

## Systeme und Wirkungsweise der Kreiselbelüfter

Belüftungssysteme, die für die Sauerstoffversorgung der Mikro-organismen beim Belebungsverfahren oder für die Belüftung von Abwasserteichen, Seen oder Flüssen eingesetzt werden, sollen in verfahrenstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht folgenden Forderungen genügen:

1. Die Sauerstoffzufuhr muss ausreichen, um den Sauerstoffbedarf zu decken.
2. Die Durchmischung des Wassers bzw. des Abwasser-Beliebtschlammgemisches soll eine gleichmässige Verteilung des eingetragenen Sauerstoffes in der Flüssigkeit gewährleisten, um den gewünschten minimalen Sauerstoffgehalt an allen Stellen des Mischsystems aufrecht zu erhalten.
3. Die durch das Belüftungssystem erzeugte Strömungsgeschwindigkeit und Turbulenz muss so hoch sein, dass Schlammablagerungen vermieden und dass die Beliebtschlammflocken mit den festen und gelösten Stoffen des Abwassers intensiv vermischt werden.
4. Die Funktionsfähigkeit des Belüftersystems muss unter Berücksichtigung der Betriebsverhältnisse und Absetzeigenschaften störungsfrei gewährleistet sein.
5. Der Energieaufwand und damit die Betriebskosten sollen im Verhältnis zum Sauerstoffeintrag und zur erzielten Umwälzströmung und turbulenten Vermischung gering sein.
6. Für das Belüftungssystem und die zugehörigen Beckeneinheiten werden niedrige Bau- und Unterhaltungskosten angestrebt.

Auf Grund von Versuchsergebnissen und Betriebs Erfahrungen, die infolge der intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet mechanischer Oberflächenbelüfter besonders in den letzten Jahren gewonnen wurden, kann festgestellt werden, dass diese Forderungen durch Kreiselbelüfter weitgehendst erfüllt werden können. Bedauerlicherweise ist die Entwurfspraxis oft nicht so weit fortgeschritten wie der Gebrauch dieser Systeme. Um Planungsfehler auszuschalten, ist eine umfassende Kenntnis über den Sauerstoffeintrag und die hydraulischen Verhältnisse im Belebungsbecken bei Einsatz von Kreiselbelüftern erforderlich.

Im Rahmen der versuchstechnischen Vorarbeiten für den Bau des Klärwerks Emschermündung wurden daher nicht nur verschiedene Kreiselbelüfter getestet, sondern vor allem versucht, die allgemeinen Beziehungen zwischen Energieaufwand, Sauerstoffeintrag und kritischer Strömungsgeschwindigkeit für Kreiselbelüfter zu erforschen und die Abhängigkeit dieser Werte von der Grösse, Konstruktionsart und Betriebsweise der Kreiselbelüfter sowie von der Form und Grösse der Belüfterbecken festzustellen. Ferner sollten Betriebswerte bei Einsatz von Kreiselbelüftern gewonnen werden [1, 2, 3]. Bevor über diese Versuche und den daraus resultierenden Erkenntnissen berichtet wird, sei zunächst ein allgemeiner Überblick über die Konstruktionsmerkmale und die Wirkungsweise von Kreiselbelüftern gegeben.

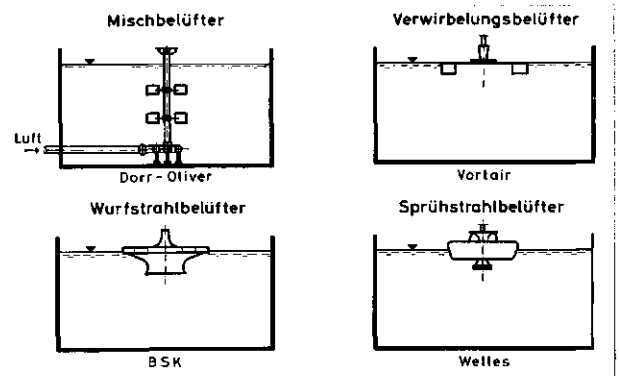
Unabhängig von der chronologischen Entwicklung der verschiedenen Kreiselbelüfersysteme können folgende

technische Entwicklungstendenzen bei Kreiselbelüftern festgestellt werden, die folgerichtig die Erkenntnisse berücksichtigen, die zur Erzielung eines wirkungsvollen Sauerstoffeintrages bereits bei der Druckluftbelüftung gewonnen wurden. Bei der Druckluftbelüftung werden bei feinblasiger Verteilung der Luft und langer Verweilzeit der Luftblasen im Wasser bei hoher Turbulenz in der Flüssigkeit günstige Verhältnisse zwischen Energieaufwand und Sauerstoffeintrag erreicht. Die Steigerung dieses Verhältniswertes, der als Sauerstoffeintrag ( $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ ) bezeichnet wird, ist das Ziel der technischen Entwicklung bei allen Kreiselbelüftungssystemen. Auf Abb. 1 sind verschiedene Belüftersysteme dargestellt, die diese Entwicklung kennzeichnen. An den Anfang dieser Entwicklungsreihe können Mischbelüfter wie der Dorr-Oliver-Aerator gestellt werden, bei dem das mechanische Mischsystem für eine feine Verteilung und turbulente Durchmischung der hierbei noch durch Gebläse eingebrachten Luft sorgt.

Nachdem man erkannt hatte, dass Luft und damit Sauerstoff auch unmittelbar aus der freien Atmosphäre in das Wasser eingetragen werden kann, sofern durch mechanische Einwirkung an der Wasseroberfläche ein turbulent bewegtes Luftblasen-Wassergemisch erzeugt wird, verzichtete man auf den Lufteintrag durch Verdichtermaschinen und entwickelte die mechanischen Oberflächenbelüfter [4], zu denen ausser den Bürstenbelüftern alle bekannten Kreiselbelüfter zählen.

Die Kreiselbelüfter können nach Art ihrer Konstruktion und ihrer vorherrschenden Wirkungsweise in 3 Gruppen unterteilt werden, wie auf Abb. 1 ersichtlich ist. Bei allen Konstruktionsarten erfolgt der Sauerstoffeintrag primär in der durch den Kreisel erzeugten Turbulenzzone an der Oberfläche. Hier sind durch den direkten Kontakt zwischen Wasser und Luft bei ständiger Erneuerung der Grenzflächen zwischen Luftblasen und Wasser infolge der Turbulenz günstige Voraussetzungen für einen intensiven Sauerstoffeintrag gegeben. Durch die Kreiselbelüfter werden gleichzeitig Umwälzströmungen erzeugt, durch die eingeschlagene Luftblasen sich im Wasser verteilen und vornehmlich durch die an der Beckenwand auftretenden, vertikal zur Sohle gerichteten Strömungen in tiefere Schichten eingetragen werden. Hierdurch wird

Abb. 1 - Entwicklung der Kreiselbelüfersysteme.



bei Kreisellüftern ein zusätzlicher sekundärer Sauerstoffeintrag bewirkt, der von der Menge, Grösse und Verweilzeit der in das Wasser eingeschlagenen Luftblasen abhängig ist.

Sofern die Luftblasen vorwiegend durch turbulente Vermischung des Wassers an der Beckenoberfläche in die Flüssigkeit eingetragen werden, kann der Kreisellüfter als Verwirbelungsbelüfter bezeichnet werden. Zu dieser Kreisellüftergruppe zählt der Vortair-Belüfter, der aus einer horizontal angeordneten runden Stahlscheibe besteht, an deren Unterfläche senkrecht stehende Rührblätter befestigt sind. Durch die Rührblätter wird das Wasser stark verwirbelt und teilweise oberhalb des Wasserspiegels verspritzt. Gleichzeitig wird durch Ansaugöffnungen in der Rotorscheibe Luft aus der Atmosphäre in die Zone verminderten Druckes unter den Rotor gesaugt und intensiv mit dem Wasser vermischt.

Neuere Kreisellüfertypen weisen Konstruktionsmerkmale auf, die von strömungstechnisch günstigen Laufradformen von Pumpen und Turbinen bekannt sind. Sofern sie wie Schaufelradpumpen arbeiten und grosse Wassermengen bei geringstmöglicher Förderhöhe durch das Laufrad direkt auf die Wasseroberfläche aufspritzen, können sie als Wurfstrahlbelüfter bezeichnet werden. Diese Systeme sind häufig auch mit Luftansaugöffnungen im Unterdruckbereich der Laufräder versehen. Der Sauerstoffeintrag ( $\text{kg O}_2/\text{h}$ ) dieser Systeme steigt mit der Menge der angesaugten Luft, der geförderten und verstrahlten Wassermenge und der Geschwindigkeit des verstrahlten Wassers. Um optimale Sauerstofftragwerte ( $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ ) zu erzielen, sind niedrige Förderhöhen, Randgeschwindigkeiten der Kreisel je nach Durchmesser zwischen 3 - 6 m/s und hohe Umwälzleistungen bei starker Mischerturbulenz des Wassers anzustreben. Zu dieser Kreisellüftergruppe können die meisten der neu- und weiterentwickelten Kreisellüfter gezählt werden.

Eine intensive Sauerstoffanreicherung des Wassers wird auch erreicht, wenn das Wasser feinstrahlig verspritzt wird. Diese bekannte Tatsache führte zur Entwicklung eines weiteren Systems, das als Sprühstrahlbelüfter bezeichnet werden kann. In diese Gruppe ist der Aquator der amerikanischen Firma Welles einzuordnen, der das Wasser durch eine Propellerpumpe fontänenartig versprüht. Hierbei wird der Hauptanteil der aufgewandten Energie zur Erzielung der hohen Förderhöhe aufgewandt. Die Sauerstoffaufnahme erfolgt vorzugsweise auf der Flugbahn des Wassers und beim Aufprall auf die Wasseroberfläche. Die Sauerstofftragwerte, die bei solch hohen Sprühbahnen des Wassers erzielt werden, liegen nur bei etwa  $1 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ . Günstigere Sauerstofftragwerte sind dann zu erreichen, wenn die Strahlwirkung des geförderten Wassers benutzt wird, um im verstärkten Umfang Luftblasen in das Wasser einzuschlagen und wenn diese Luftblasen bei hoher Umwälzleistung des Belüftersystems lange in der Flüssigkeit in Schwebe gehalten werden. Die Weiterentwicklung des Sprühstrahlbelüfters führte daher unter Berücksichtigung dieser Kenntnisse zu leistungsfähigen Propellerpumpen, bei denen das geförderte Wasser unmittelbar über der Wasseroberfläche durch Prallteller umgelenkt und flach verspritzt wird, so dass durch die Strahlwirkung des Wassers verstärkt Luftblasen eingeschlagen werden können. Dies führte zu einer Steigerung der Sauerstofftragwerte auf etwa  $1,5 - 2,0 \text{ kg O}_2/\text{kWh}$ .

Die Entwicklung der Kreisellüfter zu strömungstechnisch günstigen Förderaggregaten mit geringstmöglicher

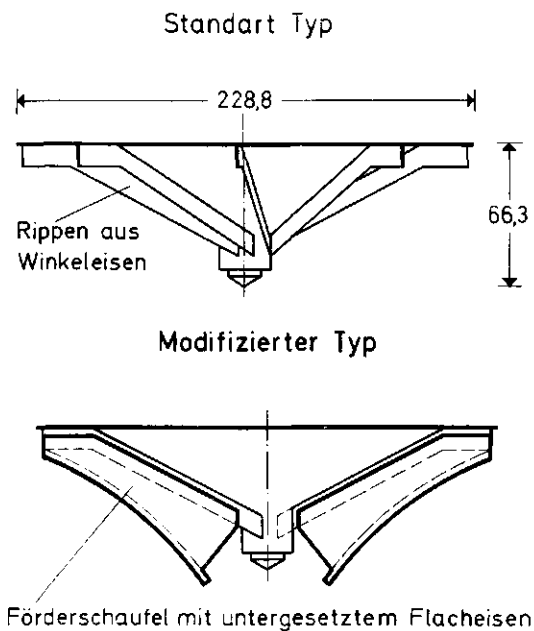


Abb. 2 - Simcar-Kreisellüfter.

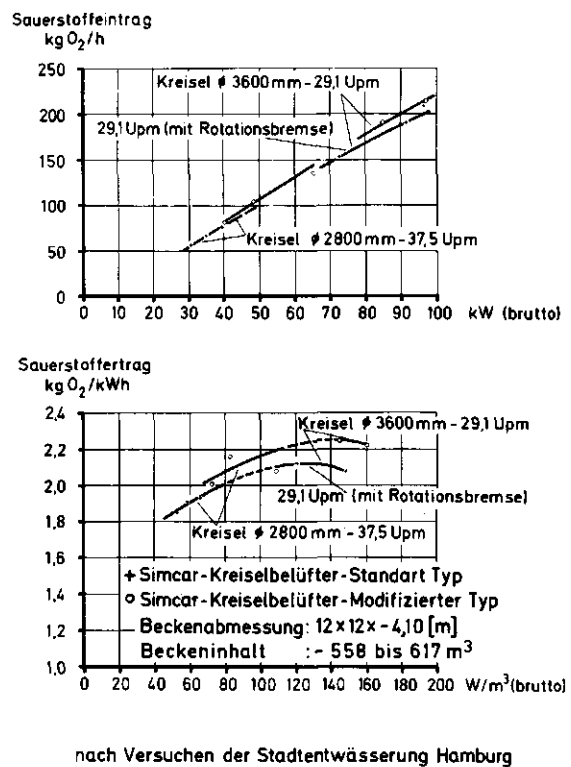


Abb. 3 - Sauerstoffeintragswerte von Simcar-Kreiseln.

Förderhöhe, bei denen die aufgewandte Energie in hohe Wasserförderleistung, intensive Strahlwirkung und hohe Verwirbelungsturbulenz umgesetzt wird, kann bei fast allen Systemen beobachtet werden. Die Konstruktionsmerkmale und die Wirkungsweise der verschiedenen Kreisellüfter lassen sich am besten durch Bilder erläutern. Zu den Sauerstoffeintrags- und Sauerstofftragwerten, die für einige Kreisellüfter angegeben werden, ist zu bemerken, dass diese Angaben und Darstellungen nicht zu einen Leistungsvergleich verschie-



Abb. 4 - Kreisbelüfter der Fa. Dorr-Oliver.

dener Kreisbelüfter benutzt werden sollten. Versuche der Emschergerenossenschaft und anderer Stellen haben gezeigt, dass Form und Grösse der Belüftungsbecken als auch Abmessungen und Betriebsweise der Kreisbelüfter von grossem Einfluss auf diese Werte sein können. Auf die Abhängigkeit der Sauerstoffeintragsleistung von den hydraulischen Strömungsverhältnissen, dem Energieaufwand und anderen Faktoren wird im Rahmen dieser Arbeit noch besonders hingewiesen.

Zu der Gruppe der Verwirbelungsbelüfter zählt ausser dem Vortair-Belüfter der Simcar-Belüfter. Auf Abb. 2 ist oben der Standard-Typ dargestellt, der zu dem darunter abgebildeten, modifizierten Typ weiterentwickelt wurde. Die einfachen Rippen des Standardtypes wurden durch glatte Förderschaukeln mit untergesetzten Flach-eisen ersetzt. Hierdurch zeichnet sich bereits ein Uebergang vom Verwirbelungsbelüfter zum Wurfstrahlbelüfter ab. Nach Versuchen der Stadtentwässerung Hamburg konnte in einem etwa 600 m<sup>3</sup> grossen Becken dadurch sowohl der Sauerstoffeintrag als auch der Sauerstoff-ertrag bei gleichem Leistungsaufwand gesteigert werden, wie Abb. 3 zeigt.

Der auf dem europäischen Markt von der Firma Dorr-Oliver neu eingeführte Kreisbelüfter kann gleichfalls zu den Verwirbelungsbelüftern gezählt werden. Wie auf

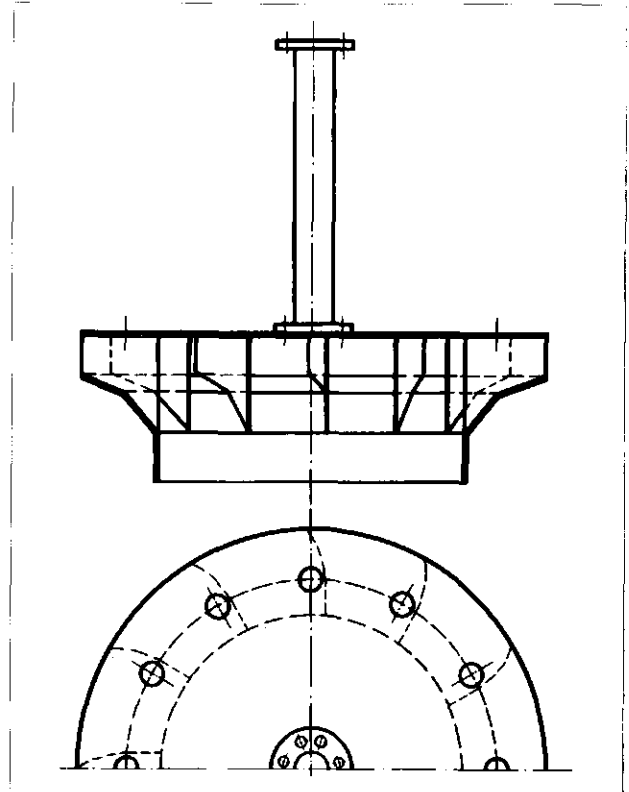
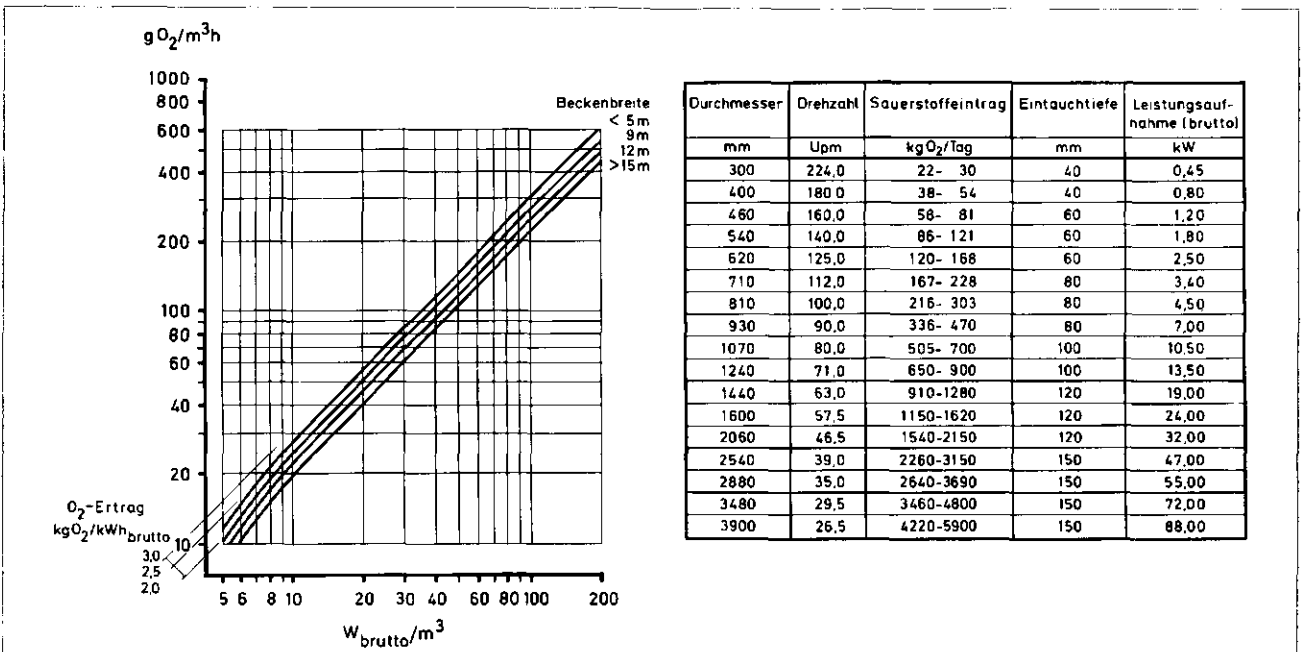


Abb. 5 - GYROX-Oberflächenbelüfter der Lurgi.

Abb. 4 ersichtlich, besteht der Belüfter, der an einer höhenverstellbaren Antriebswelle befestigt sein kann, aus schräg gestellten Blättern, die das Wasser im Bereich der Oberfläche wie eine Antriebsschraube aufwühlen und vorwiegend radial nach aussen versprühen. Der konstruktive Vorteil dieses Kreisbelüfters liegt in der einfachen Formgebung und in der flexiblen Getriebeausbildung. Nach Angaben der Firma Dorr-Oliver, die sich auf in den USA durchgeführte Versuche stützen, sind mit den

Abb. 6 - Sauerstoffeintragswerte von GYROX-Kreisbelüftern.



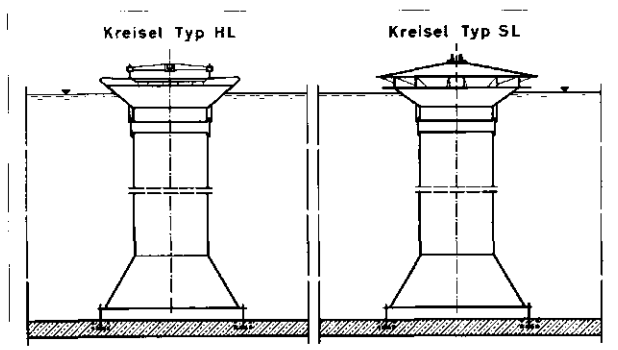


Abb. 7 - Verschiedene Simplex-Kreiselbelüfter Systeme.

bisher auf dem Markt befindlichen Belüfteraggregaten Sauerstoffeintragsleistungen bis etwa 120 kg O<sub>2</sub>/h zu erreichen. Die Sauerstoffertragswerte sollen zwischen 2,0 bis 2,4 kg O<sub>2</sub>/kWh liegen.

Die zeichnerische Darstellung des Gyrox-Belüfters der Firma Lurgi auf Abb. 5 zeigt besonders gut den entwicklungsständigen Uebergang vom Verwirbelungsbelüfter zum Wurfstrahlbelüfter. Der Gyrox-Kreiselbelüfter kann bereits als Pumpenlaufrad bezeichnet werden, bei dem an der Unterseite die gekrümmten Laufradschaufeln teilweise oder ganz abgedeckt sind. Zur Verbesserung der hydraulischen Strömungsverhältnisse wurde der Gyrox-Belüfter mit einem ringförmigen Ansaugstutzen ausgerüstet. In die obere ebene Deckscheibe sind gleichfalls Luftansaugöffnungen eingelassen worden. Einen Überblick über Abmessungen und Betriebsdaten der Gyrox-Kreiselbelüfter gibt die Tabelle der Abb. 6. Die grafische Darstellung zeigt die Abhängigkeit der von der Firma Lurgi auf Grund von Versuchen angegebenen Sauerstoffeintrag- und Sauerstoffertragswerte vom Leistungsaufwand in W/m<sup>3</sup> Beckeninhalt und der Beckenbreite. Es sei hier besonders auf die Steigerung der Sauerstoffertragswerte mit zunehmendem Leistungsaufwand und abnehmender Beckenbreite hingewiesen. Dieses Ergebnis ist durch die erhöhte Turbulenzwirkung und die verstärkte Luftblasendurchmischung des Wassers bei steigendem Energieaufwand und gleichzeitig verkleinertem Beckenvolumen bedingt und ist tendenzmässig auch für andere Kreiselbelüfter gültig.

Die Entwicklung der Wurfstrahlbelüfter führte von der bekannten offenen Laufradform, wie sie der HL-Simplex-Kreisel auf Abb. 7 aufweist, zur geschlossenen Kreisel-turbine. Zu diesem Typ zählt der neuere SL-Simplex-Kreisel, gleichfalls auf Abb. 7 dargestellt. Einige Ergebnisse von Sauerstoffeintragsversuchen, die auf der Versuchsstation Klärwerk Emschermündung durchgeführt wurden, zeigt Abb. 8. Mit dem Simplex-Kreisel können auch ohne Steigrohr günstige Sauerstoffeintragswerte erzielt werden, wie auf Abb. 9 ersichtlich ist. Die Ergebnisse dieser Abbildungen zeigen ferner, dass äussere Förderblätter und gezahnte Förderblattenden zum Aufreissen der Wasserstrahlen die Oekonomie des Sauerstoffeintrages nicht erhöhen. Wurfstrahlbelüfter, die wie der SL-Simplex-Kreisel oder wie die BSK-Turbine auf Abb. 10, die für die Abwasserteichbelüftung bei den Chemischen Werken Hüls vorgesehen sind, das geförderte Wasser in einen kräftigen geschlossenem Strahl auf die Wasseroberfläche leicht geneigt aufwerfen, erreichen besonders günstige Sauerstoffeintragsleistungen. Dies bestätigen auch die bei der Emschergenossenschaft mit der BSK-Turbine erzielten Sauerstoffeintragswerte auf Abb. 11.

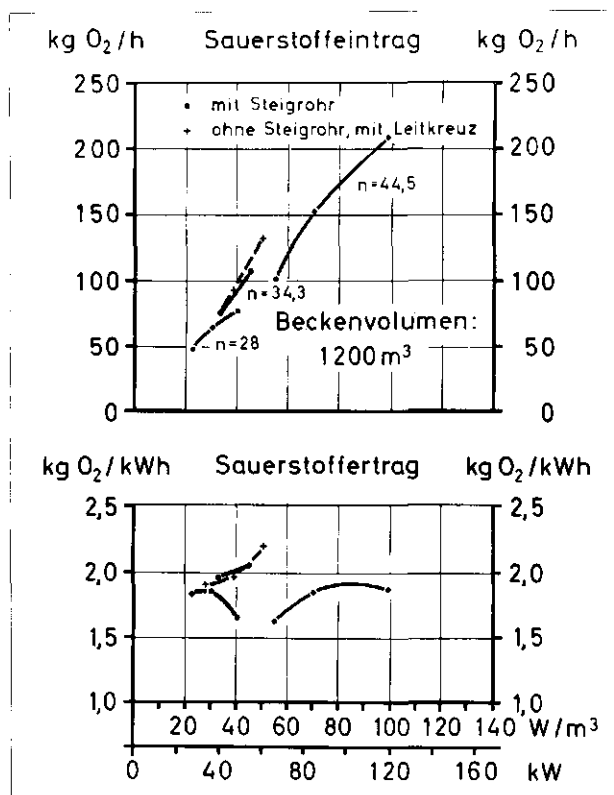


Abb. 8 - Simplex-Kreisel Typ SL  $\phi$  3000 mm.

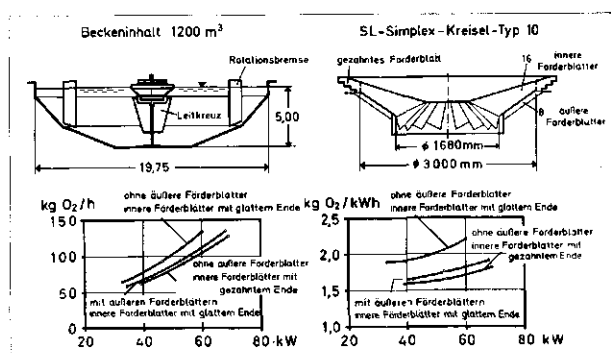
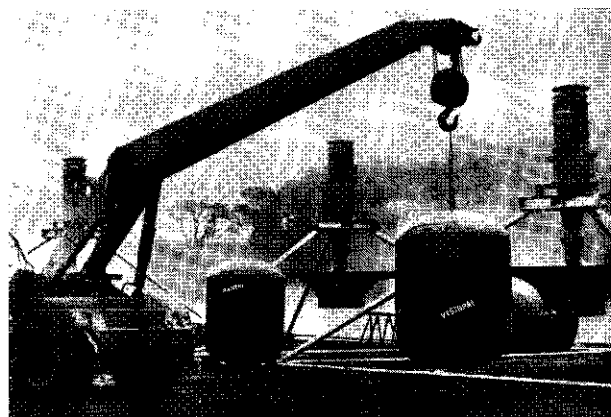


Abb. 9 - Einfluss der Kreiselform auf die Sauerstoffeintragsleistung.

Abb. 10 - Montage von BSK-Turbinen als schwimmende Einheiten.



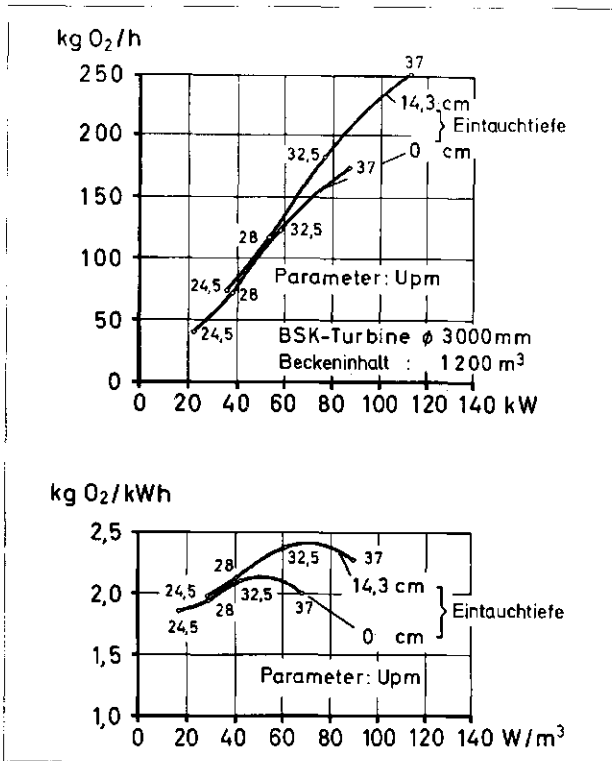
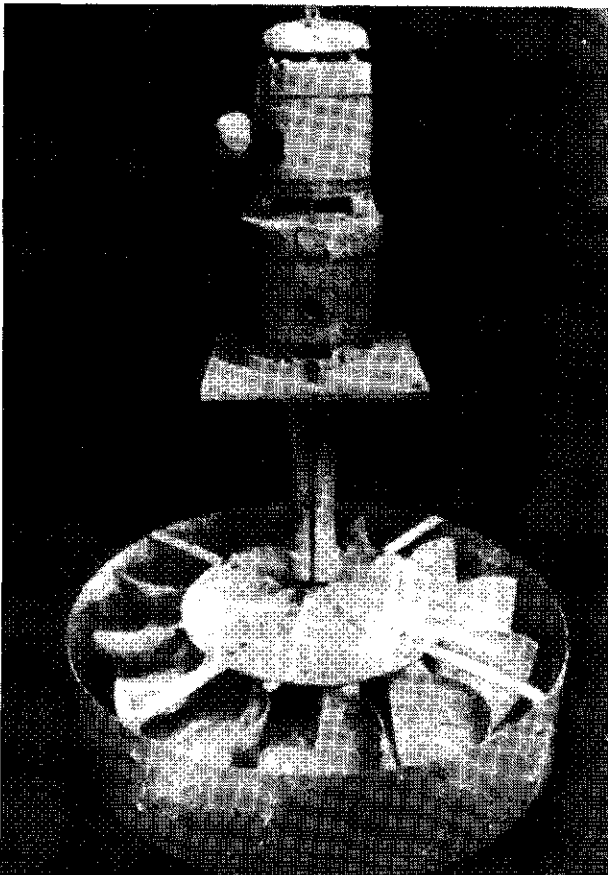


Abb. 11 - Sauerstoffeintragswerte einer BSK-Turbine.

Abb. 12 - Kreisbelüfter der Fa. Yeomans - USA.

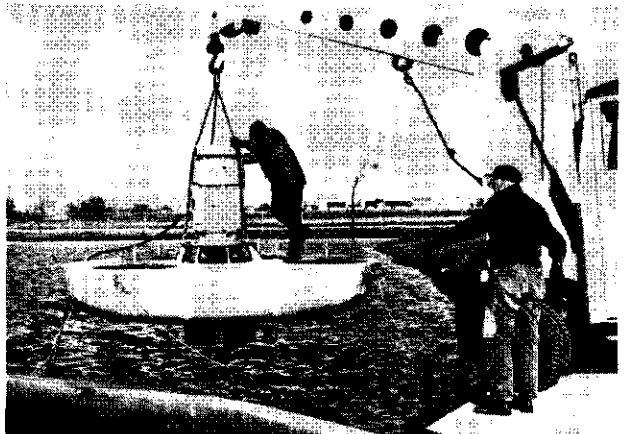


Ein weiterer Wurfstrahlbelüfter ist der Kreisbelüfter der Firma Yeomans, der eine grosse Anzahl gekrümmter Wurf-schaufeln besitzt, die das geförderte Wasser ähnlich wie der HL-Simplex-Kreisell parabol-förmig auswerfen (Abb. 12). Um die Wirbelbildung unmittelbar unter dem Steigrohr herabzusetzen und günstige Anströmverhältnisse zu erzielen, ist unter dem Laufring ein kurzes Steigrohr mit eingesetztem Leitblech montiert. Die Sauerstoffeintragsleistung dieses Kreisellbelüfers liegt nach Firmenangaben in einer ähnlichen Grössenordnung wie die anderer Wurfstrahlbelüfter.

Vorzugsweise als schwimmende Einheiten werden die Sprühstrahlbelüfter der Firma Welles eingesetzt (Abb. 13). Da bei diesem Kreisellbelüfer die Wasserförderung durch eine Propellerpumpe erfolgt, sind bei dieser Konstruktion Getriebe zur Reduzierung der Motordrehzahl nicht erforderlich. Der stehende, im Gegensatz zum Wurfstrahlbelüfter nicht rotierende Sprühstrahl wird durch einen Prallteller umgelenkt und über dem Schwimmringkörper flach auf die Wasseroberfläche aufgestrahlt. In Amerika werden ähnliche Konstruktionen, auch von anderen Firmen hergestellt. Angaben über die Grössenordnung und Leistung des Welles-Belüfers und einige Ergebnisse von Sauerstoffeintragswerten können der Tabelle der Abb. 14 entnommen werden. Bei den Sauerstoffeintragswerten ist wieder festzustellen, dass das günstigste Ergebnis mit einer grossen Belütereinheit und bei hohem Leistungsaufwand in einem kleinen Becken erzielt wurde. Diese für Kreisellbelüfter allgemein gültige Tendenz unterstreicht die grosse Bedeutung des sekundären Sauerstoffeintrages durch eingeschlagene Luftblasen.

Alle konstruktiven und betrieblichen Massnahmen, durch die bei mechanischen Oberflächenbelüftern verstärkt Luftblasen in das Wasser eingeschlagen, verteilt und turbulent in Schwebelage gehalten werden und somit zu einer Steigerung der Sauerstoffeintragsleistung führen, sollten daher stets besondere Beachtung finden. Die primäre Aufgabe der Kreisellbelüfter besteht zweifelsohne im Sauerstoffeintrag und in der Versorgung der Biomasse. Im Hinblick auf die Betriebssicherheit gegen Schlammablagerungen und für die Durchmischung der festen und gelösten Stoffe kommt jedoch auch den hydraulischen Verhältnissen bei Einsatz von Kreisellbelüftern eine erhebliche Bedeutung zu. Im folgenden sollen daher auf Grund von Beobachtungen und Messungen die Strömungsverhältnisse dargelegt werden, die durch Kreisellbelüfter in Belüftungsbecken erzeugt werden.

Abb. 13 - Floating Aqua-Lator der Fa. Welles - USA.



Kennwerte des Welles-Belüfters					Sauerstoffeintragswerte							
Motorleistung	Drehzahl	Förderleistung	Durchmesser des Faches	Kosten des Welles	Versuchsbecken Form				Versuchsbecken Form			
					Umlaufzeit	Leistung brutto	O <sub>2</sub> Eintrag	spez. O <sub>2</sub> Eintrag	Umlaufzeit	Leistung brutto	O <sub>2</sub> Eintrag	spez. O <sub>2</sub> Eintrag
hp	U/min	l/s	m	Dollar	min	kW	kg/h	kgO <sub>2</sub> /kWh	min	kW	kg/h	kgO <sub>2</sub> /kWh
5	1750				250	4,45	7,2	1,62	125,0	4,45	7,0	1,57
10	1200	252	1,68	3240								
15	1200											
20	1200	474	1,98	5060	13,3	17,0	28,8	1,55	65,8	17,0	29,8	1,52
50	900	1120	3,32	10980	5,5	40,0	76,5	1,52	22,8	40,0	62,0	1,55
60	900	1370	3,32	11660								

Abb. 14 - Kennwerte und Ergebnisse des Aqua-Lators.

Durch die Wirkung der Kreisellüfter als Förderpumpe wird das Wasser unter dem Laufrad zumeist spiralförmig nach oben gezogen und als rotierender Wurfstrahl oder feststehender Sprühstrahl auf die Wasseroberfläche aufgespritzt oder auch durch die Rotationsbewegung des Kreisellüfters nach aussen gewirbelt, wodurch an der Wasseroberfläche eine vorwiegend radial zur Beckenwand gerichtete Wasserströmung verursacht wird. Diese nur einige Zentimeter tiefe Strömungsschicht wird an der Beckenwand und teilweise bereits vorher zur Sohle umgelenkt und von dort unterstützt durch die Ansaugwirkung des Kreisels zum Zentrum des Beckens zurückgeführt. Hierdurch wird die gesamte Wassermasse des Beckens einer umlaufenden Spiralströmung unterworfen, die je nach Form, Breite und Tiefe des Beckens sehr steil oder auch sehr flach sein kann. Bedingt durch diese umlaufende Spiralströmung werden in horizontalen Schnittebenen des Beckens im Bereich der Wasseroberfläche eindeutig radial nach aussen gerichtete Strömungsgeschwindigkeiten, in der mittleren Wassertiefe mehr tangential gerichtete Strömungsgeschwindigkeiten und an der Sohle tangential oder häufiger schräg zur Beckenmitte gerichtete Strömungsgeschwindigkeiten gemessen, die unmittelbar im Zentrum des Beckens spiralförmig in die Ansaugströmung des Kreisellüfters übergehen. Auf Abb. 15 sind die in einem Modellbecken von 2,10 m Breite und 0,55 m Tiefe in verschiedenen Wassertiefen gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten nach Grösse und Richtung aufgetragen. Sie bestätigen die beschriebenen Strömungsverhältnisse, die auch durch Messungen im Betriebsbecken nachgewiesen wurden.

Die dem Wasserkörper im Belüftungsbecken aufgezwungenen Strömungen müssen naturgemäss von der Leistung des Kreisels abhängig sein. Daher steigt bei gleicher Form und Grösse des Beckens bis zu bestimmten Grenzwerten von Fördermenge und Wurfweite des Kreisels

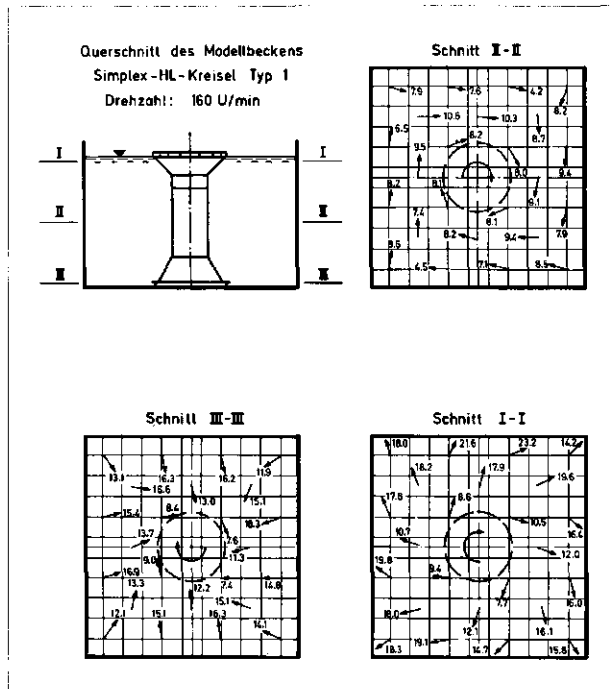
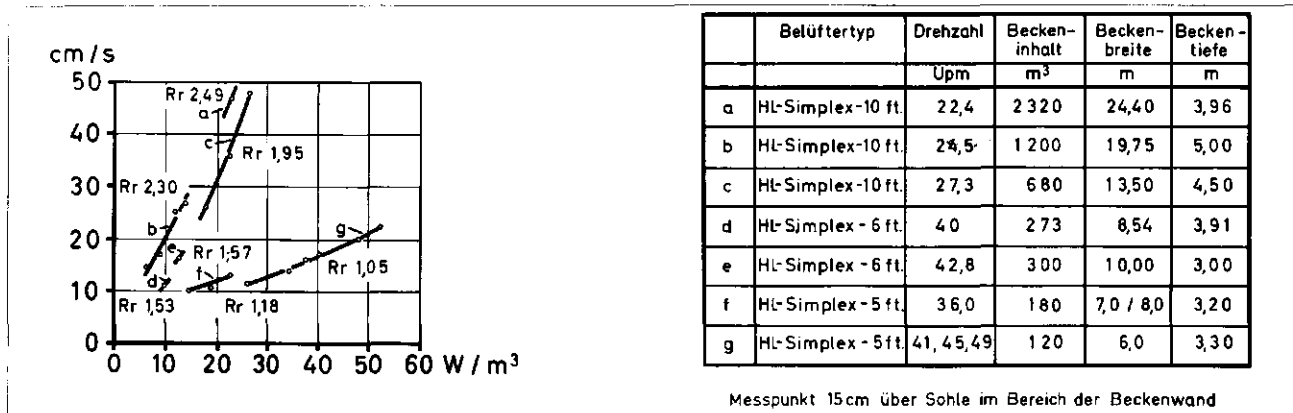


Abb. 15 - Strömungsbilder in Kreisellüfterbecken.

in Bezug zum Beckendurchmesser mit zunehmender Leistung des Kreisels die Strömungsgeschwindigkeit an der Beckensohle an. Die Reibungs-, Umlenkungs- und Turbulenzverluste der Umlaufströmung müssen aber auch von der geometrischen Form und der Grösse des Beckens abhängig sein. Das wurde durch Messungen, die bei der Emschergerossenschaft mit Simplex-Kreiseln durchgeführt wurden, bestätigt. Wie Abb. 16 zeigt, steigen in verschiedenen grossen Becken mit quadratischer Grundfläche die Strömungsgeschwindigkeiten mit zunehmender Leistung in W/m<sup>3</sup> Beckeninhalte an. Steigt der Leistungsaufwand über 30 W/m<sup>3</sup> an, ist vor allem bei höheren Drehzahlen der Kreisellüfter oft schon wieder eine leichte Abnahme der Strömungsgeschwindigkeit festzustellen. Dies ist durch verstärkt eingeschlagene Luftblasen und durch starke Mischerturbulenz bei diesen hohen Leistungen bedingt. Bei gleichem Leistungsaufwand in W/m<sup>3</sup> Beckeninhalte werden in verschiedenen grossen Becken jedoch sehr unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten gemessen, die in kleinen Becken bereits kritische Werte erreichen. Es wurde versucht, diese unterschiedlichen

Abb. 16 - Strömungsgeschwindigkeiten in Belüfterbecken.



Messergebnisse dadurch zu ordnen, dass ein Kennwert eingeführt wurde, der das Verhältnis zwischen Beckeninhalte und benetzter Wandfläche berücksichtigt. Dieser Kennwert  $R_r$ , definiert als Quotient aus Beckeninhalte  $I$  und benetzter Fläche  $F_b$ , lässt für die auf Abb. 16 angegebenen Becken eine Gesetzmässigkeit für die Strömungsgeschwindigkeit erkennen. Bei gleichem spezifischen Energieaufwand sind mit zunehmendem hydraulischen Kennwert  $R_r$  höhere Strömungsgeschwindigkeiten an der Beckensohle zu erwarten. Diese Aussage gilt zunächst nur für geometrisch ähnliche Beckenformen, die mit gleichen Kreiseltypen unter vergleichbaren Betriebsbedingungen betrieben werden.

Für solche Becken kann bei niedrigem Energieaufwand bis etwa  $30 \text{ W/m}^3$ , bei dem die Strömungsverhältnisse noch nicht durch grosse Mengen eingeschlagener Luftblasen und dadurch erzeugte Zusatzturbulenz sehr komplex werden, eine Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit von der Beckengrösse angenommen werden, die zumindest näherungsweise dem Froude'schen Gesetz genügt. Dies zeigen die auf Abb. 17 eingetragenen Werte der an der Beckensohle im Bereich der Beckenwand gemessenen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten. Auf dieser Darstellung ist ersichtlich, dass in flachen Becken mit einem Verhältnis Tiefe : Breite kleiner 1 : 4 die Strömungsgeschwindigkeiten über der rechnerischen Kurve nach Froude, in tiefen Becken mit einem Verhältnis Tiefe : Breite grösser 1 : 4 die Strömungsgeschwindigkeiten unter der rechnerischen Kurve nach Froude liegen.

Eine gute Zuordnung der in Becken verschiedener Form und Grösse gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wird auch erreicht, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von einem anderen Kennwert  $K$ , definiert als Quotient aus benetzter Fläche des Beckens und Wassertiefe des Beckens, aufgetragen werden. Hierdurch wird der negative Einfluss der Beckentiefe auf die Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Ob dieser neue Kennwert  $K$  eine reproduzierbare Grösse ist, muss durch Auswertung weiterer Messungen noch bestätigt werden.

Grundsätzlich kann nach bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen festgestellt werden, dass bei gleichem Energieaufwand in  $\text{W/m}^3$  Beckeninhalte mit zunehmender Beckengrösse steigende Strömungsgeschwindigkeiten zu erwarten sind. Um Betriebsschwierigkeiten durch Schlammablagerungen zu vermeiden, sollten daher für Belebungsbecken, die mit Kreiselbelüftern ausgerüstet werden, möglichst grosse Einheiten angestrebt werden. In kleineren Einheiten liegt, vor allem, wenn das Verhältnis von Breite : Tiefe der Becken kleiner 4 : 1 gewählt wird, bei geringem Energieaufwand die Strömungsgeschwindigkeit an der Beckensohle vielfach unter  $15 \text{ cm/s}$ , so dass bei ebener Sohle Schlammablagerungen unvermeidbar sind.

In der Praxis haben tiefe Becken mit kleinerem Volumen daher meist eine trichterförmig ausgebildete und durch starke Schrägen geformte Sohle erhalten. Diese Lösung wurde häufig bei Simplex-Kreiseln gewählt, bei denen bei trichterförmig ausgebildeter Sohle trotz ungünstiger hydraulischer Verhältnisse der Schlamm an den steilen Schrägen zum Steigrohr des Simplex-Kreisels in Beckenmitte abfließen kann.

Aus wirtschaftlichen Gründen ist es bei dünnem Abwasser und geringen Belastungen wünschenswert, die Belebungsbecken auch bei einem sehr niedrigen spezifischen Energieaufwand in  $\text{W/m}^3$  Beckeninhalte noch betrieblich sicher fahren zu können. Bei Beckengrössen über  $500 \text{ m}^3$

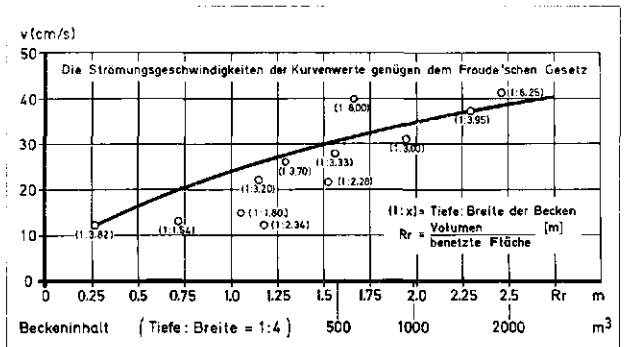


Abb. 17 - Strömungsgeschwindigkeiten bei  $20 \text{ W/m}^3$  in Becken verschiedener Grösse.

Inhalt dürfte diese Möglichkeit bei nicht zu schweren Schlämmen in den meisten Fällen bereits gegeben sein. Die konstruktive Gestaltung der Belebungsbecken ist jedoch so vorzunehmen, dass ein Verhältnis von Breite : Tiefe der Becken von 4 : 1 möglichst nicht unterschritten wird, da tiefe Becken sich hydraulisch ungünstiger verhalten.

Betonvouten in den Beckenecken sind nach Untersuchungen der Emschergenossenschaft aus hydraulischen Gründen bei grossen Becken nicht erforderlich. In Längsbecken, in denen mehrere Kreiselbelüfter hintereinander angeordnet sind, können zwischen den Kreiselbelüftern angeordnete Betonvouten sogar von Nachteil sein. In solchen Beckengruppen bilden sich zwischen den einzelnen Belüftereinheiten bei gegenläufigem Drehen der Kreisel gerade hydraulische Grenzlinien aus (Abb. 18).

Abb. 18 - Hydraulische Grenzlinie zwischen Kreiselbelüftern.



Bei wechselnder Leistung der Kreisel wandert diese hydraulische Grenzlinie, die nach Beobachtungen in einem Modellbecken bis zur Beckensohle reicht, hin und her. Eine fixierte Beckenunterteilung durch Aufbeton, die mit dieser veränderlichen hydraulischen Grenzlinie nicht immer übereinstimmt, könnte daher hydraulisch eher störend wirken. Breite Stützscheiben für die Kreiselbrücken in der Mitte zwischen den einzelnen Belüftern üben einen ähnlichen ungünstigen Einfluss aus. Sofern die Tragbrücke für den Kreiselbelüfter nicht über die gesamte Beckenbreite frei gespannt werden kann, sind zur Aufnahme der Brückenlast kreisförmige Einzelstützen, die ausserhalb des Wurfradius des Kreiselbelüfters angeordnet werden, besonders geeignet, da sie dort nur geringe hydraulische Störungen hervorrufen. Infolge der in ihrer Richtung häufig wechselnden turbulenten Strömung an der Beckensohle sind Schlammablagerungen hinter kreisförmigen Einzelstützen am leichtesten zu vermeiden. Die Ausbildung der Umlaufströmung in Kreiselbecken hängt auch davon ab, inwieweit die entsprechende Impulskomponente des durch die Kreiselbelüfter geförderten Wassers der Flüssigkeitsmasse des Belüftungsbeckens mitgeteilt werden kann. Ist die Wurfweite des Kreisels im Verhältnis zur Beckenoberfläche zu gross und wird damit das Wasser nahezu direkt gegen die Beckenwand gespritzt, so wird die Energie des Wassers vorwiegend in Turbulenz und nicht in eine gerichtete Wasserströmung umgesetzt. Die Beckenbreite sollte daher in einem bestimmten Verhältnis zum Wurfdurchmesser des Kreiselbelüfters stehen. Bei den üblichen Drehzahlen der Kreiselbelüfter kann zur Festlegung der minimal zulässigen Beckenbreite ein Verhältnis von Kreiseldurch-

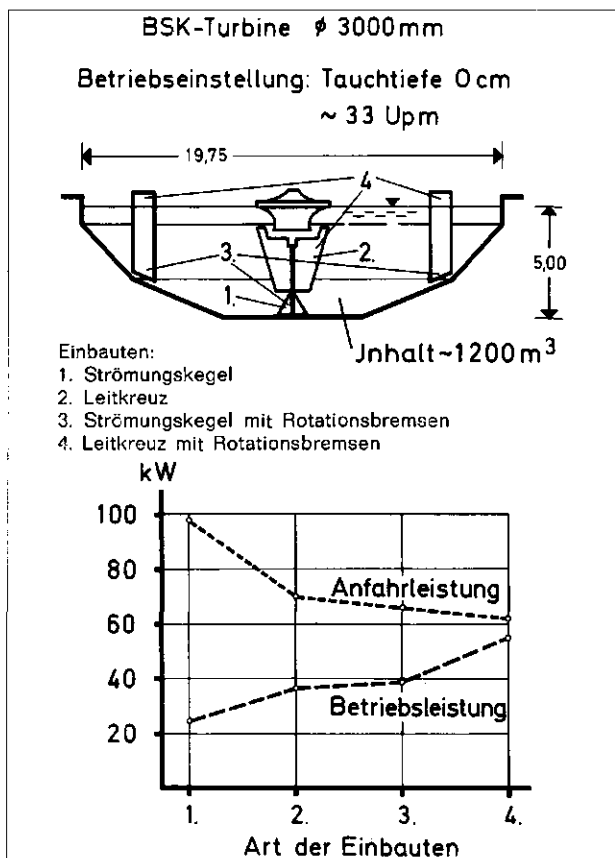
messer : Beckenbreite von etwa 1 : 5 zu Grunde gelegt werden.

Die maximal zulässige Beckengrösse wird in hydraulischer Hinsicht durch die Leistung des Kreiselbelüfters bestimmt. Bei der Betriebseinstellung mit der geringsten Leistungsaufnahme des Kreiselbelüfters muss noch der spezifische Leistungsaufwand in  $W/m^3$  Beckeninhalte erzielt werden, bei dem unter Berücksichtigung der Grösse und Form der Becken noch eine ausreichend hohe Schlammablagerungen verhindernde Strömungsgeschwindigkeit an der Beckensohle vorhanden ist. Bei Becken über  $2000 m^3$  Inhalt kann selbst bei schweren Belebtschlamm als Grenzwert ein spezifischer Leistungsaufwand von etwa  $10 W/m^3$ , bei Becken über  $1000 m^3$  Inhalt von  $15 W/m^3$  und bei Becken über  $500 m^3$  Inhalt von  $20 W/m^3$  Beckeninhalte als ausreichend angenommen werden, sofern für Breite zu Tiefe der Becken ein Verhältnis grösser 4 : 1 gewählt wird. In der Praxis konnten jedoch kleinere Becken auch bei geringerem Leistungsaufwand betrieblich noch sicher gefahren werden. Mit Hilfe dieser Grenzwerte ist auch für grosse Belüftungsbecken und Belebungsbecken, in denen mehrere Kreiselbelüfter gemeinsam eingesetzt werden sollen, unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme der Kreiselbelüfter der Beckenvolumenanteil zu ermitteln, der von einer Kreiselbelüftereinheit ausreichend umgewälzt werden kann, ohne dass Schlammablagerungen zu erwarten sind. Nach diesem Verfahren kann somit sehr einfach der erforderliche Abstand der Kreiselbelüfter unter Berücksichtigung ihrer Leistung festgelegt werden. Das jeder Kreiselbelüftereinheit zugeordnete Beckenvolumen wird durch die hydraulischen Grenzlinien der von den Belüfterkreisel bewirkten Oberflächenströmung, auch optisch sichtbar, eindeutig begrenzt.

Die Festlegung der effektiven Leistungsaufnahme eines Kreiselbelüfters sollen jedoch keineswegs entsprechend der Angabe der Nennleistung des Antriebsmotors erfolgen. Messungen haben gezeigt, dass mit demselben Kreiselbelüfter mit gleicher Drehzahl und gleicher Eintauchtiefe sehr unterschiedliche Leistungen erreicht werden können. Dies wird durch unterschiedliche Anströmverhältnisse des Kreiselbelüfters in Becken verschiedener Grösse oder auch durch unterschiedliche Einbauten in Becken gleicher Grösse bedingt. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Anfahrlast eines Kreiselbelüfters umso mehr über der Dauerbetriebsleistung liegt, je stärker die Rotationsbewegung des Wassers im Becken und vor allem im Bereich des Kreiselbelüfters ist. Auf Abb. 19 ist der Einfluss von Einbauten auf die Leistungsaufnahme einer BSK-Turbine von 3000 mm Durchmesser dargestellt. Durch Einbau von Rotationsbremsen und einem Leitkreuz zur Verhinderung einer Wirbelbildung unmittelbar unter dem Kreiselbelüfter könnte die Leistung gegenüber einem Becken ohne Einbauten um über 100 % gesteigert werden. Gleichzeitig wurde die Differenz zwischen Anfahr- und Betriebsleistung des Kreiselbelüfters bis auf einen kleinen Wert verringert.

Diese Möglichkeit, die Leistung der Kreiselbelüfter durch Einbauten und damit der Aenderung der Anströmverhältnisse zu erhöhen, kann bei ausreichender Leistungsreserve des Antriebsmotors und entsprechender Dimensionierung des Getriebes genutzt werden, spätere Belastungssteigerungen und einen dadurch bedingten höheren Sauerstoffbedarf der Belebungsstufe aufzufangen. Trotz der erheblichen Bedeutung der hydraulischen Fragen liegt die primäre Aufgabe der Kreiselbelüfter in der

Abb. 19 - Einfluss von Einbauten auf die Leistung der BSK-Turbine.





Sauerstoffversorgung der Biomasse. Die Sauerstoffeintragsleistung eines Kreislaufbelüfters muss in Abhängigkeit vom angestrebten Reinigungseffekt, der durch Aufenthaltszeit, BSB-raumbelastung und BSB-Schlammbelastung bestimmt wird, zur BSB-Fracht des Abwassers in einem bestimmten Verhältnis stehen, dass als OC/load-Wert bekannt ist. Erfahrungsgemäss werden bei der Bemessung von Belüftungsanlagen für Berechnungen des Sauerstoffbedarfes je nach angestrebtem Abbaugrad OC/load-Werte zwischen 1,0 - 2,5 zu Grunde gelegt.

Mit Hilfe der Sauerstoffertragswerte in  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$ , die für die verschiedenen Kreislaufbelüfertypen möglichst durch Sauerstoffeintragsversuche unter ähnlichen Betriebsbedingungen ermittelt sein sollen, kann durch Division des errechneten Sauerstoffbedarfes in  $\text{kg O}_2/\text{h}$  durch den Sauerstoffertragswert die erforderliche Leistung der Kreislaufbelüfter berechnet werden.

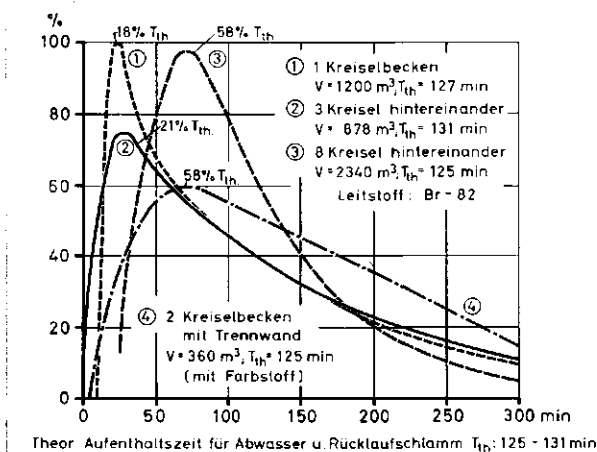
Zur Abdeckung des Sauerstoffbedarfes stehen für die verschiedenen Kreislaufbelüfertypen Laufräder zwischen 0,5 m - 4,0 m Durchmesser mit Leistungen zwischen 1 kW bis 120 kW zur Verfügung. Von einem Kreislaufbelüfter können bei mittleren Sauerstoffertragswerten von 1,5 - 2,5  $\text{kg O}_2/\text{kWh}$  damit Sauerstoffeintragsleistungen von 1,5  $\text{kg O}_2/\text{h}$  bis über 300  $\text{kg O}_2/\text{h}$  erbracht werden. Durch Veränderung der Drehzahl oder der Eintauchtiefe des Kreislaufbelüfters, durch Höhenverstellung oder Wasserstandsänderung im Becken kann seine Leistung jeweils etwa zwischen 50 % bis 100 % und bei Ausnutzung beider Möglichkeiten sogar etwa zwischen 25 % bis 100 % variiert werden. Damit ist eine ausreichend hohe Steuermöglichkeit der Sauerstoffeintragsleistung bei Kreislaufbelüftern gegeben, durch die auch in Beckengruppen mit unterschiedlichem Sauerstoffbedarf über die Länge der Beckengruppe der Sauerstoffeintrag dem jeweiligen Sauerstoffbedarf angepasst werden kann. Um einen Ueberblick über die effektive Aufenthaltszeit des Abwassers im Belebungsbecken bei verschiedenen Betriebsweisen und Beckenanordnungen zu erhalten, wurden von der Emschergenossenschaft Messungen mit radioaktiven Isotopen als auch mit Farbe als Leitstoff durchgeführt. Wie auf Abb. 20 zu erkennen ist, entspricht die Durchflusskurve eines Einzelbeckens weitgehend der Durchflusskurve eines idealen Mischbeckens. Auch bei 3 hintereinander geschalteten Becken ohne Zwischenwände ist noch ein erheblicher Mischeffekt festzustellen. Erst bei einer Beckengruppe von 8 Ein-

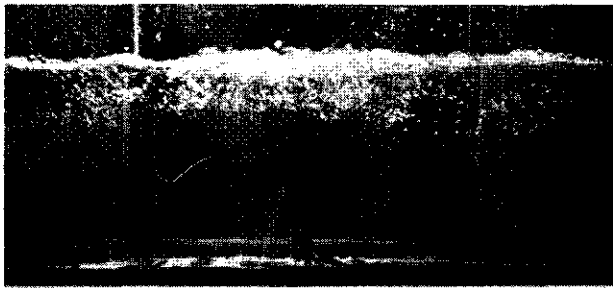
heiten ohne Zwischenwände oder bei hintereinander geschalteten Becken mit einer Zwischenwand und kleiner Durchflussöffnung wurden Durchflusskurven ermittelt, die von Längsbecken bekannt sind. Generell kann festgestellt werden, dass durch Kreislaufbelüfter hohe Mischeffekte erzielt werden können. Hierauf sollte vor allem bei hohen Verschmutzungskonzentrationen des Abwassers und tiefen Belebungsbecken geachtet werden. Da der Sauerstoffeintrag durch die Strahlwirkung des verspritzten Wassers und durch die eingeschlagenen Luftblasen vorzugsweise im oberen Beckenteil soweit erfolgt, kann bei solchen Betriebsverhältnissen nur bei einer schnellen Durchmischung des Beckeninhalts ein ausgeglichener Sauerstoffgehalt an allen Stellen des Beckens erreicht werden. Zur Ueberwachung der Betriebsverhältnisse sollte daher auf Belebungsanlagen bei Einsatz von Kreislaufbelüftern der Sauerstoffgehalt nicht nur im oberen Bereich der Belebungsbecken, sondern vor allem auch an der Beckensohle kontrolliert werden.

Unter Betriebsbedingungen ergeben sich bei allen mechanischen Oberflächenbelüftern in Belüftungsbecken gewisse Veränderungen der Strömungs- und Turbulenzverhältnisse wie auch des Sauerstoffeintrages gegenüber Messungen in Reinwasser, die durch Detergentien, den Schlammgehalt oder andere Abwasserinhaltsstoffe bedingt sein können. So ist anzunehmen, dass mit steigenden Schlammkonzentrationen die Strömungsgeschwindigkeiten etwas abnehmen. Die zuvor beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den hydraulischen Verhältnissen und dem Sauerstoffeintrag bleiben jedoch bestehen. Nach bisher vorliegenden Untersuchungen ergeben mechanische Oberflächenbelüfter hinsichtlich des Sauerstoffeintrages auch unter Betriebsbedingungen günstige Werte. Dies ist sicherlich nicht zuletzt dadurch bedingt, dass infolge der verminderten Oberflächenspannung durch Detergentien eine gleichmässiger und feinere Luftblasenverteilung eintritt, durch die der sekundäre Sauerstoffeintrag erhöht werden dürfte, wie aus der Luftblasenverteilung in Modellbecken auf Abb. 21 zu schliessen ist. Wie weit hierdurch unter Betriebsbedingungen bei Einsatz von Kreislaufbelüftern besonders günstige spezifische Abbauleistungen in  $\text{kWh}/\text{kg BSB}_5$ -Abbau bedingt sind, muss durch eingehende Untersuchung bei einer Vielzahl von Kläranlagen noch überprüft werden.

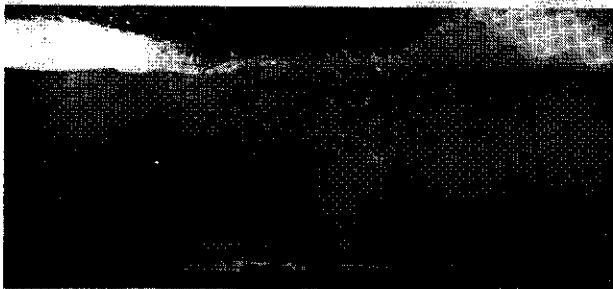
Auf Abb. 22 ist der Energieaufwand in  $\text{kWh}/\text{kg BSB}_5$ -Abbau aufgetragen, der in Abhängigkeit von der Zulaufkonzentration des Abwassers auf der Versuchstation Klärwerk Emschermündung in einem 1200  $\text{m}^3$  grossen Belebungsbecken bei 3 h Aufenthaltszeit und Abbauraten zwischen 70 % - 90 % aufgebracht werden musste. Da die Sauerstoffeintragsleistung des eingesetzten Simplex-Kreisels vom Typ SL auf Grund von Versuchen mit Reinwasser bekannt war, konnte für die vorliegenden Betriebsverhältnisse der jeweilige Sauerstoffeintrag pro  $\text{kg BSB}_5$ -Belastung bezogen auf Reinwasser mit einem Sauerstoffgehalt von 1,5  $\text{mg}/\text{l}$  im Becken ermittelt werden. Die errechneten OC-load-Werte, bezogen auf die Sauerstoffbasis von 1,5  $\text{mg}/\text{l}$  und die vorhandene Wassertemperatur liegen so günstig, dass sogar ein erhöhter Sauerstoffeintrag gegenüber Reinwasser vermutet werden kann. Die auf Abb. 22 ersichtlichen Betriebsergebnisse stützen auf Versuchsreihen, die über mehrere Monate liefen und die durch weitere Versuchsreihen mit BSK-Turbinen bestätigt wurden. Diese günstigen Betriebsergebnisse, die durch die speziellen Abwasserseigenschaften des Emscherwassers mit bedingt sein werden, sind

Abb. 20 - Durchflusskurven von Belebungsbecken mit Kreislaufbelüftern.





Leitungswasser



Leitungswasser mit Detergentien

Abb. 21 - Luftblasenverteilung im Modellbecken mit Kreisellüfter.

nicht zuletzt durch sorgfältige betriebliche Wartung und Kontrolle des Sauerstoffgehaltes der Belebungsanlage erreicht worden und können auf andere Verhältnisse sicherlich nicht übertragen werden. Auf einer anderen Kläranlage des Lippeverbandes, die als Essener Becken mit einem SL-Simplex-Kreisellüfter ausgerüstet ist und die vorwiegend mit häuslichem Abwasser beschickt wird, konnten gleichfalls günstige Betriebsergebnisse erzielt werden. Bei BSB<sub>5</sub>-Werten im Zulauf zwischen 200 und 300 mg/l wurden in 2 bis 3 Stunden Aufenthaltszeit Abbauraten zwischen 88 und 98 % erzielt. Der spez. Energiebedarf betrug dabei 0,6 bis 0,2 kWh/kg BSB<sub>5</sub>-Abbau.

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Belebungsverfahrens bei Einsatz von Kreisellüftern sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es zur Erzielung günstiger spezifischer Abbauleistungen in kWh/kg BSB<sub>5</sub>-Abbau und damit geringer Betriebskosten sehr wichtig ist, die Belebungsanlage gut zu warten und mit einem gleichmässigen niedrigen Sauerstoffgehalt von 1,5 - 2,0 mg/l im Belebungsbecken zu fahren. Geringe Leistungsunterschiede in den Sauerstofftragswerten von etwa 0,2 kg O<sub>2</sub>/kWh bei verschiedenen Kreisellüfertypen sollten keineswegs allein für die Wahl eines bestimmten Kreisellüfters entscheidend sein. Ebenso viel Gewicht muss auf die technische Ausführung, die Qualität und die garantierte Lebensdauer für Motor und Getriebe, auf den Korrosionsschutz und nicht zuletzt auf den Preis gelegt werden. In betrieblicher Hinsicht ist noch zu bemerken, dass bei nicht oder unzureichend vorgeklärtem Abwasser bei Kreisellüftern Zopfgebilde und Verstopfungen der Leitkanäle durch faserige Stoffe auftreten können. Durch Einsatz von Feinrechen oder Einbau von Anschwemmrechen im Belebungsbecken kann diese Gefahr erheblich herabgesetzt werden.

Die häufige Verwendung, die die Kreisellüfter für die

Sauerstoffversorgung der Biomasse im Rahmen des Belebungsverfahrens gewonnen haben, ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass durch die Entwicklung grosser leistungsstarker Einheiten die Baukosten für Belebungsanlagen günstig beeinflusst wurden. Der erhebliche Kostenmässige Vorteil der hierdurch beim Bau einer grossen Einheit gegenüber vielen kleineren Becken oder auch einem grösseren Becken mit mehreren Kreisellüfteraggregaten gegeben ist, wird durch Kostenvergleiche leicht bestätigt. Die spezifischen Baukosten in DM/m<sup>3</sup> für ein Belebungsbecken von 3000 m<sup>3</sup> Inhalt betragen nur etwa 50 % der spezifischen Baukosten, die für ein Becken von 500 m<sup>3</sup> Inhalt aufzubringen sind.

In den vorstehenden Ausführungen sind eine Vielzahl von betrieblichen und technischen Aspekten aufgezeigt worden, die bei Einsatz und Bau von Kreisellüfteranlagen zu beachten sind. Eine vollständige Klärung damit in Zusammenhang stehender Fragen und Probleme ist auf Grund der bisher vorliegenden Forschungsergebnisse und Betriebserfahrungen noch nicht möglich. Die bisher erzielten Erkenntnisse dürften jedoch dazu beitragen, betriebssichere Kreisellüfteranlagen zu entwerfen.

#### Schrifttum

1. Knop, Bischofsberger, Stalman, *Versuche mit verschiedenen Belüftersystemen im technischen Massstab*, Teil 1 und 2. Vulkan-Verlag dr. W. Classen, Essen - 1964/65.
2. Kalbskopf, K. H., *Strömungsverhältnisse und Sauerstoffeintrag bei Einsatz von Oberflächenbelüftern*. Vom Wasser 23. Band, Verlag Chemie GmbH, Weinheim/Bergstrasse 1967.
3. Knop, E. und Kalbskopf, K. H., *Energy and Hydraulic Tests on Mechanical Aerator Systems*. Conference of the International Association on Water Pollution Research, Prague, 1968.
4. Emde, W. v. d., *Belüftungssysteme und Beckenformen*. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Band 15, Verlag R. Oldenburg, München 1968.

Abb. 22 - Betriebsergebnisse der Versuchsstation Ktw. Emscher-mündung.

