

## Masterarbeit

# Aufbau einer Pilotanlage zur Öl-Wasser-Trennung

erstellt für

**akvola Technologies**

**Vorgelegt von:**

Wolfgang Siegl  
0635287

**Betreuer:**

Dipl.-Ing. Johanna Ludwig  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Draxler

Leoben, 6.9.2016

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

## **AFFIDAVIT**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

---

Datum

---

Unterschrift

## DANKSAGUNG

Viele engagierte Menschen haben einen Beitrag geleistet, dass diese Arbeit in ihrer jetzigen Form entstehen konnte.

In erster Linie möchte ich mich bei meiner Betreuerin bei akvola Technologies, Dipl.-Ing. Johanna Ludwig, und meinem Betreuer an der Montanuniversität Leoben, Professor Josef Draxler, bedanken. Frau Ludwig hatte jederzeit ein offenes Ohr für meine Fragen und Anliegen und hat mich stets mit ihrem umfassenden Wissen unterstützt. Herrn Professor Draxler danke ich für seine Hilfsbereitschaft und Geduld, nicht nur bei dieser Arbeit, sondern während meines gesamten Studiums.

Ich danke dem gesamten Team von akvola Technologies für die ausgezeichnete Zusammenarbeit. Matan Beery, Lucas León und Johanna Ludwig gaben mir die Möglichkeit, bei akvola in Berlin meine Arbeit zu schreiben. Lena Schmitz war eine große Hilfe bei der 3D-Modellierung, Tillmann Bors danke ich für die Programmierung des Prozessleitsystems. Besonderer Dank geht an Gregor Tyчек, der mit seinem umfangreichen Detailwissen, seiner praktischen Erfahrung und seiner positiven Einstellung einen großen Beitrag geleistet hat.

Herzlichst möchte ich auch meinen Eltern danken, die mich über meine gesamte Studienzeit hinweg bedingungslos und geduldig unterstützt haben.

## **Kurzfassung**

### **Aufbau einer Pilotanlage zur Öl-Wasser-Trennung**

Die vorliegende Arbeit beschreibt Planung, Auslegung und Konstruktion einer Pilotanlage zur Öl-Wasser-Trennung. Das eingesetzte Trennverfahren ist die von akvola Technologies patentierte akvoFloat™-Technologie, eine Kombination aus Flotation und Mikrofiltration durch keramische Membranen.

Die Anlage soll für einen Wasservolumenstrom von 100 l/h ausgelegt werden. Weitere Voraussetzungen und Vorgaben sind ein möglichst einfacher und kompakter Aufbau für leichten Transport, Korrosionsbeständigkeit der eingesetzten Materialien gegenüber den berührenden Medien und eine teilweise Automatisierung des Prozessablaufs.

Für einen ersten Entwurf der Anlage wurde ein Überblick über die gewünschten Anlagenfunktionen, Stoffstromführungen und die benötigten Komponenten geschaffen sowie ein Verfahrensfliessbild erstellt. Von Armaturen, elektrischen Maschinen, Tanks und sonstigen Bauteilen wurden Eigenschaften und erforderliche Leistungen definiert und Angebote bei Herstellern eingeholt. Besonderes Augenmerk wurde auf die Korrosionseigenschaften der Werkstoffe gelegt. Mit Hilfe eines dreidimensionalen Computermodells konnte die Anordnung der Komponenten und der Verlauf der Rohrleitungen vor der Fertigung ausgearbeitet werden. Abschließend wurden die genaue Abfolge von Prozessschritten im Betriebsablauf und die gewünschten Steuermöglichkeiten bestimmt, um den Ausgangspunkt für die Programmierung des Prozessleitsystems zu legen.

Die Pilotanlage dient der Untersuchung der Leistungsfähigkeit des akvoFloat™-Verfahrens im Rahmen von Testläufen unter realen Bedingungen an verschiedenen Einsatzorten weltweit. Die praktischen Versuche und die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen zur Weiterentwicklung und zum Erreichen der Marktreife der akvoFloat™-Technologie beitragen.

## **Abstract**

### **Design of a pilot plant for oil-water separation**

The present thesis describes the development and engineering of a pilot plant for oil-water separation. The separation is done by means of the akvoFloat™ technology, a process patented by akvola Technologies. It is a combination of flotation and microfiltration through ceramic membranes.

The pilot plant is to be designed for a water flow of 100 l/h. Additional prerequisites are a simple and compact design to facilitate transport, corrosion resistance and partial automation in operation.

A first design concept included an overview of desired system functions, media flow paths and required components as well as the development of a process flow chart. Necessary properties and corrosion characteristics of instruments, machines, controls and tanks were specified in order to obtain suitable offers from manufacturers. With help of computer modelling, the spatial arrangement of components and pipe routing could be defined prior to assembling.

The pilot plant will be tested at various sites of operation around the world in order to examine the performance of the akvoFloat™ process under real conditions. Practical experiments and pilot runs are expected to contribute to further development of the technology and to achieving market maturity.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Öl und Wasser .....	3
1.2 Unternehmensprofil: akvola Technologies .....	5
<b>2 AUFGABENSTELLUNG.....</b>	<b>6</b>
2.1 Problemstellung .....	6
2.2 Zielsetzung .....	6
<b>3 VERFAHREN DER ÖL-WASSER-TRENNUNG .....</b>	<b>8</b>
3.1 Schwerkraftabscheider .....	9
3.1.1 API-Separator .....	12
3.1.2 Plattenabscheider .....	14
3.2 Zentrifugalabscheider .....	20
3.2.1 Zentrifuge .....	23
3.2.2 Hydrozyklon.....	26
3.3 Flotation.....	28
3.3.1 Druckentspannungsflotation (DAF/DGF).....	31
3.3.2 Begasungsflotation (IAF/IGF).....	36
3.4 Membranverfahren.....	39
3.4.1 Einleitung.....	39
3.4.2 Prozessbeschreibung .....	39
3.4.3 Mikro- und Ultrafiltration.....	42
3.4.4 Fouling.....	42
3.4.5 Prozessführung.....	44
3.4.6 Membranbauformen und Membranmodule .....	46
3.4.7 Membranaufbau und -materialien .....	47
3.5 Nusschalenfilter.....	49
3.6 akvoFloat™-Technologie .....	51
3.7 Zusammenfassung .....	53
<b>4 PRAKTISCHER TEIL - ANLAGENPLANUNG .....</b>	<b>55</b>
4.1 Vorgaben .....	55
4.1.1 Auslegungsgrößen.....	55
4.1.2 Betriebsvorgaben.....	55

4.1.3	Technische Vorgaben .....	56
4.2	Fließbild & Prozessbeschreibung.....	57
4.2.1	Anlagenbeschreibung .....	57
4.2.2	Betriebsweisen .....	58
4.3	Werkstoffauswahl.....	63
4.3.1	Kunststoffe.....	64
4.3.2	Metalle .....	65
4.4	Komponentenauswahl .....	66
4.4.1	Gerüst.....	66
4.4.2	Becken und Tanks .....	67
4.4.3	Keramikmembranen und Rotationsdichtung.....	68
4.4.4	Pumpen und Frequenzumrichter.....	71
4.4.5	Speicherprogrammierbare Steuerung .....	78
4.4.6	Heizung .....	79
4.4.7	Messgeräte .....	81
4.4.8	Armaturen und Rohrleitungen .....	87
4.4.9	Elektrischer Schaltschrank.....	91
4.5	Auslegungsberechnungen .....	92
4.5.1	Filterfläche .....	92
4.5.2	Modulgröße.....	92
4.5.3	Beckengröße .....	95
4.6	Anlagensteuerung.....	98
4.6.1	Betriebsmodi.....	98
4.6.2	Hauptfunktionen.....	98
4.6.3	Nebenfunktionen.....	100
4.6.4	Sicherheitsfunktionen.....	101
4.6.5	Einstellungen .....	101
4.7	3D-Planung.....	103
<b>5</b>	<b>AUSBLICK.....</b>	<b>105</b>
<b>6</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>107</b>
6.1	Literatur.....	107
6.2	Abkürzungsverzeichnis .....	110
6.3	Tabellen .....	112
6.4	Abbildungen .....	114
<b>ANHANG.....</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Öl und Wasser

In der Umwelttechnik und der Wasseraufbereitung spielt die Abtrennung von unerwünschten Ölen und Fetten aus Wasserströmen eine wichtige Rolle. Zur Schonung der Umwelt und Einhaltung gesetzlicher Normen vor der Einleitung von Wasser in Flüsse, Seen und Meere, zur Vorreinigung im Rahmen der Trinkwasseraufbereitung und zur Erfüllung bestimmter Anforderungen an die Wasserqualität müssen Öle und Fette abgeschieden werden.

In der Öl- und Gasindustrie fallen große Mengen von mit Öl verunreinigtem Wasser in Form von Lagerstättenwasser (*produced water*) und Prozesswasser an. Vor der Wiederverwendung oder Entsorgung dieser Wasserströme müssen die Öl- und die Wasserphase in der Regel voneinander getrennt werden. Die Abtrennung von Öl aus Wasser stellt eine technische Herausforderung dar, der in der heutigen Praxis mit einer Vielzahl an verfahrenstechnischen Methoden zu Leibe gerückt wird.

Abhängig von der Menge und dem Verteilungszustand des im Wasser vorhandenen Öls kann sich die Entfernung als relativ einfach bis technisch sehr anspruchsvoll gestalten. Im einfachsten Zustand liegt das Öl nicht-emulgiert vor und bildet einen Film an der Wasseroberfläche, der ohne große Schwierigkeiten abgezogen werden kann. Sobald das Öl in emulgierter oder gelöster Form vorliegt, gestaltet sich die Abtrennung schwieriger. Öle und Fette können in verschiedenen Formen im Wasser vorliegen: als freies Öl, physikalisch emulgiert, chemisch emulgiert, gelöst oder als ölbenetzte Feststoffe. In Tabelle 1 wird ein Überblick gezeigt. [1], [2]

Tabelle 1: Auftretende Formen von Öl in Wasser

Freies Öl	Öltröpfchen mit Durchmessern von 20 µm oder darüber liegen vorerst in dispergierter Form im Wasser vor. Aufgrund der geringeren Dichte steigt das Öl ohne äußeres Zutun an die Wasseroberfläche und bildet dort einen zusammenhängenden Film.
Physikalische Emulsion	Die Größe der Öltröpfchen liegen im Bereich von 5 bis 20 µm. Physikalische Emulsionen entstehen durch mechanischen Krafteintrag wie Rühren oder Pumpen.
Chemische Emulsion	Die Öltröpfchengröße liegt im Bereich von 0,1 bis 5 µm, die Emulsion wird durch oberflächenaktive Emulgatoren wie Tenside aufrechterhalten.
Gelöstes Öl	Der Tröpfchendurchmesser ist geringer als 0,1 µm, das Öl liegt als Lösung in Wasser vor.
Benetzte Feststoffe	Das Öl haftet an Feststoffpartikeln im Wasser.

Als Dispersion werden heterogene Gemische zweier oder mehr nicht oder kaum ineinander löslicher Stoffe bezeichnet. Eine Dispersion aus zwei flüssigen Komponenten wird Emulsion genannt. Die Phase, welche Tröpfchen bildet, wird als disperse Phase bezeichnet, die umgebende als Dispersionsphase. Bei Öl-in-Wasser-Emulsionen bildet das Öl die disperse Phase und Wasser die Dispersionsphase.

Emulsionen sind stabil, wenn die Verteilung der Tropfengröße konstant bleibt: die Tröpfchen dürfen nicht sedimentieren, aggregieren oder koaleszieren. [3]

Öltröpfchen über 5 µm koaleszieren in der Regel zu größeren Tropfen, die zuerst in Form freien Öls dispergiert im Wasser vorliegen und sich dann an der Wasseroberfläche sammeln. Bei physikalischen Emulsionen (bis 20 µm Tröpfchengröße) kann dies allerdings so langsam geschehen, dass diese in der Praxis teilweise als stabile Emulsionen angesehen werden können. In diesem Fall kann der Effekt der Koaleszenz nicht zur Abscheidung genutzt werden. [2]

Das Vorliegen stabiler Emulsionen erschwert die Ölabscheidung. Die meisten Verfahren sind nicht in der Lage, emulgiertes Öl abzutrennen. Lösung für dieses Problem bringen verschiedene Methoden zur Spaltung von Emulsionen. Diese beruhen im Grunde auf dem Zusatz von emulsionsspaltenden Chemikalien (Demulgatoren), Veränderung des pH-Werts oder elektrochemischen Effekten.

Bei der Ölabscheidung aus Wasser wird zwischen drei Behandlungsstufen unterschieden: primäre, sekundäre und tertiäre Behandlungsstufe (*primary, secondary, tertiary treatment*). Die Einteilung der Trennverfahren in diese drei Kategorien orientiert sich an der erreichbaren Qualität des Produktstromes. Dabei können die Übergänge fließend und ein Verfahren – je nach technischer Ausführung – für unterschiedliche Behandlungsstufen geeignet sein.

- **Primary treatment** (Separation): Die Qualität des Austrittsstromes liegt typischerweise bei Ölgehalten zwischen 100 und 300 ppm.  
Eingesetzte Technologien hierfür sind API-Separatoren, Plattenabscheider und Hydrozyklone.
- **Secondary treatment** (Entölung): Verringerung der Ölgehalte auf 5 bis 25 ppm.  
Zu den eingesetzten Verfahren zählen Flotation, Zentrifugation und Filtration.
- **Tertiary treatment** (*polishing*): Abtrennung von Öl bis zu Restgehalten unter 10 ppm.  
Eingesetzt werden hierfür Membranfiltration, Nusschalenfiltration und biologische Verfahren.

## 1.2 Unternehmensprofil: akvola Technologies

Das Wassertechnologieunternehmen akvola Technologies ist auf die Aufbereitung schwer zu behandelnder Wasserströme spezialisiert. Der Fokus liegt dabei auf der Abscheidung von Öl und suspendierten Feststoffen aus industriellen, gewerblichen und kommunalen Abwässern. Das Kerngeschäft umfasst die Planung und den Bau von Wasseraufbereitungsanlagen und verwandte Ingenieursdienstleistungen. Das in Berlin ansässige Startup-Unternehmen wurde 2013 gegründet und beschäftigt momentan fünf feste Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Der Unternehmensgründung vorausgegangen ist die Dissertation von Dr.-Ing. Matan Beery an der Technischen Universität Berlin. Im Rahmen dieser wurden verschiedene Verfahren zur Vorreinigung von Wasser vor der Entsalzung durch Umkehrosmose verglichen. Hierbei wurde auch die Methode der Filtration durch feinporige Keramikmembranen untersucht und ein erster Prototyp zur Wasserbehandlung gebaut. Dieser Prototyp diente als Grundlage für die Entwicklung des patentierten akvo-Float™-Verfahrens durch Dipl.-Ing. Johanna Ludwig und Dr.-Ing. Matan Beery.

Beim akvo-Float™-Verfahren werden die Prozessschritte Flotation und Filtration in einem Behälter vereint. Bei der Flotation werden feinste Luftblasen durch poröse Keramikmembranen erzeugt; die nachfolgende Filtration geschieht durch getauchte feinporige Keramikplatten. Das Verfahren kann vielseitig eingesetzt werden, es eignet sich für die Abtrennung einer Vielzahl organischer und anorganischer Verunreinigungen, suspendierter Feststoffe, Öl und Algen. In Abschnitt 3.6 wird das akvoFloat™-Verfahren im Detail beschrieben.

Im Jahre 2013 wurde die erste Pilotanlage mit einer Kapazität von 700 l/h gereinigtem Wasser in Betrieb genommen. Es wurden Testläufe am Berliner Landwehrkanal, im Salzwasser-aquarium AquaDom in Berlin sowie im firmeneigenen Labor erfolgreich durchgeführt und das akvoFloat™-Verfahren dabei auf seine Tauglichkeit bei verschiedenen Betriebsbedingungen untersucht.

Das Ziel von akvola Technologies ist es, den akvoFloat™-Prozess technisch und wirtschaftlich für größere Kapazitäten zu optimieren und dabei höchste Qualitätsanforderungen hinsichtlich betrieblichem Ablauf und Produkteigenschaften zu erfüllen.

## 2 Aufgabenstellung

### 2.1 Problemstellung

Die Reinigung stark öbelasteter Wasserströme mittels akvoFloat™-Technologie wurde bisher nur im Labormaßstab erprobt. Reale Bedingungen weichen häufig von jenen im Labor ab bzw. können dort oft nicht exakt nachgebildet werden. Aus diesem Grunde sind praktische Versuche unter realen Bedingungen unabdingbar. Mit einer mobilen Pilotanlage sollen Testläufe in größerem Maßstab direkt an den Orten ermöglicht werden, an denen öbelastetes Wasser anfällt.

Erster geplanter Einsatzort und Grundlage für die Auslegung der Anlage ist eine Öllagerstätte in der Nähe von Houston, Texas in den Vereinigten Staaten. Dort soll das bei der Öl- und Gasförderung anfallende Lagerstättenwasser mit dem akvoFloat™-Verfahren aufbereitet und darin enthaltene Ölrückstände so weit wie möglich entfernt werden. Bei der Planung der Pilotanlage soll auf die vor Ort herrschenden Bedingungen Rücksicht genommen werden, dazu zählen u. a. die Eigenschaften und Inhaltsstoffe des Wassers, in den Vereinigten Staaten gebräuchliche Gewindenormen sowie das US-amerikanische Stromsystem.

Um die Anlage an unterschiedlichen Orten der Welt einsetzen zu können, soll sie möglichst unkompliziert und kompakt aufgebaut und leicht zu transportieren sein. Ein einfacher Aufbau und der Einsatz genormter Komponenten, Leitungen und Verbindungselementen erleichtern Umbauten und etwaige Reparaturen während des Einsatzes.

### 2.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Planung, Auslegung und Dimensionierung der akvoFloat™-Pilotanlage zur Öl-Wasser-Trennung. Die Anlage soll von Grund auf bis zum baufertigen Projekt entwickelt werden.

In einem ersten Schritt müssen die gewünschten Funktionen der Anlage und die dafür nötige Strömungsführung samt erforderlicher Komponenten, Armaturen und Mess-, Steuer- und Regeltechnik überlegt werden. Aus diesen Informationen sollen ein Prozessfließbild und Listen zu beschaffender Anlagenteile und Geräte erstellt und Kriterien für die Materialauswahl und Korrosionsbeständigkeit definiert werden.

Für die Komponenten sollen mehrere Angebote eingeholt werden, um anhand der Ausführung und Betriebsweise und des Preises die bestgeeigneten auswählen zu können.

Der praktische Teil der Arbeit umfasst die Dokumentation der Planung, der Auslegung und der Auswahlkriterien für Material und Anlagenkomponenten, die Beschreibung der verschiedenen Anlagenteile und Armaturen sowie der Funktionen der Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Weiters wird das Fließbild erläutert und die verschiedenen Betriebsmodi der Anlage und deren Steuerung und Automatisierung beschrieben.

Im theoretischen Teil der Arbeit werden die bedeutendsten mechanischen Verfahren zur Abtrennung von Öl aus Wasserströmen vorgestellt, die heute industrielle Verwendung finden.

Dabei werden die technischen Eigenschaften, die Mechanismen der Ölabscheidung und die Wirksamkeit dieser Methoden beschrieben. Auch die Funktionsweise des akvoFloat™-Verfahrens wird in diesem Teil erläutert.

### 3 Verfahren der Öl-Wasser-Trennung

In diesem Abschnitt werden die heute geläufigen großtechnisch eingesetzten Verfahren zur Öl-Wasser-Trennung beschrieben. Es wird dabei nur auf mechanische Verfahren eingegangen. Andere Methoden, wie z. B. der mikrobiologische Abbau von Ölmolekülen, werden nicht behandelt.

Die betrachteten Technologien können sehr grob in drei Kategorien eingeteilt werden: Verfahren, deren Trennwirkung auf dem Einfluss eines Kraftfeldes basieren, Flotationsverfahren und Filtrationsverfahren.

Die Trennung in einem Kraftfeld gelingt mit Hilfe des Erdschwerefeldes oder künstlich erzeugter Fliehkraftfelder. Flotationsverfahren werden anhand der Art der Gasblasenerzeugung unterschieden und Filtration wird mit Nusschalen als Filtermedium oder mit feinporigen Membranen durchgeführt.

In den verwendeten Literaturquellen werden ppm und mg/l als Konzentrationsmaße zur Quantifizierung des im Wasser enthaltenen Öls häufig analog verwendet. Obwohl diese Analogie aufgrund der unterschiedlichen Dichten von Öl und Wasser nur annähernd gegeben ist, wird dies in dieser Arbeit ebenfalls so gehandhabt.

### 3.1 Schwerkraftabscheider

In Schwerkraftabscheidern können Dispersionen mit Hilfe der Erdanziehungskraft voneinander getrennt werden. Voraussetzung hierfür ist ein Dichteunterschied zwischen disperser Phase und Dispersionsphase.

Ist die Dichte der dispersen Phase größer als jene der Dispersionsphase, kommt es zum Absinken der Teilchen der dispersen Phase. Im umgekehrten Fall schwimmen die Teilchen der dispersen Phase auf und setzen sich an der Oberfläche ab. Beide Fälle lassen sich durch dieselben Gesetzmäßigkeiten beschreiben. Auf ein absinkendes oder aufsteigendes Teilchen wirken Gewichtskraft  $F_G$ , Auftriebskraft  $F_A$  und die geschwindigkeitsabhängige hydrodynamische Widerstandskraft  $F_R$ . Überwiegt die Gewichtskraft kommt es zum Absinken des Teilchens, überwiegt die Auftriebskraft, schwimmt das Teilchen auf.

Für ein kugelförmiges dispergiertes Teilchen, z. B. ein Partikel oder Öltröpfchen in Wasser, gilt für Gewichts- und Auftriebskraft:

$$F_G = m_d \cdot g = V_d \cdot \rho_d \cdot g \quad (1)$$

$$F_A = m_w \cdot g = V_o \cdot \rho_w \cdot g \quad (2)$$

Die Umströmung der Teilchen in sedimentierenden oder aufschwimmenden Suspensionen ist fast ausschließlich laminar bei einer Reynolds-Zahl kleiner als 1. Der hydrodynamische Widerstand bzw. die Reibungskraft ist in diesem Fall durch das Gesetz von Stokes gegeben. Dieses beschreibt die Widerstandskraft in Abhängigkeit des Durchmessers des Teilchens, der Viskosität des umgebenden Fluids und der Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit des Partikels:

$$F_R = 3 \cdot \pi \cdot d_d \cdot \eta \cdot w \quad (3)$$

An einem Partikel oder Tröpfchen stellt sich ein Gleichgewicht der drei wirkenden Kräfte ein. Dieses kann folgendermaßen beschrieben werden:

$$F_A + F_R - F_G = 0 \quad (4)$$

In Abbildung 1 ist dieses Kräftegleichgewicht dargestellt.

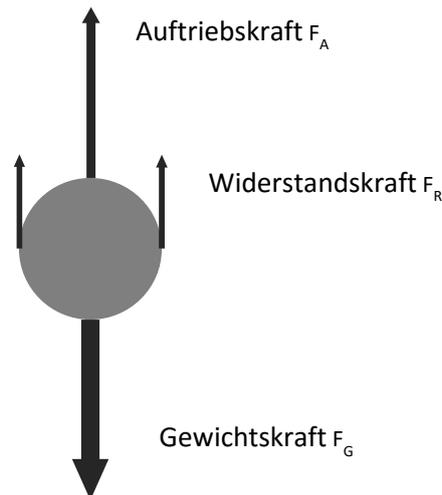


Abbildung 1: Kräftegleichgewicht an einem sedimentierenden oder aufschwimmenden Teilchen

Durch Umformen des Kräftegleichgewichts erhält man die Stokessche Gleichung. Diese stellt die Sinkgeschwindigkeit eines sich absetzenden Partikels bzw. die Steiggeschwindigkeit eines aufsteigenden Teilchens oder Öltröpfchens dar:

$$w = \frac{g \cdot d_d^2 \cdot (\rho_w - \rho_o)}{18 \cdot \eta} \quad (5)$$

Aus der Stokesschen Gleichung können für das Verhalten von Öltröpfen in Wasser folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Je größer ein Tropfen, desto größer dessen Steiggeschwindigkeit.
2. Je größer die Dichtedifferenz zwischen Öl und Wasser bzw. zwischen disperser Phase und Dispersionsphase, desto größer die Steiggeschwindigkeit.
3. Je höher die Temperatur der Dispersionsphase (Wasser), desto geringer dessen Viskosität und desto größer die Steiggeschwindigkeit. [4]

Theoretisch kann das Stokessche Gesetz auf Tröpfchen bis zu einer Mindestgröße von 10  $\mu\text{m}$  angewendet werden. Tröpfchen mit größeren Durchmessern können demzufolge mit Schwerkraftabscheidern abgetrennt werden. In der Praxis liegt die Grenze bei einem Durchmesser von rund 30  $\mu\text{m}$ , da Anlagenvibrationen und kleinste Druckschwankungen bei kleineren Tröpfchen das Aufsteigen dieser innerhalb der Dispersionsphase Wasser verhindern.

Stabile Emulsionen können nicht getrennt werden, Schwerkraftabscheider sind nur für die Abscheidung freien Öls geeignet. [5]

Die Kenntnis der Steiggeschwindigkeit der Öltröpfchen ist für die Auslegung von Schwerkraftabscheidern grundlegend. Ausgehend von der Steiggeschwindigkeit können die Baugröße und die nötige Durchflussgeschwindigkeit des ölbeladenen Wasserstroms bestimmt werden. Je kleiner die Durchmesser der abzuscheidenden Tröpfchen sein sollen, desto größer muss die Verweilzeit und damit auch die Baugröße des Abscheiders werden. Aus diesem Grunde wäre die Entfernung von Öltröpfchen relativ kleiner Durchmesser mit Schwerkraftabscheidern unwirtschaftlich. Schwerkraftabscheider werden darum hauptsächlich zur Vorreinigung eingesetzt und andere Geräte zur weitergehenden Abscheidung nachgeschaltet.

Eine Kennzahl zur Beschreibung der Abscheidecharakteristik ist die Klärflächenbelastung oder spezifische Flächenbelastung  $q$  (*hydraulic loading rate*) eines Schwerkraftabscheiders. Diese stellt den Quotienten aus Volumenstrom und Klärfläche dar und hat die Einheit einer Geschwindigkeit. Für den Volumenstrom wird in dieser Gleichung meist der gereinigte Austrittsstrom verwendet. Im einfachsten Fall eines Absetzbeckens ohne Einbauten entspricht die Klärfläche der Flüssigkeitsoberfläche, für Abscheider mit Einbauten gilt dies nicht zwingend.

$$q = \frac{\dot{V}}{A_K} \quad (6)$$

Die maximale Klärflächenbelastung entspricht der Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit der kleinsten abzutrennenden Partikel. Die Klärflächenbelastung ist geeignet, um verschiedene Abscheider miteinander zu vergleichen. [6], [7]



Der in den Abscheider eintretende Wasserstrom trifft üblicherweise auf Leitbleche, welche die Funktion haben, den Wasserstrom entlang der Breite und Tiefe des Abscheiders zu verteilen. Auf diese Weise wird bei großen Zulaufgeschwindigkeiten die horizontale Fließgeschwindigkeit auf ein akzeptables Maß gesenkt. Kurzschlussströmungen und schlechte Abscheidung durch zu große Horizontalgeschwindigkeiten werden dadurch vermieden. Um zu verhindern, dass die Öltröpfchen im Wasser emulgiert werden, ist es ratsam, schonende Fördermethoden zu verwenden. Für die Förderung des Wassers in den Separator werden aus diesem Grunde häufig Schneckenpumpen eingesetzt.

Um flüchtige Kohlenwasserstoffe und andere gasförmige Stoffe und Dämpfe zurückzuhalten, ist eine Überdachung oder Einhausung des Abscheiders sinnvoll. Diese kann durch schwimmende Abdeckungen oder fest installierte Dachkonstruktionen realisiert werden.

Um das aufschwimmende Öl und den abgesetzten Schlamm aus dem Becken abzutransportieren, werden üblicherweise Band- oder Kettenräumer verwendet. Räumbleche werden dabei entlang des Bodens und der Wasseroberfläche horizontal durch das Becken gezogen. Der Schlamm wird in einen Schlammabzug am Einlaufende des Beckens geschoben, an der Wasseroberfläche wird das Öl in Richtung des Wasserauslasses transportiert und dort über einen Überlauf oder eine Skimrinne abgezogen. Häufig werden auch Walzenskimmer eingesetzt; hierbei handelt es sich um einen über die gesamte Breite des Beckens reichenden rotierenden Zylinder, der teilweise in die Ölschicht eintaucht. Das aufschwimmende Öl haftet aufgrund der Adhäsionskräfte an der Walze, wird von der Wasseroberfläche weggehoben und mit Hilfe eines Schabers abgestreift.

Typische API-Abscheider trennen freie, nicht emulgierte Öltröpfchen mit Durchmessern von 150  $\mu\text{m}$  und darüber ab. [8], [10], [11] Sie sind sehr flexibel hinsichtlich der Eingangsbeladung, der Feed-Strom kann Ölgehalte von 500 bis hin zu 20.000 ppm aufweisen. Unabhängig von der Eintrittskonzentration kann die Ölkonzentration im austretenden Strom auf 50 bis 200 ppm reduziert werden. [12]–[14]

Großer Vorteil des API-Abscheiders ist das einfache Verfahren, das zu niedrigen Betriebskosten führt, und die große Flexibilität hinsichtlich Größe und Ölbeladung des eintretenden Wasserstroms. Neben großen Mengen an Öl eignet sich dieser Abscheider auch hervorragend zur Entfernung von Feststoffpartikeln.

Der Nachteil des API-Separators ist dessen große Bauform. Dies führt zu großem Platzbedarf und relativ hohen Baukosten.

### 3.1.2 Plattenabscheider

Der große Platzbedarf der API-Abscheider und der Wunsch, diesen zu verkleinern, waren ausschlaggebend für die Entwicklung der Plattenabscheider. Diese Anlagen kombinieren die Wirkweise einfacher Absetzbecken mit dem Mechanismus der Koaleszenz kleiner Öltröpfchen zu größeren. Dadurch kann die Abscheideleistung verglichen mit API-Abscheidern verbessert und die Baugröße verringert werden. Mit Plattenseparatoren können auf diese Weise deutlich kleinere Öltröpfchen abgeschieden werden.

Plattenabscheider verfügen über Einbauten aus mehreren parallel angeordneten Platten. Diese stehen schräg zur Längs- oder Querachse des Beckens und bilden durch ihre Zwischenräume Kanäle, durch die das Wasser strömt. Die Abstände der Platten zueinander liegen im Bereich von 1 bis 10 cm.

Öltröpfchen schwimmen in den Kanälen zwischen den Platten wegen deren geringerer Dichte auf dem Wasser auf und steigen gemäß dem Stokesschen Gesetz nach oben. Sie erreichen die darüber liegende Platte und treffen dort auf weitere Öltröpfchen, mit denen sie zu größeren koaleszieren. Aufgrund der Kanäle ist der Weg der Tröpfchen bis zur Kontaktfläche von Wasser und Ölfilm (an der Unterseite der darüber liegenden Platte) sehr kurz, die benötigte Zeit zur Abtrennung wird dadurch verringert. Das Öl wandert entlang der schrägen Platte nach oben, bis es die Endkante der Platte erreicht. Dort, im freien Becken, steigen die Tropfen an die Wasseroberfläche. Die Funktionsweise der Plattenseparatoren ist in Abbildung 3 dargestellt.

Die vertikale Steiggeschwindigkeit der Tropfen ist größer als in Becken ohne Platten, da die Tropfen aufgrund der Koaleszenz größere Durchmesser aufweisen. Die höhere Steiggeschwindigkeit bewirkt, dass bei Becken mit Platteneinbauten eine geringere Baugröße vonnöten ist, da das Öl bei gleicher horizontaler Fließgeschwindigkeit des Wassers rascher an die Oberfläche steigt.

Die Abscheidung von Feststoffen wird ebenfalls verbessert. Während in jedem Kanal das Öl aufsteigt und sich an der oberen Platte sammelt, sinken suspendierte Feststoffe ab und rutschen entlang der unteren schrägen Platte hinunter.

Das Fließen des Wassers durch die Plattenkanäle bewirkt ein deutlich weniger turbulentes Strömungsregime als es in einem Becken ohne Einbauten der Fall wäre. Die Reynoldszahlen der Strömung in Plattenabscheidern liegen im Bereich zwischen 400 und 1600, während in API-Abscheidern bei selber Strömungsgeschwindigkeit Reynoldszahlen über 5000 erreicht werden. Verwirbelungen und Rückvermischung von bereits getrenntem Öl und Wasser werden dadurch verringert, was sich positiv auf die Abscheideleistung auswirkt. Sand und andere Feststoffe setzen sich aufgrund des laminaren Strömungsregimes gut ab. [15]

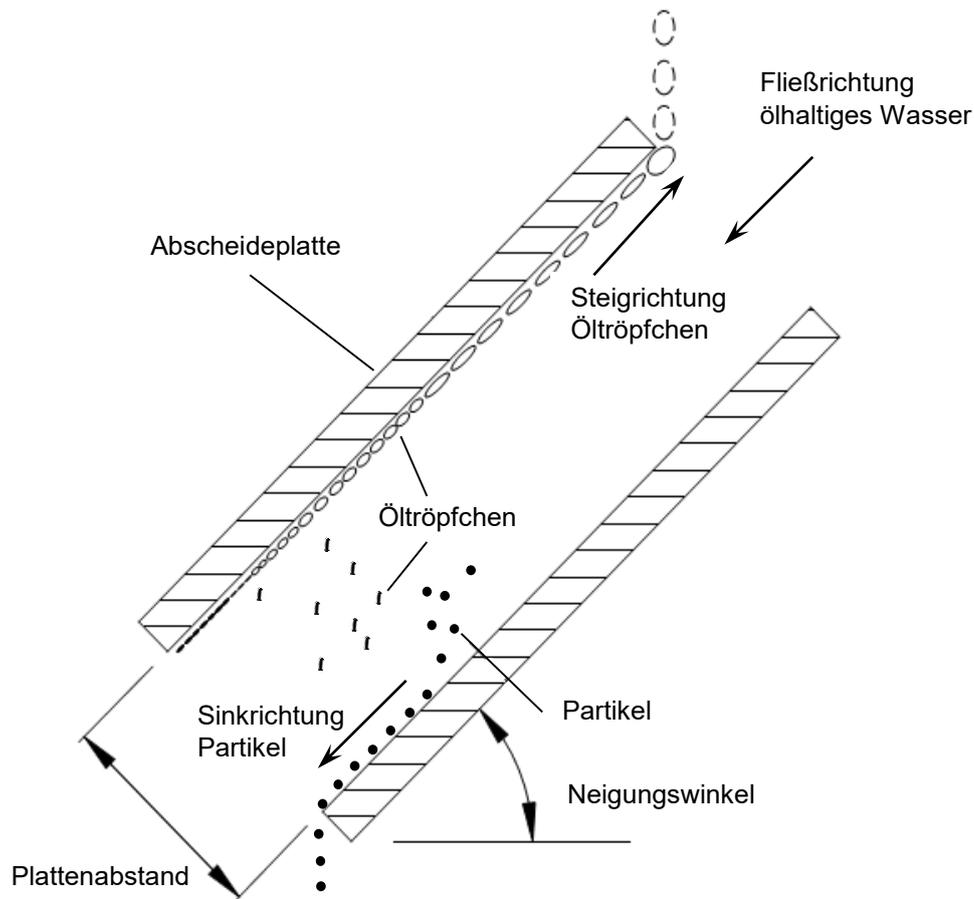


Abbildung 3: Funktionsweise eines Plattenseparators [4]

Durch die Einbauten und deren positive Auswirkungen auf die Trennung können Plattenabscheider bei gleicher Leistung deutlich kleiner gebaut werden als Abscheider ohne Einbauten. Die Baugröße von Plattenabscheidern liegt üblicherweise zwischen einem Fünftel und der Hälfte von vergleichbaren API-Abscheidern.

Plattenabscheider verfügen über keine bewegte Teile und sind darum wenig anfällig für Störungen und nur wenig wartungsintensiv. Beckenform und -größe können relativ frei gewählt und an äußere Gegebenheiten wie den verfügbaren Platz angepasst werden. Die Installation ist sehr einfach und die Betriebskosten sind gering, da außer für die Pumpen keine elektrische Energie benötigt wird. Während des Betriebs zeichnen sich die Plattenabscheider durch ihre große Flexibilität hinsichtlich der Betriebsbedingungen aus. Plötzliche Veränderungen der Durchflussmenge oder des Ölgehalts haben keine nennenswerte Auswirkung auf die Abscheideleistung.

Ein Nachteil der Plattenabscheider ist, dass die Kanäle zwischen den parallelen Platten dazu neigen, durch Anbackungen und Ablagerungen zuzuwachsen. Der freie Querschnitt wird dadurch verkleinert und die Strömungsgeschwindigkeit erhöht, was zu einer Verringerung der Abscheideleistung führt. Dieses Problem ist stärker ausgeprägt, je verschmutzter und kälter das zu behandelnde Wasser ist. Ebenso führt ein kleinerer Plattenabstand zu schnellerem

Zuwachsen. Die Reinigung der Plattenzwischenräume und Entfernung der Ablagerungen ist meist sehr aufwändig, da hierfür die Plattensets außerhalb des Beckens auseinander-genommen werden müssen.

Je nach Ausführung der Platteneinbauten kann man bei den Plattenabscheidern zwei Varianten unterscheiden. Bei Parallelplattenabscheidern (*parallel plate interceptor*, PPI-Separator) sind die parallelen Platten eben, bei Wellplattenabscheidern (*corrugated plate interceptor*, CPI-Separator) bestehen sie aus gewellten Platten.

Plattenabscheider können deutlich kleinere Öltröpfchen abtrennen als Abscheider ohne Einbauten. Der Mindestdurchmesser liegt je nach Art und Ausführung der Einbauten im Bereich von 40 bis 60  $\mu\text{m}$ , größere Tröpfchen werden in dieser Art Separatoren problemlos abgeschieden.

Hinsichtlich des Volumenstromes und der Ölbeladung des Feed-Stromes sind Plattenabscheider – so wie API-Abscheider – sehr anpassungsfähig. Ölkonzentrationen von 200 bis 10.000 ppm am Eintritt stellen keine Probleme dar. [14]

### 3.1.2.1 PPI-Abscheider (Parallelplattenabscheider)

Der PPI-Abscheider (*parallel plate interceptor*) wurde in den 1950er Jahren von der Firma Shell entwickelt. Bei den ersten Anlagen handelte es sich um einfache API-Abscheider oder Absetzbecken, die mit Einbauten aus geneigten, ebenen parallelen Platten versehen wurden.

Zwei Einbauvarianten sind üblich: Bei der ersten liegen die Platten parallel zur Querachse des Beckens und sind unter  $45^\circ$  zur Längsachse geneigt. Bei der zweiten Variante sind zwei Sets von aufeinander normal stehende Platten so angeordnet, dass sie jeweils parallel zur Längsachse des Beckens liegen und einen Winkel von  $45^\circ$  mit der Querachse einschließen. Aus der Achse der Fließrichtung betrachtet bilden sie miteinander ein „V“ (siehe Abbildung 4). [4], [8]

Der Plattenabstand liegt bei PPI-Abscheidern meist im Bereich zwischen 2 und 10 cm. Ein kleinerer Abstand erlaubt eine größere Anzahl an Platten einzubauen und dadurch die Abscheidung zu verbessern, führt allerdings auch leichter zum Zuwachsen und Verstopfen der Kanäle durch Ablagerungen.

Die Mindestgröße der freien Öltröpfchen für die Abtrennung mit PPI-Abscheidern liegt bei rund  $60 \mu\text{m}$ . Größere Tröpfchen können mit diesem Verfahren sehr gut abgeschieden werden. [8] Im Austrittsstrom können Ölgehalte von 35 bis 50 ppm erreicht werden.

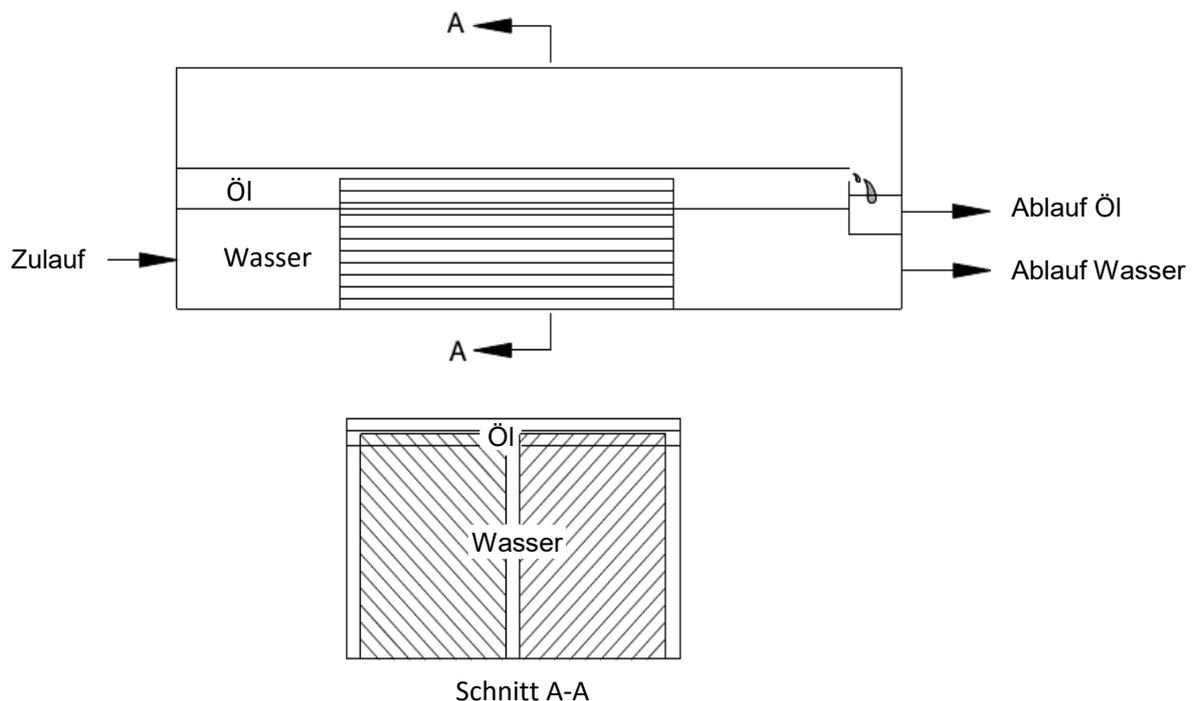


Abbildung 4: PPI-Abscheider [4]

### 3.1.2.2 CPI-Abscheider (Wellplattenabscheider)

Der CPI-Abscheider (*corrugated plate interceptor*) stellt eine Weiterentwicklung des PPI-Abscheiders dar.

An Stelle der ebenen Platten werden gewellte eingesetzt und diese ebenfalls parallel angeordnet. Die Achsen der Riffeln bzw. Wellen der Platten liegen parallel zur Fließrichtung. Die Neigung der Platteneinbauten liegt zwischen 45 und 60° zur Horizontalen. Aufgrund der geringen Plattenabstände von meist rund 2 cm können CPI-Abscheider kompakt gebaut und der Platzbedarf minimiert werden.

Die Kanäle zwischen den Platten besitzen aufgrund der gewellten Platten einen gewellten Querschnitt. In diesem sammelt sich das Öl in den „Wellenbergen“, den höchstgelegenen Stellen des Kanals, und steigt in diesen Rinnen nach oben. Am Boden des Kanals sammeln sich Feststoffe in den tiefstgelegenen Bereichen der Rinnen („Wellentäler“) und rutschen in diesen nach unten (siehe Abbildung 5).

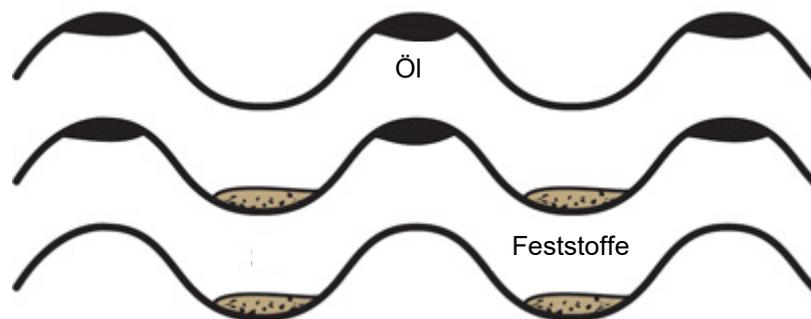


Abbildung 5: Querschnitt der gewellten Platteneinbauten [4]

Wegen der geringen Plattenabstände kann es relativ leicht zum Verstopfen der Plattenkanäle kommen. Insbesondere im Wasser enthaltener öliger Sand kann sich an den unter 45° geneigten Platten gut festsetzen. Als Gegenmaßnahme können die Platten steiler montiert werden, auch Wasserdüsen zum Wegspülen der Anbackungen sind gebräuchlich.

Es existieren zwei Varianten des CPI-Abscheiders: die *upflow*-Ausführung, bei der die Platteneinbauten in Steigrichtung durchströmt werden, und die *downflow*-Ausführung, bei welcher der Wasserstrom am höher gelegenen Ende der Plattenpackung eintritt und am niedriger gelegenen austritt. Letztere Variante wird bei der Öl-Wasser-Trennung bevorzugt eingesetzt, da Öl und Wasser an unterschiedlichen Enden der Einbauten austreten: Öl am oberen Ende und Wasser am unteren. In Abbildung 6 ist ein CPI-Separator in *downflow*-Anordnung dargestellt.

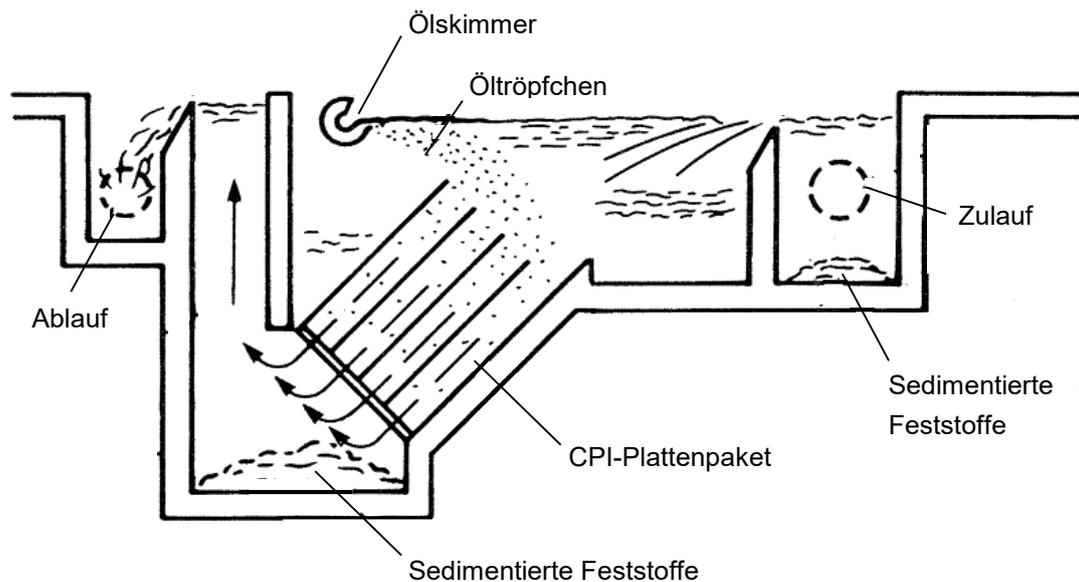


Abbildung 6: CPI-Separator in *downflow*-Ausführung [16]

Die Einbauten aus gewellten Platten sorgen für gute Abscheideleistungen, freies Öl kann bis zu einer Konzentration von 15 ppm abgeschieden werden. Die Abscheidegrenze liegt bei rund 40 µm, größere Öltröpfchen werden abgetrennt. [11], [17]

Vorteil gegenüber den PPI-Abscheidern ist die bessere Abscheideleistung bei gleicher Baugröße. Die durch die gewellten Platten entstehenden Kanäle erleichtern Handling und Transport der Feststoffe und des Öls.

### 3.2 Zentrifugalabscheider

Zentrifugalabscheider nutzen die bei rotierender Bewegung auftretenden Fliehkräfte, um Medien verschiedener Dichte zu trennen. Die Abscheidekräfte können im Fliehkraftfeld um ein Vielfaches größer werden als im Schwerkraftfeld, wodurch sich die Medientrennung deutlich effizienter und schneller realisieren lässt. Dadurch können die Baugröße der Trennapparaturen und die Verweilzeit beträchtlich verringert werden, die Trennung von Gemischen geringer Dichteunterschiede wird erleichtert.

Analog zum Schwerfeld kann im Fliehkraftfeld ein Kräftegleichgewicht aufgestellt werden. Als zusätzliche Kraft wirkt die Fliehkraft auf die Teilchen. Der Betrag der Fliehkraft ist üblicherweise um so vieles größer als jener der Schwerkraft, dass die Schwerkraft in den Berechnungen vernachlässigt werden kann.

Für das Kräftegleichgewicht, graphisch dargestellt in Abbildung 7, ergibt sich somit:

$$F_A + F_R - F_Z = 0 \quad (7)$$

$$F_Z = F_A + F_R \quad (8)$$

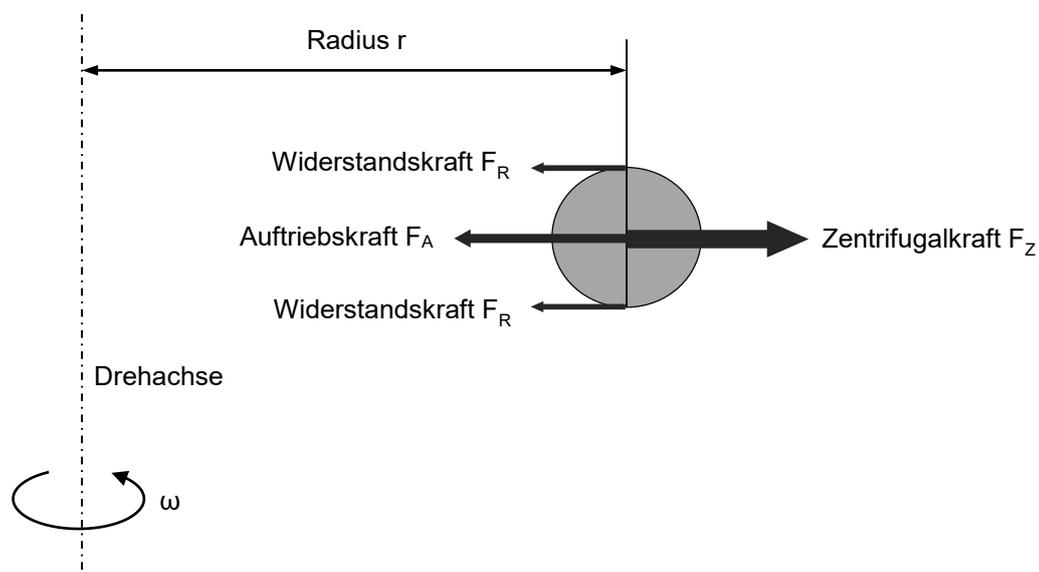


Abbildung 7: Kräftegleichgewicht eines Teilchens im Fliehkraftfeld

Die Gewichtskraft eines Körpers, Resultat der auf diesen Körper wirkenden Schwerkraft, ist abhängig von dessen Masse und der Erdbeschleunigung. Da die Erdbeschleunigung überall auf der Erde den annähernd gleichen Wert besitzt, ist die Schwerkraft eines Körpers – unabhängig von dessen Bewegung – überall auf der Erde nahezu ident. Anders im Fliehkraftfeld: dort ist die wirkende Fliehkraft abhängig vom Bewegungszustand des Körpers. Bedingung für die Ausbildung einer Zentrifugalbeschleunigung in radialer Richtung nach

außen ist die Bewegung entlang einer gekrümmten Bahn mit einem bestimmten Radius und mit einer bestimmten Umfangsgeschwindigkeit. Die auf einen im Kreis bewegten Körper oder Teilchen wirkende Zentrifugal- oder Fliehkraft  $F_Z$  ist abhängig von dessen Masse  $m$  sowie dem Bahnradius  $r$  und der Winkelgeschwindigkeit der Kreisbewegung  $\omega$ :

$$F_Z = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (9)$$

Diese Abhängigkeit vom Bewegungszustand macht die Beschreibung und Berechnung der Kräfteverhältnisse im Zentrifugalfeld deutlich komplizierter als im Schwerfeld.

Als Maß für die Wirksamkeit des Zentrifugalfeldes kann die Schleuderzahl  $K_Z$  herangezogen werden. Die Schleuderzahl beschreibt das Verhältnis von Zentrifugalbeschleunigung  $a_Z$  zur Erdbeschleunigung  $g$ :

$$K_Z = \frac{a_Z}{g} = \frac{r \cdot \omega^2}{g} \quad (10)$$

$K_Z$  ist eine dimensionslose, vom Drehradius  $r$  abhängige Kenngröße. Mit Hilfe der Schleuderzahl können verschiedene Betriebsparameter der Abscheidung im Schwerfeld und im Fliehkraftfeld verglichen werden. So ist beispielsweise die Absetzgeschwindigkeit im Zentrifugalfeld um das  $K_Z$ -fache größer als im Schwerfeld, die erforderliche Trennfläche dementsprechend im Zentrifugalfeld um den Faktor  $K_Z$  kleiner.

Die Stokessche Gleichung für die Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit der Partikel bzw. Öltröpfchen kann für die Gültigkeit im Fliehkraftfeld angepasst werden. Es ergibt sich – unter Berücksichtigung der Zentrifugalbeschleunigung anstatt der Erdbeschleunigung – folgende Gleichung:

$$w = \frac{r \cdot \omega^2 \cdot d_d^2 \cdot (\rho_w - \rho_o)}{18 \cdot \eta} \quad (11)$$

In Fliehkraftabscheidern können sich verschiedene Strömungsregime ausbilden. Bei rotierenden Fluidströmungen wird zwischen Rotationsströmung und Potentialströmung unterschieden.

Bei der Rotationsströmung ist die Umfangsgeschwindigkeit im Zentrum null und steigt mit dem Radius linear nach außen an. Diese Art der Strömung wird auch als Starrkörperwirbel bezeichnet und entsteht beispielsweise durch eine drehende Trommel, in welcher das gesamte enthaltene Fluid starr mitrotiert. In einer Zentrifuge bildet sich eine Rotationsströmung aus.

Die Potentialströmung oder freie Raumströmung zeigt eine hyperbolische Abnahme der Umfangsgeschwindigkeit vom Zentrum nach außen hin, der Maximalwert liegt im Zentrum. Das Fluid dreht sich frei im Raum, die einzelnen Fluidteilchen drehen sich allerdings – anders als bei der Rotationsströmung – nicht mit, sondern behalten während der Rotation des Gesamtfluids ihre Ausrichtung. Wird eine gerade, ebene Strömung in einen ruhenden Behälter

mit kreisförmiger Grundfläche (beispielsweise ein Zyklon) umgelenkt, bildet sich eine Potentialströmung aus. [7]

Abbildung 8 zeigt die Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit  $c_u(r)$  vom Drehradius und die räumliche Ausrichtung der Teilchen bei Rotations- und Potentialströmung.

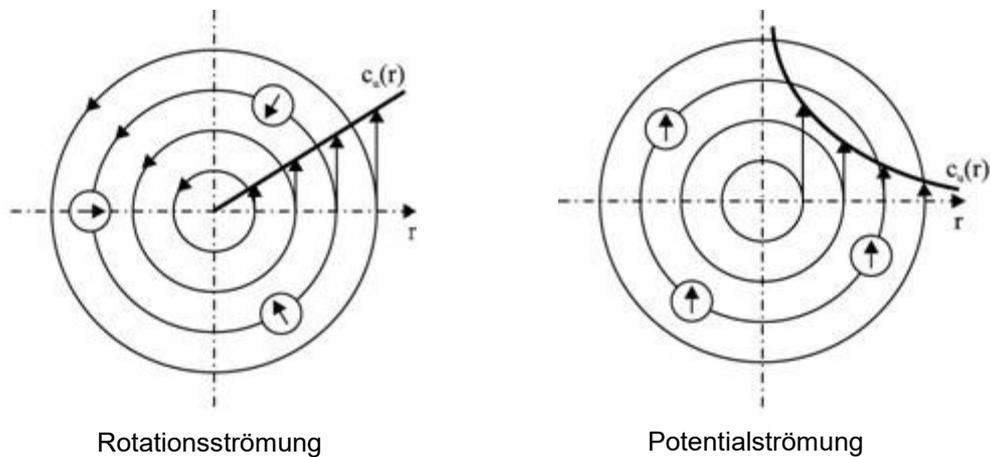


Abbildung 8: Umfangsgeschwindigkeit  $c_u(r)$  in Abhängigkeit vom Drehradius und räumliche Ausrichtung der Teilchen bei Rotations- und Potentialströmung [7]

### 3.2.1 Zentrifuge

Mit einer Zentrifuge können unter Ausnutzung der Fliehkraft Gemische aus festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteilen getrennt werden. Das zentrale Element einer Zentrifuge ist eine zylindrische oder konische Trommel, die in Rotation um die eigene Achse versetzt wird. Durch die wirkenden Fliehkräfte wandern die spezifisch leichteren Teilchen nach innen, während sich die Teilchen größerer Dichte an der Mantelfläche der Trommel sammeln.

Eine wichtige Kenngröße für die Leistungsfähigkeit einer Zentrifuge ist die maximale Zentrifugalbeschleunigung, die von dieser erzeugt werden kann. Diese wird meist als Vielfaches der Erdbeschleunigung  $g$  oder über die Schleuderzahl  $K_z$  angegeben.

Die Schleuderzahl  $K_z$  ist geeignet, geometrisch ähnliche Zentrifugen zu vergleichen. Ist die Schleuderzahl bei geometrisch ähnlichen Zentrifugen gleich, dann besitzen diese die gleiche Trennwirkung.

Im Falle der Trennung zweier flüssiger Phasen wie Öl und Wasser kann relativ einfach ein kontinuierlicher Betrieb realisiert werden. Hierfür werden in der Position variabel verstellbare Rohre oder Schläuche als Abläufe so in der Trommel positioniert, dass diese in die reine Öl- bzw. Wasserphase ragen. In Verbindung mit verstellbaren Trennscheiben kann so erreicht werden, dass auch bei sich änderndem Eingangsstrom nur reine Phasen aus der Trommel abgezogen werden. [18]

Bei der Trennung von Öl und Wasser kommen üblicherweise Vollmantel- oder Tellerzentrifugen zum Einsatz. Bei letzteren wird die Trommel durch ein Paket konischer Teller in Separierräume unterteilt (siehe Abbildung 9). Dies bewirkt, ähnlich wie bei Plattenseparatoren, dass die Steigdistanz der Öltröpfchen minimiert und die Trennwirkung verbessert wird. Das Öl sammelt sich an der Innenseite der Trommel, das Wasser wird an die Außenwand gedrückt. Der Wasserauslass ist darum an einem größeren radialen Abstand von der Drehachse der Trommel angeordnet als der Ölauslass. Mittels beweglicher Trennscheiben kann die Zentrifuge an die Dichten der Medien und deren Zusammensetzung angepasst werden.

Drei-Phasen-Zentrifugen, auch Separatoren oder Drei-Phasen-Separatoren genannt, sind zusätzlich in der Lage, vorhandene Feststoffe abzuscheiden und in eigenen Kammern zu sammeln. Bei modernen Geräten ist die Entleerung auch während des Betriebs möglich.

Abbildung 10 zeigt schematisch einen Drei-Phasen-Separator des Herstellers Flottweg.

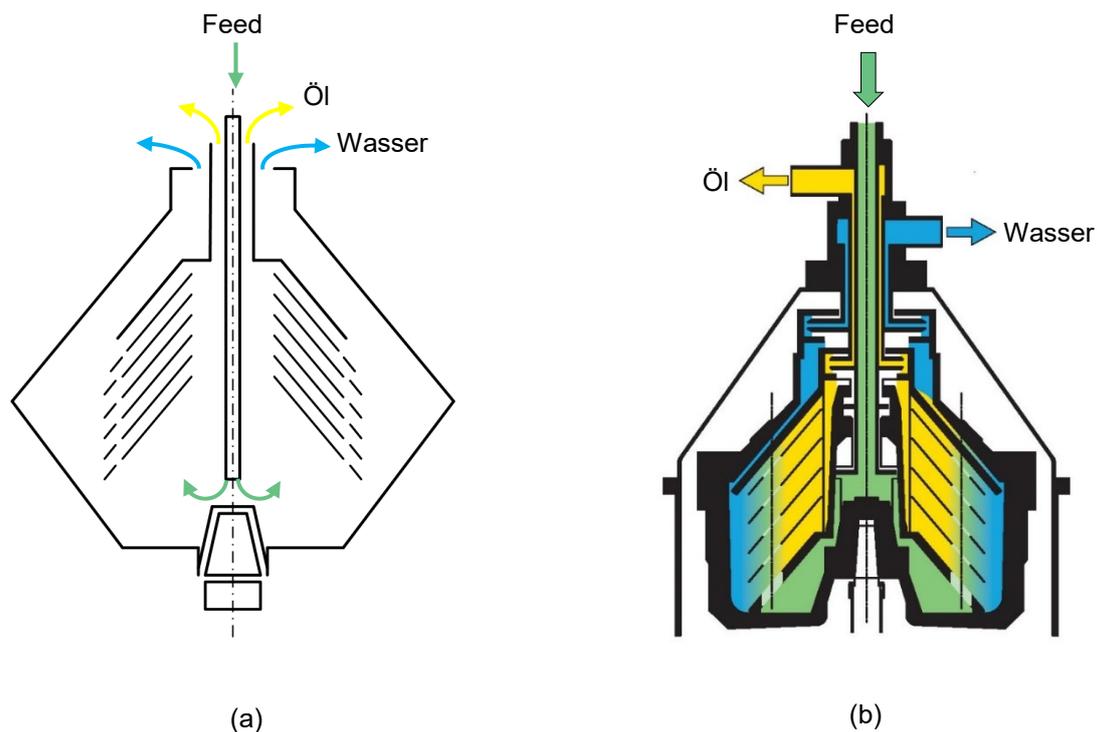


Abbildung 9: Tellerzentrifuge: (a) Querschnittsskizze, (b) realistische Zeichnung der Fa. Huading Separator [19]. Es stellt jeweils Öl die leichte und Wasser die schwere Phase dar.

Aufgrund der hohen Drehzahlen und der damit verbundenen großen wirkenden Fliehkräfte können Stoffe geringer Dichteunterschiede wie Wasser und Öl in Zentrifugen sehr effektiv getrennt werden. Die Drehzahl der Trommel kann bis zu  $12\,000\text{ min}^{-1}$  betragen.

Der Hersteller GEA-Westfalia gibt an, Ölkonzentration im Austrittsstrom von 8 ppm zu erreichen. [18], [20]

Die Abscheidung geht hinab bis zu einer Mindestgröße der abgeschiedenen Tröpfchen von  $2\ \mu\text{m}$ . [11]

Nachteil von Zentrifugen ist deren hoher Energiebedarf. Dieser resultiert aus der Rotation der relativ schweren Trommeln bei hohen Drehzahlen. Auch der Wartungsaufwand und die Kosten dafür sind aufgrund der hohen mechanischen Belastungen erheblich.

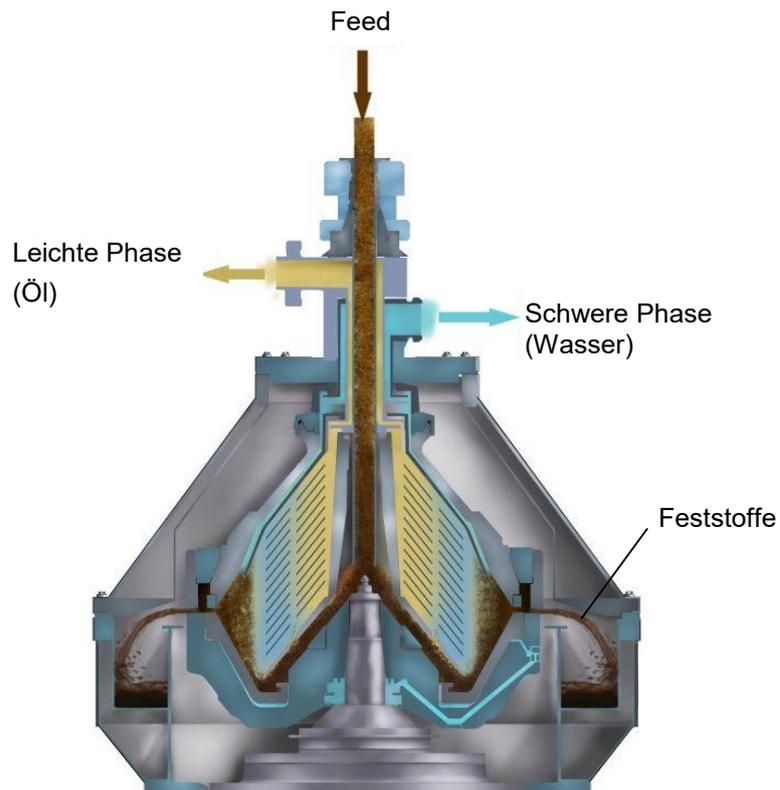


Abbildung 10: Schema eines Drei-Phasen-Separators der Fa. Flottweg [21]

### 3.2.2 Hydrozyklon

Ein Hydrozyklon besteht aus einem starren, unbewegten Gehäuse, welches üblicherweise aus einem zylindrischen und einem konischen Teil zusammengesetzt ist. Am zylindrischen Teil, der sich bei vertikaler Montage oben befindet, liegt ein tangential angeordneter Zulauf. Der spitze (untere) Teil des Konus bildet den Unterlauf (Apex), ein Tauchrohr ragt axial von oben in das Innere des Zyklons und bildet den Oberlauf (Vortex).

Die Drehströmung entsteht im Zyklon durch den tangentialen Einlauf in das Leitgehäuse. Die spezifisch schwereren Teilchen im Fluid wandern nach außen an die Gehäusewand, jene mit geringerer Dichte nach innen in Richtung Längsachse des Zyklons. Die Strömung bewegt sich in Wirbeln entlang des Konus bis zur Unterlaufdüse. Durch die Verjüngung im Konus wird das Flüssigkeitsvolumen im Inneren (Öl als weniger dichte Fraktion) nach oben verdrängt, bevor es den Unterlauf erreichen kann und verlässt den Zyklon durch das Tauchrohr. Der Strömungsverlauf ist in Abbildung 11 dargestellt. Der außen an der Zyklonwand laufende Teil der Strömung mit größerer Dichte (Wasser) wird als Primärströmung bezeichnet und fließt durch den Unterlauf ab. Die innere Strömung geringerer Dichte wird Sekundärströmung genannt.

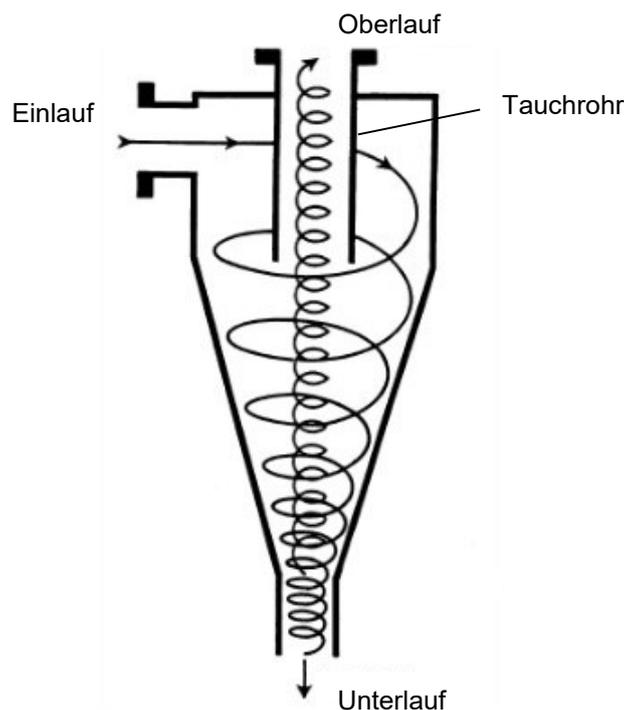


Abbildung 11: Strömungsverlauf im Hydrozyklon

Es ist nicht möglich mit einem Hydrozyklon zwei Flüssigkeiten vollständig voneinander zu trennen, da Zykclone über keine scharfe Trenngrenze verfügen. Die Ströme aus dem Ober- und Unterlauf sind somit immer nur angereicherte und keine reinen Ströme. Je reiner der Ober- oder Unterlauf werden soll, desto geringer fällt dessen Volumenstrom aus. Als Konsequenz daraus ist der andere Ausgangsstrom größer und dessen Zusammensetzung weniger rein.

Über die Geometrie des Zyklons kann das Größenverhältnis von Ober- zu Unterlauf und somit deren Zusammensetzung beeinflusst werden. Typische Werte für den Anteil des Oberlaufs am gesamten Feed-Strom liegen bei rund 1 bis 3 %. [22]

Die Abscheideleistung eines Hydrozyklons sinkt im Allgemeinen mit der Abnahme der Tröpfchendurchmesser. Aufgrund der unscharfen Trenngrenze kann kein genauer Grenzdurchmesser der abgeschiedenen Öltröpfchen angegeben werden, sondern nur Abscheidegrade für verschiedene Durchmesserklassen. Der Hersteller Prosep gibt für seine Hydrozyklone Abscheidegrade von 85 bis 95 % für Tröpfchendurchmesser über 12 bis 15  $\mu\text{m}$  an. [23] Die Mindestgröße der abscheidbaren Tröpfchen liegt bei rund 10 bis 15  $\mu\text{m}$ . [11], [24] Hydrozyklone kommen mit hohen Ölbeladungen des Feed-Stromes von 300 bis 5000 ppm zurecht. Es können Austrittskonzentrationen von bis zu 30 ppm erreicht werden, im Durchschnitt liegen sie aber bei 100 bis 300 ppm. [14], [25]

Für den Betrieb eines Hydrozyklons ist es unerheblich, ob dieser in horizontaler oder vertikaler Lage montiert wird. Um Platz zu sparen und die Kapazität zu erhöhen, werden häufig mehrere Zyclone parallel geschaltet und zu einer sogenannten Zyklonbatterie zusammengefasst. Die Hydrozyklone können dabei alle über eine eigene Zulaufleitung verfügen oder in einem Druckbehälter mit einem einzigen Zu- und Ablauf liegen (siehe Abbildung 12).

Um die Strömung aufrecht zu erhalten, sollte am Einlauf ein Mindestdruck von rund 2,5 bar anliegen, was einen relativ großen Energiebedarf zur Folge hat. [14]

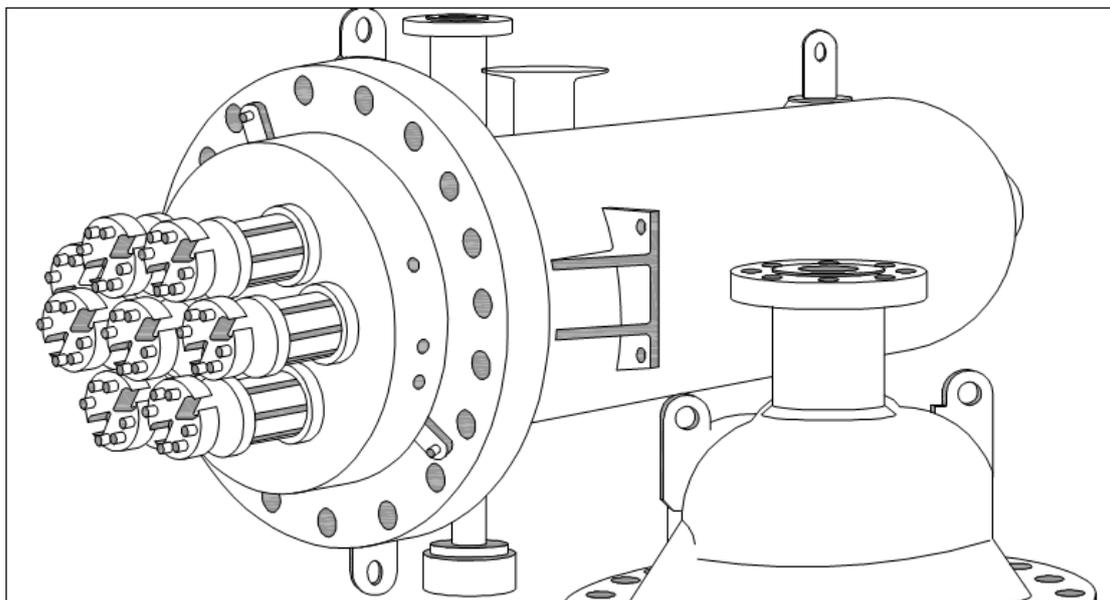


Abbildung 12: Hydrozyklonbatterie in gemeinsamem Druckbehälter [22]

### 3.3 Flotation

Flotationsverfahren ermöglichen die Abscheidung von suspendierten Fremdstoffen wie Öl oder Feststoffpartikeln aus Wasser oder anderen Flüssigkeiten. Man versteht unter Flotation das Auftreiben ungelöster Fremdstoffe bis an die Oberfläche mit Hilfe von Luft- oder Gasblasen. [26]

Fein verteilte hydrophobe Luft- oder Gasblasen werden in das zu reinigende Wasser eingebracht, lagern sich an die suspendierten (ebenfalls hydrophoben) Öltröpfchen oder Partikel an und bilden mit diesen Komplexe. Die Dichte dieser Komplexe ist kleiner als die des umgebenden Wassers, sie steigen an die Wasseroberfläche und bilden eine Schicht, die dort entfernt werden kann. Mit diesem Verfahren können nicht nur Stoffe mit geringerer Dichte als Wasser, wie beispielsweise Öl, sondern auch spezifisch schwerere Stoffe abgeschieden werden.

Häufig geht der Flotation eine Flockung bzw. Demulsifikation voraus. Dabei wird durch den Zusatz geeigneter Chemikalien ein Zusammenwachsen kleinster Partikel oder Tröpfchen zu größeren Flocken bzw. Tropfen angestrebt, an denen die Blasen leichter anhaften können.

Der Flotationsprozess kann in drei Schritte eingeteilt werden:

1. **Erzeugung von Luft- oder Gasblasen.** Es existieren unterschiedliche Verfahren zur Blasenenerzeugung. Im Bereich der Öl-Wasser-Trennung werden hauptsächlich die Begasungsflotation (IAF/IGF) und die Druckentspannungsflotation (DAF/DGF) eingesetzt. Die Blasen werden bei ersterer Methode mittels mechanischer oder hydraulischer Verfahren generiert, bei letzterer durch Druckentspannung eines mit Gas gesättigten Flüssigkeitsstromes.
2. **Anlagerung der Blasen an Tröpfchen oder Flocken.** In der Wasserphase kommt es zur Bildung von Komplexen aus Flotationsgas und Öltröpfchen. Die Annäherung von Gasblase und Öltröpfchen und deren Komplexbildung muss innerhalb eines bestimmten Zeitfensters vor sich gehen, ansonsten entfernen sich Tröpfchen und Blase wieder voneinander. In Abbildung 13 ist dieser mehrstufige Prozess dargestellt:
  - (a) Aufgrund der geringeren Dichte steigen Gasblasen schneller auf als Öltröpfchen und nähern sich diesen an.
  - (b) Durch die Annäherung wird das Wasser zwischen Blase und Tröpfchen verdrängt bis nur mehr ein dünner Wasserfilm dazwischenliegt.
  - (c) Gradienten in der Grenzflächenspannung bewirken an der Kontaktfläche die Ausbildung von Einbuchtungen an Blase und Tröpfchen.
  - (d) Wasser zwischen Blase und Tröpfchen wird weiterhin verdrängt, es kommt zu einer weiteren Ausdünnung des Wasserfilms und einem Verschwinden der Ausbuchtungen.

- (e) Der Wasserfilm reißt bei einer kritischen Schichtdicke, Blase und Tröpfchen kommen in direkten Kontakt.
- (f) Wenn die Bedingungen dafür gegeben sind, kommt es zu einer Einhüllung der Gasblase durch das Öl und der gebildete Komplex steigt an die Oberfläche. [27]

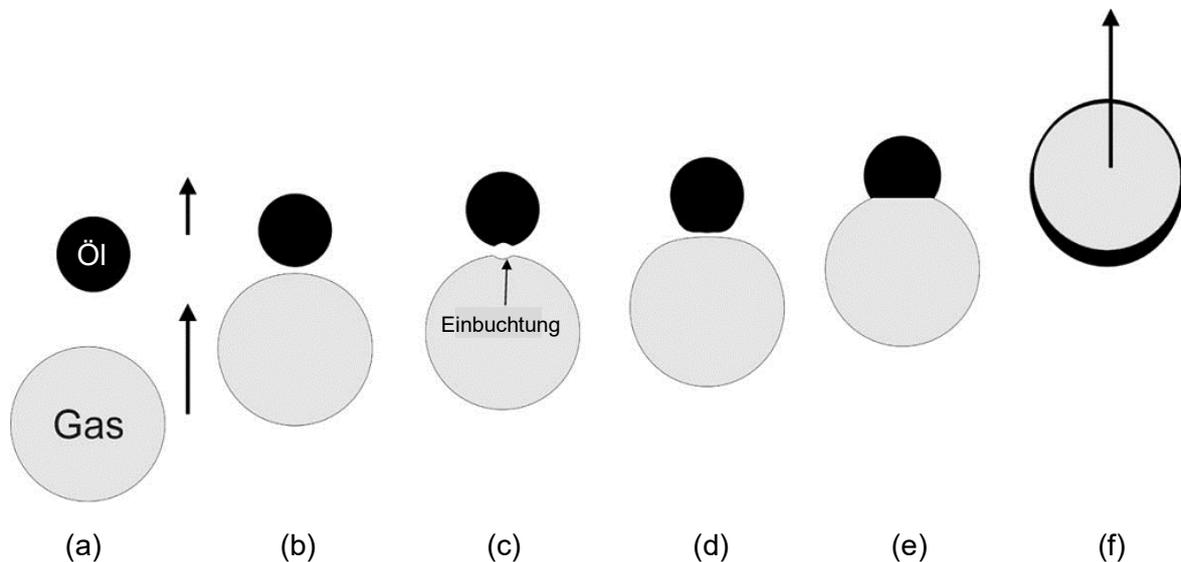


Abbildung 13: Schritte der Tröpfchen-Blasen-Komplexbildung: (a) Annäherung von Blasen und Tröpfchen beim Aufstieg, (b) Ausbildung eines dünnen Wasserfilms zwischen Blase und Tröpfchen, (c) Ausbildung von Einbuchtungen an Blase und Tröpfchen, (d) Ausdünnung des Wasserfilms, (e) Reißen des Wasserfilms führt zu direktem Kontakt von Blase und Tröpfchen, (f) gegebenenfalls Einhüllung der Blase durch Öl, Aufstieg des Komplexes. [27]

3. **Aufsteigen und Abscheiden der Komplexe.** Aufgrund des geringeren spezifischen Gewichts der gebildeten Komplexe gegenüber der umgebenden Flüssigkeit bewirkt die resultierende Kraft aus Auftrieb und Schwerkraft ein Aufschwimmen der Komplexe an die Flüssigkeitsoberfläche. Die sich an der Oberfläche sammelnden Fremdstoffe bilden dort eine schaum- oder schlammartige Schicht, die meist mit Skimmern oder über Überläufe abgezogen wird.

Flotationsanlagen erzielen beste Abscheideleistungen, wenn die Eingangsströme Ölkonzentrationen von 300 ppm nicht überschreiten. Liegen die Konzentrationen darüber, so ist eine Vorbehandlung des Wassers sinnvoll, beispielsweise mit API-Separatoren. [1]

Größere Abscheideeffizienz kann mit größeren Öltröpfchen und kleineren Luft- bzw. Gasblasen erreicht werden. Größere Tröpfchen bieten eine größere Kontaktfläche, kleinere Blasen bewirken aufgrund deren geringerer Steiggeschwindigkeit eine längere Verweilzeit im Wasser, was die Kontaktwahrscheinlichkeit zwischen Blase und Tröpfchen erhöht. Noch größeren Einfluss als die Blasengröße hat die Blasenanzahl, mehr Blasen führen zu häufigeren Tröpfchen-Blasen-Kontakten. Eine Verbesserung der Abscheidung ist somit durch den Einsatz von Chemikalien zur Tröpfchenkoaleszenz und der Erzeugung möglichst vieler möglichst kleiner Blasen zu erreichen. [27]

Eingesetzte Zusatzstoffe sind Chemikalien zur Emulsionsspaltung (Demulgatoren), zur Bildung von Flocken bzw. größeren Tröpfchen (Flockungsmittel) und zur Vergrößerung der Flocken (Flockungshilfsmittel). [1] Metallsalze der dreiwertigen Metalle Aluminium und Eisen werden bei der Ölabtrennung häufig eingesetzt, da diese sowohl als Emulsionsspalter, als auch als Flockungsmittel wirken. Aufgrund der korrosiven Wirkung der Eisensalze werden Aluminiumsalze wie Aluminiumsulfid oder Aluminiumchlorid bevorzugt. Als Flockungshilfsmittel kommen anionische Polyelektrolyte wie beispielsweise Polyacrylamide zum Einsatz. Insbesondere emulgiertes Öl kann durch den Zusatz geeigneter Chemikalien besser entfernt werden. [10]

Die Dosierung erfolgt üblicherweise unmittelbar vor der Flotationszone. Am Ort der Dosierung sollte die für die Durchmischung von Flockungsmittel und Öltröpfchen nötige Strömungsturbulenz herrschen. Dies kann auch innerhalb des Flotationsbehälters sein, beispielsweise in einer durch Leitbleche abgetrennten Flockungszone.

Wie bei Schwerkraftabscheidern stellt die Klärflächenbelastung eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung eines Flotationsabscheiders dar. Da die Steiggeschwindigkeit von mit Luftblasen beladenen Teilchen wesentlich höher ist als die Steiggeschwindigkeit in reinen Schwerkraftabscheidern, können die zulässigen Klärflächenbelastungen bei einer Flotation erfahrungsgemäß 3- bis 5-mal so groß angesetzt werden. [28] Dies führt zu kleineren Bau-Größen und macht Flotationsanlagen üblicherweise billiger gegenüber Schwerkraftabscheidern, weil die Einsparungen bei den Bauwerken größer sind als die Kosten für zusätzliche Ausrüstung. [28]

### 3.3.1 Druckentspannungsflotation (DAF/DGF)

Die Druckentspannungsflotation ist das heute gebräuchlichste industrielle Verfahren zur Entfernung von Öl und suspendierten Feststoffen aus Wasser.

Bei der Druckentspannungsflotation (DAF – *dissolved air flotation* bzw. DGF – *dissolved gas flotation*) wird Luft oder anderes Gas unter Druck in Wasser gelöst. Dieses Wasser wird dann in einen Tank oder Becken bei Atmosphärendruck eingebracht, wodurch das gelöste Gas aus der übersättigten Lösung freigesetzt wird und feinste Blasen bildet. Die Gasbläschen lagern sich an Öl- oder Feststoffpartikel an, die so gebildeten Komplexe steigen an die Wasseroberfläche und werden dort abgezogen. [1] In Kombination mit chemischer Flockung hat sich die Druckentspannungsflotation als sehr effektives Verfahren zur Wasserreinigung bewährt.

Das Verfahren basiert auf dem Henry-Daltonschen Gesetz. Gemäß diesem steigt die Löslichkeit eines Gases in Wasser proportional mit dem Druck an. Wird das mit dem Gas gesättigte Wasser anschließend auf einen niedrigeren Druck entspannt, wird ein entsprechender Anteil des gelösten Gases wieder frei. [28] Luft ist das am häufigsten verwendete Flotationsmedium, andere Gase, die eingesetzt werden, sind Methan, Stickstoff und Kohlendioxid. Insbesondere in explosiver Umgebung oder in Anwesenheit von entzündlichen Stoffen im Wasser kommen nicht-oxidierende Gase an Stelle von Luft zum Einsatz. Bei der Ölförderung dient häufig das mitgeführte Erdgas als Flotationsgas.

Ein DAF/DGF-System besteht aus folgenden Komponenten: Luft- bzw. Gasversorgung, Druckpumpe, Sättigungstank/Rückhaltetank, Druckentlastungsventil, Flotationsbecken. Bei Bedarf kann auch ein System zur Dosierung von Chemikalien vorhanden sein.

Das Gas wird in einem ersten Schritt bei Drücken von 2 bis 5 bar mit Wasser vermischt und zwischen einer halben und dreißig Minuten in einem Sättigungstank gehalten, wodurch es im Wasser gelöst wird. [1], [29] Das nun mit dem Gas übersättigte Wasser wird über ein Druckentlastungsventil in den Flotationsbehälter geleitet, und zwar nahe am Behälterboden. Aufgrund des deutlich niedrigeren Drucks im Behälter – dieser entspricht der Summe aus dem Luftdruck der Umgebung und dem hydrostatischen Druck des Wassers im Becken – ist die Gaslöslichkeit dort deutlich geringer. Dies führt dazu, dass die Luft bzw. das Gas die Lösung verlässt und feine Bläschen bildet, die an die Wasseroberfläche steigen. [1]

Die Durchmesser der entstehenden Luft- bzw. Gasblasen liegen im Bereich von 10 bis 100 µm. [30] Die vertikale Steiggeschwindigkeit der Luftblasen beträgt zwischen 3,5 und 9 m/h. [29]

Die Verweilzeit im Flotationsbecken ist über die geometrischen Maße des Beckens mit der Klärflächenbelastung verknüpft. Für DAF/DGF-Systeme werden Verweilzeiten von 10 bis 60 Minuten empfohlen, um beste Abscheideergebnisse zu erzielen. [1] Aufgrund dieser großen nötigen Verweilzeiten eignet sich DAF/DGF nur bedingt zur Behandlung von großen Volumenströmen und großen Wassermengen. Die Klärflächenbelastung einer DAF-Anlage zur Ölabtrennung wird zwischen 2,5 und 12 m/h angesetzt. [1]

Eingangseladungen von bis zu 500 ppm Öl bzw. suspendierter Feststoffe stellen kein Problem dar, bessere Abscheideergebnisse werden allerdings bei Werten unter 300 ppm erreicht. Industrielle Anlagen schaffen die Abtrennung von bis zu 95 % des enthaltenen Öls bzw. suspendierter Feststoffe. [14]

Die Strömungsführung der Gasanreicherung des Wassers kann auf drei Arten realisiert werden: [28]

1. **Vollstromverfahren:** Der gesamte der Flotation zuzuführende Wasserstrom wird unter Druck mit Gas oder Luft vermischt (siehe Abbildung 14). Bei dieser Methode wird die gesamte Wassermenge der Anreicherung ausgesetzt und dadurch die größte Menge an Gas gelöst. Dies resultiert in der größtmöglichen Menge an gebildeten Blasen bei der anschließenden Entspannung und somit in der größten Kontaktwahrscheinlichkeit von Gasblasen und Öl. Die Baugröße des Flotationsbeckens kann wegen der großen Blasenanzahl klein gehalten werden.

Nachteil dieser Methode ist, dass im Zulauf enthaltene oder in einer vorgeschalteten Flockungsstufe gebildete Flocken bei der Entspannung zerstört werden können. Auch können durch Scherkräfte, die beim Pumpen entstehen, Flocken zerkleinert und das Öl emulgiert werden. Eingesetzt wird dieses Verfahren deshalb vor allem dort, wo keine Flockung vorausgeschaltet ist und wo große Mengen an Blasen zur Flotation benötigt werden.

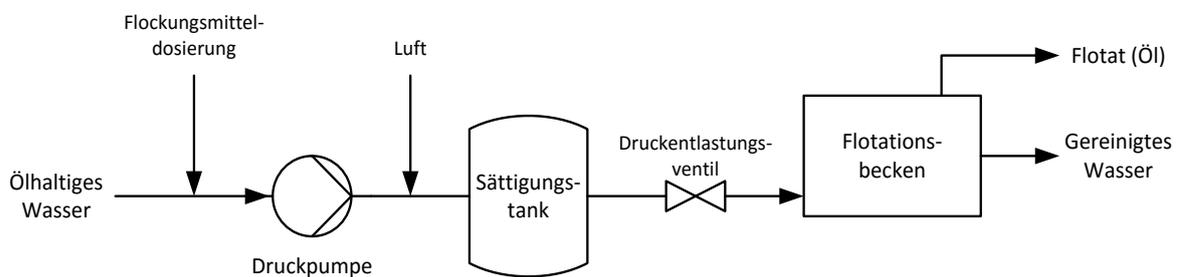


Abbildung 14: DAF/DGF im Vollstromverfahren

2. **Teilstromverfahren:** Der zu behandelnde Wasserstrom wird aufgeteilt und nur ein Teil (zw. 30 und 50 % des Gesamtstromes [29]) der Gasanreicherung unterzogen (siehe Abbildung 15). Durch die geringere Wassermenge wird eine kleinere Druckpumpe benötigt, wodurch die Betriebskosten geringer ausfallen. Aufgrund der kleineren angereicherten Wassermenge wird allerdings auch weniger Luft bzw. Gas gelöst und weniger Blasen im Flotationstank gebildet.

Da ein Teil des zu behandelnden Wassers unter Druck gesetzt wird, ergeben sich dieselben Probleme wie beim Vollstromverfahren: es kann zur Emulgierung des Öls sowie zum Zerreißen von Flocken durch Scherkräfte kommen.

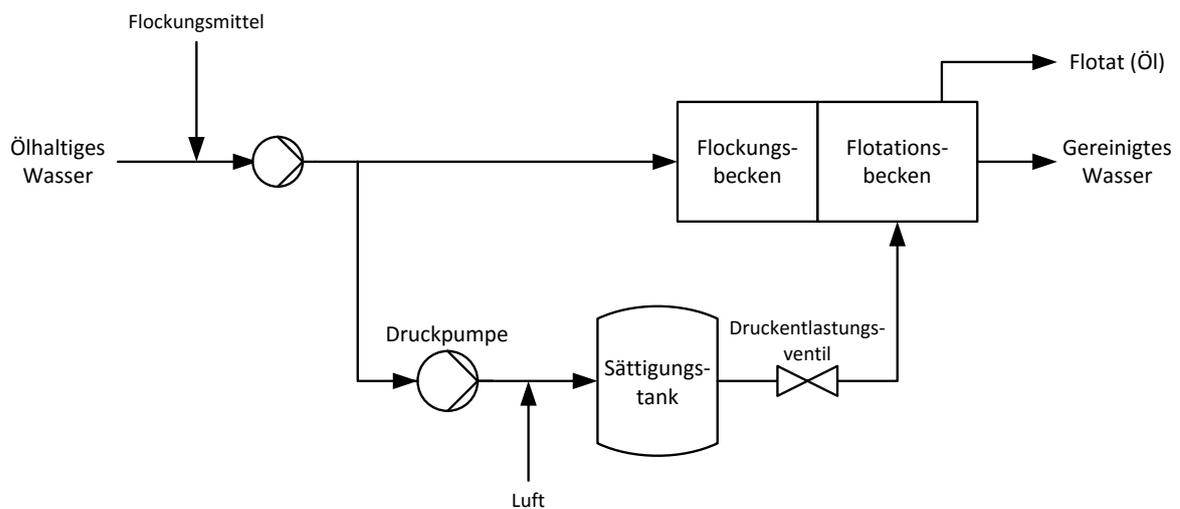


Abbildung 15: DAF/DGF im Teilstromverfahren

3. **Recyclingstromverfahren:** Bei diesem Verfahren werden üblicherweise zwischen 5 und 50 % des behandelten und gereinigten Wassers nach der Flotation abgezogen, der Gasanreicherung zugeführt und danach mit dem Eingangsstrom vermischt (siehe Abbildung 16).

Der Vorteil gegenüber Vollstrom- und Teilstromverfahren besteht darin, dass der Gassättigungsteil nur mit gereinigtem Wasser beschickt wird. Dadurch wird vermieden, dass durch Scherkräfte Öl emulgiert oder vorhandene Flocken zerstört werden. Des Weiteren sinkt durch die Verwendung von gereinigtem Wasser für die Sättigung die Häufigkeit von Störungen, hervorgerufen beispielsweise durch das Verstopfen von Entlüftungsventilen.

Nachteilig sind beim Recyclingstromverfahren die höheren Investitionskosten, verursacht unter anderem dadurch, dass das Flotationsbecken aufgrund der Stromrückführung größer gebaut werden muss.

Dieses Verfahren wird eingesetzt, wenn die Flotation eine vorausgehende Flockung erfordert und die gebildeten Flocken instabil sind.

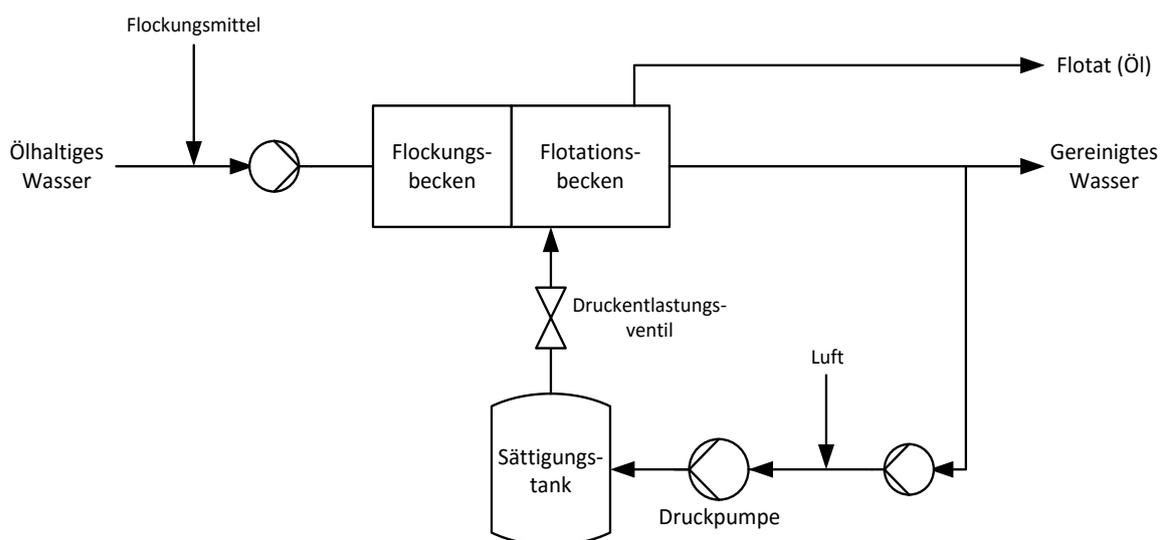


Abbildung 16: DAF/DGF im Recyclingstromverfahren.

Bereits 1954 wurde festgestellt, dass die Gasanreicherung des Recyclingstroms die effektivste Variante darstellt. Diese Erkenntnis hat sich im Laufe der Zeit nicht geändert. [1], [31] Heute ist das Recyclingstromverfahren die am häufigsten eingesetzte Methode, insbesondere bei der Öl-Wasser-Trennung. [32]

Eine andere Variante der Blasenenerzeugung ist das Lösen des Gases bei atmosphärischem Druck und anschließendes Freisetzen von Blasen in einem Behälter bei reduziertem Druck von rund 0,3 bar. Diese Methode ist heute nicht mehr gebräuchlich. [1]

Eine wichtige Voraussetzung bei der Druckentspannungsflotation ist, dass die gesamte in den Wasserstrom eingebrachte Luft bzw. Gas gelöst wird. Blasen, die durch ungelöste Luft bzw. Gas im Flotationsbecken entstehen, wären zu groß, um Öltröpfchen effizient zu entfernen und würden unerwünschte Turbulenz im Becken verursachen. [1] Berné und Cordonnier empfehlen für die Ölentfernung aus Raffinerie-Abwasserströmen mittels DAF eine Luftmenge von 50 bis 250 l/m<sup>3</sup>. [15]

Der Bereich, in welchem das mit Gas gesättigte Wasser in das Flotationsbecken eingeleitet wird und die Öltröpfchen mit den Gasblasen in Kontakt treten, wird als Kontaktzone bezeichnet. Diese wird üblicherweise durch ein Leitblech von der sogenannten Klärungszone getrennt, um eine Rückvermischung und die Bildung von Kurzschlussströmungen zu verhindern.

In der Klärungszone wird das sich an der Oberfläche sammelnde Flotat abgetrennt. Dies geschieht mit Hilfe von mechanischen Skimmern oder Überläufen. [30]

In den meisten DAF/DGF-Systemen werden Chemikalien zur Emulsionsspaltung und Flockenbildung zugesetzt. Bei der Ölabscheidung spielt besonders Natriumalaun eine große Rolle und wird häufig in Verbindung mit als Flockungshilfsmittel wirkenden Polyelektrolyten eingesetzt.

DAF/DGF ohne zusätzliche Flockung eignet sich zur Abscheidung von Öltröpfchen bis hinab zu 25 µm im Durchmesser. Wird zuvor eine Emulsionsspaltung und Flockung durchgeführt, kann die Mindestgröße abscheidbarer Tröpfchen auf unter 10 µm verringert werden. [33] Ohne Flockung können Ölabscheidegrade von 85 bis 90 % erreicht werden, unter Einsatz geeigneter Chemikalien bis zu 95 %. [15], [34]

Vorteil des DAF/DGF-Verfahrens ist seine Flexibilität hinsichtlich der Wassermenge und Öl- sowie Feststoffbelastung. Für sehr große Wasserströme ist das Verfahren allerdings nur bedingt geeignet. Durch die Dosierung geeigneter Flockungsmittel und Flockungshilfsmittel können auch Emulsionen gut abgeschieden werden. Allerdings sind diese Chemikalien dann im Flotat enthalten, wodurch eventuell strengere Entsorgungsrichtlinien beachtet werden müssen.

Nachteilig an der DAF/DGF ist die große Baugröße, bedingt durch den relativ geringen Durchfluss, sowie die relativ hohen Investitions- und Betriebskosten. Letztere resultieren aus dem hohen Energiebedarf der Druckerzeugung. [14]

### 3.3.2 Begasungsflotation (IAF/IGF)

Für die Begasungsflotation werden je nach verwendetem Gas üblicherweise die englischen Begriffe *induced air flotation* (IAF) oder *induced gas flotation* (IGF) verwendet.

Dieses Verfahren wird seit langer Zeit im Bergbau zur Erzaufbereitung eingesetzt, seit den 1970er Jahren wird es auch in der Abwasseraufbereitung verwendet. Heute findet IAF/IGF bei der Ölproduktion breite Anwendung, in geringerem Ausmaß auch in Raffinerien und petrochemischen Anlagen.

Bei der IAF/IGF ist im Gegensatz zur DAF/DGF keine Druckerzeugung nötig, das Verfahren arbeitet bei atmosphärischem Druck. Die Gas- oder Luftblasen werden bei diesem Verfahren mechanisch oder hydraulisch erzeugt. Dies kann durch schnell drehende Impeller in Kombination mit Gas- bzw. Luftinjektionssystemen, durch Gasverteiler oder durch die Homogenisierung eines Gas- und Flüssigkeitsstroms geschehen. Auch Venturidüsen können zum Einsatz kommen, dabei saugt das Wasser beim Durchströmen Luft aus der Umgebung an. Ziel ist die Erzeugung einer homogenen Zwei-Phasen-Dispersion aus Wasser und Luft, mit möglichst feinen und gleichmäßig verteilten Blasen im Wasser.

Abbildung 17 zeigt ein Impeller-IAF-Modul. Luft wird dabei von oberhalb der Wasseroberfläche angesaugt und durch ein schnell rotierendes Laufrad im Wasser verteilt.

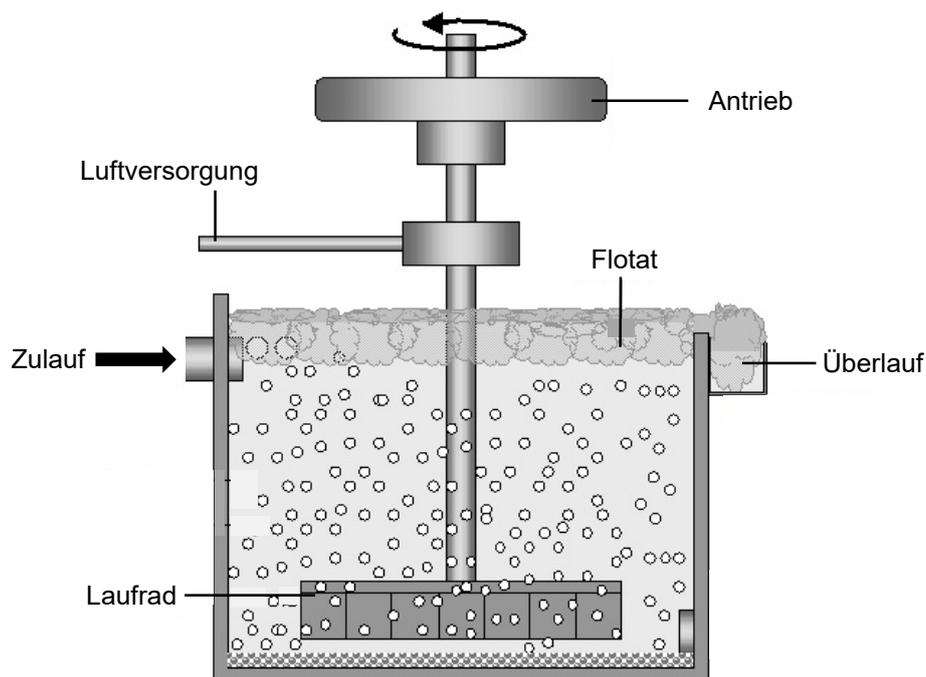


Abbildung 17: Impeller-IAF [35]

Eine IAF/IGF-Einheit ist verglichen mit einer DAF/DGF-Anlage deutlich einfacher aufgebaut, da die Druckstufe wegfällt. Im Prinzip reicht ein Tank oder Becken mit eingetauchtem Blasenenerzeuger aus, um die Flotation durchzuführen. Eine Flockungsstufe ist häufig vorangestellt.

Verschiedene Quellen berichten von IAF/IGF-Systemen, die mit Impellern oder Venturidüsen in der Lage sind, Gas- oder Luftblasen von 50  $\mu\text{m}$  oder weniger zu generieren. [36], [37] Bei IGF/IAF werden deutlich größere Luftmengen ins Wasser eingebracht als bei DAF/DGF. Im Allgemeinen sind die Gas- oder Luftblasen beim IAF/IGF-Verfahren etwa um den Faktor 10 größer als bei der Druckentspannungsflotation, die Durchmesser liegen im Bereich von 700 bis 1500  $\mu\text{m}$ . [38] Aufgrund der größeren Blasen ist die Steiggeschwindigkeit dieser deutlich größer als beim DAF/DGF-Verfahren. Die schnellere Kinetik führt zu kurzen nötigen Verweilzeiten in IAF/IGF-Anlagen, diese beträgt oft nur 5 Minuten oder weniger. [1] Geringe Verweilzeiten bewirken kleinere Baugrößen der IAF/IGF-Systeme, was sich wiederum in geringeren Investitionskosten niederschlägt.

In großindustriellen Anlagen ist eine mehrstufige Ausführung üblich. Hierbei werden meist vier oder mehr Flotationszellen in Serie geschaltet, die Verweilzeit beträgt nur rund 1 Minute pro Zelle. Eine vierstufige IAF-Anlage zur Behandlung von Lagerstättenwasser ist in Abbildung 18 dargestellt. Die mehrstufige Ausführung verhindert die Rückvermischung durch Kurzschlussströmungen, so können trotz der geringen Verweilzeit und einer durchschnittlichen Ölabscheidung von 50 % pro Zelle eine gute Gesamtabscheidung erzielt werden.

Handelsübliche Großanlagen entfernen zwischen 50 und 90 % des Öls. [14]

Die besten Abscheidungsergebnisse werden bei konstantem Wasserstrom und gleichbleibenden Wassereigenschaften erzielt. Die eingehende Ölkonzentration sollte 300 ppm nicht übersteigen. [14] Die Anlagen sind üblicherweise für Feed-Ströme von 10 bis 1000  $\text{m}^3/\text{h}$  ausgelegt, die Klärflächenbelastung liegt im Bereich von 30 bis 500  $\text{m}^2/\text{h}$ . [36], [39]

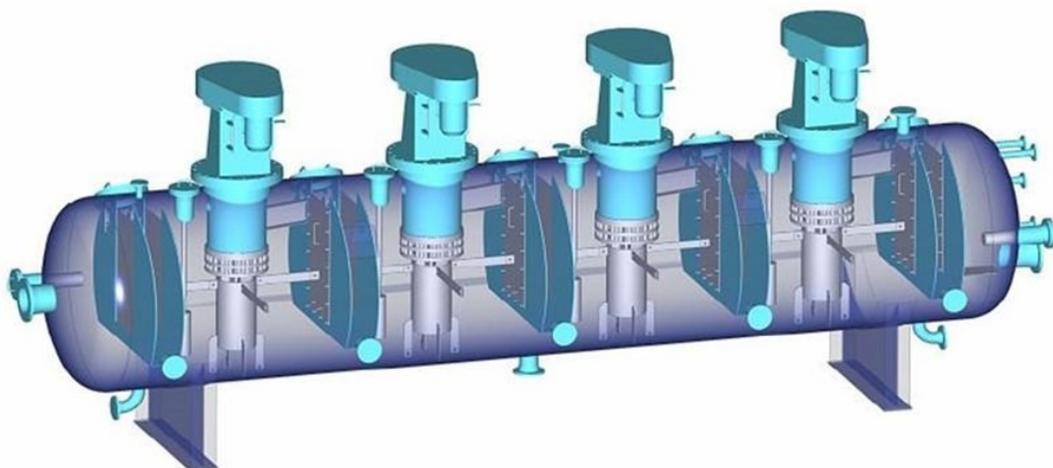


Abbildung 18: Vierstufige IAF-Anlage zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser [40]

Auch beim IAF/IGF-Prozess werden häufig Chemikalien zudosiert, um die Abscheidung zu verbessern. Neben den eingangs erwähnten Aluminiumsalzen können mit Natriumalaun sehr gute Ergebnisse bei der Ölabtrennung erzielt werden. [41]

Die Mindestgröße der abscheidbaren Tröpfchen liegt ohne vorausgehende Flockung bei rund 25  $\mu\text{m}$ , mit Flockung bei 3 bis 5  $\mu\text{m}$ . [11]

IAF/IGF-Systeme ohne Flockung erreichen Abscheideleistungen von maximal 60 bis 80 %, mit chemischer Flockung können bis zu 90 % erzielt werden. [14], [42]

Die Vorteile der IAF/IGF gegenüber der DAF/DGF liegen in den deutlich niedrigeren Kosten, bedingt durch die kleinere Baugröße und den Betrieb bei atmosphärischem Druck. Dem gegenüber steht die mangelnde Flexibilität in Bezug auf zufließende Wassermenge und Ölbeladung. Sowohl suspendierte Feststoffe als auch emulgiertes Öl werden ohne vorherige Flockung nur schlecht abgeschieden. Im Falle einer Dosierung von Chemikalien zur Emulsionsspaltung und Flockung sammeln sich die Chemikalien im Flotat und müssen mit diesem entsorgt werden.

## 3.4 Membranverfahren

### 3.4.1 Einleitung

Die Membrantechnik ist ein physikalisches Verfahren zur Trennung von Stoffgemischen. Die eingesetzten Membranen wirken ähnlich wie Filter und die abgetrennten Stoffe werden weder thermisch, chemisch noch biologisch verändert. [43]

Membranen sind teildurchlässige Gebilde, die für zumindest eine Komponente eines sie anströmenden Fluids durchlässig, für andere hingegen undurchlässig sind. [44] Diese sogenannte Semipermeabilität ist grundlegende Eigenschaft der Membranen und erlaubt die Entfernung von feinsten Partikeln und Molekülen bis hin zu gelösten Stoffen und Ionen aus Fluiden.

Membranverfahren finden heute breite Anwendung in industriellen Prozessen. In der chemischen und pharmazeutischen Industrie, Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie, Biotechnologie sowie Metallurgie wird die Membrantechnik angewendet. Im Bereich der Wasseraufbereitung wird sie zur Wasserentsalzung und zur Reinigung industrieller Abwässer eingesetzt, in jüngerer Zeit auch zur Trinkwasseraufbereitung und kommunalen Abwasserreinigung. Membranverfahren eignen sich zur Abtrennung verschiedener unerwünschter Stoffe aus Wasser, dazu zählen u.a. Viren und Bakterien, Nitrate, Sulfate, Phosphate und Fluoride, Biozide, organische Schadstoffe sowie Fette und Öle. [45]

### 3.4.2 Prozessbeschreibung

Im Grunde wirkt die Membran wie ein Filter und hält unerwünschte Stoffe zurück. Der Eingangsstrom (Feed) wird durch die Membran selektiert, ein Teil passiert die Membran nahezu ungehindert. Dieser Strom wird als Permeat bzw. Filtrat bezeichnet und stellt in der Wasserreinigung das gesäuberte Wasser dar. Der zurückgehaltene Anteil, bestehend aus den abgetrennten Stoffen, wird Retentat bzw. Konzentrat genannt.

Der Differenzdruck über die Membran, die sogenannte transmembrane Druckdifferenz bzw. Transmembrandruck (*transmembrane pressure*, TMP), ist die treibende Kraft für den Prozess der Abtrennung nicht-gelöster Stoffe. Der Transmembrandruck wird durch einen feedseitigen Überdruck oder einen permeatseitigen Unterdruck aufgebracht und liegt je nach Membran und Verfahren üblicherweise im Bereich von 0,1 bis 70 bar, in Sonderfällen bis zu 120 bar. [43]

Mit den Eigenschaften Selektivität, Leistungsfähigkeit und Permeabilität wird das Betriebsverhalten von Membranen beschrieben.

- Die **Selektivität** einer Membran ist ihre Eigenschaft, zwischen verschiedenen Komponenten einer Mischung zu unterscheiden und so eine Trennung dieser Komponenten zu ermöglichen.

- Die **Leistungsfähigkeit** einer Membran gibt den zu erzielenden **Permeatfluss** (*flux*) unter bestimmten Betriebsbedingungen an. Der Fluss ist definiert als auf die Membranfläche bezogener Permeatvolumenstrom und wird üblicherweise in der Einheit  $l/(m^2 \cdot h)$  angegeben:

$$J = \frac{\dot{V}_P}{A_F} \quad (12)$$

- Die Durchlässigkeit einer Membran wird durch deren **Permeabilität** beschrieben. Die Permeabilität ist definiert als Quotient aus dem Fluss durch die Membran und dem zugehörigen Transmembrandruck, meist dargestellt in der Einheit  $l/(m^2 \cdot h \cdot bar)$ . Der Reziprokwert der Permeabilität entspricht dem Widerstand gegenüber dem Stofftransport durch die Membran. Permeabilität und Membranwiderstand sind vergleichbar mit der Leitfähigkeit und dem elektrischen Widerstand bei elektrischen Leitern. Beeinflusst wird die Permeabilität durch den Zustand der Membran (bspw. Ablagerungen an deren Oberfläche oder im Inneren) und den Filtrationseigenschaften des Fluids.

Anhand der Größe bzw. Molmasse der abtrennbaren Stoffe werden die Membranverfahren in Mikrofiltration, Ultrafiltration und Nanofiltration sowie Umkehrosiose eingeteilt.

Die Verfahren sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Trenngrenzen für verschiedene Einsatzgebiete geeignet. Tabelle 2 liefert einen Überblick über die vier Membranverfahren und deren Eigenschaften, in Abbildung 19 ist für die unterschiedlichen Verfahren der TMP gegen die Porenweite bzw. Größe der abgetrennten Partikel aufgetragen. Eine scharfe Abgrenzung der Verfahren untereinander ist schwierig, da sich TMP und Porenweite der verschiedenen Filtrationsarten teilweise überschneiden.

Je geringer die Porengröße, desto kleiner sind die abtrennbaren Partikel, Moleküle oder Ionen, desto größer muss allerdings der herrschende Transmembrandruck sein, um das Fluid durch die Membran zu pressen.

Tabelle 2: Übersicht über die unterschiedlichen Membranverfahren [43]

Verfahren	Triebkraft (TMP) [bar]	Porenweite [µm]	Trenngrenze	Anwendung
Mikrofiltration	0,1 – 3	0,1 – 10	Feststoffe > 0,1 µm	Abtrennung von Feststoffen aus Suspensionen
Ultrafiltration	0,5 – 10	0,005 – 0,1	Feststoffe > 0,005 µm Kolloidal gelöste Stoffe: 20.000 bis 200.000 g/mol	Abtrennung makromolekularer bzw. kolloidal gelöster Stoffe, Entkeimung
Nanofiltration	2 – 40	0,001 – 0,01	Feststoffe > 0,001 µm Gelöste Stoffe: 200 bis 20.000 g/mol	Abtrennung von gelösten organischen Molekülen und mehrwertigen anorganischen Ionen
Umkehrosiose	5 – 70 (Sonderfälle: bis 120)	0,0001 – 0,005	Gelöste Stoffe: < 200 g/mol	Abtrennung von organischen Molekülen und allen Ionen

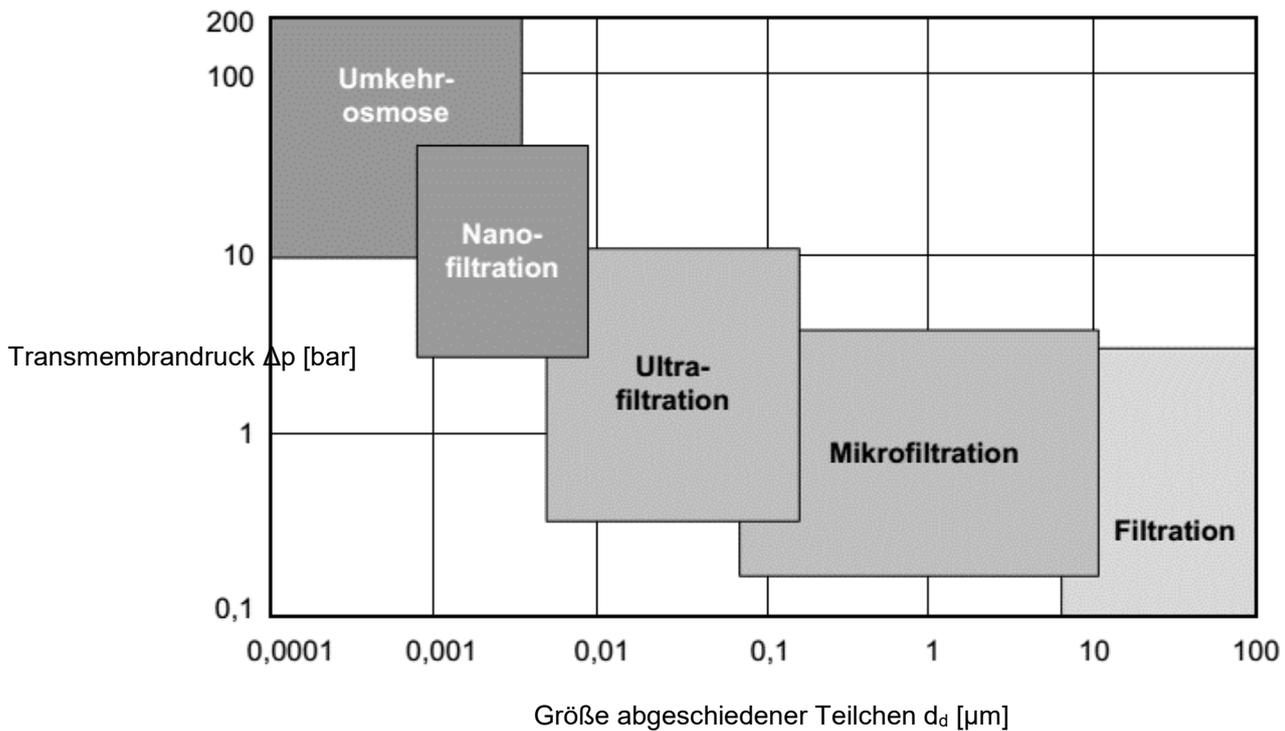


Abbildung 19: TMP und Porenweite bzw. Größe abgeschiedener Partikel bzw. Moleküle für Membranverfahren und Filtration [44]

Für den Stofftransport in Membranen, die Permeation, sind im Wesentlichen zwei Mechanismen verantwortlich: der Transport durch Poren und der Transport aufgrund von Diffusion. Damit Diffusion stattfinden kann, muss die zu transportierende Komponente zuerst in der Membranphase gelöst sein.

Membranen können anhand dieser Mechanismen in zwei ideale Arten eingeteilt werden:

- reine Porenmembranen („poröse“ Membranen) und
- reine Lösungs-Diffusions-Membranen („dichte“ Membranen).

In realen Membranen können beide Transportarten nebeneinander vorkommen.

Porenmembranen weisen (mikroskopisch) sichtbare Poren auf, die Trennung basiert auf dem Siebeffekt wie ein Filter. Treibende Kraft stellt die Druckdifferenz über die Membran (TMP) dar. Bei Lösungs-Diffusions-Membranen ist die Triebkraft – wie bei allen diffusionskontrollierten Stoffaustauschvorgängen – die Differenz der elektrochemischen Potentiale zu beiden Seiten der Membran. [46]

### 3.4.3 Mikro- und Ultrafiltration

Mikro- und Ultrafiltration sind jene Membranverfahren, die hauptsächlich für die Öl-Wasser-Trennung eingesetzt werden. Aus diesem Grunde wird in den folgenden Abschnitten ausschließlich auf diese Verfahren eingegangen. [47]

Die in der Mikro- und Ultrafiltration eingesetzten Membranen sind Porenmembranen. Diesen liegt das Prinzip eines porösen Filters zugrunde: Partikel, die größer als der Porendurchmesser der Membran sind, werden von dieser vollständig zurückgehalten. Wie bei allen Filtrationsprozessen tritt auch hier der Effekt auf, dass sich zurückgehaltene Stoffe ähnlich einem Filterkuchen auf der Membran ablagern. Die zusätzliche Filtrationswirkung der so entstehenden Deckschicht und die Adsorption kleinerer Teilchen an größeren Partikeln bewirkt einen Rückhalt auch für solche Teilchen, deren Durchmesser kleiner als der Porendurchmesser der Membran ist.

Negativer Effekt der Deckschichtbildung ist die Ausbildung eines zusätzlichen Strömungswiderstandes. Bei konstant gehaltenem Transmembrandruck resultiert dies in einem sich verringernenden Permeatfluss. Um der Permeatflussabnahme in diesem Fall entgegenzuwirken, muss die Druckdifferenz über die Membran erhöht werden.

Mit Mikro- und Ultrafiltration lassen sich Ölgehalte in Wasserströmen auf unter 1 ppm reduzieren. Die Abscheideeffizienz kann über 99 % erreichen, der Hersteller PoreLogix gibt für seine Ultrafiltrationsmembranen beispielsweise eine Abscheideleistung von über 99,9 % an. [48]–[50]

Mit Membranfiltern können Emulsionen getrennt werden, feinporige Ultrafiltrationsmembranen sind zudem in der Lage, gelöstes Öl abzuscheiden. Für die gute Wirksamkeit der Abscheidung von Öl und anderer im Wasser enthaltener Stoffe muss ein hoher Energieverbrauch in Kauf genommen werden. Dieser resultiert aus der Bereitstellung des Transmembrandrucks.

### 3.4.4 Fouling

Die Verschmutzung der Membranen durch Ein- und Ablagerungen wird allgemein als Fouling bezeichnet. Dem reversiblen Fouling, zu welchem die Deckschichtbildung zählt, kann durch geeignete Maßnahmen entgegengewirkt werden. Hierzu zählt die Rückspülung mit Permeat, Luft oder Wasser (*Backwash*). Dabei wird die Flussrichtung umgekehrt und die Membran für kurze Zeit entgegen der Filtrationsfließrichtung durchströmt, um angelagerte Störstoffe zu entfernen und ein Abplatzen der Deckschicht zu bewirken. Werden dem Rückspülmedium chemische Reinigungsmittel zugesetzt, spricht man von CEB (*chemically enhanced backwash*). Bei Durchführung regelmäßiger Rückspülungen ist die Membranfiltration ein diskontinuierlicher Prozess.

Reicht eine Rückspülung nicht aus, um verschmutzte Membranen zu reinigen, kann das ganze Membranmodul für längere Zeit in eine Reinigungslösung getaucht werden (CIP – *cleaning in place*). Als Reinigungsmittel kommen je nach Membranmaterial und Art der Verschmutzung Säuren und Basen, oxidative Reinigungsmittel oder Tensidreiniger zum Einsatz.

Um die Deckschichtbildung zu verringern, kann eine Umspülung der Membranen mit Gas durchgeführt werden (*air scouring*). Dabei wird Luft bzw. Gas unterhalb der Membranen in die umgebende Flüssigkeit eingetragen, die gebildeten Blasen steigen entlang der Membranen auf und üben Scherkräfte auf die Deckschicht aus, wodurch diese teilweise abgetragen wird.

Irreversibles Fouling ist die Verblockung von Poren durch Fremdstoffe, die sich durch *Backwash* und andere Reinigungsvorgänge nicht beheben lässt. Irreversibles Fouling führt zur langsamen und kontinuierlichen Verschlechterung der Membraneigenschaften. Sind die Membranen über ein akzeptables Maß hinaus betroffen, müssen sie ausgetauscht werden.

Abbildung 20 zeigt die Abnahme des Permeatflusses über die Zeit als Resultat des Membranfouling. Ohne regelmäßige Reinigung der Membran nimmt der Permeatfluss sehr rasch ab. Wird die Membran in wiederkehrenden Zeitabständen durch Rückspülung, CEB oder CIP gereinigt, ergibt sich eine sägezahnartige Kurve. Nach jedem Reinigungsvorgang wird die Permeabilität der Membran wiederhergestellt, irreversibles Fouling führt allerdings dazu, dass der Ausgangswert nicht mehr vollständig erreicht wird.

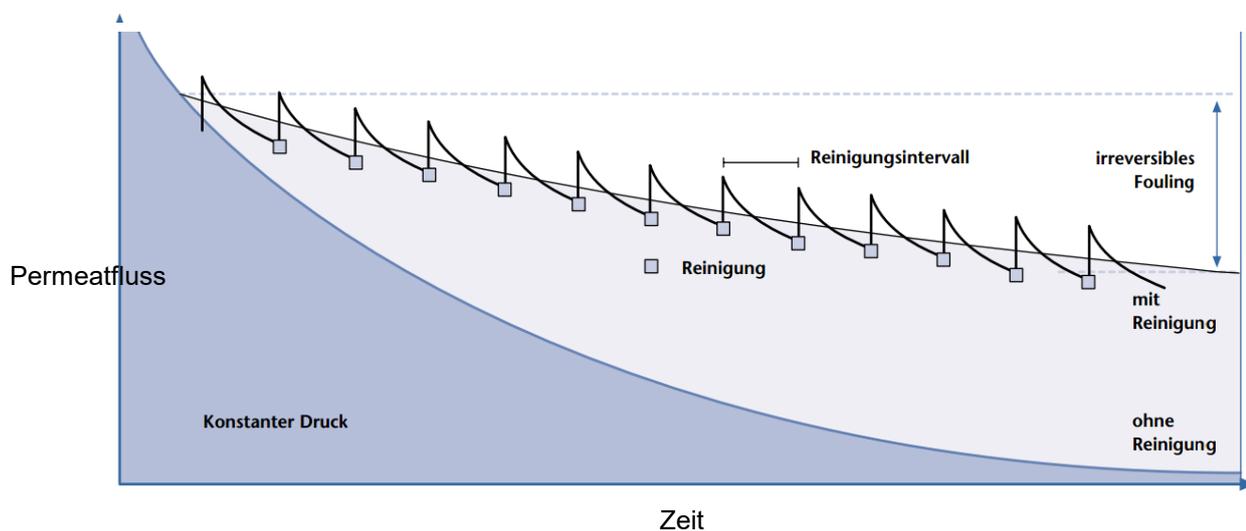


Abbildung 20: Abfall des Permeatflusses über die Zeit [43]

### 3.4.5 Prozessführung

Bei der Mikro- und Ultrafiltration kann zwischen zwei Betriebsweisen unterschieden werden: Dead-End-Filtration (statischer Betrieb) und Cross-Flow-Filtration (dynamischer Betrieb).

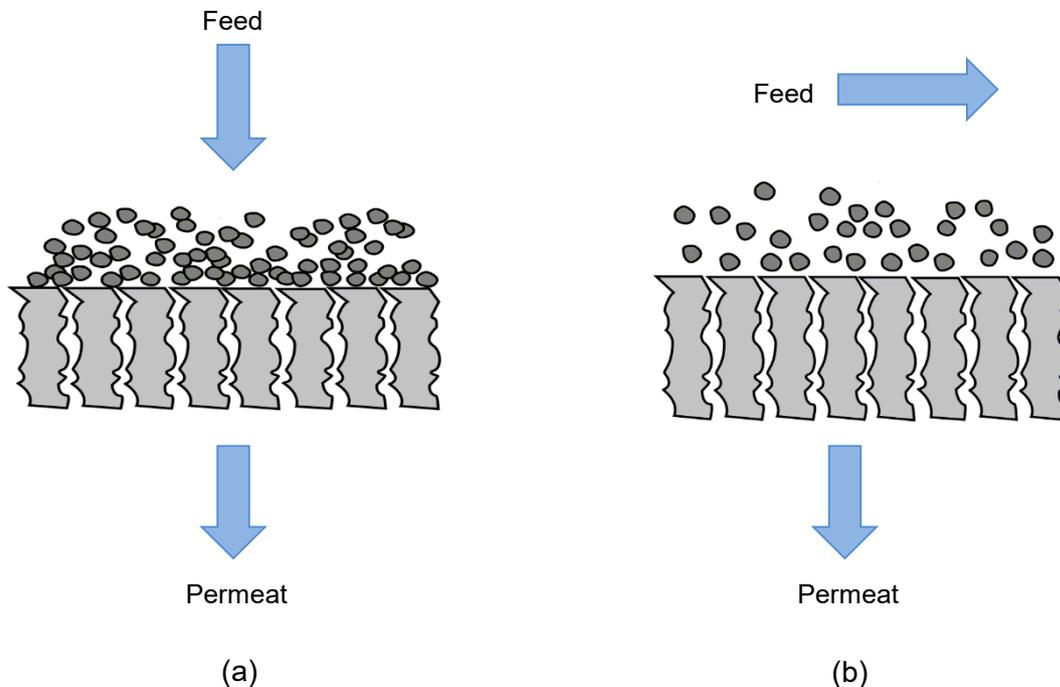
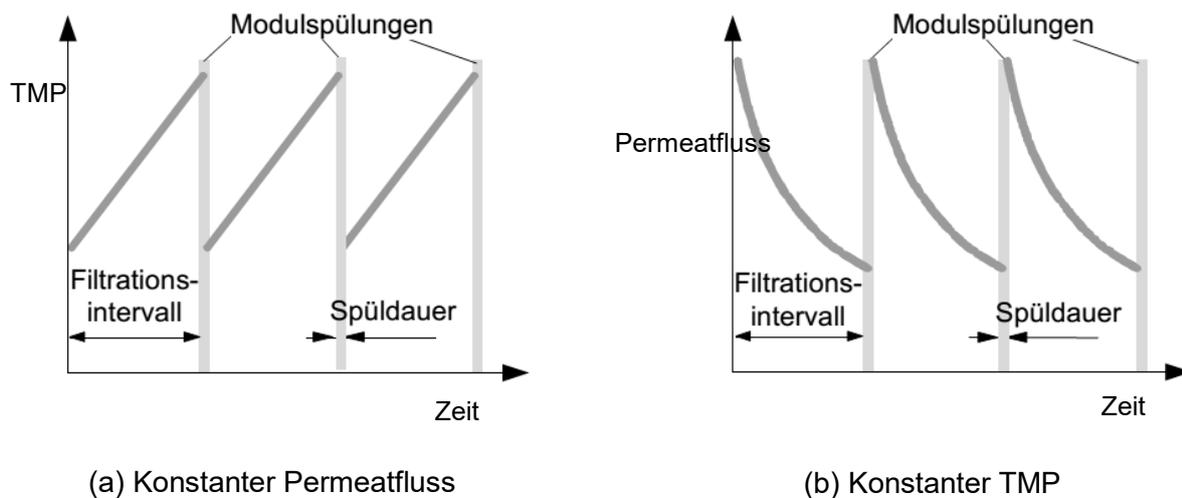


Abbildung 21: (a) Dead-End-Filtration, (b) Cross-Flow-Filtration [43]

#### 3.4.5.1 Dead-End-Filtration

Im Dead-End-Betrieb wird die Membran von dem zu filtrierenden Medium orthogonal durchströmt (siehe Abbildung 21a). Die zurückgehaltenen Stoffe lagern sich auf der Membran ab und bilden dort eine Deckschicht. Diese führt im laufenden Betrieb zur Verringerung des Permeatstromes bzw. zum Ansteigen der transmembranen Druckdifferenz.

Um den Permeatfluss während der Filtration konstant zu halten, muss der TMP kontinuierlich erhöht werden (Abbildung 22a). Wird der Druck hingegen konstant gehalten, sinkt der Permeatfluss laufend ab (Abbildung 22b). Die gängige Methode zur Wiederherstellung der Permeabilität der Membran ist der *Backwash* mit Permeatmedium. Der *Backwash* kann bei Überschreiten eines bestimmten Transmembrandrucks oder bei Unterschreiten eines bestimmten Permeatflusses eingeleitet werden. Zusätzlich oder anstatt der Rückspülung mit Permeat kann eine Rückspülung mit Luft und/oder Wasser durchgeführt werden.



(a) Konstanter Permeatfluss

(b) Konstanter TMP

Abbildung 22: Filtrationsintervalle beim Dead-End-Betrieb bei (a) konstantem Permeatfluss und (b) konstantem Transmembrandruck [44]

Vorteil des Dead-End-Verfahrens ist dessen geringer spezifischer Energiebedarf. Abgesehen vom *Backwash* wird nur für das Aufbringen des Differenzdrucks Energie benötigt.

Nachteilig ist der geringe erlaubte Feststoffgehalt im zu filtrierenden Fluid. Enthaltene Feststoffpartikel können die Membranmodule verblocken, sodass häufige Rückspülungen durchgeführt werden müssen. Die intervallmäßigen Rückspülungen verhindern einen kontinuierlichen Betrieb, zudem stellt jede Rückspülung einen Verlust an Permeat dar, verringert dadurch die Ausbeute der Filtration und benötigt Energie.

### 3.4.5.2 Cross-Flow-Filtration

Beim Cross-Flow-Verfahren wird die Membran durch den Feed-Strom kontinuierlich parallel überströmt (siehe Abbildung 21b). Auch bei diesem Verfahren kommt es zur Ausbildung einer Deckschicht an der Membran, durch die Überströmung entstehen allerdings Scherkräfte, die den Abtrag der Deckschicht bewirken können. Dieser Fall wird als reversible Deckschichtbildung bezeichnet. Dabei kommt es zur Ausbildung eines stationären Zustands, bei dem sich nach einer Einlaufphase Ablagerung und Mitreißen der Deckschichtpartikel die Waage halten. Auf diese Weise stellt sich eine konstante Deckschichtdicke und damit ein stationärer Permeatfluss ein.

Im Falle der sogenannten irreversiblen Deckschichtbildung (nicht zu verwechseln mit irreversiblen Fouling) reicht die Überströmung nicht aus, um die Deckschicht abzutragen. Wie im Dead-End-Betrieb ist hier eine periodische Entfernung nötig, beispielsweise durch Rückspülung.

Die mögliche kontinuierliche Betriebsweise ist ein großer Vorteil des Cross-Flow-Betriebs. Nachteilig ist der große Druckverlust, welcher aus der hohen Überströmungsgeschwindigkeit des Permeats resultiert und einen hohen Energiebedarf zur Folge hat.

### 3.4.6 Membranbauformen und Membranmodule

Filtrationsmembranen werden grundsätzlich in zwei geometrischen Formen gefertigt: als zylindrische Rohre oder flache Platten. Bei rohrförmigen Membranen ergeben sich zwei mögliche Betriebsweisen, je nachdem ob der Feed-Strom auf der Innenseite oder Außenseite aufgegeben wird und von innen nach außen oder von außen nach innen filtriert wird.

Einzelmembranen, unabhängig von der Form, werden üblicherweise in Gruppen zu einem Membranmodul zusammengestellt. Dieses ist mit den nötigen Prozessanschlüssen versehen, das Permeat der einzelnen Membranen wird gesammelt abgeführt. Je nach herrschenden Druckverhältnissen und Bauform können zwei Modultypen unterschieden werden: in abgeschlossene Druckbehälter integrierte Membranen und in offene Flüssigkeitsbecken getauchte Module.

#### 3.4.6.1 Druckbehälter

Einige wenige bis zu mehreren hundert rohrförmige oder flache Membranen werden zusammengefasst und in einem gemeinsamen Druckrohr oder Druckbehälter untergebracht. Meist herrscht bei Membranmodulen mit umgebendem Druckbehälter ein feedseitiger Überdruck von 1,5 bis 2 bar, d. h. der Feedstrom wird mit Druck durch die Membranen gepresst. [51]

Gewünschte Eigenschaften dieser Membranmodule sind eine hohe Packungsdichte der Membranen, gleichmäßige Umströmung der Membranen, gute Modulspülbarkeit bzw. geringe Verblockungsneigung, mechanische, chemische und thermische Stabilität sowie kostengünstige Fertigung und Membranwechsel.

#### 3.4.6.2 Getauchte Membranen

In jüngerer Zeit wurde speziell für den Bereich der Wasseraufbereitung eine neue Generation von Membranmodulen entwickelt, die sogenannten getauchten Module. Hierbei werden Membranen zu Modulen zusammengestellt und das gesamte Modul in ein Becken mit dem zu reinigenden Wasser getaucht. Aufgrund des offenen Behälters ist der Druck an der Feedseite durch den hydrostatischen Druck begrenzt. Die nötige Druckdifferenz wird durch das Anlegen eines permeatseitigen Unterdrucks hergestellt, eine Pumpe saugt das Wasser von der Permeatseite durch die Membranen. Die transmembrane Druckdifferenz liegt typischerweise bei 0,2 bis 0,4 bar.

Getauchte Module werden üblicherweise im weniger energieintensiven Dead-End-Betrieb gefahren. Der Permeatfluss ist üblicherweise relativ gering, Gründe dafür sind der geringe TMP und die große Neigung zur Deckschichtbildung. Um den Permeatfluss zu erhöhen, müssen die Membranflächen vergrößert werden. Maßnahmen, um der Deckschichtbildung entgegenzuwirken, sind die Verringerung der Packungsdichte bzw. des Membranplattenabstands, häufige und regelmäßige Rückspülungen und Luftspülung der Membranen im Becken (*air scouring*). Große Membranflächen und niedrige Packungsdichten führen zwar zu einem größeren Platzbedarf, da der Behälter aber als offenes Becken und nicht als Druckbehälter ausgeführt wird, wirkt sich dies nur in geringem Maße auf die Baukosten aus.

Der Energiebedarf getauchter Module liegt knapp über jenem von Druckbehältermodulen im Dead-End-Betrieb, aber deutlich unter jenem von Druckbehältermodulen im Cross-Flow-Betrieb. [44]

### 3.4.7 Membranaufbau und -materialien

Poröse Membranen können eine symmetrische oder asymmetrische Struktur aufweisen (siehe Abbildung 23). Symmetrische Membranen sind über die gesamte Membrandicke annähernd homogen aufgebaut, während asymmetrische aus zwei Schichten bestehen.

Die sich widersprechenden Anforderungen nach möglichst hohem Fluss (durch dünnere Membranen) und möglichst großer mechanischer Stabilität (durch dickere, selbsttragende Strukturen) lassen sich am besten durch asymmetrische Membranen realisieren. Solche Membranen besitzen eine sehr dünne aktive Trennschicht, die auf einen porösen Träger aufgebracht wird. Dieser Träger soll die mechanische Stabilität sicherstellen und im Idealfall weder Trennverhalten noch Permeatfluss beeinträchtigen.

Symmetrische Membranen kommen zum Einsatz, wenn der Stofftransportwiderstand nicht hauptsächlich von der Membran selbst abhängt, sondern von den Eigenschaften der sich bei der Trennung bildenden Deckschicht. [44]



Symmetrische Membran



Asymmetrische Membran

Abbildung 23: Aufbau von symmetrischer und asymmetrischer Membran [44]

Für die Herstellung von Mikro- und Ultrafiltrationsmembranen kommen zwei Materialgruppen zum Einsatz: organische Polymere und anorganische Werkstoffe.

#### 3.4.7.1 Mikrofiltrationsmembranen

Aufgrund der relativ großen Porenweite ist der spezifische Strömungswiderstand von Mikrofiltrationsmembranen vergleichsweise gering. Der Membranwiderstand ist gegenüber dem Widerstand der sich bildenden Deckschicht oft vernachlässigbar, geringe Membrandicken sind darum nicht zwingend erforderlich. Aus diesem Grunde kommen meist symmetrisch aufgebaute Membranen zum Einsatz.

Gebräuchliche organische Polymere für die Herstellung von Mikrofiltrationsmembranen sind Polypropylen (PP) und Polytetrafluorethylen (PTFE, Handelsname Teflon). Des Weiteren werden Celluloseester (CE), Polyamid (PA), Polysulfon (PS), Polyvinylidenfluorid (PVDF) und Polycarbonatverbindungen verwendet.

Die am häufigsten eingesetzten anorganischen Materialien sind keramische Werkstoffe, hauptsächlich Aluminiumoxid, aber auch Zirkon- und Titanoxid sowie Siliciumcarbid. Weiters

können Glas, Aluminium und Edelmehle verwendet werden. All diese Werkstoffe zeichnen sich durch besonders gute mechanische Eigenschaften sowie hohe thermische und chemische Widerstandsfähigkeit aus. [44] akvola Technologies hat in Laborversuchen die Erkenntnis gewonnen, dass insbesondere bei der Entfernung von Öl Membranen aus Siliciumcarbid effektiver und weniger foulinganfällig als solche aus Aluminiumoxid zu sein scheinen.

### 3.4.7.2 Ultrafiltrationsmembranen

Membranen zur Ultrafiltration sind fast ausschließlich asymmetrisch aufgebaut.

Für die aktive Schicht kommen aus dem Bereich der Polymere PS, Polyethersulfon (PES), Polyacrylnitril (PAN), PP und PVDF zum Einsatz, für die Stützschiht PP und Polyester (PE). Es können sowohl Aktiv- und Stützschiht aus demselben Material gefertigt (asymmetrische Bauweise), als auch unterschiedliche Materialien kombiniert werden (Kompositbauweise). Anorganische Membranen werden häufig in Kompositbauweise aus Zirkonoxid, Aluminiumoxid und Titanoxid als aktiver Schicht und Kohlenstoff sowie modifiziertem Zirkon- oder Titanoxid als Stützschiht gefertigt. Wie bei den Mikrofiltrationsmembranen finden daneben auch Glas, Aluminium und Edelmehle Anwendung. Auch hier zeichnen sich die anorganischen Werkstoffe durch ihre hervorragenden mechanischen Eigenschaften sowie Widerstandsfähigkeit aus.

### 3.5 Nussschalenfilter

Filter mit granulären Medien als Filtermaterial eignen sich hervorragend zur Entfernung von Feststoffen aus Wasserströmen. Zu diesen Filtermedien zählen u. a. Sand, Kies, Aktivkohle und gemahlene Nussschalen. Für die Ölabscheidung eignen sich Walnuss- und Pekannusschalen, andere Medien finden kaum Verwendung.

Walnusschalen als Filtermaterial wurden erstmals 1975 in einem Patent erwähnt. Heute wird diese Methode zur tertiären Behandlung und Feinreinigung von Lagerstättenwasser und Prozesswasser der Öl- und Gasförderung eingesetzt. Grund dafür ist, dass mit Nussschalenfiltern die strengen Anforderungen für die Entsorgung und Reinjektion dieser Wässer hinsichtlich Öl- und Feststoffgehalt erfüllt werden können.

Das granuläre, körnige Filtermaterial wird in Druckbehälter gefüllt, das zu reinigende Wasser durchströmt die Filterschüttung entweder von unten nach oben (*upflow*) oder von oben nach unten (*downflow*). Abbildung 24 zeigt einen Filterbehälter mit granulärem Filtermaterial im *downflow*-Betrieb. Grobe Siebe oder Roste verhindern, dass das Filtermaterial ausgetragen wird. Das Filterbett kann dabei als homogenes Bett oder in Schichten unterschiedlicher Schalensorten oder Korngrößen aufgebaut sein. [4] Wie oben erwähnt, kommen fein gemahlene Schalen von Walnüssen und/oder Pekannüssen zum Einsatz. Die spezielle Eignung dieser Nüsse wurde durch Ausprobieren verschiedener Nussarten entdeckt. [52] Die genaue Funktionsweise der Filterwirkung der Nussschalen ist nicht bekannt. Für die Ölabtrennung scheinen folgende Mechanismen verantwortlich zu sein: Adsorption des Öls an der Oberfläche der Nussschalen durch Physisorption oder Chemisorption, Kapillarkräfte zwischen oder innerhalb der Schalenteile und/oder der oleophile Charakter der Nussschalen. [52]

Das Filtermaterial wird durch regelmäßig durchgeführte Rückspülungen (*Backwash*) regeneriert. Dabei wird das Filterbett entgegen der Filtrationsrichtung durchströmt und ein fluidisierter Zustand hergestellt. In den Poren gefangene Feststoffe und anhaftendes Öl werden dabei entfernt, ein Sieb oder Rost verhindert, dass Filtermaterial den Behälter verlässt. Die Rückspülung wird üblicherweise mit reinem Wasser durchgeführt und dieses danach gesammelt und entsorgt. Die Verunreinigung des Rückspülwassers wird überwacht, die Rückspülung so lange durchgeführt, bis das Wasser nicht mehr oder nur mehr gering belastet ist. Erst dann wird die Fließrichtung umgekehrt und der Filterbetrieb wieder aufgenommen. Die Rückspülungen werden entweder in regelmäßigen zeitlichen Abständen durchgeführt oder sobald sich ein bestimmter Druckverlust eingestellt hat. Verschiedene Hersteller geben Rückspülintervalle von 24 Stunden an, die Rückspülung dauert im Durchschnitt rund 20 Minuten. [53], [54]

Nussschalenfilter erlauben Eingangsströme mit Belastungen von bis zu 100 ppm Öl und 100 ppm suspendierter Feststoffe. Sowohl der Öl-, als auch der Feststoffgehalt lässt sich auf unter 5 ppm reduzieren. [52], [53] Partikel und Öltröpfchen bis zu Größen von 2 µm lassen sich gut abscheiden. [53]

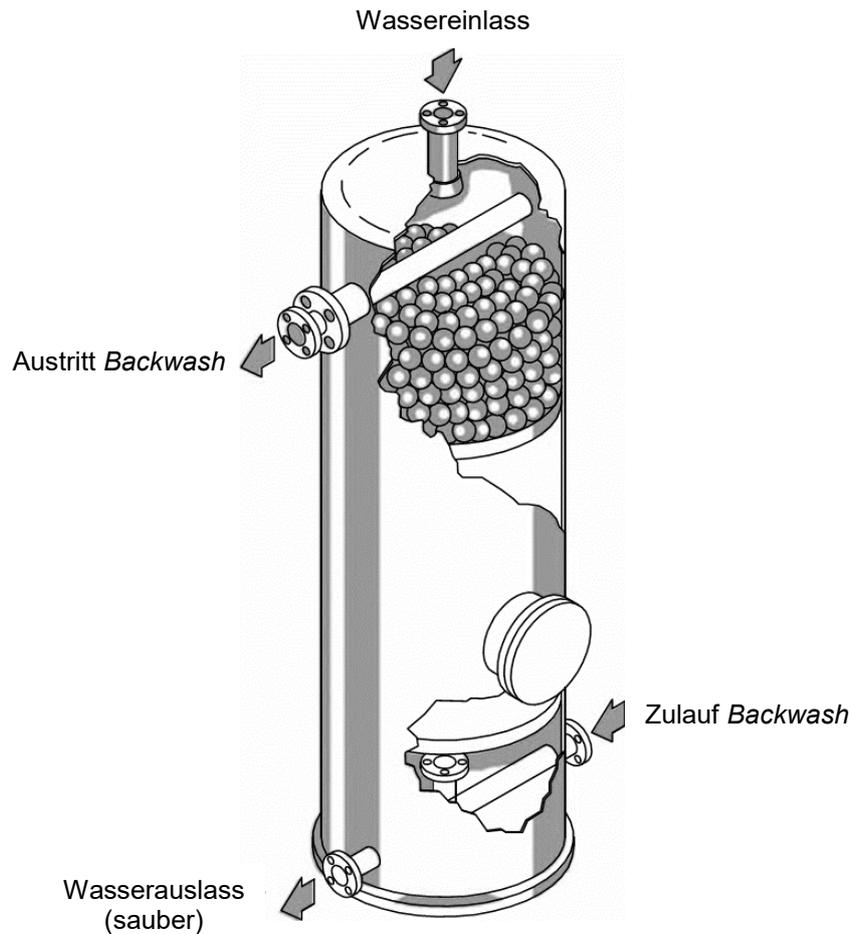


Abbildung 24: Filter mit granulären Medien im *downflow*-Betrieb der Fa. CE Natco [4]

Ein großer Vorteil der Nusschalen liegt in ihrer großen Abriebfestigkeit, der Widerstandsfähigkeit gegenüber Druck und Wärme sowie Beständigkeit gegenüber Säuren und Laugen, was zu langer Haltbarkeit des Filtermaterials führt.

Da Nusschalen ein Naturprodukt sind, können sie Qualitätsschwankungen unterliegen. Auch die lückenlose Versorgung kann aufgrund etwaiger Missernten oder Ernteaussfällen nicht garantiert werden.

### 3.6 akvoFloat™-Technologie

Die von akvola Technologies patentierte akvoFloat™-Technologie ist eine Kombination aus Flotation und Membranfiltration. Beide Verfahren werden in einem gemeinsamen Behälter untergebracht und auf diese Weise sekundäre und tertiäre Wasseraufbereitung in einer Einheit kombiniert. akvoFloat™ eignet sich zur Reinigung von Wasserströmen, deren Behandlung aufgrund von pH-Wert, Temperatur oder hohen Gehalten an Chemikalien, Öl und suspendierten Feststoffen eine Herausforderung darstellt.

Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 25 gezeigt. In einem offenen Behälter sind beide Behandlungsstufen untergebracht, die erste ist die Flotation. Die Luftblasen werden durch rotierende Diffusorscheiben erzeugt. Diese kreisförmigen porösen Keramikscheiben sind auf einer drehenden Hohlwelle gelagert, die mechanisch angetrieben wird und die Scheiben mit Luft versorgt. Druckluft bei 1 bis 2 bar Überdruck strömt durch die Hohlwelle und gelangt anschließend über die porösen Membranen ins umgebende Wasser. Die durch die Rotation entstehenden Scherkräfte bewirken beim Übertritt ins Wasser ein Abreißen der Luftblasen von den Keramikscheiben, auf diese Weise werden Luftblasen in der Größenordnung von 50 bis 100 µm erzeugt. Das an die Oberfläche steigende Flotat wird über ein Überlaufwehr abgezogen.

Die zweite Behandlungsstufe ist eine Mikrofiltration. Als Filter fungieren dabei getauchte keramische Membranen. Die Filtration ist von der Flotationsstufe durch ein Leitblech getrennt, welches den Wasserübertritt nur nahe der Wasseroberfläche erlaubt und Kurzschlussströmungen innerhalb des Behälters verhindert. Für die Filtration werden zu Modulen zusammengefasste keramische Plattenmembranen mit Porengrößen zwischen 40 und 200 nm eingesetzt. Die Plattenanzahl ist abhängig von der Größe des zu behandelnden Wasserstroms und dem gewünschten Permeatfluss. Für letzteren werden meist Werte zwischen 50 und 200 l/(m<sup>2</sup>·h) gewählt. Die für den Fluss durch die Membranen notwendige transmembrane Druckdifferenz wird durch eine permeatseitig liegende Pumpe erzeugt. Diese saugt das Wasser bei einer Druckdifferenz von 0,1 bis 0,5 bar durch die Membranen.

Dem Membranfouling wird durch regelmäßige Rückspülungen mit Permeat oder anderem reinen Wasser entgegengewirkt. Schwerwiegendere Verschmutzungen können durch die Reinigung mit geeigneten Chemikalien wie Zitronensäure oder Natriumhypochlorit entfernt werden.

Vor dem Eintritt des Wassers in den akvoFloat™-Behälter kann optional ein Flockungsmittel zudosiert werden. Eingesetzt wird hierfür z. B. Eisen(III)-chlorid. Die Flockung wirkt sich insbesondere positiv auf die Abscheidung von Mikropartikeln und gelösten Stoffen aus.

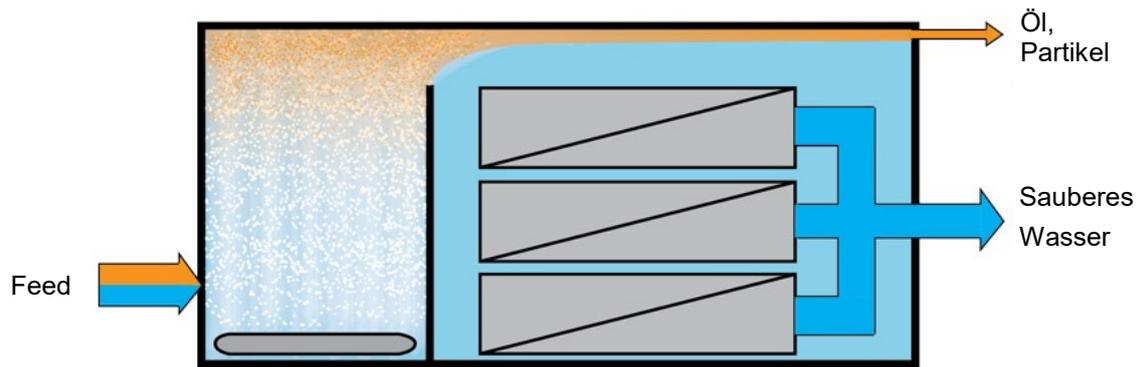


Abbildung 25: akvoFloat™-Einheit

Im Labormaßstab und in Pilotversuchen mit Feedströmen von bis zu 700 l/h wurden mit der akvoFloat™-Technologie gute Abscheideergebnisse erzielt. Bei suspendierten Feststoffen wurden Abscheidegrade über 99 % erreicht und Wassertrübung zwischen 75 und über 99 % entfernt. Öl kann selbst ohne Flockung zu über 99 % abgeschieden werden. Erfolgreiche Testversuche wurden mit Ölkonzentrationen im Feedstrom von 1000 ppm und darüber durchgeführt, die Ölgehalte können auf 5 ppm und weniger reduziert werden.

Einen großen Vorteil des Verfahrens birgt der geringe spezifische Energiebedarf von 0,1 bis 0,2 kWh/m<sup>3</sup>. Die Verfahrenskombination in einem Behälter bringt Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Platzbedarfs und der kleineren Anzahl benötigter Rohrleitungen, Armaturen und Behälter. Die relativ einfachen Verfahren ohne komplexe Technik, mit wenigen bewegte Teilen und bei niedrigen Druckstufen führen zu geringen Wartungskosten.

Die Blasenenerzeugung mit keramischen Diffusorscheiben bietet zahlreiche Vorteile: der Bedarf kostenintensiver Erzeugung hoher Drücke wie bei der DAF entfällt, auch ein Sättigungstank ist nicht nötig. Trotzdem werden Blasen mit Größen unter 100 µm generiert. Auf schwankende Feedqualität und -menge kann durch Anpassung des Druckluftstromes und Drehzahl der Diffusorscheiben rasch reagiert werden.

Die keramischen Filtrationsmembranen besitzen große Permeabilität und sind sehr resistent gegenüber Membranfouling. Des Weiteren verfügen sie über große Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischer, mechanischer und thermischer Belastung, was den Einsatz in aggressiven Medien und bei hohen Temperaturen möglich macht. Die geringen Drücke, bei denen getauchte Membranen betrieben werden, verursachen geringen Energieverbrauch bei deren Bereitstellung und führen zu nicht stark anhaftenden Deckschichten.

### 3.7 Zusammenfassung

Tabelle 3 auf der folgenden Seite liefert einen Überblick über die verschiedenen Verfahren zur Öl-Wasser-Trennung. Die Auflistung enthält die für das Verfahren erlaubte Ölmenge im Zulaufstrom und die Menge im Austrittsstrom, die erreicht werden kann, sowie die Mindestgröße der abscheidbaren Öltröpfchen. Zusätzlich werden Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren beschrieben.

Die Tabelle liefert eine Zusammenfassung der Beschreibung der Verfahren in den vorherigen Kapiteln. Quellenangaben zu den Daten sind dort zu finden.

Tabelle 3: Übersicht der Verfahren zur Öl-Wasser-Trennung

Verfahren	Ölgehalt Feed	Ölgehalt Austritt	Effizienz	Mindestgröße Öltröpfchen	Vorteile	Nachteile
	[ppm]	[ppm]	[%]	[µm]		
API-Separator	500-20.000 <sup>[14]</sup>	50-200	n. a.	150	Einfaches Verfahren Geringe Betriebskosten Flexibilität bez. Feedmenge u. -qualität Feststoffabscheidung	Große Bauform
PPI-Separator	200-10.000	35-50	n. a.	60	Einfaches Verfahren Geringe Betriebskosten Flexibilität bez. Feedmenge u. -qualität Feststoffabscheidung	Große Bauform Anbackungen an Platten
CPI-Separator	200-10.000	15	n. a.	40	Einfaches Verfahren Geringe Betriebskosten Flexibilität bez. Feedmenge u. -qualität Feststoffabscheidung	Große Bauform Anbackungen an Platten
Zentrifuge	n. a.	Bis 8 <sup>1</sup>	n. a.	2	Gute Trennwirkung Möglichkeit der Drei-Phasen-Trennung	Hoher Energiebedarf Hohe Investitions- u. Betriebskosten
Hydrozyklon	300-5000	Bis 30 <sup>1</sup>	n. a.	10-15	Einfaches Verfahren Gute Abscheidung bei hohen Feedkonz.	Unschärfe Trenngrenze Hoher Energiebedarf
DAF/DGF ohne Flockung	< 500	n. a.	85-90	25	Flexibilität bez. Feedmenge u. -qualität Feststoffabscheidung	Hohe Investitions- u. Betriebskosten Geringe Volumenströme bzw. großer Platzbedarf
DAF/DGF mit Flockung	< 500	n. a.	Bis 95	< 10	Flexibilität bez. Feedmenge u. -qualität Feststoffabscheidung	Hohe Investitions- u. Betriebskosten Geringe Volumenströme bzw. großer Platzbedarf Chemikalienbelastung d. Flotats
IAF/IGF ohne Flockung	< 300	n. a.	60-80	25	Geringe Betriebskosten Geringer Platzbedarf	Mäßige Abscheideleistung
IAF/IGF mit Flockung	< 300	n. a.	Bis 90	3-5	Geringe Betriebskosten Geringer Platzbedarf	Chemikalienbelastung d. Flotats
Membranfilter: Mikroflotation	n. a.	< 1	> 99	0,1	Trennung von Emulsionen	Backwash nötig Großer Energiebedarf
Membranfilter: Ultrafiltration	n. a.	< 1	> 99,9 <sup>1</sup>	0,005	Trennung v. Emulsionen und gelöstem Öl	Backwash nötig Großer Energiebedarf
Nussschalenfilter	Bis 100	< 5	n. a.	2	Widerstandsfähiges Material Sehr gute Abscheideleistung	Backwash nötig Qualitätsschwankungen des Filtermaterials Versorgungsunsicherheit
akvoFloat™	Bis 1000	< 5	> 99	n. a.	Kompakte Bauform Zwei Verfahren in einer Einheit Geringer Energiebedarf	Backwash nötig

<sup>1</sup> Herstellerangabe

## 4 Praktischer Teil - Anlagenplanung

### 4.1 Vorgaben

Die Pilotanlage dient der Erprobung der akvoFloat™-Technologie unter realen Bedingungen. Erster Einsatzort und Orientierungspunkt für die Auslegung des Systems soll eine Erdöl-lagerstätte in Texas, Vereinigte Staaten sein, wo ölbelastetes Lagerstättenwasser behandelt werden soll. Danach sind weitere Testläufe an verschiedenen Orten der Erde geplant. Die Ausgangspunkte und Vorgaben für die Konzeption und Konstruktion der Anlage sind nachfolgend dargestellt.

#### 4.1.1 Auslegungsgrößen

Die beiden entscheidenden Kenngrößen, nach welchen die Anlage dimensioniert wird, sind der gewünschte Volumenstrom an Permeat und der Permeatfluss über die Filtermembranen (*flux*). Diese bestimmen die Größe der Anlage und die Fläche der Filtrationsmembranen.

- Permeat-Volumenstrom:  $\dot{V}_p = 100 \text{ l/h}$
- Permeatfluss:  $J = 75 \text{ l/(m}^2 \cdot \text{h)}$

#### 4.1.2 Betriebsvorgaben

Die Anlage muss bestimmte Fahrweisen und teilweise verschiedene Flussrichtungen durch die Leitungen erlauben, damit der akvoFloat™-Prozess ablaufen kann. Folgende Kriterien sollen erfüllt werden:

- Die Permeatpumpe soll unabhängig von der transmembranen Druckdifferenz einen konstanten Permeatvolumenstrom fördern können.
- Der *Backwash* der Filtrationsmembranen mit Permeatwasser soll automatisch eingeleitet werden, sobald ein bestimmter TMP überschritten wird.
- *Backwash* der Membranen soll auch mit Luft und mit einer Reinigungslösung möglich sein. Da diese beiden Varianten seltener durchgeführt werden, ist deren Automatisierung nicht notwendig.
- Der Wasserpegel im akvoFloat™-Tank (Hauptbecken) soll auf einem konstanten Niveau bleiben.

### 4.1.3 Technische Vorgaben

Der Einsatzort in den Vereinigten Staaten und die Beschaffenheit des Lagerstättenwassers verlangen, dass die Anlage gewisse Merkmale erfüllt:

- Einfache Transportfähigkeit und kompakte Bauweise. Die Grundfläche der Anlage soll die Maße einer Europalpalette (1,2 x 0,8 m) nicht überschreiten.
- Das Lagerstättenwasser ist hochkorrosiv, es enthält bis zu 80.000 ppm gelöstes Natriumchlorid. Die verwendeten Materialien müssen dagegen beständig sein.
- Um den schnellen Austausch eventuell versagender Teile und Umbauten an der Anlage zu ermöglichen, sollen die in den USA gebräuchlichen Gewindenormen zum Einsatz kommen. Im Bereich der Öl- und Gasförderung ist dies das NPT-Gewinde (*national pipe thread*).
- Am Einsatzort ist zwar ein Stromanschluss mit einer Spannung von 230 V vorhanden, die Stromfrequenz beträgt allerdings die in den USA gebräuchlichen 60 Hz. Die elektrischen Geräte müssen bei dieser Stromfrequenz betrieben werden können.
- Die Kosten des Gesamtsystems sollen so gering als möglich ausfallen.

## 4.2 Fließbild & Prozessbeschreibung

Im folgenden Abschnitt werden anhand des Verfahrensfließbilds (Abbildung 26) die Anlage allgemein beschrieben (Kapitel 4.2.1) sowie die unterschiedlichen Betriebsweisen erläutert (Kapitel 4.2.2). In Tabelle 4 sind die im Fließbild verwendeten Abkürzungen dargestellt, Tabelle 5 liefert eine Übersicht über die Komponenten der Anlage.

### 4.2.1 Anlagenbeschreibung

Herzstück der Anlage bildet der Flotations- und Filtrationstank T-01 (Haupttank/Hauptbecken). Dieser ist als offenes Becken ausgeführt, darin befinden sich die Komponenten der akvoFloat™-Technologie: rotierende keramische Platten zur Luftblasenerzeugung (Diffusorscheiben, D-01) sowie ein Modul von Keramikfiltern (F-01). Flotations- und Filtrationszone im Becken sind durch ein Leitblech voneinander getrennt, um Rückvermischung und Kurzschlussströmungen zu verhindern. Das aufschwimmende Öl gelangt über einen Überlauf in den Abfallstoff- bzw. *Waste*-Tank T-03.

Die Zulaufpumpe P-01 transportiert das zu behandelnde Wasser in das System. Um den Volumenstrom anzupassen, wird eine Drosselregelung verwendet. Hierfür liegt nach der Pumpe ein Schwebekörper-Durchflussmesser mit integriertem Regelventil (FIC-01). V-02 und V-03 sind Drei-Wege-Ventile, diese leiten den Feedstrom entweder über die elektrische Heizung (H-01) oder über eine Bypassleitung an der Heizung vorbei. Die Heizung kommt zum Einsatz, wenn verschiedene Feedtemperaturen simuliert werden sollen. Vor dem Eintritt in den Haupttank kann optional Flockungsmittel in den Zulaufstrom dosiert werden. Dies geschieht mit Hilfe der Flockungsmittelpumpe P-03, einer Dosierpumpe, die Flockungsmittel aus dem Flockungsmittelbehälter T-04 direkt in die Zulaufleitung einspritzt.

Der Haupttank (T-01) verfügt über eine Füllstandskontrolle, der Füllstandsensor LRC-01 liefert Werte an das Prozessleitsystem. Des Weiteren werden im Becken die Temperatur und der pH-Wert überwacht, dies geschieht aus Gründen der Vereinfachung der Anlage über händische Messgeräte anstatt einer Online-Messung.

Ein Auslass an der Bodenfläche des Haupttanks erlaubt dessen vollständige Entleerung. In der Ablaufleitung sitzen ein elektrisch ansteuerbares Magnetventil (V-11) und die Entleerungspumpe (P-05).

Die Membranfiltration findet im Haupttank statt. Die Permeatpumpe (P-02) saugt das Permeat durch die Membran und pumpt es danach in den Permeattank (T-02). Die Permeatpumpe P-02 kann in zwei Richtungen fördern (Filtrationsbetrieb und *Backwash*-Betrieb, siehe Abschnitt 4.2.2).

In der Permeatleitung befindet sich unmittelbar nach den Filtrationsmembranen ein Druckmessgerät (PRS-01), um den Transmembrandruck zu überwachen und an das Prozessleitsystem zu übermitteln. Mit den zwei Kugelhähnen V-04 und V-05 kann die Permeatleitung an zwei verschiedenen Stellen abgesperrt werden. In den Rohrleitungsabschnitt zwischen diesen Ventilen mündet die Luftleitung ein.

Nach der Permeatpumpe P-02 liegt ein Durchflussmesser (FRC-02). Dieser übermittelt das Messsignal an das Prozessleitsystem, über welches in weiterer Folge mit Hilfe des Frequenzumrichters (SIRC-01) die Permeatpumpe gesteuert wird. Das Drei-Wege-Ventil V-06 wird benötigt, wenn eine Rückspülung der Membranen mit Reinigungslösung durchgeführt werden soll. Dafür saugt die Permeatpumpe Reinigungslösung aus dem Reinigungslösungstank (T-05) an. Dieser Tank kann beheizt und die Temperatur überwacht werden. Beides wird manuell durchgeführt, mittels händischem Thermometer und einem im Bedarfsfall versenkten Tauchsieders.

Die im Fließbild blau eingezeichneten Leitungen dienen der Versorgung des Systems mit Druckluft. Ein Luftkompressor (P-04) saugt aus der Umgebung Luft an, der Kompressor besitzt zur Drucküberwachung einen integrierten Druckmesser (PI-02). Der nötige Luftdurchfluss wird über einen Schwebekörper-Durchflussmesser mit integriertem Regelventil (FIC-02) händisch eingestellt. Die Druckluft wird durch eine Weiche auf zwei Leitungen aufgeteilt, eine führt über einen Druckminderer (V-08) zu den keramischen Diffusorscheiben, die andere dient der Durchführung der Rückspülung der Filtrationsmembranen mit Luft. Letztere leitet die Druckluft über einen zweiten Druckminderer (V-09) und ein Handventil (V-10) und mündet in die Permeatleitung.

## 4.2.2 Betriebsweisen

### 4.2.2.1 Filtrationsbetrieb

Im Filtrationsbetrieb erzeugt die Permeatpumpe P-02 einen Unterdruck, wodurch das Permeat durch die Keramikfilter gesaugt wird. Die Ventile V-04 und V-05 sind geöffnet, das Ventil zur Luftleitung (V-10) ist geschlossen. Das Drei-Wege-Ventil V-06 ist so geschaltet, dass das Permeat von der Permeatpumpe in den Permeattank (T-02) geleitet wird. Bei der Filtration sind zwei Betriebsmodi möglich: die Förderung eines konstanten Permeatvolumenstroms oder die Haltung eines konstanten Flüssigkeitspegels im Becken. Im ersten Fall regelt das Prozessleitsystem mit Hilfe der Daten des Durchflussmessers FRC-02 die Pumpe so, dass trotz steigender transmembraner Druckdifferenz der gewünschte Volumenstrom an Permeat konstant gefördert wird.

Im zweiten Fall wird die Permeatpumpe mit Hilfe des Levelsensors LRC-01 so geregelt, dass im Becken ein konstanter Flüssigkeitspegel gehalten wird.

Der Druckmesser PRS-01 zeichnet den Transmembrandruck auf. Aufgrund des Membranfoulings steigt dieser im Laufe des Filtrationsbetriebes an.

### 4.2.2.2 *Backwash* mit Permeat bzw. Reinigungslösung

Zur Reinigung der Filtrationsmembranen müssen regelmäßig Rückspülungen durchgeführt werden. Die Anlage ist so konzipiert, dass ein *Backwash* wahlweise in regelmäßigen zeitlichen Abständen oder bei Überschreiten eines kritischen Wertes der transmembranen Druckdifferenz durchgeführt wird.

Die Druckdifferenz über die Membran wird vom Druckmesser PRS-01 überwacht. Bei Erreichen eines vordefinierten Grenzwertes für den Druck oder nach Ablauf eines definierten Zeitintervalls schaltet das Prozessleitsystem automatisch in den *Backwash*-Betrieb. Die Drehrichtung der Permeatpumpe wird dabei umgekehrt und die Filtrationsmembran für kurze Zeit entgegen der Filtrationsrichtung mit Permeatwasser gespült. Für die Entfernung der an der Membran gebildeten Deckschicht reicht ein *Backwash* von einigen Sekunden aus. Um die Permeabilität der Membran in größerem Umfang wiederherzustellen, kann in längeren Zeitabständen eine Rückspülung mit einer Reinigungslösung durchgeführt werden (*chemically enhanced backwash*, CEB). Diese Reinigungslösung befindet sich in einem eigenen Tank (T-05). Zur Durchführung des CEB wird während des *Backwash*-Betriebs das Drei-Wege-Ventil V-06 umgeschaltet, die Permeatpumpe saugt dann an Stelle von Permeatwasser Reinigungslösung aus Tank T-05 an.

Besonderes Augenmerk ist darauf zu legen, dass im *Backwash*-Betrieb Ventil V-10 immer geschlossen ist. Andernfalls würde Rückspülmedium in die Druckluftleitung gepresst und könnte die dort verbauten Komponenten beschädigen.

#### 4.2.2.3 *Backwash* mit Luft

Die Rückspülung der Filtrationsmembran kann zu Testzwecken auch mit Druckluft durchgeführt werden. Hierfür wird die Permeatpumpe abgeschaltet und per Hand das Ventil V-05 geschlossen, damit die Druckluft nicht über die Permeatleitung zur Permeatpumpe gelangt. Der Druckminderer V-09 hat die Aufgabe, den Druck der vom Kompressor bereitgestellten Druckluft auf einen für die Filtrationsmembranen akzeptablen Betrag zu senken, um Beschädigungen auszuschließen.

Abbildung 26 auf der folgenden Seite zeigt das Verfahrensfliessbild der Anlage, in Tabelle 4 werden die im Fließbild verwendeten Abkürzungen erläutert. Einen Überblick über alle Anlagenkomponenten liefert Tabelle 5. Tabelle 6 zeigt die unterschiedlichen im Betrieb vorkommenden Medien.

Im Anhang finden sich zudem spezielle Fließbilder für die vier Betriebsweisen (Filtrationsbetrieb sowie *Backwash* mit Permeat, Reinigungslösung und Luft).

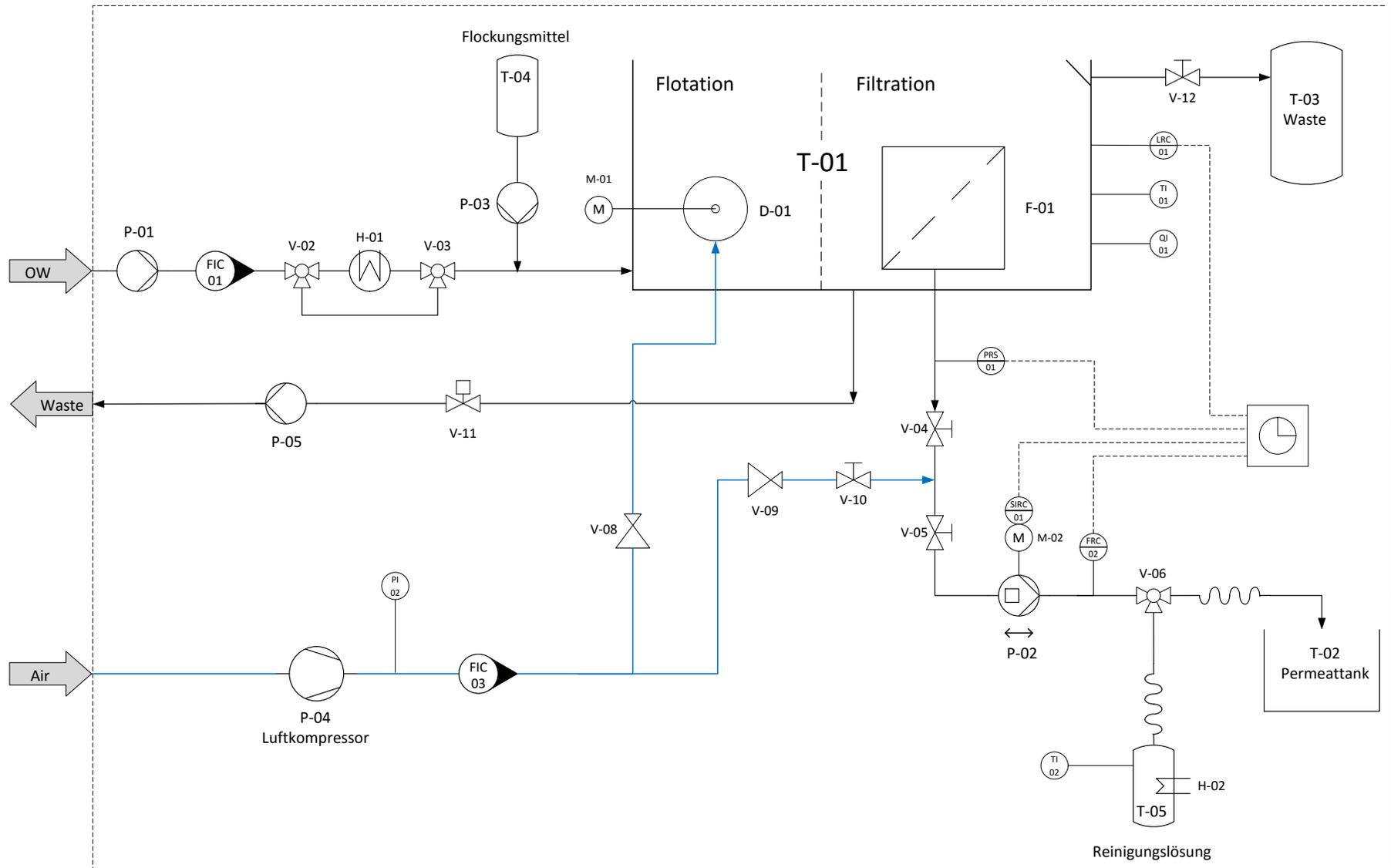


Abbildung 26: Verfahrensfließbild

Tabelle 4: Abkürzungen im Verfahrensfließbild

Abkürzung	Bedeutung
D	Diffusorscheiben
F	Filtrationsmembranen
H	Erhitzer
M	Motor
OW	<i>oily water</i> - Prozesswasser
P	Pumpe
T	Tank/Behälter
V	Ventil

Tabelle 5: Übersicht der Anlagenkomponenten

Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Typ	Berührendes Medium <sup>1</sup>
<b>Pumpen</b>			
P-01	Zulaufpumpe	Kreiselpumpe	OW
P-02	Permeatpumpe	Rollenpumpe (Verdrängerpumpe)	CW
P-03	Dosierpumpe Flockungsmittel	Membranpumpe (Verdrängerpumpe)	F
P-04	Luftkompressor	Kolbenkompressor	A
P-05	Entleerungspumpe	Kreiselpumpe	OW
<b>Ventile</b>			
V-02	Drei-Wege-Ventil vor Erhitzer	Kugelhahn, händisch	OW
V-03	Drei-Wege-Ventil nach Erhitzer	Kugelhahn, händisch	OW
V-04	Absperrung Permeat-/Luftleitung	Kugelhahn, händisch	CW/CS
V-05	Absperrung Permeatleitung	Kugelhahn, händisch	CW/CS
V-06	Drei-Wege-Ventil Reinigungslösung/Permeattank	Kugelhahn, händisch	CW/CS
V-08	Druckminderer Flotation	Filter-Regelventil	A
V-09	Druckminderer Luft- <i>Backwash</i>	Filter-Regelventil	A
V-10	Absperrventil Luftleitung	Kugelhahn, händisch	A
V-11	Absperrventil Entleerung	Magnetventil, automatisch	OW
V-12	Absperrventil <i>Waste</i>	Magnetventil, automatisch	O
<b>Tanks und Behälter</b>			
T-01	Flotation und Filtration	Edelstahlbecken	OW
T-02	Permeat	Kunststofftank	CW
T-03	<i>Waste</i>	Kunststofftank	O
T-04	Flockungsmittel	Kunststofftank	F
T-05	Reinigungslösung	Kunststofftank	CS
<b>Sonstiges</b>			
D-01	Diffusorscheiben	Keramikscheiben	A/OW
F-01	Filtrationsmembranen	Keramikplatten	OW/CW
H-01	Erhitzer	Einschraubheizkörper	OW
H-02	Erhitzer	Tauchsieder	CS
M-01	Motor	Laborrührwerk	-
M-02	Motor	Antrieb Permeatpumpe	-

<sup>1</sup> Abkürzungen siehe Tabelle 6

Tabelle 6: Medien im Betrieb

Abkürzung	Bedeutung
A	<i>air</i> - Luft
CS	<i>cleaning solution</i> - Reinigungslösung
CW	<i>clean water</i> - gereinigtes Wasser
F	<i>flocculation agent</i> - Flockungsmittel
O	<i>oil</i> - Öl
OW	<i>oily water</i> - Prozesswasser

### 4.3 Werkstoffauswahl

Die Anlage wurde für Testläufe mit Lagerstättenwasser ausgelegt, welches bei der Erdölförderung anfällt. Der Betrieb mit solchem Wasser stellt sehr hohe Anforderungen an die Widerstandsfähigkeit der eingesetzten medienberührten Werkstoffe. Neben dem enthaltenen Mineralöl können im Lagerstättenwasser bis zu 80.000 ppm gelöste Salze, insbesondere Natriumchlorid, enthalten sein. Solch hohe Salzgehalte stellen für metallische Werkstoffe eine große Herausforderung in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit dar.

Im Allgemeinen gilt folgende Faustregel: je beständiger und widerstandsfähiger ein Werkstoff, desto höher sein Preis. Die Aufgabe, die sich stellte, war, für die vorherrschenden Betriebsbedingungen geeignete Materialien zu finden und gleichzeitig mit den Kosten im Rahmen zu bleiben. Es musste somit ein Kompromiss zwischen ausreichender Korrosionsbeständigkeit sowie Lebensdauer des Werkstoffs und dessen Preis gefunden werden.

Da es sich um eine Pilotanlage für Testzwecke handelt und nicht um eine Anlage für den Dauerbetrieb, konnten bei der Lebensdauer der Komponenten Abstriche gemacht werden. Anders als bei dauerhaftem Betrieb läuft die Anlage im Testbetrieb üblicherweise nur für einige Stunden bis wenige Tage durchgehend, steht also nicht ununterbrochen in Kontakt mit dem korrodierenden Medium. Auch ist die Lebensdauer nicht von entscheidender Bedeutung, da die Testläufe im Allgemeinen nur über einige Wochen oder wenige Monate durchgeführt werden. Es wurde daher in Absprache mit den Herstellern der Anlagenkomponenten von einer Standzeit von rund einem Jahr ausgegangen. Über diesen Zeitraum hinweg sollte der Anlagenbetrieb mit hochkorrosivem Lagerstättenwasser zu keinen größeren korrosionsbedingten Schäden an der Anlage oder damit verbundenen Teilen führen.

Hohe Temperaturen können die Widerstandsfähigkeit verschiedener Materialien negativ beeinflussen. Besonders bei dauerhafter Exposition gegenüber aggressiven Medien können Temperaturen ab 40 °C bereits zur Verkürzung der Lebensdauer bei verschiedenen Kunststoffen, beispielsweise Polyvinylchlorid (PVC), führen. Da die Pilotanlage bei Temperaturen von maximal 40 °C betrieben wird und lange Haltbarkeit (wie oben beschrieben) nicht oberste Priorität hat, kann der Temperatureinfluss vernachlässigt werden.

### 4.3.1 Kunststoffe

Kunststoffe finden im Anlagenbau als Dichtmaterialien und Gehäusewerkstoffe breite Anwendung. Die Vorteile liegen in der relativ billigen Herstellung, der guten Bearbeitbarkeit und der geringen Masse.

Aus Tabelle 7 ist ersichtlich, dass die gängigen Kunststoffmaterialien gute Beständigkeit gegenüber Natriumchlorid und somit Salzwasser aufweisen. Mit wenigen Ausnahmen sind sie auch für den Einsatz bei Kontakt mit Mineralölen gut geeignet.

Tabelle 7: Beständigkeit von Kunststoffen [55]

Kurzbezeichnung	Material	Beständigkeit ggü. Mineralöl	Beständigkeit ggü. Natriumchlorid
NBR	Nitrilkautschuk	gut	gut
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	schlecht	gut
FKM	Fluorkautschuk	gut	gut
FFKM	Perfluorkautschuk	gut	gut
CR	Chloroprenkautschuk	bedingt	gut
PTFE	Polytetrafluorethylen	gut	gut
PVC	Polyvinylchlorid	bedingt	gut
PP	Polypropylen	gut	gut
PA	Polyamid	gut	gut
PVDF	Polyvinylenfluorid	gut	gut
PPS	Polyphenylensulfid	gut	gut
PEEK	Polyetheretherketon	gut	gut

### 4.3.2 Metalle

Die Auswahl geeigneter metallischer Werkstoffe stellt eine größere Herausforderung dar als die Auswahl der Kunststoffe. Alle Metalle zeigen gute Beständigkeit gegenüber Mineralölen, Salzwasser neigt jedoch stark dazu, Stähle und andere Metalle zu korrodieren. Tabelle 4 zeigt die Widerstandsfähigkeit verschiedener Metalle gegenüber Mineralölen und Natriumchlorid.

Niedriglegierte Stähle, Gusseisen und Messing sind für den Einsatz in salzhaltiger Umgebung nicht geeignet, schon nach kurzer Zeit würden korrosionsbedingte Schäden auftreten. Auch Stähle der V2A-Gruppe sind für den Einsatz in Salzwasserumgebung nicht gut geeignet und neigen rasch zu Korrosion.

Gute Widerstandsfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit gegenüber Salzwasser weisen Duplex- und Superduplex-Stähle auf. Diese Spezialstähle sind allerdings sehr teuer, viele Armaturen und andere Anlagenteile wären außerdem nur als Sonderanfertigungen aus diesen Werkstoffen erhältlich, was die Kosten empfindlich steigern würde.

Als Kompromisslösung eignen sich Stähle der V4A-Gruppe. Diese sind zwar nicht dauerhaft beständig gegenüber Chloriden, aber deutlich widerstandsfähiger als V2A-Stähle. Die angestrebte Standzeit von einem Jahr bei nicht-durchgehendem Betrieb sollte gemäß Absprache mit verschiedenen Herstellern kein Problem darstellen. Ein Großteil der Komponenten, Rohrleitungen und Armaturen ist standardmäßig aus V4A-Stählen erhältlich und die Kosten liegen deutlich unter jenen für Duplex- oder Superduplex-Stählen.

Tabelle 8: Beständigkeit metallischer Werkstoffe [55]

Kurzbezeichnung od. Werkstoffnr. nach EN bzw. AISI-Bez.	Typ	Material bzw. Stahlsorte nach EN	Beständigkeit ggü. Mineralöl	Beständigkeit ggü. NaCl
<b>Messing</b>	Legierung	Kupfer-Zink	gut	schlecht
<b>Rotguss</b>	Legierung	Kupfer-Zinn-Zink	gut	bedingt
<b>Grauguss</b>	Gusseisen	Eisen-Graphit	gut	schlecht
<b>1.0037</b>	Baustahl	S235JR	gut	schlecht
<b>1.4301 bzw. 304</b>	Edelstahl (V2A)	X5CrNi18-10	gut	schlecht
<b>1.4401 bzw. 316</b>	Edelstahl (V4A)	X5CrNiMo17-12-2	gut	bedingt
<b>1.4404 bzw. 316 L</b>	Edelstahl (V4A)	X2CrNiMo17-12-2	gut	bedingt
<b>1.4408 bzw. CF 8 M</b>	Stahlguss (V4A)	GX5CrNiMo19-11-2	gut	bedingt
<b>1.4571 bzw. 316 Ti</b>	Edelstahl (V4A)	X6CrNiTi18-10	gut	bedingt
<b>1.4462</b>	Edelstahl (Duplex)	X2CrNiMoN22-5-3	gut	gut
<b>1.4410</b>	Edelstahl (Superduplex)	X2CrNiMoN25-7-4	gut	gut
<b>1.4501</b>	Edelstahl (Superduplex)	X2CrNiMoCuWN25-7-4	gut	gut

## 4.4 Komponentenauswahl

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Anlagenteile beschrieben, Auswahlkriterien geschildert und technische Eigenschaften dargestellt.

### 4.4.1 Gerüst

Die Anlage wird auf einem metallischen Gerüststrahlen montiert. Die Grundfläche dieses Rahmens hat gemäß den Vorgaben die Größe einer Europalpalette (1200 x 800 mm), um den Transport zu vereinfachen. Gefertigt wird das Gerüst aus quadratischen Vierkantrohren mit 4 cm Seitenlänge aus Baustahl 1.0037 (S235JR) und wird zum Zwecke des Korrosionsschutzes lackiert. Da auf der Grundfläche nicht alle Teile der Anlage Platz finden, besitzt das Gerüst eine zweite Ebene, in einer Höhe von 75 cm über der ersten. Die Anordnung der Komponenten auf den zwei Ebenen und der nötige Abstand zwischen den beiden wurden mit Hilfe eines dreidimensionalen Modells der Anlage ermittelt (siehe Abschnitt 4.7). Die Bodenfläche der beiden Ebenen besteht aus PVC-Platten, die auf dem Rahmen montiert werden, um eine durchgehende ebene Fläche für die Platzierung der Anlagenteile zu schaffen.

## 4.4.2 Becken und Tanks

### 4.4.2.1 Hauptbecken

Im Hauptbecken sind die keramischen Membranen für Flotation und Filtration untergebracht, deren Platzbedarf die Beckengröße bestimmt. Die Dimensionierung des Beckens und die Berechnung dessen erforderlicher Größe ist in Abschnitt 4.5 dokumentiert. Das Becken wird aus 1,5 mm starkem Blech aus Edelstahl 1.4404 in der firmeneigenen Werkstatt gefertigt. Maße und Eigenschaften des Beckens sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Maße und Eigenschaften des Hauptbeckens

Material	Edelstahl 1.4404
Länge	73 cm
Breite	37 cm
Gesamthöhe	63 cm
Wandstärke	1,5 mm
Höhe Wasserpegel	54 cm
Gesamtvolumen	170 l
Wasservolumen im Betrieb	ca. 146 l

### 4.4.2.2 Tanks

Die vier Tanks für Permeat (T-02), abgeschiedenes Öl und Waste (T-03), Flockungsmittel (T-04) und Reinigungslösung für den Backwash (T-05) sind Tonnen bzw. Kanister aus hochdichtem Polyethylen (PE-HD). Diese Lösung wurde gewählt, da keine großen Volumina benötigt werden und diese Container einfach entleerbar und austauschbar sowie billig und leicht sind. Tabelle 10 zeigt die Eigenschaften der vier Kunststofftanks.

Tabelle 10: Eigenschaften der Tanks

Tank	Tag (Kurzbezeichnung)	Typ	Volumen	Material
Permeat	T-02	Tonne	60 l	PE-HD
Waste	T-03	Kanister	10 l	PE-HD
Flockungsmittel	T-04	Kanister	5 l	PE-HD
Reinigungslösung	T-05	Kanister	10 l	PE-HD

### 4.4.3 Keramikmembranen und Rotationsdichtung

#### 4.4.3.1 Flotationsmembranen

Beim akvoFloat™-Verfahren werden die Luftblasen für die Flotation durch rotierende Diffusorscheiben erzeugt. Diese runden Keramikscheiben sind auf einer drehenden Hohlwelle gelagert und werden über diese mit Druckluft versorgt. Die Welle wird über ein Laborrührwerk angetrieben, dessen Drehzahl geregelt werden kann. Für die Flotation werden ca. 2 bar Überdruck (3 bar Absolutdruck) benötigt. Um die Welle an den vom Luftkompressor kommenden Schlauch anzuschließen, kommt eine Rotationsdichtung (siehe Abschnitt 4.4.3.2) zum Einsatz. Durch die Rotationsdichtung und die Hohlwelle strömt die Luft in die porösen Membranen und von dort ins umgebende Wasser.

Der einzige Hersteller geeigneter keramischer Membranscheiben für diese Anwendung ist die Firma Kerafol. Kerafol bietet Membranscheiben mit den Außendurchmessern 152 mm, 312 mm und 372 mm an. Die kleinste der drei Membranen (Durchmesser 152 mm) ist für den Feedstrom von 100 l/h vollkommen ausreichend. Die keramischen Diffusorscheiben sind in Abbildung 27 dargestellt, deren technische Daten sind in Tabelle 11 aufgelistet.



Abbildung 27: Keramische Diffusorscheiben der Fa. Kerafol [56]

In vorhergehenden Versuchen mit den 152-mm-Membranscheiben wurde bei 2 bar Luftüberdruck ein Luftvolumenstrom von mindestens 10 NI/h pro Membranscheibe gemessen. Die von Berné und Cordonnier empfohlene Luftmenge für DAF-Systeme von 50 bis 240 NI/m<sup>3</sup> wurde als Anhaltspunkt für die Auslegung genommen, für einen Wasserstrom von 0,1 m<sup>3</sup>/h ergibt dies 5 bis 24 NI/h. Für die Flotation werden zwei Diffusorscheiben eingesetzt. Mit diesen kann eine Luftmenge von mindestens 20 NI/h in das Becken eingebracht werden, diese Menge liegt im oberen Bereich des Empfohlenen.

Tabelle 11: Technische Daten der Membranscheibe der Firma Kerafol

<b>Kerafol Membrane Disc 152</b>	
Außendurchmesser	152,0 mm
Innendurchmesser	25,2 mm
Dicke	4,5 mm
Membranfläche	360 mm <sup>2</sup>
Porengröße	2,0 µm
Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Betriebsdruck bei Flotation	2 bar
Max. Betriebsdruck	3 bar
Luftstrom (gemessen)	10 NI/h

Für den Antrieb der Hohlwelle, auf welcher die Keramikscheiben sitzen, kommt ein einfaches Laborrührwerk des Herstellers Witeg zum Einsatz. Das Modell HS-50A hat einen stufenlos verstellbaren Antrieb und kann Drehzahlen zwischen 0 und 3000 min<sup>-1</sup> liefern. Durch Verstellen der Wellendrehzahl kann die Blasengröße und -menge optimiert werden. Die Ausgangsleistung beträgt 75 W, das Rührwerk kann bei Stromfrequenzen von 50 oder 60 Hz betrieben werden.

#### 4.4.3.2 Rotationsdichtung

Eine Rotationsdichtung ist nötig, um die rotierende Hohlwelle und die Diffusorscheiben mit dem Schlauch der Druckluftversorgung zu verbinden. Es wird dafür eine modifizierte Version der Baureihe 7500 Typ RTE-N von Haag + Zeissler eingesetzt. Bei dieser Drehdurchführung wurden die ursprünglich aus Edelstahl ausgeführten Kugellager und Laufflächen auf Anfrage aus Keramik gefertigt. Auf diese Weise ist bessere Korrosionsbeständigkeit und Widerstandsfähigkeit im aggressiven salzhaltigen Prozesswasser gegeben. Lufteintritt und -austritt der Rotationsdichtung liegen im rechten Winkel zueinander und sind als ¼"-Außen- bzw. Innengewinde ausgeführt. Die Dichtung ist in Abbildung 28 dargestellt, in Tabelle 12 sind die technischen Daten aufgelistet.



Abbildung 28: Rotationsdichtung des Herstellers Haag + Zeissler

Tabelle 12: Technische Daten der Rotationsdichtung

<b>Haag + Zeissler Serie 7500 Typ RTE-N</b>	
Material Gehäuse	1.4571
Material Rotor	1.4571
Material Lager und Laufflächen	ZrO <sub>2</sub>
Material Dichtung	Kohlegraphit / SiC
Prozessanschlüsse	G ¼"
Max. Temperatur	120 °C
Max. Druck	10 bar
Max. Drehzahl	3500 min <sup>-1</sup>

#### 4.4.3.3 Filtrationsmembranen

Für die Filtration werden Membranplatten des Herstellers Cembrane eingesetzt. Sie bestehen aus Siliciumcarbid, die Porengröße beträgt 0,1 µm. Die Abmessungen einer Membranplatte betragen ca. 23 x 14 x 0,7 cm, um den gewünschten Permeatfluss von 1,33 l/(m<sup>2</sup>·h) zu erzielen, sind 20 Platten nötig. Diese werden in einem gemeinsamen Membranmodul untergebracht und in das Hauptbecken getaucht. Die Berechnung von Filterfläche, Plattenanzahl und Modulgröße ist in Abschnitt 4.5 dokumentiert, technische Daten der Cembrane-Membranen sind in Tabelle 13 dargestellt.

Die Membranplatten von Cembrane eignen sich aufgrund ihrer oleophoben Oberfläche ausgezeichnet für den Einsatz zur Öl-Wasser-Trennung, da das Öl nicht an der Oberfläche anhaftet. Die Membranen haben eine geringe Neigung zu Fouling und zeigen gute thermische sowie mechanische Belastbarkeit. Weiters sind sie chemisch sehr beständig und lassen sich im Bedarfsfall auch mit aggressiven Reinigungsmitteln behandeln.

Tabelle 13: Technische Daten der Membranplatten der Firma Cembrane

<b>Cembrane Membranplatten</b>	
Porengröße	0,1 µm
Material	Reaktionsgebundenes Siliciumcarbid
Länge	230 mm
Breite	140 mm
Dicke	7 mm
Membranfläche	32 200 mm <sup>2</sup>
Max. Backwash-Druck	3,0 bar
Druckbereich im Saugbetrieb	0...0,7 bar
Max. Temperatur	80 °C

## 4.4.4 Pumpen und Frequenzumrichter

### 4.4.4.1 Zulaufpumpe und Entleerungspumpe

Für die Zulauf- (P-01) und die Entleerungspumpe (P-05) wurde jeweils eine Kreiselpumpe Verdermag V-MD-20C-H der Firma Verder gewählt. Die Pumpe ist in Abbildung 29 dargestellt. Kreiselpumpen sind preisgünstig, einfach im Aufbau und wenig störungsanfällig im Betrieb. Sie eignen sich hervorragend zum Fördern verunreinigter Flüssigkeiten und bei relativ geringen Druckdifferenzen. Die Regelung des Volumenstroms lässt sich durch eine druckseitige Drossel bewerkstelligen. Durch das Eindrosseln der Pumpe wird der Anlagenwiderstand erhöht und der Arbeitspunkt der Pumpe entlang ihrer Kennlinie verschoben, bei gleicher Drehzahl fördert die Pumpe dann einen kleineren Volumenstrom.



Abbildung 29: Kreiselpumpe Verder Verdermag V-MD-20C-H

Die magnetgekuppelte Pumpe Verdermag V-MD-20C-H schafft eine maximale Förderhöhe von 4,8 m, der maximale Volumenstrom liegt bei 9,5 l/min. Der spezifizierte Punkt, jener Betriebspunkt, an welchem die Pumpe am effizientesten arbeitet, liegt bei 4,0 m bei 3,5 l/min. Abbildung 30 zeigt die Pumpenkennlinie. Die Zulaufpumpe wurde in selbstansaugender Ausführung gewählt, für die Entleerungspumpe ist dies nicht notwendig, da diese unterhalb des Beckens liegt und dadurch bei geöffnetem Entleerungsventil automatisch vollläuft.

Die Zulaufpumpe wurde hinsichtlich ihrer Förderhöhe relativ großzügig dimensioniert, was mehrere Gründe hat: der Haupttank liegt rund einen Meter über der Zulaufpumpe und ist zusätzlich rund einen halben Meter hoch. Die zwischen Pumpe und Tank liegenden Rohrleitungen und das Heizelement bewirken überdies einen Druckverlust. Dank der großzügigen Auslegung ist es darüber hinaus möglich, gegebenenfalls aus einem tiefer gelegenen Feedbehälter in die Anlage zu fördern. Die Größe des Feedstroms wird mit der oben beschriebenen Drosselregelung eingestellt, hierfür liegt nach der Pumpe ein Schwebekörper-Durchflussmesser mit integriertem Drosselventil (FIC-01).

Für die Entleerungspumpe, die unterhalb des Haupttanks liegt, würde eine kleinere Pumpe ausreichen. Es wurde allerdings auch hier großzügig dimensioniert, um im Bedarfsfall das Becken in einen weiter entfernten und/oder höher gelegenen Tank entleeren zu können.

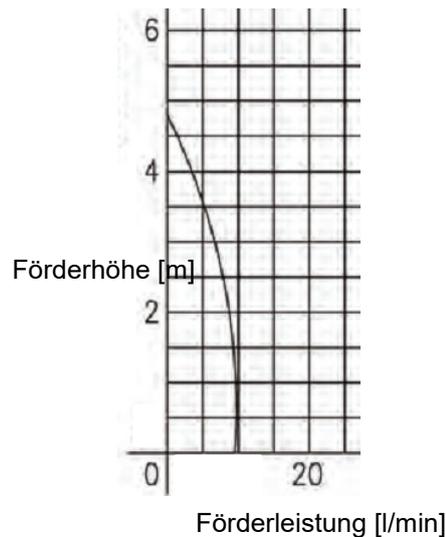


Abbildung 30: Kennlinie der Kreiselpumpe Verder Verdermag V-MD-20C-H

Die nachfolgende Tabelle 14 zeigt die technischen Daten der Zulauf- und Entleerungspumpe.

Tabelle 14: Technische Daten der Pumpe Verdermag V-MD-20C-H der Fa. Verder

<b>Verdermag V-MD-20C-H</b>	
Typ	Magnetgekuppelte Kreiselpumpe
Max. Förderleistung	9,5 l/min
Max. Förderhöhe	4,5 m
Förderleistung an spez. Punkt	3,5 l/min
Förderhöhe an spez. Punkt	4,0 m
Drehzahl	2500 min <sup>-1</sup>
Wellenleistung	20 W
Leistungsaufnahme	40 W
Material medienberührt	PP

#### 4.4.4.2 Permeatpumpe

Als Permeatpumpe (P-02) kommt eine Rollenpumpe R-NNVF8 der Firma Zuwa zum Einsatz, abgebildet in Abbildung 31. Rollenpumpen sind Verdrängerpumpen und ähneln in der Betriebsweise Drehschieberpumpen. Ein zylindrischer Rotor ist exzentrisch in einem ebenfalls zylindrischen Gehäuse montiert. Im Rotor lose gelagerte Rollen werden durch die Fliehkraft an die Gehäusewand gepresst und teilen den Raum zwischen Rotor und Gehäusewand in Kammern ein, in welchen das Wasser gefördert wird. Durch Umkehren der Drehrichtung ist eine Förderung in die entgegengesetzte Richtung möglich. Die Förderung ist pulsationsfrei und bewirkt so einen gleichmäßigen Permeatfluss durch die Filtermembranen. Die Pumpe ist dazu geeignet, den nötigen Transmembrandruck saugseitig aufzubringen,

theoretisch sind Förderhöhen bis 8 m (8 bar) möglich. Des Weiteren ist die Pumpe trocken selbstansaugend und erlaubt bis zu 30 Sekunden Trockenlauf.



Abbildung 31: Rollenpumpe R-NNVF8 der Fa. Zuwa, (a) mit Antriebsmotor, (b) im Querschnitt

Förderdruck und Fördermenge sind über die Drehzahl des Pumpenmotors regelbar, die Kennlinien der Pumpe bei verschiedenen Drehzahlen sind in Abbildung 32 ersichtlich. Die Steuerung geschieht über einen Frequenzumrichter, welcher vom Prozessleitsystem angesteuert wird. Die Nennfrequenz des Motors beträgt die in den USA standardmäßigen 60 Hz. Für die regelmäßig notwendigen Rückspülungen der Membranplatten wird über den Frequenzrichter die Pumpendrehrichtung umgekehrt, die Pumpe fördert dann aus dem Permeat- bzw. Reinigungslösungstank durch die Membranen in den Haupttank. Im Filtrationsbetrieb soll der Volumenstrom 100 l/h (ca. 1,7 l/min), im *Backwash*-Betrieb kurzzeitig 300 l/h (5 l/min) betragen, diese Betriebszustände sind als vertikale rote Linien im Kennliniendiagramm (Abbildung 32) dargestellt.

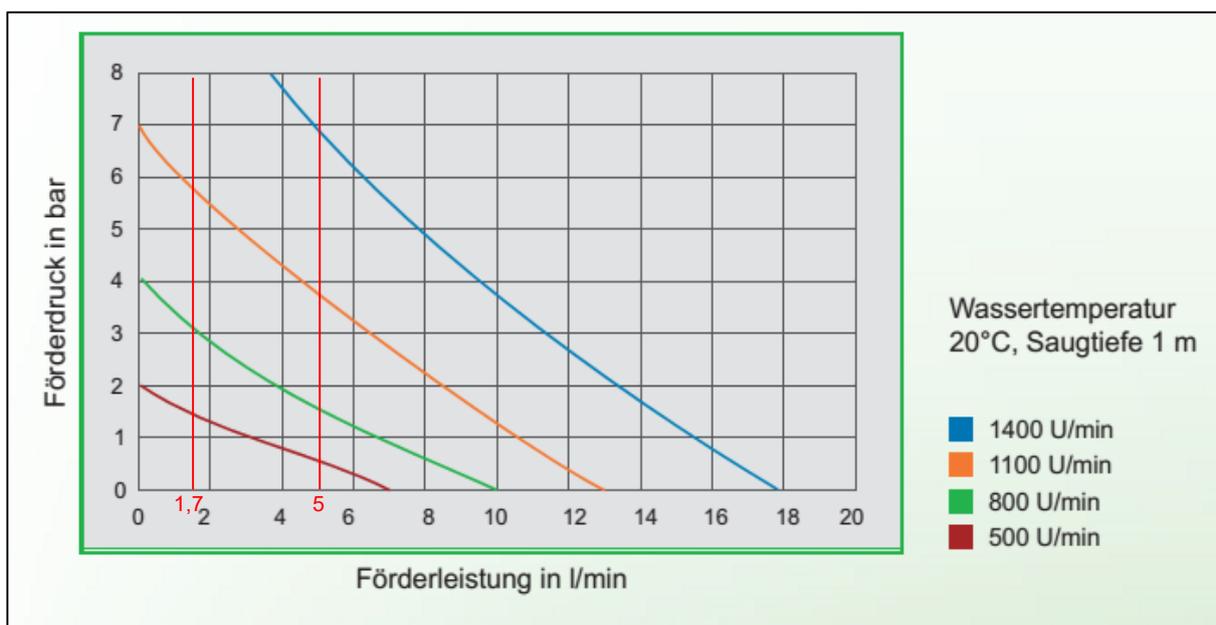


Abbildung 32: Kennlinien der Permeatpumpe bei verschiedenen Drehzahlen. Die Betriebszustände bei der Filtration (1,7 l/min) und beim *Backwash* (5 l/min) sind als rote Linien eingezeichnet.

Eine Übersicht über die technischen Daten der Pumpe liefert Tabelle 15.

Tabelle 15: Technische Daten der Rollenpumpe R-NNVF8 der Fa. Zuwa

<b>Zuwa R-NNVF8</b>	
Typ	Rollenpumpe
Max. Förderleistung	18 l/min
Max. Förderdruck / Förderhöhe	8 bar / 8 m
Nenn Drehzahl	1400 min <sup>-1</sup>
Motorleistung	0,5 kW
Nennfrequenz	60 Hz
Material Laufrad	PVDF
Material Wellendichtung	FKM
Material Pumpengehäuse	Edelstahl 1.4404

#### 4.4.4.3 Frequenzumrichter

Zur Steuerung der Permeatpumpe kommt ein Frequenzumrichter Sinamics 6SL321 der Firma Siemens zum Einsatz. Der Frequenzumrichter wird direkt von der SPS angesteuert, über die Variation der Stromfrequenz lässt sich die Pumpendrehzahl einstellen und durch Umkehr der Drehrichtung die Förderrichtung der Pumpe umkehren. Die Pumpe läuft bei Netzfrequenz auf maximaler Drehzahl, durch Verringern der Frequenz wird die Drehzahl gesenkt. Der Frequenzumrichter verfügt über Bedienknöpfe und eine elektronische Anzeige und kann damit im Bedarfsfall auch manuell gesteuert werden. In Tabelle 16 sind die technischen Daten des Frequenzumrichters dargestellt.

Tabelle 16: Technische Daten des Frequenzumrichters

<b>Siemens Sinamics 6SL321</b>	
Modellnummer	6SL3210-5BB15-5AV0
Netzspannung	200...240 V
Netzfrequenz	50/60 Hz
Eingangsphasenanzahl	1
Ausgangsphasenanzahl	3
Max. abgegebene Leistung	0,55 kW

#### 4.4.4.4 Flockungsmittelpumpe

Als Dosierpumpe zur optionalen Dosierung von Flockungsmittel kommt eine Magnet-Membrandosierpumpe gamma/ L GALa 1602 der Firma ProMinent zum Einsatz. Bei diesem Pumpentyp führt eine Membran durch Anregung durch einen Magneten eine Hubbewegung aus, wodurch kontinuierlich Flüssigkeit angesaugt und ausgestoßen wird. Über die Hubhöhe und Hubfrequenz kann die Dosiermenge gesteuert werden, Dosierpumpen eignen sich zur Bereitstellung kleinster Fördermengen.

Wenn der Bedarf einer Flockung vor der Flotation besteht, wird diese Pumpe manuell zugeschaltet. Je nach verwendetem Flockungsmittel und Ölgehalt des Feedstroms sind unterschiedliche Mengen an Flockungsmittel nötig. Die gewünschte Dosiermenge wird händisch am Bedienpanel der Pumpe eingestellt, das Flockungsmittel wird dann aus einem separaten Flockungsmittelbehälter direkt in den Feedstrom dosiert.

Die Pumpe kann bis zu 2,1 l/h bei 16 bar Druck fördern. Die Bereitstellung großer Drücke ist aufgrund der Dosierung in den Feedstrom und dem dort herrschenden Gegendruck notwendig. Ein integriertes Rückschlagventil verhindert, dass Wasser aus dem Feedstrom in die Pumpe zurückläuft.



Abbildung 33: Flockungsmittelpumpe ProMinent gamma/ L GALa 1602

Die nachfolgende Tabelle 17 zeigt die technischen Daten der Flockungsmittelpumpe.

Tabelle 17: Technische Daten der Flockungsmittelpumpe

ProMinent gamma/ L GALa 1602	
Typ	Membranpumpe
Max. Fördermenge	2,1 l/h
Max. Förderdruck	16 bar

#### 4.4.4.5 Luftkompressor

Der Luftkompressor dient der Bereitstellung der Druckluft für die Flotation und die Luftrückspülung der Filtrationsmembranen. Eingesetzt wird ein Kolbenkompressor der Modellbezeichnung 225/08/24 der Firma Güde, dargestellt in Abbildung 34. Der Kompressor ist ursprünglich für mobile Anwendung konzipiert, beim Einbau in die Anlage wird auf das Anbringen der Räder verzichtet, um stabilen Stand zu gewährleisten.

In Betrieb füllt der Motor den Druckbehälter an, bis darin der Arbeitsdruck (8 bar) erreicht ist. Dann schaltet der Kompressor selbstständig ab und Druckluft kann entnommen werden. Mit einem Drehknopf kann jener Druckwert eingestellt werden, bei dessen Unterschreiten der Kompressor wieder anspringt und abermals den Arbeitsdruck im Drucktank herstellt. Der Kompressor verfügt über eine integrierte Anzeige für den Druck im Behälter sowie über ein Sicherheitsventil, welches den Druck ablässt, bevor es zu einer Beschädigung des Geräts kommt.



Abbildung 34: Luftkompressor Güde 225/08/24

Ausschlaggebend für die Auswahl dieses Kompressors war dessen Flexibilität hinsichtlich der Stromfrequenz, laut Hersteller ist der Betrieb bei 50 sowie 60 Hz möglich. Wichtig ist auch, dass der Kompressor ölfrei arbeitet. Bei ölgeschmierten Luftkompressoren gelangt Schmieröl in die Druckluft, dies hätte die Verstopfung der Diffusorscheiben durch Ölpartikel zur Folge.

Die gewünschte Luftmenge und der gewünschte Luftdruck für den Betrieb der Flotation und den *Backwash* mit Luft werden mit dem Schwebekörper-Durchflussmesser FIC-03 (siehe Abschnitt 4.4.7.3) und den Druckminderern bzw. Filterregelventilen V-08 und V-09 (siehe Abschnitt 4.4.8.4) eingestellt.

Tabelle 18 zeigt die technischen Daten des Luftkompressors.

Tabelle 18: Technische Daten des Luftkompressors Güde 225/08/24

<b>Güde 225/08/24</b>	
Typ	Kolbenkompressor
Elektrische Leistung	1100 W
Max. Ansaugleistung	190 l/min
Max. Abgabeleistung	130 l/min
Arbeitsdruck	8 bar
Max. Druck	9 bar

#### 4.4.5 Speicherprogrammierbare Steuerung

Mit der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) wird der Betriebsablauf der Anlage gesteuert. Zum Einsatz kommt das Modell SIMATIC S7-1200 des Herstellers Siemens. Diese SPS ist kompakt und modular aufgebaut und lässt sich um zusätzlich nötige Schnittstellen erweitern. Die mitgelieferte Software SIMATIC STEP 7 Basic erlaubt die freie Programmierung der Steuerung am PC und die Erstellung unterschiedlicher gewünschter Betriebsmodi. Die SPS wird in Verbindung mit einem Starterkit angeschafft; darin enthalten sind die CPU, ein Farbdisplay mit Touchscreen zur Bedienung, die zur Programmierung nötige Software und ein Eingangssimulator zum Austesten der programmierten Funktionen und deren Steuerung. Mitgeliefert werden außerdem Verbindungskabel, Betriebsanleitung und Dokumentationen.

Die CPU verfügt über insgesamt 16 integrierte digitale und analoge Ein- und Ausgänge. Von diesen sind allerdings nur zwei analoge Eingänge, welche darüber hinaus nur Spannungssignale, nicht aber Stromsignale aufnehmen können. Da die SPS zumindest drei analoge Stromsignale aufnehmen muss (von LRC-01, PRS-01 und FRC-02), ist eine zusätzliche Baugruppe für analoge Eingänge nötig. Die Analogbaugruppe SM 1231 verfügt über vier Analogeingänge, die mit Strom- oder Spannungssignalen angesteuert werden können. Die nachfolgende Tabelle 19 zeigt die technischen Eigenschaften der Bauteile der SPS und der zusätzlichen Analogbaugruppe.

Tabelle 19: Technische Daten der SPS

<b>Siemens S7-1200</b>	
CPU-Modell	1212C
Betriebsspannung	85-264 V AC
Arbeitsspeicher	50 kB
Digitale Eingänge	8 x 24 V DC
Digitale Ausgänge	6 x Relais 2 A
Analoge Eingänge	2 x 0-10 V DC
Unterstützte Protokolle	TCP/IP, ISO-on-TCP, USS drive protocol, Modbus Master/Slave
<b>Bedienpanel</b>	
Modell	KTP400 Basic
Display	4,3 Zoll TFT-Touchscreen, 64.000 Farben
Auflösung	480 x 272 Pixel
Bedienung	Touchscreen + 4 analoge Funktionstasten
<b>Baugruppe für analoge Eingänge</b>	
Modell	SM 1231
Versorgungsspannung	24 V DC
Anzahl analoger Eingänge	4
Mögliche Eingangssignale	±10 V, ±5 V, ±2.5 V, 0...20 mA, 4...20 mA

#### 4.4.6 Heizung

Die Temperatur des zu filtrierenden Mediums beeinflusst dessen Viskosität, diese wiederum wirkt sich auf die Filtrationseigenschaften aus. Um Testläufe bei verschiedenen Feedtemperaturen durchführen zu können, ist in der Zuleitung ein Durchlauferhitzer eingebaut. Der gewählte Einschraubheizkörper Modell SEHK der Firma Siekerrkotte wird mit einem Gewinde (G 1½") in ein Mantelrohr mit Durchmesser DN 50 eingeschraubt, am gegenüberliegenden Ende der Einschrauböffnung ist das Rohr mit einem Boden verschlossen. Für Zulauf des kalten und Ablauf des erwärmten Stromes besitzt das Rohr an beiden Enden jeweils einen radial angebrachten Anschluss (siehe Abbildung 35). Wenn der Feedstrom nicht erwärmt werden soll, kann der Erhitzer über eine Bypassleitung umgangen werden. Diese wird über zwei Drei-Wege-Ventile, jeweils eines vor und eines nach dem Erhitzer, angesteuert. Abbildung 36 zeigt eine technische Skizze des Einschraubheizkörpers.

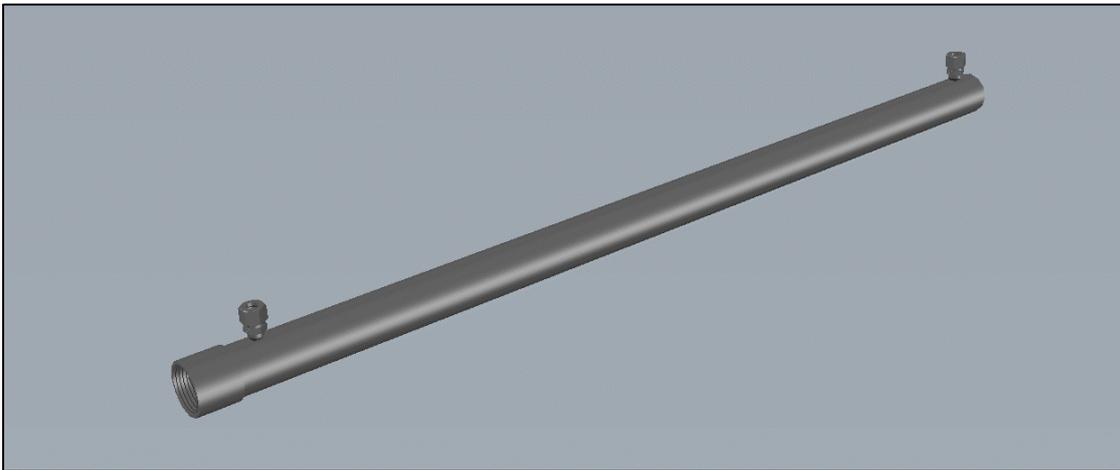


Abbildung 35: Mantelrohr für den Einschraubheizkörper

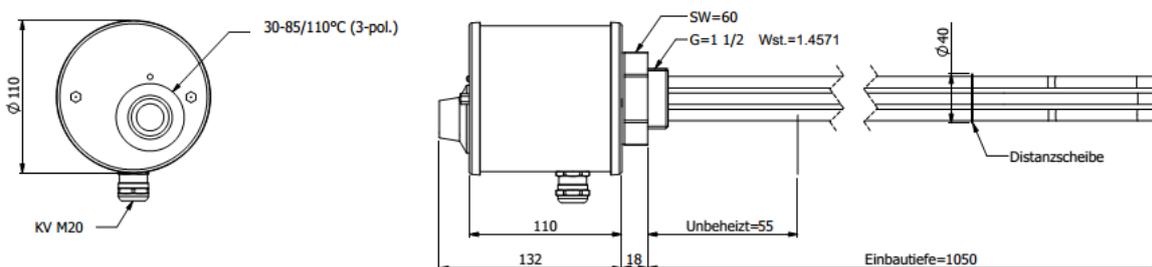


Abbildung 36: Skizze des Einschraubheizkörpers der Fa. Siekerrkotte

Der Erhitzer wurde so dimensioniert, dass ein Feedstrom von 100 l/h um 20 °C erhitzt werden kann, die elektrische Heizleistung beträgt 3300 W. Die technischen Daten des Heizkörpers sind in Tabelle 20 dargestellt.

Die Heizung verfügt über einen Drehknopf zur Regelung der Heizleistung. Da das Gerät nicht als Durchlauferhitzer, sondern als statischer Heizkörper für Tanks o. ä. konzipiert ist, muss die Regelung im Betrieb manuell durchgeführt werden. Hierfür wird im Hauptbecken die Temperatur überwacht und bei Bedarf am Heizkörper händisch nachgeregelt.

Tabelle 20: Technische Daten des Einschraubheizkörpers der Fa. Siekerkotte

<b>Siekerkotte SEHK</b>	
Material medienberührt	Edelstahl 1.4571
Elektrische Leistung	3300 W
Gesamtlänge	1200 mm
Einbautiefe Heizelement	1050 mm

## 4.4.7 Messgeräte

### 4.4.7.1 Durchflussmesser FIC-01

Der Durchflussmesser FIC-01 dient der Anzeige und Mengensteuerung des Feedstromes. Zum Einsatz kommt ein Schwebekörper-Durchflussmesser RAGK42 der Firma Rota-Yokogawa, dargestellt in Abbildung 37. Bei diesen Messgeräten durchfließt das Fluid einen durchsichtigen Zylinder senkrecht von unten nach oben. Ein darin liegender Widerstandskörper wird von der Strömung angehoben und bei konstantem Durchfluss in Schwebelage gehalten. An einer Skala kann anhand der Auslenkung des Schwebekörpers aus seiner Ruheposition der Durchfluss abgelesen werden. Die Kenntnis der Fluideigenschaften sind bei der Auswahl des Messgeräts wichtig, da die Kalibrierung von der Fluidichte und -viskosität abhängt. Diese Größen ändern sich mit der Temperatur des Mediums, bei Temperaturschwankungen und Änderung der Medienzusammensetzung kann es zu Messungenauigkeiten kommen. Bei den erwarteten Feedtemperaturen von 20 bis 40 °C sind diese Abweichungen vernachlässigbar, bei Betrieb der Anlage mit einem Wasserstrom mit variierendem Salzgehalt können sich aufgrund der Dichteänderung allerdings größere Messungenauigkeiten ergeben.



Abbildung 37: Schwebekörper-Durchflussmesser der Firma Rota-Yokogawa

Der Durchflussmesser ist an dessen Einlauf mit einem Ventil ausgestattet, über welches sich der gewünschte Durchfluss einstellen lässt. Wo es möglich war, wurde bei der Materialauswahl aufgrund besserer Korrosionsbeständigkeit Kunststoffen gegenüber Metallen der Vorzug gegeben. Die Prozessanschlüsse sind als NPT-Gewinde ausgeführt, der Messbereich reicht von 25 bis 250 l/h. Die technischen Daten sind Tabelle 21 aufgelistet.

Auswahlgründe für diesen Gerätetyp waren die wenig fehleranfällige, einfache und preisgünstige Messtechnik und die Kombination von Messung und Durchflusssteuerung in einem

Gerät. Ein weiterer großer Vorteil ist die Möglichkeit des Einsatzes nicht-korrosionsanfälliger Kunststoffe für die medienberührten Teile und ein geringer sich einstellender Druckverlust.

Tabelle 21: Technische Daten des Schwebekörper-Durchflussmessers RAGK42 der Firma Rota-Yokogawa

<b>Rota-Yokogawa RAGK42</b>	
Typ	Schwebekörper-Durchflussmesser mit Stellventil
Messbereich	25...250 l/h
Messgenauigkeit	2,5 %
Werkstoff Schwebekörper	PP
Werkstoff Prozessanschluss	PP
Werkstoff Armatur	PP
Werkstoff Dichtung	NBR
Prozessanschluss	NPT 3/8"
Messrohrlänge	150 mm
Druckverlust	10 mbar
Max. Druck	16 bar
Max. Temperatur	80 °C

#### 4.4.7.2 Durchflussmesser FIRC-02

Der Durchflussmesser FIRC-02 dient der Messung des von der Permeatpumpe geförderten Volumenstroms. Das ausgewählte Modell DT-03 der Firma Profimess ist ein kalorimetrischer Strömungswächter, dargestellt in Abbildung 38. Die Messung erfolgt nach dem kalorimetrischen Prinzip: ein beheizter Messwiderstand in einer Stahlhülse ragt in den Wasserstrom, das Wasser transportiert proportional zur Anströmgeschwindigkeit Wärme ab. Gemessen wird die Heizleistung, die dem Sensor zugeführt werden muss, um dessen Temperatur konstant zu halten, daraus kann auf den Volumenstrom geschlossen werden. Zusätzlich wird die Wassertemperatur gemessen, damit eine Temperaturänderung des Wasserstroms nicht fälschlicherweise als Änderung des Volumenstroms interpretiert wird. Vor dem ersten Einsatz muss das Gerät mit dem fließenden Medium bei bekannten Volumenströmen kalibriert werden.



Abbildung 38: Kalorimetrischer Strömungswächter der Fa. Profimess

Der Sensor besitzt einen Gewindeanschluss, mit dem er in ein T-Stück der Rohrleitung eingeschraubt wird. Das Messsignal wird über einen 4...20 mA-Ausgang an das Prozessleitsystem übermittelt, dieses kann damit die Permeatpumpe auf den gewünschten Volumenstrom regeln. Technische Details des Strömungswächters sind in Tabelle 22 gezeigt.

Der kalorimetrische Strömungswächter kann zwar nur in eine Durchflussrichtung messen, erlaubt aber im Gegensatz zu vielen Strömungsmessern mit anderen Messprinzipien den Durchfluss auch in die Gegenrichtung. Da im *Backwash*-Betrieb die Flussrichtung in der Rohrleitung umgekehrt wird, war dies ein wichtiges Auswahlkriterium für dieses Messgerät. Das Fehlen bewegter Teile verringert das Risiko mechanischen Versagens.

Tabelle 22: Technische Daten des Durchflussmessers der Fa. Profimess

<b>Profimess DT-03</b>	
Messprinzip	Kalorimetrische Messung
Genauigkeit	±10 % des Endwerts
Werkstoff medienberührt	Edelstahl 1.4571
Prozessanschluss	G ¼"
Analogausgang	4...20 mA
Max. Druck	70 bar
Temperaturbereich	0...70 °C
Versorgungsspannung	24 V DC

#### 4.4.7.3 Durchflussmesser FIC-03

Der Durchflussmesser FIC-03 ist ein Schwebekörper-Durchflussmesser zur Anzeige und Einstellung des Druckluftstromes. Das Modell RGC1061 des Herstellers Rota-Yokogawa ist gleich aufgebaut wie der Durchflussmesser in der Zulaufleitung (FIC-01, siehe Abschnitt 4.4.7.1) und funktioniert nach demselben Prinzip, ist aber auf das Durchflussmedium Luft kalibriert.

Auch hier lässt sich der gewünschte Durchfluss einstellen, der Messbereich reicht von 4 bis 40 l/h. Technische Daten dieses Messgerätes sind in nachfolgender Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Technische Daten des Schwebekörper-Durchflussmessers RGC1061 der Firma Rota-Yokogawa

Rota-Yokogawa RGC1061	
Typ	Schwebekörper-Durchflussmesser mit Stellventil
Messbereich	4...40 l/h
Messgenauigkeit	6 %
Werkstoff Schwebekörper	Glas
Werkstoff Prozessanschluss	PP
Werkstoff Armatur	PP
Werkstoff Dichtung	NBR
Prozessanschluss	NPT ¼"
Messrohrlänge	75 mm
Druckverlust	10 mbar
Max. Druck	16 bar
Max. Temperatur	80 °C

#### 4.4.7.4 Füllstandsensor LRC-01

Für die Messung des Füllstandes des Hauptbeckens (LRC-01) wird ein elektronischer Füllstandsensor der Firma ifk electronic verwendet. Das eingesetzte Modell LR3000 arbeitet nach dem Prinzip der geführten Mikrowelle. Ein Sensorkopf sitzt über der Wasseroberfläche und emittiert elektromagnetische Impulse. Diese werden entlang eines senkrechten, in das Wasser ragenden Sondenstabes geführt. Treffen sie auf den Wasserspiegel, werden sie reflektiert und zum Sensorkopf zurückgeführt. Die Zeitdauer zwischen Senden und Empfangen des Impulses ist ein Maß für die zurückgelegte Strecke und somit für den Füllstand im Becken. Die technischen Eigenschaften des Sensors sind in Tabelle 24 dargestellt.

Vorteil dieses Füllstandssensors ist das Fehlen bewegter Teile und die Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzung. Das im Wasser enthaltene Öl könnte bei Sensoren mit an Leitstangen geführten Schwimmern zu Problemen führen, bei längerem Betrieb könnte der Schwimmer durch Anlagerungen an der Leitstange behindert werden.

Tabelle 24: Technische Daten des Füllstandsensors LR3000 der Fa. ifk electronic

ifk LR3000	
Messprinzip	Geführte Mikrowelle
Werkstoffe medienberührt	Edelstahl 1.4305, PTFE, FPM
Temperaturbereich Medium	0...80 °C
Signalausgang	4...20 mA
Versorgungsspannung	18...30 V DC

#### 4.4.7.5 Druckmesser PRS-01

Die transmembrane Druckdifferenz wird mit einem Druckmessumformer A-10 der Firma Wika überwacht. Dieser Differenzdruckmesser (PRS-01), abgebildet in Abbildung 39, funktioniert nach dem piezoresistiven Messprinzip: eine Edelstahlmembran verformt sich in Folge der Druckwirkung und überträgt die Auslenkung aus der Ruheposition auf eine Siliziummembran. Diese zweite, vom zu messenden Medium abgeschirmte Membran, ist mit Dehnmessstreifen ausgestattet, deren elektrische Widerstände sich bei Verformung ändern. Ein durch elektrische Hilfsenergie zur Verfügung gestelltes elektrisches Messsignal ist abhängig von der Größe der Widerstände und der Betrag des Signals deshalb proportional zum wirkenden Druck. Das Messsignal wird umgeformt und als standardisiertes 4...20 mA-Stromsignal ausgegeben.



Abbildung 39: Druckmessumformer A-10 der Fa. Wika

Der Messumformer misst Relativdrücke, der Messbereich reicht von -1 bis 3 bar. Negative Werte bedeuten Unterdruck, wie er im Filtrationsbetrieb herrscht, positive Werte entsprechen Überdruck, welcher im *Backwash*-Betrieb wirkt. 3 bar reichen als Messbereichsendwert aus, da dies auch der maximale Druck ist, welchen die Keramikmembranen erlauben. Tabelle 25 zeigt die technischen Daten des Messgeräts.

Tabelle 25: Technische Daten des Messumformers A-10 der Fa. Wika

<b>Wika A-10</b>	
Typ	Piezoresistiver Sensor
Messbereich	-1...3 bar
Messgenauigkeit	0,5 %
Werkstoff medienberührt	Edelstahl 1.4404
Werkstoff Dichtung	NBR
Prozessanschluss	G ¼"-Außengewinde
Signalausgang	4...20 mA
Stromversorgung	8...30 V DC
Max. Druck	8 bar

#### 4.4.7.6 Temperaturmesser TI-01 und TI-02

Die Temperaturen im Hauptbecken und im Reinigungslösungstank werden mit einem beliebigen verfügbaren Handmessgerät überwacht.

#### 4.4.7.7 pH-Messer QI-01

Der pH-Wert im Hauptbecken wird mit einem beliebigen verfügbaren Handmessgerät überwacht.

## 4.4.8 Armaturen und Rohrleitungen

### 4.4.8.1 Rohrleitungen

Die Rohrleitungen für Wasser sind V4A-Edelstahlrohre mit einem Außendurchmesser von 12 mm und einer Wandstärke 1,5 mm, der Innendurchmesser beträgt 9 mm. Die geschätzte benötigte Gesamtlänge der Verrohrung beträgt 10 m, am Markt verfügbar sind die Rohre in Längen à 6 m. Eigenschaften der Rohrleitung sind in Tabelle 26 dargestellt.

Bei den geplanten Durchflussmengen von 100 l/h im Filtrationsbetrieb und 300 l/h im *Backwash*-Betrieb ergeben sich Fließgeschwindigkeiten von 0,44 m/s bzw. 1,31 m/s.

Tabelle 26: Eigenschaften der Rohrleitung

Außendurchmesser	12 mm
Innendurchmesser	9 mm
Wandstärke	1,5 mm
Gesamtlänge (geschätzt)	10 m
Material	Edelstahl 1.4404
Fließgeschwindigkeit bei Filtration	0,44 m/s
Fließgeschwindigkeit bei <i>Backwash</i>	1,31 m/s

### 4.4.8.2 Verbindungstechnik

Zur Verbindung der Rohrleitungen und Komponenten werden Schneidringverschraubungen des Herstellers Schwer Fittings eingesetzt. Schneidringverschraubungen erlauben eine formschlüssige und für hohe Drücke geeignete Fixierung eines Rohres an ein Verbindungsstück (Fitting). In der Anlage werden drei verschiedene Typen von Verbindungsstücken verbaut: Einschraubverschraubungen, Aufschraubverschraubungen und Anschweißverschraubungen. Die Verbindungsstücke besitzen auf der einen Seite die Schneidringverschraubung zur Fixierung der Rohrleitung und auf der anderen Seite ein Innen- oder Außengewinde bzw. eine Anschweißfläche zur Verbindung mit Armaturen, Messgeräten, Pumpen oder Behältern (siehe Abbildung 40). Die Fittings sind aus Edelstahl 1.4571 gefertigt.

Der ursprüngliche Plan, alle Gewindeverschraubungen im System als NPT-Gewinde auszuführen, konnte nicht durchgeführt werden. In Deutschland, wo die Anlage gefertigt wird, sind viele Komponenten nicht oder nur in Verbindung mit deutlichen Mehrkosten mit NPT-Gewinde erhältlich. Allerdings sind die genormten Schneidringverschraubungen auf der ganzen Welt mit Gewinden verschiedener Gewindenormen verfügbar, so dass der Verzicht auf NPT-Gewinde auch beim Einsatz in den USA zu keinen Problemen führt. Im Bedarfsfall können auch dort Schneidringverschraubungen mit anderen Gewindenormen als NPT besorgt werden.



Abbildung 40: Fittings des Herstellers Schwer Fittings: (a) Einschraubverschraubung, (b) Aufschraubverschraubung, (c) Anschweißverschraubung

Tabelle 40 im Anhang zeigt alle benötigten Verbindungselemente und die Art der Anschlüsse.

#### 4.4.8.3 Druckluftschläuche

Die Versorgung der Anlage mit Druckluft wird mit Schläuchen und Schlauchverbindungen der Firma Festo realisiert. Festo liefert standardisierte Schlauchgrößen und dazu passende Steckverbindungen, die sich mit einem Handgriff zusammenstecken und lösen lassen (siehe Abbildung 41). Für die Verbindung von Luftschläuchen mit Armaturen oder Komponenten ohne Festo-Anschluss existieren Steckverschraubungen. Diese besitzen auf einer Seite den Festo-Steckanschluss, auf der anderen Seite ein Gewinde einer bestimmten Gewindenorm und -größe. Der Schlauch besteht aus Polyurethan und hat einen kalibrierten Außendurchmesser von 8 mm. Die Daten des Schlauchs finden sich in Tabelle 27.



Abbildung 41: Luftschlauch und Steckverbindung der Fa. Festo

Das Festo-Schlauchsystem wurde aufgrund der einfachen Montage und flexiblen Erweiterbarkeit gewählt. Die standardisierten Schläuche und Komponenten sind zudem in vielen Ländern der Welt erhältlich, wodurch Veränderungen an der Anlage auch bei Betrieb im Ausland möglich sind.

Tabelle 27: Technische Eigenschaften des Druckluftschlauches

Außendurchmesser	8 mm
Innendurchmesser	5,7 mm
Wandstärke	1,15 mm
Druckbereich (relativ)	-0,95...10 bar
Material	Polyurethan

#### 4.4.8.4 Druckminderer

Um die Diffusorscheiben im Flotationsbetrieb und Filtrationsmembranen beim *Backwash* mit Luft nicht durch zu große Drücke zu beschädigen, muss der Luftdruck auf maximal 3 bar(a) beschränkt werden. Hierfür werden Filterregelventile des Modells MS4-LFR der Firma Festo in die Luftleitungen eingebaut. Diese Ventile verfügen über Filter zur Reinigung der Druckluft und einen Druckminderer. Über einen Drehknopf kann der gewünschte Maximaldruck eingestellt werden. Anfallendes Kondensat wird in einem Kunststoffbehälter gesammelt und kann manuell entleert werden. Die nachfolgende Tabelle 28 zeigt die Eigenschaften der Filterregelventile.

Tabelle 28: Technische Eigenschaften der Filterregelventile

Festo MS4-LFR	
Druckregelbereich	0,5...4 bar
Filterfeinheit	5 µm

#### 4.4.8.5 Handventile

Die benötigten Handventile werden bei Schwer Fittings bezogen. Je nach Verfügbarkeit wurden diese mit Gewindeanschluss oder Schneidringanschluss bestellt. Die verwendeten Materialien sind Edelstahl 1.4408 oder 1.4571.

#### 4.4.8.6 Gesteuertes Ventil

Um die automatische Entleerung des Hauptbeckens zu ermöglichen, und da das Entleerungsventil V-11 an einer schwer erreichbaren Stelle unterhalb des Beckens angeordnet ist, wurde dieses als gesteuertes Magnetventil ausgeführt. Eingesetzt wird hierfür das Zwei-Wege-Ventil D132 der Firma Sirai. Das Ventil ist direktgesteuert, benötigt also keinen Mindestbetriebsdruck für die Schaltfunktion, und ist im stromlosen Zustand geschlossen. Die technischen Daten des Ventils sind in Tabelle 29 gezeigt.

Auswahlkriterien für dieses Ventil waren die Korrosionsbeständigkeit des Fertigungsmaterials, genügend großer Durchgang für eine rasche Entleerung des Beckens und Flexibilität hinsichtlich der Einbaurichtung. All diese Kriterien werden vom Magnetventil D132 erfüllt.

Tabelle 29: Technische Eigenschaften des Entleerungsventils

<b>Sirai D132</b>	
Durchgang	9 mm
Gehäusematerial medienberührt	PPS
Dichtungsmaterial	FKM
Stromversorgung	24 V DC
Max. Druck	2 bar
Temperaturbereich Medium	-10...80 °C

#### 4.4.9 Elektrischer Schaltschrank

Der Schaltschrank wurde bei der Firma Georg Kluge Mess- und Regeltechnik GmbH in Auftrag gegeben. Im Schaltschrank laufen die elektrischen Leitungen zusammen, Sicherungen, Frequenzumrichter und SPS sind darin untergebracht. An der Außentür sind das Bedienpanel der SPS, der Hauptschalter für die Anlage, ein Not-Aus-Schalter und drei Kontrollleuchten angebracht. Die Kontrollleuchten zeigen die Funktion bzw. Aktivität folgender Dinge an: Stromversorgung, Permeatpumpe und Heizkörper. Im Anhang ist der Stromlaufplan der Gesamtanlage eingefügt, Tabelle 30 zeigt die Abmessungen des Schaltschranks.

Tabelle 30: Abmessungen des Schaltschranks

Breite	60 cm
Tiefe	30 cm
Höhe	80 cm

## 4.5 Auslegungsberechnungen

Auslegungsgrundlage für die Maße des Haupttanks bilden der Platzbedarf der keramischen Diffusorscheiben und der Filtrationsmembranen. Zusätzlich sind gewisse räumliche Abstände im Becken für einen reibungslosen Verfahrensablauf wichtig. Die gewünschten Betriebsbedingungen bestimmen die nötige Filterfläche der Membranen, diese wiederum die nötige Membranzahl und dadurch die Größe der Membranmodule.

### 4.5.1 Filterfläche

Die Größe der gesamten Filterfläche legt die Anzahl an keramischen Filtrationsmembranen fest. Die notwendige Filterfläche ergibt sich aus dem Volumenstrom des zu behandelnden Wassers und dem Permeatfluss durch die Filtrationsmembranen. Tabelle 31 gibt die Werte an, nach welchen die Anlage dimensioniert wird. Die Größe des Permeatflusses orientiert sich dabei an früheren Versuchen und Erfahrungswerten mit der akvoFloat™-Technologie.

Die Filterfläche ergibt sich als Quotient aus Volumenstrom und Permeatfluss:

$$A_F = \frac{\dot{V}}{J} = 1,33 \text{ m}^2 \quad (13)$$

Tabelle 31: Auslegungsgrößen

Größe	Symbol	Wert
Volumenstrom	$\dot{V}$	100 l/h
Permeatfluss	$J$	75 l/(m <sup>2</sup> ·h)
Filterfläche	$A_F$	1,33 m <sup>2</sup>

### 4.5.2 Modulgröße

Die Filtration soll mit keramischen Membranplatten der Firma Cembrane durchgeführt werden. Die Platten werden zu einem Membranmodul zusammengefasst und dieses ins Hauptbecken getaucht. Zusätzlich soll die Möglichkeit offenbleiben, die Anlage auch mit Membranen der Firma ItN Nanovation zu betreiben. Die Membranen der zwei Hersteller haben unterschiedliche Abmessungen, folglich sind auch die daraus zusammengesetzten Module unterschiedlich groß. Das Hauptbecken wird in seinen Maßen so dimensioniert, dass jedes der beiden Membranmodule darin Platz finden kann. Die benötigte Plattenanzahl wird aus der für den gewünschten Permeatfluss von 75 l/(m<sup>2</sup>·h) nötigen Gesamtfiterfläche (1,33 m<sup>2</sup>) und der Filterfläche der einzelnen Membranplatten berechnet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass jede Membranplatte über zwei filtrationswirksame Seitenflächen verfügt und die Filterfläche somit das Produkt aus Länge, Höhe und dem Faktor 2 beträgt. Zur Vereinfachung der Modulkonstruktion und aus Gründen der Symmetrie wurde jeweils eine gerade Plattenanzahl gewählt, auch wenn im Falle der Cembrane-Membranen die Gesamtfiterfläche der Platten dadurch knapp unter 1,33 m<sup>2</sup> liegt. Die Abmessungen, Filterfläche und nötige

Plattenanzahl der zwei unterschiedlichen Membranmodelle sind in Tabelle 32 dargestellt. Abbildung 42 zeigt die Definition der räumlichen Anordnung der Abmessungen von Haupttank, Membranplatten und Membranmodulen.

Tabelle 32: Abmessungen der Membranplatten

Größe	Einheit	Hersteller	
		Cembrane	ItN Nanovation
Länge	[m]	0,23	0,23
Höhe	[m]	0,14	0,11
Breite	[m]	0,007	0,007
Fläche	[m <sup>2</sup> ]	0,032	0,025
Anzahl	[-]	20	26
Gesamtfläche	[m <sup>2</sup> ]	1,288	1,316

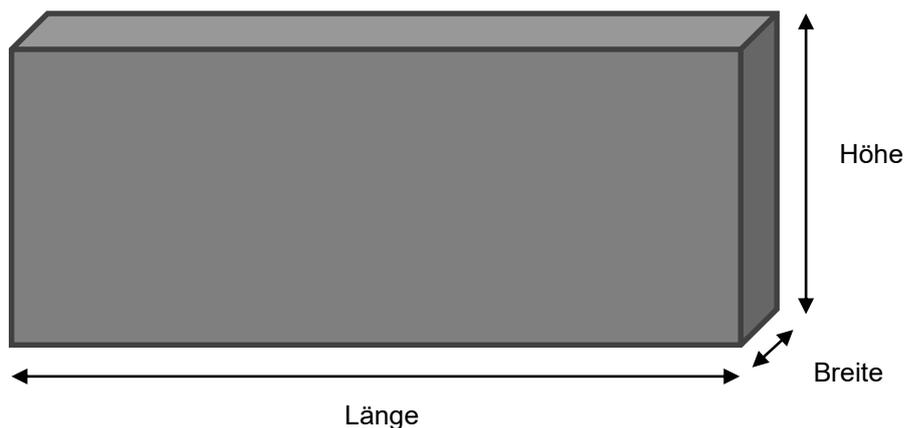


Abbildung 42: Definition der räumlichen Ausdehnung von Haupttank, Membranplatten und Membranmodulen

Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus und der unterschiedlichen Anschlussweise der Membranplatten der beiden Hersteller unterscheidet sich auch die Konstruktionsweise der Module. Um das Becken so platzsparend und kompakt wie möglich zu gestalten und den Platz optimal auszunützen, werden jeweils zwei Module mit jeweils der halben Gesamtplattenanzahl übereinander positioniert. Beim Einsatz der Cembrane-Membranen werden somit 2 Module à 10 Platten, bei ItN-Nanovation-Membranen 2 Module à 13 Platten benötigt. Die Anordnung der Einzelplatten in den Modulen ist in Abbildung 43 schematisch dargestellt.

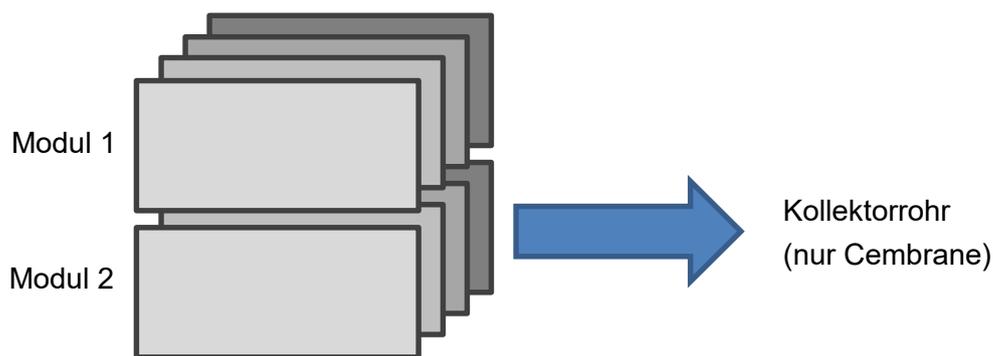


Abbildung 43: Schema der Anordnung der Membranplatte

Jede einzelne Cembrane-Membranplatte ist in einen Rahmen eingefasst, Membranplatten samt Rahmen werden zu einem Modul zusammengestellt. Ein Kollektorrohr sammelt das Permeat und führt es ab, dieses Kollektorrohr befindet sich an einer jener Seiten des Moduls, an der die Breitseiten der Einzelplatten zu liegen kommen (siehe Abbildung 43).

Bezogen auf die Abmessungen der Einzelplatte vergrößern der Rahmen und die Modulkonstruktion die Längsseite um 4 cm und die Höhe um 3 cm. Das Kollektorrohr führt zu einer zusätzlichen Verlängerung der Längsseite um 5 cm. Die Breite der Module wird durch die Breite der Membranplatten und den Abstand dieser untereinander festgelegt. Für den Abstand der Platten zueinander wurde 1 cm gewählt.

Die Module aus ItN-Nanovation-Membranen benötigen kein Kollektorrohr, das Permeat wird über einen gemeinsamen Rahmen über die Einzelplatten abgezogen. In Bezug auf die Maße der Einzelplatten führt dieser Rahmen zu einer Vergrößerung der Länge um 10 cm und der Höhe um 6 cm. Die Modulbreite wird analog zu den Cembrane-Modulen durch die Breite der Einzelplatten und deren Abstand zueinander (ebenfalls 1 cm) definiert. Der Rahmen vergrößert die Breite an den beiden Außenseiten um jeweils 3 cm.

Tabelle 33 zeigt die Abmessungen der Module. Diese Abmessungen ergeben sich für Cembrane-Module aus Plattengröße, Einzelrahmen und Kollektorrohr, bei ItN-Nanovation-Modulen aus Plattengröße und gemeinsamem Rahmen. Damit die Filtration mit jedem der beiden Module betrieben werden kann, werden die jeweils größten Abmessungen für Länge, Breite und Höhe der beiden Module (in Tabelle 33 blau hervorgehoben) für die Beckenauslegung herangezogen.

Tabelle 33: Abmessungen der Membranmodule.

Größe	Einheit	Hersteller	
		Cembrane	ItN Nanovation
Länge	[m]	0,32	0,33
Höhe	[m]	0,17	0,17
Breite	[m]	0,16	0,27

### 4.5.3 Beckengröße

Ein senkrechttes Leitblech unterteilt das Becken in zwei Kompartiments, den Flotationsteil und den Filtrationsteil. Das Leitblech ist mit dem Beckenboden und auf beiden Seiten mit der Beckenwand verbunden und erlaubt den Wasserübertritt von einem in das andere Kompartiment nur nahe der Wasseroberfläche, über die Oberkante des Leitblechs. Am oberen Ende ist das Blech in Richtung des Filtrationsteils geknickt und bildet eine kurze Schräge (siehe Abbildung 44). Durch das Leitblech werden Kurzschlussströmungen im Becken verhindert. Die notwendige Größe von Flotationsteil und Filtrationsteil wird separat berechnet und davon ausgehend der Haupttank dimensioniert. Aus früheren Versuchen und Pilotanlagen sind verschiedene Auslegungskriterien und einzuhaltende räumliche Abstände zwischen Komponenten bekannt, welche einen effizienten Verfahrensablauf garantieren. Diese sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Auslegungsgrößen und Abstände

Abstand Membranmodul-Beckenwand (jede Seite)	5 cm
Abstand Diffusorscheibe-Beckenwand	5 cm
Freiraum für Membranbelüftung	5 cm
Flüssigkeitshöhe über Filtermembranen	15 cm
Flotationshöhe	25 cm
Zusätzliche Beckenhöhe (Sicherheit gegen Überlaufen)	9 cm
Länge Skimmer	12 cm
Längsausdehnung des Leitblechs (schräger Teil)	5 cm

#### 4.5.3.1 Flotationsteil

Die Breite des Flotationsteils ist nicht entscheidend, der Flotationsbetrieb lässt sich über die Anzahl an Diffusorscheiben an die Beckenbreite anpassen. Das Becken und somit auch der Flotationsteil werden aus diesem Grunde so breit wie der Filtrationsteil ausgeführt. Die Länge des Flotationsteils ist die Summe aus dem Durchmesser der Diffusorscheiben (15 cm) und jeweils 5 cm Abstand zu Beckenwand und Leitblech. Die für den Flotationsteil erforderliche Beckenhöhe ergibt sich aus dem Scheibendurchmesser, einem Abstand der Scheiben zum Beckenboden von 5 cm und einer Flotationshöhe (Abstand zwischen Diffusorscheiben und

Wasserspiegel) von mindestens 25 cm. Dazu kommt als Sicherheit gegen Überlaufen des Beckens ein Abstand zwischen Wasserspiegel und Beckenoberkante von 9 cm. Die so berechnete nötige Höhe für den Flotationsteil ist geringer als jene für den Filtrationsteil (siehe Abschnitt 4.5.3.2), das Becken wird darum so hoch ausgeführt, wie es die Filtration erfordert.

#### 4.5.3.2 Filtrationsteil

Länge und Breite des Filtrationsteils ergeben sich aus der größten Modullänge bzw. -breite und dem auf jeder Seite gewünschten Abstand von 5 cm zwischen Modul und Beckenwand. Für die Höhe wird die doppelte Höhe der Membranmodule herangezogen, da zwei Module übereinandergestapelt werden. Zusätzlich dazu wird ein Abstand vom Beckenboden zum Modul von 5 cm eingeplant, um im Bedarfsfall eine Belüftung der Membranen nachrüsten zu können. Der Wasserspiegel soll 15 cm über dem oberen Modul liegen. Als Sicherheit gegen Überlaufen werden auch hier zusätzlich 9 cm Freiraum zwischen Wasserspiegel und Oberkante des Beckens eingeplant. Die berechnete nötige Höhe für den Filtrationsteil ist größer als jene für den Flotationsteil, die gesamte Beckenhöhe ist deshalb so groß wie die Höhe des Filtrationsteils.

#### 4.5.3.3 Gesamtgröße

Die Länge des gesamten Beckens ist die Summe der Längen von Flotations- und Filtrationsteil, sowie des auf die Horizontale projizierten Platzbedarfs des schrägen Abschnitts des Leitblechs. Breite und Höhe des Beckens sind so groß wie die jeweils größere Breite bzw. Höhe der beiden Kompartiments. Der Überlauf (Skimmer), über welchen das Öl an der Oberfläche abläuft, liegt an der Breitseite des Beckens über den Filtrationsmembranen, gegenüber dem Einlauf. Der Skimmer ist ein quaderförmiger Ablauf, welcher sich über die gesamte Breitseite des Beckens erstreckt. Der Skimmer ist 20 cm hoch und die Kante, über welche das Wasser in den Skimmer läuft, liegt 9 cm unterhalb der Beckenoberkante. Die Abmessungen des Hauptbeckens und der beiden Kompartiments sind in Tabelle 35 dargestellt.

Abbildung 44 zeigt ein dreidimensionales Modell des Haupttanks. Im Flotationsteil sind die Diffusorscheiben, im Filtrationsteil zwei übereinanderliegende Membranmodule dargestellt, dazwischen liegt das Leitblech.

Tabelle 35: Abmessungen des Beckens und der Kompartiments

Größe	Einheit	Flotationsteil	Filtrationsteil	Gesamtes Becken
Länge	[m]	0,25	0,43	0,73
Länge inkl. Skimmer	[m]	-	-	0,85
Breite	[m]	0,37	0,37	0,37
Höhe	[m]	0,54	0,63	0,63

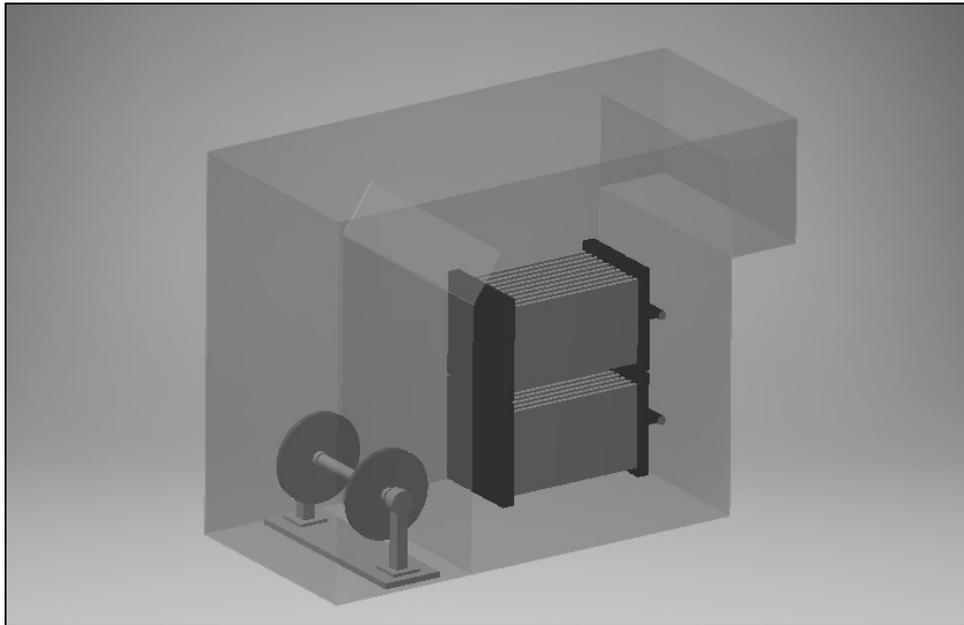


Abbildung 44: 3D-Modell des Haupttanks mit Diffusorscheiben und zwei übereinanderliegenden Membranmodulen

## 4.6 Anlagensteuerung

Die Betriebssteuerung der Anlage wird mit Hilfe einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) realisiert. Zum Einsatz kommt das Modell SIMATIC S7-1200 der Firma Siemens. Die SPS und deren technische Eigenschaften sind in Abschnitt 0 beschrieben.

### 4.6.1 Betriebsmodi

Die Anlage kann in manuellem oder automatisiertem Betrieb gefahren werden. In ersterem sind keine automatischen Regelungen und Steuerungen aktiv, die Komponenten werden händisch ein- oder ausgeschaltet und es werden keine Alarmer ausgegeben. Die SPS regelt drei Hauptfunktionen des Betriebsablaufes:

- Automatischer *Backwash*
- Pumpenregelung
- Alarmer

Diese drei Funktionen sind im manuellen Modus deaktiviert, sie können nach Bedarf zugeschaltet werden. Sind alle drei aktiviert, ist der automatische Modus erreicht. Auch wenn alle Hauptfunktionen aktiviert sind und die Anlage im automatisierten Betrieb läuft, erlaubt die SPS, die Anlagenkomponenten direkt anzusteuern und deren automatische Steuerung zu umgehen. Auf diese Weise besteht die Möglichkeit, die Anlage in manuellem, teil-automatischem oder vollautomatischem Betrieb zu fahren und so bestimmte Funktionen zu testen und auf verschiedene Bedingungen einzugehen.

### 4.6.2 Hauptfunktionen

Nachfolgend werden die drei Hauptfunktionen der Steuerung beschrieben. Sind alle drei aktiv, läuft der Anlagenbetrieb vollständig automatisiert. Ein Organigramm zur Veranschaulichung der Hauptfunktionen ist in Abbildung 53 im Anhang dargestellt.

#### 4.6.2.1 Automatischer *Backwash*

Es existieren zwei Kriterien, nach welchen ein automatischer *Backwash* eingeleitet werden kann: abhängig von der Zeit oder vom TMP. Unabhängig davon kann jederzeit manuell ein *Backwash* ausgeführt werden.

1. **Zeit:** Die Rückspülung der Filtrationsmembranen wird in bestimmten Zeitintervallen ausgelöst. Die Zeitintervalle können selbst gewählt werden.
2. **Transmembrandruck:** Der *Backwash* wird eingeleitet, sobald ein bestimmter TMP überschritten wird. Der erlaubte Maximalwert für die Druckdifferenz kann selbst gewählt werden.

Es besteht auch die Möglichkeit, diese Kriterien zu kombinieren. Der *Backwash* wird dann entweder nach einer bestimmten Zeit durchgeführt oder wenn der maximale TMP erreicht wird.

### 4.6.2.2 Pumpenregelung

Bei aktiver Pumpenregelung steuert die SPS über den Frequenzumrichter die Drehzahl der Permeatpumpe sowie die Aktivität der Zulaufpumpe. Die Pumpenregelung erlaubt zwei Einstellungsmöglichkeiten: das Fördern eines konstanten Permeatvolumenstroms oder das Halten eines konstanten Flüssigkeitspegels im Hauptbecken.

1. **Konstanter Volumenstrom:** Die Permeatpumpe wird so geregelt, dass sie einen konstanten Volumenstrom an Permeat fördert. Der Volumenstrom wird vom Durchflussmesser FRC-02 gemessen. Im Hauptbecken wird der Flüssigkeitspegel vom Füllstandsensoren LRC-01 überwacht. Übersteigt der Pegel einen bestimmten Maximalwert, wird die Zulaufpumpe abgeschaltet; fällt der Pegel unter einen bestimmten Minimalwert, wird die Zulaufpumpe aktiviert. Der Füllstand pendelt somit zwischen zwei Werten. Gewünschter Maximal- und Minimalfüllstand können frei gewählt und eingegeben werden.
2. **Konstanter Flüssigkeitslevel:** In diesem Modus läuft die Zulaufpumpe konstant, gegebenenfalls muss sie händisch über den Schwebekörper-Durchflussmesser FIC-01 eingedrosselt werden. Der Füllstandsensoren LRC-01 misst den Pegel im Becken und übermittelt den Wert an die SPS, diese regelt den von der Permeatpumpe geförderten Volumenstrom über den Frequenzumrichter so, dass der Pegel konstant bleibt.

### 4.6.2.3 Alarmer

Im Falle unerwünschter Betriebszustände werden zur Warnung Alarmer ausgegeben. Diese werden angezeigt, bevor die programmierten Sicherheitsmaßnahmen aktiviert werden und die Notabschaltung der Anlage eintritt (siehe Abschnitt 4.6.4). Warnalarmer werden ausgelöst, um auf folgende Sicherheitsrisiken hinzuweisen:

- **Überlaufen des Beckens:** Das Überlaufen des Hauptbeckens droht. Dieser Alarm wird aktiviert, bevor der Wasserpegel die Oberkante des Beckens erreicht und deswegen die Notabschaltung der Anlage eintritt.
- **Verblockung:** Weist auf eine eventuelle Verstopfung oder Verblockung der Filtermembranen und/oder Rohrleitungen hin. Dies äußert sich dadurch, dass der TMP ungewöhnlich hohe Werte erreicht. Der Alarm wird aktiv, sobald ein TMP von 0,7 bar überschritten wird.
- **Niedriger Wasserpegel:** Der Wasserpegel im Becken sinkt soweit ab, dass eine Freilegung der Membranfilter droht. Dies würde dazu führen, dass die Permeatpumpe Luft durch die Membranen saugt, wodurch diese beschädigt werden könnte. Der Alarm wird ausgelöst, bevor der Wasserspiegel die Membranen erreicht und die Anlage deshalb automatisch abgeschaltet wird.

### 4.6.3 Nebenfunktionen

Zu den Nebenfunktionen, die bei Bedarf aktiviert werden können, zählen die Datenspeicherung und die Entleerung des Hauptbeckens. Die Nebenfunktionen sind als Organigramm in Abbildung 53 im Anhang dargestellt.

#### 4.6.3.1 Datenspeicherung

Wenn die Datenspeicherung aktiviert ist, zeichnet die SPS alle fünf Sekunden von den nachfolgenden Messwerten einen Wert auf:

- Datum und Uhrzeit
- Flüssigkeitslevel im Haupttank (LRC-01)
- TMP (PRS-01)
- Ausgegebene Frequenz des Frequenzumrichters (SIRC-01)
- Drehrichtung des Frequenzumrichters (SIRC-01)
- Permeatvolumenstrom (FRC-02)
- Zustand der Zulaufpumpe (P-01): ein/aus
- Zustand der Entleerungspumpe (P-05): ein/aus

#### 4.6.3.2 Entleerung

Die Entleerungsfunktion dient dazu, Wasser aus dem Hauptbecken ablaufen zu lassen. Das automatisch gesteuerte Magnetventil V-11 und die Entleerungspumpe P-05 sind gekoppelt, sie werden immer gleichzeitig angesteuert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Entleerungspumpe nicht trockenläuft. Bei der Entleerung wird Ventil V-11 geöffnet und die Entleerungspumpe aktiviert.

Drei Einstellungen der Entleerungsfunktion sind möglich:

1. **Manuelle Entleerung:** Diese Funktion wird verwendet, um das Hauptbecken vollständig leerlaufen zu lassen. Auf diese Weise können neben Wasser auch sich am Boden des Beckens sammelnde Sedimente ausgetragen werden. Da der Levelsensor LRC-01 das vollständige Leerlaufen des Beckens nicht detektieren kann, muss der Entleerungsvorgang nach vollständiger Entleerung manuell beendet werden.
2. **Entleerung bei *Backwash*:** Mit dieser Funktion lässt sich verhindern, dass während eines *Backwash* der Flüssigkeitspegel im Becken zu stark ansteigt. Ist die Funktion aktiviert, wird während des *Backwash* Wasser aus dem Becken gepumpt. Die Zeitdauer der Entleerung und der Zeitpunkt während des *Backwash*, wann die Entleerung ausgeführt wird, können selbst gewählt werden.
3. **Sicherheitsentleerung:** Ist die Sicherheitsentleerung aktiviert, wird das Becken entleert, bevor der Wasserpegel die Beckenoberkante erreicht. Der Pegelstand, bei welchem diese Entleerung durchgeführt wird, kann selbst definiert werden. Bevor die

Sicherheitsentleerung aktiv wird, wird ein Alarmsignal ausgegeben (siehe Abschnitt 4.6.2.3).

#### 4.6.4 Sicherheitsfunktionen

Die SPS verfügt über mehrere Sicherheitsfunktionen, die ausgelöst werden, wenn bestimmte kritische Betriebswerte für z. B. Druck oder Füllstand erreicht, über- oder unterschritten werden. Die Anlage wird vollständig abgeschaltet und alle Geräte deaktiviert, sobald eine der Bedingungen eintritt. Ziel ist, Beschädigungen an der Anlage zu verhindern und Tanks vor dem Überlaufen zu schützen. Folgende Sicherheitsmechanismen sind programmiert und führen zur Notabschaltung:

- **Überlaufschutz des Haupttanks.** Bedingung: Der Füllstand im Haupttank erreicht einen bestimmten Wert (1 cm unter der Beckenoberkante). Weiterlaufender Betrieb könnte zum Überlaufen des Beckens führen.
- **Trockenlaufschutz der Permeatpumpe.** Bedingung: Der Füllstand im Haupttank sinkt so weit ab, dass er die Filtrationsmembranen erreicht. Bei weiterem Absinken des Füllstandes würde die Permeatpumpe Luft ansaugen und könnte dadurch Schaden nehmen.
- **Schutz bei Verblockung.** Bedingung: Der TMP steigt auf über 0,9 bar an. Das Erreichen ungewöhnlich großer Werte für den TMP deutet auf eine Verblockung oder Verstopfung von Filtrationsmembranen und/oder Rohrleitungen hin.
- **Versorgungsschutz der Permeatpumpe.** Bedingung: Der Durchflussmesser nach der Permeatpumpe (FRC-02) registriert über die Dauer von 20 Sekunden trotz aktiver Permeatpumpe keinen Durchfluss. Keine Flüssigkeitsförderung trotz aktiver Permeatpumpe kann ein Leck in der Leitung, niedrigen Füllstand des Haupttanks oder eine Verblockung von Filtrationsmembranen und/oder Leitungen als Ursache haben.

#### 4.6.5 Einstellungen

Neben den Haupt- und Nebenfunktionen können verschiedene weitere Einstellungen getroffen und Abläufe festgelegt werden.

##### 4.6.5.1 *Backwash*

Für den *Backwash* kann die Dauer und der Volumenstrom definiert werden. Letzterer wird über die Drehzahl der Permeatpumpe eingestellt.

##### 4.6.5.2 Heizung

Das Heizelement H-01 kann bei Bedarf manuell zugeschaltet werden.

##### 4.6.5.3 Flockungsmittelpumpe

Wenn eine Flockung vor der Flotation ablaufen soll, kann die Flockungsmittelpumpe manuell aktiviert werden. Die Fördermenge wird direkt an der Pumpe eingestellt.

#### 4.6.5.4 Luftversorgung

Der Luftkompressor und der Motor für die Rotation der Flotationsscheiben sind dauerhaft aktiviert. Der Kompressor läuft allerdings nicht durchgehend, wenn er in Betrieb ist, sondern arbeitet so, dass er den Druck im Druckbehälter ständig über einem bestimmten Wert hält. Erst wenn dieser am Kompressor einstellbare Druckwert unterschritten wird, springt der Kompressor an und füllt den Druckbehälter wieder auf.

#### 4.6.5.5 Schaltpunkte des Levelsensors

Die Aktivität verschiedener Betriebsmodi, die Ausgabe von Alarmen und das Eintreten der Notabschaltung hängt in mehreren Fällen vom Wasserpegel im Hauptbecken ab. Die nachfolgende Tabelle 36 zeigt die vom Wasserpegel abhängigen Schaltpunkte und die dadurch ausgelösten Aktivitäten. Die Höhe des Wasserspiegels, bei welchem ein bestimmter Schaltpunkt ausgelöst wird, kann über die SPS eingestellt und an den gewünschten Betriebsablauf angepasst werden. Das Becken hat eine Gesamthöhe von 63 cm, der Überlauf zum Skimmer liegt auf einer Höhe von 54 cm über dem Beckenboden.

Tabelle 36: Schaltpunkte des Levelsensors

Aufgabe	Position	Höhe Wasserpegel über Beckenboden
Überlaufschutz	1 cm unter Oberkante	62 cm
Sicherheitsentleerung	3 cm unter Oberkante	60 cm
Alarm vor Überlauf	4 cm unter Oberkante	59 cm
Pumpenregelung: P-01 aus	Bei Skimmer	54 cm
Betriebslevel	0,5 cm unter Skimmer	53,5 cm
Pumpenregelung: P-01 an	2 cm unter Skimmer	52 cm
Alarm bei Trockenlaufgefahr	3 cm über Filtermembranen	37 cm
Trockenlaufschutz	Oberkante der Filtermembranen	34 cm

## 4.7 3D-Planung

Die Pilotanlage soll zur Erleichterung des Transports möglichst kompakt gebaut werden und der Grundriss nicht größer sein als eine Europalpalette (1,2 x 0,8 m).

Um die Anordnung der verschiedenen Komponenten und die Strömungsführung planen zu können, wurden zuerst von allen Anlagenteilen dreidimensionale Modelle konstruiert. Verwendet wurde hierfür das Computerprogramm Autodesk AutoCAD 2015. Mit deren Anordnung und Positionierung auf der vorgegebenen Grundfläche wurde so lange experimentiert, bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht wurde, d. h. möglichst kurze Fließwege zwischen den Komponenten und möglichst kurze Rohrleitungen sowie optimale Platzausnutzung.

Um alle Komponenten auf der vorgegebenen Grundfläche unterzubringen, mussten diese auf zwei übereinanderliegenden Ebenen verteilt werden. Auf einem Metallrahmen wurden zwei PVC-Platten als Bodenflächen dieser Ebenen befestigt, der senkrechte Abstand zwischen den Ebenen beträgt 75 cm. Auf der unteren Ebene liegen der Zulauf und die Zulaufpumpe, das Heizelement, der Luftkompressor und die Behälter für Permeat, Reinigungslösung, Flockungsmittel und *Waste*. Auf der oberen Ebene, die leichter einsehbar und erreichbar ist, wurden jene Komponenten angeordnet, die häufig bedient und/oder kontrolliert werden. Das Hauptbecken, Permeat- und Flockungsmittelpumpe sowie der Schaltschrank mit integriertem Bedienpanel sind hier angeordnet.

Die folgenden Abbildungen Abbildung 45, Abbildung 46 und Abbildung 47 zeigen Renderings des mit Autodesk AutoCAD erstellten 3D-Modells.

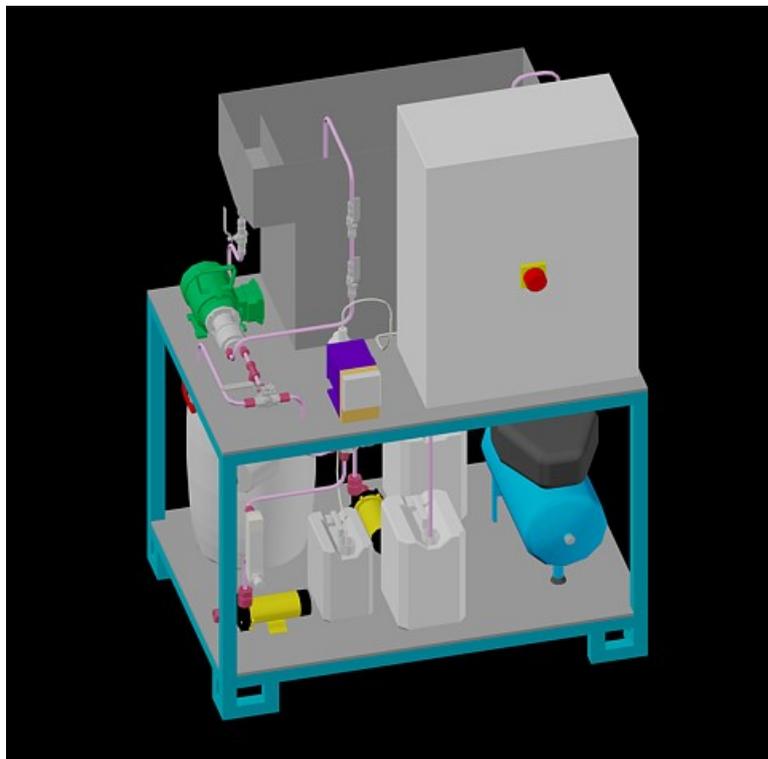


Abbildung 45: CAD-Modell der Anlage

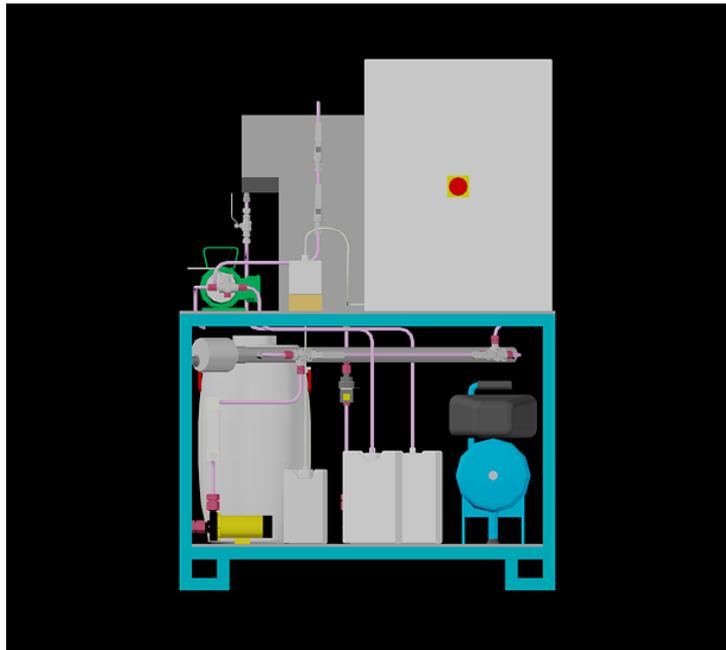


Abbildung 46: CAD-Modell der Anlage

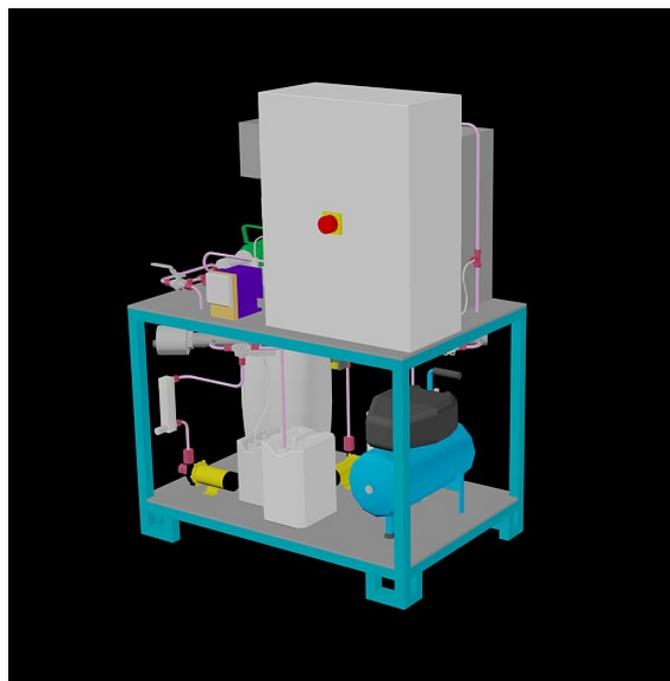


Abbildung 47: CAD-Modell der Anlage

## 5 Ausblick

Nach der Auslegung, Planung und Bestellung der nötigen Komponenten, wird die Pilotanlage in der firmeneigenen Werkstatt von akvola Technologies gefertigt. Bei Bau und Montage können Unvorhersehbarkeiten und Schwierigkeiten auftreten, mit denen im Vorfeld nicht gerechnet wurde und deren Auftauchen trotz durchgeführter 3D-Planung nicht ausgeschlossen werden kann. Hierzu zählen beispielsweise die schwierige Erreichbarkeit von Armaturen oder Bedienfeldern, die sich erst offenbart, wenn die Anlage in Originalgröße betrachtet wird. Trotz sorgfältig durchgeführter Planung kann aus diesem Grunde nicht ausgeschlossen werden, dass beim Aufbau der Anlage in bestimmten Bereichen vom Plan abgewichen werden muss. Für sicheren Transport werden die Anlagenteile und Rohrleitungen fest am Rahmen fixiert. Die Befestigungen sind nicht Teil der 3D-Planung und können im Zuge der Montage der Anlage ebenfalls zu Abweichungen der Komponentenanordnung und Leitungsführung zwingen.

Der letzte Schritt im Aufbau ist die elektrische Verkabelung der Komponenten. Diese wird von dazu gesetzlich befugten Personen vorgenommen. In Abbildung 48 ist die betriebsfertige Anlage zu sehen.

Nach der vollständigen Montage und Verkabelung wird die Anlage im Labor getestet. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Programmierung der SPS. Bei der Erstellung von Ablaufprogrammen und Anlagenbetriebsweisen an der SPS können diese während der Programmierung simuliert werden, bestimmte Betriebsparameter müssen der SPS hierfür zur Verfügung gestellt werden. Labortests sind nötig, um sicherzustellen, dass die zuvor simulierten Abläufe im realen Betrieb korrekt umgesetzt werden.

Erfahrungsgemäß liefern die erstmalige Inbetriebnahme und die ersten Testläufe oft Erkenntnisse darüber, was am Betriebsablauf verbessert werden kann. Die Programmierung der Steuerung, Bedienung und der Kriterien für Alarmmeldungen kann überarbeitet werden und an die Anforderungen und Gegebenheiten des realen Betriebs angepasst werden.

Nachdem die Testläufe im Labor zur Zufriedenheit abgeschlossen wurden, kann die Anlage an den gewünschten Einsatzort geschickt werden. Die Abmessungen des tragenden Rahmens in Größe einer genormten Europoolpalette erleichtern den Transport, da der internationale Güter- und Warenverkehr u. a. auf diese Transporteinheit ausgerichtet ist.

Neben dem ursprünglich vorgesehenen Betriebsort in Texas, USA, existieren mehrere andere potentielle Einsatzorte, darunter Ölförderstätten in Deutschland, den Niederlanden, dem Vereinigten Königreich und dem Oman. Die vorhandene Wasserqualität, die Menge enthaltenen Öls im Wasser und andere Umgebungsbedingungen beeinflussen die Wahl des Einsatzortes. Durch eine Reihe von Versuchen mit unterschiedlichen Wassertypen kann die Leistung des akvoFloat™-Verfahrens sowie dessen Stärken und mögliche Schwächen am besten analysiert werden. An jedem Standort wird die Anlage für mehrere Wochen unter verschiedenen Bedingungen betrieben, dabei Daten gesammelt und Permeatproben genommen.

Die einfache Ausführung der Pilotanlage und der automatisierte Betriebsablauf erleichtern die Handhabung und Steuerung und sorgen dafür, dass der Betrieb nicht dauerhaft von einer

Person überwacht werden muss. Der unkomplizierte Aufbau der Programme der SPS und deren möglichst intuitive Bedienung sollen ermöglichen, dass auch nicht mit der Anlage vertraute Personen die Anlage nach einer kurzen Einführung bedienen können.

Die Versuchsreihen und Testläufe unter unterschiedlichen Bedingungen und an verschiedenen Standorten und die dabei aufgezeichneten Betriebsdaten und genommenen Wasser- und Permeatproben werden anschließend an die Versuche analysiert und ausgewertet. Anhand dieser Daten können eventuell notwendige Anpassungen oder Änderungen im Prozessablauf vorgenommen werden. Die Pilotanlage soll einen wichtigen Beitrag in der Entwicklung der akvoFloat™-Technologie leisten: den Übergang von Versuchen im Labormaßstab zur großindustriellen Einsatzbereitschaft schaffen und die Marktreife des Verfahrens erreichen.



Abbildung 48: Fertiggestellte akvoFloat™-Pilotanlage

## 6 Verzeichnisse

### 6.1 Literatur

- [1] L.K. Wang, N.K. Shammam, W.A. Selke und D.B. Aulenbach (Hrsg.), *Flotation Technology*, 1. Auflage, Totowa, USA: Springer Science+Business Media LLC, 2010.
- [2] M. E. Goldblatt, J. M. Gucciardi, C. M. Huban, Vasconcellos S.R. und W. P. Liao, "New Polyelectrolyte Emulsion Breaker Improves Oily Wastewater Cleanup at Lower Usage Rates", 2014.
- [3] H. Schubert, "Emulsionen - Kunstwerke aus Öl und Wasser", *Spektrum der Wissenschaft*, Nr. 11, S. 128, 1998.
- [4] M. Stewart und K. Arnold, *Emulsions and Oil Treating Equipment: Selection, Sizing and Troubleshooting*, Burlington, Oxford: Gulf Professional Publishing, 2009.
- [5] A. Bahadori, *Waste management in the chemical and petroleum industries*, Chichester, West Sussex, Vereinigtes Königreich: John Wiley & Sons Inc, 2014.
- [6] L.K. Wang, Y.-T. Hung und N.K. Shammam (Hrsg.), *Advanced physicochemical treatment technologies*, Totowa, USA: Humana Press, 2007.
- [7] W. Müller, *Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*, 2. Auflage, Berlin: De Gruyter, 2014.
- [8] F. A. Osamor und R. C. Ahlert, *Oil/Water Separation: State of the Art*, 1978.
- [9] Tecniplant. [Online] Verfügbar unter: <http://www.tecniplant.it/wp-content/uploads/2014/11/API-Schema.jpg>. Zuletzt geprüft am 4.10.2015.
- [10] M. Hussein, A. A. Amer und Elsayed K.H, "Coagulation and Dissolved Air Flotation for Treatment of Oil-Water Emulsion", *International Journal of Engineering Sciences*, Nr. 12, S. 120-129, 2014.
- [11] T. Frankiewicz, "Understanding the Fundamentals of Water Treatment, the Dirty Dozen - 12 Common Causes of Poor Water Quality" in *11th Annual Produced Water Seminar*, 2001.
- [12] T. E. Schultz, "Get the Most out of API Separators", *Chemical Engineering*, S. 38-42, 2005.
- [13] International Maritime Organization, *Comprehensive manual on port reception facilities*, 2. Auflage, London, 1999.
- [14] T. Schultz, Vortrag: "Industrial Oily Wastewater Pretreatment", 29.11.2005.
- [15] F. Berné und J. Cordonnier, *Industrial Water Treatment: Refining, Petrochemicals and Gas Processing Techniques*, Houston: Gulf Publishing Company, 1995.
- [16] D. J. Flynn, *The Nalco water handbook*, 3. Auflage, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [17] Siemens AG, *Corrugated Plate Separator (CPS) For Oil/Solids Removal*. [Online] Verfügbar unter: [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/industries-utilities/oil-gas/portfolio/water-solution/corrugated\\_plate\\_separator\\_%28CPS%29\\_en.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/industries-utilities/oil-gas/portfolio/water-solution/corrugated_plate_separator_%28CPS%29_en.pdf). Zuletzt geprüft am 22.6.2015.
- [18] W. Hemming und W. Wagner, *Verfahrenstechnik*, 9. Auflage, Würzburg: Vogel, 2004.
- [19] YiXing Huading Food Machine Co,Ltd, *Solid-wall separators*. [Online] Verfügbar unter: <http://huading-separator.com/products/separators/solid-wall-separators.shtml>. Zuletzt geprüft am 25.10.2015.

- [20] M. Miedek, T. Fislage und J. R. Flaata, Vortrag: "Disk stack centrifuge technology for the oil-water separation of heavy crude oil emulsions"
- [21] Flottweg, *3-phase-separator*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.flottweg.com/product-lines/separator/3-phase-separator/>. Zuletzt geprüft am 25.10.2015.
- [22] M. Stewart und K. Arnold, *Produced Water Treatment Field Manual*, 1. Auflage, s.l.: Elsevier professional, 2011.
- [23] Prosep, *Hydrocyclone*. [Online] Verfügbar unter: <http://prosep.com/solutions/water/primary-separation/hydrocyclone/>. Zuletzt geprüft am 2.10.2015.
- [24] A. M. Haugnes Vikan, "A study of the effect of pumps and desanding cyclones on oil droplets in produced water" Masterarbeit, Universitetet i Stavanger, Stavanger, 2009.
- [25] K. Simms, K. Kok und A. Zaidi, "Alternative Processes for the Removal of Oil from Oilfield Brines" in *Proceedings of the First International Symposium on Oil and Gas Exploration and Production Waste Management Practices*, 1990, S. 17-30.
- [26] W. Bischof, *Abwassertechnik*, 11. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1998.
- [27] R. Moosai und R. A. Dawe, "Gas attachment of oil droplets for gas flotation for oily wastewater cleanup", *Separation and Purification Tech.*, Vol. 303-314, Nr. 33, 2003.
- [28] H. Richter, "Die Flotation - ein geeignetes Verfahren zur Aufbereitung öl- und fetthaltiger Abwässer", *Fette - Seifen - Anstrichmittel*, Vol. 83, Nr. 1, S. 10-17, 1981.
- [29] Srinivasan A, Viraraghavan, T, "Dissolved Air Flotation in Industrial Wastewater Treatment" in *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, S. 111-127.
- [30] J. C. Crittenden, *Water treatment: Principles and design*, 2. Auflage, Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2005.
- [31] G. Rohlich, "Application of Air Flotation to Refinery Waste Waters", *Industrial And Engineering Chemistry*, Nr. 46, S. 304-308, 1954.
- [32] A. A. Al-Shamrani, A. James und H. Xiao, "Separation of oil from water by dissolved air flotation", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Nr. 209, S. 15-26, 2002.
- [33] M. Kilner, *Advanced on-line instrumentation helps DAF systems lower costs*, 2013.
- [34] M. Dehghani, H. Sadatjo, H. Maleknia und N. Shamsedini, "A Survey on the Removal Efficiency of Fat, Oil and Grease in Shiraz Municipal Wastewater Treatment Plant", *Jentashapir J Health Res*, Vol. 5, Nr. 6, 2014.
- [35] Ish Grewal, *Mineral Processing Introduction*. [Online] Verfügbar unter: <http://met-solvelabs.com/library/articles/mineral-processing-introduction>. Zuletzt geprüft am 15.11.2015.
- [36] B. Knox-Holmes, 2000, "Oil and Water Separation" in *Encyclopedia of separation science*, I. D. Wilson, Ed, Amsterdam: Elsevier Science, S. 1548-1556.
- [37] AES Environmental & Process Engineering, *Induced Air/Gas Flotation Separator (IGF)*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.aesarabia.com/induced-airgas-flotation-separator-igf/>. Zuletzt geprüft am 25.9.2015.
- [38] Rubio, J, Souza M.L. und R. W. Smith, "Overview of flotation as a wastewater treatment technique", *Minerals Engineering*, Nr. 15, S. 139-155, 2002.
- [39] M. Colic, W. Morse und J. D. Miller, "The development and application of centrifugal flotation systems in wastewater treatment", *IJEP*, Vol. 30, Nr. 2, S. 296-312, 2007.

- [40] H<sub>2</sub>Oil & Gas, *Produced Water Treatment*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.h2oilandgas.com/applications/produced-water-treatment/>. Zuletzt geprüft am 15.11.2015.
- [41] P. Painmanakul, P. Sastaravet, S. Lersjintanakarn und S. Khaodhiar, "Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by Induced Air Flotation (IAF) process", *Chemical Engineering Research And Design*, Nr. 88, S. 693-702, 2010.
- [42] R. Roofthoof *et al*, "Wastewater Effluents", Brüssel, 1997.
- [43] J. Pinnekamp und H. Friedrich (Hrsg.), *Membrantechnik für die Abwasserreinigung*, 2. Auflage, Aachen: FiW-Verl, 2006.
- [44] T. Melin und R. Rautenbach, *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [45] A.B. Koltuniewicz und E. Drioli (Hrsg.), *Membranes in clean technologies: Theory and practice*, Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- [46] R. Rautenbach, *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [47] L.K. Wang (Hrsg.), *Membrane and desalination technologies*, New York: Humana Press, 2011.
- [48] J. Cui, X. Zhang, H. Liu, S. Liu und K. L. Yeung, "Preparation and application of zeolite/ceramic microfiltration membranes for treatment of oil contaminated water", *Journal of Membrane Science*, Nr. 325, S. 420-426, 2008.
- [49] Y. S. Li, L. Yan, C. B. Xiang und L. J. Hong, "Treatment of oily wastewater by organic-inorganic composite tubular ultrafiltration (UF) membranes", *Desalination*, Nr. 196, S. 76-83, 2006.
- [50] Porelogix Ultrafiltration Systems, *Produced Water Treatment*. [Online] Verfügbar unter: <http://porelogix.com/>. Zuletzt geprüft am 14.11.2015.
- [51] J. Ludwig, "Planung und Bau eines Flotations-Filtrations-Versuchsstandes als Meerwasservorbehandlung einer Umkehrosiose-Entsalzungsanlage" Studienarbeit, Fakultät III Prozesswissenschaften, Technische Universität Berlin, Berlin, 2011.
- [52] C. H. Rawlins und A. E. Erickson, "Characterization of deep bed filter media for oil removal from produced water" in *SME Annual Meeting and Exhibit 2010*, S. 78-85.
- [53] M. Howdeshell, C. Felch und E. Lorge, "Walnut Shell Filters: Redesigning for Offshore Use", Saudi Arabien, 2010.
- [54] AI Energy Solutions (AIES), *Nutshell Filters*. [Online] Verfügbar unter: <http://www.aienergysolutions.com/products/produced-water/nutshell-filters/>. Zuletzt geprüft am 29.9.2015.
- [55] Bürkert Fluid Control Systems GmbH & Co. KG, "Beständigkeitstabelle" [Online] Verfügbar unter: [https://www.buerkert.de/de/content/download/9318/335016/version/4/file/DE\\_Bestaendig\\_D.pdf](https://www.buerkert.de/de/content/download/9318/335016/version/4/file/DE_Bestaendig_D.pdf). Zuletzt geprüft am 2.12.2015.
- [56] Kerafol Keramische Folien GmbH, *Aeration*. [Online] Verfügbar unter: [http://www.kerafol.com/fileadmin/user\\_upload/Filterkeramik/produkte/membranscheiben\\_begasung/Datenblatt\\_Membranscheiben\\_zur\\_Begasung\\_EN.pdf](http://www.kerafol.com/fileadmin/user_upload/Filterkeramik/produkte/membranscheiben_begasung/Datenblatt_Membranscheiben_zur_Begasung_EN.pdf). Zuletzt geprüft am 3.12.2015.

## 6.2 Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
A	Fläche
A <sub>F</sub>	Filterfläche
az	Zentrifugalbeschleunigung
AC	<i>alternating current</i> , Wechselstrom
AISI	American Iron and Steel Institute
API	American Petroleum Institute
bar(a)	bar absolut
bzw.	beziehungsweise
C <sub>u</sub>	Umfangsgeschwindigkeit
CE	Celluloseester
CEB	<i>chemically enhanced backwash</i>
CIP	<i>cleaning in place</i>
CPI	<i>corrugated plate interceptor</i>
CR	Chloroprenkautschuk
D	Diffusorscheibe
d	Durchmesser
d <sub>d</sub>	Durchmesser eines dispergierten Teilchens
DAF	<i>dissolved air flotation</i>
DC	<i>direct current</i> , Gleichstrom
DGF	<i>dissolved gas flotation</i>
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
F	Filter
F <sub>A</sub>	Auftriebskraft
F <sub>G</sub>	Gewichtskraft
F <sub>R</sub>	Widerstandskraft
F <sub>Z</sub>	Zentrifugalkraft
FFKM	Perfluorkautschuk
FKM	Fluorkautschuk
G	Erdbeschleunigung
H	Heizung
IAF	induced air flotation
IDF	induced gas flotation
J	Permeatfluss ( <i>flux</i> )
K <sub>Z</sub>	Schleuderzahl
m	Masse
m <sub>d</sub>	Masse eines dispergierten Teilchens
m <sub>w</sub>	Masse von Wasser
M	Motor

min	Minute
n. a.	nicht angegeben
NBR	Nitrilkautschuk
NPT	National Pipe Thread
OW	<i>oily water</i> , ölhaltiges Wasser
PA	Polyamid
PAN	Polyacrylnitril
PE	Polyethylen
PE-HD	hochdichtes Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyethersulfon
ppm	<i>parts per million</i>
PP	Polypropylen
PPI	<i>parallel plate interceptor</i>
PPS	Polyphenylensulfid
PS	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvonylidenfluorid
q	Klärfächenbelastung
r	Radius
SiC	Siliciumcarbid
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
T	Tank
TMP	<i>transmembrane pressure</i> , Transmembrandruck
u. a.	unter anderem
V	Volumen / Ventil
$V_d$	Volumen eines dispergierten Teilchens
$V_w$	Volumen von Wasser
$\dot{V}$	Volumenstrom
$\dot{V}_p$	Permeatvolumenstrom
w	Sink- bzw. Steiggeschwindigkeit
z. B.	zum Beispiel
$\rho$	Dichte
$\rho_d$	Dichte eines dispergierten Teilchens
$\rho_w$	Dichte von Wasser
$\eta$	dynamische Viskosität
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
"	Zoll

### 6.3 Tabellen

Tabelle 1: Auftretende Formen von Öl in Wasser .....	3
Tabelle 2: Übersicht über die unterschiedlichen Membranverfahren [43].....	40
Tabelle 3: Übersicht der Verfahren zur Öl-Wasser-Trennung .....	54
Tabelle 4: Abkürzungen im Verfahrensfliessbild .....	61
Tabelle 5: Übersicht der Anlagenkomponenten .....	62
Tabelle 6: Medien im Betrieb .....	62
Tabelle 7: Beständigkeit von Kunststoffen [55] .....	64
Tabelle 8: Beständigkeit metallischer Werkstoffe [55].....	65
Tabelle 9: Maße und Eigenschaften des Hauptbeckens .....	67
Tabelle 10: Eigenschaften der Tanks .....	67
Tabelle 11: Technische Daten der Membranscheibe der Firma Kerafol.....	69
Tabelle 12: Technische Daten der Rotationsdichtung.....	70
Tabelle 13: Technische Daten der Membranplatten der Firma Cembrane .....	70
Tabelle 14: Technische Daten der Pumpe Verdermag V-MD-20C-H der Fa. Verder .....	72
Tabelle 15: Technische Daten der Rollenpumpe R-NNVF8 der Fa. Zuwa .....	74
Tabelle 16: Technische Daten des Frequenzumrichters .....	74
Tabelle 17: Technische Daten der Flockungsmittelpumpe.....	75
Tabelle 18: Technische Daten des Kompressors Güde 225/08/24 .....	77
Tabelle 19: Technische Daten der SPS.....	78
Tabelle 20: Technische Daten des Einschraubheizkörpers der Fa. Siekerkotte.....	80
Tabelle 21: Technische Daten des Schwebekörper-Durchflussmessers RAGK42 der Firma Rota-Yokogawa.....	82
Tabelle 22: Technische Daten des Durchflussmessers der Fa. Profimess.....	83
Tabelle 23: Technische Daten des Schwebekörper-Durchflussmessers RGC1061 der Firma Rota-Yokogawa.....	84
Tabelle 24: Technische Daten des Füllstandsensors LR3000 der Fa. ifk electronic.....	85
Tabelle 25: Technische Daten des Messumformers A-10 der Fa. Wika.....	86
Tabelle 26: Eigenschaften der Rohrleitung .....	87
Tabelle 27: Technische Eigenschaften des Druckluftschlauches .....	89
Tabelle 28: Technische Eigenschaften der Filterregelventile .....	89

Tabelle 29: Technische Eigenschaften des Entleerungsventils.....	90
Tabelle 30: Abmessungen des Schaltschranks .....	91
Tabelle 31: Auslegungsgrößen.....	92
Tabelle 32: Abmessungen der Membranplatten .....	93
Tabelle 33: Abmessungen der Membranmodule. ....	95
Tabelle 34: Auslegungsgrößen und Abstände .....	95
Tabelle 35: Abmessungen des Beckens und der Kompartiments .....	96

## 6.4 Abbildungen

Abbildung 1: Kräftegleichgewicht an einem sedimentierenden oder aufschwimmenden Teilchen .....	10
Abbildung 2: API-Abscheider [9].....	12
Abbildung 3: Funktionsweise eines Plattenseparators [4].....	15
Abbildung 4: PPI-Abscheider [4].....	17
Abbildung 5: Querschnitt der gewellten Platteneinbauten [4].....	18
Abbildung 6: CPI-Separator in <i>downflow</i> -Ausführung [16].....	19
Abbildung 7: Kräftegleichgewicht eines Teilchens im Fliehkraftfeld .....	20
Abbildung 8: Umfangsgeschwindigkeit $c_u(r)$ in Abhängigkeit vom Drehradius und räumliche Ausrichtung der Teilchen bei Rotations- und Potentialströmung [7].....	22
Abbildung 9: Tellerzentrifuge: (a) Querschnittsskizze, (b) realistische Zeichnung der Fa. Huading Separator [19].....	24
Abbildung 10: Schema eines Drei-Phasen-Separators der Fa. Flottweg [21].....	25
Abbildung 11: Strömungsverlauf im Hydrozyklon.....	26
Abbildung 12: Hydrozyklonbatterie in gemeinsamem Druckbehälter. [22] .....	27
Abbildung 13: Schritte der Tröpfchen-Blasen-Komplexbildung [27] .....	29
Abbildung 14: DAF/DGF im Vollstromverfahren .....	32
Abbildung 15: DAF/DGF im Teilstromverfahren.....	33
Abbildung 16: DAF/DGF im Recyclingstromverfahren. ....	34
Abbildung 17: Impeller-IAF [35] .....	36
Abbildung 18: Vierstufige IAF-Anlage zur Aufbereitung von Lagerstättenwasser [40].....	37
Abbildung 19: TMP und Porenweite bzw. Größe abgeschiedener Partikel bzw. Moleküle für Membranverfahren und Filtration [44].....	41
Abbildung 20: Abfall des Permeatflusses über die Zeit [43] .....	43
Abbildung 21: (a) Dead-End-Filtration, (b) Cross-Flow-Filtration [43].....	44
Abbildung 22: Filtrationsintervalle beim Dead-End-Betrieb bei (a) konstantem Permeatfluss und (b) konstantem Transmembrandruck. [44].....	45
Abbildung 23: Aufbau von symmetrischer und asymmetrischer Membran [44] .....	47
Abbildung 24: Filter mit granulären Medien im <i>downflow</i> -Betrieb der Fa. CE Natco [4].....	50
Abbildung 25: akvoFloat™-Einheit .....	52
Abbildung 26: Verfahrensfliessbild .....	60

Abbildung 27: Keramische Diffusorscheiben der Fa. Kerafol [56] .....	68
Abbildung 28: Rotationsdichtung des Herstellers Haag + Zeissler .....	69
Abbildung 29: Kreiselpumpe Verder Verdermag V-MD-20C-H .....	71
Abbildung 30: Kennlinie der Kreiselpumpe Verder Verdermag V-MD-20C-H .....	72
Abbildung 31: Rollenpumpe R-NNVF8 der Fa. Zuwa, (a) mit Antriebsmotor, (b) im Querschnitt .....	73
Abbildung 32: Kennlinien der Permeatpumpe bei verschiedenen Drehzahlen. ....	73
Abbildung 33: Flockungsmittelpumpe ProMinent gamma/ L GALa 1602 .....	75
Abbildung 34: Luftkompressor Güde 225/08/24 .....	76
Abbildung 35: Mantelrohr für den Einschraubheizkörper .....	79
Abbildung 36: Skizze des Einschraubheizkörpers der Fa. Siekerkotte .....	79
Abbildung 37: Schwebekörper-Durchflussmesser der Firma Rota-Yokogawa .....	81
Abbildung 38: Kalorimetrischer Strömungswächter der Fa. Profimess .....	83
Abbildung 39: Druckmessumformer A-10 der Fa. Wika .....	85
Abbildung 40: Fittings des Herstellers Schwer Fittings: (a) Einschraubverschraubung, (b) Aufschraubverschraubung, (c) Anschweißverschraubung .....	88
Abbildung 41: Luftschlauch und Steckverbindung der Fa. Festo .....	88
Abbildung 42: Definition der räumlichen Ausdehnung von Haupttank, Membranplatten und Membranmodulen .....	93
Abbildung 43: Schema der Anordnung der Membranplatten zu Modulen .....	94
Abbildung 44: 3D-Modell des Haupttanks mit Diffusorscheiben und zwei übereinander- liegenden Membranmodulen .....	97
Abbildung 45: CAD-Modell der Anlage .....	103
Abbildung 46: CAD-Modell der Anlage .....	104
Abbildung 47: CAD-Modell der Anlage .....	104
Abbildung 48: Fertiggestellte akvoFloat™-Pilotanlage .....	106

# Anhang

## Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
Abbildung 49: Verfahrensfließbild für Filtrationsbetrieb.....	I
Abbildung 50: Verfahrensfließbild für <i>Backwash</i> mit Permeat.....	II
Abbildung 51: Verfahrensfließbild für <i>Backwash</i> mit Reinigungslösung .....	III
Abbildung 52: Verfahrensfließbild für <i>Backwash</i> mit Luft .....	IV
Tabelle 37: Equipmentliste .....	V
Tabelle 38: EMSR-Liste (Elektrische Mess-, Steuer- und Regeltechnik).....	VII
Tabelle 39: Elektrische Leistung und elektrische Signale der Komponenten .....	IX
Tabelle 40: Anschlussliste .....	X
Abbildung 53: Organigramm der Hauptfunktionen der Prozesssteuerung .....	XI
Abbildung 54: Organigramm der Nebenfunktionen der Prozesssteuerung.....	XII
Abbildung 55: Stromlaufplan.....	XIII
Anhangverzeichnis .....	XXIII

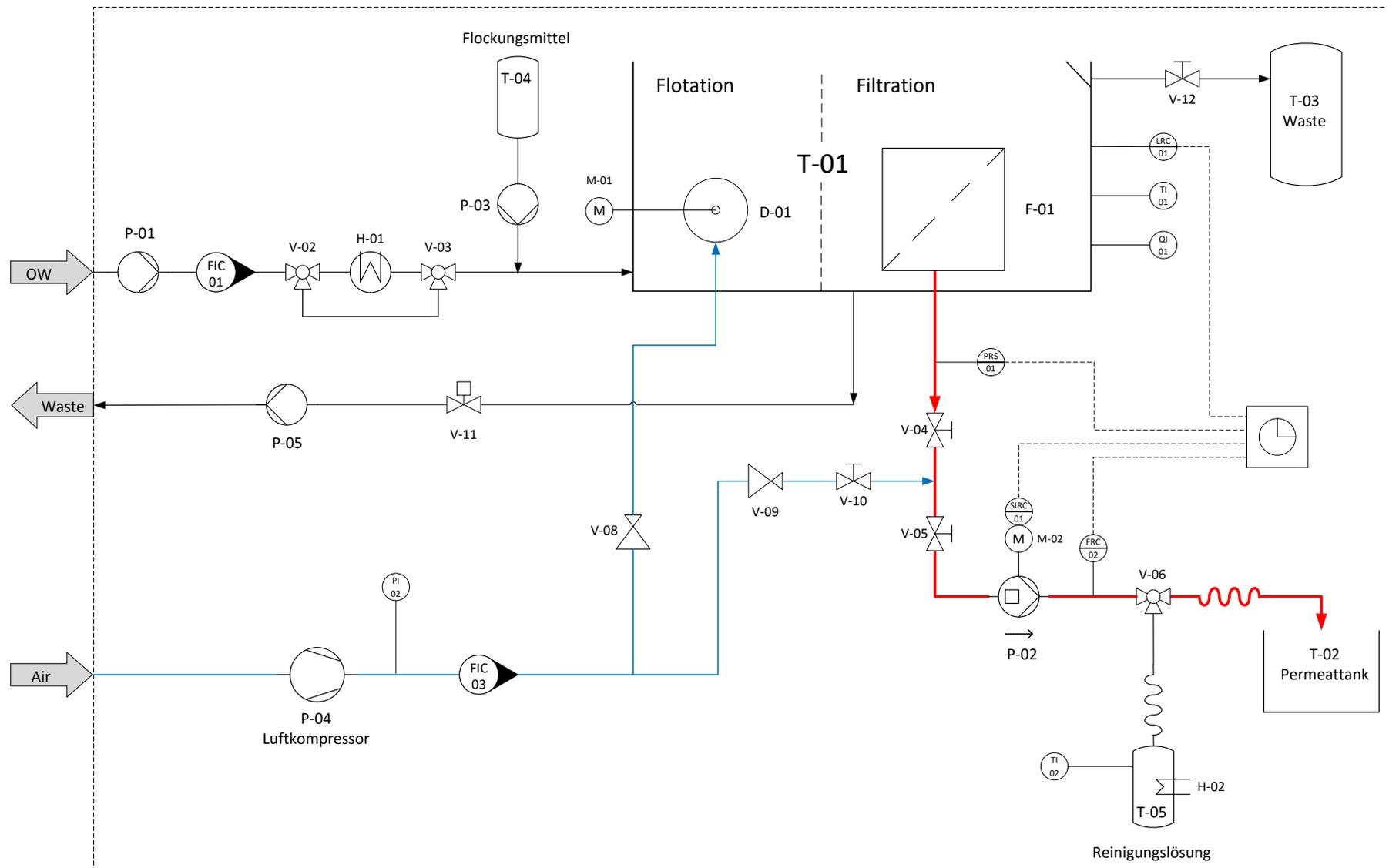


Abbildung 49: Verfahrensfließbild für Filtrationsbetrieb

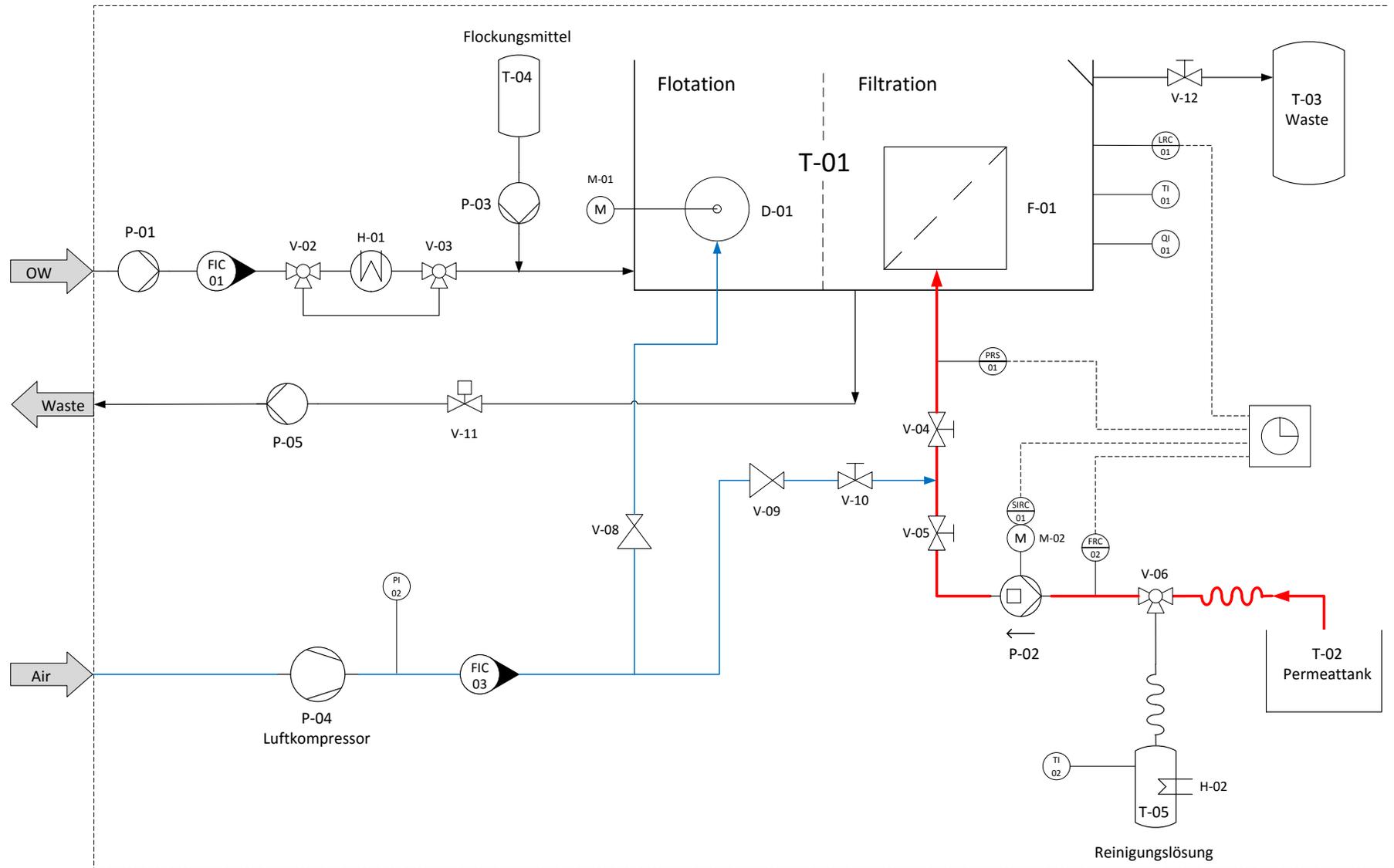
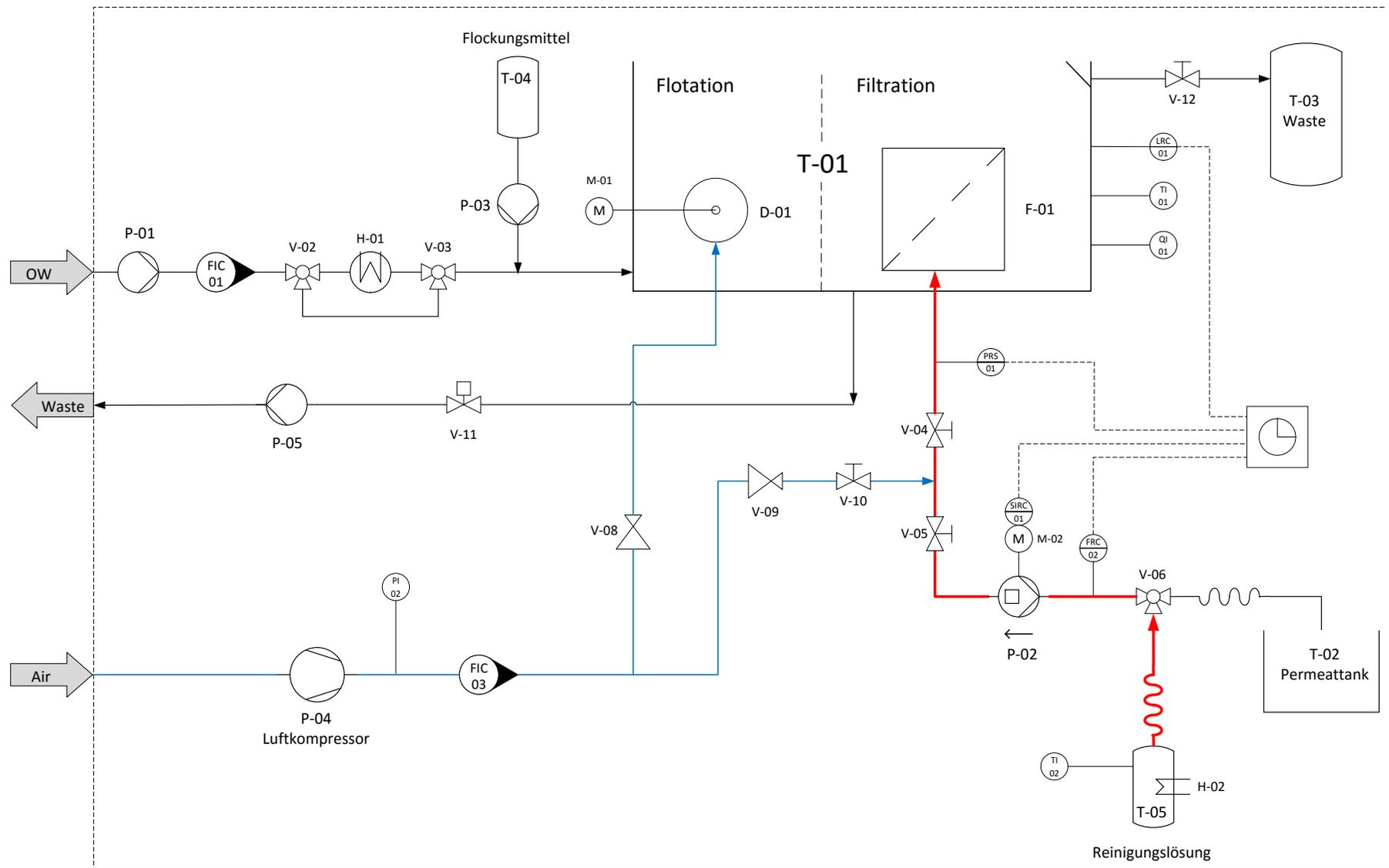


Abbildung 50: Verfahrensfließbild für *Backwash* mit Permeat

Abbildung 51: Verfahrensfließbild für *Backwash* mit Reinigungslösung

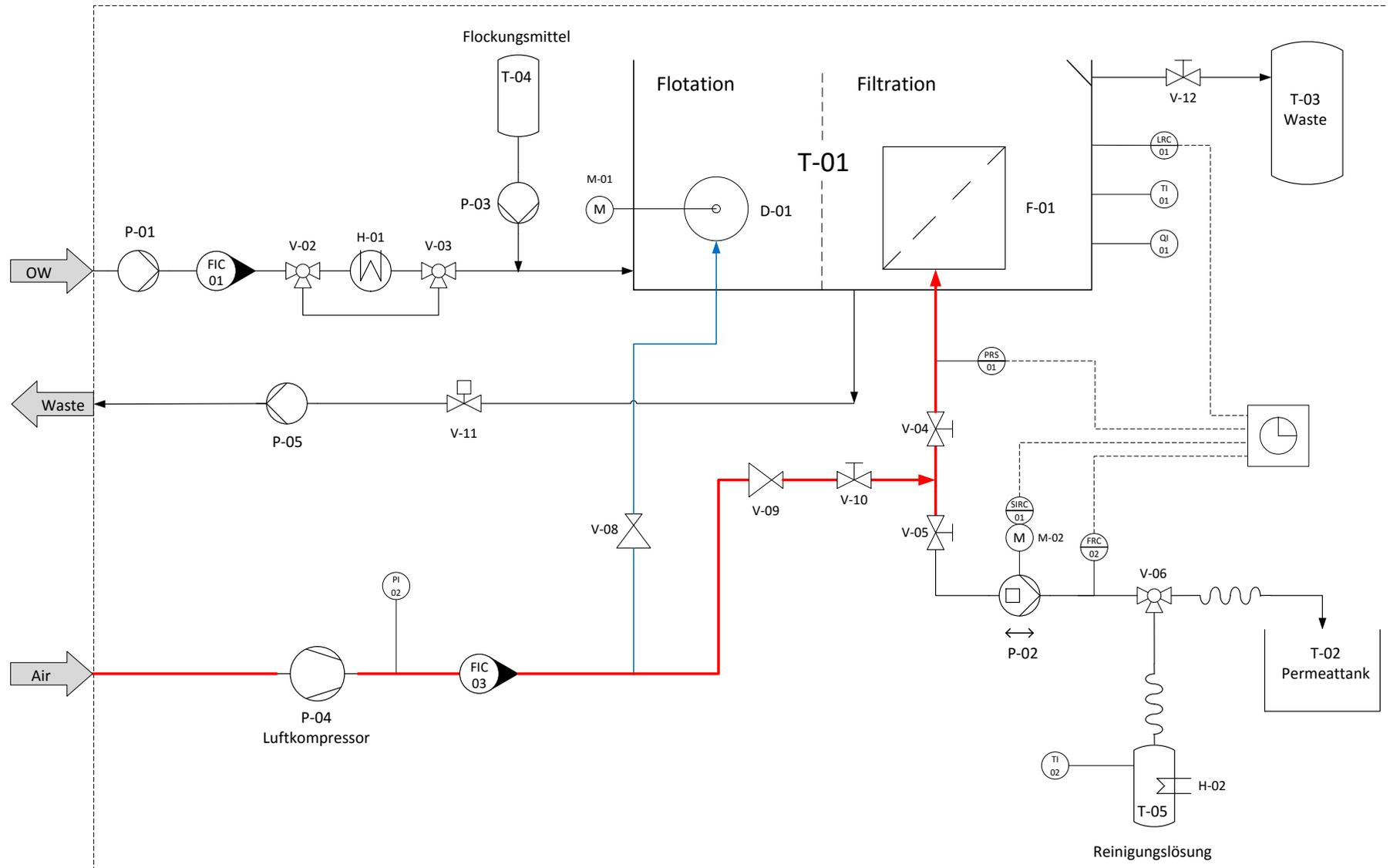
Abbildung 52: Verfahrensfließbild für *Backwash* mit Luft

Tabelle 37: Equipmentliste

Identifikation		Eigenschaften							
Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Typ	Modell	Medium <sup>(1)</sup>	Leistung	Einheit d. Leistung	Material	Elektr. Leistung	Versorgungs- spannung
				[-]			[-]	[W]	[V]
<b>Pumpen</b>									
P-01	Zulaufpumpe	Kreiselpumpe	Verder VMD 20C-T	OW	9,5	[l/min]	PP	5	230 AC
P-02	Permeatpumpe	Rollenpumpe	Zuwa R-NNVF8	CW	18,0	[l/min]	V4A	550	400 AC
P-03	Dosierpumpe Flockungsmittel	Membranpumpe	Magnetdosierpumpe GALa 1602	F	1,4	[l/h]		17	230 AC
P-04	Luftkompressor	Kolbenkompressor	Güde 225/08/24	A	130,0	[l/min]		1100	230 AC
P-05	Entleerungspumpe	Kreiselpumpe	Verder VMD 20C-T	OW	9,5	[l/min]	PP	5	230 AC
<b>Ventile</b>									
V-01	Drosselventil Zulaufpumpe	Schwebekörper-Durchflussmesser, händisch	Rota-Yokogawa RAGK42	OW	-		PP	-	-
V-02	Drei-Wege-Ventil vor Erhitzer	Kugelhahn, händisch	Schwer A-3BVG38FL-8i	OW			1.4408	-	-
V-03	Drei-Wege-Ventil nach Erhitzer	Kugelhahn, händisch	Schwer A-3BVG38FL-8i	OW			1.4408	-	-
V-04	Absperrung Permeat-/Luftleitung	Kugelhahn, händisch	Schwer A-BV2D12L	CW / CS			1.4408	-	-
V-05	Absperrung Permeatleitung	Kugelhahn, händisch	Schwer A-BV2D12L	CW / CS			1.4408	-	-
V-06	Drei-Wege-Ventil Reinigungslsg./Permeat	Kugelhahn, händisch	Schwer A-3BVG38FL-8i	CW / CS			1.4408	-	-
V-07	Drosselventil Luftversorgung	Schwebekörper-Durchflussmesser, händisch	Rota-Yokogawa RGC1064	A	-		PP	-	-
V-08	Druckminderer Flotation	Filter-Regelventil	Festo MS4-LFR-1/4-D5-C-R-M	A				-	-
V-09	Druckminderer Luft-Backwash	Filter-Regelventil	Festo MS4-LFR-1/4-D5-C-R-M	A				-	-
V-10	Absperrventil Luftleitung	Kugelhahn, händisch	Schwer A-BVEG14-8i	A			1.4408	-	-
V-11	Absperrventil Entleerung	Magnetventil	Sirai D132	OW			PPS	13	24 DC
V-12	Absperrventil Waste	Kugelhahn, händisch		O			1.4408	-	-
<b>Tanks und Behälter</b>									
T-01	Flotation- und Filtration	Edelstahltank		OW	94	[l]	1.4404	-	
T-02	Permeat	Kunststofftank		CW	50	[l]	PE	-	
T-03	Waste	Kunststofftank		O	30	[l]	PE	-	
T-04	Flockungsmittel	Kunststofftank		F	10	[l]	PE	-	
T-05	Reinigungslösung	Kunststofftank		CS	30	[l]	PE	-	
<b>Sonstige</b>									
D-01	Diffusorscheiben	Keramikscheiben	Kerafol 152	A / OW			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
F-01	Filtrationsmembranen	Keramikplatten	Cembrane / ItN Nanovation	OW / CW			SiC		
H-01	Erhitzer	Einschraubheizkörper	Siekerkotte SEHK	OW	3300	[W]	1.4571	3300	230 AC
H-02	Erhitzer	Tauchsieder		CS					
M-01	Motor	Laborrührwerk zur Rotation der Flotationsscheiben		-		[W]			
M-02	Motor	Motor der Permeatpumpe		-		[W]			

## Equipmentliste (Fortsetzung)

Identifikation		Betrieb																
Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Betriebstemp. Medium	Design Temp.	Volumenstrom min.		Volumenstrom nom.		Volumenstrom max.		Druck min.		Druck nom.		Druck max.		Dichte	Dynamische Viskosität	pH
		[°C]	[°C]	[l/h]	[l/min]	[l/h]	[l/min]	[l/h]	[l/min]	[bar(g)]	[m]	[bar(g)]	[m]	[bar(g)]	[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mPa·s]	[-]
<b>Pumpen</b>																		
P-01	Zulaufpumpe	40	60	0	0	100	1,67	100	1,67	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
P-02	Permeatpumpe	40	60	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	3,00	29,5	1050	1	
P-03	Dosierpumpe Flockungsmittel	25	45	0	0	?	?	?	?	0	0	0,05	0,5	0,06	0,6	?	0,02	
P-04	Luftkompressor	25		10	0,17	10	0,17	30	0,50	1	-	6	-	8	-	1,2	0,02	
P-05	Entleerungspumpe	40	60	0	0	0	0,00	420	7,00	0,10	0,1	0,01	0,1	0,02	0,2	1050	1	
<b>Ventile</b>																		
V-01	Drosselventil Zulaufpumpe	40	60	0	0	100	1,67	420	7,00	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	-
V-02	Drei-Wege-Ventil vor Erhitzer	40	200	0	0	100	1,67	420	7,00	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
V-03	Drei-Wege-Ventil nach Erhitzer	40	200	0	0	100	1,67	420	7,00	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
V-04	Absperrung Permeat-/Luftleitung	40	60	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	3,00	29,5	1050	1	
V-05	Absperrung Permeatleitung	40	60	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	3,00	29,5	1050	1	
V-06	Drei-Wege-Ventil Reinigungslsg./Permeat	40	200	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	2,00	19,6	1050	1	
V-07	Drosselventil Luftversorgung	25	60	0	0	10	0,17	30	0,50	1	-	6	-	8	-	1,2	0,02	-
V-08	Druckminderer Flotation	25	60	0	0	10	0,17	10	0,17	1	-	6	-	8	-	1,2	0,02	
V-09	Druckminderer Luft-Backwash	25	60	0	0	0	0,00	30	0,50	1	-	6	-	8	-	1,2	0,02	
V-10	Absperrventil Luftleitung	25	200	0	0	0	0,00	30	0,50	0,01	0,1	0,50	4,9	3,00	29,5	1,2/1050	0,02	
V-11	Absperrventil Entleerung	40	60	0	0	300	5,00	420	7,00	0,01	0,1	0,60	5,9	0,70	6,9	1050	1	
V-12	Absperrventil Waste	40	60	0	0											950		
<b>Tanks und Behälter</b>																		
T-01	Flotation- und Filtration	40	200							0	0,0	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
T-02	Permeat	40	100							0	0,0	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
T-03	Waste	40	100							0	0,0	0,04	0,4	0,04	0,4	950	1	
T-04	Flockungsmittel	25	100							0	0,0	0,04	0,4	0,04	0,4	?	?	
T-05	Reinigungslösung	40	100							0	0,0	0,04	0,4	0,04	0,4	?	?	
<b>Sonstige</b>																		
D-01	Diffusorscheiben	40								0		2	0,0	3	0,0	1	1	
F-01	Filtrationsmembranen	40	80	0	0	100	1,67	300	5,00					3		1050		
H-01	Erhitzer	40	110	0	0	100	1,67	420	7,00	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
H-02	Erhitzer																	
M-01	Motor																	
M-02	Motor																	

Tabelle 38: EMSR-Liste (Elektrische Mess-, Steuer- und Regeltechnik)

Identifikation		Eigenschaften								
Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Typ	Modell	Medium (2)	Signalart	Signalrichtung	Alarm	Material	Versorgungs- spannung	
									[V]	
<b>Druck</b>										
PRS-01	Druckmessung u. Schalter TMP	Druckmessumformer	Wika A-10	CW / A	4...20 mA	Ausgang		1.4404	24	DC
PI-02	Luftdruckmessung nach Kompressor	Manometer	Integriert in Güde-Kompressor	A	-				-	
<b>Durchfluss</b>										
FIC-01	Flowmeter nach Zulaufpumpe	Schwebekörper-Durchflussmesser	Rota-Yokogawa RAGK42	OW	-			PP	-	
FIRC-02	Flowmeter nach u. Steuerung Permeatpumpe	Kalorimetrischer Durchflussmesser	Profimess DT-03	CW	4...20 mA	Ausgang		1.4571	24	DC
FIC-03	Flowmeter nach Luftkompressor	Schwebekörper-Durchflussmesser	Rota-Yokogawa RGC1061	A	-			PP	-	
<b>Füllstand</b>										
LRC-01	Füllstandsensoren Haupttank	Mikrowellensensor	ifm LR 3000	OW	0...10 V / 4...20 mA	Ausgang		V2A	24	DC
<b>Temperatur</b>										
TI-01	Temperaturmessung Haupttank (manuell)	Manuelles Thermometer		OW	-					
TI-02	Temperaturmessung Reinigungslösung (manuell)	Manuelles Thermometer		CS	-					
<b>Qualität</b>										
QI-01	pH-Messung Haupttank (manuell)	Manuelles pH-Meter		OW	-					
<b>Drehzahl</b>										
SIRC-01	Frequenzumrichter Permeatpumpe	Elektronischer Frequenzumrichter	Siemens Sinamics V20	-	4...20 mA	Eingang			230	AC

## EMSR-Liste (Fortsetzung)

Identifikation		Betriebsparameter																
Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Betriebs- temp. Medium	Design temp.	Volumenstrom min.		Volumenstrom nom.		Volumenstrom max.		Druck min.		Druck nom.		Druck max.		Dichte	Dyn. Viskosität	pH
				[°C]	[°C]	[l/h]	[l/min]	[l/h]	[l/min]	[l/h]	[l/min]	[bar(g)]	[m]	[bar(g)]	[m]			
<b>Druck</b>																		
PRS-01	Druckmessung u. Schalter TMP	40	60	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	3,00	29,5	1050	1	
PI-02	Luftdruckmessung nach Kompressor	25	60	0	0	10	0,17	30	0,50	1	-	6	-	8	-	1,20	0,02	
<b>Durchfluss</b>																		
FIC-01	Flowmeter nach Zulaufpumpe	40	60	0	0	100	1,67	420	7,00	0,01	0,1	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
FIRC-02	Flowmeter nach u. Steuerung Permeatpumpe	40	200	0	0	100	1,67	300	5,00	0,01	0,1	0,50	4,9	2,00	19,6	1050	1	
FIC-03	Flowmeter nach Luftkompressor	25	60	0	0	10	0,17	30	0,50	1	-	6	-	8	-	1,20	0,02	
<b>Füllstand</b>																		
LRC-01	Füllstandsensoren Haupttank	40	90							0	0,0	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
<b>Temperatur</b>																		
TI-01	Temperaturmessung Haupttank (manuell)	40	200							0	0,0	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
TI-02	Temperaturmessung Reinigungslösung (manuell)																	
<b>Qualität</b>																		
QI-01	pH-Messung Haupttank (manuell)	40	200							0	0,0	0,05	0,5	0,06	0,6	1050	1	
<b>Drehzahl</b>																		
SIRC-01	Frequenzumrichter Permeatpumpe																	

Tabelle 39: Elektrische Leistung und elektrische Signale der Komponenten

Identifikation		Eigenschaften		Elektrische Daten			Messsignal	
Tag (Kurzbez.)	Beschreibung	Typ	Modell	Elektr. Leistung	Versorgungs- spannung		Signalart	Signalrichtung
				[W]	[V]			
<b>Pumpen</b>								
P-01	Zulaufpumpe	Kreiselpumpe	Verder VMD 6D	5	230	AC		
P-02	Permeatpumpe	Verdrängerpumpe	Zuwa R-NNVF8	550	230/400	AC		
P-03	Dosierpumpe Flockungsmittel	Verdrängerpumpe	Magnetdosierpumpe GALa 1602	17	230	AC		
P-04	Luftkompressor	Kompressor	Güde 225/08/24	1100	230	AC		
P-05	Entleerungspumpe	Kreiselpumpe	Verder VMD 6D	5	230	AC		
<b>Erhitzer</b>								
H-01	Einschraubheizkörper	Einschraubheizkörper	Siekerkotte SEHK	3300	230	AC		
<b>Ventile</b>								
V-11	Absperrventil Entleerung	Magnetventil	Sirai D132	13	24	DC	auf/zu	Eingang
<b>Messgeräte</b>								
LRC-01	Levelmessung Haupttank	Elektronischer Füllstandsensoren	LR3000	?	24	DC	0...10V / 4...20 mA	Ausgang
PRS-01	Druckmessung Filtration	Druckmessumformer	Wika A-10	?	24	DC	4...20 mA	Ausgang
FRC-02	Flowmeter Permeatpumpe	Kalorimetrischer Durchflussmesser	Profimess DT-03	?	24	DC	4...20 mA	Ausgang
SIRC-01	Frequenzumrichter Permeatpumpe	Elektronischer Frequenzumrichter	Siemens Sinamics V20: 6SL3210-5BB15-5AV0	?	230	AC	4...20 mA	Eingang

Tabelle 40: Anschlussliste

Komponente	Tag (Kurzbez.)	Art	Anschluss
<b>Zulauf</b>			
Zulaufpumpe	P-01	Gerade Aufschraubverschraubung	G ½"-Innengewinde
Schwebekörper-Durchflussmesser	FIC-01	Gerade Einschraubverschraubung	NPT ¾"-Innengewinde
Drei-Wege-Ventile	V-02 u. V-03	Gerade Einschraubverschraubung	G ¾"-Innengewinde
Erhitzer	H-01	Gerade Anschweißverschraubung	angeschweißt
Einmündung Flockungsmittel-Hauptleitung	-	selbst geschweißt	-
Dosierpumpe	P-03	Schlauchtülle	Schlauch: 6 mm Außendurchmesser / 4 mm Innendurchmesser
<b>Flotation / Filtration</b>			
Hauptbecken	T-01	Gerade Anschweißverschraubung	angeschweißt
Membranmodul	F-01	Gerade Anschweißverschraubung	angeschweißt
Waste-Tank	T-03	Gerade Anschweißverschraubung	angeschweißt
Waste-Tank-Ventil	V-12	Gerade Einschraubverschraubung	G ¾"-Innengewinde
<b>Entleerung</b>			
Entleerungspumpe	P-05	Gerade Aufschraubverschraubung	G ½"-Innengewinde
Magnetventil	V-11	Gerade Aufschraubverschraubung	G ½"-Innengewinde
<b>Permeatteil</b>			
Druckmesser	PRS-01	Eigenbau aus T-Stück	G ¼"-Außengewinde
Kugelhahn	V-04	Kugelhahn	nur Schneidring
Kugelhahn	V-05	Kugelhahn	nur Schneidring
Permeatpumpe	P-02	Gerade Einschraubverschraubung	R ¼"-Innengewinde
Durchflussmesser	FRC-02	Eigenbau aus T-Stück	G ¼"-Außengewinde
Einmündung Reinigungslösung-Hauptleitung	-	T-Stück	nur Schneidring
Drei-Wege-Ventil	V-06	Gerade Einschraubverschraubung	G ¾"-Innengewinde
<b>Luft</b>			
Kompressor	P-04	Eigenbau	Schnellkupplung & Festo
Schwebekörper-Durchflussmesser	FIC-03	8 mm-Schlauch (Festo) auf ¼" NPT	NPT ¼"-Innengewinde
Filter-Regelventil 1	V-08	Schlauchanschluss Festo	Festo
Filter-Regelventil 2	V-09	Schlauchanschluss Festo	Festo
Kugelhahn	V-10	Schlauchanschluss Festo	Festo & Schneidring

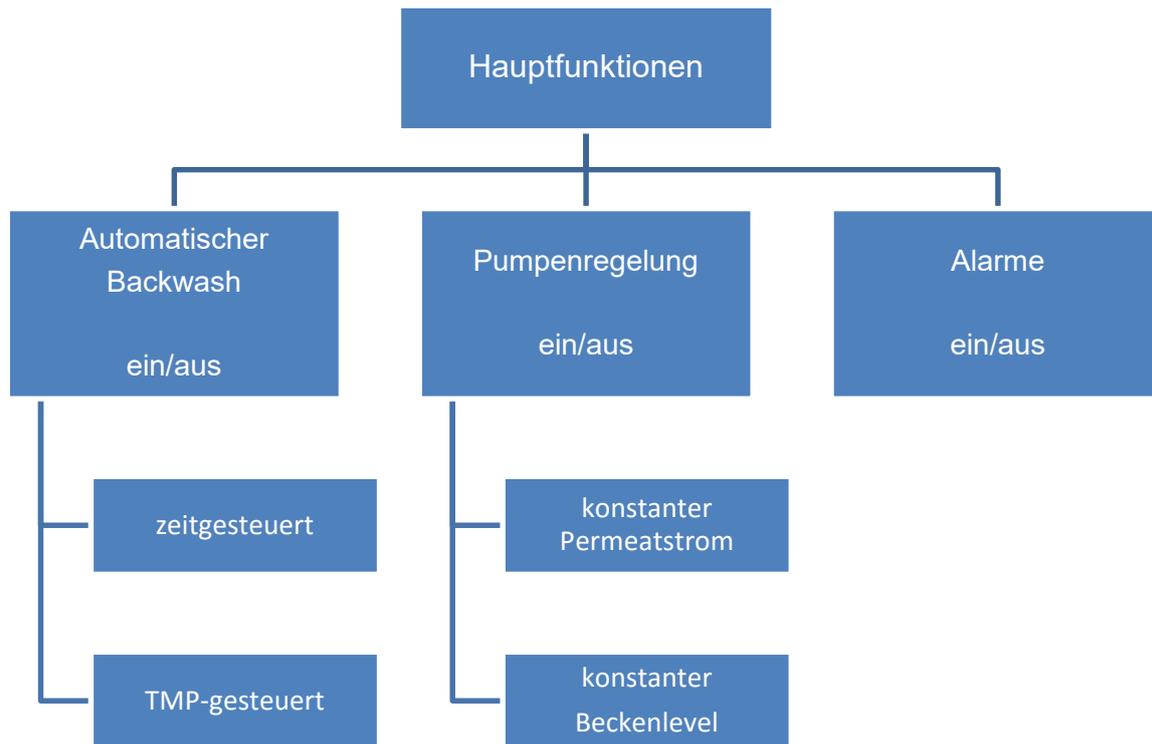


Abbildung 53: Organigramm der Hauptfunktionen der Prozesssteuerung

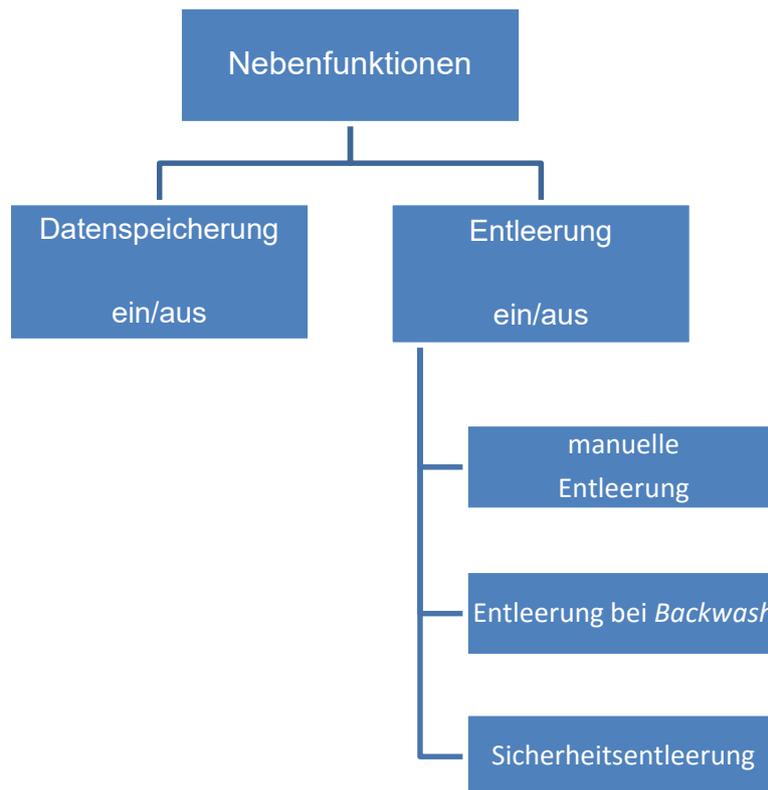


Abbildung 54: Organigramm der Nebenfunktionen der Prozesssteuerung

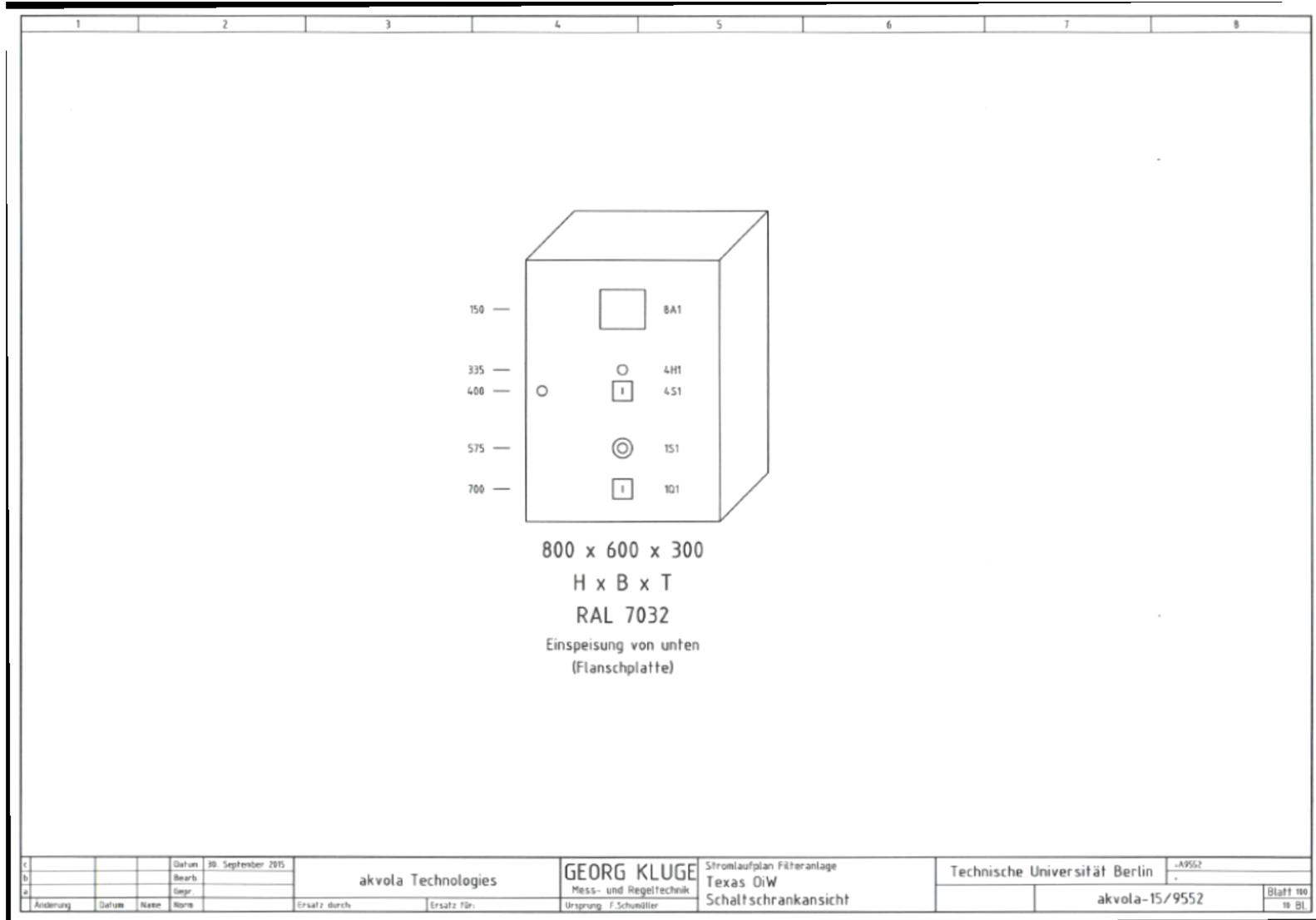
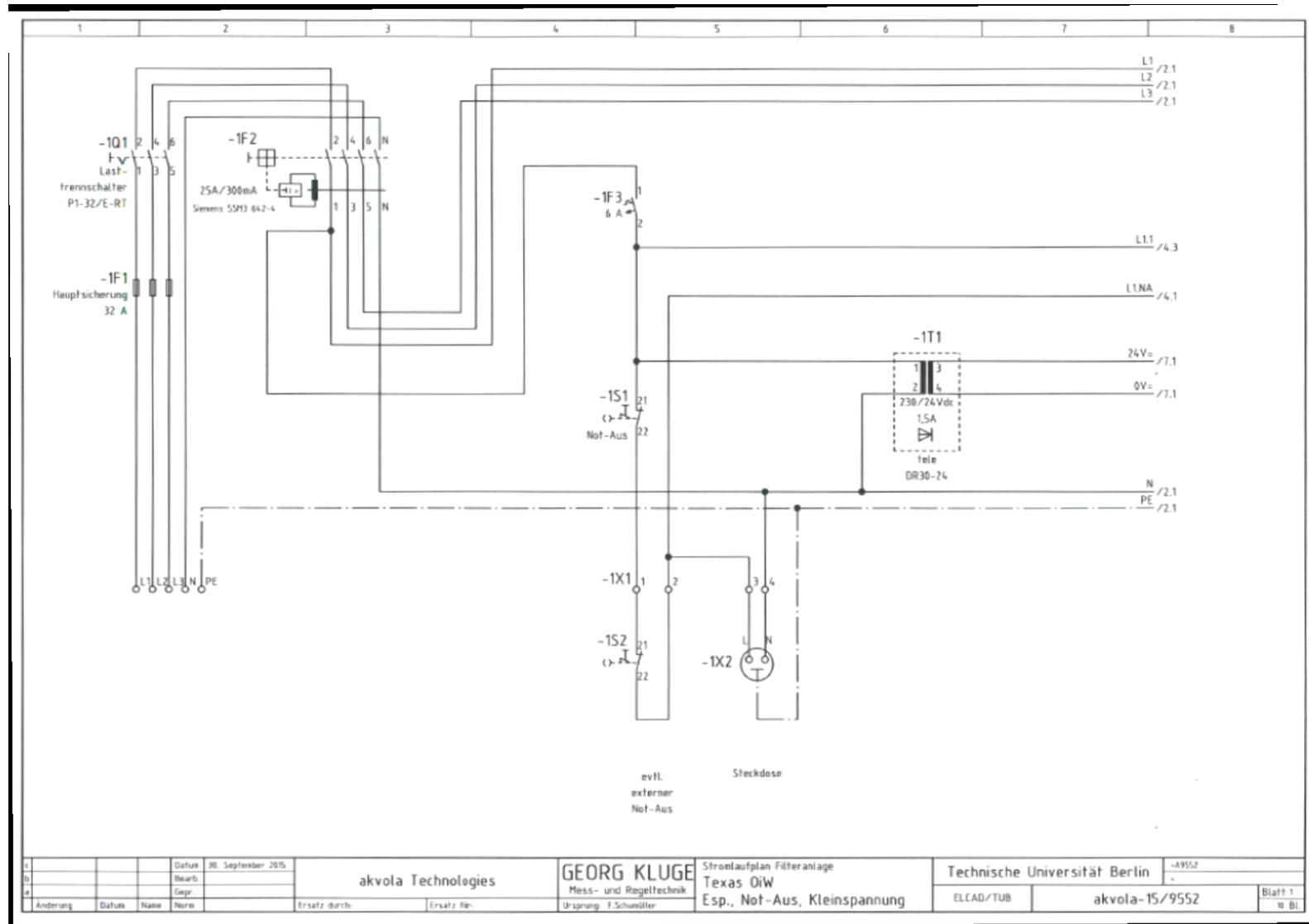


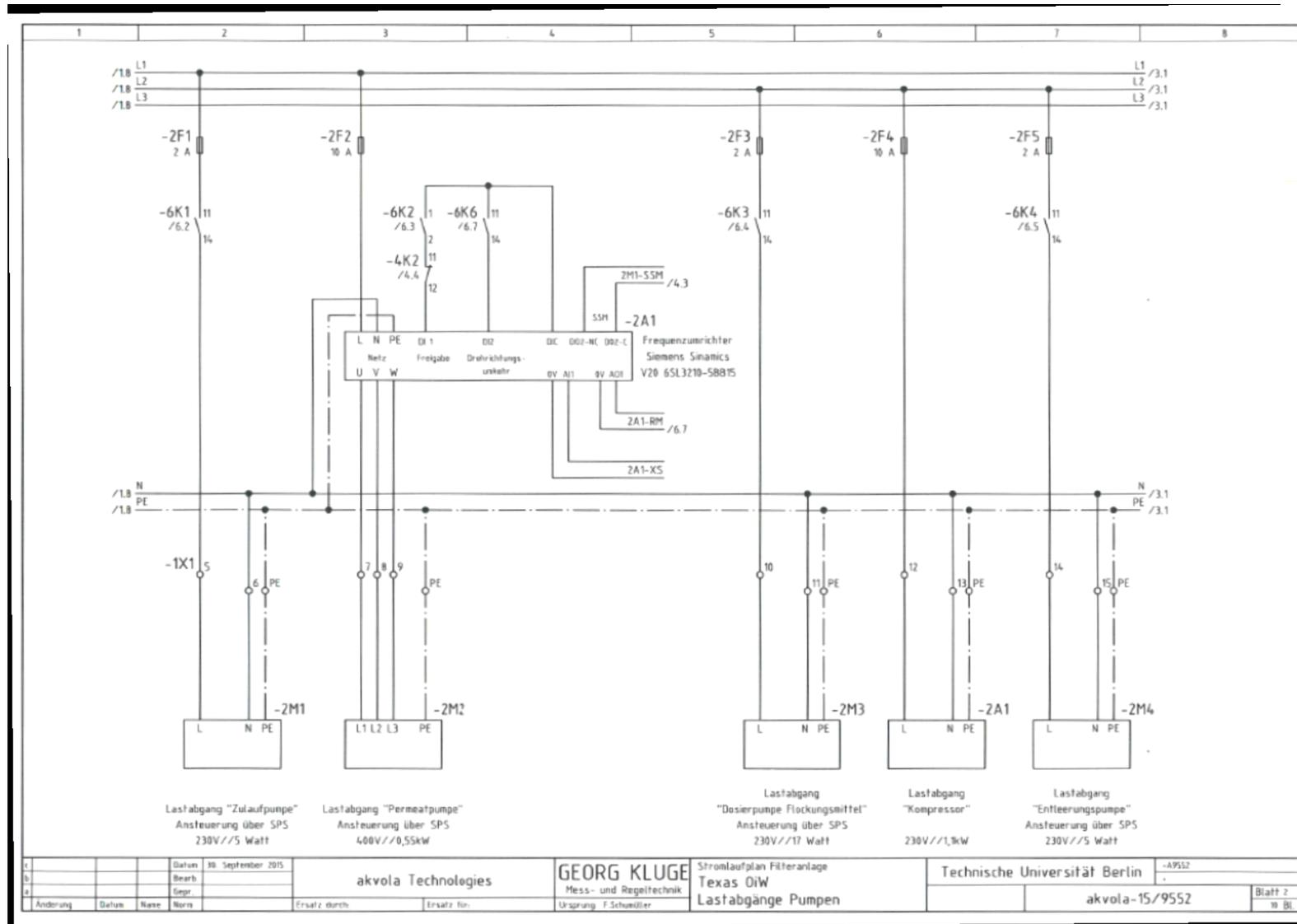
Abbildung 55: Stromlaufplan

1	2	3	4	5	6	7	8																																								
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Blatt</th> <th>Inhalt</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>00</td> <td>Schalttafelansicht</td> </tr> <tr> <td>01</td> <td>Einspeisung, Not-Aus, Kleinspannungsversorgung</td> </tr> <tr> <td>02</td> <td>Lastabgänge Pumpen, Kompressor</td> </tr> <tr> <td>03</td> <td>Lastabgang Heizung</td> </tr> <tr> <td>04</td> <td>Steuerung Pumpen</td> </tr> <tr> <td>05</td> <td>SPS (S7-1200) - Netzversorgung, Digitaleingänge</td> </tr> <tr> <td>06</td> <td>SPS (S7-1200) - Digitalausgänge, Analogeingang</td> </tr> <tr> <td>07</td> <td>SPS (S7-Erweiterungsmodul SM1231) - Netzversorgung, Analogeingänge</td> </tr> <tr> <td>08</td> <td>SPS Bedienmodul (in der Schaltschranktür)</td> </tr> </tbody> </table>		Blatt	Inhalt	00	Schalttafelansicht	01	Einspeisung, Not-Aus, Kleinspannungsversorgung	02	Lastabgänge Pumpen, Kompressor	03	Lastabgang Heizung	04	Steuerung Pumpen	05	SPS (S7-1200) - Netzversorgung, Digitaleingänge	06	SPS (S7-1200) - Digitalausgänge, Analogeingang	07	SPS (S7-Erweiterungsmodul SM1231) - Netzversorgung, Analogeingänge	08	SPS Bedienmodul (in der Schaltschranktür)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Spannungsart</th> <th>Verdrahtungsfarbe</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>400V AC</td> <td>schwarz</td> </tr> <tr> <td>230 V AC</td> <td>rot</td> </tr> <tr> <td>Null</td> <td>blau</td> </tr> <tr> <td>PE/Erde</td> <td>grün/gelb</td> </tr> <tr> <td>24 V dc +</td> <td>violett</td> </tr> <tr> <td>24 V dc -</td> <td>grau</td> </tr> <tr> <td>0...10V Ein-/Ausgang</td> <td>blau</td> </tr> <tr> <td>pot. freie Kontakte</td> <td>weiss</td> </tr> </tbody> </table>		Spannungsart	Verdrahtungsfarbe	400V AC	schwarz	230 V AC	rot	Null	blau	PE/Erde	grün/gelb	24 V dc +	violett	24 V dc -	grau	0...10V Ein-/Ausgang	blau	pot. freie Kontakte	weiss				
Blatt	Inhalt																																														
00	Schalttafelansicht																																														
01	Einspeisung, Not-Aus, Kleinspannungsversorgung																																														
02	Lastabgänge Pumpen, Kompressor																																														
03	Lastabgang Heizung																																														
04	Steuerung Pumpen																																														
05	SPS (S7-1200) - Netzversorgung, Digitaleingänge																																														
06	SPS (S7-1200) - Digitalausgänge, Analogeingang																																														
07	SPS (S7-Erweiterungsmodul SM1231) - Netzversorgung, Analogeingänge																																														
08	SPS Bedienmodul (in der Schaltschranktür)																																														
Spannungsart	Verdrahtungsfarbe																																														
400V AC	schwarz																																														
230 V AC	rot																																														
Null	blau																																														
PE/Erde	grün/gelb																																														
24 V dc +	violett																																														
24 V dc -	grau																																														
0...10V Ein-/Ausgang	blau																																														
pot. freie Kontakte	weiss																																														
c		Datum	26. September 2015	<b>akvola Technologies</b>		<b>GEORG KLUGE</b> Mess- und Regeltechnik		Stromlaufplan Filteranlage Texas ÖlW Blattverzeichnis	Technische Universität Berlin	-A9552																																					
b		Bearb.																																													
a		Gepr.																																													
Änderung		Datum	Name	Name	Ersatz durch	Ersatz Nr.	Ursprung	F. Schwilke	akvola-15/9552 Blatt 101 10 Bl.																																						

Stromlaufplan (Fortsetzung)



Stromlaufplan (Fortsetzung)

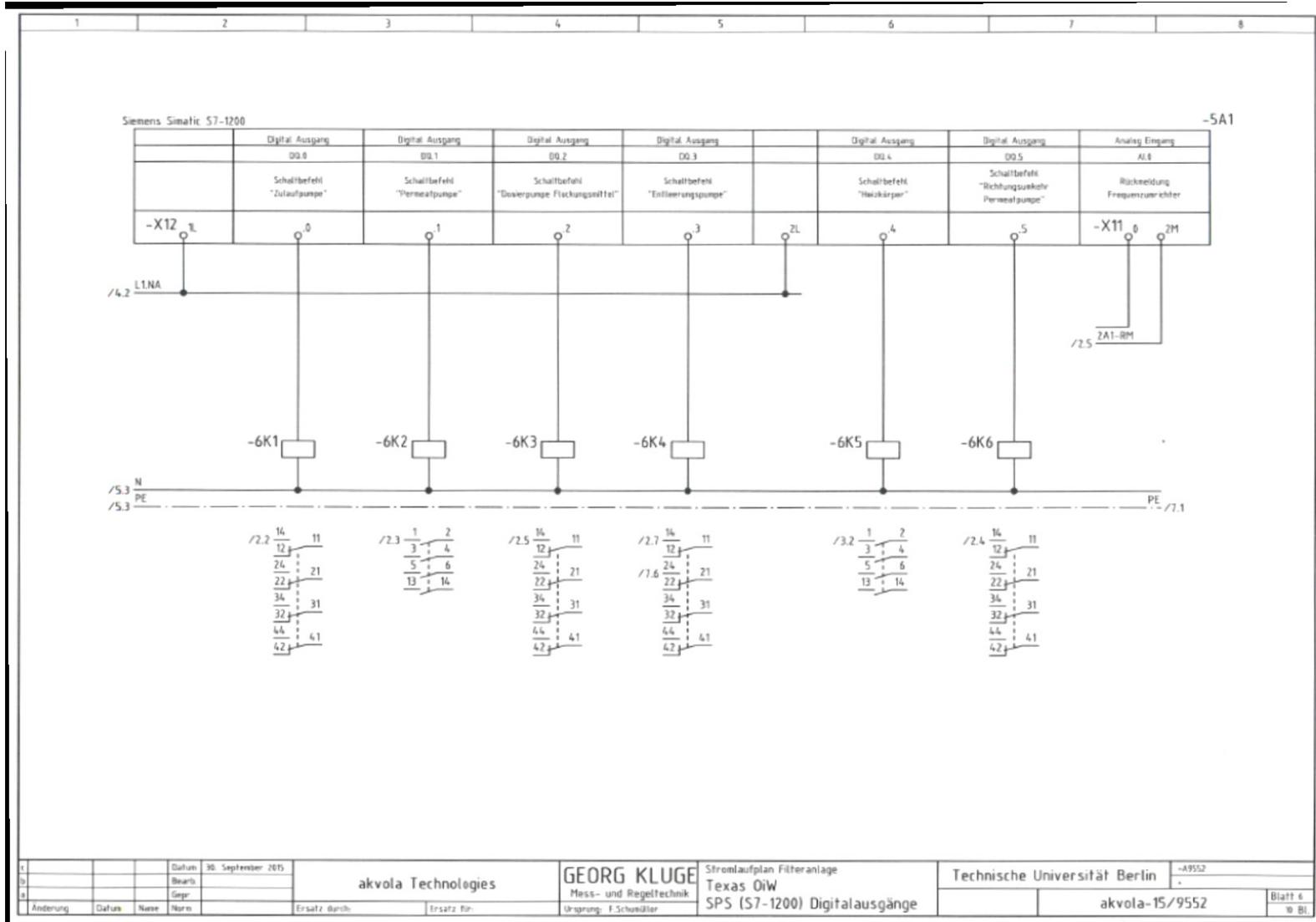


Stromlaufplan (Fortsetzung)

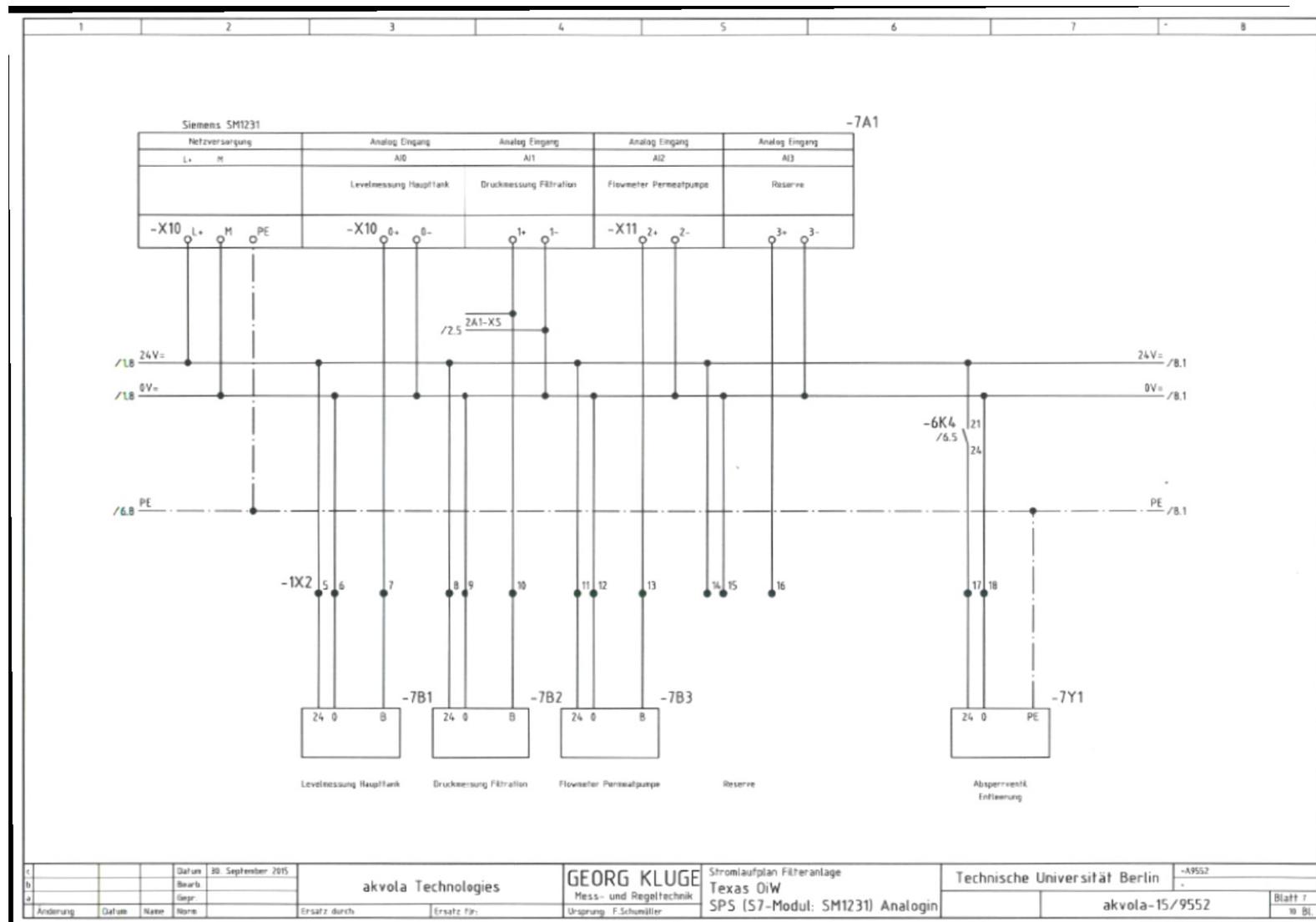




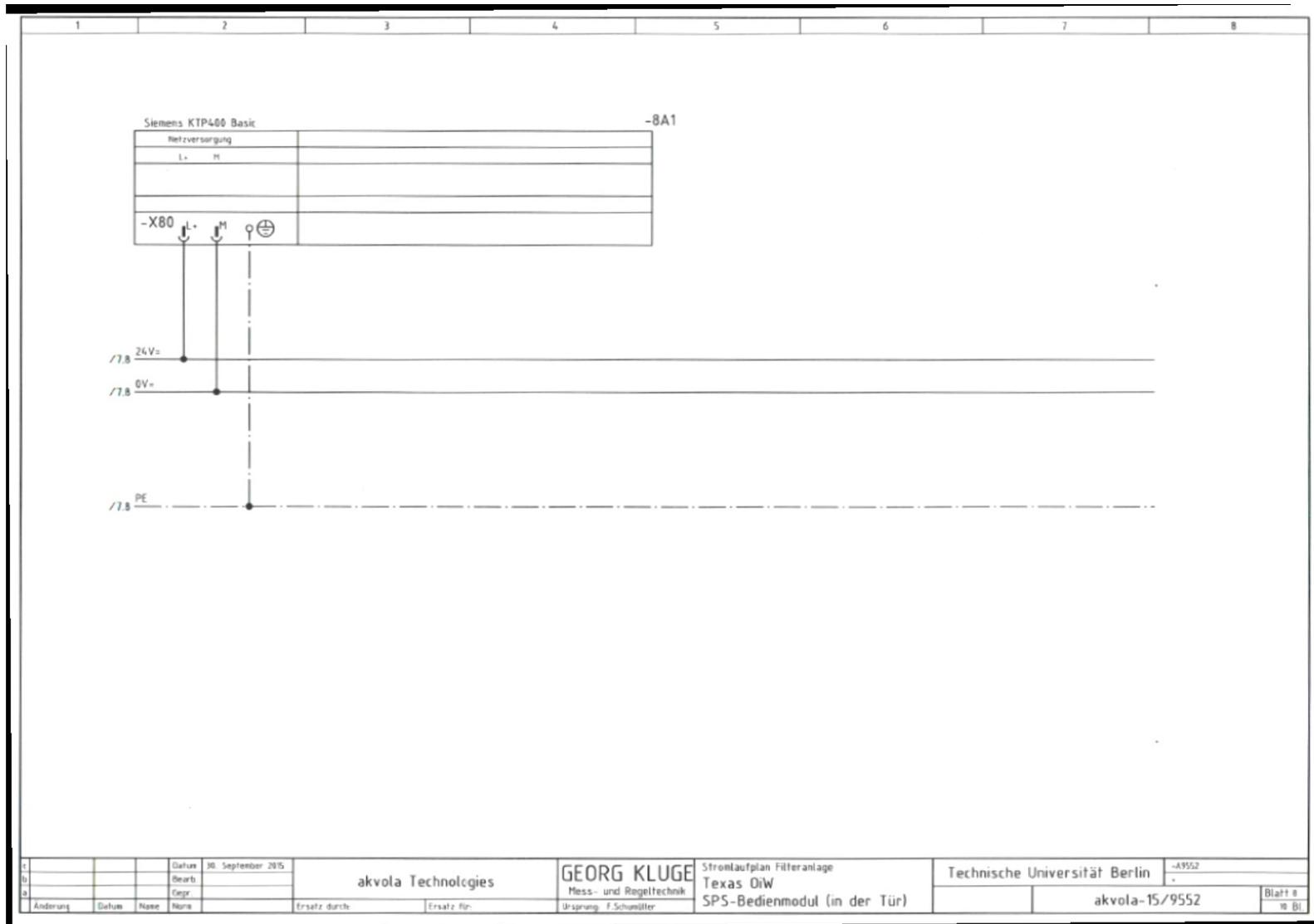




Stromlaufplan (Fortsetzung)



Stromlaufplan (Fortsetzung)



Stromlaufplan (Fortsetzung)

## Anhangverzeichnis

### Tabellen

Tabelle 37: Equipmentliste .....	V
Tabelle 38: EMSR-Liste (Elektrische Mess-, Steuer- und Regeltechnik).....	VII
Tabelle 39: Elektrische Leistung und elektrische Signale der Komponenten .....	IX
Tabelle 40: Anschlussliste .....	X

### Abbildungen

Abbildung 49: Verfahrensfliessbild für Filtrationsbetrieb.....	I
Abbildung 50: Verfahrensfliessbild für <i>Backwash</i> mit Permeat.....	II
Abbildung 51: Verfahrensfliessbild für <i>Backwash</i> mit Reinigungslösung .....	III
Abbildung 52: Verfahrensfliessbild für <i>Backwash</i> mit Luft .....	IV
Abbildung 53: Organigramm der Hauptfunktionen der Prozesssteuerung .....	XI
Abbildung 54: Organigramm der Nebenfunktionen der Prozesssteuerung.....	XII
Abbildung 55: Stromlaufplan.....	XIII