

Störungsdiagnose mit aktiver Reaktion zur Abwehr von Verstopfungen in komplexen Abwasserförderanlagen

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Sergey Bashinskiy
geb. in Wolgograd

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. H. Meyer
Berichter: Prof. Dr.-Ing. P.U. Thamsen
Berichter: Prof. Dr.-Ing. M. Ernst

Tag der wissenschaftlichen Aussprache 10 Oktober 2016

Berlin 2016

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Herrn Prof. Dr.-Ing P. U. Thamsen am Fachgebiet Fluidsystemdynamik - Strömungstechnik in Maschinen und Anlagen der Technischen Universität Berlin.

Einordnung

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Begriffe und Definitionen stammen aus dem Bereich der Fluidsystemdynamik sowie der Strömungsmaschinen. Die wichtigen Normen DIN, ISO und VDMA definieren außerdem die Anlagenbaubedingungen sowie die Betriebsbedingungen der Kreiselpumpen im Bereich Wasserversorgung und Wasserentsorgung.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt vor allem meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. P. U. Thamsen, für die Möglichkeit, in die aufregenden und spannenden Welten der Ingenieurwissenschaft einzutauchen.

Sehr dankbar bin ich auch Herrn Prof. em. Dr.-Ing H. E. Siekmann für die weitgehende Inspiration seit meiner Studienzeit.

Ferner bedanke ich mich bei dem Vorsitzenden der Promotionskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing H. Meyer sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Ernst für die Übernahme des Koreferates.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. R. Witzel, KSB AG Frankenthal, für die nützlichen Anregungen und freundliche Kritik.

Bei allen Mitarbeitern des Fachgebietes möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken. Meinen Kollegen F. Neuer sowie S. Wulff habe ich darüber hinaus sehr viele neue Ideen zu verdanken, die in kollegialen Diskussionen entstanden sind.

Allen Studierenden, deren Mitwirkung durch zahlreiche Projekt-, Studien- und Diplomarbeiten einen Forschungsbeitrag geleistet haben, einen herzlichen Dank.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern und meinem Sohn Timofey, die mir durch ihren Glauben und Unterstützung immer die wahre Bedeutung des Ingenieursberufes als Erfinder zu spüren gaben.

Berlin,
den 21. Dezember 2016

Sergey Bashinskiy

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
b	mm	Freier Kugeldurchgang
d	mm	Rohrinnendurchmesser
d_2	m^3/s	Laufraddurchmesser
d_k	m^3/s	Durchmesser des Kugeldurchgangs am Laurad
DN	mm	Nennweite
DN_{Saug}	mm	Nennweite Saugstutzen
DN_{Druck}	mm	Nennweite Druckstutzen
DN	mm	Nennweite
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
H	m	Förderhöhe
H_J	m	Druckverlusthöhe
H_{nenn}	m	Nennförderhöhe
f_n	Hz	Drehfrequenz
f_a	Hz	Abtastfrequenz
f_b	Hz	Beobachtungsfrequenz
f_{dk}	Hz	Drehklangfrequenz
n	min^{-1}	Drehzahl
n_{nenn}	min^{-1}	Auslegungsdrehzahl
n_q	min^{-1}	Spezifische Drehzahl
I	A	elektrische Stromstärke
IM	1	Impulsmuster
k	1	Erste Harmonische Drehklangfrequenz
q	1	Fördergrad
Q	m^3/s	Förderstrom
Q_{nenn}	m^3/h	Nennförderstrom
Q_{DS}	m^3/h	Druckstrahl Volumenstrom
Q_R	m^3/s	Rückspülung Förderstrom
p	bar	Druck
p_s	bar	Druck am Saugstutzen der Maschine
p_d	bar	Druck am Druckstutzen der Maschine
P	kW	Wellenleistung
P_{nenn}	kW	Nennleistung
P_u	W	Hydraulische Leistung
P_{el}	W	Elektrische Leistung

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
t	s	Zeit
t_w	s	Wirkzeit
v	m/s	Volumetrische Geschwindigkeit
v_d	m/s	Geschwindigkeit druckseitig
v_s	m/s	Geschwindigkeit saugseitig
u	m/s	axiale Geschwindigkeit am Flügelrad
U	V	elektrische Spannung
V_{SR}	m^3	Volumen des Einlaubebehälters
V_{VB}	m^3	Volumen des Vormischbeckens
V_{VD}	m^3	Verdrängungsvolumen
V_R	m^3	Rückspülvolumen
V_P	m^3	Innenvolumen der Abwasserpumpe
V_{SR}	m^3	Innenvolumen des Saugrohres
V_{SK}	m^3	Innenvolumen des Saugkrümmers
V_{BP}	m^3	Bypassvolumen
V_F	m^3	Volumen des Feststofftrenners
WZ	1	Wirkzahl
z	m	Zulaufhöhe
z_{LK}	1	Anzahl Laufradschaufeln
η	%	Wirkungsgrad
η_{Ende}	%	Wirkungsgrad zum Ende des Versuches
η_{Start}	%	Wirkungsgrad zum Start des Versuches
Θ	°	Drallwinkel
φ	°	Winkel
ρ	kg/m^3	Dichte
<i>ATV – DVWK</i>		Abwassertechnische Vereinigung - Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
<i>DIN</i>		Deutsches Institut Norm
<i>TU</i>		Technische Universität
<i>KSB</i>		KSB Aktiengesellschaft
<i>RSR</i>		Radseitenraum
<i>MID</i>		Magnetisch Induktives Durchflussgerät

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Problemstellung	9
1.2	Ziel der Arbeit	10
1.3	Vorgehensweise	10
2	Stand der Technik	13
2.1	Abwasserpumpwerke	13
2.2	Kreiselpumpen als Abwasserpumpen	17
2.3	Störungen bei Abwasserpumpenanlagen	19
2.4	Diagnostik in der Abwassertechnik	21
3	Experimentelle Untersuchungen	23
3.1	Versuchseinrichtung	23
3.2	Messeinrichtung	27
3.3	Versuchsdurchführung	28
3.4	Versuchsauswertung	31
4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	35
4.1	Kennlinienmessung	35
4.2	Verstopfungsphänomene	36
4.3	Messgrößen bei Verstopfung	43
4.4	Zeitlich aufgelöste Drucksignale	48
5	Aktuatorik	53
5.1	Reinigungszyklus	53
5.2	Rückspülen	54
5.3	Druckstrahl	56
5.4	Bypass	58
5.5	Leitprofile im Saugrohr	59
5.6	Rührwerke und Injektoren	60

8	Inhaltsverzeichnis	
6	Ergebnisse zur Wirksamkeit der Aktuatorik	63
6.1	Reinigungszyklus	63
6.2	Rückspülen	68
6.3	Druckstrahl	79
6.4	Bypass	88
6.5	Leitprofile im Saugrohr	97
6.6	Rührwerke und Injektoren	101
7	Schlussfolgerung	107
8	Zusammenfassung	111
A	Datenblätter	113
B	Ergebnisse der Untersuchungen zum Verstopfungsverhalten	119
C	Rührwerke und Injektoren	127
	Literaturverzeichnis	145

Einleitung

1.1 Problemstellung

Der zuverlässige Betrieb von Abwasserförderanlagen ist unabdingbare Voraussetzung für Hygiene und hohe Lebensqualität. Die Zuverlässigkeit der Abwasserförderung wird durch Diagnose und Wartung der Abwasserförderanlagen gewährleistet.

Eine typische Abwasserförderanlage besteht aus dem Sammelreservoir, Abwasserpumpen und entsprechenden Regelungsarmaturen. Als wesentlicher Teil des Abwassersystems unterliegt sie regelmäßiger Inspektion und daraus resultierender Diagnose.

Das Herz der Abwasserförderanlage stellen die Abwasserpumpen dar. In der Regel sind dies trocken oder nass aufgestellte Kreiselpumpen mit speziellen für den Einsatz in der Abwassertechnik entwickelten Eigenschaften. Die Kreiselpumpen sind beansprucht durch das chemisch aggressiv wirkende Abwasser und auch physikalisch durch die darin beinhaltenen Verunreinigungen, wie feste Bestandteile, faserige Stoffe, Fette und andere. Solche Einsatzbedingungen stellen hohe Anforderungen an den sicheren Betrieb der Kreiselpumpen.

Die konstruktive Erfüllung dieser einsatzspezifischen Anforderungen muss kontrolliert werden. Die dabei gewonnenen diagnostischen Informationen werden zu präventiven Maßnahmen auf Systemebene oder zur Auswahl der geeigneten Abwasserhydraulik verwendet. So können mögliche Störungen der Abwasserförderanlagen verringert werden.

In der Praxis stellen die Verstopfungen einen täglichen Aufwand dar. Die Reinigung der verstopften Abwasserpumpen, Rohrleitungen und Armaturen ist mit zusätzlichem Arbeitsaufwand und Kontaminierungsgefahr des Personals verbunden. Zudem setzen die Verstopfungsfälle die Betriebssicherheit des Abwasserpumpwerkes ab, unabhängig von der Größe des gesamten Abwassernetzwerkes und seines Automatisierungsgrades.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit sind Untersuchungen von Störungen in Abwasserförderanlagen und deren Beseitigung. Dabei steht das Auftreten von Verstopfungen in Abwasserförderanlagen im Schwerpunkt der Untersuchungen.

Die auftretenden Störungen werden an einem 1:3-maßstäblichen Pumpwerk im Labor simuliert.

Typische Merkmale, die bei Störungen auftreten, werden über geeignete Sensorik und Messtechnik nachgewiesen. Diese bilden die Grundlage für spätere Diagnosesysteme.

Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen sollen die Ursachen ermittelt werden, die für den Verstopfungsaufbau verantwortlich sind.

Schließlich sollen die Störungen über aktive Gegenmaßnahmen beseitigt werden. Der Ansatz einer Diagnose mit aktiver Reaktion ist dabei relativ neu.

1.3 Vorgehensweise

Der Aufbau der Arbeit wird anhand eines Flussdiagrammes im **Bild 1.1** erläutert.

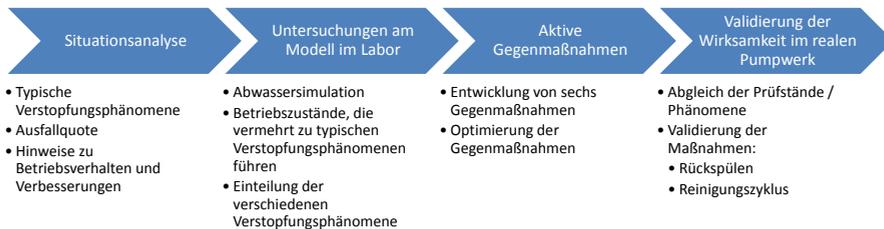


Bild. 1.1. Vorgehensweise als Flussdiagramm

Eine vom Fachgebiet Fluidsystemdynamik der TU Berlin durchgeführte Situationsanalyse [80] in realen Abwasserpumpwerken erfasste die Fehlerzustände und definierte die typischen Verstopfungsphänomene. Die dafür notwendige Überwachung und Datenerfassung erfolgte an ca. 50 Pumpwerken des Netzes der Berliner Wasserbetriebe. Neben der Verstopfungsstatistik und der Kenntnisse über die Änderung der Betriebsgrößen ergab die Situationsanalyse konkrete Hinweise zur Verbesserung des Betriebsverhaltens der Abwasserförderanlagen.

Eine vertiefende Untersuchung erfordert die strenge Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen. Die Erfassung der Betriebszustände und Störungen der Abwasserförderanlage wird weiter experimentell an einem maßstäblich nachgebautem Modell-Versuchsstand untersucht. Die Abwasserzusammensetzung wird simuliert anhand der vorhandenen Bestandteilstatistik des Abwassers der Berliner Wasserbetrieben.

Die Struktur der erfassten Verstopfungsphänomene ist in visueller Form in Abhängigkeit vom Betriebspunkt dokumentiert und analysiert worden.

Neben der visuellen Erfassung der Verstopfungsphänomene sind die Betriebsgrößen gemessen und ausgewertet worden.

Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse über den Verstopfungsaufbau sind die aktiven Gegenmaßnahmen ausgearbeitet und auf ihre Wirksamkeit hin untersucht worden. Konzeptionell wird der Einsatz der aktiven Beeinflussung der Strömungszustände angewendet und ein Verstopfungszustand durch gezieltes Agieren verhindert oder beseitigt.

Die Validierung im Pumpwerk sollte die Wirksamkeit der aktiven Gegenmaßnahmen unter realen Arbeitsbedingungen abschließend bestätigen.

Stand der Technik

2.1 Abwasserpumpwerke

Abwasserpumpwerke sind stationäre Anlagen, in denen motorisch angetriebene Pumpen Abwasser fördern [7, 9, 17, 18, 19, 21, 48, 66, 67, 84, 85].

Laut DIN 4045 [17] ist ein *Abwasserpumpwerk* eine

„Anlage zum Heben von Abwasser innerhalb eines Kanalnetzes oder einer Kläranlage“.

Ergänzend definieren DIN 752 [19] und die Richtlinie ATV-DVWK-A 134 [21] eine *Pumpstation* als

„Bauwerk und Ausrüstung zur Förderung von Abwasser unter Druck in eine Pumpendruckleitung oder zur sonstigen Hebung von Abwasser“.(vgl. **Bild 2.1**)

Es werden jeweils nach Aufgabenschwerpunkten oder nach Standorten unterschieden: Kanalisationspumpwerke, Zwischenpumpwerke, Zubringerpumpwerke, Regenwasserpumpwerke, Schmutzwasserpumpwerke, Kläranlagenpumpwerke, Hochwasserpumpwerke [7].

Die Aufgaben eines Abwasserpumpwerkes bestehen im Folgenden:

- einen Höhenunterschied mit oder ohne Druckrohrleitung zu überwinden,
- eine Entfernung mit Druckrohrleitung primär zu überbrücken oder
- sowohl einen Höhenunterschied als auch eine Entfernung mit Druckrohrleitung zu überwinden.

Beispielsweise betreiben die Berliner Wasserbetriebe im Stadtgebiet ca. 160 Abwasserpumpwerke.

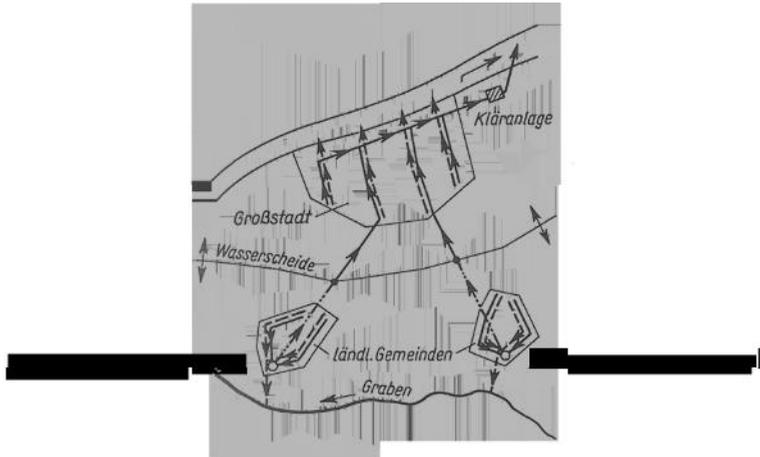


Bild. 2.1. vernetzte Abwasserpumpwerke [7]

Ein Abwasserpumpwerk besteht im Wesentlichen aus drei Bereichen [84] (vgl. dazu **Bild 2.2**):

- *Saugraum*, auch Pumpensumpf, Speicher- oder Sammelraum genannt. Er ist zwischen Zulauf und Pumpe angeordnet und dient der Verteilung des Abwassers auf die Pumpen und der kurzfristigen Pufferung von Differenzmengen zwischen Zufluss und Abfluss,
- *Maschinenraum* mit den Abwasserpumpen und
- *Hochbauteil* für Schaltanlagen, Steueranlagen, sonstige elektrische Einrichtungen und Nebenanlagen.

Das zu fördernde *Abwasser* bezeichnet man nach DIN EN 1085 und DIN EN 752-1 als:

„Wasser, bestehend aus jeglicher Kombination von abgeleitetem Wasser aus Haushalten, Industrie- und Gewerbebetrieben, Oberflächenabfluss und unbeabsichtigtem Fremdwasserzufluss.“

Einen Überblick dazu gibt die **Tabelle 2.1**.

Tabelle 2.1. Übersicht der Abwasserarten [64]

Häusliches Schmutzwasser	Schmutzwasser	Trockenwetterabfluss	Mischwasserabfluss
Gewerbliches Schmutzwasser			
Landwirtsch. Schmutzwasser			
Fremdwasser			
Regen- und Schmelzwasser			

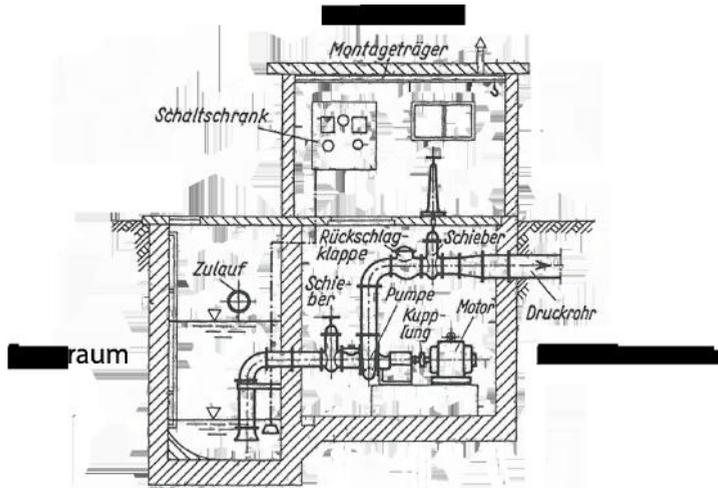


Bild. 2.2. Abwasserpumpwerk mit trocken aufgestellter Pumpe [7]

Links finden sich fünf Kategorien, in die das Abwasser eingeteilt wird. Sie unterscheiden sich nach Vorkommen und in der Zusammensetzung stark voneinander.

Auf der rechten Seite der Tabelle finden sich Gruppenbegriffe, in welche die verschiedenen Schmutzwasserarten zusammengefasst werden.

Die Beschaffenheit des Abwassers ist vom Ort und Einsatzgebiet abhängig. Die Zusammensetzung des Abwassers wird anhand vieler physikalischer und chemischer Größen erfasst und kontrolliert.

Die **Tabelle 2.2** gibt die Struktur des empirisch erfassten durchschnittlichen Schmutzgehalt des kommunalen Schmutzwassers wieder.

Tabelle 2.2. Einteilung des Schmutzgehaltes des kommunalen Schmutzwassers [42]

Bezeichnung	Einheit	Maß
Gesamtschmutzmenge	mg/l	1260
Davon gelöste Stoffe (Filterdurchlauf)	mg/l	660
Davon abfiltrierbare Stoffe	mg/l	600

Die Einteilung des Schmutzgehaltes wird als Massenmenge pro Liter des Fördermediums definiert. Die Aufteilung von gelösten und abfiltrbaren Stoffen im Abwasser ist jeweils eine Hälfte zur Gesamtmenge.

Für die vorliegenden Untersuchungen spielen die Anteile des Abwassers, die zu einer Verstopfung oder Verzopfung führen können eine bedeutende Rolle. Das sind die abfiltrierbaren bzw. absetzbaren Stoffe.

Der Herkunft der abfiltrierbaren Stoffen im unbehandelten Abwasser (Rohabwasser) ist unterschiedlich. Den Überblick über Herkunft der Feststoffe im Abwasser liefert die **Tabelle 2.3**.

Tabelle 2.3. absetzbare Stoffe im Schmutzgehalt des kommunalen Schmutzwassers

Herkunft	Haushalt	Kommunal
biegeschlaife Stoffe (z.B. Textilien, Tücher, Papier)	✓	✓
solide Teile (z.B. Kinderspielzeuge)		✓
Hygieneartikel (z.B. Windeln, Wattestäbchen, Wundpflaster, Mullbinden, usw.)	✓	✓
Wegwerfstoffe (z.B. Verpackung, Einwegartikel)	✓	✓
Speisereste, Küchenabfälle	✓	✓
Strassenabfälle (z.B. Äste, Laub, Kies, Steine)	✓	

Eine besondere Eigenschaft ist die *Form* der absetzbaren Stoffe. Hier unterscheidet man zwischen die meistens in Zöpfe verwebten *langfaserigen Feststoffe* und *grobe Feststoffansammlungen* (vgl. **Bild 2.3**). Im Bereich der Abwasserbehandlung beschreibt der Begriff der Zopfbildung das Festsetzen sich miteinander verspinnender Textilien und anderer fadenförmiger Stoffe im Abwasser (Putzwolle, Haare) an Hindernissen und Einbauten im Strömungsquerschnitt. Grobe Feststoffansammlungen erreichen Größen zwischen 40 und 120mm und gelten als Grobmüll.



a)



b)

Bild. 2.3. a Verstopfung aus der Saugleitung der Abwasserpumpe, b Verstopfung in der Abwasserarmatur

In einer Kläranlage wird im Abwasser mitschwimmender Grobmüll im Rechenwerk vom Abwasser getrennt und mit dem Rechengut entsorgt. Die weitere Ab-

scheidung von Grobstoffen erfolgt zumeist durch Absetzen oder Aufschwimmen in Mehrkammerabsetzgruben und Mehrkammerausfallgruben.

Der Abwassertransport solcher Verunreinigungen bis zur Kläranlage stellt ein Hindernis für Kreiselpumpen dar. Die langfaserigen Feststoffe, deren Länge größer als ein Laufraddurchmesser ist, gelten als nicht pumpbar. Das Gleiche gilt für die Feststoffansammlungen, deren Größe den freien Kugeldurchgang des Laufrades übersteigt [48].

Die während der Situationsanalyse bei den Berliner Wasserbetrieben aufgenommenen Bilder zeigen langfaserige und kleine tuchartige Schmutzstoffe als wesentliche Bestandteile des Abwassers, die Verzopfung- bzw. Verzopfungs-aufbau verursachen und welche nicht mit einfacher Vergrößerung des freien Kugeldurchganges der Abwasserhydraulik zu beseitigen sind.

2.2 Kreiselpumpen als Abwasserpumpen

Unter einer *Abwasserpumpe* versteht man eine Pumpe, die speziell zur Abwasserförderung geeignet ist. Die Lauf- und Leitradkanäle weisen meist relativ große Querschnitte zur Vermeidung von Verstopfungen auf. Kreiselpumpen sind wegen ihres geringen Wartungsaufwandes in der Abwassertechnik vorherrschend [84, 54, 56, 65].

Um die Anforderungen für den störungsfreien Betrieb zu erfüllen, werden die Abwasserkreiselpumpen mit speziell entwickelten Laufrädern zum Fördern des Abwassers ausgestattet. Im **Bild 2.4** sind typische Abwasserpumpen dargestellt.

Das *Freistromrad* fördert mit Gas und Fasern beladene Abwässer, ist jedoch konstruktionsbedingt energetisch weniger effizient als die anderen Laufräder.

Das *Mehrkanalrad* verfügt in der Regel über zwei oder drei Schaufeln und bietet einen relativ hohen Wirkungsgrad. Infolge der relativ engen Kanäle neigen Mehrkanlräder zu Verstopfungen durch langformige Bestandteile im Abwasser.

Das *Einschaufelrad* und das *Diagonalrad* verfügen über einen großen Eintritt und der Nennweite des Laufradeintrittes vergleichbaren freien Kugeldurchgang (**Bild 2.4**).

Einen Überblick über die Vorteile und Nachteile bei dem Einsatz von verschiedenen Laufrädern für Abwasserpumpen liefert die **Tabelle 2.4**.

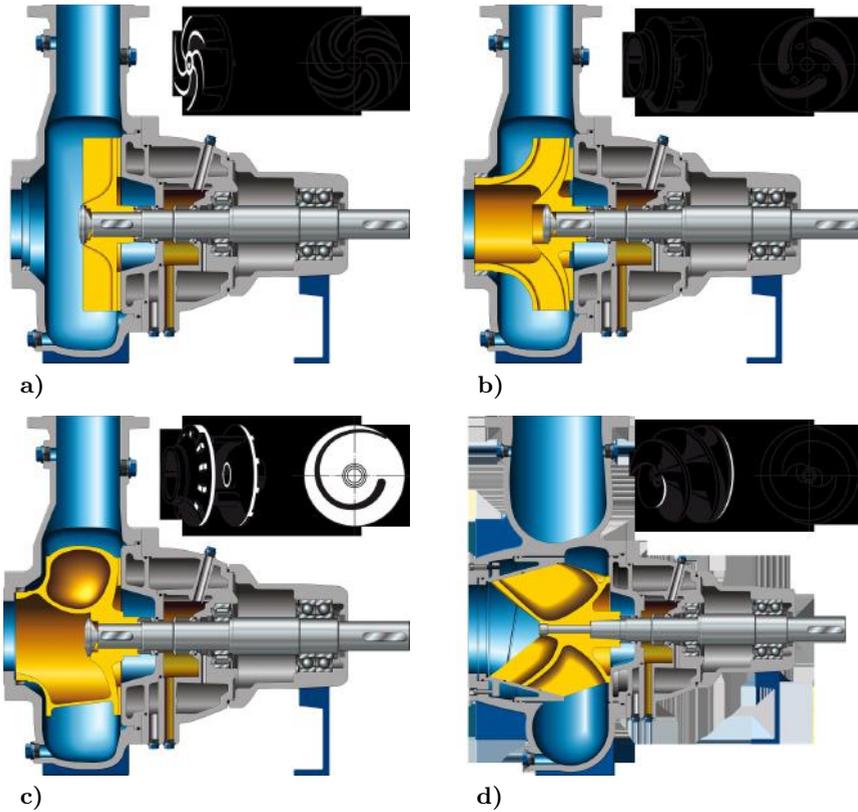


Bild. 2.4. Kreiselpumpen in Abwassertechnik: **a** Freistromrad, **b** Mehrkanalrad, **c** Einschaufelrad, **d** Diagonalrad. Quelle: *KSB* [56]

Tabelle 2.4. Vorteile und Nachteile der Abwasserhydraulik bei Kreiselpumpen

Bezeichnung	Vorteile	Nachteile
Freistromrad	Gas-, Faserförderung	Geringer Wirkungsgrad
Mehrkanalrad	Hoher Wirkungsgrad	Geringer Kugeldurchgang
Einschaufelrad	Großer Kugeldurchgang	hydrodynamische Unwucht, Anlagenschwingungen
Diagonalrad	Faser-, Schlammförderung	Verschleiß, Spaltverluste

Fazit

Abwasserpumpen bieten also unterschiedliche Effizienz und Funktionalität und werden daher speziell für die definierte Aufgabe ausgewählt und eingesetzt.

2.3 Störungen bei Abwasserpumpenanlagen

Kommunales Abwasser ist oft stark mit Textilien oder anderen biegeschlaffen Beimischungen verunreinigt. Diese Materialien haben die unangenehme Eigenschaft der sogenannten „Zopfbildung“ [78, 80, 83]. Solche Zöpfe umwickeln die Laufräder der Pumpen und blockieren sie.

In einer Situationsanalyse zu Störungen in Abwassersystemen wurden die Erkenntnisse über die Ursachen der Verzopfungs- und des Verstopfungsaufbaus strukturiert erarbeitet [80]. Die Hauptstörungen in Abwasserpumpenanlagen sind (vgl. **Bild 2.5**):

- Verstopfung der Abwasserhydraulik (**Bild 2.5 a**),
- Blockade des Radseitenraums (**Bild 2.5 b**)



a)



b)

Bild. 2.5. Störfall: **a** Verzopfung im Laufradeintritt und Laufradkanälen eines Mehrkanallaufrades, **b** Blockade des Radseitenraums

Durch die Analyse der Verstopfungsfälle zeigte sich, dass die Verstopfungsart stark von der eingesetzten Hydraulik abhängig ist.

Zum Beispiel neigen Mehrkanallaufäder zur Verzopfung in ihrem Eintritt und in den Kanälen. Die Einschaufellaufäder dagegen sind anfällig zur Verstopfung im Radseitenraum. Die Feststoffe gelangen in den Radseitenraum und setzen sich dort ab, bis sie, über die Zeit, eine kritische Größe erreichen und das Laufrad blockieren (**Bild 2.6**).

Die Ergebnisse der über mehrere Monate geführten Erfassung der Störfälle im Berliner Abwassernetz wird hier zusammengefasst:

- als Verstopfungsursache kommen Verzopfungen im Laufrad und Blockaden im Radseitenraum vor,

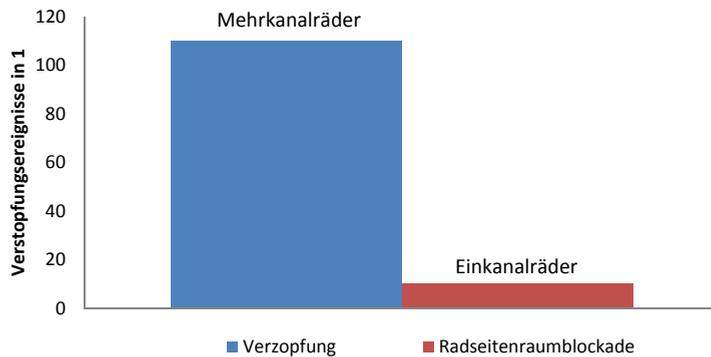


Bild. 2.6. Häufigkeitsverteilung der Verzapfungs- und Verstopfungereignisse [80]

- Verzapfungen sind überwiegend bei Mehrkanalrädern zu beobachten,
- Radseitenraumblockaden sind bei Einschaufelrädern zu beobachten,
- Verstopfungen treten meist bei starker Teillast und geringer Drehzahl auf,
- zahlreiche Pumpen sind zu groß für die zu fördernden Abwassermengen bemessen,
- besonders die Mehrkanalradpumpen im Tieffeld des Saugraums neigen zu Verstopfungen und
- regelmäßige Spülungen beseitigen die Ablagerungen im Saugraum.

2.4 Diagnostik in der Abwassertechnik

Zur Diagnose bei Kreiselpumpen wurden bereits zahlreiche Beiträge geleistet:

- Kallweit [43] untersuchte die Erstellung wissensbasierter Fehlerdiagnosesysteme,
- Huhn [39] und Laue [58] erstellten Fehlerdiagnosesysteme am Modell mit Hilfe der Merkmalgenerierung der mechanischen und hydraulischen Fehlerzustände,
- Geiger [29] führte technische Fehlerdiagnose mittels Parameterschätzung und Fehlerklassifikation am Beispiel einer Kreiselpumpe durch,
- Kollmar [50] entwickelte eine Form des maschinellen Lernens bei Störungsfrüherkennung,
- Kiggen [46] setzte bauteilintegrierte Sensorik und explorative Datenanalyse für Störungsfrüherkennung ein,
- Hawibiwo [38] untersuchte sicherheitstechnische Abschätzungen des Betriebszustandes für Schadensfrüherkennung und
- Friedrichsen [28], Nuglich [66] und Wolfram [90] untersuchten die Betriebsautomatisierung von Schöpfwerken.

Bisherige Untersuchungen erarbeiteten Methoden zur Schadensfrüherkennung an konventionellen Kreiselpumpen. Die Arbeiten zur Schadensdiagnose konzentrieren sich wesentlich auf die rechtzeitige Erkennung von Verschleißzuständen oder Störungen. Hierbei besteht das Ziel einer zustandsorientierten Wartung und Instandsetzung. Zudem sollen durch Vorhersage der Restlaufzeit geplante Maßnahmen ergriffen werden. Diese geplanten Maßnahmen zur Wartung und Instandsetzung sind wesentlich kostengünstiger als ungeplante Störfälle.

Bezogen auf Abwasser liegen nur wenige Arbeiten [43, 39, 58, 50] vor.

Auf Grund der, in den letzten 15 Jahren, vermehrten auftretenden Trocken- und Faseranteile im Abwasser, entstand im Bereich der Abwasserfördertechnik Bedarf, auch Maßnahmen der Schadensfrüherkennung anzuwenden. Zusätzlich ist der häufige Einsatz von Arbeitskräften im Bereich der Abwassertechnik aus gesundheitlichen und sicherheitstechnischen Aspekten grundsätzlich zu vermeiden.

Die Früherkennung von Verstopfungen ist mittels der synchronen Überwachung des Verhaltens mehrerer Prozessparameter wie beispielsweise Schwingungen, Förderhöhe oder Leistungsbedarf möglich. Hierauf basierend ist es möglich, ein Diagnosesystem zur Verstopfungsfrüherkennung einer Abwasserpumpe aufzubauen.

Neben dieser Methodik geben jedoch auch instationäre Veränderungen des statischen Druckes an Saug- und Druckstutzen der Abwasserpumpe, sogenannte *Druckfluktuationen*, Aufschluss über sich anbahnende Verstopfungen. Mehrere Forschungsarbeiten zeigen, dass sich bei Laufradverschmutzungen die Analyse der Drehfrequenz (Laue) [58], Drehklang und deren Harmonische (Friedrichsen) [28] auf Druckfluktuationen erfolgreich ist.

Die Betrachtung der Druckfluktuation als einzige dynamische Betriebsgröße besitzt folgende Vorteile [43]:

- reduzierter messtechnischer Aufwand,
- geringe Nachrüstkosten,
- Überwachungsmöglichkeit auch bei kleinen Maschinen und
- Integration von Low-Cost Diagnosemesstechnik in Maschinen.

Aus der Zunahme von detektierten Störfällen im Rahmen der Automatisierung sowie angestrebter Reduzierung des direkt in den Pumpwerken tätigen Personals ergibt sich der Ansatz dieser Arbeit, die Kenntnisse aus der Diagnose von Kreiselpumpen auf die besonderen Problemstellungen in der Abwasserförderung zu übertragen und zu erweitern.

Hier soll zudem ein neuer Ansatz verfolgt werden, indem aus der Diagnose der Störung eine geeignete Gegenmaßnahme als aktive Reaktion eingeleitet wird. Dieses Vorgehen erscheint besonders geeignet bei auftretenden Verstopfungen, da hier keine Störung der Funktion der Kreiselpumpe im üblichen Sinne vorliegt.

Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchseinrichtung

Die Untersuchungen werden an einem im Fachgebiet Fluidsystemdynamik der Technischen Universität Berlin errichteten Versuchsstand durchgeführt. Dieser Versuchsstand (**Bild 3.1**) ist für die Untersuchung der Abwassersysteme in Maßstab 1 : 3 zu einem realen Pumpwerk entworfen und aufgebaut worden. Er ermöglicht eine realitätsnahe Simulation der repräsentativen Störungszustände, sowie Untersuchung der Wirksamkeit der aktiven Maßnahmen.

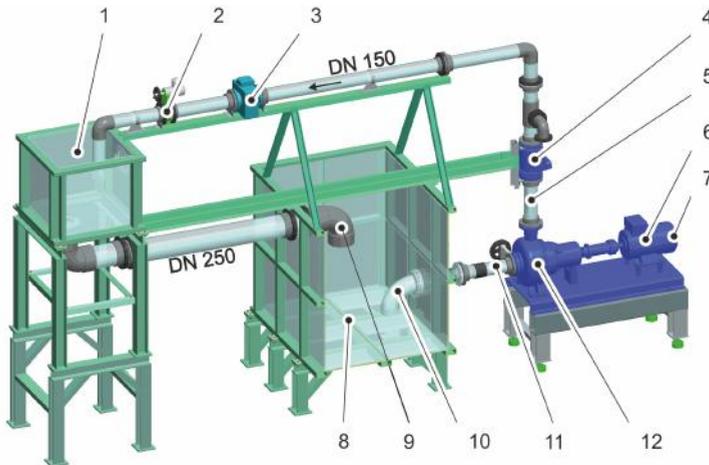


Bild. 3.1. Darstellung der verwendeten Versuchseinrichtung

1 Vormischbehälter	7 Drehzahlmessung
2 Drosselschieber	8 Saugraum
3 Durchflussmesser	9 Zulaufkrümmer
4 Rückschlagklappe	10 Einlaufkrümmer
5 Druckmessstelle	11 Druckmessstelle
6 Antriebsmotor	12 Abwasserpumpe

Aus dem offenen Saugraum **8** wird das Fluid über den Einlaufkrümmer **10** der Saugleitung der Abwasserpumpe zugeführt. Die Pumpe **12** fördert Fluid über die Druckleitung zum Vormischbehälter **1**. Durch den Zulauf **9** fließt das Fluid wieder zurück in den Saugraum. Mit dem Drosselschieber **2** wird der Volumenstrom eingestellt. Die Messung des Saug-, und Förderdruckes **5** und **11** erfolgt nach DIN ISO EN 9906 mittels direkt eingebauter Druckaufnehmer. Die Messung des Volumenstroms erfolgt nach DIN ISO EN 9906 mit Hilfe eines magnetisch induktiven Durchflussmessers **3**. Die über Frequenzumformer einstellbare Drehzahl wird mit Hilfe eines Inkrementalgebers **7** direkt an der Welle des Motors der Abwasserpumpe **12** gemessen.

Mit zwei Flachschiebern, saugseitig und druckseitig, lässt sich die Abwasserpumpe von der Anlage abkoppeln. Die Abwasserpumpe kann dabei für optische Begutachtungen entleert und geöffnet werden. Die Steuerung des Prüfstands wird über elektromechanische Armaturen und einen Frequenzumrichter umgesetzt.

Die Ansteuerung der Automatisierungstechnik erfolgt über einen angeschlossenen Computer. Das Prozessschema befindet sich im Anhang (S. 113), die Prozessdaten sind in der **Tabelle 3.1** zusammengefasst.

Tabelle 3.1. Prozessdaten des Versuchsstandes

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Maß
Volumen des Einlaufbehälters	V_{SR}	m^3	6
Volumen des Vormischbeckens	V_{VB}	m^3	1
Nennförderstrom	Q_{nenn}	m^3/h	386
Nennleistung	P_{nenn}	kW	37

Die Zugabe der Schmutzstoffe zum Wasser erfolgt im Vormischbehälter **1**. Vermischt mit Wasser passieren die Schmutzstoffe durch den Zulauf in den Saugraum **8** und werden dann, mit dem Fluid von der Abwasserpumpe weiter im Kreis zurück zum Vormischbehälter gefördert. Dort werden sie durch einen Filter abgefangen. Damit gehen die Schmutzstoffe nur durch einen Zyklus der Kreislaufleitung und können die Abwasserpumpe nur einmal belasten. Weitere Zirkulation der Schmutzstoffen im System ist aus Perspektive der Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen und möglichen Wechselwirkung nicht zulässig.

Versuchsmaschine

Als Versuchsmaschine dient eine trocken aufgestellte Mehrkanalrad-Abwasserpumpe in Originalausführung DN150. Die prinzipielle Darstellung der Abwasserpumpe ist auf dem **Bild 3.2** zu sehen. Die Pumpe weist die typischen Merkmale „zum Fördern von verunreinigtem Abwasser und Schmutzwasser aller Art in der Abwasserwirtschaft und Industrie“ (KSB) auf.

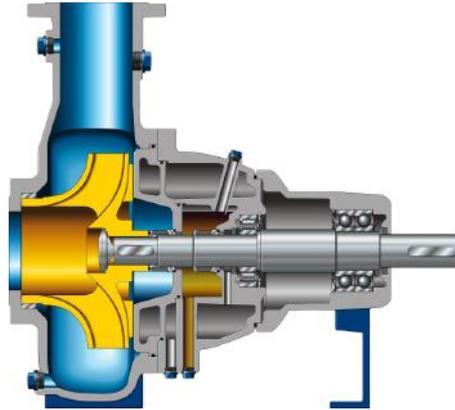


Bild. 3.2. Schematische Darstellung der Abwasserpumpe. *Quelle:* KSB

Der Leitapparat der Pumpe ist als Spiralgehäuse ausgeführt. Das geschlossene radiale Laufrad (**Bild 3.3**) verfügt über drei Schaufeln, deren Eintrittskanten sich bis in den Nabenbereich erstrecken. Die radial gerichteten Rückenschaufeln hinter der Tragscheibe sorgen für die Spülung des Radseitenraumes als Prävention gegen Verblockung im Spalt des Radseitenraumes.

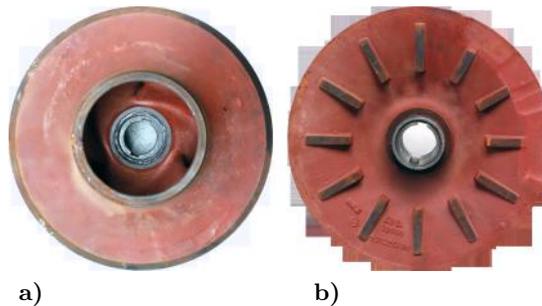


Bild. 3.3. Darstellung des Laufrades (Mehrkanalrad - 3 Kanäle): **a** Deckscheibe, **b** Tragscheibe mit Rückenschaufel

Die wesentlichen Kenndaten der Versuchsmaschine sind in der **Tabelle 3.2** aufgeführt. Die Kennlinien befinden sich im Anhang (S. 115).

Tabelle 3.2. Kenndaten der Versuchsmaschine

Bezeichnung	Nomenklatur	Einheit	Maß
Nennleistung	P_{nenn}	kW	31
Nennförderhöhe	H_{nenn}	m	21
Nennförderstrom	Q_{nenn}	m^3/h	365
Nenn Drehzahl	n_{nenn}	min^{-1}	980
Spezifische Drehzahl	n_q	min^{-1}	30
Nennweite Saugstutzen	DN_{Saug}	mm	200
Nennweite Druckstutzen	DN_{Druck}	mm	150
Laufreddurchmesser	d_2	mm	404
Freier Kugeldurchgang	b	mm	76

Neben dem hier dargestellten Mehrkanallaufgrad mit drei Laufschaufeln werden weitere Untersuchungen mit anderen Laufrädern (Zweischaufelrad, Einschau felrad, offenes Diagonalrad) durchgeführt.

Für die visuelle Erfassung der Verstopfungs-Phänomene ist die Anlage weitgehend transparent gestaltet worden. Die Behälter sind samt ihren hydraulischen Anschlüssen sowie der Deckel der Wartungsöffnung der Abwasserpumpe, aus Acrylglas gefertigt worden. Die Rohrleitung ist aus durchsichtigem Polyvinylchlorid ausgeführt worden (**Bild 3.4**).



a)



b)

Bild. 3.4. Optische Zugänge. **a** Durchsichtiger Einlaufkrümmer, **b** Wartungsfenster am Spiralgehäuse

3.2 Messeinrichtung

Messtechnik zur Betriebspunktüberwachung

Die Erfassung des Betriebszustandes erfolgt nach DIN EN ISO 9906 [16]. Diese Norm beschreibt die Abnahmeregeln für Kreiselpumpen. Folgende Betriebsdaten werden erfasst und ausgewertet:

- Förderstrom,
- Saugdruck,
- Förderdruck,
- Differenzdruck,
- Leistungsbedarf und
- Drehzahl.

Der Förderstrom wird mit Hilfe eines **magnetisch induktiven Durchflussmessgerätes** (MID) gemessen. Das Gerät ist mit einer Anlaufstrecke für Beruhigung der Strömung von mehr als $13DN$ in der Druckleitung installiert worden.

Die Pumpendrehzahl wird direkt an der rotierenden Welle des Antriebsmotors mit Hilfe eines Inkrementalgebers gemessen.

Die Druckmessung erfolgt unmittelbar vor dem Saug- und hinter dem Druckstutzen der Versuchsmaschine mit Hilfe von Drucksensoren. Der Saugdruck wird über einen piezoresistiven Absolutdruck-Sensor erfasst. Für die Messung des Förderdruckes wird ein Differenzialdrucksensor verwendet. Der Sensor erfasst Druckdifferenz zwischen den bereits definierten Messstellen vor dem Saug- und hinter dem Druckstutzen.

Messtechnik zur Ermittlung der Druckfluktuation

Zusätzlich zu den nach Klasse **2** DIN EN ISO 9906 definierten Druckmessstellen werden auch Drucksensoren wandbündig angebracht. Diese Sensoren reagieren auf die dynamische Änderung des Druckes. Die erfassten zeitlich aufgelösten Drucksignale werden zur Diagnose über die Verstopfungsphänomene analysiert.

An den wandbündigen Messstellen sind spezielle Drucksensoren, die auf der Fluidseite versiegelt sind, montiert. Solche Ausführung der Sensorik hat eine höhere Beständigkeit gegen Feststoffe im Abwasser, als herkömmliche Drucksensoren für reines Wasser.

Messtechnik zur optischen Erfassung

Die optisch detektierten Strömungs- sowie Verstopfungszustände werden mit Hilfe von Foto und Videotechnik dokumentiert. Die Erfassung erfolgt durch das transparente Wartungsfenster am Spiralgehäuse, sowie weitere transparente Elemente der Versuchsanlage (**Bild 3.4**). Nach dem Entleeren der Versuchsmaschine werden die Verstopfungszustände direkt durch das geöffnete Wartungsfenster aufgenommen.

3.3 Versuchsdurchführung*Kennlinienmessungen*

Das Messprogramm wird in der **Tabelle 3.3** zusammengefasst. Sie stellt eine Struktur der einzelnen Messpunkte der Versuche zum Verstopfungsverhalten dar. Die Einstellparameter bestehen aus drei Drehzahlen und fünf Werten des Fördergrades der Abwasserpumpe.

Tabelle 3.3. Übersicht Messprogramm für Untersuchungen des Verstopfungsverhaltens der Abwasserpumpe

Drehzahl	Fördergrad $q = Q/Q_{opt}$ in %				
	40	60	80	100	120
in min^{-1}	Förderstrom Q in l/s				
600	25	38	50	63	76
850	36	55	73	91	109
960	46	69	92	115	138

Der typische Versuchsablauf der Modelluntersuchung einer Abwasserpumpstation mit Verschmutzung wird in der **Tabelle 3.4** dargestellt.

Während der Versuche mit Verschmutzung wird ein zeitsynchrones Ereignisprotokoll aufgeführt. Eine Liste der dabei auftretenden typischen Ereignisse präsentiert **Tabelle 3.5**.

Beim Beobachten eines der definierten Ereignisse wird manuell ein Signal ausgelöst und mit den Betriebsdaten zeitsynchron gespeichert. Im Versuchsprotokoll wird ein Vermerk über das Auftreten dieses Ereignisses eingetragen.

Der Zeitpunkt des ausgelösten Signals wird später bei der Datenanalyse als Ereignismarke interpretiert. Anhand der Reihenfolge und Definition des Ereignisses wird es später möglich, das jeweilige Ereignis dem zeitlichen Versuchsablauf zuzuordnen und die zu diesem Zeitpunkt gespeicherten Messwerten gezielt zuzuordnen.

Tabelle 3.4. Versuchsablauf bei der Untersuchung des Verstopfungsverhalten

Schritt	Beschreibung
1.	die Verschmutzung vorbereiten
2.	der Drosselschieber wird geschlossen
3.	die Pumpe wird gestartet
4.	der Drosselschieber wird geöffnet
5.	die Pumpe wird in den zu untersuchenden Betriebspunkt gebracht
6.	die Datenaufzeichnung wird gestartet
7.	die Verschmutzung wird in das Vormischbecken zugegeben
8.	der Förderstrom und die Drehzahl werden nach Bedarf nachgestellt
9.	die Datenaufzeichnung wird nach 5 Minuten beendet
10.	der Schieber bleibt offen
11.	die Pumpe wird ausgeschaltet
12.	die Pumpe wird von der Anlage entkoppelt und Wasser entleert
13.	der Verstopfungszustand wird erfasst und dokumentiert

Tabelle 3.5. Ereignisprotokoll bei der Untersuchung des Verstopfungsverhalten

Ereignis	Beschreibung
1.	Zugabe der Verschmutzung im Vormischbehälter
2.	erste Verschmutzung passiert den Einlaufbehälter
3.	erste Verschmutzung passiert den Laufradeintritt
4.	erste Verschmutzung tritt aus der Pumpe aus
5.	der Förderstrom ändert sich
6.	der Förderstrom wird nachgestellt
7.	Unwesentliche Verschmutzung im Einlaufbehälter
8.	der Drosselschieber wird geschlossen
9.	der Drosselschieber ist geschlossen, die Pumpe wird abgeschaltet

Das Fluid soll die Anforderungen an die Qualität der Ergebnisse der experimentellen Untersuchung treffen. Hierzu im Detail:

1. Das Fluid soll in seinem Zusammensetzen geeignet sein, die Verstopfungsphänomene aus der Praxis nachzubilden,
2. Das Fluid soll die Erfassung der Kennwerte der Abwasserpumpe, sowie die optische Erfassung des Verstopfungsaufbaus ermöglichen,
3. Das Fluid soll die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unterstützen,
4. Das Fluid soll den Bedingungen der Arbeitssicherheit unter Laborbedingungen entsprechen,
5. Die Herstellung des Fluides soll unter Laborbedingungen ermöglicht werden,
6. Das hergestellte Fluides soll die herkömmliche Methodik der Datenerfassung aus der Praxis berücksichtigen.

Das Anliegen der Untersuchungen, die Verstopfungsphänomene nachzubilden, schließt die chemisch wirkende Bestandteile des Abwassers aus. Das Herstellen des Fluides als synthetisches Abwasser stützt sich demzufolge nur auf die Anteile der nicht löslichen Stoffe. Studien aus den Regionen Berlin und Karlsruhe ergaben Durchschnittswerte von absetzbaren Stoffen im Bereich:

$$200 \dots 600 \text{ mg/l}$$

Als repräsentativer tuchartiger Schmutzstoff werden Einweg-Staubtücher mit eingewebtem Kunststoffnetz verwendet, die 200mm breit und 300mm lang sind (**Bild 3.5**).



Bild. 3.5. Staubtuch für Verstopfungsversuche

Gewicht 100 Tücher= 225 g; 200 Tücher = 450 g

In der Voruntersuchung wurde die Auswirkung der Verschmutzungsanteile nach einfache (100 g) und doppelter Menge (200 g) analysiert. Es wurde festgestellt, dass die doppelte Menge der Verschmutzung zu gleicher Auswirkung im Ansatz wie die einfache führt. Aus diesem Grund sind 100 Tücher als Indikator der Verstopfungen als ausreichend genommen worden.

3.4 Versuchsauswertung

Optische Auswertung der Verstopfung

Die optische Auswertung des Verstopfungsverhaltens wird als Lokalisierung der Verstopfung durchgeführt. Die Lokalisierung der simulierten Verstopfung wird folgendermaßen formalisiert.

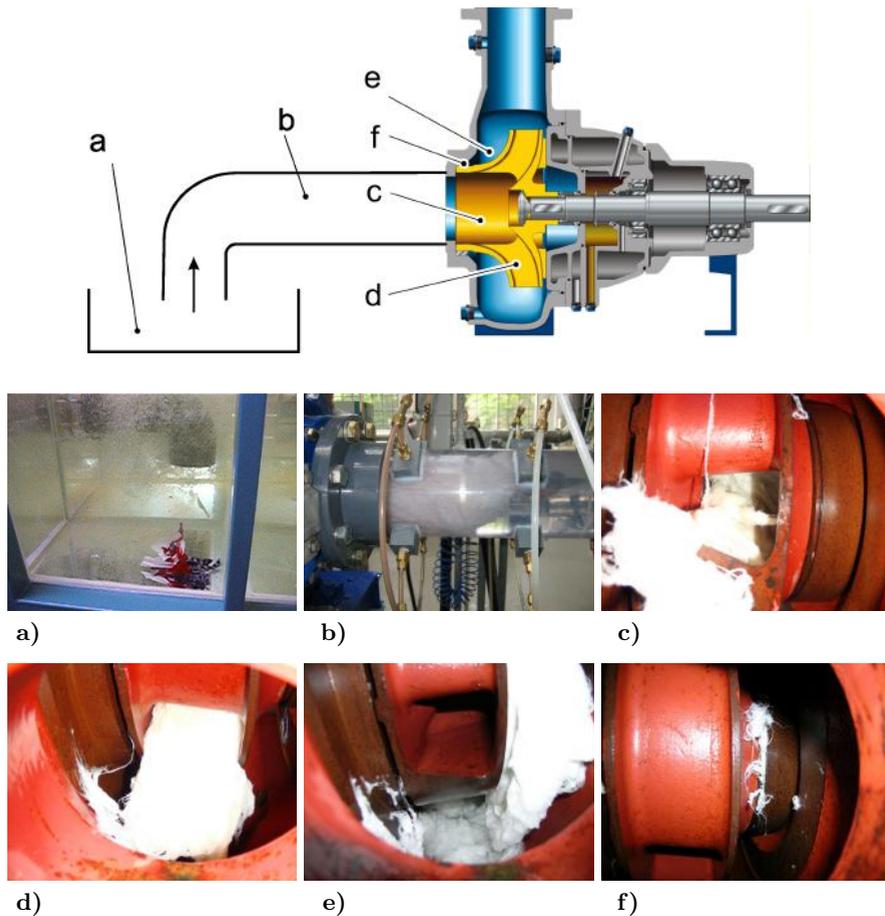


Bild. 3.6. Definition der Verstopfung nach Ablagerungsort. **a** Saugraum, **b** Saugrohr, **c** Laufradeintritt, **d** Laufradkanäle, **e** Radseitenraum, **f** Laufradspalt. Zuströmung des Fluids von rechts nach links

Die Verstopfung tritt auf an:

- Saugraum
- Saugrohr
- Laufradeintritt
- Laufradkanal
- Laufradspalt
- Radseitenraum

Die auftretenden Verstopfungen (**Bild 3.6**) werden mit Hilfe einer Verstopfungstabelle (**Tabelle 4.2**) erfasst und analysiert.

Die beobachteten Verstopfungsphänomene (vgl. **Abschnitt 4.2**) indizieren die Verstopfungsneigung der Abwasserpumpe und sind als Ursache möglicher Ausfälle für die zustandsorientierte Überwachung ohne Zweifel interessant. Sie bieten jedoch nicht genug Auskunft über den Verlauf des Verstopfungsaufbaus, um eine gezielte aktive Beeinflussung durchzuführen. Der Verlauf des Verstopfungsaufbaus hat einen kausalen Charakter und soll in einzelnen Schritten untersucht und verstanden werden.

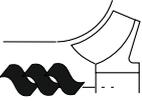
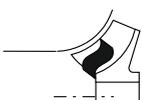
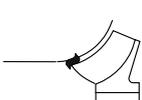
Als Vorlage für die Untersuchung wird hier eine strukturierte Darstellung der Auswirkung der Einflussfaktoren auf den Aufbau der Verstopfung vorgeschlagen (**Tabelle 3.6**). Im linken Bereich der Tabelle sind Verstopfungsphänomene, in der Reihenfolge ihrer Erscheinung bei der Förderung des Fluides, aufgelistet. Im rechten Bereich sind die möglichen Ursachen für jedes Phänomen in Reihenfolge der gegenseitigen kausalen Beeinflussung zusammengetragen.

Wird die Ursache der Verstopfung erkannt, kann der Verstopfungsaufbau durch gezielten Abbruch seiner kausalen Entwicklungsfolge verhindert werden. Die mögliche Wirkmechanismen dazu sollen im einzelnen Fall erarbeitet werden.

Die einzelnen Verstopfungsszenarien lassen sich nicht direkt vom Modell auf reale Bedingungen übertragen. Die Vielfalt der möglichen Einflussfaktoren ist größer und soll im Einzelfall näher untersucht werden. Die Gewichtung der Einflussfaktoren darf auch nicht pauschal ausgeführt werden. Die verschiedenen Szenarien des Verstopfungsaufbaus sind ebenfalls nicht auszuschließen.

Die präsentierten Verstopfungsszenarien stützen sich auf spezifische Verstopfungsverhalten der zu untersuchenden Kreiselpumpe. Ein ähnliches Verhalten wird grundsätzlich auch bei anderen Abwasserkreiselpumpen zu erwarten sein.

Tabelle 3.6. mögliche Verstopfungsszenarien als zusammenwirkende Ursachen des Verstopfungsaufbaus

Verstopfung		typische Ursache
Saugraum		<ol style="list-style-type: none"> 1. Toträume 2. Verwirbelungen 3. Sedimentation 4. Aufschwebende Stoffe 5. Verwebung/Verzopfung
Saugrohr		<ol style="list-style-type: none"> 1. Geometrie des Einlaufes 2. Drall im Einlauf 3. Teillastwirbel 4. Rückströmung aus der Pumpe 5. Häufige zyklische Fahrweise
Laufradeitritt		<ol style="list-style-type: none"> 1. Betrieb unter leichter Teillast 2. Langfaserige Stoffe 3. Nicht pumpbare Stoffe (vgl. S. 17) 4. Belegung der Schaufeleintrittskante 5. Häufige zyklische Fahrweise
Laufradkanal		<ol style="list-style-type: none"> 1. Betrieb unter leichter Teillast 2. Langfaserige Stoffe 3. Nicht pumpbare Stoffe 4. Belegung der Schaufeleintrittskante
Radseitenraum		<ol style="list-style-type: none"> 1. Toträume im Gehäuse 2. Betrieb unter starker Teillast 3. Asymmetrische Druckverteilung am Umfang des Spiralgehäuses 4. Verstopfter Dichtspalt
Dichtspalt		<ol style="list-style-type: none"> 1. Feststoffe im Spiralgehäuse 2. Offene Geometrie des Radseitenraumes 3. Große Weite des Dichtspaltes 4. Betrieb unter starker Teillast 5. Starke Spaltströmung 6. Häufige Abdrosselung

Auswertung der Betriebsgrößen

Anhand der Messdaten werden folgende Betriebsgrößen ausgewertet:

- Förderstrom Q
- Förderhöhe H
- Drehzahl n
- Hydraulische Leistung P_u
- Elektrische Leistung P_{el}
- Wirkungsgrad η

Die Auswertung der Betriebsgrößen erfolgt nach DIN EN ISO 9906 [16].

Auswertung der zeitaufgelösten Änderung des statischen Druckes (Druckfluktuation) wird anhand der folgenden Kennwerte realisiert:

- Drehfrequenz f_n ,
- Drehklang f_{dk} ,
- Harmonische des Drehklangs $k f_{dk}$.

Die Drehfrequenz f_n ist die Frequenz, mit der sich die Welle der Pumpe dreht.

Durch das regelmäßige Passieren der Laufschaufel am Gehäuse wird die Frequenz des Drehklangs angeregt [43, 58]. Die Grundfrequenz des Drehklangs berechnet sich nach folgende Formel:

$$f_{DK} = f_n \cdot z_{LK} \quad (3.1)$$

f_n - Drehfrequenz der Welle

z_{LK} - Anzahl der Laufradschaufeln

Die Versuchsmaschine mit 3-Kanal-laufrad ausgestattet ist. Somit

$$z_{LK} = 3$$

Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

4.1 Kennlinienmessung

Die Ergebnisse der Kennlinienmessung sind auf dem Diagramm (**Bild 4.1**) dargestellt.

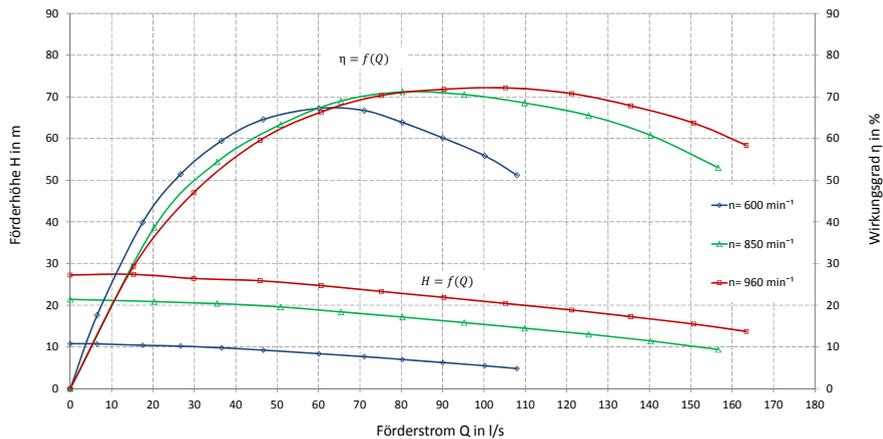


Bild. 4.1. Kennlinien der Versuchsmaschine Sewatec 140-400 mit 3K-Laufrad

Die aufgenommenen Werte dienen als Referenz bei der Untersuchung des Verstopfungsverhaltens.

4.2 Verstopfungsphänomene

Die Untersuchungen mit Schmutzbelastung bei verschiedenen Pumpendrehzahlen und Fördergradverhältnissen ergeben nachfolgendes (**Bild 4.2**).

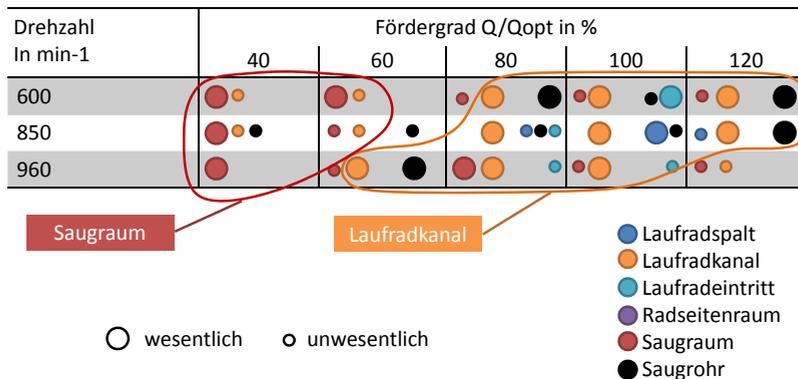


Bild. 4.2. Übersicht des Verstopfungsverhaltens der Versuchsmaschine in Abhängigkeit von der Drehzahl n und dem Fördergrad q . Versuchsmaschine Sewatec 140-400 mit 3-Kanalrad

Die dargestellte Struktur des Verstopfungsverhaltens lässt sich wie folgt beschreiben und interpretieren:

- Die Verstopfungsbildung im Saugraum (**rot**) tritt überwiegend bei geringem Fördergrad und bei allen Drehzahlen auf. Gering eingestellte Förderströme resultieren in entsprechend niedrigen Fließgeschwindigkeiten, die Schmutzstoffe im Wasser nicht mitfördern. Das begünstigt die Ablagerungen auf dem Boden und in Totwassergebieten und führt zu potenzieller Zopfbildung.
- Die Verstopfungsbildung im Saugrohr (**schwarz**) ist bei allen Drehzahlen und insbesondere bei höchstem Fördergrad gegeben. Bei höherem Fördergrad wird höherer Förderdruck aufgebaut. Nach dem Ausschalten des Antriebsmotors der Versuchsmaschine baut sich die Druckdifferenz an Saug- und Druckstutzen ab. Tendenziell ist dabei eine Rückströmung aus dem Laufradeintritt zu erwarten. Die Ablagerungen im Laufradeintritt werden dabei in das Saugrohr zurück gespült.
- Die Verstopfung des Laufradeintrittes (**cyan**) tritt bei allen Drehzahlen und bei mittlerem Fördergrad $q = [80, 100]\%$ auf.
- Die Verstopfung des Laufadkanals (**orange**) tritt bei allen Drehzahlen und Fördergrad $q = [80 \dots 120]\%$ auf.

- Die Verstopfungsbildung im Radseitenraum (**violett**) ist bei dieser Versuchsmaschine nicht festgestellt worden.
- Die Verstopfungsbildung im Laufradspalt (**blau**) ist bei mittlerer Drehzahl $n = 850 \text{min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$ gegeben. Die Verstopfungsart ist auf die höheren Spaltströme beim Schließen des Schiebers, kurz vor dem Abschalten des Antriebsmotors der Versuchsmaschine zurück zu führen. Da das Schließen des Drosselschiebers immer zum Verschieben des Betriebspunktes in den Bereich der maximalen Teillast führt, kann die bereits in der Pumpe vorhandene Verstopfung das Laufradspalt verstopfen.

Die Verstopfungszustände des Laufrades weisen Unterschiede in Abhängigkeit von der Drehzahl n und Fördergrad q auf. Exemplarisch zeigt das **Bild 4.3** die asymmetrische Belegung der Laufradkanäle. Vollständige Darstellung der Laufradverstopfung befindet sich im Anhang (**Bilder B.3 - B.5**).

$q = 40\%$



$q = 60\%$



$q = 80\%$



$q = 100\%$



$q = 120\%$



Kanal 1

Kanal 2

Kanal 3

Bild. 4.3. Verstopfung des Laufrades bei Drehzahl $n = 600\text{min}^{-1}$ abhängig vom Fördergrad $q = [40 \dots 120]\%$

Bei starker Teillast ($q = 40, 60\%$) verstopft sich das Laufrad nur in einem Kanal. Die Schmutzstoffe lagen auf der Schaufeldruckseite und waren leicht zu

entfernen (vgl. **Tabelle 4.1**). Die Schaufeleintrittskante ist dabei frei geblieben.

Bei Teillast ($q = 80\%$) kommt es zum Umbruch im Verstopfungsverhalten. Die Menge der im Laufrad gebliebenen Prüftextilien steigt stark an. Ab diesem Betriebspunkt, weiter in Richtung höheren Fördergrades, hängen die verwebten Prüftextilien an der Schaufeleintrittskante gestreckt in zwei Kanälen oder auch im Laufradeintritt. Diese Ansammlung ist schwer mit der Hand zu entfernen.

Im Überlastbetrieb ($q = 120\%$) sinkt die Anzahl der stark verdrillten Prüftextilien in den Kanälen. Es werden alle drei Kanäle belegt. Die Menge der Prüftextilien in den einzelnen Kanälen ist in diesem Betriebspunkt unterschiedlich.

Die Belegung der Schaufeleintrittskante in Abhängigkeit von der Drehzahl und Fördergrad ist in der **Tabelle 4.1** dargestellt.

Bei allen Drehzahlen im Teillastbetrieb bleibt die Schaufeleintrittskante frei von Ablagerungen. Die Prüftextilien lagern sich auf der Druckseite der Schaufel ab.

Im Bestpunkt lagern sich die Prüftextilien an der Schaufeleintrittskante ab, annähernd gleichermaßen zu Schaufeldruck- und Saugseite verteilt.

Im Überlastbetrieb dagegen werden die Prüftextilien mehr auf der Druckseite verteilt.

Tabelle 4.1. Nachgebaute Darstellung der Belegung der Schaufeleintrittskante in Abhängigkeit von Drehzahl n und Fördergrad q

Drehzahl min^{-1}	Fördergrad $q = Q/Q_{opt}$ in %				
	40	60	80	100	120
600					
850					
960					

Auf dem **Bild 4.4** ist eine schematische Darstellung der Beaufschlagung der Schaufeleintrittskante und Ablösungsgebiete der Strömung bei Teillast, Bestpunkt und Überlast einer Pumpe zu sehen (näher dazu [31]). Der Winkel der Beaufschlagung sowie die Ablösungsgebiete an der Schaufel korrespondieren mit der Struktur der Belegung der Schaufel mit Feststoffen.



Bild. 4.4. schematische Darstellung der Beaufschlagung der Schaufeleintrittskante und Strömungsablösung bei Teillast, Bestpunkt und Überlast einer Pumpe

Bei Teillast kommt es zur Ablösung der Strömung auf der Schaufeldruckseite. Dadurch entsteht ein Totwassergebiet, wo die entsprechenden Ablagerungen gefunden wurden.

Im Bestpunkt wird die Schaufeleintrittskante direkt beaufschlagt. Fluid umströmt die Schaufel gleichmäßig ohne Ablösung. Die Prüftextilien lagern direkt an der Schaufeleintrittskante ab.

Bei Überlast kommt es zur Ablösung an der Saugseite der Schaufel. Die Prüftextilien lagern sich an der Schaufeleintrittskante ab sind aber mehr auf die Druckseite der Schaufel verschoben.

Anhand der erfassten örtlichen Ablagerungen von Prüftextilien in der Versuchsmaschine während der Untersuchungen des Verstopfungsverhaltens werden drei Parameter wie folgt definiert (vgl. **Bild 4.5**):

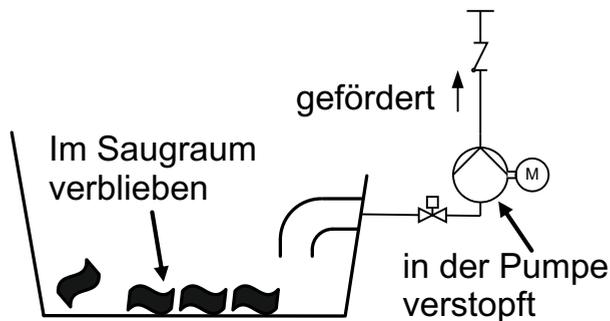


Bild. 4.5. Definition der Kennzahlen nach Verstopfungsort

- *Im Saugraum verblieben* als Menge der im Saugraum verbliebenen Prüftextilien,
- *In der Pumpe verstopft* als Menge der in Versuchsmaschine verstopften Prüftextilien und
- *Gefördert* als Anzahl von einmal geförderten Prüftextilien in die Druckleitung.

Die resultierende Messwerte lassen die Rückschlüsse auf den Verstopfungsaufbau im Saugraum zu und charakterisieren das Förder- und Verstopfungsverhalten der Abwasserpumpe (**Bilder 4.6-4.8**).

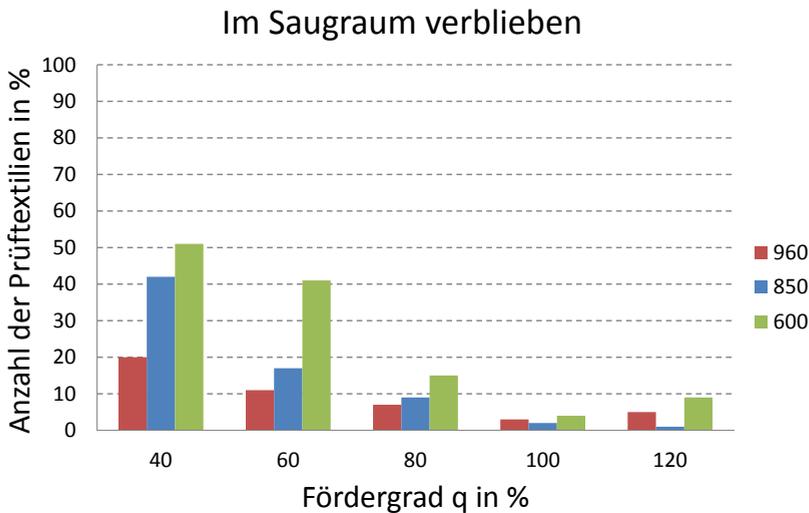


Bild. 4.6. Im Saugraum verbliebene Schmutzstoffe.

Aus dem Diagramm **Bild 4.6** ist ersichtlich, dass die Anzahl der im Saugraum verbliebenen Prüftextilien mit Erhöhung des Fördergrades um 20 – 40% und mit Erhöhung der Drehzahl um 10 – 30% sinkt.

Durch Erhöhung des Fördergrades oder auch der Drehzahl erzeugt die Pumpe einen höheren Förderstrom. Die dabei resultierenden höheren Geschwindigkeit reduziert die Bildung der Totwasserräume.

Bei Fördergrad $q = 120\%$ geht die Anzahl der im Saugraum verbliebenen Prüftextilien nicht, wie erwartet zurück, sondern steigt leicht an. Die starke Zulaufströmung staut sich an Wänden und Ecken des Behälters, wodurch Verwirbelungen und Totwassergebiete entstehen in denen sich die Prüftextilien sammeln.

Bild 4.7 präsentiert das Diagramm „*In der Pumpe verstopfte Schmutzstoffe*“. Auf dem Diagramm sind zwei Bereiche des Verstopfungsverhaltens zu unterscheiden: bei Fördergrad 40...60% und 80...120%.

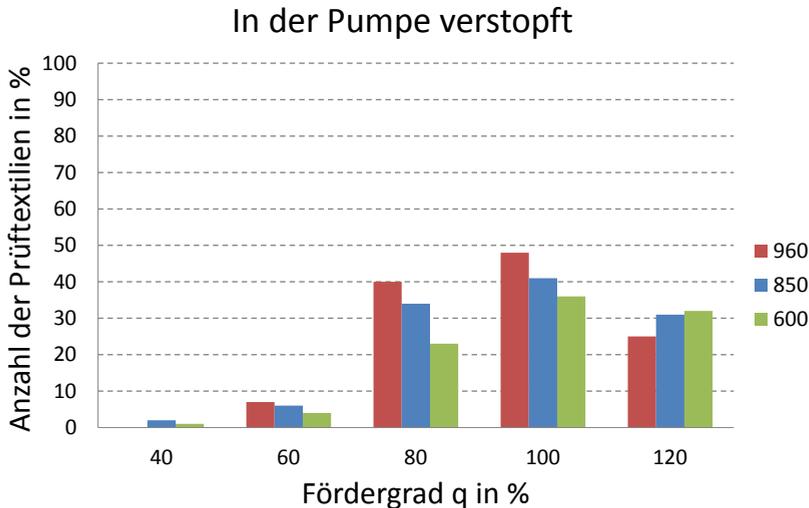


Bild. 4.7. In der Pumpe verstopfte Schmutzstoffe.

Bei starker Teillast ($q=40, 60\%$) bleibt die Abwasserpumpe nur leicht verstopft. Bei der Nenndrehzahl 960 min^{-1} tritt in der Pumpe keine Verstopfung auf.

Im Bereich der leichten Teillast $q = 80\%$, über Bestpunkt hinaus bis zum Überlast 120% steigt die Anzahl in der Pumpe gefundenen Prüftextilien bis um das Fünffache an. Die maximale Anzahl der Prüftextilien ist bei $q = 100\%$ festgestellt worden.

Bild 4.8 präsentiert Diagramm „*Geförderte Schmutzstoffe*“. Es ist ersichtlich, dass die Förderung der Prüftextilien bei niedriger Drehzahl 600 min^{-1} , relativ unabhängig vom Fördergrad, beinahe konstant bleibt (grüne Säule).

Eine Erhöhung der Drehzahl auf 850 min^{-1} resultiert in besserer Förderung der Schmutzstoffe über den gesamten untersuchten Förderbereich der Pumpe (blaue Säule). Die maximale Anzahl der geförderten Prüftextilien wird bei dem Fördergrad 60% erreicht und ist dabei über 30% größer im Vergleich zu den anderen untersuchten Betriebspunkten.

Bei Nenndrehzahl 960 min^{-1} weist das Diagramm bessere Förderung der Feststoffe im Teillastbereich und Überlastbereich auf (rote Säule).

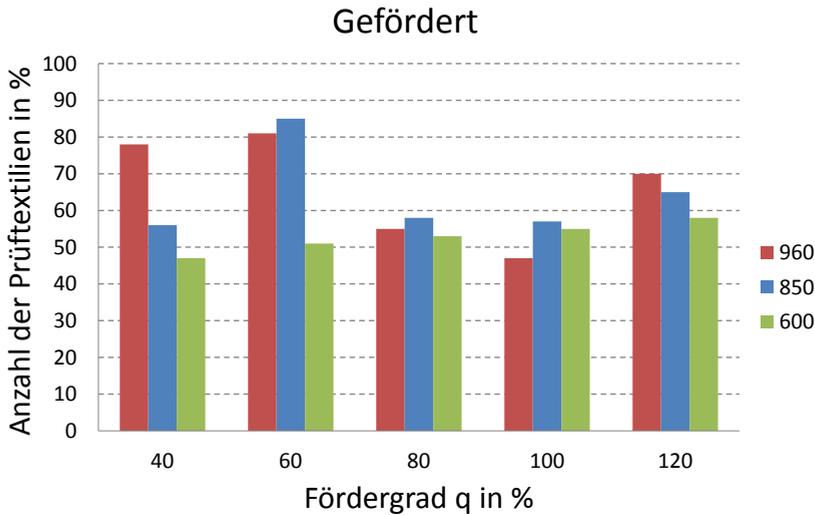


Bild. 4.8. Geförderte Schmutzstoffe.

Fazit

Die dargestellten Diagramme weisen auf das höhere *Verstopfungsrisiko der Pumpe* bei höherem Fördergrad hin. Bei niedrigen Fördergraden besteht die Gefahr der *Verstopfungsbildung im Saugraum*.

4.3 Messgrößen bei Verstopfung

Während der Versuchsreihen zur Ermittlung des Verstopfungsverhaltens sind physikalische Kenngrößen der Anlage, wie

- Druck,
- Förderhöhe,
- Leistungsaufnahme und
- Wirkungsgrad

gemessen und ausgewertet worden. Daraus ermittelte Betriebsgrößen der Abwasserpumpe werden hier präsentiert.

Direkter Vergleich zwischen Start- und Endwerten ermöglicht eine Gegenüberstellung der beobachteten Verstopfungserscheinungen und Betriebsgrößen der Abwasserpumpe. Die daraus schliessende Merkmale werden bei der Überwachung der Betriebszustandes der Abwasserpumpe im Pumpwerk verwendet.

Das Diagramm in dem **Bild 4.9** zeigt die experimentell ermittelte Förderhöhe H zum Beginn (H_{Start}) und am Ende (H_{Ende}) jeder einzelnen Verstopfungsfahrt pro Betriebspunkt aus einem Versuch.

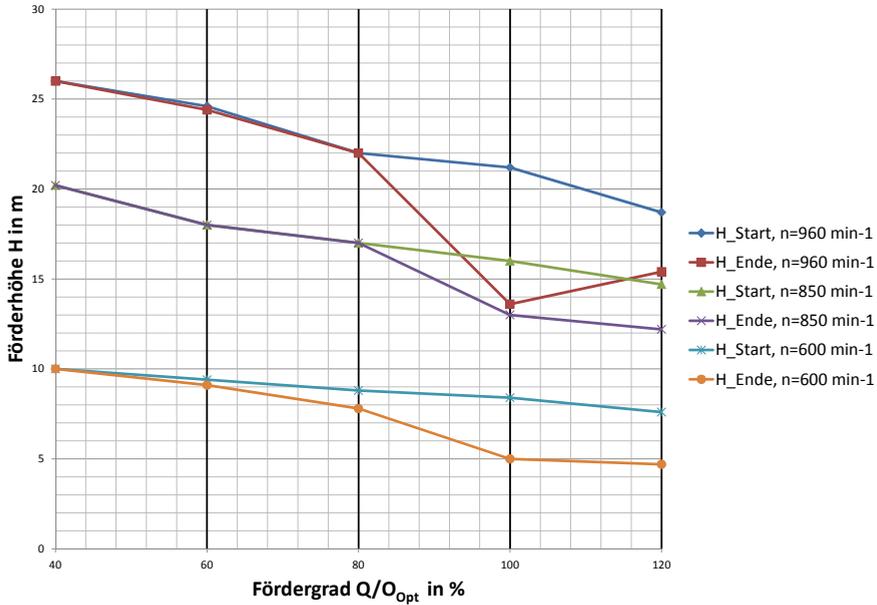


Bild. 4.9. ermittelte Förderhöhe zum Start H_{Start} und Ende H_{Ende} des Verstopfungsversuches für Drehzahlen $n = [600 \dots 960] \text{min}^{-1}$ bei Fördergraden $q = [40 \dots 120]\%$

Die Förderhöhendifferenz ΔH in % berechnet sich mit der Gleichung:

$$\Delta H = \frac{H_{Ende} - H_{Start}}{H_{Start}} \cdot 100 \tag{4.1}$$

Tabelle 4.2. Differenz der Förderhöhen ΔH in % am Start und am Ende der Verstopfungsfahrt

Drehzahl in min^{-1}	Fördergrad $q = Q/Q_{opt}$ in %				
	40	60	80	100	120
600	0	-3	-11	-40	-38
850	0	0	0	-18	-17
960	0	0	0	-36	-18

Das Diagramm in dem **Bild 4.10** zeigt die experimentell ermittelte Leistungsaufnahme P zum Beginn (P_{Start}) und am Ende (P_{Ende}) jeder einzelnen Verstopfungsfahrt pro Betriebspunkt aus einem Versuch.

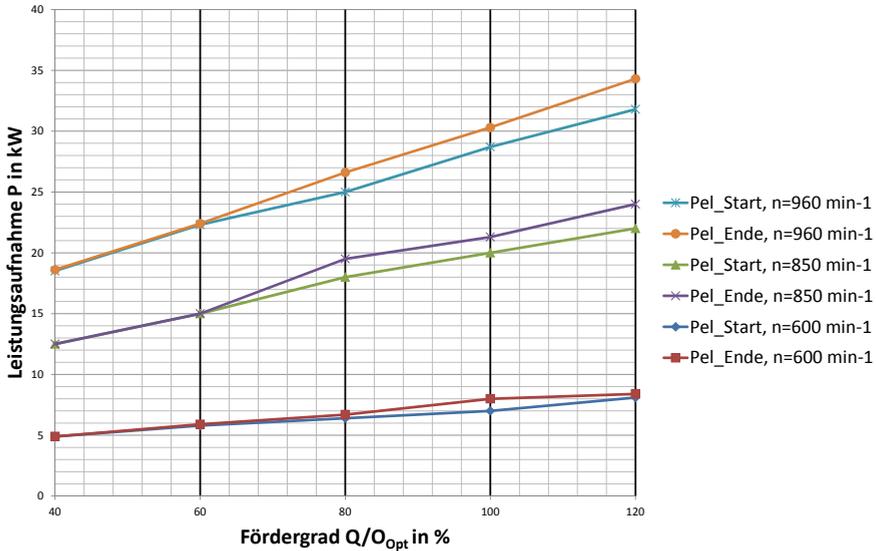


Bild. 4.10. ermittelte Leistungsaufnahme zum Start P_{Start} und Ende P_{Ende} des Verstopfungsversuches für Drehzahlen $n = [600 \dots 960] \text{min}^{-1}$ bei Fördergraden $q = [40 \dots 120]\%$

Die Differenz in der Leistungsaufnahme ΔP in % berechnet sich mit der Gleichung:

$$\Delta P = \frac{P_{Ende} - P_{Start}}{P_{Ende}} \cdot 100 \tag{4.2}$$

Tabelle 4.3. Differenz der Leistungsaufnahme ΔP in % am Start und am Ende der Verstopfungsfahrt

Drehzahl in min^{-1}	Fördergrad $q = Q/Q_{opt}$ in %				
	40	60	80	100	120
600	0	2	4	13	4
850	0	0	8	6	8
960	1	0	6	5	7

Das Diagramm in dem **Bild 4.11** zeigt den experimentell ermittelten Wirkungsgrad der Versuchsmaschine η zum Beginn (η_{Start}) und am Ende (η_{Ende}) jeder einzelnen Verstopfungsfahrt pro Betriebspunkt aus einem Versuch.

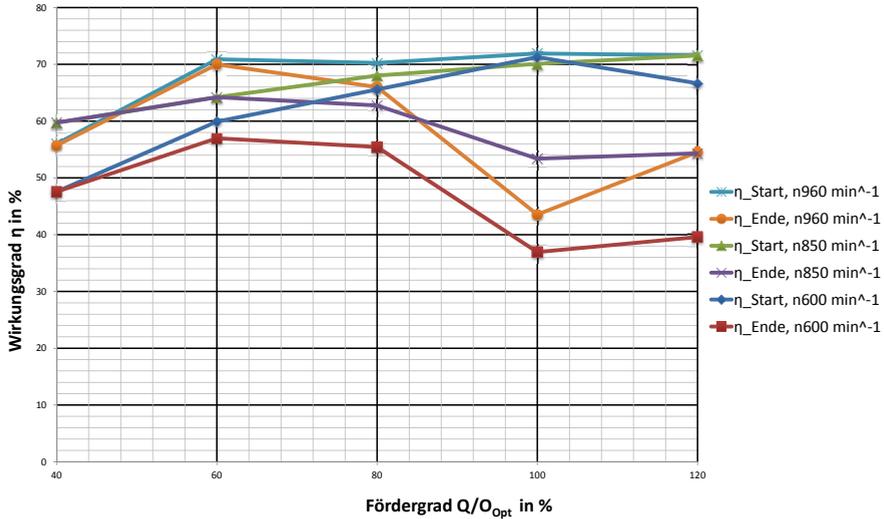


Bild. 4.11. ermittelter Wirkungsgrad zum Start η_{Start} und Ende η_{Ende} des Verstopfungsversuches für Drehzahlen $n = [600 \dots 960] \text{min}^{-1}$ bei Fördergraden $q = [40 \dots 120]\%$

Die Wirkungsgraddifferenz $\Delta\eta$ in % berechnet sich mit der Formel:

$$\Delta\eta = \eta_{Ende} - \eta_{Start} \tag{4.3}$$

Tabelle 4.4. Differenz des Wirkungsgrades $\Delta\eta$ in % zum Start und Ende der Verstopfungsfahrt

Drehzahl in min^{-1}	Fördergrad $q = Q/Q_{opt}$ in %				
	40	60	80	100	120
600	0	-3	-10	-34	-27
850	0	0	-5	-17	-17
960	0	-1	-4	-28	-17

Im **Bild 4.12** dargestelltes Balkendiagramm gibt einen Überblick über Änderung der Betriebsgrößen.

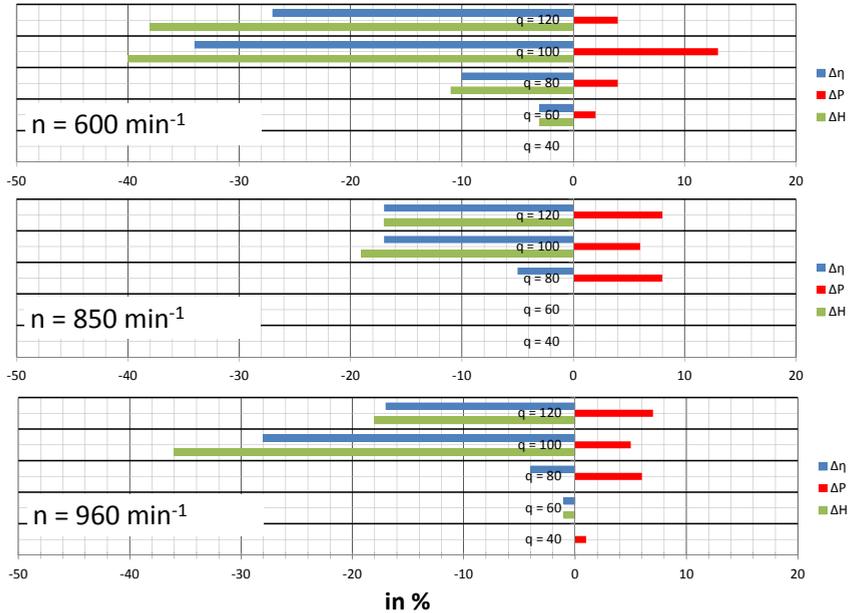


Bild. 4.12. Überblick der Betriebsgrößenänderungen $\Delta\eta$, ΔP und ΔH für die Drehzahlen $n = [600 \dots 960] \text{ min}^{-1}$ aus den Verstopfungsfahrten

Aus der Darstellung wird ein tendenzieller Zusammenhang zwischen Verstopfung der Hydraulik aus Versuchsreihen mit Fördergrad $q = [80 \dots 120]\%$ (vgl. **Bild 4.2**, S. 36) und der Betriebsgrößenänderung ersichtlich.

Verstopfte Hydraulik verursacht einen Abfall der Förderhöhe bis auf 40%, Zunahme des Leistungsbedarf bis auf 13% und Abfall des Wirkungsgrades bis auf 34%.

Geringe Betriebsgrößendifferenzen bei Betriebspunkten im starken Teillast $q = 120\%$ sind auf eine leichte, anbahnende, Verstopfung zurückzuführen. Die dabei eingestellten Förderströme der Abwasserpumpe sind nicht stark genug, um die Zirkulation im Saugraum anzuregen und für die Förderung der Prüftextilien eine ausreichende Verteilung im Wasser aufrecht zu erhalten. Die Verstopfungstextilien bleiben während der Versuchsdurchführung großenteils im Saugraum.

4.4 Zeitlich aufgelöste Drucksignale

Neben der Auswertung der Betriebsgrößen, sind zeitliche Änderungen des statischen Druckes an den Saug- und Förderstutzen der Abwasserpumpe gemessen und ausgewertet worden.

Die Wellenfrequenz, Drehklang und 1. Harmonische haben bis zum Zeitpunkt des Passieren der ersten Verschmutzung (vgl. Ereignisprotokoll, Item 2., **Tabelle 3.5**) $t = 50 \text{ s}$ homogene und relativ geringe Amplituden.

Mit wachsender Beladung der Pumpe durch das Schmutzmedium, kommt es bei dem Zeitpunkt $t = 100 \text{ s}$ zum Amplitudenwachstum über alle drei betrachteten Frequenzen. Im weiteren Zeitverlauf nimmt die Amplitude der Wellenfrequenz ab, wogegen die wachsende Amplitude der 1. Harmonischen und des Drehklanges auffällige Instationaritäten aufweisen.

Die Frequenzspektren haben charakteristische Züge, je nach Druckmessstelle. Für den Saugdruck bestehen deutlich dominante Amplituden bei Wellenfrequenzen. Dagegen sind die Amplituden des Drehklanges deutlich in den Spektren des Förderdruckes.

Ein weiterer Unterschied in Frequenzspektren besteht im zeitlichen Verhalten der Amplitude bei aufgelisteten Frequenzen. Während der ersten Verschmutzungserscheinung in der Pumpe und des impulsartigen Amplitudenwachstums der Wellenfrequenz kommt es im weiteren Zeitverlauf zu einer Dämpfung der Amplitude der Wellenfrequenz. Die Amplitude des Drehklanges steigt dagegen weiter an.

Das Erscheinungsbild der Frequenzen des Drehklanges korrespondiert mit der asymmetrischen Belegung der drei Laufradkanäle (**Bild 4.3**, S. 38). Die dadurch entstehende Unstetigkeit sowie das Wachstum der Amplitude des Förderdruckes ist auf Unterschiede der Geometrie der drei unterschiedlich verstopften Kanälen zurück zu führen.

Die **Abbildungen 4.13 - 4.15** zeigen die zeitliche Änderung des Frequenzspektrums des statischen Druckes bei der Drehzahl $n = 600 - 960 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$.

Das Frequenzband ist über die in **Tabellen 4.5 - 4.7** aufgelisteten Frequenzen aufgespannt.

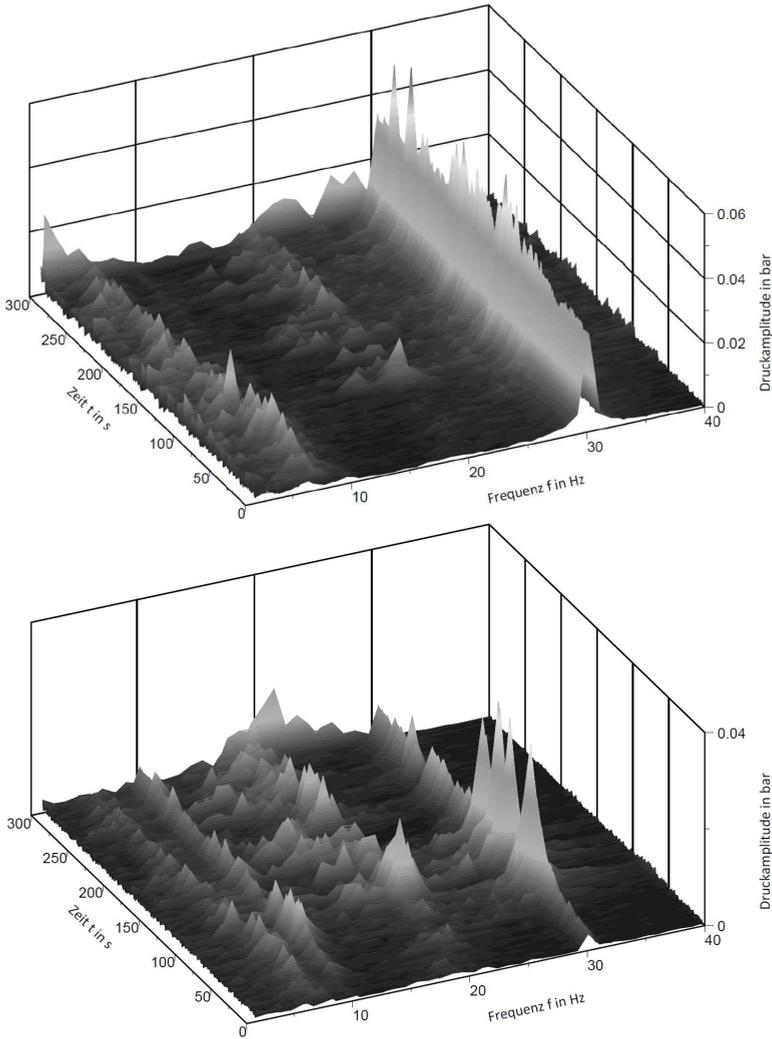


Bild. 4.13. Frequenzspektrum des relativen Saugdrucks (unten) und Förderdrucks (oben) bei Drehzahl $n = 600 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$

Tabelle 4.5. Betrachtete Frequenzen bei Drehzahl $n = 600 \text{ min}^{-1}$

Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Wert
Wellenfrequenz	f_n	s^{-1}	10
1. Harmonische	$2f_n$	s^{-1}	20
Drehklang	f_{dk}	s^{-1}	30

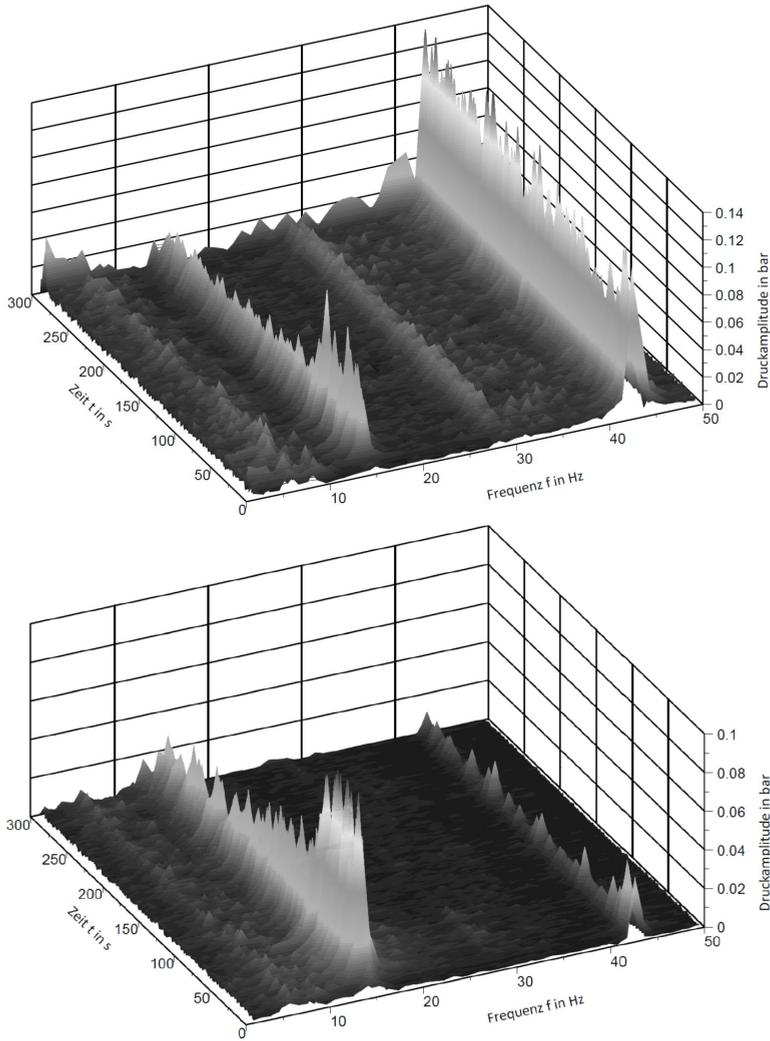


Bild. 4.14. Frequenzspektrum des relativen Saugdrucks (unten) und Förderdrucks (oben) bei Drehzahl $n = 850 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$

Tabelle 4.6. Betrachtete Frequenzen bei Drehzahl $n = 850 \text{ min}^{-1}$

Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Wert
Wellenfrequenz	f_n	s^{-1}	14
1. Harmonische	$2f_n$	s^{-1}	28
Drehklang	fdk	s^{-1}	42,5

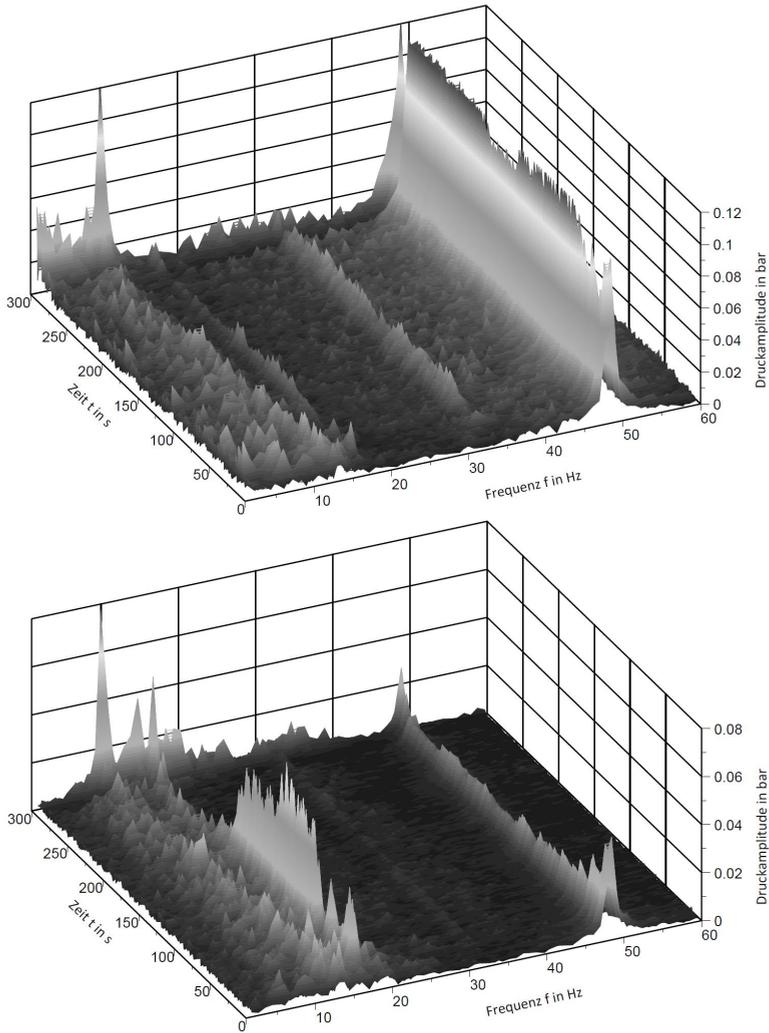


Bild. 4.15. Frequenzspektrum des relativen Saugdrucks (unten) und Förderdruckes (oben) bei Drehzahl $n = 960 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$

Tabelle 4.7. Betrachtete Frequenzen bei Drehzahl $n_{PP} = 960 \text{ min}^{-1}$

Bezeichnung	Zeichen	Einheit	Wert
Wellenfrequenz	f_n	s^{-1}	16
1. Harmonische	$2f_n$	s^{-1}	32
Drehklang	f_{dk}	s^{-1}	48

Aktuatorik

Nach Verständnis der Verstopfungsphänomene entwickelte sich die Idee, eine sich anbahnende Verstopfung zu erkennen und diese über geeignete Maßnahmen abzuwehren.

Im Rahmen der Arbeit werden sechs aktive Abwehrmaßnahmen ausgearbeitet und am Modell auf ihre Wirksamkeit gegen den Verstopfungsaufbau untersucht. Einige (Reinigungszyklus, Rückspülen) in einem realen Abwasserpumpwerk validiert (**Kapitel 6**). Konzeptuell wird es angestrebt, die Strömungsverhältnisse so zu beeinflussen, dass der Verstopfungsaufbau vermieden wird.

Im Folgenden werden sechs Maßnahmen zur Verstopfungsvermeidung bzw. Verstopfungsbeseitigung vorgestellt. Das sind im Einzelnen:

- Reinigungszyklus,
- Rückspülen,
- Druckstrahl,
- Bypass,
- Leitprofile im Saugrohr und
- Injektoren und Rührwerke.

5.1 Reinigungszyklus

Durch Variieren der Drehzahl des Antriebmotors wird die Kreiselpumpe durch unterschiedlichen Betriebszustände gefahren. Diese charakterisieren sich mit jeweils unterschiedlichen Strömungszuständen innerhalb der Kreiselpumpe und führen zu einem „Sich-Lösen“ der Verstopfung (vgl. **Bilder 4.2, 4.4**).

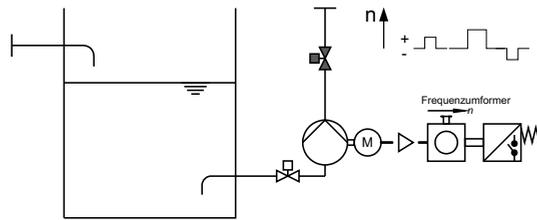


Bild. 5.1. vereinfachte Darstellung der Maßnahme *Reinigungszyklus*

Der Verstopfung auflösende Effekt kann durch Drehrichtungumkehr verbessert werden, da dies infolge der Strömungsablösungen zu einer starken Wirkung auf die Verstopfung führt.

5.2 Rückspülen

Bei der aktiven Maßnahme *Rückspülen* wird die Abwasserpumpe samt ihrer Saugleitung von Feststoffansammlungen frei gespült (**Bild 5.2**). Das Rückspülvolumen wird mit Hilfe einer Rückspülvorrichtung in die Druckleitung der nicht angetriebenen Abwasserpumpe gepumpt.

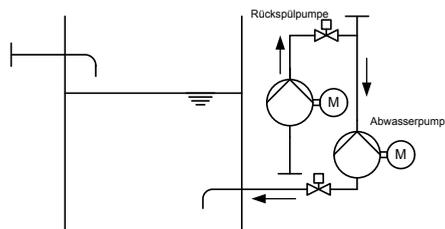


Bild. 5.2. vereinfachte Darstellung der Maßnahme *Rückspülen*

Die Rückspülvorrichtung besteht aus einer Hilfspumpe (Rückspülpumpe), Rückspülleitung, Regelungsarmatur, Steuerung der Rückspülpumpe. Für den Rückspülvorgang wird die Abwasserpumpe ausgeschaltet und Regulationsschieber in der Hauptleitung geschlossen.

Die Maßnahme ist insbesondere für den Start der Abwasserpumpe hilfreich. Beim Anfahren der Abwasserpumpe vom Stillstand bis zum ihrem Betriebspunkt hin, könnten die vorhandenen, selbst leichte, Feststoffansammlungen zu starken Verzopfungen durch Teillastwirbel vor dem Laufradeintritt verdrillt werden. Ein präventives Spülen der Abwasserpumpe und ihrer Saugleitung

kann die sich anbahnende Verstopfungen im Saugrohr oder im Laufradeintritt gezielt beseitigen und damit die Verstopfungsgefahr verringern.

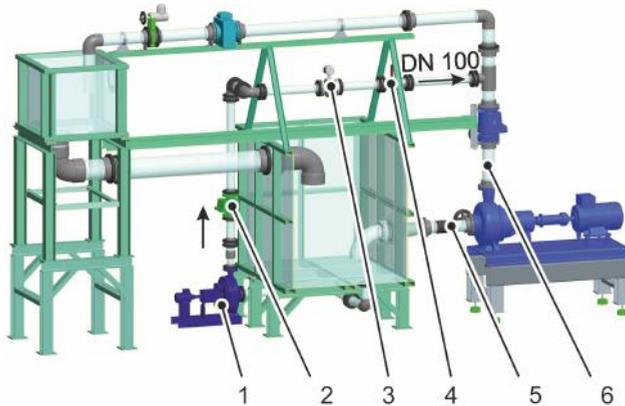


Bild. 5.3. Versuchsanlage mit der aktiven Maßnahme *Rückspülen*: **1** Rückspülpumpe, **2** Rückschlagklappe, **3** Durchflussmessgerät, **4** Kugelhahn, **5** Druckmessstelle, **6** Druckmessstelle

Die für den Untersuchungszweck konstruierte Rückspülvorrichtung (**Bild 5.3**) besteht aus einer zusätzlichen Leitung *DN100*, die hinter der Abwasserpumpe an die Hauptleitung angeschlossen ist, einem Kugelhahn **4** und einer Hilfspumpe **1**, die als Rückspülpumpe genutzt wird. Die Rückspülpumpe wird manuell gesteuert.

Die Erfassung der Betriebsdaten der Rückspülpumpe erfolgt mit den Drucksensoren **5** und **6** und Durchflussmessgerät **3**. Die für die Untersuchung notwendigen Messwerkzeuge sind in die vorhandene Messkette integriert, deren Signale in eine für Abwasserförderanlage gemeinsame Datenbankdatei gespeichert werden.

5.3 Druckstrahl

Die Verstopfungen an kritischen Stellen (Radseitenraum, Pumpengehäuse) werden gezielt mit Hilfe eines Freistrahls aus den Druckdüsen, mit hoher Geschwindigkeit und angepasstem Volumenstrom beseitigt (**Bild 5.4**). Hier sind geeignete Düsen, nach Form und Anzahl, sowie eine günstige Positionierung nach Wirksamkeit und Aufwand, mechanisch und über die Steuerung der Druckdüsen zu optimieren.

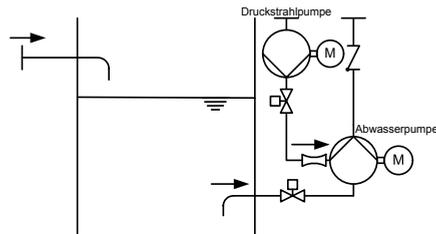


Bild. 5.4. vereinfachte Darstellung der Maßnahme *Druckstrahl*

Hierfür sind genaue Kenntnisse der Druckverhältnisse innerhalb der Pumpe wichtig, um so gezielte korrektive Strömungen einzubringen. Dieses Eingriffssystem soll insbesondere hinsichtlich des notwendigen Energiebedarfs optimiert werden. Idealerweise konnte die vorhandene Pumpenantriebsenergie zur Erzeugung der notwendigen „Reinigungsströmungen“ verwendet werden. Zur Untersuchungszwecken wurde die Versuchsanlage mit dem Modul *Druckstrahl* ausgerüstet (**Bild 5.5**).

Die Hilfspumpe **2**, Druckstrahlpumpe genannt, fördert das reine Wasser aus dem Speisebecken **1** durch die Druckleitung *DN100* an den Verteiler **6**. Durch verschiedene Kombinationen der Regelungsarmatur am Verteiler wird mit Hilfe der am Pumpengehäuse angeschlossenen Düsen **7** der Druckstrahl eingebracht (**Bild 5.6, b**).

Hierzu sind vier Drucksensoren am Umfang des Gehäuses in unmittelbarer Nähe von Injektionsort direkt in das Gehäuse eingebaut. Die Lage ist aus dem **Bild 5.6, a** und **Tabelle 5.1** zu entnehmen.

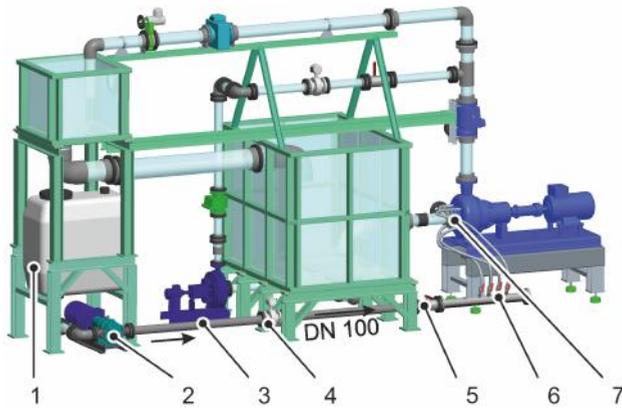
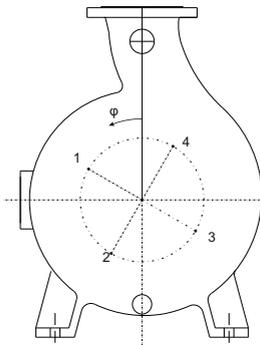
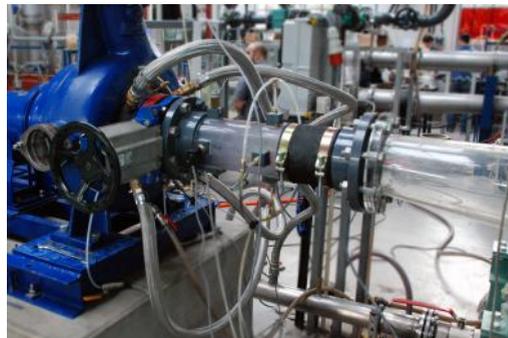


Bild. 5.5. Versuchsanlage mit der aktiven Maßnahme *Druckstrahl*: 1 Speisebecken, 2 Druckstrahlpumpe, 3 Druckmeßstelle, 4 Durchflussmessgerät, 5 Kugelhahn, 6 Verteiler, 7 Düsen



a)



b)

Bild. 5.6. a Lage der Druckmessstellen am Umfang der Versuchsmaschine auf der Vorderseite des Gehäuses, b Verteiler mit ans Gehäuse angeschlossenen Panzerschläuche

Tabelle 5.1. Lage der Druckmessstellen am Umfang der Versuchsmaschine auf der Vorderseite des Gehäuses

Druckmessstelle	Position am Umfang
1	$\varphi = 60^\circ$
2	$\varphi = 150^\circ$
3	$\varphi = 240^\circ$
4	$\varphi = 330^\circ$

5.4 Bypass

Die aktive Maßnahme *Bypass* ist auch als Feststofftrennsystem bekannt. Die als nicht pumpbar geltende Feststoffe (S. 17) werden mit Hilfe der Bypasspumpe an der Abwasserpumpe vorbeigeführt, so dass es dadurch zu keiner Verstopfung der Abwasserpumpe kommt.

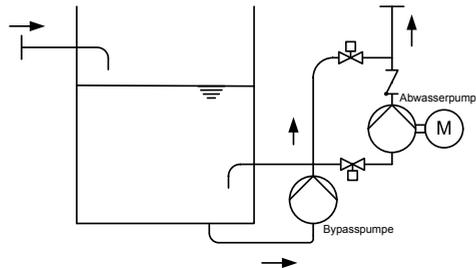


Bild. 5.7. vereinfachte Darstellung der Maßnahme „Bypass“

Durch den Einsatz solcher Feststofftrennsysteme können die Feststoffe noch vor der Pumpe gefiltert werden. Die vor den als nicht pumpbar geltenden Feststoffen geschützte Pumpe unterliegt dabei einer geringeren Verschleiss- und Verstopfungsgefahr, was insgesamt die Betriebssicherheit der Anlage steigert.

Ein Vorteil dieser Maßnahme liegt in der Möglichkeit, eine Mehrkanalpumpe mit hohem Wirkungsgrad in der Anlage einzusetzen, die allerdings durch geringeren Kugeldurchgang weniger robust ist.

Dieses Prinzip wird teilweise bei kleinen und mittelgroßen Abwasserhebeanlagen eingesetzt. Aktuell sind nicht viele Systeme mit Bypassvorrichtung auf dem Markt [74, 25, 55]. Solche Feststofftrennsysteme sind derzeit als vornehmend geschlossene Komplettlösung vorhanden, können in bestehende Abwasserterpumpstationen jedoch nicht direkt eingebunden werden (Avalift, AmaDS).

Darüber hinaus setzen die Systeme eine zeitliche Trennung zwischen dem Zulaufbetrieb und dem Förderbetrieb der Anlage voraus. Hierbei übernimmt die Abwasserpumpe für den Förderbetrieb, durch eine geschickte Vernetzung der Rohrleitung mit speziellem Sammelbehälter, ebenfalls die Funktion der Bypasspumpe. Pumpwerke, die in einem kontinuierlichem Zulaufbetrieb arbeiten, können daher nur schwierig mit derzeit verfügbar kompletten Feststofftrennsystemen erweitert werden.

5.5 Leitprofile im Saugrohr

Es ist durchaus denkbar, geeignete Aktoren in kritische Bereiche, beispielsweise im Saugrohr einzubringen, die eine Beeinflussung der Strömung vor der Abwasserpumpe derart beeinflussen, dass eine Verstopfung verhindert werden kann.

Der im Saugrohr vorhandene Drall begünstigt die Verwebung der Feststoffe (**Bild 5.8**), die weiterhin als ein Zopf die Pumpe passieren und zu einem sofortigen Ausfall führen können.

Dem Drall im Saugrohr liegen folgende Ursachen zu Grunde:

- Rotation des Fluides im Saugraum,
- Strömungsablösung und Sekundärströmungen im Einlaufkrümmer und
- Teillastwirbel im Saugrohr, der vom jeweiligen Betriebspunkt der Abwasserpumpe abhängt.



Bild. 5.8. Verstopfung im Saugrohr bei Modellversuchen

Das Mittel dazu könnte eine Blende, ein Profil oder auch ein Injektor sein. Der Ansatz, Leitprofile zur Verhinderung eines Vordralles einer Kreiselpumpe bei Förderung des reinen Wassers zu nutzen, ist bekannt [31]. Mit weitergehender Forschung im Bereich Abwassertechnik wird noch zu interessanten Lösungen mit entsprechenden mechatronischen Aktoren führen.

Für die gewünschte Beeinflussung des Dralls im Saugrohr kommen zwei, in das Saugrohr eingebaute, Leitprofilen zum Einsatz. Unmittelbar vor der Abwasserpumpe werden die Leitprofile unter der Einsatzbedingungen konstruktiv realisiert (**Bild 5.10**).

Zur Erprobung der Wirksamkeit hinsichtlich des Einflusses auf die oben aufgelisteten Mechanismen werden in das Saugrohr fest montierte, nicht bewegliche Leitprofile eingebaut.

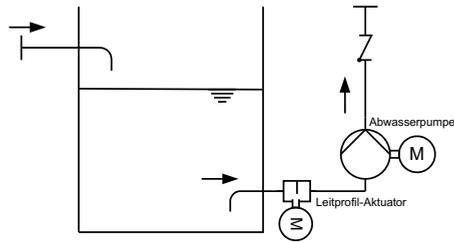


Bild. 5.9. vereinfachte Darstellung der Maßnahme *Leitprofile im Saugrohr*

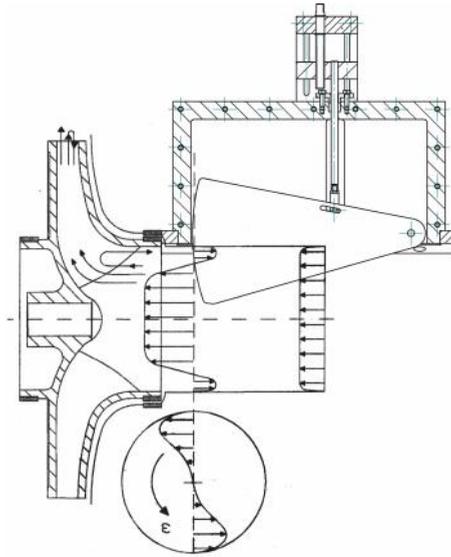


Bild. 5.10. Wirkung des Leitprofils auf den Teillastwirbel am Eintritt der Kreiselpumpe

5.6 Rührwerke und Injektoren

Als weitere aktive Maßnahme gegen Verstopfungsaufbau können Rührwerke oder Injektoren eingesetzt werden, um die Schmutzansammlungen und Schwimmdeckenbildung bereits im Saugraum zu verhindern (**Bild 5.11**).

Rührwerke [89, 92] werden üblicherweise in der Klärtechnik eingesetzt, um Abwasser in großen Behältern zu *homogenisieren* oder auch *suspendieren*.

Injektoren finden ihren Einsatz beim *Homogenisieren* oder auch Beeinflussen der Strömung durch den Triebstrahl [63].

Die Wirkmechanismen sind in der Tabelle **5.2** aufgelistet und erläutert worden.

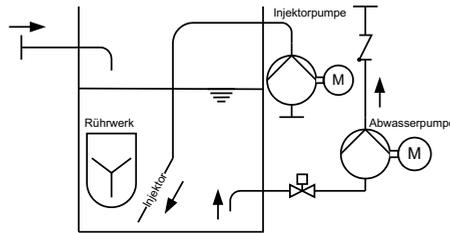


Bild. 5.11. vereinfachte Darstellung der Maßnahme *Rührwerke und Injektoren*

Tabelle 5.2. Wirkmechanismen und Aufgaben[92]

Wirkmechanismus	Aufgabe
Homogenisieren	Ausgleich von Konzentrations- und Temperaturunterschieden
Suspendieren	Aufwirbeln eines Feststoffes in einer Flüssigkeit
Dispergieren	Zerstreuung von zwei nicht miteinander mischbaren Flüssigkeiten
Intensivieren	Intensivieren des Wärmeaustausches (Flüssigkeit / Übertragungsfläche)

Die Rührwerke und Injektoren haben unterschiedliche Wirkungsweisen und Einsatzbedingungen.

Die offene rotierende Propellerhydraulik des Rührwerkes erzeugt eine Steigung der Geschwindigkeit im Fluid. Durch Rotation des Propellers und in dem Fall fehlendem Leitapparat wird der Drall aus dem Fluid nicht herausgenommen. Dabei entstehen die Turbulenzströmungen im erzeugtem freiem Strahl, die die Mischvorgänge intensivieren.

Der Triebstrahl des Injektors wird zum Verstärken der Hauptströmung und Erhöhen der Strömungsgeschwindigkeit eingesetzt.

Eine weitere Aufgabe des Injektors besteht im Übertragen der kinetischen Energie auf das Fluid, um bessere Mischvorgänge zu erzielen. Daher wird der Triebstrahl gegenüber der Hauptströmung, einem anderem Triebstrahl oder gegenüber einem festen Körper, in der Regel einer Prallwand, ausgelöst.

Der Einsatz der Rührwerke und Injektoren stellt eine Alternative zur Standard-Reinigung eines Abwasserpumpwerkes dar. Die Reinigung erfolgt durch unterschiedliche Methoden:

- Druckspülung
- Schwallspülung

Kurze und intensive *Druckspülung* ist eine Maßnahme bei der das Abwasser im Kreis gefördert wird. Bei abgesenktem Pegel im Saugraum wird die *Schwimm-*

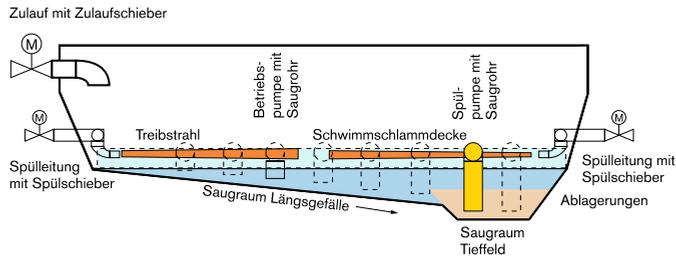


Bild. 5.12. Druckspülung [52]

schlammdecke von Triebstrahlen der zur Mitte gerichteten Spülleitung zerstört oder deren Entstehen verhindert.

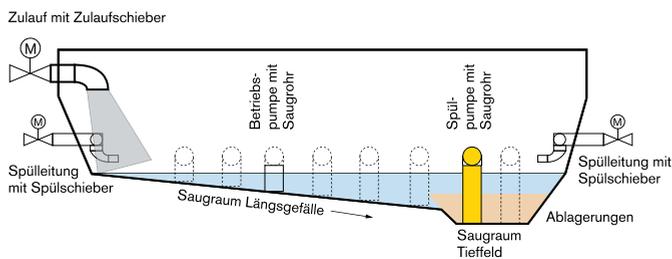


Bild. 5.13. Schwallspülung [52]

Eine *Schwallspülung*, die durch Differenz der geodätischen Höhe des Zulaufkanals entsteht, wird zur Reinigung des Saugraumes eingesetzt. Die Schwallspülung sollte die *Sedimente* im Sohlenbereich des Saugraumes zu einem kompakten Tiefeld formen, wo sie durch eine Abwasserpumpe weiter abtransportiert werden.

Hier ist ein qualitativer Vergleich der Effektivität bei erhaltener Effizienz ein geeignete Validierungsstrategie.

Ergebnisse zur Wirksamkeit der Aktuatorik

6.1 Reinigungszyklus

Die Versuchsdurchführung des Reinigungszyklus unterscheidet drei Vorgänge: Verstopfen, Reinigen und Spülen.



Bild. 6.1. Ablauf der Untersuchung der Maßnahme *Reinigungszyklus*

Das *Verstopfen* erfolgt durch die Zugabe der Prüftextilien, die in drei Belastungsgrade eingeteilt worden sind (vgl. **Bild 6.2**):

- leicht (50 lose Prüftextilien),
- mittel (50 verwebte Prüftextilien, 5 Zöpfen je 1,7 m),
- mittel (5 Knäule, je 10 Prüftextilien) und
- stark (reißfeste Scheuerlappen, 5 Zöpfe je 1,7 m)

Die Zugabe der leichten Verschmutzung erfolgt im Vormischbehälter, die Verschmutzung des mittleren und starken Grades direkt vor dem Einlaufkrümmer der Abwasserpumpe.

Das Verstopfen wird beim Fördergrad

$$q_{opt} = 100\%$$



a)



b)



c)

Bild. 6.2. Feststoffe: **a** Zopf aus 10 Prüftextilien, **b** Knäul aus 10 Prüftextilien, **c** Zopf aus reißfesten Scheuerlappen

und Drehzahl

$$n = 600 \text{ min}^{-1}$$

durchgeführt. Dieser Betriebspunkt stellte sich während der Verstopfungsversuche mit höchst erreichtem Verstopfungsgrad der Abwasserpumpe dar.

Das vorprogrammierte *Reinigen* wird nach dem gezielten Verstopfen der Versuchsmaschine gestartet.

Anschließend erfolgt der Vorgang *Spülen* bei Drehzahl $n = 600 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 80\%$. Das während des Reinigens gelöste Verstopfungsgut wird in die Druckleitung gefördert.

Nach dem Spülen wird die Pumpe ausgeschaltet und entleert. Der Verstopfungszustand der Abwasserpumpe wird begutachtet und dokumentiert.

Der Reinigungszyklus wird beim geschlossenen Schieber in der Druckleitung, Fördergrad $q = 0\%$, ausgeführt. Der Schieber wird nur für das Spülen der abgelösten Verstopfung geöffnet.

Die Ansteuerung des Reinigungszyklus erfolgt durch die Software LabVIEW und wird über die Bedienoberfläche des Steuerungsprogramms am PC ausgeführt. Die Abwasserpumpe kann in beide Drehrichtungen mit präzise eingestellter Drehzahl betrieben werden.

Die Wirksamkeit der aktiven Maßnahme *Reinigungszyklus* wird hier anhand der folgenden Einflussfaktoren beschrieben:

- Drehzahlwechsel $n = [0 \dots n_{Nenn}] \text{ in } \text{min}^{-1}$
- Drehrichtungswechsel rechtläufig sowie rückläufig
- Impulsmuster $IM \text{ in } 1$
- Wirkungsdauer $t \text{ in } s$

Ein **Drehzahlwechsel** beseitigt die anbahnende oder leichte Verstopfung aus losen Prüftextilien. Die Variation der Drehzahl von Nenndrehzahl bis auf Null, bei geschlossenem Schieber, bewirkt eine Änderung der Strömungszustände in der Kreiselpumpe (vgl. dazu Stromlinienwechsel [31]) und als Folge das Ablösen der Verstopfung. Mit dem danach folgenden erreichten Wechsel zur Betriebsdrehzahl wird die aus der Kreiselpumpe abgelöste Verstopfung, beim Öffnen des Schiebers, in der Druckleitung frei gespült und weiter gefördert.

Die **Tabelle 6.1** präsentiert die Reinigungswirkung beim Wechsel zu unterschiedlichen Drehzahlen. Mit jeder Änderung der Betriebsdrehzahl ist eine vollständige Reinigung der Versuchsmaschine erzielt worden.

Tabelle 6.1. Auswirkung der Drehzahl auf Reinigungseffekt

Vorgang	Drehzahl in min^{-1}	Fördergrad in %	Förderstrom in l/s	Zeit in s	Drehrichtung	Reinigung in %
Verstopfen	600	100	63	300	cw	
Schliessen des Schiebers	600			30	cw	
Spülen	600	80	51	15	cw	100
Spülen	850	80	73	15	cw	100
Spülen	960	80	92	15	cw	100

Die abweichende Drehzahl hat die gleiche Wirkung auf Reinigungseffekt der Pumpe bei leichter Verschmutzung.

Ein **Drehrichtungswechsel** ist für die Beseitigung von Verstopfungen mittleren und schweren Grades erfolgreich angewendet worden. Nicht pumpbare Verstopfung ist beseitigt worden. Nicht pumpbare Verstopfung langfaseriger Stoffe, die länger als der Laufraddurchmesser sind, sowie der Verstopfungen in Form eines Knäules, größer als der freie Kugeldurchgang des Laufradkanals, sind ebenfalls beseitigt worden.

Den Reinigungseffekt des Drehrichtungswechsels präsentiert **Tabelle 6.2**. Mit der Drehrichtung im Uhrzeigersinn sind langfaserige Verstopfungen nicht beseitigt worden. Bei Umkehr der Drehrichtung sowie bei Kombination der beiden Drehrichtungen ist jedoch eine komplette Reinigung erzielt worden.

Tabelle 6.2. Auswirkung des Drehrichtungswechsels auf den Reinigungseffekt

Drehrichtungswechsel	Reinigung in %		
	Versuch1	Versuch2	Versuch3
CW	65	80	65
kombiniert	100	100	100
CCW	100	100	100

Ein **Impulsmuster** ist definiert als mindestens eine Impulsänderung, ausgelöst durch den Drehzahlwechsel. Einmaliger Drehzahlwechsel hat sich für die Beseitigung leichter Verstopfung als ausreichend erwiesen und kann in Kombination mit einer Verstopfungsdiagnose eingesetzt werden.

Für die Verstopfung des mittleren und schweren Grades soll das Impulsmuster aus der Kombination der Drehzahlrichtung und dem Drehzahlwechsel zusammengesetzt werden. Hier zeigt die Kombination aus den Drehrichtungen CW-CCW-CW des Laufrades einen erfolgreichen Reinigungseffekt. Anschließend soll das aufgewirbelte Gut mit dem Öffnen des Schiebers in der Druckleitung frei gespült und weiter gefördert werden. Eine Wiederholung des gesamten Zyklus wird empfohlen.

Die **Tabelle 6.3** zeigt die Anzahl der Wiederholungen in Abhängigkeit von dem Grad der Verstopfung. Für präventiven Einsatz der Reinigung nach Zyklus ist die ein- oder zweimalige Wiederholung ausreichend gewesen. Für Beseitigung der Verstopfung des mittleren sowie schweren Grades dagegen wird die zwei- bis sechsfache Wiederholung notwendig. Weitere Wiederholung bei schwerem Verstopfungsgrad hat sich als nutzlos erwiesen. Die Abwasserpumpe musste dann zerlegt und die Verstopfung manuell entfernt werden.

Eine **Wirkungsdauer** von 15 s für jeden einzelnen Fahrtabschnitt hat sich als wirkungsvoll erwiesen. Die Verlängerung der Wirkungsdauer hat keine signi-

Tabelle 6.3. Auswirkung der Art der Verstopfung auf Impulsmuster

Verstopfung	Wiederholung
leicht (Lappen)	1
mittel (Knäuel)	1-2
mittel (Zopf)	2-6
schwer (schwerer Zopf)	≥ 7

fikanten Unterschiede beim Reinigungseffekt gebracht und erscheint als nicht sinnvoll.

Die Gewinnung der Erkenntnisse über den Verstopfungsaufbau sowie den Reinigungseffekt der aktiven Maßnahme ist mit Hilfe optischer Betrachtung und einer, darauf bezogenen Analyse der Betriebsdaten der Abwasserpumpe durchgeführt worden. Sie hat folgende Ergebnisse über die Merkmale der beobachteten Zustände gebracht:

- Förderstrom und Förderhöhe nehmen schon bei sich anbahnender Verstopfung bis zu 10% ab,
- Leistungsbedarf hat einen signifikanten Anstieg um 10% schon bei der anbahnenden Verstopfung und
- Die Frequenzanteile (Wellenfrequenz, Drehklang) des zeitlich aufgelösten statischen Druckes zeigen den charakteristischen Bereich für die Verstopfung des Laufrades.

Während des Versuchslaufs sind unterschiedliche Reinigungseffekte beobachtet worden:

- Ablösen,
- Zerfasern und
- Aufwirbeln

Ablösen charakterisiert sich mit der Änderung der Strömungszustände in der Pumpe, zum Beispiel nach dem Drehzahlwechsel, und daraus resultierendem Wechsel des Ablagerungsbildes.

Zerfasern wird bei Reinigung in Drehrichtung Rotationssinn beim Geschlossenen Schieber beobachtet. Die starke Abnutzung der Prüftextilien wird auf Abreißen der aus dem Laufradkanalaustritt am Sporn des Spiralgehäuses heraushängenden Teilen zurückgeführt.

Aufwirbeln dagegen wird bei Reinigung gegen Rotationsinn beim geschlossenen Schieber beobachtet. Dabei werden auf der Eintrittskante hängende langfaserige Ablagerungen zerstörungsarm gelöst. Diese Wirkung ist auf die Änderung der Strömungsbedingungen an der Eintrittskante des Laufrades zurückzuführen. Die Änderungen entstehen auf Grund der geänderten Geo-

metrien im Eintritt und Austritt des Laufrades und Krümmung der Schaufel durch Wechsel des Rotationssinnes.

Tabelle 6.4. Wirkung der aktiven Maßnahme mit Reinigungszyklus in Abhängigkeit vom Rotationssinn

Rotationsrichtung	Wirkung
Rotation in Uhrzeigersinn	Ablösen leichter Verstopfung Zerfasern mittelschwere und schwere Verstopfung
Rotation gegen Urzeigersinn	Ablösen leichter Verstopfung Aufwirbeln mittelschwerer und schwerer Verstopfung
Kombination der Rotationssinne	Für leichte Verstopfung nicht notwendig Für mittelschwere und schwere Verstopfung erforderlich

6.2 Rückspülen

Zur Beurteilung der Wirkung der aktiven Maßnahme *Rückspülen* wird die beobachtete Verteilung der Verstopfung, nach der Durchführung der Rückspülaktion, in Betracht gezogen.

Die bei stehender Abwasserpumpe rückwärts der Hauptanströmung gespülte Verstopfung (Prüftextilien) erreicht, je nach Einstellwert der Einflussparameter, unterschiedliche Stellen in der Rohrleitung, bis sie anschließend den Saugeraum erreicht.

Der Ort und die Menge der nach dem Rückspülen aufgefundenen Prüftextilien werden zur Auswertung der Wirksamkeit der Maßnahme erfasst.

Die Formalisierung der Verstopfungsortes erfolgt nach der vorgeschlagenen Struktur (**Bild 6.3, a**). Eine Fotoaufnahme präsentiert die Verstopfungsverteilung nach dem Einsatz der Maßnahme (**Bild 6.3, b**).

Die Untersuchung der Wirksamkeit erfolgt in zwei Schritten:

- Verstopfen und
- Rückspülen.

Das *Verstopfen* erfolgt durch die Zugabe von Prüftextilien zum Fluid im Vormischbehälter. Die Abwasserpumpe verstopft beim Fördern des Feststoffgemisches aus Wasser und Prüftextilien.

Der Betriebspunkt der Abwasserpumpe ist bei der Drehzahl $n = 600 \text{ min}^{-1}$ und Fördergrad $q = 100\%$ festgelegt worden. Dieser Betriebspunkt hat sich

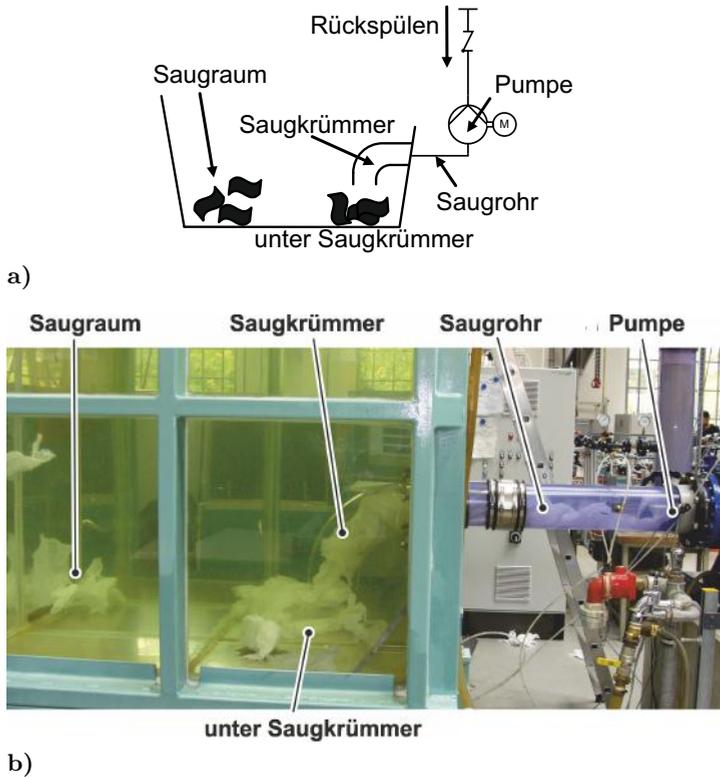


Bild. 6.3. Darstellung der Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen: **a** Definition nach Ort, **b** Fotoaufnahme

durch maximal mögliche Verstopfungsintensität während der Verstopfunguntersuchungen (vgl. **Abschnitt 4.2**) ausgezeichnet.

Eine andere Methode besteht im gezielten Verstopfen der gefährdeten Stellen, an denen eine Beseitigung mit der aktiven Maßnahme *Rückspülen* sinnvoll wäre.

Das sind:

- Laufradkanäle,
- Laufradeintritt und
- Saugrohr.

Die Menge der Prüftextilien für jede lokal gefährdete Stelle ist in Anlehnung an das spezifische Verstopfungsverhalten der Abwasserpumpe festgelegt worden.

Das Verstopfen erfolgt manuell, durch Anbringen der Prüftextilien bei stehender Abwasserpumpe.

Nach dem Verstopfen wird die aktive Maßnahme *Rückspülen* gestartet. Das gespülte Verstopfungsgut wird dabei aus der Abwasserpumpe, durch deren Einlaufleitung, zurück in den Saugraum gefördert.

Nach dem zeitlich definierten Spülvorgang wird die Rückspülpumpe ausgeschaltet und die Abwasserpumpe entleert. Der Verstopfungszustand wird wie oben beschrieben begutachtet und dokumentiert.

Die Wirksamkeit der Maßnahme ist auf folgende Einflussfaktoren hin untersucht worden:

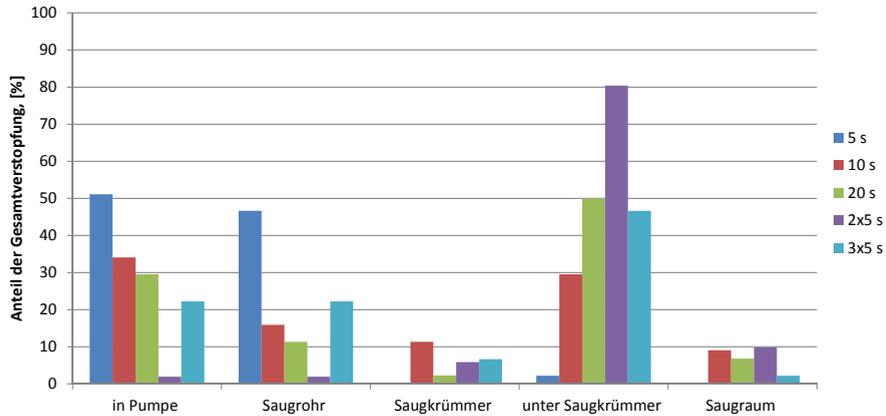
- Volumenstrom Q_R in m^3/s ,
- Wirkzeit t_w in s und
- Wirkzahl WZ in 1

Tabelle 6.5 sowie **Bild 6.4** präsentieren die Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen.

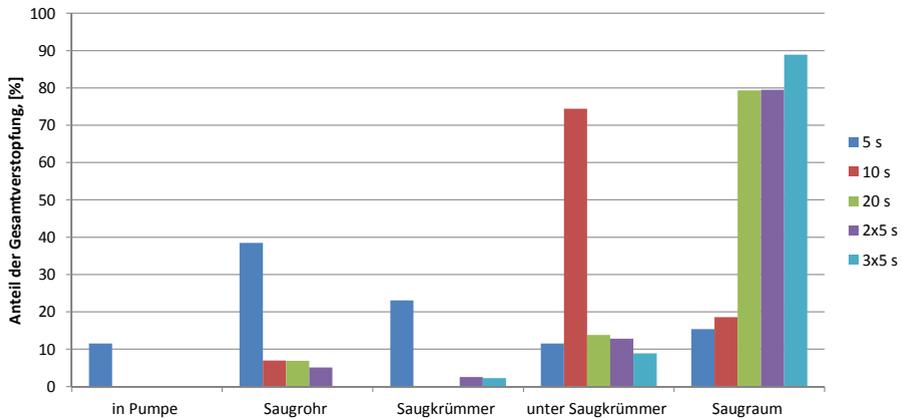
Tabelle 6.5. Reinigungseffekt nach dem Rückspülen bei der Verstopfungsform *Abwasserpumpe verstopft*. Versuchsdaten: $Q=63$ l/s, Pumpenverstopfung ca. 50 Prüftextilien

Volumenstrom in l/s	Wirkdauer in s	Rückspülvolumen in l	Impulsmuster in 1	Effekt in %
5	5	25	1	0
	10	50	1	0
	20	100	1	7
	10	50	2	10
	15	75	3	2
10	5	50	1	15
	10	100	1	20
	20	200	1	80
	10	100	2	80
	15	150	3	90

Der bestmögliche Effekt wurde bei einem Rückspülstrom 10 l/s mit drei Impulsen über 15 s Wirkdauer registriert (fett markiert).



a)



b)

Bild. 6.4. Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen der verstopften *Abwasserpumpe* mit verschiedenen Volumenströmen, Wirkungsdauer und Impulsmuster: **a** Volumenstrom 5 l/s, **b** Volumenstrom 10 l/s

Tabelle 6.6 und **Bild 6.5** präsentieren die Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen des verstopften *Saugrohr* der Abwasserpumpe mit jeweils verschiedenen Volumenströmen, Wirkungsdauern und Impulsmuster.

Der bestmögliche Effekt wurde bei einem Rückspülstrom 10 l/s mit einem Impuls über 20 s registriert (fett markiert).

Tabelle 6.6. Reinigungseffekt nach dem Rückspülen bei der Verstopfungsform *Saugrohr verstopft*

Volumenstrom in l/s	Wirkdauer in s	Rückspülvolumen in l	Impulsmuster in 1	Effekt in %
5	5	25	1	2
	10	50	1	2
	20	100	1	13
	10	50	2	0
	15	75	3	2
10	5	50	1	7
	10	100	1	6
	20	200	1	100
	10	100	2	33
	15	150	3	90

Tabelle 6.7 und **Bild 6.6** präsentieren die Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen des verstopften *Laufraudeintritts* der Abwasserpumpe in Abhängigkeit von Volumenstrom, Wirkungsdauer und Impulsmuster.

Der bestmögliche Effekt wurde bei Rückspülstrom $10l/s$ mit drei Impulsen über $20s$ Wirkdauer registriert (fett markiert). Die Erprobung der Maßnahme bei Rückspülstrom $5l/s$ ist in Anlehnung auf Voruntersuchungen aus dem Messprogramm als nicht effektiv zurückgenommen.

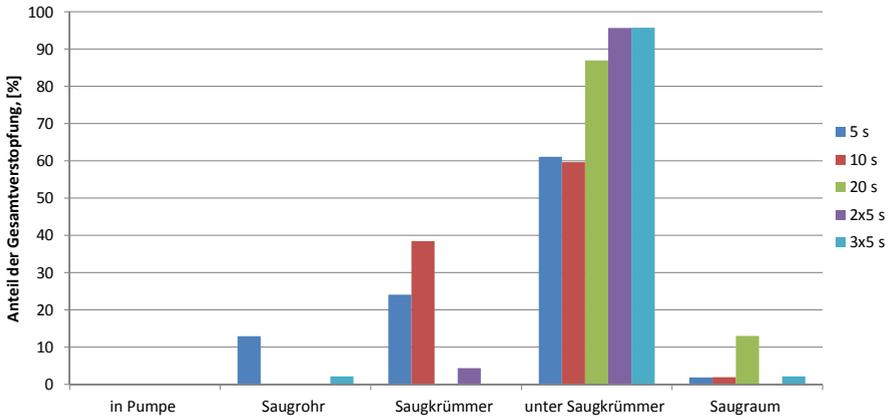
Tabelle 6.7. Reinigungseffekt der Maßnahme *Rückspülen* bei der Verstopfungsform *Laufraudeintritt verstopft*

Volumenstrom in l/s	Wirkdauer in s	Rückspülvolumen in l	Impulsmuster in 1	Effekt in %
10	5	50	1	2
	10	100	1	2
	20	200	1	13
	10	100	2	0
	15	150	3	2

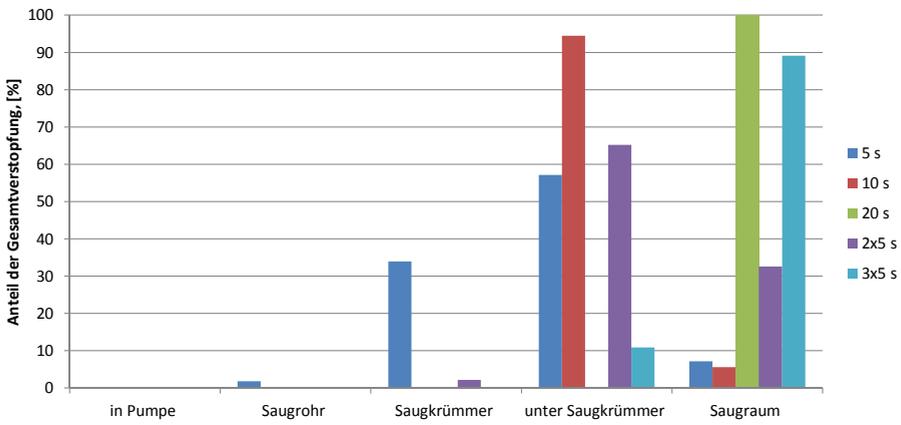
Bild 6.7 präsentiert die Untersuchungsergebnisse der Maßnahme *Rückspülen* bei der Verstopfungsform *Laufradkanäle verstopft*.

Für Untersuchung der Wirkung der Maßnahme bei der Verstopfungsform *Laufradkanäle verstopft* werden anfangs 27 Prüftextilien in jedem der drei Kanäle der Pumpe platziert (insgesamt 81).

Nach dem Rückspülen zeigte sich, dass *Kanal 1* immer frei ist und der Rest der Kanäle weiterhin verstopft bleibt. Ungeachtet der Einstellwert der Wirkdauer $[5 \dots 20]s$ oder auch des Volumenstroms $[5 \dots 10]l/s$ blieb dieser Effekt erhalten.



a)



b)

Bild. 6.5. Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen des verstopften *Saugrohres* der Abwasserpumpe mit verschiedenen Volumenströmen, Wirkungsdauern und Impulsmustern: **a** Volumenstrom 5 l/s, **b** Volumenstrom 10 l/s

Eine Nebenwirkung der aktiven Maßnahme Rückspülen ist dadurch gekennzeichnet, dass sich die zurückgespülten Verstopfungskomponenten unterhalb des Saugkrümmers verstauen bzw. sammeln **Bild 6.8 a**).

Die schräge Wand (Berme) hinter dem Krümmer beseitigt diese Stauzone (vgl. **Bild 6.8 b**).

Tabelle 6.8 und **Bild 6.9** präsentieren die Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen bei eingesetzter Berme.

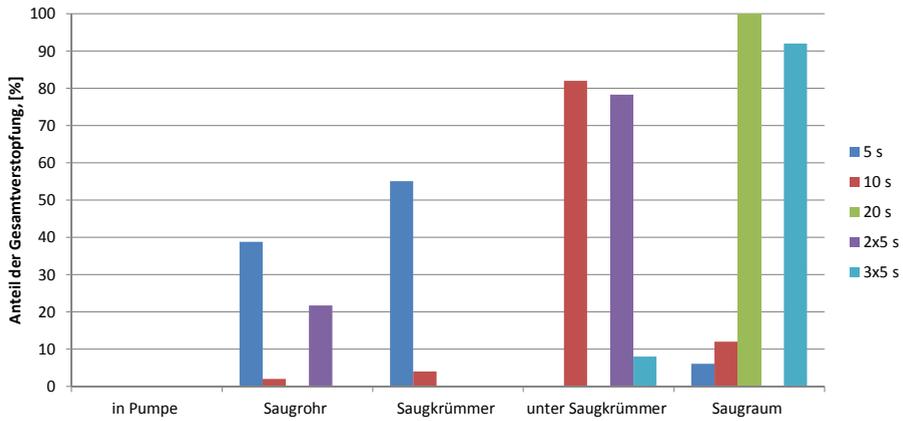


Bild. 6.6. Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen des verstopften *Laufradeintritts* der Abwasserpumpe bei Volumenstrom 10l/s mit verschiedenen Wirkungs-dauern und Impulsmuster

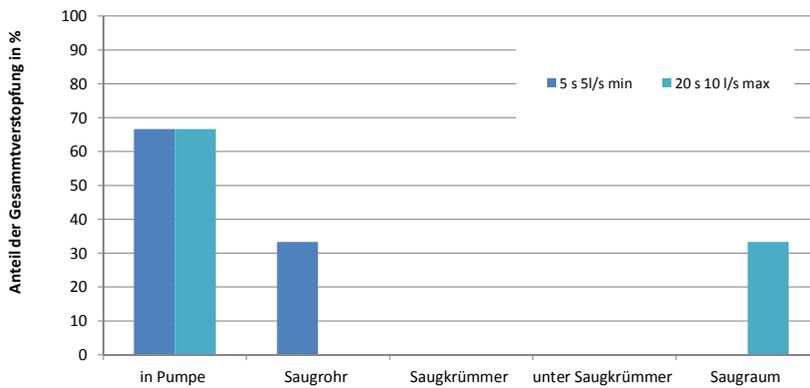
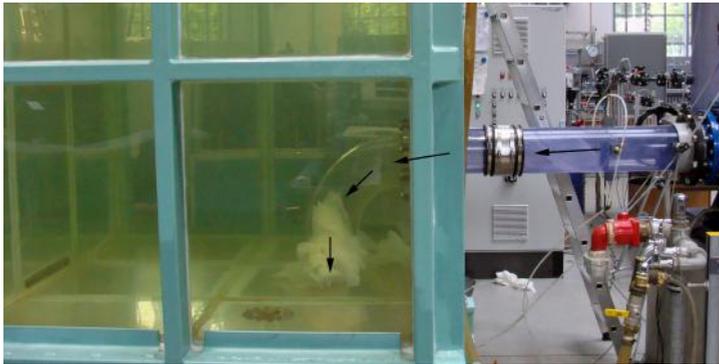
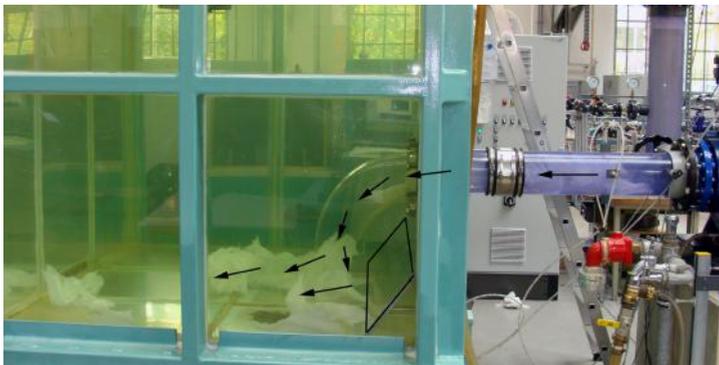


Bild. 6.7. Resultate der Rückspülung bei der Verstopfungsform *Laufradkanäle verstopft*

Es ist ersichtlich, dass der Einsatz der Berme den Rückspüleeffekt der Massnahme auf seinen maximal möglichen Wert (100%) bei Verstopfung der Abwasserpumpe, Saugrohr und Laufradeintritt erhöht hat.



a)



b)

Bild. 6.8. Nebenwirkung: **a** Verstauung der Feststoffen unter dem Saugkrümmer nach dem Rückspülen, **b** schräge Wand (Berme) beseitigt die Stauzone. Rückspülstrom 10l/s, Wirkungsdauer 10s

Die Ergebnisse der Untersuchungen können in Bezug auf die Auswirkung der Einflussfaktoren zusammengefasst werden.

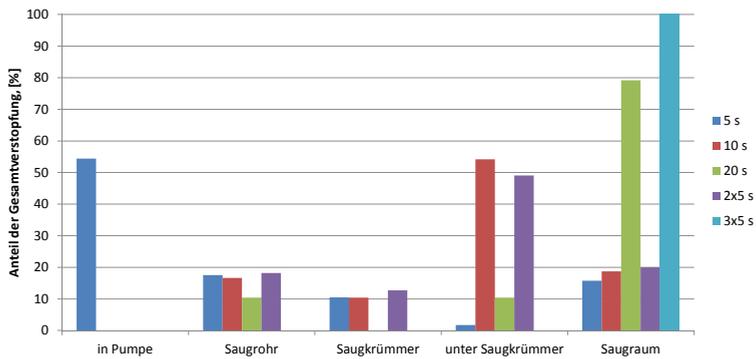
Der **Volumenstrom** der Rückspülvorrichtung soll in Abhängigkeit von notwendigen *Rückspülvolumen* Q_R und *Wirkzeit* t_R festgelegt werden.

Rückspülvolumen wird als Volumen des durch die Rückspüleleitung geförderten Fluides definiert:

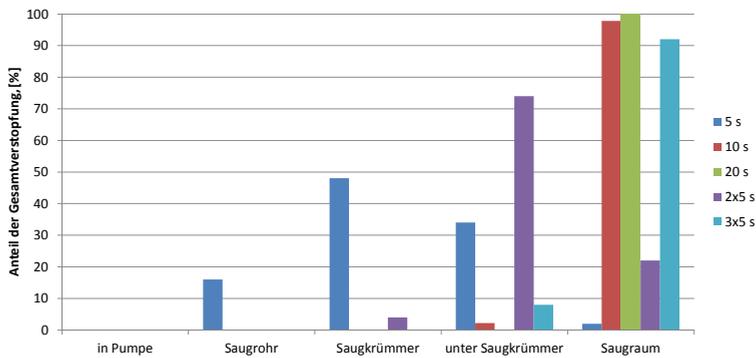
$$V_R = Q_R t_R$$

Rückspülvolumen soll auf das notwendige einfache des *Verdrängungsvolumens* der Saugleitung der Abwasserpumpe bis zur Eintrittskante des Einlaufkrümmers abgestimmt werden.

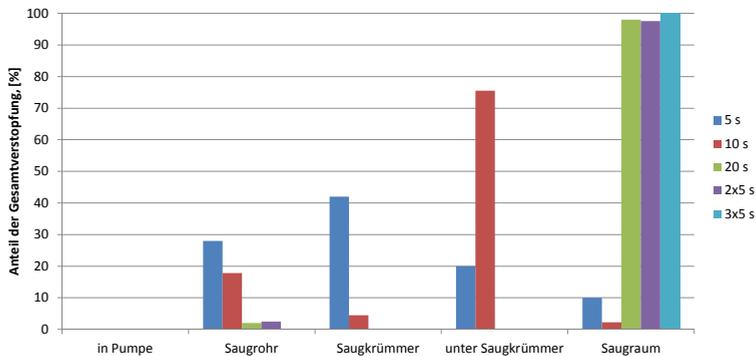
Verdrängungsvolumen wird als Innenvolumen der Saugleitung der Abwasserpumpe bezeichnet, dessen Wert aus der Summe des Innenvolumen des Saug-



a)



b)



c)

Bild. 6.9. Verstopfungsverteilung nach dem Rückspülen der Verstopfungen in: **a** - der *Abwasserpumpe*, **b** - dem *Saugrohr* und **c** - dem *Laufradeintritt* bei Volumenstrom 10l/s mit verschiedenen Wirkungsauern und Impulsmustern gegen eine schräge Wand (Berme)

Tabelle 6.8. Reinigungseffekt der Maßnahme *Rückspülen* mit Berme bei der Verstopfungsform *Abwasserpumpe verstopft, Saugrohr verstopft, Laufradeintritt verstopft*

Volumenstrom in l/s	Wirkdauer in s	Rückspülvolumen in l	Impulsmuster in l	Effekt in %
Abwasserpumpe verstopft - mit Wand (Berme)				
10	5	50	1	16
	10	100	1	20
	20	200	1	80
	10	100	2	20
	15	150	3	100
Saugrohr verstopft - mit Wand (Berme)				
10	5	50	1	2
	10	100	1	100
	20	200	1	100
	10	100	2	22
	15	150	3	100
Laufradeintritt verstopft - mit Wand (Berme)				
10	5	50	1	10
	10	100	1	2
	20	200	1	98
	10	100	2	98
	15	150	3	100

krümmers V_{SK} , Innenvolumen des Saugrohres V_{SR} sowie Innenvolumen der Abwasserpumpe V_P besteht.

Das Verdrängungsvolumen muss für jede Anlage neu bestimmt werden. Für die verwendete Versuchsanlage gilt es die folgende Berechnung:

$$V_{VD} = V_P + V_{SR} + V_{SK} = 35 + 40 + 74 = 149l$$

Zur Bestimmung des erforderlichen Verdrängungsvolumens sollten die resultierenden lokalen Geschwindigkeiten in der Rohrleitung beachtet werden. Die für den sicheren Betrieb zulässige Mindestgeschwindigkeit darf nicht unterschritten werden. Bei komplexen Verlegungen der Rückspüleleitung müssen die Verluste in der Rohrleitungsgeometrie für Berechnung der Mindestgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Die zulässigen Mindestgeschwindigkeiten sind aus ATV 116 und DIN 1671 zu entnehmen [2, 15]. Laut den letzten eigenen Untersuchungen am Fachgebiet Fluidsystemdynamik der Technischen Universität Berlin [71] werden höhere Mindestgeschwindigkeiten für Feststofftransport in Abwassersystemen empfohlen (vgl. **Tabelle 6.9**).

Tabelle 6.9. Mindestgeschwindigkeit für Feststofftransport in Abwassersystemen

Quelle	Mindestgeschwindigkeit in m/s	
	horizontal	vertikal
ATV 116	0,7	0,7
DIN 1671	0,7	0,7
TU Berlin	0,8	1,2

Die **Wirkzeit** der aktiven Maßnahme ist unter Berücksichtigung des eingestellten Volumenstroms Q_R auf das resultierende Rückspülvolumen V_R zu berechnen.

$$t_R = V_R/Q_R$$

Die Wirkungsdauer muss auf mindestens einfaches Verdrängungsvolumen V_{VD} bestimmt werden. Die Untersuchungen zeigen keinen Reinigungseffekt der Maßnahme bei der Wirkungsdauer $5s$, wobei das erzeugte Rückspülvolumen V_R das Verdrängungsvolumen V_{VD} noch nicht erreicht hat.

$$V_R < V_{VD} \rightarrow 20\%$$

Erst mit Erhöhung der Wirkungsdauer auf $10s$ und eine resultierende Annäherung des erzeugten Rückspülvolumens V_R auf das notwendige Verdrängungsvolumen V_{VD} hat die Maßnahme den 90% Effekt erreicht (vgl. **Tabelle 6.5**).

$$V_R = V_{VD} \rightarrow 90\%$$

Impulsmuster intensiviert den Reinigungseffekt. Die Untersuchungen zeigen höhere Wirkung der Maßnahme bei mehreren Wiederholungen und kürzeren Wirkzeiten (vgl. **Tabelle 6.8** und **Bild 6.9**) als bei einem Rückspülen über die längere Zeit:

- $3 \times 5s \rightarrow 90\%$ Effekt
- $1 \times 20s \rightarrow 80\%$ Effekt

6.3 Druckstrahl

Das Verstopfen erfolgt durch Zugabe der Prüftextilien zum Fluid wie bei Verstopfungsversuchen. Eine andere Methode besteht in einem manuellen, gezielten Anbringen der Prüftextilien in den Spalt des Radseitenraumes vor Deckscheibe des Laufrades.

Mit Injektion des Klarwassers wird die aktive Maßnahme gestartet. Die Erprobung der Wirksamkeit der Maßnahme ist bei intakter Pumpe mit rotierendem Laufrad, sowie bei stillstehender Pumpe ausgeführt worden. Während der Versuchsfahrten sind die Messdaten aufgezeichnet und gespeichert worden.

Die Untersuchung der Wirksamkeit der Aktiven Maßnahmen mit Druckstrahl wird an der Versuchsmaschine mit Einkanalrad durchgeführt. Der Einsatz der Versuchsmaschine mit der Einschaufel-Hydraulik sollte einen näheren Bezug zu den in der Praxis beobachteten Verstopfungserscheinungen im Radseitenraum herstellen. Im Stand der Technik (**Kapitel 2.3**) ist auf die Problematik der hohen Störungsquote im Radseitenraum bei dieser Hydraulik bereits verwiesen worden.

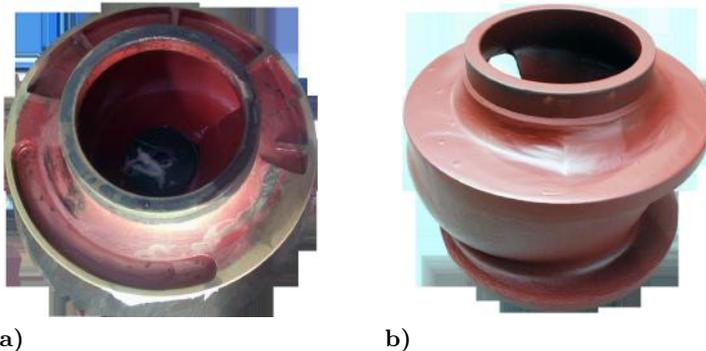


Bild. 6.10. Darstellung des Laufrades: **a** mit Bauchschaufel und Bund, **b** ohne Bund und Bauchschaufel

Für die laufende Versuche wird ein geschlossenes Einkanalrad ($D = 330\text{mm}$) in zwei Ausführungen eingesetzt. Eine Darstellung der beiden Laufradausführungen zeigt **Bild 6.10**.

Die erste Ausführung des Laufrades **a** besitzt Bauchschaufeln und Bund. Die zweite Ausführung **b** ist dagegen ohne. Der Bund ist durch das Abdrehen auf 5mm bis zur Oberfläche der Deckscheibe entfernt worden. Die Hohlräume zwischen den Rückenschaufeln wurden, bis zur Oberfläche der Deckscheibe mit Spachtel versiegelt. Die Schaufelaustrittskante liegt knapp über dem Außenradius der Deck- und Tragscheibe.

Die wesentlichen Kenndaten der Versuchsmaschine für die Untersuchungen der aktiven Maßnahme mit Druckstrahl sind in der **Tabelle 6.10, S. 80** zusammengefasst worden.

Tabelle 6.10. Kenndaten der Versuchsmaschine für Untersuchungen mit Druckstrahl

Parameter	Index	Einheit	Maß
Leistung	P	kW	36
Nennförderhöhe	H_{nenn}	m	20
Nennförderstrom	Q_{nenn}	m^3/h	495
Nenndrehzahl	n_{nenn}	min^{-1}	1450
Spezifische Drehzahl	n_s	-	5,7
Nennweite Saugstutzen	DN	mm	150
Nennweite Druckstutzen	DN	mm	150
Lauftraddurchmesser	d_2	mm	370
Freier Kugeldurchgang	b	mm	76

Bei aktiver Maßnahme *Druckstrahl* werden folgende Einflussfaktoren auf Ihre Wirksamkeit untersucht:

- Volumenstrom Q_{DS} in m^3/s ,
- Wirkzeit t_w in s ,
- Ort *Düse* in 1 und
- Druck p in bar

Die Verfügbarkeit des Druckes und des Volumenstromes ist durch die Messung der Kennlinien der Druckstrahlanlage ermittelt worden. In dem **Bild 6.11** werden die Druck- und Volumenstromkennlinien in Abhängigkeit von der Anzahl der aktiven Düsen und der Motordrehzahl der Verdrängerpumpe aufgetragen.

Die Horizontalachse steht für die Drehzahl in $1/min$. Auf der linken Vertikalachse ist der Förderstrom in l/s schwarz dargestellt. Der Absolutdruck in bar ist auf der rechten Vertikalachse blau angetragen. Der Druck erreicht den maximal zugelassenen Druck in der Anlage $8bar$. Danach wird die Anlage aus Sicherheitsgründen ausgeschaltet.

Die ermittelte Werte präsentiert **Tabelle 6.11**.

Im Weiteren ist der statische Druck im Umfang des Radseitenraumes von der Seite der Deckscheibe des Laufrades ermittelt worden. Die Ergebnisse der Druckmessung sind im **Bild 6.12** dargestellt.

In jedem Diagramm, für jeweils vier verschiedene Drehzahlen der Abwasserpumpe, werden die ermittelte Werte des statischen Druckes aufgetragen. Die Änderung des Druckes im Umfang des Radseitenraumes an der Innenwand des

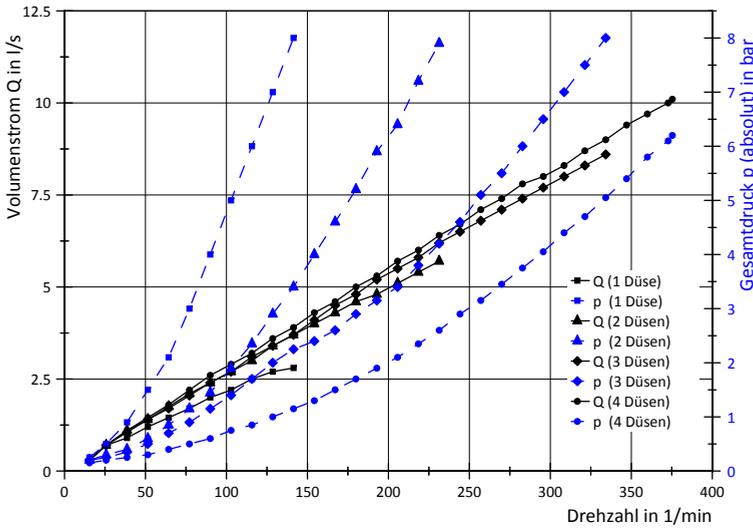


Bild. 6.11. Druck und Volumenstrom des Systems zur Klarwasserinjektion in Abhängigkeit der Drehzahl der Verdrängerpumpe und von Anzahl der aktiven Düsen

Tabelle 6.11. Volumenstrom und Druck im System der Klarwasserinjektion

Düse	Volumenstrom in l/s	Druck in bar
1	2,8	8,0
1, 2	5,7	8,0
1 - 3	8,6	8,0
1 - 4	10,1	6,2

Pumpengehäuses ist mit Zunahme der Drehzahl und Geometrie des Leitapparates nachvollziehbar.

Der Einsatz der Maßnahme mit Druckstrahl ist mit einer Beeinflussung der strömungs-technischen Zustände durch Wasserinjektion in Radseitenraum begründet. Die Auswirkung der Wasserinjektion auf den Druck im Umfang des Gehäuses wird experimentell ermittelt und in dem **Bild 6.13** dargestellt.

Die Messpunkte liegen anäherungsweise übereinander und weisen unwesentliche Unterschiede für jede der vier Messstellen am Umfang des Gehäuses aus. Der Einfluss der Injektion auf den Druck in den Messpunkten am Umfang ist geringfügig (vgl. **Tabelle 6.12**).

Demzufolge wird der Einfluss der Wasserinjektion auf die Änderung des statischen Druckes am Umfang des Radseitenraumes als unwesentlich gekennzeichnet.

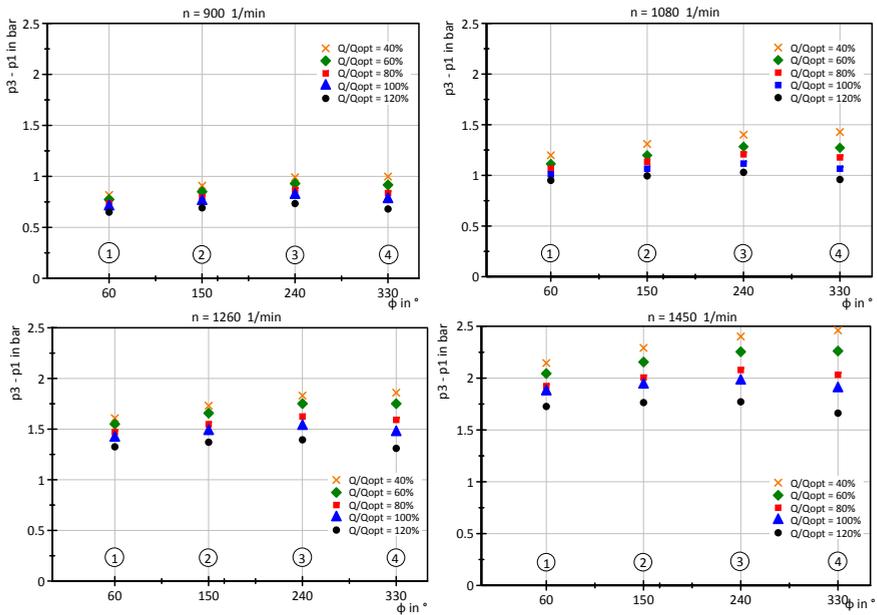


Bild. 6.12. statischer Druck in Umfangsverteilung am Spiralgehäuse der Abwasserpumpe in Abhängigkeit von Anzahl der aktiven Düsen, Drehzahl und Fördergrad

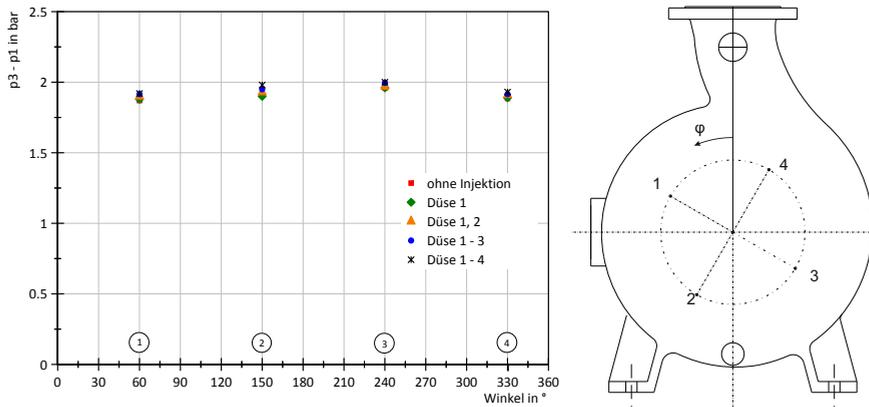


Bild. 6.13. Druck und Volumenstrom des Systems zur Klarwasserinjektion in Abhängigkeit von Anzahl der aktiven Düsen im Bestpunkt der Abwasserpumpe

Tabelle 6.12. statischer Druck im Umfangsverteilung an der Innenwand des Spiralgehäuses der Abwasserpumpe in Abhängigkeit von Anzahl der aktiven Düsen im Bestpunkt

Düse	Winkel	Druck in bar				
		ohne	1	1, 2	1 - 3	1 - 4
1	60	1,87	1,88	1,9	1,915	1,92
2	150	1,905	1,9	1,93	1,95	1,98
3	240	1,96	1,96	1,97	1,995	2
4	330	1,885	1,89	1,91	1,915	1,93

Die Untersuchungen am rotierendem Laufrad mit Bauchschaufeln und Bund haben einen unwesentlichen Einfluss des Druckstrahls gegenüber der Spülwirkung des Rades mit Bauchschufeln gezeigt. Die Spülwirkung der Bauchschufeln ist so dominant, dass keine erkennbare Unterschiede vor und nach der Wasserinjektion zu bemerken sind.

Das Laufrad ist verstopfungsfrei geblieben worden (**Bild 6.14**).



Bild. 6.14. Laufrad mit Bauchschaufeln nach dem Verstopfungsversuch

Summierend für *rotierendes* Laufrad *mit* Bauchschaufeln und Bund:

- Keine Verstopfungsbildung,
- Die Spülwirkung der Bauchschaufeln ist sehr dominant und
- Einsatz der Druckstrahlanlage nicht erforderlich

Die mögliche Wirkung der Wasserinjektion ist bei stehendem Laufrad mit Bauchschaufeln und Bund untersucht worden.

Der Radseitenraum, neben der Deckscheibe des Laufrades, ist für die Untersuchungen mit drei Prüftextilien bei 7, 9 und 11 Uhr, manuell und bei stehender Pumpe verstopft worden (**Bild 6.15a**).

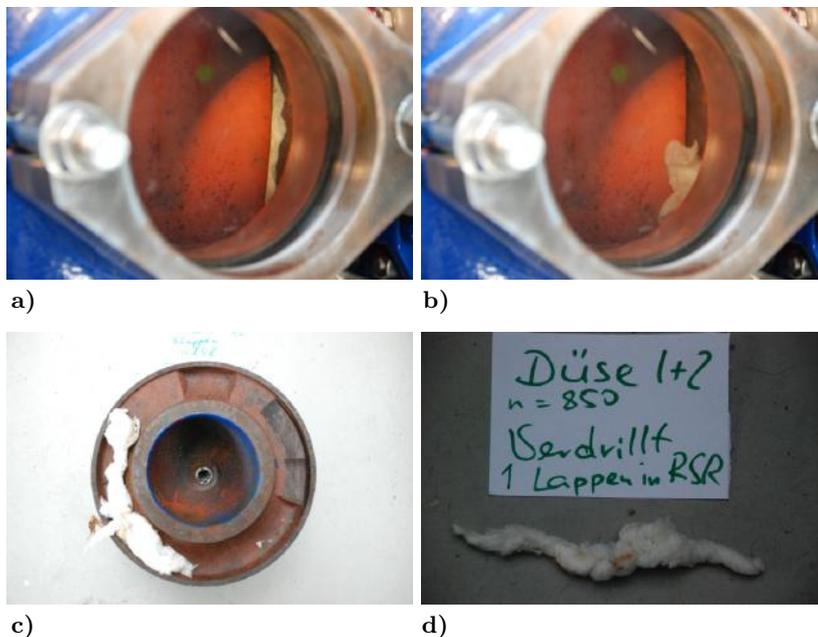


Bild. 6.15. Reinigungseffekt der Maßnahme Druckstrahl am stehendem Laufrad mit Bauchschaufeln und Bund: **a** vor Injektion, **b** nach Injektion, **c** Position der Prüftextilien (Zöpfe), **d** Zopf

Die Injektion des Wassers bewirkte das Einziehen der Prüftextilien in den Radseitenraum (**Bild 6.15b**). Nach der Demontage der Abwasserpumpe sind die drei Prüftextilien in einem fest verdrilltem Zustand aufgefunden worden (**Bild 6.15c**). Die Stärke des verdrillten Zopfes im Querschnitt ist deutlich größer als der Spalt im Radseitenraum (**Bild 6.15d**). Infolgedessen konnten weitere Reinigungsgänge die Zöpfe nicht beseitigen.

Summierend für *stehendes* Laufrad *mit* Bauchschaufeln und Bund:

- Prüftextilien werden bei Injektion in Radseitenraum hineingezogen,
- Prüftextilien verdrillen sich im Radseitenraum zu starken Zöpfen und
- Demontage der Pumpe für Reinigung erforderlich.

Im Weiterem wird die Auswirkung der Druckstrahlinjektion am gleichem Laufrad *ohne Bauchschaufeln und abgedrehtem Bund* zum Spalt des Radseitenraumes der Deckscheibe geprüft.

Bei einem rotierendem Laufrad ist die Spülwirkung der Radseitenraumströmung gegenüber der Druckstralinjektion weiterhin dominant. Die Prüftextilien verlassen Spalt des Radseitenraums (vgl. **Bild 6.16**).

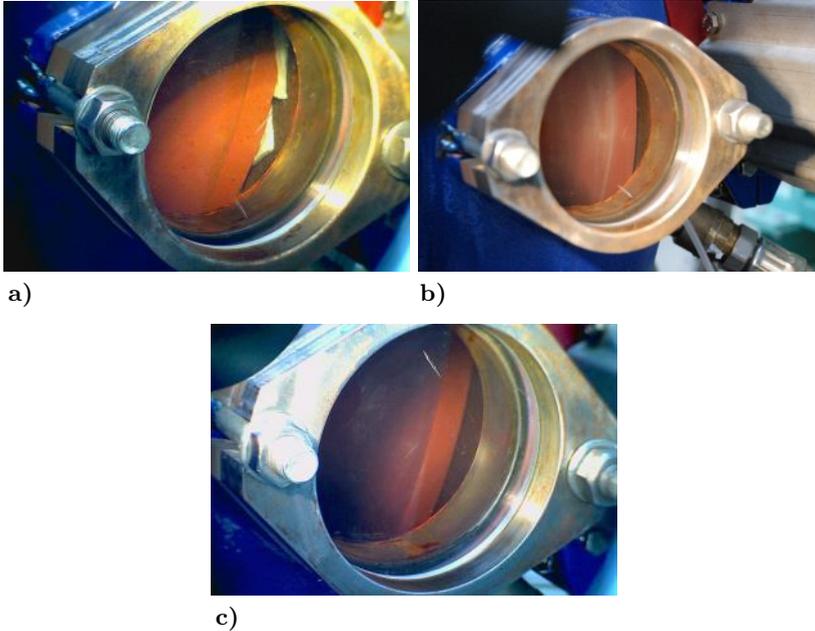


Bild. 6.16. Reinigungseffekt der Maßnahme Druckstrahl am Laufrad ohne Bauchschaufeln und ohne Bund im Betrieb (Nenn Drehzahl, Fördergrad 60%): **a** nach manueller Verstopfung, **b** nach Einschalten der Pumpe, **c** keine Prüftextilien im Radseitenraum

Summierend für *rotierendes* Laufrad *ohne* Bauchschaufeln und *ohne* Bund:

- Manuelle Verstopfung hergestellt,
- Injektion gestartet,
- Spülwirkung auch ohne Bauchschaufeln ist dominant und
- Einsatz der Druckstrahlanlage nicht erforderlich.

Im letzten Schritt wird die Wirksamkeit der Maßnahme mit Druckstrahl an *stehendem* Laufrad *ohne* Bauchschaufeln und *ohne* Bund untersucht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen gleichen den Resultaten der Versuche an stehendem Laufrad mit Bauchschaufeln und Bund. Hier werden die Prüftextilien ebenfalls durch Wasserinjektion verdrillt und in den Radseitenraum hineingezogen.

Die Reinigung des Radseitenraums ist größtenteils ohne Demontage der Pumpe möglich, da die glatte Deckscheibe ohne Bauchschaukel keine Hohlräume für eine Zopfbildung bleibt.

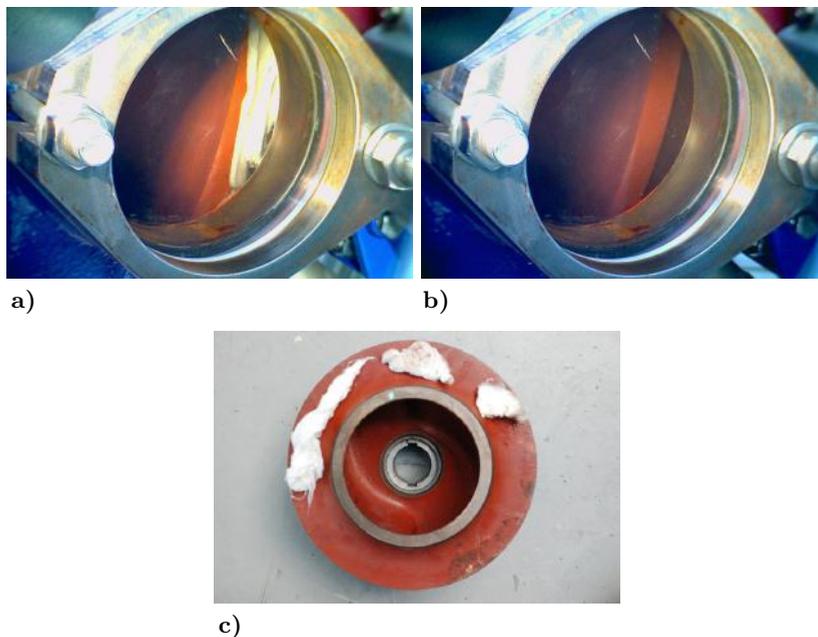


Bild. 6.17. Reinigungseffekt der Maßnahme Druckstrahl am Laufrad ohne Bauchschaukel und ohne Bund im Stillstand: **a** nach Manueller Verstopfung, **b** Injektion mit Düsen 1,2, **c** Nach Injektion

Summierend für *stehendes* Laufrad *mit* Bauchschaukel und Bund:

- Manuelle Verstopfung hergestellt,
- Injektion gestartet,
- Prüftextilien werden bei Injektion in Radseitenraum hineingezogen,
- Verdrillen der Prüftextilien im Radseitenraum zu starken Zöpfen und
- Demontage der Pumpe für Reinigung erforderlich.

Die Ergebnisse der gesamten Untersuchungen der Maßnahme Druckstrahl in der vorhandenen Ausführung können folgenderweise erläutert werden:

Die Auswirkung der aktiven Maßnahme mit Druckstrahl auf den Strömungszustand im Radseitenraum zeigte nur unwesentliche Unterschiede in der Druckverteilung im Umfang des Spiralgehäuses der Abwasserpumpe im Betrieb.

Durch Rotation des Laufrades entsteht die sekundäre Ausgleichsströmung im Radseitenraum, deren Spülwirkung über die Wirkung der aktiven Maßnahme mit Druckstrahl, unabhängig von eingestellten Volumenstrom, Druck oder Ort der Injektion, dominiert. Die Verstopfung wird dabei ausgespült, bevor die aktive Maßnahme zum Einsatz kommt. Das Gleiche gilt für ein Laufrad mit und ohne Bauchschaufeln.

Bei stehendem Laufrad wird ein gegenteiliger Effekt beobachtet. Unabhängig von Volumenstrom, Druck oder Ort der Injektion wird die Verstopfung in den Spalt des Radseitenraumes eingesaugt (**Bild 6.18**).

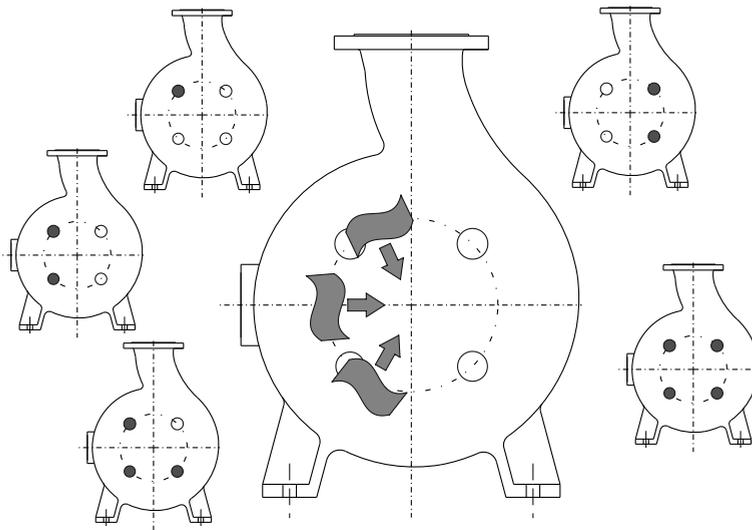


Bild. 6.18. Wirksamkeit der Maßnahme Druckstrahl bei variablem Düsen Einsatz Hydraulik: mit Bauchschaufeln und Bund; ohne Bauchschaufeln und abgedrehtem Bund

Das Verdrillen der eingesaugten Verstopfung ist beim Laufrad mit Bauchschaufeln, mit oder ohne Bund, stärker ausgeprägt, als mit glatter Deckscheibe ohne Bauchschaufeln und ohne Bund. Die Beseitigung der verdrillten Verstopfung bedingt teilweise die Demontage der Abwasserpumpe.

Während des *regulären Betriebes* filtert der in der Saugleitung, hinter dem **Einlauf**, eingebaute **Feststofftrenner** die absetzbaren Feststoffe im simulierten Abwasser ab. Das vorgereinigte Fluid passiert dann die hinter dem Feststofftrenner eingebaute Abwasserpumpe, **Hauptpumpe** genannt, und wird, durch **Zulauf** in dem **Saugraum**, im Kreis gefördert.

Wird die Kapazität des Feststofftrenners erreicht, wird der *Bypassbetrieb* über den Schieber und die **Hilfspumpe** gestartet.

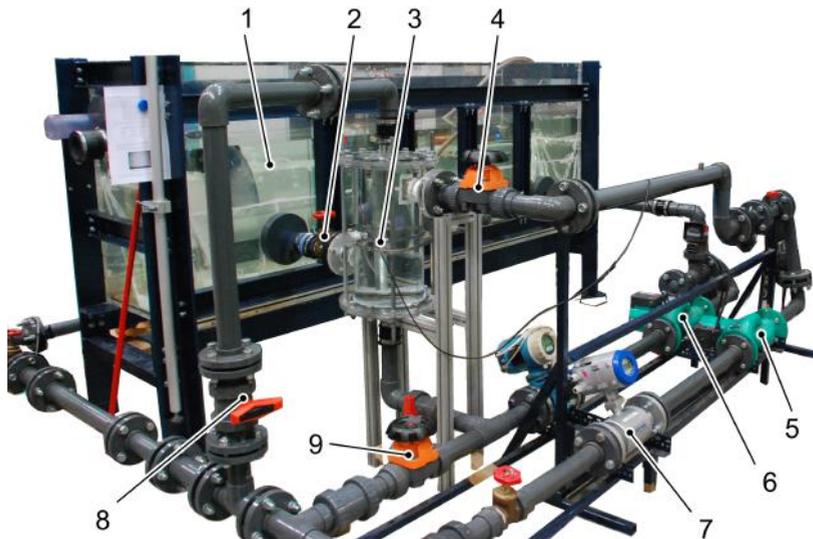


Bild. 6.20. Darstellung der Versuchsanlage Modell des Saugraumes eines Abwasserpumpwerkes ausgestattet mit der Modul *Bypass*: 1 Saugraum, 2 Sperrventil, 3 Feststofftrenner, 4 Sperrventil, 5 Hauptpumpe, 6 Hilfspumpe, 7 Durchflussmessgerät, 8 Drosselventil, 9 Kugelhahn

Die Überwachung des Betriebspunkts in regulärem Betrieb ist durch Volumenstromerfassung der Hauptpumpe, mit Hilfe von **MID 1**, gewährleistet worden. Die Werte sind manuell abgelesen und festgehalten worden. Bei Bypassbetrieb ist der Volumenstrom und die Durchflussmenge mit Hilfe des **MID 2** gemessen worden. Die Reduktion der Kapazität des Feststofftrenners wird durch optische Überwachung der transparenten Anlage (vgl. **Bild 6.20**) erkannt.

Die Untersuchungen fokussieren sich auf die Standard-*Betriebspunkte* der Abwasserpumpstation: *Nacht*, *Tag* und *Regen*. Die Parameter für die Betriebspunkte sind in der **Tabelle 6.14** zusammen gefasst worden.

Der *Verschmutzungsgrad* wurde nach dem Gewicht der zum Fluid zugefügten Menge der Verstopfungsstoffe definiert. Die Aufteilung erfolgte in vier Stufen: *leicht*, *mittel*, *stark*, *extrem*. Die Übersicht dazu gibt die **Tabelle 6.15**.

Tabelle 6.14. Betriebspunkte am Model der Abwasserpumpstation für Bypass Untersuchung

Betriebspunkt	Volumenstrom	Pegelstand
Nacht	0,27	236
Tag	0,95	476
Regen	2,21	676

Tabelle 6.15. Definition der absetzbaren Feststoffen für die Untersuchung der Maßnahme Bypass auf Volumen $1,2m^3$

Verschmutzungsgrad	Gewicht der Prüfstoffe in <i>g</i>
Leicht	200
Mittel	300
Stark	600
Extrem	2000

Als kurzfaserige Verstopfung wurden ca. 10cm lange Polypropylenschnüre verwendet, die steif und schwerer als Wasser sind. Langfaserige Verstopfung wurde durch ca. 10 cm Mullbinden realisiert. Diese sind weich und neigen stark zur Verzopfung (vgl. **Bild 6.21**).

**Bild. 6.21.** Feststoffe für Simulation des Abwassers für Untersuchung des *Bypasses*

Die Versuche mit langfaseriger Verstopfung wurden nur bei leichtem und mittlerem Verschmutzungsgrad durchgeführt, da das Volumen der Verstopfung wegen der kleineren Masse der Mullbinden schon bei 300 Gramm dem Volumen der Schnüre bei extremem Verschmutzungsgrad entsprach.

Bei aktiver Maßnahme *Bypass* werden folgende Einflussfaktoren auf Ihre Wirksamkeit hin untersucht:

- Bypassvolumen V_{BP} in m^3 ,
- Wirkzeit t_W in s ,

Darüber hinaus sind die Untersuchungen der aktiven Maßnahme *Bypass* nach ihrer *Funktionalitätserprobung* in Hinsicht auf *Energiebedarfsoptimierung* bearbeitet worden. Die Energiekosten von Feststofftrennsystemen werden in der Praxis für den Betreiber einen erheblichen Entscheidungsfaktor darstellen.

Die durchgeführten Experimente bestätigen die Wirksamkeit des Bypasssystems als eine präventive Lösung der Verstopfungsproblematik in einer Abwasserpumpstation. Die Festkörper und Fasern können im Feststofftrenner aufgefangen und über die Bypassleitung an der Abwasserpumpe vorbeigeleitet werden (**Bild 6.22**).

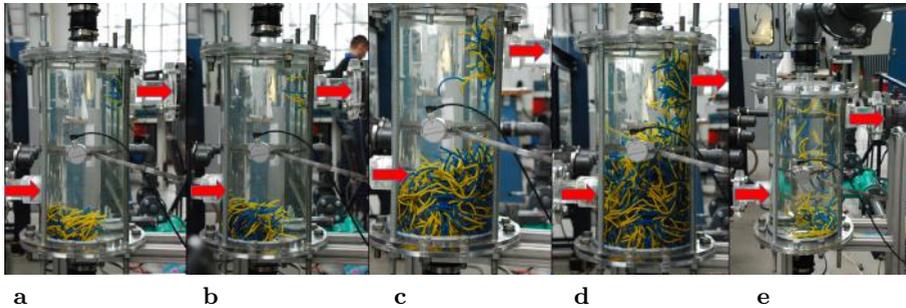


Bild. 6.22. Feststofftrenner während des Ablaufs der Bypass Maßnahme bei Betrieb Regenfall: **a-d** reguläres Förderbetrieb, **e** Bypassbetrieb. Strömungsrichtung von links unten nach rechts oben

Da die Feststoffe nicht zu der Pumpe vordringen, können die Pumpen mit kleinem Energiebedarf und hohem Wirkungsgrad eingesetzt werden, die bei einem normalen Abwasserpumpwerksbetrieb, wegen der kleinen Durchgangsquerschnitte, nicht in Frage kommen.

Das Bypasssystem kann mit entsprechenden Armaturen und einem Steuerungsprogramm vollautomatisch betrieben werden. Es bedarf keiner komplexen Betriebsgrößenauswertung und konnte mit geringem Aufwand in vorhandenen Diagnosesysteme implementiert werden.

Zum Beispiel lässt sich mit der Überwachung der Volumenstromänderung feststellen, wann der Bypassbetrieb eingeleitet werden muss. **Tabelle 6.16** präsentiert die Ergebnisse der Auswertung der maximal erreichten Minderung des Förderstromes in regulärem Betrieb durch Verblockung der abgefangenen

Feststoffe im Feststofftrenner. Diagramm auf dem **Bild 6.23** stellt die Werte grafisch dar.

Tabelle 6.16. Minderung des Volumenstroms der Abwasserpumpe im regulären Betrieb durch Abfangen der Fesstoffe im Feststofftrenner

Verschmutzung	Regen		Tag		Regen (Langfaserig)	
	Q	ΔQ	Q	ΔQ	Q	ΔQ
	in l/s	in %	in l/s	in %	in l/s	in %
Leicht	1,9	13,6	0,95	0	0,5	77,3
Mittel	1,8	18,2	0,95	0	0,5	77,3
Stark	1,6	27,3	0,95	0	-	-
Extrem	1,3	40,9	0,85	10,5	-	-

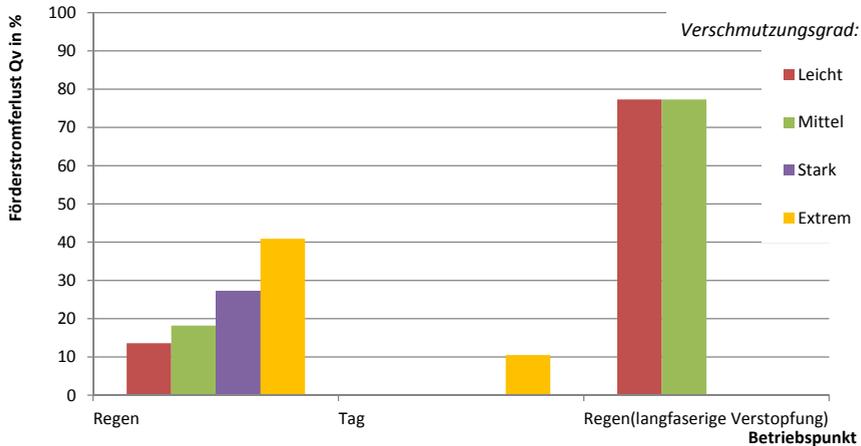


Bild. 6.23. Minderung des Volumenstroms der Abwasserpumpe im regulären Betrieb durch Abfangen der Feststoffe im Feststofftrenner in %

Die Tabelle und das Diagramm beinhalten keine Ergebnisse zu Untersuchungen im Betriebspunkt *Nacht*. Experimente im Betriebspunkt *Nacht* haben keine Änderung des Volumenstroms gezeigt. Auf Grund des geringen Volumenstroms, und als Folge geringen Anströmungsgeschwindigkeiten, lagern sich die Feststoffe bereits im Saugraum ab und werden *nicht* zum Feststofftrenner weiter geleitet (**Bild 6.24**).

Ähnliche Ablagerungen erscheinen während der Versuchsfahrten im Betriebspunkt *Tag*. Nur diesmal sammeln sich die Feststoffe auf dem Boden des Feststofftrenners. Mit Steigern des Verschmutzungsgrades von *leicht* bis zu *extrem*



Bild. 6.24. Betriebspunkt Nacht. Feststoffablagerung im Saugraum

ändert sich die Verteilung der Feststoffe auf dem Boden des Feststofftrenners gleichmäßig, bis sie schliesslich den Einlauf zur Druckleitung erreichen.

Danach bilden die Feststoffe eine Rampenform, die weitere ankommende Feststoffe nach oben leitet. Bei extremer Belastung mit Feststoffen werden Zulauf und Auslauf im Feststofftrenner teilweise verstopft (**Bild 6.25**). Es kommt zu Reduzierung des Volumenstroms bis auf %10.

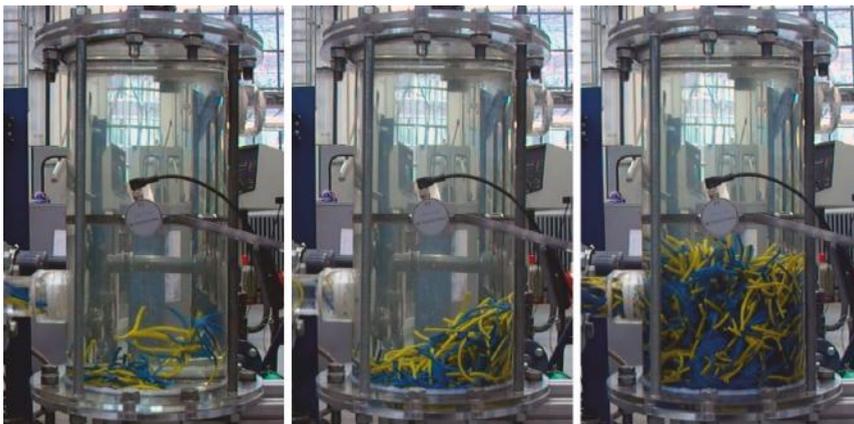


Bild. 6.25. Betriebspunkt Tag. Feststoffablagerung im Feststofftrenner. Strömungsrichtung von links nach rechts

Im Betriebspunkt *Regen* bleibt der Charakter der Verstopfung erhalten, die Intensität der Belegung der Rohrleitung und des Feststofftrenners nimmt jedoch zu (**Bild 6.26**). Die Volumenstromverluste steigen bei extremer Verschmutzung bis auf %49 des Betriebsförderstromes.

Beim Fördern der langfaserigen Stoffe (**Bild 6.27**) erreichen die Förderstromverluste ihren maximalen Grad. Selbst bei leichtem und mittel-

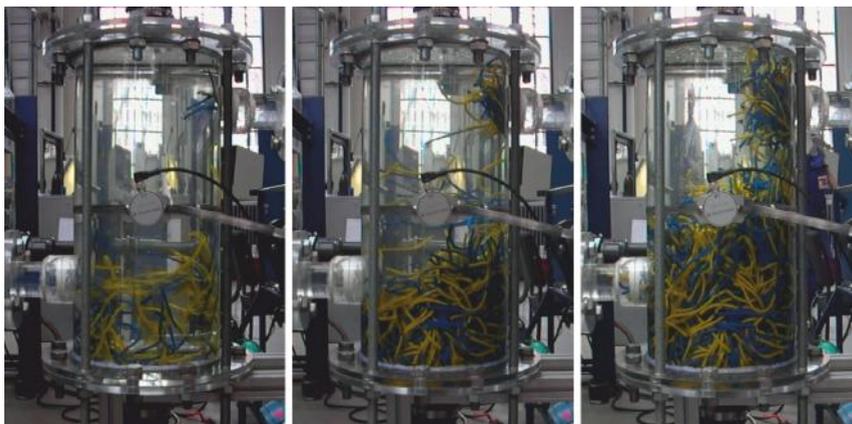


Bild. 6.26. Betriebspunkt Regen. Feststoffablagerung im Feststofftrenner. Strömungsrichtung von links nach rechts

leichtem Verschmutzungsgrad sind Förderstromverluste bis zu 77% zu erwarten. Die Feststoffe verstopfen den Feststofftrenner.

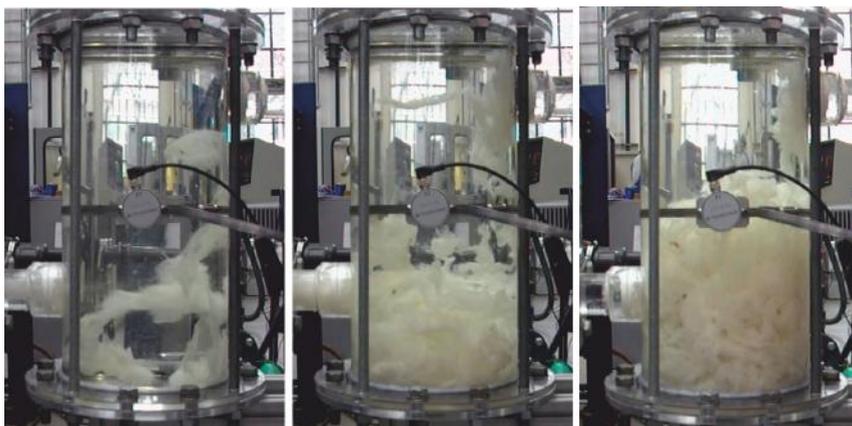
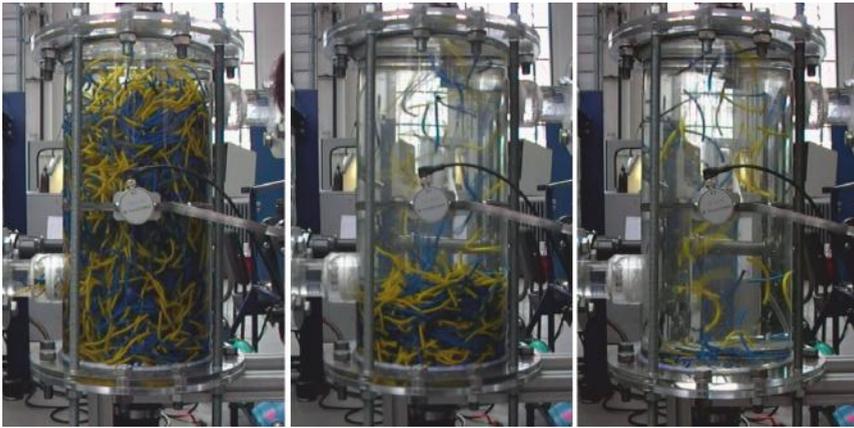


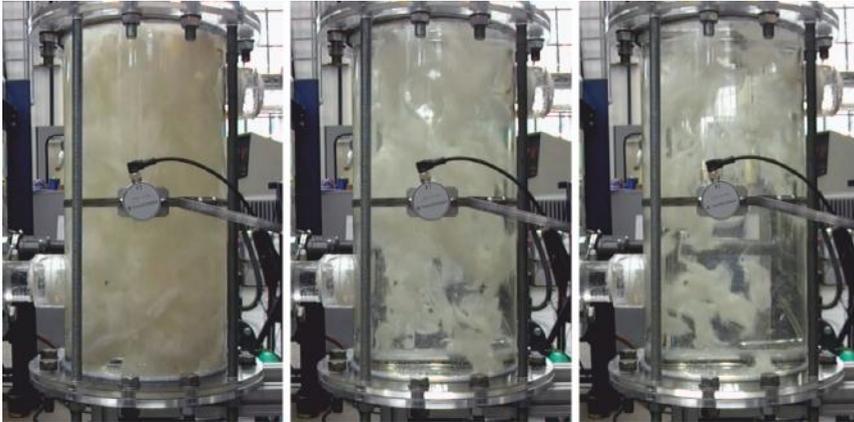
Bild. 6.27. Betriebspunkt Regen. Ablagerung der langfaserigen Stoffe (Mullbinden) im Feststofftrenner. Strömungsrichtung von links nach rechts

Nach Erschöpfen der Speicherkapazität des Feststofftrenners, im regulären Förderbetrieb, erfolgt der *Bypassbetrieb*. Die Feststoffe werden dabei durch die Bypassleitung in die Druckleitung der Abwasserpumpwerke weiter gefördert. Der Feststofftrenner wird freigespült (**Bild 6.28**).

Die Maßnahme ist für Feststoffe und langfaserige Stoffe als wirksam getestet worden. Das erforderliche Bypassvolumen für die Spülung der Feststoffe V_B



a



b

Bild. 6.28. Reinigung des Feststofftrenners im Bypassbetrieb. Strömungsrichtung von unten nach oben

wurde ermittelt und mit dem Volumen des Feststofftrenners V_F im Verhältnis $X = \frac{V_B}{V_F}$ dargestellt worden. Aus der **Tabelle 6.17** ist ersichtlich, dass eine für vollständige Spülung des Feststofftrenners das *vier- bis zwölffache* Bypass-Volumen erforderlich ist.

Als Erweiterung der geplanten Untersuchungen der Wirksamkeit der Maßnahme, erfolgte eine Funktionsoptimierung hinsichtlich der möglichen Reduktion des Energiebedarfs. Dabei ist das erforderliche Bypassvolumen für eine *Teilreinigung* des Feststofftrenners (**Tabelle 6.18**) ermittelt, und mit den Werten bei *vollständiger* Reinigung des Feststofftrenners (**Tabelle 6.17**) verglichen worden.

Tabelle 6.17. Bypassvolumen bei Vollreinigung des Feststofftrenners

Verschmutzung	Vollständig gereinigt von kurzen Fasern		Vollständig gereinigt von langen Fasern	
	V_B in m^3	X in 1	V_B in m^3	X in 1
Leicht	0,093	3,8	0,128	5,2
Mittel	0,109	4,5	0,140	5,7
Stark	0,218	8,9	-	-
Extrem	0,312	12,7	-	-

Tabelle 6.18. Bypassvolumen bei Teilreinigung des Feststofftrenners

Verschmutzung	Unvollständig gereinigt von kurzen Fasern		Unvollständig gereinigt von langen Fasern	
	V_B in m^3	X in 1	V_B in m^3	X in 1
Leicht	0,074	3,0	0,071	2,9
Mittel	0,088	3,6	0,082	3,3
Stark	0,095	3,9	-	-
Extrem	0,123	5,0	-	-

Im Gegensatz zur vollständigen Reinigung, bleibt bei der Teilreinigung nur eine unwesentliche Menge der Feststoffe im Feststofftrenner. Die optimierte Teilreinigung hat keine Auswirkung auf den nächsten regulären Betrieb der Anlage, da nach dem Bypassbetrieb nur ein unwesentlicher Anteil der Feststoffe im Feststofftrenner bleibt. Der nächste reguläre Betrieb bleibt störungsfrei. Der gelieferte Förderstrom der Anlage wird dadurch nicht beeinflusst.

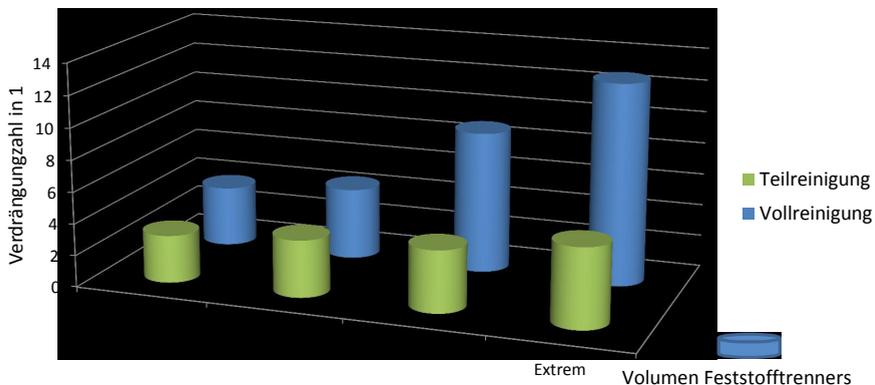


Bild. 6.29. Volumenbedarf für Voll- und Teilreinigung des Feststofftrenners als Zahl des Verdrängungsvolumen des Feststofftrenners

Die Vergleichsergebnisse sind in einem Diagramm (**Bild 6.29**) zusammen gefasst worden. Es ist ersichtlich, dass bei der *optimierten Teilreinigung* bis zur *dreifachen* Ersparnis des Bypassvolumens bei gleichwertiger Bypassförderung der Feststoffe erzielt werden kann.

Die Untersuchungen bestätigten die Vermeidung des Verstopfens der Abwasserpumpe mit Hilfe von einer mechatronischen Bypassvorrichtung. Die darauf wirkende Einflussfaktoren sind in der **Tabelle 6.19** im Bezug zu ihren Zielgrößen dargestellt worden.

Tabelle 6.19. Wirkung der aktiven Maßnahme mit Bypass in Abhängigkeit von Einflussfaktoren

Einflussfaktor	Wirkung
Volumenstrom	Bypassvolumen Mindestgeschwindigkeit (Schwebezustand)
Wirkdauer	Bypassvolumen übertragene Energie vermeidbare Stöße

6.5 Leitprofile im Saugrohr

Die Untersuchung der Wirkung des Leitprofiles im Saugrohr einer Abwasserkreiselpumpe erfolgt:

1. Ermittlung der Wirkung der Leitprofile im Saugrohr auf das Förderverhalten der Abwasserpumpe,
2. Ermittlung der Wirkung der Leitprofile auf den Drall im Saugrohr und
3. Ermittlung der Wirkung der Leitprofile auf das Verstopfungsverhalten der Abwasserpumpe (vgl. **Abschnitt 4.2**).

Die Messung des Dralls im Einlaufrohr ist mit einem Drallmeter (s. **Bild 6.30**) nach Vorgaben des Standards ANSI HI 98 9.8 [3] durchgeführt worden.

Das Drallmeter ist als ein Flügelrad mit vier geraden Schaufeln aufgebaut worden. Das Flügelrad rotiert frei in beide Richtungen auf einer Welle mit reibungsarmen Gleitlagern im Lagerträger. Die wesentliche Maße sind in der **Tabelle 6.20** zusammengefasst worden.

Die gemessene Umdrehung des Flügelrades pro Zeiteinheit wird zum Drallwinkel θ abgeleitet, der die Intensität des Dralls bezeichnet [3].

$$\Theta = \tan^{-1}(\pi \cdot d \cdot n/u) \quad (6.1)$$

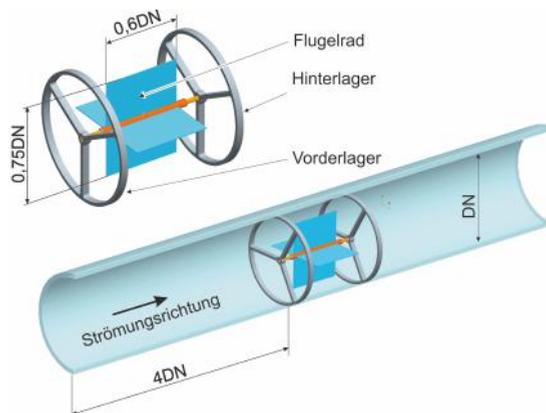


Bild. 6.30. Aufbau des Drallmeters [3]

Tabelle 6.20. Konstruktive Maße des Drallmeters

Bezeichnung	Einheit	Maß
Rohrinnendurchmesser	d mm	190
Zulaufstrecke (vor erstem Lager)	$4d$ mm	760
Nachlaufstrecke (nach zweitem Lager)	$4d$ mm	760
Laufradaußendurchmesser	$0,75d$ mm	144
Schaufellänge in Strömungsrichtung	$0,6d$ mm	114

u - durchschnittliche axiale Geschwindigkeit am Flügelrad in m/s

d - Rohrdurchmesser am Flügelrad in m

n - Rotation des Flügelrades in s^{-1}

Das **Förderverhalten** der Abwasserpumpe mit Leitprofilen im Saugrohr wird bei Gegenüberstellung der ermittelten Kennwerte bei Förderung des Klarwassers (vgl. **Kapitel 4.1**) ohne Leitprofile erläutert (**Bild 6.31**).

Die Förderhöhe zeigt mit steigendem Förderstrom bis auf 5% Einbuße im Verlauf.

Der Wirkungsgrad wird bis auf 6% beim Bestpunkt der Abwasserkreiselpumpe verbessert.

Der **Drall** im Saugrohr wird durch den Einsatz der Leitprofile beim Bestpunkt und beim Überlast bis auf 6% geringer (**Bild 6.32**). Bei starker Teillast $q = 40\%$ wird der Drall beseitigt. Eine Drallzunahme bis auf 3% wird beim leichten Teillast $q = 80\%$ beobachtet.

Das **Verstopfungsverhalten** der Abwasserkreiselpumpe wird als Gegenüberstellung zu den Ergebnissen der Untersuchungen zum allgemeinen Verstopfungsverhalten erklärt. Die Auswirkung der Leitprofile im Saugrohr

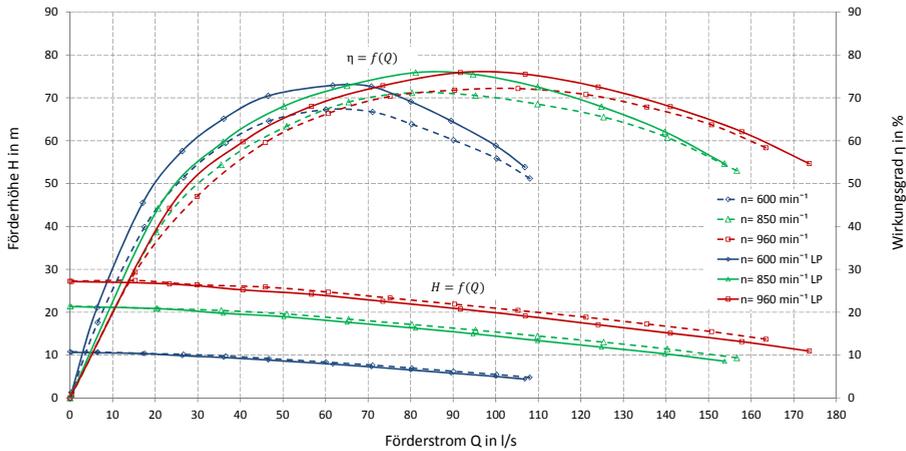


Bild. 6.31. Auswirkung des Leitprofiles auf Förderverhalten der Abwasserkreiselpumpe

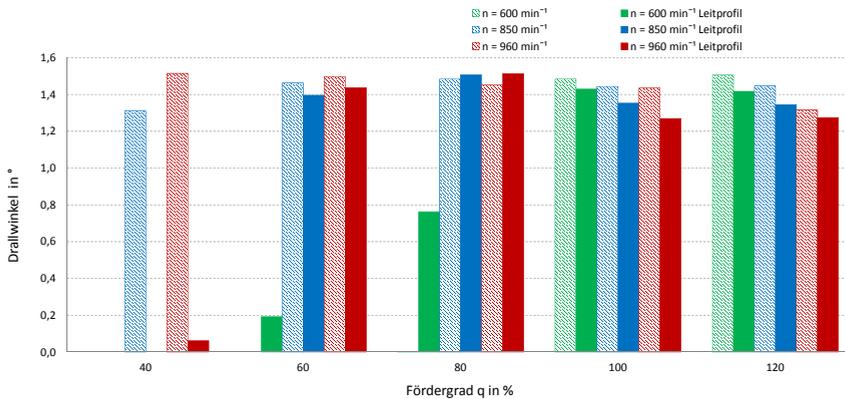


Bild. 6.32. Auswirkung des Leitprofiles auf Drall im Saugrohr der Abwasserkreiselpumpe. Drallwinkel absolut.

präsentieren die Diagramme *Geförderte* und *in der Pumpe Verbliebenen* Feststoffe im **Bild 6.33**.

Die Förderung der Feststoffe hat bei der Drehzahl $n = 600\text{min}^{-1}$ keine Verbesserung gezeigt. Die Förderung erweist Reduktion von 2 bis auf 30% je nach Fördergrad.

Die Förderung der Feststoffe bei Nenndrehzahl $n = 960\text{min}^{-1}$ sowie $n = 850\text{min}^{-1}$ ist verbessert worden von 3 bis auf 18 %, je nach Fördergrad.

Die Verstopfung der Abwasserkreiselpumpe, beim Einsatz der Leitprofile, hat eine negative Tendenz zu den Werten der geförderten Feststoffen. Die zuneh-

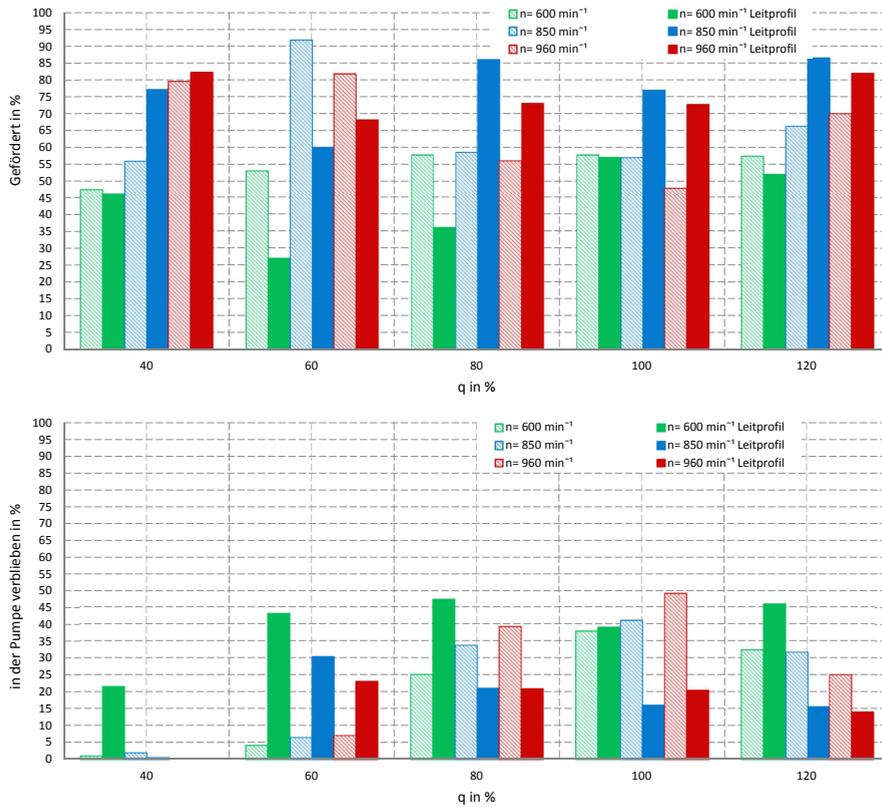


Bild. 6.33. Auswirkung des Leitprofiles auf Verstopfungsverhalten der Abwasserkreislumppe

mende Anfälligkeit ist bei Drehzahl $n = 600\text{min}^{-1}$ von 5 bis auf 40% beobachtet worden.

Die Verstopfungsanfälligkeit bei höheren Drehzahlen $n = 960\text{min}^{-1}$ sowie $n = 850\text{min}^{-1}$ und höheren Fördergraden $q = 80\text{...}120\%$ ist reduziert worden von 11 bis auf 30%.

Zusammengefasst, zeigt die aktive Massnahme die besten Ergebnisse, hinsichtlich Förder- und Verstopfungsverhalten der Abwasserkreislumppe, im Bereich höherer Drehzahlen oder auch höherer Fördergrade.

6.6 Rührwerke und Injektoren

Die Wirkung eines Rührwerkes und Injektors lässt sich am Modell eines Saugraumes eines Abwasserpumpwerkes der Berliner Wasserbetriebe bei gängigen Betriebszuständen untersuchen (**Bild 6.34**).

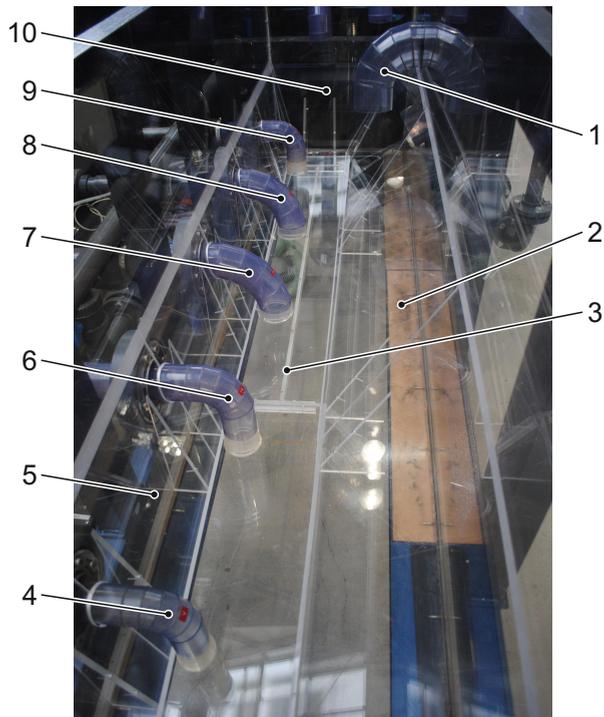


Bild. 6.34. Modell des Saugraumes eines Abwasserpumpwerkes: **1** Zulauf, **2** Berme, **3** Sohle, **4** Einlaufkrümmer II, **5** Berme, **6** Einlaufkrümmer III, **7** Einlaufkrümmer IV, **8** Einlaufkrümmer V, **9** Einlaufkrümmer VI, **10** Berme

Die Einstellungen für die jeweils gefahrenen Betriebszustände sind in der **Tabelle 6.21** zusammen gefasst worden. Der Pegelstand im Einlaufbehälter ist für jeden eingestellten Betriebspunkt angepasst worden.

Die Untersuchung ist in folgende Versuchsreihen untergegliedert worden:

- Ermittlung des Strömungs- und Sedimentationszustandes im Saugraum,
- Erprobung des Injektors im Saugraum,
- Erprobung des Rührwerkes im Saugraum,
- Analyse und Vergleich der Wirkung des Injektors und Rührwerkes.

Tabelle 6.21. Übersicht Betriebspunkte zur Untersuchung am Modell Saugraum

Betriebspunkt	Volumenstrom Q [l/s]		Pumpe Einlauf	Pegelstand [müNN]
	Original	Modell		
Nacht	85	0,27	II	29,1
Spülprogramm	200	0,63	II	29,1
Tag	250	0,79	VI/V	31,0
Tag	300	0,95	V	31,5
Regen	700	2,21	III+IV	33,5

Die erzielte Wirkung wird mit folgenden Vorgängen beschrieben:

- Suspendieren
- Homogenisieren

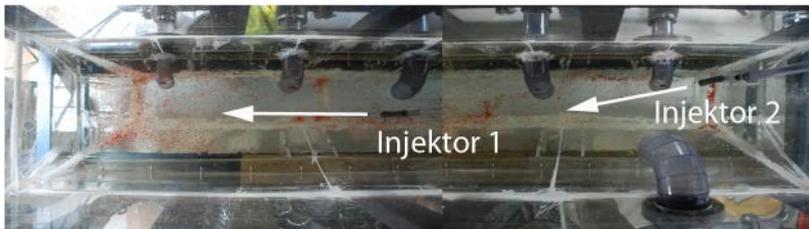


Bild. 6.35. zwei Injektoren am Modell Saugraumes Abwasserpumpwerkes bei Nachtbetrieb

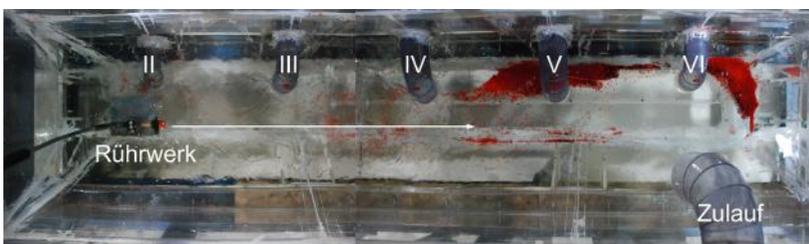


Bild. 6.36. Rührwerk am Modell Saugraumes Abwasserpumpwerkes bei Nachtbetrieb

Zur Visualisierung der Strömungsverläufe und Sedimentationsgebiete wird ein Granulat (**Bild 6.37**) aus Polyvinylchlorid verwendet. Die Partikel sind rot und zylinderförmig mit dem Durchmesser $\varnothing 2\text{mm}$ und Länge von ca. 2mm .



Bild. 6.37. Kunststoffgranulat

Ein Kunststoffgranulat mit etwas höherer Dichte (1090g/l) wie Wasser, ist gewählt, um die störungsarme Nachvollziehbarkeit der Strömungsverläufe und Sedimentation zu ermöglichen.

Der typische Versuchsablauf der Modelluntersuchung ist in der **Tabelle 6.22** aufgelistet worden.

Tabelle 6.22. Versuchsablauf bei der Versuchseinrichtung Modell Saugraum

Nr. Aktion
1. Pegelstand im Saugraum wird eingestellt
2. Einlauf $[I - IV]$ je nach Betriebspunkt geöffnet
3. Pumpe wird gestartet
4. Volumenstrom wird eingestellt
5. Beruhigungszeit 20min einhalten
6. erste Partikelzugabe 300ml im näheren Bereich des Zulaufs
7. Verteilungszeit 10min einhalten
8. zweite Partikelzugabe 300ml im näheren Bereich des Zulaufs
9. Verteilungszeit 10min einhalten
10. dritte Partikelzugabe 300ml im näheren Bereich des Zulaufs
11. Verteilungszeit 10min einhalten
12. Zustand wird erfasst und dokumentiert (Foto, Skizze, Protokoll)

Die Untersuchung der Strömungs- und Sedimentationszustände im Saugraum am Model bestätigt die Entstehung der Ablagerungen in den Totwassergebieten. Die Sedimentation der Feststoffen (rote Partikel) weist auf die entstehenden Totwassergebiete hin (**Bild 6.38**).

Die Analyse der visuellen Ergebnisse zeigt, dass die Totwassergebiete im Saugraum entstehen auf Grund:

- der Verwirbelungen in der Ecken,
- geringe Geschwindigkeit des Fluides an der Sohle des Saugraums,
- unkoordinierten Austausches des Fluides von Zulauf des Saugraums, bis zum Einlauf der je nach Betriebspunkt aktive Pumpe.

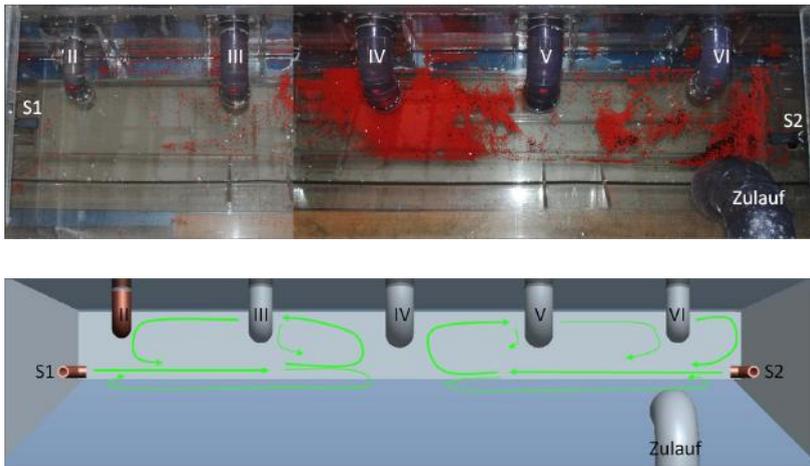


Bild. 6.38. Spülbetrieb, Istzustand

Die Erprobung der Wirkung des Rührwerkes und Injektoren auf Strömungs- und Sedimentationszustände im Saugraum brachte folgende zusammenfassende Erkenntnisse:

Einsatz eines Injektors unterstützt die Zulaufströmung. Die Position des Injektors soll aufwärts der Zulaufströmung gewählt werden (**Bild 6.39**). Positionieren gegen eine Berme erhöht den Staudruck vor der Berme und regt dadurch die Ausgleichzirkulation an. Ausrichtung des Injektors in den Saugraum bringt weniger Effekt auf Grund der Zerstreuung der Strahl-Energie auf größerem Raum.

Einsatz eines Rührwerkes regt die vertikale Zirkulation im Saugraum an. Die Ausrichtung des Rührwerkes soll in den Raum gegen die Zulaufströmung gewählt werden (**Bild 6.40**). In dieser Position kommt es zur Unterstützung der Aufwärtzströmung. Neben der horizontalen Hauptströmung sind zusätzlich vertikale Strömungen vorhanden, welche Einfluss auf die Sedimentation im Sohlenbereich oder die Schwimmschlammdecke an der Wasseroberfläche nehmen.

Der qualitative Vergleich der Wirkung des Injektors und Rührwerkes miteinander zeigt, dass der Einsatz des Injektors stark beeinflusst die Sedimentation auf dem Boden des Saugraumes.

Das Rührwerk beeinflusst die Sedimentation am Boden weniger, jedoch es aktiviert die Mischvorgängen auf der Wasseroberfläche. Sein Einsatz gegen die Bildung der Schwimmschlammdecke kann bei geeignetem Pegelstand damit begründet werden.

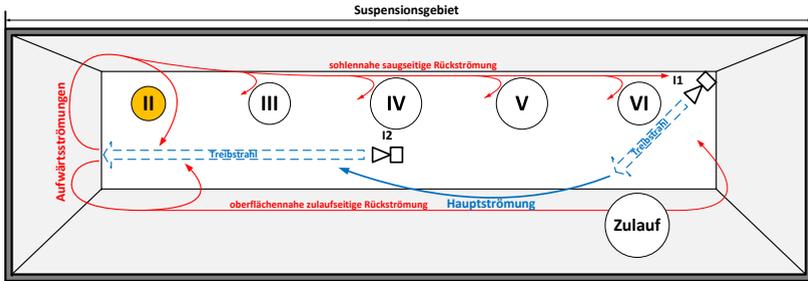
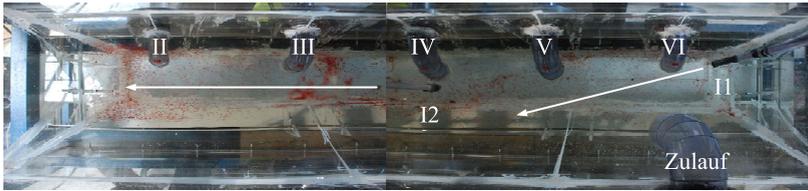


Bild. 6.39. Spülbetrieb mit Injektoren I1 and I2

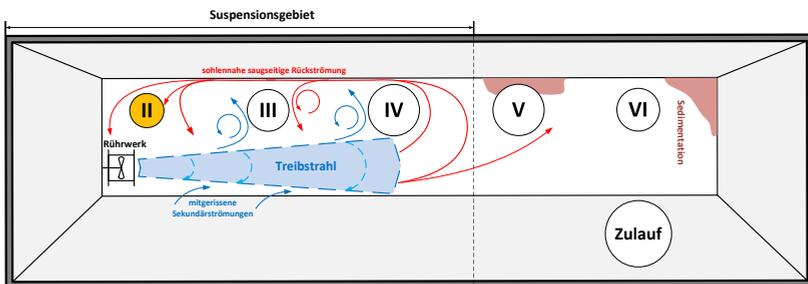
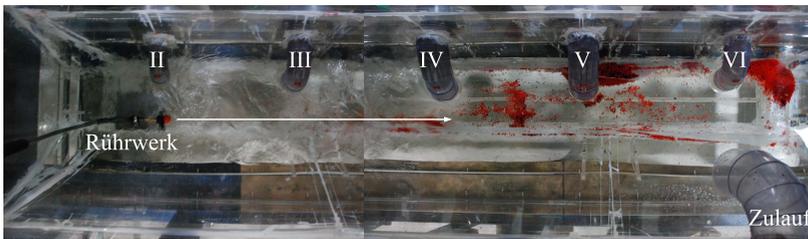


Bild. 6.40. Spülbetrieb mit Rührwerk

Schlussfolgerung

Optisches Beobachten des Verstopfungsverhaltens

Bei Abwasserpumpen stehen die beobachteten Verstopfungsphänomene in starkem Zusammenhang mit ihrer Hydraulik. Der Typ, die geometrische Dimensionen der Hydraulik und daraus resultierende Strömungsverhältnisse prägen das Verstopfungsverhalten der Abwasserpumpe.

Die in dieser Arbeit angewandte Methodik hat es ermöglicht, das Verstopfungsverhalten einer Abwasserpumpe sowohl mit Hilfe simulierten Abwassers als auch simulierter Fördervorgänge zu beschreiben.

Die Ergebnisse stehen im Zusammenhang mit, während der Situationsanalyse der im Berliner Abwassernetzwerk beobachteten Störfällen. Die gewonnene Erkenntnisse können bei der Wahl der passende Abwasserhydraulik hinsichtlich Verfügbarkeit der Abwassertechnik angewendet werden.

Messgrößen bei Verstopfung

Die neben den beobachteten Verstopfungsphänomenen registrierte Änderung wichtiger Messgrößen ermöglicht zu dem Erkennen nicht nur bereits entstandener, sondern auch sich anbahnender Verstopfung.

Die Informationen über die Änderung des Förderstroms, Förderdruckes sowie des Saugdruckes erlauben Rückschlüsse hinsichtlich bei der Wahl der passenden Abwasserhydraulik im Bezug auf Optimieren des Energiebedarfs.

Es ist nachgewiesen, dass leichte Änderungen der Messgrößen (innerhalb des 5% ihres Effektivwertes) und zeitliche Änderung des statischen Druckes als Indikatoren für einen sich anbahnenden Verstopfungsaufbau verwendet werden können.

Zusammen mit beobachteten Verstopfungsphänomene bilden nach dieser Methodik analysierte Messsignale eine belastbare Basis für den Aufbau eines Diagnosesystems, ausgerüstet mit gezielt eingesetzten aktiven Maßnahmen. Die in dieser Arbeit erprobten, aktiven Maßnahmen lassen sich im Wesentlichen wie folgt charakterisieren.

Reinigungszyklus

Die gewonnenen Kenntnisse über die Wirksamkeit der aktiven Maßnahme Reinigungszyklus kann in der Praxis bei drehzahlgeregelten Abwasserpumpen durch vorprogrammieren des Frequenzumformers leicht umgesetzt werden.

Die dafür notwendige konstruktive Optimierung der Komponenten der Kreiselpumpe, wie Antriebswelle, Laufradbefestigung und die für beide Rotationsrichtungen ausgelegte Gleitringdichtung, muss beachtet werden. Der Fokus der Maßnahme liegt auf präventiver Reinigung der Abwasserpumpe bei leichtem und mittlerem Verstopfungsgrad.

Rückspülen

Das Freispülen der Pumpe und Saugleitung kann als Präventivmaßnahme die Betriebssicherheit enorm erhöhen. Für das Aufrüsten der Abwasserpumpenanlage können die im Abwasserpumpwerk vorhandenen Wasser- und Energiequellen genutzt werden. Als Fluid für das Rückspülen kann reines Wasser oder für größere Dimensionen vorgereinigtes Abwasser genutzt werden.

Das Rückspülverfahren ermöglicht den sicheren Start der Abwasserpumpe ohne hohe Verstopfungsgefahr. Das in Saugraum zurück gespülte Schmutzstoffe können nach dem sicheren Start der Abwasserpumpe weiter transportiert werden.

Druckstrahl

Die Wirkung der aktiven Maßnahmen mit Druckstrahl wurde hinsichtlich der grundlegenden Einflussfaktoren untersucht.

Die Spülwirkung im Radseitenraum vom rotierenden Laufrad ist so dominant, dass der zusätzliche Einfluss auf den Spüleffekt bei Klarwasserinjektion in den Radseitenraum nicht beobachtet werden kann. Die Injektion des Klarwassers bei stehendem Laufrad verursacht das Verdrillen der im Radseitenraum vorhandene Feststoffe.

Bypass

Das Konzept, die für Abwasserpumpen kritische Verstopfungen durch Bypass-Leitung an der Abwasserpumpe vorbei zu fördern, kann die Sicherheit der Abwasserförderanlage erhöhen. Ausgerüstet mit Verstopfungsfängern in der Saugleitung der Abwasserpumpe und einer entsprechenden Steuerung für den Wechsel von Förder- auf Bypassbetrieb kann die Massnahme zu einer permanenten Betriebsprozedur entwickelt werden.

Leitprofile im Saugrohr

Die aktive Maßnahme eliminiert den Drall im Saugrohr vor der Abwasserpumpe.

Die Leitprofile können bei zusätzlicher Steuerung flexibel ins Saugrohr eingerückt werden. Die Beweglichkeit der Leitprofile sollte bei gezieltem Einsatz genutzt werden, um die energetische Effizienz und die Förderung der Feststoffe zu verbessern.

Rührwerke und Injektoren

Das Sedimentationsverhalten im Saugraum eines Abwasserpumpwerkes kann durch den Einsatz der Injektoren verbessert werden. Die Rührwerke können zusätzlich gegen die Schwimmschlammdecke eingesetzt werden.

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die Untersuchungen von Störungen in Abwasserförderanlagen und deren Beseitigung.

Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen sind die Ursachen ermittelt worden, die für den Verstopfungsaufbau verantwortlich sind. Für Beseitigung der ermittelten Störungen sind aktive Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit erprobt worden.

Die auftretenden Störungen sind an einem Modell 1 : 3 - eines Pumpwerks im Labor simuliert worden. Die Beobachtung des Verstopfungsaufbaus der Abwasserhydraulik erfolgt an einer Abwasserpumpe in der realen Dimension.

Zur Simulation des Abwassers sind reißfeste Textilien in fest definierter Größe in einem für Abwasser typischen Feststoffanteil dem Wasser zugefügt worden.

Im Ergebnis ist das Verstopfungsverhalten der Abwasserpumpe bei verschiedenen Betriebszuständen ermittelt worden.

Die Untersuchung der Verstopfungserscheinungen im Saugraum des Abwasserpumpwerkes ist am Modell 1 : 10 eines realen Abwasserpumpwerkes durchgeführt worden.

Die Ermittlung der Strömungszustände sowie die Beurteilung des Sedimentationsverhaltens erfolgte mit dem simulierten Abwasser durch die Zugabe eines definierten Anteils der Feststoffe in Partikelform zu dem Wasser.

Typische Merkmale, die bei Simulation von Störungen auftreten, sind über geeignete Sensorik und Messtechnik nachgewiesen. Diese bilden die Grundlage für spätere Diagnosesysteme.

Die Ausarbeitung und Erprobung der aktiven Maßnahmen ist auf beobachtete Verstopfungsphänomene ausgerichtet. Im Fokus steht nicht nur allein die Beseitigung des Verstopfungsaufbaus sondern auch ein aktives präventives Agie-

ren durch eine geeignete Massnahme, die in einem komplexen Abwassersystem durch ein Diagnosesystem gestartet werden kann.

Die Auswirkung der einzelnen Einflussparameter auf Reinigungseffekt für jede Maßnahme ist im Ansatz untersucht und bewertet worden. Die Zusammenhänge können beim Gestalten der Maßnahme für reale Abwassersysteme angewendet werden.

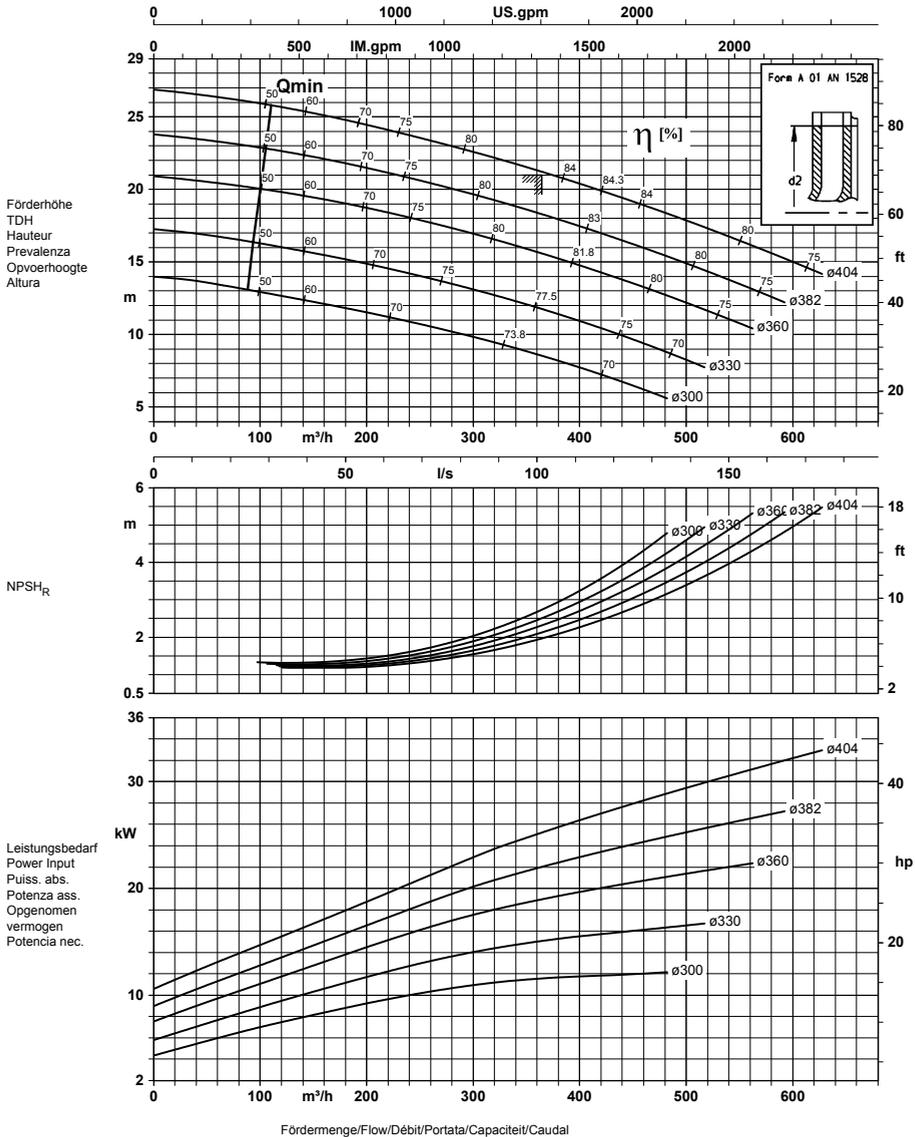
A

Datenblätter

Die nachfolgenden Datenblätter erläutern Systemparameter, Funktionsweise, Anschlussvarianten und Betriebsarten zu dem im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Anlagenkomponenten.

- Prozessschema der Versuchsanlage,
- Kennlinien Abwasserpumpe Sewatec K150-400,
- Kennlinien Rückspülpumpe Etanorm 80-400,
- Kennlinien Druckstrahlpumpe Börger PL200.

Baureihe-Größe Type-Size Modèle	Tipo Serie Tipo	Nenn Drehzahl Nom. speed Vitesse nom.	Velocità di rotazione nom. Nominaal toerental Revoluciones nom.	Laufrad-ø Impeller dia. Diamètre de roue	ø girante Waaier ø ø rodeté	 KSB Aktiengesellschaft Postfach 200743 06008 Halle (Saale) Turmstraße 92 06110 Halle (Saale)
Sewatec K 150-400		975 1/min				
Projekt Project Projet	Progetto Projekt Proyecto	Angebots-Nr. Quotation No. N° de l'offre	N° oferta Ofertierr. N° oferta	Pos.-Nr. Item No. N° de pos.	N° pos Pos. nr. N° de art	

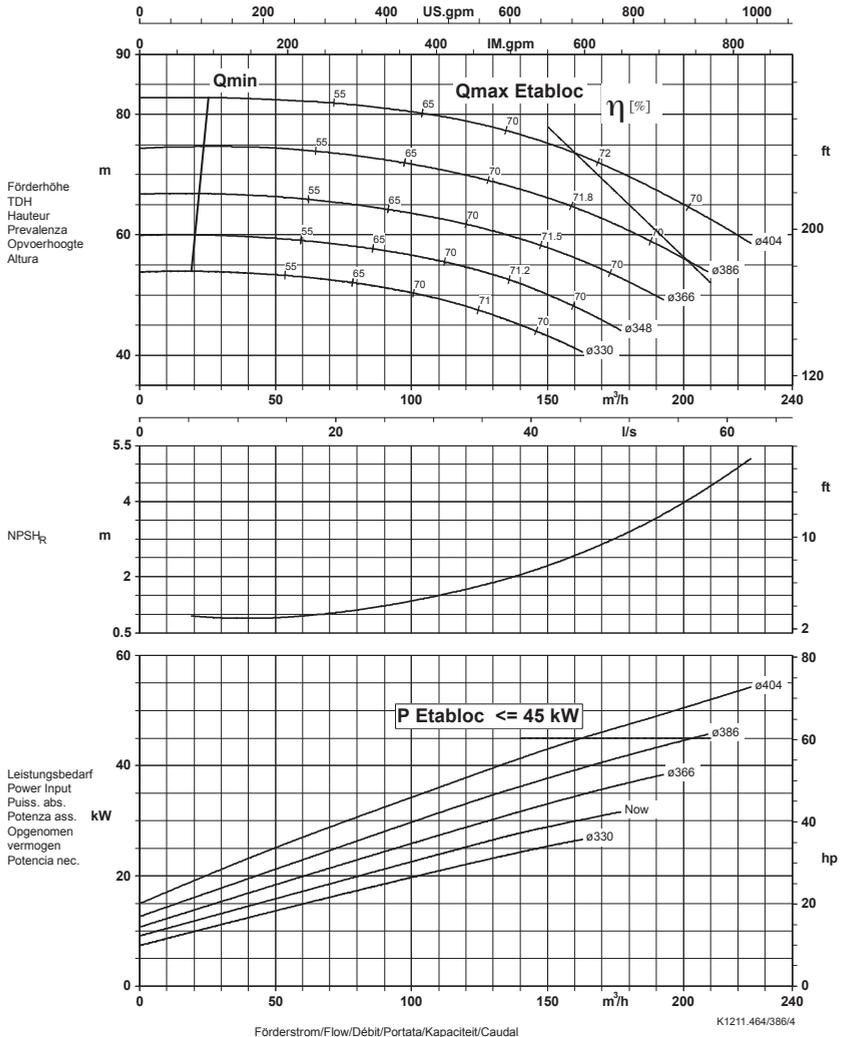


Kugeldurchgang/Free passage/Passage intégral
 Passaggio libero/Kogeldoorgang/Paso libre

76 mm
 76 mm

Aus Kurve K43190s/0* gerechnet
 T153-Ha, Müller Eberhard, 2010-04-08

Baureihe-Größe Type-Size Modèle Etanorm 80-400 Etabloc	Tipo Serie Tipo	Nenn Drehzahl Nom. speed Vitesse nom. 1750 1/min	Velocità di rotazione nom. Nominal rotational Revoluciones nom.	Lauf rad-ø Impeller Dia. Diamètre de roue	ø Girante ø Wasier ø Rodete	 KSB Aktiengesellschaft Unternehmensbereich Pumpen Industrie- und Wassertechnik Postfach 1725, 67225 Frankenthal Joh.-Klein-Str. 9, 67227 Frankenthal
Projekt Project Projet	Progetto Project Proyecto	Angebots-Nr. Project No. No. de l'offre	Offerta-No. Offerten. Offerta-No.	Pos.-Nr. Item No. No. de pos.	Pos.-Nr. Positionr. Pos.-Nr.	

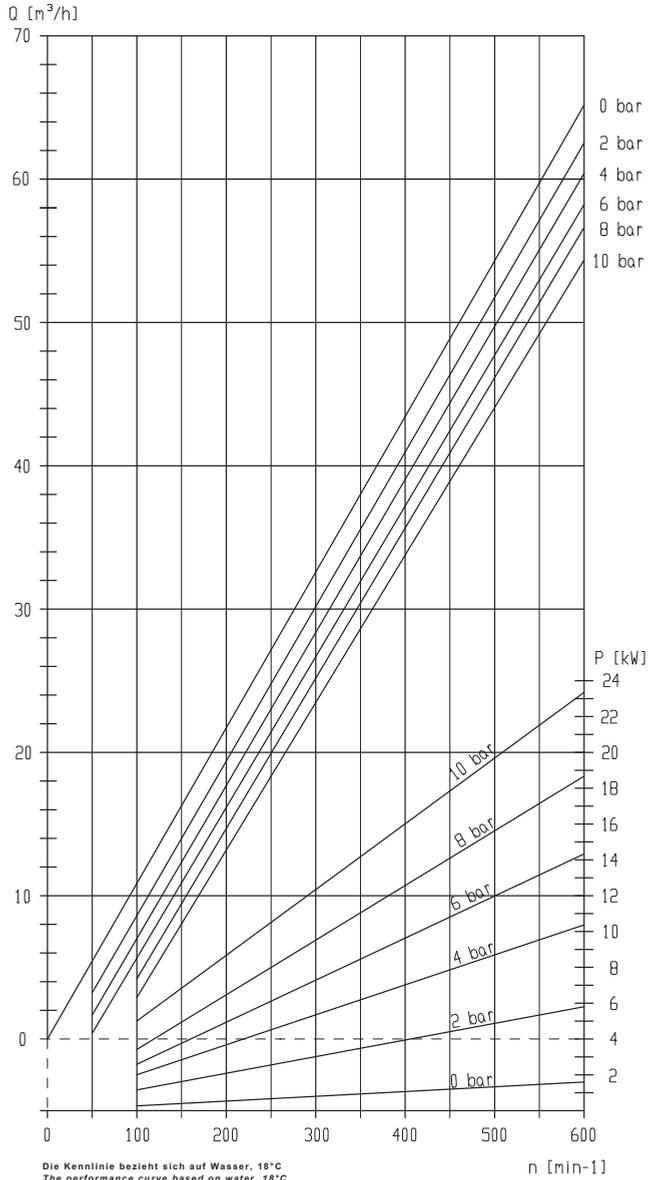


Lauf rad austrittsbreite/Impeller outlet width/Largeur à la sortie de la roue 13,0 mm
 Luce della girante/Wasier uittredebreedte/Anchura de salida rodete 13,0 mm



PL 200

Kennlinie
performance curve



Die Kennlinie bezieht sich auf Wasser, 18°C
The performance curve based on water, 18°C

B

Ergebnisse der Untersuchungen zum Verstopfungsverhalten

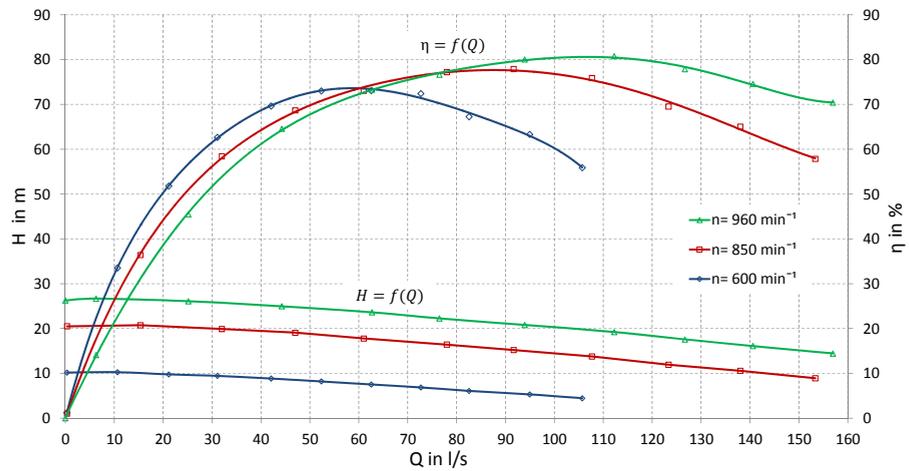
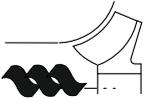
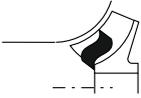
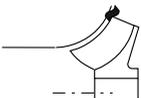
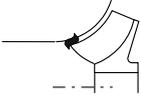


Bild. B.1. Kennlinien der Versuchsmaschine KSB Sewatec K150-400

Tabelle B.1. mögliche Verstopfungsszenarien als zusammenwirkende Ursachen des Verstopfungsaufbaus.

Verstopfung	Ursache
Saugraum 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Toträume 2. Verwirbelungen 3. Sedimentation 4. Aufschwebende Stoffe 5. Verwebung/Verzopfung
Saugrohr 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Geometrie des Einlaufes 2. Drall im Einlauf 3. Teillastwirbel 4. Rückströmung aus der Pumpe 5. häufige zyklische Fahrweise
Laufradeitritt 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Betrieb unter leichtem Teillast 2. Langfaserige Stoffe 3. nicht pumpbare Stoffe 4. Belegung der Schaufeleintrittskante 5. häufige zyklische Fahrweise
Laufradkanal 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Betrieb unter leichtem Teillast 2. langfaserige Stoffe 3. nicht pumpbare Stoffe 4. Belegung der Schaufeleintrittskante
Radseitenraum 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Toträume im Gehäuse 2. Betrieb unter starkem Teillast 3. Assymetrische Druckverteilung am Umfang des Spiralgehäuses 4. verstopfter Dichtspalt
Dichtspalt 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Feststoffe im Spiralgehäuse 2. offene Geometrie des Radseitenraumes 3. große Weite des Dichtspaltes 4. Betrieb unter starkem Teillast 5. Starke Spaltströmung 6. häufige Abdrosselung

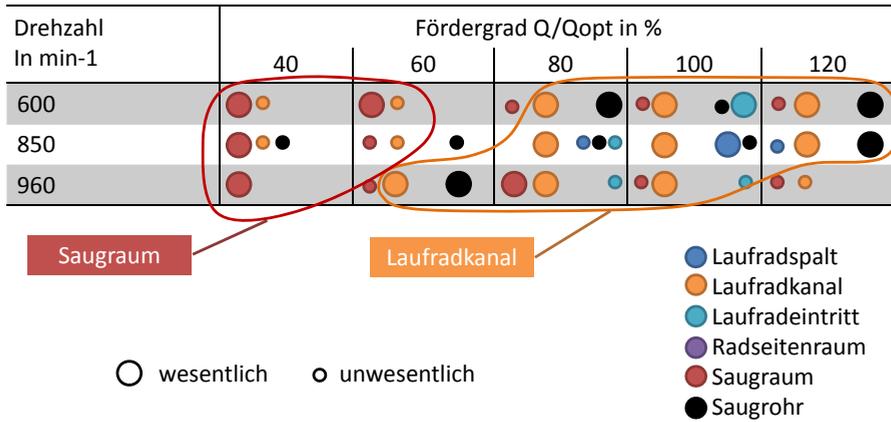


Bild. B.2. Übersicht des Verstopfungsverhaltens der Abwasserpumpe in Abhängigkeit von der Drehzahl n und dem Fördergrad q .

40%



60%



80%



100%



120%



Kanal 1

Kanal 2

Kanal 3

Bild. B.3. Verstopfung des Laufrades bei Drehzahl $n = 600\text{min}^{-1}$ abhängig vom Fördergrad $q = [40 \dots 120] \%$

40%



60%



80%



100%



120%



Kanal 1

Kanal 2

Kanal 3

Bild. B.4. Verstopfung des Laufrades bei Drehzahl $n = 850 \text{min}^{-1}$ abhängig vom Fördergrad $q = [40 \dots 120] \%$

40%



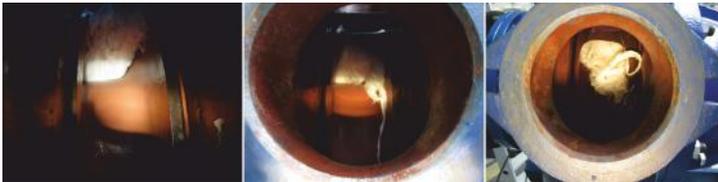
60%



80%



100%



120%



Kanal 1

Kanal 2

Kanal 3

Bild. B.5. Verstopfung des Laufrades bei Drehzahl $n = 960 \text{min}^{-1}$ abhängig vom Fördergrad $q = [40 \dots 120] \%$

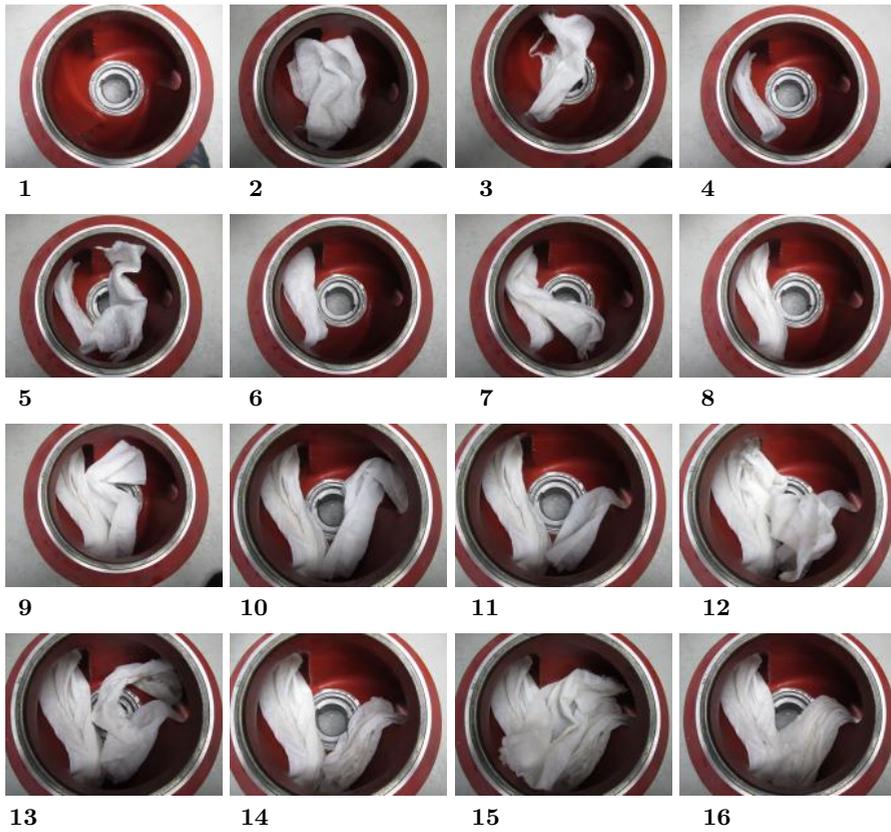
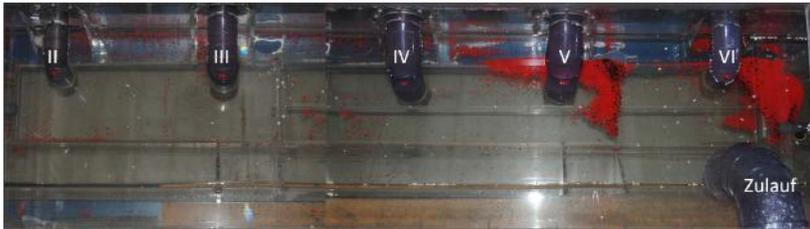


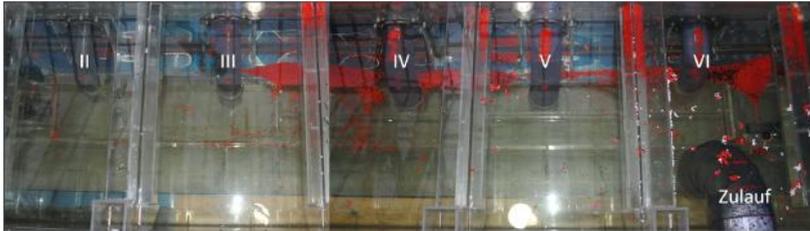
Bild. B.6. Nachgestellte Darstellung des möglichen Verstopfungsaufbau im Lauf-
radeintritt und Laufradkanlle des geschlossenen Mehrkanallauftrads bei Drehzahl
 $n = 850 \text{min}^{-1}$, Fördergrad $q = 80\%Q/Q_{opt}$

C

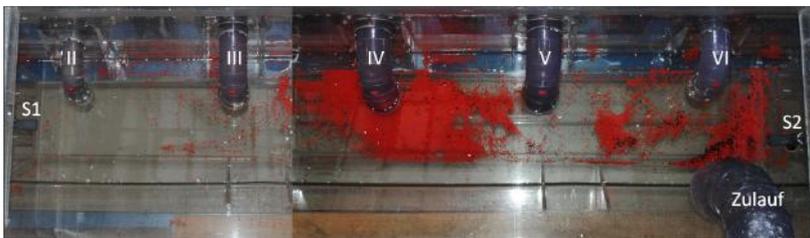
Rührwerke und Injektoren



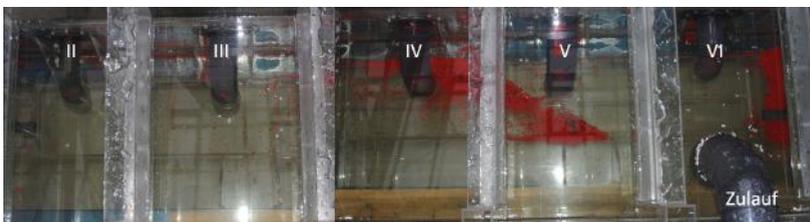
Nachtbetrieb



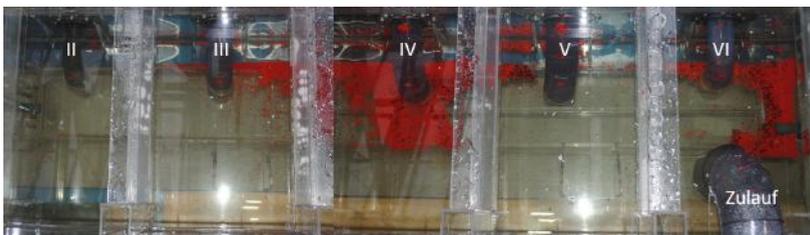
Regenbetrieb



Spülbetrieb

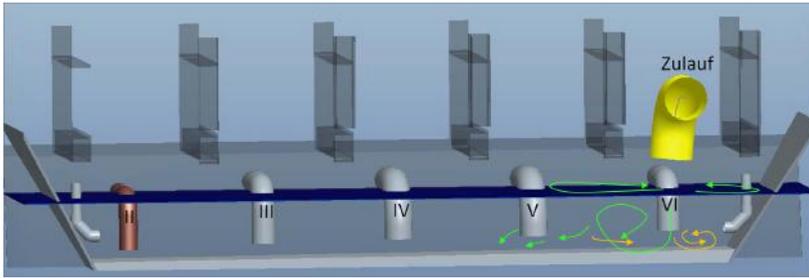


Tagesbetrieb I

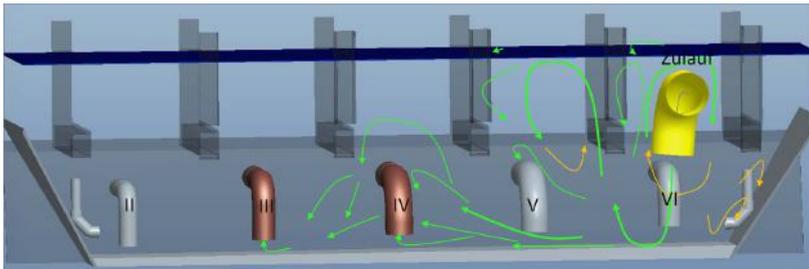


Tagesbetrieb II

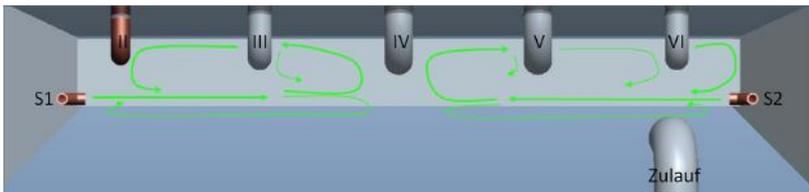
Bild. C.1. Istzustand, Sedimentation



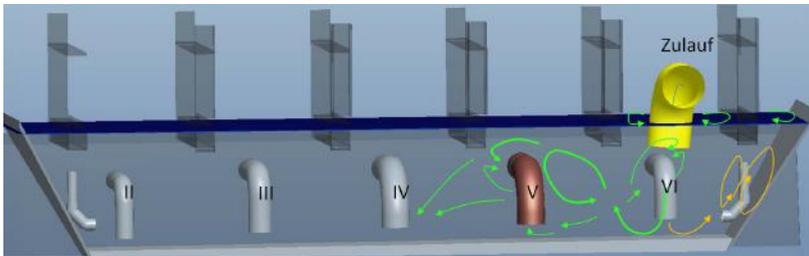
Nachtbetrieb



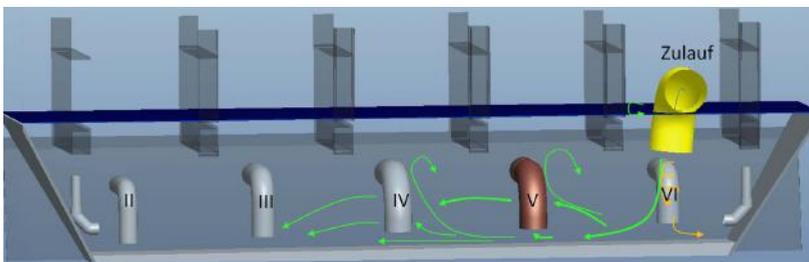
Regenbetrieb



Spülbetrieb

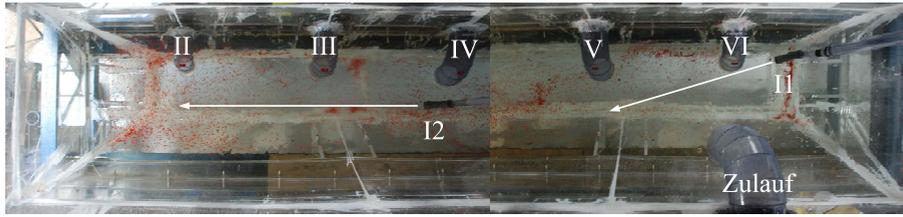


Tagesbetrieb I

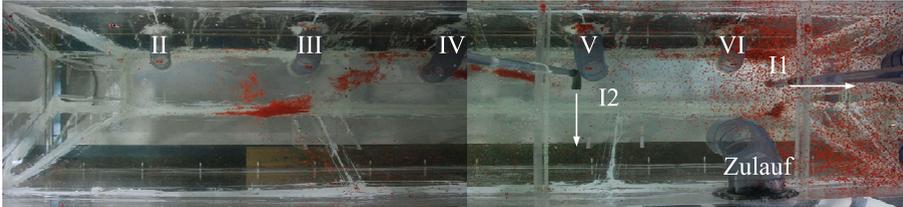


Tagesbetrieb II

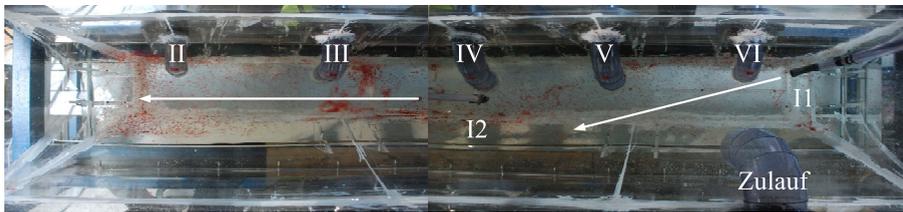
Bild. C.2. Istzustand, Stromverlauf



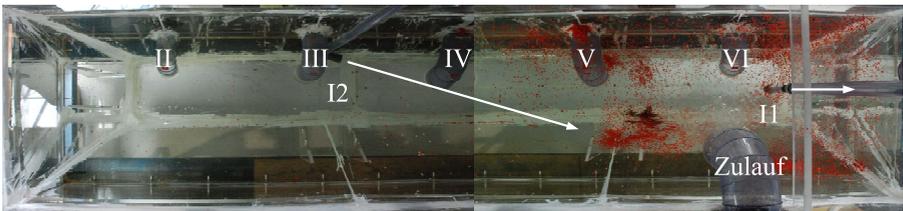
Nachtbetrieb



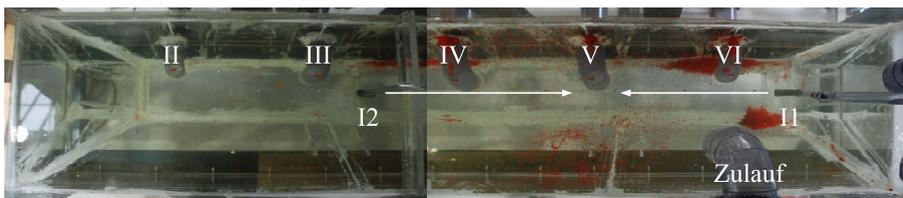
Regenbetrieb



Spülbetrieb

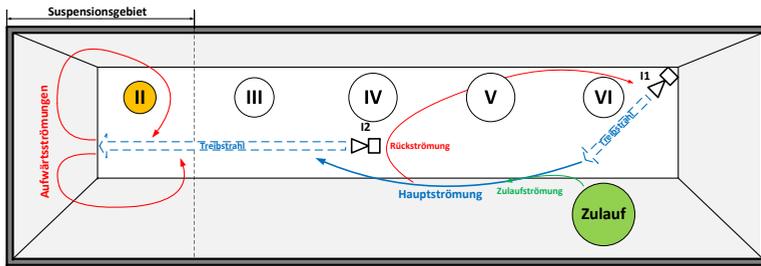


Tagesbetrieb I

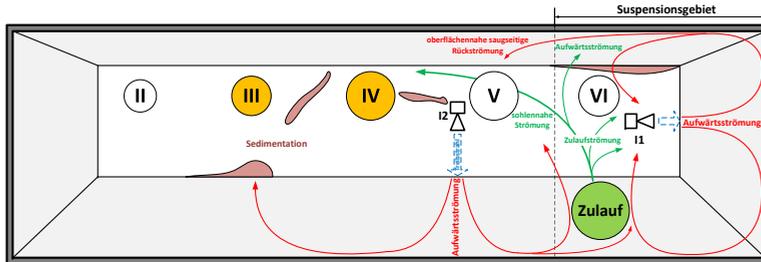


Tagesbetrieb II

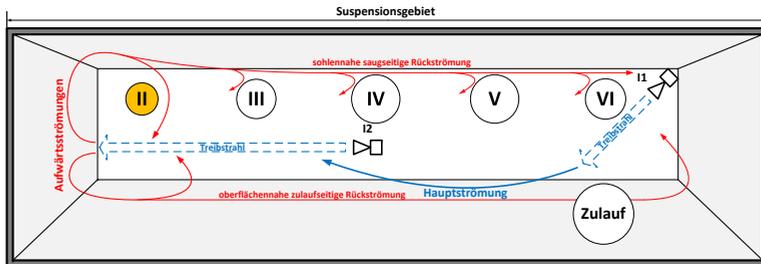
Bild. C.3. Injektoreinsatz, beste Ergebnisse für jeden Betriebspunkt



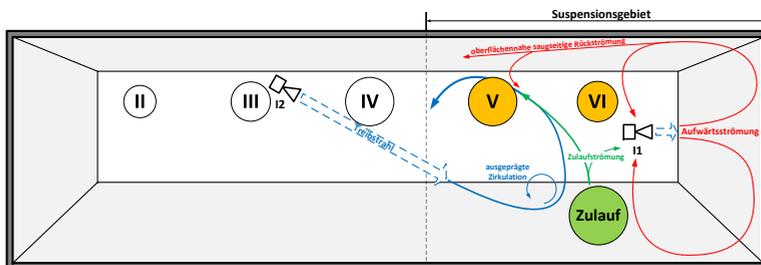
Nachtbetrieb



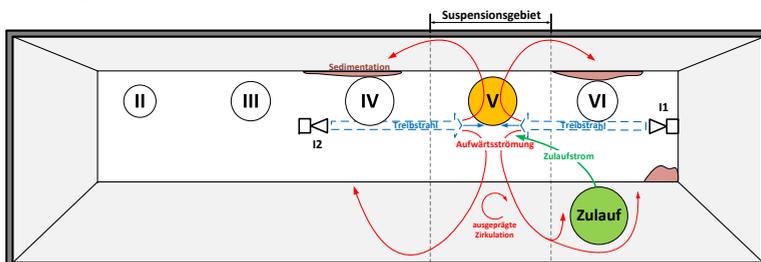
Regenbetrieb



Spülbetrieb

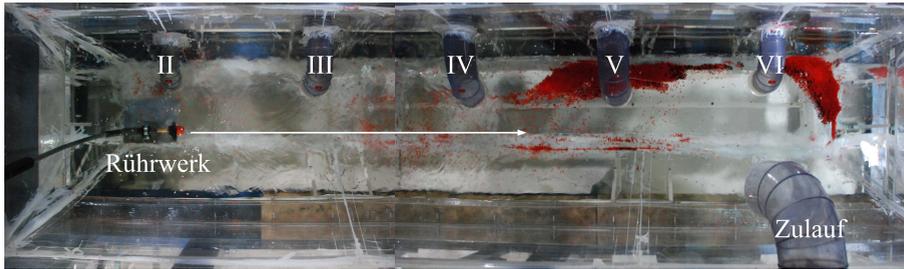


Tagesbetrieb I

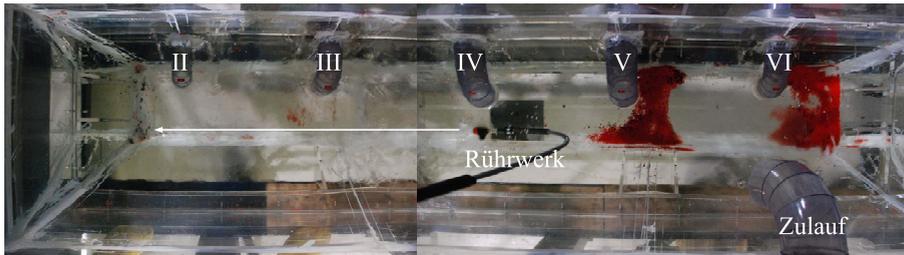


Tagesbetrieb II

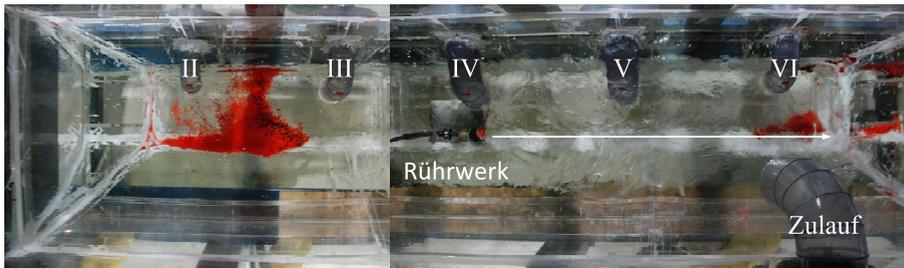
Bild. C.4. Injektor, Stromverlauf



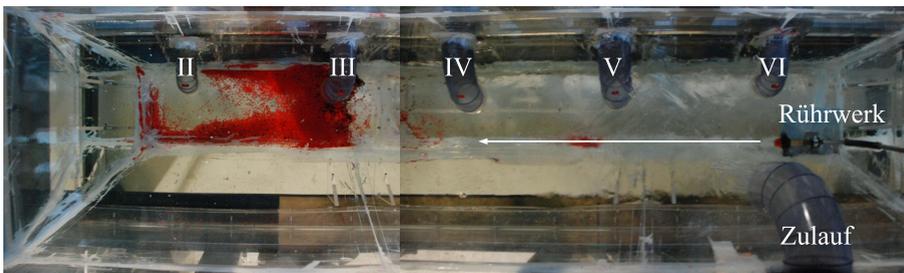
Nachtbetrieb, links



Nachtbetrieb, mittig nach links

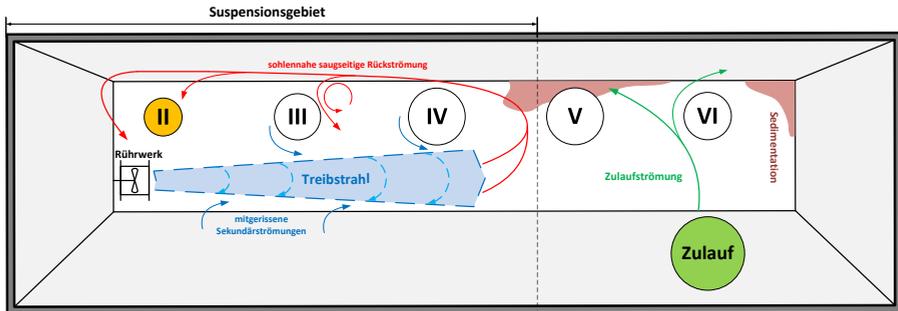


Nachtbetrieb, mittig nach rechts

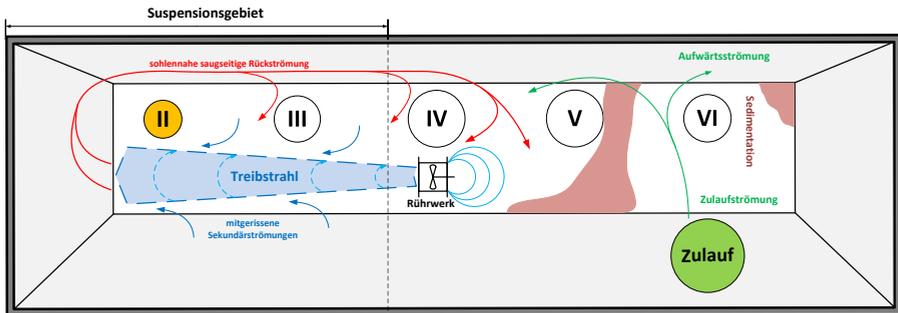


Nachtbetrieb, rechts

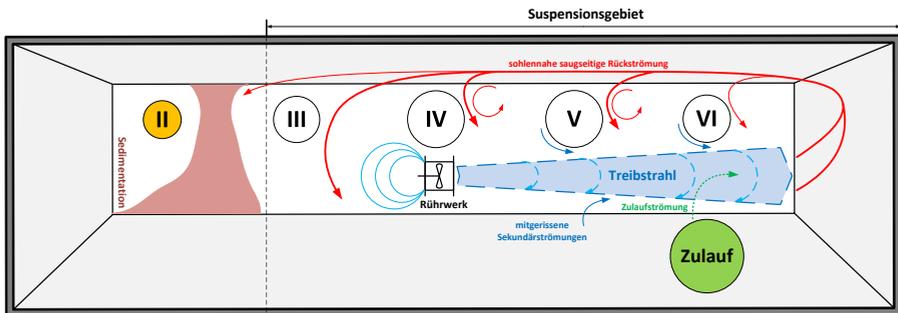
Bild. C.5. Rührwerk, Nachtbetrieb



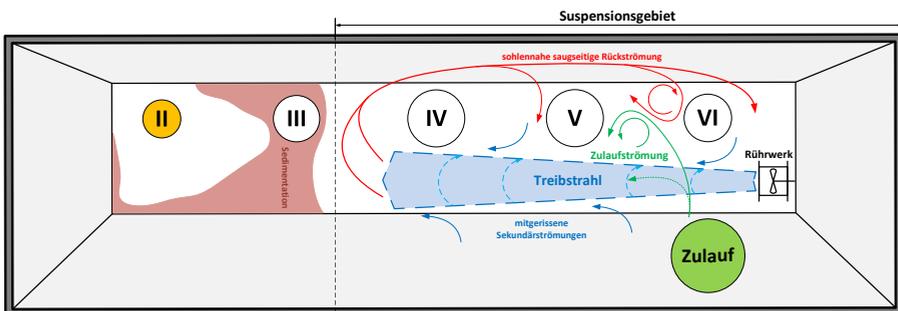
Nachtbetrieb, links



Nachtbetrieb, mittig nach links

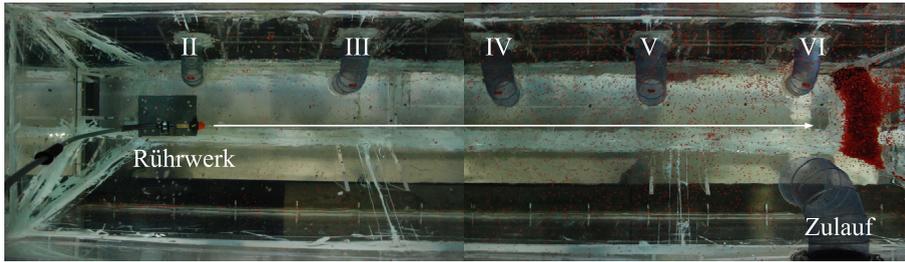


Nachtbetrieb, mittig nach rechts

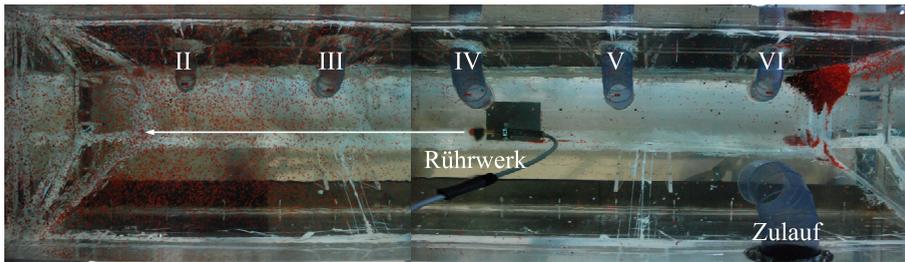


Nachtbetrieb, rechts

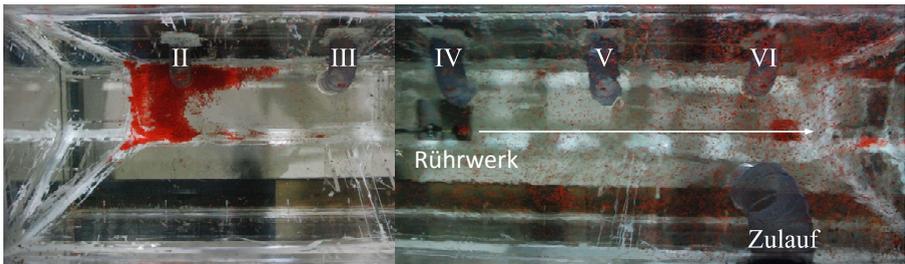
Bild. C.6. Rührwerk, Stromverlauf Nachtbetrieb



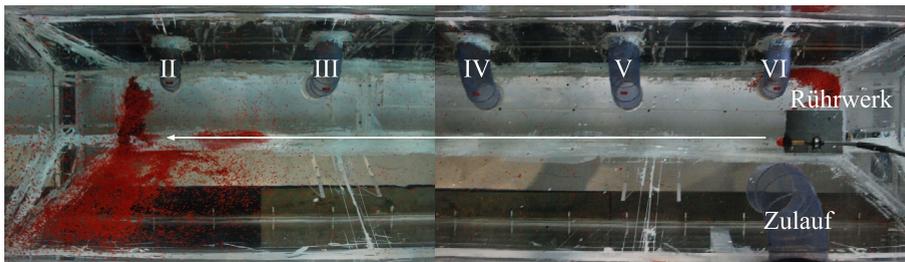
Regenbetrieb, links



Regenbetrieb, mittig nach links

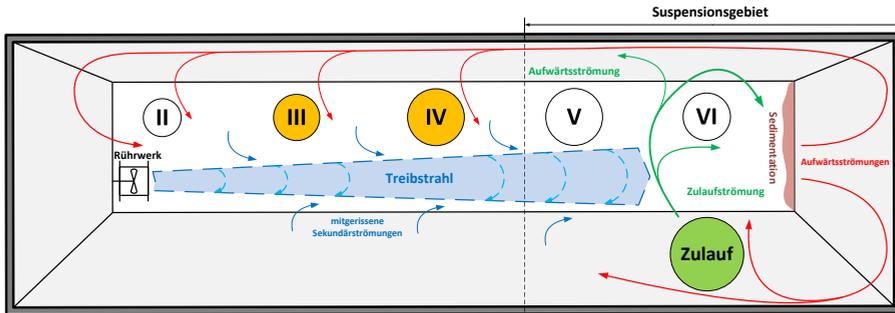


Regenbetrieb, mittig nach rechts

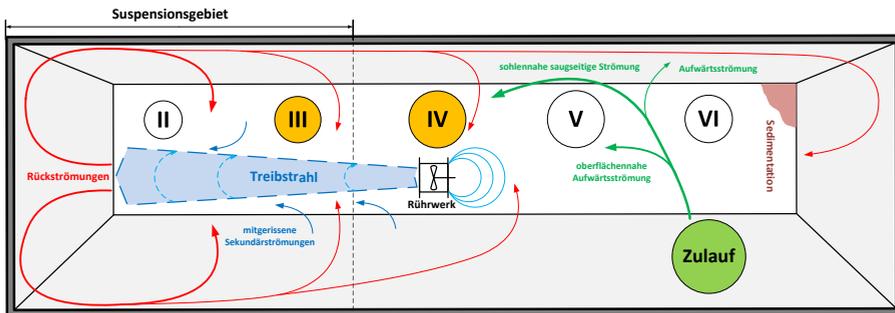


Regenbetrieb, rechts

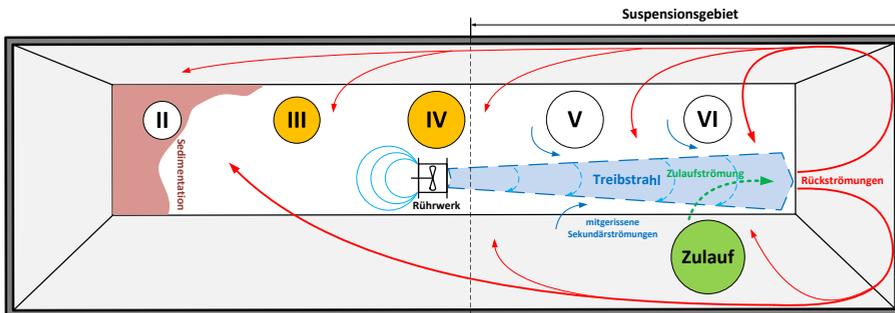
Bild. C.7. Rührwerk, Regenbetrieb



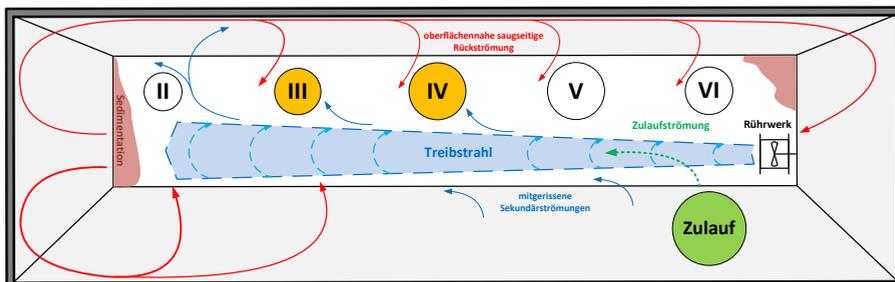
Regenbetrieb, links



Regenbetrieb, mittig nach links

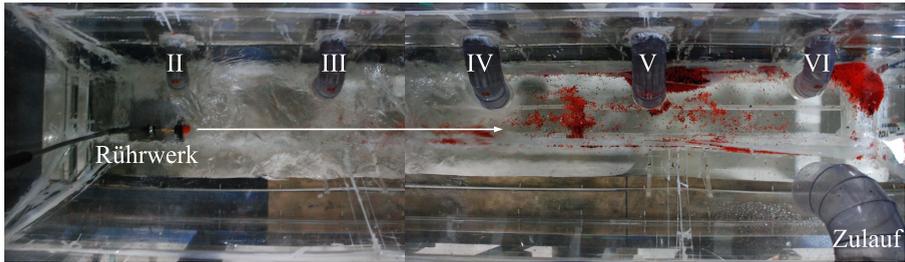


Regenbetrieb, mittig nach rechts

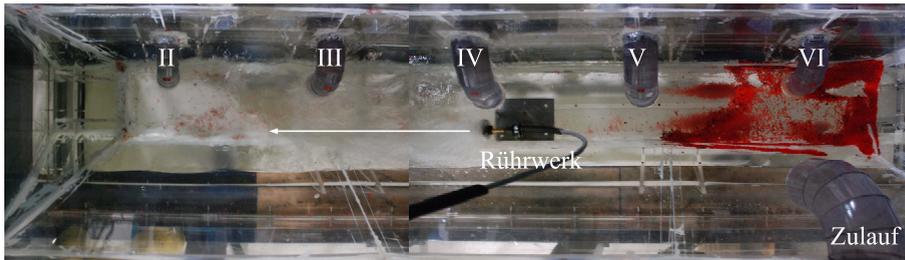


Regenbetrieb, rechts

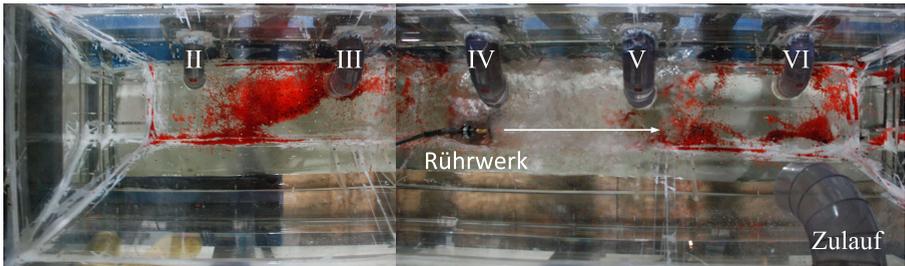
Bild. C.8. Rührwerk, Stromverlauf Regenbetrieb



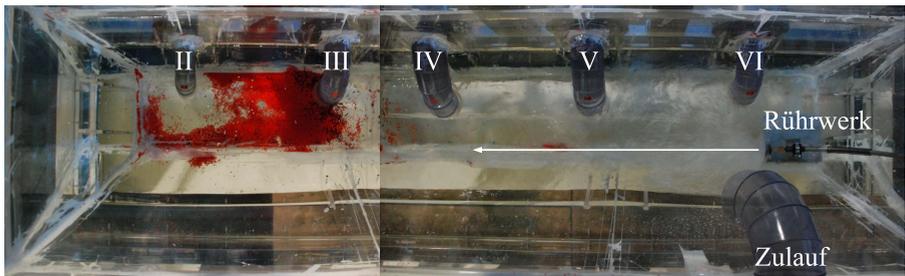
Spülbetrieb, links



Spülbetrieb, mittig nach links

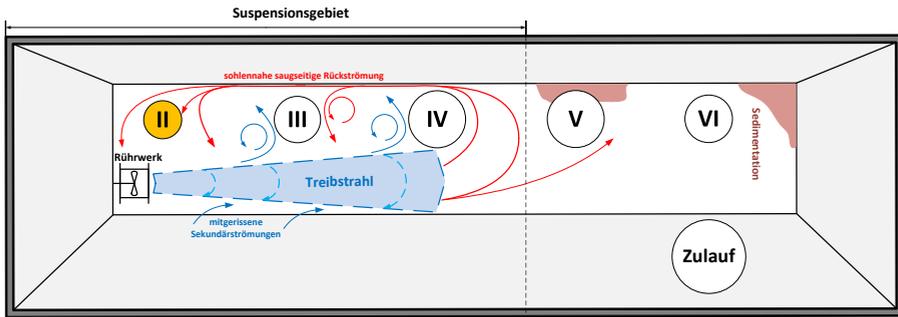


Spülbetrieb, mittig nach rechts

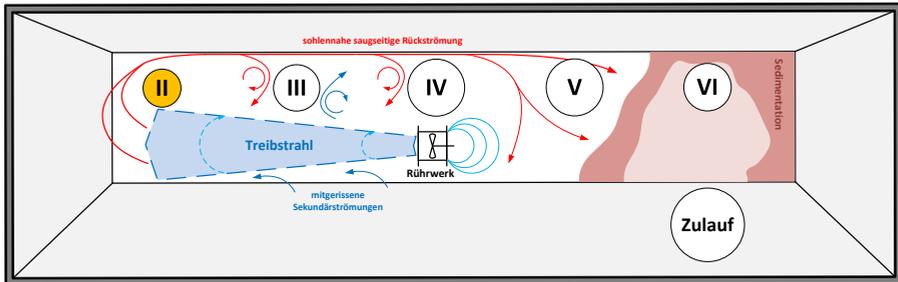


Spülbetrieb, rechts

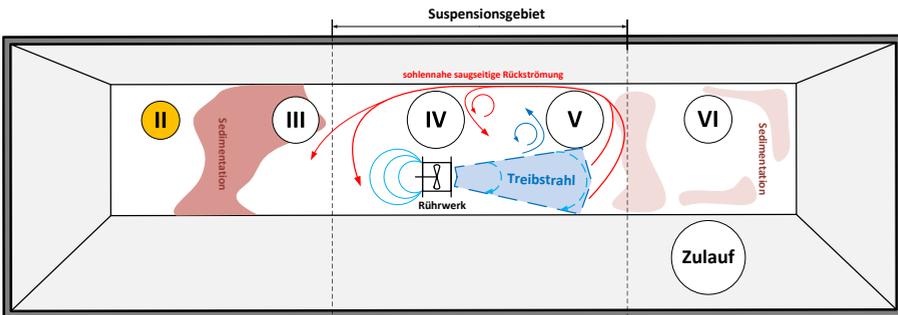
Bild. C.9. Rührwerk, Spülbetrieb



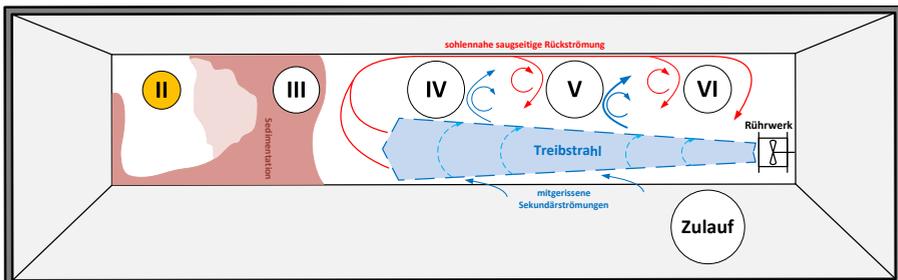
Spülbetrieb, links



Spülbetrieb, mittig nach links

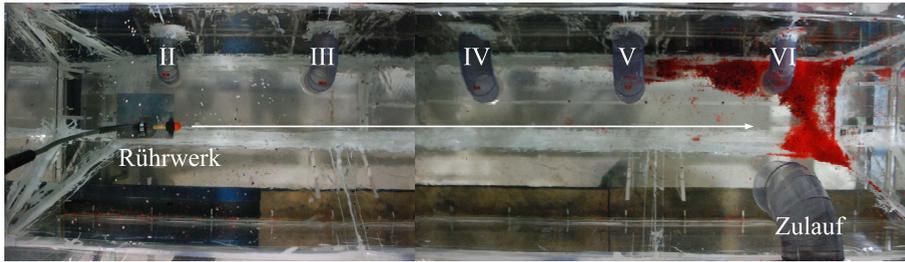


Spülbetrieb, mittig nach rechts

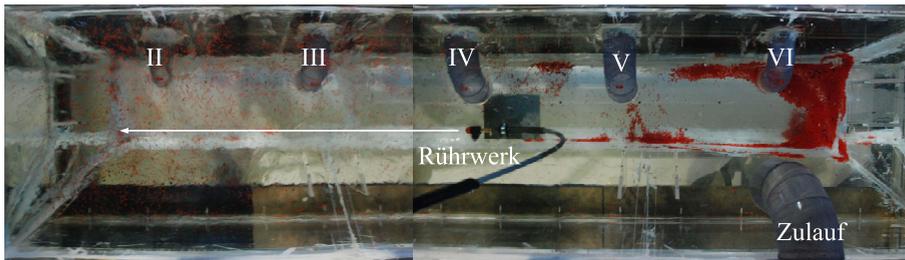


Spülbetrieb, rechts

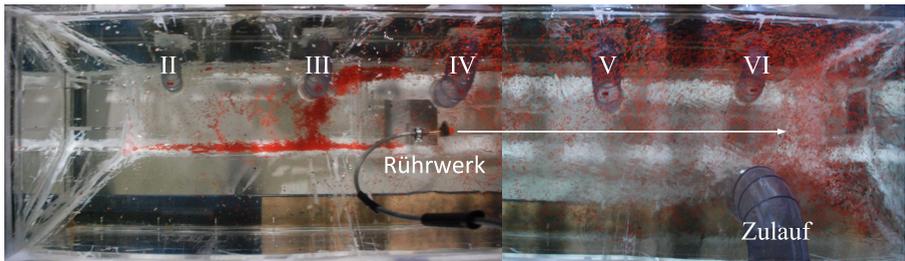
Bild. C.10. Rührwerk, Stromverlauf Spülbetrieb



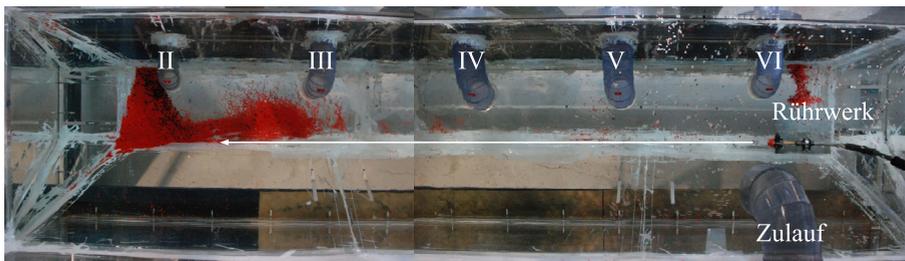
Tagesbetrieb I, links



Tagesbetrieb I, mittig nach links

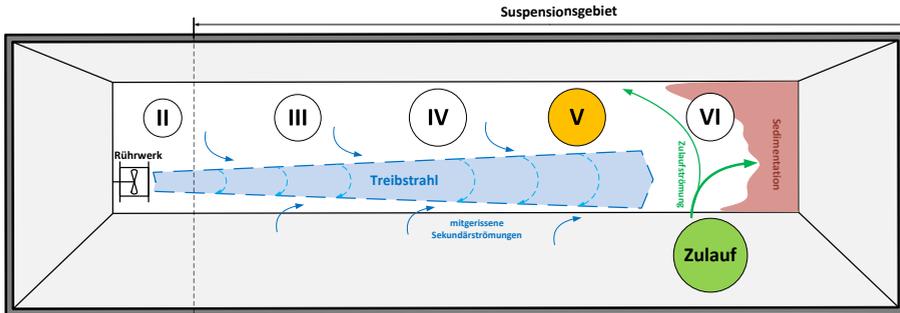


Tagesbetrieb I, mittig nach rechts

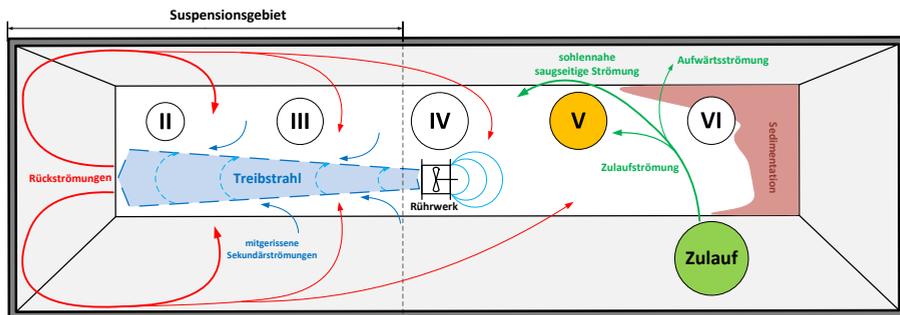


Tagesbetrieb I, rechts

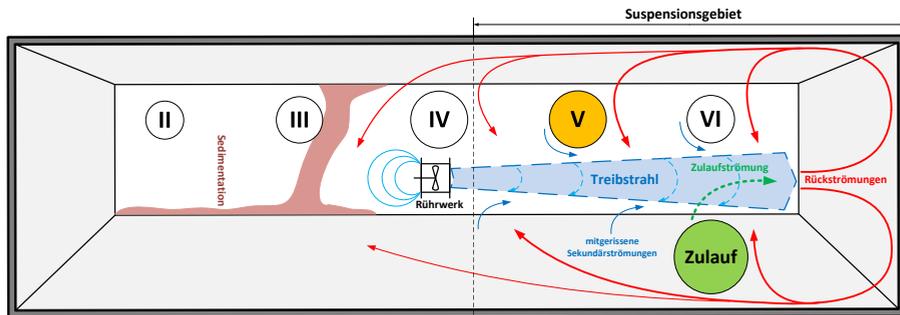
Bild. C.11. Rührwerk, Tagesbetrieb I, Pumpe V



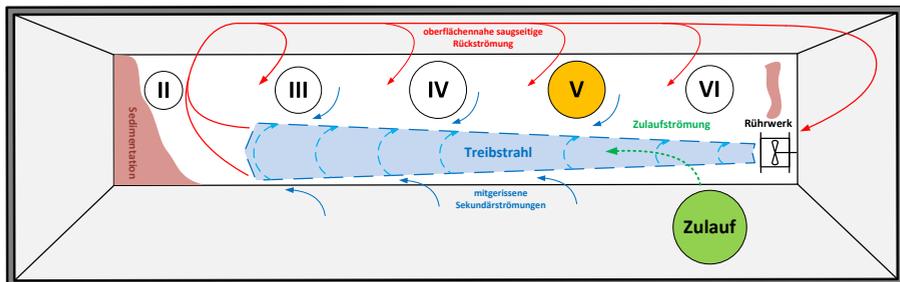
Tagesbetrieb I (V), links



Tagesbetrieb I (V), mittig nach links

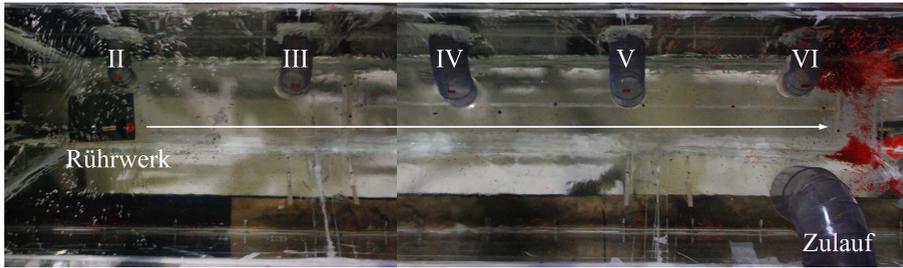


Tagesbetrieb I (V), mittig nach rechts

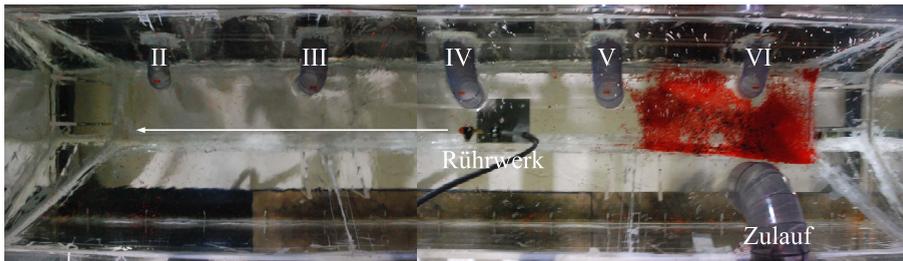


Tagesbetrieb I (V), rechts

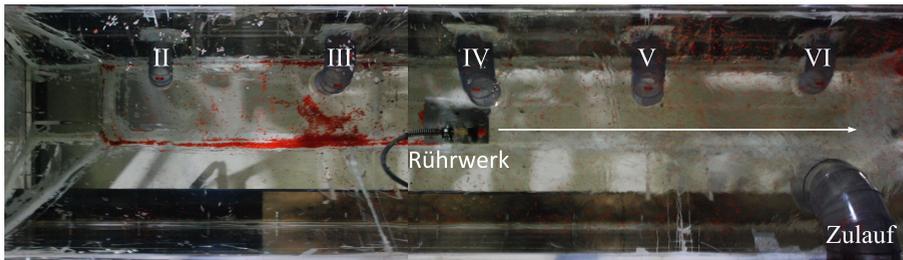
Bild. C.12. Rührwerk, Stromverlauf Tagesbetrieb I, Pumpe V



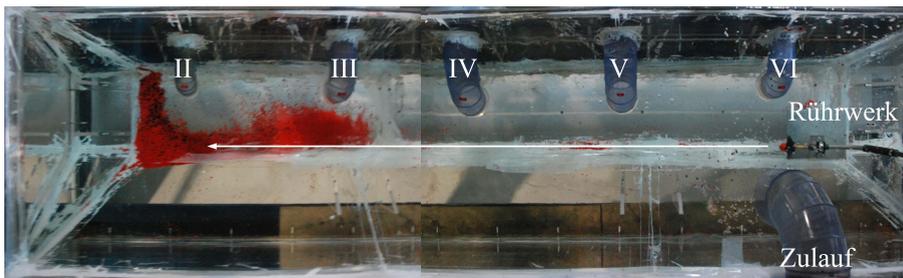
Tagesbetrieb I (VI), links



Tagesbetrieb I (VI), mittig nach links

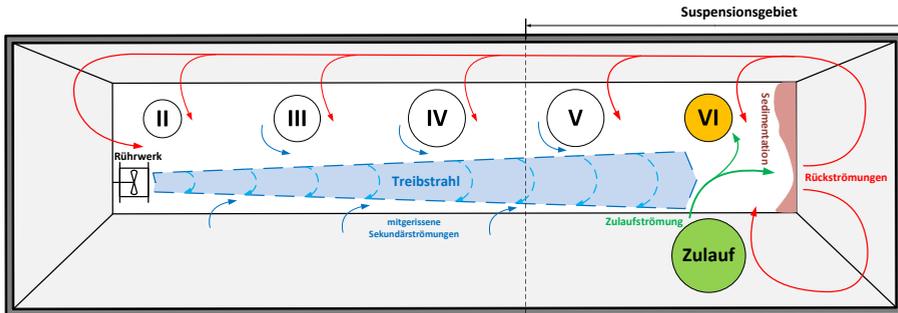


Tagesbetrieb I (VI), mittig nach rechts

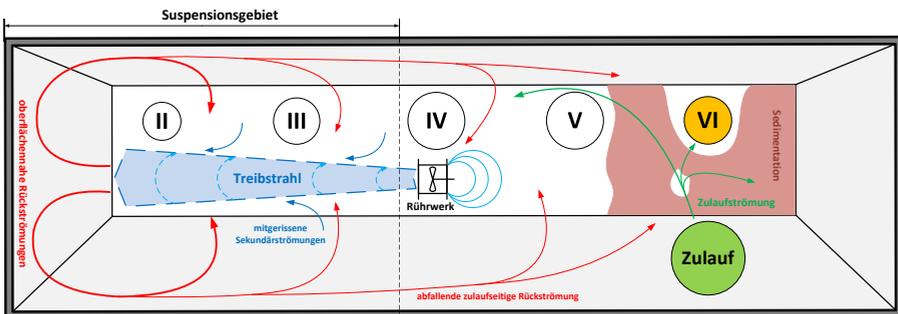


Tagesbetrieb I (VI), rechts

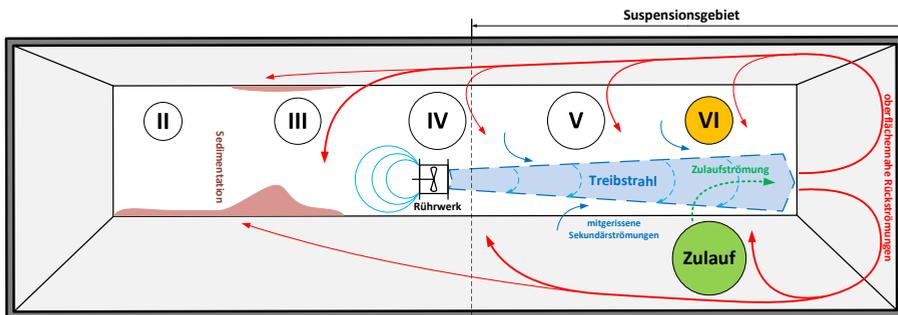
Bild. C.13. Rührwerk, Tagesbetrieb I, Pumpe VI



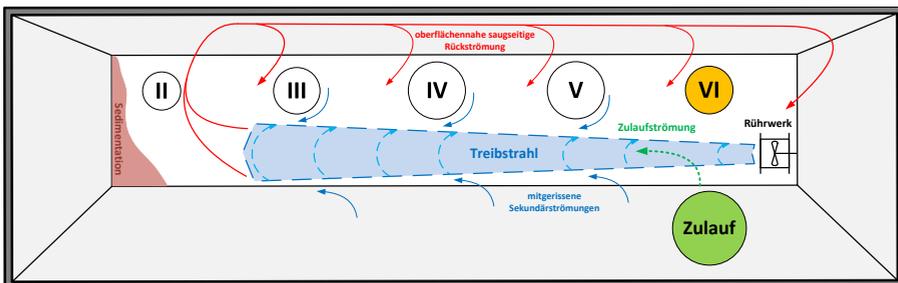
Tagesbetrieb I (VI), links



Tagesbetrieb I (VI), mittig nach links

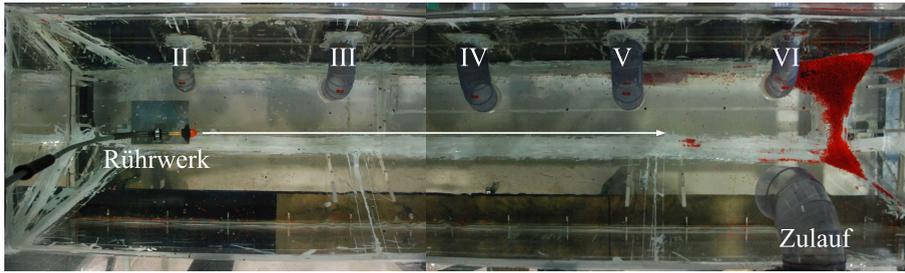


Tagesbetrieb I (VI), mittig nach rechts

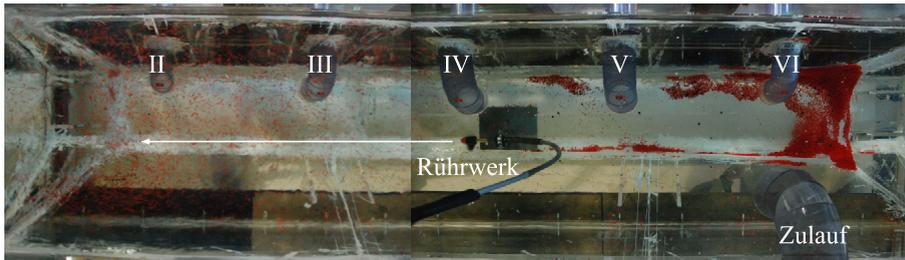


Tagesbetrieb I (VI), rechts

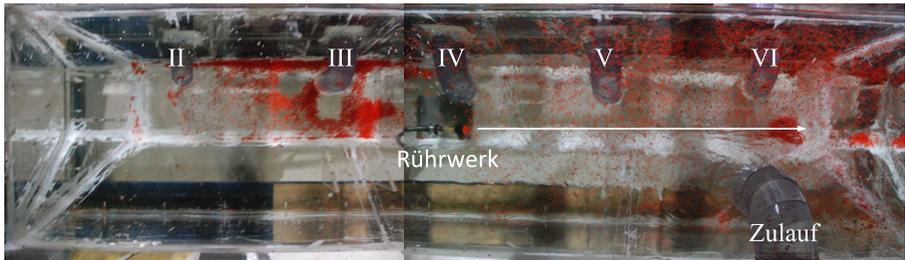
Bild. C.14. Rührwerk, Stromverlauf Tagesbetrieb I, Pumpe VI



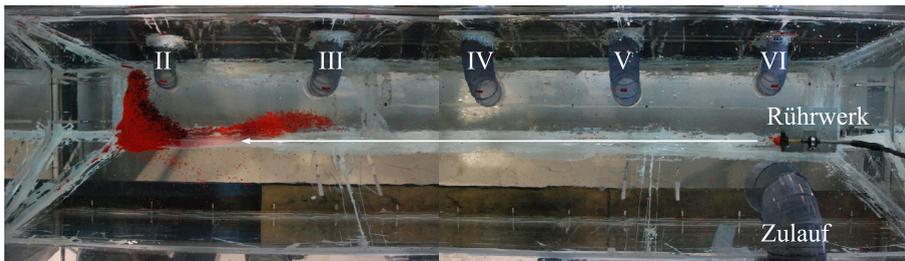
Tagesbetrieb II, links



Tagesbetrieb II, mittig nach links

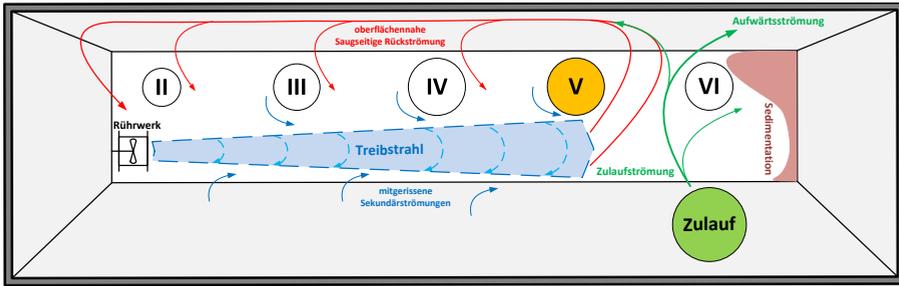


Tagesbetrieb II, mittig nach rechts

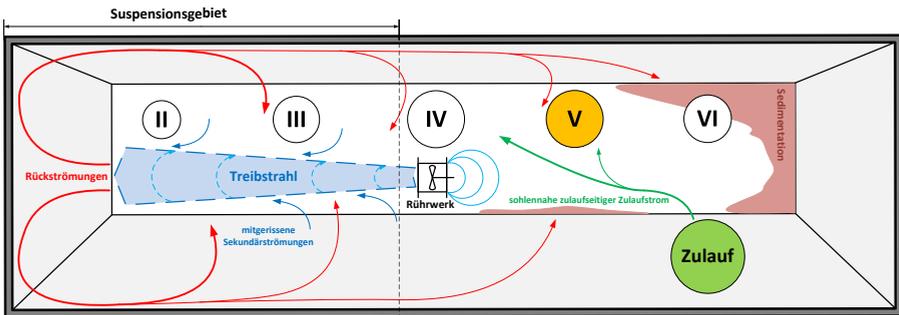


Tagesbetrieb II, rechts

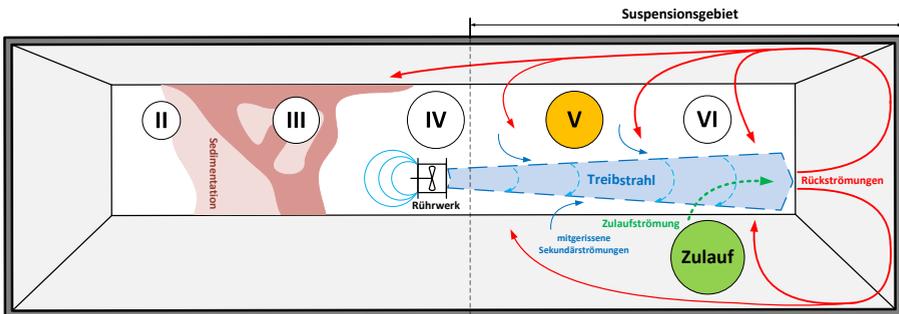
Bild. C.15. Rührwerk, Tagesbetrieb II



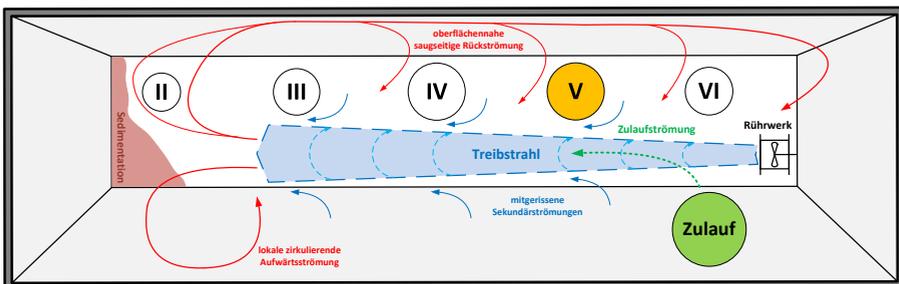
Tagesbetrieb II, links



Tagesbetrieb II, mittig nach links



Tagesbetrieb II, mittig nach rechts



Tagesbetrieb II, rechts

Bild. C.16. Rührwerk, Stromverlauf Tagesbetrieb II

Literaturverzeichnis

- [1] Sewage blockages cut by pump control. In: *WORLD PUMPS* (2009), July, S. 10–12
- [2] 116, ATV: *Besondere Entwässerungsverfahren - Unterdruckentwässerung - Druckentwässerung*. 1999
- [3] ANSI: *ANSI HI 98 9.8 - Pump Intake Design*. 1998
- [4] BAUMANN, Peter: *MSR-Technik in abwassertechnischen Anlagen mit 19 Tabellen*. Renningen : expert-Verl., 2009 (Kontakt und Studium 664)
- [5] BENRA, F.-K. ; DOHMEN, H. J.: Strömungsinduzierte Schwingungen von Abwasserpumpen / VDI-Berichte. 2002 (Nr. 1682). – Forschungsbericht. S.263
- [6] BERNSTEIN, Herbert: *Mechatronik in der Praxis Sensoren, Bussysteme, Antriebssysteme, Messverfahren ; mit 2 CD-ROM*. Berlin u. a. : VDE-Verl., 2007. – Herbert Bernstein Ill., graph. Darst. 2 CD-ROMs (12 cm)
- [7] BISCHOF, Wolfgang: *Abwassertechnik*. 11., neubearb. und erw. Aufl. Stuttgart : Teubner, 1998
- [8] BLITZ, E. (Hrsg.): *Abwassertechnologie Entstehung, Ableitung, Behandlung, Analytik der Abwässer*. Berlin u.a. : Springer, 1984
- [9] BRAHA, Alexandru ; GROZA, Ghiocel: *Moderne Abwassertechnik Erhebung, Modellstruktur, Scale up, Planung*. Weinheim : Wiley-VCH-Verl., 2006
- [10] BUBELACH, Torben: *Untersuchung der Radseitenraumströmung in einer Einschaufelrad-Abwasserpumpe*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2009

- [11] CARPIO, Homero Acosta del: *Das dynamische Verhalten von Kreiselpumpen niedriger spezifischer Drehzahl bei raschen Drehzahländerungen.* Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 1990
- [12] CZICHOS, Horst: *Mechatronik Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme ; mit 12 Tabellen.* 2., aktualisierte und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008 (Studium). – Horst Czichos
- [13] DAMRATH, Helmut ; CORD-LANDWEHR, Klaus: *Wasserversorgung mit 58 Tafeln und 41 Beispielen.* 11., neubearb. und erw. Aufl. / bearb. von Klaus Cord-Landwehr. Stuttgart : Teubner, 1998
- [14] DIN: *DIN 1319 - Grundlagen der Messtechnik.* Januar 1995
- [15] DIN: *DIN 1671 - Druckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden.* 1997
- [16] DIN: *EN ISO 9906 - Kreiselpumpen - Hydraulische Abnahmeprüfung Klassen 1 und 2.* August 2002
- [17] DIN: *DIN4045 - Abwassertechnik. Grundbegriffe.* August 2003
- [18] DIN: *DIN EN 1085 - Abwasserbehandlung. Wörterbuch.* Mai 2007
- [19] DIN: *DIN EN 752 - Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden.* April 2008
- [20] DUBBEL, Heinrich ; GROTE, Karl-Heinrich: *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau ; mit Tabellen.* 22., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin : Springer, 2007
- [21] DVWK-A-ATV-134 ; DVWK (Hrsg.): *Planung und Bau von Abwasserpumpenanlagen.* Juni. Hennef : GFA, 2000. – ATV
- [22] DWA-A-112 ; DWA (Hrsg.): *Hydraulische Dimensionierung und Leistungsnachweis von Sonderbauwerken in Abwasserleitungen und -kanälen Arbeitsblatt.* August. Hennef : DWA, 2007 (DWA-Regelwerk). – Arbeitsblatt
- [23] EBEL, Otto-Gerhard: *Maschinelle und elektrische Anlagen in Wasserwerken.* Bd. 3. München : Oldenbourg, 1995
- [24] ENDRESS+HAUSER ; Y. MÜLLER, A. W. (Hrsg.): *Abwasser Mess- und Regeltechnik.* 2. Ausgabe, 1. Auflage. Endress+Hauser, 1981
- [25] Feluwa (Veranst.): *Fäkalex Abwasser-Trennförderung.* 2010
- [26] FERNANDO PUENTE LEON; KIENCKE, Holger: *Signale und Systeme.* 5. Aufl. München : Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2011

- [27] FLORJANCIC, Dusan: *Experimentelle Untersuchungen an einer Pumpe zur Feststellung der Änderung der Saugfähigkeit durch Oberflächenrauigkeit, durch Mischvorgänge am Laufradeintritt und durch Heißwasserförderung Versuche zur Abklärung des Blasenlängeneinflusses auf Materialzerstörung*, Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1970
- [28] FRIEDRICHSEN, Uwe: *Untersuchungen zur Betriebsautomation von Schöpfwerken*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1993
- [29] GEIGER, Gerhard: *Technische Fehlerdiagnose mittels Parameterschätzung und Fehlerklassifikation am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Kreiselpumpe*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 1985
- [30] GEUE, Wilhelm: *Einrichtung an Kreisel- und Kolbenpumpen zur Förderung grob verunreinigter Flüssigkeiten*. 1928
- [31] GÜLICH, Johann F.: *Kreiselpumpen; Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb*. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. Springer, 2010
- [32] GNEIPEL, Gottfried: *Berechnung der Partikelbahnen in Kreiselpumpen bei der Förderung von Fluid-Feststoff-Gemischen*, Freiberg Bergakademie, Dissertation, 1990
- [33] GRABOW, Gerd: Korrekturfaktoren; Einsatz von Kreiselpumpen für den hydraulischen Feststofftransport. In: *MM Das Industriemagazin Konstruktion Pumpenbau* (2003), Nr. 45, S. 44
- [34] GRÄF, Rainer: *Taschenbuch der Abwassertechnik Umwelttechnik in der Oberflächenveredelung ; Stand der Technik und praktische Umsetzung*. München u.a. : Hanser, 1998
- [35] GROMBACH, Peter: *Handbuch der Wasserversorgungstechnik*. 3., völlig überarb. Aufl. München ; Wien : Oldenbourg-Industrieverl., 2000
- [36] HAAKH, Frieder: *Hydraulische Aspekte zur Wirtschaftlichkeit von Pumpen, Turbinen und Rohrleitungen in der Wasserversorgung mit ausführlichen Berechnungsbeispielen, Tabellen und Arbeitsblättern auf CD für die eigene Berechnung ; für Studium und Praxis*. Berlin u.a. : Huss-Medien u.a., 2009
- [37] HAGER, Willi H.: *Abwasserhydraulik Theorie und Praxis*. Korr. Nachdr. Berlin u.a. : Springer, 1995
- [38] HAWIBOWO, Singgih: *Sicherheitstechnische Abschätzung des Betriebszustandes von Pumpen zur Schadensfrüherkennung*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1997

- [39] HUHNS, Martin: *Diagnose hydraulischer Fehlerzustände bei axialen Tauchmotorpumpen anhand des Körperschalls*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2003
- [40] ISERMANN, Rolf: *Mechatronische Systeme Grundlagen ; mit 103 Tabellen*. 2., vollst. neu bearb. Aufl. Berlin u.a. : Springer, 2008. – Rolf Isermann Ill., graph. Darst.
- [41] JESCHKE, Roland: Abwasserpumpen; Konsequente Auslegung senkt Investitions- und Betriebskosten. In: *Umweltpraxis* 1/2 (2001), Nr. 1-2, S. 33
- [42] KALBSKOPF, Karl-Heinz: *Mechanische Abwasserreinigung*. 4. Aufl. Berlin : Ernst, 1997
- [43] KALLWEIT, Stephan: *Untersuchungen zur Erstellung wissenschaftlicher Fehlerdiagnosesysteme für Kreiselpumpen*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1994
- [44] KARGER, Rosemarie ; CORD-LANDWEHR, Klaus ; HOFFMANN, Frank: *Wasserversorgung*. 13., überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008 (Viewegs Fachbücher der Technik : Studium)
- [45] KECKE, Hans J. ; KLEINSCHMIDT, Paul: *Industrie-Rohrleitungsarmaturen*. Düsseldorf : VDI-Verl., 1994
- [46] KIGGEN, Mario: *Störungsfrüherkennung an Kreiselpumpen mit Hilfe bauteilintegrierter Sensorik und Verfahren der explorativen Datenanalyse*, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2007
- [47] KIRCHHEIM, Norma: *Kanalablagerungen in der Mischkanalisation*. Hennef : DWA, 2005
- [48] KLAUKE, Friedrich: *Ein Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit von Abwasserpumpwerken*. Dortmund, Universität Dortmund, Dissertation, 1981
- [49] KOLERUS, Josef ; WASSERMANN, Johann: *Zustandsüberwachung von Maschinen das Lehr- und Arbeitsbuch für den Praktiker*. 4., neu bearb. und erw. Aufl. Renningen : expert-Verl., 2008 (Edition Expertsoft 79)
- [50] KOLLMAR, Dirk: *Störungsfrüherkennung an Kreiselpumpen mit Verfahren des maschinellen Lernens*. Kaiserslautern, Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2002
- [51] KRÖBER, Werner: *Abwasser*, Technische Universität Berlin, Diplomarbeit, 1996

- [52] KRÖBER, Werner ; RAUWALD, Helmut: Automatische Abwasserförderung. In: *WWT* 5 (2009), S. 8
- [53] KREBS, Peter (Hrsg.): *Stoffhaushalt in der Siedlungsentwässerung Tagungsband*. 1. Aufl. Dresden : ISI, 2000 (Dresdner Berichte 16). – Dresdner Kolloquium zur Siedlungswasserwirtschaft, Dresden, 6. Dezember 2000. Technische Universität Dresden, Institut für Siedlungs- und Industrie-wasserwirtschaft.
- [54] KSB-AKTIENGESELLSCHAFT: *Auslegung von Kreiselpumpen*. 5., überarb. und erw. Aufl. Frankenthal : KSB, 2005
- [55] KSB Aktiengesellschaft (Veranst.): *AmaDS Broschüre*. 2011
- [56] KSB-AKTIENGESELLSCHAFT: *KSB-Kreiselpumpen-Lexikon*. 5. überarb. und korr. Aufl. Frankenthal (Pfalz) : Ottweiler Druckerei und Verlag GmbH, 2012
- [57] KUNZ, Peter: *Behandlung von Abwasser emissionsarme Produktionsverfahren, mechanisch-physikalische, biologische, chemisch-physikalische Abwasserbehandlung, technische Realisierung, rechtliche Grundlagen*. 4., überarb. Aufl. Würzburg : Vogel, 1995 (Umweltschutz Entsorgungstechnik)
- [58] LAUE, Stefan W.: *Experimentelle Untersuchungen zur modellbasierten Fehlerdiagnose an axialen Tauchmotor-Pumpenaggregaten*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2007
- [59] LAUER, Johannes: *Einfluß der Eintrittsbedingungen und der Geometrie auf die Strömung in den Radseitenräumen von Kreiselpumpen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Januar 1999
- [60] LEHR, Frank: *Berechnen von Blasengrößenverteilungen und Strömungsfeldern in Blasensäulen*. Als Ms. gedr. Düsseldorf : VDI-Verl., 2002 (Fortschritt-Berichte VDI : Reihe 3, Verfahrenstechnik Verein Deutscher Ingenieure: Fortschritt-Berichte VDI 3 726)
- [61] LIANG, Zhongxiong: *Numerische Untersuchungen der durch ein Axiallauftrad erzwungenen Makromischvorgänge zur Abwasserreinigung*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, April 1998. – Zhongxiong Liang Ill., graph. Darst. Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1997
- [62] MITTELBACH, Frank ; GOOSSENS, Michel: *Der Latex - Begleiter*. 2., überarb. und erw. Aufl. München u.a. : Pearson Studium, 2005 (Scientific tools)
- [63] MROTZEK, Werner: *Gegenstrominjektionsvermischung niedrigviskoser Reaktionsharze*. Aachen., Aachen, Techn. Hochsch., Dissertation, 1982

- [64] NEITZEL, Uwe: *Abwasser. Technik und Kontrolle*. Weinheim : VCH Verlag GmbH, 1998
- [65] NEITZEL, Uwe: *Lexikon der Abwassertechnik*. 6. Aufl. Essen : Vulkan-Verlag, 2000
- [66] NUGLISCH, Kai R.: *Entwicklung eines anlagenunabhängigen Störungsfrüherkennungssystems für Pumpen auf der Basis des maschinellen Lernens*, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation, 2006
- [67] PALLASCH, Otto: *Entwurf und Bau von Kanalisationen und Abwasserpumpwerken*. Bd. Bd. 2. 3., überarb. Aufl. Berlin : Ernst, 1982
- [68] PROSSER, M. J. ; PROSSER, M. J. (Hrsg.): *The hydraulic design of pump sumps and intakes*. Cranfield u.a. : BHRA/CIRIA, July 1977
- [69] P.U. THAMSEN, A. L. ; OESTERLE, M.: Reliability Improvements in Sewage Pumping Using Diagnosis with active Reaction. In: *Singapore International Water Week*. Singapour, 23.-27. Juni 2008
- [70] RADKE, Michael ; BROSS, Stephan ; PENSLER, Thomas ; SPRINGER, Peer: Einfluss der Laufradgeometrie auf Betriebssicherheit und Lebenszykluskosten von Abwasserpumpen. In: *Technik Kompakt KSB 4* (2001), Nr. 4, S. 10
- [71] ROHNSTOCK, Falk: *Experimentelle Untersuchung und Ermittlung von Mindestgeschwindigkeit des Fluides bei Abwasserförderung*, Technische Universität Berlin, Studienarbeit, 2009
- [72] SCHEFFLER, Till: *Particle-Image-Velocimetry zur Untersuchung hydraulischer Strömungsmaschinen*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1999
- [73] SCHMITT, Ferdinand: *Einfluß von Ablagerungen auf den Betrieb von Abwasserkanälen*, Universität Hannover, Dissertation, 1992
- [74] STRATE (Veranst.): *Strate Katalog*. 2010
- [75] STRICKER, Harald: *Strömungstechnische Untersuchungen axialer Laufräder von Rührwerken der kommunalen Abwasserbehandlung*, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1996
- [76] SZYMANSKY, Vera: *Ökologische Industriepolitik - Nachhaltige Polotik für Innovation, Wachstum und Beschäftigung / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz Reaktorsicherheit*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. 2008. – Forschungsbericht. Stellungnahme

- [77] THAMSEN, P. U. ; BUBELACH, T.: Flow characteristics in shroud clearance of centrifugal pumps with non-symmetrical pressure distribution. In: *9th European Conference on Turbomachinery*. Istanbul, March 2011
- [78] THAMSEN, Paul-Uwe ; RÖDING, Bert ; BASHINSKIY, Sergey: Störungen in Abwassersystemen beheben. In: *WWT* 6 (2010), S. 13
- [79] THAMSEN, P.U. ; BASHINSKIY, S. ; KRÖBER, W.L.: Diagnose mit aktiver Abwehr von Störungen in Abwasserpumpenanlagen. In: *8 Tagung Technische Diagnostik*, Oktober 2010
- [80] THAMSEN, P.U. ; BUBELACH, T.: Optimierung von Abwasserpumpwerken und Abwasserpumpen / Technische Universität Berlin. 2005. – Forschungsbericht. Bericht Situationsanalyse
- [81] THAMSEN, P.U. ; BUBELACH, T. ; NEUER, F.: Aktive Diagnose in der Abwassertechnik / Technische Universität Berlin. 2005. – Forschungsbericht. System mit Aktiver Reaktion
- [82] TILLACK, Peter: *Förderverhalten von Kreiselpumpen bei viskosem, gasbeladenem Fördermedium*, Universität Keiserslautern, Dissertation, 1998
- [83] TORNOW, Manfred ; KRÖBER, Werner: Typische Störungen von Abwasserpumpen. In: *WWT* 6 (2010), S. 8
- [84] TRIEBEL, Walter ; ATV (Hrsg.): *Lehr-und Handbuch der Abwassertechnik. Entwurf und Bau von Kanalisationen und Abwasserpumpwerken*. Bd. II. 3. Aufl. Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1982
- [85] TRIEBEL, Walter ; ATV (Hrsg.): *Lehr-und Handbuch der Abwassertechnik. Wassergütewirtschaftliche Grundlagen, Bemessung und Planung von Abwasserleitungen*. Bd. I. 3. Aufl. Berlin : Wilhelm Ernst & Sohn, 1982
- [86] TROSKOLANSKI, Adam T. ; LAZARKIEWICZ, Stephan: *Kreiselpumpen Berechnung u. Konstruktion*. 1. Aufl., orig. 3. Aufl. Basel, Stuttgart : Birkhäuser, 1976 (Lehr- und Handbücher der Ingenieurwissenschaften)
- [87] WEINRICH, H.: Gesichtspunkte für die Auswahl geeigneter Laufradformen in Kreiselpumpen zur Förderung von Abwasser / KSB. 2002 (0 321.051 G3). – Forschungsbericht. Frankenthal (Pfalz)
- [88] WIEDENROTH, Wolfgang: *Untersuchungen über die Förderung von Sand-Wasser-Gemischen durch Rohrleitungen und Kreiselpumpen*, Technische Hochschule Hannover, Dissertation, 1967
- [89] WÜNSCH, Olaf: *Strömungsmechanik des laminaren Mischens*. Springer, 2001

- [90] WOLFRAM, Armin: *Komponentenbasierte Fehlerdiagnose industrieller Anlagen am Beispiel frequenzumrichter gespeister Asynchronmaschinen und Kreiselpumpen*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation, 2002
- [91] XYLEM, Flyght: Clogging: not just throughlet size. In: *World Pumps* 9 (2012), S. 34
- [92] ZLOKARNIK, Marco: *Rührtechnik Theorie und Praxis*. Springer, 1999