



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Science

Analyse von Druck- und Saugfiltern zur Badewasserreinigung in öffentlichen Schwimmbädern

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Bachelorthesis

Verfahrenstechnik

Vorgelegt von

Henning Sievers

Matr.-Nr. XXXXXXXXXX

Hamburg

am 12 April 2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Geweke (HAW Hamburg)

Gutachter: Ing. Ingo Schütz (Bäderland Hamburg GmbH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt bei der Firma Bäderland Hamburg GmbH

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 12.04.2019

Henning Sievers

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden verschiedene Filtersysteme für öffentliche Schwimmbäder miteinander unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten verglichen, um eine Empfehlung für die effizienteste Filtertechnik geben zu können. Der Fokus liegt dabei auf Drucksandfiltern und Unterdruck-Saugfiltern der Typen „Formula“ der Firma Landwehr Wassertechnik GmbH und „Captura“ der Firma MTK (Main-Tauber Kunststoff GmbH). In den theoretischen Grundlagen wird ebenso auf die Anschwemmfiltration und Nanofiltration eingegangen. Dabei werden die verschiedenen Anlagen vorgestellt und ihre technischen und baulichen Vor- und Nachteile erläutert. Anschließend erfolgt eine genaue Beschreibung der untersuchten Anlagen und den dazu gehörigen Anbauteilen und Verbrauchern, die für einen reibungslosen Betrieb nötig sind. Eine Auflistung und Erklärung aller Eingangsparameter schafft die Grundlage für einen Wirtschaftlichkeitsvergleich, darunter die Investitionskosten und wie sich diese zusammensetzen. Anschließend werden die laufenden Kosten, zusammengesetzt aus Stromkosten, Wasser- und Abwasserkosten, sowie Chemikalien- und Betriebsmittelkosten aufgelistet und erläutert. Dabei werden verschiedene Annahmen getroffen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das Ergebnis des Filtervergleichs stellt eine Empfehlung für die zu verwendende Filtertechnik dar. Abhängig davon, ob ein Schwimmbad neu errichtet oder modernisiert wird, ergeben sich zwei unterschiedliche Szenarien. Bei einer Modernisierung eines Bads, welches über Drucksandfilter verfügt, empfiehlt es sich das Filtersystem mit modernen Pumpen und einem Kathodenschutz auszustatten, da sich so ohne großen technischen oder finanziellen Aufwand signifikante Einsparungen erzielen lassen. Bei einem Neubau hat der „Captura“ Filter die besten Ergebnisse erzielt, da der Platzbedarf geringer ist, als bei einem klassischen Drucksandfilter und sich die laufenden Kosten auf einem sehr niedrigen Niveau bewegen. Diese Empfehlung gilt auch für die Modernisierung eines Bads, wenn die Sanierung der Filteranlage nicht mehr wirtschaftlich ist.

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	2
Zusammenfassung.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	8
Symbolverzeichnis.....	9
1. Einleitung und Aufgabenstellung.....	12
2. Theoretische Grundlagen.....	14
2.1 Grundlagen der Schwimmbadwasseraufbereitung.....	14
2.2 Gesetzliche Anforderungen an die Wasserqualität.....	16
2.2.1 Hygieneparameter zur Wasserbeschaffenheit.....	17
2.2.2 Mikrobiologische Anforderungen.....	17
2.2.3 Hygiene-Hilfsparameter.....	19
2.3 Der Wasserkreislauf.....	22
2.3.1 Beckenhydraulik.....	22
2.3.2 Schwallwasser.....	23
2.3.3 Flockung.....	23
2.3.4 Adsorption.....	25
2.3.5 Filtration.....	28
2.3.6 Filtrerrückspülung.....	35
2.3.7 Erwärmung.....	37
2.3.8 Desinfektion.....	37
2.3.9 pH-Wert Korrektur.....	38
2.4 Formeln für den Wirtschaftlichkeitsvergleich.....	38
2.4.1 Investitionskosten.....	38

2.4.2	Laufende Kosten.....	40
2.4.2.1	Strom.....	40
2.4.2.2	Wasser und Abwasser.....	41
2.4.2.3	Wärme.....	42
2.4.2.4	Chemikalien und Verbrauchsmaterial	42
2.4.2.5	Gesamte Kosten.....	43
3.	Stand der Technik	44
3.1.1	Anschwemmfiltration.....	44
3.1.2	Festbettfiltration	47
3.1.2.1	Druckfilter.....	50
3.1.2.2	Saugfilter	51
4.	Durchführung des Filtervergleichs.....	53
4.1	Vorstellung der zu vergleichenden Bäder	53
4.1.1	Hamburger System.....	53
4.1.2	Druckfilter Billebad Bergedorf	55
4.1.3	Unterdruck Saugfilter „Formula“ Festland Altona.....	55
4.1.4	Unterdruck Saugfilter „Captura“ Insempark Wilhelmsburg.....	57
4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	59
4.2.1	Hamburger System.....	59
4.2.2	Sportbecken Billebad Bergedorf	63
4.2.3	Anlage 4 Festland Hamburg Altona.....	69
4.2.4	Mehrzweckbecken Insempark Wilhelmsburg.....	75
5.	Ergebnisse und Diskussion	80
5.1	Kostenvergleich.....	80
5.2	Empfehlung eines Filtersystems	83
	Literaturverzeichnis	85

Anhang	87
Anhang 1: Fließschema Mehrzweckbecken Hamburger System.....	87
Anhang 2: Fließschema Sportbecken Billebad.....	88
Anhang 3: Fließschema Anlage 1-4 Festland Altona	89
Anhang 4: Filterbehälter Anlage 4 Festland Altona	90
Anhang 5: Fließschema Sportbecken und Mehrzweckbecken Inseipark.....	91
Anhang 6: Fließschema Mehrzweckbecken Inseipark	92
Anhang 7: Ermittlung der laufenden Kosten des Hamburger Systems.....	93
Anhang 8: Investitionskosten und laufende Kosten für das Sportbecken im Billebad Bergedorf	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Kreislaufprozess der Wasseraufbereitung.....	14
Abbildung 2 vertikale Durchströmung (links) und horizontale Durchströmung (rechts) (5)	23
Abbildung 3 Wirkungsweise von Flockungsmittel (1 S. 139)	24
Abbildung 4 Abtrennung der Desinfektionsnebenprodukte durch NFOX-Verfahren (6 S. 7)	27
Abbildung 5 Filterdurchströmung (9 S. 140)	32
Abbildung 6 Vereinfachtes Schema Druck- und Vakuumanschwemmfilter (1 S. 191)	45
Abbildung 7 Filterdüsen in Schnellfiltern (15)	49
Abbildung 8 Aufbau eines Mehrschicht-Druckfilters (1 S. 182)	50
Abbildung 9 Schema Saugfilter (vereinfacht) (16).....	51
Abbildung 10 Formula Saugfilter (17)	56
Abbildung 11 Captura Mehrschichtfilter (16)	58
Abbildung 12 Grafische Darstellung des Kostenvergleichs	82
Abbildung 13 Fließschema Mehrzweckbecken Hamburger System (18)	87
Abbildung 14 Fließschema Sportbecken Billebad (19)	88
Abbildung 15 Fließschema Anlage 1-4 Festland (20).....	89
Abbildung 16 Filterbehälter Anlage 4 Festland Altona (20).....	90
Abbildung 17 Fließschema Sportbecken und Mehrzweckbecken Inselpark (21)	91
Abbildung 18 Fließschema Mehrzweckbecken Inselpark (21)	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1- Mikrobiologische Anforderungen an das Reinwasser und das Beckenwasser (4 S. 16)	18
Tabelle 2 Spülwassergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Körnung des Filtersandes (7 S. 119)	36
Tabelle 3 Kostenpunkte Filteranlage Sportbecken Billebad Bergedorf	64
Tabelle 4 Kostenpunkte Peripherie Sportbecken Billebad Bergedorf	64
Tabelle 5 Investitionskosten Filteranlage und Peripherie Anlage 4 Festland	70
Tabelle 6 laufende Kosten Anlage 4 Festland Altona	71
Tabelle 7 Investitionskosten Filteranlage und Peripherie Mehrzweckbecken Inselpark	75
Tabelle 8 laufende Kosten Mehrzweckbecken Inselpark.....	77
Tabelle 9 Kostenvergleich der Filtersysteme	80
Tabelle 10 laufende Kosten MZB Elbgaustraße.....	93
Tabelle 11 laufende Kosten MZB Billstedt	95
Tabelle 12 laufende Kosten MZB Bramfeld.....	97
Tabelle 13 laufende Kosten MZB Blankenese	100
Tabelle 14 Investitionskosten und laufende Kosten Sportbecken Billebad	102

Symbolverzeichnis

a	Annuitätsfaktor
b	Breite [m]
c_v	lokale Feststoffkonzentration
c_{v0}	lokale Feststoffkonzentration zu Beginn der Filtration
- dc_v	Abnahme der Feststoffkonzentration
d_{32}	Sauter Durchmesser
ϵ	Porosität
h	Höhe [m]
I_k	Investitionskosten gesamt [€]
$k(\epsilon)$	Kozeny-Konstante
K	Konstante
K_{AH}	Kosten Aushub pro m^3 [€]
K_C	Kosten Chemikalien [€]
K_{ges}	Stromkosten pro Jahr [€]
K_H	Kosten Wärme [€]
K_{HE}	Kosten Wärme pro kW/h [€]
K_i	Kapitalkosten pro Jahr [€]
K_{kg}	Kosten pro Kilogramm [€]
K_S	Stromkosten pro kW/h [€]
K_T	Kosten Technikraum [€]

K_{TC}	Kosten Technik [€]
K_{IF}	Kosten inflationsbereinigt [€]
K_W	Kosten Wasser [€]
K_{AW}	Kosten Abwasser pro m^3 [€]
K_{FW}	Kosten Frischwasser pro m^3 [€]
l	Länge [m]
L	Durchströmte Länge [m]
λ	Filterkoeffizient
λ_0	Filterkoeffizient zu Beginn der Filtration
n	Laufzeit Abschreibung [a]
η	dynamische Viskosität
P_s	Preissteigerung [%]
Δp	Druckverlust [bar]
$\Delta p_v(t)$	Druckverlust in Abhängigkeit der Zeit [bar]
Δp_{v0}	Druckverlust zum Zeitpunkt $t=0$ [bar]
S_{ges}	gesamte Oberfläche
S_v	Spezifische Oberfläche [1/m]
t	Zeit [s]
t_{ges}	Zeit [h]
μ	Beladung
μ_s	Sättigungbeladung
V	Volumen [m^3]

V_W	Wasserbedarf [m ³]
V_{ges}	gesamtes Volumen
V_H	Hohlraumvolumen [m ³]
V_S	abgeschiedenes Feststoffvolumen [m ³]
V_F	Filtervolumen [m ³]
\bar{w}	Leerrohrgeschwindigkeit [m/s]
w_F	Filtergeschwindigkeit [m/h]
W	Stromverbrauch [kw/h]
z	Durchströmungsrichtung
z_s	Zinssatz pro Jahr [%]

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der Badbesuch, Schwimmen und Baden sind schon seit der Antike ein fester Bestandteil der Freizeitgestaltung. Zu der Zeit von Kaiser Konstantin um 300 n. Chr. gab es im alten Rom über 900 öffentliche Bäder sowie elf große kaiserliche Thermen. Nachdem das Waschen dann für lange Zeit verpönt war, setzte in der Zeit der Aufklärung ein Sinneswandel ein. Mediziner erkannten den Wert der Hygiene und damit des Waschens. Im Jahr 1842 eröffnete die erste Wasch- und Badeanstalt in Liverpool. Sie sollte es auch weniger privilegierten Menschen ermöglichen an sauberes Wasser zu kommen und sich zu waschen. 1855 eröffnete in Hamburg Deutschlands erste öffentliche Badeanstalt. Dienten die ersten Bäder, ausgestattet mit Badewannen und Brausen noch der Hygiene, entdeckten die Menschen das Baden und Schwimmen schnell als Freizeitaktivität. So wurden schon 1870 die ersten Bäder mit großen Becken, so wie man sie heute kennt, in Betrieb genommen. Das Kaifu Bad wurde 1895 erbaut und ist das älteste noch bestehende Schwimmbad der Hansestadt. Es entspricht weitgehend dem heutigen Bild eines öffentlichen Bades. Natürlich bietet ein modernes Bad eine Vielzahl an zusätzlichen Angeboten und Aktivitäten, das Herz einer öffentlichen Badeanstalt bleibt allerdings ein großes Schwimmbecken, dessen Wasser gereinigt werden und hygienisch einwandfrei sein muss. Die letzten 100 Jahre haben viele technische Neuerungen und Änderungen mit sich gebracht, welche dazu führen, dass es mittlerweile viele unterschiedliche Filtersysteme gibt, um das Badebeckenwasser zu reinigen. (1 S. 9 f.) (2) Die Bäderland Hamburg GmbH betreibt über das Stadtgebiet verteilt mehr als 20 Schwimmbäder, die in einem Zeitraum von über einem Jahrhundert erbaut wurden. Da die verschiedenen Schwimmbäder auf unterschiedliche Konzepte zur Reinigung des Wassers setzen, soll ein Vergleich der Systeme, welche dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, zeigen welches Filtersystem die höchste Effizienz bei geringstem Wartungsaufwand bietet. Dazu soll ein Wirtschaftlichkeitsvergleich der verschiedenen Systeme durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt sind die Betriebsdaten der verschiedenen Filtersysteme aufzunehmen oder abzuschätzen. Dies geschieht davon abhängig welche Daten vorhanden oder messbar sind. Darauf aufbauend werden Betriebskosten und Anschaffungskosten der ver-

schiedenen Filterkonzepte miteinander verglichen. Dabei sollen die konstruktiven und betrieblichen Besonderheiten eines Schwimmbades wie beispielsweise der eingeschränkte Bauraum bei Nachrüstung von Filtersystemen in alten Bädern oder der notwendige Chemikalieneinsatz zur Sicherstellung der hygienischen Anforderungen berücksichtigt werden. Die verschiedenen Filtersysteme werden dann hinsichtlich energetischen Nutzens und anlagentechnischem Aufwand analysiert und miteinander verglichen werden. Abschließend soll eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden.

Als Resultat der Arbeit soll für zukünftige Entscheidungen über den Einsatz von Filtersystemen in der Badewasseraufbereitung das effizienteste System vorgeschlagen werden.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Filtertechnik in Schwimmbädern erklärt. Angefangen mit den Grundlagen der Schwimmwasseraufbereitung wird dann später auf die gesetzlichen Anforderungen an die Wasserqualität eingegangen. Anschließend wird jeder Schritt des Wasserkreislaufs beschrieben und erläutert. Danach werden die Formeln für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erklärt. Abschließen wird auf die einzelnen Kostenstellen eingegangen und beschrieben, woraus sie sich zusammensetzen.

2.1 Grundlagen der Schwimmbadwasseraufbereitung

Badewasser in öffentlichen Schwimmbädern wird in einem Kreislaufprozess aufbereitet. Das von Badegästen verschmutzte und verdrängte Beckenwasser wird kontinuierlich abgezogen und gereinigt. Nach der Reinigung wird das gereinigte Beckenwasser wieder in das Schwimmbecken eingeleitet. Dies kann man in Abbildung 1 verfolgen.

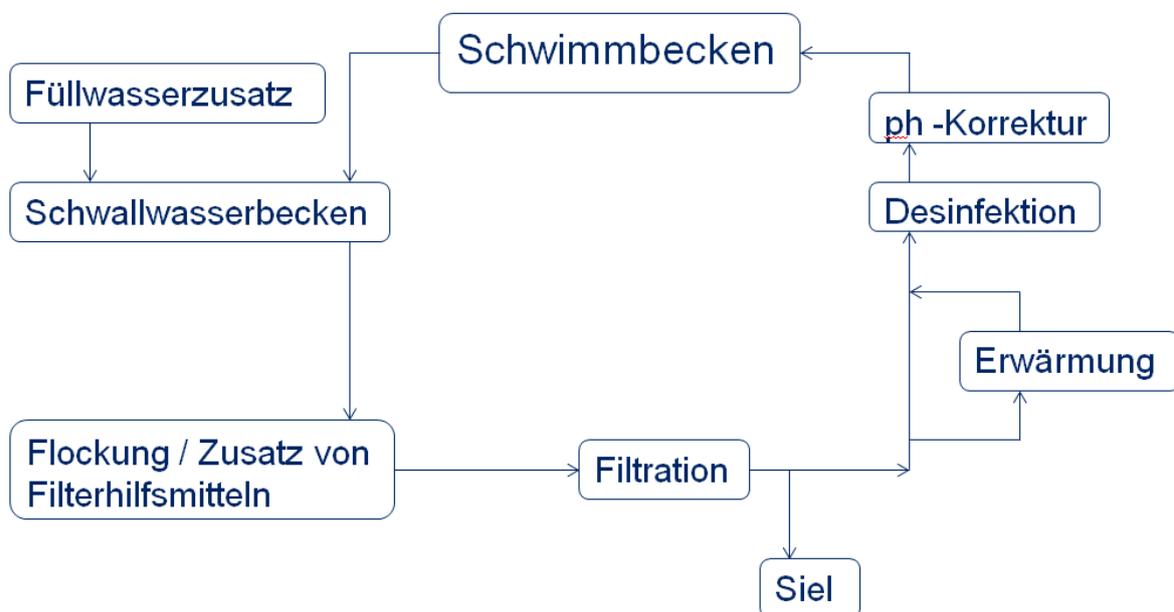


Abbildung 1 Kreislaufprozess der Wasseraufbereitung

Das Beckenwasser wird über die umlaufende Rinne abgezogen und in den Schwallwasserbehälter abgeführt. Bei unzureichender Wassermenge wird hier auch zusätzliches Füllwasser hinzugegeben. Anschließend folgt die Zugabe von Flockungsmittel und/oder Filterhilfsmittel, abhängig davon welcher Filtertyp verwendet wird. Danach wird das Wasser gefiltert, über einen Bypass wird dann ein Teil des Wassers erwärmt, um die gewünschte Badewasser Temperatur zu erreichen. Bevor das Badewasser dann wieder in das Schwimmbecken geleitet wird, folgen die Desinfektion des Wassers mit Chlor und die Korrektur des pH-Wertes mit Hilfe von Säuren oder Laugen. Nur wenn alle Verfahrensschritte problemlos und einwandfrei funktionieren, kann eine gleichbleibende hohe Wasserqualität gewährleistet werden.

2.2 Gesetzliche Anforderungen an die Wasserqualität

Die Wasserqualität in öffentlichen Schwimmbädern wird in Deutschland durch das Gesundheitsamt kontrolliert. Dies geschieht auf Grundlage des Infektionsschutzgesetzes, welches bis 2001 Bundes-Seuchengesetz genannt wurde. § 37 schreibt hierbei vor, dass das Wasser von Schwimm- und Badebecken in Gewerbebetrieben, öffentlichen Bädern sowie in sonstigen nicht ausschließlich privat genutzten Einrichtungen für den menschlichen Gebrauch so beschaffen sein muss, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit, insbesondere durch Krankheitserreger, nicht zu erwarten ist. Bei Schwimm- und Badebecken muss die Aufbereitung des Wassers eine Desinfektion mit einschließen. Die Wasseraufbereitung durch biologische und mechanische Verfahren muss dabei mindestens nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erfolgen. (3 S. 33)

Die DIN 19643 „Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser“ gibt vor welche Aufbereitungsmaßnahmen zur Erhaltung der Wasserqualität nach § 37 notwendig sind. Sie stellt die Erkenntnisse über technische Möglichkeiten und die wirtschaftlichen Interessen der deutschen Industrie dar und enthält anerkannte Regeln der Technik wie sie in Deutschland und den europäischen Nachbarländern zur Anwendung kommen. Dabei sind die DIN-Normen nicht verbindlich. Der Anwender ist also nicht verpflichtet sie zu erfüllen. Allerdings kann er sich bei Anwendung der Normen darauf verlassen, dass eine gute Funktionsweise gewährleistet ist.

Die DIN 19643 wurde vom Normenausschuss für Wasserwesen im Jahr 1984 aufgestellt. Darauf aufbauend folgten mehrere Überarbeitungen und Verschärfungen in den Jahren 1989, 1997 und zuletzt im Jahr 2012. Die aktuelle Fassung besteht aus vier Teilen. Teil 1 beschreibt sowohl die Allgemeinen Anforderungen zur Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser als auch die Auslegung und den Betrieb der Wasseraufbereitungsanlage. Die nachfolgenden Teile beschäftigen sich dann mit unterschiedlichen Verfahrenskombinationen zur Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser (4 S. 5):

- Teil 2: Verfahrenskombinationen mit Festbett- und Anschwemmfiltern
- Teil 3: Verfahrenskombinationen mit Ozonung
- Teil 4: Verfahrenskombinationen mit Ultrafiltration

Beim Bäderland Hamburg wird ausschließlich die Verfahrenskombination mit Festbett- und Anschwemmfiltern verwendet, wobei abgesehen von einem Becken die Verfahrenskombination mit Festbettfiltern verwendet wird. Sie umfasst Flockung, Filtration und Chlorung sowie unter Umständen Adsorption an Aktivkohle oder Nanofiltration. Adsorption an Aktivkohle oder Nanofiltration haben hierbei die Aufgabe die Konzentration von Stoffen wie Trichlormethanen und Chloraminen auf ein Minimum zu reduzieren, da diese gesundheits-schädlich sind.

2.2.1 Hygieneparameter zur Wasserbeschaffenheit

Die Hygieneparameter zur Wasserbeschaffenheit sind vom Umweltbundesamt im Rahmen des Infektionsschutzgesetzes entwickelte Konzepte zur Vorbeugung, Erkennung und Verhinderung der Weiterverbreitung von durch Wasser übertragbaren Krankheiten. Beim Umweltbundesamt werden zur Erfüllung dieser Aufgaben beratende Fachkommissionen eingerichtet. Diese können Empfehlungen zum Schutz der menschlichen Gesundheit auf Grund der Anforderungen an die Qualität des in § 37 Abs. 1 und 2 bezeichneten Wassers geben und zu Maßnahmen raten. (3 S. 35)

2.2.2 Mikrobiologische Anforderungen

Einen Schwerpunkt hierbei bilden die mikrobiologischen Anforderungen an die Qualität des Schwimm- und Badebeckenwasser. Das Reinwasser und das Beckenwasser müssen frei von *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* (E.coli) sowie *Legionella pneumophila* (Legionellen) sein. Andere koloniebildene Einheiten dürfen im Beckenwasser eine maximale Konzentration von 100/ml und im Reinwasser eine maximale Konzentration von 20/ml erreichen. Siehe Tabelle 1.

Tabelle 1- Mikrobiologische Anforderungen an das Reinwasser und das Beckenwasser (4 S. 16)

Nr.	Parameter	Einheit	Reinwasser Oberer Wert	Beckenwasser Oberer Wert	Nachweisverfahren ^a
5.3.1	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	KBE/100 ml	0	0	DIN EN ISO 16266
5.3.2	<i>Escherichia coli</i>	KBE/100 ml	0	0	DIN EN ISO 9308-1
5.3.3	<i>Legionella spec.</i>	KBE/100 ml	b, c	c, d	ISO 11731 ^e DIN EN ISO 11731-2 ^e
5.3.4	Koloniezahl (KBE) bei (36 ± 1) °C	KBE/ml	20	100	DIN EN ISO 6222 TrinkwV 2001 ^f
<p>^a Es dürfen die in der Tabelle genannten Nachweisverfahren oder gleichwertige Verfahren für Trink- und/oder Schwimm- und Badebeckenwasser nach DIN EN ISO 17994 eingesetzt werden.</p> <p>^b Im Filtrat bei Beckenwassertemperatur ≥ 23 °C.</p> <p>^c Bewertung und Maßnahmen bei Legionellenbefunden richten sich nach 14.4, Tabellen 7 und 8.</p> <p>^d Im Beckenwasser von Warmsprudelbecken sowie Becken mit zusätzlichen aerosolbildenden Wasserkreisläufen und Beckenwassertemperaturen ≥ 23 °C.</p> <p>^e Ggf. vorliegende Empfehlungen des Umweltbundesamtes und der Schwimm- und Badebeckenwasserkommission des Bundesministeriums für Gesundheit beim Umweltbundesamt sind zu beachten.</p> <p>^f Bestimmung der Koloniezahl nach TrinkwV 2001, Anlage 5 Teil I, Punkt d), Unterpunkt bb).</p>					

Escherichia coli:

Das Bakterium *Escherichia coli* wird seit über 100 Jahren also Indikatorkeim genutzt, um fäkale Verunreinigungen von Wasser zu erkennen. Zusätzlich zu dem meistens harmlosen *E.coli* sind in den letzten Jahren auch pathogene *E.coli*-Stämme aufgetreten, die ernsthafte Infekte und Durchfall verursachen können, wie zum Beispiel EPEC oder EHEC. (1 S. 69)

Pseudomonas aeruginosa:

Pseudomonas aeruginosa ist ein Stäbchenförmiges Bakterium, das Erkrankungen des Außenohrkanals (Ohrenentzündung, laufende Ohren), der Augen und des Nasen-Rachen-Raums verursacht. Der Erreger dringt mit dem Badewasser in den Gehörgang ein und führt dort zu Infektionen. Typischerweise ist das Bakterium an Wasser-Luft-Grenzflächen zu finden, wie zum Beispiel an Wasserhähnen, Duschköpfen oder Luftbefeuchtern, aber auch in Sand- und Aktivkohlefiltern. Als besonderer Ansiedlungsort haben sich die Filter der Badewasseraufbereitung erwiesen. Dies kann nur durch eine effektive Spülung des Filters sowie die Einhaltung entsprechender Chlorkonzentrationen im Wasser verhindert werden.

Da *Pseudomonas aeruginosa* und *Escherichia coli* durch ungefähr die gleiche Chlorkonzentration abgetötet werden, kann das Schwimmbeckenwasser durch entsprechende Chlorung von diesen Bakterien freigehalten werden. (1 S. 70)

Legionella pneumophila (Legionellen):

Legionellen sind weltweit das größte umwelthygienische Infektionsproblem in allen Warmwasser-Systemen. Die Bakterien wurden erstmals 1976 bei einem Veteranentreffen der „American Legion“ als Auslöser einer Epidemie mit 221 erkrankten und 34 Toten nachgewiesen. Sie sind in niedriger Konzentration in jedlichen Grund und Oberflächenwasser zu finden. Zwischen 30°C und 45°C können sie sich allerdings optimal vermehren. Es gibt viele verschiedene Arten, die gefährlichste ist allerdings die *Legionella pneumophila*. Hauptinfektionsweg ist das einatmen luftgängiger Aerosole aus dem Warmwasserbereich. Filter in Schwimmbädern, insbesondere Mehrschichtfilter mit Kohleauflagen sind bevorzugte Orte für Legionellen und gelten als besonders gefährdet. Von dort aus können sie dann ins Beckenwasser gelangen. Um einen Legionellenbefall zu bekämpfen, müssen alle Biofilme vollständig entfernt werden. Dabei ist Chlordioxid als einziges Desinfektionsmittel in der Lage, diese abzulösen und dabei die Legionellen sicher abzutöten. (1 S. 72)

2.2.3 Hygiene-Hilfsparameter

Die Hygienehilfsparameter dienen zur Kontrolle der Wasserqualität. Mit ihnen lässt sich der hygienische Zustand des Beckenwassers bestimmen. Da Proben nur die Wasserqualität zur Zeit der Probennahme darstellen, diese sich aber auch nur wenige Stunden nach Probennahme ändern können, empfiehlt sich eine dauerhafte Aufzeichnung der Hygienehilfsparameter. Diese sind:

- Gehalt an freiem und gebundenem Chlor
- pH-Wert
- Redox Spannung

Freies und gebundenes Chlor:

Mittlerweile gehören die Messung von freiem und gebundenem Chlor zum Standard. Im Bäderland wird die Chlorkonzentration durchgehend in allen Bädern gemessen. Freies Chlor zeigt hierbei an, ob im Wasser noch ausreichend Chlor vorhanden ist, um eine schnelle Desinfektion bei Verunreinigung sicherzustellen. Die DIN gibt hier für öffentliche Bäder eine Konzentration von 0,3 mg/l bis 0,6 mg/l vor.

Wenn das Chlor nun mit Verschmutzungen im Wasser reagiert, entsteht das sogenannte gebundene Chlor. Dabei reagiert das Chlor mit anorganischen und organischen Aminen zu Chloraminen. Anorganische Amine entstehen hierbei hauptsächlich aus Harnstoff, der von den Badegästen über Urin und Schweiß eingetragen wird. Die organischen Amine entstehen aus Aminosäuren, die aus der menschlichen Haut gelöst werden, sowie aus sonstigen Ausscheidungen des menschlichen Körpers. Da Chloramine leicht flüchtig sind und die Atemorgane belasten können sowie Augenreizungen hervorrufen, schreibt die DIN hier einen Höchstwert von gebundenem Chlor vor. Dieser liegt bei 0,2 mg/l Wasser. (4 S. 40)

pH-Wert:

Der pH-Wert des Wassers gibt an, ob das Wasser neutral, sauer oder basisch ist. Er dient als Maß für die Wasserstoff-Ionen-Aktivität in einer wässrigen Lösung. Die DIN schreibt für Beckenwasser einen pH-Wert im Bereich von 6,5-7,6 vor, da dieser in dem Bereich als hautverträglich gilt. Er spielt nicht nur für die Desinfektion eine wichtige Rolle, sondern beeinflusst auch die Wirksamkeit der Flockung und das korrosionsverhalten des Wassers. Zusätzlich sorgt ein neutraler pH-Wert für ein hautverträgliches Beckenwasser für den Badegast. Die freien H^+ und OH^- Ionen im Wasser sind hierbei bestimmend, ob das Wasser sauer oder basisch ist. Sind im Wasser mehr Wasserstoff-Ionen ist es sauer und der pH-Wert niedrig. Wenn die Hydroxyl-Ionen in der Überzahl sind, wird das Wasser basisch und der pH-Wert steigt. (1 S. 341-346)

Nach der DIN 19643 sind für die pH-Korrektur folgende Mittel zugelassen:

- Kohlenstoffdioxid
- Natronlauge
- Natriumcarbonat
- Natriumhydrogensulfat
- Natriumhydrogencarbonat
- Salzsäure
- Schwefelsäure

Redox-Spannung:

Die Redox-Spannung gilt als wichtigster Hygiene-Hilfsparameter. Sie ist das Maß an Reduktions- oder Oxidationsvermögen, welches das Wasser besitzt. Bei der Verwendung von Chlor ist die Redox-Spannung direkt mit der Desinfektionsleistung des freien Chlors verbunden. Dabei sind im Wasser vorhandene Verschmutzungen, reduzierende Stoffe, Chlor, Ozon sowie Chlordioxid Oxidationsmittel. Die Redox-Spannung, die im Wasser vorliegt, ist also ein genaues Maß wie hoch die desinfizierende Wirkung ist. Diese ist nicht allein vom freien Chlor abhängig, sondern auch von den bereits im Becken vorhandenen Verschmutzungen. Darum wird die Redox-Spannung - wie schon die Chlor-Konzentration - dauerhaft überwacht. Wenn Desinfektionsmittel verbraucht wird, sinkt die Redox-Spannung zu einem geringeren Wert. Wird zu viel Desinfektionsmittel hinzu gegeben, steigt die Redox-Spannung. So ist eine relativ einfache Kontrolle der Wasserqualität möglich. Die Redox-Spannung ist zudem temperatur- und pH-Wert-abhängig. Die DIN schreibt bei gechlortem Wasser eine Redox-Spannung von mindestens 750 mV vor. (1 S. 373-377)

2.3 Der Wasserkreislauf

Die Aufbereitung des Wassers erfolgt in einen kontinuierlichen Kreislaufprozess. Nachdem das Wasser dem Becken über die Überlaufrinne entzogen wurde und in den Schwallwasserbehälter geleitet wurde, wird bei Bedarf Füllwasser hinzugegeben. Das zu filternde Wasser wird aus dem Behälter abgezogen, anschließend durchläuft es die folgenden Verfahrensstufen:

- Flockung: Mit Aluminium- oder Eisensalzen
- Adsorption: Mit Pulver- oder Kornaktivkohle
- Filtration: Mit Sandfiltern oder Mehrschichtfiltern
- Filtrerrückspülung
- Erwärmung: Über einen Bypass Wärmetauscher
- Desinfektion: Mit Chlor
- pH-Korrektur: Mit Laugen oder Säuren

Wenn die Qualität des Filtrats nachlässt oder der Filterwiderstand zu groß wird, ist eine Filterspülung erforderlich, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

2.3.1 Beckenhydraulik

Die Beckenhydraulik ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass der Wasserkreislauf „Becken-Aufbereitung-Desinfektion-Becken“ problemlos funktioniert. Da sich Schwebstoffe an der Wasseroberfläche und Sinkstoffe am Beckenboden sammeln und das Desinfektionsmittel ständig verbraucht wird oder verdunstet, müssen alle Beckenteile gleichermaßen am Wasseraustausch beteiligt sein. Denn nur so werden alle Verschmutzungen schnell genug in die Aufbereitungsanlage geführt und das Wasser ausreichend gechlort, um eine gleichbleibende keimtötende Wirkung sicherzustellen. Die DIN schreibt hier vor, dass der gesamte Volumenstrom ständig und gleichmäßig über die Überlaufrinne abgeführt werden muss. Die Beckenzuläufe sind daher so anzuordnen, dass sich das Wasser gleichmäßig im ganzen Becken verteilt. Toträume sind wegen Verkeimungsgefahr zu vermeiden.

Dabei werden heute weitgehend zwei Systeme verwendet: Die horizontale Durchströmung und die vertikale Durchströmung. Bei der horizontalen Durchströmung wird das Wasser aus längsseitig angeordneten Düsen in das Becken geleitet, während bei der Vertikaldurchströmung das Wasser aus gleichmäßig über den Beckenboden verteilten Düsen austritt. Siehe Abbildung 2. Das verschmutzte Wasser wird über die umlaufende Rinne abgezogen und wird als Schwallwasser bezeichnet. (1 S. 79)

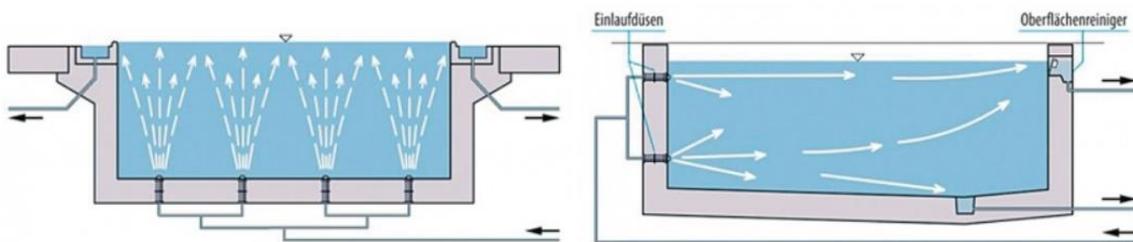


Abbildung 2 vertikale Durchströmung (links) und horizontale Durchströmung (rechts) (5)

2.3.2 Schwallwasser

Da nicht nur der umwälzende Volumenstrom Schwallwasser ist, sondern auch eine wechselnde Anzahl an Badegästen für unterschiedliche Verdrängung des Wassers sorgt, bleibt der Schwallwasserstrom nie genau vorhersehbar. Daher wird das Schwallwasser, nachdem es aus dem Becken geführt wurde, erstmal in einem Schwallwasserbehälter aufgefangen. Hier können Verdunstung und Verschleppung des Badewassers mit Füllwasser ausgeglichen werden. Von hier aus wird es dann der Aufbereitung zugeführt. Das Wasser, das aus dem Schwallwasserbehälter abgezogen wird, heißt nach der DIN 19643 Rohwasser.

2.3.3 Flockung

Um die Stoffe aus dem Rohwasser zu filtern, die von dem Filter nicht erfasst werden können, wie zum Beispiel Trübstoffe, kolloidale Stoffe und zum Teil gelöste Stoffe, wird ein Flockungsmittel hinzugegeben, um diese in eine filterbare Form zu bringen. Die DIN lässt hier verschiedene Aluminium- und Eisensalze zu. Die Verunreinigungen im Wasser sowie ein Teil der Bakterien und Viren werden durch das zugegebene Flockungsmittel zu voluminösen Teilchen mit flockiger Struktur, die von den Filtern zurückgehalten werden können. Zusätzlich werden durch die Aluminium- oder Eisensalze ortho-Phosphate aus dem Wasser gefällt.

Der Flockungsvorgang läuft dabei wie folgt ab:

Dem Wasser wird vor der Filtration ein Flockungsmittel versetzt. Nach der DIN 19643 muss dies mindestens zehn Sekunden vor dem Filter geschehen, während eine Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s nicht überschritten werden darf, damit das Flockungsmittel ausreichend Zeit hat, um seine Wirkung zu entfalten. Da Trübstoffe und kolloidal gelöste Stoffe elektrostatisch negativ geladen sind, stoßen sie sich gegenseitig ab und können sich nicht zu größeren filtrierbaren Partikeln zusammenballen. Das Flockungsmittel sorgt dafür, dass die abstoßenden Kräfte zwischen den Teilchen herabgesetzt oder aufgehoben werden. Das Flockungsmittel ist also ein Stoff mit positiver Ladung. Es entlädt die Kolloide und ermöglicht ein Zusammenballen zu größeren Flocken. Das Flockungsmittel selbst bildet nach Abgabe seiner positiven Ladung auch filtrierbare Flocken, die von dem Filter entfernt werden können. Abbildung 3 zeigt die einzelnen Schritte, die bei der Flockung ablaufen:

1. Negativ geladene Teilchen die sich abstoßen
2. Zugabe des positiv geladenen Flockungsmittels
3. Zusammenballen der einzelnen Teilchen
4. Ausbildung von Filtrierbaren Flocken

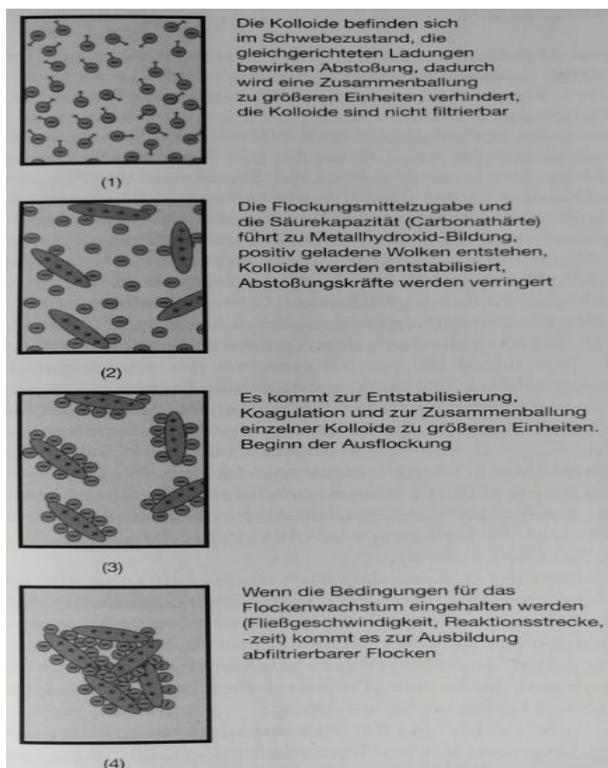


Abbildung 3 Wirkungsweise von Flockungsmittel (1 S. 139)

Wenn zu viel Flockungsmittel in das Wasser gegeben wird, kommt es zu einem Überschuss an positiven Ladungen. Dies führt wiederum zu einer schlechteren Flockung. Es ist also wichtig, dass die richtige Menge an Flockungsmittel genutzt wird. Um anschließend ausreichend große Flocken zu erzeugen, darf das Wasser nur eine geringe Fließgeschwindigkeit bei einer ausreichenden Verweilzeit vor den Filter haben. Für eine gute Flockungswirkung muss das Wasser über eine ausreichende Säurekapazität und einen entsprechenden pH-Wert verfügen. Dieser liegt bei Eisensalzen bei 6,5 bis 7,5 und bei Aluminiumsalzen bei 6,5 bis 7,2. Im Bäderland werden ausschließlich Aluminiumsalze in Form von Quickflock ($Al_2(OH)Cl_5$) verwendet. (1 S. 137-145)

Flockung ist nur bei Sandfiltern und Mehrschichtfiltern notwendig, bei der Anschwemmfiltration entfällt dieser Arbeitsschritt.

2.3.4 Adsorption

Bei der Desinfektion mit Chlor entstehen unvermeidbar Desinfektionsnebenprodukte. Diese sind eine große Anzahl von chlororganischen Verbindungen, von denen viele als gesundheitsgefährdend oder gesundheitsschädlich eingestuft werden. Deshalb muss es ein Ziel sein, möglichst viele von ihnen aus dem Badebeckenwasser zu entfernen, um ein gesundheitlich unbedenkliches Baderlebnis zu ermöglichen. Dafür gibt es verschiedene Herangehensweisen, die als Grundprinzip die Adsorption der Desinfektionsnebenprodukte an Aktivkohle nutzen. Sie wird entweder in Pulverform vor dem Filter in den Wasserstrom gegeben oder bei Kornaktivkohle als zusätzliche Filterschicht auf dem Filter angeordnet. (1 S. 117) Alternativ bietet Evoqua Water Technologies mit dem DNP NFOX-Regenerator eine Möglichkeit, um Desinfektionsnebenprodukte mit Hilfe von Nanofiltration abzutrennen.

Aktivkohle:

Aktivkohle ist ein pulverförmiges, geformtes oder körniges Produkt mit einer sehr großen inneren Oberfläche, die je nach Produkt zwischen 500 und 1500 m²/g beträgt. Ihre Makro- (>50nm), Meso- (2-50nm) und Mikroporen (<2nm) sorgen nicht durch chemische Bindung, sondern nur durch physikalische Kräfte für eine Anhaftung der unterschiedlich großen Des-

infektionsnebenprodukte. Zusätzlich kommt es an der Oberfläche der Aktivkohle zu Chemiesorption. Dabei werden chemische Stoffe an der Oberfläche der Aktivkohle gebunden und zersetzt. Dies geschieht zum Beispiel bei Chloraminen. Dabei können hohe Reaktionswärmern auftreten. Der Vorgang ist ein katalytischer Prozess, daher findet keine Anreicherung von Stoffen an der Aktivkohleoberfläche statt. (1 S. 117 f.)

Pulver-Aktivkohle (PAK):

In einer Dosieranlage wird eine Aktivkohle-Wasser-Suspension angemischt und proportional zum Volumenstrom zugesetzt. Dabei muss die Suspension stetig gerührt werden, um eine gleichbleibende Aktivkohlekonzentration zu gewährleisten. Außerdem muss der pH-Wert unter zwei gehalten werden, um eine Verkeimung der Aktivkohle zu verhindern. Zusätzlich muss die Filtrierbarkeit der Aktivkohle gewährleistet sein, damit der Filter diese zurückhalten kann. Ist sie zu fein, könnte sie durch den Filter wieder ins Beckenwasser gelangen. Die DIN 19643-2 fordert eine Zugabe von 0,3-2 Gramm pro Kubikmeter Volumenstrom. Bei moderner hochwertiger Aktivkohle können schon geringere Mengen ausreichend sein, um Desinfektionsnebenprodukte zu binden. Durch die Bestimmung des gebundenen Chlors im Beckenwasser kann die richtige Menge hinzu dosiert werden. Das Ausbleiben des typischen „Chlorgeruchs“ in der Schwimmhalle ist ein guter Indikator für die ausreichende Dosierung der Aktivkohle. (1 S. 121-126)

Korn-Aktivkohle:

Die DIN 19643-2 empfiehlt eine Korngröße von 0,6-1,6 mm oder 1,4-2,5 mm für Filterkohlen. Diese können entweder als zusätzliche Filterschicht auf dem Sandfilter eingebracht werden, dies geschieht in der Mehrschichtfiltration, oder sie werden in einem nur mit Kornaktivkohle befülltem Behälter als zusätzliche Sorptionsstufe eingesetzt. Dabei werden für die Herstellung hauptsächlich Steinkohle oder Kokosnussschalen eingesetzt, da die so erzeugte Aktivkohle besonders abriebfest ist. Durch Spülung und Sorption unterliegt die Kornaktivkohle einem stetigen Verlust. Daher muss die Schichthöhe regelmäßig kontrolliert

und gegebenenfalls aufgestockt werden, um eine gleichbleibende Adsorptionsfähigkeit zu gewährleisten. (1 S. 131 ff.)

Nanofiltration:

Bei der Nanofiltration mit dem NFOX-Regenerator wird ein Teilstrom aus dem Aufbereitungskreislauf direkt hinter dem Sandfilter abgetrennt. Desinfektionsnebenprodukte werden in der Anlage in einem Konzentrat-Volumenstrom abgetrennt. Da bei der Nanofiltration nicht nur das gebundene Chlor, sondern auch das freie Chlor zu 99 Prozent abgetrennt werden, wird nur ein Teilmengenstrom durch die Nanofiltrationsanlage geführt, um Chlor zu sparen und längere Filterlaufzeiten zu ermöglichen. Das Konzentrat wird entweder verworfen, oder es wird für die Rückspülung des Filters verwendet. Durch diesen Aufbau kann Abwasser verhindert werden. Der von Desinfektionsnebenprodukten befreite Volumenstrom wird dann in den Aufbereitungskreislauf zurückgeführt. Siehe dazu Abbildung 4. Zusätzlich sorgt der Verzicht von Pulver-Aktivkohle für längere Filterlaufzeiten, da die Aktivkohle den Filter nicht zusätzlich belastet. (6 S. 4-7)

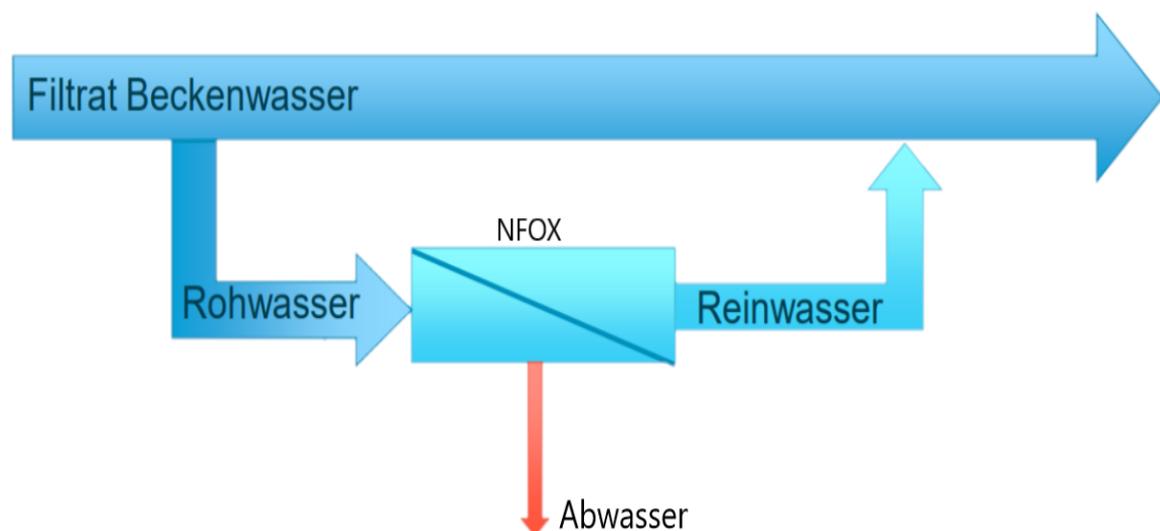


Abbildung 4 Abtrennung der Desinfektionsnebenprodukte durch NFOX-Verfahren (6 S. 7)

2.3.5 Filtration

Der wichtigste Verfahrensschritt der Wasseraufbereitung ist die Filtration. Sie ist eine mechanische Reinigung des Wassers. Es gibt dabei verschiedene Möglichkeiten das Wasser zu filtern. Bei der Ultrafiltration mit Hilfe von einer Membran sowie der Anschwemmfiltration mit Hilfe eines Filterhilfsmittels handelt es sich um eine Kuchenfiltration. Die Filtration über Schichten von körnigen Materialien, wie zum Beispiel Sand, Kies oder Aktivkohle ist dabei die älteste und gleichzeitig die am häufigsten anzutreffende Form. Diese wird auch in der Schwimmbadtechnik sehr oft genutzt. Es handelt sich hierbei um eine Mischung von Oberflächenfiltration und Tiefenfiltration, wobei die Tiefenfiltration hier ganz klar überwiegt. Die exakte Berechnung des Filtrationsprozesses ist wegen zahlreicher sich überlagernder Effekte überaus schwierig.

Begriffserklärung:

- **Volumenstrom:**

Bezeichnet die Wassermenge die stündlich den Filter durchströmt. Angegeben in m^3/h ist der Volumenstrom abhängig von Filterfläche und Filtrationsgeschwindigkeit.

- **Filtrationsgeschwindigkeit:**

Die Geschwindigkeit mit der das Wasser durch den Filter hindurch strömt. Angegeben in m/h wird die Filtrationsgeschwindigkeit berechnet indem man den Volumenstrom durch die Filterfläche dividiert.

- **Filterlaufzeit:**

Die Zeit die ein Filter zwischen den Filterspülungen arbeitet, abhängig von Filtrationsgeschwindigkeit, Verschmutzung des Wassers und Aufbau des Filters.

- **Filterwiderstand:**

Wenn die Wasserdurchlässigkeit nachlässt, der Filter also mit Schmutz beladen ist, steigt der Filterwiderstand an. Bei Schnellfiltern lässt sich dies durch eine größer werdende Druckdifferenz zwischen Rohwasser- und Filtratseite beobachten.

- **Oberflächenfiltration:**

Der Schmutz wird in den oberen Zentimetern des Filtermaterials zurückgehalten. Bei zu starker Belastung des Wassers kann sich die Filterschicht sehr schnell Zusetzen, die Folge sind häufige Filterspülungen und kurze Filterlaufzeiten.

- **Tiefenfiltration:**

Durch eine optimale Schichtung der Filtermaterialien können längere Laufzeiten erreicht werden. Dabei verwendet man als oberste Schicht Sand mit einer größeren Körnung und als untere Schicht eine feinere Körnung. Damit lässt sich der Schmutz bis in die Tiefen des Raums zurückhalten.

- **Filtermaterialien:**

Quarzsand, Quarzkies, Bims, Anthrazit, Filterkohle oder seit kurzer Zeit auch Filterperlen aus Glas.

- **Filterspülung:**

Der Vorgang bei dem die sich im Filter angesammelten Schmutzstoffe und Verunreinigungen wieder entfernt werden. Dies geschieht in der Schwimmbadtechnik mit einer Mischung aus Wasser- und Luftspülungen.

- **Freibord:**

Das Volumen im Filter über dem Filterbett, um eine Ausdehnung des Filters bei der Filterspülung zu ermöglichen.

- **Erstfiltrat:**

Das Wasser aus einem Filter, welches nach Beendigung des Spülvorgangs alle Filterschichten mit der vorgegebenen Filtrationsgeschwindigkeit durchströmt hat, allerdings noch geringe Mengen an Trubstoffen enthält und daher verworfen werden muss.

(1 S. 154 ff.)

Obwohl sich Wissenschaftler mit den wichtigen theoretischen und praktischen Zusammenhängen der Filtration beschäftigt haben, fehlt bis heute die Brücke zwischen Theorie und praktischer Anwendung. Die verbesserten Theorien haben weder bei der korrekten Dimensionierung noch bei der Verbesserung des Filtrationsergebnisses große Fortschritte erzielt. Deshalb setzt man auch heute noch auf Erfahrung oder aufwendige Versuchsreihen.

Gründe für die Probleme hängen bei der Filtration mit Transportvorgängen, Anlagerungsmechanismen und Abreißvorgängen durch Scherkräfte zusammen. Die Schmutzpartikel müssen bei der Filtration zuerst sehr dicht an das Filtermedium gebracht werden, um dem Wasser dann entzogen zu werden. Nach der Anlagerung an die Filterkörner können die Schmutzpartikel anschließend erneut in das Wasser gelangen. Da diese Vorgänge parallel ablaufen, ist es überaus schwierig den Filtrationsprozess in seiner Gesamtheit mathematisch zu beschreiben. Zusätzlich verkompliziert wird die Beschreibung und Berechnung der Filtration, weil unterschiedliche Transport- und Anlagerungsmechanismen mal eine größere und mal eine kleinere Rolle haben. In einem Sandfilter kommen dabei unter anderem folgende Vorgänge zusammen:

- **Adsorptionsvorgänge:**

Unter Adsorption (lat.: adsorbere = ansaugen) versteht man die Anlagerung von Teilchen aus einer flüssigen Phase an der Oberfläche eines Festkörpers. Da sich dabei der gelöste Stoff an der Oberfläche anlagert, findet bei diesem Vorgang immer eine Konzentrationsänderung an der Phasengrenzfläche statt. (1 S. 118)

- **Physisorption:**

Als Physisorption bezeichnet man Adsorption, die nicht mit einer festen chemischen Bindung einhergeht. Sie entsteht meistens durch die eher lose Bindung aufgrund von Van-der-Vaals Kräften. Diese basieren auf spontanen Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, welche auch bei ungeladenen Teilchen auftreten können. Das sorgt dafür, dass sie zwar nicht so stark sind wie chemische Bindungen, allerdings können sie zwischen fast allen Materialien auftreten. Dadurch erfolgt keine Passivierung durch eine bereits absorbierte Schicht. (7 S. 37)

- **Chemische Vorgänge:**

Chemisorption geht mit dem Austausch von Ladungen einher und führt zu einer stärkeren Bindung an das Filtermaterial, als bei reiner Physisorption. Allerdings wird die Oberfläche passiviert. Dadurch kann sich eine Monoschicht bilden, die eine Reaktion zwischen Filtermaterial und Schmutzpartikeln verhindert.

- **Sedimentation:**
Partikel mit einem relativ großen Dichteunterschied zu der Flüssigkeit, die filtriert werden soll, sowie einem ausreichend großem Durchmesser verlassen durch Schwerkraftwirkung ihre Strombahn und schlagen sich auf dem Filtermaterial nieder. (8 S. 748 ff.)
- **Sperreffekt:**
Auch wenn Partikel aufgrund ihrer Größe das Filtermedium passieren, können sie durch eine Verkleinerung der Strömungsbahnen zwischen den Filterkornoberflächen trotzdem auf das Filtermaterial treffen und hier mit Hilfe von Adhäsionskräften gebunden werden. (9 S. 5)
- **Partikelträgheit:**
Hierbei handelt es sich um eine Kombination von Sperreffekt und Sedimentation. Die Schmutzpartikel können aufgrund ihrer Trägheit der Strömung nicht mehr folgen. Dies führt zu einem Verlassen der Strömungsbahn und einer Ablagerung auf dem Filtermedium. (9 S. 19)
- **Diffusion:**
Diffusion beschreibt die Bewegung von sehr kleinen Teilchen aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung. Diese nimmt bei abnehmender Größe der Partikel zu. Durch diesen Effekt können die Teilchen dann ihre Strömungsbahn verlassen und am Filtermedium angelagert werden. (9 S. 139)
- **Elektrische Kräfte:**
Die Partikel werden aufgrund von elektrischen Kräften elektrostatisch aufgeladen und in einem elektrischen Feld abgelenkt. So werden sie aus der Strömung gesteuert und können sich an dem Filtermedium ablagern. (9 S. 5)
- **Ionische Wechselwirkung:**
Ionen wirken gegenseitig aufeinander, wobei sich gleich geladene Ionen abstoßen und ungleich geladene Ionen anziehen. Wenn also auf der Oberfläche des Filtermaterials ungleich zu den Schmutzpartikeln geladene Ionen vorhanden sind, wird die Wahrscheinlichkeit erhöht diese aus dem Wasser zu filtern.

- **Oberfläche des Filtermediums:**

Ein nicht zu vernachlässigender Faktor auf die Filterqualität hat die Rauigkeit des Filtermaterials. Kleine Vertiefungen an der Oberfläche des Filtermediums können den Abscheidegrad erheblich erhöhen. (1 S. 157 f.)

Bei diesen Vorgängen hat zum Beispiel die Diffusion bei kleinen Teilchen eine größere Relevanz als bei großen Teilchen. Die Sedimentation spielt bei schwereren Teilchen eine größere Rolle als bei leichten Teilchen. Es laufen also viele Vorgänge parallel ab, die sich gegebenenfalls auch gegenseitig beeinflussen. Versucht man nun die überaus komplexe Theorie in die Praxis zu übertragen, stellt man schnell fest, dass die sich stetig ändernde Zusammensetzung des Wassers sowie Temperaturschwankungen eine Berechnung weiter erschweren. Daher ist bis heute eine genaue Bestimmung der Filterparameter so komplex, dass man sich auf Versuchsreihen verlässt, um zu aussagekräftigen Ergebnissen zu kommen. (7 S. 111 ff.) Trotzdem soll hier kurz auf einige Berechnungsansätze eingegangen werden. Der Volumenstrom eines Filters lässt sich noch verhältnismäßig einfach über Filterfläche und Filtergeschwindigkeit berechnen: (1 S. 154)

$$\dot{V} = A \cdot w_F$$

Formel 1 Volumenstrom eines Filters

Ein Ansatz zur Berechnung der Abnahme der Feststoffkonzentration wurde von Iwasaki 1937 aufgestellt. Dabei wird die Abnahme der Feststoffkonzentration in Durchströmungsrichtung $-dc_V$ proportional zu vorhandenen Konzentration c_V angesetzt. Siehe dazu Abbildung 5:

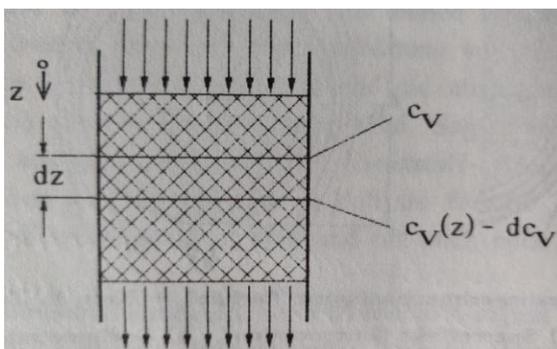


Abbildung 5 Filterdurchströmung (9 S. 140)

Daraus ergibt sich folgende Formel: (9 S. 140)

$$-\frac{dc_V}{dz} = \lambda \cdot c_V$$

Formel 2 Abnahme der Feststoffkonzentration

Der Filterkoeffizient λ umfasst hier alle wichtigen Einflussgrößen. Diese sind unter anderem die Korngröße, die Hafteigenschaften und Transporteigenschaften der Filterkörner und Partikel, Porosität und Filtrationsgeschwindigkeit. Die Beladung μ beschreibt das abgeschiedene Feststoffvolumen V_s bezogen auf das Filtervolumen V_F : (9 S. 140)

$$\mu = \frac{V_s}{V_F}$$

Formel 3 Beladung des Filters

Daraus folgt, dass λ nur zu Beginn der Filtration als konstant angesehen werden kann. Daraus folgt für die Iwasaki-Gleichung: (9 S. 140)

$$c_V = c_{V0} \cdot \exp(-\lambda_0 \cdot z)$$

Formel 4 Iwasaki-Gleichung

Das heißt also, dass die Partikelkonzentration in der Flüssigkeit exponentiell abnimmt. Die Beladung der obersten Schicht ist also am größten, je tiefer man in den Filter kommt desto geringer wird die Konzentration. Die Änderung von λ kann durch die Korrekturfunktion f_λ näherungsweise beschrieben werden. Dabei ist μ_s die Sättigungbeladung: (9 S. 140)

$$\lambda = \lambda_0 \cdot f_\lambda\left(\frac{\mu}{\mu_s}, \dots\right)$$

Formel 5 Filterkoeffizient

Mit zunehmender Beladung wird die Aufnahmefähigkeit der Filterschicht kleiner. Wegen der zahlreichen Einflüsse und komplexen Vorgängen lässt sich jedoch keine allgemeine Gesetzmäßigkeit bestimmen.

Ein weiterer wichtiger Kennwert ist der Druckverlust im Filter. Dieser ist in der Anfangsphase der Filtration mit der Carman-Kozeny-Gleichung beschreiben: (9 S. 69)

$$\Delta p = L \cdot k(\varepsilon) \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot S_V^2 \cdot \eta \cdot \bar{w}$$

Formel 6 Druckverlust

Mit der zu durchströmenden Länge L, der Kozeny-Konstanten k(ε) der Porosität ε:

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V}$$

Formel 7 Porosität

Welche aus Volumen und Hohlraumvolumen berechnet wird. (9 S. 62) Sowie der Spezifischen Oberfläche S_V:

$$S_V = \frac{S_{ges}}{V}$$

Formel 8 Spezifische Oberfläche

Und der dynamischen Viskosität η und der Leerrohrgeschwindigkeit \bar{w} . Den weiteren zeitlichen Verlauf über die Schichthöhe muss empirisch erfasst werden. Die Beladung der Schicht, beginnend im oberen Teil lässt den Druckverlust stark ansteigen. Für den Gesamtverlust über die Zeit wurde mit Hilfe einiger Vereinfachungen ein linearer Zusammenhang gefunden: (9 S. 141)

$$\Delta p_V(t) = \Delta p_{V0} + K \cdot c_{V0} \cdot \bar{w} \cdot t$$

Formel 9 Druckverlust über Zeit

Wobei die mit 0 gekennzeichneten Werte zum Zeitpunkt $t=0$ gelten. K ist eine im Einzelfall empirisch zu ermittelnde Konstante. (9 S. 141)

2.3.6 Filtrerrückspülung

Die Filtrerrückspülung dient dazu, die im Filter angesammelten Schmutzpartikel wieder zu entfernen. Dies wird notwendig, wenn entweder der Filterwiderstand einen zu hohen Wert erreicht (wenn die Druckdifferenz zu hoch wird), oder es zu einem Trübungsdurchbruch kommt (der Filter nicht mehr seiner Aufgabe nachkommen kann ein ausreichend sauberes Filtrat zu produzieren). Beim Bäderland Hamburg hat es sich bewährt, die Filterspülung unabhängig von der Verschmutzung des Filters in regelmäßigen Abständen durchzuführen. So kann man auch bei fehlerhafter Messtechnik sicherstellen, dass immer die beste Wasserqualität gewährleistet ist. Zusätzlich beugt regelmäßiges Spülen auch bei geringer Belastung des Wassers einer Verkeimung des Filters vor. Dabei setzt man im Bäderland auf eine Kombination von Wasser- und Luftspülung. Diese läuft je nach Filtertyp mit unterschiedlichen Spülzeiten, jedoch immer nach dem gleichen Prinzip ab. Bei der Filterspülung kommt es zu einer Filterbettausdehnung. Diese ist je nach Filtermaterial und der Spülgeschwindigkeit unterschiedlich groß. Die Konsequenz ist, dass die Filterspülung für gewöhnlich wie folgt abläuft:

- **Belüftung des Filters und Absenkung des Wassers bis zur Oberfläche des Filterbetts:**

Dies ist notwendig, um einen Austrag des Filtermaterial zu verhindern, da sich das Filterbett während der Filterspülung um mindestens 10 Prozent ausdehnt. Eine größere Ausdehnung des Filterbetts sorgt für einen besseren Spülvorgang. Allerdings kommt es bei zu hohen Spülgeschwindigkeiten zu einem Austrag des Filtermaterials, abhängig von der Höhe des Freibords im Filter.

- **Luftspülung:**

Bei der Filterspülung fällt der Luftspülung die wichtigste Aufgabe zu. Durch sie werden die dem Filtermaterial anhaftenden Schmutzteilchen gelöst. Es kommt hier zusätzlich zu einer starken Bewegung des Filtermaterials. Dabei reiben die Körner aneinander, was dazu führt, dass eine Verbackung des Filtermaterials verhindert wird.

- **Entlüftung des Filters:**

Eine kurze Ruhephase, um der Luft Zeit zu geben das Filterbett zu verlassen. Dies sorgt dafür dass sich das Filterbett setzen kann, da die Wasserspülung sonst Filtermaterial aus dem Filter austragen könnte.

- **Wasserspülung:**

Nach erfolgreichem Aufbrechen und Ablösen der Schmutzpartikel durch die Luftspülung hat die Wasserspülung die Aufgabe, die gelösten Verunreinigungen aus dem Filter auszutragen. Die Spülgeschwindigkeit ist dabei abhängig von der Körnung des Filtermaterials. Siehe Tabelle 2:

Tabelle 2 Spülwassergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Körnung des Filtersandes (7 S. 119)

Körnung des Filtersands in mm	Spülwassergeschwindigkeit $q_A/m/h$
0,63–1,00	50–55 (50)
0,71–1,25	60–65 (60)
1,00–2,20	85–90 (85)

- **Abführung des Erstfiltrats:**

Nach der Filterspülung muss das Erstfiltrat solange abgeführt werden, bis der Filter wieder eine erstklassige Filtratqualität liefert. Erst dann kann die Filtration wieder aufgenommen werden.

- **Wiederaufnahme der Wasserfiltration:**

Nachdem die Filtratqualität den Anforderungen genügt, wird die Filtration wieder aufgenommen.

(7 S. 117-120)

2.3.7 Erwärmung

Nachdem das Rohwasser filtriert wurde, folgt die Erwärmung des Wassers - welches nun Reinwasser genannt wird, auf die gewünschte Badewassertemperatur. Dies erfolgt über einen Wärmetauscher, der die notwendige Wärme an das Wasser abgibt, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Dabei kann entweder der gesamte Volumenstrom erwärmt werden, oder ein Teil des Wassers wird über einen Bypass erhitzt und dann dem Gesamtvolumenstrom wieder zugeführt.

2.3.8 Desinfektion

Um ein sicheres Badevergnügen zu gewährleisten, ist die Desinfektion des gereinigten Wassers unverzichtbar. Die DIN 19643 schreibt hier eine Abtötung von 99,99 Prozent aller Bakterien innerhalb von 30 Sekunden vor. Dafür hat sich Chlor bewährt. Die DIN verlangt eine Zugabe von mindestens 2g je Kubikmeter Aufbereitungsvolumenstrom vor, wobei die Konzentration im Beckenwasser bei 0,3-0,6 mg/l liegen sollte. (4 S. 40)

Das Chlor wird meistens in Form von Chlorgas eingesetzt und mit Hilfe von Chlorgasdosierungsanlagen, die nach dem Vakuumprinzip arbeiten, in das Wasser eingebracht. Das bedeutet, dass die gesamten chlorführenden Leitungen mit Unterdruck arbeiten, um ein Ausreten des Chlorgases zu verhindern, da Chlorgas, wenn es nicht im Wasser gelöst ist, hochgiftig ist. (1 S. 249 f.)

Um die bei der Reaktion entstehende Salzsäure zu neutralisieren, wird die salzsäurehaltige Chlorklösung durch Mamorkies geführt. Hier reagieren dann Mamorkies (CaCO_3) und Salzsäure (HCl) zu Calciumchlorid (CaCl_2), Wasser (H_2O) und Kohlenstoffdioxid (CO_2).

Die Chlorung ist kontinuierlich, also auch außerhalb der Öffnungszeiten durchzuführen, um eine Verkeimung zu verhindern und gleichbleibende Wasserqualität sicher zu stellen. Damit die Chlorzugabe zum Filtrat nicht unterbrochen wird, müssen ausreichende Chlorvorräte vorhanden sein. Wenn die Chlorung des Wassers nicht mehr gewährleistet ist, muss eine Aussetzung des Badebetriebs erfolgen. (4 S. 41)

Im Fall einer akuten Verkeimung kann durch die manuelle Zugabe von Natriumhypochlorid (Chlorbleichlauge/Natronbleichlauge) das Wasser hochgechlort werden, um die Verkeimungen zu neutralisieren und damit einen sicheren Badebetrieb wiederherzustellen. Da das Natriumhypochlorid aber sehr teuer ist, wird es für gewöhnlich nur als Hilfs- oder Notchlorung verwendet.

2.3.9 pH-Wert Korrektur

Der letzte Schritt bevor das Wasser wieder dem Becken zugeführt wird, ist die pH-Wert Korrektur. Wie auf Seite 19 erwähnt, spielt dieser eine wichtige Rolle für die Desinfektion, Flockung und die Hautverträglichkeit des Wassers. Zusätzlich dazu greift ein zu saures Wasser die Betonfugen im Becken sowie Kanalisationsrohre aus Beton an. Gelangt zu saures Wasser in die Kläranlage kann deren biologische Aufbereitungsstufe gestört werden. Daher sollte der pH-Wert immer in dem von der DIN vorgegebenen Bereich liegen. Bei den Bädern des Bäderlands erfolgt die pH-Wert Korrektur bei einem zu hohen Wert mit Hilfe von Schwefelsäure (H_2SO_4). Bei einem zu niedrigen pH-Wert wird mit Hilfe von Natriumhydroxid (NaOH) oder Natriumcarbonat (Na_2CO_3) gegengesteuert. (1 S. 364 ff.)

2.4 Formeln für den Wirtschaftlichkeitsvergleich

Die verschiedenen Filteranlagen in den Bädern sollen nach wirtschaftlichen Aspekten miteinander verglichen werden. Dafür werden die Investitionskosten, die baulichen Maßnahmen einschließlich der Anschaffungskosten für die Filteranlagen erfasst. Diese werden dann mit Blick auf ihre angenommene Nutzungsdauer sowie den Abschreibungszeitraum in Kosten pro Jahr umgerechnet. Zusätzlich werden auch die Betriebskosten, die sich aus Stromkosten, Wasser- und Abwasserkosten, Wärmekosten, Chemikalienkosten sowie Kosten für Wartung und Reparatur zusammensetzen, erfasst. Dabei werden alle Kosten als Nettokosten ohne Steuern berechnet.

2.4.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten sind die zur Erstellung und zum Erwerb oder zur Erneuerung der Anlage erforderlichen einmalig aufzuwendenden Kosten. Diese werden auf Jahreskosten umgerechnet. Dafür sollen die Investitionskosten I_K mit den Annuitätsfaktor a multipliziert werden. Dadurch ergeben sich die Investitionskosten pro Jahr und die Kapitalkosten K_i . (10 S. 172)

$$K_i = I_k \cdot a$$

Formel 10 Kapitalkosten

Annuität sind die Abschreibung und Verzinsung. Der mathematische Ansatz für den Kapitalwiedergewinnungsfaktor - die Annuität - lautet:

$$a = \frac{(1+zs)^n \cdot zs}{(1+zs)^n - 1} \quad (10 \text{ S. } 97)$$

Formel 11 Annuität

Der erste große Kostenpunkt ist der Bau des Technikraums. Dieser befindet sich für gewöhnlich unter dem Schwimmbad, deshalb werden auch die Aushubkosten erfasst.

Da die Filter mit Abstand die größten Bauteile in einer Filteranlage sind, werden sie als Grundlage genommen. Um ausreichend Platz für Bedienung, Wartung und Peripherie zu schaffen, werden zu Höhe, Breite und Länge jeweils ein Meter addiert. Die so bestimmte Größe des Technikraums wird dann mit den Kosten für Tiefbauaushub pro Quadratmeter multipliziert. Daraus ergibt sich folgende Formel für die Kosten des Technikraums:

$$K_T = (h + 1m) \cdot (b + 1m) \cdot (l + 1m) \cdot K_{AH}$$

Formel 12 Kosten Technikraum

Weitere Kosten für die Filteranlage, die Peripherie der Anlage, sowie die Inbetriebnahme von Steuerungssoftware und Filteranlage werden der Abschlussrechnung des jeweiligen Bads entnommen. Da diese nicht alle zur gleichen Zeit fertiggestellt wurden, werden die Kosten mithilfe des Baupreisindizes für das Jahr 2018 berechnet. (11) Dafür wird der Kaufpreis mit der Preissteigerung P_S wie folgt berechnet:

$$K_{IF} = K_{TC} \cdot \left(1 + \frac{P_S \text{ in } \%}{100}\right)$$

Formel 13 Preissteigerung

2.4.2 Laufende Kosten

Bei dem Betrieb von Schwimmbädern stellen die laufenden Kosten den bei weitem größten Kostenpunkt da. Das hängt damit zusammen, dass sowohl die Stromkosten für die Wasserrumwälzung und den Betrieb von Dosier- und Filteranlagen als auch die Wärmekosten für die Erwärmung des Beckenwassers sehr hoch ausfallen. Dazu kommen noch Kosten für Frischwasser, sowie die Entsorgung des verschmutzten Wassers (Schlammwasser) in den Siel an. Als letzter Betriebskostenpunkt werden die Kosten für Chemikalien und Verbrauchsmaterial betrachtet. Da es sich bei den zu vergleichenden Bädern um sehr moderne Anlagen handelt, fallen momentan noch keine größeren Reparatur- und Wartungskosten an. Daher sollen diese nicht mit in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einfließen.

2.4.2.1 Strom

Für die Berechnung der Stromkosten werden der Stromverbrauch der Filtrat- und Rohwasserpumpen, der PAK, des Spülluftgebläses und der Spülwasserpumpe (falls es eine dedizierte Spülwasserpumpe gibt, und ihre Aufgabe nicht von einer der Filtrat- oder Rohwasserpumpen übernommen wird) genutzt. Da die Anlagen für Chemikaliendosierung und Chlorung bei allen Bädern gleich sind und diese auch keine signifikante Strommenge verbrauchen, werden sie hier nicht näher aufgeführt.

Die oben genannten Stromverbraucher in den zu vergleichenden Bädern sind weitgehend mit Frequenzumformern ausgestattet. Deshalb kann der Stromverbrauch jedes Verbrauchers abgelesen werden. Auf dem Frequenzumrichter werden der aktuelle Stromverbrauch, die Gesamtlaufzeit sowie der gesamte Stromverbrauch angezeigt. Da der aktuelle Stromverbrauch ständig schwankt (z.B. aufgrund von Auslastung) und einige Bäder mit einer Nachtabsenkung (Absenkung des Wasserspiegels unter die umlaufende Rinne) arbeiten, wird der Gesamtstromverbrauch W_{ges} durch die Laufzeit t_{ges} geteilt, um einen konkreten Stromverbrauch pro Stunde zu erhalten. Es wird angenommen, dass die Filteranlage 355 Tage im Jahr läuft, um Störungen und Ausfälle des Systems zu berücksichtigen. Damit und mit dem Strompreis K_s , den das Bäderland an den Stromversorger entrichten muss, werden dann die Stromkosten pro Jahr bestimmt.

$$K_{Sges} = \frac{W_{ges}}{t_{ges}} \cdot 24 \cdot 355 \cdot K_S$$

Formel 14 Stromkosten pro Jahr

Bei den Geräten, die über keinen Frequenzumrichter verfügen, wird die angegebene Leistung mit der jährlichen Betriebszeit multipliziert, um einen Stromverbrauch zu errechnen. Die jährliche Betriebszeit ergibt sich aus der Zeit, welche die Geräte laufen multipliziert mit der Anzahl der Einschaltungen pro Jahr:

$$t_{ges} = \frac{355 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ Stunden}}{\text{Intervall der Einschaltung in Stunden}} \cdot \text{Laufzeit des Geräts}$$

Formel 15 Gesamtlaufzeit pro Jahr

Multipliziert mit der Leistung des Geräts und dem Strompreis von 0,15 Euro pro Kilowattstunde ergeben sich so die Stromkosten pro Jahr:

$$K_{ges} = t_{ges} \cdot P \cdot 0,15\text{€}$$

Formel 16 Stromkosten pro Jahr

Abschließend werden alle Stromkosten addiert, um die gesamten Stromkosten pro Jahr zu bestimmen.

2.4.2.2 Wasser und Abwasser

Die Wasserkosten lassen sich ganz einfach bestimmen, da es für jedes Becken einen eigenen Wasserzähler gibt. Der Zähler nimmt den Wasserverbrauch V_W in Kubikmetern auf. Dieser Wert muss dann nur mit dem Wasserpreis multipliziert werden, um die Wasserkosten zu erhalten. Für das Abwasser wird die Verdunstung und der Austrag von Wasser durch die Besucher vernachlässigt. Der Ansatz ist also, dass alles was an Frischwasser in das Becken

kommt, früher oder später als Abwasser das Becken wieder verlassen muss. Folglich wird hier der Jahreswasserverbrauch mit dem addierten Frischwasserpreis K_{FW} und Abwasserpreis K_{AW} pro Kubikmeter multipliziert. Es ergibt sich für die Frisch- und Abwasserkosten also folgende Formel:

$$K_W = V_W \cdot (K_{FW} + K_{AW})$$

Formel 17 Kosten Frischwasser und Abwasser

2.4.2.3 Wärme

Der Wärmebedarf lässt sich auch über den Wasserbedarf berechnen. Dafür wird der Wasserverbrauch V_W in Litern mit dem Temperaturanstieg ΔT (bei allen Bädern als gleich angenommen um Vergleichbarkeit zu gewährleisten) und der Wärmekapazität c multipliziert. Zusätzlich muss man die Umrechnung von Joule in Wattstunden beachten und erhält damit die Wärmekosten in Euro pro Jahr. (12)

$$K_H = \frac{V_W \cdot 1000 \cdot \Delta T \cdot c}{3600} \cdot K_{HE}$$

Formel 18 Wärmekosten

2.4.2.4 Chemikalien und Verbrauchsmaterial

Die Kosten für Chemikalien und Verbrauchsmaterial wurden aus dem Buchhaltungsprogramm (SAP) des Bäderlands Hamburg entnommen. Da die betrachteten Bäder über mehrere Becken verfügen, wird der Bedarf anteilig für das betrachtete Becken über den Volumenstrom \dot{V} bestimmt. Die Bestellung von Chemikalien und Verbrauchsgütern der letzten fünf Jahre wird ausgewertet, um einen vergleichbaren Durchschnitt zu bekommen und eventuelle Ausreißer auszusortieren. In Absprache mit Mitarbeitern aus der Abteilung Engineering und den einzelnen zu betrachtenden Bädern wurde ein Materialbedarf pro Jahr aufgestellt. Der Preis für die einzelnen Güter wurde dann über den Einkauf bestimmt. Aufsummiert ergeben sich daraus die gesamten Materialkosten K_C .

$$K_C = K_{kg} \cdot m \cdot \frac{\dot{V}}{\dot{V}_{ges}}$$

Formel 19 Chemikalienkosten

2.4.2.5 Gesamte Kosten

Die gesamten Kosten K_{ges} pro Kubikmeter ergeben sich aus den Kapitalkosten $K_{I m^3}$ und den laufenden Kosten K_{m^3} und werden wie folgt berechnet:

$$K_{ges} = K_{m^3} + K_{I m^3}$$

Formel 20 Kosten gesamt

Anschließend soll berechnet werden, wie lange es dauert bis die Gewinnschwelle bei einem Neubau der Filteranlage überschritten wird:

Gewinnschwelle

$$= \frac{\text{Gesamtkosten Hamburger System}}{\text{Gesamtkosten Hamburger System} - \text{Gesamtkosten des zu vergleichenden Filter}}$$

Formel 21 Gewinnschwelle

3. Stand der Technik

In der DIN 19643 sind folgende Filtrationsverfahren für die Reinigung von Schwimmbadwasser vorgeschrieben:

- Ultrafiltration
- Anschwemmfiltration
- Festbettfiltration

Dabei gewinnt die Ultrafiltration mit Membranen als Filtrationsverfahren immer mehr an Bedeutung. Das liegt zum einen an der geringen Größe der Anlage und damit an den geringeren Baukosten für den Technikraum, zum anderen an der hohen Leistungsfähigkeit, das heißt einer sehr guten Filtratqualität aus einer Ultrafiltrationsanlage. Zusätzlich bieten sich noch die Vorteile, dass auf Flockungsmittel verzichtet werden kann und durch Mikrofiltration aufbereitetes Spülwasser nach einer Entchlorung durch einen Korn-Aktivkohlefilter als Toilettenspülwasser oder Wasser zu Bewässerung der Außenanlagen eingesetzt werden kann. Alternativ kann das Oberflächenwasser so in den Regenwasserkanal eingeleitet werden, wodurch im Vergleich zum Abwasser Gebühren gespart werden können. Allerdings stehen diesen Vorteilen ein erheblich höherer Anschaffungspreis sowie eine relativ geringe Umwälzmenge im Vergleich zu anderen Filtrationsverfahren gegenüber. Dies kann insbesondere bei der Nachrüstung einer solchen Anlage Probleme bei der Beckenhydraulik bereiten, da aufgrund des niedrigeren Volumenstroms ein erheblich geringerer Wasseraustausch stattfindet. Da die Bäderland Hamburg GmbH in keinem ihrer 28 Anlagen auf Ultrafiltration setzt und dies für die nähere Zukunft auch nicht geplant ist, soll hier nicht näher auf die Ultrafiltration mit Hilfe der Membrantechnik eingegangen werden. (1 S. 196 ff.)

3.1.1 Anschwemmfiltration

Im Jahr 1976 ist die erste Norm für Anschwemmfilter erschienen. Diese Norm DIN 19624 gilt dabei auch für den Schwimmbadbetrieb. Später wurde sie in die DIN 19643-2 als Verfahrenskombination mit Adsorption an Pulver-Aktivkohle aufgenommen. Hier werden die Voraussetzungen und technischen Anforderungen an Filtrationsgeschwindigkeit, Dosierung

des Anschwemmmaterials als auch die Spülung des Filters definiert.

Anschwemmfiler können entweder als Druckanschwemmfiler ausgeführt werden, diese arbeiten mit einem Überdruck, welcher das Wasser durch den Filter drückt. Ist das der Fall, entspricht der Anlagenaufbau im Wesentlichen dem von Druck-Festbettfiltern. Oder sie werden als Vakuumanschwemmfiler ausgeführt, diese arbeiten dann mit Unterdruck, das bedeutet, dass das zu filternde Wasser durch die Filterschicht gesaugt wird. In diesem Fall benötigen sie eine Rohwasser- und eine Filtratpumpe. Bei Druckanschwemmfiltern ist lediglich eine Rohwasserpumpe notwendig. Siehe dazu ein vereinfachtes Schema von Anschwemmfiltern in Abbildung 6. (1 S. 186 f.)

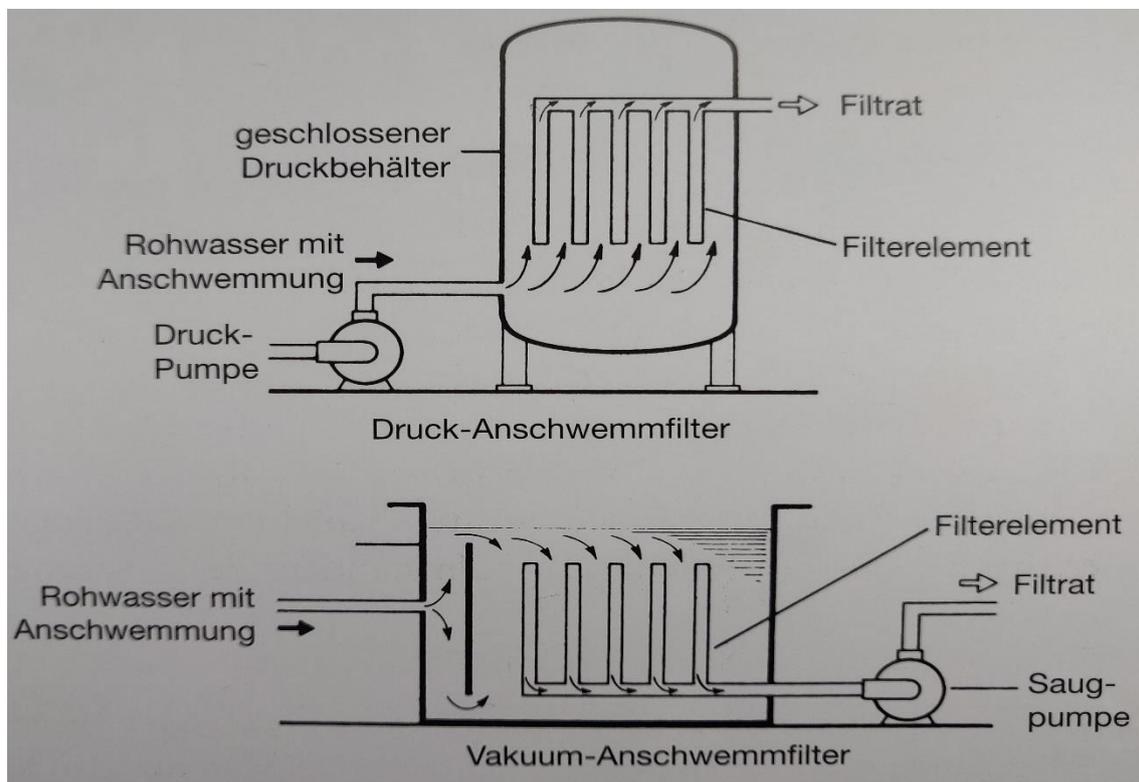


Abbildung 6 Vereinfachtes Schema Druck- und Vakuumanschwemmfiler (1 S. 191)

Ein Anschwemmfiler funktioniert dabei wie folgt:

Dem Rohwasser das filtriert werden soll, wird ein Anschwemmmaterial und die benötigten Filterhilfsmittel, um das gewünschte Filtratergebnis zu erreichen, hinzugegeben. Das Anschwemmmaterial verteilt sich dann gleichmäßig auf den Filterelementen und bildet eine

poröse Filterschicht. Wenn sich diese Filterschicht gebildet hat, kann mit der Filtration begonnen werden. Das Filtermaterial ist für gewöhnlich ein pulverförmiges oder faseriges Produkt mit einer hohen Oberflächenwirksamkeit. In der Schwimmbadtechnik verwendet man für gewöhnlich Kieselgur. Zusatzhilfsstoff ist Pulver-Aktivkohle, um das gebundene Chlor aus dem Wasser zu entfernen. Um die Phosphatbelastung zu reduzieren gibt es spezielle Zusatzstoffe, die mit der Kieselgur oder separat zugegeben werden können. Alternativ wird die Frischwasserzugabe erhöht, um die Phosphatkonzentration durch Verdünnung unter Kontrolle zu haben.

Die Filterelemente - bei Druckfiltern Filterkerzen (röhrenförmige Hohlkörper) und bei Saugfiltern Filterplatten, sind mit einem feinen Netz mit einer bestimmten Durchlässigkeit bespannt. Die äußere Oberfläche ist dabei die Filterfläche des Anschwemmfilters. Die Filterschicht wird dann vor dem Filtrationsvorgang an die Filterflächen angeschwemmt. Sie ist nur ein paar Millimeter dick und für die Filtration zuständig. Das Netz dient hier nur als Träger für das eigentliche Filtermaterial. Die Güte der Filtration hängt hierbei von der Porengröße des Filtermaterials ab. Alle Schmutzpartikel die größer als diese Poren sind, werden von der Filterschicht zurückgehalten und damit entfernt. Dabei wird während der Filterlaufzeit kontinuierlich eine geringe Menge Filtermaterial in den Volumenstrom gegeben. Diese fortlaufende Anschwemmung hilft dabei den Filterkuchen aufzulockern und durchlässiger zu machen, um eine frühzeitige Filterverstopfung zu verhindern. Flockungsmittel ist für die Filtration mit einem Anschwemmfilter nicht notwendig und kann die Effizienz des Filters maßgeblich herabsetzen, da die größeren Flocken die Filterelemente sehr schnell zusetzen und damit häufigere Reinigungsvorgänge erforderlich machen. (13 S. 145 f.) Wenn ein bestimmter Filterwiderstand erreicht wird, wird die Filterschicht durch Spülung, Abstreif- oder Abspritzeinrichtungen entfernt. Dadurch ergibt sich ein sehr geringer Spülwasserbedarf, da die Verunreinigungen nur von den Filterelementen abgespült werden müssen. Zusätzlich haben Anschwemmfilter im Vergleich zu Sandfiltern eine längere Filterlaufzeit. Weitere Vorteile sind der geringe Platzbedarf und die einfache Bedienung.

Nachteile sind unter anderem, dass sich durch fehlen der Flockung die Phosphate im Wasserkreislauf aufkonzentrieren können und das Schlammwasser wegen teilweise sehr hoher Feststoffbelastung schwierig zu entsorgen ist. Einen weiteren Nachteil bringt die Kieselgur mit sich.

Kieselgur:

Kieselgur wird auch Diatomit oder Diatomeenerde genannt. Sie besteht aus Panzern von mikroskopisch kleinen fossilen Kieselalgen. Von ihnen sind nur der Panzer übriggeblieben, welcher aus Kieselsäuregerüsten bestehen. Die Kieselgur bestehen zu 85-95 Prozent aus Kieselsäure (SiO_2), zu vier Prozent aus Aluminiumoxid (AlO_2) und enthält geringe Mengen anderer im Wasser unlösliche Stoffe. In frühen erdgeschichtlichen Epochen haben sich große Kieselgur Ablagerungen gebildet, welche heute im Tagebau zum Beispiel in der Lüneburger Heide abgebaut werden. Die so gewonnenen Kieselalgen werden getrocknet, gemahlen und bei Temperaturen von 900 bis 1200 °C gebrannt. Anschließend wird die Kieselgur im Windsichter in bestimmte Korngrößen aufgeteilt. (13 S. 146 f.)

Die Kieselgur wurde von der WHO (World Health Organisation) als krebserregende Substanz eingestuft. Das gilt allerdings nur für das Einatmen des Staubes. In der Funktion als Anschwemmfilter ist sie absolut unbedenklich und wird zum Beispiel auch bei der Filtration von Trübstoffen aus Bier oder Wein eingesetzt. Die Krebsgefahr macht es leider erforderlich bei der Bestückung des Anschwemmfilters entsprechende Schutzkleidung zu tragen. Die nötigen Schutzmaßnahmen bei dem Umgang mit Gefahrstoffen sind in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 500) geregelt und auf der Website der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin geregelt. (1 S. 189 f.) (14)

3.1.2 Festbettfiltration

Bei der Festbettfiltration unterscheidet man zwischen Langsam- und Schnellfiltern. Bei der Langsamfiltration werden offene drucklose Filterbecken verwendet. Das Druckgefälle über den der Filtrationsvorgang abläuft, wird hier durch den Wasserüberstau gewährleistet. Wegen des sehr großen Platzbedarfs, der langsamen Filtergeschwindigkeit und einem hohen Aufwand bei der Filterregeneration werden diese Filter für gewöhnlich nicht mehr eingesetzt.

Schnellfilter zeichnen sich durch eine erheblich höhere Filtergeschwindigkeit im Vergleich zu Langsamfiltern aus. Das liegt daran, dass durch Pumpen ein Druck (Druckfilter) oder Unterdruck (Saugfilter) erzeugt wird, der das Wasser durch die Filterschicht drückt oder saugt.

Die Filterbehälter sind hier in der Regel aus Stahlblech, das gegen Korrosion geschützt werden muss. Der Korrosionsschutz muss widerstandsfähig genug sein, um die schmirgelnde Wirkung des Filtermaterials bei der Filterspülung unbeschadet zu überstehen. Man unterscheidet zwischen aktiven und passiven Korrosionsschutz. Als aktiven Rostschutz nutzt man einen kathodischen Korrosionsschutz. Um diesen zu ermöglichen, werden Titananoden, die mit Iridium-Mischoxiden beschichtet sind, in den Filterbehälter eingebaut. Sie ermöglichen eine gleichmäßige Stromverteilung auf die Behälterinnenseite. Der Strom fließt von den Titananoden durch das Wasser an die Innenwand des Stahlbehälters und ist dem aus der Metalloberfläche austretenden Korrosionsstrom entgegengerichtet. Dadurch ist der Behälter im Gleichstromfeld kathodisch geschützt. Als passiver Korrosionsschutz hat sich eine Gummierung der Innenflächen des Filterbehälters wegen seiner Widerstandsfähigkeit bewährt, da zum Beispiel Rostschutzfarbe durch die abrasive Wirkung des Filtermaterials relativ schnell abgeschliffen wird. Alternativ werden Behälter aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) oder Polypropylen eingesetzt. Hier entfällt die Notwendigkeit für einen Korrosionsschutz. (1 S. 164-168)

Durch die Verwendung eines grobkörnigen Filtermaterials erreicht man eine starke Tiefenwirkung. Die erhöhte Geschwindigkeit bei der Filtration verringert den Platzbedarf erheblich. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber der Langsamfiltration. Zusätzlich sind Schnellfilter durch eine relativ einfache Bauweise kostengünstig. Die verwendeten Filtermaterialien sind meistens Quarzsand verschiedener Körnung auf einem Filterboden, in dem Filterdüsen eingesetzt sind. Diese Filterdüsen bestehen heute überwiegend aus korrosionsfreiem Kunststoff und sind direkt in den Filterboden eingeschraubt. Sie haben je nach Verwendungszweck unterschiedliche Durchmesser, Schaftlängen und Schlitzweiten. Die Funktionsweise lässt sich in Abbildung 7 gut erkennen. (1 S. 184 ff.)

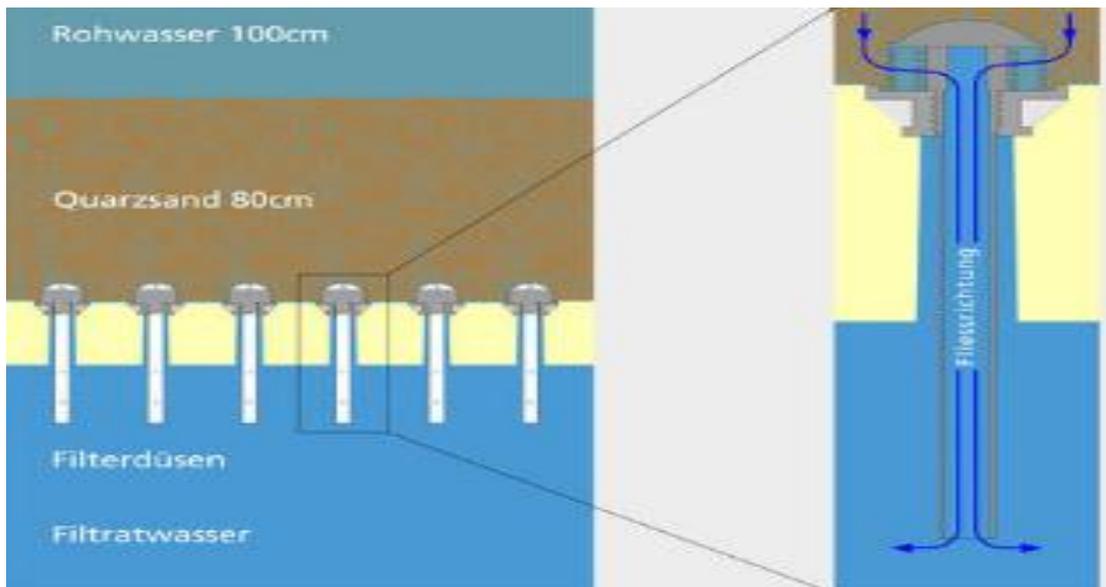


Abbildung 7 Filterdüsen in Schnellfiltern (15)

Der Filteraufbau ist bei Festbettfiltern immer sehr ähnlich. Auf dem Filterboden mit den Filterdüsen liegen Stützsichten mit unterschiedlicher Körnung, die nach oben feiner wird. Auf der Stützsicht liegt der Filterkies in einer Korngrößenbereich von 0,7-1,2 mm oder 1,0-1,6 mm. Die DIN 19643 schreibt bei Einschichtfiltern eine Filterschichthöhe von mindestens 1,2 m vor. Bei Mehrschichtfiltern sollte diese mindestens 0,6 m betragen. Zusätzlich liegt hier auf dem Filterkies eine weitere Filterschicht. Sie besteht aus Anthrazit, Filterkohle oder Bims, wobei sich hier eine Filterschicht aus Kornaktivkohle bewährt hat. Über der letzten Filterschicht muss ein Freibord von mindestens 25 Prozent der Filterschichthöhe plus 0,2 m vorhanden sein, damit bei der Filterspülung, bei der sich das Filtermaterial ausdehnt, kein Material ausgespült wird. (1 S. 164-172)

Der Aufbau eines Filters ist für gewöhnlich immer ähnlich, wie in Abbildung 8 dargestellt:

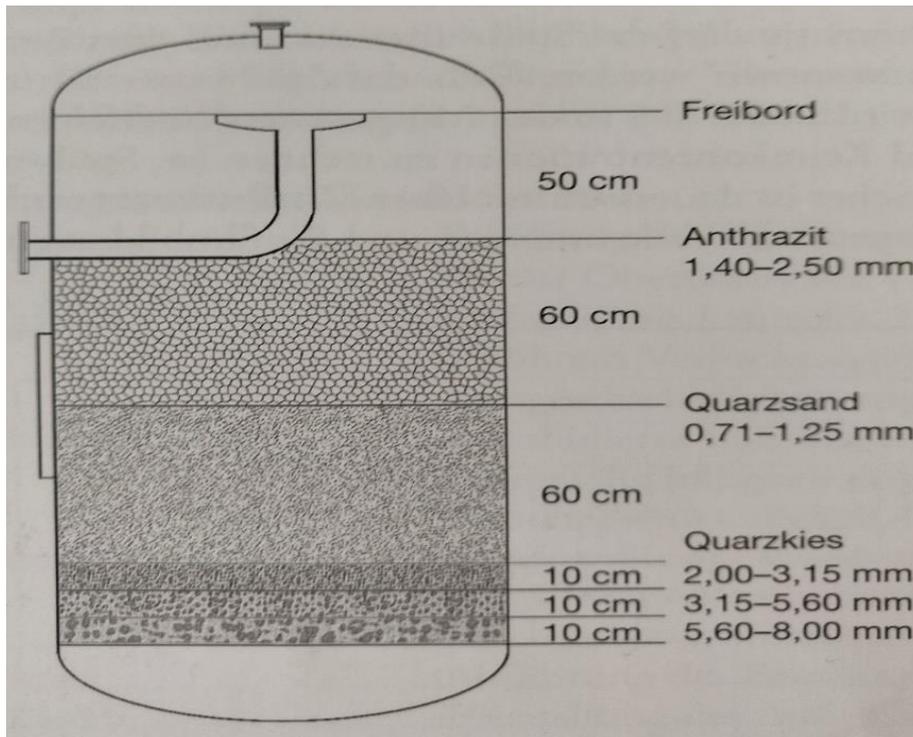


Abbildung 8 Aufbau eines Mehrschicht-Druckfilters (1 S. 182)

3.1.2.1 Druckfilter

Druckfilter arbeiten mit einem konstanten Überdruck. Das Rohwasser wird von oben in den Filterbehälter eingebracht. Unten dem Filterboden wird das Filtrat wieder abgeführt. In der DIN 19643 wird ein Sichtfenster gefordert, um die ausreichende Fluidisierung des Filters bei der Spülung kontrollieren zu können und um zu überprüfen, ob das Filterbett nach der Spülung wieder verwerfungsfrei und waagrecht ist. Siehe dazu auch Abbildung 8. Die Filtergeschwindigkeit in geschlossenen Schichtfiltern ist in der DIN 19463 definiert und darf maximal 30 m/h betragen. Bei der Filterspülung wird das Spül- oder Schlammwasser über den Trichter oben im Filter wieder abgeführt. Hier darf die maximale Spülgeschwindigkeit - abhängig von dem verwendeten Filtermaterial kann diese auch niedriger sein - maximal 65 m/h betragen, um eine Ausspülung des Filtermaterials zu verhindern. Vorteile der Druckfiltration sind Langlebigkeit der Systeme und ein breites Angebot verschiedenster Hersteller. Die Technik hat sich bewährt und ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt. Nachteile sind, dass bei großen Filtern ein großer Spülwasserbedarf anfällt und dass bei zu kurzen Spülungen eine Verkeimungsgefahr besteht. Daher sollte die Spülung des Filters mit

gechlortem Wasser erfolgen. Außerdem sind die im Vergleich zu Saugfiltern größeren Dimensionen insbesondere die größere Bauhöhe zu beachten, die einen größeren Technikraum erforderlich machen, oder eine Nachrüstung in einem vorhandenen Bad erschweren, da die Druckbehälter für gewöhnlich aus einem Teil bestehen. Es gibt zwar Sonderkonstruktionen aus mehreren Teilen, allerdings steigen dann die Kosten. Ebenfalls sind die einzelnen Filterteile sind immer noch sehr groß und müssen dann vor Ort zusammengefügt werden. (1 S. 165 f. ; 176-182)

3.1.2.2 Saugfilter

Seit einigen Jahren werden vermehrt Saugfilter eingesetzt. Bei diesem System wird das Rohwasser von einer Pumpe in den Filtratbehälter gefördert. Hier sorgt eine Niveauregulierung dafür, dass der Wasserstand konstant bleibt. Unter dem Filterboden sitzt eine Filtratpumpe, die das Wasser durch den Filter saugt und dann zurück in das Becken fördert. Die Filtrerrückspülung wird entgegen der Filtrationsrichtung ausgeführt. Dabei kann das Schlammwasser je nach Hersteller entweder durch den Trichter oder eine umlaufende Kunststoffrinne wieder abgeführt werden. Siehe dazu Abbildung 9:

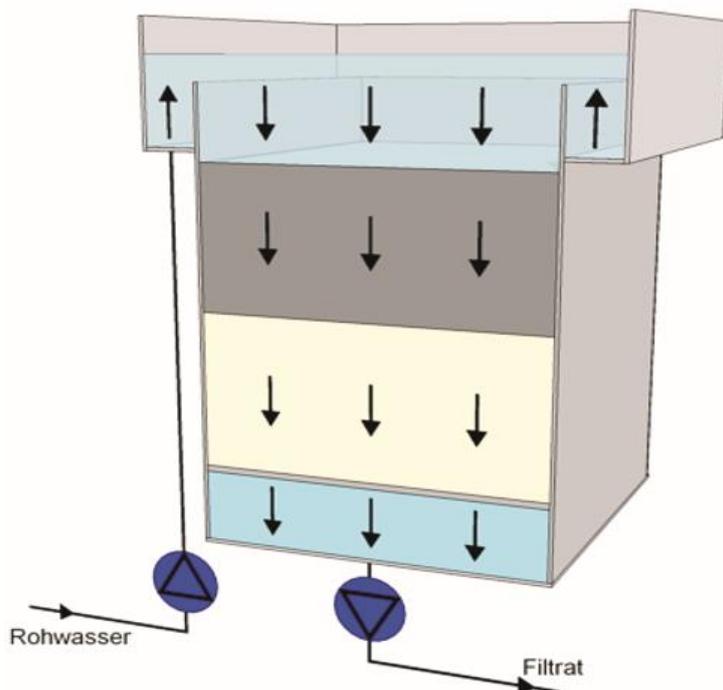


Abbildung 9 Schema Saugfilter (vereinfacht) (16)

Vorteile eines Saugfilters sind der geringere Platzbedarf und die modulare Bauweise, die es ermöglicht, die Filter auch in alten Bädern nachzurüsten. Da die Filterbehälter für gewöhnlich aus Kunststoff bestehen, können sie auch problemlos in Teilen angeliefert und vor Ort verschweißt werden. Das ermöglicht zum Beispiel den Transport der Einzelteile durch enge Gänge in einen vorhandenen Technikraum. Außerdem ist der Spülwasserbedarf geringer, da das Erstfiltrat wiederverwendet werden kann, welches bei Druckfiltern verworfen wird. Diese Filter gibt es erst seit ungefähr 20 Jahren zu kaufen. Deshalb gibt es noch keine Langzeitstudien über die Haltbarkeit des Materials. Nachteile sind die erhöhten Kosten für die Peripherie, wie zum Beispiel eine Rohwasserpumpe und eine Filtratpumpe im Vergleich zu nur einer Rohwasserpumpe bei Druckfiltern. Außerdem ist mehr Steuerungstechnik in Form von Messgeräten und Steuerungssoftware notwendig, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Daher fallen auch höhere Kosten für Messtechnik wie Druckmesser und Niveauekontrolle an. Durch die zusätzlichen Nebenaggregate erhöhen sich die Verschleißteilkosten ebenso. Die Filtrationsgeschwindigkeit liegt auch hier bei maximal 30 m/h, die Spülgeschwindigkeit ist je nach Filtermaterial ungefähr doppelt so hoch. Da auch hier eine Verkeimungsgefahr besteht, sollte die Filterspülung auch mit gechlortem Wasser erfolgen. (1 S. 173 ff.)

4. Durchführung des Filtervergleichs

In diesem Abschnitt sollen nun die verschiedenen Filtersysteme miteinander verglichen werden. Dazu werden die Filtersysteme in verschiedenen Bädern der Bäderland Hamburg GmbH herangezogen, in denen die umgewälzte Wassermenge ungefähr gleich groß ist, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Da die Wasserqualität dabei konstant von der Bäderland Hamburg GmbH überwacht wird und das Gesundheitsamt die Wasserqualität nach der DIN 19643 regelmäßig überprüft, ist davon auszugehen, dass die Filterleistung mit jedem Filtersysteme höchsten Ansprüchen entspricht. Daher sollen hier weniger die Qualität des Filtrats verglichen werden, sondern die einzelnen Kostenpunkte summiert werden, um die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Filtersysteme einschätzen zu können.

4.1 Vorstellung der zu vergleichenden Bäder

In diesem Kapitel werden die einzelnen Becken in den verschiedenen Bädern und ihre Wasseraufbereitungstechnik kurz vorgestellt werden. Sie sollen dann mit dem Schwimmbad des Hamburger Systems verglichen werden. Alle zu vergleichenden Bäder arbeiten mit einem Volumenstrom von ungefähr $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Da die Besucherzahlen von vielen Faktoren wie zum Beispiel Wetter, Jahreszeit und Schulferien abhängig sind und sich diese für einzelne Becken in den Bädern nicht bestimmen lässt, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen werden, dass sie ähnlich gut besucht sind. Daher wird auf die Besucherzahl nicht näher eingegangen und der Schmutzeintrag in den verschiedenen Bädern wird als ähnlich stark angenommen um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

4.1.1 Hamburger System

Anfang der 1970er Jahre wurde in Hamburg eine neue Generation von Schwimmbädern geplant und mit einigen Verbesserungen bis in die 1980er Jahre gebaut. In dieser Zeit sind viele mit Ausnahme weniger Details gleiche Schwimmbäder errichtet worden, von denen

heute noch über Zehn in Betrieb sind. Vom Aufbau sind alle ähnlich und auch von der Technik fast identisch. Zwar wurden einige der Bäder über die Jahre modernisiert und zum Beispiel die Pumpen mit Frequenzumrichtern ausgestattet, um eine Nachtabsenkung zu ermöglichen. Bei anderen wurden die Filterbehälter mit Kathodenschutz ausgerüstet, um eine Durchrostung der Druckbehälter zu verhindern. Dabei ist die Filtertechnik selbst aber unangetastet geblieben. Jedes Bad besteht aus einem Lehrschwimmbecken (ca. 12 x 9 m Tiefe 0,80 - 1,10 m) und einem Mehrzweckbecken (ca. 25 x 17 m Tiefe 1,10 - 3,80 m). Dabei soll hier nur das Mehrzweckbecken betrachtet werden, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Für den Vergleich werden die Bäder Blankenese, Billstedt, Bramfeld und Elbgaustraße herangezogen. Aus diesen vier Bädern wird ein Durchschnittswert der Kosten für das Hamburger System gebildet. Das Konzept der Wasseraufbereitung arbeitet mit der Verfahrenskombination Flockung - Filtration - Chlorung. Gemäß dem Kapitel *Der Wasserkreislauf* folgen nach der Flockung und der Pulveraktivkohledosierung zwei parallellaufende Stahl-Drucksandfilter. Sie haben einen Durchmesser von 2,5 m. Somit kann ihre maximale Filterleistung pro Filter über Formel 1 bestimmt werden:

$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 m \cdot 30 m/h = 147,26 m^3/h$$

Dies ermöglicht eine konstante Filtration des Rohwassers auch wenn ein Filter gespült werden muss. Sind beide Filter in Betrieb, arbeiten sie mit einer verringerten Filtergeschwindigkeit:

$$\dot{V} = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 2,5^2 m \cdot 23,17 m/h = 227,5 m^3/h$$

Da es sich um Druckfilter handelt, werden nur Rohwasserpumpen benötigt, um das Wasser durch den Filter zu drücken. Daher entfallen die Filtratpumpen bei diesen Filteranlagen. Die gesamte Verfahrenskombination ist in Anhang 1: Fließschema Mehrzweckbecken Hamburger Systeme einzusehen.

4.1.2 Druckfilter Billebad Bergedorf

Als ersten zu vergleichenden Filtrationskreislauf wird der des Sportbeckens im Billebad Bergedorf herangezogen. Das Billebad wurde im Jahr 2005 in Bergedorf direkt an der Bille errichtet und bietet eine große Angebotsvielfalt mit Baden, Schwimmen und Sauna-Erholung. Die Badebecken wurden dabei mit modernen Drucksandfiltern ausgerüstet. Das Sportbecken hat mit einer Größe von 25 x 15 m, einer Tiefe von 1,10 - 3,80 m und einer Umwälzung von 225 m³/h ähnliche Dimensionen wie das Mehrzweckbecken des Hamburger Systems. Auch hier arbeiten zwei Drucksandfilter parallel. Ihr Durchmesser beträgt 2,2 Meter. Analog zur Filterleistung im Hamburger System kann auch hier mithilfe von Formel 1 die Filterleistung berechnet werden. Die Filtergeometrie ist die gleiche wie in den Mehrzweckbecken des Hamburger Systems, allerdings werden im Billebad Druckfilter aus GFK verwendet. Diese bieten neben der Korrosionsresistenz ein geringeres Gewicht und einen etwas geringeren Anschaffungspreis. Allerdings werden sie in diesen Dimensionen noch nicht so lange angeboten. Daher können noch keine definitiven Aussagen über die zu erwartende Lebensdauer getroffen werden. Zusätzlich wird hier keine Pulver-Aktivkohle vor den Filtern hinzu dosiert, sondern es werden mit dem DNP NFOX-Regenerator die Desinfektionsnebenprodukte hinter den Drucksandfiltern entfernt. Der genaue Aufbau der Filtrationsanlage des Sportbeckens Billebad ist in dem Schema in Anhang 2: Fließschema Sportbecken Billebad einzusehen.

4.1.3 Unterdruck Saugfilter „Formula“ Festland Altona

Im Jahr 2007 wurde das Festland Freizeitbad als Freizeit-Oase mitten in Hamburg-Altona eröffnet. Es bietet eine weitläufige Pool-Landschaft mit drei 25 Meter-Pools, einen großen Wellnessbereich und eine Saunalandschaft. Das Filtersystem im Festland ist in vier Anlagen aufgeteilt. Für den Filtervergleich wird Anlage 4 - Kursbecken, Kinderbecken, Suhle und Außenschwimmbecken Sauna - herangezogen, da der Volumenstrom der Anlage bei 200 m³/h liegt. Der eingesetzte Filter ist ein Doppelkammer-Saugfilter Typ Formula der Firma Landwehr Wassertechnik. Diese werden in Zusammenarbeit mit dem Kunden für den speziellen Einsatzfall individuell konzipiert. Dabei sind die Abmessungen frei wählbar, um sich den Gegebenheiten vor Ort anzupassen. Durch den Einsatz von Polypropylen oder Polyethylen

lassen sie sich vor Ort montieren und können auch in bereits bestehende Anlagen eingebaut werden. In der Mitte jeder Filterkammer befindet sich eine durchlaufende Rinne, über die das Rohwasser in den Filter gelangt und bei der Filterspülung das Schlammwasser abgeführt wird. Siehe dazu Abbildung 10.



Abbildung 10 Formula Saugefilter (17)

Da es sich um einen Saugfilter handelt, sind eine Rohwasserpumpe und eine Filtratpumpe, sowie Regeltechnik für die Niveauregulierung erforderlich, um den Filter zu betreiben. Die Filterfläche beträgt $2 \times 3,53 \text{ m}^2$, daraus ergibt sich mit Formel 1 eine maximale Filterleistung von $212 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Desinfektionsnebenprodukte werden hier mithilfe von Pulveraktivkohle vor dem Filter entfernt. Der vollständige Aufbau der Filtrationsanlage ist Anhang 3: Fließschema Anlage 1-4 Festland Altona zu entnehmen, der Aufbau des Filterbehälters ist in Anhang 4: Filterbehälter Anlage 4 einsehbar.

4.1.4 Unterdruck Saugfilter „Captura“ Inseipark Wilhelmsburg

Im Jahr 2011 wurde im Inseipark in Hamburg-Wilhelmsburg die Schwimmhalle Inseipark eröffnet. Sie bietet ein Sportbecken, ein Mehrzweckbecken, ein Kursbecken und ein Kinderbecken. Für den Filtervergleich wird nur das Mehrzweckbecken betrachtet. Dieses hat mit einer Größe von $25 \times 17 \text{ m}$ und einer Tiefe von $1,10$ bis $3,80 \text{ m}$ eine Umwälzung von $211 \text{ m}^3/\text{h}$. Für die Filtration des Wassers werden Captura Unterdruck-Saugfilter von der Firma Main-Tauber Kunststoff eingesetzt. Diese werden aus Polypropylen in verschiedenen Größen zwischen $1,1 \text{ m}^2$ bis $3,1 \text{ m}^2$ Filterfläche gefertigt. Die vorgegebenen Modulgrößen bieten eine optimierte Filtergeometrie. Durch ausführliche Testreihen wurden die Standardmodule so entworfen, dass keine Toderäume entstehen und es bei der Filterspülung nicht zu Verwerfungen des Filterbetts kommt. Die umlaufende Rinne, die den Trichter in der Mitte des Filters ersetzt, unterstützt dies noch und ermöglicht bei der Spülung des Filters einen bestmöglichen Austrag des Schlammwassers. Siehe dazu Abbildung 9. Durch ihre modulare Bauweise können beliebig viele Filter so kombiniert werden, dass die gewünschte Filterleistung erzielt wird. Für das Mehrzweckbecken im Schwimmbad Inseipark werden zwei $2,1 \text{ m}^2$ Filtermodule ($65 \text{ m}^3/\text{h}$) und ein $3,1 \text{ m}^2$ Filtermodul ($95 \text{ m}^3/\text{h}$) kombiniert, um eine theoretische Filterleistung von $225 \text{ m}^3/\text{h}$ zu erreichen. Da es sich um Saugfilter handelt, sind eine Rohwasserpumpe und eine Filtratpumpe, sowie Regeltechnik für die Niveauregulierung erforderlich, um die Filter zu betreiben. Bei den Captura-Filtern handelt es sich um Mehrschichtfilter. Die Desinfektionsnebenprodukte werden hier von einer Schicht Korn-Aktivkohle aus dem Wasser gefiltert. Siehe dazu Abbildung 11.

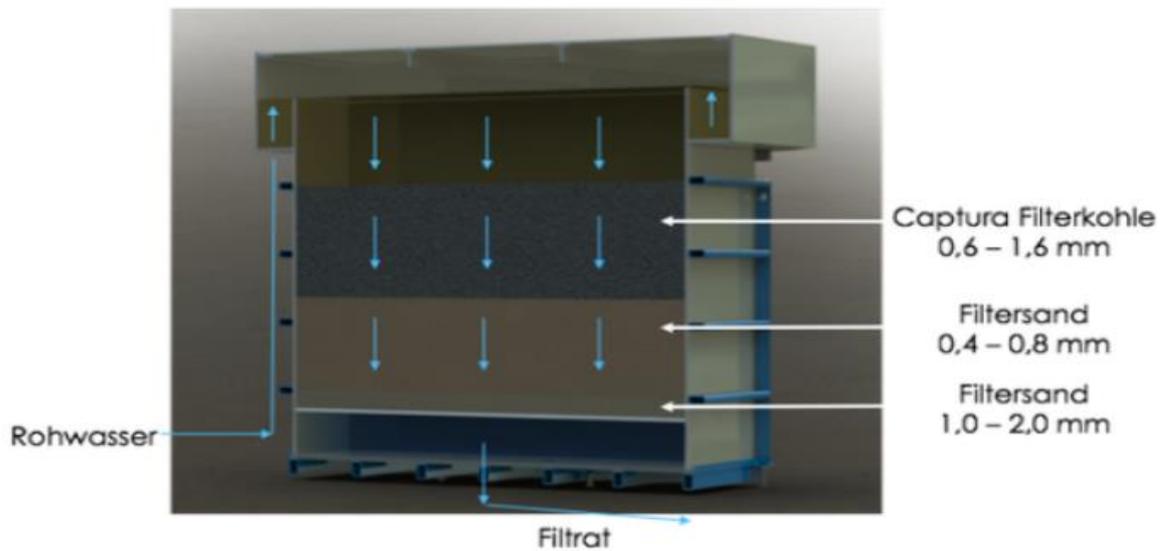


Abbildung 11 Captura Mehrschichtfilter (16)

Dies bietet den Vorteil, dass keine Pulver-Aktivkohle Dosierung oder Nanofiltration zur Entfernung des gebundenen Chlors nötig ist. Allerdings wird durch die Korn-Aktivkohle auch das meiste freie Chlor aus dem Wasser gefiltert. Das sorgt für einen erhöhten Chlorgasverbrauch. Die Korn-Aktivkohle muss in regelmäßigen Abständen (ungefähr alle fünf Jahre) erneuert werden. Der vollständige Aufbau der Filteranlage ist im Anhang 5: Fließschema Sportbecken und Mehrzweckbecken Inseipark zu sehen. Im Anhang 6: Fließschema Mehrzweckbecken Inseipark wurde der Filtrationskreislauf des Mehrzweckbeckens nochmal vergrößert, um besser einsehbar zu sein.

4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Kapitel sollen die einzelnen Filtersysteme unter wirtschaftlichen Aspekten verglichen werden. Dafür werden zuerst die laufenden Kosten pro Kubikmeter Volumenstrom im Jahr des Hamburger Systems mit Hilfe der Formeln aus Kapitel 2.4 bestimmt. Anschließend werden die Kosten inklusive der Investitionskosten pro Kubikmeter Volumenstrom im Jahr des Sportbeckens im Billebad, von Anlage 4 im Festland und vom Mehrzweckbecken im Inselepark bestimmt und mit denen des Hamburger Systems verglichen.

4.2.1 Hamburger System

Da sich die Kosten für das Hamburger System aus einem Mittelwert von den Bädern Blankenese, Billstedt, Bramfeld und Elbgaustraße zusammensetzt, das Filtersystem in den Bädern aber identisch ist, sollen hier beispielhaft die Kosten des Mehrzweckbeckens in Blankenese berechnet werden. Anschließend wird ein Mittelwert der vier Bäder gebildet, um diesen dann mit den anderen Bädern zu vergleichen.

Stromkosten:

Die größten Stromverbraucher sind die zwei Rohwasserpumpen. Die Leistungsaufnahme der Pumpen ist mit jeweils 11 kW angegeben. Da diese aber über Frequenzumrichter verfügen, wird die genaue Leistungsaufnahme der Pumpen aufgezeichnet, damit kann der Stromverbrauch der beiden Pumpen präzise mit Formel 14 berechnet werden:

$$K_{Pumpe\ 1} = \frac{43363 \frac{kW}{h}}{6176\ h} \cdot 24 \cdot 355 \cdot 0,15\ \text{€} = 8973,11\ \text{€}$$

$$K_{Pumpe\ 2} = \frac{41104 \frac{kW}{h}}{5941\ h} \cdot 24 \cdot 355 \cdot 0,15\ \text{€} = 8842,10\ \text{€}$$

Ein weiterer Verbraucher ist die Pulveraktivkohle-Anlage - zusammengesetzt aus Druckerhöhungspumpe und Rührwerk. Da die PAK-Anlage sowohl Mehrzweckbecken (MZB) als

auch Lehrschwimmbecken (LSB) bedient, werden die Kosten auf den anteiligen Volumenstrom aufgeteilt. Das ergibt bei einer Umwälzmenge LSB 80 m³/h und MZB 220 m³/h einen Umrechnungsfaktor von 220/300. Daraus ergibt sich mit Formel 14 folgende Formel:

$$K_{\text{Druckerröhunspumpe PAK}} = 3 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 355 \cdot 0,15 \text{ €} \cdot \frac{220}{300} = 2061,84 \text{ €}$$

$$K_{\text{Rührwerk PAK}} = 0,2 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h} \cdot 355 \cdot 0,15 \text{ €} \cdot \frac{220}{300} = 137,46 \text{ €}$$

Die Luftspülung des Filters erfolgt innerhalb eines Spülvorgangs für 120 Sekunden alle 42 Stunden. Bei 355 Betriebstagen ergibt sich daraus nach Formel 15 folgende jährliche Betriebszeit:

$$t_{\text{ges Spülluftgebläse}} = \frac{355 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ h}}{42 \text{ h}} \cdot \frac{120 \text{ s}}{3600 \text{ s}} = 6,76 \text{ h}$$

Daraus ergeben sich bei einer Leistung von 11 kW und einem Strompreis von 0,15 € pro kW/h nach Formel 16 folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{\text{Spülluftgebläse}} = 6,76 \text{ h} \cdot 11 \text{ kW} \cdot 0,15 \text{ €} = 11,11 \text{ €}$$

Die Wasserspülung des Filters erfolgt innerhalb eines Spülvorgangs für 360 Sekunden alle 42 Stunden. Bei 355 Betriebstagen ergibt sich daraus nach Formel 15 folgende jährliche Betriebszeit:

$$t_{\text{ges Spülwasserpumpe}} = \frac{355 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ h}}{42 \text{ h}} \cdot \frac{360 \text{ s}}{3600 \text{ s}} = 20,20 \text{ h}$$

Daraus ergeben sich bei einer Leistung von 5,5 kW und einem Strompreis von 0,15 € pro kW/h nach Formel 16 folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{\text{Spülwasserpumpe}} = 20,20 \text{ h} \cdot 5,5 \text{ kW} \cdot 0,15 \text{ €} = 16,67 \text{ €}$$

Aufsummiert ergeben sich folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{\text{Strom}} = K_{\text{Pumpe 1}} + K_{\text{Pumpe 2}} + K_{\text{Druckerröhunspumpe PAK}} + K_{\text{Rührwerk PAK}} \\ + K_{\text{Spülluftgebläse}} + K_{\text{Spülwasserpumpe}}$$

$$K_{\text{Strom}} = 8973,11 \text{ €} + 8842,10 \text{ €} + 2061,84 \text{ €} + 137,46 \text{ €} + 11,11 \text{ €} + 16,67 \text{ €} = 20042,29 \text{ €}$$

Wasser-, Abwasser- und Wärmekosten:

Die Wasser- und Abwasserkosten ergeben sich nach *Formel 17 Kosten Frischwasser und Abwasser* anhand des vom Frischwasserzähler abgelesenen jährlichen Wasserverbrauchs:

$$K_{Wasser} = 6834 \text{ m}^3 \cdot (1,34 \text{ €} + 1,77 \text{ €}) = 21253,74 \text{ €}$$

Die Wärmekosten lassen sich über den Wasserverbrauch mit Hilfe von *Formel 18* bestimmen:

$$K_{Heat} = \frac{6834 \text{ m}^3 \cdot 1000 \cdot 18 \text{ K} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}}{3600} \cdot 0,05 \text{ €} = 7144,95 \text{ €}$$

Chemikalien- und Filterhilfsmittelkosten:

Die Chlorgaskosten liegen bei 1,21 € pro Kilogramm. Daraus ergeben sich mit *Formel 19* die gesamten Chlorgaskosten:

$$K_{Chlor} = 1,21 \text{ €} \cdot 1550 \text{ kg} \cdot \frac{220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 1369,12 \text{ €}$$

Analog für die anderen Chemikalien:

$$K_{Chlorbleichlauge} = 0,32 \text{ €} \cdot 240 \text{ kg} \cdot \frac{220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 56,06 \text{ €}$$

$$K_{Mamorkies} = 0,35 \text{ €} \cdot 650 \text{ kg} \cdot \frac{220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 166,08 \text{ €}$$

Sowie für die Filterhilfsmittel:

$$K_{Quickflock} = 0,65 \text{ €} \cdot 450 \text{ kg} \cdot \frac{220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 213,53 \text{ €}$$

$$K_{CSK \text{ Aktivkohle}} = 3,75 \text{ €} \cdot 240 \text{ kg} \cdot \frac{220 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{300 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 657,00 \text{ €}$$

Aufsummiert ergeben sich Chemikalien- und Filterhilfsmittelkosten von:

$$K_C = K_{Chlor} + K_{Chlorbleichlauge} + K_{Marmor Kies} + K_{Quickflock} + K_{CSK Aktivkohle}$$

$$K_C = 1369,12 \text{ €} + 56,06 \text{ €} + 166,08 \text{ €} + 213,53 \text{ €} + 657,00 \text{ €} = 2461,79 \text{ €}$$

Die gesamten laufenden Kosten betragen demnach:

$$K_{ges} = K_{Strom} + K_{Wasser} + K_{Heat} + K_{Chemie}$$

$$K_{ges} = 20042,29 \text{ €} + 21253,74 \text{ €} + 7144,95 \text{ €} + 2461,79 \text{ €} = 50902,77 \text{ €}$$

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{m^3} = \frac{K_{ges}}{\dot{V}} = \frac{50902,77 \text{ €}}{220 \frac{m^3}{h}} = 231,38 \text{ €}$$

Diese Kosten wurden auch für die anderen zu vergleichenden Bäder des Hamburger Systems ermittelt. Diese werden in Anhang 7: Ermittlung der laufenden Kosten des Hamburger Systems aufgelistet. Aus diesen wird der Mittelwert der laufenden Kosten für das Hamburger System berechnet:

$$K_{m^3 \text{ Hamburger System}}$$

$$= K_{m^3 \text{ Blankenese}} + K_{m^3 \text{ Billstedt}} + K_{m^3 \text{ Bramfeld}} + K_{m^3 \text{ Elbgaustraße}}$$

$$K_{m^3 \text{ Hamburger System}} = \frac{231,38 \text{ €} + 254,23 \text{ €} + 277,87 \text{ €} + 192,92 \text{ €}}{4} = \mathbf{239,10 \text{ €}}$$

Da es sich bei dem Hamburger System um ältere Filteranlagen handelt werden zu den laufenden Kosten nach Rücksprache mit Mitarbeitern der Abteilung Engineering bei der Bäderland Hamburg GmbH jährliche Reparaturkosten in Höhe von 5 Prozent der laufenden Kosten berechnet. Daraus ergibt sich ein Wert für die gesamten Betriebskosten der Anlagen:

$$K_{m^3 \text{ Hamburger System Betriebskosten}} = 239,10 \text{ €} + 239,10 \text{ €} \cdot 0,05 = \mathbf{251,06 \text{ €}}$$

4.2.2 Sportbecken Billebad Bergedorf

Analog zur Wirtschaftlichkeitsberechnung des Hamburger Systems werden die laufenden Kosten des Sportbeckens Billebad berechnet. Zusätzlich werden auch die Investitionskosten, und die sich daraus ergebenden Kapitalkosten bestimmt:

Investitionskosten

Zunächst werden die Investitionskosten berechnet. Mit Formel 12 werden als erstes die Kosten für den Technikraum bestimmt. Dabei liegen die Kosten pro Kubikmeter Aushub derzeit bei 450€/m³ Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$K_T = (3,2m + 1m) \cdot (2,2 + 1m) \cdot (2,2m + 2,2m + 1m) \cdot 450 \text{ €/m}^3 = 32659,20 \text{ €}$$

Alle weiteren Kosten sind abgesehen von der später nachgerüsteten NFOX-Anlage der Abschlussrechnung für das Bad entnommen und müssen an die Preissteigerung angepasst werden. Diese liegt nach (11) bei 41 Prozent. Daher sind alle hier angegebenen Werte mithilfe von Formel 13 auf das aktuelle Preisniveau angehoben. Die Kosten der NFOX-Anlage wurden einer Rechnung des Jahres 2018 entnommen und bedürfen daher keiner Anpassung. Nachträgliche Investitionskosten, die für einen reibungslosen Betrieb der Anlage notwendig sind, werden bei den Investitionskosten unter dem Punkt „Nachträgliche Investitionskosten“ aufgeführt. Siehe dazu Anhang 8: Investitionskosten und laufende Kosten für das Sportbecken im Billebad Bergedorf.

Die Investitionskosten setzen sich aus den Kosten für die Filteranlage und den Kosten für die Peripherie zusammen, welche in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgelistet sind.

Filteranlage:

Tabelle 3 Kostenpunkte Filteranlage Sportbecken Billebad Bergedorf

Kostenpunkt:	Kosten:	
2 x Filterbehälter GFK 2200 mm	27527,37	€
Filterverrohrung	12563,78	€
Software zur Automatisierung	4668,95	€
Inbetriebnahme und Bearbeitung der Software	2009,25	€
Funktionsprüfung	2009,25	€
Inbetriebnahme der gesamten Anlage	338,40	€
Kosten Filteranlage gesamt:	49117,00	€

Peripherie:

Tabelle 4 Kostenpunkte Peripherie Sportbecken Billebad Bergedorf

Kostenpunkt:	Kosten:	
Rohwasserpumpe	4489,17	€
Frequenzumrichter Rohwasserpumpe	2557,39	€
Spülluftgebläse (ein Viertel der Kosten, da das Spülluftgebläse für alle 4 Becken verwendet wird)	889,84	€
Frequenzumrichter Spülluftgebläse (ein Viertel der Kosten, da das Spülluftgebläse für alle 4 Becken verwendet wird)	430,65	€
Kompressor (ein Viertel der Kosten, da der Kompressor für alle 4 Becken verwendet wird)	486,02	€
Mamorkiesbehälter	3430,00	€
Chlorgasdosiereinrichtung	7118,14	€
DNP N-FOX Regenerator	8000,00	€
Software DNP N-FOX Regenerator	1236,00	€
Nachträgliche Investitionskosten	9265,44	€
Kosten Peripherie gesamt:	37902,65	€

Daraus ergeben sich die gesamten Investitionskosten I_k :

$$I_k = K_T + I_{\text{Filteranlage}} + I_{\text{Peripherie}}$$
$$I_k = 32659,20\text{€} + 49117,00\text{€} + 37902,65\text{€} = 119678,85\text{€}$$

Mit einem Zinssatz von vier Prozent und einer Laufzeit von 25 Jahren ergibt sich nach folgendem Annuitätsfaktor:

$$a = \frac{(1+0,04)^{25} \cdot 0,04}{(1+0,04)^{25}-1} = 0,0640 = 6,4\%$$

Mit den Investitionskosten und dem Annuitätsfaktor lassen sich mit Formel 10 die jährlichen Kapitalkosten K_i bestimmen:

$$K_i = 119678,85\text{€} \cdot 0,0640 = 7660,87\text{€}$$

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{I\text{ m}^3} = \frac{K_i}{\dot{V}} = \frac{7660,87\text{€}}{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{34,05\text{€}}$$

Laufende Kosten

Die laufenden Kosten für das Sportbecken Bergedorf werden analog zu den Kosten des Hamburger Systems berechnet.

Stromkosten:

Der größte Stromverbraucher ist auch hier die Rohwasserpumpe. Die Leistungsaufnahme der Pumpe ist mit 15 kW angegeben. Da diese aber über einen Frequenzumrichter verfügt, wird die genaue Leistungsaufnahme der Pumpe aufgezeichnet. Damit kann der Stromverbrauch der beiden Pumpen präzise mit Formel 14 berechnet werden:

$$K_{\text{Pumpe}} = \frac{93545 \frac{\text{kWh}}{\text{h}}}{9990 \text{ h}} \cdot 24 \cdot 355 \cdot 0,15 \text{ €} = 11967,02 \text{ €}$$

Ein weiterer Verbraucher ist die DNP-N-FOX-Anlage. Das bietet bei den Stromkosten im Vergleich zur Pulveraktivkohle-Anlage erhebliche Einsparpotentiale. Die Leistungsaufnahme liegt hier nur bei 0,80 kW. Daraus ergibt sich mit Formel 14 folgender Verbrauch:

$$K_{DNP\ NFOX} = 0,8\ kW \cdot 24\ h \cdot 355 \cdot 0,15\ \text{€} = 1022,40\ \text{€}$$

Die Luftspülung des Filters erfolgt innerhalb eines Spülvorgangs für 40 Sekunden alle 84 Stunden. Bei 355 Betriebstagen ergibt sich daraus nach Formel 15 folgende jährliche Betriebszeit:

$$t_{ges\ Spülluftgebläse} = \frac{355\ Tage \cdot 24\ h}{84\ h} \cdot \frac{40\ s}{3600\ s} = 1,12\ h$$

Daraus ergeben sich bei einer Leistung von 7,5 kW und einem Strompreis von 0,15 € pro kW/h nach Formel 16 folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{Spülluftgebläse} = 1,12\ h \cdot 7,5\ kW \cdot 0,15\ \text{€} = 1,26\ \text{€}$$

Die Wasserspülung des Filters erfolgt innerhalb eines Spülvorgangs für 360 Sekunden alle 84 Stunden. Bei 355 Betriebstagen ergibt sich daraus nach Formel 15 folgende jährliche Betriebszeit:

$$t_{ges\ Spülpumpen} = \frac{355\ Tage \cdot 24\ h}{84\ h} \cdot \frac{360\ s}{3600\ s} = 10,10\ h$$

Daraus ergeben sich bei einer Leistung von 7,5 kW und einem Strompreis von 0,15 € pro kW/h nach Formel 16 folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{Spülpumpen} = 10,10\ h \cdot 7,5\ kW \cdot 0,15\ \text{€} = 11,36\ \text{€}$$

Aufsummiert ergeben sich folgende Stromkosten pro Jahr:

$$K_{Strom} = K_{Pumpe} + K_{DNP\ NFOX} + K_{Spülluftgebläse} + K_{Spülpumpen}$$

$$K_{Strom} = 11967,02\ \text{€} + 1022,40\ \text{€} + 1,26\ \text{€} + 11,36\ \text{€} = 13002,04\ \text{€}$$

Wasser-, Abwasser- und Wärmekosten

Die Wasser- und Abwasserkosten ergeben sich nach Formel 17 anhand des vom Frischwasserzähler abgelesenen jährlichen Wasserverbrauchs:

$$K_{Wasser} = 4514 \text{ m}^3 \cdot (1,34 \text{ €} + 1,77 \text{ €}) = 14038,54 \text{ €}$$

Die Wärmekosten lassen sich über den Wasserverbrauch mithilfe von Formel 18 bestimmen:

$$K_{Heat} = \frac{4514 \text{ m}^3 \cdot 1000 \cdot 18 \text{ K} \cdot 4,182 \frac{\text{kJ}}{(\text{kg K})}}{3600} \cdot 0,05 \text{ €} = 4719,39 \text{ €}$$

Chemikalien- und Filterhilfsmittelkosten

Die Chlorgaskosten liegen bei 1,21 € pro Kilogramm. Anteilig am gesamten Volumenstrom ergeben sich für das Sportbecken mit Formel 19 die Chlorgaskosten:

$$K_{Chlor} = 1,21 \text{ €} \cdot 2900 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 1076,38 \text{ €}$$

Analog für die anderen Chemikalien:

$$K_{Chlorbleichlauge} = 0,32 \text{ €} \cdot 70 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 6,76 \text{ €}$$

$$K_{Mamorkies} = 0,35 \text{ €} \cdot 1550 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 166,41 \text{ €}$$

$$K_{Schwefelsäure} = 0,65 \text{ €} \cdot 175 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 34,89 \text{ €}$$

$$K_{Bicar \text{ Pharma Exipient}} = 2,38 \text{ €} \cdot 350 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 255,52 \text{ €}$$

Sowie für die Filterhilfsmittel:

$$K_{Quickflock} = 0,65 \text{ €} \cdot 2600 \text{ kg} \cdot \frac{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{733,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 518,40 \text{ €}$$

Zusätzlich fallen Kosten für spezielle Reinigungsmittel für die DNP NFOX-Anlage an, sowie der Austausch der Filterkartusche einmal im Jahr. Da im Billebad drei gleich große NFOX-Anlagen in Betrieb sind, werden die Reinigungsmittelkosten nicht über den Volumenstromanteil berechnet, sondern einfach durch drei geteilt:

$$K_{Scale \text{ Ex K1}} = 11,80 \text{ €} \cdot 25 \text{ kg} \cdot \frac{1}{3} = 98,33 \text{ €}$$

$$K_{Scale \text{ Ex K2}} = 11,45 \text{ €} \cdot 18 \text{ kg} \cdot \frac{1}{3} = 68,70 \text{ €}$$

$$K_{P3 \text{ Ultrasiel 75}} = 8,66 \text{ €} \cdot 26 \text{ kg} \cdot \frac{1}{3} = 75,05 \text{ €}$$

$$K_{P3 \text{ Ultrasiel 112}} = 10,75 \text{ €} \cdot 22 \text{ kg} \cdot \frac{1}{3} = 78,83 \text{ €}$$

$$K_{Filterkartusche} = 1200 \text{ €}$$

Aufsummiert ergeben sich Chemikalien- und Filterhilfsmittelkosten von:

$$\begin{aligned} K_C &= K_{Chlor} + K_{Chlorbleichlauge} + K_{Mamorkies} + K_{Schwefelsäure} + \\ &K_{Bicar \text{ Pharma Excipient}} + K_{Quickflock} + K_{Scale \text{ Ex K1}} + K_{Scale \text{ Ex K2}} + \\ &K_{P3 \text{ Ultrasiel 75}} + K_{P3 \text{ Ultrasiel 112}} + K_{Filterkartusche} \\ K_C &= 3579,27 \text{ €} \end{aligned}$$

Die gesamten laufenden Kosten betragen demnach:

$$\begin{aligned} K_{ges} &= K_{Strom} + K_{Wasser} + K_{Heat} + K_{Chemie} \\ K_{ges} &= 35339,24 \text{ €} \end{aligned}$$

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{m^3} = \frac{K_{ges}}{\dot{V}} = \frac{35339,24 \text{ €}}{225 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{157,06\text{€}}$$

Kosten gesamt

Die gesamten Kosten für die Filteranlage ergeben sich aus den Kapitalkosten und den laufenden Kosten:

$$K_{\text{ges}} = K_{m^3} + K_{I m^3}$$

$$K_{\text{ges}} = 157,06\text{€} + 34,05\text{€} = \mathbf{191,10 \text{ €}}$$

Die einzelnen Kostenpunkte sind Anhang 8: Investitionskosten und laufende Kosten für das Sportbecken im Billebad Bergedorf zu entnehmen.

4.2.3 Anlage 4 Festland Hamburg Altona

Investitionskosten

Zunächst werden die Investitionskosten berechnet. Mit Formel 12 werden als erstes die Kosten für den Technikraum bestimmt. Dabei liegen die Kosten pro Kubikmeter Aushub derzeit bei 450€/m³. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$K_T = (2,4m + 1m) \cdot (2,5 + 1m) \cdot (3,2m + 1m) \cdot 450 \text{ €/m}^3 = 22491,00 \text{ €}$$

Alle weiteren Kosten sind der Abschlussrechnung für das Bad entnommen und müssen an die Preissteigerung angepasst werden. Diese liegt nach (11) bei 27 Prozent. Daher sind alle hier angegebenen Werte mit Formel 13 auf das aktuelle Preisniveau angehoben. Siehe dazu Tabelle 5:

Tabelle 5 Investitionskosten Filteranlage und Peripherie Anlage 4 Festland

Filteranlage:	Landwehr Formula - Doppelkammer 2 x 106 m ³ /h 2x 3,53 m ²		Ursprünglicher Kaufpreis:	Inflationsbereinigt:
Anschaffungspreis:		€	14640,50	18593,44
Verrohrung:		€	7723,80	9809,23
Filterkies+Spülen:		€	1634,02	2075,21
Amatursatz		€	462,31	587,13
Anbindung PAK Dosierung:		€	435,00	552,45
Software für Automatisierung:		€	625,00	793,75
Inbetriebnahme und Bearbeitung Software:		€	590,00	749,30
Softwaremäßige Bearbeitung Gesamtsystem:		€	625,00	793,75
Inbetriebnahme der gesamten Anlage		€	625,00	793,75
	Gesamt:	€		34748,00
Peripherie:				
Kosten Rohwasserpumpen:		€	3504,00	4450,08
Kosten Filtratpumpen:		€	3404,00	4323,08
Kosten Frequenzumrichter Rohwasser:		€	1146,72	1456,33
Kosten Frequenzumrichter Filtrat:		€	2293,44	2912,67
Kosten Spülwasserpumpe:		€	1089,75	1383,98
Kosten Frequenzumrichter Spülwasser:		€	684,32	869,09
Kosten Spülluftgebläse:		€	1229,92	1562,00
Kosten Frequenzumrichter Spülluft:		€	580,52	737,26
Kosten Kompressor:		€	1470,85	1867,98
Kosten Mamorkiesbehälter:		€	3485,60	4426,71
Kosten Chlorgasdosiereinrichtung:		€	11234,86	14268,27
Kosten PAK Jetpak		€	3591,73	4561,50
	Gesamt:	€		42818,95

Daraus ergeben sich die gesamten Investitionskosten I_k :

$$I_k = K_T + I_{Filteranlage} + I_{Peripherie}$$

$$I_k = 22491,00\text{€} + 34748,00\text{€} + 42818,95\text{€} = 100057,95$$

Mit einem Zinssatz von vier Prozent und einer Laufzeit von 25 Jahren ergibt sich nach Formel 11 folgender Annuitätsfaktor:

$$a = \frac{(1+0,04)^{25} \cdot 0,04}{(1+0,04)^{25} - 1} = 0,0640 = 6,4\%$$

Mit den Investitionskosten und dem Annuitätsfaktor lassen sich mit Formel 10 die jährlichen Kapitalkosten K_i bestimmen:

$$K_i = 100057,95 \cdot 0,0640 = 6403,71\text{€}$$

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{I\ m^3} = \frac{K_i}{\dot{V}} = \frac{6403,71\ \text{€}}{190 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{33,70\text{€}}$$

Laufende Kosten

Die laufenden Kosten für Anlage 4 Festland Altona werden analog zu den Kosten des „Hamburger Systems“ berechnet. Die größten Stromverbraucher sind auch hier die Pumpen. Da es sich um eine Unterdruck-Saugfilteranlage handelt, fallen hier allerdings nicht nur die Stromkosten für die Rohwasserpumpe an, sondern auch für die Filtratpumpe und eine Reinwasserpumpe. Diese sind alle mit einem Frequenzumrichter ausgestattet. Daher wird die genaue Leistungsaufnahme der Pumpen aufgezeichnet, damit können Stromverbrauch und Stromkosten der Pumpen präzise mit Formel 14 berechnet werden. Die restlichen Kostenpunkte werden wie beim Hamburger System bestimmt. Alle Kostenpunkte der laufenden Kosten sind in Tabelle 6 aufgelistet:

Tabelle 6 laufende Kosten Anlage 4 Festland Altona

Laufende Kosten:			Theorie	ist
Verbraucher:	Rohwasserpumpen		1 x Herborner Unibad 150-250/1104X	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	11,00	1,37
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	39,60	4,93
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	14454,00	1799,74
Verbraucher:	Filtratpumpe		2 x Herborner Uniblock 100-201/0404 GF	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	8,00	4,30
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00

Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	28,80	15,49
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	10512,00	5652,93
Verbraucher:	Reinwasserpumpe		Herborner Uniblock 80-241/0224	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	2,20	1,00
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	7,92	3,60
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	2890,80	1314,00
Verbraucher:	Druckerhöhungspumpe PAK:		Grundfos CR 10-7	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	3,00	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	10,80	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		2300,40
Verbraucher:	PAK Dosieranlage:		Wallace & Tiernan Jet-pak	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	0,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,72	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		153,36
Verbraucher:	Spülluftgebläse Becker DTLF 500		70 s alle 42 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	30,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		3,62
Betriebsdauer:		h		3,93
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		2,14
Verbraucher:	Spülwasserpumpe		1 x Herborner Uniblock 200-350/3704	
			390 s alle 42 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	37,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		3,68
Betriebsdauer:		h		52,33
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		28,87
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m ³		1,30
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		6814,00
	Wasserkosten gesamt:	€		8858,20

Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m ³		2,10
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		6814,00
	Abwasserkosten gesamt	€		14309,40
Filterspülung:				
Filterspülwasser pro Spülung:		m ³		20,50
Anzahl Spülungen pro Jahr:				212,00
	Filterspülwasser gesamt:	m ³		4346,00
Chemikalieneinsatz:	SAP 2013-2017			
Chlorgas:				
Cl ₂ -Verbrauch:		kg	814,29	
Cl ₂ -Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl ₂ -Kosten gesamt:	€		985,29
Natriumhydrogencarbonat:	Natron			
Na ₂ CO ₃ -Verbrauch:		kg		
Na ₂ CO ₃ -Kosten:		€ pro kg	1,59	
	Na ₂ CO ₃ -Kosten gesamt:	€		
Natriumhypochlorit:	Webco Pool Liquid			
NaOCl-Verbrauch:		kg		
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,99	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		0,00
Natriumhypochlorit:	Chlorbleichlauge			
NaOCl-Verbrauch:		kg	598,41	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		191,49
Mamorkies:				
CaCO ₃ -Verbrauch:		kg	620,41	
CaCO ₃ -Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO ₃ -Kosten gesamt:	€		217,14
Schwefelsäure:				
H ₂ SO ₄ -Verbrauch		kg	266,36	
H ₂ SO ₄ -Kosten		€ pro kg	0,65	
	H ₂ SO ₄ -Kosten gesamt:	€		173,13
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				

Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:		kg	443,93	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		288,55
Aquazit Filterkohle Type N				
Filterkohleverbrauch:	ungefähr 3-4 Jahre	kg	1411,43	
Filterkohlekosten:		€ pro kg	0,60	
	Filterkohle Kosten gesamt:	€	846,86	
	Filterkohle Kosten pro Jahr:	€		241,96
Aktivkohle:				
	CSS			
Aktivkohleverbrauch:		kg	504,08	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	3,75	
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		1890,31
Aktivkohle:				
	CSK			
Aktivkohleverbrauch:		kg	414,90	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	2,87	
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		1190,76
		€	Laufende Kosten:	39597,66

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{m^3} = \frac{K_{ges}}{\dot{V}} = \frac{39597,66 \text{ €}}{190 \frac{m^3}{h}} = \mathbf{208,41\text{€}}$$

Kosten gesamt

Die gesamten Kosten für die Filteranlage ergeben sich aus den Kapitalkosten und den laufenden Kosten:

$$K_{ges} = K_{m^3} + K_{l m^3}$$

$$K_{ges} = 208,41\text{€} + 33,70\text{€} = \mathbf{242,11 \text{ €}}$$

4.2.4 Mehrzweckbecken Inselpark Wilhelmsburg

Investitionskosten

Zunächst werden die Investitionskosten berechnet. Mit Formel 12 werden als erstes die Kosten für den Technikraum bestimmt. Dabei liegen die Kosten pro Kubikmeter Aushub derzeit bei 450€/m³. Die Dimensionen der Filteranlage sind der Website des Herstellers zu entnehmen. (16) Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$K_T = (2,36m + 1m) \cdot (2,3 + 1m) \cdot (1,8m + 1,8m + 2,5m + 1m) \cdot 450 \text{ €/m}^3$$

$$= 35426,16 \text{ €}$$

Alle weiteren Kosten wurden der Abschlussrechnung für das Bad entnommen. Dabei ist erwähnenswert, dass die Kosten für eine Pulver-Aktivkohle Anlage oder Nanofiltration entfallen, da es sich hier um einen Mehrschichtfilter handelt und diese Aufgabe von der Korn-Aktivkohle auf dem Filt,erbett übernommen wird. Die Kosten müssen an die Preissteigerung angepasst werden. Diese liegt nach (11) bei 20 Prozent. Daher sind alle hier angegebenen Werte mit Formel 13 auf das aktuelle Preisniveau angehoben. Siehe dazu Tabelle 7:

Tabelle 7 Investitionskosten Filteranlage und Peripherie Mehrzweckbecken Inselpark

Filteranlage:	2 x Aquila Captura 2 m ² 1 x Aquila Captura 3 m ²		Ursprünglicher Kaufpreis:	Inflations- bereinigt:
Anschaffungspreis:		€	44433,22	53319,86
Befüllung und Spülen		€	2320,38	2784,46
Erstbefüllung Filterkohle:		€	2919,00	3502,80
CapCon Steuerungssoftware		€	1125,00	1350,00
Software für Automatisierung:		€	977,00	1172,40
Inbetriebnahme und Bearbeitung Software:		€	1438,75	1726,50
Projektierung und Datenerstellung		€	550,00	660,00
Inbetriebnahme der gesamten Anlage		€	1016,25	1219,50
	Gesamt:	€		65735,52
Peripherie:				
Kosten Rohwasserpumpen:		€	5621,88	6746,26
Kosten Frequenzumrichter Rohwasser:		€	1676,00	2011,20
Kosten Filtratpumpen:		€	enthalten in Filterkosten	

Kosten Frequenzumrichter Filtrat:		€	2555,00	3066,00
Kosten Spülwasserpumpe:		€	707,57	849,08
Kosten Frequenzumrichter Spülwasser:		€	258,75	310,50
Kosten Spülluftgebläse:		€	705,54	846,64
Kosten Frequenzumrichter Spülluft:		€	258,75	310,50
Kosten Kompressor:		€	649,83	779,79
Kosten Mamorkiesbehälter:		€	1228,36	1474,03
Kosten Chlorgasdosiereinrichtung:		€	4962,89	5955,46
	Gesamt:	€		22349,46

Daraus ergeben sich die gesamten Investitionskosten I_k :

$$I_k = K_T + I_{Filteranlage} + I_{Peripherie}$$

$$I_k = 35426,16\text{€} + 65735,52\text{€} + 22349,46\text{€} = 123511,14\text{€}$$

Mit einem Zinssatz von vier Prozent und einer Laufzeit von 25 Jahren ergibt sich nach Formel 11 folgender Annuitätsfaktor:

$$a = \frac{(1+0,04)^{25} \cdot 0,04}{(1+0,04)^{25} - 1} = 0,0640 = 6,4\%$$

Mit den Investitionskosten und dem Annuitätsfaktor lassen sich mit Formel 10 die jährlichen Kapitalkosten K_i bestimmen:

$$K_i = 123511,14 \cdot 0,0640 = 7904,71\text{€}$$

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{I\ m^3} = \frac{K_i}{\dot{V}} = \frac{7904,71\text{€}}{211 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = \mathbf{37,46\text{€}}$$

Laufende Kosten

Die laufenden Kosten für das Mehrzweckbecken Inselpark Wilhelmsburg werden analog zu den Kosten des Hamburger Systems berechnet. Die größten Stromverbraucher sind auch hier die Pumpen. Da es sich um eine Unterdruck-Saugfilteranlage handelt, fallen hier allerdings nicht nur die Stromkosten für die Rohwasserpumpe an, sondern auch für die Filtrat-

pumpe und eine Reinwasserpumpe. Diese sind alle mit einem Frequenzumrichter ausgestattet, daher wird die genaue Leistungsaufnahme der Pumpen aufgezeichnet. Damit können Stromverbrauch und Stromkosten der Pumpen präzise mit Formel 14 berechnet werden. Die restlichen Kostenpunkte werden wie beim Hamburger System bestimmt. Alle Kostenpunkte der laufenden Kosten sind:

Tabelle 8 laufende Kosten Mehrzweckbecken Inselepark

Laufende Kosten			Theorie	ist
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		2 x Herborner Unibad 100-201/0224 X	
Stromverbrauch:		kWh	4,40	3,07
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	15,84	11,04
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	5781,60	4027,97
Verbraucher:	Filtratpumpe		2 x Herborner Uniblock 80-241/0304 GF AF 60	
Stromverbrauch:		kWh	6,00	3,39
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	21,60	12,21
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	7668,00	4334,40
Verbraucher:	Filtratpumpe		1 x Herborner Uniblock 80-241/0404 GF AF 90	
Stromverbrauch:		kWh	4,00	3,01
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	14,40	10,83
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	5112,00	3844,25
Verbraucher:	Spülluftgebläse		80 s alle 31 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	7,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		1,85
Betriebsdauer:		h		5,77
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		1,60
Verbraucher:	Spülwasserpumpe		1 x Herborner Uniblock 125-250/0554 GF	

			600 s alle 31 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	5,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		1,38
Betriebsdauer:		h		45,83
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		9,49
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m³		1,30
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		2308,00
	Wasserkosten gesamt:	€		3000,40
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m³		2,10
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		2308,00
	Abwasserkosten gesamt	€		4846,80
Wärme				
		kW/h	48260,28	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		2413,01
Filterspülwasser pro Spülung:		m³		18,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				274,19
	Filterspülwasser gesamt:	m³		4935,48
Chemikalieneinsatz:				
	SAP 2016+2017 x 210/540			
Chlorgas:				
Cl2-Verbrauch:		kg	1248,00	
Cl2-Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl2-Kosten gesamt:	€		1510,08
Natriumhydrogencarbonat:				
	Calciniertes Soda			
Na2CO3-Verbrauch:		kg	48,75	
Na2CO3-Kosten:		€ pro kg	0,72	
	Na2CO3-Kosten gesamt:	€		35,10
Natriumhypochlorit:				
	Webco Pool Liquid			
NaOCl-Verbrauch:		kg	327,60	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,99	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		322,69
Bicar Pharma Excipient				
Bicar-Verbrauch:		kg	39,00	

Bicar-Kosten:		€ pro kg	2,38	
	Bicar-Kosten gesamt:	€		92,82
Natriumhypochlorit:	Chlorbleichlauge			
NaOCl-Verbrauch:		kg	33,15	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		10,61
Chlorgranulat:				
Ca(ClO)2-Verbrauch:		kg	3,90	
Ca(ClO)2-Kosten:		€ pro kg	7,80	
	Ca(ClO)2-Kosten gesamt:	€		30,42
Mamorkies:				
CaCO3-Verbrauch:		kg	1228,50	
CaCO3-Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO3-Kosten gesamt:	€		429,98
Regenit Siede Tablettensalz:				
Tablettensalz-Verbrauch:		kg	78,00	
Tablettensalz-Kosten:		€ pro kg	0,27	
	Tablettensalz-Kosten gesamt:	€		21,06
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:	20 kg alle 4 Tage	kg	1775,00	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		1153,75
Captura Filterkohle				
Filterkohleverbrauch:	alle 5 Jahre	kg	2200,00	
Filterkohlekosten:		€ pro kg	3,20	
	Filterkohle Kosten gesamt im Jahr:	€		1408,00
		€	Laufende Kosten	27492,42

Pro Kubikmeter Volumenstrom ergeben sich dann Kosten von:

$$K_{m^3} = \frac{K_{ges}}{\dot{V}} = \frac{27492,42 \text{ €}}{211 \frac{m^3}{h}} = \mathbf{130,30\text{€}}$$

Kosten gesamt

Die gesamten Kosten für die Filteranlage ergeben sich aus den Kapitalkosten und den laufenden Kosten:

$$K_{\text{ges}} = K_{m^3} + K_{I m^3}$$

$$K_{\text{ges}} = 130,30\text{€} + 37,46\text{€} = \mathbf{167,76 \text{ €}}$$

5. Ergebnisse und Diskussion

Nun da alle Daten erfasst wurden und die Kosten für die Reinigung des Badebeckenwassers der einzelnen Bäder bestimmt wurden, sollen die Ergebnisse miteinander verglichen und ausgewertet werden. Dabei sollen die Investitionskosten und laufenden Kosten der Bäder den laufenden Kosten des Hamburger Systems gegenübergestellt werden, um zu bestimmen, ob sich eine Aufrüstung auf eines der neuen Filtersysteme lohnt.

5.1 Kostenvergleich

Wenn man die laufenden Kosten, sowie die Investitionskosten der einzelnen Filteranlagen gegenüberstellt, lassen sich klare Tendenzen ablesen. Siehe dazu Tabelle 9.

Tabelle 9 Kostenvergleich der Filtersysteme

Bad:	Laufende Kosten	Kapitalkosten pro Jahr	Kosten gesamt
Drucksandfilter „Hamburger System“	251,06 €	-----	251,06 €
Drucksandfilter Sportbecken Billebad Bergedorf	157,06 €	34,05 €	191,10 €
Saugfilter „Formula“ Anlage 4 Festland Altona	208,41 €	33,70 €	242,11 €
Saugfilter „Captura“ Mehrzweckbecken Inselpark Wilhelmsburg	130,30 €	37,46 €	167,76 €

Durch eine grafische Darstellung wird dies noch deutlicher. Siehe dazu Abbildung 12 Grafische Darstellung des Kostenvergleichs. Hier zeigt sich, dass der Captura Filter klare Kostenvorteile gegenüber den anderen Filtersystemen bietet. Bemerkenswert ist hier auch, dass die Drucksand Filteranlage des Sportbeckens Bergedorf mit einer höheren Effizienz als der Formula Filter der Anlage 4 im Festland arbeitet. Dies wird noch deutlicher, wenn berechnet wird, wann die Gewinnschwelle mit den einzelnen Filtersystemen erreicht wird. Diese wird mithilfe von Formel 21 berechnet und liegt dann bei folgenden Werten:

$$\text{Gewinnschwelle Sportbecken Billebad} = \frac{251,06\text{€}}{251,06\text{€} - 191,10\text{€}} = 4,19 \text{ Jahre}$$

$$\text{Gewinnschwelle Anlage 4 Festland} = \frac{251,06\text{€}}{251,06\text{€} - 242,11\text{€}} = 28,06 \text{ Jahre}$$

$$\text{Gewinnschwelle Mehrzweckbecken Inseipark} = \frac{251,06\text{€}}{251,06\text{€} - 167,76\text{€}} = 3,01 \text{ Jahre}$$

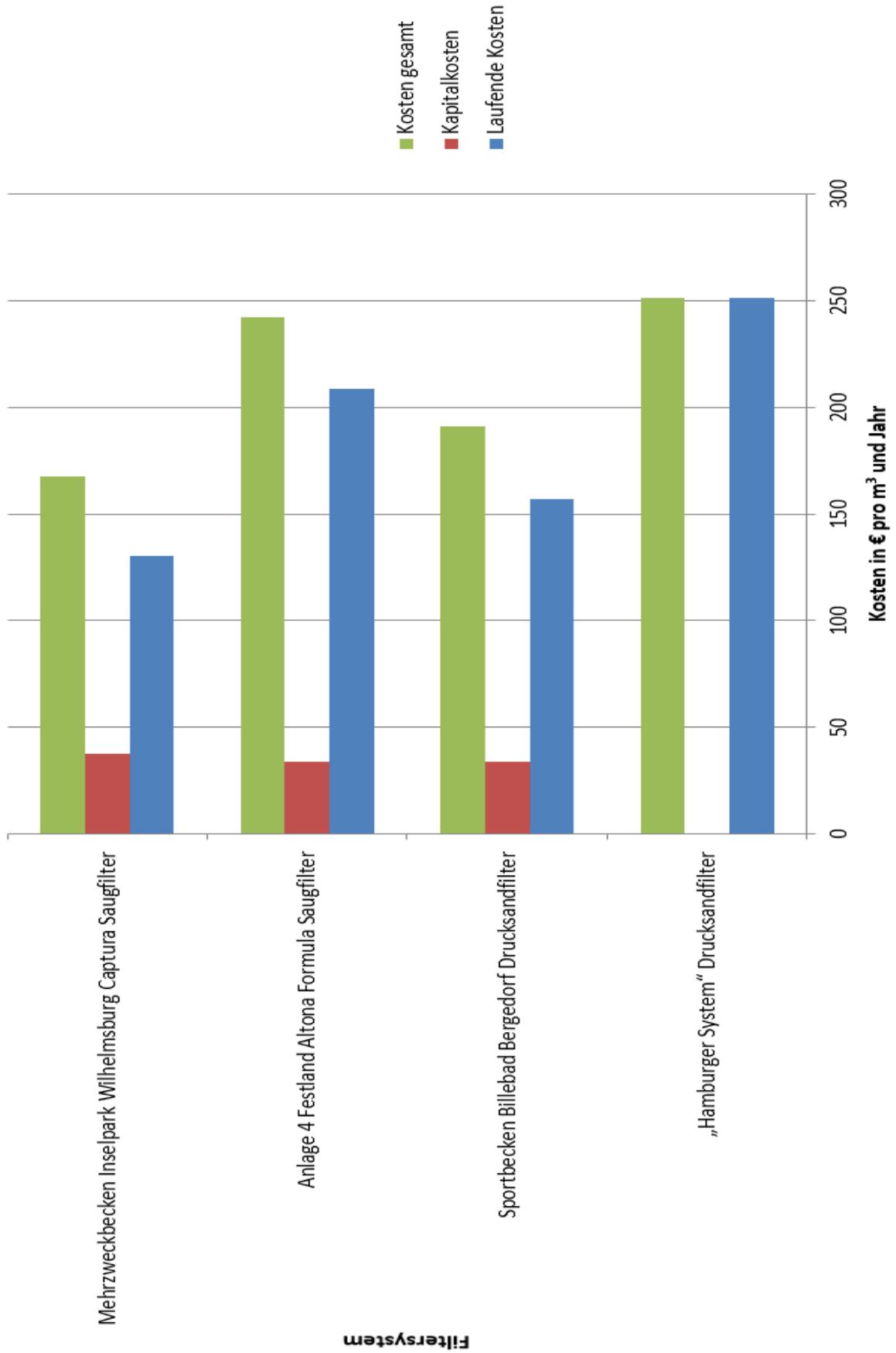


Abbildung 12 Grafische Darstellung des Kostenvergleichs

5.2 Empfehlung eines Filtersystems

Drucksandfilter Sportbecken Billebad Bergedorf:

Die Kosten liegen hier erheblich unter denen des Hamburger Systems. Das liegt zum einen an dem geringeren Wasserverbrauch durch effizientere Filterspülungen und zum anderen daran, dass nur eine Rohwasserpumpe effizienter eingesetzt wird. Dies führt zu einem geringeren Strombedarf. Da es sich hierbei aber im Grunde genommen um die gleiche Filtertechnik handelt wie bei dem Hamburger System, ist bei bestehenden Drucksandfiltern eine Modernisierung der Filteranlage zu empfehlen, weil hier ohne allzu großen Kostenaufwand erhebliche Einsparpotentiale zu erzielen sind. So lassen sich bestehende Anlagen auch in Zukunft noch effizient betreiben.

Formula Unterdruck-Saugfilter Festland

Der Formula Filter kann im Vergleich nicht überzeugen. Dies hängt damit zusammen, dass die betrachtete Anlage durch das angeschlossene Kinderbecken stärker belastet ist und die Filteranlage deshalb stärker gefordert ist. Allerdings liegen die Kosten anderer Filtersysteme des Typs Formula in verschiedenen Bädern der Bäderland Hamburg GmbH, die aufgrund abweichender Umwälzmengen nicht in diesem Filtervergleich betrachtet werden, auf einem ähnlich hohen Niveau. Daher kann hier keine Empfehlung für diese Filtertechnik ausgesprochen werden.

Captura Unterdruck-Saugfilter Inseipark

Die Captura Filter zeichnen sich durch einen geringen Spülwasser- und Strombedarf aus. Ihre modulare Bauweise ist bei einem Neubau ein Vorteil da ein geringer Platzbedarf notwendig ist. Da die Module vorgegebene Dimensionen haben, deren Strömungseigenschaften untersucht wurden, ist eine gleichmäßige Durchströmung des Filterbetts gegeben. Durch eine komplexere Steuerungstechnik ist die Filtertechnik zwar etwas anfälliger und in der Anschaffung am teuersten, allerdings sind die laufenden Kosten signifikant geringer. Daher lohnt sich die Anschaffung schon nach wenigen Jahren und mit den eingesparten laufenden Kosten lassen sich eventuelle Reparaturen finanzieren.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass bei einer Renovierung eines Schwimmbads die Modernisierung der Drucksandfilteranlage große Einsparpotentiale bietet. Bei einem Neubau sollte die Captura Saugfilteranlage genutzt werden, da hier die laufenden Kosten am niedrigsten sind und der Platzbedarf für diese Filteranlage erheblich geringer ist als bei einem klassischen Drucksandfilter.

Literaturverzeichnis

1. Roeske, Wolfgang. *Schwimm- und Badebeckenwasser*. Günzburg : Roeske Verlag, 2010. ISBN 978-3-9813146-0-1.
2. www.swim.de. [Online] 14. 2 2014. [Zitat vom: 17. 3 2019.] <https://swim.de/magazin/pool/geschichte-erschwimmen-30969>.
3. Bundesministerium der Justiz. Gesetz zu Verhütung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten beim Menschen. Berlin : s.n., 2000.
4. DIN 19643-1, -. *Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin : Beuth Verlag, 2012.
5. Eisele, Frank. www.pool-magazin.com. [Online] [Zitat vom: 20. 2 2019.] <https://www.pool-magazin.com/artikel/badewasser-keimfrei>.
6. Evoqua Water Technologies GmbH. aks-kassel.de. [Online] 2016. [Zitat vom: 19. 3 2019.] www.aks-kassel.de/files/reinhardshagenfox1.pdf.
7. Wilhelm, Stefan. *Wasseraufbereitung - Chemie und chemische Verfahrenstechnik*. Heidelberg : Springer-Verlag Heidelberg Berlin, 2008. ISBN 978-3-540-25163-7.
8. Schubert, Heinrich. *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. ISBN 3-527-30577-7.
9. Stieß, Matthias. *Mechanische Verfahrenstechnik 2*. Berlin : Springer Verlag, 1993. ISBN 3-540-55852-7.
10. Thomas Schuster, Leona Rüdt von Collenberg. *Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation*. Berlin : Springer-Verlag GmbH, 2017. ISBN 978-3-662-47798-4.
11. www.destatis.de. [Online] [Zitat vom: 10. 3 2019.] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Indikatoren/Konjunkturindikatoren/Preise/bpr210.html>.
12. F.Balck. www.biosensor-physik.de. [Online] 10. 9 2014. [Zitat vom: 28. 3 2019.] <http://www.biosensor-physik.de/energie/kilowattstunde.htm>.

13. Müller, Erich. *Mechanische Trennverfahren Band 2*. Frankfurt am Main : Otto-Salle Verlag GmbH & Co., 1983. ISBN 3-7935-5503-8.
14. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. www.baua.de. [Online] 1 2008. [Zitat vom: 12. 3 2019.] https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-500.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
15. www.hardwasser.ch. [Online] [Zitat vom: 15. 3 2019.] <http://hardwasser.ch/content/uberblick>.
16. www.mt-kunststoff.de. [Online] 3 2016. [Zitat vom: 15. 3 2019.] <http://mt-kunststoff.de/wp-content/uploads/2016/03/Technische-Doku-Captura.pdf>.
17. Landwehr Wassertechnik GmbH. <https://www.landwehr-wt.de>. [Online] [Zitat vom: 20. 3 2019.] https://www.landwehr-wt.de/fileadmin/user_upload/Landwehr/Downloads/FORMULA_Pp_201708.pdf.
18. Bäderland Hamburg GmbH. *Technische Dokumentation Wasseraufbereitung Barmbek*. s.l. : Bäderland Archiv, 2008.
19. Landwehr Wassertechnik GmbH. *Technische Dokumentation Kombibad Bille-Bad Kst: 7403 Wasseraufbereitung Ordner 42 von 86*. Bäderland Archiv : s.n., 2005.
20. Wolff + Partner GmbH. *Hamburg-Altona Holstenstraße Schwimmbadtechnik 107047*. Bäderland Archiv : s.n., 2007.
21. Aquila Wasseraufbereitungs GmbH. *Schwimmbad Hamburg-Wilhelmsburg Ausführungsplan BWT+Lüftung Stand 08/2011*. Bäderland Archiv : s.n., 2011.
22. Lindemann, Dirk. *Bädertechnik für Betrieb und Ausbildung*. Wolfhagen : Litho-Verlag e.K., 2016. ISBN 978-3-941484.
23. DIN 19643-2, -. *Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser - Teil 2: Verfahrenskombination mit Festbett- und Anschwemmfiltern*. Berlin : Beuth Verlag, 2012.

Anhang

Anhang 1: Fließschema Mehrzweckbecken Hamburger System

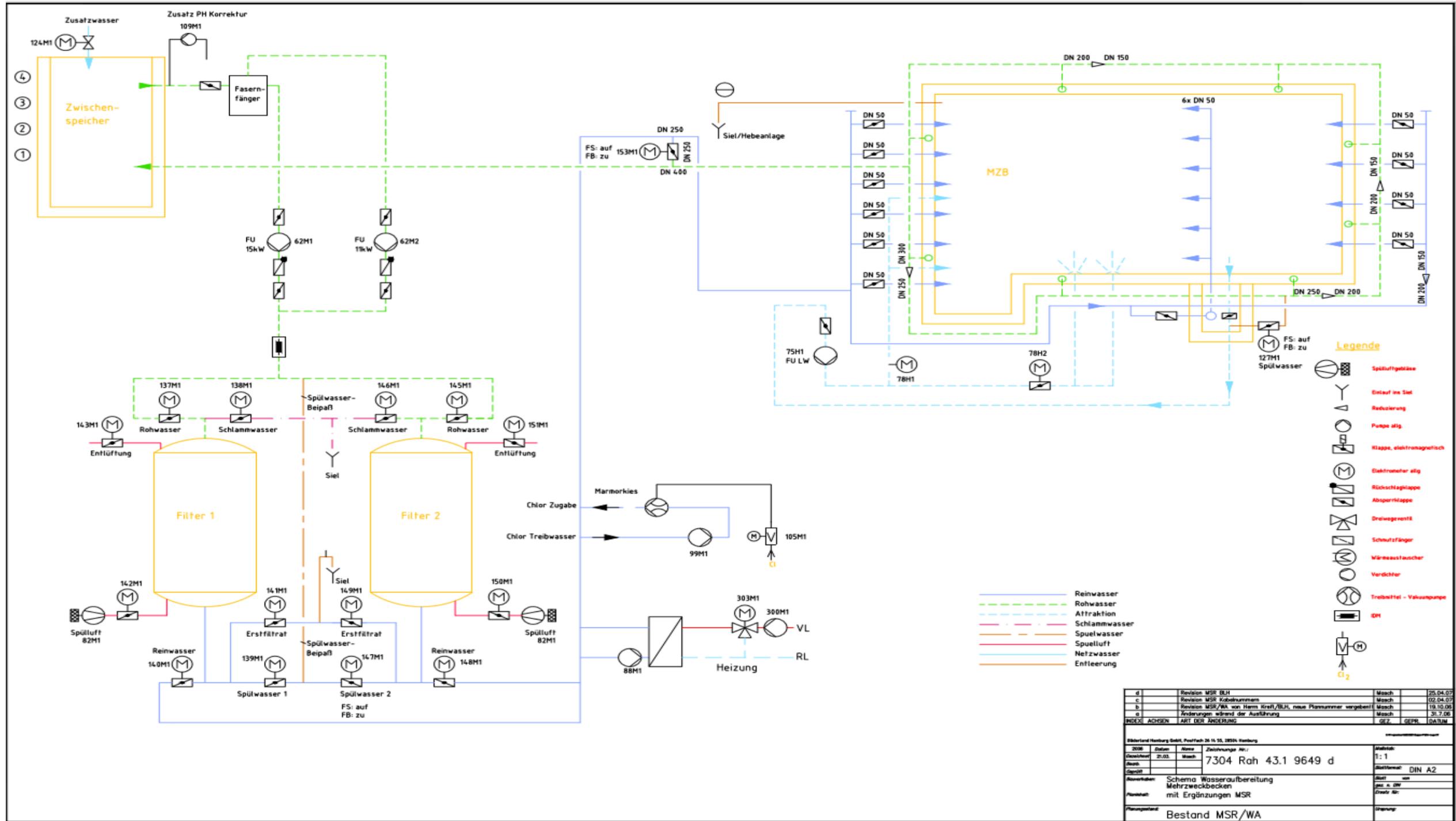
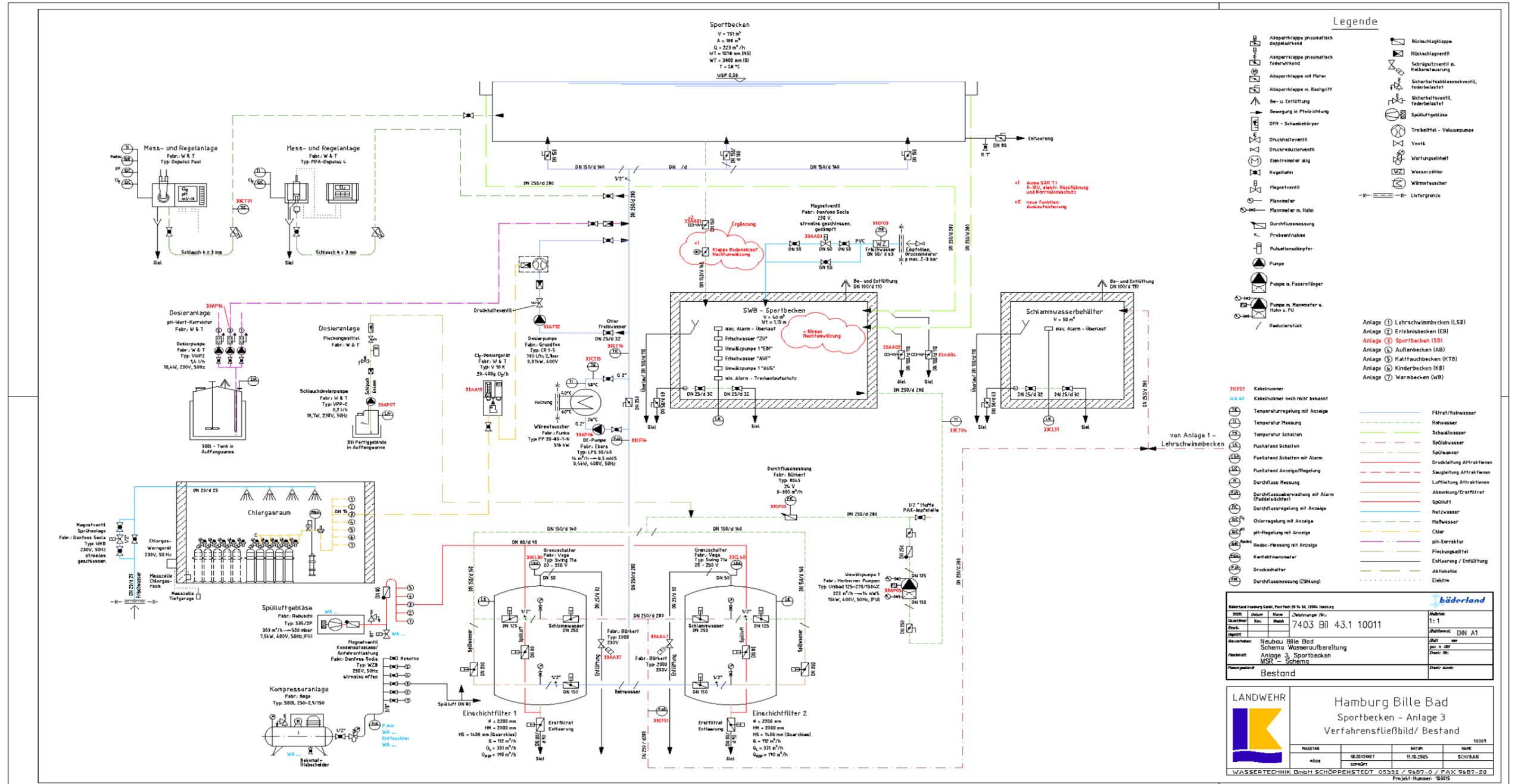


Abbildung 13 Fließschema Mehrzweckbecken Hamburger System (18)

Anhang 2: Fließschema Sportbecken Billebad



Anhang 4: Filterbehälter Anlage 4 Festland Altona

FILTERBEHÄLTER-ANLAGE 4

Fabr.: Landwehr Wassertechnik GmbH

TYP: FORMULA – Doppelkammer

$Q = 2 \times 106 \text{ m}^3/\text{h} \quad v = 30 \text{ m/h}$

$L \times B = \quad \text{mm} \quad H_s = \quad \text{mm} \quad (\text{Quarzsand})$

$A = 2 \times 3,53 \quad \text{m}^2 \quad H_s = \quad \text{mm} \quad (\text{Anthrazit})$

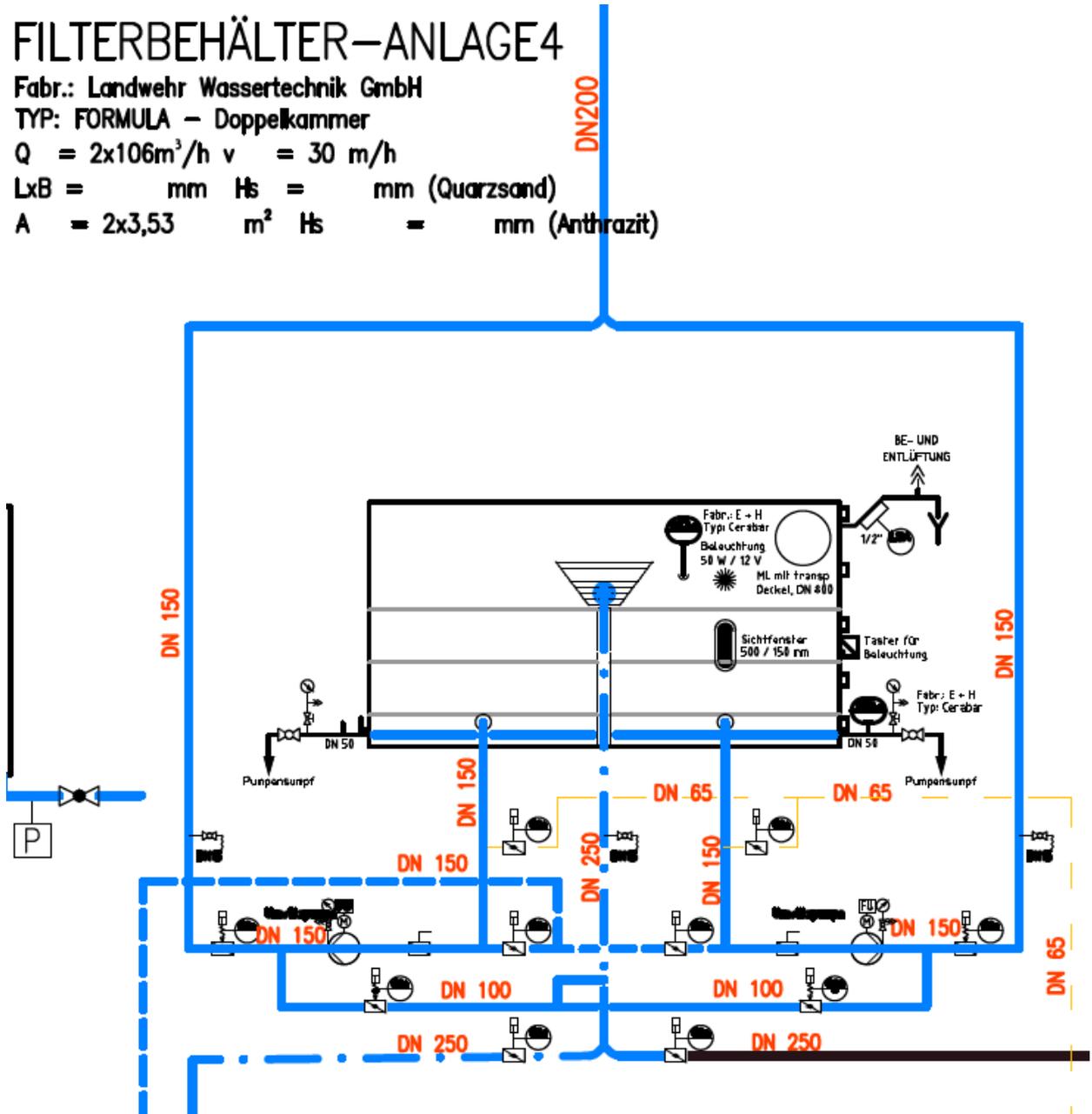


Abbildung 16 Filterbehälter Anlage 4 Festland Altona (20)

Anhang 7: Ermittlung der laufenden Kosten des Hamburger Systems

Tabelle 10 laufende Kosten MZB Elbgaustraße

Bad:	Mehrzweckbecken Elbgaustraße	Einheit	Theorie	ist
	Volumenstrom Q	m³/h	230,00	230,00
Filteranlage:			2 x Einschicht Druckfilter d=2500 mm	
Betriebskosten:				
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		2 x KSB Etablock 200 m³/h	
Stromverbrauch:		kWh	22,00	10,91
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	79,20	39,27
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	28116,00	13941,64
Verbraucher:	Druckerhöhungspumpe PAK:		Grundfos CR 10-7	
Stromverbrauch:		kWh	3,00	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	7,89	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		2799,43
Verbraucher:	PAK Dosieranlage:		Wallace & Tiernan Jetpak	
Stromverbrauch:		kWh	0,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,53	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		186,63
Verbraucher:	Spülluftgebläse		120 s alle 42 h	entspricht 404 min im Jahr
Stromverbrauch:		kWh	11,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		11,00
Betriebsdauer:		h		6,73
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		11,11
Verbraucher:	Spülwasserpumpe		KSB Etablock 200 m³/h 11 kw	
			6 min alle 42 h	entspricht 1212 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	11,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		11,00
Betriebsdauer:		h		20,20
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		33,33

Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m³		1,34
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		5973,00
	Wasserkosten gesamt:	€		8003,82
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m³		1,77
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		5973,00
	Abwasserkosten gesamt	€		10572,21
Wärme				
		kW/h	124895,43	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		6244,77
Filterspülung:				
Filterspülwasser pro Spülung:		m³		34,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				202,00
	Filterspülwasser gesamt:	m³		6868,00
Chemikalieneinsatz:				
	SAP 2013-2017 x 230/315			
Chlorgas:				
Cl2-Verbrauch:		kg	985,50	
Cl2-Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl2-Kosten gesamt:	€		1192,46
Natriumhypochlorit:				
	Chlorbleichlauge			
NaOCl-Verbrauch:		kg		
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		
Mamorkies:				
	67 kg / Monat			
CaCO3-Verbrauch:		kg	635,10	
CaCO3-Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO3-Kosten gesamt:	€		222,29
Wasserstoffperoxid:				
H2O2-Verbrauch:		kg	124,10	
H2O2-Kosten:		€ pro kg	0,27	
	H2O2-Kosten gesamt:	€		33,51
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:		kg	438,00	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		284,70

Aktivkohle:	CSK			
Aktivkohleverbrauch:		kg		226,30
Aktivkohlekosten:		€ pro kg		3,75
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		848,63
		€	Laufende Kosten:	44374,51
		m³/h	Volumenstrom:	230,00
		€	Kosten pro Jahr m³/h	192,93

Tabelle 11 laufende Kosten MZB Billstedt

Bad:	Mehrzweckbecken Billstedt	Einheit	Theorie	ist
	Volumenstrom Q	m³/h	240,00	220,00
Filteranlage:			2 x Einschicht Druckfilter d=2500 mm	
Betriebskosten:				
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		2 x Herborner Uniblock 125-301/1504	
Stromverbrauch:		kWh	30,00	12,23
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	108,00	44,03
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	38340,00	15631,02
Verbraucher:	Druckerhöhungspumpe PAK:		Grundfos CR 10-7	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	3,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh	2,36	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	6,22	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		2209,11
Verbraucher:	PAK Dosieranlage:		Wallace & Tiernan Jetpak	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	0,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,53	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		187,44
Verbraucher:	Spülluftgebläse		120 s alle 42 h	entspricht 404 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	11,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		11,00
Betriebsdauer:		h		6,73
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		11,11

Verbraucher:	Spülwasserpumpe		Unbekannter Hersteller	
			6 min alle 42 h	entspricht 1212 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	5,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		5,50
Betriebsdauer:		h		20,20
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		16,67
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m ³		1,34
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		8356,00
	Wasserkosten gesamt:	€		11197,04
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m ³		1,77
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		8356,00
	Abwasserkosten gesamt	€		14790,12
Wärme:		kW/h	174723,96	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		8736,20
Filterspülung:				
Filterspülwasser pro Spülung:		m ³		34,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				101,00
	Filterspülwasser gesamt:	m ³		3434,00
Chemikalieneinsatz:	SAP 2013-2017			
Chlorgas:				
Cl ₂ -Verbrauch:		kg	994,23	
Cl ₂ -Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl ₂ -Kosten gesamt:	€		1203,02
Natriumhydrogencarbonat:	Natron			
Na ₂ CO ₃ -Verbrauch:		kg		
Na ₂ CO ₃ -Kosten:		€ pro kg	1,59	
	Na ₂ CO ₃ -Kosten gesamt:	€		
Natriumhypochlorit:	Chlorbleichlauge			
NaOCl-Verbrauch:		kg	197,44	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		63,18
Natriumhydrogencarbonat:	Calciniertes Soda			
Na ₂ CO ₃ -Verbrauch:		kg	47,41	
Na ₂ CO ₃ -Kosten:		€ pro kg	0,72	

	Na2CO3-Kosten gesamt:	€		39,60
Mamorkies:				
CaCO3-Verbrauch:		kg	796,55	
CaCO3-Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO3-Kosten gesamt:	€		278,79
Schwefelsäure:				
H2SO4-Verbrauch		kg	649,38	
H2SO4-Kosten		€ pro kg	0,65	
	H2SO4-Kosten gesamt:	€		422,10
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:	150 kg / Monat	kg	644,83	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		419,14
Aktivkohle:				
SK				
Aktivkohleverbrauch:		kg	81,17	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	2,87	
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		232,96
Aktivkohle:				
CSK				
Aktivkohleverbrauch:		kg	131,62	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	3,75	
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		493,58
		€	Laufende Kosten:	55931,08
		m³/h	Volumenstrom:	220,00
		€	Kosten pro Jahr m³/h	254,23

Tabelle 12 laufende Kosten MZB Bramfeld

Bad: Bramfeld	MZB	Einheit	Theorie	ist
	Volumenstrom Q	m³/h	300,00	190-290
Filteranlage:			2 x Einschicht Druckfilter d=2500 mm	
Betriebskosten:				
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		Herborner Uniblock 125-301/1504	
Stromverbrauch:		kWh	30,00	12,23
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	108,00	44,03

	Stromkosten gesamt Jahr:	€	38340,00	15631,02
Verbraucher:	Druckerhöhungspumpe PAK:		Grundfos CR 10-7	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	3,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh	2,06	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	5,45	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		1932,98
Verbraucher:	PAK Dosieranlage:		Wallace & Tiernan Jetpak	
Stromverbrauch:		kWh	0,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,53	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		187,44
Verbraucher:	Spülluftgebläse		120 s alle 42 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	11,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		11,00
Betriebsdauer:		h		6,73
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		11,11
Verbraucher:	Spülwasserpumpe		?? 6 min alle 42 h	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	5,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		5,50
Betriebsdauer:		h		20,20
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		16,67
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m ³		1,30
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		10143,00
	Wasserkosten gesamt:	€		13185,90
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m ³		2,10
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		10143,00
	Abwasserkosten gesamt	€		21300,30
Wärme		kW/h	212090,13	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		10604,51

Filterspülung:				
Filterspülwasser pro Spülung:		m ³		34,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				101,00
	Filterspülwasser gesamt:	m ³		3434,00
Chemikalieneinsatz:	SAP 2013-2017			
Chlorgas:				
Cl ₂ -Verbrauch:		kg	1027,50	
Cl ₂ -Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl ₂ -Kosten gesamt:	€		1243,28
Natriumhydrogencarbonat:	Natron			
Na ₂ CO ₃ -Verbrauch:		kg		
Na ₂ CO ₃ -Kosten:		€ pro kg	1,59	
	Na ₂ CO ₃ -Kosten gesamt:	€		
Natriumhypochlorit:	Webco Pool Liquid			
NaOCl-Verbrauch:		kg	360,00	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,99	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		354,60
Natriumhypochlorit:	Chlorbleichlaug			
NaOCl-Verbrauch:		kg	162,75	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		52,08
Natriumhydroxid:	Soda			
NaOH-Verbrauch:		kg		
NaOH-Kosten:		€ pro kg	0,74	
	NaOH-Kosten gesamt:	€		
Marmor Kies:				
CaCO ₃ -Verbrauch:		kg	202,50	
CaCO ₃ -Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO ₃ -Kosten gesamt:	€		70,88
Schwefelsäure:				
H ₂ SO ₄ -Verbrauch		kg	337,50	
H ₂ SO ₄ -Kosten		€ pro kg	0,65	
	H ₂ SO ₄ -Kosten gesamt:	€		219,38
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:		kg	900,00	

Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		585,00
Aktivkohle:				
Aktivkohleverbrauch:		kg	345,00	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	3,75	
	Aktivkohlekosten ge- samt:	€		1293,75
		€	Laufende Kosten:	66688,87
		m³/h	Volumenstrom:	240,00
		€	Kosten pro Jahr m³/h	277,87

Tabelle 13 laufende Kosten MZB Blankenese

Bad:	Mehrzweckbecken Blankenese	Einheit	Theorie	ist
	Volumenstrom Q	m³/h	230,00	220,00
Filteranlage:			2 x Einschicht Druckfilter d=2500 mm	
Betriebskosten:				
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		2 x KSB Etablock 230 m³/h	
Stromverbrauch:		kWh	22,00	13,94
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	79,20	50,18
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	28116,00	17815,21
Verbraucher:	Druckerhöhungspumpe PAK:		Grundfos CR 10-7	
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	3,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh	2,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	5,81	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		2061,84
Verbraucher:	PAK Dosieranlage:		Wallace & Tiernan Jetpak	
Stromverbrauch:		kWh	0,20	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,53	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		137,46
Verbraucher:	Spülluftgebläse		120 s alle 42 h	entspricht 404 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	11,00	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		11,00

Betriebsdauer:		h		6,73
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		11,11
Verbraucher:	Spülwasserpumpe		KSB Etablock 230 m³/h 11 kw	
			6 min alle 42 h	entspricht 1212 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	5,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		5,50
Betriebsdauer:		h		20,20
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		16,67
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m³		1,34
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		6834,00
	Wasserkosten gesamt:	€		9157,56
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m³		1,77
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m³		6834,00
	Abwasserkosten gesamt	€		12096,18
Wärme:				
		kW/h	142898,94	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		7144,95
Filterspülwasser pro Spülung:		m³		34,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				202,00
	Filterspülwasser gesamt:	m³		6868,00
Chemikalieneinsatz:	SAP 2013-2017 x 220/300			
Chlorgas:				
Cl2-Verbrauch:		kg	1131,50	
Cl2-Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl2-Kosten gesamt:	€		1369,12
Natriumhypochlorit:	Webco Pool Liquid			
NaOCl-Verbrauch:		kg		
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,99	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		0,00
Natriumhypochlorit:	Chlorbleichlauge			
NaOCl-Verbrauch:		kg	175,20	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		56,06

Mamorkies:				
CaCO ₃ -Verbrauch:		kg	474,50	
CaCO ₃ -Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO ₃ -Kosten gesamt:	€		166,08
Schwefelsäure:				
H ₂ SO ₄ -Verbrauch		kg		
H ₂ SO ₄ -Kosten		€ pro kg	0,65	
	H ₂ SO ₄ -Kosten gesamt:	€		0,00
Filterhilfsmittel:				
Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:		kg	328,50	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		213,53
Aktivkohle:	CSK			
Aktivkohleverbrauch:		kg	175,20	
Aktivkohlekosten:		€ pro kg	3,75	
	Aktivkohlekosten gesamt:	€		657,00
		€	Laufende Kosten:	50902,74
		m ³ /h	Volumenstrom:	220,00
		€	Kosten pro Jahr m ³ /h	231,38

Anhang 8: Investitionskosten und laufende Kosten für das Sportbecken im Billebad Bergedorf

Tabelle 14 Investitionskosten und laufende Kosten Sportbecken Billebad

Bad: Billebad Bergedorf	Sportbecken	Einheit	Theorie	ist
	Volumenstrom Q	m ³ /h	223,00	225,00
Anschaffung:				
Kosten-Technikraum:				
Größe-Technikraum:		m ³	72,58	
Kosten pro m ³ :		€	450,00	
	Kosten Technikraum gesamt:	€		32659,20
Filteranlage:	aus Abschlussrechnung 2005		2 x Einschicht Druckfilter d=2200 mm GFK	
Anschaffungspreis:		€	19522,96	27527,37
Verrohrung:		€	8910,48	12563,78

Software für Automatisierung:		€	3311,31	4668,95
Inbetriebnahme und Bearbeitung Software:		€	1425,00	2009,25
Funktionsprüfung:		€	1425,00	2009,25
Inbetriebnahme der gesamten Anlage		€	240,00	338,40
	Gesamt:	€		49117,00
Peripherie:				
Kosten Rohwasserpumpen:		€	3206,55	4489,17
Kosten Frequenzumrichter Roh:		€	1826,71	2557,39
Kosten Filtratpumpen:		€		0,00
Kosten Frequenzumrichter Filtrat:		€		0,00
Kosten Spülluftgebläse:		€	635,60	889,84
Kosten Frequenzumrichter Luft:		€	307,61	430,65
Kosten Kompressor:		€	347,16	486,02
Kosten Mamorkiesbehälter:		€	2450,00	3430,00
Kosten Chlorgasdosiereinrichtung:		€	5084,39	7118,14
Kosten DNP N-FOX:		€	8000,00	8000,00
Kosten Software N-FOX:		€		1236,00
Nachträgliche Investitionskosten:		€		9265,44
	Gesamt:	€		37902,65
Betriebskosten:				
Verbraucher:	Rohwasserpumpe		1 x Herborner Unibad 125-270/1504X	
Stromverbrauch:		kWh	15,00	9,36
Betriebsdauer:		h	24,00	24,00
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Tag:	€	54,00	33,71
	Stromkosten gesamt Jahr:	€	19170,00	11967,02
Verbraucher:	Abtrennung gebundenes Chlor		Wallace & Tiernan DNP - NFOX Regenerator	
Stromverbrauch:		kWh	0,80	
Betriebsdauer:		h	24,00	
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	
	Stromkosten gesamt Tag:	€	0,78	
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		1022,40
Verbraucher:	Spülluftgebläse Robuschi S35/2P		40 s alle 84 h	entspricht 67 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	7,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		7,50
Betriebsdauer:		h		1,12
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		1,26

Verbraucher:	Spülwasserpumpe		1 x Herborner Unibad 100-271/0754 X	
			6 min alle 84 h	entspricht 606 min im Jahr
Stromverbrauch theoretisch:		kWh	7,50	
Stromverbrauch tatsächlich:		kWh		7,50
Betriebsdauer:		h		10,10
Stromkosten:		€ pro kWh	0,15	0,15
	Stromkosten gesamt Jahr:	€		11,36
Wasserverbrauch:				
Wasserkosten:		€/m ³		1,34
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		4514,00
	Wasserkosten gesamt:	€		6048,76
Abwasser:				
Abwasserkosten		€/m ³		1,77
Mittelwert 2015-2017	aus EWS	m ³		4514,00
	Abwasserkosten gesamt	€		7989,78
Wärme:				
		kW/h	94387,74	
	Wärmekosten	€ pro kW/h	0,05	
	Wärmekosten gesamt	€		4719,39
Filterspülung:				
Filterspülwasser pro Spülung:		m ³		34,00
Anzahl Spülungen pro Jahr:				202,00
	Filterspülwasser gesamt:	m ³		6868,00
Chemikalieneinsatz:				
	SAP 2013-2017			
Chlorgas:				
Cl ₂ -Verbrauch:		kg	889,57	
Cl ₂ -Kosten:		€ pro kg	1,21	
	Cl ₂ -Kosten gesamt:	€		1076,38
Natriumhydrogencarbonat:				
	Natron			
Na ₂ CO ₃ -Verbrauch:		kg		
Na ₂ CO ₃ -Kosten:		€ pro kg	1,59	
	Na ₂ CO ₃ -Kosten gesamt:	€		
Natriumhypochlorit:				
	Webco Pool Liquid			
NaOCl-Verbrauch:		kg		
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,99	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		0,00
Natriumhypochlorit:				
	Chlorbleichlauge			

NaOCl-Verbrauch:		kg	21,47	
NaOCl-Kosten:		€ pro kg	0,32	
	NaOCl-Kosten gesamt:	€		6,87
Natriumhydroxid:	Soda			
NaOH-Verbrauch:		kg		
NaOH-Kosten:		€ pro kg	0,74	
	NaOH-Kosten gesamt:	€		
Mamorkies:	200 kg / Monat			
CaCO3-Verbrauch:		kg	475,46	
CaCO3-Kosten:		€ pro kg	0,35	
	CaCO3-Kosten gesamt:	€		166,41
Schwefelsäure:				
H2SO4-Verbrauch		kg	53,68	
H2SO4-Kosten		€ pro kg	0,65	
	H2SO4-Kosten gesamt:	€		34,89
Bicar Pharma Excipient				
Bicar-Verbrauch:		kg	107,36	
Bicar-Kosten:		€ pro kg	2,38	
	Bicar-Kosten gesamt:	€		255,52
Scale Ex K1				
Scale Ex K1 Verbrauch:		kg	8,33	
Scale Ex K1 Kosten:		€ pro kg	11,80	
	Scale Ex K1 Kosten gesamt:	€		98,33
Scale Ex K2				
Scale Ex K2 Verbrauch:		kg	6,00	
Scale Ex K2 Kosten:		€ pro kg	11,45	
	Scale Ex K2 Kosten gesamt:	€		68,70
P3 Ultrasiel 75				
P3 Ultrasiel 75 Verbrauch:		kg	8,67	
P3 Ultrasiel 75 Kosten:		€ pro kg	8,66	
	P3 Ultrasiel 75 Kosten gesamt:	€		75,05
P3 Ultrasiel 112				
P3 Ultrasiel 112 Verbrauch:		kg	7,33	
P3 Ultrasiel 112 Kosten:		€ pro kg	10,75	
	P3 Ultrasiel 112 Kosten gesamt:	€		78,83
Filterhilfsmittel:				

Flockungsmittel:				
Dialuminium chlorid pentahydroxid (Quickflock)				
Flockungsmittelverbrauch:		kg	797,55	
Flockungsmittelkosten:		€ pro kg	0,65	
	Flockungsmittelkosten gesamt:	€		518,40
Filter zur Abtrennung des gebundenen Chlors:				
Ersatzfilterkartuschen N-FOX Regenerator: (1 x im Jahr)		€	1200,00	1200,00
		€	Laufende Kosten:	35339,37
		m ³ /h	Volumenstrom:	225,00
		€	Kosten pro Jahr m ³ /h	157,06