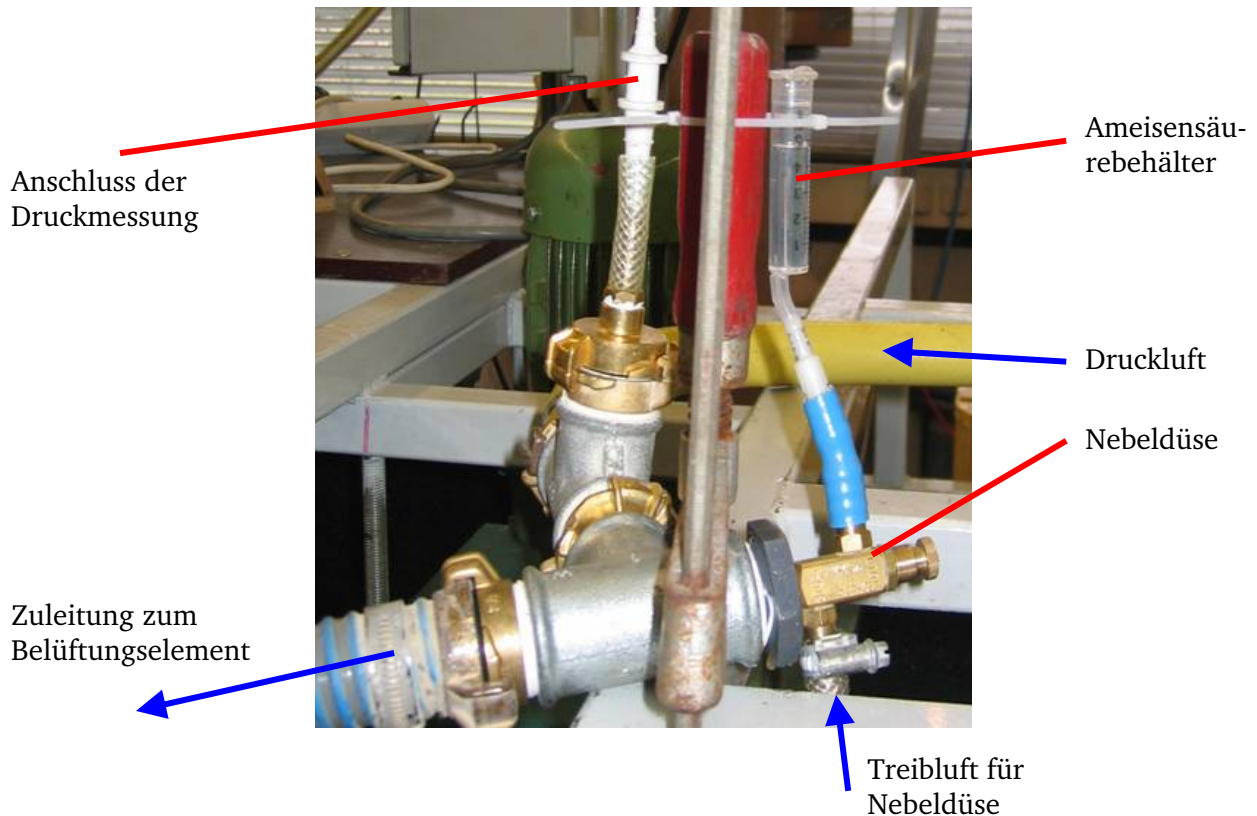


Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Säureeindüsung

4.3 Werkstoffuntersuchungen

4.3.1 Materialhärte

Die Materialhärte wurde entweder als Shore-A Härte nach DIN 53 505 oder nach DIN ISO 48 in internationalen Härtegraden IRHD (International Rubber Hardness Degree) bestimmt. Für beide Methoden gilt: „Die Härte wird durch die Eindringtiefe eines unter einer festgelegten Kraft stehenden, kugelförmigen Eindringkörpers in den elastomeren Probekörper gemessen.“ [DIN ISO 48, S. 3]. Es wurden wechselnde Labore mit den Messungen beauftragt.

Bei den Messungen nach DIN ISO 48 wurde die so genannte Mikrohärteprüfung (Verfahren M) durchgeführt. Diese Prüfung ist im Wesentlichen eine Verkleinerung der Normalprüfung (Verfahren N), wodurch eine regelkonforme Prüfung dünner ($2 \pm 0,5$) mm und kleiner Probekörper (9 mm) ermöglicht wird. Als Ergebnis erhält man ebenfalls die Materialhärte in IRHD-Einheiten. Für hoch-

elastische Elastomere sind die Skalen der IRHD- und der Shore-A Härteprüfgeräte vergleichbar [DIN ISO 48]. An einzelnen Proben durchgeführte Kontrollversuche ergeben praktisch keine Abweichung zwischen den Messverfahren, da die Messwerte innerhalb der Messgenauigkeit der beiden Verfahren gleich sind. Die Abmessungen des Eindringkörpers, der Auflagefläche und die aufgebrachtene Kräfte sind genormt und variieren zwischen bei den Prüfungsverfahren.

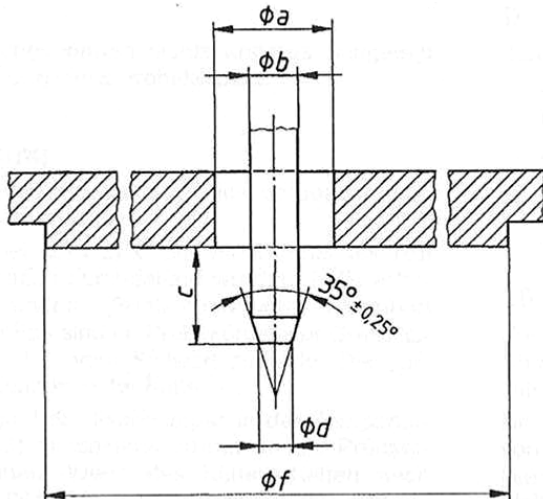


Abbildung 25: Abmessungen des Eindringkörpers und der Auflagefläche bei der Härteprüfung [DIN 53505] (links) und Fotografie der Probenahme (rechts)

4.3.2 Extrahierbare Bestandteile des EPDM

Der Gehalt an paraffinischen Weichmachern (Weichmacheröle) der EPDM-Werkstoffe kann näherungsweise über den Gehalt extrahierbarer Substanzen bestimmt werden [Brüll, 2004 und Edel, 2001]. Diese Bestimmung wurde beim Deutschen Kunststoff-Institut (DKI) in Darmstadt in Auftrag gegeben. Dabei wurden die Proben mit Xylol extrahiert. Die Extrakte wurden dann vom Lösungsmittel befreit und im Vakuum getrocknet [DKI, 2004]. Die Proben für diese Bestimmung wurden zusammen mit den Proben für die Bestimmung der Materialhärte genommen und wurden aus dem geschlitzten Teil der Belüftungsmembran herausgeschnitten (s. Abbildung 25).

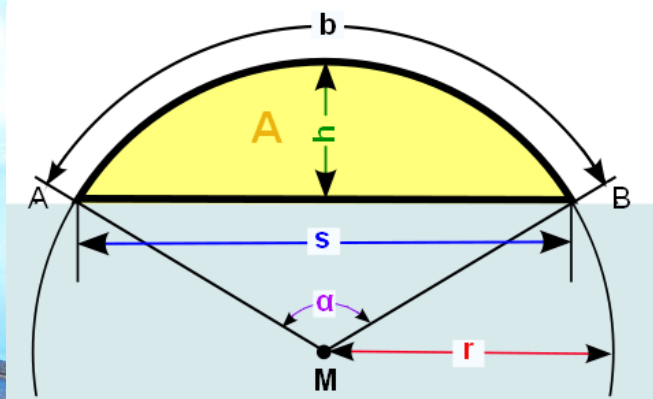
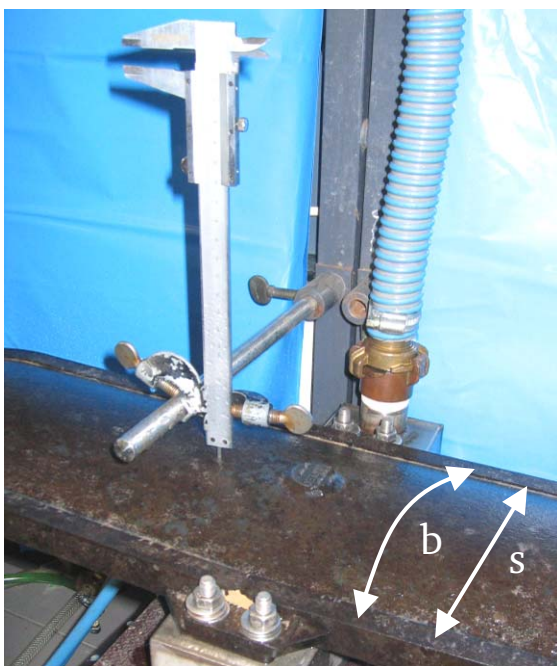
4.3.3 Dehnungsverhalten

Üblicherweise werden die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen unter normierten Versuchsbedingungen an genau definierten Probekörpern ermittelt (z.B. Zugversuch nach DIN 53 455, s. auch Kapitel 4.3.1 Materialhärte). Hierzu müssen die Belüftermembranen von den Belüftungselementen entfernt und entsprechende Probekörper aus den Belüftungsmembranen herausgeschnitten werden, was naturgemäß die Zerstörung der Belüftungselemente bedingt. Die Ergebnisse erlauben zwar eine nachvollziehbare und reproduzierbare Aussage über die Materialeigenschaften des untersuchten Werkstoffs; Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten der Belüftungsmembran sind jedoch nicht unmittelbar möglich. Die Gründe hierfür werden im Folgenden diskutiert:

- Die Krafteinleitung in einen Norm-Probekörper erzeugt einen anderen Spannungszustand als die Betriebsbelastung. Belüftungsmembranen geraten aufgrund der Einspannung in die Stützkörper (bei Platten- und Tellerbelüftern) und durch die Schlitzung in einen zweiachsigen Spannungszustand. Der Zugversuch nach DIN 53 455 erzeugt nur eine einachsige Spannung, bei der zudem die Ausrichtung der Belüftungsschlitze die Ergebnisse beeinflusst. Bei der Be-

- stimmung der Shore-A Härte wird die Belüftungsmembran zum einen punktförmig und zum anderen senkrecht zur Ebene der betrieblichen Belastung untersucht.
- Bereits vor der Versuchsdurchführung, jedoch spätestens bei der Interpretation der Versuchsergebnisse muss bekannt sein, in welcher Größenordnung die Betriebsbelastung liegt. Überlegungen dazu erübrigen sich, wenn die Untersuchung im Betrieb durchgeführt werden kann.
 - Die Probekörper können sich durch Trocknen und das Ausdunsten leicht flüchtiger Bestandteile verändern und damit eine Materialhärte oder Steifigkeit vortäuschen, die unter Betriebsbedingungen nicht vorhanden ist.
 - Da bei Zugversuchen die Spannung als Kraft pro Querschnittsfläche (N/mm^2) berechnet wird, muss bei der Analyse der Messwerte berücksichtigt werden, dass die Probekörper von gebrauchten EPDM-Belüftungsmembranen den geschrumpften Zustand der Belüftungsmembran aufzeigen.

Um die Dehnung der Membranwerkstoffe unter möglichst realistischen Betriebsbedingungen zu messen, wurde daher ein neues Messverfahren entwickelt, das die Nachteile der Normversuche weitgehend vermeidet. Bei diesem Verfahren wird die Aufwölbung der Belüftungsmembran (bei Platten- und Tellerbelüftern (s. Abbildung 26, links)) bzw. der Umfang der Belüftungsmembran (bei Rohrbelüftern) bei verschiedenen, in abnehmender Reihenfolge eingestellten Luftvolumenströmen gemessen und zusammen mit dem Luftvolumenstrom und dem Druckverlust ausgewertet. Anhand einer idealisierten Belüftungselementgeometrie (s. Abbildung 26, rechts) wird dann im Vergleich zur Ausgangslänge der Belüftungsmembran (s) die Dehnung ermittelt. Da bei den untersuchten Tellerbelüftern die Belüftungsmembran in Tellermitte durch ein Rückschlagventil fixiert wird, wird hier die Aufwölbung in der Mitte zwischen Tellermitte und Tellerrand bestimmt. Da bei Teller- und bei Plattenbelüftern die genaue Ausgangslänge der Belüftungsmembran aufgrund ihrer Befestigung am Rand des Belüftungselementes nicht genau bestimmt werden kann, wurde die Abmessung des Stützkörpers als Ausgangslänge (s) angenommen. Abbildung 28 zeigt beispielhaft zwei unterschiedlich stark aufgewölbte Tellerbelüfter. Das Rückschlagventil ist in dieser Ansicht durch die Belüftungsmembran verdeckt. Um das Austrocknen der Belüftungsmembran zu verhindern, werden die Belüftungselemente bis unmittelbar vor der Messung in demineralisiertem Wasser betrieben und während der Messung durch mehrfaches Besprühen mit dem gleichen Wasser feucht gehalten.



$$b = \frac{\arctan\left(\frac{2h}{s}\right) \cdot (4h^2 + s^2)}{2h}$$

Abbildung 26: Messaufbau (links), Schema und Berechnungsformel der idealisierten Geometrie für Teller- und Plattenbelüfter (rechts) [Formularium, 2008]

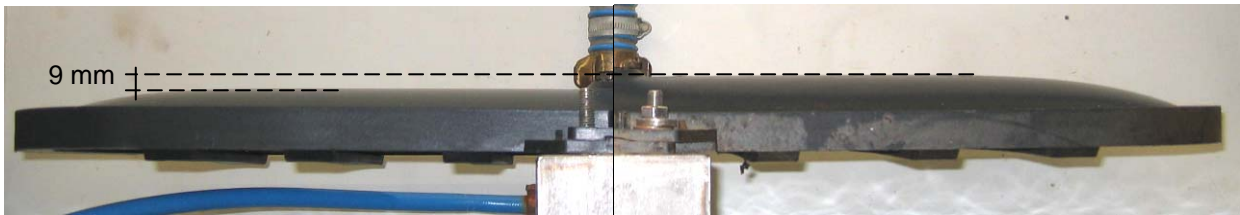


Abbildung 27: neue Silikonmembran eines Plattenbelüfters mit geringer Wölbung (links) und gebrauchte Silikonmembran mit großer Wölbung (rechts) (bei gleichem Luftvolumenstrom)

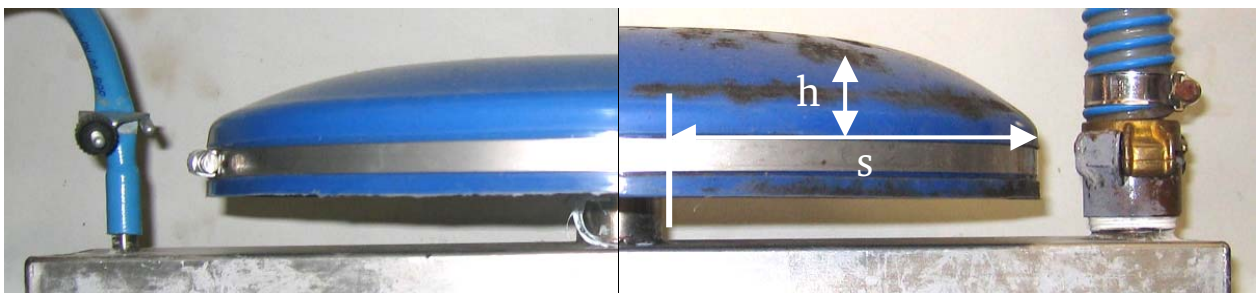


Abbildung 28: neue Silikonmembran eines Tellerbelüfters mit geringer Wölbung (links) und gebrauchte Silikonmembran mit großer Wölbung (rechts) (bei gleichem Luftvolumenstrom)

4.4 Untersuchung der Beläge

4.4.1 Semiquantitative Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) der Membranablagerungen

Zur Bestimmung der Zusammensetzung der auf den Oberflächen der Belüftungsmembranen anhaftenden Beläge wurden semiquantitative Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) beim Labor SGS Institut Fresenius GmbH (Taunusstein) in Auftrag gegeben. Die Proben wurden zunächst getrocknet und danach bei 550°C geglüht. Bei der RFA werden alle Elemente ab der Ordnungszahl 9 erfasst. Mit Ausnahme der Halogene werden die gefundenen Elemente als Oxide berechnet und auf 100 % normiert. Die bei der RFA angegebenen Ergebnisse beziehen sich auf die bei 550 °C geglühte Probe [Institut Fresenius], d.h. den getrockneten anorganischen Anteil (Glühverlust nach DIN 38414 Teil 3). Der Glühverlust wurde daher ebenfalls berechnet.

4.4.2 Mikroskopie

Für die Erstellung der mikroskopischen Aufnahmen wurde wahlweise ein mit einer Digitalkamera nachgerüstetes Durchlichtmikroskop des Typs Will BX-300 und eine digitale Mikroskopkamera des Typs Conrad-Electronics YK-MC01 benutzt. Die digitale Mikroskopkamera hat dabei den Vorteil, dass sie mit der integrierten Beleuchtung direkt auf die zu mikroskopierende Oberfläche gesetzt wird, so dass die sonst übliche Präparation der Probe zur Befestigung auf den Mikroskoptisch entfällt. Die Belüftungselemente müssen daher nicht für die Mikroskopie zerlegt werden, wodurch Aufnahmen von Belüftungselementen/-schlitzen mit Luftbeaufschlagung möglich sind.

4.5 Bestimmung des Energiebedarfs der Belüftung unter Betriebsbedingungen

Der Energiebedarf für die Belüftung wurde mit der in Kapitel 2.6 dargestellten Gleichungen an Hand des Energiebedarfs für die Druckluftherzeugung mit Turboverdichter oder Drehkolbengebläse berechnet. Als Eingangswerte der Berechnung müssen der Luftvolumenstrom und der Differenzdruck, der dem Gegendruck des Belüftungssystems entspricht, bekannt sein. Um die Auswirkung von Veränderungen des Druckverlustes und der Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente auf den Energiebedarf der Belüftung zu beurteilen, wurden alle relevanten Zusammenhänge in einem theoretischem Model des Belüftungssystems abgebildet, mit dem anschließend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt wurde. Das Ziel dieser Analyse ist die Auswirkung der Veränderungen der Eingangsgrößen Druckverlust und Sauerstoffausnutzung auf den Energiebedarf der Belüftung als Ausgangsgröße darzustellen. Um die Sensitivitätsanalyse allgemeingültig zu gestalten, wurden die zu untersuchenden Größen als relative Größen zu beschrieben. Daher wurden der Druckverlust der Belüftungselemente, die Sauerstoffausnutzung und der Energiebedarf des Belüftungssystems für den Neuzustand als Ausgangszustand der Betrachtung zu 100 % gesetzt. Die Analyse setzt voraus, dass beim relativen Vergleich Belastungsschwankungen durch Tagesverläufe etc. im langfristigen Mittel keine Rolle spielen und daher die Betrachtung mittlerer Zustände ausreichend ist.

4.5.1 Bestimmung des erforderlichen Luftvolumenstrom

Bei der Druckluftbelüftung ergibt sich die Sauerstoffzufuhr aus dem Luftvolumenstrom Q , der Sauerstoffausnutzung $SOTE$, der Einblastiefe h_e und dem Sauerstoffgehalt der Druckluft wie folgt:

$$SOTR = Q \cdot SOTE \cdot h_e \cdot 0,299 \text{ kg/m}^3 \quad [\text{kg/h}]$$

Eine Veränderung der Sauerstoffausnutzung müssen die Druckluftherzeuger durch die Erhöhung oder Verminderung des Luftvolumenstroms kompensieren, um die Sauerstoffzufuhr wieder auf das ursprüngliche Ausgangsmaß anzuheben. Der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom verhält sich daher umgekehrt proportional zur Sauerstoffausnutzung. Dieser Zusammenhang kann bei relativer Betrachtung mittels entsprechender Indices wie folgt formuliert werden:

$$\frac{Q_{\text{Betrieb}}}{Q_{\text{Neu}}} = \frac{SOTE_{\text{Neu}}}{SOTE_{\text{Betrieb}}} \quad [-]$$

mit:

$$\begin{array}{ll} Q & \text{(Norm-)Luftvolumenstrom} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \\ SOTE & \text{Sauerstoffausnutzung} \quad [\%/m] \end{array}$$

Zusätzlich muss auch berücksichtigt werden, dass die Sauerstoffausnutzung feinblasiger Druckluftbelüftungssysteme vom Luftvolumenstrom abhängig ist. An Hand von Erfahrungswerten ergibt sich, dass bei minimalem Luftvolumenstrom die Sauerstoffausnutzung etwa 20 % größer ist, als bei maximalem Luftvolumenstrom. Hierfür wurde ein vereinfachender linearer Ansatz gewählt, der für die Betrachtung der mittleren Zustände ausreichend genau ist. Mit der nachstehenden Weiterentwicklung der zuvor genannten Formel kann somit die erforderliche Veränderung des Luftvolumenstroms zur Anpassung an die veränderte Sauerstoffausnutzung iterativ berechnet werden.

$$\frac{Q_{\text{Betrieb}}}{Q_{\text{Neu}}} = \frac{SOTE_{\text{Neu}}}{SOTE_{\text{Betrieb}}} \cdot \left(\frac{Q_{\text{Betrieb}}}{Q_{\text{Neu}}} \cdot 0,25 + 0,75 \right) \quad [-]$$

Damit ist der Luftvolumenstrom für die Berechnung des Energiebedarfs der Druckluftherzeuger bekannt. Als weitere Eingangsgröße ist noch der Überdruck im Belüftungssystem zu bestimmen.

4.5.2 Bestimmung des Überdrucks

Der Überdruck im Belüftungssystem besteht aus der Summe von hydrostatischem Wasserdruck, Rohrleitungsverlusten und dem Druckverlust der Belüftungselemente (vergl. Kapitel 2.5). Die Einblastiefe kann beim Belebungsverfahren im Allgemeinen als konstant betrachtet werden. Der hydrostatische Wasserdruck wurde daher als im Betrieb unveränderlich angenommen. Die Rohrleitungsverluste sind sehr variabel, da sie als Reibungsverluste der Luftströmung zum einen von der Fließgeschwindigkeit abhängig sind, zum anderen aber auch durch die Stellung der Drosselarmaturen zur Steuerung der Luftverteilung beeinflusst werden. Daher wurden sie bei der Berechnung des Überdrucks pauschal mit einem Erfahrungswert von 30 mbar angesetzt. Der Druckverlust der Belüftungselemente ist anders als die Sauerstoffzufuhr nicht vom (Norm-)Luftvolumenstrom, sondern vom Betriebs-Luftvolumenstrom abhängig. Für die Sensitivitätsanalyse wurde ein fiktives fabrikneues Belüftungselement angesetzt, dessen Druckverlust zwischen 0 und 100 % Betriebs-Luftvolumenstrom linear von 30 auf 60 mbar ansteigt. Für die Übertragung der Versuchsergebnisse auf den Energiebedarf unter Betriebsbedingung (s. Kapitel 5.5.2) wurden die Druckverlustkurven realer Belüftungselemente ausgewertet. Der Überdruck im Belüftungssystem ergibt sich wie folgt:

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{hydrostatisch}} + p_{\text{Rohrleitung}} + p_{\text{Belüftungselemente}} \\ &= 98,1 \text{ mbar/m} \cdot h_p + 30 \text{ mbar} + f(Q_{\text{Betrieb}}) \quad [\text{mbar}] \end{aligned}$$

Bei bekanntem Norm-Luftvolumenstrom, kann der Betriebs-Luftvolumenstrom an Hand des Überdrucks im Belüftungssystem berechnet werden. Da der Druckverlust der Belüftungselemente als Teil des Überdrucks aber selbst vom Betriebs-Luftvolumenstrom abhängig ist (s. Kapitel 4.5.1), wird diese Berechnung iterativ durchgeführt.

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Druckverlust im Neuzustand

Zur Vorbereitung der weiteren Untersuchungen wurden zunächst als Referenz- und Vergleichswerte die Druckverluste der Belüftungselemente im Neuzustand bestimmt (s. Abbildung 29). Die Druckverlustangaben der Hersteller (Tabelle 6) werden zumeist unterschritten.

Tabelle 6: Herstellerangaben zum Druckverlust, gemessene Druckverluste und Luftvolumenströme

Element	Material	Herstellerangaben	Messwerte
Rohr (0,5 m)	EPDM Typ I	50 mbar (5 m ³ /h), 36 mbar (1 m ³ /h)	41 mbar (3,0 m ³ /h)
	EPDM Typ II	entspricht Typ I	
	Silikon Typ I	75 mbar (5 m ³ /h), 50 mbar (1 m ³ /h)	44 mbar (3,0 m ³ /h)
	Silikon Typ II	keine Angabe	57 mbar (3,0 m ³ /h)
Teller	EPDM Typ I	40 mbar (8 m ³ /h), 30 mbar (1 m ³ /h)	19 mbar (4,0 m ³ /h)
	EPDM Typ II	keine Angabe	22 mbar (4,0 m ³ /h)
	Silikon	„geringfügig höher als bei EPDM“	27 mbar (4,0 m ³ /h)
Platte	EPDM	keine Angabe	41 mbar (3,5 m ³ /h)
	Silikon	keine Angabe	38 mbar (3,0 m ³ /h)

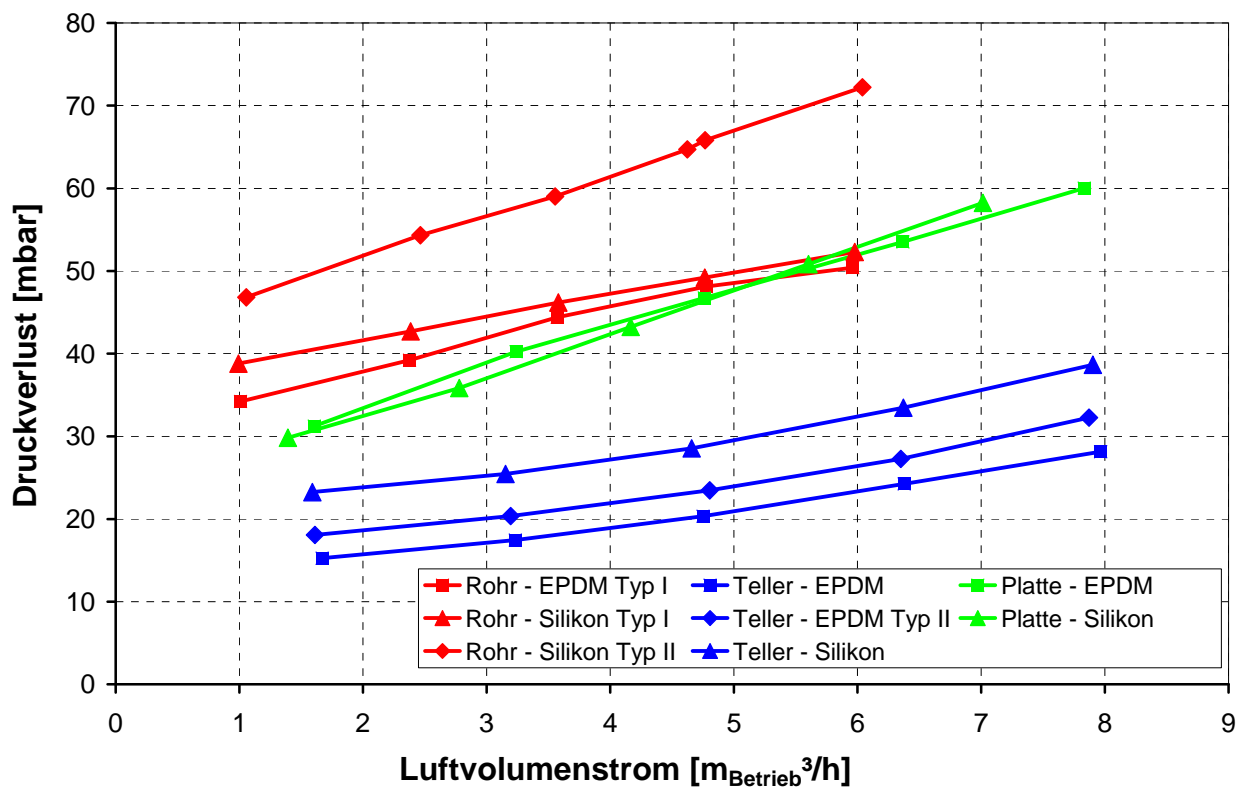


Abbildung 29: Druckverluste im Neuzustand

Auffällig hoch ist der Druckverlust der Silikon-Typ II-Rohrbelüfter. Weiterhin steigt der Druckverlust bei Rohr- und Plattenbelüftern nahezu linear zum Luftvolumenstrom an, während der Druckverlust der Tellerbelüfter deutlich überproportional zum Luftvolumenstrom ansteigt.

5.2 Druckverlust unter Betriebsbedingungen

5.2.1 Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembran

Aus den bei fünf verschiedenen Luftvolumenströmen ermittelten Druckverlusten jedes Belüftungselementes wurde für die Datenauswertung der Druckverlust bei 50 % des maximal für den Dauerbetrieb zugelassenen Luftvolumenstroms berechnet. Die so ermittelten Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen sind in Abbildung 30 bis Abbildung 32 dargestellt. Wie die Abbildungen zeigen, steigt der Druckverlust der Belüftungselemente in der ersten Betriebsphase von 4 bis 8 Wochen zunächst stark an. Danach stagniert der Druckverlust zumeist auf mittlerem Niveau, schwankt aber kurzfristig sehr stark. Zwischen den Belüftungselementen gleichen Typs und Materials innerhalb einer Versuchsanlage (es sind jeweils paarweise baugleiche Belüftungselemente im Betrieb) treten Druckverlustunterschiede von bis zu 10 mbar auf. Auch zwischen den Versuchständen sind die Druckverluste unterschiedlich. Diese Unterschiede können, wie in den nachfolgenden Kapiteln noch dargestellt wird, auf die unterschiedlichen Betriebsweisen der Belüftungselemente zurück geführt werden. Einflüsse aus der Abwassercharakteristik und des Belebtschlammes waren demgegenüber nicht eindeutig nach zu weisen.

Die Tellerbelüfter weisen sowohl im Neu- als auch im Betriebszustand die geringsten Druckverluste auf. Die Messwerte der als „mikrobenbeständig“ bezeichneten EPDM-Typ-II Tellerbelüfter unterscheiden sich dabei nicht erkennbar von denen der Tellerbelüfter mit konventioneller EPDM-Membran. Im Versuchsstand C erzielten die Tellerbelüfter die insgesamt niedrigsten Druckverluste dieser Versuchsreihe.

Die Messpause zwischen der 79. und der 96. Betriebswoche des Versuchsstandes A (s. Abbildung 30) ist eine Folge der Umstellung des Betriebs des Nitrifikationsbeckens auf intermittierende Nitrifikation/Denitrifikation. Da dieser Versuchsstand bis dahin nicht über eine eigene Druckluftversorgung verfügte, wurden auch die Belüftungselemente des Versuchsstandes intermittierend betrieben. Auf Grund der kurzen Phasendauer konnte jedoch keine sinnvolle Druckverlustmessung durchgeführt werden. Später wurde der Versuchsstand mit einem separaten Drehkolbengebläse ausgestattet, so dass die Druckverlustmessungen wieder aufgenommen werden konnten. Die Druckverluste am Versuchsstand C sind allgemein sehr niedrig. Die Abwasserreinigungsanlage C führte ab der 17. Betriebswoche ein wöchentliches Wartungsprogramm für die Belüftungselemente durch. Dabei wurden die Druckluftherzeuger mehrfach abgeschaltet. Da der Versuchsstand über keine eigene Druckluftversorgung verfügte, wurden auch die Belüftungselemente des Versuchsstandes in dieser Zeit nicht mit Luft beaufschlagt.

Die Rohrbelüfter der älteren EPDM-Mischung (EPDM Typ II) zeigen in allen Versuchständen einen deutlichen Anstieg des Druckverlustes, der zwischen der 35. und der 50. Betriebswoche einsetzt. Etwa 25 Wochen nach Beginn des Druckanstiegs wird ein Plateau mit Druckverlusten um 130 mbar erreicht. Bei maximalem Luftvolumenstrom wurden so Werte von bis zu 207 mbar erreicht. Das nicht alle Belüftungselemente dieses Typs betroffen sind (s. Abbildung 31), ist dadurch zu erklären, dass zwei verschiedene Produktionschargen mit evtl. abweichenden Materialeigenschaften eingesetzt wurden. Dies war bei der Versuchsplanung nicht erwartet worden. Eine nachträgliche Zuordnung zu den unterschiedlichen Chargen ist aufgrund der nach 2-jährigem Betrieb im Belebtschlamm nicht mehr lesbaren Beschriftung der Belüftungsmembranen nicht möglich. Die Belüftungselemente

der anderen eingesetzten Belüftungselementtypen stammen jeweils aus einer gemeinsamen Produktionscharge.

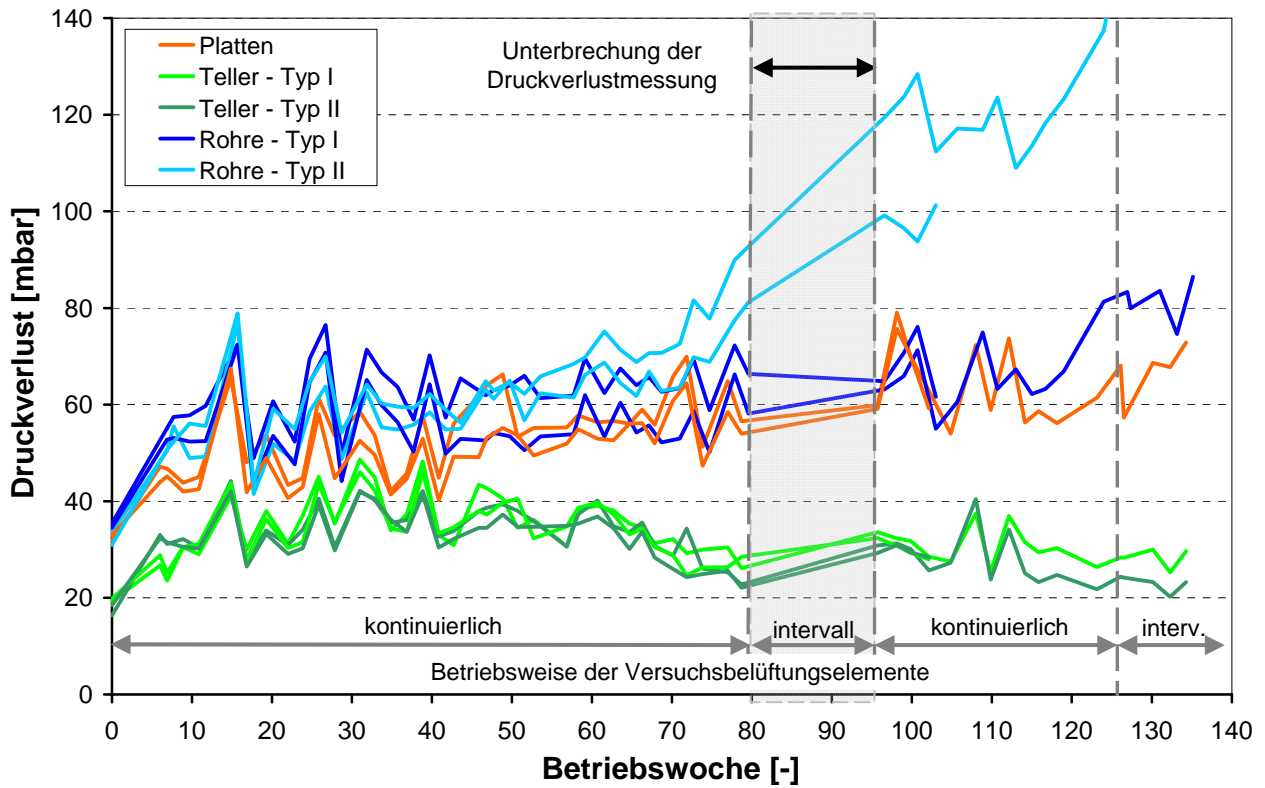


Abbildung 30: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand A

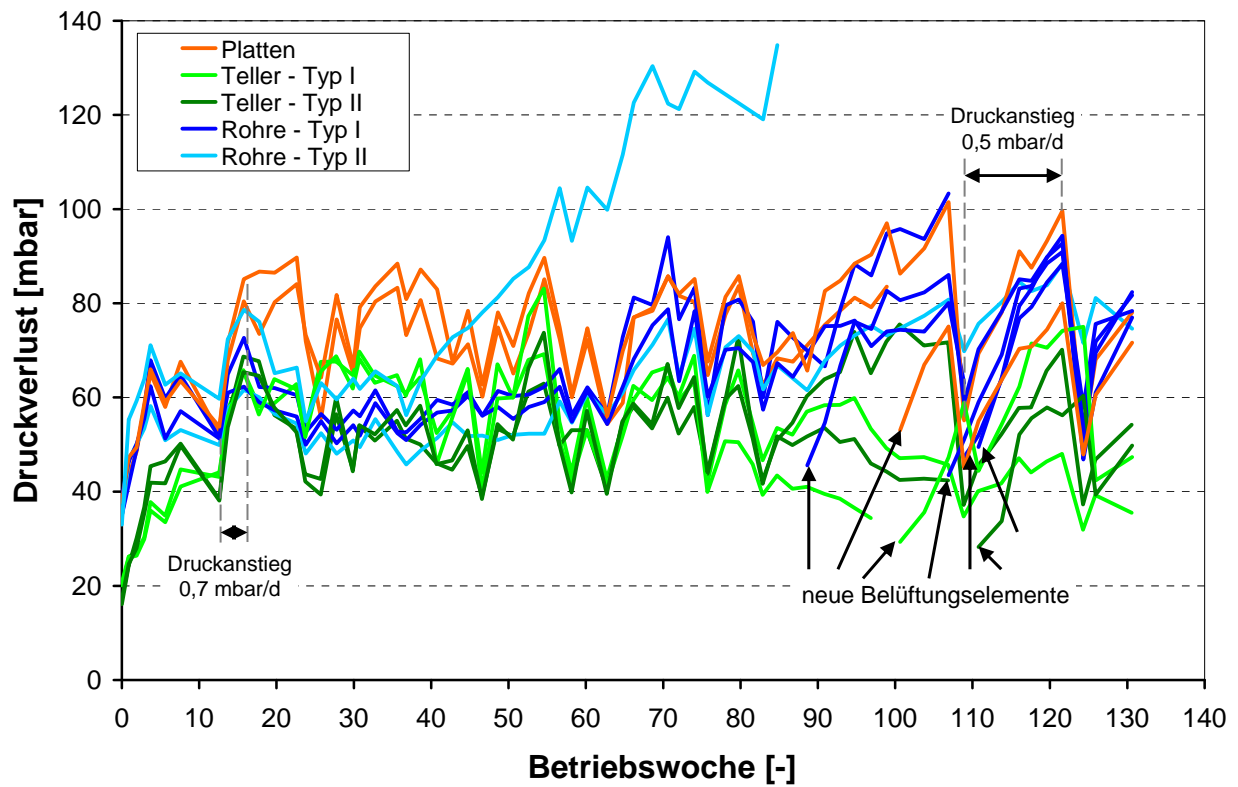


Abbildung 31: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand B

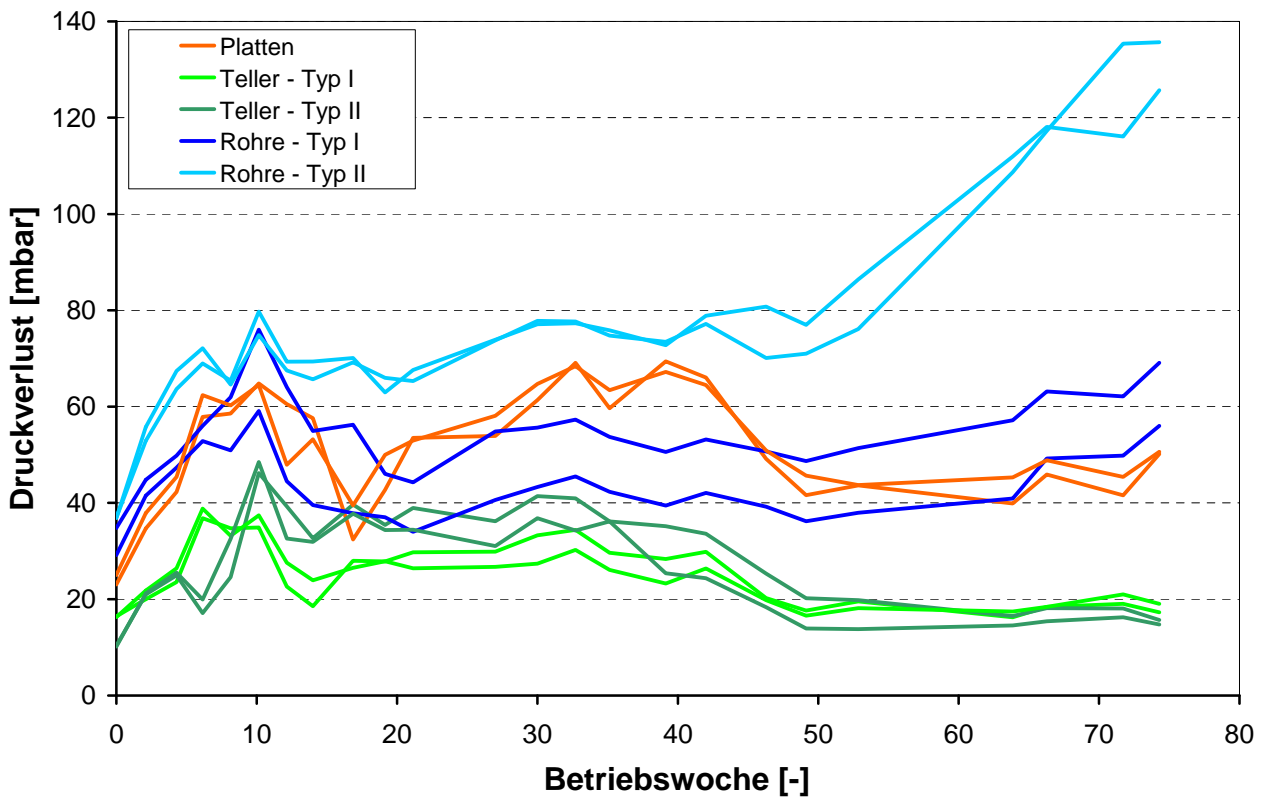


Abbildung 32: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand C

Die vom starken Druckanstieg betroffenen EPDM-Typ II-Rohrbelüfter wurden ausgebaut und näher untersucht. Die Belüftungsmembran dieser Belüftungselemente ist so weit geschrumpft, dass sie fest auf dem Stützrohr anliegt). Eine gleichmäßige Verteilung der Druckluft unterhalb der Belüftungsmembran, die für ein gleichmäßiges Abgasen aller Schlitze erforderlich ist, wird dadurch verhindert. Das nur noch aus wenigen Schlitzen direkt am Luftkanal abgasende Belüftungselement erzeugt so nur noch ungleichmäßig verteilte und sehr große Blasen (s. Abbildung 33).

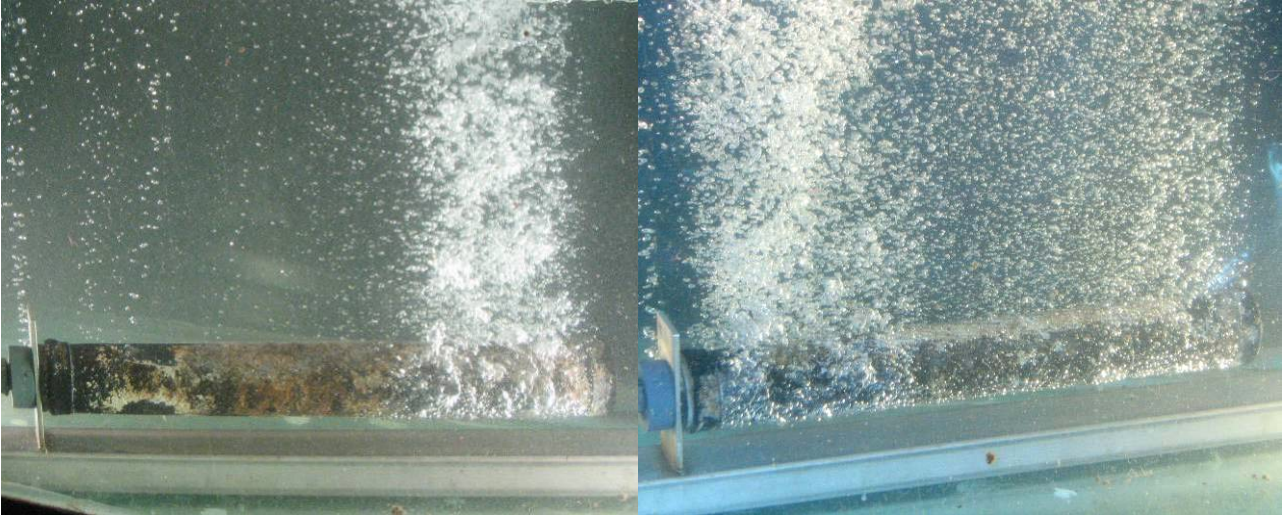


Abbildung 33: beschädigter EPDM Typ II – Rohrbelüfter mit geschrumpfter Belüftungsmembran

5.2.2 Belüftungselemente mit Silikonmembran

Die Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikon-Membranen sind in Abbildung 34 bis Abbildung 36 dargestellt. Sie zeigen von Versuchsbeginn an eher höhere Druckverluste als die Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen. Dies wird besonders im Vergleich der Werte deutlich (s. Kapitel 5.2.5). Die Platten- und Tellerbelüfter des Versuchsstandes B weisen als einzige eine langfristig steigende Tendenz der Druckverluste auf. Die Rohrbelüfter zeigen sehr hohe und besonders stark schwankende Druckverluste. Da die Ursache dieser unerwarteten Schwankungen zunächst nicht erklärbar war und zunächst Fehler bei der Handhabung der Belüftungselemente (z.B. zu lange Lagerung, kein ausreichende langes „Einfahren“ bei hohem Luftvolumenstrom) als Ursache vermutet wurden, wurden in der 39. Betriebswoche zwei der vier Rohrbelüfter (jeweils ein Belüftungselement Silikon Typ I und Typ II) gegen fabrikneue Belüftungselemente gleicher Bauart ausgetauscht. Wie in Abbildung 35 aber deutlich zu erkennen ist, steigt auch der Druckverlust dieser Elemente innerhalb von 6 Wochen auf das Druckverlustniveau der anderen Belüftungselemente an. Handhabungsfehler sind damit als Ursache der hohen Druckverluste auszuschließen.

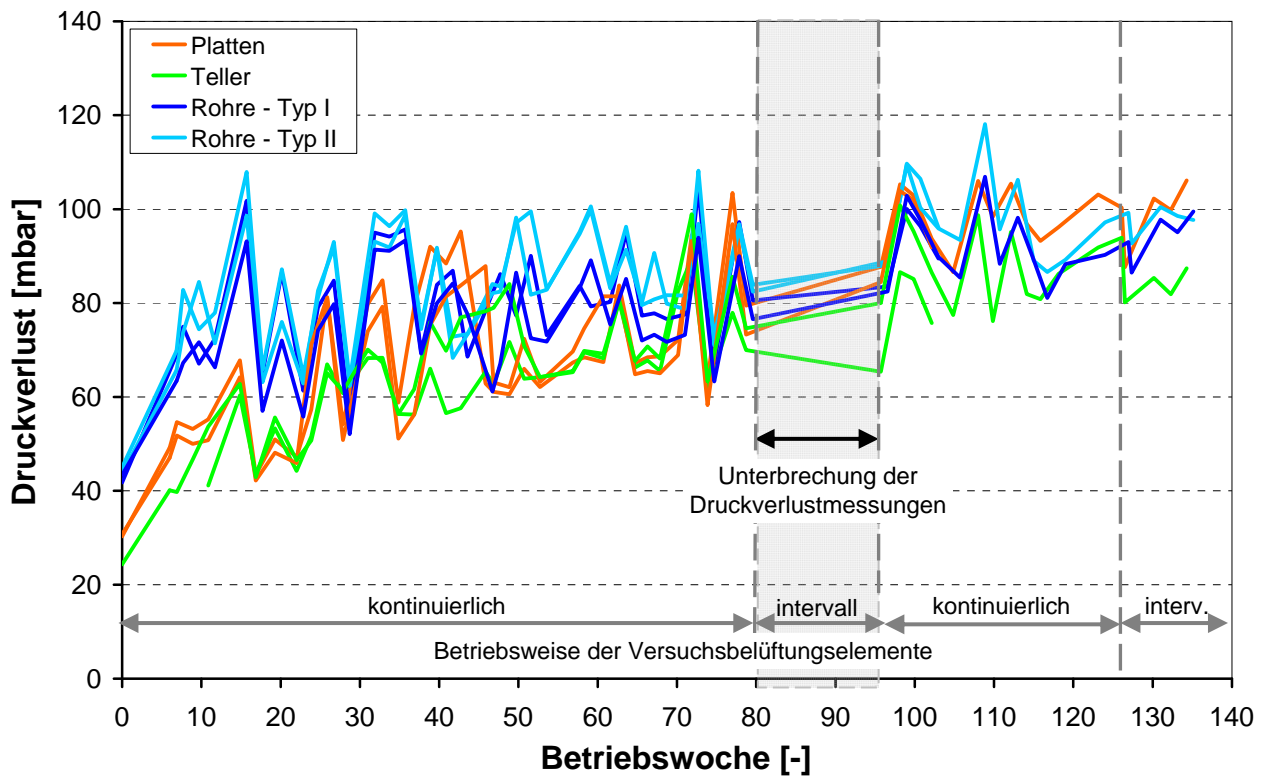


Abbildung 34: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand A

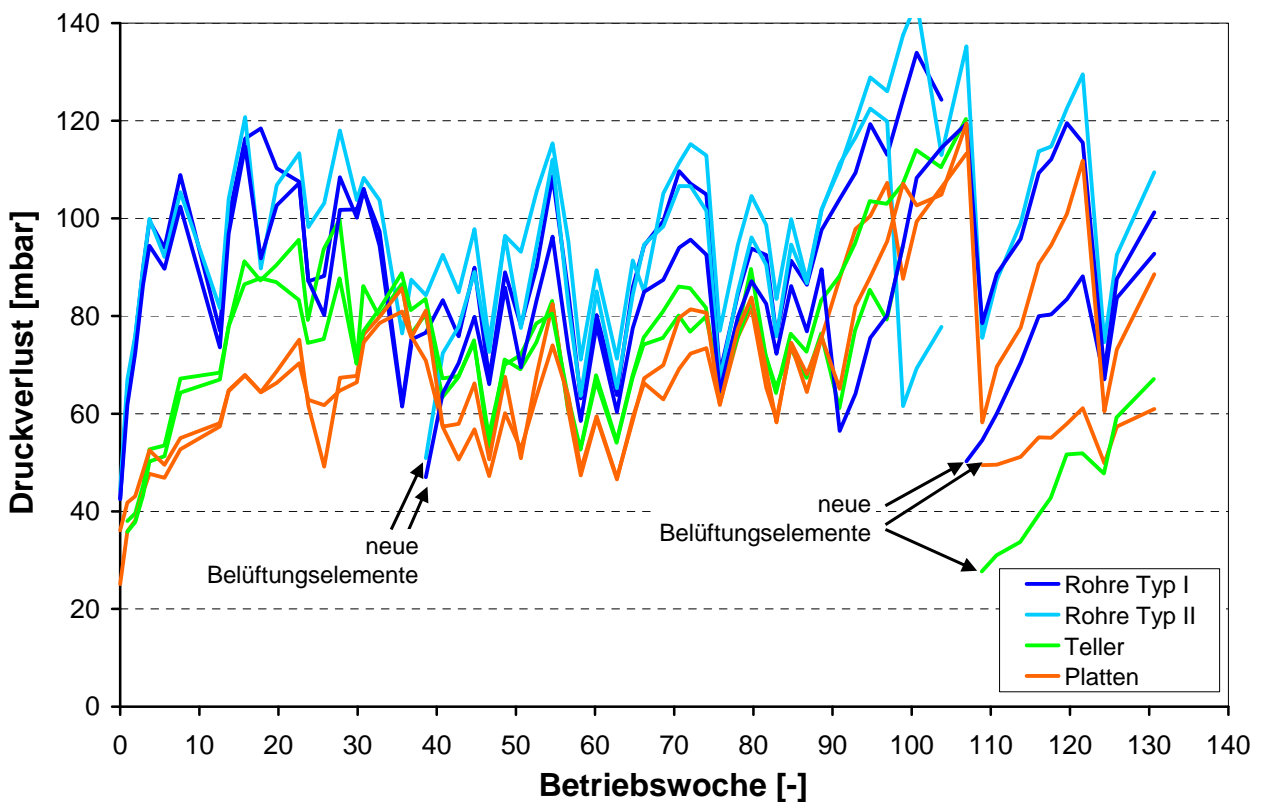


Abbildung 35: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand B

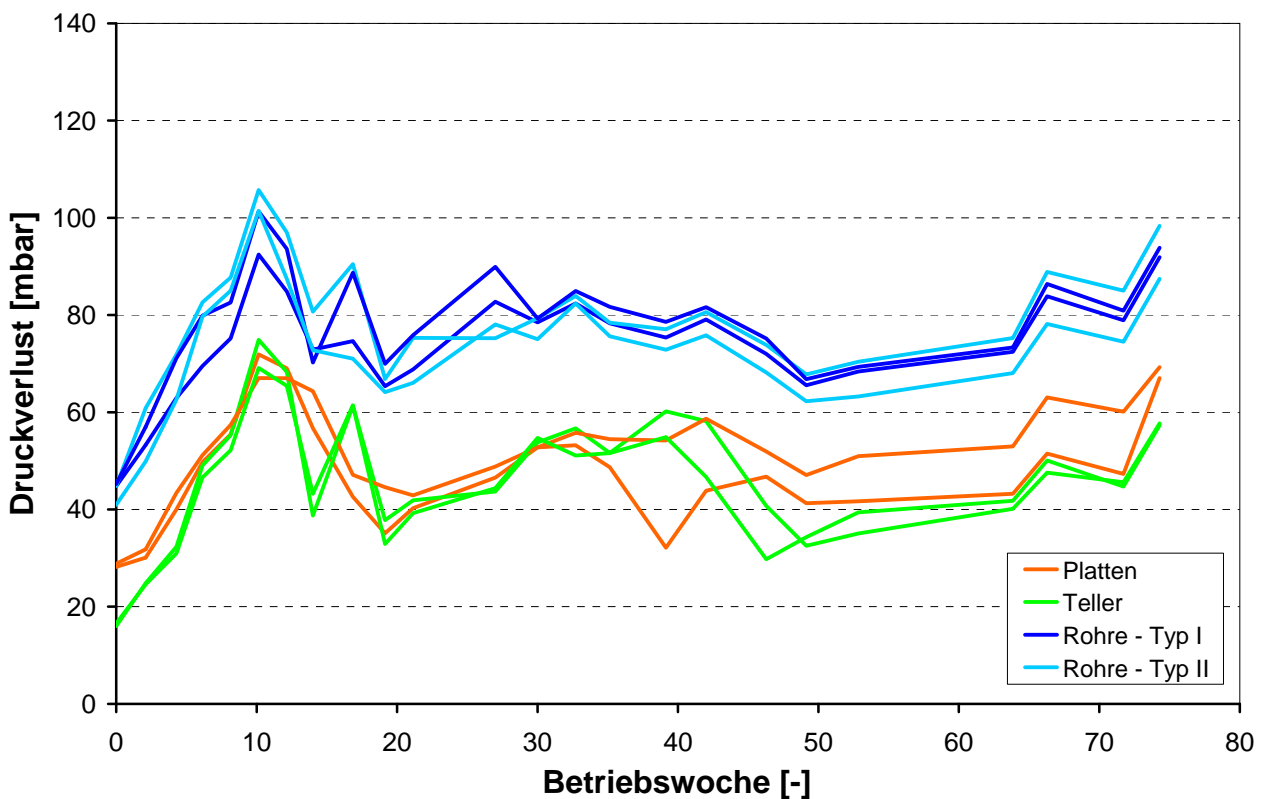


Abbildung 36: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand C

5.2.3 Entwicklung in den ersten Betriebswochen

In den ersten Wochen nach Inbetriebnahme der neuen Belüftungselemente war, wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits diskutiert wurde, zunächst ein steiler Anstieg der Druckverluste zu beobachten. Erst danach stagnierte der Druckverlust auf einem mittleren betrieblichen Druckverlustniveau, das in allen Versuchständen von Druckschwankung überlagert wurde. Diese Druckschwankungen bewirken eine weitgehend synchrone Zu- und Abnahme der Druckverluste aller Belüftungselemente des gleichen Versuchsstandes. Während der laufenden Versuche wurden einzelne Belüftungselemente ausgebaut und durch baugleiche neue ersetzt. Da alle Belüftungselementbauteypen jeweils paarweise in die Versuchstände eingebaut wurden, ergibt sich hieraus die Möglichkeit die Druckverluste neuer und gebrauchter Belüftungselemente direkt miteinander zu vergleichen. Die Druckverlustschwankungen können, da sie alle Belüftungselemente zeitgleich betreffen, durch eine relative Betrachtung der Messwerte eliminiert werden. Dazu wurden die Druckverluste der bereits im Betrieb befindlichen Belüftungselemente zu 100 % normiert und die Messwerte der neu eingebauten Belüftungselemente hierauf bezogen (s. Abbildung 37). Der Druckverlust der neu eingebauten Belüftungselemente beträgt beim Einbau zunächst nur 50 bis 60 % des späteren betrieblichen Druckverlustes. Danach kommt es zu einem schnellen Anstieg des Druckverlustes innerhalb der ersten zwei Betriebswochen. Später nimmt die Geschwindigkeit des Druckanstiegs einer Sättigungsfunktion folgend ab, bis schließlich nach 8 bis 10 Betriebswochen neue und gebrauchte Belüftungselemente praktisch identische Druckverluste aufweisen. In diesem Verhalten zeigen sich keine Unterschiede zwischen Belüftungselementen mit Silikon- oder EPDM-Belüftungsmembranen.

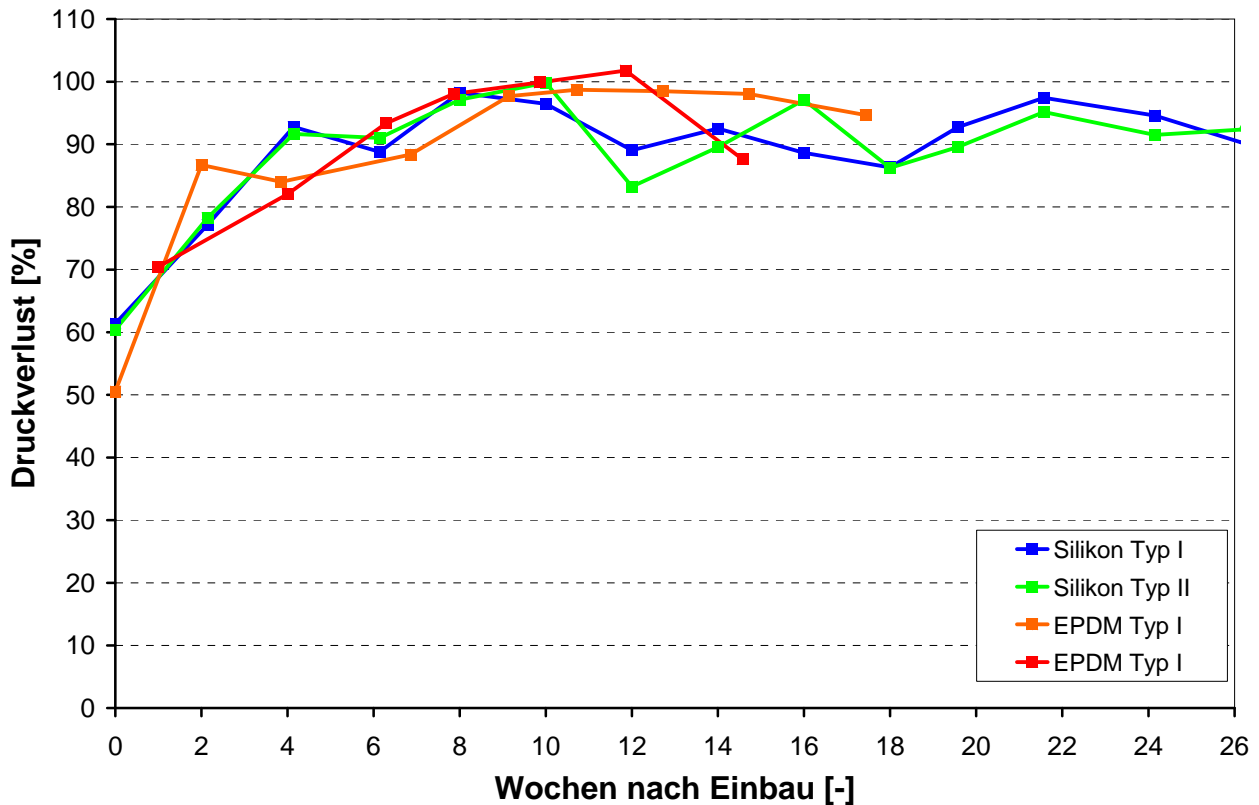


Abbildung 37: betrieblicher Druckverlust nach dem Einbau fabrikneuer Rohrbelüfter

5.2.4 Belüftungspausen und „Freiblasen“

Die Auswertung der zweiwöchig gemessenen Druckverlustkurven (s. z.B. Abbildung 31) zeigt, dass der Druckverlust der Belüftungselemente bei ununterbrochener Luftzufuhr um mehr als 0,5 mbar täglich zunahm. Um das Verhalten der Belüftungselemente auch in der Zwischenzeit zu beobachten, wurde der Druckverlust einzelner Belüftungselemente zusätzlich kontinuierlich gemessen (s. Abbildung 38). Das Belüftungselement, dessen Druckverlust hier dargestellt ist, wurde im Versuchsbetrieb mit einem konstanten Luftvolumenstrom von 3,5 m³/h betrieben. Nur während der Messung der Druckverlustkurven wurde der Luftvolumenstrom geändert. Die Messwerte beider Methoden stimmen weitgehend überein. Der regelmäßige Betrieb der Belüftungselemente mit hohen Luftvolumenströmen, das so genannte „Freiblasen“, wird von einigen Herstellern als wichtigste Wartungs- und Pflegemaßnahme angesehen. Die kontinuierliche Messung des Druckverlustes zeigt aber, dass das Freiblasen und der Wechsel der Luftvolumenströme die Entwicklung des Druckverlustes nicht beeinflusst. Daher sind entsprechend lautende Empfehlungen, zumindest was ihre direkten Auswirkungen auf den Druckverlust betrifft, nicht stichhaltig. Dem gegenüber bewirkt die Unterbrechung der Luftzufuhr eine unerwartete und deutliche Verminderung des Druckverlustes. Direkt nach der Unterbrechung werden sehr niedrige Druckverluste erreicht, die mit zunehmender Unterbrechungsdauer abnehmen. Nach der Unterbrechung steigt der Druckverlust bis zur nächsten Unterbrechung wieder mit ähnlicher Geschwindigkeit wie zuvor an.

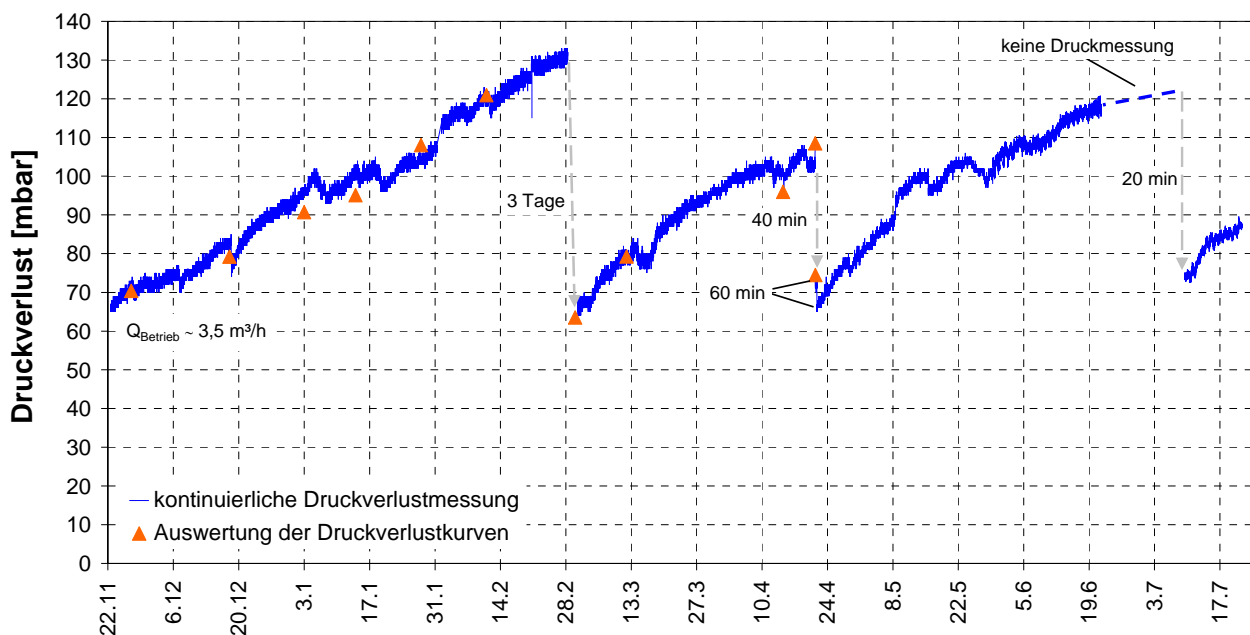


Abbildung 38: Druckverluste bei kontinuierlichem Betrieb und nach Unterbrechung der Luftzufuhr

5.2.5 Mittel- und Extremwerte des Versuchsbetriebes

In Abbildung 35 bis Abbildung 41 sind die Mittel- und Extremwerte des betrieblichen Druckverlustes bezogen auf den mittleren Luftvolumenstrom (s. Abbildungsbeschriftung) dargestellt. Um die Werte nicht durch die niedrigen Druckverluste direkt nach der Inbetriebnahme zu verfälschen, wurden die Messwerte der ersten Betriebswochen nicht berücksichtigt. Bei maximalem Luftvolumenstrom liegen die Druckverluste etwa 40 bis 60 mbar höher als beim mittleren Luftvolumenstrom. Zum Vergleich sind in den Abbildungen auch die Druckverluste des Neuzustandes (Tabelle 6) dargestellt.

Die Druckverluste der Belüftungselemente liegen am Versuchsstand A etwas niedriger als am Versuchsstand B, an dem die höchsten Druckverluste gemessen werden. Am Versuchsstand C werden deutlich niedrigere Werte gemessen. Hier sind die Druckverluste teilweise sogar niedriger als bei fabrikneuen Belüftungselementen (Abbildung 41). Dieser Effekt kann zum einen durch hohe Zuluft- und/oder Wassertemperaturen oder durch das Aufquellen des EPDM verursacht worden sein. In beiden Fällen lassen sich die Belüftungsschlitze mit geringerem Überdruck öffnen, so dass der Druckverlust gegenüber der Referenzmessung abnimmt. Zum Dehnungsverhalten der Belüftungsmembranen wurden weitere Untersuchungen durchgeführt (s. Kapitel 5.9.2). Niedrige Druckverluste können auch durch Schäden an den Belüftungselementen wie z.B. aufgerissenen Schlitzen oder Belüftungsmembranen oder Undichtigkeiten der Anschlüsse verursacht werden. Das für diese Schäden zu erwartende typische Entstehen großer Blasen an den Schadensstellen konnte jedoch nicht beobachtet werden. Der direkte Vergleich der Membranmaterialien zeigt, dass die Silikonmembranen praktisch bei allen Versuchen höhere Druckverluste aufweisen als die ansonsten baugleichen Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen. Die einzige Ausnahme bilden dabei die Plattenbelüfter des Versuchsstandes B (s. Abbildung 39).

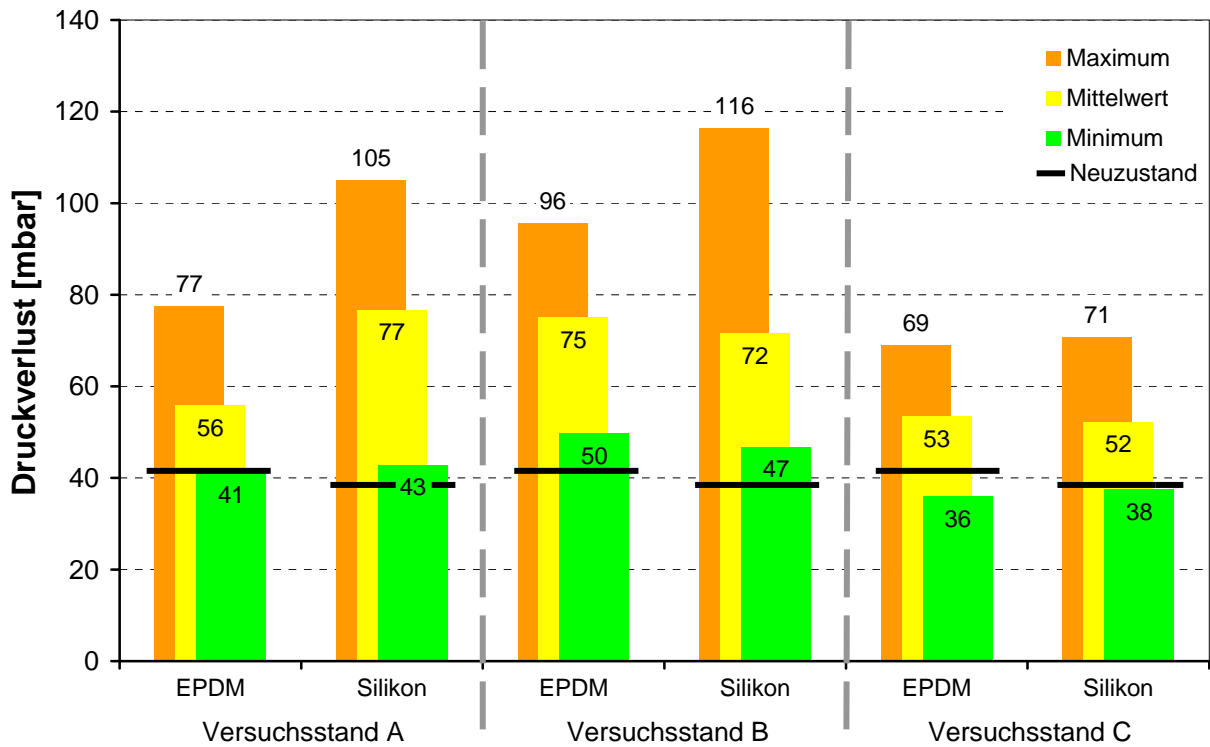


Abbildung 39: Druckverluste der Plattenbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (EPDM 3,5 m³/h; Silikon 3,0 m³/h)

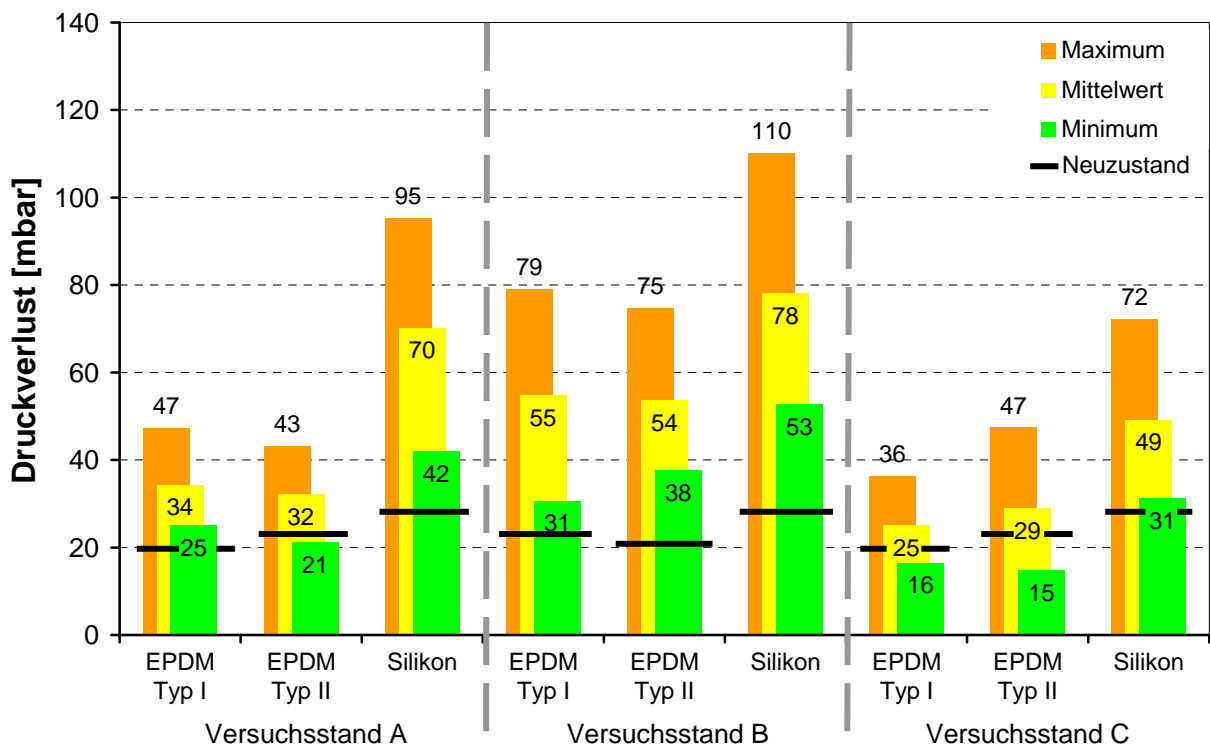


Abbildung 40: Druckverluste der Tellerbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (4,0 m³/h)

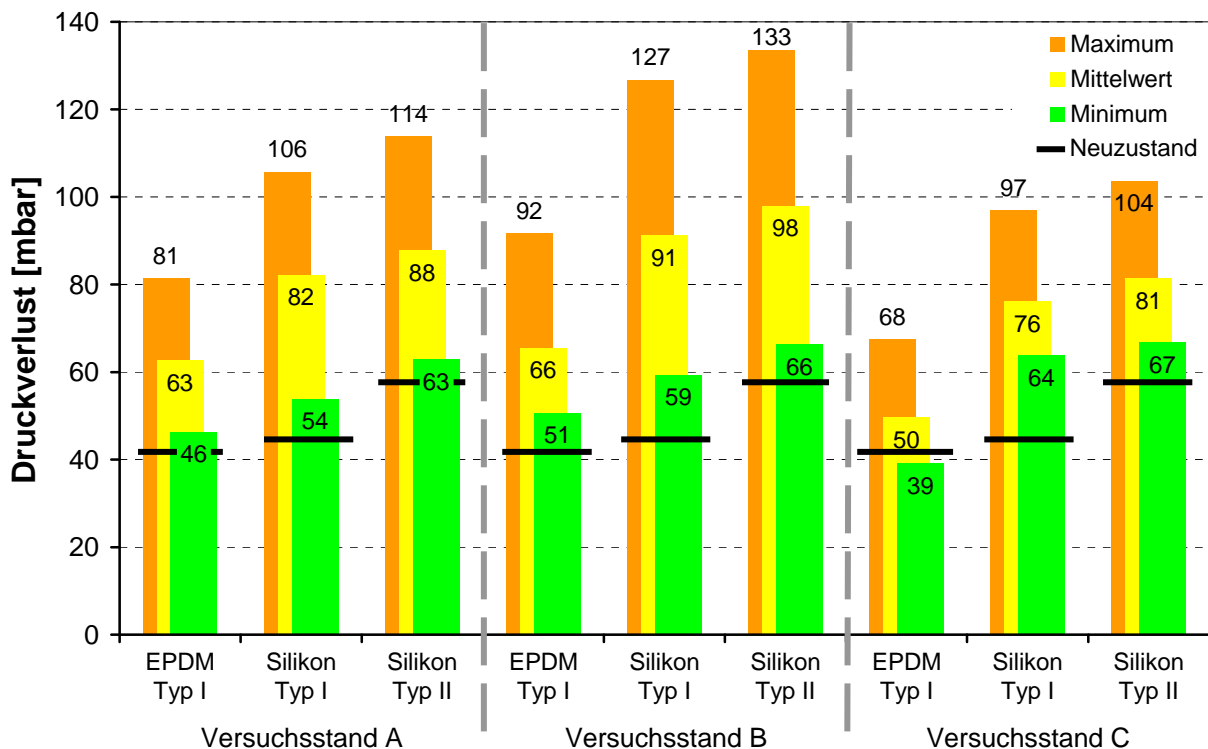


Abbildung 41: Druckverluste der Rohrbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (3,0 m³/h)

5.2.6 Vergleich mit Literaturdaten

Beim Vergleich der Angaben zum Druckverlust (Abbildung 42 und Abbildung 43) stellt sich die Frage nach der Vergleichbarkeit der Daten. Hierbei sind drei verschiedene Einflussfaktoren zu unterscheiden:

- **Bauart**
Wie bereits dargestellt, weisen sowohl die unterschiedlichen Belüftungselementformen als auch die verschiedenen Membranmaterialien jeweils verschieden hohe Druckverluste auf. Daneben existieren bei gleicher Form und gleichem Material auch innerhalb der Produktpalette der einzelnen Hersteller verschiedene Schlitzmuster, die über die Größe und Anzahl der Schlitze je Belüftungselement und damit über den Luftvolumenstrom je Schlitze auch den Druckverlust beeinflussen. Während Belüftungselementform und Membranmaterial bei Angaben zum Druckverlust oft noch berücksichtigt werden, bleiben unterschiedliche Schlitzbilder in der Regel unberücksichtigt. Weiterhin ist beim Vergleich der Druckverluste von einzelnen Belüftungselementen mit dem Druckverlust von ganzen Belüftungsfeldern zu berücksichtigen, dass selbst baugleiche Belüftungselemente Druckabweichungen von 5 bis 10 mbar erreichen (s. z.B. Abbildung 36).
- **Luftvolumenstrom**
Der Druckverlust ist von der Höhe des Luftvolumenstroms je Belüftungselement abhängig. Daher ist bei genauer Betrachtung zu berücksichtigen auf welchen Luftvolumenstrom je Belüftungselement sich die Druckangabe bezieht. Auch die Angabe der Bezugsbasis Norm- oder Betriebs-Luftvolumenstrom ist erforderlich.

➤ Statistik

Da der Druckverlust im Betrieb nicht konstant ist, sondern erheblichen Schwankungen unterliegt, ist eine Angabe über die statistische Relevanz der Messwerte erforderlich. Möglichkeiten sind z.B. Extrem-, Mittel-, Medianwerte oder auch Angaben ob es sich um typische, häufig auftretende oder z.B. bei manueller Ablesung von Druckmessgeräten nur um besonders oft wahrgenommene Werte handelt.

Die während der Versuche gewonnen Messwerte wurden aufgrund der aufgezählten Einflussfaktoren den Literaturdaten für einzelne Belüftungselemente zum einen als Mittelwerte und zum anderen als Maximalwerte gegenüber gestellt. Die Werte sind nach den Versuchsstandorten getrennt dargestellt. Die Mittelwerte sind für die gesamte Versuchsdauer abzüglich einer Einfahrphase von 8 Wochen (vergl. Kapitel 5.2.1) für jedes einzelne Belüftungselement für den minimalen, den mittleren und den maximalen Luftvolumenstrom dargestellt (Abbildung 42). Die Maximalwerte (Abbildung 43) entsprechen den Messwerten am Tage des höchsten Druckverlusts. Es wurden auch hier wiederum die Werte für den minimalen, mittleren und maximalen für den Dauerbetrieb empfohlenen Luftvolumenstrom je Belüftungselement angegeben.

Krampe, 2007 gibt die Medianwerte der Druckangaben der Kläranlagenbetreiber aus einer Umfrage an. Ob es sich dabei um Mittel- oder Extremwerte handelt, ist unklar. Frey, 2005 gibt Messwerte an, die er bei der Begehung von Abwasserreinigungsanlagen stichprobenartig gemessen hat. Angaben über Luftvolumenströme fehlen ebenso wie eine Zuordnung zu den Belüftungselementtypen.

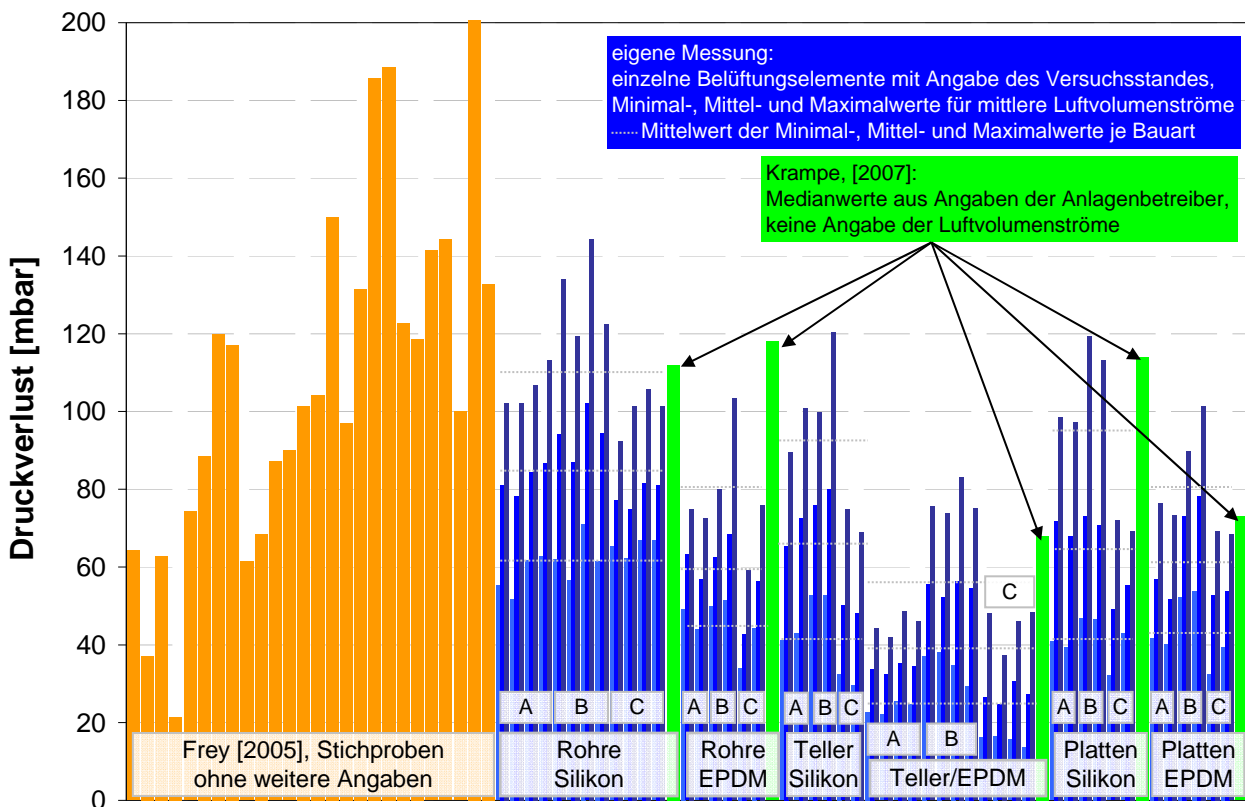


Abbildung 42: Mess- und Literaturdaten – Druckverluste für mittlere Luftvolumenströme

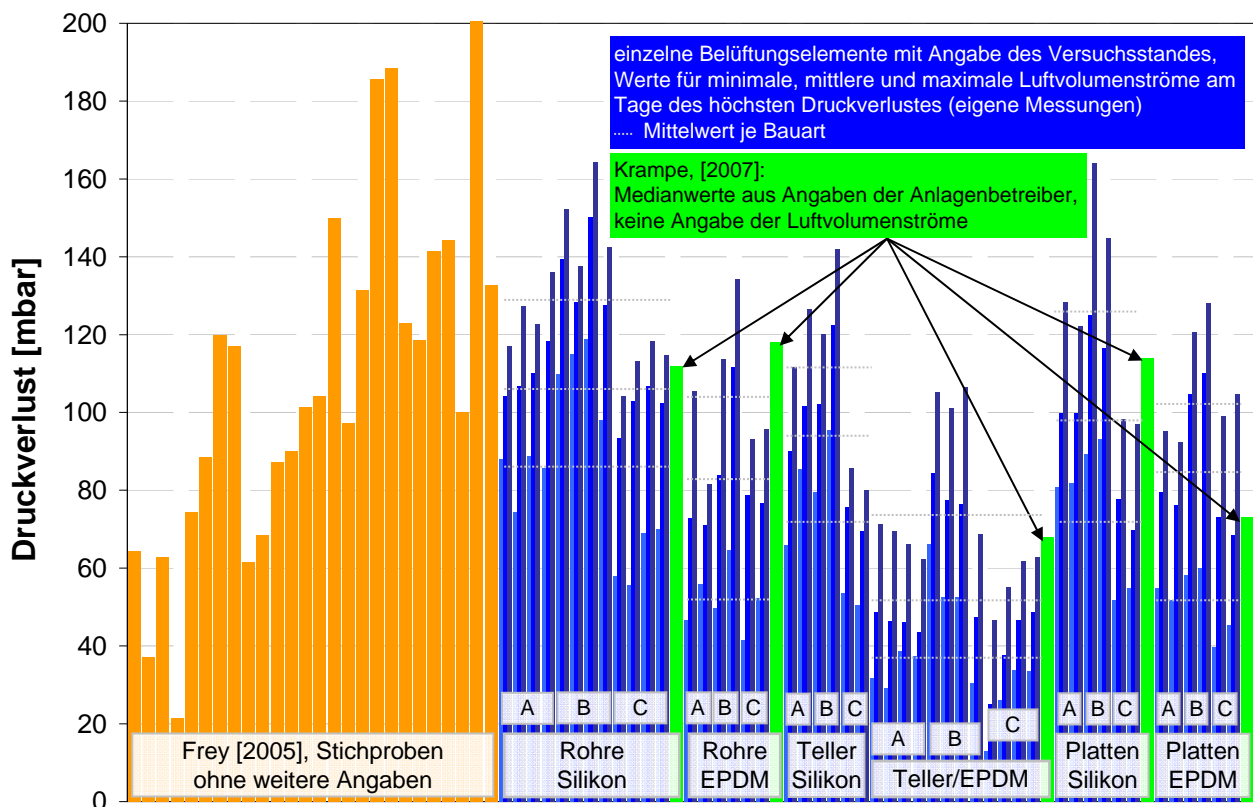


Abbildung 43: Mess- und Literaturdaten – Druckverluste am Tage des höchsten Druckverlustes

Die Daten von Frey, 2005 zeigen die gesamte Bandbreite der bei feinblasigen Belüftungselementen möglichen Druckverluste von ca. 20 bis über 200 mbar. Druckverluste über 170 mbar konnten bei den eigenen Messungen nur bei deutlich geschädigten Belüftungselementen (vergl. Kapitel 5.2.1) gemessen werden. Diese wurden, da sie nicht mehr gebrauchstauglich und auch nicht mehr als Produkt erhältlich sind, nicht in der Auswertung berücksichtigt. Es ist daher davon aus zu gehen, dass Frey gezielt Anlagen mit extrem hohen und extrem niedrigen Druckverlusten für seine Untersuchungen ausgewählt hat, um die Angaben der Betreiber zu verifizieren. Wie der Vergleich mit den eigenen Messwerten zeigt, müssen die niedrigsten Druckverluste von Frey, 2005 an EPDM-Tellerbelüftern gemessen worden sein. Die Daten von Krampe, 2007 bestätigen nur teilweise die bei den eigenen Versuchen gefundene Reihenfolge der Druckverluste der Belüftungselemente. Die niedrigsten Druckverluste wurden wiederum für EPDM-Tellerbelüfter ermittelt. Während Krampe, 2007 vergleichbar hohe Druckverluste für EPDM-, Silikon-Rohrbelüfter und Silikon-Plattenbelüfter ermittelt hat, zeigen sich bei den eigenen Messungen die höchsten Druckverluste bei Silikon-Rohrbelüftern. EPDM-Rohrbelüfter haben hingegen deutlich niedrigere Druckverluste. Krampe, 2007 gibt hohe Druckverluste für Silikon- und niedrige Druckverluste für EPDM-Plattenbelüfter an, während eigene Messungen ähnliche Mittelwerte beider Typen zeigen; jedoch sind die Extremwerte bei den Silikon-Plattenbelüftern stärker ausgeprägt. Krampe zeigt aufgrund der mangelnden Datenbasis keine Werte für Silikon-Tellerbelüfter. Übereinstimmend berichten die Autoren, dass EPDM-Tellerbelüfter die niedrigsten Druckverluste aufweisen, während Silikon-Plattenbelüfter zumindest hohe Extremwerte erreichen und Silikon-Rohrbelüfter die höchsten Druckverluste haben. Die Ursache für die auffälligen Unterschiede der Druckverluste der EPDM-Rohrbelüfter ist nicht zu klären. Es kann lediglich vermutet werden, dass die für die eigenen Versuche zufällig ausgewählten EPDM-Rohrbelüfter untypisch niedrige Druckverluste aufweisen.

5.3 Sauerstoffausnutzung und Druckverlust gebrauchter Belüftungselemente

Nach dem Ausbau aus den Versuchständen, wurden die Sauerstoffausnutzung und der Druckverlust der gebrauchten Belüftungselemente unter Laborbedingungen bestimmt. In Abbildung 44 sind zunächst die Ergebnisse aller Messungen zusammenfassend dargestellt. In dieser Darstellung ist der Druckverlust als Mittelwert für die fünf untersuchten Luftvolumenströme dargestellt. Die Sauerstoffausnutzung wurde für jeden der fünf untersuchten Luftvolumenströme mit den Referenz-Belüftungselementen verglichen und die durchschnittliche Veränderung gegen den Druckverlust aufgetragen.

Die Versuchsauswertung ergibt Druckverluste die in einem weiten Bereich zwischen 25 und 133 mbar streuen. Die Veränderung der Sauerstoffausnutzung ist zunächst uneinheitlich. Daher muss zwischen den unbeschädigten Belüftungselementen mit feinblasig abgasender Belüftungsmembran und den nicht mehr funktionsfähigen Belüftungselementen mit geschrumpfter und grobblasig abgasender Belüftungsmembran unterschieden werden. Die Sauerstoffausnutzung der nicht mehr funktionstüchtigen Belüftungselemente (Rohre EPDM Typ II, s. Abbildung 33) nimmt durch die Vergrößerung des Blasendurchmessers und durch die Ungleichmäßigkeit des Abgasens um bis 48 % ab. Die verbleibende Sauerstoffausnutzung von etwa 3,5 %/m entspricht einer mittel- bis grobblasigen Druckluftbelüftung, allerdings bei deutlich höherem Druckverlust. Die Sauerstoffausnutzung der unbeschädigten Belüftungselemente hat sich nur wenig verändert. Gegenüber den Referenz-Belüftungselementen wurden zwischen 6 % Abnahme und bis zu 12 % Zunahme der Sauerstoffausnutzung gemessen. Vor allem bei Belüftungselementen mit Silikonmembranen nimmt die Sauerstoffausnutzung oft zu. Krampe, 2006 bestätigt die Zunahme der Sauerstoffausnutzung von Rohrbelüftern mit Silikonmembran nach einem einjährigen Betrieb, kann dafür aber keine Ursache benennen.

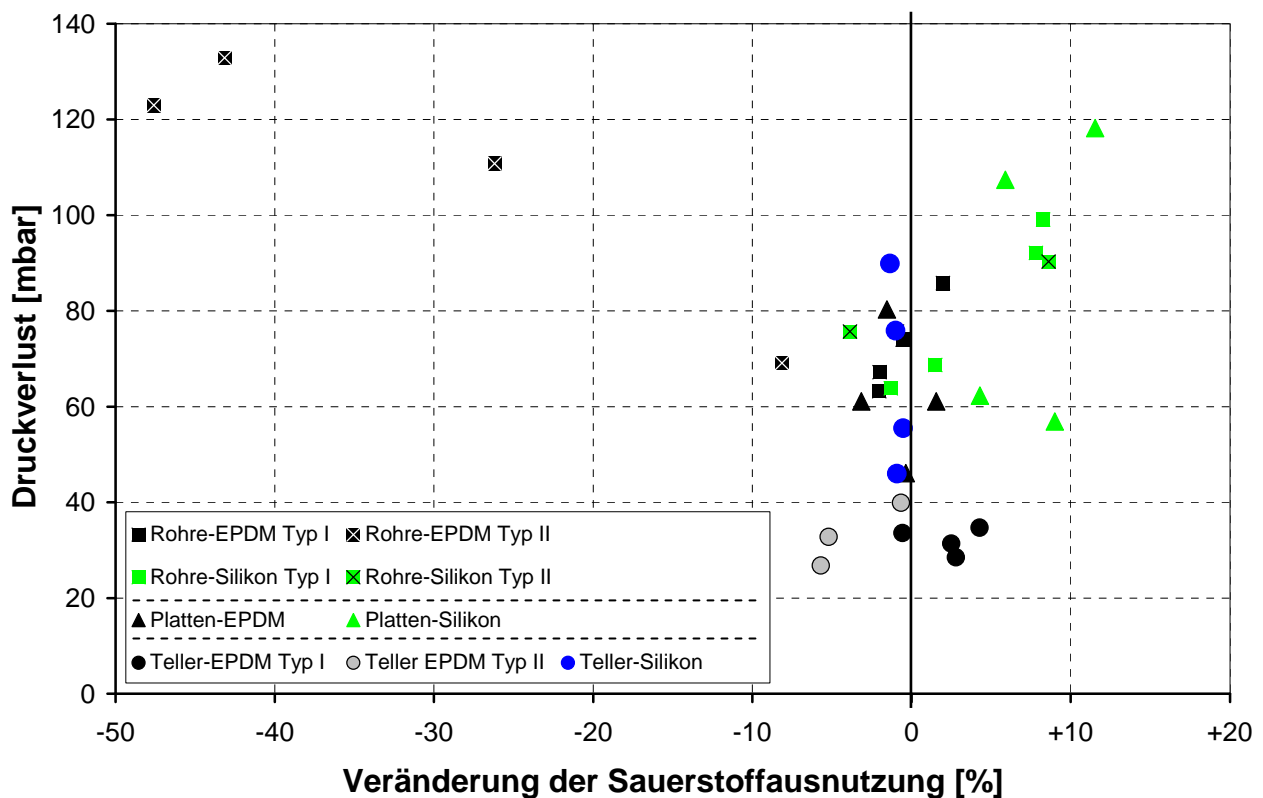


Abbildung 44: Veränderung der Sauerstoffausnutzung und des Druckverlustes

In Abbildung 45 sind die Daten der unbeschädigten Belüftungselemente nach Versuchsständen getrennt dargestellt. Aus den Messwerten lässt sich kein Unterschied der Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente zwischen den Versuchsständen ableiten. Es zeigen sich allerdings deutliche Unterschiede im Druckverlust. Während die Druckverluste der Belüftungselemente aus den Versuchsständen B und C im Bereich bis 75 mbar liegen, erreichen die Belüftungselemente aus Versuchsstand A höhere Druckverluste von bis zu 107 mbar. Dabei haben die Belüftungselemente mit Silikonmembranen in den Versuchsständen A und C jeweils deutlich höhere Druckverluste als die Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen. Bei den betrieblichen Druckverlustmessungen waren die Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen noch in allen Versuchsständen höher.

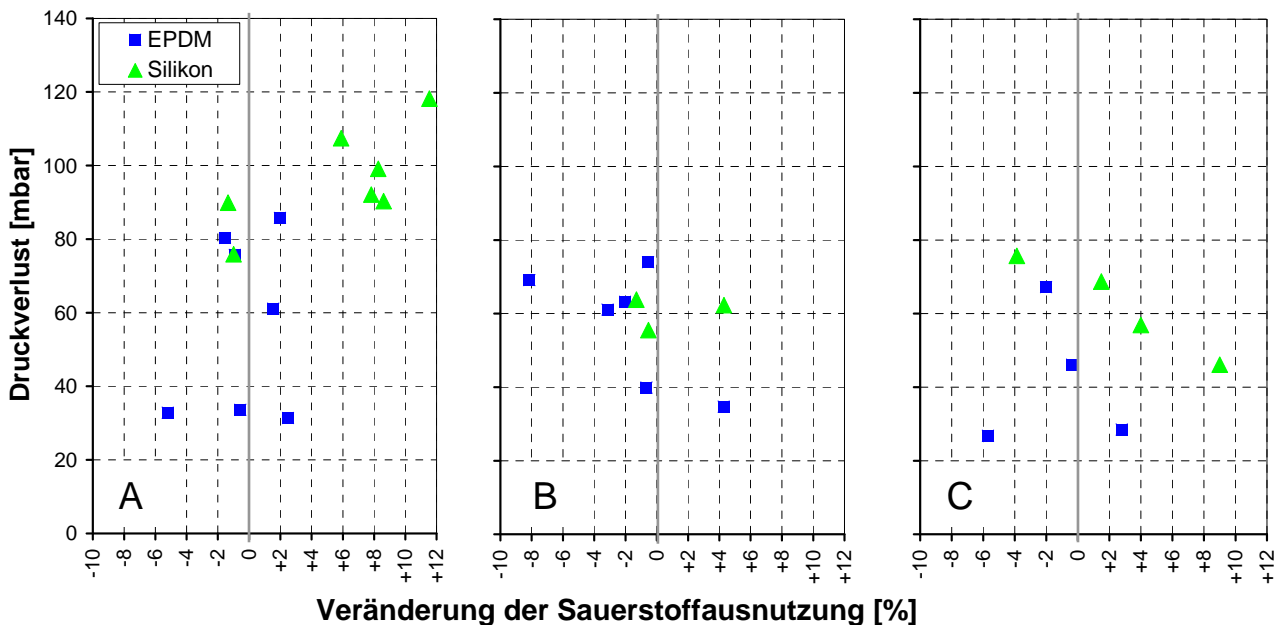


Abbildung 45: Druckverlust und Sauerstoffausnutzung (Labormessung) sortiert nach Versuchsstand

5.4 Vergleich der Ergebnisse von Labor- und Betriebsmessungen

Da der Zeitraum zwischen dem Ausbau der Belüftungselemente aus den Versuchsständen und der Sauerstoffzufuhr- und Druckverlustmessung im Labor neben einer sehr langen Betriebsunterbrechung auch einen mehrfachen Milieuwechsel (Belebungsbecken --> Transport --> Lagerung in Trinkwasser oder gereinigtem Abwasser --> Messwasser) bedeutet, ist zu prüfen, ob die Labormessung und die Betriebsmessung übereinstimmende Ergebnisse liefern. Da die in der Labormessung ermittelten Druckverluste ausschließlich den unteren Bereich der im Betrieb auftretenden Druckverluste (z.B. Abbildung 35) wider spiegeln, scheint dies zunächst fraglich. Es ist jedoch auch möglich, dass die Belüftungselemente vorwiegend in Phasen mit geringem Druckverlust ausgebaut wurden und deshalb keine hohen Druckverluste in der Labormessung auftreten. Daher wurden die Ergebnisse der Labormessungen den Ergebnissen aus der jeweils letzten routinemäßigen Betriebsmessung der Versuchsstände A und B, sofern sie nur wenige Tage zurückliegt, gegenüber gestellt. Für Versuchsstand C ist keine Gegenüberstellung der Daten möglich, da in den Wochen vor dem Ausbau der Belüftungselemente keine betriebliche Druckverlustmessung mehr durchgeführt werden konnten. Als Grenze für die Übereinstimmung der Messungen wird eine Differenz von maximal 8 mbar angesetzt. Dies ergibt sich aus der Addition der Erfahrungswerte für die Messunsicherheiten von 2 mbar für die Labor- und 4 mbar für Betriebsmessung zuzüglich einem weiteren Zuschlag von 2

mbar dafür, dass der Einfluss der unterschiedlichen Wassertemperaturen nicht durch eine Temperaturkorrektur berücksichtigt wurde. Die Gegenüberstellung der Daten (Abbildung 46) zeigt, dass beim Vergleich von 21 Messungen 15-mal übereinstimmende Messwerte erzielt wurden. 4-mal waren die Druckverluste im Labor deutlich niedriger als im Betrieb (Nr. 13, 14, 18, 21), und 2-mal waren die Druckverluste bei der Labormessung höher (Nr. 3 und 4). Die Abweichung der Messwerte Nr. 13, 14, 18 und 21 ist darauf zurück zu führen, dass diese Belüftungselemente in einer Phase sehr hoher betrieblicher Druckverluste ausgebaut wurden. Wie die Untersuchungen in Kapitel 5.2.4 zeigen, führt in diesen Phasen bereits eine kurze Unterbrechung der Belüftung zu einer Reduktion des Druckverlustes. Bedingt durch die Betriebsunterbrechung des Ausbaus zeigt die Labormessung also den Druckverlust wie er unmittelbar nach einer Betriebsunterbrechung auftritt. Dieses Ergebnis wird dadurch bestätigt, dass der Messwert der Labormessungen mit dem betrieblichen Druckverlust noch im Betrieb befindlicher, baugleicher Belüftungselemente überein stimmt, deren Druckverlust nach einer Betriebsunterbrechung wenige Tage später ebenfalls stark abgenommen hat. Die Ursache für die Abweichung der Messungen 3 und 4 kann nicht erklärt werden.

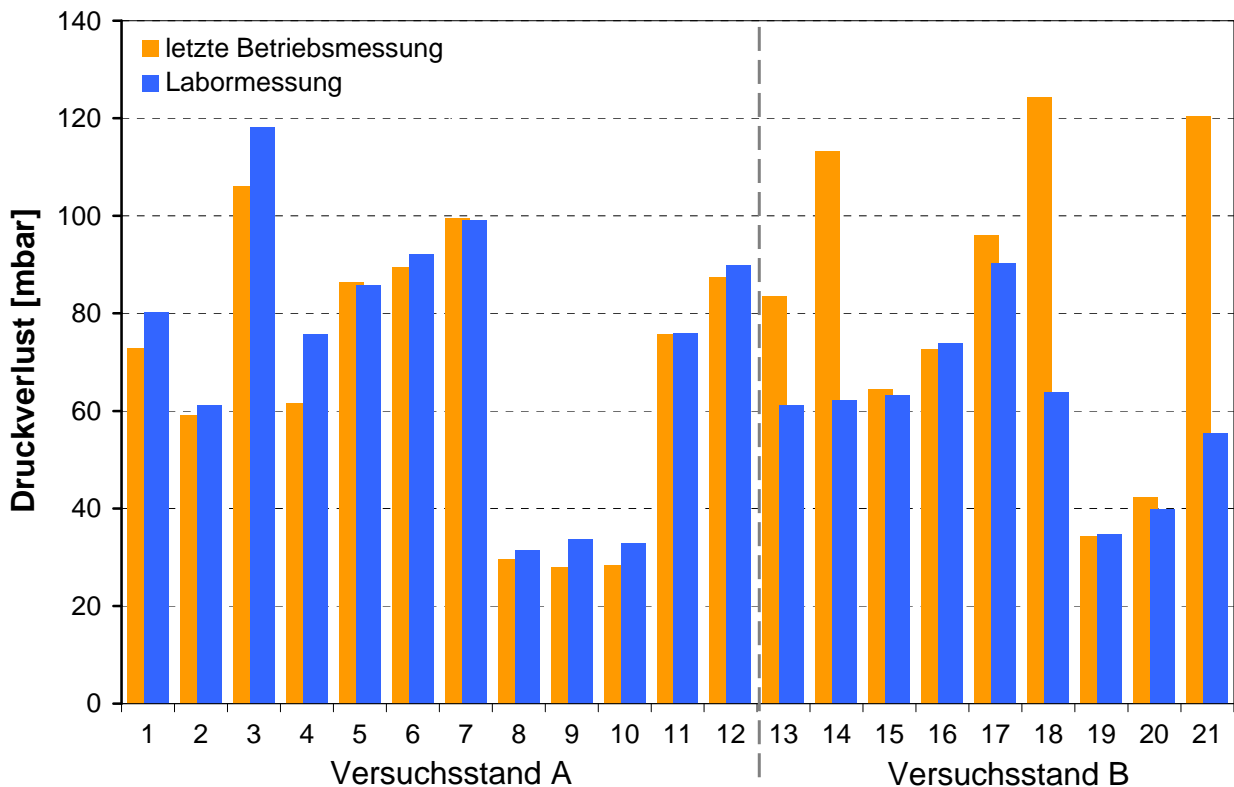


Abbildung 46: Druckverluste unter Betriebsbedingungen und bei der Labormessung

5.5 Ermittlung des Energiebedarfs

5.5.1 Sensitivitätsanalyse - Einflüsse auf den Energiebedarf

Wenn die Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente unverändert bleibt, dann bleibt beim Anstieg des Druckverlustes der Belüftungselemente der zur Sauerstoffversorgung erforderliche (Norm-)Luftvolumenstrom konstant. Der Energiebedarf der Drucklufterzeuger steigt daher nur auf Grund des zunehmenden Differenzdrucks an. Der Energieverbrauch von Turboverdichtern steigt durch den Anstieg des Gegendrucks prinzipbedingt weniger stark als bei Drehkolbengebläse (Abbildung 47).

Da der Druckverlust der Belüftungselemente nur einen geringen Teil des von den Druckluftherzeugern zu überwindenden Differenzdrucks ausmacht, sind die Auswirkungen ihres Anstiegs bei den in der Praxis auftretenden Größenordnungen des Druckanstiegs von bis zu 100 mbar entsprechend gering. Aus der Analyse ergibt sich, dass der auf die Belüftungselemente entfallende Anteil am gesamten Differenzdruck je nach Grad der belagsbedingten Druckerhöhung und der Einblastiefe zwischen 5 % (7 m Einblastiefe, keine Erhöhung des Druckverlusts, kein Rückgang der Sauerstoffausnutzung) und 35 % (3 m Einblastiefe, 100 mbar Druckerhöhung des Belüfters, Rückgang der Sauerstoffausnutzung auf 80 % des Ausgangswertes) liegt. Bei geringer Einblastiefe wirkt sich die Druckerhöhung durch die Belagsbildung (relativ gesehen) stärker aus als bei hoher Einblastiefe. So nimmt bei Anlagen mit geringer Einblastiefe von 3 m der Energiebedarf bei einem Anstieg des Druckverlusts der Belüftungselemente um 100 mbar um 35 % zu, während bei 7 m Einblastiefe nur ein Anstieg um 16 % stattfindet.

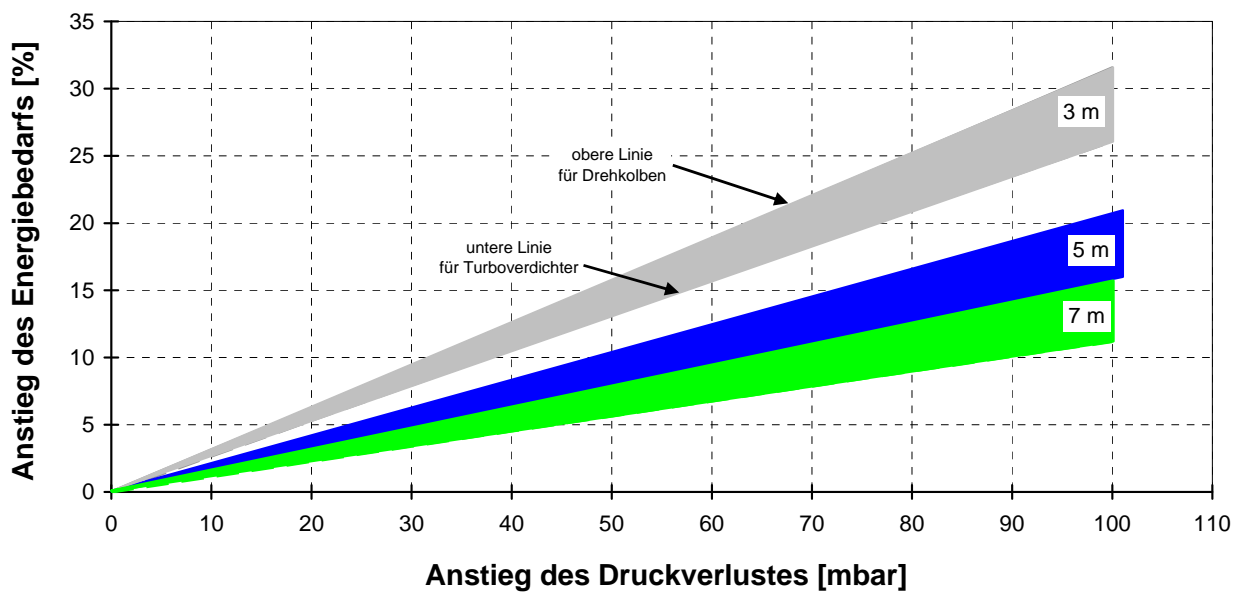


Abbildung 47: Anstieg des Energiebedarfs der Belüftung bei ansteigendem Druckverlust

Die Analyse bestätigt, dass sich der Druckanstieg und der Rückgang der Sauerstoffausnutzung in bezüglich ihrer Auswirkungen auf den Energiebedarf addieren. Steigt der Energiebedarf z.B. bei 50 mbar Druckanstieg noch um 11 % an, so steigt er bei einer zusätzlich um 10 % reduzierten Sauerstoffausnutzung bereits um 29 % an (bei 5 m Einblastiefe). Die Veränderung der Sauerstoffausnutzung wirkt sich unabhängig von der Einblastiefe direkt auf den Energiebedarf aus, während der Einfluss des ansteigenden Druckverlustes auch von der Einblastiefe abhängig ist.

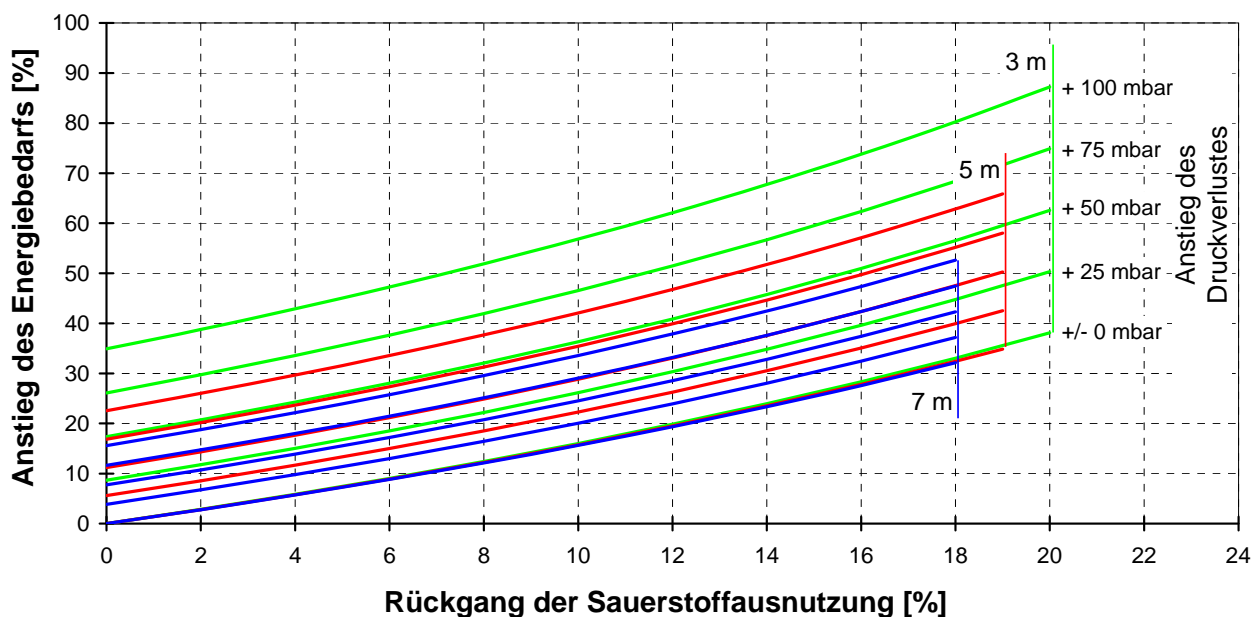


Abbildung 48: Anstieg des Energiebedarfs bei veränderlicher Sauerstoffausnutzung

Somit ist zusammenzufassen, dass ein erhöhter Energiebedarf und betriebliche Probleme durch die Überlastung des Belüftungssystems besonders bei Belebungsbecken mit geringer Einblastiefe zu erwarten sind, da sich hier sowohl der Rückgang der Sauerstoffausnutzung als auch der ansteigende Differenzdruck besonders deutlich auf die erforderliche Leistung der Druckluftherzeuger auswirken. Bei tiefen Becken mit großer Einblastiefe steigt aufgrund des dominierenden Anteils des hydrostatischen Wasserdrucks am gesamten Differenzdruck der Energiebedarf durch den Anstieg des Druckverlusts der Belüfter weniger stark an als in flachen Becken. Deshalb resultiert der Anstieg des Energiebedarfs dieser Belüftungssysteme primär aus zunehmenden Luftvolumenströmen.

Praktisch werden die oben angeführten Effekte durch Tages-, Wochen- und saisonale Schwankungen überlagert, so dass sie sich einer direkten Messung während des laufenden Betriebs entziehen. Die Analyse der Beobachtungen einer kommunalen Kläranlage des Ruhrverbands [Jardin, 2004] (Abbildung 14) zeigt die Übereinstimmung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse mit den Ergebnissen aus der Praxis. Die monatliche Darstellung des durchschnittlichen täglichen Energiebedarfs des Belüftungssystems lässt trotz der saisonalen Schwankungen erkennen, dass der Energiebedarf bei Austausch der belegten Belüftungselemente gegen baugleiche neue Elemente mit Silikonmembran schlagartig sinkt. Da sich die Belastungssituation der Kläranlage nicht verändert hat, kann anhand des Vergleichs der Januarzahlen bilanziert werden, dass die belegten Belüftungsmembranen einen Anstieg des Energiebedarfs von ca. 45 % bewirkten. Eine Nachrechnung der veröffentlichten Daten dieser Anlage führt zu dem Ergebnis, dass sich bei einem Druckanstieg der Belüfter von ca. 120 mbar und einer Einblastiefe von 5,5 m die Sauerstoffausnutzung um mehr als 10 % reduziert hat.

5.5.2 Veränderung des Energiebedarfs durch die Belagsbildung

Die Übertragung der Versuchsergebnisse auf den betrieblichen Energiebedarf von Belüftungssystemen ist nur mit einigen vereinfachenden Annahmen möglich. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln diskutiert wurde, ist die Veränderung des Energiebedarfs feinblasiger Druckluftbelüftungssysteme sowohl von der Einblastiefe als auch von der Art der Druckluftherzeugung abhängig. Daher

werden die Ergebnisse für Einblastiefen von 3, 5 und 7 m angegeben, die an Hand der Berechnung für Drehkolbengebläse ermittelt wurden. Da der Energiebedarf von Turboverdichtern weniger druckabhängig ist, ergeben sich bei ihnen geringere Veränderungen des Energiebedarfs. Für die Berechnungen wurde weiterhin davon ausgegangen, dass die Prozesse, die zur Veränderung der Druckverluste und der Sauerstoffausnutzung führen (Bildung von Belägen, Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Belüftungsmembranen) unabhängig von der Einblastiefe sind. Außerdem wird vorausgesetzt, dass die im Labor gemessene Veränderung der Sauerstoffausnutzung auf die Situation in realen Abwasserreinigungsanlagen übertragbar ist.

Da sich die durchgeführten Untersuchungen auf die Betrachtung einzelner Belüftungselemente beschränken, kann die Übertragung der Versuchsergebnisse nur unter der Annahme stattfinden, dass sich die Sauerstoffausnutzung und der Druckverlust aller Belüftungselemente eines Belebungsbeckens in gleicher Weise verändern. Die durch die Ungleichverteilung der Druckluft als Resultat unterschiedlicher Druckverluste der Belüftungselemente eines Belebungsbeckens hervorgerufene Veränderung der Sauerstoffausnutzung, kann nicht berücksichtigt werden. Da die Ergebnisse der betrieblichen Druckverlustmessungen (Kapitel 5.2) zeigen, dass der Druckverlust der unter gleichen Bedingungen betriebenen baugleicher Belüftungselemente nur in Ausnahmefällen um mehr als 10 mbar voneinander abweicht, ist dieser Effekt als gering einzuschätzen.

Auf Basis der im Laborversuch gemessenen Sauerstoffausnutzungen und Druckverluste (Abbildung 49) ergibt sich eine Veränderung des Energiebedarfs zwischen -10 % und +15 %. Da der Anteil des Druckverlustes der Belüftungselemente am Gegendruck der Drucklufterzeugung mit steigender Einblastiefe abnimmt, nimmt auch der Einfluss des Anstiegs des Druckverlustes auf den Energiebedarf ab. Daher ist in dieser Betrachtung der Anstieg des Energiebedarfs bei hoher Einblastiefe (7 m) stets geringer als bei mittlerer (5 m) und niedriger Einblastiefe (3 m). Die breite Streuung der Messwerte der Sauerstoffausnutzung und der Druckverluste (Kapitel 5.3) zeigt sich naturgemäß auch bei der Veränderung des Energiebedarfs. Bei der Kombination einer steigenden Sauerstoffausnutzung mit hohen Druckverlusten ist es bei gleichen Ausgangsdaten des Belüftungselementes möglich, dass der Energiebedarf bei niedriger Einblastiefe zunimmt, während er bei hoher Einblastiefe abnimmt.

Wie bereits in Kapitel 5.2.4 diskutiert ergeben die Labormessungen aufgrund der unvermeidbaren Betriebsunterbrechungen vergleichsweise niedrige Druckverluste. Um den Einfluss der deutlich höheren betrieblichen Druckverluste auf den Energiebedarf der Belüftung zu berücksichtigen, wurde eine zweite Berechnung durchgeführt, bei der für jedes Belüftungselement die Auswirkung der Kombination der im Laborversuch ermittelten Sauerstoffausnutzung mit dem höchsten betrieblichen Druckverlust (bei mittlerem Luftvolumenstrom) ermittelt wurde. Bei dieser Kombination ergibt sich der maximale Anstieg des Energiebedarfs (Abbildung 50). Es werden Spitzenwerte von bis zu 32 % (bei 3 m Einblastiefe) erreicht. Bei einigen Platten- und Rohrbelüftern führen die hohen Extremwerte des Druckverlustes unter Betriebsbedingungen zu einem erheblichen Anstieg des Energiebedarfs. Die hohen Druckverluste führen auch dazu, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Einblastiefen noch deutlicher hervortreten.

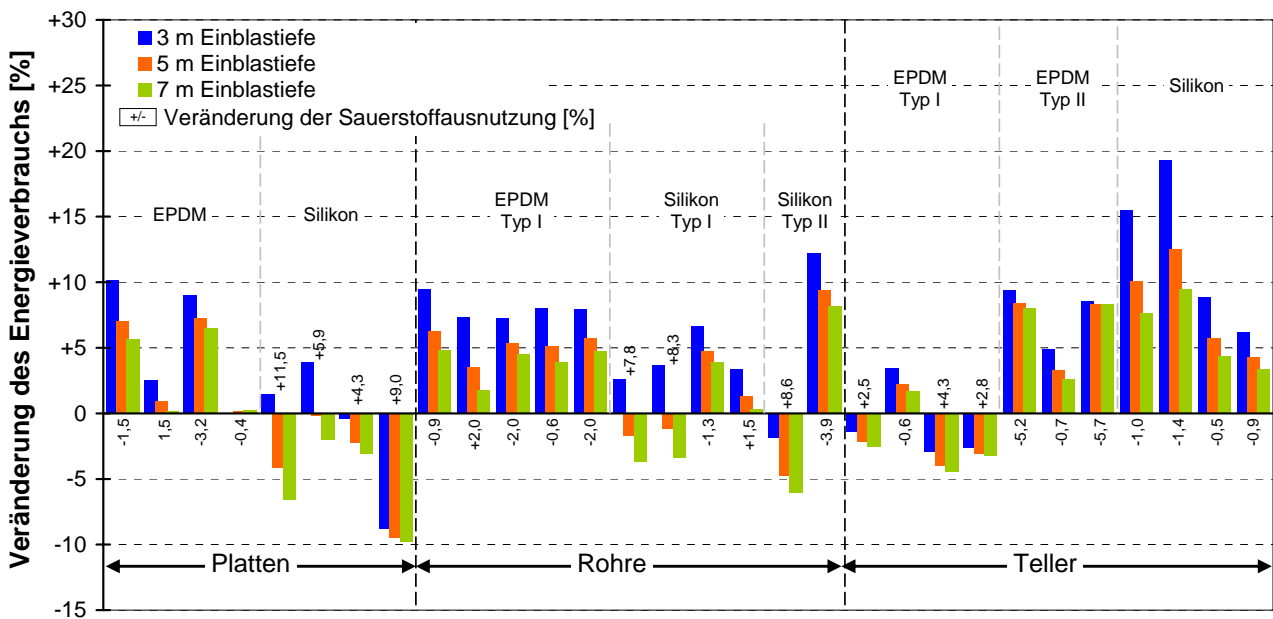


Abbildung 49: Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung (Basis Labormessung)

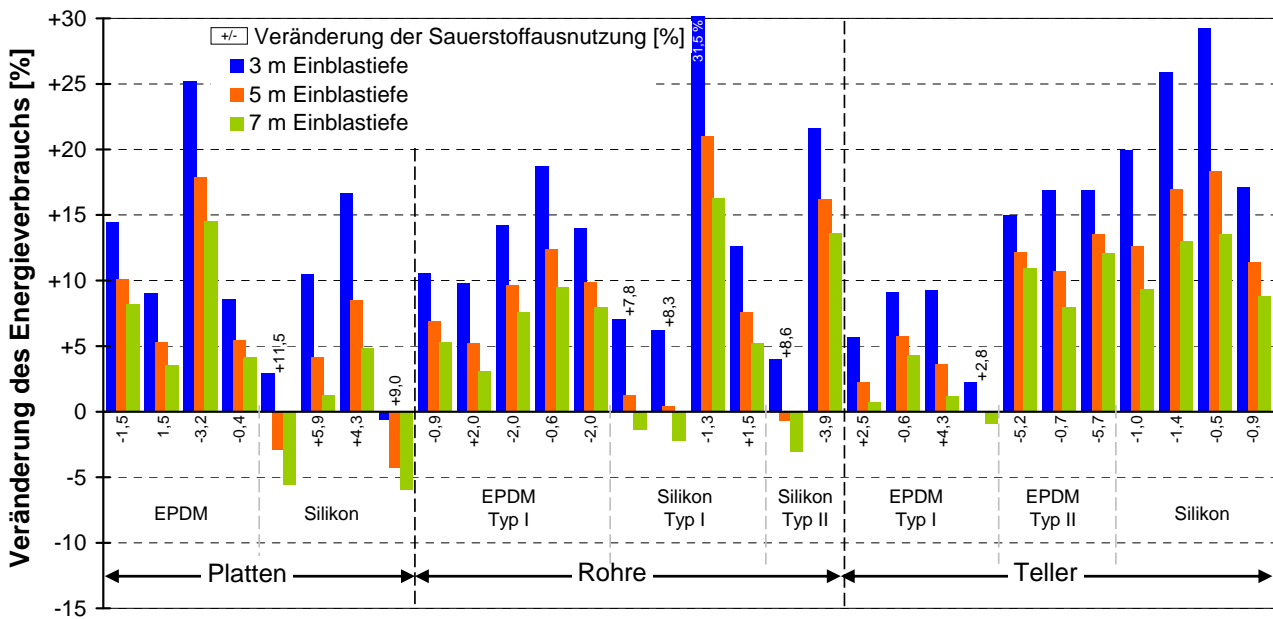


Abbildung 50: Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung (Basis Labor- und Betriebsmessung)

5.6 Hochdruckbehandlung der Belüftungsmembranen

5.6.1 Vorversuche

Bei der Hochdruckbehandlung von feinblasigen Membranbelüftungselementen besteht durch die hohe Geschwindigkeit des auftreffenden Wasserstrahls die Gefahr, die Belüftungsmembran zu beschädigen. Da zu Beginn der Untersuchungen nur wenige Erfahrungen mit dieser Methode vorlagen, wurden zunächst Vorversuche mit neuen Belüftungselementen durchgeführt. Dabei wurden

verschieden Drücke und Hochdruckdüsen benutzt und die Auswirkungen ihrer Anwendung durch den Vergleich der Sauerstoffausnutzung und des Druckverlusts vor und nach der Behandlung beurteilt. Im ersten Behandlungsschritt wurden die Belüftungselemente zunächst mit einem Druck von 80 bar mit einer Fächerdüse (übliche Hochdruckdüse) abgestrahlt. Im zweiten Behandlungsschritt wurde statt der Fächerdüse eine Dreckfräse (rotierender Hochdruckstrahl) eingesetzt. Hierdurch wird die Intensität der Hochdruckbehandlung stark erhöht. Beim dritten Behandlungsschritt wurde der Wasserdruck beim Einsatz der Dreckfräse auf 150 bar erhöht. Der Abstand zwischen Hochdruckdüse und Belüftungsmembran betrug immer ca. 20 cm. Während der Behandlung wurden die Belüftungselemente durchgehend mit Druckluft beaufschlagt. Die Versuchsergebnisse (Tabelle 7) zeigen, dass die Hochdruckbehandlung in den meisten Fällen sowohl mit der Fächerdüse als auch mit der Dreckfräse bei 80 bar die Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente verbessert und gleichzeitig den Druckverlust reduziert. Allein beim Silikon-Rohrbelüfter nimmt die Sauerstoffausnutzung nach der ersten Behandlung ab, was auf eine Beschädigung hin deutet. Nach der zweiten Behandlung nimmt die Sauerstoffausnutzung noch weiter ab, bleibt dann aber schließlich bei der dritten Behandlung unverändert. Wäre die Hochdruckbehandlung die Ursache für die Beschädigung, dann müsste die Sauerstoffausnutzung gerade nach der besonders intensiven letzten Behandlung deutlich abnehmen. Da sie aber praktisch unverändert bleibt, kann die Hochdruckbehandlung selbst nicht die Ursache der Beschädigung sein. Es ist daher davon aus zu gehen, dass auch Silikon-Rohrbelüfter schadlos mit Hochdruck und Dreckfräse (80 bar) behandelt werden können.

Tabelle 7: Ergebnisse der Vorversuche zur Hochdruckbehandlung

Typ	Material	Hochdruckreinigung mit Fächerdüse bei 80 bar		Hochdruckreinigung mit Dreckfräse bei 80 bar		Hochdruckreinigung mit Dreckfräse bei 150 bar	
		SOTE	ΔP	SOTE	ΔP	SOTE	ΔP
		Veränderung gegenüber dem unbehandelten Belüftungselement					
Rohr	EPDM	+ 1 %	+ 0 %	+ 1 %	- 10 %	- 3 %	- 14 %
	Silikon - Typ I	- 2 %	- 2 %	- 6 %	- 26 %	- 5 %	- 32 %
Platte	EPDM	+ 2 %	- 2 %	+ 4 %	- 6 %	nicht untersucht	
	Silikon	+ 3 %	- 3 %	+ 3 %	- 14 %		
Teller	EPDM - Typ I	+ 6 %	+ 1 %	+ 3 %	- 5 %		
	Silikon	- 1 %	- 1 %	+ 2 %	- 13 %		
Mittelwerte aus Messungen bei fünf Luftvolumenströmen							

Die Erhöhung des Wasserdrucks auf 150 bar in Verbindung mit dem Einsatz der Dreckfräse führt beim EPDM-Rohrbelüfter zum Rückgang der Sauerstoffausnutzung. Damit bestätigten sich die negativen Erfahrungen mit dieser Behandlungsmethode aus einzelnen früheren Untersuchungen an der TU Darmstadt. Daher wurde für die weiteren Untersuchungen die Hochdruckbehandlung mit der Dreckfräse bei 80 bar Wasserdruck als intensivster Reinigungsschritt festgelegt.

Veränderungen an den Belüftungsmembranen wurden nach der Hochdruckbehandlung weder bei der Mikroskopie der Belüftungsschlitzte noch bei der Beobachtung des Abgasverhaltens beim Betrieb im Glasbecken beobachtet. Als Ursache für die Veränderung des Druckverlustes und der Sauerstoffausnutzung kommen die Dehnung der Belüftungsschlitzte, die Veränderung der Oberflächeneigenschaften sowie die Entfernung evtl. noch anhaftender Produktionsreste in Frage. Der Hersteller der untersuchten Rohrbelüfter empfiehlt aufgrund der großen Gefahr von Schäden die Hochdruckbehandlung ausschließlich mit einer Fächerdüse bei einem Mindestabstand zwischen Belüftungs-

membran und Hochdruckdüse von 50 cm. Eine Angabe zum Reinigungsdruck wird nicht getroffen. In der Praxis werden im Allgemeinen leistungsstärkere Hochdruckreiniger mit einem Sprühdruk von 120 bis 150 bar eingesetzt, da diese an vielen Abwasserreinigungsanlagen ohnehin zu Reinigungszwecken vorhanden sind. Es ist an zu nehmen, dass bei den gewählten Versuchsbedingungen (80 bar/20 cm) vergleichbare Reinigungsergebnisse wie unter praxisüblichen Bedingungen (150 bar/50 cm) erzielt werden können. Hierzu wurden jedoch keine weitergehenden Untersuchungen durchgeführt.

5.6.2 Schäden durch Behandlungsfehler

Bevor die Belüftungselemente in das Messbecken die für Sauerstoffzufuhrmessungen eingesetzt werden, wird ihre Funktionsfähigkeit zunächst in einem Glasbecken überprüft. Dadurch wird auch das Messwasser der Sauerstoffzufuhrmessung vor Verunreinigungen geschützt, da sich lockere Verunreinigungen bereits im Glasbecken von den Belüftungselementen ablösen. Auch die Dichtigkeit der Luftanschlüsse ist so einfach zu prüfen. Außerdem kann das Abgasungsverhalten des Belüftungselementes beobachtet werden und auch Schäden an der Belüftungsmembran werden sichtbar. Abbildung 51 zeigt beispielhaft zwei Bilder dieser Überprüfung. Das linke Bild wurde unmittelbar nach der Hochdruckbehandlung des Belüftungselementes mit der Dreckfräse aufgenommen. Es zeigt eine extrem ungleichmäßige Blasenverteilung. Im mittleren, stark belüfteten Bereich koaleszieren die am Belüftungselement entstehenden kleinen Blasen durch die hohe lokale Luftzufuhr in diesem Bereich nach wenigen Zentimeter Aufstieg zu sehr großen Blasen. Erst drei Stunden später (Bild rechts) hat sich das Abgasungsverhalten normalisiert. Für dieses Verhalten gibt es zwei mögliche Erklärungen. Entweder ist die mechanische Belastung der Belüftungsmembran bei der Hochdruckbehandlung so groß, dass die Belüftungsmembran mehrere Stunden braucht um sich davon zu erholen, oder es wurden bei der Reinigung Teile des Belags in die Schlitze hinein gepresst, die die Belüftungsschlitze zunächst verstopfen, sich aber später wieder lösen. Dieser Vorgang wurde zwar nicht weiter untersucht, er zeigt aber, dass die Belüftungselemente nach einer mechanischen Behandlung eine Ruhezeit von mehreren Stunden benötigen, bevor mit Sauerstoffzufuhrversuchen der Behandlungserfolg bestimmt werden kann.

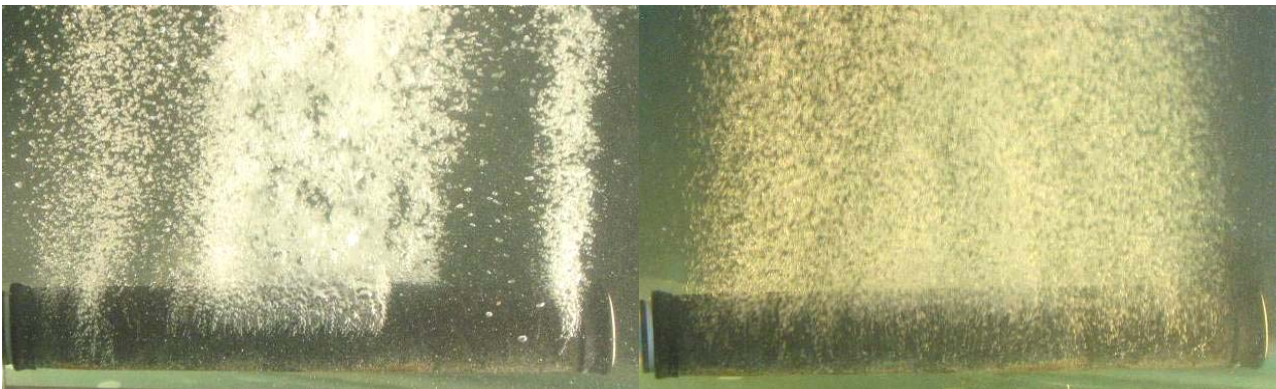


Abbildung 51: Belüftungselement nach Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse (links) und drei Stunden später (rechts)

Nach der Hochdruckbehandlung wurden die Belüftungselemente mikroskopisch untersucht. Die oberen Mikroskopien in Abbildung 52 wurden bei einem Luftvolumenstrom von etwa $6 \text{ m}^3/\text{h}$ aufgenommen. Die dargestellte Schlitzebreite entspricht daher der maximalen Öffnung unter Betriebsbedingungen. Die Mikroskopien der gereinigten Silikonmembran (Abbildung 52, unten) zeigen ausgeschnittene Membranstücke, die in einen Träger eingespannt wurden. Daher sind die Belüftungsschlitze bei diesen Aufnahmen stärker geweitet als unter Betriebsbedingungen.

Die abgebildeten Belüftungsschlitze zeigen deutlich erkennbare Schäden in Form von eingerissenen Schlitzrändern. Diese sind die Folge der mechanische Belastung während der Hochdruckbehandlung, die bei den dargestellten Belüftungselementen mit einer Dreckfräse und 150 bar Sprühdruk durchgeführt wurde. Auf der Membranoberfläche und auch in einem Teil der Schlitze verbleiben dennoch deutlich auf den Abbildungen erkennbaren Verunreinigungen, so dass auch nach der Behandlung Schlitze verstopft bleiben.

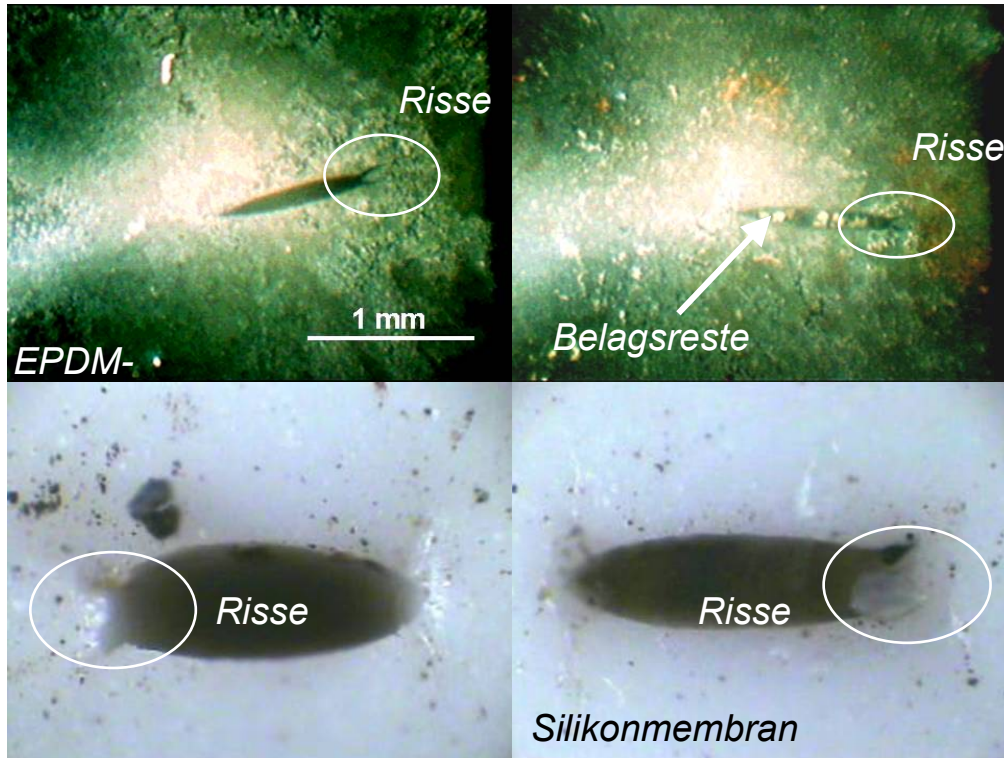


Abbildung 52: Belüftungsschlitze nach der Hochdruckbehandlung

Die angeführten Ergebnisse zeigen, dass die Hochdruckbehandlung feinblasiger Belüftungsmembranen eine Gratwanderung zwischen der Beschädigung der Belüftungsmembran bei hohem Sprühdruk einerseits und unvollständiger Reinigung der Belüftungsschlitze bei niedrigem Druck andererseits darstellt. Die Rückseite (zum Stützkörper hin gewandte Seite) der Belüftungsmembran zeigt keine Spuren der Behandlung. Da weder Wasser noch Belagsreste dort austreten, müssen in den Belüftungsschlitzen vorhandene Beläge entgegen der Sprühdrichtung des Wassers bzw. in Richtung des Luftstroms aus den Belüftungsschlitzen austreten. Dass ungewöhnliche Abgasungsverhalten des gerade behandelten Belüftungselementes in Abbildung 51 deutet darauf hin, dass sich ein Teil der Beläge in den Belüftungsschlitzen erst in der Zeit nach der Wiederinbetriebnahme löst.

5.7 Druckschlagbehandlung

5.7.1 Druckschlagbehandlung unter Laborbedingungen

Zur Vorbereitung der Druckschlagbehandlung unter Betriebsbedingungen wurde zunächst ein Vorversuch unter Laborbedingungen durchgeführt. Ein Silikon-Tellerbelüfter wurde in (kalkhaltigem) Trinkwasser betrieben um einen Anstieg des Druckverlustes zu bewirken. Nach einigen Wochen stieg der Druckverlust von 35 mbar auf bis zu 125 mbar (bei 7 m³/h) an und deutlich sichtbare Kalkabscheidungen bildeten sich (Abbildung 53). Die Druckschlagarmatur öffnet die Zuluftleitung

zum Belüftungselement alle 5 Minuten für 20 Sekunden zur Atmosphäre hin, so dass die Druckluft entweicht. Geht man davon aus, dass unter Betriebsbedingungen zwischen ein und vier Druckschläge je Tag stattfinden (Erfahrungswerte über die Druckschlagbehandlung sind bisher nicht veröffentlicht worden), dann wurden in der siebentägigen Versuchsdauer so viele Druckschläge bewirkt wie sonst in einer realen Zeit von ein bis sechs Jahren

Innerhalb der ersten 24 Stunden nach Inbetriebnahme der Druckschlagarmatur, fällt der Druckverlust um 25 mbar ab. Danach ändert er sich kaum noch. Nach dem Abschalten der Druckschlagarmatur steigt der Druckverlust sehr viel schneller an, als vor Inbetriebnahme der Druckschlageinrichtung. Beim erneuten Einschalten der Druckschlageinrichtung sinkt der Druckverlust wieder. Bei Ende des Versuchs wird eine maximale Druckverlustreduktion von 33 mbar erzielt. Auffällig ist die starke Aufwölbung der Belüftungsmembran bei Versuchsende (s. kleines Bild, Abbildung 53). Die jeweils nach den ersten Stunden der Druckschlagbehandlung sehr gleichmäßige verlaufende Abnahme des Druckverlustes ist daher wohl auch auf die fortschreitende Streckung der Silikonmembran durch die hohe Membranspannung während des Druckschlags bedingt. Trotz der intensiven Behandlung ist der verbleibende Druckverlust immer noch sehr hoch. Der Versuch zeigt daher, dass eine Reduzierung des Druckverlustes mit der Druckschlagbehandlung bei hohen Ausgangsdrücken zwar prinzipiell möglich ist, der Reinigungseffekt aber keinesfalls zufriedenstellend ist. Zudem ist die mechanische Belastung der Belüftungsmembran bedenklich hoch. Bei einer Unterbrechung der Behandlung nimmt der Druckverlust zudem mit ungewöhnlich hoher Geschwindigkeit wieder zu. Dieses Verhalten lässt darauf schließen, dass die bei Beendigung der Druckschlagbehandlung verbliebenen Ablagerungen als „Kristallisationskeime“ für neue Ablagerungen dienen. Andere Taktzeiten als 5 min/20 s wurden nicht untersucht.

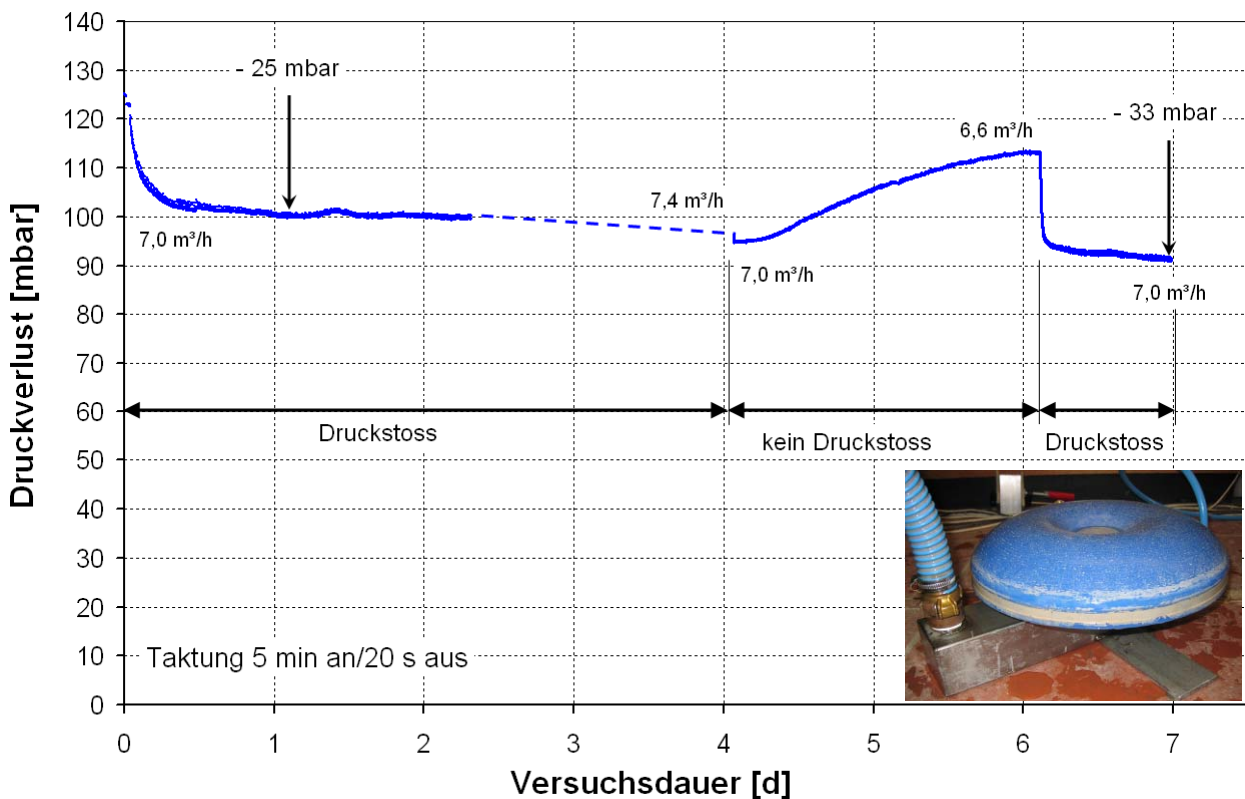


Abbildung 53: Druckverlust des Silikon-Tellerbelüfters während der Druckschlagbehandlung

5.7.2 Druckschlagbehandlung unter Betriebsbedingungen

Ein Teller- und ein Rohrbelüfter mit Silikonmembranen wurden über 6 bzw. 10 Wochen unter Betriebsbedingungen in Versuchstand B mit einer Druckschlageinrichtung betrieben. Da die Belüftungselemente jeweils paarweise in den Versuchständen angeordnet sind, können die Druckverluste der Belüftungselemente mit und ohne Druckschlagbehandlung bei identischen Betriebsbedingungen direkt miteinander verglichen werden (Abbildung 54). In den Wochen vor Inbetriebnahme der Druckschlagarmatur weichen die Druckverluste der Belüftungselemente nur wenig voneinander ab. Unmittelbar vor der Inbetriebnahme der Druckschlagarmatur betragen die Differenzen 6 bzw. 7 mbar. In den ersten zwei Versuchswochen nimmt der Druckverlust der mit Druckschlag behandelten Belüftungselementes deutlich ab, obwohl der Druckverlust der unbehandelten Belüftungselemente ansteigt. Die Druckdifferenz steigt innerhalb der ersten 2 Wochen auf maximal 27 bzw. 76 mbar. In den folgenden Wochen steigt der Druckverlust der Belüftungselemente wieder an. Dabei verringert sich die Druckdifferenz zwischen den mit und ohne Druckschlag betriebenen Belüftungselementen fortwährend, so dass der reinigende Effekt des Druckschlags langfristig abnimmt. Bei Versuchende verbleiben nur noch 13 bzw. 35 mbar Druckdifferenz. Die mit der Druckschlagbehandlung erreichten Druckverlustminima liegen bei etwa 60 mbar. Ähnliche Druckverluste, ergeben sich auch nach Betriebsunterbrechungen, bei denen kein Druckschlag statt findet (Kapitel 5.2.4 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Eine höhere Behandlungswirkung als mit Belüftungspausen ist mit der Druckschlagbehandlung daher kaum erzielbar. Zudem lässt der Erfolg der Druckschlagbehandlung mit zunehmender Versuchsdauer nach, was auf unerwünschte Nebenwirkungen dieser Methode hinweist. Es ist zu befürchten, dass die Druckschlagbehandlung ein langfristiges Ansteigen des Druckverlustes verursachen kann.

Nach Abschluss der Versuche wurden die Belüftungselemente ausgebaut und im Labor weiter untersucht. Äußerlich zeigen sich durch den Betrieb mit Druckschlag keine Veränderungen auf der Belüftungsmembran (Abbildung 54). Die deutlich auf der blauen Silikonmembran erkennbaren schwarzen Flecken sind typische Manganablagerung (vergl. Kapitel 5.10). Sie treten auf allen Belüftungselementen auf und haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Belüftungselemente. Ein Einfluss der Druckschlagbehandlung auf diese Beläge ist ebenfalls nicht erkennbar.

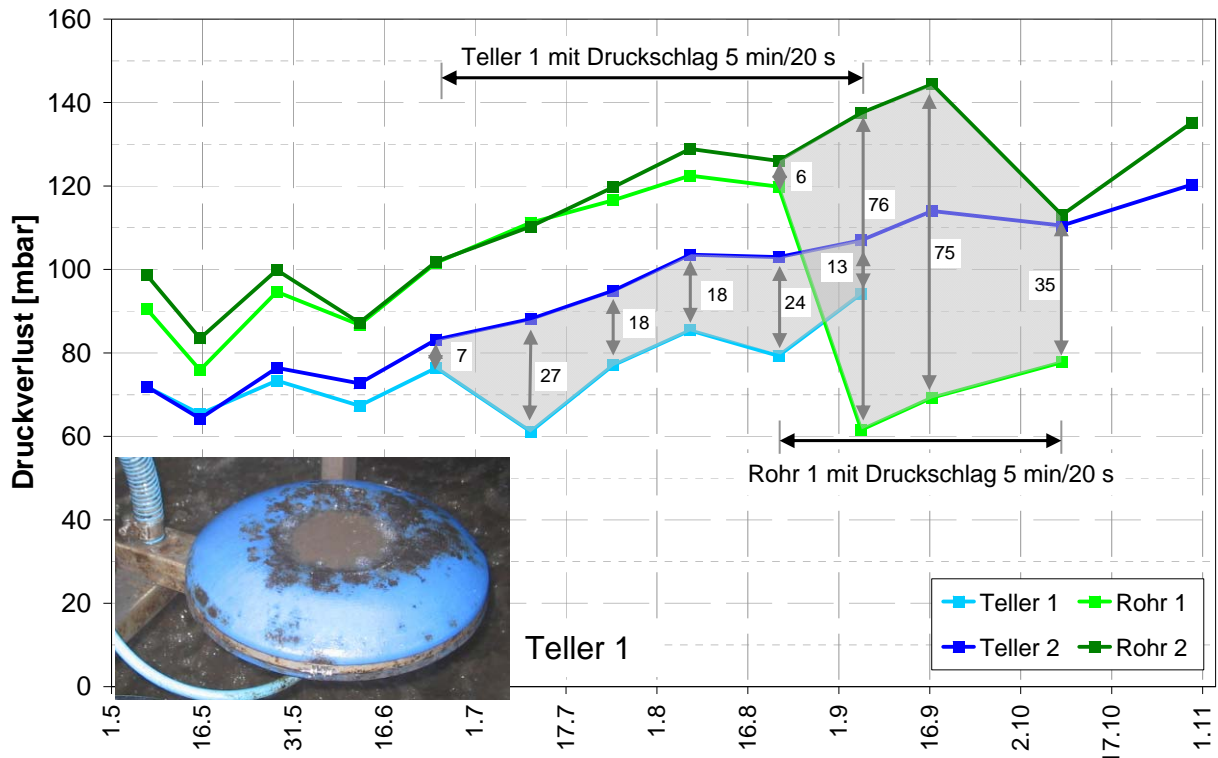


Abbildung 54: Druckverluste bei der Druckschlagbehandlung

Bei den abschließenden Labormessungen ist der Druckverlust des mit Druckschlag behandelten Tellerbelüfters außergewöhnlich hoch. Die Sauerstoffausnutzung der mit Druckschlag behandelten Belüftungselemente unterscheidet sich dagegen kaum vom Druckverlust der unbehandelten Belüftungselemente. Sie wird durch die Druckschläge nicht beeinflusst. Alle mit Druckschlag behandelten Belüftungselemente wurden nachfolgend einer Hochdruckbehandlung (80 bar Sprühdruk) unterzogen. Mit dem Einsatz der Fächerdüse kann dabei zwar keine wirksame Reduktion des Druckverlustes erreicht werden, stattdessen steigt aber die Sauerstoffausnutzung um mehr als 3 % an. Die Benutzung der Dreckfräse führt andererseits zwar zur Reduktion des Druckverlustes, gleichzeitig nimmt aber die Sauerstoffzufuhr deutlich ab (Abbildung 55).

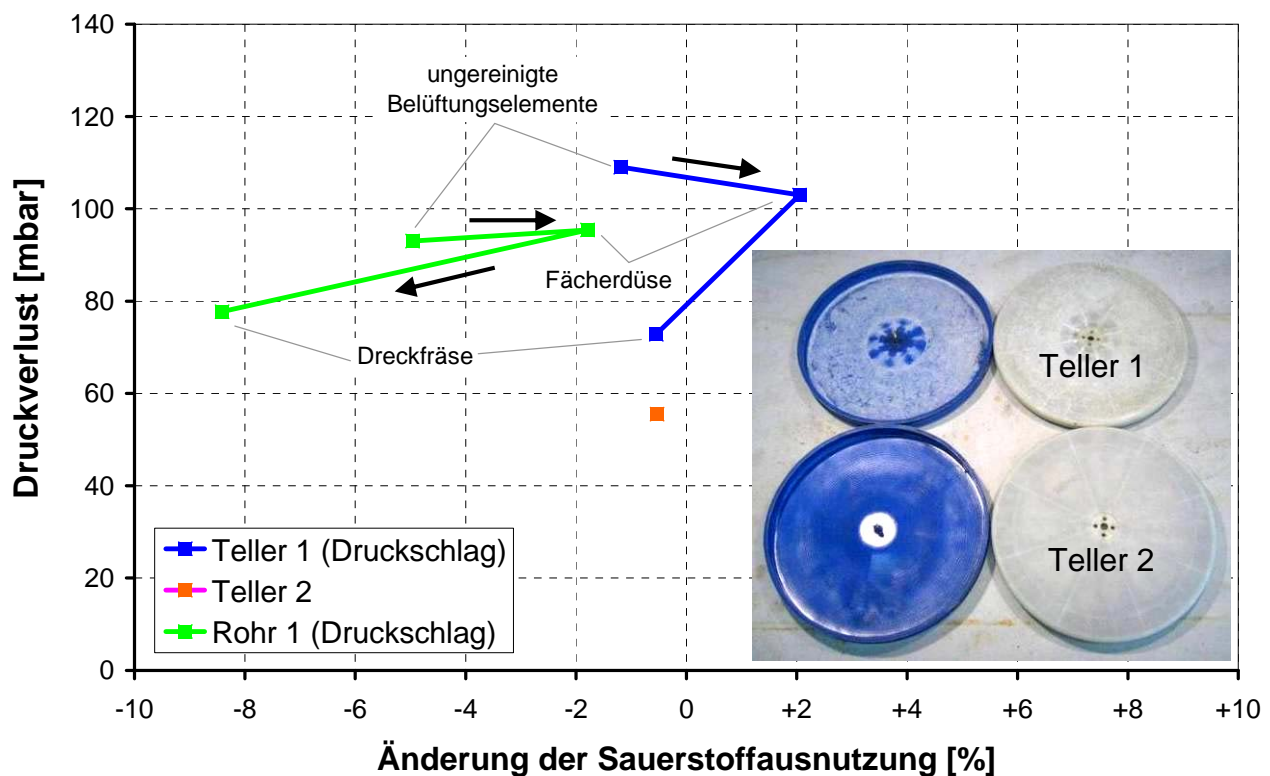


Abbildung 55: Sauerstoffausnutzung und Druckverluste nach Druckschlagbehandlung und Hochdruckbehandlung

Nach Abschluss der Messungen wurden die Belüftungselemente zerlegt. Dabei wurden auf der Innenseite der mit Druckschlag betriebenen Belüftungsmembranen ungewöhnliche Ablagerungen festgestellt, die auch in die Belüftungsschlitze hineinreichen (Abbildung 56). Die Struktur der Ablagerungen zeigt, dass es sich um die eingetrockneten Reste einer aus den Belüftungsschlitzen herausgetretenen Flüssigkeit handelt. Aufgrund der erheblichen Menge der Ablagerungen (s. kleines Bild, Abbildung 55) ist aus zu schließen, dass diese erst bei der Hochdruckbehandlung entstanden sind. Sie sind nicht wasserlöslich und bestehen hauptsächlich aus Kalziumverbindungen (vergl. Kapitel 5.10.2). Da die Ablagerungen bei Kontakt mit Salzsäure zu starker Gasbildung neigen und sich nahezu vollständig auflösen, müssen sie hauptsächlich aus Calciumcarbonat (CaCO_3) bestehen.

Das Auftreten dieser Ablagerungen zeigt, dass bei der Druckschlagbehandlung die flüssige Phase des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches tief in den Belüftungsschlitz eindringt und bis zur Membraninnenseite gelangt. Nach dem Ende der unbelüfteten Phase wird die Flüssigkeit durch Druckluft wieder verdrängt, wobei jedoch ein Teil der Flüssigkeit zurückbleibt und vom Luftstrom getrocknet wird. Da sich dieser Vorgang vielfach wiederholt, werden die Ablagerungen bei späteren Druckschlagzyklen erneut nass. Leicht wasserlösliche Bestandteile wie Kochsalz werden dadurch wieder gelöst und ausgeschwemmt, bis sich schließlich ein Gleichgewicht beider Vorgänge einstellt. Nicht wasserlösliche und schlecht wasserlösliche Bestandteile wie z.B. Calciumcarbonat als Bestandteil der Wasserhärte lösen sich nicht mehr auf, verbleiben daher in der Ablagerung und reichern sich bei jedem Zyklus weiter an. Daher lassen sich anders als in der flüssigen Phase des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches in den Ablagerungen im Belüftungselement kaum wasserlösliche Bestandteile nachweisen, während andererseits besonders der Kalkanteil stark zunimmt. Wie auch der schon diskutierte Anstieg des Druckverlustes während der Druckschlagbehandlung zeigt, werden die Belüftungsschlitze durch Rückstände der eindringenden Flüssigkeit immer weiter verstopfen. Die Druckschlagbehandlung ist daher als Maßnahme zur Begrenzung des Druckverlustanstiegs nicht geeignet.

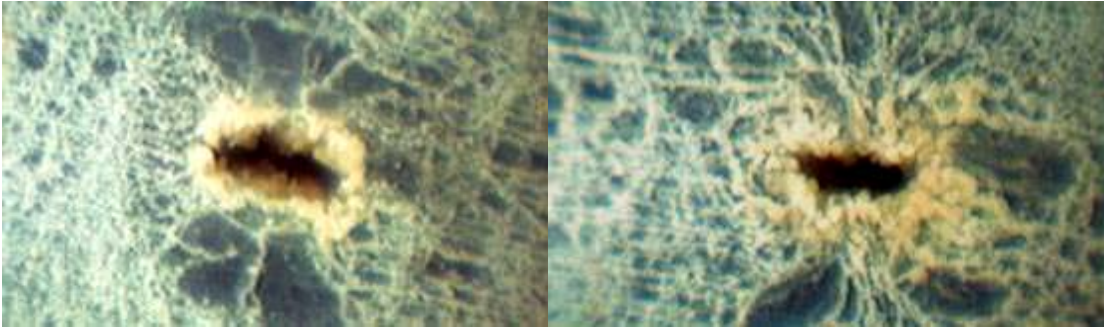


Abbildung 56: Ablagerungen an den Schlitzen auf der Membraninnenseite

5.8 Reinigungserfolg der Behandlungsmaßnahmen

5.8.1 Sauerstoffausnutzung und Druckverlust

Die Wirkung der untersuchten Behandlungsmaßnahmen wird in diesem Kapitel an Hand des durch die Behandlung veränderten Druckverlustes und der Veränderung der Sauerstoffausnutzung dargestellt und diskutiert. Die Sauerstoffausnutzung wird dabei immer im relativen Vergleich zum Referenzbelüftungselement angegeben. In der Regel weicht die Sauerstoffausnutzung der gebrauchten und gereinigten Belüftungselemente um weniger als 10 % von der Sauerstoffausnutzung des Referenzbelüftungselementes ab. Da mit allen Belüftungselementen Sauerstoffzufuhrmessungen bei fünf verschiedenen Luftvolumenströmen durchgeführt wurden, wurde zunächst für jeden Luftvolumenstrom einzeln die Abweichung der Sauerstoffausnutzung vom Referenzbelüftungselement bestimmt. Für die Darstellung in den Diagrammen wurde mit einer Regressionsrechnung die Änderung der Sauerstoffausnutzung im Mittel der fünf untersuchten Luftvolumenströme ermittelt. Der Druckverlust wurde als Mittelwert der fünf Luftvolumenströme dargestellt. Die in den Diagrammen eingezeichneten Orientierungspfeile markieren die Richtung, in der sich die Messwerte ausgehend vom unbehandelten Belüftungselement durch die Behandlung verändern. Die Zahl am Pfeil gibt an, wie sich der Energiebedarf eines Belüftungssystems mit Drehkolbengebläsen und 5 m Einblastiefe durch die Behandlung verändern würde. Nachfolgend werden die Ergebnisse sortiert nach der Bauart der Belüftungselemente dargestellt und diskutiert. Diagramme mit den gleichen Ergebnissen, allerdings nach der Behandlungsmaßnahme geordnet, sind in Anhang V dargestellt.

➤ Plattenbelüfter mit EPDM-Belüftungsmembran

Die Hochdruckbehandlung führt beim Einsatz der Fächerdüse zunächst nur zur Verminderung des Druckverlustes (Abbildung 57). Mit der nachfolgenden Hochdruckbehandlung mit der Dreckfräse wird der Druckverlust weiter gesenkt und zusätzlich auch die gegenüber dem Referenzbelüftungselement reduzierte Sauerstoffausnutzung verbessert. Der Ausgangswert wird dennoch nicht ganz erreicht. Die Reinigung mit der Handbürste erhöht zwar die Sauerstoffausnutzung, reduziert den Druckverlust aber kaum. Durch die Eindüsung von Ameisensäure wird zwar der Druckverlust mehr oder weniger stark reduziert, die Sauerstoffausnutzung nimmt aber teilweise ab. Der Energieverbrauch lässt sich durch alle Maßnahmen senken. Besonders wirksam ist aber die Hochdruckbehandlung mit der Dreckfräse.

➤ Plattenbelüfter mit Silikon-Belüftungsmembran

Die Sauerstoffausnutzung der Plattenbelüfter mit Silikonmembranen (ebenfalls Abbildung 57) liegt bereits im unbehandelten Zustand deutlich höher als bei der Referenzmessung und lässt sich durch

eine Behandlung z.T. noch deutlich erhöhen. Die Hochdruckbehandlung, insbesondere wenn sie mit der Dreckfräse durchgeführt wird, ist besonders durch die außergewöhnliche Verbesserung der Sauerstoffausnutzung sehr wirkungsvoll. Die Reinigung mit der Handbürste ist ebenfalls erfolgreich. Die Eindüsung von Ameisensäure zeigt auch hier uneinheitliche Ergebnisse.

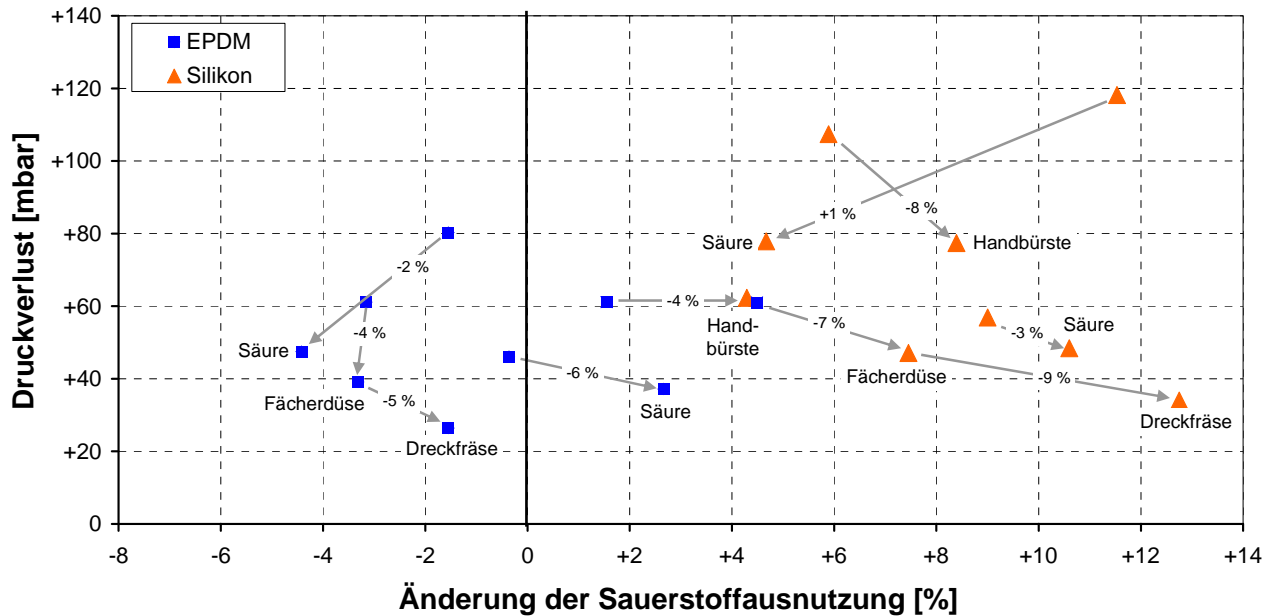


Abbildung 57: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Plattenbelüftern

➤ Rohrbelüfter mit EPDM-Belüftungsmembran

Durch die Hochdruckbehandlung mit der Fächerdüse nimmt die Sauerstoffausnutzung der Rohrbelüfter mit EPDM-Belüftungsmembran bei fast unverändertem Druckverlust leicht ab (Abbildung 58). Wird statt der Fächerdüse die Dreckfräse eingesetzt, dann nimmt auch der Druckverlust deutlich ab, wodurch der Reinigungserfolg sichergestellt wird. Die Reinigung mit der Handbürste ist fast wirkungslos und bewirkt allenfalls ein Rückgang der Sauerstoffausnutzung. Die Säureeindüsung hat nur eine geringe Reinigungswirkung und bewirkt lediglich einen geringen Rückgang des Druckverlustes.

➤ Rohrbelüfter mit Silikonmembran

Die Sauerstoffausnutzung der Rohrbelüfter mit Silikonmembranen (ebenfalls Abbildung 58) ist bereits im unbehandelten Zustand teilweise sehr deutlich gegenüber dem Referenzbelüftungselement erhöht. Die Behandlung der Belüftungselemente mit Silikonmembranen ist anders als bei den Belüftungselementen mit EPDM-Belüftungsmembranen immer erfolgreich. Die bisher nicht durch Messungen belegte Annahme, dass sich Silikonmembranen aufgrund der glatteren Oberfläche besser reinigen lassen als EPDM-Belüftungsmembranen [z.B. Wagner und von Hoessle, 2003], kann daher bestätigt werden. Sowohl die Hochdruckbehandlung, als auch das Abbürsten von Hand bewirkt einen großen Reinigungserfolg, da sowohl der Druckverlust reduziert, als auch die Sauerstoffausnutzung erhöht ist. Die Reinigungswirkung der Säureeindüsung ist demgegenüber nur gering, da bei praktisch unveränderter Sauerstoffausnutzung der Druckverlust nur wenig gesenkt wird.

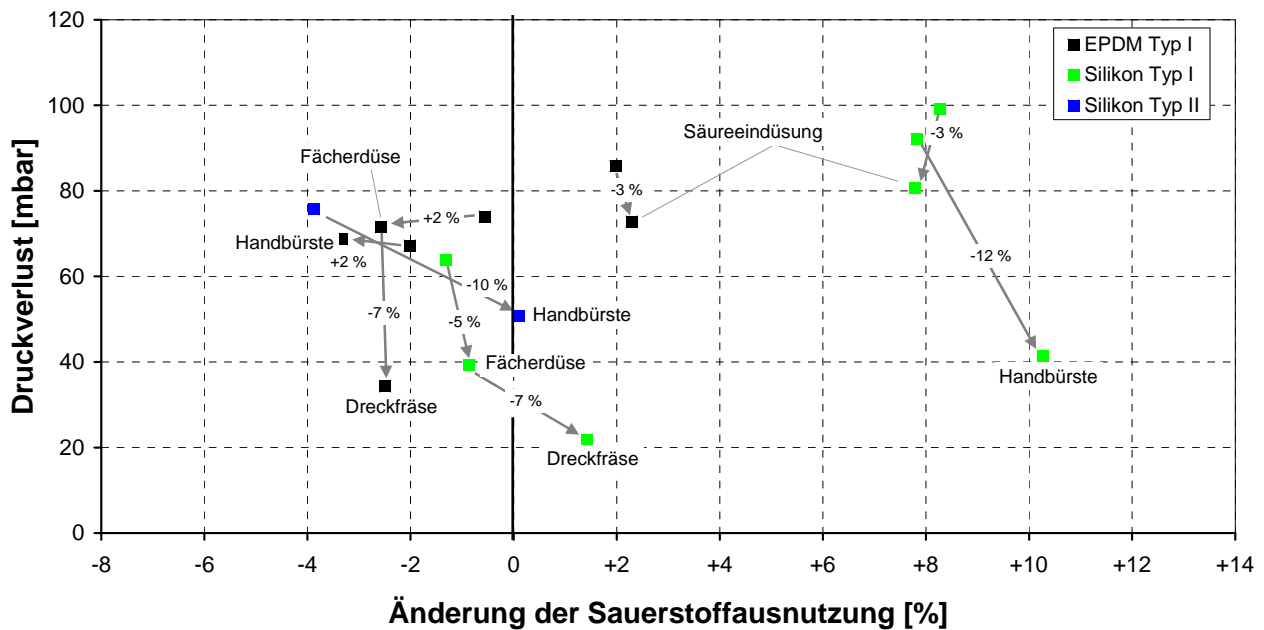


Abbildung 58: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Rohrbelüftern

➤ Tellerbelüfter mit EPDM-Belüftungsmembran

Die Hochdruckbehandlung von Tellerbelüftern mit EPDM-Belüftungsmembran ist nicht erfolgreich. Sie bewirkt eine deutliche Abnahme der Sauerstoffzufuhr, besonders dann, wenn die Dreckfräse eingesetzt wird. Gleichzeitig tritt zwar immer eine Verminderung des Druckverlustes ein, diese ist aber, auch aufgrund des ohnehin niedrigen Druckverlustniveaus, sehr gering. Das Abbürsten bringt kaum Veränderungen. Die Säureeindüsung ergibt widersprüchliche Ergebnisse. Aufgrund der Zunahme des Energiebedarfs sollte im Allgemeinen von einer Behandlung der Belüftungselemente abgesehen.

➤ Tellerbelüfter mit Silikonmembran

Bei Tellerbelüftern mit Silikonmembran ist die Hochdruckbehandlung besonders beim Einsatz der Dreckfräse wirkungsvoll. Es kann dabei aber nur der Druckverlust reduziert werden, während die Sauerstoffausnutzung unverändert bleibt. Die Eindüsung von Ameisensäure bringt auch hier widersprüchliche Ergebnisse. Eine Handreinigung wurde nicht durchgeführt.

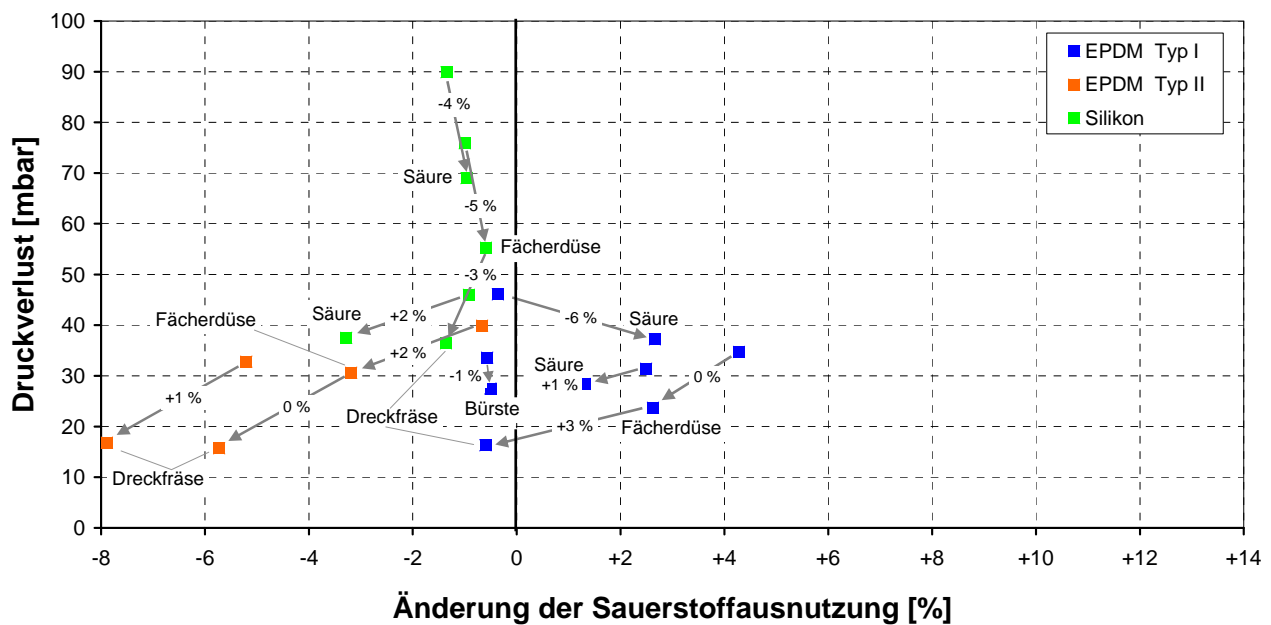


Abbildung 59: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Tellerbelüftern

5.8.2 Zusammenfassung und Analyse der Reinigungsergebnisse

➤ Hochdruckbehandlung

Die Hochdruckbehandlung führt immer zu einer Reduktion des Druckverlustes. Fraglich ist im Einzelfall nur, ob durch die Reinigung die Sauerstoffausnutzung zu- oder abnimmt. Silikonmembranen sind diesbezüglich bei der Hochdruckreinigung deutlich vorteilhafter als EPDM-Belüftungsmembranen, da ihre Sauerstoffausnutzung zunimmt oder zumindest unverändert bleibt, während die Sauerstoffausnutzung der EPDM-Belüftungsmembranen bestenfalls unverändert bleibt, oft aber auch abnimmt. Der Einsatz der Dreckfräse ist gegenüber der Fächerdüse vor zu ziehen, da die Reinigungswirkung deutlich stärker ist. Zum Teil wird der Druckverlust erst durch den Einsatz der Dreckfräse gesenkt. Schäden an den Belüftungsmembranen, die auf die Durchführung der Hochdruckreinigung zurück zu führen wären, wurden nicht beobachtet.

➤ Abbürsten

Das Abbürsten der Belüftungselemente ist bei Silikonmembranen immer sinnvoll und sehr wirkungsvoll, da neben der Verminderung des Druckverlustes auch eine Erhöhung der Sauerstoffausnutzung erzielt wird. Bei EPDM-Belüftungsmembranen ist die Reinigungswirkung bei Teller-Plattenbelüftern gering. Bei Rohrbelüftern mit EPDM-Belüftungsmembran ist das Abbürsten nicht sinnvoll.

➤ Eindüsung von Ameisensäure

Die Ergebnisse der Eindüsung von Ameisensäure sind äußerst uneinheitlich. Anders als bei der Hochdruckbehandlung und beim Abbürsten wird die Eindüsung von Ameisensäure auf Abwasserreinigungsanlagen ohne Betriebsunterbrechung und zumeist auch periodisch durchgeführt. Unter diesen Bedingungen ist die Reinigungswirkung möglicherweise besser. Durch die Möglichkeit die Anwendung beliebig zu wiederholen, ist ein geringer Reinigungserfolg bei nur einmaliger Anwen-

dung unproblematisch. Die Eindüsung von Ameisensäure wird auch vorbeugend praktiziert. Die weitere Untersuchung der mit Ameisensäure behandelten Belüftungselemente ergibt, dass sich in den Belüftungsschlitzten immer noch Ablagerungen befinden, die zu großen Teilen aus säurelöslichem Kalziumkarbonat bestehen (Nachweis durch Gasbildung bei HCl-Zugabe). Warum diese nicht bei der Eindüsung der Ameisensäure entfernt wurden, ist unklar.

In Tabelle 8 sind die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Empfehlungen für die Reinigung zusammengefasst. Diese Empfehlungen richten sich ausschließlich nach dem zu erwartenden Reinigungserfolg. Die Gefahr bei der Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse die Belüftungselemente zu Beschädigung wurde nicht in die Bewertung mit einbezogen.

Tabelle 8: Reinigungsempfehlung

Element	Membranmaterial	Empfehlung
Platten	EPDM	- Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse - Abbürsten
	Silikon	- Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse
Rohre	EPDM	- Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse
	Silikon	- Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse - Abbürsten
Teller	EPDM	- keine Reinigung durchführen
	Silikon	- Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse

Als Gründe für die bei einigen Belüftungselementen nach der Reinigung beobachtete Abnahme der Sauerstoffausnutzung kommt neben nicht sichtbaren Schäden sowohl die Zunahme der Blasengröße als, auch eine ungünstige ungleichmäßig über die Membranfläche verteilte Blasenbildung in Frage. Da trotz intensiver Reinigung in einem Teil der Belüftungsschlitzte Ablagerungen verbleiben, die den Luftstrom blockieren, kann sich die Gleichmäßigkeit des Abgasens durch eine Behandlung verschlechtern und dadurch die Sauerstoffausnutzung trotz des möglicherweise erfolgreich reduzierten Druckverlustes abnehmen. Dieser Effekt ist in extremen Fällen deutlich sichtbar (vergl. Abbildung 51). Die Blasengröße hängt unter anderem vom Schlitzquerschnitt und vom Luftvolumenstrom je Belüftungsschlitz ab (vergl. Kapitel 0). Beide Parameter werden durch die Entfernung vorhandener Beläge bei der Reinigung verändert, so dass die Blasengröße verändert wird. Dabei variiert die Blasengröße auch zwischen den Schlitzten des gleichen Belüftungselementes. Zu diesen Effekten wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt, da weder zur Bestimmung des lokalen Luftvolumenstroms an einzelnen Belüftungsschlitzten noch zur Bestimmung der lokal gebildeten Blasengröße praktikabel erscheinende und zugleich auch allgemein anerkannte Untersuchungsmethoden verfügbar waren, mit denen der Einfluss der genannten Messgrößen auf die Sauerstoffausnutzung hätte übertragen werden können.

5.8.3 Betrieblicher Druckverlust gereinigter Belüftungselemente

Die Dauerhaftigkeit der Reinigungswirkung (reduzierter Druckverlust, erhöhte Sauerstoffausnutzung) ist entscheidend für die Nachhaltigkeit einer Reinigungsmaßnahme. Ist die Reinigungswirkung nur von kurzfristiger Dauer, dann ist der für die Reinigung erforderliche Aufwand nicht zu rechtfertigen. Um den zeitlichen Verlauf des erneuten Anstiegs des Druckverlustes nach erfolgreicher Reinigung zu ermitteln, wurden gereinigte Belüftungselemente erneut in Versuchsstand B betrieben. In Abbildung 43 sind die Druckverlustverläufe dieser Belüftungselemente dargestellt.

Der Einbruch der Druckverluste Ende März und Mitte Mai wurde durch kurzfristige Betriebsunterbrechungen der Druckluftversorgung hervorgerufen. Die Ergebnisse der Technikumsmessungen vor und nach der Hochdruckreinigung fügen sich nahtlos in die am Versuchsstand B gemessenen Druckverläufe ein. Die durch die Hochdruckreinigung reduzierten Druckverluste steigen nach der erneuten Inbetriebnahme der Belüftungselemente innerhalb von nur 6 bis 8 Wochen wieder auf das ursprüngliche Druckverlustniveau oder sogar darüber hinaus an. Die Dauerhaftigkeit der Reinigungswirkung ist daher gering. Auch der Vergleich der Druckverluste unmittelbar nach erfolgter Hochdruckbehandlung mit den Druckverlusten nach den Betriebsunterbrechungen zeigt, dass der erhebliche personelle und logistische Aufwand für die mechanische Reinigung in Frage zu stellen ist.

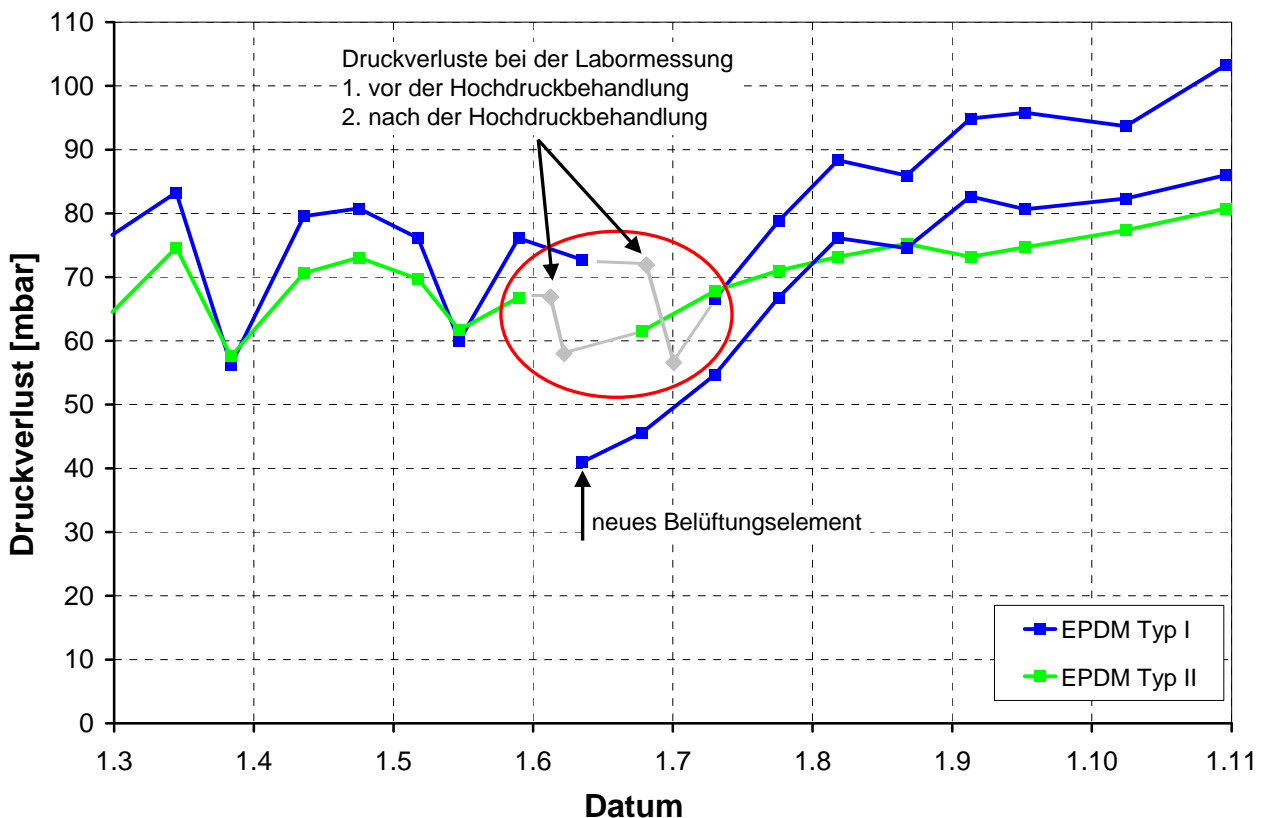


Abbildung 60: Druckverlust vor und nach Hochdruckbehandlung

5.8.4 Behandlung geschrumpfter EPDM-Belüftungsmembranen

Die während des Versuchsbetriebs geschrumpften Belüftungsmembranen haben durch die Veränderungen des EPDM-Werkstoffs ihre Elastizität verloren und sind geschrumpft (s. Kapitel 5.9.2). Diese Effekte können nicht rückgängig gemacht werden und begrenzen daher die Lebensdauer der betroffenen Belüftungsmembranen. Die eigentlich nicht mehr gebrauchstauglichen Belüftungselemente wurden mit in die Reinigungsversuche einbezogen, um fest zu stellen, ob sich durch die Hochdruckbehandlung eine „Restbetriebstauglichkeit“ erzielen lässt, mit der es bei betroffenen Abwasserreinigungsanlagen unter Umständen möglich ist, Zeit zu gewinnen zur Vorbereitung von Ersatz- oder Umbaumaßnahmen. Die Ergebnisse der nach der Hochdruckbehandlung durchgeführten Sauerstoffzufuhrversuche (Tabelle 9) zeigen jedoch eindeutig, dass dieses Ziel nicht erreicht wird. Die Hochdruckbehandlung mit der Fächerdüse ist praktisch wirkungslos, zugleich führt aber der Einsatz

der Dreckfräse zu einer weiteren Reduktion der Sauerstoffausnutzung. Der dabei abnehmende Druckverlust beweist, dass die ausgehärtete Belüftungsmembran den großen Kräften bei einer Hochdruckbehandlung nicht mehr Stand hält, so dass die Belüftungsschlitze aufreißen. Von weiteren Versuchen mit Belüftungselementen dieses Typs wurde daher abgesehen.

Tabelle 9: Veränderung der Sauerstoffausnutzung und des Druckverlustes der EPDM Typ II Rohrbelüfter im Betriebszustand und nach mechanischer Behandlung

Versuchs-stand	Betriebszustand		Hochdruckbehandlung			
			Fächerdüse (80 bar)		Dreckfräse (80 bar)	
	SOTE	ΔP	SOTE	ΔP	SOTE	ΔP
	Veränderung gegenüber dem Referenzbelüfter					
A	- 26 %	+68 mbar	-	-	-	-
B	- 43 %	+90 mbar	- 43 %	+95 mbar	- 56 %	+70 mbar
C	- 48 %	+80 mbar	-	-	-	-
Mittelwerte aus Messungen bei fünf Luftvolumenströmen						

5.9 Veränderung der Membranwerkstoffe

5.9.1 Materialhärte und extrahierbare Bestandteile

Die Shore-A Härte und der Gehalt extrahierbarer Bestandteile einiger Belüftungsmembranen wurden im Neuzustand und nach Abschluss des Versuchsbetriebes bestimmt (Tabelle 10). Weitere Belüftungselemente wurden in belüftetem Trinkwasser zusammen mit bereits gebrauchten Belüftungselementen gelagert und nach 12 bzw. 26 Monaten ebenfalls untersucht. Während dieser Zeit bildete sich auch auf den ungebrauchten Belüftungsmembranen ein durchsichtiger, hellgrauer Biofilm.

➤ Rohrbelüfter

Die Lagerung der EPDM Typ I Belüftungsmembranen in Trinkwasser führt ebenso wie der Betrieb im Versuchsstand B zum Aushärten des Membranwerkstoffs. An Hand der Veränderung der Shore-A Härte und der deutlich fest zu stellenden Schrumpfung der Belüftungsmembran ist davon aus zu gehen, dass sich Bestandteile aus dem EPDM-Werkstoff herausgelöst haben. Die Materialhärte der aus Versuchsstand B entnommenen stark geschrumpften EPDM Typ II Belüftungsmembranen steigt ebenfalls erheblich an. Der Rückgang der extrahierbaren Substanzen im Membranwerkstoff kann darauf hin deuten, dass Bestandteile aus dem Werkstoff heraus diffundiert sind. Dies gilt auch für die im Wasser gelagerten Belüftungsmembranen. Der Messwerte sind in beiden Fällen nahezu identisch. Da Silikon ein weichmacherfreies und weitgehend inertes Material ist, wird allgemein davon ausgegangen, dass sich die Belüftungsmembranen aus diesem Material während des Betriebes nicht verändern. Dem widerspricht die gemessene Zunahme der Materialhärte des Silikon-Werkstoffs. Teller- und Plattenbelüftungsmembranen aus Silikonwerkstoffen wurden nicht untersucht, da eine Veränderung des Silikonwerkstoffs zunächst nicht erwartet wurde. Es ist zu vermuten, dass die Zunahme der Shore-A Härte aus der Streckung des Membranmaterials in Belastungsrichtung resultiert (vergl. Kapitel 5.9.2).

Tabelle 10: Shore-A Härte und extrahierbare Bestandteile

Belüftungselement		Zustand/Beschreibung	Messwerte	
Typ	Material		Shore-A Härte [-]	extrahierbare Bestandteile [%]
Rohr	EPDM Typ I	Neuzustand	46,4	38,5
		aus Versuchsstand A	64,2	/
		12 mon. Wasserlagerung	59,2	/
		26 mon. Wasserlagerung	71,0	/
	EPDM Typ II	Neuzustand	43,4	40,8
		aus Versuchsstand A	82,6	27,3
		12 mon. Wasserlagerung	50,6	/
	Silikon Typ I	Neuzustand	56,8	/
		aus Versuchsstand A	65,2	/
Platte	EPDM	Neuzustand	64,0	/
		aus Versuchsstand A	66,2	/
		12 mon. Wasserlagerung	75,7	/
Teller	EPDM	Neuzustand	56,1	/
		aus Versuchsstand A	65,5	/
	EPDM Typ II	Neuzustand	49,5	/
		aus Versuchsstand A	61,2	/

➤ Plattenbelüfter

Die Härte des EPDM-Werkstoffs nimmt durch den Betrieb im Versuchsstand nur geringfügig zu. Bei der Wasserlagerung härtet die Belüftungsmembran jedoch deutlich aus. Die Ursache für diesen Widerspruch ist unklar. Es ist jedoch möglich, dass Stoffe aus dem Abwasser in die Belüftungsmembran hinein diffundieren und das Aufquellen des Werkstoffs bewirken [Edel, 2001]. Hierbei könnte sich auch die Shore-A Härte verändern.

➤ Tellerbelüfter

Die Ergebnisse der untersuchten Belüftungsmembranen von Tellerbelüftern zeigen, dass sich die Materialhärte der zwei untersuchten EPDM-Werkstoffe ähnlich entwickelt. Der „mikrobenresistente“ EPDM-Werkstoff hat zwar eine etwas geringere Shore-A Härte als der konventionelle Werkstoff, härtet aber in ähnlichem Maße aus. Die geringe Zahl der Messwerte lässt aber keinen allgemeingültigen Vergleich der beiden EPDM-Werkstoffe zu.

5.9.2 Dehnungsverhalten

Das Dehnungsverhalten der Belüftungsmembranen wurde im Anschluss an die Sauerstoffzufuhrmessungen unter Laborbedingungen untersucht. An Hand der Aufwölbung der Belüftungsmembran bei Platten- und Tellerbelüfter bzw. der Zunahme des Umfangs bei Rohrbelüftern, wurde bei ver-

schiedenen Luftdrücken die Dehnung der Belüftungsmembran bestimmt. Sie wurde auf die Ausgangslänge der Belüftungsmembran eines nicht mit Luft beaufschlagten ungebrauchten Referenzbelüftungselementes aus der gleichen Produktionscharge bezogen. Für Rohrbelüfter des EPDM Typs II stand kein ungebrauchtes Vergleichsbelüftungselement zur Verfügung, so dass diese Belüftungsmembran auch mit der ungebrauchten EPDM Typ I Belüftungsmembran verglichen wurde. Die Messung wurde ausgehend vom höchsten Luftdruck zu niedrigen Luftdrücken hin durchgeführt. Im Anhang VI sind die Ergebnisse aller durchgeführten Dehnungsmessungen als Diagramme dargestellt.

➤ EPDM-Membranen

Da die Belüftungsmembran des Plattenbelüfters mit Überlänge eingebaut wurde, geht ihre Druck-Dehnungskurve nicht durch den Nullpunkt (Abbildung 61). Nach dem der Überdruck durch das Öffnen der Luftleitung auf Null reduziert wurde, legt sich die nun drucklose Belüftungsmembran nicht auf den Stützkörper ab, so dass eine geringe Aufwölbung bestehen bleibt, die einer Überlänge von ca. 2 % entspricht. Die Belüftungsmembran des Tellerbelüfters wurde genau passend eingebaut.

Die Druck-Dehnungskurven der gebrauchten Belüftungsmembranen sind durch die Schrumpfung der Belüftungsmembranen deutlich nach unten verschoben. Die Belüftungsmembran des Plattenbelüfters ist genau auf die Abmessungen des Stützkörpers geschrumpft. Die Überlänge der Belüftungsmembran im Neuzustand ist daher möglicherweise der Versuch des Herstellers den Problemen mit schrumpfenden EPDM-Werkstoffen durch eine anfängliche Überlänge vor zu beugen. Die ursprünglich passende Belüftungsmembran des Tellerbelüfters ist durch die eingetretene Schrumpfung bereits im drucklosen Zustand vorgespannt. Die Typ I EPDM-Belüftungsmembran des Rohrbelüfters ist um 2,9 % geschrumpft, so dass sie auch beim maximalen Luftdruck nicht mehr ihre Ausgangslänge erreicht. Die Sauerstoffausnutzung dieses Belüftungselementes liegt dennoch 2 % höher als die des Referenzbelüftungselementes. Daher ist ein negativer Einfluss der Materialschrumpfung aus zu schließen. Der Druckverlust des Belüftungselementes beträgt bei der Druckverlustmessung im Mittel 72 mbar und ist daher nicht ungewöhnlich hoch. Die Schrumpfung der Typ II EPDM-Belüftungsmembran des zweiten Rohrbelüfters ist so weit fortgeschritten, dass sie fest auf dem Stützkörper aufliegt. Damit ergibt sich eine vom Luftdruck unabhängige konstante Dehnung von -4,7 %.

➤ Silikon-Membranen

Anders als bei den EPDM-Belüftungsmembranen dehnen sich die Silikon-Belüftungsmembranen der Tellerbelüfter stärker als die der Plattenbelüfter (Abbildung 62). Die Dehnungskurve des ungebrauchten Plattenbelüfters zeigt, dass die Silikon-Belüftungsmembran anders als die EPDM-Belüftungsmembran nicht mit Überlänge, sondern wie auch die anderen Silikon-Belüftungsmembranen passend eingebaut ist. Die Verschiebung der Dehnungskurven der gebrauchten Belüftungsmembranen hin zu hohen Dehnungen, zeigt, dass im Betrieb eine plastische Dehnung des Silikonwerkstoffs um mindestens 1 % statt findet. Da die Sauerstoffausnutzung der gebrauchten Belüftungselemente mit Silikonmembranen zumeist höher ist, als die der ungedehnten Referenzbelüfter, ist zu vermuten dass die Dehnung die Sauerstoffausnutzung positiv beeinflusst.

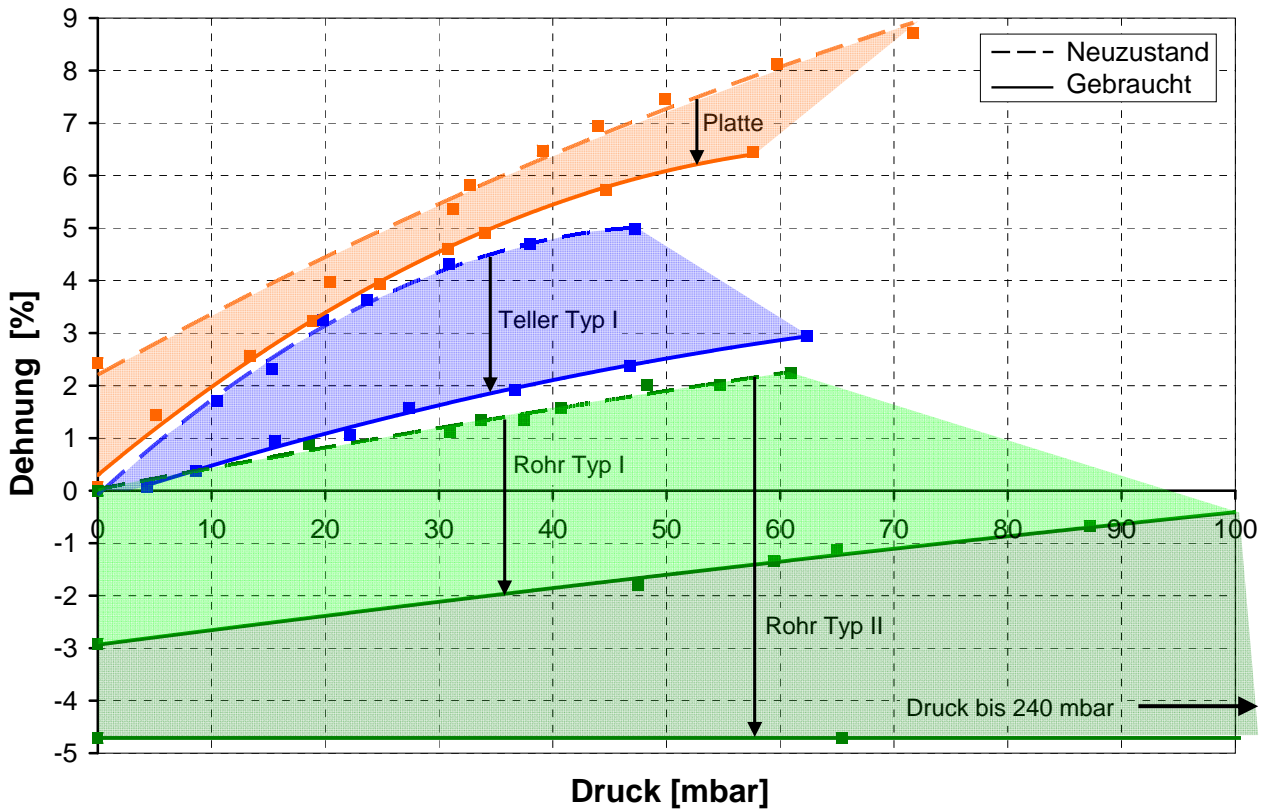


Abbildung 61: Dehnungsverhalten von EPDM-Belüftungsmembranen

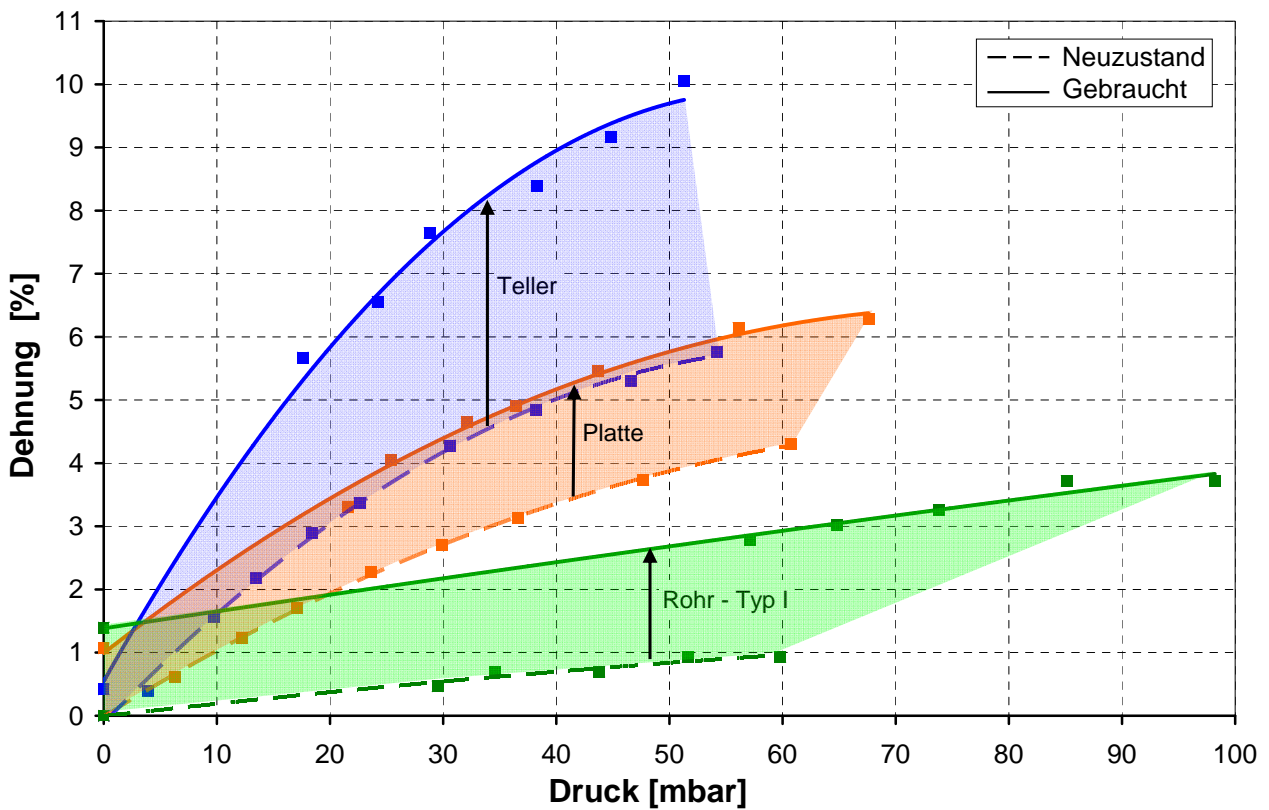


Abbildung 62: Dehnungsverhalten der Silikon-Belüftungsmembranen

5.10 Zusammensetzung der Beläge

5.10.1 Biofilm auf der Belüftungsmembran

Die Zusammensetzung des anorganischen Anteils des auf den Belüftungsmembranen entstandenen Biofilms wurde mit der semiquantitativen Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Der organische Anteil an der Trockenmasse wurde als Glühverlust ermittelt. Die Beläge bestehen praktisch immer aus verschiedenen Schichten unterschiedlichster Zusammensetzung, was sich auch in ihrem Aussehen widerspiegelt. Bevor die Analysenergebnisse dargestellt und diskutiert werden, werden daher zunächst die verschiedenen Belagsschichten beschrieben und ihr auftreten charakterisiert. Die Beläge auf EPDM-Belüftungsmembranen (Abbildung 63) unterschieden sich deutlich von denen auf Silikon-Belüftungsmembranen (Abbildung 64).

Auf den EPDM-Belüftungsmembranen sind insgesamt vier verschiedene Belagsschichten zu unterscheiden. Aufgrund seiner Farbe erkennt man besonders gut den hellen, 1 bis 2 mm dicken Belag, der direkt auf der Belüftungsmembran aufliegt und meist von weiteren dunkleren Schichten bedeckt wird. Dieser Belag haftet sehr locker auf der Belüftungsmembran und lässt sich mühelos mit einem harten Gegenstand (z.B. Messer, Spachtel) entfernen. Entweder direkt auf der Belüftungsmembran oder als Auflage auf der hellen Schicht liegt eine schwarze Schicht auf der sich meist eine weitere dünne rotbraune Schicht bildet. Diese zwei Schichten bedecken auch die ursprünglich weiße Unterseite der Stützkörper (Abbildung 63, links unten). Dort wo sich keine der zuvor genannten Schichten befindet, ist die Belüftungsmembran von einer dünnen farblosen Schleimschicht überzogen. Diese Schicht wurde nicht weiter untersucht. Sie besteht wahrscheinlich aus extrazellulären polymeren Substanzen (EPS), die typischer Weise als Teil von Biofilmen auftreten [Flemming, 1994]. Diese Schicht bildet als Deckschicht den Abschluss des Belags zum Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch hin. Zwischen dieser Schicht und der massiven hellen Schicht existieren verschiedene Zwischenstufen in unterschiedlichen Grautönen. Anders als auf der massiven hellen Schicht sind auf den Zwischenstufen keine dunklen Schichten als Auflage zu finden. Das fleckenartige Muster des Belags zeigt, dass immer wieder Teile der hellen Schicht mit den darauf liegenden dunklen Schichten von der Belüftungsmembran abplatzen. Dieser Vorgang tritt nach dem Ausbau aus dem Versuchsstand während des Transportes und bei der Lagerung verstärkt auf. An einem Teilstück eines Tellerbelüfters (Abbildung 63, mittleres Bild rechts) wurden die aufliegenden dunkleren Beläge entfernt und der darunter liegende helle Belag frei gelegt. Der um den Ausschnitt herum entstandene Spalt zeigt, dass die Belüftungsmembran soweit geschrumpft ist, dass sie bereits im unbelüfteten Zustand unter Spannung steht.

Der Belag auf den Silikon-Belüftungsmembranen ist dünner als der Belag auf den EPDM-Belüftungsmembranen und besteht, da sich keine helle Schicht gebildet hat, nur aus drei statt vier Schichten. Auf den Rohrbelüftern treten Ablagerungen hauptsächlich an den ungeschlitzten Membranbereichen auf. Direkt auf der Oberfläche der Belüftungsmembran befindet sich die schwarze Schicht, die meist von der sehr dünnen und leicht abwaschbaren rotbraunen Schicht überdeckt wird. Die Blasenbildung findet trotz der schwarzen Beläge gleichmäßig verteilt über die Membranoberfläche statt. Daher ist ein Einfluss der nur auf der Membranoberfläche liegenden und nicht in die Belüftungsschlitze hineinreichenden Beläge nicht zu erwarten. Das gleiche gilt auch für EPDM-Belüftungsmembranen. Obwohl Silikonwerkstoffe als leicht zu Reinigen gelten [Wagner und von Hoessle, 2003], ist die schwarze Schicht so fest mit der Silikonoberfläche verbunden, dass sie sich mit einer Hochdruckbehandlung nicht entfernen lässt. Andererseits ist die EPS-Schicht auf den Silikonbelüftungsmembranen farblos und sehr dünn. Für die Analyse der Belagsschichten wurden Proben von hellen und schwarzen Schichten von Rohrbelüftern aus den Versuchsständen B und C genommen. Von der rotbraunen Schicht wurde keine Probe untersucht, da durch die geringe Dicke nicht genügend Probematerial von der darunter liegenden schwarzen Schicht getrennt werden

konnte. Aufgrund der rostbraunen Färbung ist in dieser Schicht ein hoher Eisen-III-oxid (Fe_2O_3) Anteil anzunehmen.

Der organische Anteil der untersuchten Schichtproben liegt zwischen 73 und 83 % (Tabelle 11) und entspricht damit der Größenordnung die auch von Wagner, 2004 angegeben wird (vergl. Abbildung 11). Die untersuchten Schichten bestehen somit vorwiegend aus organischen Bestandteilen. Da die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse auf die Oxide der vorliegenden Elemente bezogen sind (ebenfalls Tabelle 11), wird an Hand dieser Ausgangsdaten die Häufigkeit der in der Probe vorliegenden Elemente berechnet (Abbildung 65). Die bei der Analyse ermittelten Hauptbestandteile der Beläge sind mit Daten zu ihrer Herkunft im Klärschlamm im Folgenden aufgelistet:

➤ Aluminium (Al)

Aluminiumverbindungen können aus den eingesetzten Fällmitteln oder aus dem Abwasserzulauf stammen. Ins Abwasser gelangen sie hauptsächlich als Waschmittelbestandteile (Zeolithe).

➤ Kalzium (Ca)

Kalzium liegt im Trinkwasser als Bestandteil der Wasserhärte vor. Es fällt bei Überschuss entsprechend des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes als Kalk (Calciumcarbonat CaCO_3) aus. Im Klärschlamm liegt Kalzium in einer Konzentration von ca. 60 g/t TS vor [Gujer, 2007].

➤ Chlor (Cl)

Chlor ist Bestandteil von Kochsalze (NaCl) und gelangt ebenso wie Natrium auch durch menschliche Ausscheidung ins Abwasser. Auch im Regen- und Trinkwasser ist Chlor bereits enthalten. Darüber bestehen Fällmitteln zur P-Eliminierung z.B. Eisen-III-Chlorid FeCl_3 aus Chloranteilen.

➤ Eisen (Fe)

Das im Klärschlamm vorhandene Eisen stammt hauptsächlich aus eisenhaltigen Fällmitteln. Eisen ist in vielen Grundwässern enthalten und wird bei der Trinkwasseraufbereitung durch Belüftung und Oxidation entfernt. Die weitgehende Enteisung ist eine unbedingte Voraussetzung für eine erfolgreiche biologische Entmanganung und wird daher immer zuerst durchgeführt. [Gujer, 2007]

➤ Kalium (K)

Kalium wird in Düngemitteln eingesetzt, findet sich aber in geringen Mengen auch im Trinkwasser. Im Klärschlamm liegt Kalium in einer Konzentration von ca. 2,5 g/t TS vor [Gujer, 2007].

➤ Magnesium (Mg)

Magnesium ist wie Kalzium Bestandteil der Wasserhärte und fällt bei Überschuss als Magnesiumcarbonat MgCO_3 aus. Das Verhältnis von Kalzium zu Magnesium beträgt im Trinkwasser etwa 5 zu 1 [Mutschmann, Stimmelmayer, 1991]. Im Klärschlamm liegt Magnesium in einer Konzentration von ca. 5 g/t TS vor [Gujer, 2007].



Abbildung 63: Beläge auf EPDM-Belüftungsmembranen und auf der Unterseite eines Stützkörpers



Abbildung 64: Beläge auf Silikon-Belüftungsmembranen

➤ Mangan (Mn)

Mangan liegt oft in sauerstoffarmen Grundwässern gelöst vor und wird bei der Trinkwasseraufbereitung mit biologisch aktivierten Filtern mit katalytisch wirkender Manganoxid-Beschichtung entfernt. Sobald sich Mangan oxidierende Bakterien in ausreichender Zahl angesiedelt haben, lagern sie selbst Manganoxid MnO_2 (Braunstein) auf dem Filtermaterial ab. Die Umsatzleistung der Filter erhöht sich dadurch. Die Voraussetzungen für die biologische Manganoxidation sind neben einem geringen Kohlenstoffangebot eine gute Sauerstoffversorgung und die vollständige Oxidation des im Wasser vorliegenden Eisens. Bei der Rückspülung des Filters wird ein Teil des Manganoxids vom Trägermaterial abgelöst und mit dem Spülwasser ausgetragen, mit dem es in die Abwasserreinigung gelangt. [Mutschmann, Stimmelmayer, 1991 und Gujer, 2007] Mangan ist auch Bestandteil vieler Böden [dtv-Atlas, 1987a] und gelangt deshalb auch durch Bodenabtrag in die Abwasserreinigung.

➤ Natrium (Na)

Natrium liegt in geringen Mengen im Grund- und Trinkwasser vor. Als Bestandteil von Kochsalz (NaCl) gelangt es ebenfalls in die Abwasserreinigung.

➤ Phosphor P

Der Phosphor im Abwasserzulauf stammt hauptsächlich aus menschlichen Ausscheidungen. Bei der Abwasserreinigung wird Phosphor sowohl als Bestandteil der Biomasse und mit Hilfe von Fällmitteln im Klärschlamm gebunden und in der Nachklärung entfernt. In der Biomasse liegt der Phosphoranteil bei 1 % der Trockensubstanz. [Gujer, 2007]

➤ Schwefel (S)

Schwefel liegt als Sulfat $[\text{SO}_4]^{2-}$ oder Hydrogensulfat $[\text{HSO}_4]^-$ sowohl im Trinkwasser als auch im Regenwasser vor und ist auch Bestandteil einiger Fällmittel.

➤ Silizium (Si)

Silizium stammt vermutlich als Teil der Kieselsäure SiO_2 aus den (Fein-)Sandbestandteilen, die nicht im Sandfang oder bei der Vorklärung entfernt wurden. Daneben ist Silizium auch Bestandteil der Belüftungsmembranen selbst. Es ist einerseits namensgebender Bestandteil des Silikons, andererseits aber auch als Füllmaterial im EPDM-Werkstoff vorhanden und wird auch bei der Produktion der Belüftungsmembranen als Trennmittel benutzt. Das Silizium kann auch von feinsten Staubpartikeln herrühren die trotz Luftfilter ins Belüftungssystem gelangen.

➤ Zink (Zn)

Zink wird als Korrosionsschutzschicht auf Metalloberflächen aufgebracht. Im Gebrauch löst sich die Beschichtung langsam auf und das Zink gelangt u.a. als Zinkoxid (Trivialname Zinkweiß) oder Zinkhydroxid $\text{Zn}(\text{OH})_2$ [dtv-Atlas, 1987a] in die Kanalisation und von dort in die Abwasserreinigungsanlage. Typische Konzentrationen im Klärschlamm liegen bei 1 g/t TR [Gujer, 2007].

Die Proben der schwarzen Schichten zeichnen sich, wie schon die Farbe der Schicht zeigt, durch einen sehr hohen Mangananteil aus (Abbildung 65), so dass es sich sicher um Manganoxid-Ablagerungen (Braunstein) handelt, die durch die biologische Oxidation des Mangans hervorgerufen werden. In der aufliegenden rotbraunen Schicht werden durch die Belüftung und durch Bakterien Eisen- und Kohlenstoffreste oxidiert und so erst die Bedingungen (hohe Sauerstoffkonzentration, geringer Kohlenstoffgehalt, weitgehende Oxidation des Eisens) für die Manganoxidation in der darunter liegenden Schicht geschaffen. Der Prozess der zur Bildung der schwarzen Manganoxidschicht führt, ist daher ähnlich dem Entmanganungsprozess in der Trinkwasseraufbereitung. Die helle Schicht besteht ebenfalls hauptsächlich aus Mangan, aber auch aus Anteilen von Kalzium, Eisen und Zink. Der Mangananteil ist gegenüber der schwarzen Schicht halbiert, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, dass sich die Schichten bei der Probenahme nicht vollständig trennen lassen und daher auch Reste der anderen Schichten in der Probe enthalten sind. Der Mangan- und Eisenanteil der hellen Schicht wird daher bei der Analyse etwas überbewertet. Die helle Farbe dieser Schicht ergibt sich aus dem Kalzium- und Zinkanteil, die zusammen etwa 40 % des anorganischen Anteils der Probe ausmachen und die mit den in Frage kommenden Reaktionspartnern hauptsächlich helle Verbindungen (z.B. Zinkweiß, Kalk) bilden, die sich mit der Röntgenfluoreszenzanalyse aber nicht näher bestimmen lassen. Die geringen Aluminium- und Eisenanteile der Proben zeigen, dass die zur P-Elimination eingesetzten Fällmittel nicht maßgeblich an der Bildung der Beläge beteiligt sind. Die Annahme, dass die bei der Produktion der EPDM-Werkstoffen erforderliche Beschichtung mit Talkum (Magnesiumsilikathydrat $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) eine aktive Rolle im Anfangsstadium der Bildung von Belägen spielt [Wagner und von Hoessle, 2003a], lässt sich aufgrund der geringen Magnesium- und Siliziumanteile in den Proben nicht bestätigen. Phosphor liegt nur in geringen Anteilen vor, die Teil der Biomasse des Biofilms sind. Das Silizium weist auf Feinsandbestandteile hin, die als Fremdbestandteile genauso in die Schichten eingebaut wurden, wie die aus den Waschmitteln stammenden Aluminiumverbindungen. Abbildung 66 zeigt eine schematische Darstellung der Überlagerung der auf den Belüftungsmembranen zu findenden Belagsschichten.

Tabelle 11: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und der Bestimmung des Glühverlustes der Belagsschichten

Probe	schwarze Schicht			helle Schicht
	Silikon Versuchsstand B	Silikon Versuchsstand C	EPDM Versuchsstand B	EPDM Versuchsstand B
Bestandteil	Anteil in % an der bei 550 °C geglühten Probe			
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	8,0	3,0	7,2	
Calciumoxid (CaO)	12,5	12,0	10,8	23,5
Eisen-III-oxid (Fe ₂ O ₃)	8,0	12,0	7,2	17,6
Kieselsäure (SiO ₂)	4,0	6,0		
Magnesiumoxid (MgO)	2,0	2,0		
Mangan-II-oxid (MnO)	57,0	59,0	61,4	29,4
Phosphor-V-oxid (P ₂ O ₅)	6,5	4,0		
Zinkoxid (ZnO)	3,0		10,8	17,6
Sonstige		2,0	3,6	11,8
Glühverlust GV / oTR	80,2	80,6	73,3	83,0

Bestandteile die im Analysenergebnis mit weniger als 0,5 % der bei 550 °C geglühten Probe angegeben sind, sind nicht berücksichtigt.

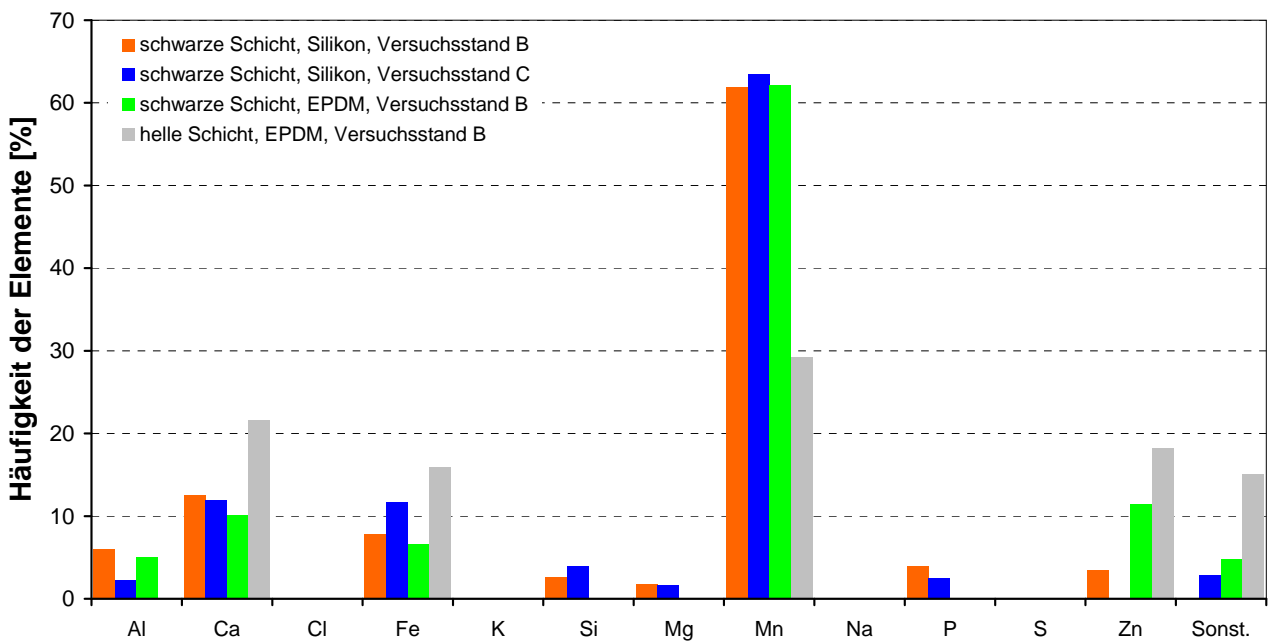


Abbildung 65: Zusammensetzung der Belagsschichten

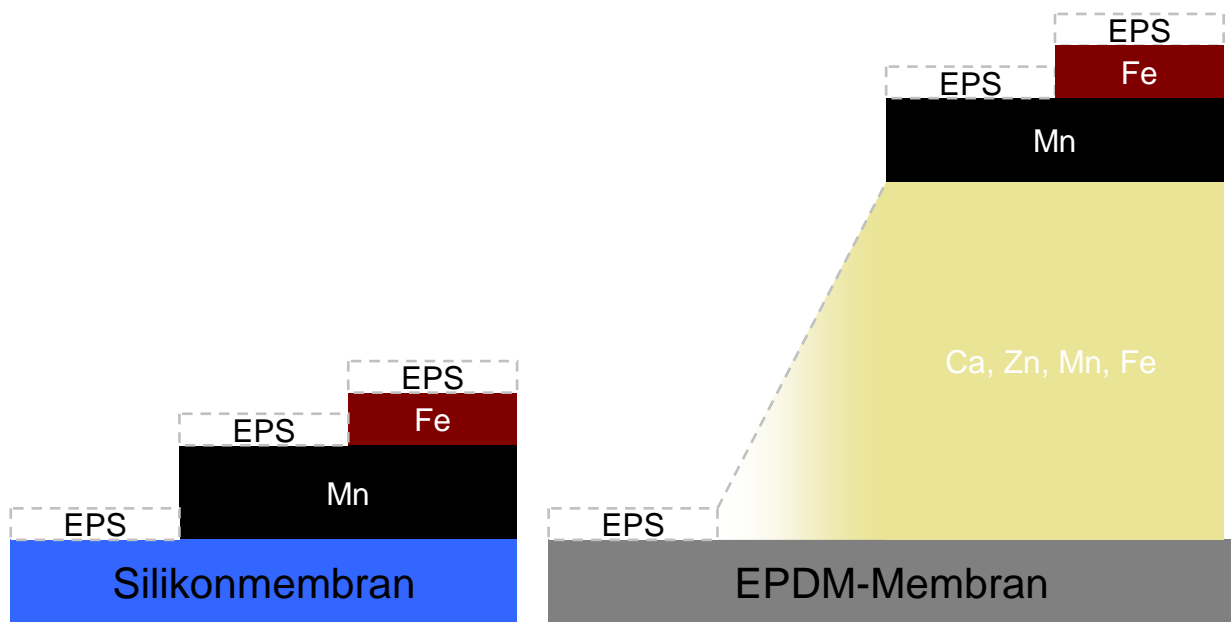


Abbildung 66: Schema des Biofilms auf den Belüftungsmembranen

5.10.2 in den Belüftungsschlitzen

Unter den auf der Belüftungsmembran aufliegenden Schichten ist mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen welche Bedingungen in den Belüftungsschlitzen herrschen. Die genaue Untersuchung der Belüftungsschlitze mit dem Mikroskop zeigt, dass am Ausgang des Belüftungsschlitzes eine scharfe Grenze existiert, die die Beläge auf der Belüftungsmembran von denen in den Belüftungsschlitzen trennt. Die abgebildeten Belüftungsschlitze sind durchgehend mit hellem Material gefüllt, dass teilweise beim Anschneiden der Belüftungsschlitze heraus fällt (Abbildung 67).

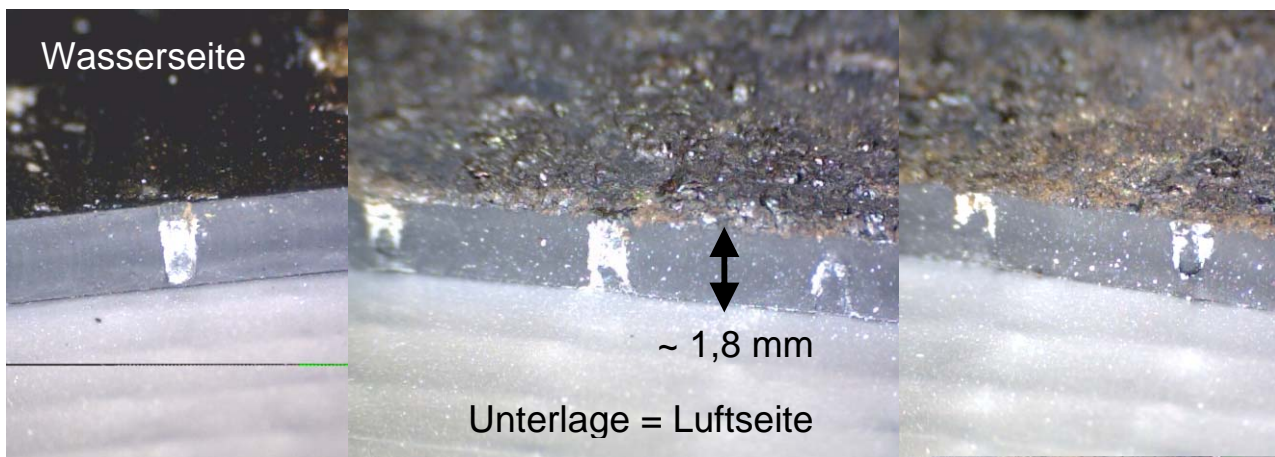


Abbildung 67: Mikroskopie der Beläge auf der Belüftungsmembran und in den Belüftungsschlitzen - EPDM

Besonders anschaulich ist die Trennung zwischen Membranaußenseite und Schlitzinnenseite bei Silikon-Belüftungselementen mit Manganablagerungen zu erkennen (Abbildung 68). Um die Belüftungsschlitze herum befinden sich auf der Außenseite der Belüftungsmembran schwarze Manganablagerungen. Die Manganablagerungen reichen jedoch nicht in den Belüftungsschlitz hinein, sondern

werden unmittelbar am Ausgang des Belüftungsschlitzes an einer scharf definierten Grenze von hellen Ablagerungen abgelöst, die in die Belüftungsschlitzes hinein reichen.



Abbildung 68: Biofilm auf der Belüftungsmembran und Beläge in den Belüftungsschlitzes - Silikon

Da aus den Belüftungsschlitzes nur wenig Material für eine Probe zu gewinnen ist, konnte keine Röntgenfluoreszenzanalyse der Beläge in den Schlitzes durchgeführt werden. Auf die Zugabe von Salzsäure reagiert das helle Material mit starker Gas- bzw. Blasenbildung. Dabei löst es sich nahezu rückstandsfrei auf, was in Verbindung mit der typischen Farbe auf Calciumcarbonat als Hauptbestandteil hindeutet.

Um den Prozess aufzuklären, der zur Bildung der calciumcarbonatreichen Ablagerungen in den Belüftungsschlitzes führt, wurden auch die Beläge auf der Innenseite der mit Druckschlag betriebenen Belüftungselemente (vergl. Kapitel 4.2.3) analysiert. Die Struktur der Ablagerung zeigt, dass sie durch das Trocknen einer durch die Belüftungsschlitzes eingedrungenen Flüssigkeit entstanden ist, die außer den gelösten Bestandteilen keine erkennbaren ungelösten Bestandteile mitgeführt hat. Um zu prüfen ob es sich dabei um die flüssige Phase des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches handelt, wurden zum Vergleich zwei Proben des gereinigten Abwassers untersucht, da dieses beim Belüftungsverfahren prinzipbedingt die gleiche Zusammensetzung aufweisen muss wie die flüssige Phase des Abwasser-Belebtschlamm-Gemisches (Abbildung 69). Eine der Proben wurde vor der Untersuchung filtriert, die andere wurde unfiltriert untersucht.



Abbildung 69: Trockenrückstand des filtrierten gereinigten Abwassers, Ablagerung im Tellerbelüfter

Die geringen Glühverluste der Proben (Tabelle 12) zeigen den mineralischen Charakter der Beläge. Alle Proben reagieren bei Zugabe von Salzsäure mit starker Blasenbildung die zeigt, dass das Kalzium in Form von Kalziumkarbonat vorliegen muss. Wagner und von Hoessle, 2003 ermitteln für die Beläge in den Schlitzten einen Glühverlust von 50 % und gehen deshalb von einer biologischen Ursache für die Bildung der Beläge aus.

Die Ergebnisse der Analysen (und Abbildung 70) zeigen deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung zwischen den Abwasserproben und den Belägen in den Belüftungselementen. Die Abwasserproben sind sehr ähnlich, sie bestehen aus großen Anteilen Kalzium, Chlor und Natrium. Daneben enthalten sie kleinere Anteile Schwefel, Magnesium, Kalium und Silizium. Aluminium und Eisen sind nur in geringen Mengen in der unfiltrierten Probe enthalten. Demgegenüber bestehen die Beläge auf den Innenseiten der Belüftungsmembran hauptsächlich aus Kalzium und geringen Mengen Silizium. Auch diese zwei Proben sind sehr ähnlich.

Tabelle 12: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse

Probe	Gereinigtes Abwasser		Ablagerung im Belüftungselement	
	unfiltriert	filtriert	Teller	Rohr
Bestandteil	Anteil in % an der bei 550 °C geglühten Probe			
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	0,5		0,6	2,3
Calciumoxid (CaO)	31,5	25,0	74,2	74,0
Chlor (Cl)	17,5	23,0	0,6	0,8
Eisen-III-oxid (Fe ₂ O ₃)	0,5			0,8
Kalium (K ₂ O)	4,0	4,0		0,8
Kieselsäure (SiO ₂)	4,0	3,0	21,4	15,3
Magnesiumoxid (MgO)	7,0	6,5	0,6	2,3
Natrium (Na ₂ O)	17,5	19,0		0,8
Phosphor-V-oxid (P ₂ O ₅)	0,5	0,5	0,6	0,8
Schwefel-VI-oxid (SO ₃)	17,5	19,0	1,9	2,3
Glühverlust GV / oTR	28,3	12,2	27,4	16,4
Bestandteile die im Analysenergebnis mit weniger als 0,5 % der bei 550 °C geglühten Probe angegeben sind, sind nicht berücksichtigt.				

Der zur Bildung der Beläge in den Belüftungsschlitzten führende Prozess lässt sich an Hand der vorliegenden Daten wie folgt rekonstruieren:

- Bei der Blasenbildung am Ausgang des Belüftungsschlitzes gelangt Flüssigkeit aus dem Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch in den Belüftungsschlitz hinein und trocknet im Luftstrom auf. Durch die Verengung des Fließquerschnitts steigt daher bei kontinuierlichem Betrieb der Druckverlust an. Dieser Vorgang wurde in seinen Grundzügen bereits von Frey, 2004 beschrieben (s. Kapitel 3.1.2).
- Da der Belag am Schlitzausgang in Kontakt mit dem belebten Schlamm steht, saugt er von dort weitere Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein, die an seiner Oberfläche im Inneren des Schlitzes verdunstet und dabei alle zuvor gelösten Stoffe als Feststoffe hinterlässt. Damit wächst die Dicke des Belags weiter an. Seine Zusammensetzung entspricht zunächst der Zusammensetzung des Trockenrückstands des gereinigten Abwassers.

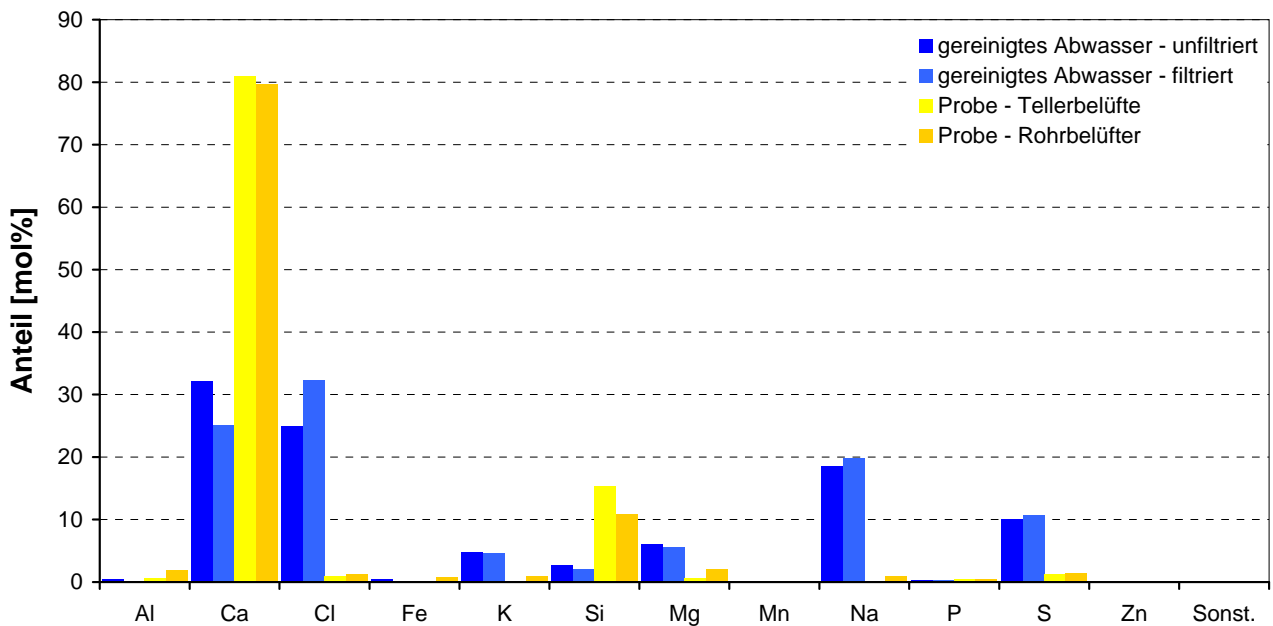


Abbildung 70: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse

- Wird die Luftzufuhr unterbrochen, dann wird entsprechend des Wasserbindungsvermögens (Hygroskopie) des Belags weiterhin Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein gesaugt. Zusätzlich drückt auch der Wasserdruck von Außen auf die Schlitzze. Nun können sich die wasserlöslichen Bestandteile des Belags (Na, K, Sulfate) wieder auflösen. Unlösliche oder nur langsam in Lösung gehende Bestandteile wie z.B. Kalziumcarbonat verbleiben als Feststoffe.
- Durch die Wiederaufnahme der Luftzufuhr wird die Flüssigkeit zumindest teilweise aus dem Belüftungsschlitz verdrängt. Durch das Ausspülen der löslichen Bestandteile nimmt die Dicke des Belages nach jeder Unterbrechung der Druckluftzufuhr ab. Außerdem verändert sich die Zusammensetzung des Belags zugunsten unlöslicher Bestandteile wie z.B. CaCO_3 und SiO_2 .

6 Kostenabschätzung

6.1 Energiekosten

Die Bilanzierung des durch die Belagsbildung erhöhten Energiebedarfs wurde in Kapitel 5.5.2 durchgeführt. Dabei wurde der Energiebedarf immer relativ zum Energiebedarf eines neuen, noch nicht durch eine Belagsbildung beeinflussten Belüftungssystems betrachtet. Für die Ermittlung absoluter Energiekosten müssen nun absolute Größenordnungen betrachtet werden (Tabelle 13). Beispielhaft werden deshalb die Kosten einer Abwasserreinigungsanlage mit 100.000 EW berechnet.

Tabelle 13: Annahmen zur Berechnung der Energiekosten

Ausbaugröße	100.000	EW
Strompreis	0,12	€/kWh
spez. Energiebedarf der Belüftung	13,7	kWh/(E·a) [MURL, 1999]

An Hand der Annahmen ergeben sich jährliche Energiekosten für das Belüftungssystem in Höhe von rund 170.000 Euro. Jedes Prozent Änderung des Energiebedarfs ergibt damit eine Energiekostensteigerung oder -senkung in Höhe von ca. 1.700 Euro/a. Entsprechend lässt sich die in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellte Veränderung des Energiebedarfs auf die Stromkosten hochrechnen. Bei der Berechnung muss unterschieden werden, ob das Belüftungssystem durchgehend betrieben wird, wodurch sich der Druckverlust langsam aber kontinuierlich erhöht, oder ob durch beabsichtigte oder unbeabsichtigte Betriebsunterbrechungen der Druckverlust gesenkt wurde. In Tabelle 14 ist der Anstieg der Energiekosten für die Extremwerte des Anstiegs des Energiebedarfs dargestellt. Die in Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellten Extremfälle mit 19 und 32 % Zunahme des Energiebedarfs (3 m Einblastiefe) entsprechen Kostensteigerungen von 32.000 und 54.000 Euro/a. Bei einem mittleren Anstieg des Energiebedarfs von 5 % erhöhen sich die Energiekosten um 8.500 Euro

Tabelle 14: Veränderung der jährlichen Energiekosten durch Belagsbildung

Einblastiefe	Betrieb mit Belüftungspausen		Betrieb ohne Belüftungspausen	
	Δ Energiebedarf	Δ Energiekosten	Δ Energiebedarf	Δ Energiekosten
m	%	€/a	%	€/a
7	+10	17.000	+16	27.000
5	+13	21.000	+21	36.000
3	+19	32.000	+32	54.000

6.2 Kosteneinsparung durch Belüftungspausen

Bei kontinuierlicher Druckluftzufuhr steigt der Druckverlust der Belüftungselemente kontinuierlich an. Bei welchem Druckverlust dieser Anstieg abflacht konnte nicht abschließend geklärt werden, da keine ausreichend lange ununterbrochene Betriebsphase erreicht wurde. Typische Geschwindigkeiten dieses Druckanstiegs liegen bei 0,5 bis 1 mbar/d, wobei bei niedrigen Druckverlusten auch ein schnellerer Druckanstiegs stattfinden kann. Durch jede Unterbrechung der Druckluftzufuhr sinkt der Druckverlust wieder ab. Für die Unterbrechung der Luftzufuhr entstehen naturgemäß keine Kosten. Da auch der Ausbau der Belüftungselemente zur Durchführung der Sauerstoffzufuhrmessungen eine Unterbrechung der Druckluftzufuhr bedingt, ist es nicht möglich, die Sauerstoffausnutzung während des Betriebes mit hohem Druckverlust zu ermitteln. Für die Bilanzierung der Energiekosten

wird daher angenommen, dass die Sauerstoffausnutzung während des Druckanstiegs unverändert bleibt. Für die Berechnung des Energieverbrauchs wird vereinfacht ein gleichbleibend schneller Anstieg des Druckverlusts angesetzt. Daher kann der Druckverlust zur Halbzeit des Betriebsintervalls für die Berechnung des Energiebedarfs der Belüftung herangezogen werden. Abhängig von der Dauer des Betriebsintervalls beträgt der mittlere Druckanstieg bis zu 45 mbar bei 6-monatigem Dauerbetrieb. Die Energiekosten steigen dabei um bis zu 15.000 €/a im Vergleich zum Betrieb mit dem Druckverlust unmittelbar nach der Unterbrechung der Druckluftzufuhr an (Tabelle 15).

Tabelle 15: Vergleich der Belüftungskosten bei Betrieb mit und ohne Belüftungspausen (bei Einblastiefe 5 m)

Belüftungsdauer zwischen den Belüftungspausen	mittlerer Druckanstieg während der ununterbrochenen Belüftung	Anstieg des Energiebedarfs	Anstieg der Energiekosten für Belüftung
	mbar	%	€/a
6 mon.	45,0	8,9	15.000
3 mon.	22,5	4,5	7.600
2 mon.	15,0	3,0	5.100
1 mon.	7,5	1,5	2.600
2 Wochen	3,8	0,8	1.400
1 Woche	1,9	0,4	680

6.3 Energiekosteneinsparung durch Reinigungsmaßnahmen

Da bei der Durchführung von manuellen Reinigungsmaßnahmen wie der Hochdruckbehandlung und dem Abbürsten üblicherweise auf vorhandenes Personal zurückgegriffen wird, fallen keine zusätzlichen Personalkosten an. Auch die erforderlichen Geräte sind zumeist schon auf den Abwasserreinigungsanlagen vorhanden. Weitere Kosten sind nicht relevant. Bei der Eindüsung von Ameisensäure entstehen ebenfalls keine zusätzlichen Personalkosten. Die Anschaffungskosten für eine Eindüsstation liegen bei ca. 2000 € [Doppler, 2004]. Die Kosten für 85-%ige Ameisensäure liegen bei 3,5 €/kg [F+B Chemie, 2008]. Die Versuche zeigen, dass je Anwendung 10 bis 20 g Ameisensäure je Belüftungselement eingesetzt werden müssen. Bei ca. 2.500 Belüftungselementen für eine Beispielanlage mit 100.000 EW ergeben sich somit Chemikalienkosten von 90 bis 180 € je Anwendung.

Für die Ermittlung des Energiebedarfs und der Energiekosten wird angenommen, dass die Wirkung der Reinigungsmaßnahmen über einen Zeitraum von 3 Monaten kontinuierlich abklingt, und danach wieder Druckverlust und Sauerstoffausnutzung des ungereinigten Ausgangszustands erreicht sind. Dies entspricht den Erfahrungen mit dem Druckanstieg nach der Wiederinbetriebnahme gereinigter Belüftungselemente (Kapitel 5.8.3). Die große Streuung der Versuchsergebnisse (vergl. Kapitel 5.8.1) führt dazu, dass auch die Berechnung des Energieverbrauchs sehr große Spannweiten aufweist (Tabelle 15). Im Mittel ist der Reinigungserfolg des Abbürstens und der Hochdruckreinigung mit Dreckfräse gleichermaßen groß. Die berechnete Energieeinsparung fällt bei der Eindüsung von Ameisensäure und bei der Hochdruckbehandlung mit Fächerdüse weniger als halb so groß aus. Da die Reinigungswirkung nicht länger als 3 Monate anhält, wird die in der Tabelle dargestellte Energiekosteneinsparung nur bei regelmäßiger 4 maliger jährlicher Reinigung erreicht. Da der Aufwand für die Durchführung der Hochdruckbehandlung und des Abbürstens aufgrund der erforderlichen Entleerung der Belebungsbecken enorm hoch ist, fällt die ohnehin unsichere Kosteneinsparung relativ gering aus. Daher sind diese Maßnahmen nur zu empfehlen, wenn entweder akuter Handlungsbedarf besteht, die Becken z.B. zu Reparaturzwecken ohnehin entleert werden müssen, oder

die Belüftungselemente an aushebbaren Belüftungsgittern installiert sind. Außerdem ist bei der Hochdruckbehandlung auch das Beschädigungsrisiko zu berücksichtigen. Z.T. geht dabei auch der Gewährleistungsschutz der Hersteller verloren.

Tabelle 16: Veränderung des Energiebedarfs und der Energiekosten durch Reinigung der Belüftungselemente

Typ	Energie							
	-bedarf	-kosten	-bedarf	-kosten	-bedarf	-kosten	-bedarf	-kosten
	Handbürste		Fächerdüse		Dreckfräse		Säureeindüsung	
	%	€/a	%	€/a	%	€/a	%	€/a
Platten	-8	-6.800	-7	-5.950	-16	-13.600	-3	-2.550
	-4	-3.400	-4	-3.400	-9	-7.650	+1	+850
Rohre	-12	-10.200	-5	-4.250	-12	-10.200	-3	-2.550
	-10	-8500	+2	+1.700	-5	-4.250	-3	-2.550
	+2	+1700						
Teller	-1	-850	-5	-4.250	-8	-6.800	-6	-5.100
			0	0	+1	+850	-4	-3.400
			+2	+1.700	+2	+1.700	+1	+850
					+3	+2.550	+2	+1.700
Mittelwert	-5,5	+4.700	-2,4	+2.100	-5,5	+4.700	-1,9	+1.600

6.4 Nutzungsdauer der Belüftungselemente

Die Versuche unter Betriebsbedingungen wurden über einen Zeitraum von mehr als 2,5 Jahren durchgeführt. Demgegenüber liegt die Nutzungsdauer von Belüftungselementen zwischen 6 und 10 Jahren (Krampe, 2007). An Hand der vorliegenden Daten ist daher keine Abschätzung der Lebensdauer der Belüftungselemente möglich. Grundsätzliche Aussagen über die die Nutzungsdauer begrenzenden Faktoren sind dennoch möglich. EPDM-Werkstoffe verändern sich im Betrieb. Dabei nimmt die Materialhärte zu und die Belüftungsmembranen schrumpfen (vergl. Kapitel 5.9). Diese Veränderungen begrenzen prinzipiell ihre Nutzungsdauer und lassen sich auch nicht durch Wartungs- oder Reinigungsmaßnahmen verhindern oder verzögern (von Consbruch, 2001). Bei Rohrbelüftern ist zu beobachten, dass die schrumpfende Belüftungsmembran den Stützkörper fest umschließt, bis letztendlich kein Raum mehr für die Verteilung der Druckluft unterhalb der Belüftungsmembran bleibt. Bei Platten- und Tellerbelüfter ist die Belüftungsmembran am Rand des Stützkörpers eingespannt. Schrumpft die Membran sehr stark, dann steht sie auch im unbelasteten Zustand unter Spannung, so dass sich die Schlitze öffnen und Flüssigkeit unter die Membran gelangt.

Anders als bei EPDM-Belüftungsmembranen ist bei Silikonmembranen eine plastische Dehnung des Materials zu beobachten (vergl. Kapitel 5.9). Bisher wurde keine Auswirkung dieser Dehnung auf die Betriebstauglichkeit der Belüftungselemente beobachtet. Ob es dazu kommt, hängt davon ab, ob der Dehnungsprozess langfristig zum Stillstand kommt und welche Dehnung im Endstadium erreicht wird. Kritisch kann die Materialdehnung dadurch werden, dass die Belüftungsschlitze bei hohem Druck aufreißen, oder dass die Belüftungsmembran aufgrund ihrer Überlänge im drucklosen Zustand Falten wirft. Im Allgemeinen werden die Belüftungsmembranen oder die Belüftungselemente ausgetauscht, wenn der Druckverlust als zu hoch empfunden wird.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Belag in den Belüftungsschlitzen

Die mikroskopische Untersuchung der Belüftungsschlitze zeigt, dass an der wasserseitigen Öffnung des Belüftungsschlitzes eine scharfe Grenze existiert, die den Biofilm auf der Belüftungsmembran vom Belag in den Belüftungsschlitzen trennt. Anders als der Biofilm auf der Belüftungsmembran hat der Belag in den Belüftungsschlitzen keinen biologischen Ursprung. Es konnte gezeigt werden, dass während der Blasenbildung Flüssigkeit aus dem belebten Schlamm ins Innere des Belüftungsschlitzes gelangt und dort antrocknet. Da der hygroskopische Belag am Schlitzausgang in Kontakt mit dem belebten Schlamm steht, saugt er von dort weitere Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein, die an seiner Oberfläche im Inneren des Schlitzes fortwährend wieder verdunstet und dabei alle zuvor gelösten Stoffe als Feststoffe hinterlässt. Wird die Luftzufuhr unterbrochen, dann wird entsprechend der Hygroskopie des Belags weiterhin Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein gesaugt. Zusätzlich drückt auch der Wasserdruck von Außen auf die Schlitze. Nun gehen die wasserlöslichen Bestandteile des Belags (Na, Cl, K, Sulfate) wieder in Lösung. Unlösliche oder nur langsam in Lösung gehende Bestandteile wie z.B. Kalziumcarbonat verbleiben als Feststoffe. Bei der Wiederaufnahme der Luftzufuhr wird die Flüssigkeit zusammen mit den gelösten Bestandteilen aus dem Belüftungsschlitz verdrängt. Durch das Ausspülen der löslichen Bestandteile nimmt die Dicke des Belages bei jeder Unterbrechung der Druckluftzufuhr ab. Außerdem verändert sich die Zusammensetzung des Belags zugunsten unlöslicher Bestandteile wie z.B. CaCO_3 und SiO_2 .

7.2 Biofilm auf der Belüftungsmembran

Auf den Belüftungsmembranen entsteht ein Biofilm, der aus bis zu vier unterschiedlichen Schichten besteht. Die leicht zu unterscheidenden Schichten treten stets in der gleichen Reihenfolge auf, da durch die jeweils aufliegenden Schichten erst die Wachstumsbedingungen für die Bakterien in den weiter unten liegenden Schichten geschaffen werden. Die oberste Schicht wird von einer dünnen und klaren Schicht EPS gebildet, in der Kohlenstoffreste abgebaut werden, so dass die darunter liegenden Schichten vor dem Zutritt von Kohlenstoff geschützt sind. Darunter befindet sich eine rotbraune Schicht, deren Färbung sich aus den Eisen-III-oxid-Ablagerungen Eisen oxidierender Bakterien ergibt. Die nächste Schicht ist schwarz und erhält ihre Farbe durch Manganoxid-Ablagerungen die von Mangan oxidierenden Bakterien gebildet werden. Diese Schicht kann sich nur dadurch bilden, dass in der aufliegenden rotbraunen Schicht nach dem Kohlenstoff auch Eisen entfernt wurde. Diese schwarze Schicht liegt bei Silikonbelüftungsmembranen direkt auf der Belüftungsmembran auf. Bei EPDM-Belüftungsmembranen liegt darunter zusätzlich eine sehr Dicke und helle Schicht, die aus Kalzium, Eisen, Mangan und auch Zink besteht. Die Farbe ergibt sich zum einen durch den hohen Kalziumgehalt und zum anderen durch das Zink, das als Zinkoxid „Zinkweiß“ die helle Färbung verursacht. Da der Druckverlust der Belüftungselemente hauptsächlich durch den Reibungswiderstand der Luftströmung in den Belüftungsschlitzen entsteht, ist ein Einfluss des oberflächlichen Biofilms auf den Druckverlust der Belüftungselemente auszuschließen.

7.3 Veränderung der Belüftungsmembranen

Es wurde gezeigt, dass sowohl EPDM- als auch Silikonbelüftungsmembranen beim Betrieb in Abwasserreinigungsanlagen Veränderungen unterworfen sind. Da EPDM-Werkstoffe nicht dauerhaft stabil sind schrumpfen die Belüftungsmembranen und härten aus, wodurch ihre Nutzungsdauer begrenzt wird. Es können Stoffe sowohl aus dem Material heraus (z.B. die Weichmacher) wie auch hinein diffundieren [Edel, 2001 und von Consbruch, 2001]. Einige dem Werkstoff zugesetzte Addi-

tive können den mikrobiellen Befall des Werkstoffs begünstigen, der bis zur vollständigen Auflösung des Materials führen kann [Flemming, 1994]. Welcher dieser Prozesse letztlich die beobachteten Veränderungen der untersuchten EPDM-Belüftungsmembranen hervorruft, kann mit den durchgeführten Untersuchungen nicht bestimmt werden. Silikon-Werkstoffe werden anders als EPDM-Werkstoffe plastisch gedehnt. Die Veränderungen der Werkstoffe beeinflussen die Aufwölbung der vom Luftdruck aufgespannten Belüftungsmembran. Durch das Schrumpfen des EPDM-Werkstoffs nimmt die Aufwölbung der EPDM-Belüftungsmembran ab. In extremen Fällen steht die am Stützkörper eingefasste Belüftungsmembran bereits ohne Druckluftzufuhr unter Spannung, wodurch die Belüftungsschlitze ständig geöffnet sind. Bei Rohrbelüftern verengt sich durch den schrumpfenden Werkstoff der Luftspalt zwischen dem Stützkörper und der Belüftungsmembran, so dass der Fließweg der Druckluft unterhalb der Membran blockiert wird. Demgegenüber ist die plastische Dehnung des Silikon-Werkstoffs in der beobachteten Größenordnung unproblematisch. Es ist zu vermuten, dass die Zunahme der Sauerstoffausnutzung einiger Silikon-Belüftungselemente durch die Zunahme der Dehnung der Belüftungsmembran begünstigt wird. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Dehnung der Belüftungsmembran und der Sauerstoffausnutzung oder dem Druckverlust konnte jedoch nicht hergestellt werden.

7.4 Druckverlust unter Betriebsbedingungen

An drei Versuchsständen wurden die Druckverluste von insgesamt 54 Belüftungselementen unter Betriebsbedingungen ermittelt. Es wurde gezeigt, dass in der ersten 8 bis 10-wöchigen Betriebsphase zunächst ein sehr schneller Druckanstieg stattfindet. Der im Neuzustand eines Belüftungselementes gemessene Druckverlust lässt daher keinen Rückschluss auf den im Betrieb zu erwartenden Druckverlust zu und kann deshalb kein geeignetes Kriterium zur Beurteilung von Belüftungselementen sein. Nach der ersten Betriebsphase hängt die weitere Entwicklung des Druckverlustes insbesondere von der Betriebsweise der Belüftung ab. Bei ununterbrochener Druckluftzufuhr steigt der Druckverlust durch die zunehmende Verengung der Belüftungsschlitze durch die Beläge kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis 1 mbar/d an. Bei Silikonmembranen steigt der Druckverlust zwischen den Belüftungspausen schneller an als bei EPDM-Membranen. Deshalb erreichen Belüftungselemente mit Silikonmembranen bei ununterbrochenem Betrieb deutlich höhere Druckverluste. Wann dieser Prozess zum Erliegen kommt, und sich ein Gleichgewicht zwischen Neubildung und Ablösung der Beläge einstellt, konnte mit den Versuchen nicht geklärt werden. Bei vollständiger Unterbrechung der Belüftung sinkt der Druckverlust schlagartig ab. Unmittelbar nach der Wiederaufnahme der Belüftung, werden wieder die vergleichsweise niedrigen Druckverluste der ersten Betriebsphase erreicht. Für diesen Effekt sind bereits wenige Minuten Unterbrechung ausreichend. Bei erneuter Druckluftzufuhr wiederholt sich der Druckanstieg. Ein positiver Effekt des Betriebs mit hohen Luftvolumenströmen, dem so genannten „Freiblasen“, der auf den Abrieb der Beläge und das Abplatzen von der gedehnten Belüftungsmembran zurück zu führen wäre, ist nicht nachweisbar. Dass in der Praxis das eigentlich unwirksame Freiblasen dennoch erfolgreich praktiziert und daher auch empfohlen wird, deutet auf die Fehlinterpretation der zum Reinigungserfolg führenden Mechanismen hin. Da offensichtlich die Zunahme der Wirkung des Freiblasens bei steigendem Luftvolumenstrom erwartet wird, werden unter Hinweis auf diesen Zweck vorübergehend Luftvolumenströme zugelassen, die um mindestens 25 % höher sind, als die für den Dauerbetrieb zulässigen Luftvolumenströme. Da die unter wirtschaftlichen Aspekten durchgeführte Auslegung der Druckluftherzeuger im Allgemeinen keine Reserven für diesen Fall beinhaltet, kann ein ausreichend hoher Luftvolumenstrom je Belüftungselement meist nur durch die gezielte Konzentration des zur Verfügung stehenden Luftvolumenstroms auf einen Teil der Belüftungselemente erreicht werden. Dabei wird die Luftzufuhr der übrigen Belüftungselemente unterbrochen, wodurch sich dann die eigentlich durch den hohen Luftvolumenstrom beabsichtigte Verminderung des Druckverlustes ergibt.

7.5 Reinigung

Die Durchführung der Reinigungsmaßnahmen hat gezeigt, dass eine Verminderung des Druckverlustes fast immer möglich ist, sie aber z.T. auf Kosten einer Verminderung der Sauerstoffausnutzung geschieht. Der Reinigungserfolg darf daher keinesfalls allein an Hand der Senkung des Druckverlustes gemessen werden. Eine sinnvolle Bewertung kann daher nur erfolgen, wenn auch die Veränderung der Sauerstoffausnutzung ermittelt und damit die Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung als Maß für den Reinigungserfolg bestimmt wird. In der Praxis wird die Sauerstoffausnutzung nur in Ausnahmefällen gemessen; daher kann der Reinigungserfolg nur durch den Vergleich des Energiebedarfs der Belüftung vor und nach der Reinigung bestimmt werden. Die Wirkung der Reinigung hält aufgrund der erneut einsetzenden Belagsbildung nur 8 bis 10 Wochen nach der Reinigung an.

Bei der manuellen Reinigung (Hochdruckbehandlung, Abbürsten) ist fest zu stellen, dass der Reinigungserfolg von der Bauart der Belüftungselemente abhängt. Zudem lassen sich Belüftungselemente mit Silikonmembranen durch Hochdruckbehandlung und Abbürsten besser reinigen als EPDM-Membranen. So ist die Hochdruckbehandlung von Plattenbelüftern mit Silikonmembran besonders erfolgreich, während sie bei EPDM-Tellerbelüftern hingegen zur Erhöhung des Energiebedarfs der Belüftung führt. Die manuelle Reinigung ist aufgrund des hohen Aufwandes nicht als regelmäßige Wartungsmaßnahme sinnvoll. Zudem besteht bei der Hochdruckbehandlung die Gefahr die Belüftungselemente zu beschädigen.

Als Alternative zur mechanischen Reinigung wurde die Eindüsung von Ameisensäure in den Luftstrom untersucht. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass sie anders als die manuelle Reinigung ohne Betriebsunterbrechung und auch automatisiert durchführbar ist. Daher eignet sich diese Methode besonders für die regelmäßige Durchführung. Die Versuchsergebnisse dieser Methode sind jedoch sehr uneinheitlich. Zwar konnte immer der Druckverlust reduziert werden, aber in etwa der Hälfte der Versuche wird die Sauerstoffausnutzung negativ beeinflusst, so dass mit der Reinigung nicht die erhoffte Senkung des Energiebedarfs eintritt. Die Ursachen dafür sind unklar. Da die Versuchsbedingungen nicht die praktischen Einsatzbedingungen bzgl. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit widerspiegeln können, sollten weitere Untersuchungen mit dem Ziel der Optimierung des Verfahrensablaufes durchgeführt werden.

Die Durchführung der Druckschlagbehandlung ergibt zunächst sinkende Druckverluste. Diese Wirkung ist aber nur auf den Effekt der Unterbrechung der Luftzufuhr zurück zu führen (vergl. Kapitel 7.4). Die Untersuchung der Belüftungselemente zeigt, dass Flüssigkeit durch die Belüftungsschlitze ins Innere des Belüftungselementes gelangt, deren getrocknete Rückstände nach Beendigung der Druckschlagbehandlung einen erheblichen Anstieg des Druckverlustes verursachen. Die Druckschlagbehandlung ist daher als Behandlungsmaßnahme für Belüftungselemente ungeeignet.

7.6 Schlussfolgerungen für den praktischen Betrieb

Für den praktischen Betrieb ist die regelmäßige Unterbrechung der Luftzufuhr zu empfehlen. Da der Druckanstieg bei 0,5 mbar/d bis 1 mbar/d liegt, ist die wöchentliche Unterbrechung der Druckluftzufuhr ausreichend. Bei intermittierendem Betrieb der Belüftung ist der Druckverlust sehr hoch. Zudem kann er nicht durch zusätzliche Belüftungspausen gesenkt werden. Aus Sicht der Belagsbildung ist der intermittierende Betrieb daher nicht sinnvoll.

Der Druckverlust der Belüftungselemente sollte regelmäßig unter vergleichbaren Betriebsbedingungen, z.B. in Anschluss an eine Belüftungspause bei gleichem Luftvolumenstrom gemessen und aus-

gewertet werden. Als indirektes Maß für die Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente sollten zusätzlich auch der Energieverbrauch der Druckluftherzeuger gemessen und falls möglich auch die Luftvolumenströme aufgezeichnet werden. Veränderungen des Luftvolumenstroms sind entweder auf eine veränderte Belastung der Abwasserreinigungsanlage oder der Abnahme der Sauerstoffausnutzung durch belegte oder beschädigte Belüftungselemente zurück zu führen. Wenn keine Messung des Luftvolumenstroms erfolgt, dann kann anhand des Druckverlustes und des Energieverbrauchs berechnet werden, ob eine Veränderung des Luftvolumenstroms stattgefunden hat [z.B. Jardin, 2004]. Die Versuche zeigen, dass mit einer Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung zwischen -10 % und +15 % zu rechnen ist. Wird das Belüftungssystem lange Zeit ohne Belüftungspausen betrieben, so dass der Druckverlust kontinuierlich ansteigt, dann ist in Extremfällen mit einem Anstieg von über 30 % zu rechnen. Hierdurch fallen beispielsweise für eine Abwasserreinigungsanlage mit 100.000 EW zusätzliche Energiekosten in Höhe von bis zu 54.000 €/a an.

7.7 Offene Fragen – Forschungsbedarf

7.7.1 Grundlagen der Druckluftbelüftung

Die Größe der an den Belüftungsschlitzten erzeugten Blasen bestimmt maßgeblich die Sauerstoffausnutzung bei der Druckluftbelüftung. Grundlegende Untersuchungen der Blasenbildung wurden bisher jedoch ausschließlich an kreisförmigen Düsen untersucht [z.B. Durst und Beer, 1969]. Obwohl der Blasenbildungsprozess eine Schlüsselstellung bei der Druckluftbelüftung in Abwasserreinigungsanlagen einnimmt, liegen keine grundlegenden Untersuchungen zum Blasenbildungsprozess an schlitzförmigen Belüftungsöffnungen vor. Von Interesse ist dabei in Bezug auf die Belagsbildung, wie sich die Veränderung der Oberflächeneigenschaften des Membranmaterials und die Bildung von Ablagerungen im Blasenablösungsbereich auf die Blasengröße auswirken. Dabei stellt sich insbesondere die Frage wie entsprechende Kennwerte ausreichend genau im relevanten Bereich sowohl im Neuzustand, als auch mit Belägen bestimmt werden können.

7.7.2 Prozess der Belagsbildung

Zum weiteren Verständnis des Vorgangs der Bildung von Belägen in den Belüftungsschlitzten sollte untersucht werden, wie und unter welchen Umständen Flüssigkeit bei der Blasenbildung in den Belüftungsschlitz hinein gelangt. Bei entsprechenden Untersuchungen ist zu klären, von welchen Parametern dieser Vorgang abhängt, und ob z.B. durch eine geeignete Geometrie (Schlitzlänge, Breite, Membrandicke, gelochte statt geschlitzte Öffnungen (andere Form der Öffnung) die Reduzierung der Belagsbildung zu erwarten ist. Wie gezeigt werden konnte, steigt der Druckverlust von Belüftungselementen mit Silikonmembranen schneller an als der von Belüftungselementen mit EPDM-Membranen. Die Ursache dafür ist unklar. Eventuell begünstigt die glattere Oberfläche der Silikonwerkstoffe das Eindringen der Beläge in die Belüftungsschlitzte. Da auch die Schlitzherstellung die Oberflächenbeschaffenheit im Belüftungsschlitz beeinflusst, können eventuell auch alternative Verfahren der Schlitzherstellung bei Silikon-Membranen zielführend sein.

7.7.3 Behandlungsmaßnahmen

Da die Eindüsung von Reinigungskemikalien wie z.B. Ameisensäure in den Luftstrom als einzige Reinigungsmaßnahme ohne Betriebsunterbrechungen durchgeführt werden kann, sollten zukünftige Untersuchungen die Optimierung dieses Verfahrens betrachten. Die Anwendung dieses Verfahrens hat bei den durchgeführten Versuchen nur einen begrenzten Reinigungserfolg erzielt. Da die Beläge in den Belüftungsschlitzten aus wasserlöslichen wie auch aus säurelöslichen Anteilen bestehen sollte ein darauf angepasstes Verfahren bessere Reinigungsergebnisse erbringen. Dabei könnten

zunächst mit der Eindüsung von entmineralisiertem Wasser die wasserlöslichen Bestandteile aus den Belüftungsschlitzen gelöst und heraus gespült werden. In einem zweiten Schritt würden dann durch die Eindüsung von Säure die verbleibenden Bestandteile entfernt und anschließend die Reaktionsprodukte wieder durch die Eindüsung von entmineralisiertem Wasser aus den Schlitzen heraus gespült.

8 Zusammenfassung

8.1 Ergebnisse des Forschungsprojektes

Da 40 bis 50 % des Energiebedarfs der kommunalen Abwasserreinigung für das Belüftungssystem aufgewendet werden [Reichert, 2001], ist ein dauerhaft effizienter Betrieb des Belüftungssystems von besonderer Bedeutung. Die Auswirkung der unter Betriebsbedingungen auftretenden Veränderungen an feinblasigen Membranbelüftungselementen, wie die Veränderung der Membranwerkstoffe und die Bildung von Belägen wurden bisher nicht umfassend untersucht. Der vorliegende Bericht befasst sich daher sowohl mit den Ursachen und Auswirkungen dieser Prozesse, als auch mit der Untersuchung von Reinigungs- und Gegenmaßnahmen und ist daher ein Beitrag zur dauerhaften Sicherung der hohen Effizienz feinblasiger Belüftungssysteme unter Betriebsbedingungen.

Im ersten Teil der Untersuchungen wurden je 18 Belüftungselemente unter praxisnahen Bedingungen in den Belebungsbecken von drei kommunalen Abwasserreinigungsanlagen betrieben. Dabei zeigt sich, dass der Druckverlust der Belüftungselemente erst nach einem schnellen Druckanstieg in den ersten 8 bis 10 Betriebswochen sein betriebliches Niveau erreicht. Im Weiteren werden die Druckverluste besonders durch die Betriebsweise der Belüftung bestimmt. Bei ununterbrochener Belüftung steigt der Druckverlust um 0,5 bis 1 mbar/d an. Dieser Druckanstieg verläuft bei Belüftungselementen mit Silikonmembranen schneller als bei Belüftungselementen mit EPDM-Membranen. Deshalb erreichen Belüftungselemente mit Silikonmembranen bei ununterbrochenem Betrieb deutlich höhere Druckverluste. Bereits bei mehrminütigen Belüftungspausen fällt der Druckverlust wieder auf minimale Werte ab. Daher ist eine entsprechende Betriebsweise zu empfehlen. Demgegenüber konnte ein positiver Effekt des Betriebs mit hohen Luftvolumenströmen („Freiblasen“) nicht beobachtet werden. Auch die intermittierende Belüftung wirkt sich nicht positiv auf die Druckverluste aus. Versuche zum Betrieb der Belüftungselemente mit einem Druckschlag, d.h. dem schlagartigen absenken des Luftdrucks durch die Öffnung der Belüftungsleitung, ergeben, dass der zunächst niedrige Druckverlust zum einen auf den Druck senkenden Effekt der Belüftungspausen zurück zu führen ist, und zum anderen durch den wiederholten Druckschlag Flüssigkeit durch die Belüftungsschlitze ins Innere des Belüftungselementes eindringt und dieses auf Dauer verstopft.

Im zweiten Teil der Untersuchungen wurden die aus den Versuchsständen entnommenen Belüftungselemente hinsichtlich ihrer abwassertechnischen Gebrauchstauglichkeit untersucht und der Einfluss der Veränderung von Sauerstoffausnutzung und Druckverlust auf den Energiebedarf der Belüftung berechnet. Der Vergleich der unter Betriebsbedingungen und unter Laborbedingungen gemessenen Druckverluste zeigt, dass sich die Belüftungselemente bei der Labormessung so verhalten wie unter Betriebsbedingungen unmittelbar nach der letzten Belüftungspause vor ihrem Ausbau aus dem Versuchsstand. Die Sauerstoffzufuhr der gebrauchten Belüftungselemente variiert gegenüber dem Ausgangszustand zwischen -8 und +12 %. Besonders die Sauerstoffausnutzung von Belüftungselementen mit Silikonmembranen kann sich verbessern. Kombiniert mit niedrigen Druckverlusten ergibt sich dadurch in einigen Fällen ein gegenüber dem Neuzustand reduzierter Energiebedarf. Insgesamt liegen die Veränderungen des Energiebedarfs zwischen -10 % und +15 %. Werden hingegen die hohen Druckverluste berücksichtigt die sich bei ununterbrochener Belüftung durch den kontinuierlichen Druckanstieg ergeben, dann ist mit einem Anstieg des Energieverbrauchs um bis zu 32 % zu rechnen. Dies entspricht bezogen auf eine Abwasserreinigungsanlage mit einer Ausbaugröße von 100.000 EW zusätzlichen Energiekosten von 54.000 €/a.

Durch eine mechanische Reinigung (Hochdruckbehandlung, Handreinigung) oder die Eindüsung von Säure in den Luftstrom kann fast immer der Druckverlust der Belüftungselemente reduziert werden. Dies geschieht aber zu Ungunsten der Sauerstoffausnutzung. Dadurch lässt sich der Energieverbrauch der Belüftung oft nicht oder kaum reduzieren. Der Reinigungserfolg oder -misserfolg

jedes Verfahrens hängt in besonderem Maße von der Bauart der Belüftungselemente ab. Während Platten- und Rohrbelüftungselemente mit gutem Erfolg gereinigt werden können, ist die Reinigung von EPDM-Tellerbelüftern erfolglos. Bei der Hochdruckbehandlung (80 bar Sprühdruk) ist die Hochdruckdüse mit rotierendem Wasserstrahl („Dreckfräse“) der konventionellen Flachstrahldüse vor zu ziehen. Der geringe Reinigungserfolg der Eindüsung von Ameisensäure wird auf ungünstige Versuchsbedingungen zurückgeführt. Da die Eindüsung von Reinigungskemikalien in den Luftstrom ein kostengünstiges und einfaches Verfahren darstellt, das zudem ohne Betriebsunterbrechungen durchgeführt werden kann, sollte die Optimierung dieses Verfahrens angestrebt werden.

Im dritten Teil der Untersuchungen wurden die an den Belüftungselementen durch den Betrieb verursachten Veränderungen untersucht. Dabei wurde die Veränderung der Membranwerkstoffe betrachtet und auch die Ablagerungen auf den Belüftungsmembranen und in den Belüftungsschlitzten untersucht. Die Haltbarkeit von EPDM-Werkstoffen ist begrenzt, da Werkstoffbestandteile aus dem Material heraus wie auch fremde Stoffe hinein diffundieren können [Edel, 2001 und von Consbruch, 2001]. Einige dem Werkstoff zugesetzte Additive können den mikrobiellen Befall des Werkstoffs begünstigen, der bis zur vollständigen Auflösung des Materials führen kann [Flemming, 1994]. Die Untersuchung der Materialhärte einiger Belüftungsmembranen zeigt, dass die Belüftungsmembranen im Betrieb aushärten. Der Gehalt extrahierbarer Substanzen nimmt ebenfalls ab. Ob dieser Materialverlust allein auf die Diffusion der Weichmacher zurück zu führen ist, oder auch weitere Werkstoffbestandteile von einem oder mehreren der o.g. Prozesse betroffen sind, ist unklar. Die Messung der vom Überdruck der Luftzufuhr verursachten Dehnung der Belüftungsmembran zeigt, dass alle EPDM-Membranen im Betrieb schrumpfen. Wenn sie nicht im Neuzustand mit ausreichendem Übermaß an den Stützkörpern angebracht werden, dann geraten sie bei fortschreitender Materialschumpfung bereits ohne Druckluftzufuhr unter Spannung, so dass sich die Belüftungsschlitzte öffnen und Flüssigkeit in die Schlitzte eindringt. Bei Rohrbelüftern verengt sich durch den schrumpfenden Werkstoff der Luftspalt zwischen dem Stützkörper und der Belüftungsmembran, so dass der Fließweg der Druckluft unterhalb der Membran blockiert wird, was an einzelnen älteren Belüftungselementen gezeigt werden konnte. Silikon gilt unter den bei der Abwasserreinigung auftretenden Bedingungen als stabiler Werkstoff. Die Messung der Membrandehnung zeigt jedoch, dass die Belüftungsmembranen aus Silikon im Betrieb plastisch gedehnt werden. Negative Auswirkungen davon waren allerdings nicht zu beobachten. Die Vermutung, dass durch die veränderte Dehnung der Belüftungsmembranen die Öffnung der Belüftungsschlitzte beeinflusst wird und sich dadurch eine Veränderung des Druckverlustes und der Sauerstoffausnutzung ergibt, ist an Hand der vorliegenden Versuchsergebnisse nicht zu bestätigen.

Die Untersuchung der gebrauchten Belüftungselemente zeigt, dass sich auf den Belüftungsmembranen ein Biofilm befindet, während in den Belüftungsschlitzten mineralische Beläge entstehen. Der Biofilm besteht auf Silikonmembranen aus drei und auf EPDM-Membranen aus vier Schichten. Die Schichten sind an Hand ihrer unterschiedlichen Färbung leicht zu unterscheiden und treten stets in der gleichen Reihenfolge auf. Die oberste Schicht wird von einer dünnen und klaren vermutlich aus EPS (extrazellulären Polymeren Substanzen) bestehenden Schicht gebildet. Darunter befindet sich eine rotbraune Schicht, deren Färbung sich aus Eisen-III-Oxid-Ablagerungen ergibt. Die nächste Schicht ist schwarz und erhält ihre Farbe durch Manganoxid-Ablagerungen. Diese schwarze Schicht liegt bei Silikonbelüftungsmembranen direkt auf der Belüftungsmembran auf. Bei EPDM-Belüftungsmembranen liegt darunter zusätzlich eine sehr dicke und helle Schicht, die aus Kalzium-, Eisen-, Mangan- und auch Zinkablagerungen besteht. Die Farbe ergibt sich zum einen durch den hohen Kalziumgehalt und zum anderen durch das Zink.

Durch den Vergleich der Zusammensetzung der bei der Druckschlagbehandlung in die Belüftungselemente eindringenden Flüssigkeit und der flüssigen Phase des belebten Schlammes konnte der zur Bildung der Beläge in den Belüftungsschlitzten führende Prozess rekonstruiert werden. Während der Belüftung gelangt vermutlich während der Blasenablösung erste Flüssigkeit aus dem belebten

Schlamm in den Belüftungsschlitz und wird dort durch den Luftstrom getrocknet. Da dieser Belag am Schlitzausgang direkten Kontakt zum belebten Schlamm hat, wird durch das hygroskopische Material Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein gesaugt, die an der Oberfläche des Belags fortwährend wieder verdunstet. Dabei bleiben alle zuvor gelösten Stoffe als Feststoffe zurück, so dass die Belagsdicke kontinuierlich anwächst. Aus diesem Ablauf des Prozesses ergibt sich, dass der Belag zunächst aus dem Trockenrückständen der flüssigen Phase des belebten Schlammes besteht. Da in Belüftungssystemen regelmäßig Wasser als Kondensat auftritt, werden wasserlösliche Bestandteile (Na, Cl, K, Sulfate) aus dem Belag heraus gelöst. Daher bleiben auf Dauer nur die wasserunlöslichen Bestandteile Kalziumkarbonat CaCO_3 und SiO_2 im Belüftungsschlitz zurück. Auch bei Belüftungspausen werden die wasserlöslichen Bestandteile des Belags gelöst, da weiterhin Flüssigkeit in den Belüftungsschlitz hinein gesaugt wird, aber nichts mehr verdunstet. Bei der Wiederaufnahme der Luftzufuhr wird die Flüssigkeit zusammen mit den gelösten Bestandteilen aus dem Belüftungsschlitz verdrängt. Durch das Ausspülen der löslichen Bestandteile nimmt daher die Dicke des Belags bei jeder Belüftungspause ab.

8.2 Schlussfolgerungen für die Praxis

Für den praktischen Betrieb ist die regelmäßige Unterbrechung der Luftzufuhr zu empfehlen. Da der Druckanstieg bei 0,5 mbar/d bis 1 mbar/d liegt, ist die wöchentliche Unterbrechung der Druckluftzufuhr ausreichend. Bei intermittierendem Betrieb der Belüftung ist der Druckverlust sehr hoch. Zudem kann er nicht durch zusätzliche Belüftungspausen gesenkt werden. Aus Sicht der Belagsbildung ist der intermittierende Betrieb daher nicht sinnvoll. Der Druckverlust der Belüftungselemente sollte regelmäßig unter vergleichbaren Betriebsbedingungen, z.B. in Anschluss an eine Belüftungspause bei gleichem Luftvolumenstrom gemessen und ausgewertet werden. Als indirektes Maß für die Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente sollten zusätzlich auch der Energieverbrauch der Druckluftherzeuger gemessen und falls möglich auch die Luftvolumenströme aufgezeichnet werden. Veränderungen des Luftvolumenstroms sind entweder auf eine veränderte Belastung der Abwasserreinigungsanlage oder der Abnahme der Sauerstoffausnutzung durch belegte oder beschädigte Belüftungselemente zurück zu führen. Wenn keine Messung des Luftvolumenstroms erfolgt, dann kann anhand des Druckverlustes und des Energieverbrauchs berechnet werden, ob eine Veränderung des Luftvolumenstroms stattgefunden hat.

8.3 Weiterer Forschungsbedarf

Die Größe der an den Belüftungsschlitzen erzeugten Blasen bestimmt maßgeblich die Sauerstoffausnutzung bei der Druckluftbelüftung. Grundlegende Untersuchungen der Blasenbildung wurden bisher jedoch ausschließlich an kreisförmigen Düsen untersucht [z.B. Durst und Beer, 1969]. Obwohl der Blasenbildungsprozess eine Schlüsselstellung bei der Druckluftbelüftung in Abwasserreinigungsanlagen einnimmt, liegen keine grundlegenden Untersuchungen zum Blasenbildungsprozess an schlitzförmigen Belüftungsöffnungen vor. Von Interesse ist dabei in Bezug auf die Belagsbildung, wie sich die Veränderung der Oberflächeneigenschaften des Membranmaterials und die Bildung von Ablagerungen im Blasenablösungsbereich auf die Blasengröße auswirken. Dabei stellt sich insbesondere die Frage wie entsprechende Kennwerte ausreichend genau im relevanten Bereich sowohl im Neuzustand, als auch mit Belägen bestimmt werden können.

Zum weiteren Verständnis des Vorgangs der Bildung von Belägen in den Belüftungsschlitzen sollte untersucht werden, wie und unter welchen Umständen Flüssigkeit bei der Blasenbildung in den Belüftungsschlitz hinein gelangt. Bei entsprechenden Untersuchungen ist zu klären, von welchen Parametern dieser Vorgang abhängt, und ob z.B. durch eine geeignete Geometrie (Schlitzlänge,

Breite, Membrandicke, gelochte statt geschlitzte Öffnungen (andere Form der Öffnung) die Reduzierung der Belagsbildung zu erwarten ist. Wie gezeigt werden konnte, steigt der Druckverlust von Belüftungselementen mit Silikonmembranen schneller an als der von Belüftungselementen mit EPDM-Membranen. Die Ursache dafür ist unklar. Es ist zu vermuten, dass die glattere Oberfläche der Silikonwerkstoffe das Eindringen der Beläge in die Belüftungsschlitzte begünstigt. Da auch die Schlitzherstellung die Oberflächenbeschaffenheit im Belüftungsschlitz beeinflusst, können eventuell auch ein alternative Verfahren der Schlitzherstellung bei Silikon-Membranen zielführend sein.

Da die Eindüsung von Reinigungschemikalien wie z.B. Ameisensäure in den Luftstrom als einzige Reinigungsmaßnahme ohne Betriebsunterbrechungen durchgeführt werden kann, sollten zukünftige Untersuchungen die Optimierung dieses Verfahrens betrachten. Die Anwendung dieses Verfahrens hat bei den durchgeführten Versuchen nur einen begrenzten Reinigungserfolg erzielt. Da die Beläge in den Belüftungsschlitzten aus wasserlöslichen wie auch aus säurelöslichen Anteilen bestehen sollte ein darauf angepasstes Verfahren bessere Reinigungsergebnisse erbringen. Dabei könnten zunächst mit der Eindüsung von entmineralisiertem Wasser die wasserlöslichen Bestandteile aus den Belüftungsschlitzten gelöst und heraus gespült werden. In einem zweiten Schritt würden dann durch die Eindüsung von Säure die verbleibenden Bestandteile entfernt und anschließend die Reaktionsprodukte wieder durch die Eindüsung von entmineralisiertem Wasser aus den Schlitzten heraus gespült.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Di- und trifunktionelle Einheiten von Siloxan und Poly(dimethyl)siloxan [Rochow, 1991]	10
Abbildung 2: Grundstrukturen des EPDM [nach Moneke, 2004].....	11
Abbildung 3: Penetrationstheorie (δ_L = Dicke der Grenzschicht, ρ_G = Sauerstoffpartialdruck)	13
Abbildung 4: Funktionsweise des Drehkolbens.....	16
Abbildung 5: Drehkolben , Verdichterstufe und vollständiges Gerät mit Schallhaube [Aerzener] .	16
Abbildung 6: Turboverdichter; ausgebautes Laufrad und vollständiges Aggregat [HV-Turbo]	17
Abbildung 7: Wirkungsgrade von Turboverdictern und Drehkolbengebläsen [nach Jacoby, 2003]	17
Abbildung 8: Kupplungsleistung von Drehkolbengebläsen und Turboverdictern.....	19
Abbildung 9: Außenseite (links) und Innenseite (rechts) im Bereich des Belüftungsschlitzes einer belegten EPDM-Membran [Wagner, 2003]	23
Abbildung 10: Bildung von Ablagerungen in den Belüftungsschlitzten [Frey, 2004].....	24
Abbildung 11: Zusammensetzung der Beläge [Wagner, 2004].....	24
Abbildung 12 betriebliche Druckverluste [nach Daten von Krampe et al., 2007] (TPU = thermoplastisches Polyurethan)	25
Abbildung 13: Druckverluste neuer und gebrauchter Belüftungselemente [nach Frey, 2005].....	26
Abbildung 14: Energiebedarf eines Belüftungssystems bei starker Belagsbildung [nach Jardin, 2004]	27
Abbildung 15: Versuchsstand A und dort eingebaute Tellerbelüfter	29
Abbildung 16: Versuchsstand B und dort eingebaute Plattenbelüfter	29
Abbildung 17: Versuchsstand C und dort eingebaute Rohrbelüfter	29
Abbildung 18: Verlauf der Sauerstoffkonzentration bei Sauerstoffzufuhrmessungen	31
Abbildung 20: Bild und Schema des Versuchsaufbaus der Sauerstoffzufuhrmessungen im Labor ...	32
Abbildung 19: Sauerstoffausnutzung und Druckverlust eines Belüftungselementes (Beispiel)	33
Abbildung 21: Hochdruckbehandlung von Rohrbelüftern; Funktion der Dreckfräse	34
Abbildung 22: Plattenbelüfter vor, während und nach der Reinigung mit der Handbürste	35
Abbildung 23 Druckschlagarmatur	35
Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Säureeindüsung.....	36
Abbildung 25: Abmessungen des Eindringkörpers und der Auflagefläche bei der Härteprüfung [DIN 53505] (links) und Fotografie der Probenahme (rechts).....	37
Abbildung 26: Messaufbau (links), Schema und Berechnungsformel der idealisierten Geometrie für Teller- und Plattenbelüfter (rechts) [Formularium, 2008]	38
Abbildung 27: neue Silikonmembran eines Plattenbelüfters mit geringer Wölbung (links) und gebrauchte Silikonmembran mit großer Wölbung (rechts) (bei gleichem Luftvolumenstrom)	39
Abbildung 28: neue Silikonmembran eines Tellerbelüfters mit geringer Wölbung (links) und gebrauchte Silikon- membran mit großer Wölbung (rechts) (bei gleichem Luftvolumenstrom)	39
Abbildung 29: Druckverluste im Neuzustand	42
Abbildung 30: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand A	44
Abbildung 31: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand B	45
Abbildung 32: Druckverluste der Belüftungselemente mit EPDM-Belüftungsmembranen am Versuchsstand C	45
Abbildung 33: beschädigter EPDM Typ II – Rohrbelüfter mit geschrumpfter Belüftungsmembran.	46
Abbildung 34: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand A	47
Abbildung 35: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand B	47

Abbildung 36: Druckverluste der Belüftungselemente mit Silikonmembranen am Versuchsstand C	48
Abbildung 37: betrieblicher Druckverlust nach dem Einbau fabrikneuer Rohrbelüfter.....	49
Abbildung 38: Druckverluste bei kontinuierlichem Betrieb und nach Unterbrechung der Luftzufuhr	50
Abbildung 39: Druckverluste der Plattenbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (EPDM 3,5 m ³ /h; Silikon 3,0 m ³ /h)	51
Abbildung 40: Druckverluste der Tellerbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (4,0 m ³ /h).....	51
Abbildung 41: Druckverluste der Rohrbelüfter bei mittlerem Luftvolumenstrom (3,0 m ³ /h)	52
Abbildung 42: Mess- und Literaturdaten – Druckverluste für mittlere Luftvolumenströme	53
Abbildung 43: Mess- und Literaturdaten – Druckverluste am Tage des höchsten Druckverlustes....	54
Abbildung 44: Veränderung der Sauerstoffausnutzung und des Druckverlustes.....	55
Abbildung 45: Druckverlust und Sauerstoffausnutzung (Labormessung) sortiert nach Versuchsstand	56
Abbildung 46: Druckverluste unter Betriebsbedingungen und bei der Labormessung	57
Abbildung 47: Anstieg des Energiebedarfs der Belüftung bei ansteigendem Druckverlust.....	58
Abbildung 48: Anstieg des Energiebedarfs bei veränderlicher Sauerstoffausnutzung	59
Abbildung 49: Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung (Basis Labormessung)	61
Abbildung 50: Veränderung des Energiebedarfs der Belüftung (Basis Labor- und Betriebsmessung)	61
Abbildung 52: Belüftungselement nach Hochdruckbehandlung mit Dreckfräse (links) und drei Stunden später (rechts).....	63
Abbildung 53: Belüftungsschlitze nach der Hochdruckbehandlung	64
Abbildung 54: Druckverlust des Silikon-Tellerbelüfters während der Druckschlagbehandlung	65
Abbildung 55: Druckverluste bei der Druckschlagbehandlung	67
Abbildung 56: Sauerstoffausnutzung und Druckverluste nach Druckschlagbehandlung und Hochdruckbehandlung	68
Abbildung 57: Ablagerungen an den Schlitzen auf der Membraninnenseite.....	69
Abbildung 58: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Plattenbelüftern.....	70
Abbildung 59: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Rohrbelüftern	71
Abbildung 60: Auswirkung der Reinigungsmaßnahmen bei Tellerbelüftern.....	72
Abbildung 61: Druckverlust vor und nach Hochdruckbehandlung	74
Abbildung 62: Dehnungsverhalten von EPDM-Belüftungsmembranen	78
Abbildung 63: Dehnungsverhalten der Silikon-Belüftungsmembranen.....	78
Abbildung 64: Beläge auf EPDM-Belüftungsmembranen und auf der Unterseite eines Stützkörpers	81
Abbildung 65: Beläge auf Silikon-Belüftungsmembranen.....	82
Abbildung 66: Zusammensetzung der Belagsschichten	84
Abbildung 67: Schema des Biofilms auf den Belüftungsmembranen	85
Abbildung 68: Mikroskopie der Beläge auf der Belüftungsmembran und in den Belüftungsschlitzen - EPDM	85
Abbildung 69: Biofilm auf der Belüftungsmembran und Beläge in den Belüftungsschlitzen - Silikon	86
Abbildung 70: Trockenrückstand des filtrierten gereinigten Abwassers, Ablagerung im Tellerbelüfter	86
Abbildung 71: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Typische Zusammensetzung einer EPDM-Mischung [Edel, 2001]	12
Tabelle 2:	Energiebedarf der Belüftung	21
Tabelle 3:	Betriebskosten der Belüftung	21
Tabelle 4:	Bau- und Umbaukosten für Druckluftbelüftungssysteme.....	22
Tabelle 5:	Kenndaten der Abwasserreinigungsanlagen an denen die Versuchsstände betrieben wurden.....	30
Tabelle 6:	Herstellerangaben zum Druckverlust, gemessene Druckverluste und Luftvolumenströme	42
Tabelle 7:	Ergebnisse der Vorversuche zur Hochdruckbehandlung.....	62
Tabelle 8:	Reinigungsempfehlung.....	73
Tabelle 9:	Veränderung der Sauerstoffausnutzung und des Druckverlustes der EPDM Typ II Rohrbelüfter im Betriebszustand und nach mechanischer Behandlung.....	75
Tabelle 10:	Shore-A Härte und extrahierbare Bestandteile	76
Tabelle 11:	Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und der Bestimmung des Glühverlustes der Belagsschichten.....	84
Tabelle 12:	Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse	87
Tabelle 13:	Annahmen zur Berechnung der Energiekosten.....	89
Tabelle 14:	Veränderung der jährlichen Energiekosten durch Belagsbildung	89
Tabelle 15:	Vergleich der Belüftungskosten bei Betrieb mit und ohne Belüftungspausen (bei Einblastiefe 5 m)	90
Tabelle 16:	Veränderung des Energiebedarfs und der Energiekosten durch Reinigung der Belüftungselemente.....	91

Symbole und Abkürzungen

DBU		Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DKI		Deutsches Kunststoff-Institut
DV	mbar	Druckverlust
DWA		Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EPDM		Ethylen-Propylen-Dien-Terpolymer
EPS		extrazelluläre polymere Substanz
EPA		Environmental Protection Agency
e.V.		eingetragener Verein
FU		Frequenzumformer
GR		Glührückstand
GV		Glühverlust
Hrsg.		Herausgeber
i.d.R.		in der Regel
PU		Polyurethan
p	mbar	Druck (1 mbar entspricht 1.000 N/m ²)
P	kW	Leistung
RFA		Röntgenfluoreszenzanalyse
SOTR	kg/h	Sauerstoffzufuhr unter Standardbedingungen, gemäß DWA-M 209
SOTE	%/m	Sauerstoffausnutzung unter Standardbedingungen, gemäß DWA-M 209
SAE	kg/kWh	Sauerstofftrag, gemäß DWA-M 209
TPU		thermoplastisches Polyurethan
v.l.n.r.		von links nach rechts

Literaturverzeichnis

AbwV (2004)

Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung), BGBl. I Nr. 28 vom 22.6.2004 S. 1108

ASCE Standard 2-06 (2005)

Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water (2005), Third Edition, American Society of Civil Engineers, 345 East 47th Street, New York, N.Y. 10017-2399, USA, 2007

ASCE Standard 18-96 (1997)

Standard Guidelines for In-Process Oxygen Transfer Testing (1997):
American Society of Civil Engineers, 345 East 47th Street, New York, N.Y. 10017-2399, USA

ASTM D 624-98 (1998)

Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers, American Society for Testing and Materials (ASTM), New York, April 1998

ATV-Handbuch (1997)

Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Auflage, Abwassertechnische Vereinigung, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Bischof, F. (1994)

Untersuchung der Blasenbildung und des Stoffaustausches unter dem Einfluß oberflächenaktiver Substanzen und gelöster Gase, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg

Bohn, T. (1997)

Aktuelle Betriebskosten von Abwasserreinigungsanlagen mit weitergehender Reinigung. in: Schriftenreihe WAR, Band 102, 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserreinigungsanlagen, 6.11.97, Darmstadt

Bohn, T. (1998)

Einflussfaktoren der Betriebskosten bei der weitergehenden Abwasserreinigung. in: Schriftenreihe WAR, Band 108, 9. Gemeinsames Seminar-Abwassertechnik: Einsparungen von Kosten, Betriebsmittel, Energie und Personal auf Abwasserreinigungsanlagen, 16./17.9.1998, Weimar

Bretscher, U., Hager, W.H. (1983)

Die Reinigung von Abwasserbelüftern, gwf - Wasser, Abwasser, 124. Jahrgang, Heft 6, Oldenbourg-Verlag, München

von Consbruch, H.-Chr. (2001)

Belagsbildung auf Belüfterelementen - Probleme und Lösungsmöglichkeiten, 2. Hannoversche Belüfbertagung, 17. Mai 2001, Hannover

DIN 1301 - Teil 1 (1993)

Einheiten - Einheitennamen, Einheitenzeichen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 1993

DIN 1301 - Teil 2 (1978)

Einheiten - Allgemein angewendete Teile und Vielfache, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 1978

DIN 1301 - Teil 3 (1979)

Einheiten - Umrechnungen für nicht mehr anzuwendende Einheiten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 1979

DIN 1304 - Teil 1 (1994)

Formelzeichen - Allgemeine Formelzeichen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1994

DIN 1343 (1990)

Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen - Begriffe und Werte, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1990

DIN 4045 (2003)

Abwassertechnik - Grundbegriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2003

DIN 38414 Teil 3 (1985)

Abwassertechnik, Grundbegriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin November 1985

DIN 53504 (1994)

Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1994

DIN 53505 (2000)

Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Härteprüfung nach Shore-A und D, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2000

DIN 53 455

Prüfung von Kunststoffen - Zugversuch, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin

DIN ISO 48 (2003)

Elastomere und thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Härte (Härte zwischen 10 IRHD und 100 IRHD), Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2003

DIN EN 12255-15 (2003)

Kläranlagen – Teil 15: Messung der Sauerstoffzufuhr in Reinwasser und Belüftungsbecken von Belebungsanlagen, April 2004

DIN 19569-3 (2002)

Kläranlagen - Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen, Teil 3: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zur aeroben biologischen Abwasserreinigung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2002

dtv-Atlas (1987a)

dtv-Atlas zur Chemie, Hans Breuer, Band I, Allgemeine und anorganische Chemie, 4. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag, München

dtv-Atlas (1987b)

dtv-Atlas zur Chemie, Hans Breuer, Band II, Organische Chemie und Kunststoffe, 3. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag, München

Doppler, R. (2004)

Belagsbildung auf Membranbelüftern und Maßnahmen zur Druckreduzierung, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

DKI (2004)

Untersuchungsbericht zur Bestimmung des Gehaltes an Weichmachern von Belüftungselementen für Kläranlagen, Deutsches Kunststoff-Institut, Darmstadt, 26.3.2004

Durst, F., Beer, H. (1969)

Blasenbildung an Düsen bei Gasdispersion in Flüssigkeiten, Chemie-Ingenieur-Technik, 41. Jahrgang, Nr. 18, Wiley VCH, Weinheim

DWA (2006)

Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen 2006, DWA-Arbeitsgruppe BIZ-1.1 „Kläranlagen-Nachbarschaften“, Download vom 17.10.08 unter www.dwa-st.de/nb/kan/leistungen/auswertung.htm

DWA (2007)

Merkblatt M 209, Messung der Sauerstoffzufuhr von Belüftungseinrichtungen in Belebungsanlagen in Reinwasser und in belebtem Schlamm, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef, April 2007

Edel, V. (2001)

Elastomer-Belüftungsmembranen in der Belüftungstechnik - Materialien und Prüfmethode, 2. Hannoversche Belüfzertagung, 17. Mai 2001, Hannover

EPA (1989)

Fine Pore Aeration Systems, Design Manual, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Center for Environmental Research Information, Risk reduction Engineering Laboratory, Cincinnati; OH 45268, EPA/625/1-89/023

EPA (1999)

Wastewater Technology Fact Sheet - Fine Bubble Aeration, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, EPA 823-F-625-99-065, September 1999

F&B Chemie (2008)

Homepage der Firma F&B Chemie GmbH, <http://www.fundb-chemie.com/shop/>, Suchbegriff „Ameisensäure“, abgerufen am 13.11.2008

Fischer-Reinhard, M. (2007)

Mikrobieller Abbau von Siliconölen, Siloxanen und Silanolen?, Dissertation, Fachbereich Biologie, Technische Universität Darmstadt

Flemming, H.-C. (1994)

Biofilme, Biofouling und mikrobielle Schädigung von Werkstoffen, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 129, Habilitationsschrift, Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft e.V., Stuttgart

Flemming, H.-C., Wingender, J. (2001)

Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs)-Part II: Technical Aspects, Water Science Technology, Volume 43, No. 6, IWA Publishing

Formularium (2008)

FORMULARIUM - Formulas for a Calculating World, www.formularium.org, Suchbegriff „Kreissegment“, abgerufen am 24.10.2008

Frank, A., Biederbick, K. (1990)

Kunststoff-Kompendium: Aufbau, Polymerisation, Verarbeitung, Eigenschaften, Anwendung der Thermoplaste, Elastomere, Duroplaste, Polymerlegierungen, 3. Auflage, Vogel-Verlag, Würzburg

Frey, W., Thonhauser, C. (2003)

Betriebsprobleme mit Druckluftbelüftungssystemen, Wiener Mitteilungen, Band 183

Frey, W. (2004)

Druckanstieg bei Belüftungssystemen – neue Erkenntnisse, KAN, Folge 12, 2004

Frey, W. (2004)

Reinigung von Belüftermembranen, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Frey, W. (2005)

Druckanstieg bei Belüftungssystemen: Ergebnisse weiterführender Untersuchungen, KAN

Frey, W. (2006)

Einflüsse auf die Veränderung des Betriebsverhaltens von Membranbelüftern, in: Belüftung von Belebungsbecken, Tagungsordner des Abschlussseminars zum DBU-Projekt "Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken", 8. Mai 2006, Osnabrück

Frey, W., Thonhauser, C. (2004)

Clogging and cleaning of fine-pore membrane diffusers in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 69-77

Grassman, P. (1983)

Physikalische Grundlagen der Verfahrenstechnik, 3. Auflage, Verlag Sauerländer AG, Aarau

Gujer, W. (2007)

Siedlungswasserwirtschaft, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin

Hoessle, von, R. (2004)

Mikrobiologische Aspekte der Belagsbildung, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Institut Fresenius (2008)

Bericht über die Durchführung von Röntgenfluoreszenzanalysen vom 9.1.2008, SGS Institut Fresenius GmbH, Taunusstein

Jacoby, K. (2003)

Wirtschaftlicher Betrieb von Turboverdichtern, in: Hellmann, D.-H., Riegler, G., (2003); Maschinentechnik in der Abwasserreinigung; Verfahren und Ausrüstung, Wiley-VCH Verlag, Weinheim

Janda, R. (1990)

Kunststoff Verbundsysteme - Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung, VCH, Weinheim

Jardin, N., Overfeld, H. (2003)

Belagsbildung auf Belüfterelementen am Beispiel der Kläranlage Nordwalde, Abwasserreport Ausgabe 2/2003, Abwasserberatung NRW e.V., Düsseldorf

Jardin, N. (2004)

Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserreinigungsanlagen, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Kärcher (2007)

Homepage der Alfred Kärcher GmbH & Co. KG, www.karcher.com, abgerufen am 11.10.2007

Klos, J. (2007)

persönliche Mitteilung

Krampe, J. (2006)

Vergleich verschiedener Druckluftbelüftungssysteme unter Betriebsbedingungen in kommunalen Kläranlagen, in: Betriebsoptimierung von Kläranlagen, 81. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium am 12.10.2006, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 186, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart

Krampe, J., Kaebert, S. (2006)

Stand der Belüftungstechnik in Baden-Württemberg, Lehrer- und Obmannatagung 2006, DWA Landesverband Baden-Württemberg

Krampe, J., Kaebert, S., Cifre Manganar, L. (2007)

Vergleich verschiedener Druckluftbelüftungssysteme unter Betriebsbedingungen in kommunalen Kläranlagen und Stand der Belüftungstechnik in Baden-Württemberg, Schlussbericht für das Umweltministerium Baden-Württemberg, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserrecycling, Universität Stuttgart

Liepe, Friedrich et al. (1988)

Verfahrenstechnische Berechnungsmethoden: Teil 4, Stoffvereinigen in fluiden Phasen, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, ISBN 3-527-26 205-9

Lehr- und Handbuch der Wasserversorgung (1993)

Wasserchemie für Ingenieure, Bd. 5, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW), R. Oldenbourg Verlag, München

LfU (1998)

Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen, Handbuch Wasser 4, Band 13,, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU), Karlsruhe

Metcalf & Eddy (2004)

Wastewater Engineering, Treatment and Reuse, 4th Edition, International Edition, McGraw-Hill, New York

Moneke, M. (2004)

Zusammensetzung und physikalische Eigenschaften von EPDM-, PU- und Silikonmembranen, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

MURL (1999)

Handbuch „Energie in Kläranlagen“, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (MURL), September 2007, Düsseldorf

Mutschmann, J., Stimmelmayer, F. (1991)

Taschenbuch der Wasserversorgung, 10. Auflage, Franckh-Kosmos-Verlags GmbH, Stuttgart

Nestmann, F. (1994)

Sauerstoffeintrag durch Blasen und Entwicklung eines mechanischen Belüftungsverfahrens, Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Karlsruhe

Pöpel, H.-J. (1984)

Entwicklungstendenzen beim Belebungsverfahren, Wasser und Boden, Nr. 5, S. 206-213

Reichert, J. (2001)

Betriebskosteneinsparungen bei Belüftungssystemen – Praxisbeispiele, Schriftenreihe WAR, Band 134, 64. Darmstädter Seminar - Abwassertechnik: Neues zur Belüftungstechnik, 15.11.01, Darmstadt

Reinhardt, M. (2001)

Möglichkeiten zur Energieoptimierung auf Kläranlagen, Erfahrungsbericht KA Langenhagen, in: 2. Hannoversche Belüfertextagung; Druckluftbelüftung - Neue Herausforderungen am 17.5.2001, Hannover

Rochow, E. G. (1991)

Silicium und Silicone - über steinzeitliche Werkzeuge, antike Töpfereien, moderne Keramik, Computer, Werkstoffe für die Raumfahrt, und wie es dazu kam, Springer Verlag, Berlin 1991

Röthmeyer, F., Sommer, F. (2001)

Kautschuktechnologie; Werkstoffe – Verarbeitung - Produkte, Carl Hanser-Verlag, München, ISBN 3-446-16169-4

Sander, T. (2003)

Ökonomie der Abwasserreinigung - Wirtschaftlicher Betrieb von kommunalen Abwasseranlagen, Springer Verlag, Berlin, ISBN 3-540-00675-3

Siemes, W. (1954)

Gasblasen in Flüssigkeiten - Teil I: Entstehung von Gasblasen an nach oben gerichteten kreisförmigen Düsen, Chemie-Ingenieur-Technik, 26. Jahrgang, Nr. 8/9, Wiley VCH, Weinheim

Siemes, W., Günther, K. (1956)

Gasdispersion in Flüssigkeiten durch Düsen bei hohen Durchsätzen, Chemie-Ingenieur-Technik, 28. Jahrgang, Nr. 6, Wiley VCH, Weinheim

Steinmetz, H. (1996)

Einfluss von Abwasserinhaltsstoffen, Stoffwechselprozessen und Betriebsparameter von Belebungsanlagen auf den Sauerstoffeintrag in Abwasser-Belebtschlamm-Gemische, Schriftenreihe des Fachgebiets Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, Heft 9

Steinmetz, H. (2006)

Potenzial und Bedarf zur Optimierung von Belebungsanlagen, in: Betriebsoptimierung von Kläranlagen, 81. Siedlungswasserwirtschaftliches Kolloquium am 12.10.2006, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Band 186, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Universität Stuttgart

Thiele, K. (2003)

Wirtschaftlicher Betrieb von Drehkolbengebläsen, in: Hellmann, D.-H., Riegler, D., (2003); Maschinentechnik in der Abwasserreinigung; Verfahren und Ausrüstung, Wiley-VCH Verlag, Weinheim

Wacker (2008)

Die Verarbeitung von Elastosil® LR Flüssigsilikonkautschuk, Homepage der Wacker Chemie AG abgerufen am 1.1.2009 unter http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/5911_DE.pdf

Wagner, M. (1997)

Sauerstoffeintrag und Sauerstofftrag von Belüftungssystemen und deren Bestimmung mit modernen Meßmethoden. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-Schriftenreihe, Band 100

Wagner, M. (2002)

Belüftungstechnik, in: Maschinentechnik in der Abwasserreinigung – Verfahren und Ausrüstung, Wiley-VCH Verlag, Weinheim

Wagner, J. (2002a)

Optimierung von Druckluftbelüftungssystemen in der Abwasserbehandlung, Dissertation, Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Band 122

Wagner, M., R. von Hoessle (2003a)

Biological Coating of EPDM-Membranes of Fine Bubble Diffusers, in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 79-85

Wagner, M., v. Hoessle, R. (2003b)

Biological Coating of Fine Bubble Diffusers with EPDM-Membranes, In: Proceedings of the 76th Annual Technical Conference WEFTEC 2003, 11.10-15.10.2003, Los Angeles, USA

Wagner, M. (2004)

Probleme mit Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen – eine Übersicht, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Belüftungsmembranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Wagner, M., v. Hoessle, R. (2004)

Biological coating of EPDM-membranes of fine bubble diffusers, Water Science Technology, Vol. 50 No. 7, IWA Publishing, 2004

Wagner, M., Looock, P. (2005b)

Sauerstoffzufuhr in Abwasserreinigungsanlagen - Leistungsfähigkeit von Belüftungssystemen in: Pöpel, F. (Hrsg.): Abwassertechnik und Gewässerschutz, 17. Aktualisierung, C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 2005, ISBN 3-8114-7000-0

Wagner, M.; Looock, P., (2006)

Belagsbildung auf Membrandruckbelüftungselementen in Abwasserreinigungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung, in: Belüftung von Belebungsbecken, Tagungsordner des Abschlussseminars zum DBU-Projekt "Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken", 8. Mai 2006, Osnabrück

Westphal, G. (1995)

Leistungseintrag in Belebungsbecken – Eine Grundlegende Darstellung, Korrespondenz Abwasser, Jahrgang 42, Ausgabe 8/1995, S. 1353-1358

Aus dem Projekt hervorgegangene Veröffentlichungen

Wagner, M.; von Hoessle, R.; Loock, P., (2005)

Newest developments concerning the biological coating of membranes of fine bubble diffusers
IWA Specialized Conference - Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, 19.-21. September 2005, Krakow, PL

Wagner, M.; Loock, P., (2006)

Belagsbildung auf Membrandruckbelüftungselementen in Abwasserreinigungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung, in: Belüftung von Belebungsbecken, Tagungsordner des Abschlussseminars zum DBU-Projekt "Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken", 8. Mai 2006, Osnabrück

Wagner, M.; Loock, P., (2006)

Betriebskosteneinsparung durch Optimierung von Belüftungseinrichtungen, in: 78. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, „Neue Maschinen und verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Einsparung von Betriebskosten bei der Abwasserbehandlung“, 2. November 2006, Verein zur Förderung des Institutes WAR der Technischen Universität Darmstadt, WAR-Band 176

Wagner, M., Loock, P., Güntel, T., (2007)

Design and Operational Aspects of Modern Fine Bubble Aeration Systems, 10th IWA Specialised Conference: Design, Operation and Economics of Large Wastewater Treatment Plants, 9-13 September 2007, Vienna, Austria

Wagner, M.; Loock, P., (2007)

Biological Coating of Membranes of Fine Bubble Diffusers: Impacts and Countermeasures, 80th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference (WEFTEC), October 13-17th 2007, San Diego, USA

Anhang Teil A - Tabellen und Diagramme

- A-I Verlauf der betrieblichen Druckverluste sortiert nach Membranmaterial
- A-II Gegenüberstellung der betrieblichen Druckverluste (mbar) und des Druckanstiegs (mbar/d) an Versuchsstand C mit Betriebsdaten der Abwasserreinigungsanlage
- A-III Diagramme der Sauerstoffausnutzung
- A-IV Druckverluste und Sauerstoffausnutzung (Technikumsmessung) sortiert nach Versuchsstand
- A-V Ergebnisse der Reinigungsmaßnahmen sortiert nach Maßnahme
- A-VI Ergebnisse der Dehnungsmessungen

Anhang Teil B - Originaltexte der Veröffentlichungen (Eigener Band)

Anhang A-I Druckverläufe nach Membranmaterial

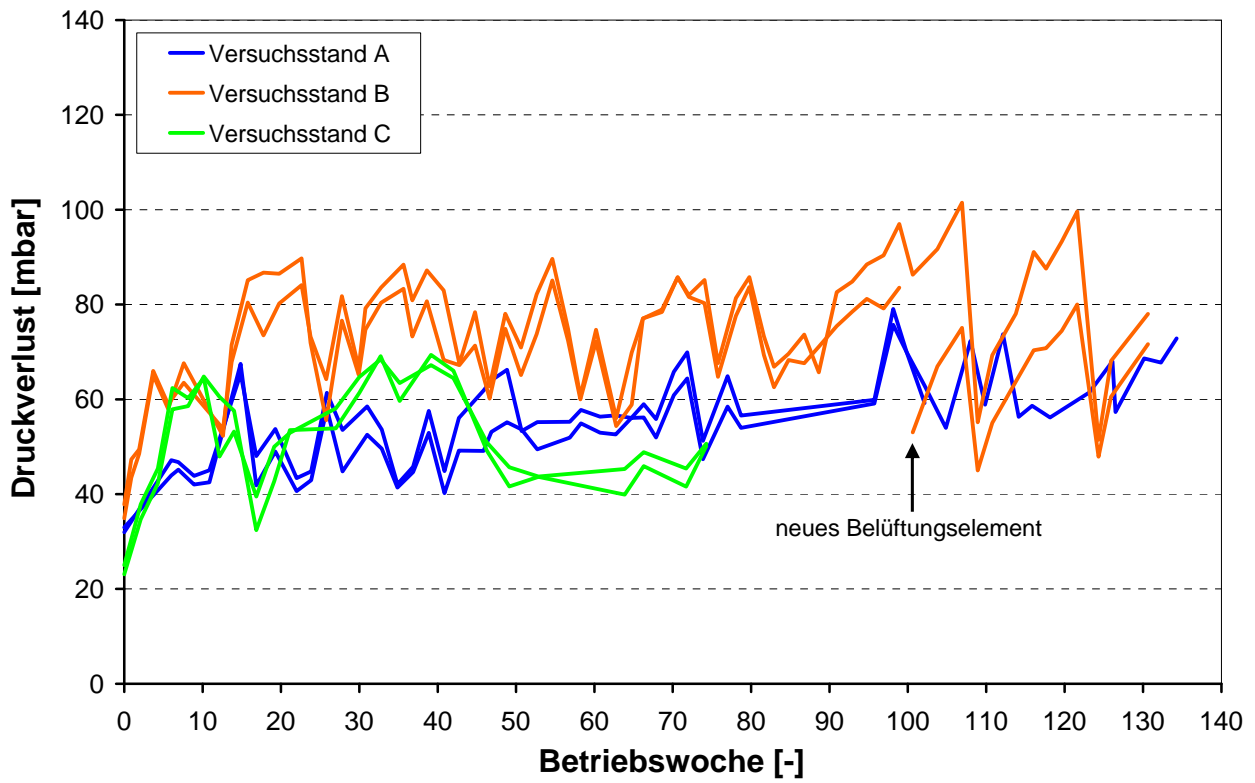


Abbildung 1: Plattenbelüftungselemente - EPDM

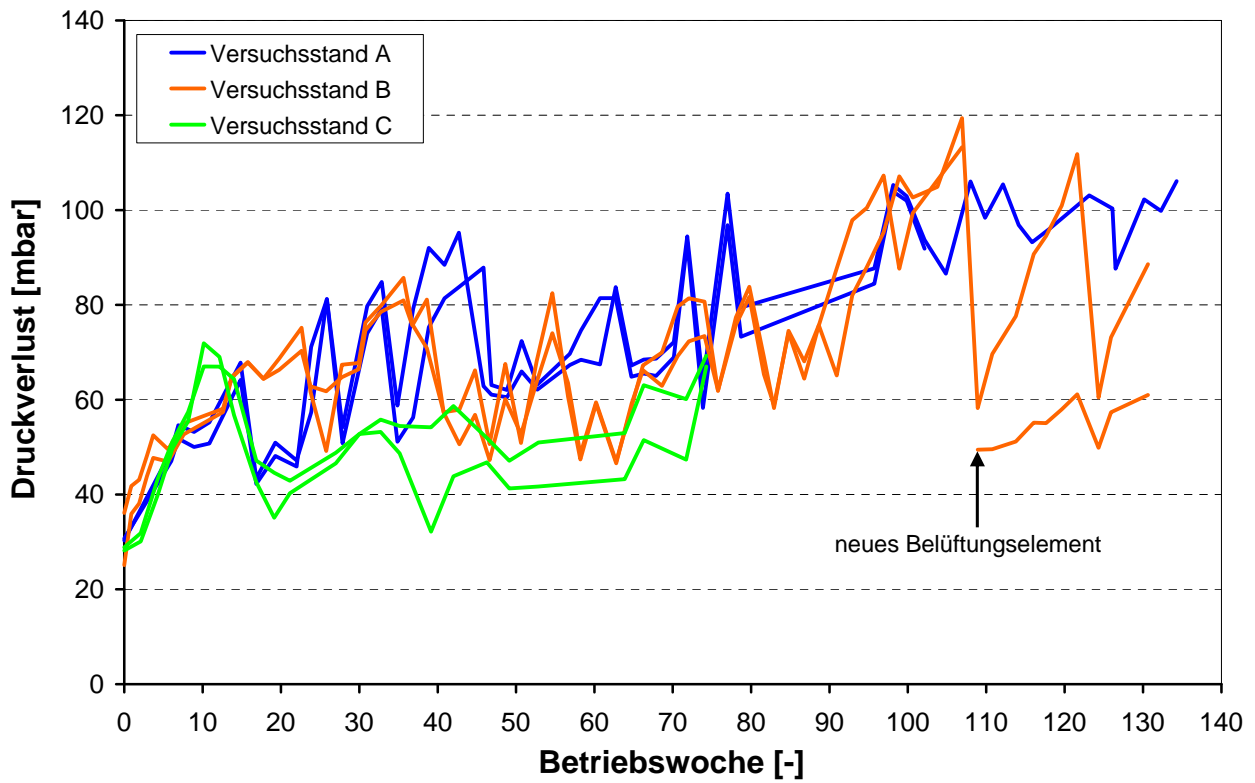


Abbildung 2: Plattenbelüftungselemente - Silikon

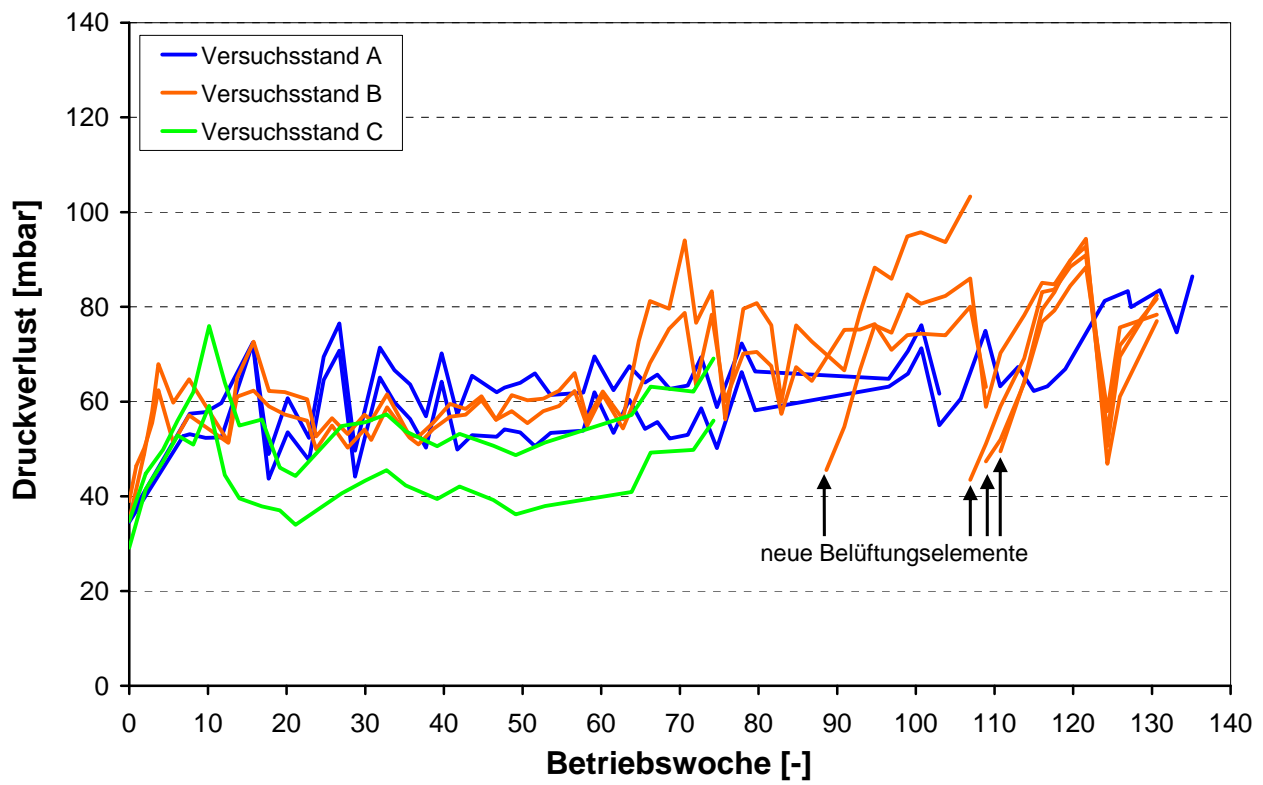


Abbildung 3: Rohrbelüftungselemente - EPDM Typ I

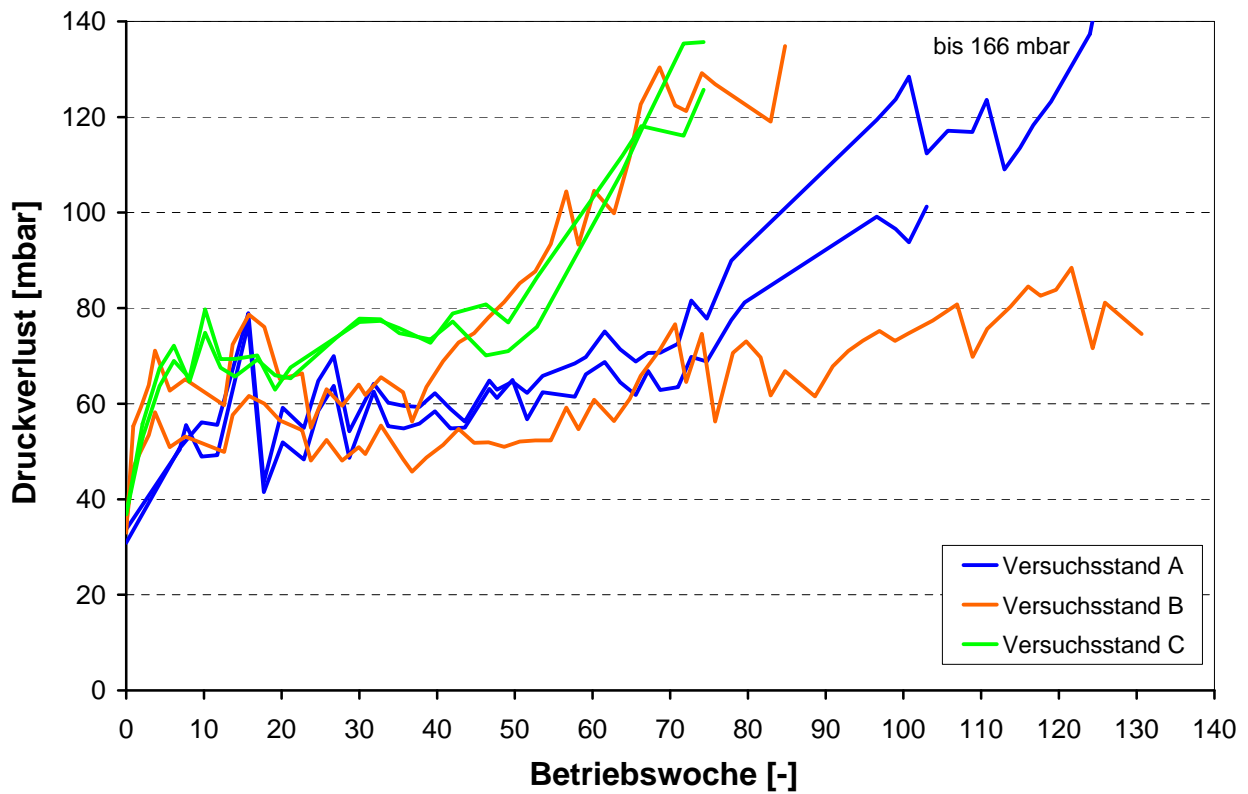


Abbildung 4: Rohrbelüftungselemente - EPDM Typ II

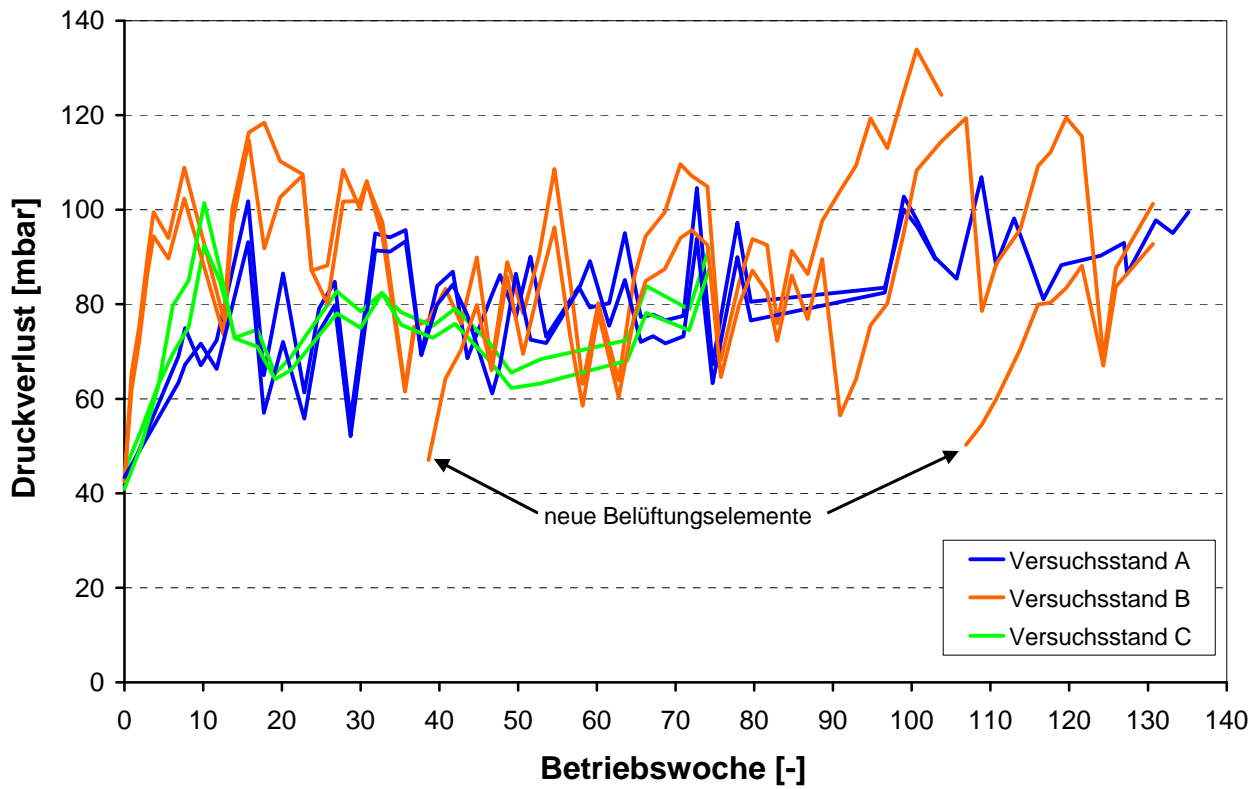


Abbildung 5: Rohrbelüftungselemente - Silikon Typ I

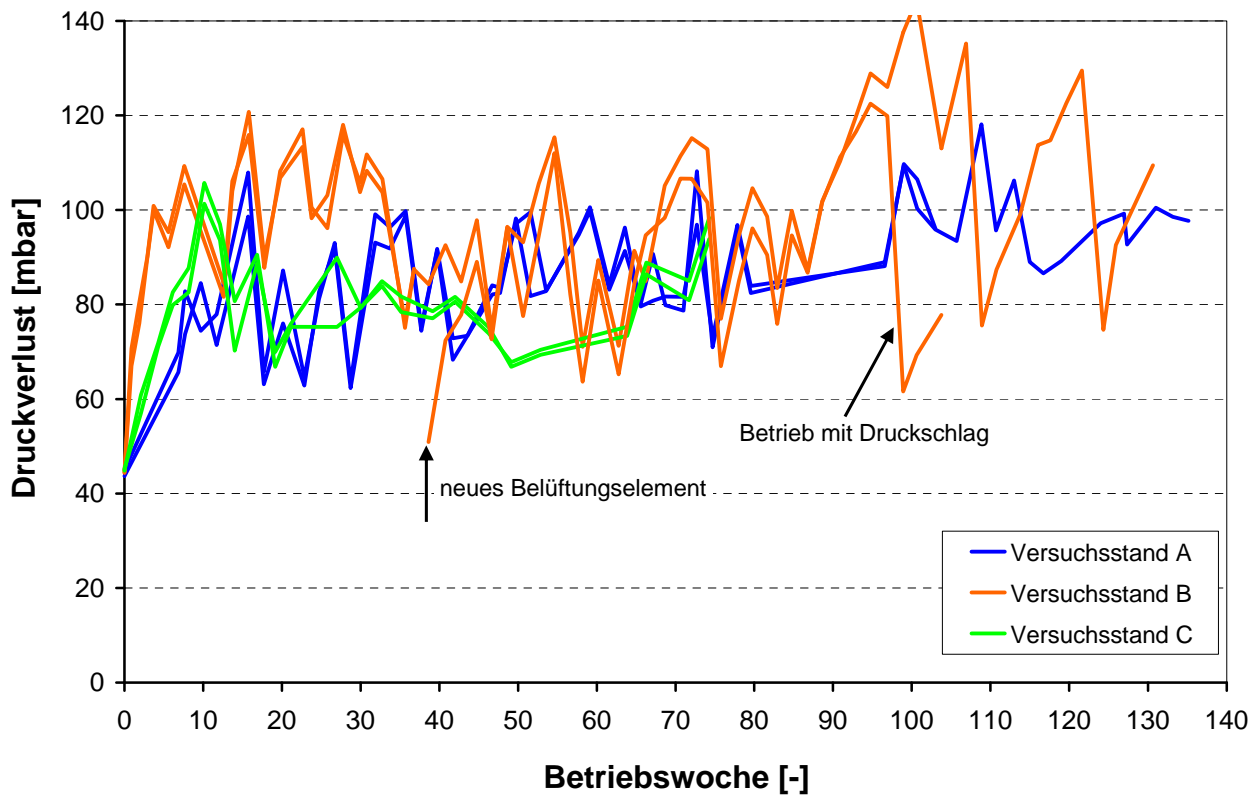


Abbildung 6: Rohrbelüftungselemente - Silikon Typ II

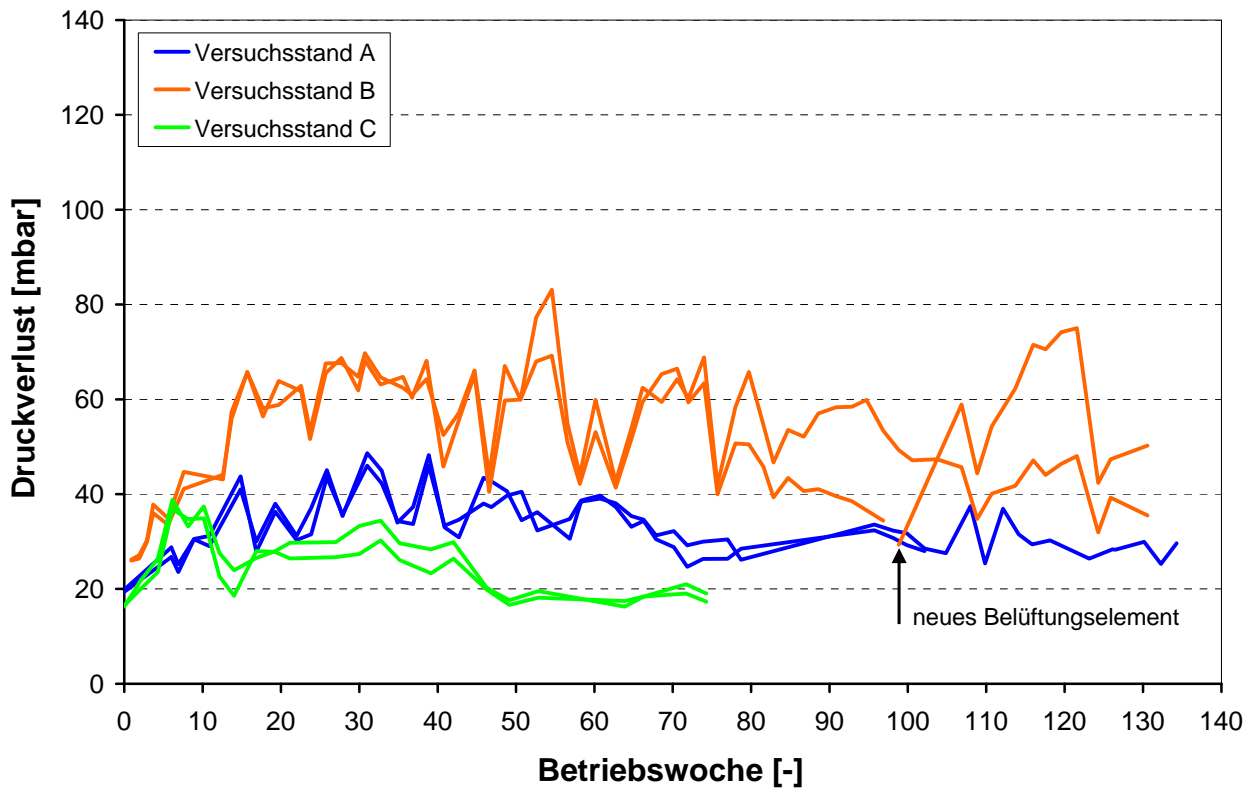


Abbildung 7: Tellerbelüftungselemente - EPDM Typ I

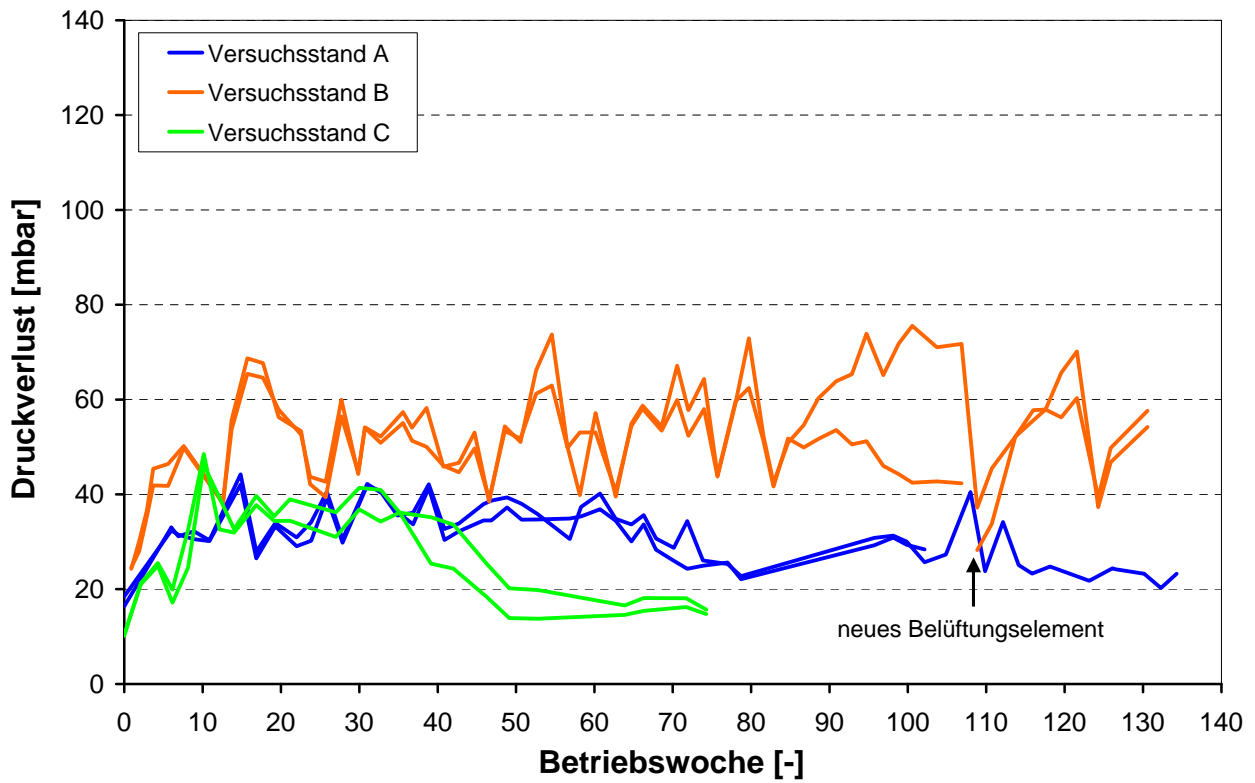


Abbildung 8: Tellerbelüftungselemente - EPDM Typ II

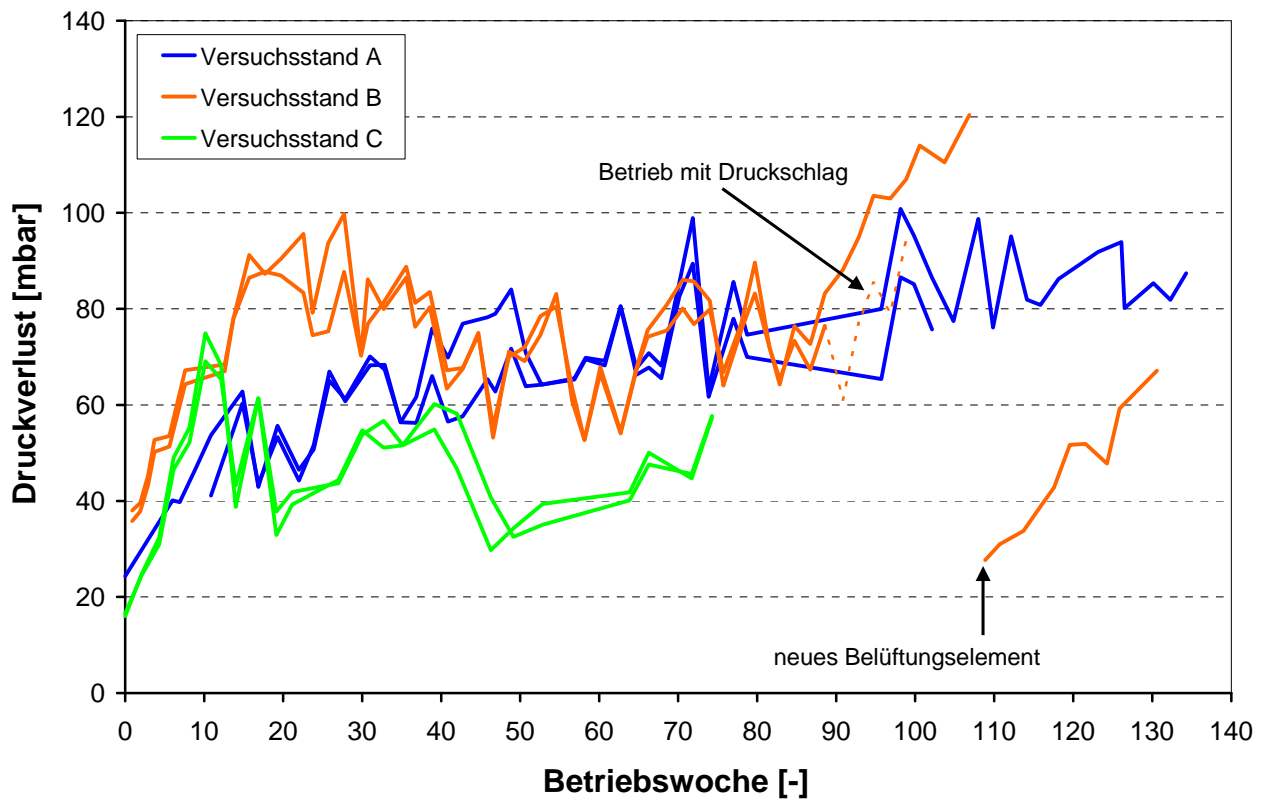


Abbildung 9: Tellerbelüftungselemente - Silikon

Anhang A-II Gegenüberstellung der Druckverluste (mbar) und des Druckanstiegs (mbar/d) an Versuchsstand C mit den Betriebsdaten der Abwasserbehandlungsanlage

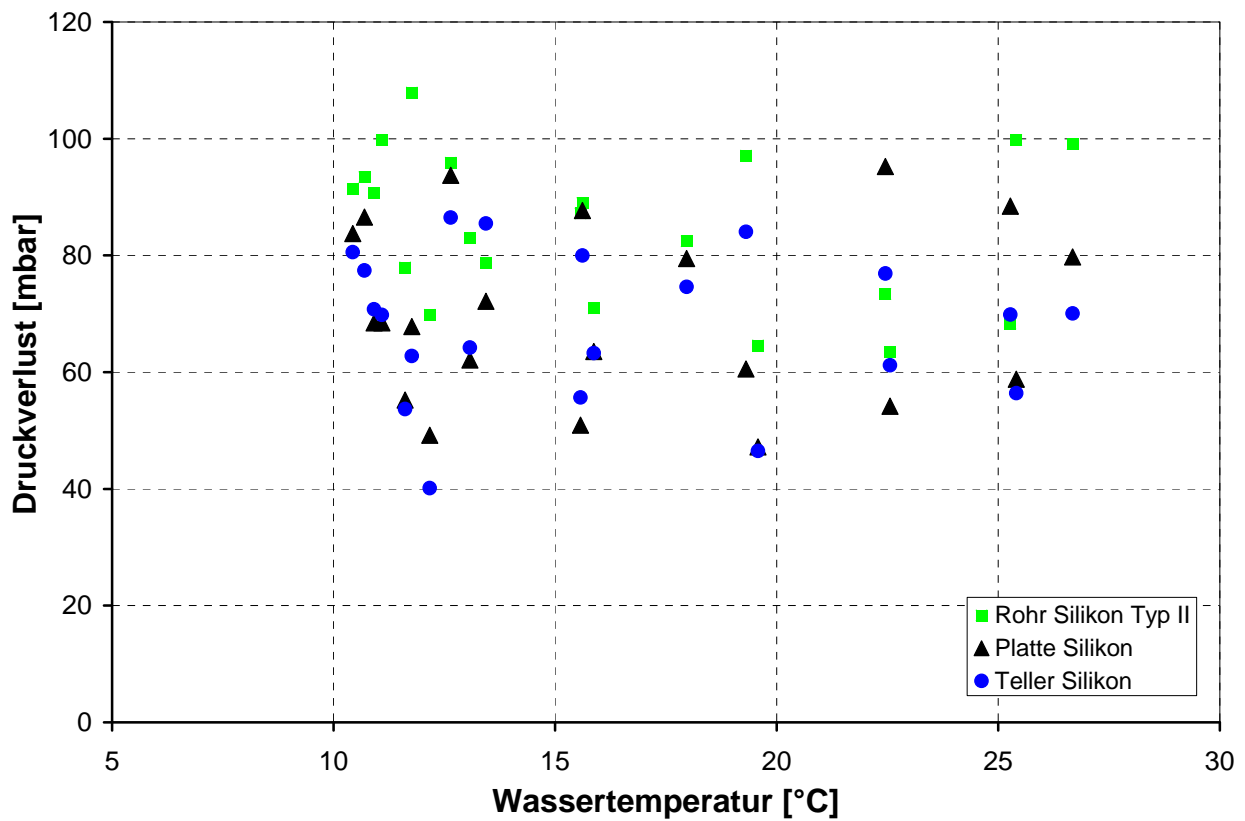


Abbildung 3: Druckverlust und Wassertemperatur

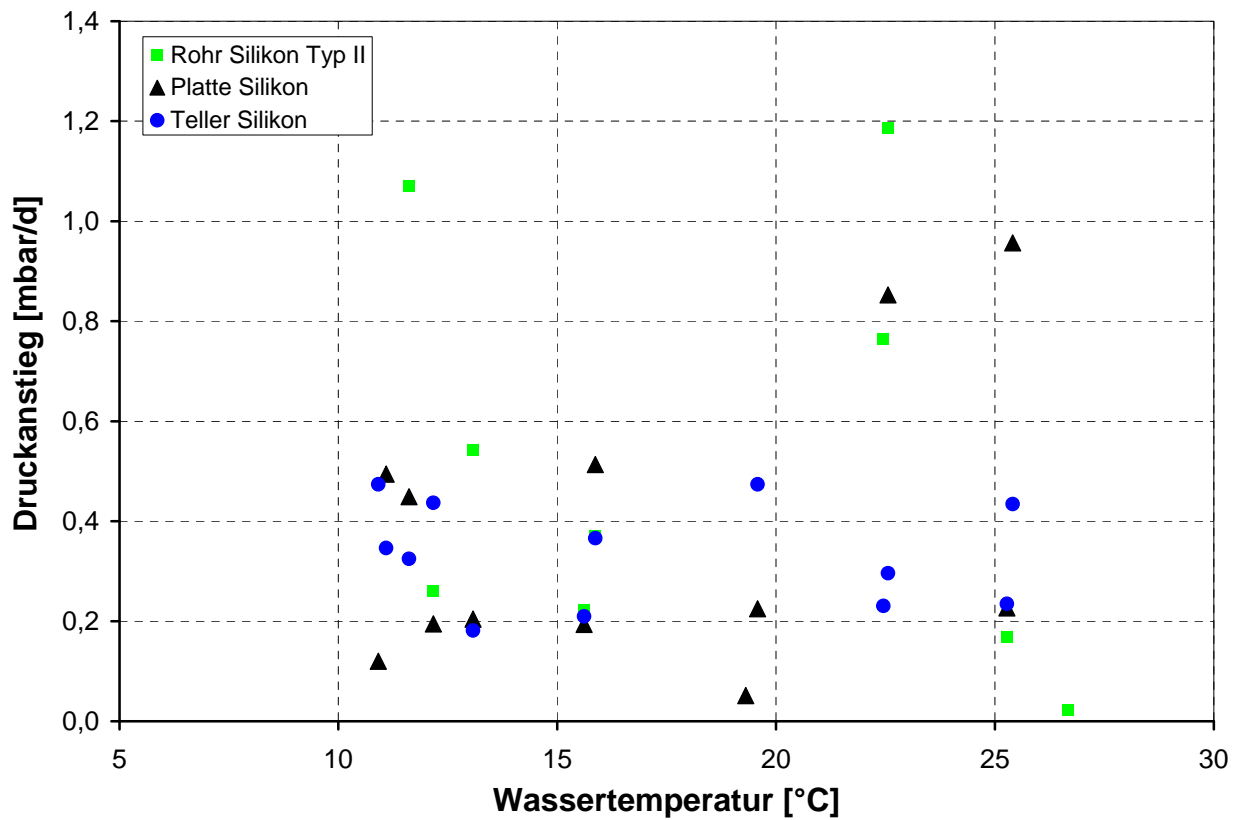


Abbildung 4: Druckanstieg und Wassertemperatur

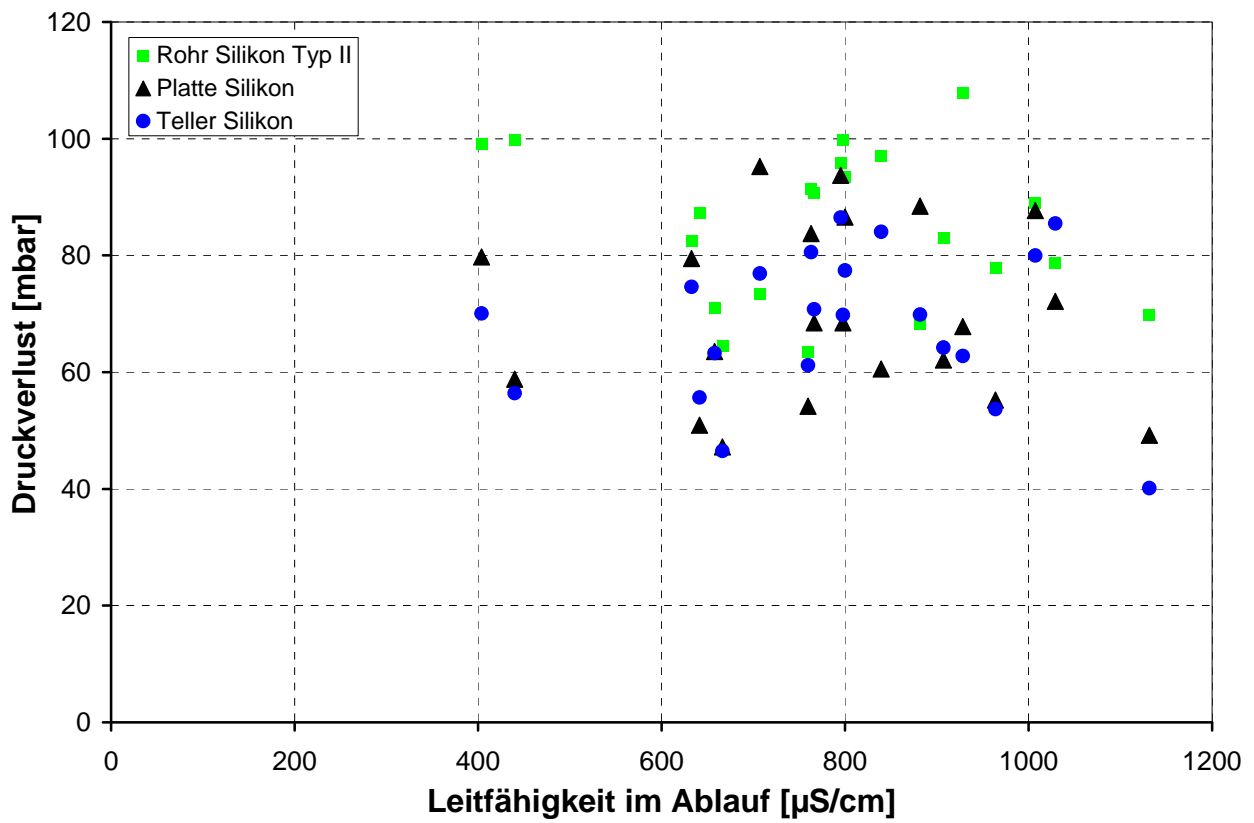


Abbildung 5: Druckverlust und Leitfähigkeit

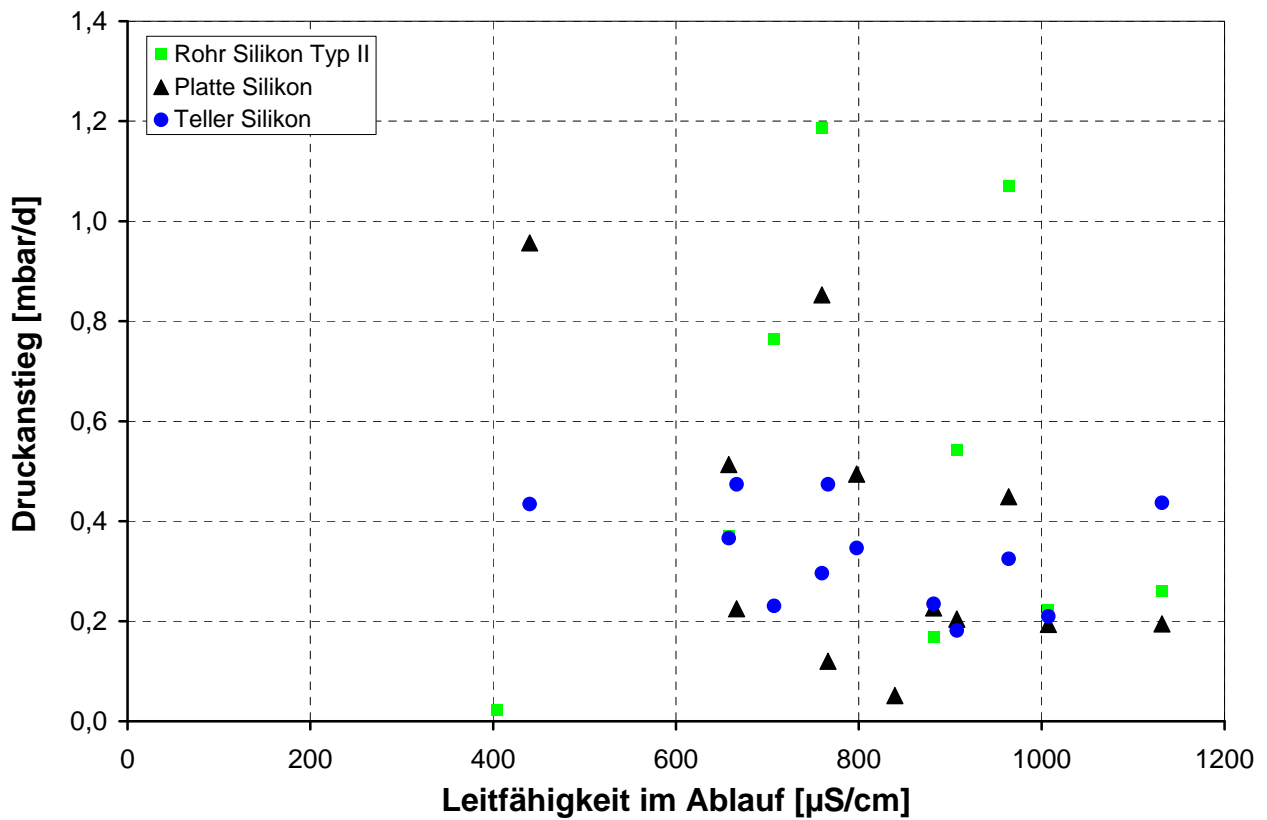


Abbildung 6: Druckanstieg und Leitfähigkeit

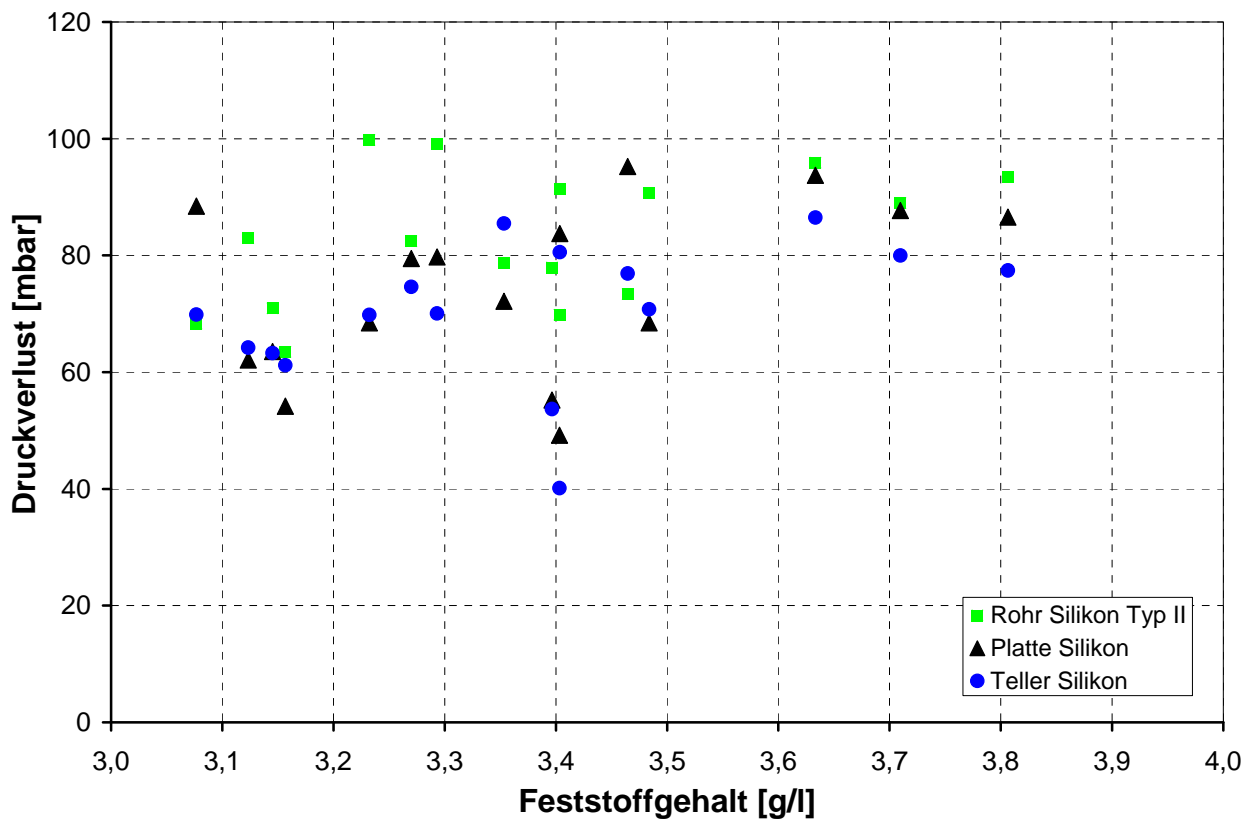


Abbildung 7: Druckverlust und Feststoffgehalt im Belebungsbecken

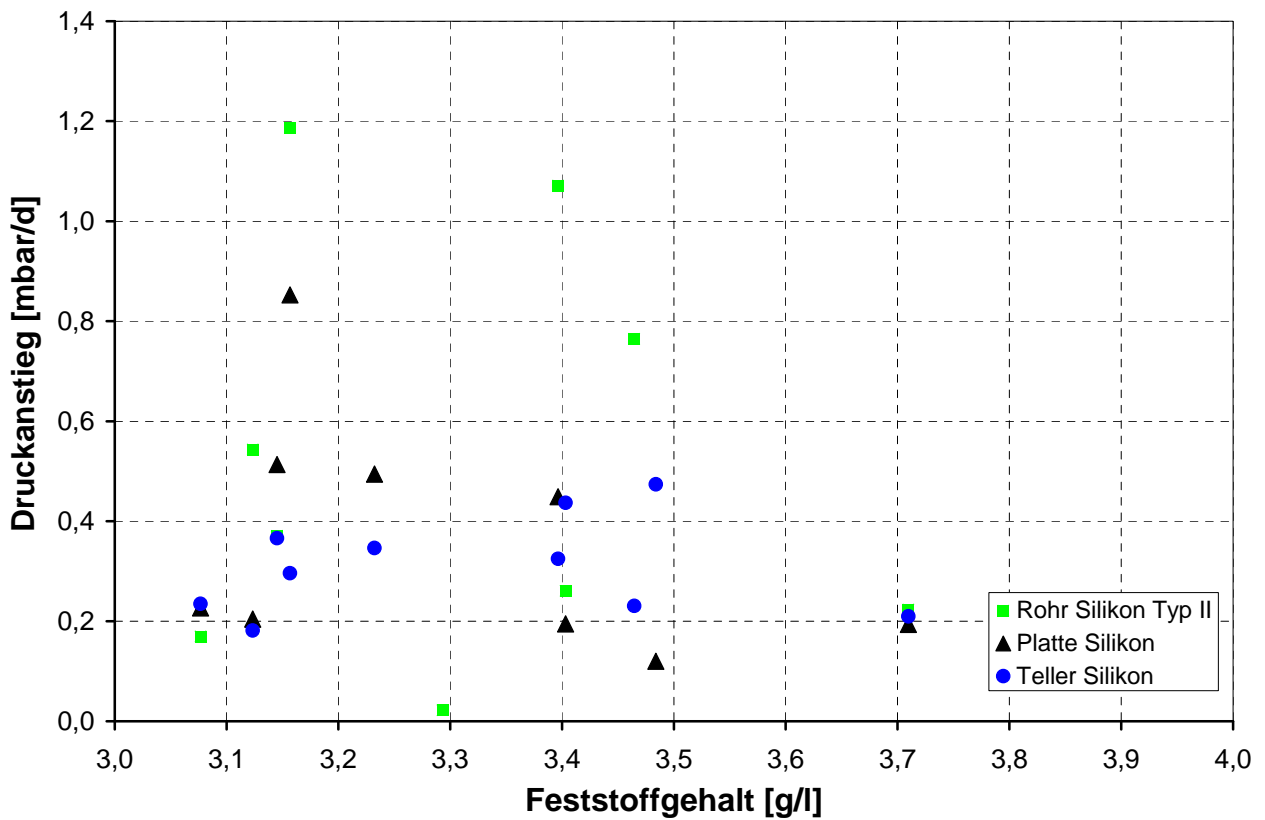


Abbildung 8: Druckanstieg und Feststoffgehalt im Belebungsbecken

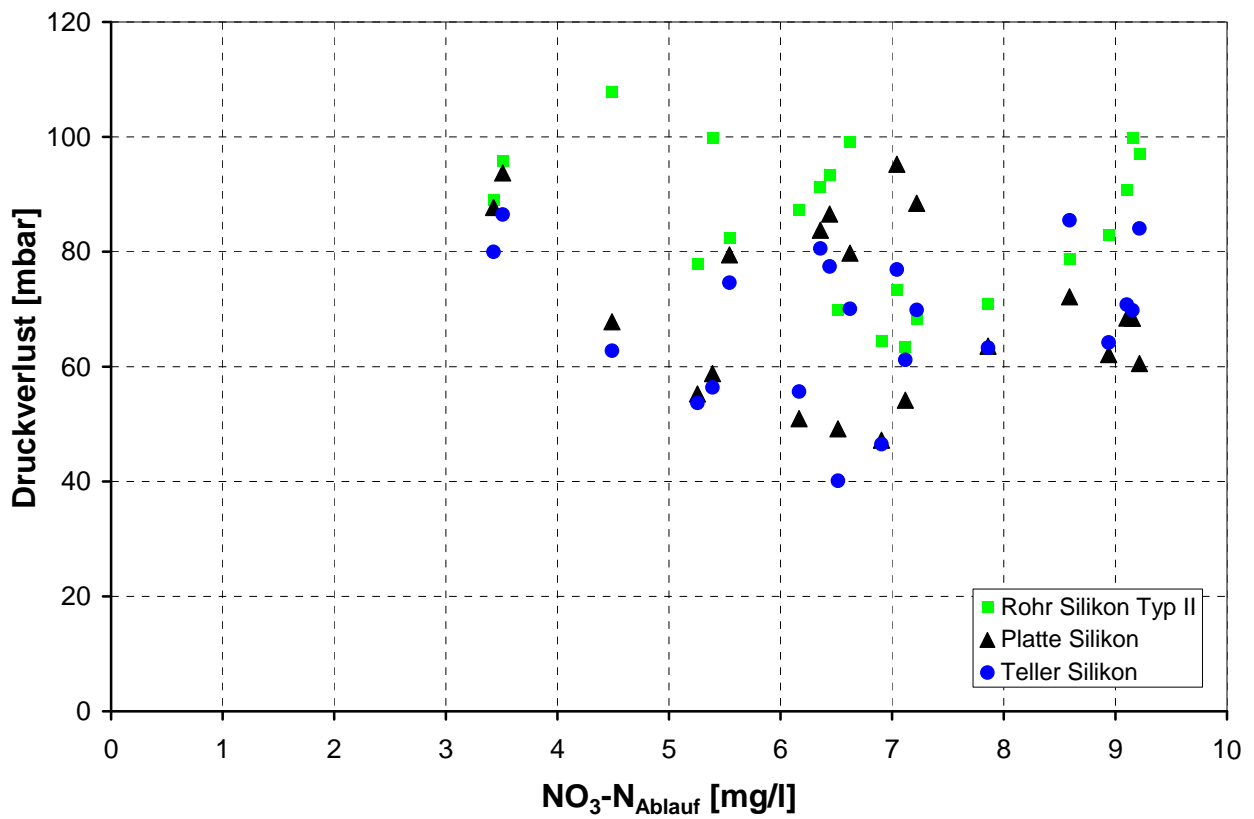


Abbildung 9: Druckverlust und Nitrat

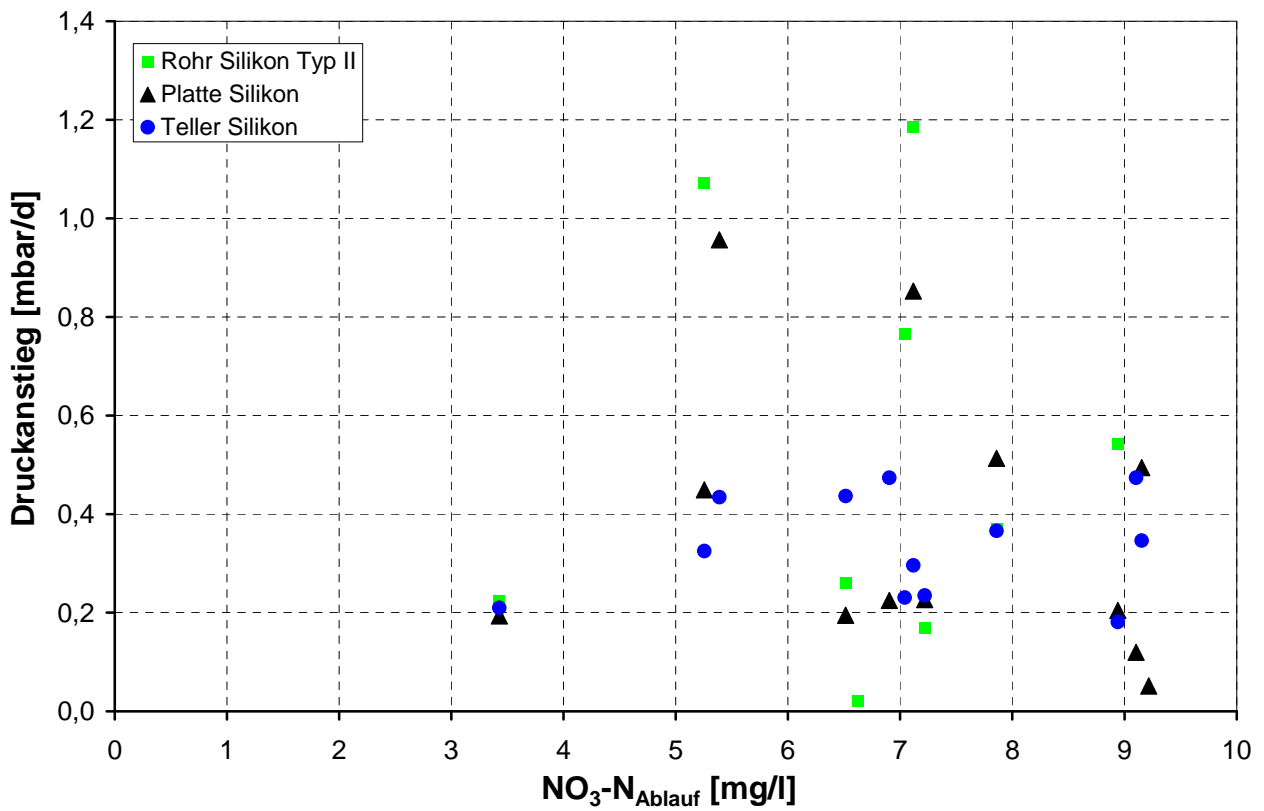


Abbildung 10: Druckanstieg und Nitrat

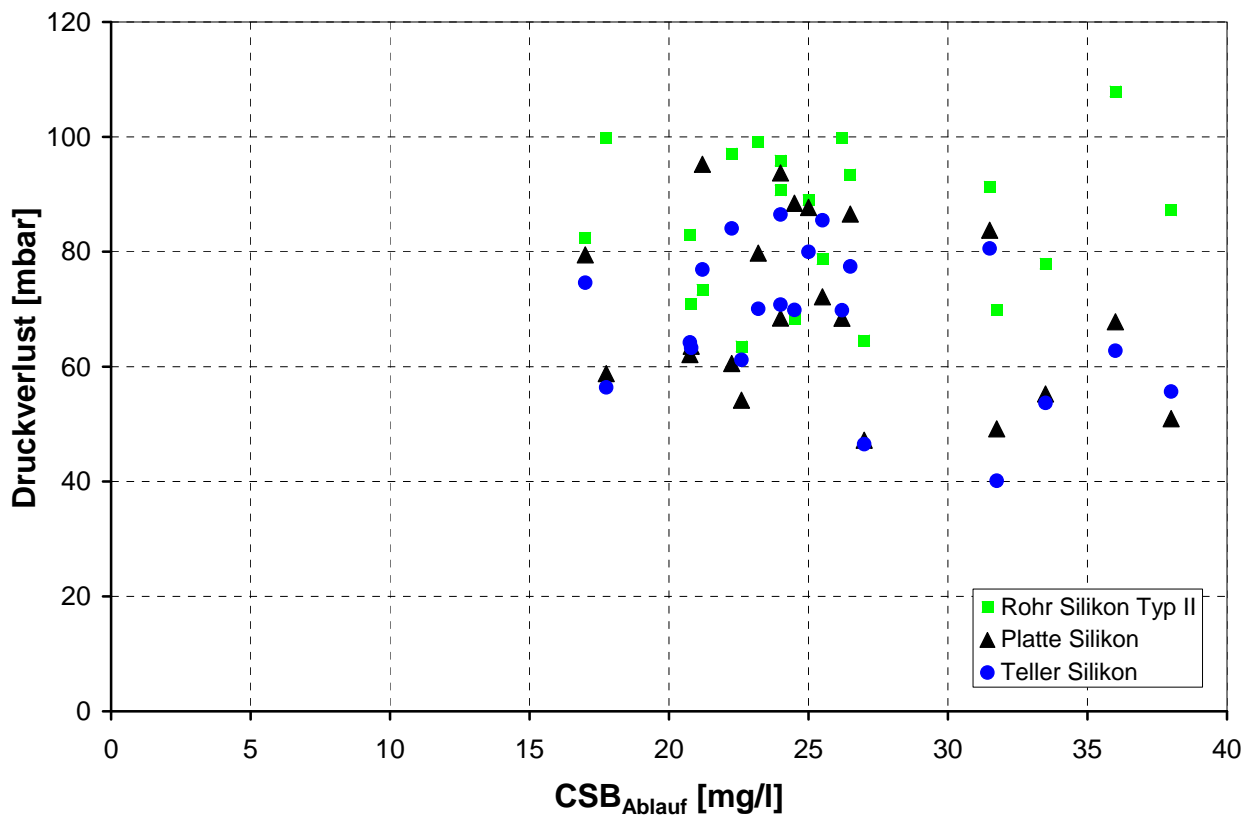


Abbildung 11: Druckverlust und CSB

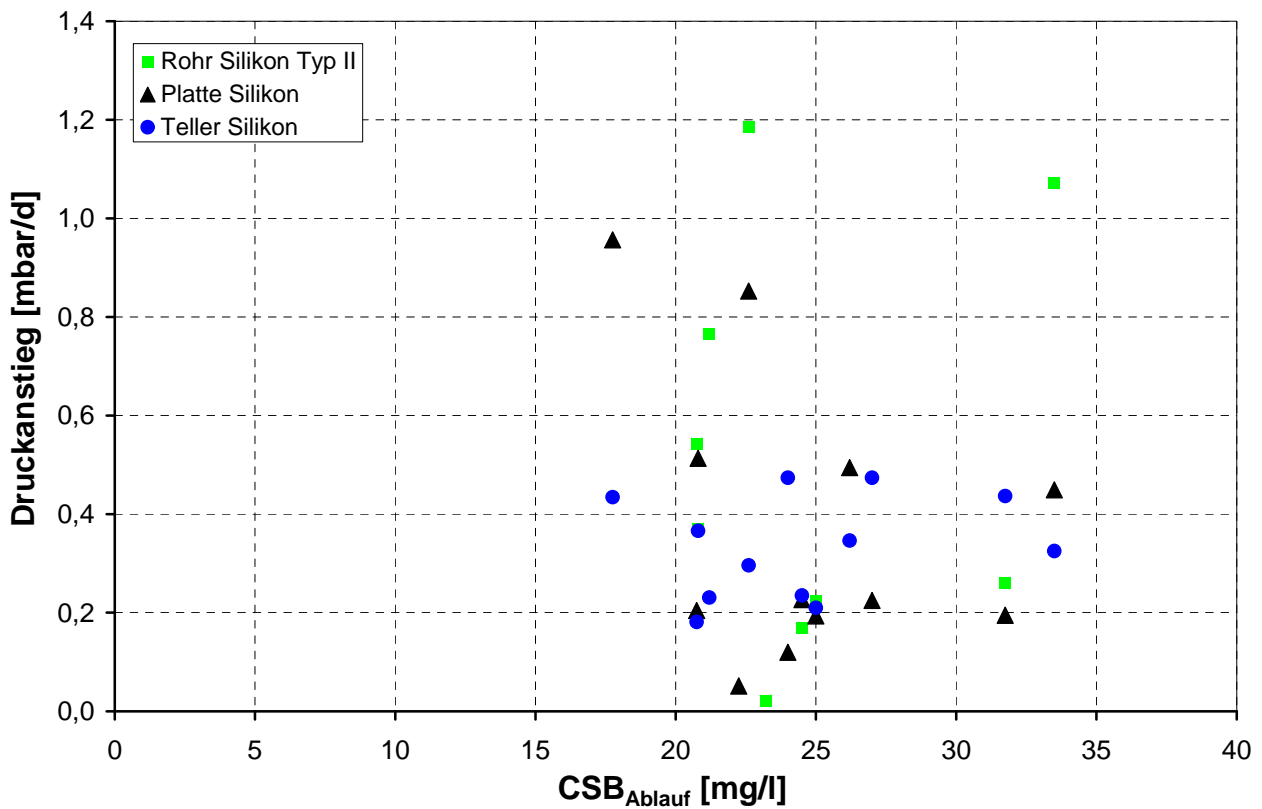


Abbildung 12: Druckanstieg und CSB

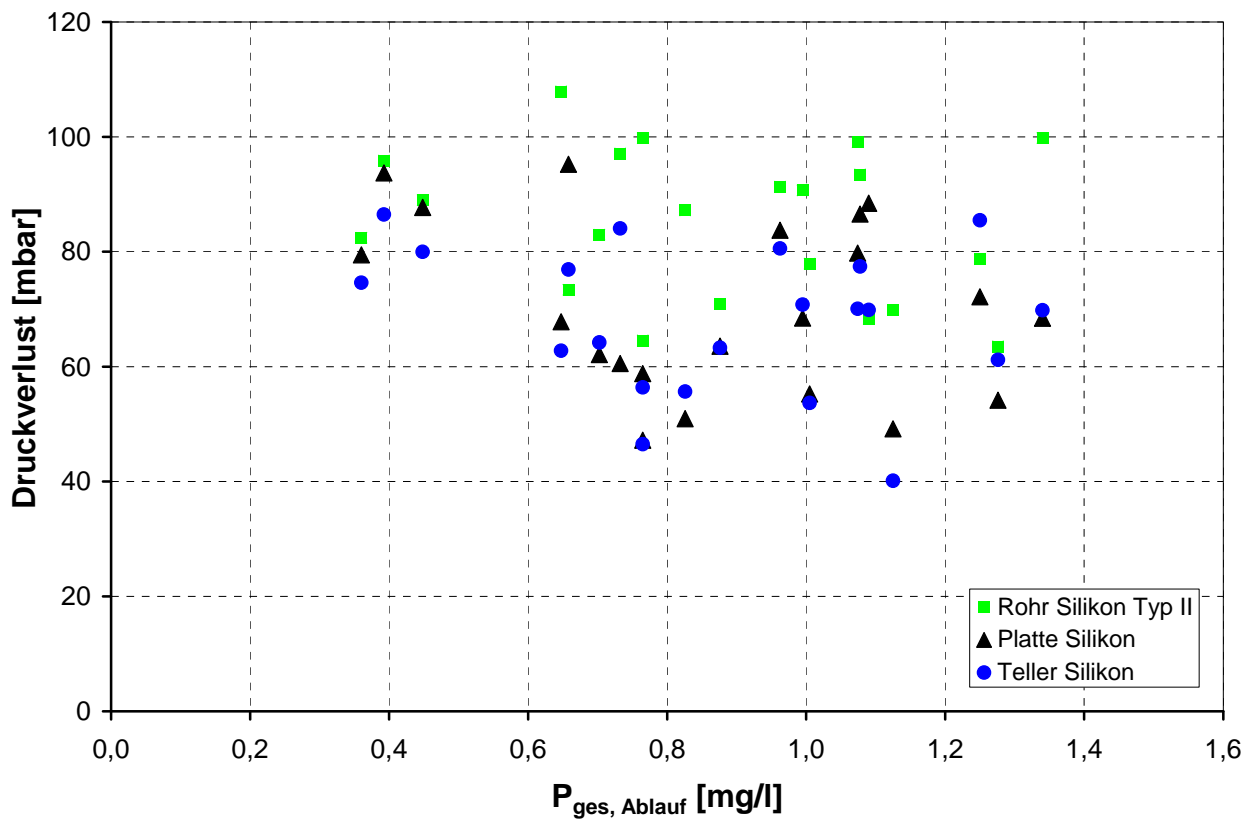


Abbildung 13: Druckverlust und Phosphor

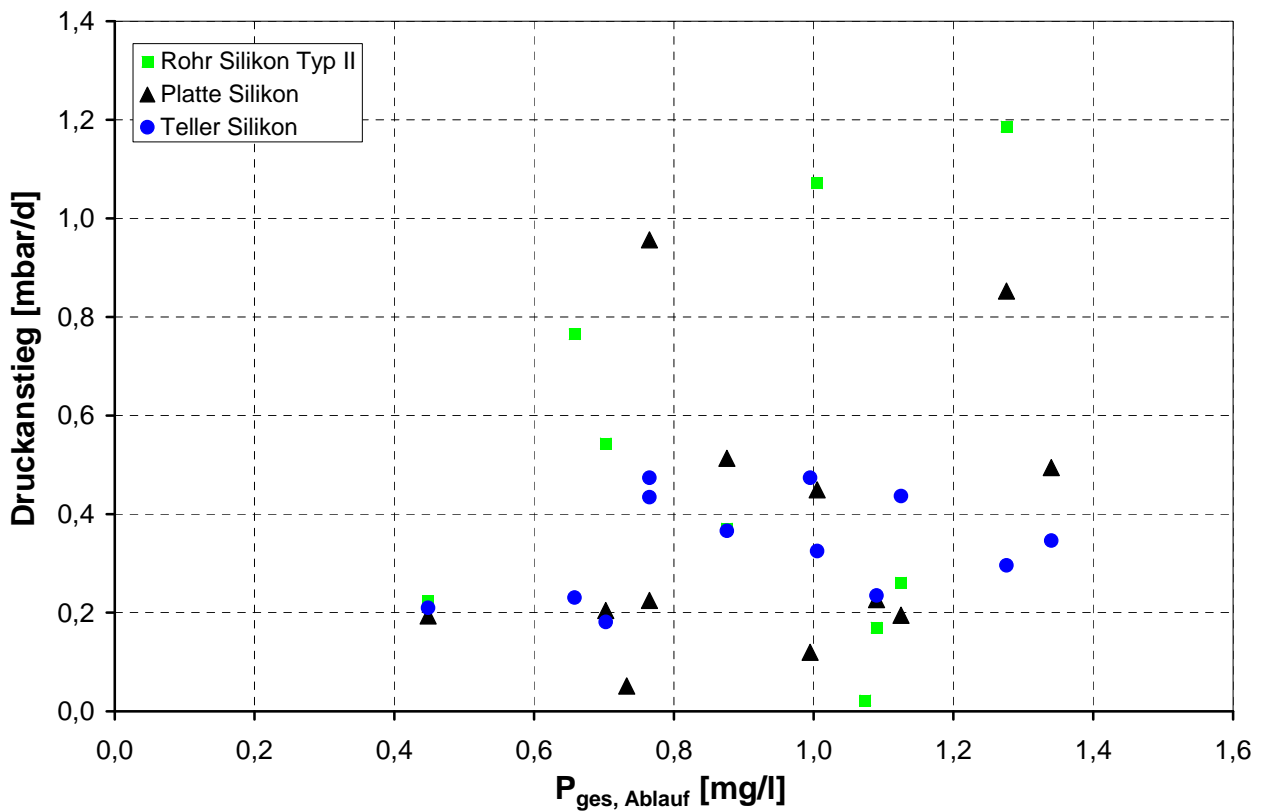


Abbildung 14: Druckanstieg und Phosphor

Anhang A - III Diagramme der Sauerstoffausnutzung

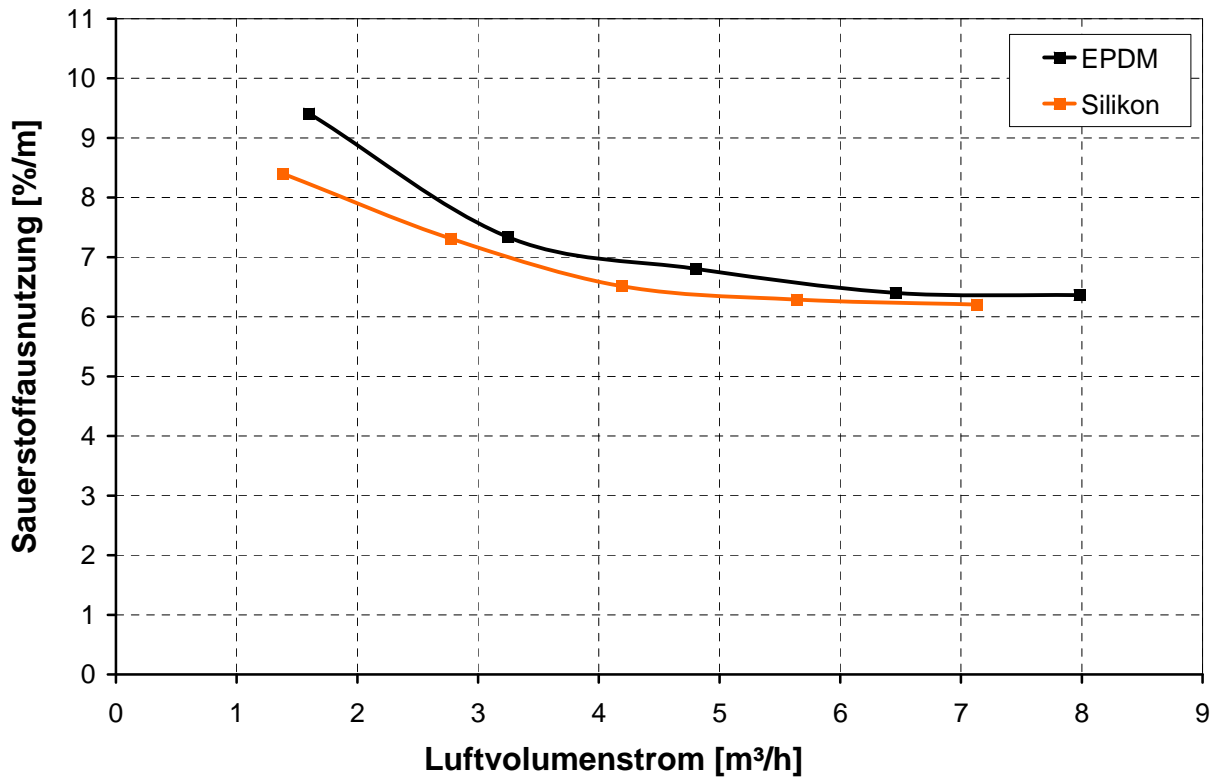


Abbildung 1: Plattenbelüftungselemente

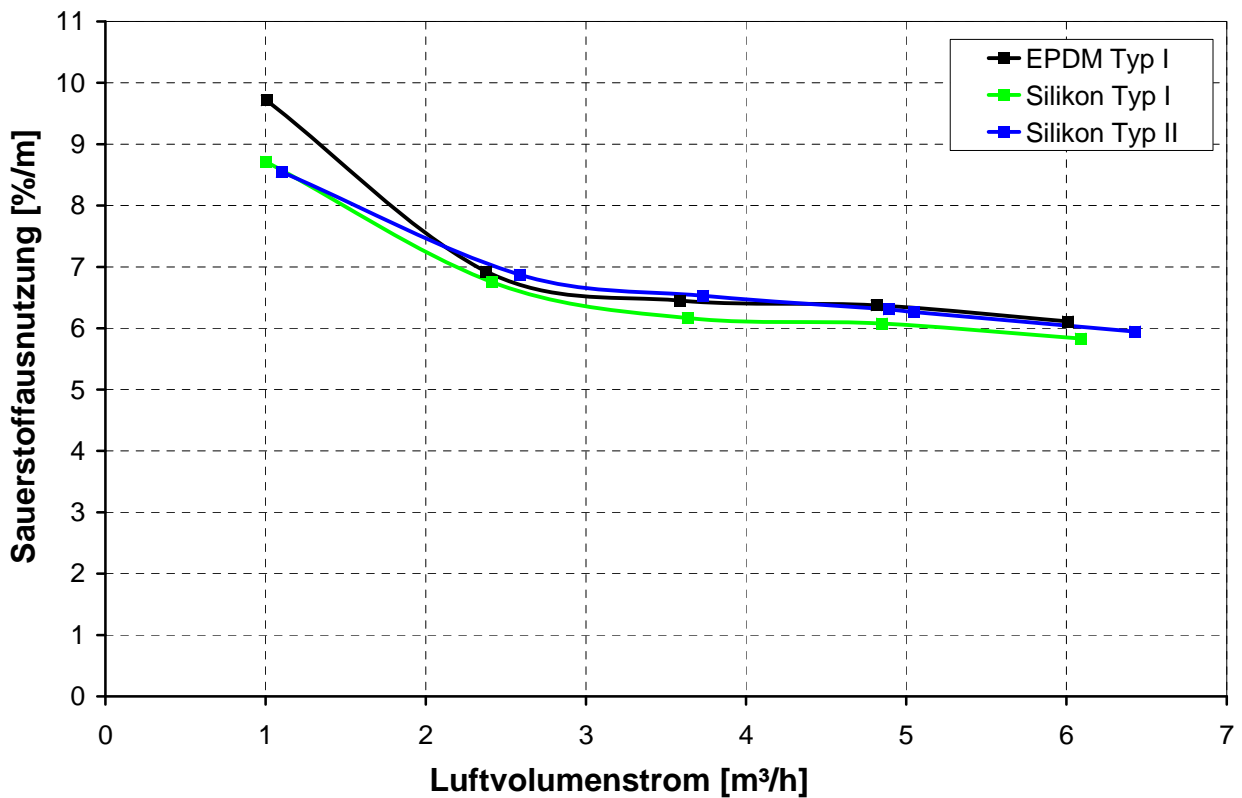


Abbildung 2: Rohrbelüftungselemente

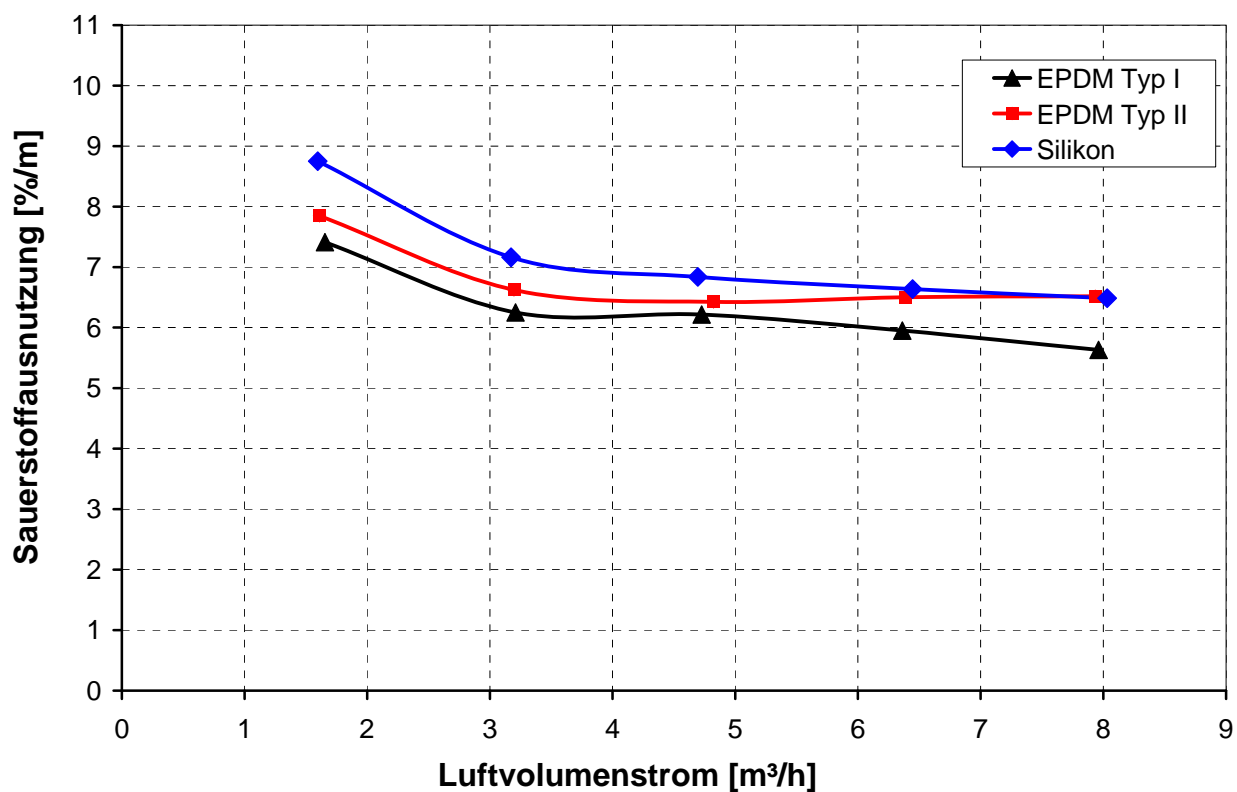


Abbildung 3: Tellerbelüftungselemente

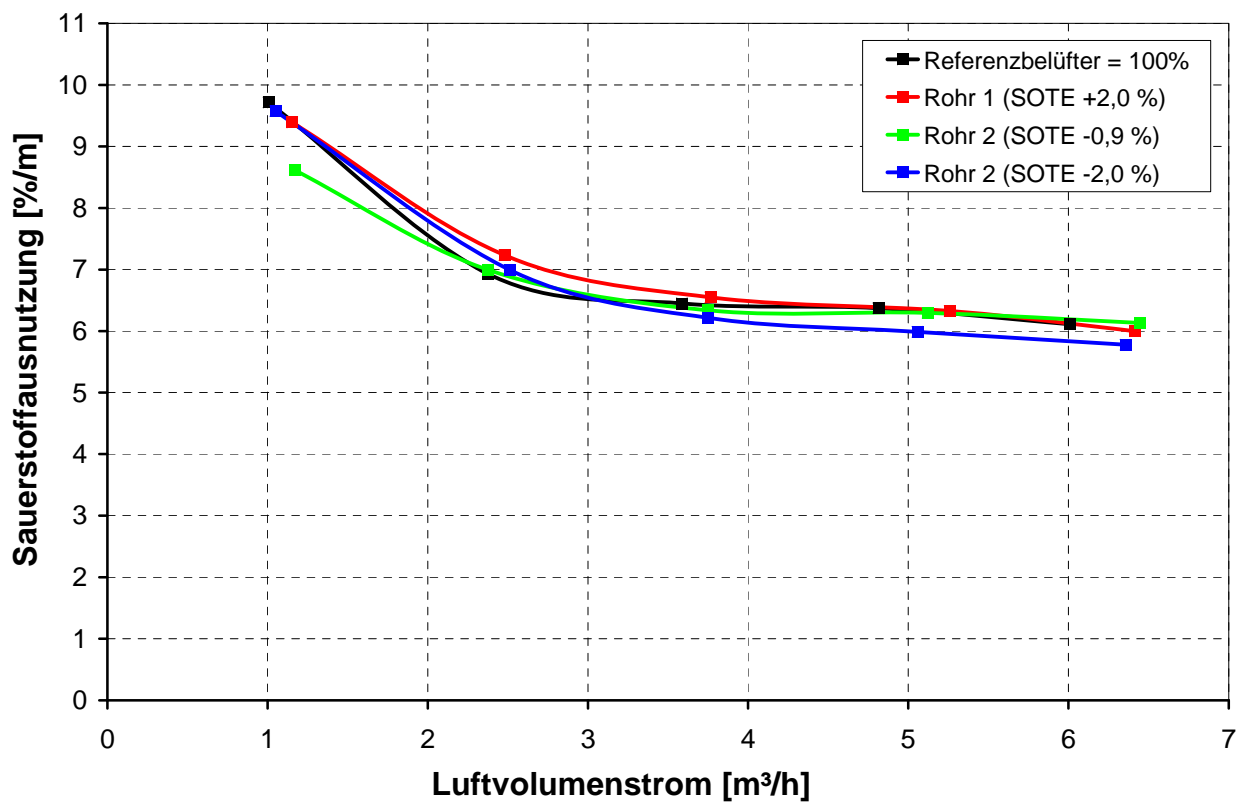


Abbildung 4: Vergleich der Sauerstoffausnutzung gebrauchter Rohrbelüftungselemente

Anhang A - IV Druckverluste und Sauerstoffausnutzung (Technikumsmessung) sortiert nach Versuchsstand

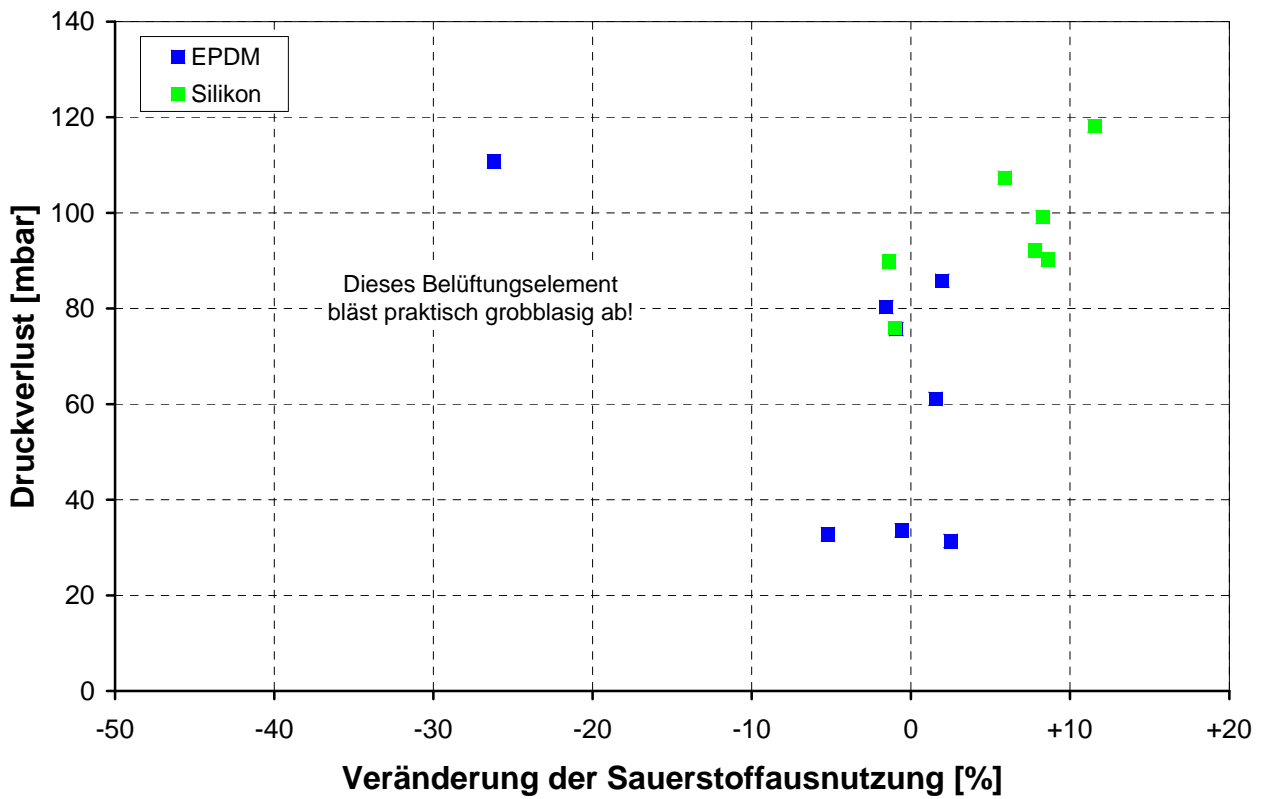


Abbildung 1: Versuchsstand A

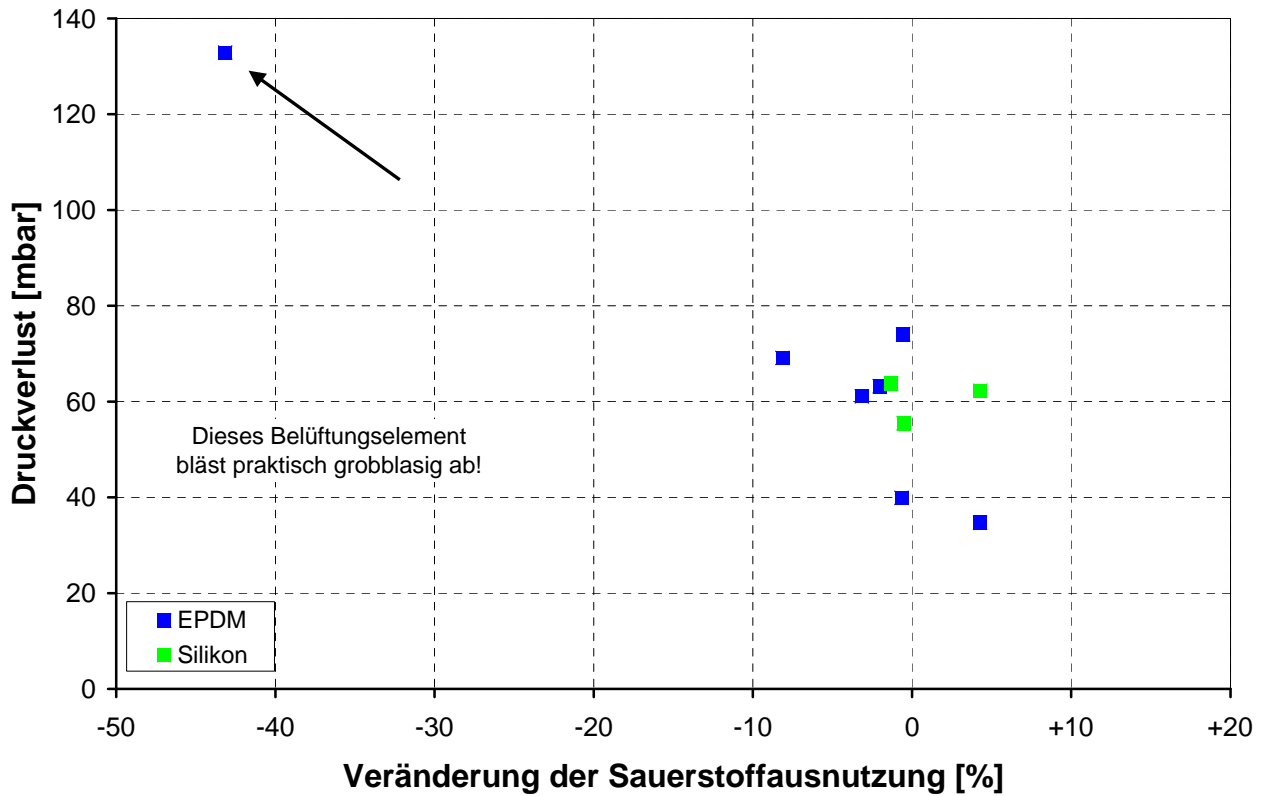


Abbildung 2: Versuchsstand B

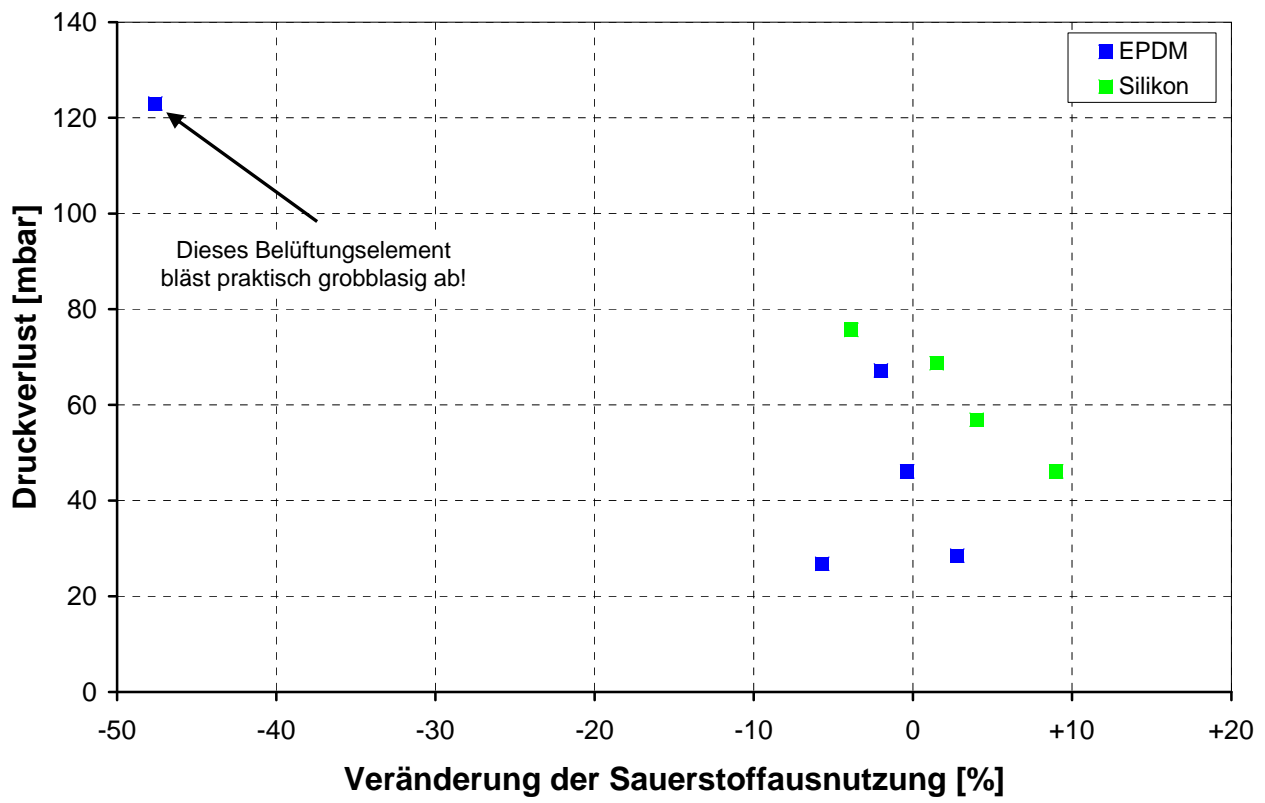


Abbildung 3: Versuchsstand C

Anhang A - V Ergebnisse der Reinigungsmaßnahmen sortiert nach Maßnahme

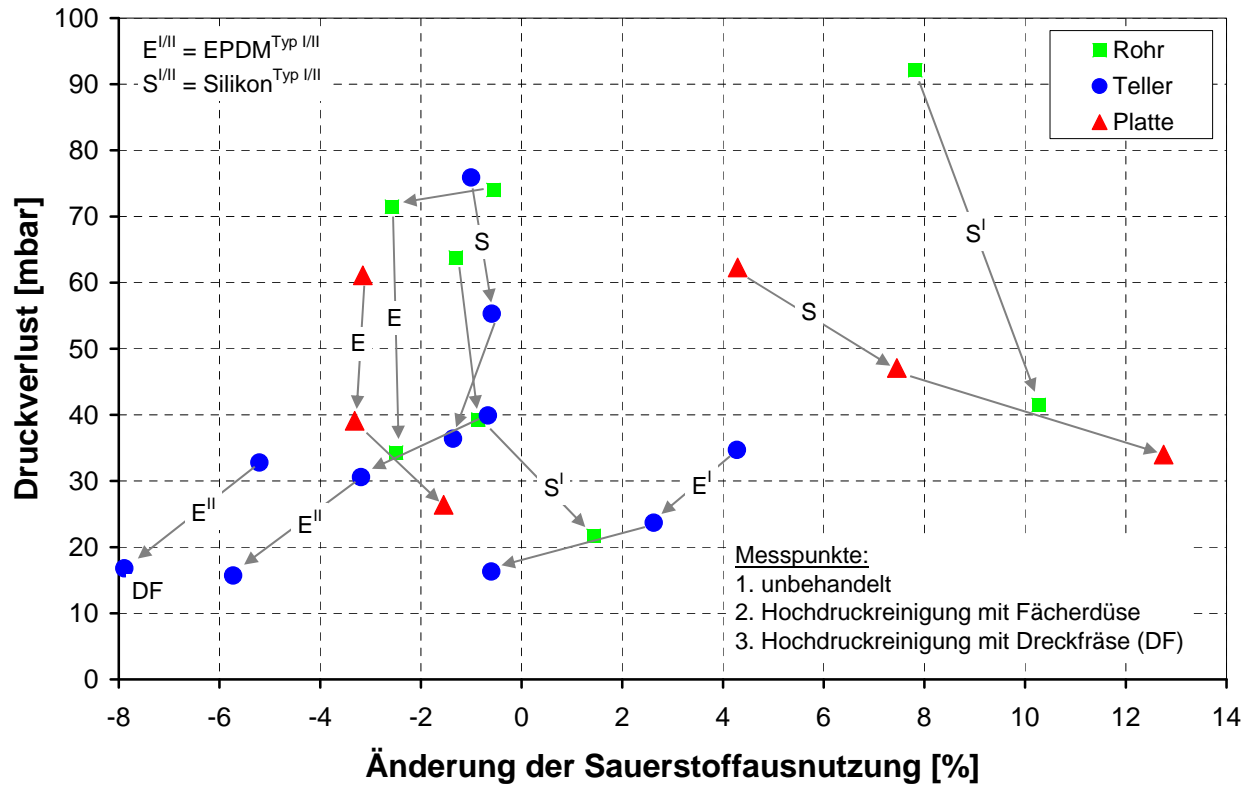


Abbildung 1: Hochdruckreinigung

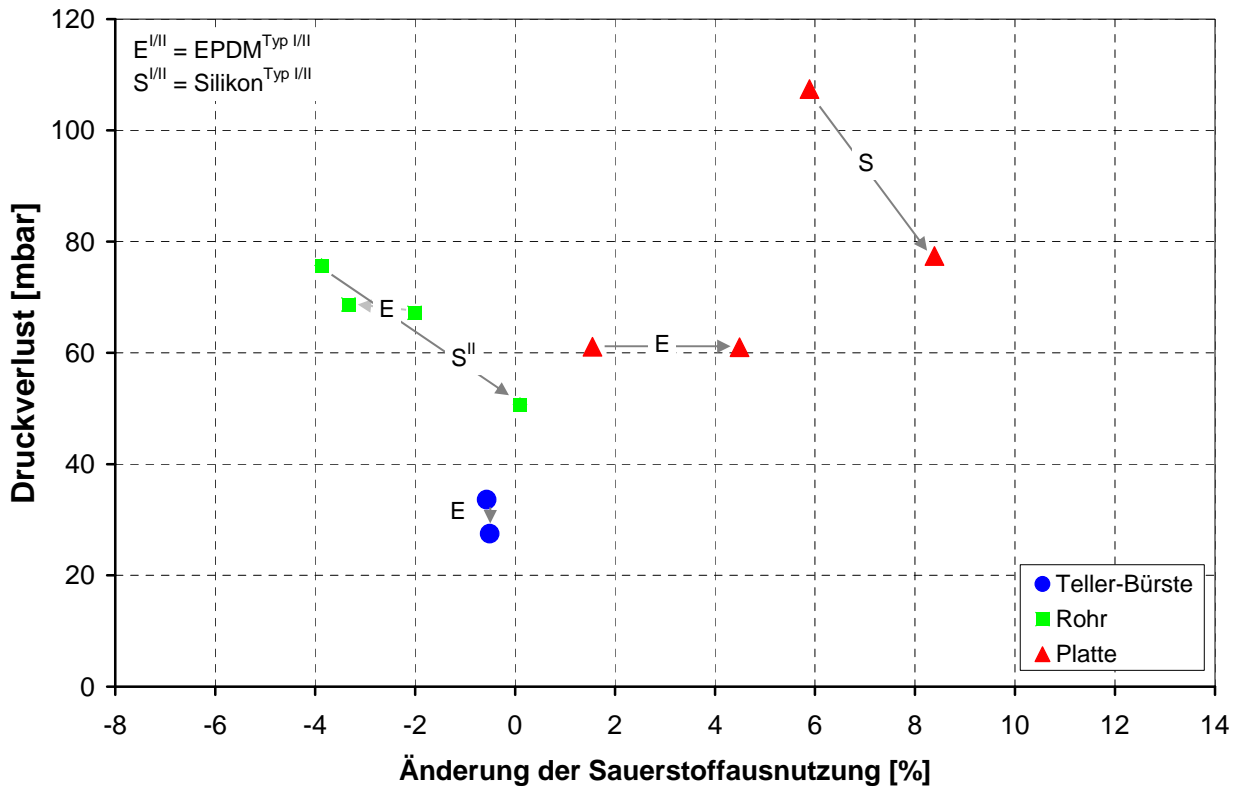


Abbildung 2: Reinigung mit Handbürste

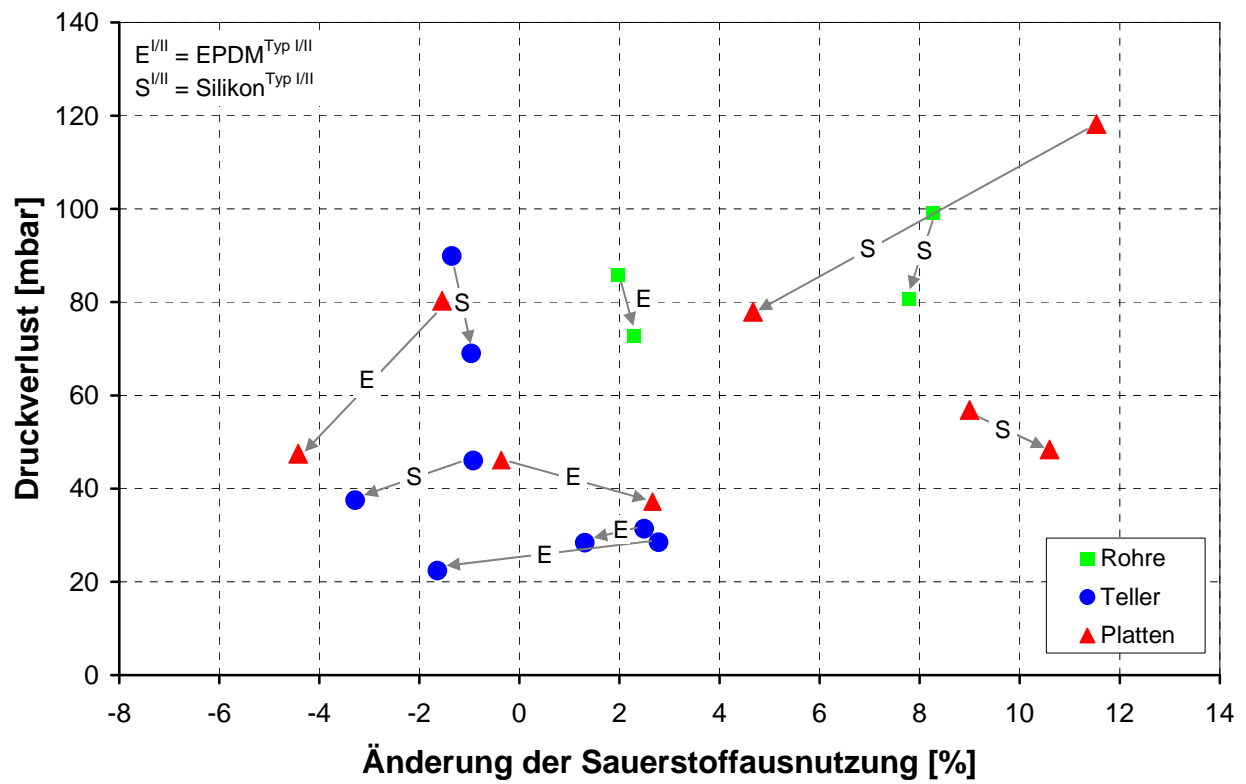


Abbildung 3: Eindüsung von Ameisensäure

Anhang A - VI Diagramme der Dehnungsmessungen

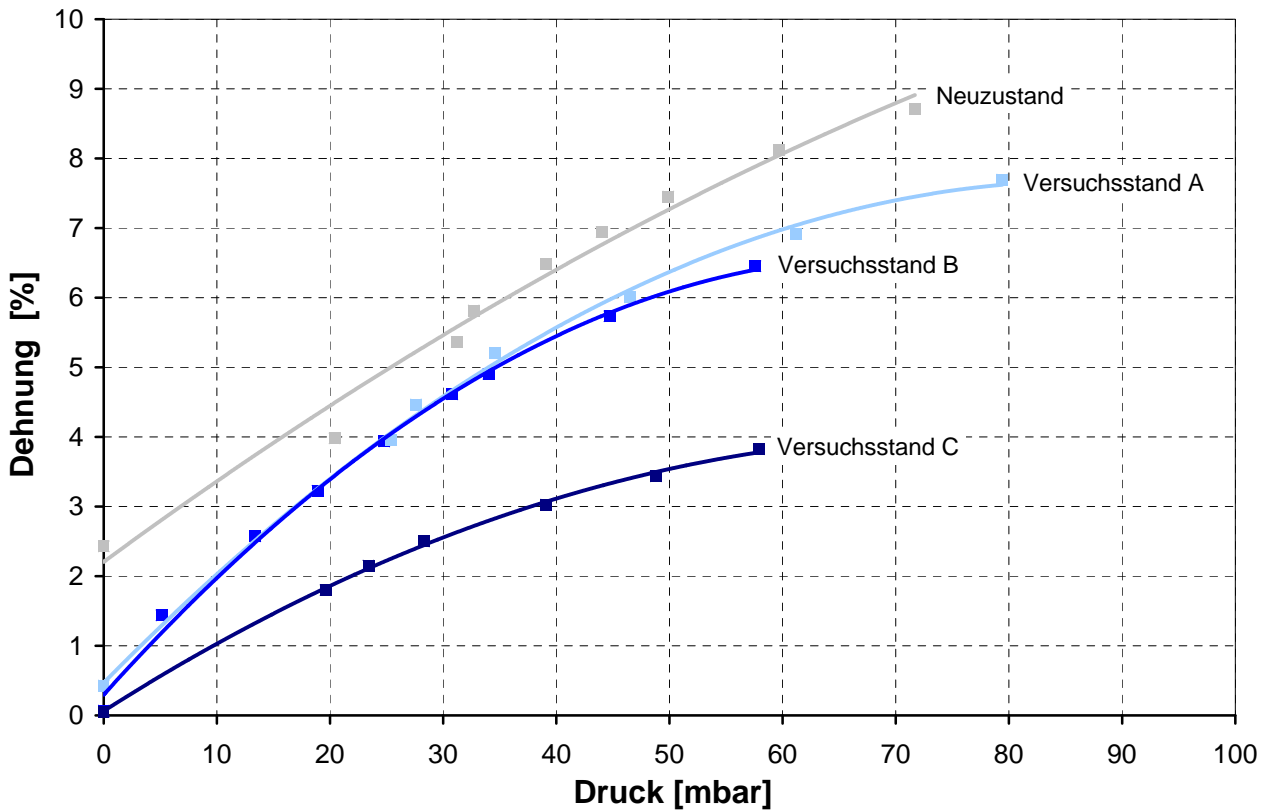


Abbildung 1: Plattenbelüftungselemente - EPDM

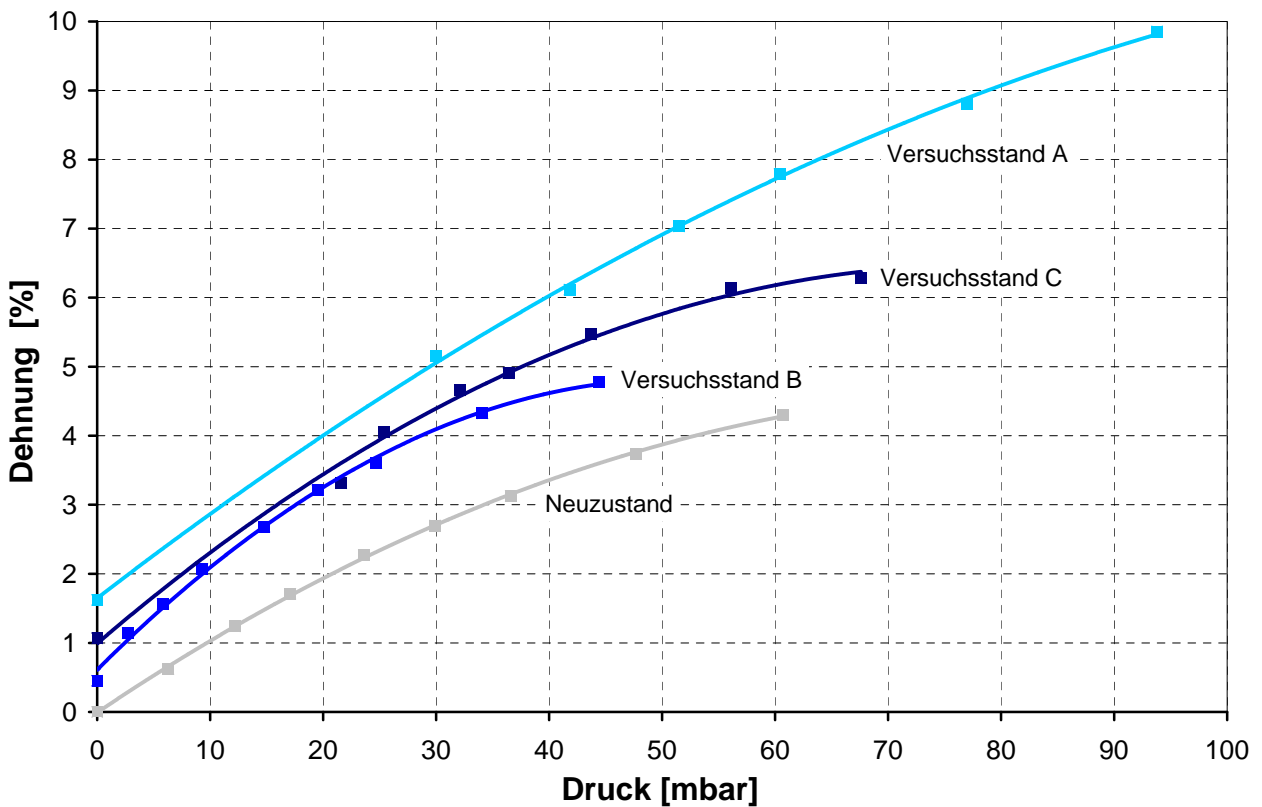


Abbildung 2: Plattenbelüftungselemente - Silikon

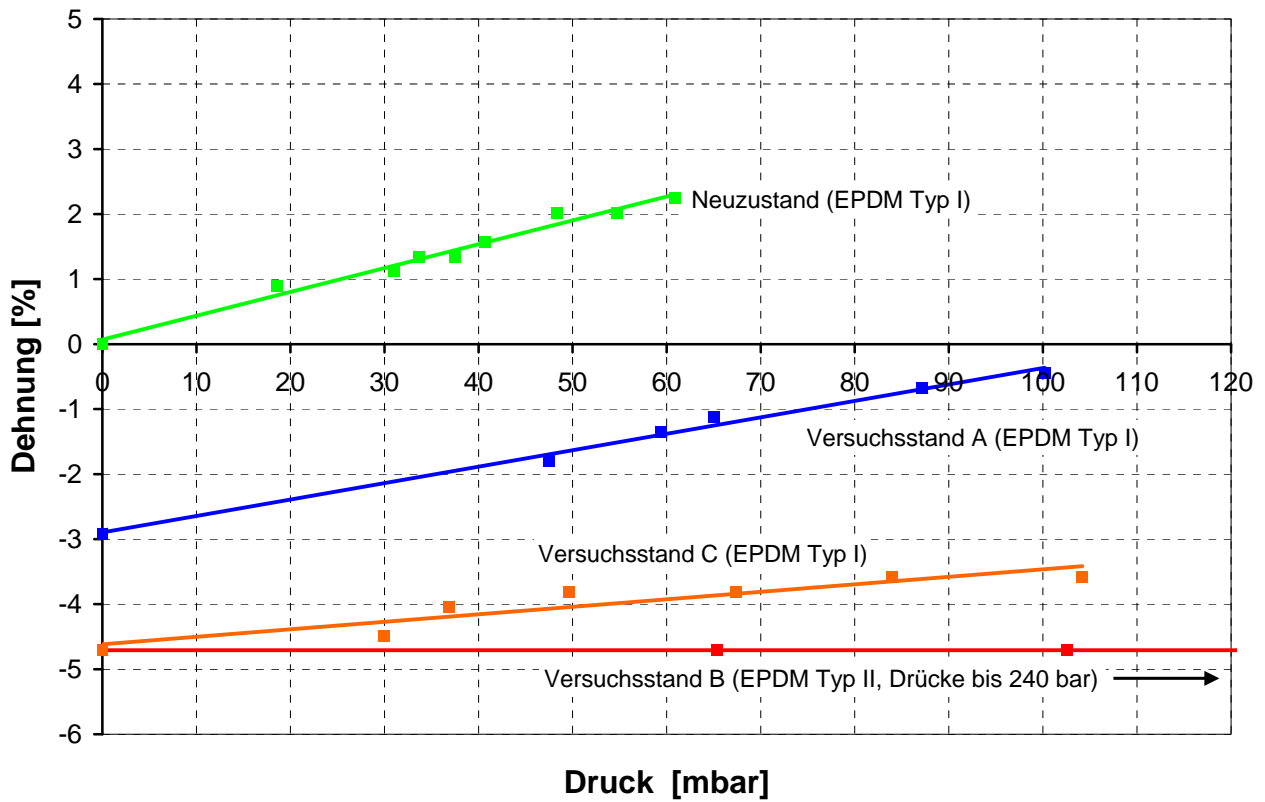


Abbildung 3: Rohrbelüftungselemente - EPDM Typ I und II

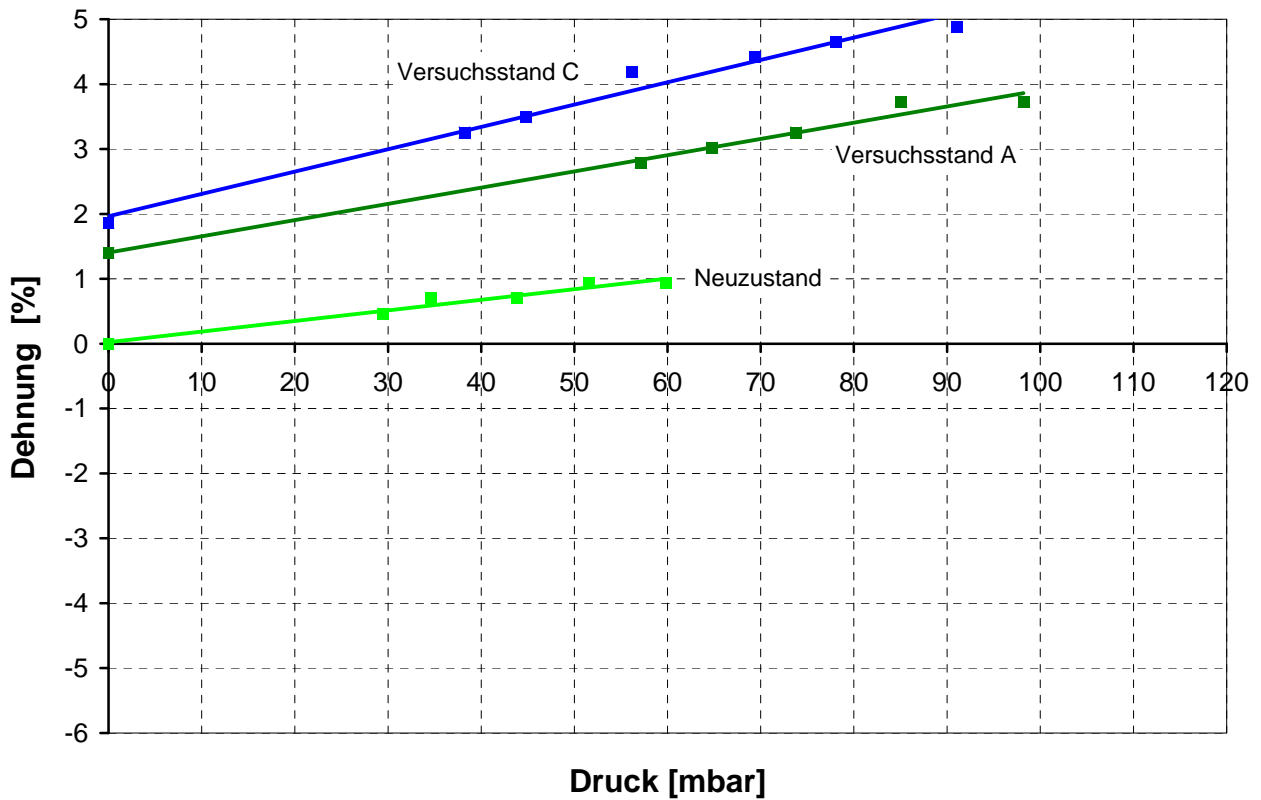


Abbildung 4: Rohrbelüftungselemente - Silikon Typ I

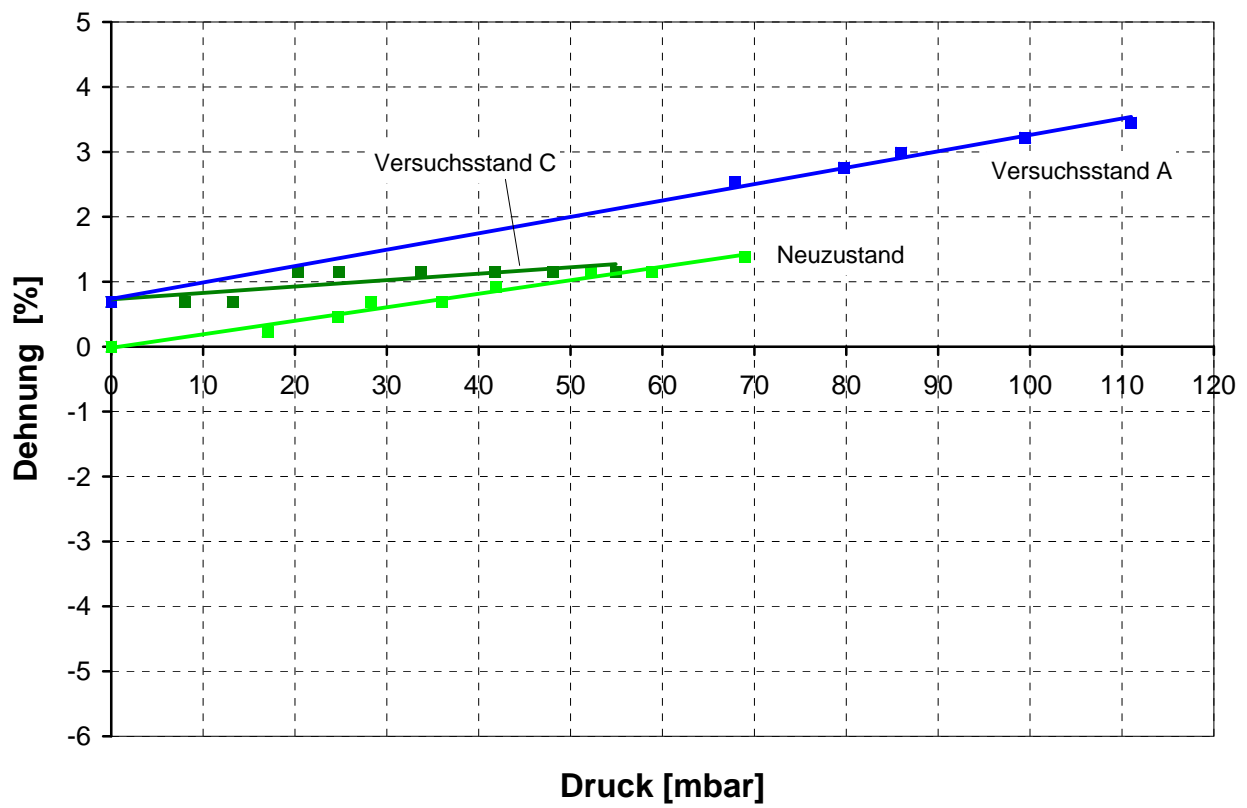


Abbildung 5: Rohrbelüftungselemente - Silikon Typ II

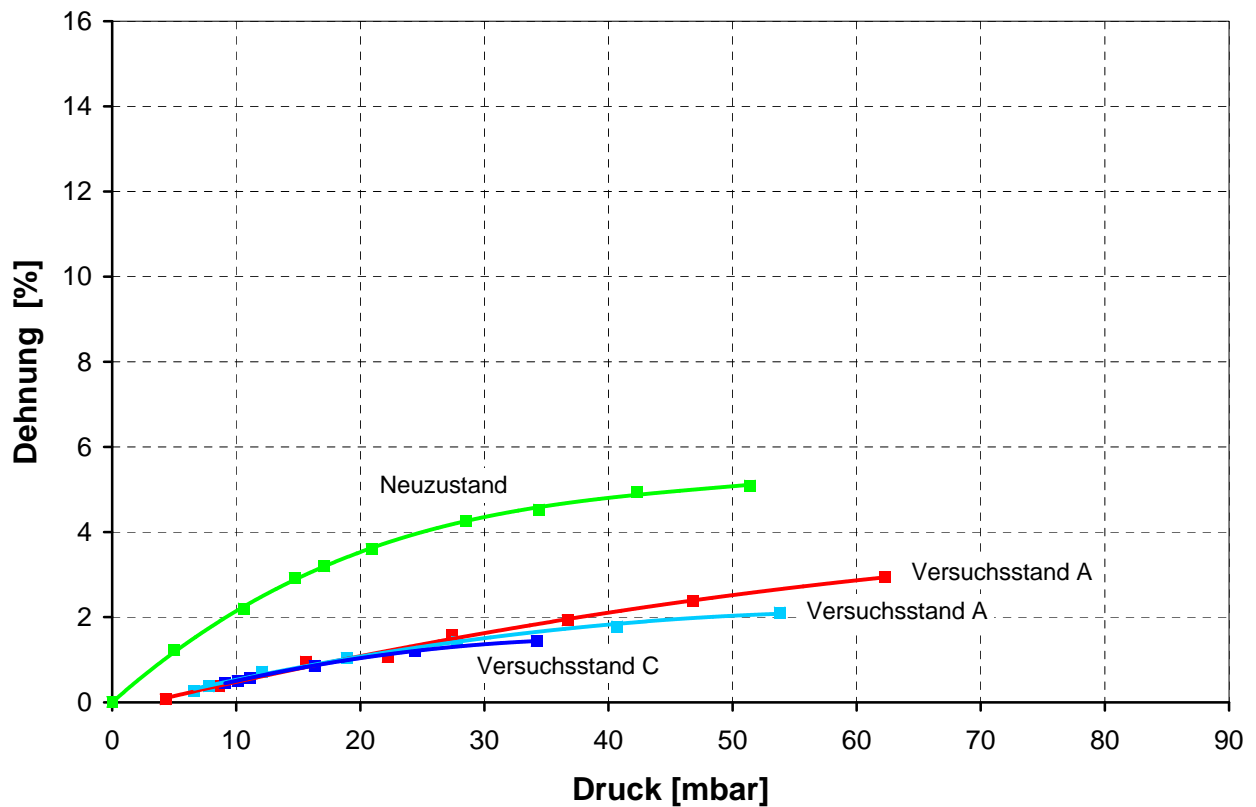


Abbildung 6: Tellerbelüftungselemente - EPDM Typ I

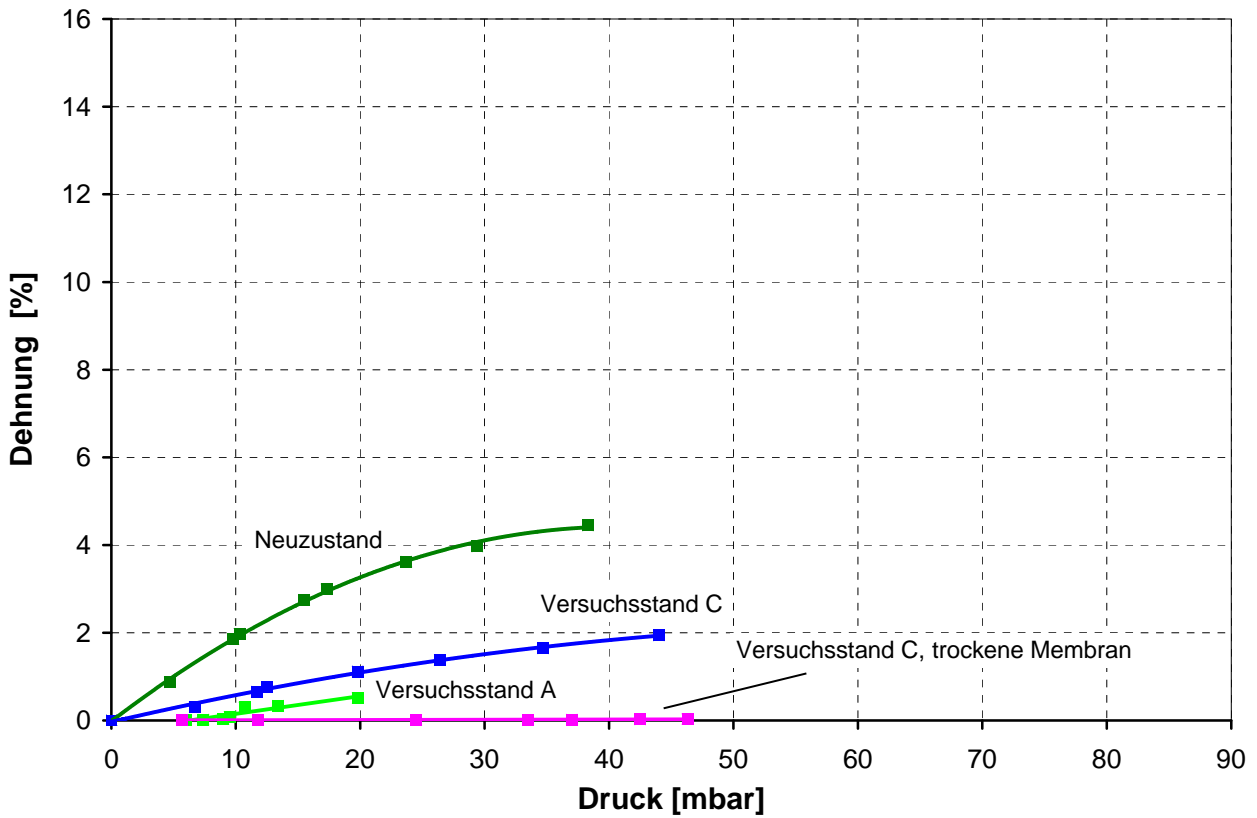


Abbildung 7: Tellerbelüftungselemente - EPDM Typ II

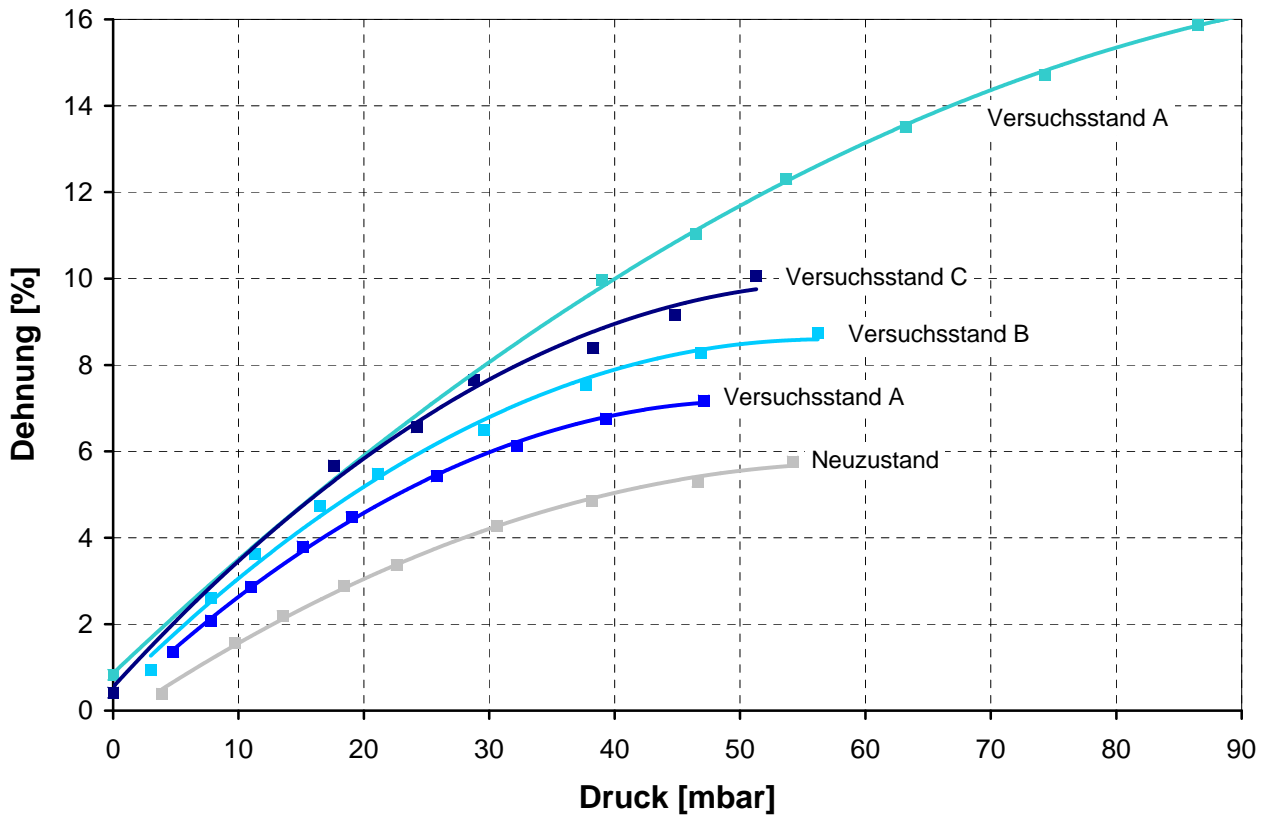


Abbildung 8: Tellerbelüftungselemente - Silikon

Veröffentlichung 1 **Wagner, M.**
Probleme mit Belagsbildung auf Membranen von
Belüftungselementen – eine Übersicht,
2. WAR-Infotag, 22. April 2004, Darmstadt

Probleme mit Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen - eine Übersicht -

Privatdozent Dr. Martin Wagner

Institut WAR
Technische Universität Darmstadt





Ursache der Aufwerfungen auf der Belebungsbeckenoberfläche

starke **Belegung der Belüftermembran** mit viskosem Material

sehr schwer mechanisch entfernbar

hier nicht behandelt: verkalkte Belüftungselemente



6

Verbreitung des Schadens I

Fragebogenaktion von Frey (2003) in Österreich:

879 Abwasserbehandlungsanlagen

473 Rückläufe

Problem: viele Anlagen ohne Druckmessung

Ergebnisse: 12 % Probleme mit steigendem Gegendruck

54 % Probleme bei Anlagen mit Druckmessung



7

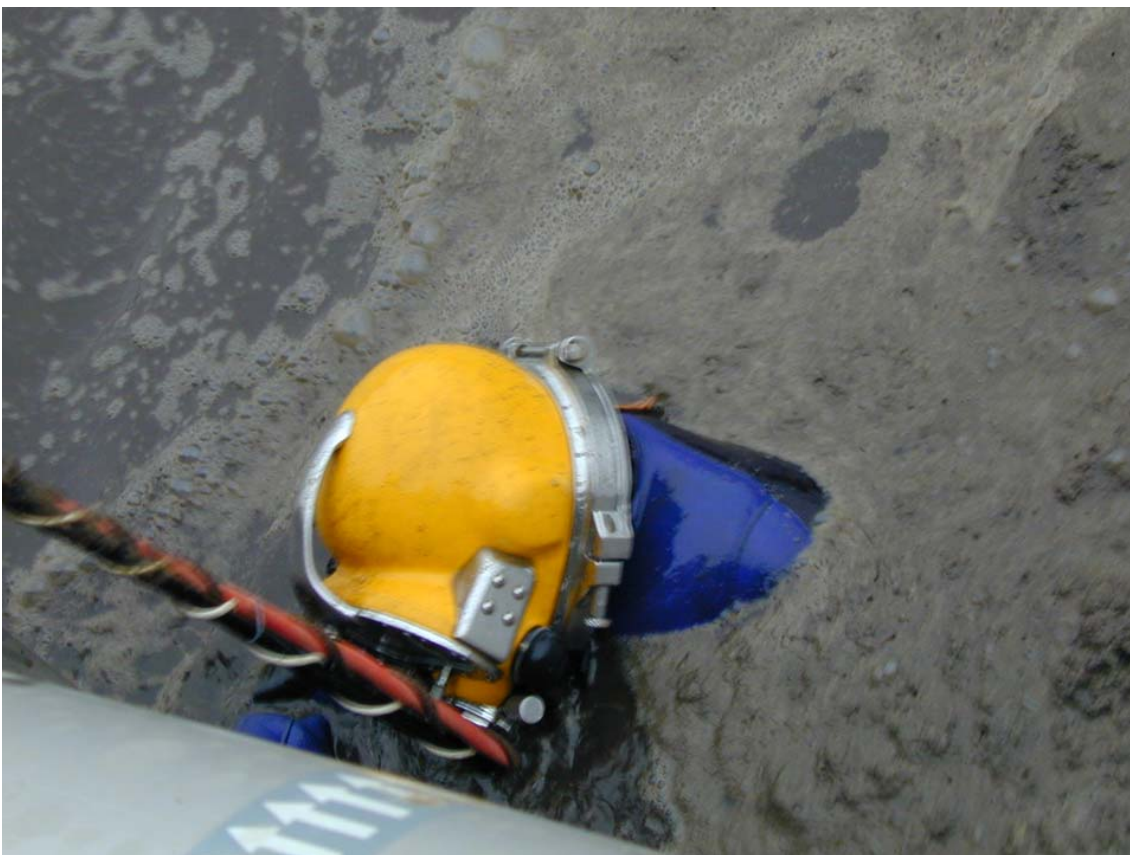
Verbreitung des Schadens II

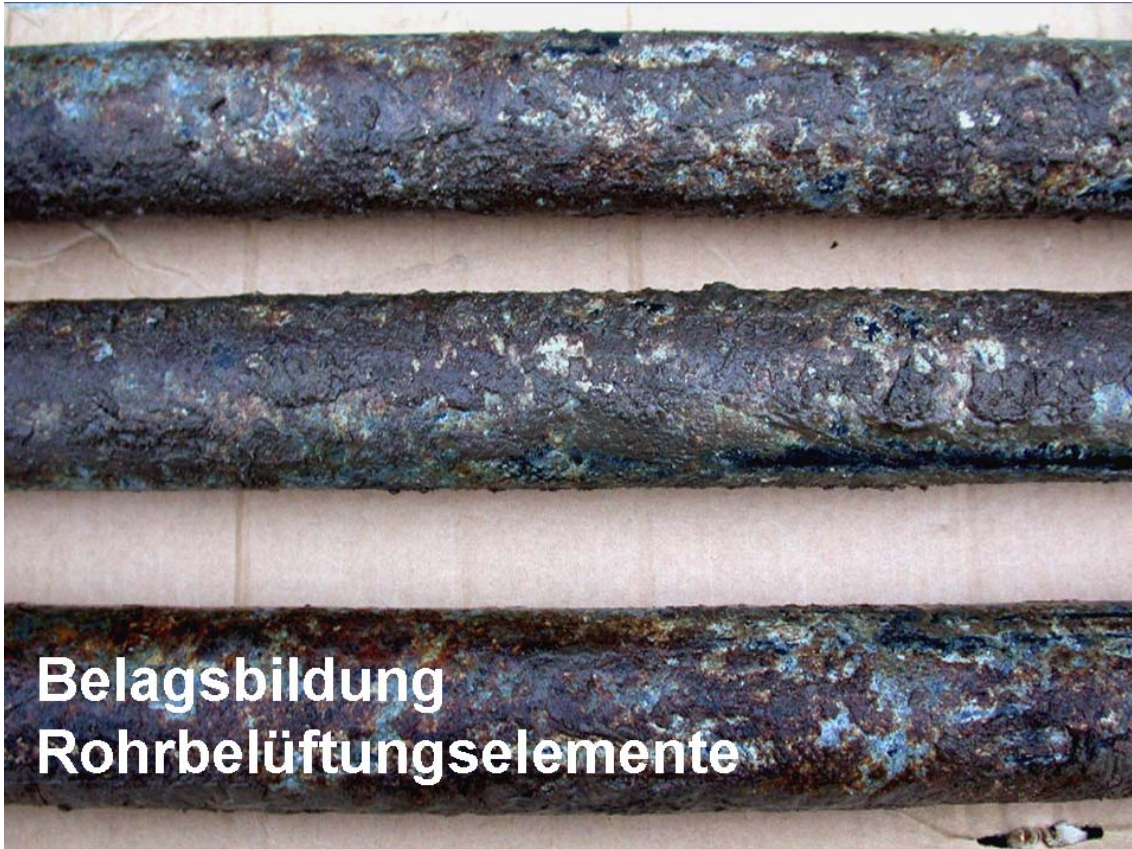
eigene gutachterliche Tätigkeit: 27 Anlagen

- konventionelle Belebung und Membranbelebung;
- Misch- und Umlaufbecken;
- Beckentiefe < 4 m bis 7,7 m;
- < 1.000 bis 4 Mio. E+EW;
- alle Formen von Belüftungselementen,
- EPDM und dunkles Silikon

Übertragung österreichischer Ergebnisse auf
Deutschland: ohne Druckmessung: ≈ 1.200
mit Druckmessung: ≈ 5.400

zu hoch ? s. später





Abgasverhalten der Belüftungselemente

Folge der Belagsbildung:

schlechtes Abgasverhalten der Belüftungselemente

neue und belegte Membranen
mit Wasser anstelle von Luft
(besseres Erkennen im Vergleich zu Luft)

◀ 12





◀ 14



EPS und Belebtschlammbeleg

EPS* und Biofilmbelag

*) Extrazelluläre polymere
Substanzen

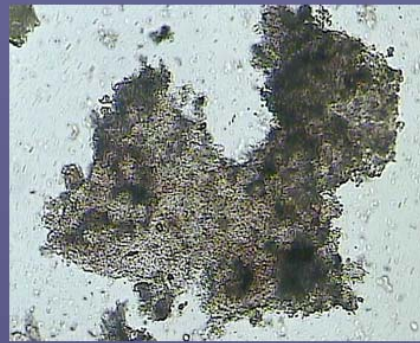


Ablagerungen (Blätter)

◀ 15



Fadenbakterien, EPS-
und Belebtschlammbelag



Schlammflocke
Belebtschlamm-Anhaftung



Nematode aus
Belebtschlamm-Belag

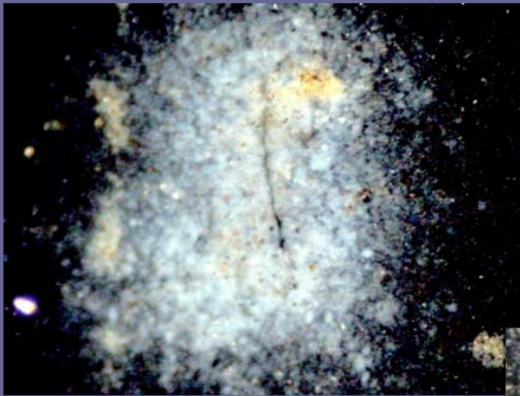
◀ 16



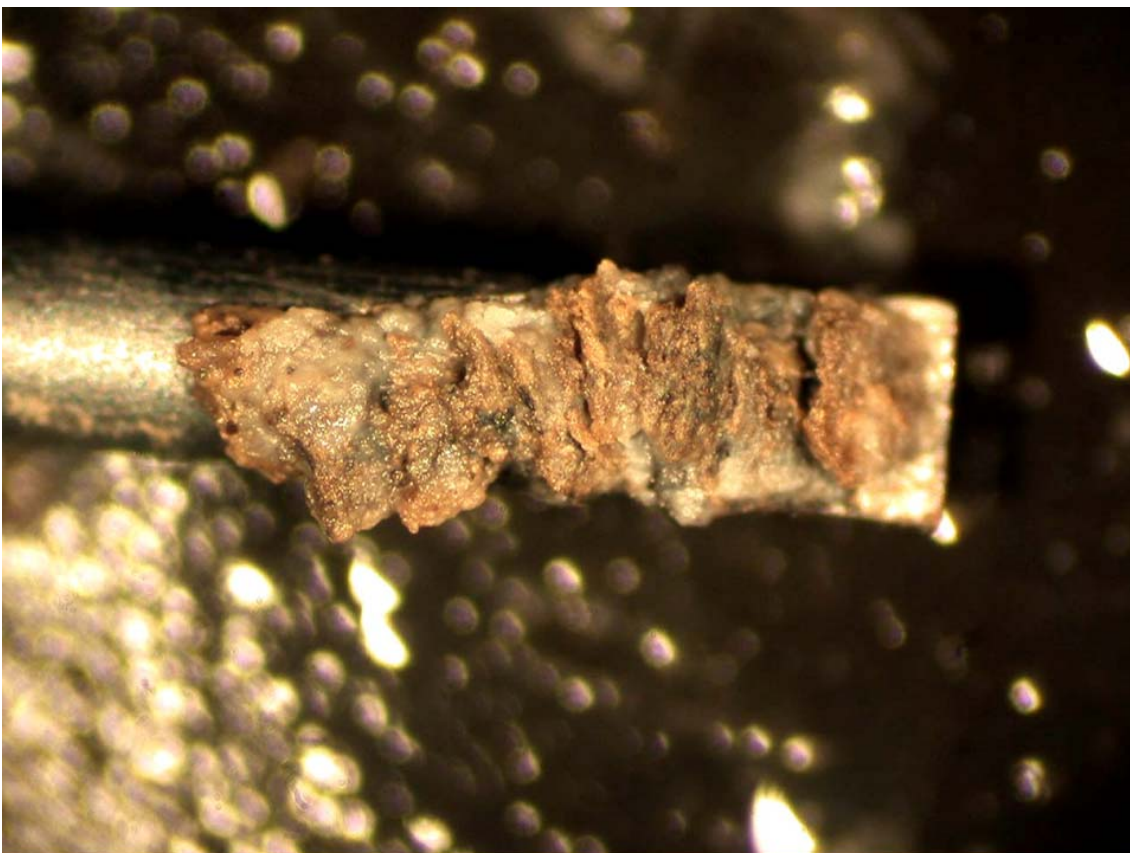
Außenseite der Membranen



◀ 17



Innenseite der Membranen



Membranen

Probleme mit Belagsbildung bei Membranen aus:

EPDM

PU

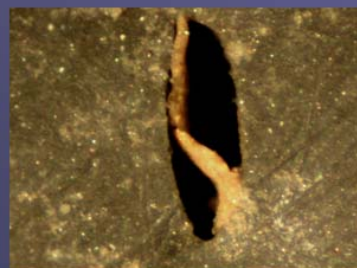
dunklem/schwarzem Silikon

keine Probleme mit Belagsbildung bei Membranen aus:

hellem/weißem Silikon

Probleme

EPDM



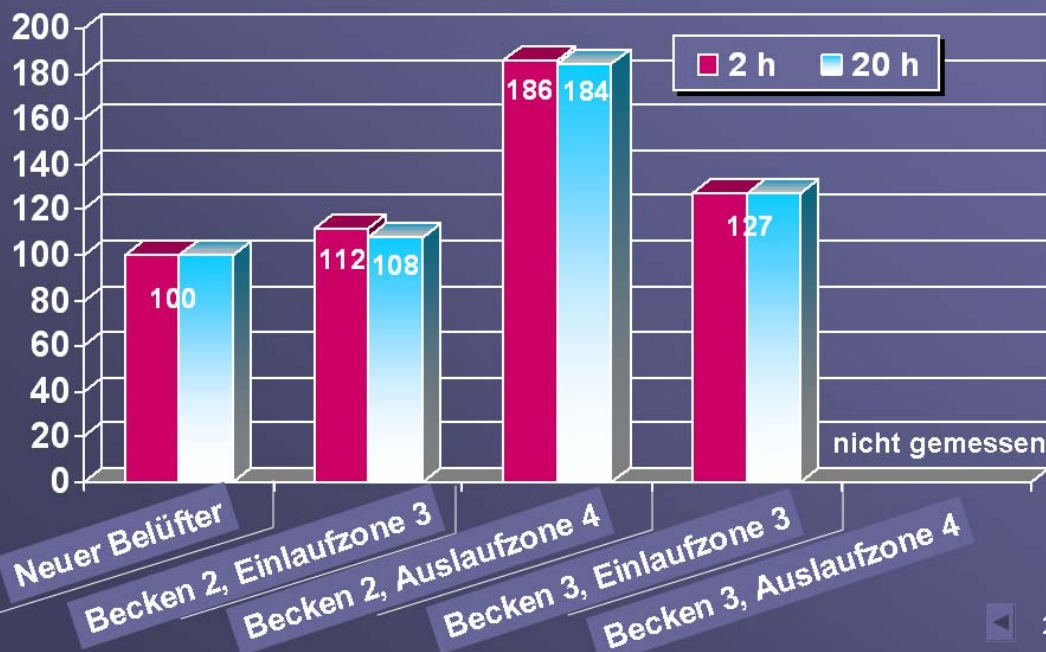
dunkles/schwarzes Silikon

keine Probleme



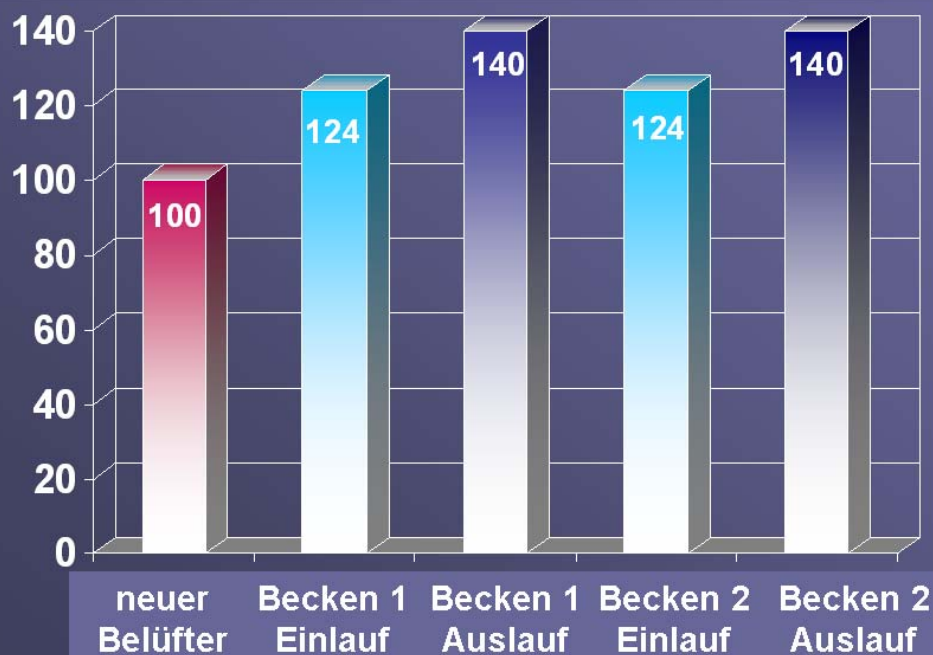
helles/weißes Silikon

Druckverluste (relative Werte [%])



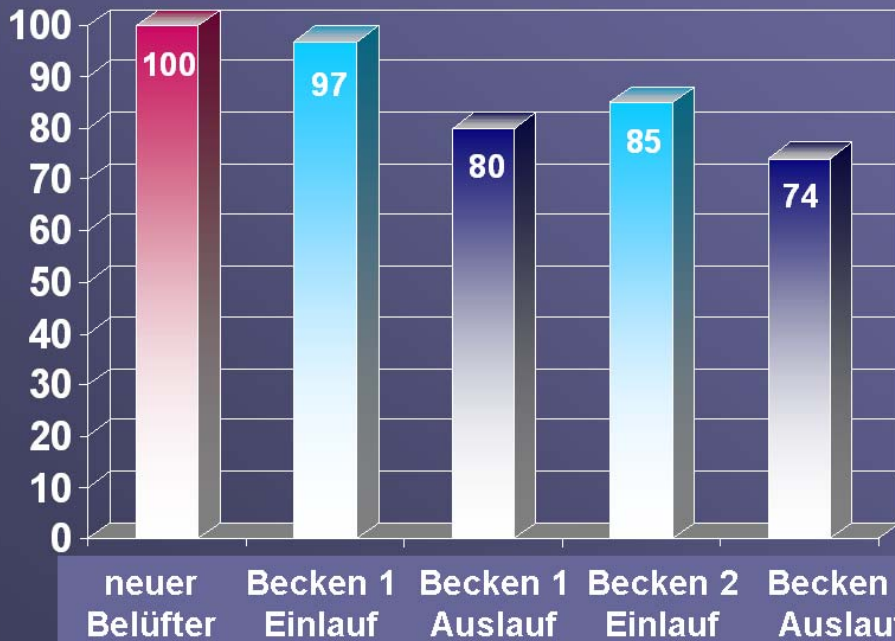
22

Shore A Härte von EPDM-Membranen (relative Werte [%])



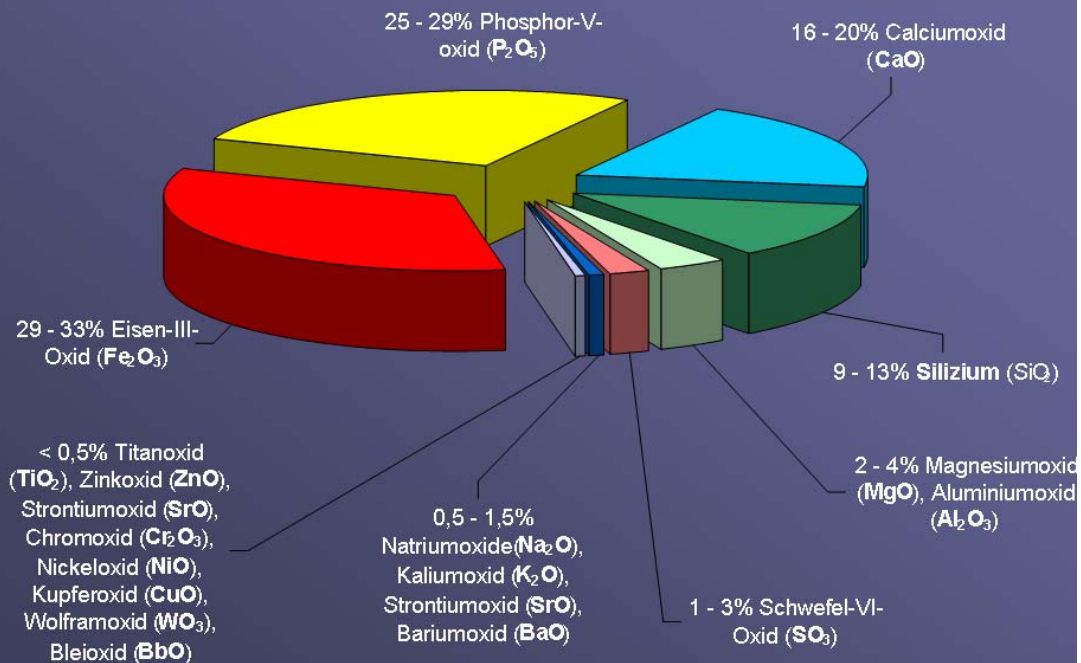
23

Weichmacheranteil von EPDM-Membranen (relative Werte [%])



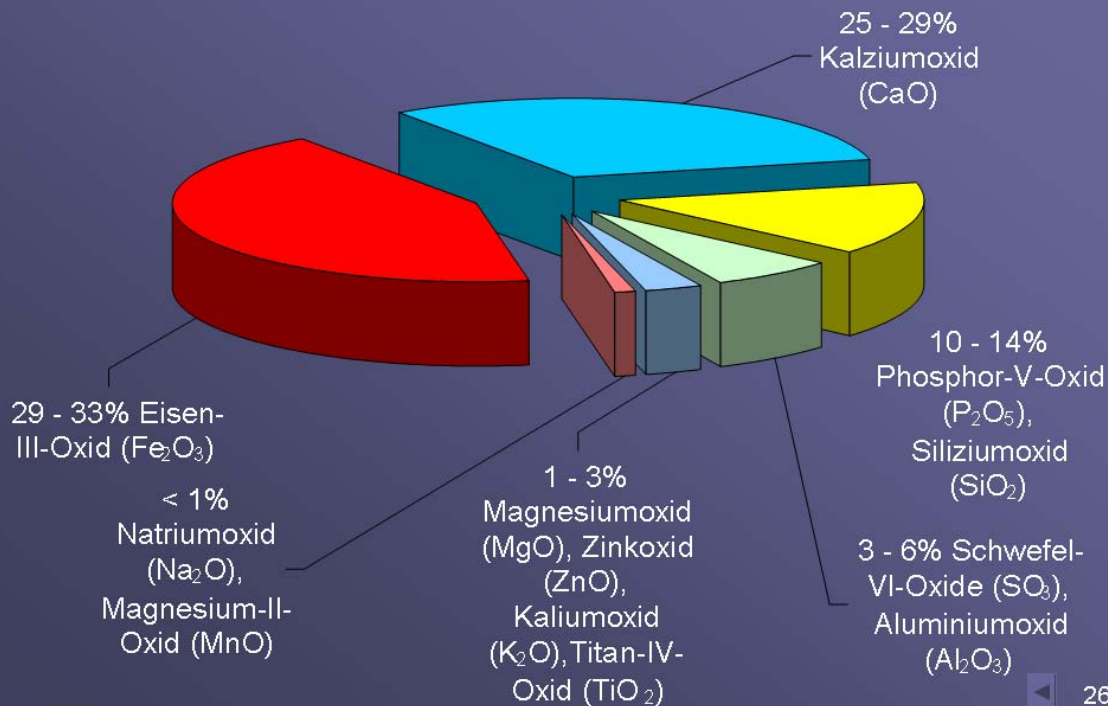
24

Belag auf der Membrane - organische Substanz: 32 %



25

Belag in den Schlitzten - organische Substanz: 50 %



26

Vermutete Gründe für die Belagsbildung

niedrig und **unterbelastete** Abwasserbehandlungsanlagen



Anlagerung von Bakterien auf den Membranen und in den Schlitzten/Löchern



Bakterien lösen den Weichmacher aus den EPDM-Membranen heraus

27

Erste Ergebnisse I

- ➔ **fadenförmige Mikroorganismen** keine Ursache der Belagsbildung
- ➔ **Belag** besteht aus **drei Schichten**:

oben: **EPS***, **Belebtschlamm** und **Biofilm**
(wie in Biofiltern und Tropfkörper)

Mitte: **EPS** und **Belebtschlamm**

Unten: **EPS**

* EPS = Extrazelluläre polymere Substanzen

- ➔ **erste Schicht** schwer mechanisch zu entfernen;
Teile der EPS können nicht entfernt werden

◀ 28

Erste Ergebnisse II

- ➔ Material in Schlitzen/Löchern ist **organischen** ($\approx 50\%$) und **anorganischen** ($\approx 50\%$) Ursprungs
- ➔ Der Belag auf den Membranen und in den Schlitzen besteht aus **anorganischem Material** wie **Magnesium, Silizium** u.a.
- ➔ **tendenziell**: der Druckverlust und die Shore A-Härte der Membranen steigen und der Weichmachanteil fällt vom Zu- zum Ablauf des Belebungsbeckens

◀ 29

Erste Ergebnisse III

- ➔ Bakterien lagern sich an/in den Schlitzen/Löchern der Membranen an und produzieren extrazelluläre polymere Substanzen (**EPS**)
- ➔ andere Bakterien finden **gute Bedingungen zur Anlagerung**
- ➔ Durch weiteres Wachstum werden die geschlitzten/gelochten Bereiche **überwuchert**
- ➔ Trennmittel (und Füllmittel) **Talkum** (Magnesiumsilikat $\text{Mg}_6(\text{OH})_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}]$) scheint die Belagsbildung zu unterstützen

◀ 30

Erste Ergebnisse IV

- ➔ Aufgrund des geringen Nährstoffangebots im Abwasser versuchen die **Bakterien** den organischen Anteil der Membranen (den **Weichmacher**) als **Nährstoffquelle** zu nutzen
- ➔ Diese Theorie kann dadurch erhärtet werden, dass der **Weichmacheranteil** vom **Zulauf** des Belebungsbeckens ((viel organisches Material) bis zum **Ablauf** (wenig organisches Material) **abnimmt**

◀ 31

Erste Ergebnisse V

	Bereich		neue Membrane
	belüftet	unbelüftet	
Druckverlust [mbar]	190	79	-
Shore A-Härte [-]	68	50	55
Weichmacheranteil [%]	26,6	35,8	35,0

◀ 32

Mögliche Maßnahmen zur Lösung der Probleme I

➔ **Reinigung der belegten Membranen** führt nicht immer zum langfristigen Erfolg, da der Verlust an Weichmachern und damit des Anstieg des Druckverlustes nicht reversibel ist

Außerdem:

auch **nach** einer **Reinigung** kommt es wieder zur **Belagsbildung**



33

Mögliche Maßnahmen zur Lösung der Probleme II

- ➔ Auswechseln der EPDM-Membranen **(nicht der Belüftungselemente !)** und Einsatz von hellen/weißen Silikonmembranen ist eine Alternative
- ➔ **der Markt wird entscheiden**, ob eine Reinigung der Membranen oder ein Austausch gegen helle/weiße Silikonmembranen zukünftig angewendet wird

◀ 34

Forschungsvorhaben Institut WAR

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Osnabrück),
unter Beteiligung von VATECH Wabag GmbH, Wien:

„Wissenschaftliche Erforschung der Ursachen der Belagsbildung auf Membrandruckluftbelüftungselementen in Abwasserbehandlungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung“

Laufzeit: 2 Jahre

◀ 35

Forschungsvorhaben II

Ziele:

- Inventarisierung der bekannten Fälle (Übertragung der österreichische Ergebnisse)
- möglicher Sauerstoffeintrag belegter Elemente
- langfristige Beobachtung neuer und gereinigter Elemente
- Strategien zur Reinigung belegter Elemente und Verhinderung der Belagsbildung neuer Elemente

36

NO MEMBRANES. NO PROBLEM.



Werbung für membranlose Sauerstoffelektroden

37

Veröffentlichung 2 **Wagner, M., von Hoessle, R., Loock, P.**
Newest developments concerning the biological
coating of membranes of fine bubble diffusers,
IWA Specialized Conference, 19.-21. September
2005, Krakau, Polen

Newest developments concerning the biological coating of membranes of fine bubble diffusers

M. Wagner*, R. von Hoessle** and P. Loock*

* Technische Universität Darmstadt, Institut WAR, Wastewater Technology,
64287 Darmstadt, Germany

(E-mail: m.wagner@ivw.tu-darmstadt.de)

**Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden, 65187 Wiesbaden, Germany

Abstract In the last years unusual biological coatings on membranes of fine bubble diffusers have been a problem on many wastewater treatment plants, as the oxygen supply of the micro-organisms is no longer guaranteed. Especially diffusers with membranes of EPDM show problems, although in few individual cases it is also reported on problems of diffusers of silicone. Investigations prove that the pressure loss and the Shore A-hardness of the EPDM-membranes increase while on the other hand their softener content decreases equally. The detected coatings on the membrane surfaces and in the slits or holes of the membranes show extra-cellular organic substances (EPS), which, compared with fibrillar/filamented EPS usually found on surfaces in wastewater treatment plants, are viscous to a much greater extent. Here, it has to be pointed out that a biological incrustation of foreign matter on all surfaces in the wastewater (that is also in the aeration tank) is normal. The harmful incrustation of foreign matter as described in the following is a different one. Besides chemical cleaning measures, the exchange of the EPDM-membranes against membranes of silicone would also be a possible measure to solve this problem. It is up to the market, if in the future, EPDM-membranes are cleaned or exchanged against membranes of silicone, however, it has to be taken into consideration that the loss of softener is irreversible.

Keywords fine bubble diffusers, diffuser membranes, coating, silicone-membranes, talcum

Introduction

For many years compressed-air systems with fine bubble diffusers for the oxygen supply of the micro-organisms have been installed in municipal wastewater treatment plants. Usually, perforated or slitted EPDM-membranes (EPDM = Ethylene propylene diene rubber) are mounted on supports out of which the compressed air streams. For approx. 3 years problems have arisen with this type of diffuser system, as on EPDM-membranes a harmful biological coating is produced, causing an increase of pressure loss of the diffusers and consequently an increase of pressure loss in the piping system, so that the blowers have to be stopped due to overheating (positive displacement blower) or reaching of the pump limit (centrifugal or turbo compressors) (WAGNER, 2003a und 2003b, WAGNER, 2004). Therefore, a sufficient oxygen supply of the micro-organisms is no longer guaranteed, so that it is feared that the discharge concentrations are exceeded. Simultaneously with the increase of pressure loss an uneven outgasing behaviour is noticed, which can especially be seen on the water surface of the aeration tank. Altogether this results in a reduced oxygen transfer rate and a substantial increase in power consumption of the aeration system. Figure 1 shows that the replacement of coated membranes by new membranes effects an immediate drop in power consumption which leads to remarkable savings in energy costs.

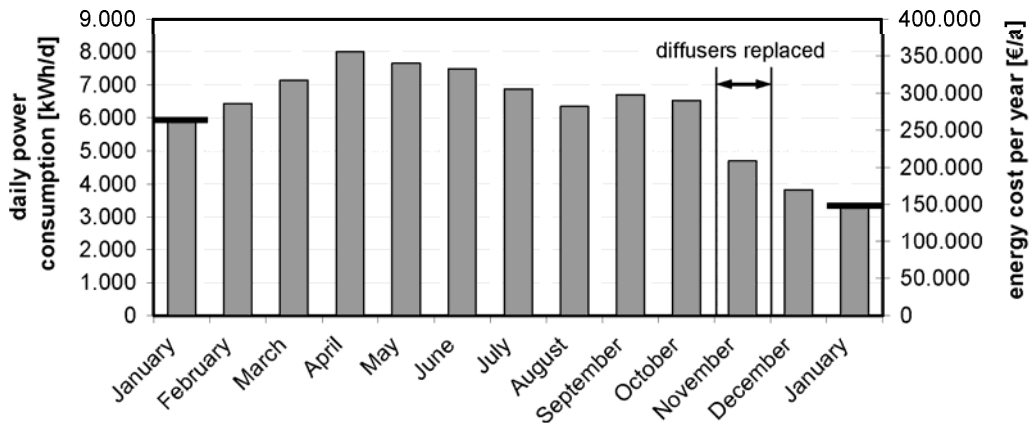


Figure 1: Power consumption of the aeration system (JARDIN, 2004)

The poor transfer rates are understandable when considering the outgasing behaviour of the diffusers. Figure 2 shows the outgasing of a new diffuser compared with a used diffuser with coated EPDM-membranes. For a better illustration of the outgasing behaviour tap water was used instead of air. The photos demonstrate the uneven outgasing of the used diffuser with a coated membrane. Figure 3 shows the upper side of a coated EPDM-membrane. Due to the biological growing the interior of the membranes is also coated (see figure 4). The phenomenon of coated EPDM-membranes occurs independent of the shape of diffusers (e.g. tube, disc, plate).

Recently, also problems with coated silicone membranes have been known. In diffuser systems with silicone membranes has also been noticed an increase in pressure in the piping system after a short operating time. But this minor increase in pressure is normal. However, if there are heavy increases in pressure, all the known problems show nearly exclusively that due to discharges of substances in the sewage system, these substances (e. g. manganese, oil, fat) combine with the normal grown biofilm and then cause coatings and cloggings in the pores (see figure 4).

Methods

To determine the described problems with diffusers with EPDM-membranes microscopic/macrosopic and chemical/physical tests of the coating on the membranes and in the slits or holes were carried out. Furthermore pressure loss, shore A-hardness and softener content of the EPDM-membranes were measured. In order to estimate an influence of the diffusing time on the pressures loss, the pressure losses were determined at an air flow rate of 8 m³/(m·h at STP) both after an aeration period of 2 hours and after 20 hours.

The shore A-hardness was determined according to DIN 53505 (2000), i. e. in a device with a so-called jut out indenter a definite load is pressed against the (even) sample surface, while the indenter presses a spring together dependent on the hardness of the sample. The resistance against the penetration of the indenter results from the characteristic curve of the spring, which is calibrated in shore hardness ranges from 0 to 100. The softener content of the EPDM-membranes is determined by the sum of the extractable components. The disintegrated material is weighed and extracted. After the extractive agent has fully evaporated, the extracted substance shall be calculated by the weight difference.



Figure 2: Outgasing of a new and a biologically coated EPDM-membrane diffuser

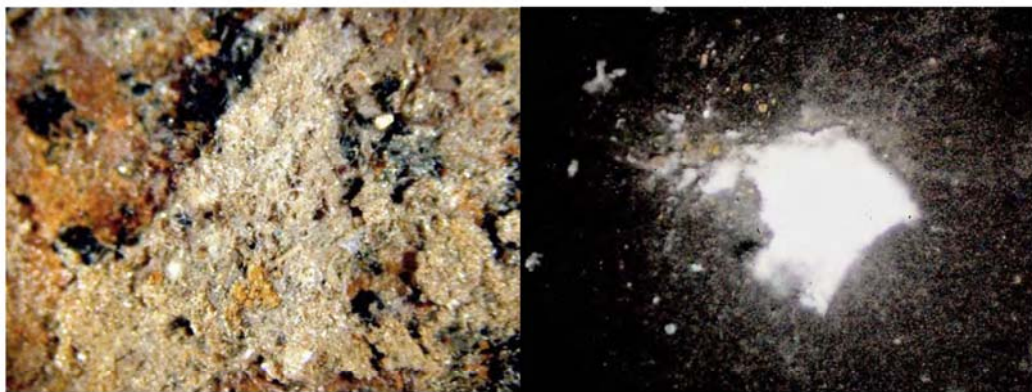


Figure 3: Upper side of a coated EPDM-membrane

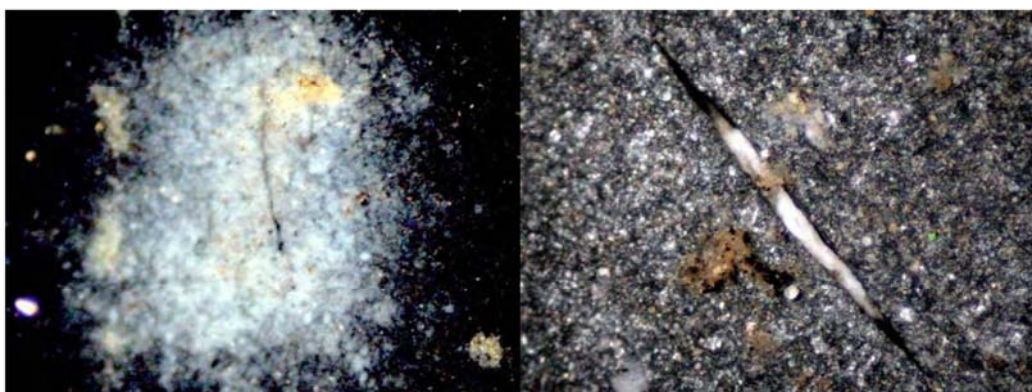


Figure 4: Interior side of a coated EPDM-membrane

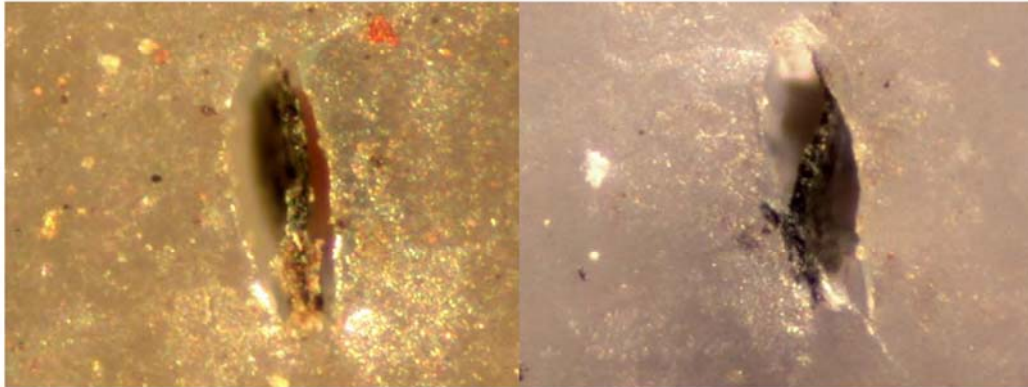


Figure 5: Slits of clogged silicone membranes

Results

The microscopic/macrosopic as well as the chemical/physical tests show that the coating on the EPDM membranes consists of two, partly three layers. Coating 1, directly on the membrane, consists of a highly viscous whitish/yellow matrix of extra-cellular polymeric substances (EPS-matrix), which is produced by bacteria in order to adhere to the EPDM-membranes. Because of this, this EPS-matrix is different to those fibrillar/filamented coatings usually found for example on pipings and other devices built in. The second layer (coating 2) mainly consists of activated sludge and other particles which have adhered to coating 1. The colour of this layer is reddish/brown and consequently corresponds to the colour of a normal activated sludge. Coating 3 can be called as biofilm coating. The micro-biology of this layer often consists of a shell ameba, sessiles, colony forming ciliates as for example epistylis and diatoms. Furthermore coating 3 shows a high share of fine grits (< 0.1 mm).

The results of the pressure loss measurements are summarized in figure 6, those of the shore A-hardness in figure 7, and in figure 8 are summarized the results of the measurements of the softener content of the membranes. All the three figures do not indicate absolute values but relative values with regard to brand-new and uncoated EPDM-membranes.

Figure 6 shows that the pressure loss increases up to 86 %. A longer lasting aeration (20 hours) does not give any substantial reduction of the pressure loss. An important fact is that the pressure loss increases from the inlet area of the activated sludge tank towards the outlet area. This observation can also be confirmed by pressure loss measurements at other wastewater treatment plants. According to the summarized results of the shore A-hardness determinations in figure 7 (again shown as relative values) a considerable increase of the shore A-hardness can be seen, while an increase of the hardness from the inlet of the activated sludge tank towards the outlet can be detected (from 124 % to 140 %). The measurements of the shore A-hardness herewith confirm the results of the pressure loss measurement (tendency).

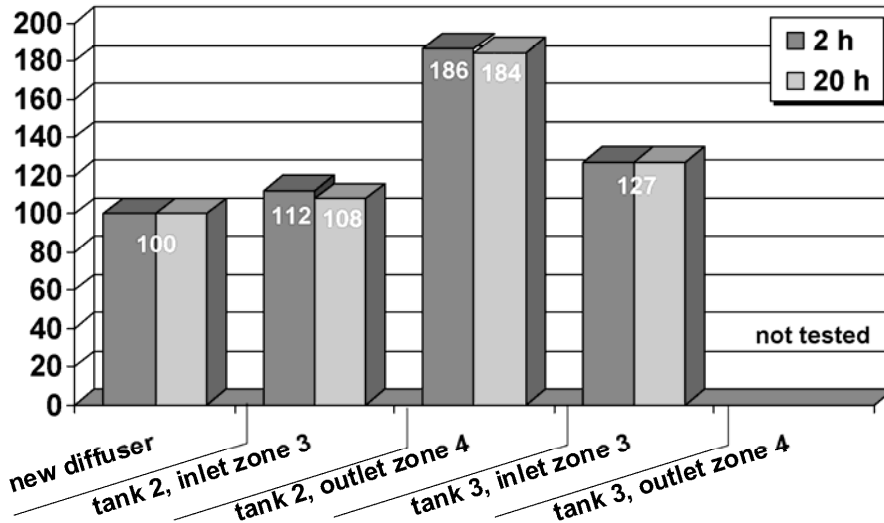


Figure 6: Relative pressure loss of the EPDM-membranes (tube diffuser) with an air flow rate of 8 m³/(m·h) at STP (WWTP A, relative values)

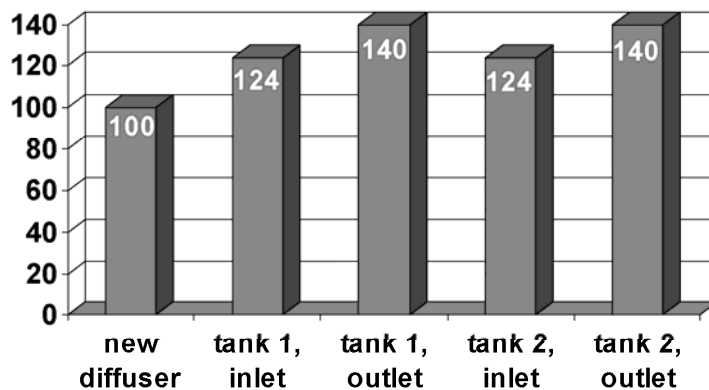


Figure 7: Relative Shore A-hardness of EPDM-membranes (WWPT B, relative values in %)

Tests were made in order to find out if the noticed increase of pressure loss and shore A-hardness also result from a loss of softener of the EPDM-membranes. The corresponding results in figure 8 show a reduction of the softener content of the coated EPDM-membranes up to 74 % compared to new uncoated EPDM-membranes. Furthermore a reduction of the softener content from the inlet towards the outlet of the activated sludge tank can be seen. Regarding this, the results of the measurements of the pressure loss and the shore A-hardness are confirmed.

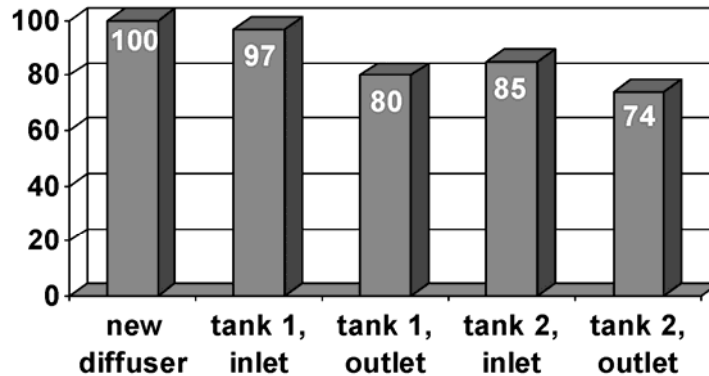


Figure 8: Softener content of EPDM-membranes (WWTP B, relative values in %)

Discussion

The tests carried out confirm the assumption that coatings are produced both on the EPDM-membranes themselves (figure 3) and also in the air slits or holes (figure 4). With the continuous increase of the coating, first single and afterwards more and more holes or slits will clog and consequently altogether less and less air bubbles will remain in the water. The consequence is a reduced oxygen transfer rate.

A possible reason of the coating on EPDM-membranes is the EPS-matrix usually found on surfaces in wastewater treatment plants. Compared to this, the extra-cellular polymeric substances on the EPDM-membranes and in the slits or holes are extremely viscous. As, besides primary organic parts (carbon), the coatings on the membranes as well as in the slits or holes also show inorganic constituents like magnesium, silica and others, the authors assume, that the separating agent (and also inactive filler) talcum (magnesium silicate $Mg_6(OH)_4[Si_8O_{20}]$), used when producing the membranes, support at least a first beginning of the coating.

Inside the folded burrs, edges etc., produced when perforating the air slits and holes, the organic/inorganic substances can stick on well. Superfine dust constituents and fibres from the sound absorbers and the dust filters of the blowers and compressors, input via the compressed air, will build up gradually inside this substance and consequently lead to a gradual clogging of the holes or slits. Bacteria will find optimum establishing and growing conditions inside the holes, as both water or moisture and also oxygen is available sufficiently.

Having established themselves both on the surface of the EPDM-membranes and in the slits or holes, the micro-organisms do not find any organic materials giving them the possibility to grow and to multiply. If these do not exist in the wastewater or only to a very small extent, the bacteria, seeking for a carbon source, turn towards the softener in the EPDM-membranes. Softener consist for the most part of organic material and can probably be used by the bacteria as carbon source after a certain adaptation time. This theory can be substantiated by the fact that the softener content in the EPDM-membranes decreases from the beginning towards the end of the activated sludge tank (see figure 8). In the inlet of an activated sludge tank bacteria find sufficient degradable organic carbon compounds in the water. At the outlet of an activated sludge tank this is no more guaranteed.

In order to solve the problems with coated membranes, the membranes can be cleaned on the one hand (see figure 9, left side, FREY, 2004; right side, von HOESSLE, 2004) or exchanged on the other hand. Cleaning procedures to remove the coatings have to be seen from a critical point, as

almost certainly not all organic/inorganic substances (including bacteria) which stick on the slits or holes are removed. The consequence is that the slits or holes clog again. According to tests on membranes cleaned with chemicals, a clogging has appeared again after few months. Even if it should be possible to remove all constituents from the slits or holes, a hardening of the membranes, which has already been effected due to the loss of softener, shall be irreversible.



Figure 9: Cleaning of EPDM-membranes

Besides a cleaning of the EPDM-membranes with the help of chemicals, an exchange of the clogged EPDM-membranes by membranes of silicone is also practiced. For production process reasons, membranes of silicone do not consist of any softener, which, as with EPDM-membranes, can dissolve out of the membranes. In order to prove that an exchange of the membrane materials can solve the clogging problems, there were made microscopic and macroscopic tests in a laboratory of silicone membranes which have been removed by divers from the activated sludge tanks of a wastewater treatment plant (300,000 PE) having problems with clogged EPDM-membranes and therefore installed silicone membranes. The silicone-membranes have been operated in the activated sludge tank for approx. 1 year. One can clearly see on figure 10 that, as expected, a coating also occurs on surfaces of the silicone-membranes. But in the holes or slits no clogging can be detected. This proof by example can be confirmed by many other wastewater treatment plants. In no case, where after a coating on EPDM-membranes a replacement by silicone-membranes was recommended by the first author, clogging problems have arisen afterwards.



Figure 10: Silicone-membrane after one year operation in a wastewater treatment plant

Prospect

With regard to the clarification of the reasons for the harmful coating on EPDM-membranes there are first realizations and theories. In no way one can say that the problem has been clarified definitely. So the question is, why this problem has arisen only approx. 3 years ago. Reasons could be given for example that changes of the operating mode of wastewater treatment plants (from the elimination of carbon compounds to the nutrient elimination with nitrification/de-nitrification and chemical/biological phosphorus elimination) or other additives used when producing EPDM-membranes could have supported the harmful coating. On the other hand you can argue that there have always been harmful coatings, but they were not known as such and detected as a hardening of the membranes. This regarding much research is still necessary in order to clarify this problem of harmful coating on EPDM-membranes.

Despite partly emotional discussions on the possibilities how to clean membranes compared to an exchange of the EPDM-membranes by silicone-membranes, it is at last up to the market to decide. If it turns out that, when cleaning the EPDM-membranes, the coating problem is solved permanently, the cleaning processes shall get more and more important compared to an exchange of EPDM-membranes by silicone-membranes. With regard to sustaining aspects in the wastewater technology a permanent use of cleaning chemicals in order to keep going the serviceability of EPDM-membranes of compressed-air diffusers is at least doubtful. With regard to a further use of EPDM-membranes, developments with bacteria resistant softeners seem to be the right road to follow.

References

- DIN 53505 (2000).** *Prüfung von Elastomeren. Härteprüfung nach Shore A und D.*
- Frey, W. and C. Thonhauser.** *Clogging and cleaning of fine-pore membrane diffusers* in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 69-77
- von Hoessle, R. (2004).** *Mikrobiologische Aspekte der Belagsbildung.* in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2
- Jardin, N. (2004).** *Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen.* in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2
- Wagner, M., R. von Hoessle (2003 a).** *Biological Coating of EPDM-Membranes of Fine Bubble Diffusers* in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 79-85
- Wagner, M. (2003 b).** *Biological Coating of Fine Bubble Diffusers with EPDM-Membranes* in: Proceedings WEFTEC 2003, 11.-15.10.2003 (Los Angeles)
- Wagner, M. (2004).** *Probleme mit Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen – eine Übersicht* in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Veröffentlichung 3	Wagner, M., Loock, P. Belagsbildung auf Membrandruckbelüftungselementen in Abwasserbehandlungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung, in: Belüftung von Belebungsbecken, Abschlussseminars zum DBU-Projekt "Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken", 8. Mai 2006, Osnabrück
---------------------------	---

BELAGSBILDUNG AUF MEMBRANDRUCKLUFTBELÜFTUNGSELEMENTEN IN ABWASSER-BEHANDLUNGSANLAGEN UND ABLEITUNG VON MAßNAHMEN ZUR BEHEBUNG

Prof. Dr.-Ing. Martin Wagner, Dipl.-Ing. Peter Loock

Institut WAR, Technische Universität Darmstadt, Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt

Email: m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de, p.loock@iwar.tu-darmstadt.de

1 Einleitung

In den meisten modernen Abwasserbehandlungsanlagen nach dem Belebungsverfahren wird die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen durch ein feinblasiges Druckluftbelüftungssystem sichergestellt. Eine zu jedem Zeitpunkt, also auch in Spitzenlastzeiten ausreichende Sauerstoffzufuhr ist die Grundlage für ein sicheres Einhalten der geforderten Ablaufgrenzwerte. Während in den siebziger und achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts noch vermehrt Oberflächenbelüftungssysteme (Kreisel und Walzen) zum Einsatz kamen, werden heute vorrangig feinblasige Druckluftbelüftungssysteme mit Belüftungsmembranen aus EPDM (es existieren verschiedene Materialmischungen) oder Silikon, teilweise auch aus PU (Polyurethan) genutzt. Als Vorteile der feinblasigen Druckluftbelüftung sind zum Einen die gegenüber der Oberflächenbelüftung erheblich reduzierten Lärm- und Geruchsbelästigungen und zum Anderen der höhere Sauerstofftrag [kg/kWh] in Reinwasser zu nennen. Der Nachteil von Druckluftbelüftungssystemen ist der relativ hohe Installationsaufwand durch Gebläsehaus, Rohrleitungen, Schieber, Belüftungsgitter, Rührwerke etc.

Seit einigen Jahren kommt es vorwiegend bei Belüftungsmembranen aus EPDM zu einem starken Rückgang der Leistungsfähigkeit der Belüftungselemente, wobei sowohl der Druckverlust der Belüftungselemente erhöht, als auch die Sauerstoffausnutzung herabgesetzt ist. Um trotzdem eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Belebungsstufe zu erreichen, müssen die Druckluftherzeuger größere Luftvolumenströme bei gleichzeitig erhöhtem Gegendruck liefern. Dies kann im Einzelfall zur Überlastung und zur Beschädigung der Druckluftherzeuger oder anderer Bauteile des Belüftungssystems führen. Ein deutlicher Anstieg des Energieverbrauchs ist jedoch in allen Fällen unvermeidbar. In diesem Zusammenhang wird häufig von einer verstärkten oder schädigenden Belagsbildung auf den Belüftungsmembranen berichtet [von Hoessle, 2004; Wagner und von Hoessle, 2003; Wagner, 2003].

An der Oberfläche der Belüftermembranen können während des Betriebes verschiedene Veränderungen auftreten. So kommt es in Einzelfällen durch zulaufenden (Stör-)Stoffe zu anorganischen bzw. nicht biologisch bedingten Ablagerungen wie z.B. Kalkausfällungen. Auch aus dem Inneren des Belüftungssystems können Störstoffe, wie Kondensat, Staub oder auch Fasern von defekten Luftfiltern der Gebläse an die Membran und in die Schlitze gelangen und so die Belüftungselemente schädigen. Auf Beschädigungen dieser Art wird hier, da sie sich in der Regel auf eine klar identifizierbare Einzelursache zurückführen lassen, nicht weiter eingegangen. Weiterhin wird die Belüftermembran durch biologische Effekte beeinflusst. So bildet sich auf ihr wie ausnahmslos auf allen im Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch als Nähr- und Impfmedium befindlichen Oberflächen ein Biofilm, der je nach Material und Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich gut anhaften kann. Dieser Belag ist in der Regel unproblematisch und hat keinen Einfluss auf den Betrieb des Belüftungssystems. Von dieser unschädlichen biologischen Belagsbildung abzugrenzen ist die Bildung eines schädigenden Biofilms. Dieser schädigende Biofilm wächst ausgehend von der Membranoberfläche gegen die austretende Druckluft in die Belüftungsschlitze hinein und gelangt dabei sogar bis auf die Rückseite der Belüftungsmembran, d.h. auf die dem Stützkörper zugewandte Luftseite. Die im Biofilm

vorhandene Bakterienmasse verstopft nun zum Einen selbst die Belüftungsschlitze, zum Anderen „fängt“ sie durch die Bildung einer stark adhesiven EPS (extrazelluläre polymere Substanz) weitere partikuläre und/oder anorganische Stoffe ein, die eine weitere Verdickung des Biofilms und den Verschluss der Belüftungsschlitze zur Folge hat. Als weiterer schädigender Effekt wird beobachtet, dass der Weichmacher aus EPDM-Membranen herausgelöst wird, was zur Aushärtung der Membran und dem Anstieg des Druckverlustes des Belüftungselementes führt. Dieser Effekt wird auf die Nutzung des Weichmachers als Kohlenstoffquelle für die Bakterienmasse des Biofilms zurückgeführt [Wagner, 2003].

Vor dem geschilderten Hintergrund der schädigenden Belagsbildung auf Belüftungselementen, hauptsächlich mit Membranen aus EPDM, genehmigte die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) ein Forschungsprojekt, das sich mit der „wissenschaftlichen Erforschung der Ursachen der Belagsbildung auf Druckluftbelüftungselementen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung“ beschäftigt (Projektnummer 20326). Die Projektziele sind:

- Ermittlung der Ursachen der Belagsbildung unter besonderer Berücksichtigung besonders belagsfördernder und Entwicklung belagsvermeidender Betriebsweisen von Abwasserbehandlungsanlagen
- Untersuchung der Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Reinigungsverfahren unter Berücksichtigung der veränderten Sauerstoffzufuhr belegter Membranen und einer möglicherweise frühzeitigen Wiederbelegung gereinigter Membranen
- unter Berücksichtigung aller Betriebs-, Reinigungs- und Austauschkosten soll eine Empfehlung für oder gegen den regelmäßigen Austausch belegter Membranen oder den Einsatz belagsfreier Membranwerkstoffe gegeben werden.

Im vorliegenden Beitrag werden im folgenden Kapitel zunächst die Ergebnisse von Untersuchungen an belegten Belüftungselementen mit EPDM-Membranen dargestellt. Danach werden anhand der Untersuchung von Silikonmembranen prinzipielle Zusammenhänge zwischen Belagsbildung und Leistungsfähigkeit von Belüftungselementen hergeleitet. Im Anschlusskapitel wird auf die Resultate von Langzeitversuchen unter Betriebsbedingungen eingegangen. Abschließend zeigt eine Sensitivitätsanalyse, wie sich die Effekte „Anstieg des Druckverlust“ und „Reduzierung des Sauerstoffeintrags“ auf den Energieverbrauch und die Belastung des betroffenen Belüftungssystems auswirken.

2 Untersuchung belegter Belüftungselemente mit EPDM-Membranen

Da der Ausbau von Belüftungselementen im laufenden Betrieb aus den Belebungsbecken stets mit einem sehr hohen Arbeits- und Logistikaufwand verbunden ist (i.d.R. Außerbetriebnahme der Becken, Bereitstellung von Personal, Hebewerkzeugen, Belüftungselemente etc.) sind belegte Belüftungselemente nur selten verfügbar. Deshalb können sich diese Untersuchungen nur auf Einzelfälle beschränken, sind jedoch auf andere Fälle übertragbar.

Bei der Untersuchung von EPDM-Membranen müssen einhergehend mit der Bildung von schädigenden biologischen Belägen die Effekte des Aushärtens und Schrumpfens des Materials betrachtet werden. Hierzu wurden verschiedene Belüftungsmembranen aus Belebungsbecken mit schädigender biologischer Belagsbildung auf ihren Gehalt extrahierbarer Substanzen untersucht. In diesen Substanzen sind neben weiteren nicht näher bestimmbar-

ren Stoffen auch die Weichmacher enthalten. Es ist anzunehmen, dass mit den extrahierbaren Stoffen weitgehend die (wenn auch langsam) biologisch abbaubaren Stoffe erfasst werden. Dabei zeigt sich, dass der Gehalt extrahierbarer Stoffe in den Belüftungsmembranen vom Zulaufbereich der Belebungsbeckens zum Ablaufbereich hin tendenziell abnehmen (s. Abbildung 1).

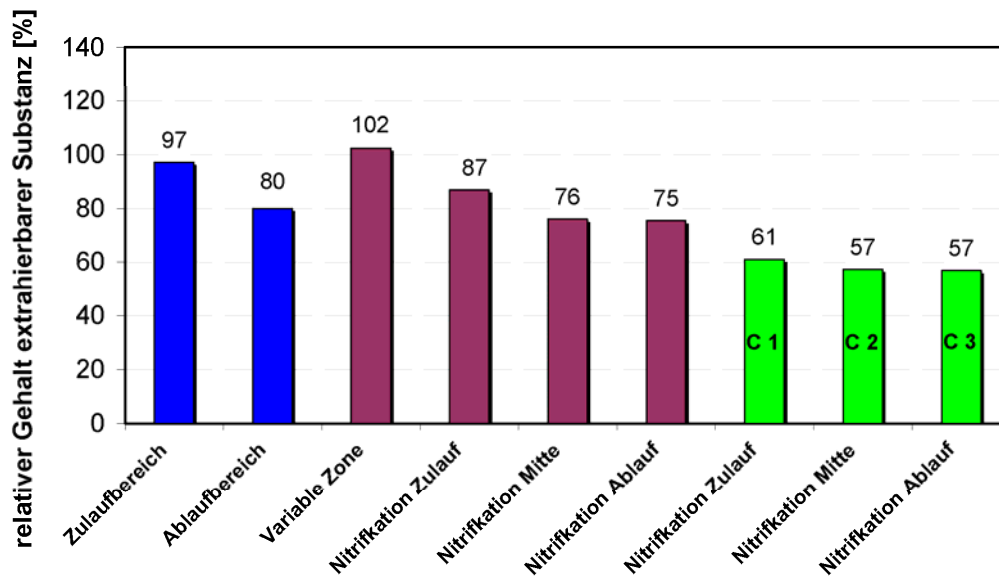


Abbildung 1 relativer Gehalt extrahierbarer Substanz (Neuzustand = 100 %)

Die Tatsache, dass der Gehalt an extrahierbaren Substanzen der Belüftungsmembranen vom Zu- zum Ablauf eines Belebungsbeckens abnimmt, ist als Hinweis darauf zu sehen, dass der in modernen, zur weitgehenden Stickstoffelimination bemessenen Abwasserbehandlungsanlagen auftretende Kohlenstoffmangel die Mikroorganismen dazu veranlasst, auch die schwer verfügbaren Kohlenstoffe aus den Belüftungsmembranen (Weichmacher) zu verwerten. Als Folge härtet die Membran zum Einen aus, zum Anderen schrumpft sie dabei aufgrund des Materialverlusts zusammen. So können im Extremfall insbesondere Rohrbelüftungselemente aufgrund des festen Auf liegens der Membran auf dem Stützkörper des Belüftungsrohres unbrauchbar werden. Bei Teller- und Plattenbelüftungselementen ist dagegen zu befürchten, dass durch die zunehmende Spannung der Membran bereits im unbelüfteten Zustand die Schlitze geöffnet werden, so dass beim Abschalten der Druckluftzufuhr Verunreinigungen in das Belüftungselement und das Rohrleitungssystem gelangen, die dann das Wachstum eines Biofilms im Inneren der Belüftungselemente und in den Schlitzen beschleunigen können.

In Abbildung 2 ist die Materialhärte der Belüftermembranen gemessen als Shore-A Härte nach DIN 53505 relativ zum Neuwert (= 100%) dargestellt. Die Gegenüberstellung der Abbildungen 1 und 2 zeigt, dass sich die Materialhärte umgekehrt proportional zum verbleibenden Anteil der extrahierbaren Substanz (hier ist der Weichmacher enthalten) entwickelt. Es lässt sich jedoch bei keinem der untersuchten Belüfter ein direkter Zusammenhang mit dem Druckverlust herleiten. Zudem fällt z.B. der Druckverlust der Belüftungselemente C 1 nach C 3 hin trotz ansteigender Materialhärte ab, wie der Vergleich der Abbildungen 2 und 3 zeigt. Demnach muss der sehr hohe

Druckverlust sowohl durch die Materialhärte als auch durch die (von der Beckenzone abhängige) Verstopfung der Schlitzte verursacht werden.

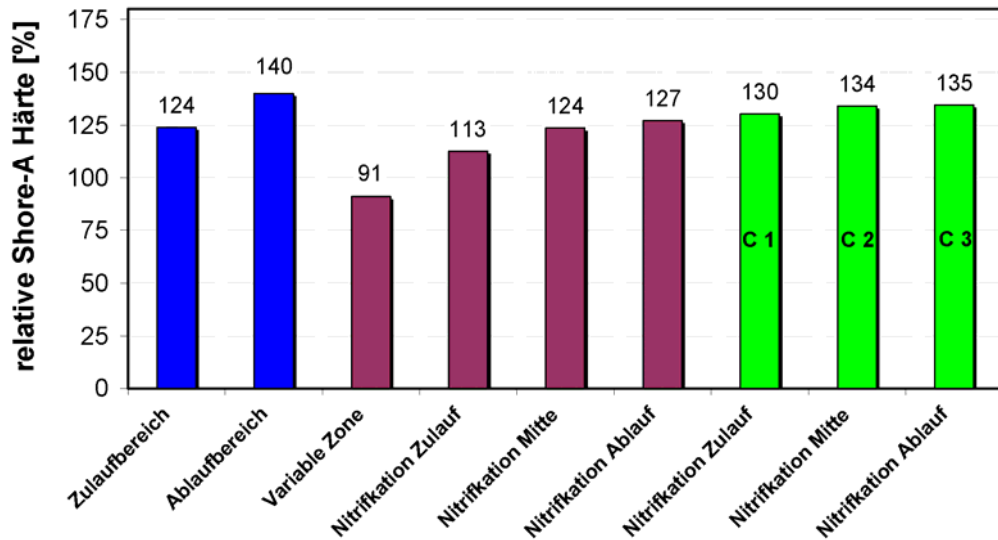


Abbildung 2 Shore-A Härte der Membranen aus verschiedenen Belüftungsbeckenzonen

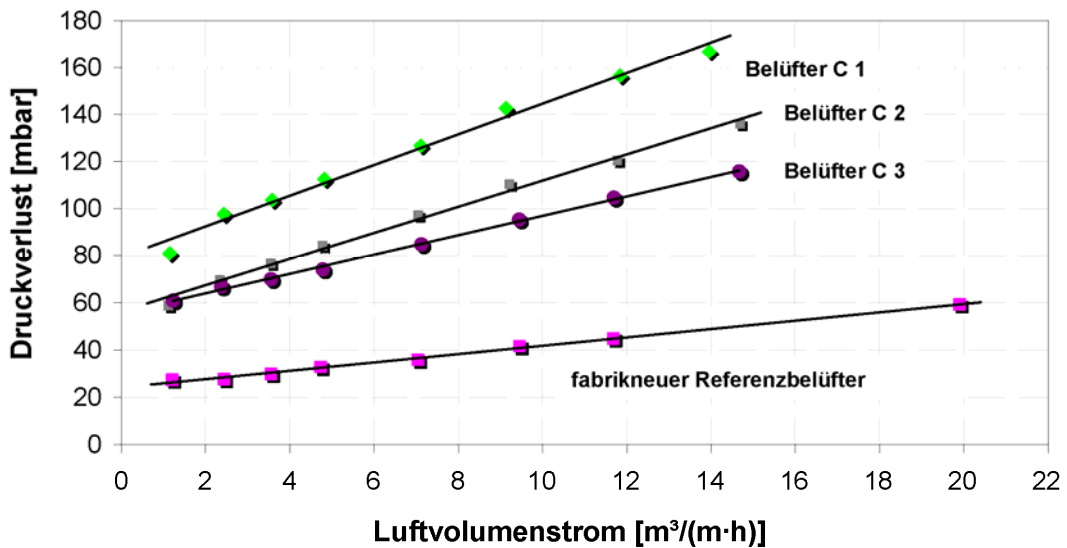


Abbildung 3 Druckverlust der Belüfter C 1 bis C 3

In Abbildung 4 ist die Sauerstoffausnutzung (%/m) der untersuchten Belüftungselemente im belegten Zustand für verschiedene Luftvolumenströme dargestellt. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die absolute Höhe der dargestellten Sauerstoffausnutzung nicht direkt auf die Bedingungen im realen Belebungsbecken übertragbar

ist, da sie stark von den Bedingungen des Messstandes (rundes Becken, 0,90 cm Einblastiefe, einzelnes Belüftungselement etc.) beeinflusst ist. Die Messwerte können deshalb nur im Vergleich betrachtet werden.

Der Vergleich der Sauerstoffausnutzung eines neuen und der belegten Belüftungselemente zeigt, dass weder der gestiegene Druckverlust noch die hohe Materialhärte und/oder der Verlust des Weichmachers die Sauerstoffausnutzung signifikant beeinflussen. Überraschend ist, dass Belüfter C 1 trotz des mit Abstand höchsten Druckverlusts sogar eine deutlich höhere Sauerstoffausnutzung erzielt als ein vergleichbarer fabrikneuer Belüfter. Der dahinter stehende Mechanismus ist unklar, möglicherweise handelt es auch um einen „positiven Ausreißer“.

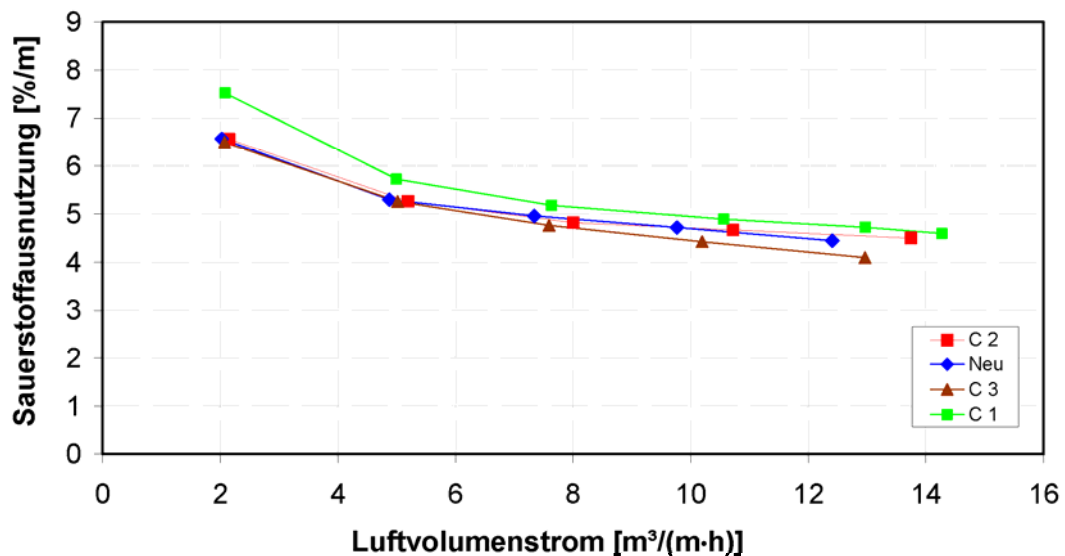


Abbildung 4 Sauerstoffausnutzung der Belüfter C1 bis C3

3 Untersuchung belegter Belüftungselemente mit Silikonmembranen

Bei den im Folgenden dargestellten Belüftungselementen handelt es sich um Elemente mit Silikonmembranen. Effekte, welche durch das Aushärten oder das Schrumpfen der Membran ausgelöst werden, wie es bei belegten EPDM-Membranen auftritt, sind somit ausgeschlossen. An Hand der Untersuchung dieser Belüftungselemente aus kommunalen Belebungsanlagen soll dargestellt werden, dass sich die Bildung von Belägen sehr unterschiedlich auf die Leistung eines Belüftungselementes (Sauerstoffeintrag) auswirken kann.

Zunächst wurden die Sauerstoffausnutzung und der Druckverlust der Belüftungselemente im belegten Zustand ohne eine vorherige Reinigung bestimmt. Nach einer intensiven Reinigung mittels Hochdruckreiniger (kaltes Wasser) wurden die Sauerstoffeintragsmessungen wiederholt. Zusätzlich wurden unter dem Mikroskop Aufnahmen der Schlitzen angefertigt. Bei Belüfter A handelt es sich um ein Plattenbelüftungselement; Belüfter B ist ein Rohrbelüftungselement.

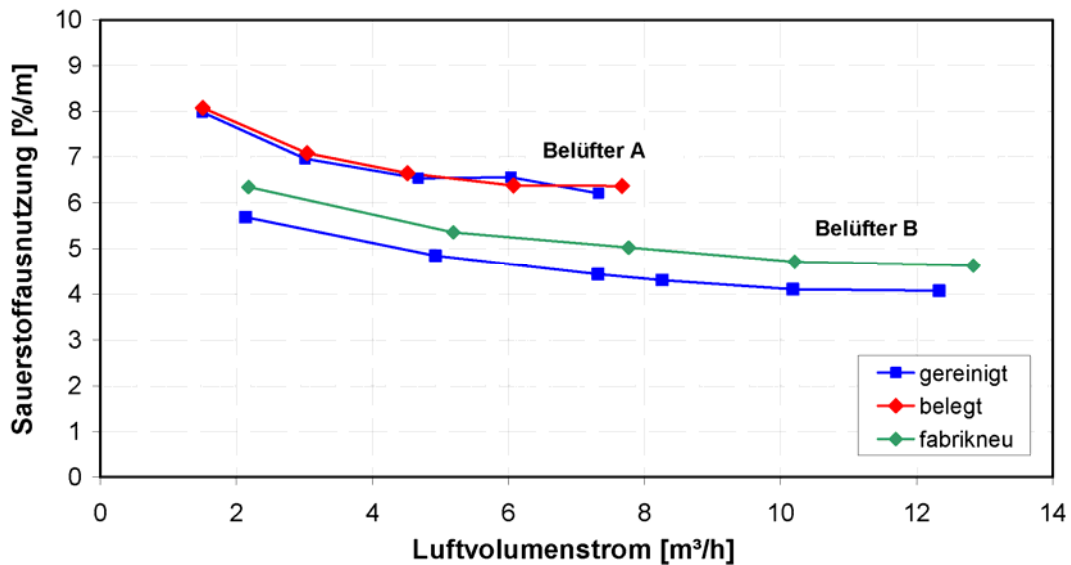


Abbildung 5 Sauerstoffausnutzung der Belüfter A und B

Abbildung 5 verdeutlicht, dass die Bildung von Belägen keinen generellen Einfluss auf die von den Belüftungselementen erzielte Sauerstoffausnutzung aufweist. Bei Belüftungselement A bleibt die Sauerstoffausnutzung vor und nach der Reinigung unverändert. Fabrikneue Belüfter gleicher Bauart konnten mangels Verfügbarkeit nicht untersucht werden. Die Messung von Belüftungselement B zeigt demgegenüber ein anderes Bild. Hier ist die Sauerstoffausnutzung trotz einer intensiven Reinigung noch etwa 10 % geringer als im Neuzustand. Für den Betrieb der Abwasserbehandlungsanlage bedeutet dieser Rückgang, dass bei unverändertem Sauerstoffbedarf der Belüftungsstufe dauerhaft entsprechend 10 % höhere Luftvolumenströme zugeführt werden müssen. Die Ursache hierfür zeigt die mikroskopische Untersuchung des Belüftungselementes (Abbildung 6). Bei der Interpretation der dargestellten Bilder muss berücksichtigt werden, dass die Membranen bei der Anfertigung der Bilder um ein vielfaches stärker gedehnt werden als im Betrieb. Daher erscheinen die hier gezeigten Schlitze weit geöffnet, während sie im Betrieb nahezu geschlossen sind. Es ist dennoch zu erkennen, dass trotz intensiver Hochdruckreinigung Rückstände in den Belüftungsschlitzen verbleiben, die das Abgasverhalten und damit einhergehend die Sauerstoffausnutzung verschlechtern können.



Abbildung 6 Belüftungsschlitze der Silikonmembran des Belüfters B nach der Hochdruckreinigung

Der Druckverlust von Belüftungselement A konnte durch die Reinigung nicht gesenkt werden und liegt ca. 100 % über dem Ausgangswert eines baugleichen, fabrikneuen Referenzbelüftungselementes. Der Druckverlust des Belüftungselementes B (s. Abbildung 7) konnte dagegen im Mittel um ca. ein Drittel reduziert werden, so dass die Druckverluste nach der Reinigung trotz verbleibender (Rest-)Beläge in den Schlitzen sehr nahe an die Neuwerte heranreichen. Der dargestellte maximale Druckverlust von 103 mbar stellte für den sicheren Betrieb des Belüftungssystems bisher (noch) kein Problem dar. Zum Einen sind bei der Dimensionierung der Druckluftherzeuger entsprechende Sicherheitsaufschläge auf den zu erwartenden Gegendruck und den Luftvolumenstrom enthalten, zum Anderen führt die übliche Teilauslastung der Belebungsstufe zusammen mit den in der Bemessung nach dem DWA-Arbeitsblatt A 131 enthaltenen Sicherheiten zu erheblichen Leistungsreserven des Belüftungssystems. Dennoch sind an dieser Anlage z.Z. Maßnahmen zur Begrenzung des Gegendrucks in Planung.

Zusammenfassend bestätigt der Vergleich der Silikonbelüftungselemente A und B, dass bei der Bildung von Belägen die Effekte Druckanstieg und Rückgang der Sauerstoffausnutzung unabhängig voneinander auftreten können. So kann anhand eines Druckanstiegs nicht auf einen reduzierten Sauerstoffeintrag geschlossen werden. Auch ein Rückgang des Sauerstoffeintrags bedingt nicht zwangsläufig einen Anstieg des Gegendrucks.

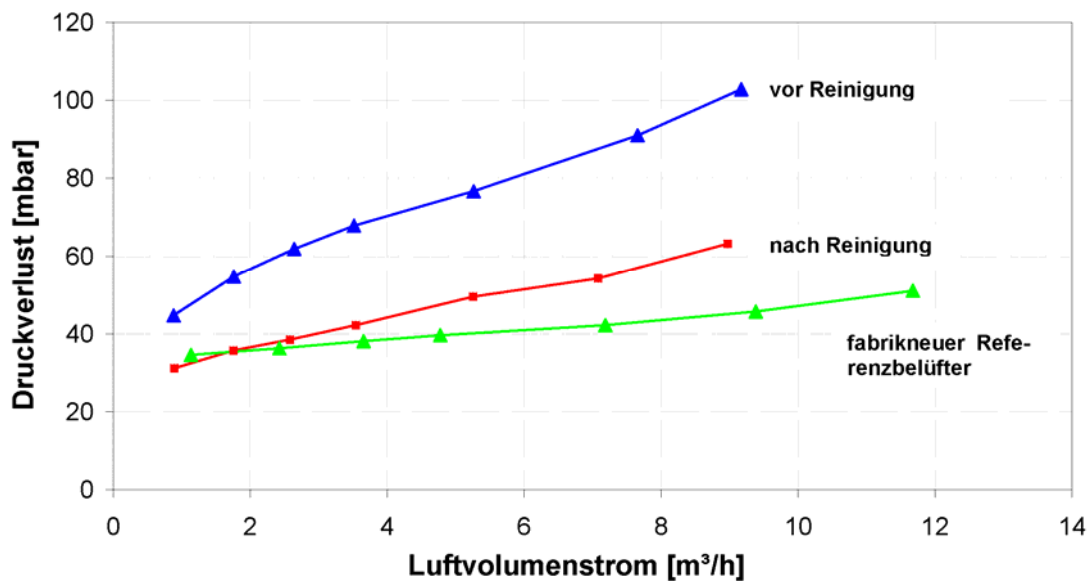


Abbildung 7 Druckverlust des Belüftungselementes B vor und nach der Hochdruckreinigung

4 Langzeitversuche unter Betriebsbedingungen

Um die Bildung von Belägen unter realen Betriebsbedingungen beobachten zu können, wurden in den Belüftungsbecken ausgewählter Abwasserbehandlungsanlagen jeweils 18 Belüftungselemente auf heraushebbaren Belüftungsgittern zusätzlich zu den bereits im Belebungsbecken installierten Belüftungselementen betrieben. Es wurden dabei gezielt Anlagen ausgewählt, bei denen bereits Probleme mit den Belüftungselementen aufgetaucht sind. Zum Einsatz kamen dabei Teller-, Platten- und Rohrbelüftungselemente aus verschiedenen EPDM- und Silikonmaterialien. Die Belüftungselemente befinden sich 0,5 bis 0,75 m unterhalb des Wasserspiegels des belüfteten Nitrifikationsbeckens. Da nach bisherigen Erkenntnissen [Wagner und von Hoessle, 2003] davon auszugehen ist, dass ein starker Kohlenstoffmangel im Belebungsbecken die Bildung schädigender Beläge fördert, wurden die zusätzlichen Belüftungselemente möglichst nahe am Ablauf des Belebungsbeckens installiert, da dort der Kohlenstoffmangel am größten ist. Jedes Belüftungselement ist mit jeweils einer eigenen Zuluftleitung, einer Entwässerungsleitung sowie einer eigenen Luftvolumenstrommessung versehen (s. Abbildung 8).



Abbildung 8 Messaufbau der Langzeitversuche

Der Druckverlust wird mit einem mobilen Druckmessgerät bestimmt, das zwischen den Belüftungselementen umgesteckt wird. Während der Messungen werden neben dem Druckverlust auch die Änderungen des Wasserstandes sowie die Luft- und Wassertemperaturen zur genauen Bestimmung der dem Belüftungselement zugeführten Betriebsluftmenge aufgezeichnet. Die Druckluft wird von einem ausschließlich für diese Versuche bereitgestelltem Drehkolbengebläse erzeugt, so dass die Testbelüfter vollkommen unabhängig vom Druckluftsystem des Belebungsbeckens betrieben werden können. Bei den Messungen werden Luftvolumenströme von 20, 40, 60, 80 und 100 % der vom Hersteller empfohlenen maximalen Betriebsluftmenge eingestellt und der Druckverlust nach jeweils 45 Minuten Betrieb bei konstantem Luftvolumenstrom bestimmt. Anhand einer Regressionsrechnung wird daraus der Druckverlust bei 50 % des maximalen für den Betrieb empfohlenen Luftvolumenstroms berechnet. Die Abbildungen 9 bis 11 zeigen den Verlauf des Druckverlusts der Testbelüftungselemente.

Schon nach wenigen Tagen steigt der Druckverlust aller Plattenbelüftungselemente unabhängig vom eingesetzten Membranmaterial deutlich an (s. Abbildung 9). Die Silikonbelüftungselemente werden aufgrund ihres Schlitzbildes mit geringeren Luftvolumenströmen betrieben als die EPDM-Belüftungselemente. Bei vergleichbarer Luftbeaufschlagung ist daher der Druckverlust der Silikonbelüftungselemente ca. 4 mbar höher als im Diagramm dargestellt. Dennoch liegen die Silikonmembranen hinsichtlich des Druckverlustes dauerhaft etwas günstiger als die EPDM-Membranen. Obwohl eines der beiden Silikonbelüftungselemente bei sehr viel geringeren Neuwerten beginnt, erreicht es im Dauerbetrieb innerhalb weniger Wochen praktisch die gleichen Druckverlustwerte wie das andere Silikonbelüftungselement. Bei allen Membranmaterialien sind Anstiege des Druckverlusts zwischen 100 % und 150 % zu beobachten.

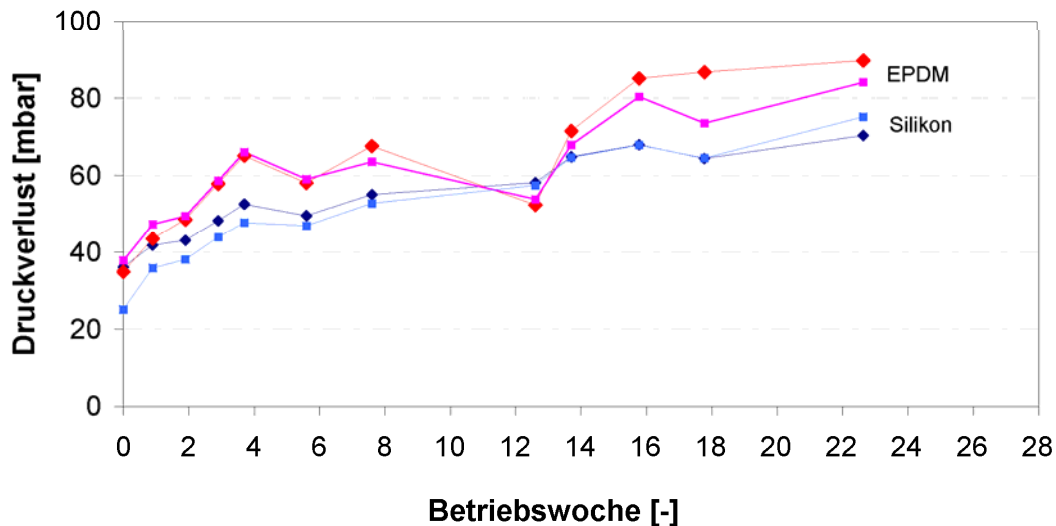


Abbildung 9 Entwicklung des Druckverlusts bei Plattenbelüftungselementen

Bei den Tellerbelüftungselementen (Abbildung 10) wurde neben EPDM und Silikon auch eine so genannte bakterienbeständige EPDM-Mischung eingesetzt. Von diesem Material wird erwartet, dass es das Schrumpfen und Aushärten infolge eines belagsbedingten Masse-/Weichmacherverlustes ebenso wie Silikon verhindert. Die Tellerbelüftungselemente können ebenso wie die Rohrbelüftungselemente unabhängig vom Material mit gleichen Luftvolumenströmen beaufschlagt werden. Auch bei den Tellerbelüftungselementen ist wie bei den Plattenbelüftungselementen deutlich zu erkennen, dass der Druckverlust in den ersten Versuchswochen schnell ansteigt. Bereits nach 4 Wochen hat sich der Druckverlust gegenüber dem Neuzustand bei allen Belüftungselementen verdoppelt. Anders als bei den Plattenbelüftungselementen liegen hier die Silikonmembranen von Beginn an deutlich ungünstiger als die EPDM-Membranen, wobei sich mit zunehmender Versuchsdauer der Abstand noch vergrößert. Die Belüftungselemente mit Membranen aus bakterienbeständigem EPDM zeigen Druckverluste in etwa der gleichen Größenordnung wie die Belüftungselemente mit konventionellem EPDM. Ihr zu Versuchsbeginn etwas geringerer Druckverlust wurde durch den in der Anfangsphase stärkeren Druckanstieg aber wieder ausgeglichen.

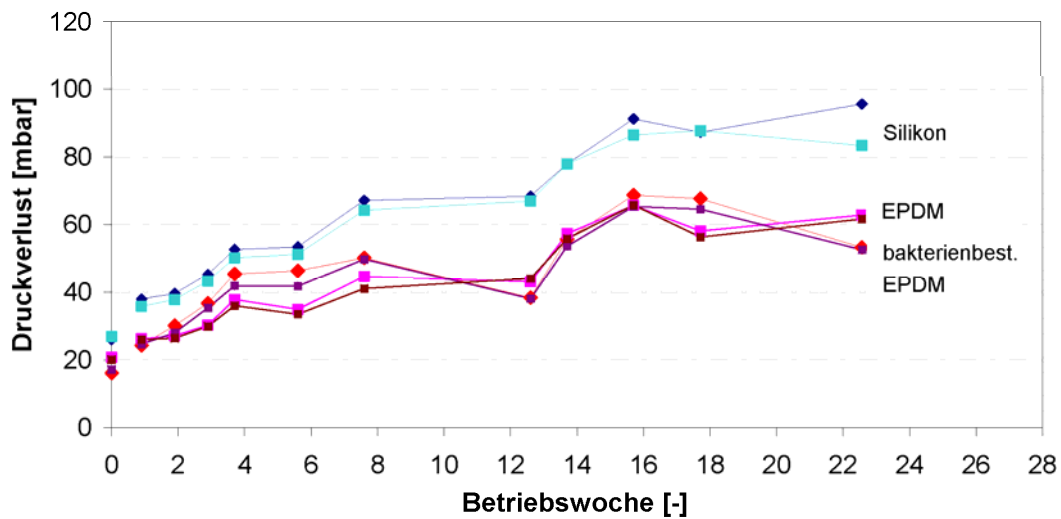


Abbildung 10 Entwicklung des Druckverlusts bei Tellerbelüftungselementen

Die Untersuchungen mit Rohrbelüftungselementen (Abbildung 11) wurden mit zwei verschiedenen Silikonmembranen (weißes und klares Silikon) und zwei verschiedenen, nicht näher zu bestimmenden EPDM-Mischungen eingesetzt. Die klare Silikonmischung liegt beim Druckverlust nur geringfügig höher als das weiße Silikon. Beide Silikone haben von Beginn an höhere Druckverluste als die Belüftungselemente mit EPDM-Membranen und entwickeln sich zudem deutlich ungünstiger. Die beiden EPDM-Mischungen sind hinsichtlich ihres Druckverlusts nicht eindeutig zu unterscheiden, da die Streuung zwischen den Belüftungselementen gleichen Materials größer ist, als der Unterschied zwischen den Membranmaterialien. Zu beobachten ist weiterhin, dass der Druckverlust der Silikonbelüftungselemente sehr stark schwankt. Scheinbar ist ihr Druckverlust von anderen Zusammenhängen abhängig als der Druckverlust der Belüftungselemente mit EPDM-Membran.

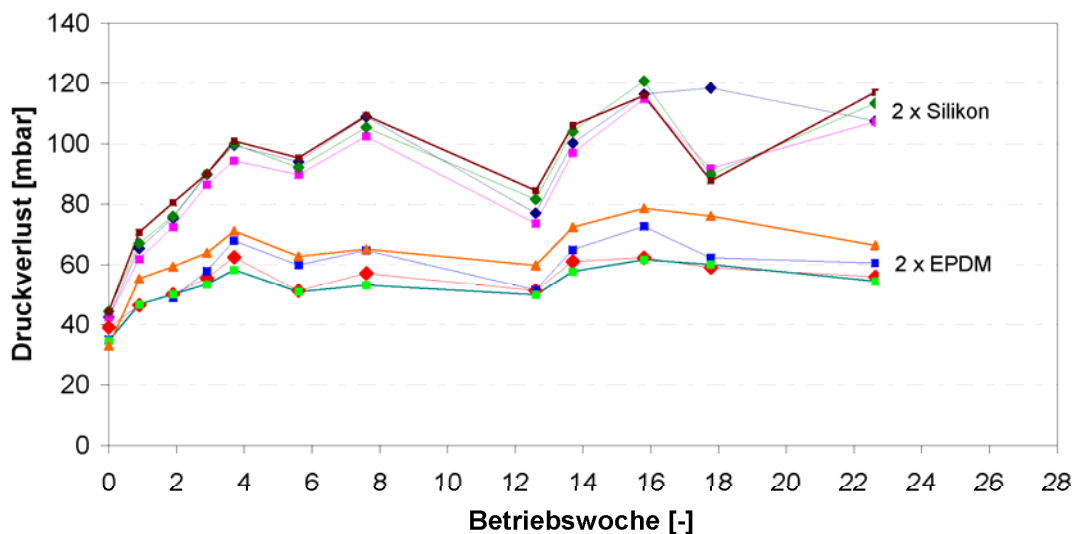


Abbildung 11 Entwicklung des Druckverlusts bei Rohrbelüftungselementen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Druckverluste der Belüftungselemente trotz des z.T. deutlichen Anstiegs noch kein Niveau erreicht haben, wo sicher von einer schädigenden Belagsbildung ausgegangen werden kann. Ob es hierzu kommt wird erst die weitere Fortführung der Versuche auch auf weiteren Abwasserbehandlungsanlagen zeigen.

Bis zum jetzigen Zeitpunkt weisen die Silikonmembranen von Teller- und Rohrbelüftungselementen ausgehend von bereits erhöhten Neuwerten noch immer höhere Druckverluste auf als die EPDM-Membranen. Dagegen haben die Plattenbelüftungselementen mit Silikonmembranen von Anfang an geringe Druckvorteile gegenüber den Elementen mit EPDM-Membran. Die bei den Tellerbelüftungselementen eingesetzte bakterienbeständige EPDM-Mischung unterscheidet sich bisher nicht von der konventionellen EPDM-Mischung. Bei Verwendung anderer Membranen anderer Hersteller können sich andere Druckverluste ergeben, so dass sich auch die Reihenfolge hinsichtlich der Größe des Druckverlustes ändern kann.

Weiterhin zeigt sich, dass die Druckverluste zu Betriebsbeginn innerhalb weniger Tage stark ansteigen. Somit ist der im Neuzustand eines Belüfters gemessene Druckverlust für die Beurteilung des Betriebsverhaltens gänzlich ungeeignet und lässt keinen Schluss auf den im Betrieb zu erwartenden Druckverlust zu. Der Druckverlust des Neuzustandes sollte deshalb kein Kriterium bei der Entscheidung für oder gegen einen bestimmten Belüftungselementtyp sein.

5 Bilanzierung des belagsbedingten Energiemehrverbrauchs

Um die Auswirkungen eines Ansteigenden Druckverlustes der Belüftungselemente und des Rückgangs der Sauerstoffausnutzung auf den Energieverbrauch eines Belüftungssystems zu beurteilen, wird nachfolgend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Prinzipiell ist dabei der Energieverbrauch neben seiner ursprünglichen Bedeutung auch

als Indikator für die mechanische und ebenso die daraus resultierende thermische Belastung der Drucklufizerzeuger bzw. deren Komponenten (Motoren, Getriebe, Verdichterstufen) anzusehen, so dass der Energieverbrauch als zur Abwasserreinigung notwendiges „Übel“ nur solange steigerungsfähig ist, bis die schwächste Komponente des Belüftungssystems dem steigendem Energiebedarf nicht mehr stand hält. Im Ergebnis kommt es, falls keine vorgeschalteten Sicherungsmaßnahmen greifen, entweder zum Überhitzen der Antriebe bei Drehkolbengebläse (Motoren und Getriebe) oder Turboverdichter erreichen ihre Pumpgrenze.

Bei der Aufstellung der Sensitivitätsanalyse sind einige Zusammenhänge mehr oder weniger stark vereinfacht zu berücksichtigen. Der Druckverlust der Belüftungselemente beträgt im Neuzustand bei mittlerer Beaufschlagung ca. 30 mbar. Die Druckverluste des Rohrleitungssystems werden vereinfacht als konstant angenommen und betragen ebenfalls 30 mbar. Der Energieverbrauch der Drucklufizerzeuger ergibt sich für Drehkolbengebläse vereinfacht aus der Multiplikation von Luftvolumenstrom und dem zu überwindendem Gegendruck des Belüftungssystems, der sich wiederum aus dem hydrostatischem Wasserdruck, den Rohrreibungsverlusten und dem Druckverlust der Belüftungselemente zusammensetzt. Eine genauere Berechnung mit einem detaillierteren Ansatz für Turboverdichter zeigte, dass die Unterschiede zwischen Drehkolben und Turboverdichter kleiner als 1 % sind. Sie werden deshalb nicht dargestellt. Der Anteil der Belüftungselemente am gesamten Gegendruck liegt je nach Grad der belagsbedingten Druckerhöhung und der Einblastiefe zwischen 3,6 % (8 m Einblastiefe, keine Erhöhung des Druckverlusts, kein Rückgang der Sauerstoffausnutzung) und 25 % (4 m Einblastiefe, 300 % Druckerhöhung des Belüfters, Rückgang der Sauerstoffausnutzung auf 70 % des Ausgangswertes).

Bewirkt die Belagsbildung ausschließlich einen Anstieg des Druckverlusts der Belüftermembran, ohne dabei die Sauerstoffausnutzung zu verändern, bleibt der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom konstant. Der Energieverbrauch steigt entsprechend des gesamten zu überwindenden Gegendrucks, der sowohl von der Einblastiefe (hydrostatischer Wasserdruck oberhalb der Schlitzöffnungen = 98,1 mbar/m) als auch dem Druckverlust des Belüftungselementes abhängt, an (s. Abbildung 12). Bei geringer Einblastiefe wirkt sich die Belagsbildung folglich (relativ gesehen) deutlich stärker aus als bei hoher Einblastiefe. So nimmt bei Anlagen mit geringer Einblastiefe von 4,0 m der Energieverbrauch bei einem 300-prozentigen Anstieg des Druckverlusts der Belüfter der Energieverbrauch um 20 % zu, während bei 8,0 m Einblastiefe nur ein Anstieg um 11 % erreicht wird.

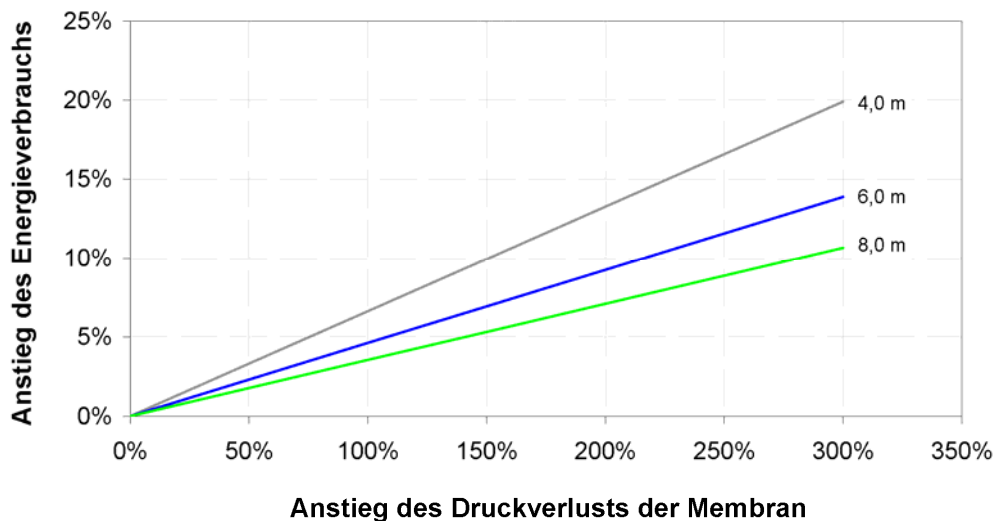


Abbildung 12 Energieverbrauch des Belüftungssystem bei ansteigendem Druckverlust des Belüfters

Tritt zusätzlich zum erhöhten Gegendruck auch eine reduzierte Sauerstoffausnutzung der belegten Belüftungselemente auf, sind weitere Effekte zu berücksichtigen, so dass entsprechend folgende Annahmen getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom umgekehrt proportional zur Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente verhält. Mit steigendem Luftvolumenstrom erhöht sich zudem sowohl bei neuen als auch bei gebrauchten bzw. belegten Belüftungselementen der Druckverlust. Dabei wird zwischen minimaler und maximaler Beaufschlagung eines Belüftungselementes eine Erhöhung des Druckverlustes um 100 % bezogen auf den mittleren Druckverlust angesetzt. Die Druckverluste des Rohrleitungssystems werden wiederum vereinfacht als konstant angenommen. Es zeigt sich (s. Abbildung 13), dass das Zusammenwirken beider Effekte den Energieverbrauch sehr schnell spürbar ansteigen lässt. Steigt der Energieverbrauch z.B. bei einem 200-prozentigen Anstieg des belüfterbedingten Druckverlusts noch um 9 % an, so steigt er bei einer zusätzlich um 10 % reduzierten Sauerstoffausnutzung bereits um 22 % an (bei 6,0 m Einblastiefe). Eine veränderte Sauerstoffausnutzung wirkt sich unabhängig von der Einblastiefe direkt auf den Energieverbrauch aus, während der Einfluss des ansteigenden Druckverlusts, wie bereits gezeigt wurde, stark von der Einblastiefe abhängt.

Somit ist zusammenzufassen, dass ein erhöhter Energieverbrauch und betriebliche Probleme durch die Überlastung des Belüftungssystems besonders bei Belebungsbecken mit geringer Einblastiefe zu erwarten sind, da sich hier sowohl der Rückgang der Sauerstoffausnutzung als auch der ansteigende Gegendruck deutlich auf die Belastung der Druckluftherzeuger auswirken. Bei tiefen Becken mit großer Einblastiefe steigt aufgrund des dominierenden Anteils des hydrostatischen Wasserdrucks am Gesamtdruck der Energieverbrauch durch den Anstieg des Druckverlusts der Belüfter weniger stark an als in flachen Becken. Deshalb resultiert der Anstieg des Energieverbrauchs dieser Belüftungssysteme primär aus zunehmenden Luftvolumenströmen, wie Abbildung 13 zeigt.

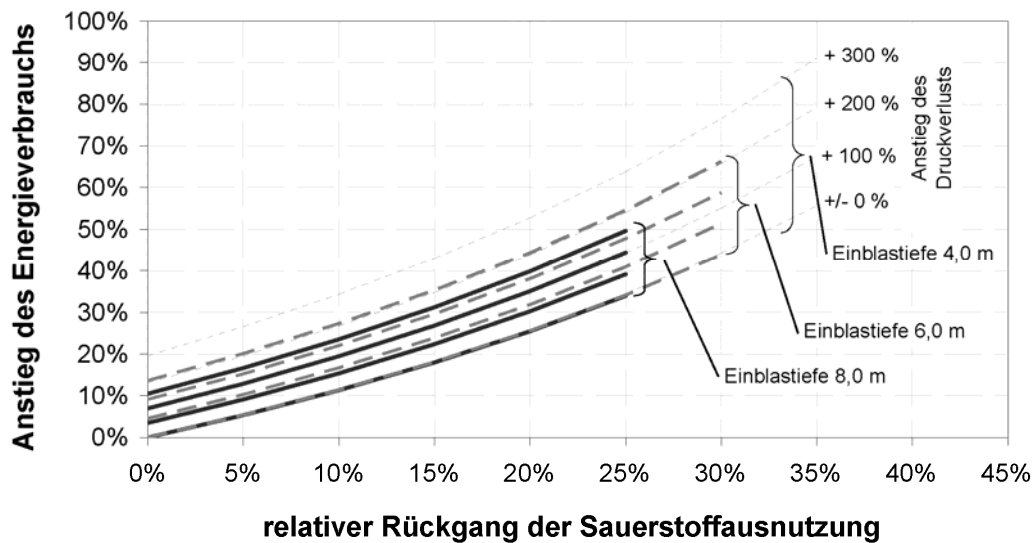


Abbildung 13 Energieverbrauch bei verringerter Sauerstoffausnutzung und erhöhtem Druckverlust der Belüftungselemente (für jede Einblastiefe sind Linien mit +/-0%, 100%, 200% und 300% Druckanstieg der Belüftungselemente dargestellt)

Praktisch werden die oben angeführten Effekte durch Tages-, Wochen- und saisonale Schwankungen überlagert, so dass sie sich einer direkten Messung während des laufenden Betriebs entziehen. Der Vergleich mit den Beobachtungen einer kommunalen Kläranlage des Ruhrverbands [Jardin, 2004] (s. Abbildung 14) zeigt dennoch, dass es sich bei den im vorliegenden Beitrag dargestellten Werten sehr wohl um praktisch auftretende Größenordnungen handelt. Die monatsweise Darstellung des durchschnittlichen täglichen Energieverbrauchs des Belüftungssystems lässt trotz der saisonalen Schwankungen erkennen, dass der Energieverbrauch bei Austausch der belegten Belüftungselemente gegen baugleiche neue Elemente mit Silikonmembran schlagartig sinkt. Da sich die Belastungssituation der Kläranlage nicht verändert hat, kann anhand des Vergleichs der Januarzahlen bilanziert werden, dass die belegten Belüftermembranen einen Anstieg des Energieverbrauchs von ca. 45 % bewirkten. Eine Nachrechnung der veröffentlichten Daten dieser Anlage führt zu dem Ergebnis, dass sich bei einem Druckanstieg der Belüfter von ca. 360 % und einer Einblastiefe von 5,5 m die Sauerstoffausnutzung um mehr als 15 % reduziert haben muss. Dabei wurde jeweils die Hälfte des zusätzlichen Energieverbrauchs für die Erhöhung des Luftvolumenstroms und die Erhöhung des Gegendrucks benötigt.

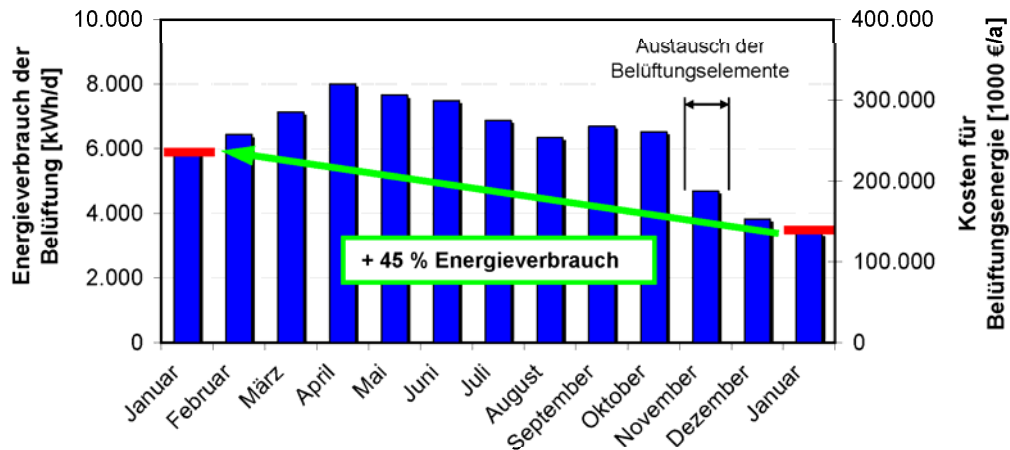


Abbildung 14 Anstieg des Energieverbrauchs einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage [Jardin, 2004]

6 Zusammenfassung

Die Untersuchung gebrauchter einzelner Belüftungselemente zeigt, dass die belagsbedingten Effekte Anstieg des Druckverlusts und Verlust des Sauerstoffeintrags voneinander getrennt betrachtet werden müssen. So kann von einem erhöhten Druckverlust nicht auf einen Rückgang der Sauerstoffzufuhr geschlossen werden. Dabei wurde auch gezeigt, dass durch die Reinigung mittels Hochdruckreiniger zwar der Druckverlust reduziert werden kann, aber aufgrund der in den Schlitzen verbleibenden Beläge die Sauerstoffzufuhr nicht immer wiederhergestellt wird.

Langzeitversuche zeigen, dass der Druckverlust in der ersten Betriebsphase sehr schnell ansteigt. Somit lässt sich anhand des Druckverlusts des Neuzustandes keine Aussage über die Höhe des Druckverlusts im Dauerbetrieb herleiten. Teller- und Rohrbelüftungselemente mit Silikonmembran schneiden bis zum jetzigen Zeitpunkt, wo es noch nicht zu einer schädigenden Belagsbildung gekommen ist, beim Anstieg des Druckverlustes schlechter ab als Belüftungselemente mit EPDM-Membranen. Lediglich bei Plattenbelüftungselementen weisen Silikonmembranen geringe Druckvorteile auf. Tellerbelüftungselemente mit Membranen aus bakterienbeständigem EPDM sind bisher gegenüber den klassischen EPDM-Membranen ohne Vor- und Nachteil. Bei Verwendung anderer Membranen anderer Hersteller können sich andere Druckverluste ergeben, so dass sich auch die Reihenfolge hinsichtlich der Größe des Druckverlustes ändern kann.

Die abschließende Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Anstieg des Druckverlusts in Belebungsbecken mit geringer Einblastiefe zu einem höheren Anstieg Energieverbrauchs führt, als in Becken mit großer Einblastiefe. Dies liegt insbesondere daran, dass der Anteil des Druckverlusts der Belüftungselemente am Gesamtdruckverlust des Belüftungssystems mit steigender Einblastiefe abnimmt. Ein Abfall der Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente bewirkt hingegen unabhängig von der Einblastiefe eine Erhöhung des Energieverbrauchs des Belüftungssystems, näherungsweise in der Höhe ihres Rückgangs. Demnach ist bei Anlagen mit kleinerer Einblastiefe eher mit einem

Anstieg des Energieverbrauchs und Betriebsproblemen infolge der Effekte einer schädigenden Belagsbildung zu rechnen als bei Anlagen mit großer Einblastiefe.

7 Literatur

DIN 53505 (2000)

Prüfung von Elastomeren. Härteprüfung nach Shore A und D, Deutsches Institut für Normung e.V.

Frey, W. (2004)

Reinigung von Belüftermembranen, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

von Hoessle, R. (2004)

Mikrobiologische Aspekte der Belagsbildung, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Jardin, N. (2004)

Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen, in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR, Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, Industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2

Wagner, M., R. von Hoessle (2003)

Biological Coating of EPDM-Membranes of Fine Bubble Diffusers, in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 79-85

Wagner, M. (2003)

Biological Coating of Fine Bubble Diffusers with EPDM-Membranes in: Proceedings WEFTEC 2003, 11.15.10.2003, Los Angeles

Veröffentlichung 4 **Wagner, M., Loock, P.,
Betriebskosteneinsparung durch Optimierung von
Belüftungseinrichtungen, in: 78. Darmstädter
Seminar, „Neue Maschinen und verfahrenstechnische
Möglichkeiten zur Einsparung von Betriebskosten bei
der Abwasserbehandlung“, WAR-Band 176,
2. November 2006, Darmstadt**

BETRIEBSKOSTENEINSPARUNG DURCH OPTIMIERUNG VON BELÜFTUNGSEINRICHTUNGEN

Martin Wagner, Peter Looock (Darmstadt)

1 Einleitung

Das Belebungsverfahren wird weltweit in verschiedenen konstruktiven und verfahrenstechnischen Ausprägungen zur Reinigung von kommunalem und industriellem Abwasser eingesetzt. Insbesondere in Abwasserbehandlungsanlagen mit Stickstoff- und Phosphorelimination sind ein ausreichend bemessenes und betriebssicheres Belüftungssystem sowie entsprechende Mischeinrichtungen wesentliche Voraussetzungen für die Einhaltung geringer Ablaufkonzentrationen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit. Bei Abwasserbehandlungsanlagen mit Nitrifikation/Denitrifikation und getrennter anaerober Schlammbehandlung werden heute 40 % bis 50 % des Gesamtenergieverbrauchs der Abwasserbehandlung für die Belüftung aufgewendet [Reichert, 2001]. Vor diesem Hintergrund wird klar, dass Anlagenbetreiber dem Betrieb und der Optimierung des Belüftungssystems als Kernkomponente des Belebungsverfahrens besondere Aufmerksamkeit widmen müssen.

Im vorliegenden Beitrag werden zunächst kurz die Grundlagen der Belüftungstechnik erläutert. Anschließend wird auf die Kostenrelevanz der Belüftung im Zusammenhang der biologischen Abwasserreinigung eingegangen. Danach wird auf die zu erwartende Leistungsfähigkeit von feinblasigen Druckluftbelüftungssysteme und Oberflächenbelüftungssystemen eingegangen und Richtwerte für Sauerstoffzufuhr- und Sauerstofftragswerte moderner Anlagen anhand der modifizierten Richtwerttabelle vorgestellt. Weiterhin werden Optimierungsmöglichkeiten der Steuerung und des Betriebs von Belüftungssystemen aufgezeigt. Dabei wird auch auf Betriebsprobleme von Belüftungssystemen, insbesondere der schädigenden Belagsbildung auf feinblasigen Druckluftbelüftungselementen und deren Einfluss auf den Energieverbrauch eingegangen. Eine kurze Zusammenfassung schließt den Beitrag ab.

2 Sauerstoffverbrauch bei der biologischen Abwasserreinigung

Belüftungssysteme haben prinzipiell zwei Aufgaben. Zum einen sollen sie die Bakterienmasse möglichst effektiv mit dem zum biologischen Abbau der im Abwasser enthaltenen Schmutzstoffe notwendigen Sauerstoff versorgen, zum anderen sollen sie eine ausreichende Durchmischung des Belebungsbeckens gewährleisten, um das Absetzen des belebten Schlammes zu verhindern. In zeitweise unbelüfteten Becken oder Becken mit geringer Belüftungsintensität müssen deshalb zusätzlich Rührwerke installiert sein. Der Sauerstoffverbrauch der biologischen Abwasserbe-

handlung setzt sich aus vier Verbrauchsanteilen entsprechend den unterschiedlichen Stoffwechselforgängen der Mikroorganismen zusammen.

➤ **aerobe Kohlenstoffatmung**

Der Sauerstoffverbrauch wird durch die Oxidation der abbaubaren organischen Kohlenstoffverbindungen verursacht und ergibt sich daher aus der dem Belebungsbecken zufließenden organischen Schmutzfracht $B_{d,BSB}$ [kg BSB₅/d].

$$OV_{d,C,Abbau} = 0,56 \cdot B_{d,BSB} \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

➤ **endogene Atmung**

Sie bezeichnet die zur reinen Lebenserhaltung der Bakterienmasse erforderliche Grundatmung und wird durch das Schlammalter t_{TS} [d], den Temperaturfaktor F_t ($F_t = 1,072^{\wedge(T-15)}$) und die zufließende organische Schmutzfracht $B_{d,BSB}$ bestimmt. Je höher das Schlammalter und die Wassertemperatur sind, desto größer wird die endogene Atmung. Sowohl die aerobe Kohlenstoffatmung als auch die endogene Atmung hängen somit direkt vom Zulauf der Belebungsbecken ab. Eine entsprechend sorgfältige Ermittlung der zukünftigen organischen Belastung ist daher für eine punktgenaue Bemessung des Belüftungssystems genauso wichtig wie für die Bemessung der Beckenvolumina.

$$OV_{d,C,endogen} = B_{d,BSB} \cdot 0,15 \cdot t_{TS} \cdot F_t / (1 + 0,17 \cdot t_{TS} \cdot F_t) \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

➤ **Nitrifikation**

Die Oxidation von Ammonium über Nitrit zu Nitrat wird als Nitrifikation bezeichnet. Die hierfür benötigte Sauerstoffmenge ergibt sich aus der Masse des zu oxidierenden Stickstoffs $B_{d,N}$ [kg N/d].

$$OV_{d,N} = 4,3 \cdot B_{d,N} \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

➤ **Denitrifikation („Rückgewinn“)**

Bei der Denitrifikation wird anstelle von freiem molekularem Sauerstoff der gebundene Nitratsauerstoff zur Oxidation organischer Substanz genutzt. Der Sauerstoffverbrauch der aeroben Kohlenstoffatmung (s.o.) verringert sich entsprechend der Fracht des zu denitrifizierenden Stickstoffs $B_{d,D}$ [kg N/d]. Eine möglichst weitgehende Denitrifikation (z.B. durch maximale Größe der anoxischen Beckenzone) ist daher sowohl zur Senkung der Stickstoffablaufwerte als auch der Reduktion des Sauerstoffverbrauchs wünschenswert.

$$OV_{d,D} = 2,9 \cdot B_{d,D} \quad [\text{kg O}_2/\text{d}]$$

➤ **Stoßfaktoren**

Da die Zulaufganglinien üblicherweise einen ausgeprägten Tagesgang aufweisen, müssen bei der Bemessung des Belüftungssystems zur Abdeckung der Spitzenzeiten Stoßfaktoren berücksichtigt werden. Die Bewirtschaftung des Zulaufs durch den Betrieb von Speicher-, Misch- und Ausgleichsbecken kann bei der Ermittlung der Stoßfaktoren berücksichtigt werden.

Abbildung 1 zeigt die Massenbilanz des Kohlenstoffs (angegeben als CSB) bei der biologischen Abwasserreinigung für eine Anlage mit Stickstoffelimination und anaerober Schlammstabilisierung (links) sowie für eine Anlage mit Stickstoffelimination und simultaner aerober Schlammstabilisierung (rechts). Mit einer einstündigen Vorklärung werden dem Belebungsbecken der Anlage mit getrennter Schlammfäulung 90 g/(E·d) CSB zugeführt, von denen 52 g/(E·d) CSB unter Sauerstoffverbrauch oxidiert werden müssen. Hinzu kommen der Sauerstoffverbrauch für die endogene Atmung der Bakterienmasse und der Sauerstoffverbrauch der Stickstoffelimination. Das Belüftungssystem muss jederzeit in der Lage sein den gesamten Sauerstoffbedarf inklusive der Bedarfsspitzen abzudecken. Bei der Abwasserbehandlungsanlage mit simultaner aerober Schlammstabilisierung (rechts) werden dem Belebungsbecken aufgrund der fehlenden Vorklärung etwa 120 g/(E·d) CSB zugeführt. Hiervon müssen 72 g/(E·d) CSB unter Sauerstoffverbrauch oxidiert werden. D.h. bei der aeroben Schlammstabilisierung muss ein deutlich größerer Anteil (60 % gegenüber 43 %) des dem Belebungsbecken zulaufenden Kohlenstoffs oxidiert werden, als bei getrennter Schlammfäulung. Hinzu kommen der Sauerstoffverbrauch für die endogene Atmung der Bakterienmasse und der Sauerstoffverbrauch der Stickstoffelimination, wobei aufgrund des höheren Schlammalters die endogene Atmung bei der aeroben Stabilisierung höher ist als bei der Anlage mit getrennter Schlammfäulung. In Kapitel 5 wird auf die Anpassung des Schlammalters zur Einsparung von Belüftungsenergie vertieft eingegangen.

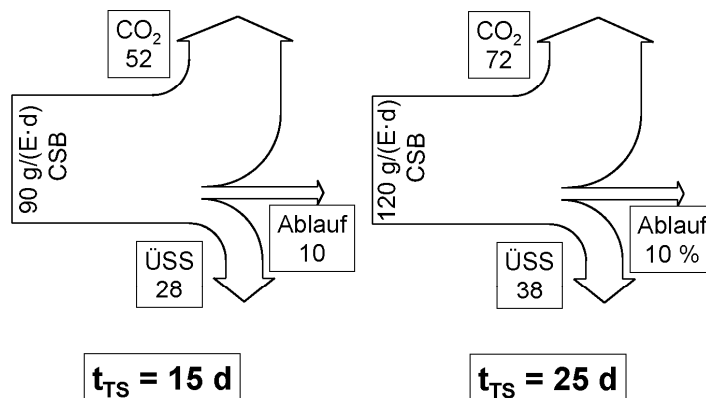


Abbildung 1: Beispiel einer CSB-Bilanz von Belebungsanlagen mit unterschiedlichen Schlammaltern [Jardin, 2001]

An diesem Beispiel wird deutlich, dass sich der Sauerstoffbedarf einer Abwasserbehandlungsanlage aus einer Vielzahl verschiedener Abhängigkeiten ergibt. Diese müssen sowohl bei der Planung als auch im Betrieb berücksichtigt werden, um eine Minimierung des Sauerstoffverbrauchs und somit der Belüftungskosten zu erzielen.

3 Kostenrelevanz der Belüftungstechnik bei der Abwasserbehandlung

Abbildung 2 zeigt die Betriebskosten der Teilprozesse der Abwasserbehandlung von Abwasserbehandlungsanlagen unterschiedlicher Größenklassen (GK, nach AbwV). Es zeigt sich, dass die Kosten der biologischen Reinigung (Betrieb der Belebungs- und Nachklärbecken inkl. Rückführungen, evtl. Abluftbehandlung, Fällmittelstation) von ca. 30 % bei Abwasserbehandlungsanlagen der Größenklasse 1 auf 15 % bei Anlagen der Größenklasse 5 abnehmen. Dies liegt zum einen daran, dass auf großen Anlagen optimierte Belüftungssysteme zum Einsatz kommen, zum anderen nimmt aber auch die Zahl der Energieverbraucher durch die höhere Zahl der Behandlungsstufen (z.B. Schlamm entwässerung etc.) zu.

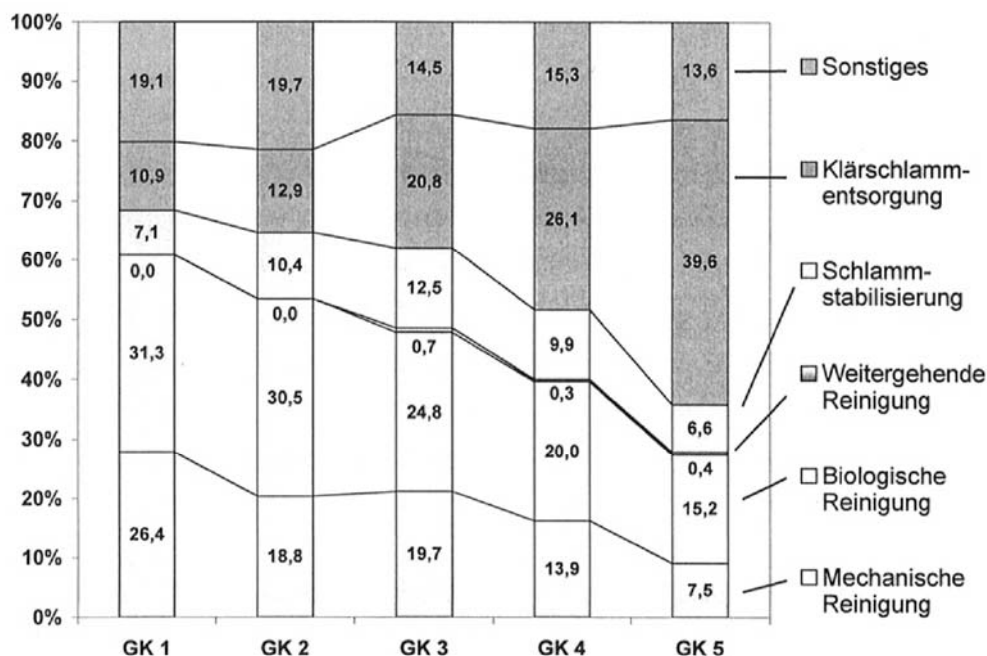


Abbildung 2: Aufteilung der Betriebskosten in Teilprozesse der Behandlung [Reicherter, 2003]

Der Energiebedarf moderner Belebungsanlagen wird maßgeblich von den Verbrauchern der Belebungsstufe bestimmt (s. Abbildung 3). Hierzu gehören im Wesentlichen neben den Rezirkulationspumpen die Belüftungs- und Mischeinrichtungen. Die maschinelle Ausrüstung des Belebungsbeckens macht demnach etwa drei Viertel des Gesamtenergiebedarfs von Abwasserbehandlungsanlagen aus. Daher muss für eine Reduzierung des Energieverbrauchs immer zunächst der Betrieb des Belüftungssystems auf Optimierungsmöglichkeiten hin untersucht werden. Auf die Jahreskosten mit speziellem Bezug auf die planerische Auswahl des Belüftungssystems wird in Kapitel 4.3 noch einmal detailliert eingegangen.

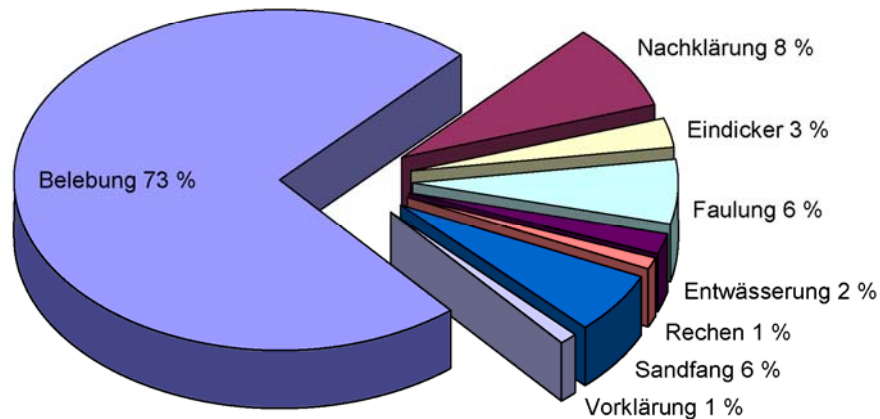


Abbildung 3: Anteile der einzelnen Verfahrensstufen am Energiebedarf von Belebungsanlagen [nach Bohn, 1997]

4 Leistungsfähigkeit von Belüftungssystemen

4.1 Grundlagen

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Belüftungssystemen erfolgt über die Sauerstoffzufuhr und den dafür notwendigen relativen Energiebedarf. Die Sauerstoffzufuhr wird gemäß dem noch gültigen, aber voraussichtlich noch dieses Jahr in überarbeiteter Version erscheinenden DWA-Merkblatt M 209 (2006) gemessen als:

- Sauerstoffzufuhr OC [kg O₂/h]
(demnächst: standard oxygen transfer efficiency SOTR)
- spezifische Sauerstoffzufuhr OC_{L,h} [g O₂/(m³·m)]
(demnächst: specific standard oxygen transfer efficiency SSOTE)
- spezifische Sauerstoffausnutzung OC_{A,h} [%/m]
(demnächst: specific standard oxygen transfer efficiency SSOTE%)

Die Wirtschaftlichkeit wird anhand des Parameters

- Sauerstoffertrag ON [kg O₂/kWh]
(demnächst: standard aeration efficiency SAE)

beurteilt.

In kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen werden sowohl Druckluftbelüftungssysteme als auch Oberflächenbelüfter eingesetzt. Während in den siebziger und achtziger Jahren in Abwasserbehandlungsanlagen zum Abbau von Kohlenstoffverbindungen noch häufig Oberflächenbelü-

tungssysteme zum Einsatz gekommen sind, werden heute vorrangig feinblasige Druckluftbelüftungssysteme verwendet. Andere Belüftungstechniken spielen dagegen zahlenmäßig keine Rolle. Druckluftbelüftungssysteme werden in folgenden Varianten ausgeführt:

- flächendeckende Anordnung von Rohren, Tellern oder Platten
- flächendeckende Anordnung von großformatigen Platten aus Folienmaterial
- Trennung von Mischung und Belüftung (z.B. in Umlaufbecken)

Oberflächenbelüftungssysteme werden als

- Rotoren in Umlaufbecken,
- Kreisel in Mischbecken und
- Kreisel in Umlaufbecken

gebaut.

4.2 Richtwerttabelle für Belüftungssysteme

Auf der Grundlage von über 80 Sauerstoffzufuhrmessungen in 30 Abwasserbehandlungsanlagen wurde sowohl für Druckluftbelüftungssysteme als auch für Oberflächenbelüftungssysteme unterschiedlicher Ausführungsformen eine Richtwerttabelle mit Sauerstoffzufuhrwerten und -erträgen in Reinwasser und unter Betriebsbedingungen aufgestellt [Pöpel und Wagner, 1998]. Bei Druckluftbelüftungssystemen werden flächendeckende Anordnung mit Rohren, Tellern und Platten, Platten aus Folienmaterial sowie Systeme mit Trennung von Mischung und Belüftung unterschieden. Bei Oberflächenbelüftungssystemen werden die Ergebnisse für Kreisel in Mischbecken, Kreisel in Umlaufbecken und Walzen in Umlaufbecken angegeben. In der Richtwerttabelle wurde bei der Druckluftbelüftung unter günstigen Bedingungen die mittlere Sauerstoffzufuhr bei einem Luftvolumenstrom von $2 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ bestimmt. Bei Systemen mit getrennter Mischung und Belüftung wird aufgrund der dort vorliegenden spezifischen Bedingungen die Sauerstoffzufuhr bei $1,5 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ angegeben. Der Sauerstofftrag der Druckluftbelüftungssysteme wird aus der Sauerstoffzufuhr unter Annahme eines spezifischen Energieaufwandes der Druckluftherzeuger von $5,5 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ berechnet. Zur Ermittlung der Zufuhr- und Ertragswerte unter Betriebsbedingungen wird der α -Wert mit 0,6 angesetzt.

Bei Oberflächenbelüftungssystemen werden unter günstigen Bedingungen die mittleren Sauerstoffzufuhr- und -ertragswerte bei einer Leistungsdichte von $35 \text{ W}/\text{m}^3$ verstanden. Der α -Wert zur Umrechnung der Reinwasser- in Abwasserwerte beträgt 0,9. Die mittleren Bedingungen in der Richtwerttabelle wurden sowohl für Oberflächen- als auch Druckluftbelüftungssysteme mit 75 % der Werte unter günstigen Bedingungen angesetzt.

Die Ergebnisse der Sauerstoffzufuhrmessungen, mit der die ursprüngliche Richtwerttabelle erstellt wurde, sind aus der Zeit vor 1989. Da sich insbesondere bei der Druckluftbelüftung durch die Weiterentwicklung der Membranbelüftungselemente und der Druckluftherzeuger erhebliche

Leistungssteigerungen ergeben haben, sind heute gegenüber 1989 um 40 % höhere spezifische Sauerstoffausnutzungen (%/m) und Sauerstofferträge (kg/kWh) möglich. Diese hohen Werte sind nur zu erreichen, wenn die Belüftungselemente optimal abgasen und gleichzeitig Druckluftherzeuger mit einem sehr niedrigen spezifischen Leistungsbedarf zum Einsatz kommen. Im Falle von Belüftungssystemen mit getrennter Umwälzung und Belüftung müssen Rührwerke verwendet werden, die das Durchdringen der beim Belüften entstehenden Luftblasenwand gewährleisten, damit eine Umlaufströmung in den Umlaufkanälen erzeugt wird. Steigerungen der Leistungsfähigkeit von Oberflächenbelüftungssystemen im Vergleich zum Jahr 1989 wurden nicht beobachtet.

Ausgehend von den o.g. etwa 40 % höheren Werten für die Sauerstoffausnutzung und den Sauerstoffertrag ergibt sich eine modifizierte Richtwerttabelle (s. Tabelle 2) für Druckluftbelüftungssysteme. Beim Heranziehen der modifizierten Richtwerttabelle zur Auswahl von Belüftungssystemen ist unbedingt zu beachten, dass im Einzelfall sowohl höhere als auch niedrigere Sauerstoffausnutzungen und Sauerstofferträge festgestellt werden können. Beide Kennzahlen hängen bei Druckluftbelüftungssystemen von der Abstimmung zwischen der Luftbeaufschlagung der Belüftungselemente, der Belegungsdichte, der Wassertiefe, dem Abgasverhalten, der Art der Druckluftherzeugung, des Einbaus von Schiebern etc. ab. In Tabelle 2 sind die Richtwerte für Oberflächenbelüftungssysteme dargestellt.

Tabelle 1: Modifizierte Richtwerttabelle für Druckluftbelüftungssysteme

Leistungstabelle für Druckluftbelüftungssysteme				
System	günstig		mittel	
	SSOTE% [%/m]	SAE [kg/kWh]	SSOTE% [%/m]	SAE [kg/kWh]
Reinwasserbedingungen				
Flächendeckende Elemente	8,0	4,5	6,0	3,4
Flächendeck. Folienplatten	10,6	5,5	8,0	4,1
Umwälzung und Belüftung	6,7	4,2	5,0	3,2
Betriebsbedingungen				
Flächendeckende Elemente	4,8	2,7	3,6	2,0
Flächendeck. Folienplatten	6,4	3,2	4,8	2,5
Umwälzung und Belüftung	4,1	2,5	3,1	2,0

Tabelle 2: Richtwerttabelle für Oberflächenbelüftungssysteme

Leistungstabelle für Oberflächenbelüftungssysteme [alle Werte in kg O ₂ /kWh]				
System	Reinwasser		Betrieb	
	günstig	mittel	günstig	mittel
Kreisel in Mischbecken	1,7	1,3	1,5	1,15
Kreisel in Umlaufbecken	2,1	1,6	1,9	1,4
Walzen in Umlaufbecken	1,7	1,3	1,5	1,15

Aktuelle Messungen des Instituts WAR der Technischen Universität Darmstadt bestätigen (s. Abbildungen 4 und 5), dass die Sauerstoffzufuhrwerte eine große Streuung aufweisen. Dabei werden die zum Vergleich aufgeführten Werte der Richtwerttabelle sowohl über- als auch unterschritten. Dies verdeutlicht das enorme Einsparpotential einer optimierten Planung des Belüftungssystems in Bezug auf die Energiekosten. An einzelnen Anlagen mit Belüftung und getrennter Umwälzung in Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass durch die ungünstige Gesamtkonzeption des Belebungsbeckens die sehr gute spezifische Sauerstoffausnutzung nicht zu einem ebenfalls sehr guten Sauerstofftrag führt. Zudem sind die Sauerstofftragswerte zum Teil ohne Berücksichtigung der Rührwerksenergie angegeben.

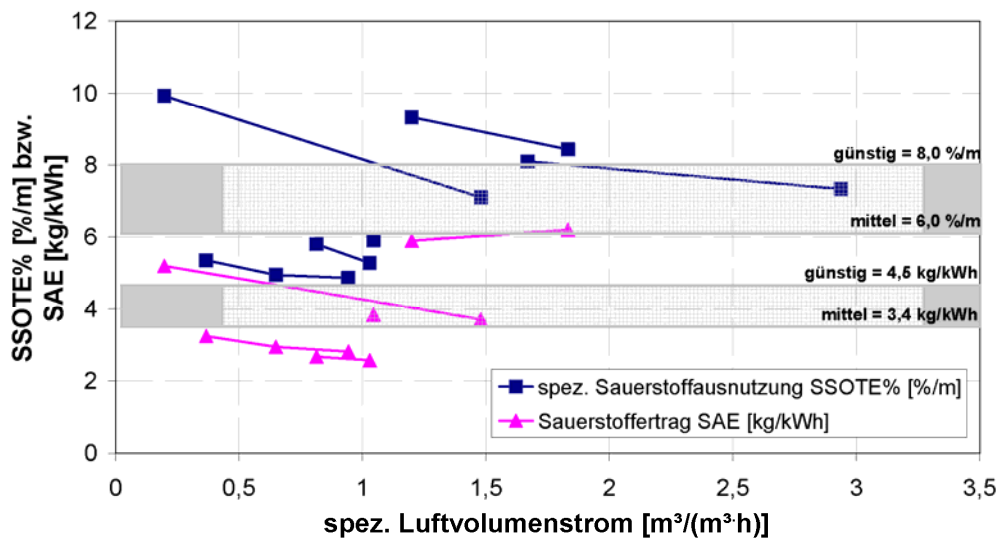


Abbildung 4: Ergebnisse aktueller gutachtlicher Sauerstoffzufuhrmessungen des Instituts WAR in Belebungsbecken mit flächendeckender Belegung der Belüftungselemente

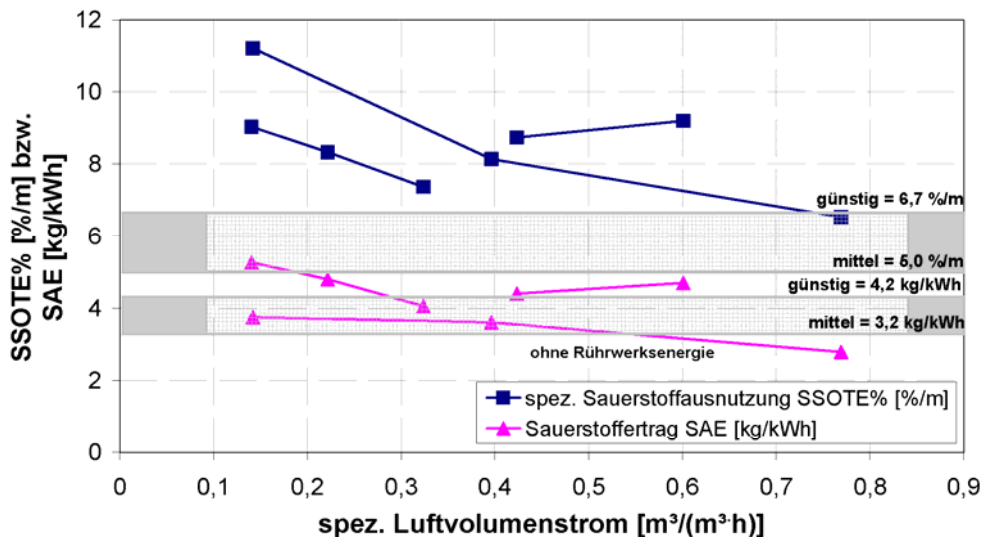


Abbildung 5: Ergebnisse aktueller gutachtlicher Sauerstoffzufuhrmessungen des Instituts WAR in Belebungsbecken mit getrennter Belüftung und Umwälzung

Bei der Auswahl des Belüftungssystems für eine Abwasserbehandlungsanlage wurde in der Vergangenheit vorrangig auf hohe Sauerstoffträge und damit niedrige Energiekosten geachtet. Neben der Forderung nach einem hohen Sauerstofftrag sollten zukünftig auch andere Gesichtspunkte, wie Flexibilität im Betrieb, Wartungsfreundlichkeit, geringe Ersatzteilbevorratung, niedrige Anschaffungskosten etc. stärker beachtet werden. Daher rückt der früher bei der Auswahl eines Belüftungssystems oft als einziger Entscheidungspunkt herangezogene „hohe Sauerstofftrag“ immer mehr in den Hintergrund. Die beim Neu- oder Umbau von Abwasserbehandlungsanlagen fast zwangsläufige Wahl eines Druckluftbelüftungssystems aufgrund der hohen Ertragswerte ist daher zukünftig im Einzelfall zu prüfen.

4.3 Jahreskosten der biologischen Abwasserreinigung

Abbildung 6 zeigt die Jahreskosten der biologischen Reinigung unterschieden nach Druckluft- und Oberflächenbelüftungssystemen. Hierin sind die Jahreskosten für Belebungs- und Nachklärbecken inkl. Rückführung, der Abluftbehandlung und der Fällmittelstation berücksichtigt [Reicherter, 2003]. Das Ergebnis widerspricht auf den ersten Blick der allgemein anerkannten These, dass Druckluftbelüftungssysteme wirtschaftlicher sind als Oberflächenbelüfter. Bis zu einer Ausbaugröße von 30.000 EW sind die untersuchten Anlagen mit Oberflächenbelüftern kostengünstiger als die Anlagen mit Druckluftbelüftung. Die Gründe hierfür sollen in den höheren Anschaffungs- und Wartungskosten der vergleichsweise komplizierten Druckluftsysteme zu suchen sein. Unklar bleibt jedoch, inwiefern das Datenkollektiv überhaupt vergleichbar ist und ob die Art des Belüftungssystem die einzige Ursache für die unterschiedlichen Jahreskosten ist. Somit kann

letztendlich nicht allgemein ausgesagt werden, ob Oberflächen- oder Druckluftbelüftungssysteme wirtschaftlicher sind.

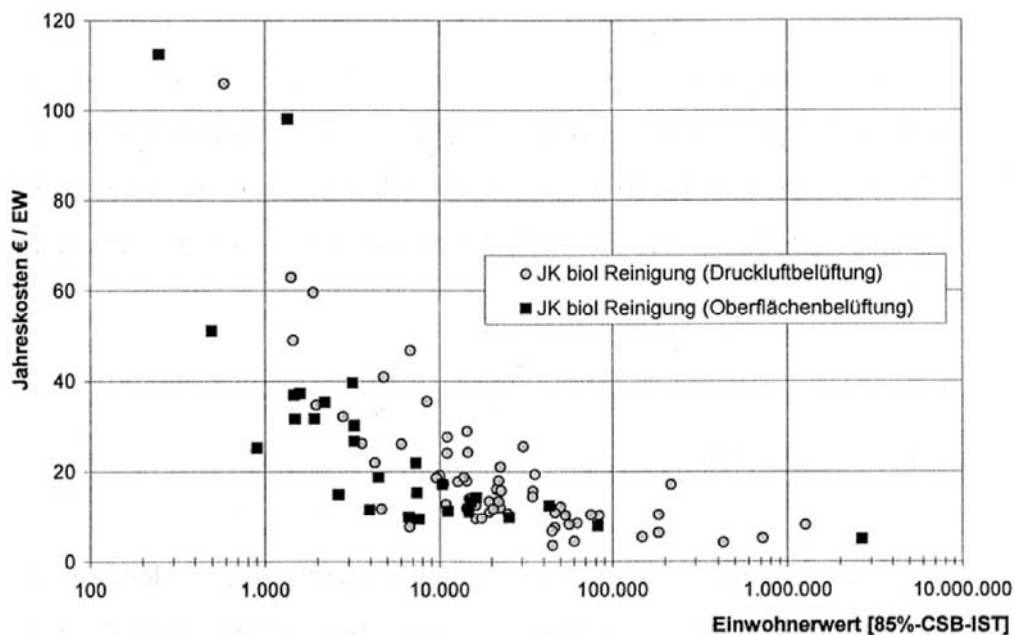


Abbildung 6: Jahreskosten der biologischen Abwasserreinigung unterschieden nach Druckluft- und Oberflächenbelüftung [Reicherter, 2003]

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine österreichische Untersuchung. Im Rahmen eines Benchmarking-Projektes (Erfassung und Vergleich von technischen und wirtschaftlichen Kennzahlen in der Siedlungswasserwirtschaft – Benchmarking SWW) (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 2001) wurden der Energieverbrauch und die spezifischen Betriebskosten von Druckluft-, Oberflächen- und sog. Turbinenbelüftungssystemen verglichen. Von 88 Abwasserbehandlungsanlagen, die am Projekt teilnahmen, waren 46 mit Druckluftbelüftungssystemen und 17 mit Oberflächenbelüftungssystemen ausgerüstet. 25 Anlagen hatten Sonderformen von Belüftungssystemen (hier als Turbinenbelüfter bezeichnet). Zu beachten ist jedoch die Aufteilung in die unterschiedlichen Größenklassen. Es wurden keine Oberflächenbelüftungssysteme in kleinen Abwasserbehandlungsanlagen (weniger als 12.000 EW) untersucht; gleichzeitig erwiesen sich die untersuchten Druckluftbelüftungssysteme in dieser Größenklasse als überdurchschnittlich teuer, aber wenig effizient. Werden nur die Anlagen mit über 12.000 EW herangezogen, ergeben sich daher etwas geringere Vergleichswerte für Druckluftbelüftungssysteme von etwa 0,50 kWh/kg CSB_{zu} und 5,0 €/EW_{CSB110}. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Studie bezüglich des spezifischen Energieverbrauchs (Abbildung 7) und der spezifischen Betriebskosten des Belüftungssystems (Abbildung 8) dargestellt.

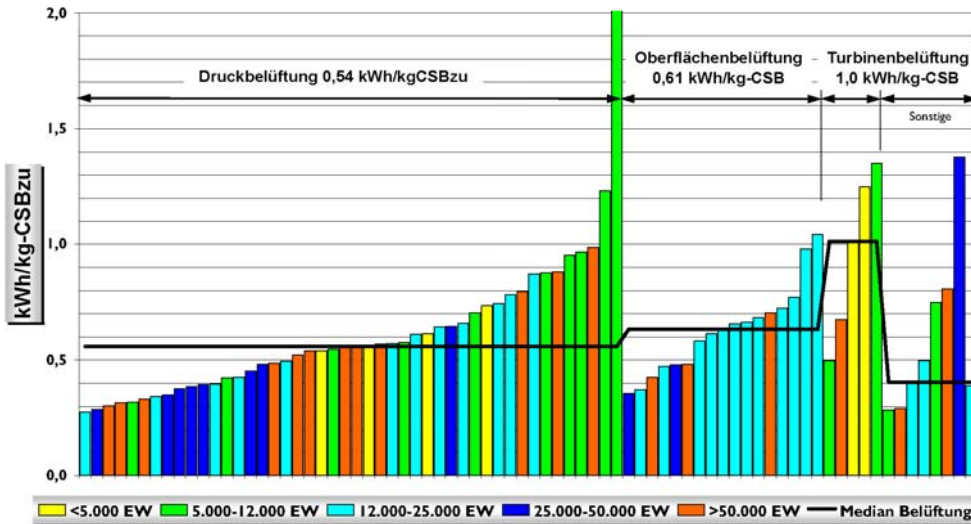


Abbildung 7: spezifischer Energieverbrauch von Belüftungssystemen (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 2001)

Der spezifische Energieverbrauch der Anlagen mit Druckluftbelüftung beträgt über alle Anlagen gemittelt 0,54 kWh je kg CSB im Zulauf. Der spezifische Energieverbrauch der Anlagen mit Oberflächenbelüftung liegt nur um 11 % höher (0,61 kWh/kg-CSB_{zu}), wobei im Einzelfall erhebliche abweichende Werte zu beobachten sind.

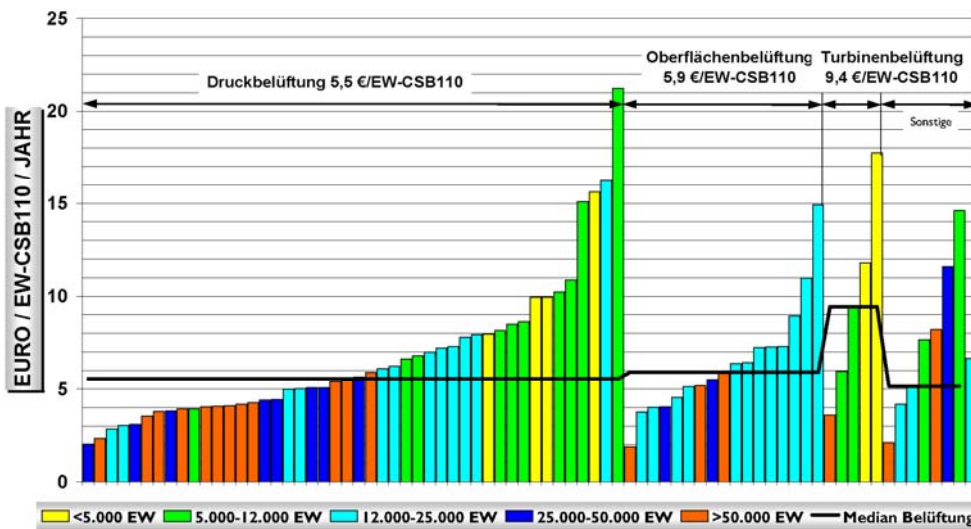


Abbildung 8: spezifische Betriebskosten von Belüftungssystemen (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 2001)

Der Median der spezifischen Betriebskosten der Anlagen mit Druckluftbelüftung (Werte inkl. Mischeinrichtungen) beträgt 5,5 €/ (EW-CSB110·a). Im Gegensatz dazu beträgt der Median der Betriebskosten von Anlagen mit Oberflächenbelüftung 5,9 €/ (EW-CSB110·a); d.h. die Betriebskosten von Druckluftbelüftungssystemen, die neben den Energiekosten auch Wartungskosten etc. beinhalten, sind nur geringfügig (7 %) niedriger als die Betriebskosten von Oberflächenbelüftern. Der Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs (11 % geringer bei Druckluftbelüftung) zeigt, dass dieser zwar maßgeblich für die Betriebskosten des Belüftungssystems ist, aber ein erheblicher Teil der Energieeinsparungen der effektiveren Druckluftbelüftungssysteme durch höhere Wartungs- und Instandhaltungskosten wieder ausgeglichen werden.

Aufgrund der einfacheren Bauweise von Oberflächenbelüftungssystemen (verzicht auf Druckluftleitungen und Gebläsehaus, einfachere Steuerung etc.) und der damit geringeren Kapital- und Wartungskosten, können die Jahreskosten von Druckluft- und Oberflächenbelüftungssystemen näher beisammen liegen als generell angenommen wird. Eine Kostenvergleichsrechnung muss daher neben den Betriebskosten auch die Kapitalkosten einschließen, um letztlich die Jahreskosten ermitteln und vergleichen zu können. Nur diese sollten zur Auswahl von Belüftungssystemen herangezogen werden.

5 Ansätze zur Optimierung von Belüftungssystemen

5.1 Auswahl geeigneter Dimensionierungslastfälle

Die Betriebserfahrungen der letzten Jahrzehnte haben gezeigt, dass viele der nach dem alten ATV-Arbeitsblatt A 131 (1991) bemessenen Belüftungssysteme häufig stark überdimensioniert sind. Die Analyse der Ursachen zeigt folgendes Bild [Jardin, 2001]:

- es wurde häufig von deutlich zu optimistischen Annahmen bei den zu erwartenden zukünftigen Zulauffrachten ausgegangen.
- die Belüftungseinrichtungen wurden (technisch unsinnig) auf den gleichen Prognosezeitraum wie die Bautechnik der Abwasserbehandlungsanlagen ausgelegt.
- es wurden bei der Dimensionierung sehr ungünstige und zu selten/nie auftretende Lastfallkombinationen ausgewählt.
- in den Zwischenschritten der Dimensionierung des Belüftungssystems wurden mehrfach (Un-)Sicherheitsfaktoren angesetzt und überlagert.

Im Ergebnis führt die akkumulierende Wirkung der angeführten Einzelfaktoren zu einer erheblichen Überdimensionierung des Belüftungssystems. Als Folge davon wandert der Punkt des häufigsten Betriebs in den energetisch ungünstigen Teil/Schwachlastbereich des Systems. Damit wird der Betrieb des Belüftungssystems unwirtschaftlich und mithin auch problematisch, wie nachfolgende Ausführungen zeigen:

- das Belüftungssystem lässt sich am unteren Ende des Betriebsbereiches nur noch unzureichend regeln, so dass der Sauerstoffgehalt der belüfteten Becken deutlich zu hoch liegt. Hierdurch wird zum einen Belüftungsenergie verschwendet, zum anderen wird die Denitrifikation durch die hohe Sauerstoffrückführung aus der internen Rezirkulation beeinträchtigt, so dass erhöhte Nitratblaufwerte auftreten können.
- die geringe Luftbeaufschlagung der Druckluftbelüftungselemente führt zu einer niedrigen Durchmischungsintensität im Belebungsbecken mit der Gefahr von Schlammablagerungen am Beckenboden. Bei dauerhaft niedriger Luftbeaufschlagung ohne regelmäßige Spülphasen zum Freiblasen der Belüftermembranen steigt die Gefahr der Bildung von Ablagerungen auf den Elementen.
- nicht zuletzt sind durch die Überdimensionierung die Investitions- und Wartungskosten der Anlage unnötig hoch.

Um die oben genannten Fehler zu vermeiden und die Ermittlung der relevanten Zulauffrachten zu erleichtern und zu vereinheitlichen wurde im Jahre 2003 das ATV-DVWK Arbeitsblatt 198 „Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen“ zur Ermittlung der maßgebenden Zulauffrälle herausgegeben. Für die Dimensionierung des Belüftungssystems sind mindestens folgende Lastfälle zu untersuchen [Jardin, 2001]:

- Lastfall 1 - erforderliche Sauerstoffzufuhr bei höchster Wassertemperatur (αOC_{max})
Bei starken saisonalen Schwankungen ist es zusätzlich erforderlich verschiedene weitere Lastfälle mit ungünstigen Kombinationen aus Zulauffracht und zugehöriger Wassertemperatur zu untersuchen.
- Lastfall 2 - erforderliche Sauerstoffzufuhr bei tiefster Wassertemperatur (αOC_{max})
Bei Abwasserbehandlungsanlagen mit variabel belüfteten Beckenzonen, die bei Wassertemperaturen unterhalb der Bemessungstemperatur teilweise auf die Denitrifikation verzichten indem die variable Zone dem Nitrifikationsbecken zugeschlagen wird, kann trotz der niedrigen Wassertemperaturen der Sauerstoffbedarf höher sein als bei Lastfall 1.
- Lastfall 3 - erforderliche Sauerstoffzufuhr aus endogener Atmung (αOC_{min})
Dieser Lastfall stellt die minimal erforderliche Sauerstoffzufuhr dar und begrenzt damit den Regelbereich des Belüftungssystem nach unten. Hierdurch wird z.B. die Anzahl und Staffe-lung der Gebläse beeinflusst.
- Lastfall 4 - erforderliche Sauerstoffzufuhr im Mittel (αOC_{mittel})
Die mittlere Sauerstoffzufuhr dient der Abschätzung der Energiekosten und als Vergleichs-größe in der Ausschreibung.

Liegt die voraussichtliche Anlagenbelastung bei der Inbetriebnahme deutlich unterhalb der Prognosebelastung, sollte zusätzlich eine Berechnung für den Inbetriebnahmezeitpunkt durchgeführt werden, um hiermit den Regelbereich des Belüftungssystems ggf. entsprechend anzupassen und so bereits bei der Inbetriebnahme einen wirtschaftlichen Betrieb zu ermöglichen. Eine andere Möglichkeit der Optimierung liegt darin, den Nutzungszeiträumen des Belüftungssystems entsprechende Zwischenausbaustufen zuzuordnen. Beträgt z.B. die Nutzungsdauer der Bautechnik 30 Jahre und die Nutzungsdauer des Belüftungssystems dagegen nur 10 Jahre so sollte überprüft werden ob nach 10 und 20 Jahren beim ohnehin erforderlichen Umbau des Belüftungssystems eine spätere, den Anforderungen entsprechende Leistungsanpassung des Belüftungssystems realisiert werden kann. So kann das Belüftungssystem in der Regel zunächst im ersten Ausbauschnitt kleiner ausfallen. Andererseits kann unter Umständen bei der Inbetriebnahme zunächst auf zusätzliche redundante Anlagenkomponenten (z.B. Gebläse) verzichtet werden, da durch die geringe Auslastung ohnehin mehr Leistung zur Verfügung steht als zunächst erforderlich ist [Jardin, 2001].

5.2 saisonale Anpassung des Feststoffgehaltes im Belebungsbeckens

Im laufenden Anlagenbetrieb ergibt sich die Möglichkeit durch eine saisonale Anpassung des Feststoffgehaltes des Belebungsbeckens den Energieverbrauch für das Belüftungssystem zu senken. Da mit zunehmender Wassertemperatur das erforderliche Schlammalter zurückgeht, kann im Sommer entweder Belebungsbeckenvolumen stillgelegt werden oder das gesamte Volumen mit reduziertem Feststoffgehalt betrieben werden. In beiden Fällen reduziert sich der Sauerstoffverbrauch gegenüber dem Betrieb mit der bei der Bemessungstemperatur von 12°C erforderlichen Schlammmenge deutlich. Abbildung 9 zeigt das Einsparpotenzial einer fiktiven Abwasserbehandlungsanlage mit 100.000 EW, welche nach ATV-Arbeitsblatt A 131 bemessen wurde. Bei einer Wassertemperatur von 20°C kann der Feststoffgehalt im Belebungsbecken von 3,15 kg/m³ auf 1,5 kg/m³ reduziert werden, wodurch sich ein Einsparpotenzial von 10 % der Belüftungsenergiekosten ergibt [Jardin, 2001].

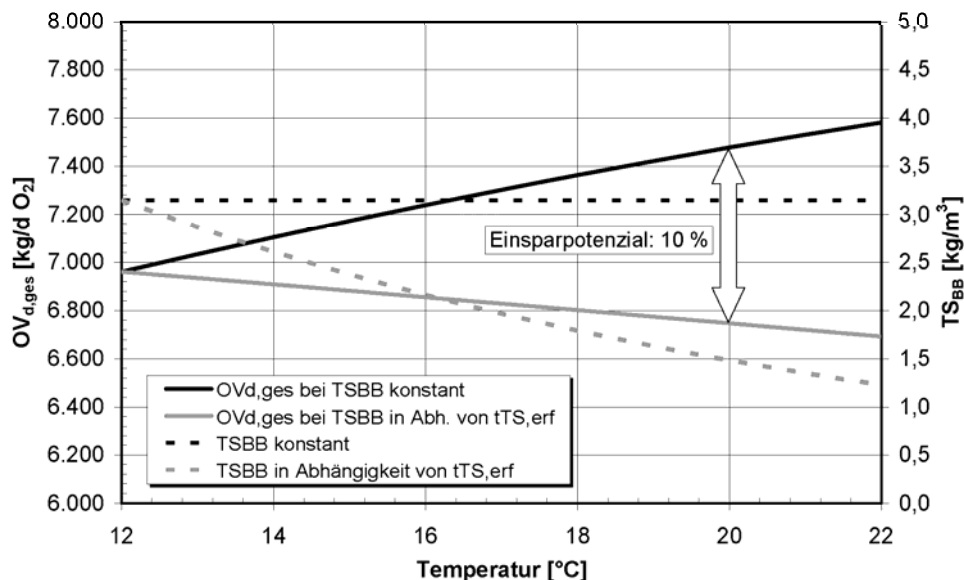


Abbildung 9: Abhängigkeit des Sauerstoffverbrauchs und des erforderlichen Feststoffgehalts in der Belebung von der Temperatur [Jardin, 2001]

Eine weitere Möglichkeit der Energie- und Kosteneinsparung ergibt sich durch die Bewirtschaftung des Zulaufstroms mit Speicherbecken. Zum einen können durch die Abpufferung der Zulaufspitzen die Stoßbelastungen reduziert werden, so dass die Stoßfaktoren bei der Dimensionierung des Belüftungssystems reduziert werden können. Zum anderen können durch die Speicherung und Verlagerung der Zulaufkraft in die Zeiten des günstigen Nachtstromtarifs Stromkosten eingespart werden. In gleicher Weise kann auch die Speicherung und Bewirtschaftung von Prozesswässern der Schlammbehandlung zur Einsparung von Belüftungsenergie beitragen.

5.3 Regelung der Drucklufizerzeuger

5.3.1 Anlagenkennlinie

Abbildung 10 zeigt, wie sich die Anlagenkennlinie des Gegendrucks des Belüftungssystems abhängig von der Höhe des Luftvolumenstroms aus unterschiedlichen Anteilen zusammensetzt. Der weitaus größte Anteil des Gegendrucks muss zur Überwindung des hydrostatischen Wasserdrucks erzeugt werden. Dieser Anteil ist, einen konstanten Wasserstand vorausgesetzt, unabhängig von der Höhe des Luftvolumenstroms. Zusätzlich zum hydrostatischen Wasserdruck muss der Mindestöffnungsdruck der Schlitze in den Belüftungsmembranen überschritten werden, bevor Luft ins Belebungsbecken eintreten kann (Linie A in Abbildung 10). Die durch die Luftreibung in Armaturen, Ventilen und Rohrleitungen, also allen Bauteilen zwischen den Belüftungselementen und den Drucklufizerzeugern erzeugten (Transport-)Verluste nehmen quadratisch mit dem Luftvolumenstrom zu (Kurve B). Auch der Druckverlust der Belüftungselemente nimmt,

nachdem der Öffnungsdruck überwunden ist, im Neuzustand näherungsweise quadratisch zum Luftvolumenstrom zu (Kurve C).

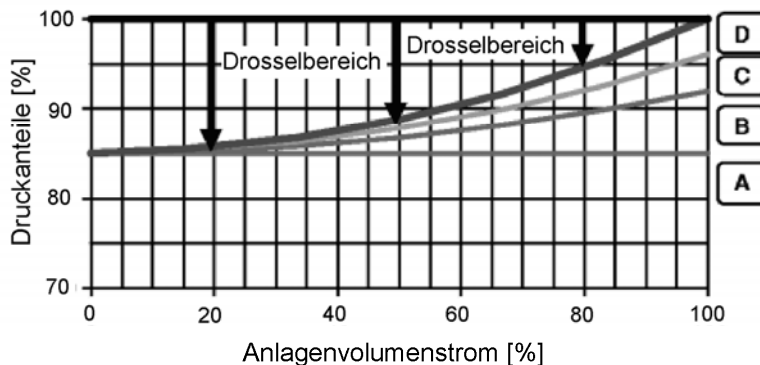


Abbildung 10: Anlagenkennlinie [Holzenthal, 2003]

Um Sicherheit gegenüber dem Druckanstieg durch Belagsbildung und Alterung der Druckluftbelüftungselemente zu gewinnen, werden weitere Sicherheiten eingerechnet. Diese im langfristigen Betrieb auftretenden Verluste nehmen ebenfalls näherungsweise quadratisch mit dem Luftvolumenstrom zu (Kurve D).

5.3.2 direkte Sauerstoffregelung

Das Ziel der Steuerung der Druckluftherzeuger ist es, möglichst genau den für den Betrieb der Belebungsanlage erforderlichen Luftvolumenstrom zu erzeugen um einen wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Für diese Aufgabe stehen verschiedene Regelungsstrategien zur Verfügung. Bei der direkten Sauerstoffregelung wird die Leistung der Druckluftherzeuger (in der Regel Drehkolbengebläse) direkt in Abhängigkeit von der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken geregelt. Sinkt die Sauerstoffkonzentration dabei unter einen bestimmten Wert ab, wird der Luftvolumenstrom durch die Erhöhung der Motorfrequenz/Verdichterdrehzahl erhöht. Die Regelung des Luftvolumenstroms wird so ausschließlich durch die Regelung der Druckluftherzeuger bewirkt; eine weitere Regelung, Drosselung etc. findet nicht statt. Bei dieser Regelung wird nur der für den Lufteintrag in die Belebungsbecken physikalisch notwendige Druck erzeugt.

Aus energetischer Sicht ist die direkte Sauerstoffregelung also zunächst optimal. Problematisch wird diese Regelung jedoch, falls mehrere Becken oder Beckenzonen ohne direkte Zuordnung einzelner Druckluftherzeuger mit unterschiedlichen Luftvolumenströmen aus einer gemeinsamen Hauptleitung beaufschlagt werden, wie es in mittleren und großen Abwasserbehandlungsanlagen üblich ist. In diesen Fällen ist dann eine andere Regelungsstrategie nötig. Die direkte Sauerstoffregelung wird deshalb hauptsächlich bei einfachen und kleinen Abwasserbehandlungsanlagen eingesetzt.

5.3.3 Konstantdruckregelung

Bei der weit verbreiteten Konstantdruckregelung wird versucht auf der gemeinsamen Hauptleitung einen konstanten, fest eingestellten Druck zu erzielen. Benötigen einzelne Belüftungszonen/Becken mehr Luft, so wird der entsprechende Regulierverschieber an der Hauptleitung geöffnet, wodurch sich der Luftvolumenstrom zur angeschlossenen Belüftungszone/dem angeschlossenen Becken erhöht, aber gleichzeitig auch der Druck auf der Hauptleitung absinkt. Die Regelung der Druckluftherzeuger registriert diesen Druckabfall und erhöht die Leistung der Druckluftherzeuger, bis der Solldruck wieder erreicht wird. Der Solldruck liegt im Allgemeinen deutlich höher als für den Betrieb der Belüftung erforderlich, da er für den Vollastbetrieb mit maximalem Luftvolumenstrom, bei gleichzeitig hohen Rohrreibungsverlusten, maximalem Wasserstand und zusätzlichen Sicherheiten z.B. für die Alterung der Belüftungselemente bemessen ist. Folglich sind die Regulierverschieber den überwiegenden Teil der Betriebszeit nicht voll geöffnet, so dass überschüssige „Druck“-Energie „vernichtet“ wird.

5.3.4 Gleitdruckregelung

Im Gegensatz zur Konstantdruckregelung wird bei der Gleitdruckregelung der Druck auf der Hauptleitung dynamisch auf den jeweiligen aktuellen Bedarf angepasst. Dadurch liefern die Druckluftherzeuger nur den minimal erforderlichen Druck, wodurch sich bei gleichem Luftvolumenstrom gegenüber der Konstantdruckregelung eine Energieeinsparung entsprechend der Druckreduktion ergibt.

Zur Regelung des Drucks auf der Hauptleitung werden von der Steuerungselektronik in Echtzeit die Ventilpositionen der Blendenregulierverschieber abgefragt. Im Idealzustand ist das am weitesten geöffnete Ventil immer nahezu vollständig geöffnet (Most-open-valve control). Hierdurch kann die Hauptleitung mit dem geringsten möglichen Druck betrieben werden und die Reibungsverluste der Ventile sind minimiert, da alle Ventile, soweit es für die geforderte Luftverteilung möglich ist, maximal geöffnet sind. Wenn das am weitesten geöffnete Ventil eine genau festgelegte maximale Position erreicht, weil nicht genügend Druckluft zur Verfügung steht, wird der Druck auf der Hauptleitung erhöht. Erreicht das Ventil diese Position nicht, weil weniger Luft benötigt wird, ist der gewählte Druck zu hoch und die Leistung der Druckluftherzeuger kann reduziert werden. In der Praxis muss diese Regelung zusätzlich durch Sollwertgrenzen und Sicherheitsabfragen ergänzt werden, um ein übermäßiges Schwingen des Systems und kritische Belastungszustände zu vermeiden.

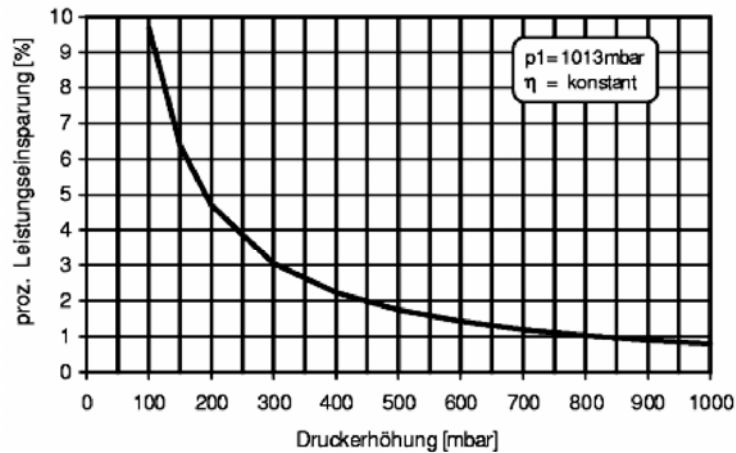


Abbildung 11: Leistungseinsparung bei 10 mbar Druckreduzierung auf der Druckseite des Turbo-kompressors [Holzenthal, 2003]

Durch den Einsatz der Gleitdruckregelung sind Energieeinsparungen von bis zu 4 % der Belüftungsenergie im Vergleich zu einer Konstantdruckregelung zu erwarten [Holzenthal, 2003]. Abbildung 11 zeigt die Einsparungen, die bereits bei einer geringen Druckreduzierung um 10 mbar erzielt werden. So ergeben sich bei einem Gegendruck von 600 mbar (etwa 5 m Einblastiefe) Einsparungen von 1,5 %.

5.4 Anpassung der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken an die erforderliche Reinigungsleistung

Die Leistung der Nitrifikanten als obligat aerobe Bakterien bzw. die Nitrifikationsgeschwindigkeit hängt direkt von der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken ab (Monod-Kinetik). Richtlinien empfehlen daher einen Sauerstoffgehalt von 2 mg/L zur Sicherstellung einer stabilen und leistungsfähigen Nitrifikation. Da der Belüftungsaufwand bei zunehmenden Sauerstoffgehalten aufgrund des abnehmenden Sättigungsdefizits als dem treibenden Gefälle des Sauerstoffübergangs überproportional zunimmt, sollten zur Energieeinsparung möglichst geringe Sauerstoffgehalte angestrebt werden. Erfahrungsgemäß findet insbesondere in den warmen Sommermonaten auch bei Sauerstoffgehalten deutlich unter 2 mg/L eine stabile Nitrifikation statt. Die Sauerstoffzufuhr wird in diesem Fall anhand der gewünschten Ammoniumkonzentration des Ablaufs geregelt und kann zunächst so lange reduziert werden, wie die beabsichtigte Ammoniumkonzentration gerade noch sicher eingehalten wird.

Das Beispiel der Abwasserbehandlungsanlage Mönchengladbach-Neuwark (800.000 EW) zeigt, dass die Reduzierung der Sauerstoffkonzentration gegenüber dem Betrieb mit 2 mg/L im günstigsten Fall zu einer Energieeinsparung bei der Belüftung von 20 % führt (Abbildung 12). Im Jahresmittel konnten hier Energieeinsparungen von 12 % realisiert werden. Hierbei ist zu beachten,

dass die Nitrifikationsleistung gerade bei geringer Sauerstoffkonzentration stark von dieser abhängt, also ein entsprechend sensibles Regelsystem erforderlich ist.

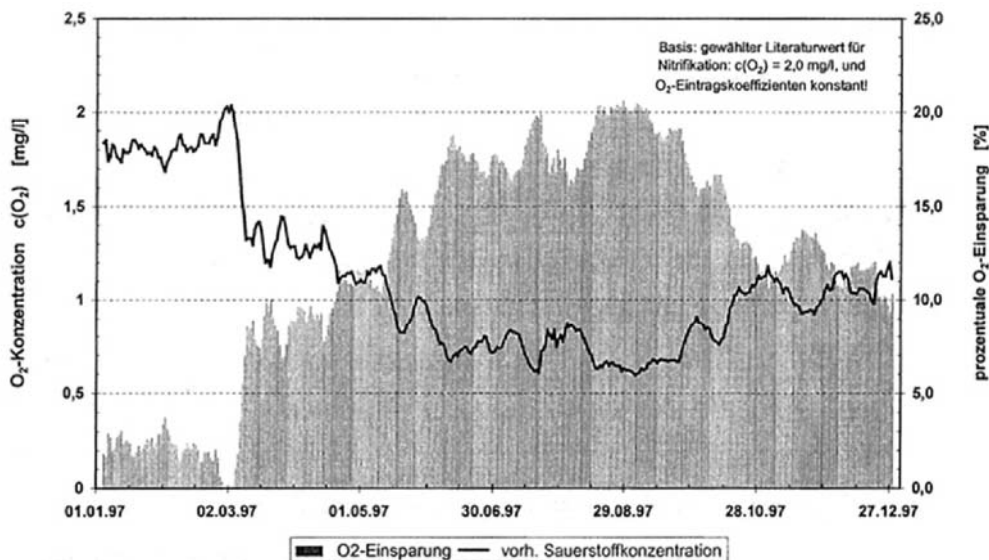


Abbildung 12: Erzielte prozentuale Einsparung an einzutragendem Sauerstoff durch Verminderung der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken [Melsa, 1998]

Allerdings besteht bei der Reduzierung des Sauerstoffgehalts im Belebungsbecken auch die Gefahr einer Bläh/Schwimmschlammbildung durch die übermäßige Vermehrung von *Microthrix Parvicella*, so dass hier für jede Abwasserbehandlungsanlage ein geeigneter Kompromiss zwischen dem sicheren Anlagenbetrieb und der Energieeinsparung gefunden werden muss.

5.5 Beispiel Abwasserbehandlungsanlage Hattingen – Umsetzung einer $\text{NH}_4\text{-N}$ Regelung und Einsatz von Speicherbecken

Als Beispiel für eine erfolgreiche Reduzierung der Betriebskosten des Belüftungssystems wird nachfolgend das Vorgehen bei der Abwasserbehandlungsanlage Hattingen des Ruhrverbandes dargestellt. Durch eine Kombination von Maßnahmen konnte der Energieverbrauch dieser Anlage deutlich gesenkt werden, da der Luftertrag in die Belebungsbecken um 20 % bis 25 % verringert werden konnte. Gleichzeitig wurde auch erheblich an Energie für die Rezirkulationspumpen eingespart [Schmitt et al., 1997].

Die Abwasserbehandlungsanlage Hattingen ist für 100.000 EW ausgebaut und war 1998 zu etwa 85 % ausgelastet. Die Belebungsstufe besteht aus vier in Reihe geschalteten Umlaufbecken (Becken 1 bis 4) mit feinblasiger Druckluftbelüftung, wovon das erste Becken als vorgeschaltetes Denitrifikationsbecken betrieben wird. Somit liegt der belüftete Beckenanteil bei maximal 75 % des Beckenvolumens. Das Regelkonzept der Anlage regelt den Sauerstoffgehalt in den Bele-

bungsbecken in Abhängigkeit von der Ammoniumkonzentration. Dabei schwankt der Sauerstoffgehalt in den Becken 3 und 4 zwischen 0,5 und 2,5 mg/L. Bei ausreichender Nitrifikation wird das Denitrifikationsvolumen von Becken 1 durch das zusätzliche Abschalten von Belüftungselementen in Becken 2 auf bis zu 60 % des gesamten Belebungsbeckenvolumens vergrößert. Durch die getrennte Sauerstoffzufuhrregelung der einzelnen Becken konnte der Sauerstoffgehalt im Ablauf des Beckens 4 i.d.R. auf 0,5 mg/L gesenkt werden, wodurch sich das Problem der ungewollten Sauerstoffverschleppung durch die Rezirkulation in die Denitrifikationszone entschärfen ließ.

Aufgrund der ungünstigen Zulaufbedingungen mussten jedoch weitere Maßnahmen zur Stabilisierung der Stickstoffelimination durchgeführt werden. So wurden drei der vier Vorklärbecken zu Zwischenspeichern umgebaut. Durch die Reduzierung der Vorklärzeit wurde das BSB_5/N -Verhältnis verbessert. Die in den Mittagsstunden mit Ammonium-Spitzenbelastungen zulaufenden Wasser und die Prozesswässer der Schlammbehandlung wurden zwischengespeichert und während belastungsschwacher Nachtstunden dem Belebungsbecken zugeführt. Die Entleerung der Zwischenspeicher wurde zunächst durch eine einfache Zeitschaltung und später über eine maximale Ammoniumfracht im Zulauf gesteuert. Neben einer Stabilisierung der Stickstoffelimination wurde durch diese Maßnahme auch der Energieverbrauch des Belüftungssystems vergleichmässigt, was sich durch die Kappung der Lastspitzen positiv auf die Energiekosten, insbesondere die Spitzenlastabhängigen Bereitstellungskosten des Stromanschlusses auswirkte [Schmitt et al., 1997].

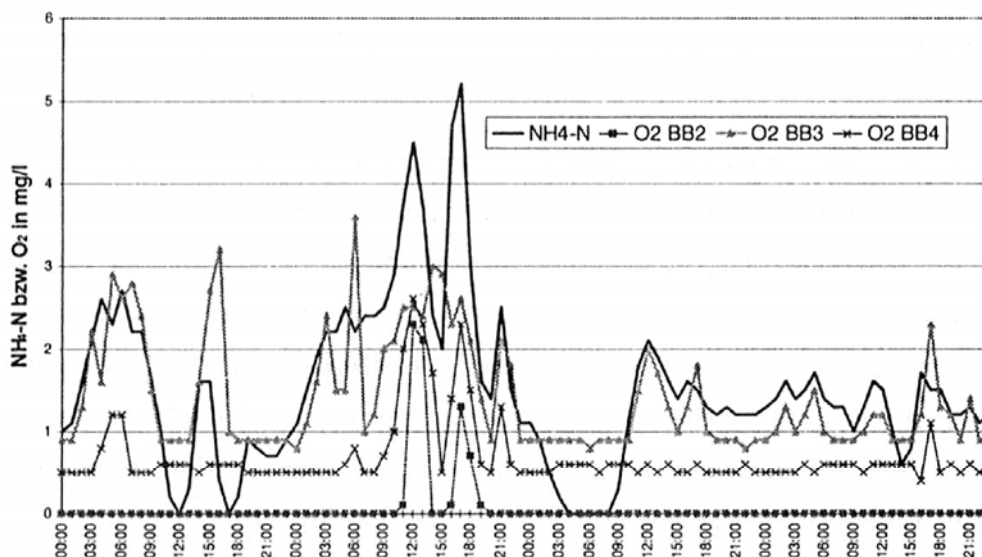


Abbildung 13: Optimierung des Sauerstoffeintrags durch getrennte Regelung der Belüftung in jedem Belebungsbecken der Abwasserbehandlungsanlage Hattingen [Schmitt et al., 1997]

Abbildung 13 zeigt den Ammoniumablaufwert und die Sauerstoffkonzentrationen in den drei belüfteten Belebungsbecken. Die Belüftung im variablen Belebungsbecken 2 bleibt in der Regel abgeschaltet, d.h. 50 % des Belebungsbeckenvolumens stehen der Denitrifikation zur Verfügung. Die Sauerstoffkonzentration in Becken 4 bleibt zur Minimierung der Sauerstoffverschleppung in die Denitrifikationszone möglichst gering; zumeist bei 0,5 mg/L. Die Regelung der Nitrifikationsleistung erfolgt also vorrangig durch die Anpassung des Sauerstoffgehaltes in Becken 3. Hier werden in Spitzenzeiten Werte von über 3,5 mg/L erreicht wobei zumeist aber Werte um 1 mg/L genügen. Die vergleichsweise hohen Werte am 27.11 (Bildmitte) wurden durch die Außerbetriebnahme der Zwischenspeicher verursacht. Dies unterstreicht die Wichtigkeit der Zwischenspeicher für die Anlage. Durch die Inkaufnahme von geringen Rest-Ammoniumablaufkonzentrationen kann die Sauerstoffkonzentration im letzten Becken deutlich abgesenkt und damit Belüftungsenergie eingespart werden. Zudem kann damit die Belüftung im Bereich der Rezirkulationsleitung weiter vermindert oder sogar ganz abgestellt werden, wodurch sich abermals das Problem der Sauerstoffverschleppung entschärfen ließ.

In Abbildung 14 ist der Erfolg der durchgeführten Maßnahmen dargestellt. Es ist deutlich zu sehen, wie von Oktober zu November 1995 der Lufteintrag abnimmt. Einsparungen beim Luftvolumenstrom sind direkt mit entsprechenden Energieeinsparungen der Druckluftzeuger verbunden. Dass diese Veränderung nicht auf eine abnehmende Zulaufkraft zurückzuführen ist, zeigen die ebenfalls aufgeführten NH₄-N- und CSB-Zulaufkräften.

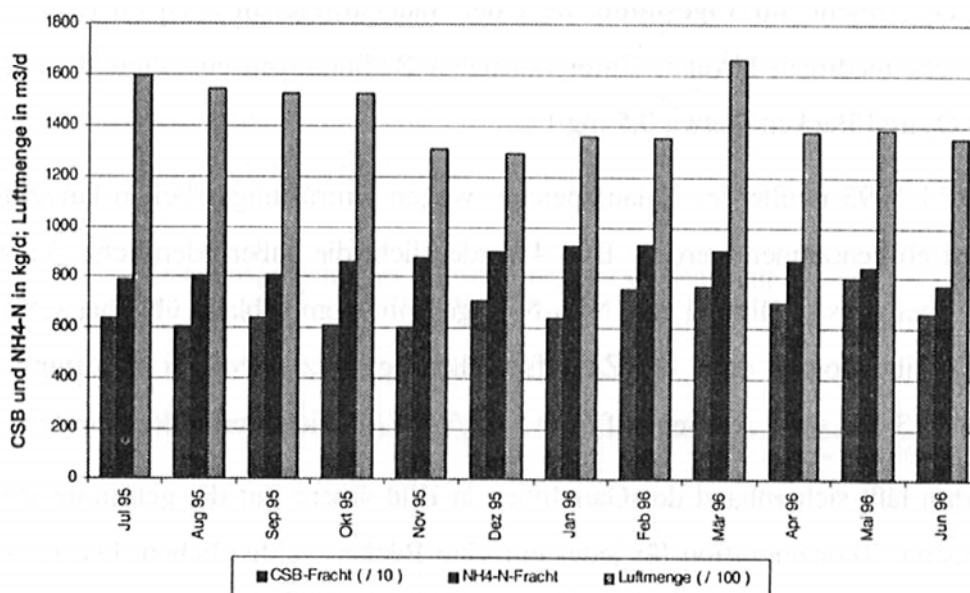


Abbildung 14: Verringerung des Lufteintrages durch Optimierung von Nitrifikation und Sauerstoff-Regelung auf der Abwasserbehandlungsanlage Hattingen [Schmitt et al., 1997]

5.6 weitere Regelstrategien

Seit einiger Zeit wird an umfassenden Lösungsansätzen gearbeitet, die die wechselseitigen Abhängigkeiten des Belebtschlammverfahrens erfassen können und damit eine bessere Optimierung des Gesamtbetriebs der Abwasserbehandlungsanlage erzielen. Sie regeln zumeist neben der Belüftung auch die variable Beckenaufteilung in belüftete und unbelüftete Zonen und die Rezirkulationsströme, evtl. aber auch weitere Betriebsparameter wie z.B. die Fällmitteldosierung. Umfassende Untersuchungen wurden hierzu in den vergangenen Jahren im Rahmen eines Forschungsprojektes am Institut WAR der Technischen Universität durchgeführt [Meyer, 1998 und Meyer, 2000].

Bei der Fuzzy Logic-Regelung werden verschiedene Messwerte als Einganggrößen (z.B. O₂-, NH₄-N-, NO₃-N-Konzentration) über Wenn-Dann-Regeln miteinander verknüpft und hieraus Stellgrößen (z.B. Sauerstoffsollwert) abgeleitet. Die Einganggrößen und die Zahl der Wenn-Dann-Regeln können dabei beliebig gewählt werden, so dass sich die Komplexität der Regelung beliebig steigern lässt [Meyer, 1998]. Im Idealfall erkennt die Regelung für jede mögliche Betriebssituation automatisch die besten Sollwerte und gibt diese an die Anlagensteuerung weiter. Die Fuzzy Logic-Regelung stellt prinzipiell keine völlig neue Regelstrategie dar, sondern verknüpft bekannte Regelstrategien (wie bereits gezeigt wurde) zu einem optimierten Gesamtkonzept.

Bei der modellbasierten Regelung wird die dynamische Simulation der biologischen Abwasserreinigung genutzt um die jeweils aktuelle Reinigungskapazität der Abwasserbehandlungsanlage anhand der vorhergegangenen Belastungszustände zu ermitteln. Hierdurch besteht die Möglichkeit die Betriebsparameter vorausschauend auf anstehende Zulaufereignisse anzupassen und z.B. die Beckenaufteilung zu verändern.

6 Probleme feinblasiger Druckluftbelüftungssysteme im Betrieb mit Auswirkung auf den Energieverbrauch

Seit einigen Jahren kommt es in vielen Fällen (vorwiegend bei Belüftungsmembranen aus EPDM) zu einem starken Rückgang der Leistungsfähigkeit der Belüftungselemente, wobei sowohl der Druckverlust der Belüftungselemente erhöht, als auch die Sauerstoffausnutzung herabgesetzt sein kann. Um trotzdem eine ausreichende Sauerstoffversorgung der Belebungsstufe zu erreichen, müssen die Drucklufterzeuger größere Luftvolumenströme bei gleichzeitig erhöhtem Gegendruck liefern. Dies kann zur Überlastung und zur Beschädigung der Drucklufterzeuger oder anderer Bauteile des Belüftungssystems führen. Ein deutlicher Anstieg des Energieverbrauchs ist jedoch in allen Fällen unvermeidbar. In diesem Zusammenhang wird häufig von einer verstärkten oder schädigenden Belagsbildung auf den Belüftungsmembranen berichtet [Wagner, 2003; von Hoessle, 2004; Wagner, von Hoessle, 2003].

An der Oberfläche der Belüftermembranen können während des Betriebes verschiedene Veränderungen auftreten. So kommt es in Einzelfällen durch zulaufende (Stör-)Stoffe zu anorganischen bzw. nicht biologisch bedingten Ablagerungen wie z.B. Kalkausfällungen. Auch aus dem Inneren

des Rohrleitungssystems können Störstoffe, wie Kondensat, Staub oder Fasern von defekten Luftfiltern der Gebläse an die Membran und in die Schlitze gelangen und so die Belüftungselemente schädigen. Auf Beschädigungen dieser Art wird hier, da sie sich in der Regel auf eine klar identifizierbare Einzelursache zurückführen lassen, nicht weiter eingegangen.

Weiterhin wird die Belüftermembran durch biologische Effekte beeinflusst. So bildet sich auf ihr, wie ausnahmslos auf allen im Abwasser-Belebtschlamm-Gemisch als Nähr- und Impfmedium befindlichen Oberflächen ein Biofilm, der je nach Material und Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich gut anhaften kann. Dieser Belag ist in der Regel unproblematisch und hat keinen Einfluss auf den Betrieb des Belüftungssystems. Von dieser unschädlichen biologischen Belagsbildung abzugrenzen ist die Bildung eines schädigenden Biofilms. Dieser schädigende Biofilm wächst ausgehend von der Membranoberfläche gegen die austretende Druckluft in die Belüftungsschlitze hinein und gelangt dabei sogar bis auf die Rückseite der Belüftungsmembran, d.h. auf die dem Stützkörper zugewandte Luftseite. Die im Biofilm vorhandene Bakterienmasse verstopft nun die Belüftungsschlitze und „fängt“ durch die Bildung einer stark adhesiven EPS (extrazelluläre polymere Substanz) weitere partikuläre und/oder anorganische Stoffe ein, was eine weitere Verdickung des Biofilms und den Verschluss der Belüftungsschlitze zur Folge hat. Als zusätzlicher schädigender Effekt wird beobachtet, dass der Weichmacher aus EPDM-Membranen herausgelöst wird, was zur Aushärtung der Membran und zum Anstieg des Druckverlustes des Belüftungselementes führt. Dieser Effekt wird auf die Nutzung des Weichmachers als Kohlenstoffquelle für die Bakterienmasse des Biofilms zurückgeführt [Wagner, 2003]. Abbildung 15 zeigt das Ausgasungsverhalten eines neuen und eines belegten Belüftungselementes mit Membranen aus EPDM. Zur Verdeutlichung des Abgasungsverhaltens wurde anstelle von Luft Wasser verwendet.



Abbildung 15: Abgasungsverhalten eines neuen und eines belegten Belüftungselementes

Abbildung 16 zeigt die Außen- und Innenseite einer belegten EPDM-Membran. Das Phänomen der Belagsbildung auf EPDM-Membranen ist unabhängig von der Form der Belüftungselemente (Rohre, Teller, Platten). Probleme mit einer schädigenden biologischen Belagsbildung auf Membranen aus Silikon sind den Verfassern nicht bekannt.

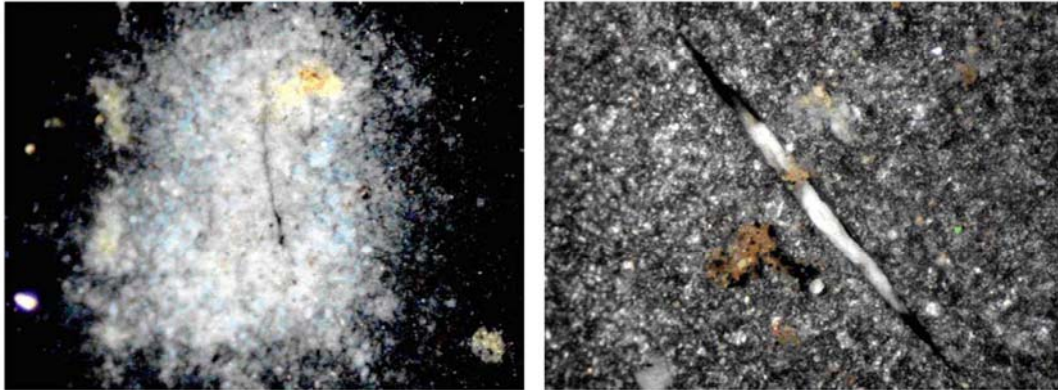


Abbildung 16: Innenseite (links) und Außenseite (rechts) einer belegten EPDM-Membran im Bereich eines Schlitzes

Um den Problemen mit steigendem Gegendruck zu begegnen, können die Membranen entweder gereinigt (s. Abbildung 17) oder ausgetauscht werden. Reinigungsversuche müssen insofern als kritisch angesehen werden, als dass nie restlos alle Anlagerungen und Bakterienagglomerate, die sich an und in den Membranschlitzen befinden, entfernt werden können. Hierdurch kommt es dann zu einer frühzeitigen Wiederbelegung der Membran. Versuche mit chemisch gereinigten Membranen haben gezeigt, dass eine erneute Belagsbildung bereits nach wenigen Monaten auftritt.



Abbildung 17: Chemische Reinigung von EPDM-Membranen (links: Frey, 2004; rechts: von Hoessle, 2004)

Weiterhin zeigen Sauerstoffzufuhrversuche mit gereinigten Belüftungselementen, dass die mechanische Reinigung mit Hochdruckreiniger und Dreckfräse (spezieller Zusatz bei einem Hochdruckreiniger) zwar immer eine Reduktion des Druckverlusts bewirkt; nach der Reinigung kann die Sauerstoffzufuhr der behandelten Belüftungselemente aber reduziert sein. Abbildung 18 zeigt entsprechende Versuchsergebnisse [Wagner und Looock, 2006]. Es ist zu erkennen, dass das belegte und ungereinigte Rohrbelüftungselemente einen Druckverlust von 106 mbar bei 6

m³/(m·h) aufweist. Nach der ersten Reinigung mit einem Hochdruckreiniger geht die Sauerstoffausnutzung bereits messbar zurück, während der Druckverlust nur um 2 mbar reduziert wird. Bei der nachfolgenden intensiven Reinigung mit einer Dreckfräse geht der Druckverlust deutlich auf 40 mbar zurück; gleichzeitig wird aber auch die Sauerstoffausnutzung reduziert.

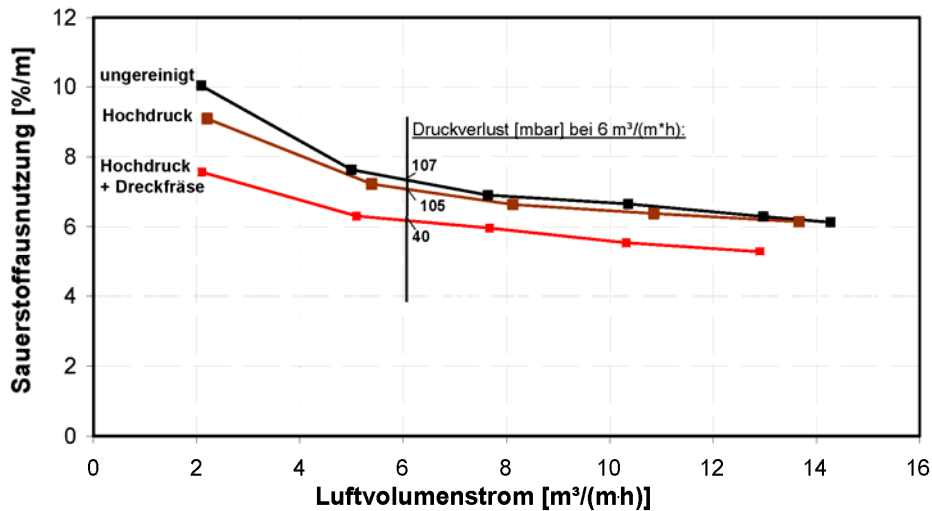


Abbildung 18: Sauerstoffzufuhrergebnisse belegter Belüftungselemente

Andererseits zeigen kombinierte Sauerstoffzufuhr- und Druckverlustmessungen an belegten und weitgehend ausgehärteten EPDM-Membranen, dass ein hoher Druckverlust der belegten Belüftungselemente keinesfalls ein Indikator für eine geringe Sauerstoffzufuhr ist.

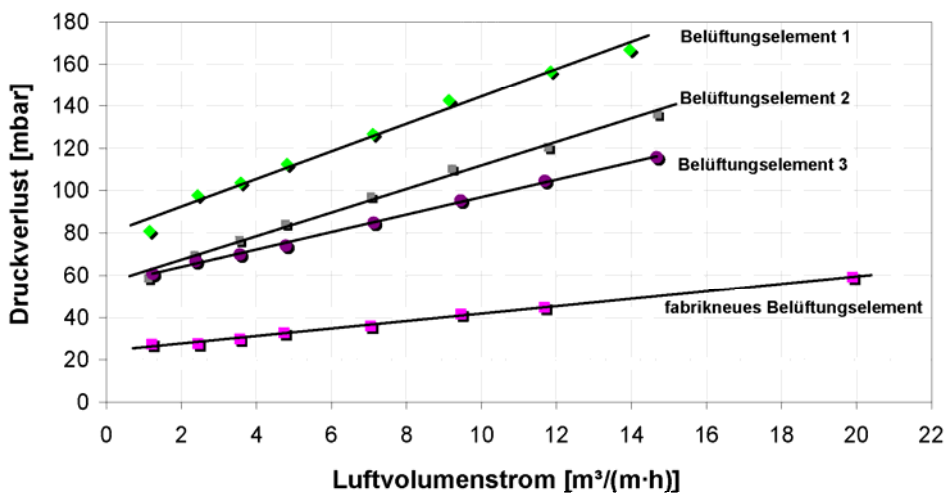


Abbildung 19: Druckverlust belegter EPDM-Rohrbelüftungselemente

Abbildung 19 zeigt die Druckverluste der aus verschiedenen Beckenzonen einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage stammenden belegten Belüftungselemente (Rohrbelüftungselemente) im Vergleich mit einem fabrikneuen Belüftungselement. Es ist zu erkennen, dass der Druckverlust gegenüber dem Neuzustand deutlich zugenommen hat, sich dabei aber die Belüftungselemente in einem Belebungsbecken hinsichtlich des Druckverlustes nicht gleichmäßig entwickeln.

Abbildung 20 zeigt demgegenüber die spezifische Sauerstoffausnutzung dieser Belüftungselemente. Während der Druckverlust der Belüftungselemente sehr unterschiedlich und teilweise sehr hoch ist, weicht die Sauerstoffausnutzung des neuen Elements und der Elemente 2 und 3 kaum voneinander ab. Belüftungselement 1 (das Belüftungselement mit dem höchsten Druckverlust) erzielt sogar die beste Sauerstoffausnutzung. Demnach entwickeln sich der Druckverlust und die Sauerstoffausnutzung im Betrieb unabhängig voneinander.

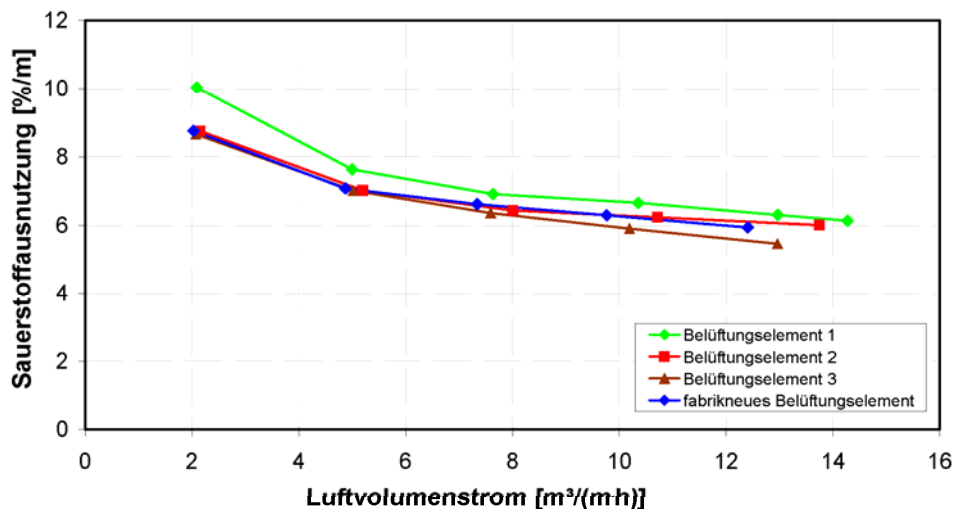


Abbildung 20: Sauerstoffausnutzung neuer und belegter Belüftungselemente

Um die Auswirkungen des ansteigenden Druckverlustes der Belüftungselemente und des Rückgangs der Sauerstoffausnutzung auf den Energieverbrauch eines Belüftungssystems zu beurteilen, wird nachfolgend eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Prinzipiell ist dabei der Energieverbrauch neben seiner ursprünglichen Bedeutung auch als Indikator für die mechanische und ebenso die daraus resultierende thermische Belastung der Druckluftherzeuger bzw. deren Komponenten (Motoren, Getriebe, Verdichterstufen) anzusehen, so dass der Energieverbrauch als zur Abwasserreinigung notwendiges „Übel“ nur solange steigerungsfähig ist, bis die schwächste Komponente des Belüftungssystems der Belastung nicht mehr stand hält. Im Ergebnis kommt es, falls keine vorgeschalteten Sicherungsmaßnahmen greifen, entweder zum Überhitzen der Antrie-

be bei Drehkolbengebläsen (Motoren und Getriebe) oder die Turboverdichter erreichen ihre Pumpgrenze.

Bei der Erstellung der Sensitivitätsanalyse wurden einige Zusammenhänge vereinfacht berücksichtigt. Der Druckverlust der Belüftungselemente beträgt im Neuzustand bei mittlerer Beaufschlagung ca. 30 mbar. Die Druckverluste des Rohrleitungssystems werden vereinfacht als konstant angenommen und betragen ebenfalls 30 mbar. Der Energieverbrauch der Drucklufterzeuger ergibt sich für Drehkolbengebläse aus der Multiplikation von Luftvolumenstrom und dem zu überwindendem Gegendruck des Belüftungssystems, der sich wiederum aus dem hydrostatischem Wasserdruck, den Rohrreibungsverlusten und dem Druckverlust der Belüftungselemente zusammensetzt. Eine genauere Berechnung mit einem detaillierten Ansatz für Turboverdichter zeigte, dass die Unterschiede zwischen Drehkolben und Turboverdichter kleiner als 1 % sind. Sie werden deshalb nicht getrennt dargestellt. Der Anteil der Belüftungselemente am gesamten Gegendruck liegt je nach Grad der belagsbedingten Druckerhöhung und der Einblastiefe zwischen 3,6 % (8 m Einblastiefe, keine Erhöhung des Druckverlusts, kein Rückgang der Sauerstoffausnutzung) und 25 % (4 m Einblastiefe, 300 % Druckerhöhung des Belüfters, Rückgang der Sauerstoffausnutzung auf 70 % des Ausgangswertes).

Bewirkt die Belagsbildung ausschließlich einen Anstieg des Druckverlusts der Belüftermembran, ohne dabei die Sauerstoffausnutzung zu verändern, bleibt der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom unverändert. Der Energieverbrauch steigt entsprechend des zu überwindenden Gegendrucks, der sowohl von der Einblastiefe (hydrostatischer Wasserdruck oberhalb der Schlitzöffnungen = 98,1 mbar/m) als auch dem Druckverlust des Belüftungselementes abhängt, an (s. Abbildung 21). Bei geringer Einblastiefe wirkt sich die Belagsbildung folglich (relativ gesehen) deutlich stärker aus als bei hoher Einblastiefe. So nimmt bei Anlagen mit geringer Einblastiefe von 4,0 m der Energieverbrauch bei einem 300-prozentigen Anstieg des Druckverlusts der Belüftungselemente der Energieverbrauch um 20 % zu, während bei 8,0 m Einblastiefe und einem 300-prozentigen Anstieg des Druckverlusts der Belüftungselemente nur ein Anstieg um 11 % erreicht wird.

Tritt zusätzlich zum erhöhten Gegendruck auch eine reduzierte Sauerstoffausnutzung der belegten Belüftungselemente auf, sind weitere Effekte zu berücksichtigen, so dass entsprechend nachfolgende Annahmen getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich der zur Sauerstoffversorgung erforderliche Luftvolumenstrom umgekehrt proportional zur Sauerstoffausnutzung der Belüftungselemente verhält. Mit steigendem Luftvolumenstrom erhöht sich zudem sowohl bei neuen als auch bei gebrauchten bzw. belegten Belüftungselementen der Druckverlust. Dabei wird zwischen minimaler und maximaler Beaufschlagung eines Belüftungselementes eine Erhöhung des Druckverlustes um 100 % bezogen auf den mittleren Druckverlust angesetzt. Die Druckverluste des Rohrleitungssystems werden wiederum vereinfacht als konstant angenommen.

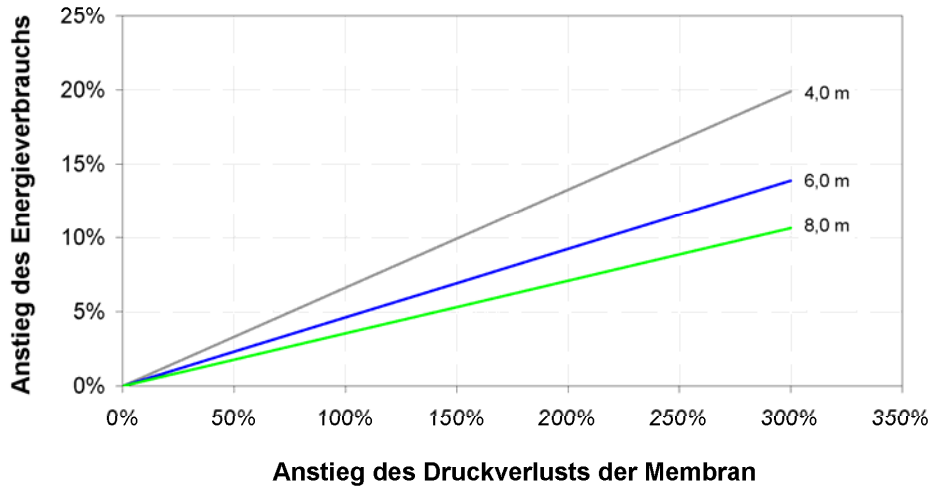


Abbildung 21: Energieverbrauch des Belüftungssystems bei ansteigendem Druckverlust des Belüftungselementes

Es zeigt sich (s. Abbildung 22), dass das Zusammenwirken beider Effekte den Energieverbrauch sehr schnell ansteigen lässt. Steigt der Energieverbrauch z.B. bei einem 200-prozentigen Anstieg des belüfterbedingten Druckverlusts noch um 9 % an, so steigt er bei einer zusätzlich um 10 % reduzierten Sauerstoffausnutzung bereits um 22 % an (bei 6,0 m Einblastiefe). Eine veränderte Sauerstoffausnutzung wirkt sich unabhängig von der Einblastiefe direkt auf den Energieverbrauch aus, während der Einfluss des ansteigenden Druckverlusts, wie bereits gezeigt wurde, stark von der Einblastiefe abhängt.

Somit ist zusammenzufassen, dass ein erhöhter Energieverbrauch und betriebliche Probleme durch die Überlastung des Belüftungssystems besonders bei Belebungsbecken mit geringer Einblastiefe zu erwarten sind, da sich hier sowohl der Rückgang der Sauerstoffausnutzung als auch der ansteigende Gegendruck deutlich auswirken. Bei tiefen Becken mit großer Einblastiefe steigt aufgrund des dominierenden Anteils des hydrostatischen Wasserdrucks am Gesamtdruck der Energieverbrauch durch den Anstieg des Druckverlusts der Belüfter weniger stark an als in flachen Becken. Deshalb resultiert der Anstieg des Energieverbrauchs dieser Belüftungssysteme primär aus zunehmenden Luftvolumenströmen, wie Abbildung 22 zeigt.

Praktisch werden die oben angeführten Effekte durch Tages-, Wochen- und saisonale Schwankungen überlagert, so dass sie sich einer direkten Messung während des laufenden Betriebs entziehen. Der Vergleich mit den Beobachtungen einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage des Ruhrverbands [Jardin, 2004] (s. Abbildung 23) zeigt dennoch, dass es sich bei den im vorliegenden Beitrag dargestellten Werten sehr wohl um praktisch auftretende Größenordnungen handelt.

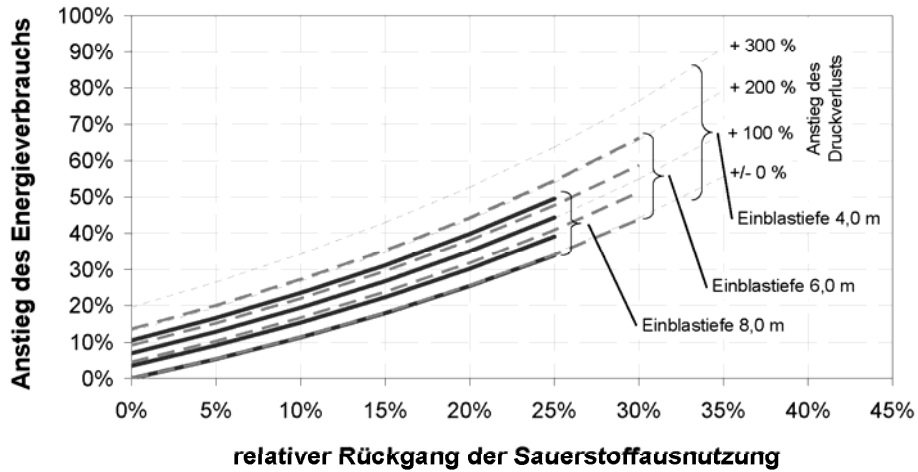


Abbildung 22: Energieverbrauch bei verringerter Sauerstoffausnutzung und erhöhtem Druckverlust der Belüftungselemente (für jede Einblastiefe sind Linien mit +/-0%, 100%, 200% und 300% Druckerhöhung der Belüftungselemente dargestellt)

Die monatliche Darstellung des durchschnittlichen täglichen Energieverbrauchs des Belüftungssystems lässt trotz der saisonalen Schwankungen erkennen, dass der Energieverbrauch bei Austausch der belegten Belüftungselemente gegen baugleiche neue Elemente mit Silikonmembranen schlagartig sinkt. Da sich die Belastungssituation der Abwasserbehandlungsanlage nicht verändert hat, kann anhand des Vergleichs der Januarzahlen bilanziert werden, dass die belegten Belüftermembranen einen Anstieg des Energieverbrauchs von ca. 45 % bewirkten. Eine Nachrechnung der veröffentlichten Daten dieser Anlage führt zu dem Ergebnis, dass sich bei einem Druckerhöhung der Belüfter von ca. 360 % und einer Einblastiefe von 5,5 m die Sauerstoffausnutzung um mehr als 15 % reduziert haben muss. Dabei wurde jeweils die Hälfte des Mehrverbrauchs an Energie für die Erhöhung des Luftvolumenstroms und die Erhöhung des Gegendrucks benötigt.

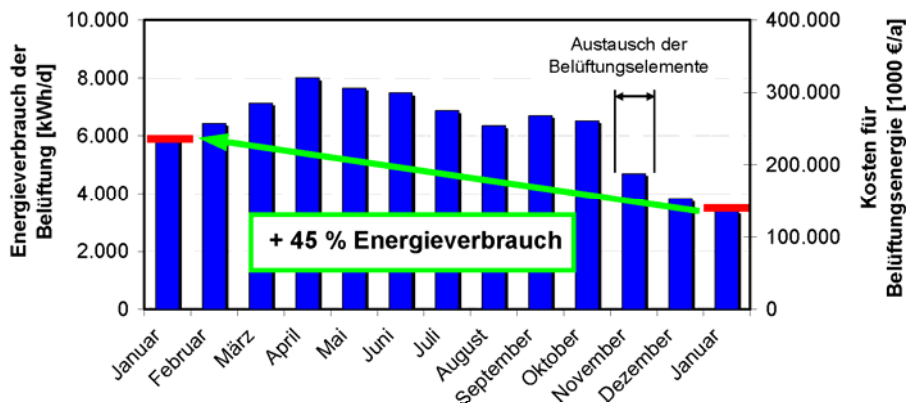


Abbildung 23: Anstieg des Energieverbrauchs einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage [Jardin, 2004]

7 Zusammenfassung

Allein für die ausreichende Belüftung von Belebungsbecken werden 10 % der Betriebskosten bzw. 50 % des Gesamtenergieverbrauchs von Abwasserbehandlungsanlagen aufgewendet. Bereits bei der Anlagenplanung wird durch die Auswahl und die bauliche Planung des Belüftungssystems die Effizienz des Belüftungssystems weitgehend festgelegt, wie anhand der Richtwerttafel und aktueller Vergleichswerte gezeigt wurde. Spätere Optimierungsbemühungen können Versäumnisse bei der konstruktiven Gestaltung und der technischen Ausrüstung des Belüftungssystems kaum wieder wettmachen. Als Optimierungsmöglichkeiten für den Betrieb wurden verschiedene Steuerungsprinzipien des Belüftungssystems und der Druckluftheizer dargestellt. So kann durch eine $\text{NH}_4\text{-N}$ -Regelung der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken 12 % der Belüftungsenergie gegenüber einer konstanten Sauerstoffkonzentration von 2 mg/L eingespart werden. Die Reduktion des Feststoffgehaltes im Belebungsbecken in den Sommermonaten ergibt bei 20°C Wassertemperatur Energieeinsparungen von 10 %. Durch eine Gleitdruckregelung der Druckluftheizer können bei gleich bleibendem Luftvolumenstrom 4 % der Belüftungsenergie allein durch die Reduzierung der Druckverluste auf der Hauptleitung eingespart werden. Weiterhin wurde auf die Problematik der schädigenden Belagsbildung auf feinblasigen Druckluftbelüftungselementen eingegangen und der Erfolg von Gegenmaßnahmen bewertet. Zudem wurde anhand einer Sensitivitätsanalyse der durch die Belagsbildung zu erwartende Mehrverbrauch an Belüftungsenergie dargestellt.

8 Literatur

- ATV (1997): ATV-Handbuch: Biologische und weitergehende Abwasserreinigung, 4. Auflage, Verlag Ernst&Sohn, Berlin
- ATV (1991): ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.-GFA, Theodor-Heuss-Allee 17, 53758 Hennef, Februar 1991
- ATV-DVWK (1997): ATV-DVWK-Merkblatt 268: Steuern und Regeln der N-Elimination beim Belebungsverfahren. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.-GFA, Theodor-Heuss-Allee 17, 53758 Hennef, Februar 1997
- ATV-DVWK (2000): ATV-DVWK-Merkblatt 265: Regelung der Sauerstoffzufuhr beim Belebungsverfahren. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.-GFA, Theodor-Heuss-Allee 17, 53758 Hennef, März 2000
- ATV-DVWK (2000): ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.-GFA, Theodor-Heuss-Allee 17, 53758 Hennef, Mai 2000
- ATV-DVWK (2003): ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 198: Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V.-GFA, Theodor-Heuss-Allee 17, 53758 Hennef, April 2003
- Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft (2001): Benchmarking in der Siedlungswasserwirtschaft. Österreichisches Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft (www.lebensministerium.at/publikationen)
- Bohn, T. (1997): Aktuelle Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen mit weitergehender Reinigung. in: Schriftenreihe WAR, Band 102, 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 6.11.97, Darmstadt
- Bohn, T. (1998): Einflussfaktoren der Betriebskosten bei der weitergehenden Abwasserreinigung. in: Schriftenreihe WAR, Band 108, 9. Gemeinsames Seminar-Abwassertechnik: Einsparungen von Kosten, Betriebsmittel, Energie und Personal auf Abwasserbehandlungsanlagen, 16./17.9.1998, Weimar
- Frey, W. (2004): Reinigung von Belüftermembranen. in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004 in Darmstadt, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2
- von Hoessle, R. (2004): Mikrobiologische Aspekte der Belagsbildung. in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004 in Darmstadt, Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2
- Holzenthal, K. (2003): Gleitdruckregelung von Klärwerksverdichtern. Korrespondenz Abwasser, 09/2003, S. 1157-1161

- Jardin, N. (2001): Auswirkungen der neuen ATV-DVWK Arbeitsblätter A 131 und A 198 (Entwurf) auf die Berechnung des Sauerstoffbedarfs. Schriftenreihe WAR, Band 134, 64. Darmstädter Seminar - Abwassertechnik: Neues zur Belüftungstechnik, 15.11.01, Darmstadt
- Jardin, N. (2004): Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen. in: 2. WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004 in Darmstadt. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts WAR der Technischen Universität Darmstadt e.V., WAR-TU 2
- Melsa, A. K., Habbe, R., Reichert, J., Viersen (1998): Potentiale zur Minderung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen – Eine Übersicht. in: Schriftenreihe WAR, Band 108, 9. Gemeinsames Seminar-Abwassertechnik: Einsparungen von Kosten, Betriebsmittel, Energie und Personal auf Abwasserbehandlungsanlagen, 16./17.9.1998, Weimar
- Meyer, U. (1997): Kosteneinsparung durch betriebssichere Stickstoffentfernung mit modernen Steuerungs- und Regelstrategien. in: Schriftenreihe WAR, Band 102, 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 6.11.97, Darmstadt
- Meyer, U. (2000): Untersuchungen zum Einsatz von Fuzzy-Control zur Optimierung der Stickstoffelimination in Abwasserbehandlungsanlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation, Dissertation, Schriftenreihe WAR, Band 127
- Pöpel, H.J., Wagner, M. (1998): Sauerstoffeintrag moderner Belüftungssysteme, Teil I Druckbelüftung und Teil II Oberflächenbelüftung, KA Korrespondenz Abwasser (36) Nr. 4 (Teil I, S. 453-457 und Teil II S. 582-590)
- Reichert, J. (2001): Betriebskosteneinsparungen bei Belüftungssystemen - Praxisbeispiele. Schriftenreihe WAR, Band 134, 64. Darmstädter Seminar - Abwassertechnik: Neues zur Belüftungstechnik, 15.11.01, Darmstadt
- Reicherter, E. (2003): Untersuchungen zu Kennzahlen als Grundlage für Kostenbetrachtungen in der Abwasserentsorgung, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Heft 84/2003, Universität der Bundeswehr München
- Schmitt, F., Klauwer, E., Feckler, H. (1997): Wirksame Maßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs auf Abwasserbehandlungsanlagen, Schriftenreihe WAR, Band 102, 52. Darmstädter Seminar – Abwassertechnik: Senkung der Betriebskosten von Abwasserbehandlungsanlagen, 6.11.97, Darmstadt
- Wagner, M. (2003): Biological Coating of Fine Bubble Diffusers, in: Proceedings WEF-TEC 2003, 15.10.2003, Los Angeles
- Wagner, M., Looock, P. (2006): Leistung und Bemessung von Belüftungseinrichtungen. DWA-WasserWirtschaftsKurs M/2 "Kommunale Abwasserbehandlung", Oktober 2006, Kassel

Wagner, M., Loock, P. (2006): Belagsbildung auf Membrandruckluftbelüftungselementen in Abwasserbehandlungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung. in: Belüftung von Belebungsbecken, Abschlussseminar zum DBU-Projekt „Messverfahren für die Sauerstoffeintragsleistung in Belebungsbecken“, 8.5.2006, Os-nabrück

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wagner (apl)
Dipl.-Ing. Peter Loock
Technische Universität Darmstadt, Institut WAR, Fachgebiet Abwassertechnik
Petersenstr. 13,
64287 Darmstadt

Tel.: +49 (0)6151 16 3759
Fax: +49 (0)6151 16 3758
Email: m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de

Veröffentlichung 5 **Wagner, M., Loock, P., Günkel, T.**
Design and Operational Aspects of Modern Fine
Bubble Aeration Systems, 10th IWA Specialised
Conference: Design, Operation and Economics of
Large Wastewater Treatment Plants,
9.-13. September 2007, Wien, Österreich

Design and Operational Aspects of Modern Fine Bubble Aeration Systems

M. Wagner, P. Loock, T. Guenkel

Technische Universität Darmstadt, Institut WAR, Wastewater Technology, Petersenstr. 13, 64287 Darmstadt, Germany (E-mail: m.wagner@iwar.tu-darmstadt.de)

Abstract: The aeration system is the controlling factor in terms of energy consumption in a municipal wastewater treatment plant. Against this background, professional design and operation are essential preconditions for low operational costs. First, the decisive parameters for the dimensioning of aeration systems, i.e. α -factor and Θ -factor, are discussed in detail. Secondly, characteristic values for the oxygen transfer rate and the standard aeration efficiency of modern fine bubble aeration systems are presented in a modified table of reference data. The impact of harmful coatings on fine bubble diffusers is discussed in respect of reducing operational energy costs.

Keywords: aeration, dimensioning, α -factor, Θ -factor, coatings formation

1. Introduction

One of the essential preconditions for a reliable and economic operation of an activated-sludge plant is a sufficiently dimensioned and reliable aeration system. About 70 % of the energy consumption in a wastewater treatment plant is taken up by the aeration system. Therefore, dimensioning and operational procedures play a decisive role.

To begin with, this article will demonstrate the procedure of dimensioning aeration systems, followed by the determination of the influencing variables of oxygen transfer. The α -factor and the temperature correction factor (Θ -factor), in particular, are discussed. Furthermore, achievable values for oxygen transfer rate and aeration efficiency of modern aeration systems are presented by means of a modified table of indicator values. In terms of the operation of fine bubble aeration systems, the impact of coatings formation on the energy consumption is discussed. Conclusions and a short summary will complete the article.

2. Dimensioning of Aeration Systems

2.1 Influencing Variables for the Dimensioning of Aeration Systems

The dimensioning of aeration systems is based on the fact, that the oxygen transfer rate under operating conditions (αOTR [kg O₂/h]) corresponds to the maximum oxygen uptake rate (OUR_h [kg O₂/h]), i.e. $\alpha OTR = OUR_h$. Based on the oxygen transfer rate under operating conditions αOTR , the standard oxygen transfer rate $SOTR$ is calculated. Standard conditions are: clean water, oxygen concentration $C = 0$ mg/L, water temperature $T = 20^\circ\text{C}$, air pressure $P = 1,013$ hPa (ASCE, 1991). The standard oxygen transfer rate $SOTR$ is calculated as:

$$SOTR = OUR_h \cdot \frac{f_d \cdot C_{s,20}}{(f_d \cdot C_{s,T} - C) \cdot \Theta^{(T-20)} \cdot \alpha} \quad [\text{kg O}_2/\text{h}] \quad (1)$$

with C = oxygen concentration [mg/L] (indices: s = standard, T = temperature), f_d = depth factor (taking into account the influence of water overpressure on $C_{s,T}$), $f_d = 1 + (d_e/20,7)^{-1}$, T = temperature, θ = temperature correction factor, α = α -factor

The oxygen uptake rate OUR_b as maximum oxygen demand derives from technical dimensioning (e.g. Metcalf & Eddy, 2003).

The further dimensioning of fine bubble aeration systems is carried out via the specific standard oxygen transfer rate $SSOTR$ [g O₂/ (m³·m at STP)]: g O₂ per standard cubic metre air per metre of bubble ascension d_e . Using this $SSOTR$ definition and $SOTR$ [kg O₂/h] the equations are:

$$SSOTR = \frac{1.000 \cdot SOTR}{Q \cdot d_e} \quad [g \text{ O}_2 / (m^3 \cdot m \text{ at STP})] \quad \text{and} \quad Q = \frac{1.000 \cdot SOTR}{SSOTR \cdot d_e} \quad [m^3/h] \quad (2, 3)$$

with Q = air flow rate [m³/h], d_e = diffusers submergence [m]

In Table 1 (see chapter 2.2) reference data for standard oxygen transfer rate (SOTR) and standard aeration efficiency (SAE) in fine bubble aeration systems are presented. As the α -factor has the larger influence on the dimensioning (linear influence in equation 1), it is discussed first (chapter 2.1.1), before - in chapter 2.1.2 - the Θ -factor is presented. The remaining values in equations 1 - 3 are tabular values, or are defined through equipment and aeration system, respectively.

2.1.1 α -Factor

The α -factor describes the ratio between the aeration coefficient under operating conditions and in clean water. Influencing variables are, amongst others, character (anionic/nonionic) and concentration of surfactants, sludge age, sludge load, and suspended solids content.

Figure 1 shows α -factors of fine bubble aeration systems as a function of air flow and shape and material of diffusers. The large range of 0.25 - 0.7 of the α -factor indicates the large variety of potential influencing variables (cf. Gillot et al. (2005), Rosso et al. (2005)).

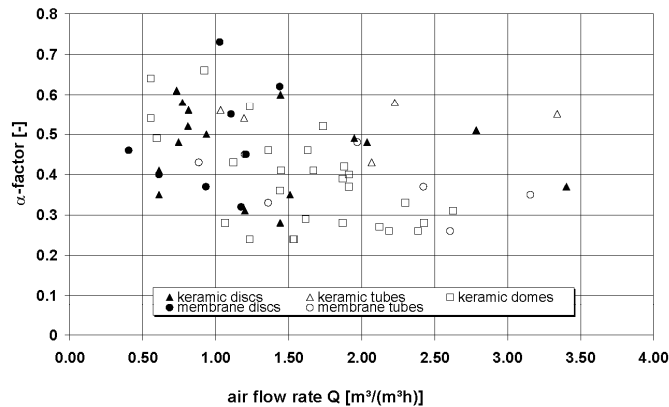


Figure 1: α -factor as a function of airflow and shape and material of aeration elements

Sludge age is a further parameter influencing the α -factor. With increasing sludge age, the α -factor tends to rise. For example, a sludge age of 3 days will result in α -factors of 0.3, while a sludge age of 25 days will produce α -factors of 0.85. Using fine bubble aeration systems, Reichert (1997) measured α -factors of 0.35 - 0.5 in the inflow area of an activated-

sludge tank, and 0.5 - 0.75 in the outlet area. Furthermore, α -factors fluctuate depending on the time of day.

In order to determine the impact of water depth on the α -factor, extensive investigations were carried out at the *WAR* Institute. Figure 2 shows that the α -factor does not depend on the water depth, thereby confirming the result, that sludge load (sludge age, respectively) has an impact on the α -factor.

Information about α -factors of membrane bioreactors becomes of increasing importance. In Figure 3 α -factors of large-scale membrane bioreactors are presented against the suspended solids content (SS measurements by the *WAR* Institute). A reduction in α -factors could be observed with increasing suspended solids contents. However, with SS contents up to 12 g/L, the α -factors averaged out $\alpha = 0.55$, a level comparable to conventional bioreactors with fine bubble aeration systems. Only higher SS contents of up to 16 g/L result in a mean α -factor of $\alpha = 0.4$.

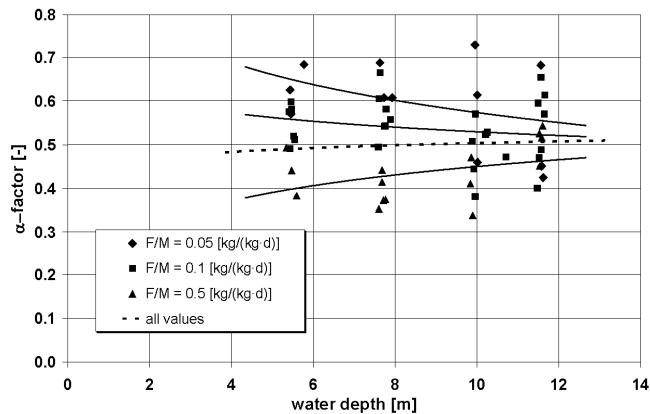


Figure 2: (Non-existing) correlation between α -factor and water dept

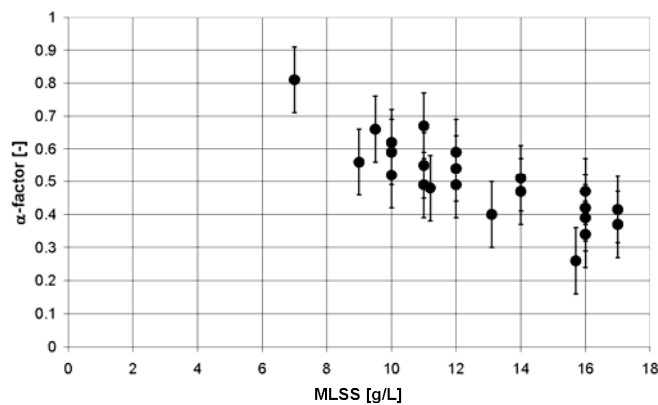


Figure 3: α -factor as a function of the suspended solids content (Krause/Cornel, 2004)

2.1.2 Θ -Factor

In order to determine the Θ -factor, preliminary investigations were carried out, considering water temperatures between 5°C and 35°C. A reactor (height: 3 m, diameter: 0.5 m) was used for the measurements in clean water, with a silicon disc aerator centered at the bottom of the reactor. By measuring the oxygen transfer rate, aeration coefficients $k_L a_T$ were determined and are presented in Figure 4 against the water temperature. The diagram demonstrates that $k_L a_T$ values increase with increasing water temperatures. It also shows $k_L a_{20}$ values calculated ($k_L a_{20} = k_L a_T \Theta^{(20-T)}$) with different Θ -factors (1.01, 1.02, 1.024, 1.03, 1.04). In order to point out the relevance of the determined $k_L a_{20}$ -values, the error of measurement of 5% was added to the diagram.

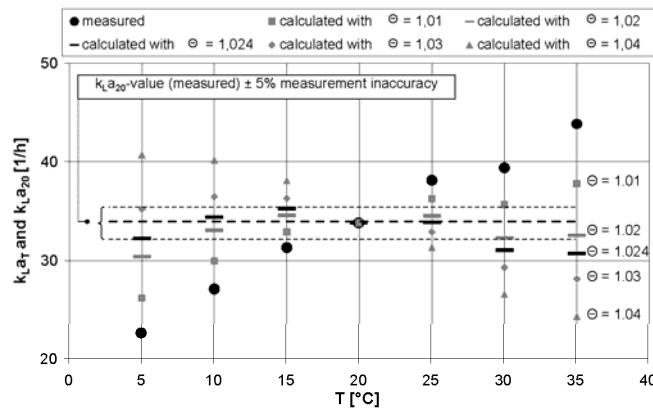


Figure 4: Aeration coefficients and $k_L a_{20}$ values (calculated with different Θ -factors) against the water temperature

As Figure 4 shows, standardization using Θ -factors of 1.02 and 1.024 complies with the measured values. Particularly with low and high water temperatures, Θ -factors of 1.01, 1.03 and 1.04 deviate strongly from the aeration coefficient measured at 20°C. With water temperatures below 10°C, $k_L a_{20}$ values calculated using $\Theta = 1.024$ are closer to the aeration coefficient measured at 20°C. The same applies to water temperatures above 25°C and a Θ -factor of $\Theta = 1.02$. With water temperatures between 10°C and 25°C, there is no difference between the correction factors $\Theta = 1.02$ and $\Theta = 1.024$. These measurements comply with the recommendations of Stenstrom & Gilbert (1981) to avoid a correction of the $k_L a_{20}$ value across a temperature range of more than 10°C.

2.2 Modified table of Reference Data

Based on data of more than 80 measurements of oxygen transfer rate in 30 wastewater treatment plants, a table of reference data was compiled for different designs of fine bubble aeration systems, showing oxygen transfer rates and standard aeration efficiencies under clean-water and operating conditions (Pöpel/Wagner, 1998). Reference data for "average" conditions were determined by calculating 75 % of the values under "favourable" terms.

The original table of reference data was compiled with oxygen transfer data before 1989. Since then, there have been enhancements in the efficiency of membrane elements and air compressors. Therefore, nowadays specific oxygen transfer rates [$\text{g O}_2 / (\text{m}^3 \cdot \text{m at STP})$] and

standard aeration efficiencies (kg/kWh) can be achieved, which are about 40 % higher than before 1989.

Based on oxygen transfer rates and standard aeration efficiencies increased by 40 %, a modified table of reference data was compiled for fine bubble aeration systems (cf. Table 1). In case these data are used to select a suitable aeration system, it is essential to take into account that in individual cases there are higher as well as lower oxygen transfer rates and standard aeration efficiencies. With fine bubble aeration systems, both factors depend on the adjustment between the air flow per diffuser, number of diffusers, water depth, air distribution, blower type, etc.

Table 1: Modified table of reference data for fine bubble aeration systems

system	favourable conditions		average conditions	
	$SSOTR$ [g O ₂ / (m ³ ·m at STP)]	SAE [kg/kWh]	$SSOTR$ [g O ₂ / (m ³ ·m at STP)]	SAE [kg/kWh]
<u>clean-water conditions</u>				
full floor coverage	24.0	4.5	18.0	3.4
race track systems	20.1	4.2	15.0	3.2
<u>operating conditions</u>				
full floor coverage	14.4	2.7	10.8	2.0
race track systems	12.3	2.5	9.3	2.0
Conditions: air flow 2 m ³ /(m ³ ·h at STP) and 1.5 m ³ /(m ³ ·h at STP) in race track systems and aeration; specific energy demand of blower: 5.5 Wh/(m ³ ·m); $\alpha = 0.6$				

Up-to-date measurements at the *WAR* Institute at Darmstadt Technical University confirm that there is a large variation in oxygen transfer data (cf. Figure 5). The measured values exceed as well as fall below the reference data, which are illustrated in the diagram as well. This phenomenon points out the enormous saving potential towards energy costs, which can be achieved by an optimal design of the aeration system. Individual cases show, that due to unfavourable concepts of aeration tanks, high specific oxygen transfer rates do not lead to high oxygen transfer efficiency, too.

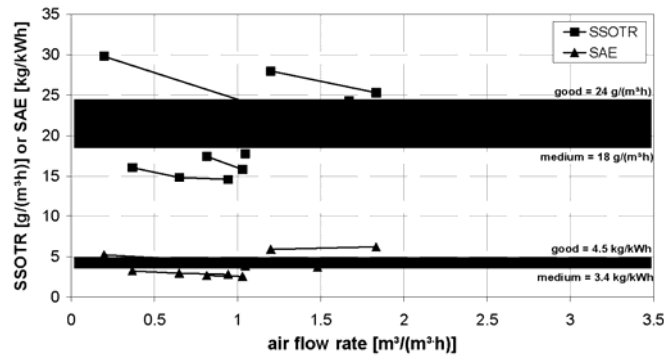


Figure 5: Comparison of measured and reference data (full floor coverage)

3. Operation of Fine Bubble Aeration Systems

Since a few years, in many wastewater treatment plants (mainly those using EPDM diffuser membranes), there is a large decline in the diffuser efficiency. Thereby, the pressure loss of the aeration elements may increase as well as the oxygen transfer efficiency may decrease. In this context, investigations showed an increased and/or harmful formation of coatings on the diffuser membranes (Wagner, 2003; Wagner, von Hoessle, 2003; Wagner, von Hoessle, Loock, 2005).

In order to evaluate the effects of the increasing pressure loss of the diffusers and the decrease in oxygen transfer efficiency on the energy consumption of aeration systems, a model was developed, and a sensitivity analysis was carried out taking into account the controlling factors.

The results (cf. Figure 5) show, that the interaction of increasing pressure loss and decreasing oxygen transfer efficiency causes a significant increase in energy consumption. Thereby, the decreasing oxygen transfer efficiency has an approximately directly proportional effect on the energy consumption, while the impact of the increasing pressure loss depends on the diffuser submergence.

Summing up, it can be pointed out, that an increase in energy consumption and operational problems (due to a capacity overload of the aeration systems) are to be expected mainly with aeration tanks with low diffuser submergence, caused by a significant impact of both decreasing oxygen transfer efficiency and increasing pressure loss. Due to the commanding hydrostatic water pressure, increasing pressure loss of diffusers do not play a decisive role in deep tanks with large diffuser submergence. Here, the increase in energy consumption primarily derives from increasing air flows.

As the effects described above are superimposed by daily, weekly, and seasonal variations, direct measurements are generally not possible during normal plant operation. However, compared to observations made in a municipal wastewater treatment plant of the Ruhrverband (Jardin, 2004) (cf. Figure 6), the values presented here show levels similar to real conditions.

Figure 6 shows the energy consumption of aeration systems [kWh/d], illustrated as monthly mean values. One can see that despite seasonal variations, the energy consumption

drops promptly after exchanging the coated diffusers by new diffusers (identical in construction) with silicone membranes. As the load of the wastewater treatment plant did not change, it is possible to compare the January values of the energy consumption. The comparison shows, that the coated diffuser membranes caused an increase in energy consumption of about 45 %.

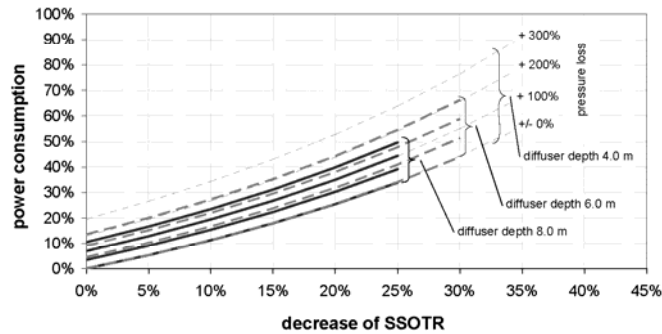


Figure 6: Increase in energy consumption due to reduced oxygen transfer efficiency and increased pressure loss of the diffusers (curves with +/-0%, 100%, 200% und 300% pressure loss of aeration elements are presented for each air injection depth)

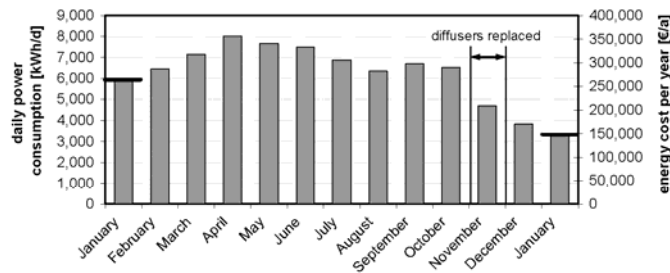


Figure 7: Increase in the energy consumption of a municipal wastewater treatment plant (Jardin, 2004)

4. Summery and Conclusions

Dimensioning of aeration systems: The dimensioning of aeration systems is based on the adjustment of the required oxygen uptake rate OUR by the oxygen transfer rate αOTR . The conversion of the oxygen transfer rate from operating to standard conditions is affected by the α -factor and the Θ -factor. The large variation of the α -factor (0.25 - 0.7) points out the different influencing variables. Apart from the wastewater characteristics these variables are, above all: sludge age (sludge load, respectively) and the suspended solids content. With the temperature correction factor (Θ -factor) it is possible to standardize the aeration coefficient $k_L a_T$ to the standard temperature of 20°C. Measurements of oxygen transfer rates in a

temperature range of 5°C - 35°C showed that Θ -factors of 1.02 and 1.024 enable a good correction ($k_{La_{20}} = k_{La_T} \Theta^{(20-T)}$). The further dimensioning of fine bubble aeration systems is carried out via the specific standard oxygen transfer rate *SSOTR* [g O₂/ (m³·m at STP)]. This parameter was defined, using data of more than 80 measurements of oxygen transfer rates in 30 wastewater treatment plants for different designs of fine bubble aeration systems. It is presented in a table of reference data. Up-to-date measurements at the *WAR* Institute at Darmstadt Technical University indicate that there is a large variation in oxygen transfer data. This phenomenon points out the enormous savings potential towards energy costs, which can be achieved by an optimal design of the aeration system.

Operation of fine bubble aeration systems: In many wastewater treatment plants there is a large decline in the efficiency of diffusers, caused by the formation of harmful coatings. Thereby, the pressure loss of the diffusers increases and the oxygen transfer efficiency decreases, resulting in a significant increase in energy consumption. Besides rising energy costs, operational problems (due to a capacity overload of the aeration systems) are to be expected mainly with aeration tanks with low diffuser submergence. Increasing energy demands for the operation of deep tanks are caused by higher air flows, which are necessary to improve oxygen transfer.

5. References

- ASCE 2-91 (1991) ASCE Standard, Measurement of Oxygen Transfer in Clean Water; American Society of Civil Engineers; New York, Juni 1991
- Gillot, S., Capela-Marsal, S., Carrand, G., Wouters-Wasiak, K., Baptiste, P., Héduit, A. (2005) Fine bubble aeration with EPDM membranes: conclusions from 15 years of practice, IWA Specialized Conference - Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, Krakow (PL)
- Jardin, N. (2004) Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen. in: 2. *WAR*-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen am 22.4.2004 in Darmstadt. Hrsg.: Verein zur Förderung des Instituts *WAR* der Technischen Universität Darmstadt
- Krause, S., Cornel, P. (2004) Aerobe Membranbelebungsverfahren zur Aufbereitung von Industrieabwasser und Prozesswasser, ATV-DVWK Membrantage, Tagungsunterlagen, Kassel, Juni 2004
- Metcalf & Eddy (2003) Wastewater Engineering - Treatment and Reuse, Fourth Edition, McGraw-Hill International Edition, New York
- Pöpel, H.J., Wagner, M. (1998) Sauerstoffeintrag moderner Belüftungssysteme, Teil I Druckbelüftung und Teil II Oberflächenbelüftung, Korrespondenz Abwasser, (36) 4 (Teil I, S. 453, Teil II S. 582)
- Reichert J. (1997) Bilanzierung des Sauerstoffeintrags und des Sauerstoffverbrauchs mit Hilfe der Abluftmethode, Dissertation, Schriftenreihe *WAR*, Band 96, Darmstadt
- Rosso, D., Larson, L.E., Stenstrom, M.K. (2005) Economic analysis of aeration system retrofits in Biological Nutrient Removal Activated Sludge Processes, IWA Specialized Conference - Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, Krakow (PL)
- Stenstrom, M.K., Gilbert, R.G. (1981) Effects of alpha, beta and theta factor upon the design, specification and operation of aeration systems, Wat. Res. Vol. 15, pp. 643-654
- Wagner, M. (2003) Biological Coating of Fine Bubble Diffusers, in: Proceedings WEF-TEC 2003, 15.10.2003, Los Angeles
- Wagner, von Hoessle (2003) Biological Coating of EPDM-membranes of Fine Bubble Diffusers, in: Water Science & Technology, Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operations and Economics, Volume 50, Number 07/2004, p. 79-85
- Wagner, M.; von Hoessle, R.; Looek, P. (2005) Newest developments concerning the biological coating of membranes of fine bubble diffusers. IWA Specialized Conference - Nutrient Management in Wastewater Treatment Processes and Recycle Streams, Krakow (PL)

Veröffentlichung 6 **Wagner, M., Loock, P.**
Biological Coating of Membranes of Fine Bubble
Diffusers: Impacts and Countermeasures, 80th Annual
Water Environment Federation Technical Exhibition
and Conference (WEFTEC),
13.-17. Oktober 2007, San Diego, USA

BIOLOGICAL COATING OF MEMBRANES OF FINE BUBBLE DIFFUSERS – IMPACTS AND COUNTERMEASURES

Martin Wagner, Peter Loock
Technische Universität Darmstadt,
Institut *WAR*, Chair of Wastewater Technology,
64287 Darmstadt, Germany

ABSTRACT

During the last years unusual biological coatings on membranes of fine bubble diffusers have been a problem in many wastewater treatment plants. The increase of the diffusers' back pressure as well as the reduced oxygen transfer of the coated membranes lead to a significant increase in the power consumption of the aeration system. In some cases the blowers have to be stopped due to overheating, so that a reliable operation of the wastewater treatment plant is no longer guaranteed. Especially diffusers with membranes of EPDM show problems, although in a few individual cases there are reports on problems with diffusers made of silicone, as well.

The investigations show that the back pressure of plasticizer-free silicone membranes - which are used as an alternative for plasticizer-containing EPDM membranes - is often higher than with EPDM membranes, not only when new but also during operation. Mechanical cleaning, e.g. with high-pressure cleaners and dirt blaster does not always lead to the desired success. Moreover, when using too high a cleaning intensity, membranes might be damaged without being noticed, and thus, the oxygen transfer efficiency of the diffusers might be reduced dramatically.

KEYWORDS

fine bubble aeration, biological coating, diffuser ageing, membrane, coating, cleaning, silicone, EPDM, back pressure

INTRODUCTION

For many years diffused air aeration systems with fine bubble diffusers for the oxygen supply of microorganisms have been installed in municipal wastewater treatment plants. Usually, perforated or slit EPDM membranes (EPDM rubber = ethylene propylene diene monomer rubber) are mounted on supports out of which the compressed air streams. During the last approx. 5 years there have been problems with this type of diffuser system, as harmful biological coatings are produced on EPDM membranes, causing an increase in the back pressure of the diffusers and consequently an increase in the overall back pressure of the aeration system. As a result, blowers have to be stopped due to overheating (positive displacement blower) or excess of the pump capacity (centrifugal or turbo compressors) (WAGNER, 2003a und 2003b, WAGNER, 2004). Therefore, sufficient oxygen supply of the microorganisms is

no longer guaranteed, so that discharge concentrations might exceed limit values. Simultaneously with an increase in the back pressure an uneven outgassing behavior is noticed, which can be seen on the water surface of the aeration tank, in particular. The combination of both effects results in a reduced oxygen transfer rate and a substantial increase in the power consumption of the aeration system.

In this paper, first, the process of the formation of coatings are described in general, followed by the quantification of the coatings' impact on the oxygen transfer efficiency and the back pressure of the diffusers. Then, the chances of success using mechanical cleaning measures are presented. Finally, the increased energy consumption of the aeration systems due to the formation of the coatings are balanced.

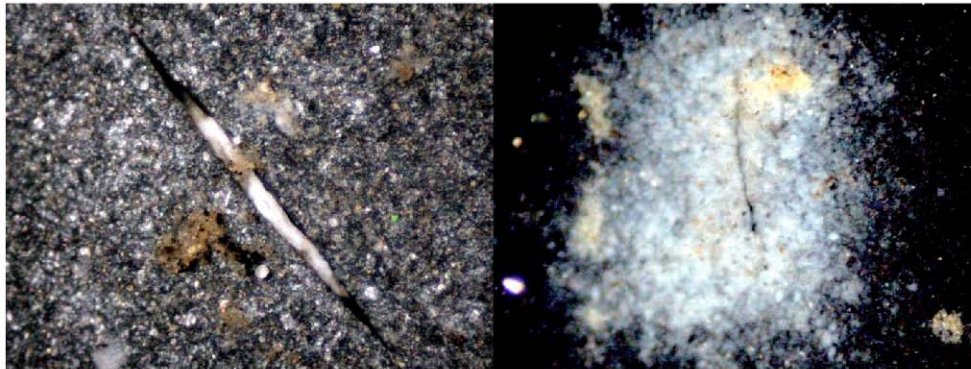
GENERAL DESCRIPTION OF THE FORMATION OF COATINGS

During operation, various changes might occur on the surface of the aeration membranes. For example, in individual cases there might be inorganic coatings or coatings, not caused biologically, respectively, such as lime precipitation, due to the inflow of (disturbing) substances. Furthermore, interfering material from the inside of the aeration system, such as condensate, dust or fibers from defective air filters of blowers might get in contact with the membranes and into the slits, thus damaging the diffusers. These kinds of damages will not be dwelled on in this paper, as normally they can be traced back to a clearly identifiable singular cause. Furthermore, there are biological impacts on the diffuser membranes. As with all surfaces occurring in mixtures of waste water and activated sludge (culture and inoculation medium), biofilms are formed on diffuser membranes, too. Depending on the material and the surface properties, the biofilm adheres more or less well. Normally, these coatings are unproblematic and do not have any impact on the operation of the aeration system.

One has to distinguish these harmless biological coatings from the formation of harmful biofilms. Starting from the membrane's surface, this damaging biofilm grows into the aeration slits in countercurrent with the compressed air, and even reaches the back side of the aeration membrane, i.e. the downstream face which is directed towards the supporting shell (Figure 1). On the one hand, the bacteria within the biofilm themselves block the aeration slits. On the other hand, due to the formation of strongly adhesive EPS (extracellular polymer substance) they "catch" additional particulate and/or inorganic substances, which cause a further thickening of the biofilm and a total blockage of the aeration slits.

As this process does not occur evenly spread in all slits of the membrane, the affected diffusers cannot outgas uniformly from the whole slit surface. In Figure 2 the unbalanced outgassing - via application of water - from a coated diffuser (right) is presented, in comparison with a new diffuser (left). The altered outgassing behavior negatively influences the standard oxygen transfer efficiency (SOTE) of each individual diffuser.

Figure 1 – Outside (left) and inside area (right) of a slit of a coated EPDM membrane [Wagner, 2003]



As the back pressure does not increase evenly in all diffusers within the activated sludge tank, the air distribution within the tank changes as well. Activated sludge tanks with full floor coverage and high coverage density, in particular, show an uneven bubble pattern, which - due to the large-scale flow pattern - leads to a reduced standard oxygen transfer rate (SOTR).

Figure 2 – Outgassing behavior of a new (left) and a coated diffuser (right)



Investigations prove that, on the one hand, the back pressure and the Shore A hardness of the EPDM membranes may increase while, on the other hand, their plasticizer content decreases equally. The loss in the plasticizer content causes the membranes to harden and shrink (Wagner and Looek, 2005). In the extreme case, this leads to the disablement of tube diffusers, due to the fact that the membrane is rigidly supported on the supporting shell. With disc and plate diffusers, it is suspected that the increasing tension of the membrane leads to an opening of the slits already in the non-aerated state. Thereby, when shutting off the compressed air, impurities might enter the diffuser and the piping, which might then accelerate the growth of biofilms within the diffuser and in the slits. In case the EPDM membranes have significantly shrunk, they will not reach their original effectiveness, even after intensive cleaning measures, as the loss of plasticizers is irreversible.

BACK PRESSURE IN LONG-TERM OPERATION

Test Set-up

In order to be able to observe the operational behavior of individual diffusers under real conditions, activated sludge tanks of three wastewater treatment plants were selected for the tests. In each case, 18 diffusers, mounted on movable aeration grids, were installed additionally to the existing compressed air system (Figure 3). Such plants were selected, which already have had problems with diffusers. Investigations were carried out with disc, plate and tube diffusers. Additionally to conventional EPDM and silicone formulas, a special microbe-resistant EPDM compound was applied. With the tube diffusers, two different silicone mixtures were used. In addition, some tube diffusers with an out-of-date EPDM compound, not available on the market anymore, from old stocks were tested.

Figure 3 – Testing facility for long-term operation tests



As material tests [Wagner und Loock, 2005] show that EPDM membranes tend to harden more strongly towards the outlet of the activated sludge tank, the additional diffusers were installed as close as possible to this location. Depending on the test plant, the compressed air is produced either by a positive displacement blower, exclusively provided for these tests, or is taken from the compressed air system of the wastewater treatment plant. Each diffuser is provided with its own supply air and dewatering pipe. The diffusers are operated using average operational air admission. They are situated 0.5 - 0.75 m below the water surface of the aerated nitrification tank. Due to the separate compressed air generator (plant A) and the low

depth of emergence of the diffusers (plant B and C), respectively, the air flow of the test diffusers can be adjusted independently of the air flow of the wastewater treatment plant.

The back pressure is measured every 2 weeks. Thereby, air flows are adjusted at 20, 40, 60, 80 and 100 % of the maximum air flow permitted for continuous operation, and the back pressure is determined after at least 20 minutes of operation with constant air flow. In addition to the pressure, data on the water level, air and water temperature and humidity are recorded, out of which the actual air flows applied to the diffusers are calculated. From the five reading points, the back pressure at 50 % of the permitted maximum operational air flow is calculated via regression analysis. Disc diffusers are operated using 8 m³/(diffuser·h) maximum, tube diffusers using 6 m³/(diffuser·h) maximum and plate diffusers using 6 m³/(diffuser·h) (silicone) and 7 m³/(diffuser·h) (EPDM), respectively.

Results

During the first operational stage of 4 - 8 weeks, the back pressure increases significantly in all diffusers, independently of the used membrane material. Thereafter, the back pressure stagnates on a medium level, however, there are very strong short-term fluctuations. The diffusers with silicone membranes show comparable or higher back pressure than diffusers with EPDM membranes (see Figure 4 and 5).

Figure 4 – Back pressure of EPDM membrane diffusers (Plant A)

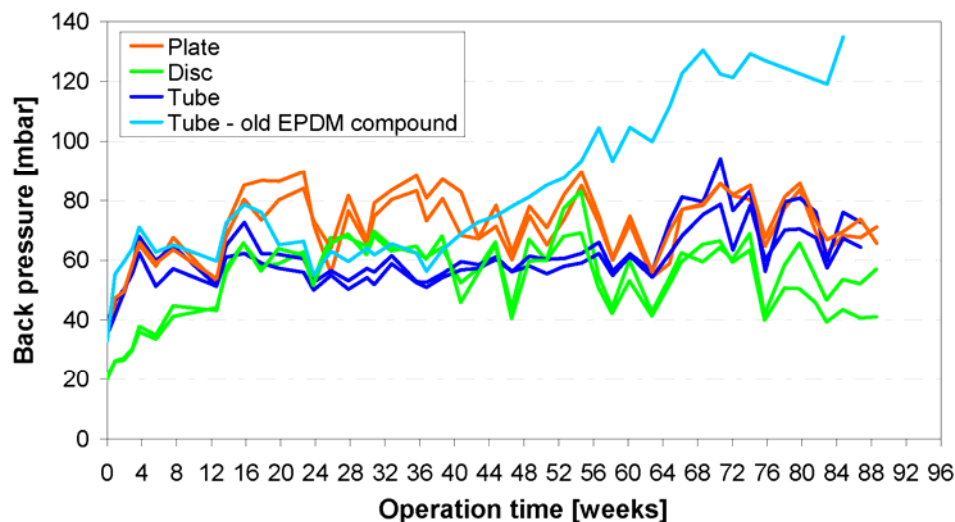
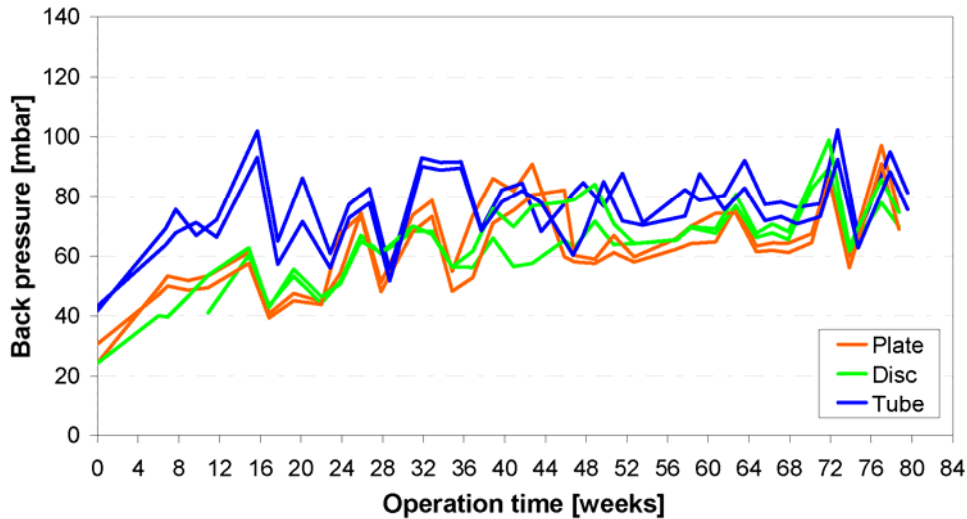
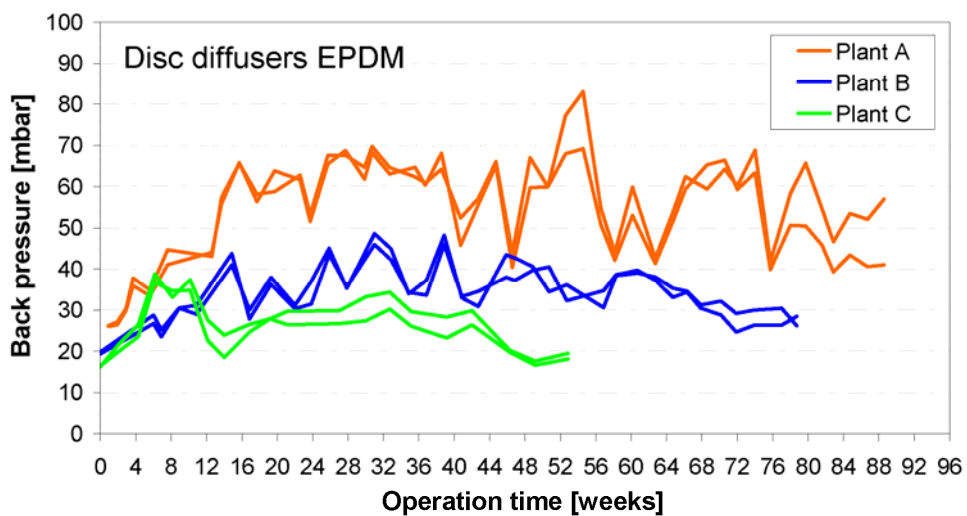


Figure 5 – Back pressure of silicone membrane diffusers (Plant B)



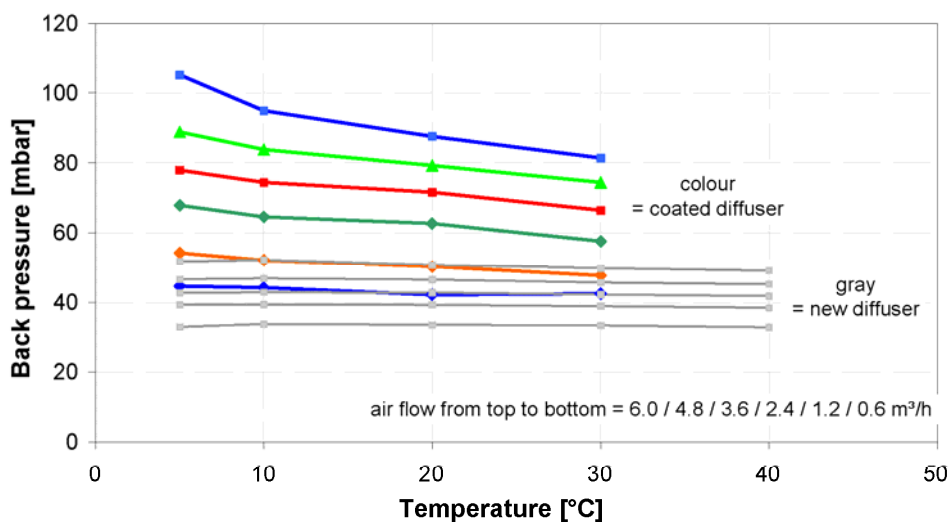
Only one of the diffusers showed a considerable pressure rise in terms of a harmful coatings formation. One of the membranes made of an out-of-date *EPDM* compound was affected. Thereby, a back pressure of up to 207 mbar was measured when applying high air flows. Furthermore, silicone diffusers in particular, developed very strong fluctuations of the pressure within short time periods. In addition, significant differences were observed among diffusers of the same type and material, but installed in different test plants, thus verifying the considerable influence of the waste water / activated sludge on the formation of coatings (see Figure 6).

Figure 6 – Back pressure of EPDM disc diffusers at different wastewater treatment plants



In order to narrow down the causes for the strong short-term fluctuations of the back pressure, measurements of the back pressure were carried out with new and used diffusers at different water temperatures. Thereby, the temperature of the inflowing compressed air was adjusted to the water temperature by means of a heat exchanger, thus guaranteeing the same temperature conditions at the membranes, water-wise and air-wise. Water temperatures between 5° C and 40° C were set and different air flows were investigated (see Figure 7). The results of these measurements were compared with the back pressures of the oxygen transfer tests, which had been carried out directly beforehand. Thereby, the chance of removing the coatings from the membrane during the measurements - due to the change in temperature - was eliminated.

Figure 7 – Back pressure as a function of temperature for new and coated EPDM tube diffusers



The test results show that during long-term operation the back pressure generally increases due to the formation of coatings on the membranes. Furthermore, the temperature conditions affect the behavior of the diffusers. With low temperatures, in particular, the back pressure increases considerably with high air flows, while with high temperatures the pressure increases only slightly. However, this effect can only explain to a small extent the fluctuations of the back pressure in long-term operation (see Figure 5). Therefore, further investigations have to be carried out in order to explain these phenomena.

OXYGEN TRANSFER TESTS

Test Set-up

In order to better evaluate the efficiency of new and used diffusers, oxygen transfer tests were carried out in the laboratories of the Chair of Wastewater Technology, using new and used diffusers. Thereby, diffusers are installed separately into a circular basin of approx. 750 L volume. Depending on the diffuser, the depth of emergence is about 90 cm. The measurements

are carried out via desorption method, after increasing the dissolved oxygen concentration, by aeration with pure oxygen gas. Comparable to the back pressure measurements during long-term operation, air flows are adjusted at 20, 40, 60, 80 and 100 % of the maximum air flow permitted for continuous operation. In addition to the oxygen concentration, which is measured via three electrodes, air flow, water and air temperature, atmospheric air pressure and back pressure are recorded. The relative humidity of the air taken in by the blowers from the interior rooms varies between 40 % and 60 % and is calculated with 50 %. The air flows are converted to standard conditions (1013 mbar, 0 °C, 0 % relative humidity), and the results of the oxygen transfer rate are calculated as standard oxygen transfer efficiency (SOTE).

Due to the presented test conditions, the results are not to be adopted directly for the conditions in a large-scale activated sludge tank. However, the results permit a statement about the relative change in the oxygen transfer efficiency of the diffusers and, thus, can be used to evaluate the efficiency of the diffusers.

Mechanical Cleaning Tests

As the dismantling of diffusers from activated sludge tanks during plant operation always includes a high effort in work and logistics (normally shut-down of the tank, allocation of personnel, lifting gear, diffusers, etc.), coated diffusers for the realization of cleaning tests are seldom available. Therefore, the effects of mechanical cleaning were first tested on new diffusers in various test series. By means of these tests, statements can be made, whether the membrane is damaged and to which extent the oxygen transfer efficiency and the back pressure are impaired.

Prior to the first measurement, the diffusers were submerged into lime-free water, and during a longer period, high air flows were applied according to manufacturer data, in order to guarantee a constant outgassing. During the first cleaning step, the diffusers were cleaned with cold drinking water, using a standard high pressure cleaner and a pressure of 80 bar. Thereby, the spraying distance was approx. 30 cm. In a second step the diffusers were cleaned using a so-called dirt blaster. The dirt blaster is a special nozzle, which, if required, is attached to the lance of the high pressure cleaner as a substitute for the usual fan jet. The dirt blaster concentrates the total energy of the high pressure cleaner within a very fine water jet, thus producing a considerably higher cleaning effect than the fan jet. In order to reach large areas with the fine water jet all the same, the jet is set into rotation, thus describing a circular arc on the surface to be cleaned. During the cleaning with the dirt blaster, the distance between the nozzle and the membrane was also 30 cm, and maximum operational air flow was applied to the diffusers.

Results

The results of the measurements of the oxygen transfer rates and the cleaning tests are presented in Table 1. The experiments lead to the unexpected result that in most of the cases cleaning measures with high pressure cleaner as well as with dirt blaster increase the oxygen transfer rate of the diffusers, already when brand new, and thereby reduce the back pressure.

Table 1 - Results of the cleaning tests, using brand new diffusers

type of diffuser	material	high pressure		dirt blaster (80 bar)		dirt blaster (150 bar)	
		SOTE	ΔP	SOTE	ΔP	SOTE	ΔP
tube	EPDM	+ 0.5	+ 0.2	+ 1.2	- 10	- 3.2	- 16
	silicone	- 2.0	- 1.6	- 5.5	- 26	- 4.7	- 32
plate	EPDM	+ 1.5	- 2.4	+ 4.4	- 5.4	-	-
	silicone	+ 2.6	- 2.5	+ 3.6	- 14	-	-

data in %-deviation from the initial value of a brand new diffuser identical in construction, in each case mean values of measurements at air flows adjusted at 20, 40, 60, 80 and 100 % of the maximum air flow permitted for continuous operation

It was not possible to define in detail the process responsible for this effect. However, on the one hand, it is assumed that due to mechanical stress during the cleaning process, the membrane material is slightly stretched, thus improving the opening of the slits. On the other hand, the cleaning process might remove possible impurities - left over from the manufacturing process - from the membranes and out of the slits. For documentary reasons, all diffusers were submerged into a water-filled glass basin, before and after the cleaning measures, and photographed while operating. However, no changes in the outgassing behavior could be observed this way.

Damages of the membrane already after the first cleaning, were only observed when cleaning silicone tube diffusers with a high pressure cleaner. Additional, more intensive cleaning with a dirt blaster at 150 bar resulted in a damage of the membranes, independently of the membrane material. These damages are described in the chapter „Cleaning tests with diffusers from long-term operation tests“. Due to the high damage risk, the manufacturer of the tube diffusers recommends the exclusive use of high pressure cleaners with a fan jet and a minimum distance of 50 cm between membrane and jet. Further cleaning tests with plate diffusers are pending. Furthermore, it is to be tested, whether the application of water to the diffusers during the cleaning process might improve the cleaning effect.

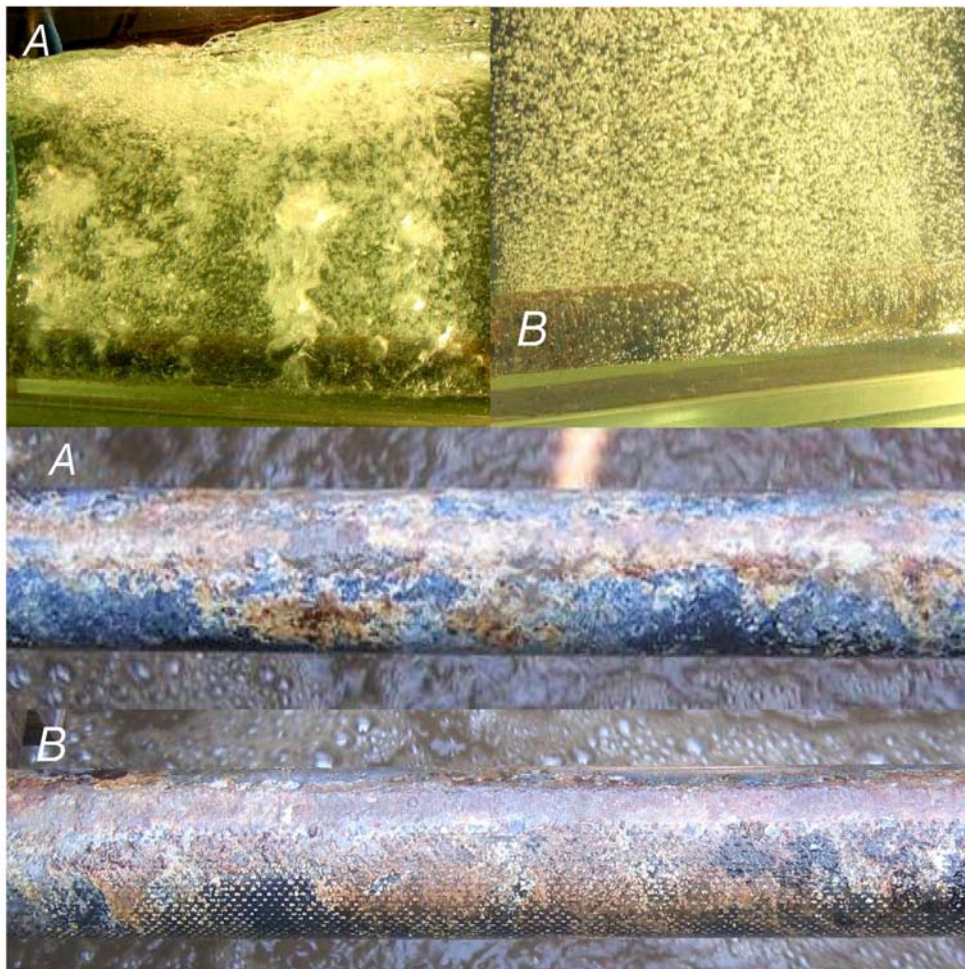
Cleaning of diffusers from long-term operation tests

During the long-term tests, one of the diffusers made of an out-of-date EPDM compound developed an extremely high back pressure, starting in the 36th week of operation (see Figure 4, Plant A). This diffuser (A) was removed, together with the adjacent diffuser (B), which is also made of an out-of-date EPDM compound, and the tube diffusers with EPDM membranes, and they were investigated in detail. The EPDM membrane of diffuser (A) has shrunk to such an extent, that it is rigidly supported on the supporting tube. Therefore, the compressed air cannot spread out uniformly beneath the membrane, a process needed for the even outgassing of all slits. Thus, the diffuser, which now only ejects air from a few slits located directly at the air duct, only produces unevenly spread and very large bubbles. The membrane of diffuser (B) has also significantly hardened. However, this diffuser does not show a significant increase in the back pressure, and the outgassing behavior is hardly worse than with a brand new diffuser. In order to observe further developments, the diffuser presented in these investigations was included again into the long-term tests

In Figure 8 the bubble patterns of diffuser (A), using medium air flow, and diffuser (B), using minimum air flow, are presented, as well as photographs of the coatings of the membrane sur-

faces. The dark brown spots are residues of adsorbed activated sludge, which could not be removed by careful cleaning with clear water. The spots, colored light brown, light grey and white, present the actual coating. It is noticeable that not only are the coatings of membrane (A) significantly thicker than those of membrane (B), but also significantly more light grey spots exist due to the increased formation of EPS. Optically, one cannot distinguish the coatings on the membranes with new EPDM compound (not shown) from the coatings of membrane (B).

Figure 8 – Tube diffusers (out-of-date EPDM compound) from long-term tests



Following the visual appraisal, oxygen transfer tests and cleaning tests were carried out with the dismantled diffusers. In Table 2 the results are presented, in comparison with a new EPDM diffuser (=100 %). The values of diffuser (A) show that this diffuser has become practically inoperative. The oxygen transfer efficiency of the diffusers with membranes made of new EPDM compound declines only slightly during operation. In contrast, the membranes made of the out-of-date EPDM formula loose significantly more in efficiency. The back pres-

sure of the remaining functioning diffusers increases between 44 % and 69 %. Thereby, one has to note that these values only present snap-shots, as the back pressure strongly fluctuates during operation (see Figure 5).

The measurements following the cleaning of the diffusers show that the oxygen transfer efficiency of the diffusers did not improve. The back pressure is reduced, however, partly at the expense of the oxygen transfer efficiency.

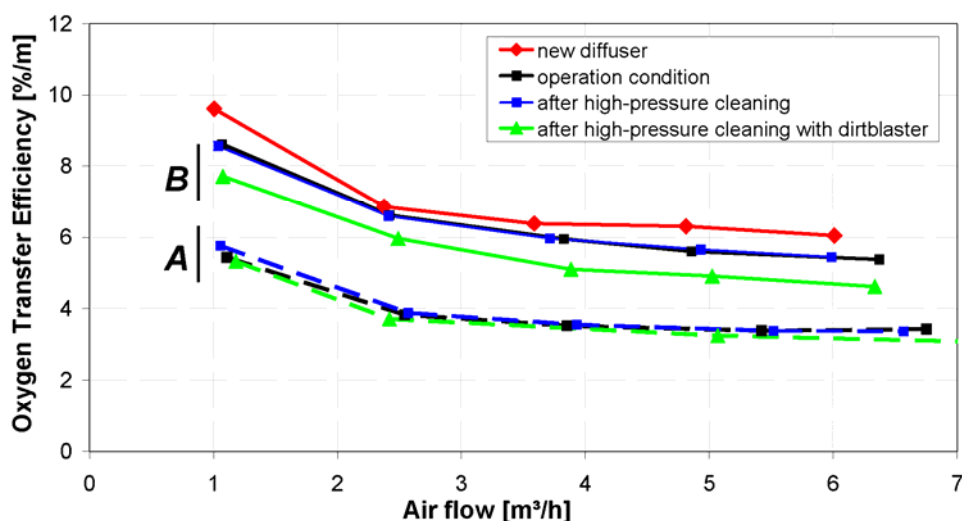
Table 2 – Cleaning results of coated diffusers from long-term tests

type of diffuser	material	operation		high pressure		dirt blaster	
		SOTE	ΔP	SOTE	ΔP	SOTE	ΔP
tube	EPDM	- 1	+ 69	- 3	+ 65	- 3	+ 42
		- 2	+ 44	-	-	-	-
	EPDM old comp.	(A) - 43	+ 208	- 43	+ 218	- 56	+ 108
		(B) - 8	+ 59	- 8	+ 41	- 19	+ 38

data in %-deviation from the initial value of a brand new diffuser identical in construction (= 100 %); in each case mean values of measurements at air flows adjusted at 20, 40, 60, 80 and 100 % of the maximum air flow permitted for continuous operation

In Figure 9 the results of the oxygen transfer tests of diffusers (A) and (B) are presented in detail, as well as the comparison with a brand new EPDM diffuser, using different air flows. Generally, the oxygen transfer efficiency reduces with increasing air flows. Thereby, the differences between the test series increase with increasing air flows. The values of Table 2 have been calculated from the curves presented in the diagram, by means of regression analysis.

Figure 9 – Oxygen transfer efficiency of diffusers (A) and (B) before and after cleaning

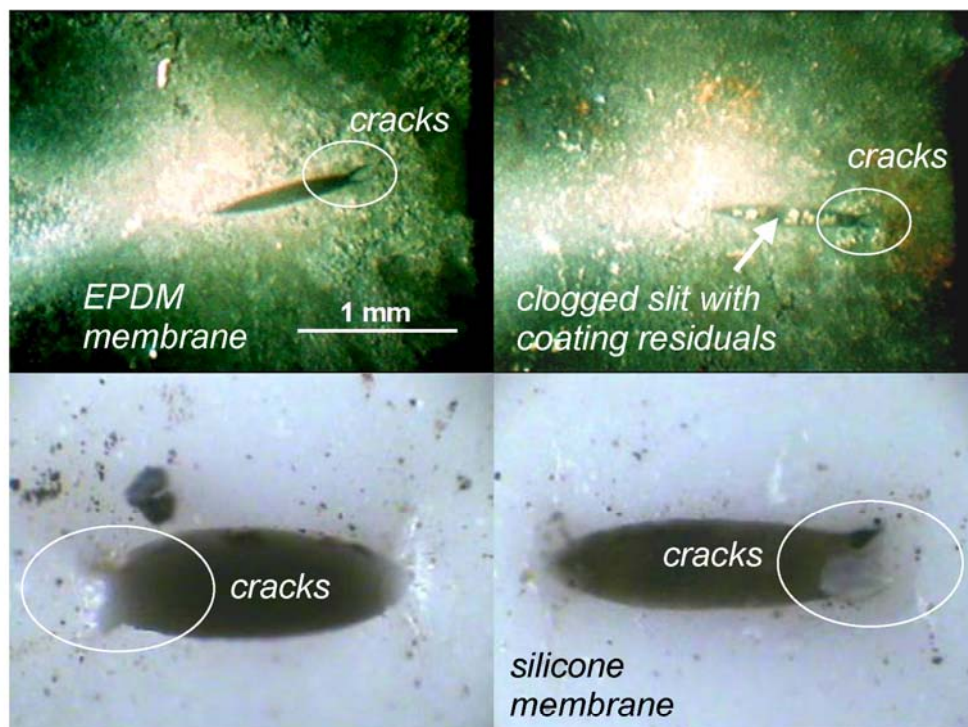


The diffusers were investigated microscopically before and after each cleaning step. A microscope camera enabled the production of pictures of the EPDM membranes during operation at maximum continuous air flow. Thus, the opening of the slits of the EPDM membrane exactly

presents the opening found during operation (see Figure 10). The photographs of a cleaned silicone, which are presented in comparison, were taken with a light-optical microscope, as generally used in laboratories. For this, part of the membrane had to be cut off and mounted on a holder. Therefore, the slits in the picture are stretched more than during operation.

While no damages were visible before and after high pressure cleaning, many of the slits show ripped edges after being cleaned with the dirt blaster, indicating too high a mechanical stress during cleaning. Even so, one can clearly observe remains of the coatings on the membrane surface. A large number of the slits is still blocked, even after intensive cleaning.

Figure 10 – Slits after cleaning with dirt blaster



POWER CONSUMPTION

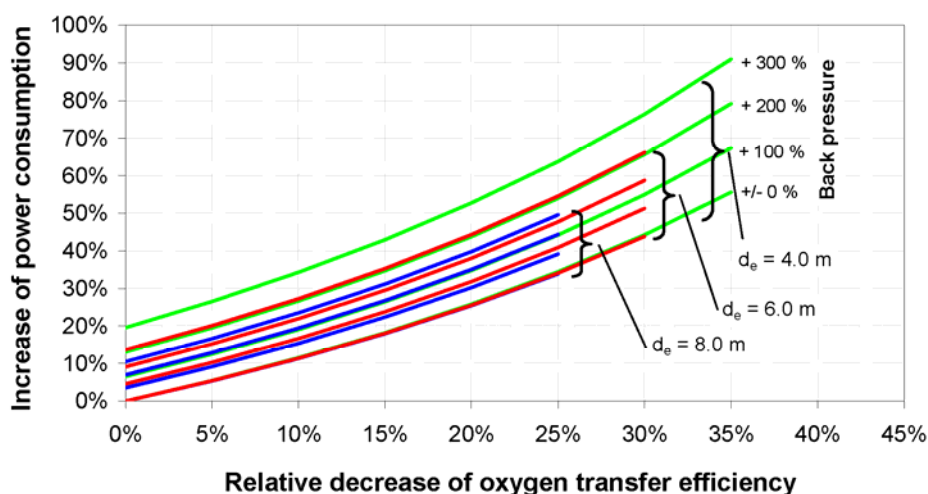
In order to evaluate the impact of the diffusers' increasing back pressure and the decrease in oxygen transfer efficiency on the power consumption of aeration systems, a sensitivity analysis is carried out. In principle, the power consumption is - beside its original significance - considered as an indicator for the mechanical as well as the resulting thermal load of the air compressors and their components (motors, gears, compressor units), respectively. Therefore, the power consumption - as a necessary "evil" in wastewater treatment - can only be increased until the weakest component of the aeration system no longer withstands the stress. The results are, in case there are no upstream safety measures, overheating of positive displacement blowers (motors and gears) or excess of the pump capacity (turbo compressors).

The power consumption of the blowers is calculated, with sufficient accuracy, and when knowing the efficiency factor, by multiplication of the air flow and the back pressure of the aeration system to be overcome. The latter consists of the hydrostatic pressure (98.1 mbar/m), friction loss of the tubes (incl. valves) and the back pressure of the diffusers.

The air flow needed for oxygen supply increases inversely proportionally to the oxygen transfer efficiency of the diffusers. With increasing air flow, their back pressure increases according to the increased loading of the diffusers. It appears (see Figure 11) that the combination of both effects results in a substantial increase in the power consumption. For example, with a 200 % increase in the diffuser-caused back pressure, the power consumption increases only approx. 9 %, whereas it increases approx. 22 % in case the oxygen transfer efficiency is reduced 10 % in addition (depth of emergence 6.0 m).

In summary, one has to expect increased power consumption and operational problems due to the overstressing of the aeration systems, particularly with activated sludge tanks of low depth of emergence. Here, the decline of oxygen transfer efficiency and increasing counter pressure have a significant impact. Due to the dominant influence of the hydrostatic pressure, the increase in the power consumption - caused by the increase in the back pressure of the aeration systems - is not as strong in deep tanks with a large depth of emergence as in shallow tanks.

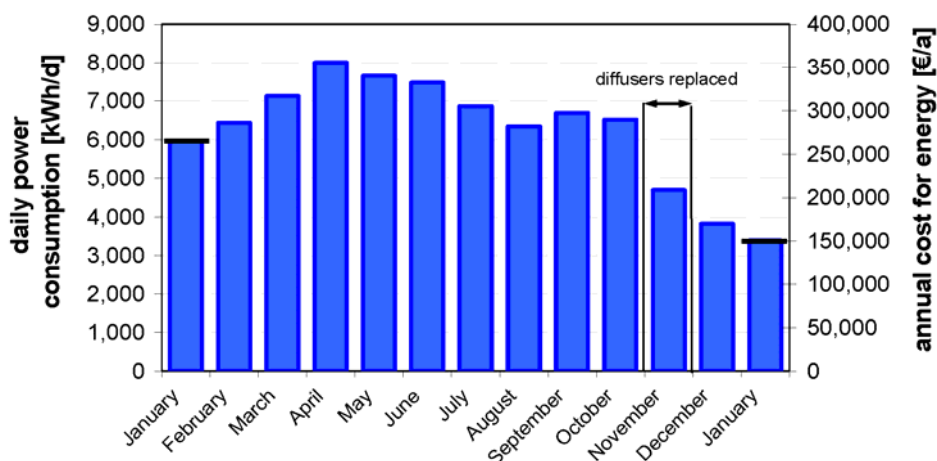
Figure 11 – Power consumption as a result of increasing diffuser back pressure and loss of oxygen transfer efficiency (for each depth of emergence graphs for +/-0 %, 100 %, 200 % and 300 % increase of back pressure are shown)



As the effects described above are superimposed by daily, weekly, and seasonal variations, direct measurements are generally not possible during normal plant operation. However, compared to observations made in a municipal wastewater treatment plant of the Ruhrverband (Jardin, 2004) The values presented here show levels similar to real conditions. Figure 12 shows the power consumption of aeration systems [kWh/d], illustrated as monthly mean values. One can see that despite seasonal variations, the power consumption drops promptly after exchanging the coated diffusers by new diffusers (identical in construction) with silicone membranes. As the load of the wastewater treatment plant did not change, it is possible to

compare the January values of the power consumption. The comparison shows, that the coated diffuser membranes caused an increase in the power consumption of about 45 %.

Figure 12 – Increase in the power consumption of a municipal wastewater treatment plant of the Ruhrverband, Germany (Jardin, 2004)



The recalculation of published data on this plant, leads to the result that with a pressure rise in the diffusers of approx. 360 % and a depth of emergence of 5.5 m, the oxygen transfer efficiency must have been reduced by more than 15 %. Thereby, half of the additional power consumption is needed for increasing the air flow and the air pressure, respectively.

DISCUSSION

Long-Term Operation Tests

The results of the long-term tests show that a slight increase of the back pressure, caused by the formation of coatings, occurs with all materials and types of diffusers. After a rapid pressure rise within the first 4 - 8 weeks of operation, the back pressure stagnates on a medium level, which is superimposed by strong, short-term fluctuations. Thereby, the back pressure in the tested silicone membranes is - against former assumptions - slightly higher than the back pressure of EPDM membranes, on the same level at best, not only when brand new, but also during operation.

During the design of plants, the back pressure of brand new diffusers is often consulted for comparing different diffusers. However, due to the pressure rise shortly after the start of operation, this value becomes practically insignificant and cannot be used sensibly neither for the operation nor for planning purposes.

The cause for the strong fluctuations of the pressure has to be investigated further. The investigations on the back pressure at different temperatures show an increased temperature sensitivity of the diffusers in operating conditions. However, this cannot be the exclusive explanation for the observed fluctuations.

Oxygen Transfer Tests

The results of the oxygen transfer rate measurements with EPDM tube diffusers from the long-term test show that the operational pressure rise, as normal in all diffusers, has only marginal effects on the oxygen transfer efficiency of the individual diffusers. Membranes made of older EPDM compounds can harden and shrink, a fact which - in tube diffusers - results in a large decline of the oxygen transfer efficiency and parallel high back pressure. The trouble-free behavior of new EPDM compounds shows that the efforts of the manufacturers to develop EPDM compounds of long-term stability have been successful.

The continuation of the research project will show whether operating EPDM membranes of disc and plate diffusers also harden and shrink. Due to their design, one has to expect that the effects of a shrinking of these diffusers' membranes are different than with tube diffusers.

Mechanical Cleaning

The results of the diffuser cleaning tests with high pressure cleaner and dirt blaster show that the cleaning intensity has to be adjusted to the mechanical load capacity of the different membranes. In case the mechanical stress during cleaning is too high, e.g. caused by the use of a dirt blaster, membranes are damaged, as the slits are ripped by the high pressure jet. Thus, the oxygen transfer efficiency is reduced. The thicker membranes of the plate diffusers appear to be of advantage in this case.

On the other hand, often the mechanical cleaning of already coated membranes did not result in the expected success, as residues of the coatings remain in the slits. Thereby, the outgassing from the membrane was impaired in such a way that the oxygen transfer efficiency decreased even below the level of the uncleaned membranes. It is assumed that part of the coatings residues entered the slits due to the cleaning process. However, the back pressure can always be decreased using sufficient intensity (dirt blaster). The target for the practical application of mechanical cleaning should be, to determine the maximum cleaning intensity at which damages of the membranes are just avoided. Finally, in order to evaluate the cleaning effect in advance, it is recommended to carry out preliminary tests, prior to the cleaning of the diffusers of an activated sludge tank.

Power Consumption

The final sensitivity analysis shows that the increase in the back pressure in activated sludge tanks with low depth of emergence results in a larger increase in the power consumption than in tanks with large depth of emergence. This phenomenon is mainly caused by the fact, that the fraction of the diffusers' back pressure in the total back pressure of the aeration system decreases with increasing depth of emergence. On the other hand, the decline of the oxygen transfer efficiency of the diffusers has to be balanced via an according increase in the air flow, independently of the depth of emergence. Thereby, the power consumption increases proportionally to the increase in the air flow. Thus, one has to expect increased power consumption and operational problems due to the impacts of a harmful formation of coatings rather with plants of low depth of emergence than with plants of large depth of emergence.

Future Work

The investigations described above on the oxygen transfer efficiency of operating diffusers will be expanded towards all diffusers used in the long-term test. Furthermore, the causes for short-term fluctuations in the back pressure and the different pressure developments in different wastewater treatment plants will be investigated, by means of investigating and comparing the operational conditions of diffusers (humidity, temperature, sludge properties, use of precipitants, etc.).

Further investigations on the cleaning methods will include the realization and prospects of success of chemical cleaning. In addition, the cleaning of the diffuser by shock pressure have been discussed as countermeasure and is under investigation just now. Finally, the calculation of the increased energy costs, caused by the coatings formation, and the costs for cleaning measures, which might have to be carried out periodically, should determine the measures which lead to minimum operational costs.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), Osnabrück, (German Federal Environmental Foundation) for their kind support of the project "Cause study on the formation of coatings on membrane diffusers and deduction of countermeasures", project number 20326.

REFERENCES

- Jardin, N. (2004) Auswirkung der Belagsbildung auf den Betrieb von Abwasserbehandlungsanlagen (Effects of Coating of Membrane Diffusers on the Operation of WWTP). Proceedings of the 2nd WAR-Infotag: Belagsbildung auf Membranen von Belüftungselementen (Coating of membrane diffusers, text in German) 22.4.2004. Technische Universität Darmstadt
- Wagner, M. (2003) Biological Coating of Fine Bubble Diffusers with EPDM-Membranes. in: Proceedings WEFTEC 2003. 11.-15.10.2003. Los Angeles
- Wagner, M., von Hoessle, R. (2004). Biological Coating of EPDM-Membranes of Fine Bubble Diffusers in: Water Science & Technology. Large Wastewater Treatment Plants IX: Design, Operation and Economics. Volume 50. Number 07/2004. p. 79-85
- Wagner, M., Loock, P. (2005). Newest Developments concerning the biological coating of membranes of fine bubble diffusers, IWA-conference on biological nutrient removal. 19-21 September 2005. Krakow. Poland
- Wagner, M., Loock, P. (2006). Belagsbildung auf Membrandruckluftbelüftungselementen in Abwasserbehandlungsanlagen und Ableitung von Maßnahmen zur Behebung. (Coating of fine bubble diffusers in WWTP and derivation of countermeasures) Conference proceedings Belüftung von Belebungsbecken (text in German). German Environmental Foundation (DBU). 8th of May, 2006. Osnabrück, Germany