Sachbericht zum FuE-Projekt Nr. 12721

"Effiziente Wasseraufbereitungstechnologie für Brunnen- und Gebrauchswasser" Kurzbezeichnung EffBruGWa

Von der SAB Sächsische Aufbaubank im Rahmen des Förderprogramms "Projekte zur Entwicklung neuer und neuartiger Projekte und Verfahren im Freistaat Sachsen" gefördertes Vorhaben

Projektleiter: Dr. habil. Thiele, Wolfgang

Kooperationspartner:

Steinbeis Transfer Zentrum R.T.M. Halle Blumen Meinhardt GmbH Niemberg

Gliederung

Teil 1: Kurzfassung

Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

- 1.0 Ziel des Vorhabens
- 2.0 Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde
- 3.0 Darstellung und Wertung der erzielten wissenschaftlichen bzw. technischen Ergebnisse
- 3.1 Bewertung des als Alternative vorgesehenen DesEl-Verfahrens zur elektrochemischen Salzabreicherung
- 3.2 Erprobungsergebnisse der Verfahrenskombination Umkehrosmose-Calc-Tech-Anlage im EUT-Technikum und bei der Fa. Blumen Meinhardt GmbH
- 3.3 Erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine kleine Wasseraufbereitungsanlage, ausreichend für den Bedarf der Fa. Blumen Meinhardt GmbH
- 3.4 Anlagenkonzept für die Wasseraufbereitungsanlage Kapazitäts- und Kostenabhängigkeiten
- 3.5 Aufbau und Funktion der Anlage zur Säurespülung der Umkehrosmose-Module
- 3.6 Konzept für ein Ergänzungsmodul zur Desinfektion und zur Beseitigung bzw. Vermeidung der Algenbildung
- 4.0 Anwendungsmöglichkeiten und Darstellung der geplanten wirtschaftlichen Verwertung
- 5.0 Angaben zu bereits erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen bzw. Patentanmeldungen
- 6.0 Beitrag des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen.
- 7.0 Einschätzung des Finanzierungs- bzw. Zeitplanes mit Angabe der Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben
- 8.0 Im Rahmen des Vorhabens hergestellte Sonderbetriebsmittel und deren weitere Verwendung
- 9.0 Literatur

Teil 1: Kurzfassung

Zielstellung

Entwicklung einer effizienten Wasseraufbereitungstechnologie für Brauch- und Trinkwasser, speziell zugeschnitten auf Gartenbau- und Landwirtschaftsbetriebe mit eigenem Brunnen und mit jährlichen Wasserverbräuchen von 20.000 bis 200.000 m³. Die Wasservorbehandlung soll die Versorgung mit teilenthärtetem und teilentsalztem Wasser, das auch pflanzen-

verträglich ist, kostengünstig ermöglichen. Darüber hinaus soll optional eine elektrolytische Wasserdesinfektion in die Untersuchungen einbezogen werden, um bei Bedarf auch Trinkwasserqualität zu ermöglichen. Die spezifischen Kosten dieser effizienten Wasseraufbereitung sollen 0,5 €/m³ möglichst nicht überschreiten, wobei eine Rückflussdauer für die Investmittel von etwa 2 Jahren angestrebt wird.

Realisierte Ergebnisse

Für die Wasseraufbereitung wurden zunächst zwei Varianten untersucht und wirtschaftlich bewertet:

- Durch die Umkehrosmose in Kombination mit einer zur Vermeidung von Kalkablagerungen in den Membranen vorgeschalteten CalcTech-Anlage (Erzeugung eines alternierend modifizierten Magnetfeldes) wird ein Deionat erzeugt, welches mit Brunnenwasser abgemischt wird.
- 2. Anwendung des DesEl-Verfahrens zur elektrochemischen Enthärtung und Teilentsalzung.

Beide Verfahren führten bei der Ersterprobung zu guten Ergebnissen hinsichtlich der erreichbaren Wasserqualitäten. Jedoch ergab eine erste Kostenschätzung, dass sich die wirtschaftliche Zielstellung mit dem kostenaufwändigeren DesEl-Verfahren nicht realisieren lässt. Deshalb wurde im weiteren Verlauf der Arbeiten ausschließlich die Weiterentwicklung der Verfahrenskombination gemäß Pkt. 1 verfolgt. Die Ersterprobung einer Technikums-Umkehrosmose-Anlage mit vorgeschalteter CalcTech-Anlage wurde bei EUT sowohl mit Trinkwasser (ca. 22 °dH) als auch mit Brunnenwasser der Fa. Blumen Meinhardt GmbH (ca. 44 °dH) durchgeführt. Nach positiver Erprobung wurde die Anlage beim Kooperationspartner zur Bewässerung ausgewählter Pflanzenkulturen eingesetzt. Auf Grund der Ergebnisse einer mehrmonatigen Bewässerung verschiedener Pflanzenkulturen mit dem erhaltenen Gießwasser wurden im Vergleich mit dem bisher eingesetzten Trinkwasser keinerlei Nachteile festgestellt. Trotz der Verwendung des sehr harten und salzhaltigen Brunnenwassers (ca. 1.600 mg/l Salzgehalt) kam es nicht zu einer Schädigung der Umkehrosmose-Membranen. Eine nur geringfügige Kalkablagerung wurde im Nachgang mittels verdünnter Salzsäure entfernt. Für eine in größeren Zeitabständen sicherheitshalber vorzusehende Säurespülung wurde eine Verfahrensweise entwickelt und erprobt, mit der eventuelle Kalkablagerungen ohne Ausbau der Umkehrosmose-Module kurzfristig entfernt werden können. Damit kann auf die sonst erforderliche kostenaufwändige Enthärtung des der Umkehrosmose-Anlage zugeführten Brunnenwassers verzichtet werden.

Für die Auslegung der Wasserbehandlungsanlagen (in Abhängigkeit der Invest- und Betriebskosten von der Anlagenkapazität) wurden Berechnungsmodelle entwickelt und ausge-

wertet. Damit ergaben sich ab einem Gießwasserverbrauch von 20.000 m³/a spezifische Wasserbehandlungskosten von $\le 0,5$ €/m³, mit sinkender Tendenz bei größeren Anlagen (z.B. $\le 0,4$ €/m³ bei 50.000 m³/a). Bei kleineren Anlagen für 10.000 m³/a (entspricht dem jährlichen Verbrauch der Fa. Blumen Meinhardt GmbH) muss mit etwas höheren spez. Kosten um die 0,7 €/m³ gerechnet werden.

Zur Desinfektion des behandelten Wassers wurden die durch EUT entwickelten Desinfektions-Elektrolysezellen auf Basis von Aktivchlor oder Ozon erprobt und für die technischen Wasseraufbereitungsanlagen ausgelegt. Mit einer Desinfektionszelle auf Basis von Aktivchlor wurden auch gute Ergebnisse zur Beseitigung des nach längerer Betriebszeit auftretenden Algenbefalls erzielt.

Anwendungsmöglichkeiten

In erster Linie ist das Entwicklungsergebnis für Gartenbau- und Landwirtschafts-Betriebe anwendbar, die einen jährlichen Gießwasserbedarf ab 10.000 m³/a haben und die über Brunnenwasser verfügen, das wegen zu hoher Härte- und Salzgehalte als Gießwasser nicht geeignet ist. Das Verfahren lässt sich aber auch überall dort einsetzen, wo in analoger Weise eine Verringerung der Wasserhärte und des Salzgehaltes von Brunnenwasser zwingend erforderlich ist. Die erreichbare Wirtschaftlichkeit ist umso besser, je gleichmäßiger der Wasserverbrauch über das Jahr verteilt ist. In diesem Sinne können bei Anwendungen in kleineren Industriebetrieben sogar bessere Voraussetzungen für die Anwendung des Entwicklungsergebnisses vorliegen, als bei Gartenbaubetrieben mit einem der Vegetationsperiode angepassten, stark schwankenden Wasserbedarf.

Teil 2: Ausführlicher Sachbericht

1.0 Ziel des Vorhabens

Entwicklung einer effizienten Wasseraufbereitungstechnologie für Brauch- und Trinkwasser für verschiedene Anwendungsgebiete, insbesondere für Industrie-, Landwirtschafts- und Gartenbaubetriebe mit eigenem Brunnen und mit jährlichen Wasserverbräuchen von 20.000 bis 200.000 m³ (Kurzbezeichnung EffBruGWA). Die Wasservorbehandlung soll die Versorgung mit teilenthärtetem und vorwiegend teilentsalztem Wasser, das auch pflanzenverträglich ist, kostengünstig absichern. Darüber hinaus soll optional die Integration einer elektrolytischen Wasserdesinfektion in die Gesamtanlage erfolgen, um bei Bedarf faktische Trinkwasserqualität zu ermöglichen. Die spezifischen Kosten dieser effizienten Wasseraufbereitung sollen 0,5 €/m³ nicht überschreiten, wobei eine Rückflussdauer für die Investmittel von etwa 2 Jahren angestrebt wird.

2.0 Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

Viele Gartenbaubetriebe und kleinere landwirtschaftliche Unternehmen, aber auch Industriebetriebe mit großem Wasserbedarf, verfügen über eigene Brunnenanlagen, können jedoch vielfach das Wasser ohne geeignete Vorbehandlung nicht nutzen. Der zu hohe Kalk- und Salzgehalt genügt oft nicht den speziellen Erfordernissen, z.B. für solch sensible Bereiche wie die Pflanzenzucht. Ein zu hoher Kalk-/Salzgehalt führt nicht nur zur Verstopfung der Berieselungsanlagen, es kommt auch zu einer Hemmung des Pflanzenwuchses durch Schädigung der Wurzeln und durch Kalkablagerungen auf den Blättern. Der Kalk bindet darüber hinaus im Boden wichtige Nährstoffe, die dadurch den Pflanzen nicht mehr zur Verfügung stehen. Insgesamt ist davon auszugehen, dass für Topfpflanzen die Wasserhärte im Bereich von 10 bis 20 °dH und der Gesamtsalzgehalt (als KCI) 150 - 400 mg/l liegen sollte.

Die dem Stand der Technik entsprechenden Verfahren zur Enthärtung und Teilentsalzung wie Ionenaustausch und Membranverfahren (insbesondere die Umkehrosmose) sind mit folgenden Nachteilen verbunden:

Bei den Ionenaustauschverfahren sind zur Regenerierung Chemikalien erforderlich, die nicht nur selbst Kosten verursachen, sondern darüber hinaus auch erhebliche Aufwendungen zur umweltgerechten Entsorgung der anfallenden Behandlungslösungen verursachen.

Bei den Membranverfahren kommt es zur Kalkablagerung im Leitungssystem und vor allen Dingen auf den Membranen. Bei Umkehrosmose-Anlagen ist es deshalb zwingend erforderlich, zur Vermeidung bzw. Minimierung solcher Kalkablagerungen eine Vorenthärtung vorzu-

nehmen, komplexbildende Zusätze zu verwenden oder die Anlagen in relativ kurzen Abständen zu spülen bzw. mit Säuren vom Kalk zu befreien. Auch die Dauerbeständigkeit der Membranen leidet darunter. Die laufenden Kosten für die Erneuerung der Membranen, für die erforderlichen Chemikalien bzw. für die umweltgerechte Entsorgung der anfallenden mit Chemikalien belasteten Abwässer sind deshalb relativ hoch. Dadurch ergeben sich aber spezifische Kosten der Wasserbehandlung, die meist die bei ca. 1,50 €/m³ liegenden Trinkwasserkosten für gewerbliche Zwecke übersteigen und 1,80 bis 2,50 €/m³ erreichen können. Diese hohen Kosten einer eigenen Wasseraufbereitung sind für mittlere Garten- und Obstbaubetriebe vielfach nicht tragbar, so dass dort, wo verfügbar, auf die öffentliche – aber teure – Trinkwasserversorgung zurückgegriffen werden muss.

Neben den genannten Verfahren der Wasserbehandlung, die zum allseitig verfügbaren technischen Stand gehören, ist in den letzten Jahren ein elektrolytisches Verfahren bekannt geworden, mit dem auch eine Enthärtung und Teilentsalzung von Brauchwasser möglich ist. Beim sogenannten DesEl-System [1,2] wird mit einem speziellen elektrochemischen Reaktor gearbeitet, der mit großflächigen Elektroden, Trennfolien und Abstandshaltern ausgestattet ist. Beim Durchfluss von Brauchwasser und Anlegen einer Spannung kommt es zur Konzentrierung von Kationen im Kathodenbereich und von Anionen im Anodenbereich, wodurch Härtebildner und andere Salze aus dem Brauchwasser entfernt und an den Elektroden angereichert werden (siehe Funktionsschema Bild 1, S. 7).

Die angelegte Spannung reicht jedoch nicht zur Entladung der Ionen an den Elektroden aus. Nach erfolgter Beladung der Elektrodenbereiche mit den Ionen (Beladevorgang) erfolgt deren Abreicherung, indem sich in einem Wasser-Teilstrom bei umgekehrter elektrischer Polung die Ionen wieder von den Elektroden ablösen, so dass sich die abgetrennten Salze wieder im Wasser-Teilstrom anreichern und mit diesem Abwasser ausgetragen werden (Entladevorgang). Bei der Normalausführung dieser DesEl-Anlagen kommt es bevorzugt zur Abreicherung von mehrwertigen Ionen, also im vorliegenden Fall eines zu behandelnden Brauchwassers vorwiegend zur Entfernung der die Wasserhärte bildenden Ca²+- und Mg²+- Ionen.

Da die DesEl-Anlagen derzeit nur als Pilotanlagen in Kanada "handgefertigt" werden, sind sie gegenwärtig - sowohl von der Anschaffung her als auch beim laufenden Betriebsaufwand - noch zu kostenintensiv. Hinzu kommt, dass bei diesem Verfahren besonders großflächige Elektroden und Membranen eingesetzt werden und somit genau wie bei den Umkehrosmose-Anlagen mit störenden Kalkablagerungen zu rechnen ist, die in geringen Zeitabständen durch Rückspülungen und/oder durch Zusatz von Chemikalien entfernt werden müssen. In-

sofern sind beim DesEl-Verfahren die gleichen Probleme bei der Behandlung von sehr hartem Brauchwasser zu erwarten, wie sie bereits am Beispiel der Umkehrosmose dargestellt wurden. Seitens EUT und des Beratungsunternehmen Steinbeis Technologietransferzentrum RTM (speziell durch Prof. Matschiner) wurden deshalb Konzepte zur Weiterentwicklung dieses Umkehrosmose-Verfahrens entwickelt:

Zur Vermeidung von Kalkablagerungen in Behältern und Leitungen mit hartem Wasser sind Verfahren der Wasserbehandlung bekannt, bei denen die unter Einwirkung eines elektrischen und magnetischen Feldes auftretenden sogenannten Lorenzkräfte dazu genutzt werden, um kleine Kalkpartikel in Bewegung zu versetzen. Hierzu gibt es viele Untersuchungen, die teilweise schon aus den 70er Jahren stammen [3]. H. Matschiner et. al. [4] haben gefunden, dass insbesondere durch ein alternierend moduliertes, also speziell gepulstes Magnetfeld kleine Teilchen in gleicher Weise sehr stark beschleunigt werden können und beim Zusammenstoß mit anderen Teilchen oder mit den Wandungen zertrümmert werden. Diese Bruchstücke verhindern, dass sich feste Kalkablagerungen an den Wänden von Rohrleitungen und Behältern bilden. Dieses Verfahren findet inzwischen als CalcTech-Verfahren zur Verhinderung von Kalkabscheidungen in Rohrleitungen bereits technische Anwendung [5, 6]. Es galt zu erforschen, ob bei der Wasseraufbereitung sowohl durch das DesEl-Verfahren als auch durch die Umkehrosmose durch eine Kombination mit diesem Calc-Tech-Verfahren eine Effizienzsteigerung erreicht werden kann.

3.0 Darstellung und Wertung der erzielten wissenschaftlichen bzw. technischen Ergebnisse

3.1 Bewertung des als Alternative vorgesehenen DesEl-Verfahrens zur elektrochemischen Salzabreicherung

In einer bei der Fa. Aqua & Terra GmbH in 15326 Lebus (Nähe Frankfurt Oder) stationierten Pilotanlage für das DesEl-Verfahren wurden Versuche zur Teilentsalzung des stark salzhaltigen Brunnenwassers der Fa. Blumen Meinhardt GmbH gefahren. Beim patentierten DesEl-System kann Wasser teilentsalzt bzw. teilenthärtet werden. Es wird mit einem speziellen elektrochemischen Reaktor gearbeitet, der mit großflächigen Elektroden, Trennfolien und Abstandshaltern ausgestattet ist. Beim Durchfluss von Brauchwasser und Anlegen einer Spannung kommt es zur Konzentrierung von Kationen im Kathodenbereich und von Anionen im Anodenbereich, wodurch Härtebildner und andere Salze aus dem Brauchwasser entfernt und an den Elektroden angereichert werden (siehe Bild 1, Funktionsschema).

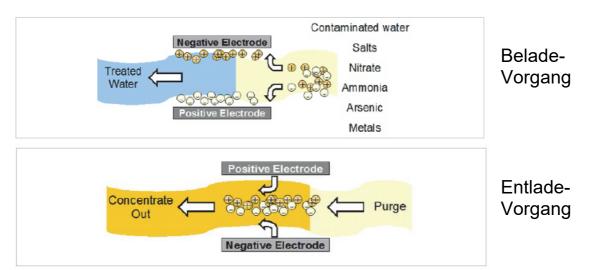


Bild 1: Funktionsschema des DesEl-Systems zur Wasserbehandlung



Bild 2: DesEl-Versuchsanlage

Die angelegte Spannung reicht jedoch nicht zur Entladung der Ionen an den Elektroden aus. Nach erfolgter Beladung der Elektrodenbereiche mit den Ionen (Beladevorgang) erfolgt deren Abreicherung, indem sich in einem Wasser-Teilstrom bei umgekehrter elektrischer Polung die Ionen wieder von den Elektroden ablösen, so dass sich die abgetrennten Salze wieder im Wasser-Teilstrom anreichern und mit diesem Abwasser ausgetragen werden (Entladevorgang). Bei der Normalausführung dieser DesEl-Anlagen kommt es bevorzugt zur Abreicherung von mehrwertigen Ionen, also im vorliegenden Fall eines zu behandelnden Brunnenwassers mit großer Ausgangshärte vorwiegend zur Entfernung der die Wasserhärte bildenden Ca²+- und Mg²+-Ionen.

Die bei der Fa. Aqua & Terra vorhandene Technikums-Versuchsanlage hat einen maximalen Durchsatz von 8 I/min (ca. 500 I/h). Die Steuerung erfolgt durch Vorgabe der maximalen

elektrischen Leitfähigkeit, bei der die Anlage von Beladen auf Entladen umschaltet. Die durchschnittliche Leitfähigkeit des behandelten Wassers liegt dann unter diesem Grenzwert.

Das eingesetzte Brunnenwasser hatte einen Gesamtsalzgehalt von etwa 1.600 mg/l, eine Wasserhärte von 42 °dH (246 mg/l Ca, 30 mg/l Mg) sowie eine elektrische Leitfähigkeit von $1.996~\mu S/cm$.

Bei einem ersten Versuch wurde als Grenzwert 400 µS/cm eingegeben, der Endwert lag dann unter diesem Grenzwert, der mögliche Durchsatz wurde dabei aber nur ungenügend ausgeschöpft. Deshalb wurde für eine genauere Messung der Grenzwert auf 1.000 µS/cm heraufgesetzt. Es stellte sich ein Durchsatz zwischen 4 und 6 l/min, also ca. 300 l/h ein. Diese Durchsatzmenge bezieht sich allerdings nur auf die Zeit der Beladung. Rechnet man mit etwa 20 % der Gesamtzeit für die Umschaltzeiten und für das Entladen, ergäbe sich ein mittlerer Durchsatz von etwa 240 l/h. Es wurden Durchschnittsproben für das behandelte Wasser und das aufkonzentrierte Abwasser entnommen. Die folgenden Analysendaten wurden ermittelt:

	Wasserhärte	Ca-Gehalt	Mg-Gehalt	Leitfähigkeit	
	°dH	mg/l	mg/l	μS/cm	
Ausgangs-Brunnenwasser	42	246	30	1.996	
behandeltes Wasser	3	21	0	750	
Abwasser (Konzentrat)	227	1.118	305	11.500	

Bei annähernder Proportionalität des Salzgehaltes mit der elektrischen Leitfähigkeit kann eingeschätzt werden, dass der Salzgehalt von 1.600 mg/l auf etwa 600 mg/l, also auf etwa. 38 % verringert werden konnte. Wesentlich stärker ging die Wasserhärte von 42°dH auf 3°dH, also auf nur noch 7 % zurück. Andererseits stieg der Salzgehalt im Abwasser auf das 5,8fache des Ausgangsgehaltes an. Von den 300 l/h eingespeistes Brunnenwasser wurden nur etwa 35 l, also nur etwa 12 % in Form von Abwasser wieder ausgetragen (berechnet aus dem Leitfähigkeitsanstieg).

Insgesamt kann auf Grund dieser Ergebnisse das DesEl-Verfahren als durchaus mögliche Alternative zum Umkehrosmose-Verfahren angesehen werden.

Allerdings sind die von Aqua & Terra eingeschätzten Preise noch deutlich zu hoch, um eine ernsthafte Konkurrenz zum mittels Calc-Tech modifizierten Verfahren der Umkehrosmose darstellen zu können. Für eine Anlage mit einem Durchsatz von ca. 3 m³/h teilentsalztem

Wasser wurde ein Richtpreis von etwa 80.000 € angegeben. Das ist im Vergleich zu den im Verlauf der Themenbearbeitung ermittelten Investaufwendungen einer gleichgroßen Wasserbehandlungsanlage auf der Grundlage der Umkehrosmose das mehr als Doppelte. Da sich damit die wirtschaftliche Zielstellung des F/E-Projektes nicht realisieren lässt, wurden die Arbeiten an dieser Verfahrensvariante nicht weitergeführt. Dazu hat auch beigetragen, dass Aqua & Terra nicht bereit war, Einsicht in die mit den Canadischen Patentinhabern abgeschlossenen Verträgen zu gewähren, in denen angeblich für Aqua & Terra die ausschließlichen Nutzungsrechte für Europa vereinbart sind. EUT hat auch angeboten, gemeinsam mit Aqua & Terra eine Weiterentwicklung vorzunehmen und hat dafür Konzepte vorgeschlagen. Eine dazu Aqua & Terra vorgeschlagene Absichtserklärung für die Zusammenarbeit bei der Weiterentwicklung und Vermarktung des DesEl-Systems wurde leider von Aqua & Terra nicht akzeptiert.

3.2 Erprobungsergebnisse der Verfahrenskombination Umkehrosmose - Calc-Tech-Anlage im EUT-Technikum und bei der Fa. Blumen Meinhardt GmbH

Für die Versuche im Rahmen des Projektes wurde eine komplette Umkehrosmose-Anlage der Fa. AquaCare GmbH & Co. KG vom Typ HP 3000 für einen Deionat-Nenndurchsatz von 120 l/d gemietet. Die Anlage wurde zunächst mit vorgeschalteter Enthärtung in Betrieb genommen. Um die Ausgangsbedingungen für die Versuche mit der CalcTech-Anlage festzustellen, wurde mit der unveränderten Umkehrosmoseanlage, aber ohne vorherige Enthärtung, wie folgt verfahren (s. Bild 3):



Bild 3: Umkehrosmoseanlage vom Typ HP 3000, Ausgangszustand mit 5 UO-Modulen

Der Trinkwasserdurchsatz wurde schrittweise erhöht, wodurch sich auch der Druck erhöhte. Der Konzentratanteil wurde dabei auf mindestens 1/3 der Wassereintrittsmenge eingestellt. Der Druck wurde zunächst auf maximal 12 Bar erhöht. Der mit 16 Bar angegebene Grenzwert wurde dabei noch nicht erreicht. Trotzdem stieg der Durchsatz an Deionat bis auf 210 l/h an Wie aus dem Diagramm ersichtlich, kam es dabei kaum zu einer Qualitätsverschlechterung (Anstieg der Leitfähigkeit von 12 auf 14 µS/cm).

Für das eingesetzte Trinkwasser (das bei EUT anliegt) wurden folgende Ausgangsdaten bestimmt: Wasserhärte 20,4 °dH, el. Leitfähigkeit 690 μS/cm, Kalziumgehalt 119 mg/l, Magnesiumgehalt 16,2 mg/l (siehe Diagramm Bild 4).

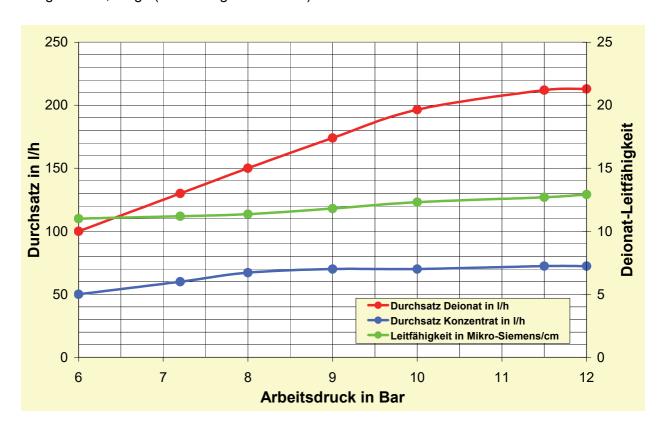


Bild 4: Abhängigkeit der Leistungsparameter der UO-Anlage vom Druck.

Offensichtlich ist die Anlage mit 5 neuwertigen UO-Membranen überdimensioniert. Um die für die Versuche veranschlagten 100 l/h Deionat zu erreichen, käme man gut mit drei anstelle der installierten fünf Module aus. Es ergäbe sich bei einem Druck von 9 bis 10 Bar ein Durchsatz von etwa 100 l/h. Damit hatte man die Möglichkeit, sicherheitshalber zwei Module in Reserve zu lassen. Selbst wenn es bei den Versuchen mit CalcTech ohne vorherige Enthärtung zum Ausfall der Umkehrosmose-Module gekommen wäre, hätte man die Anlage mit einem auf 60 –80 l/h reduzierten Deionatdurchsatz wieder in Betrieb nehmen können, bis Ersatzmembranen beschafft wurden.

Der Umbau der Anlage wurde mit folgender Zielsetzung durchgeführt.

- 1. Ausbau von 2 Modulen, so dass die Anlage mit 3 Modulen weiter betrieben werden kann.
- 2. Die CalcTech-Anlage wurde in die Umkehrosmoseanlage in der Weise integriert, dass der Trinkwasserstrom diese nach den Vorfiltern und vor der Druckerhöhungspumpe passiert. Durch den Einbau zweier T-Stücke sowie von zwei Hähnen wäre es erforderlichenfalls möglich gewesen, die CalcTech-Anlage zu überbrücken und die Enthärtung wieder in Betrieb zu nehmen.

Die Abhängigkeit der Leistungsdaten vom Pumpendruck wurde nach dem Umbau ohne und mit zwischengeschalteter CalcTech-Anlage bestimmt. Die Ergebnisse sind im Bild 5 dargestellt:

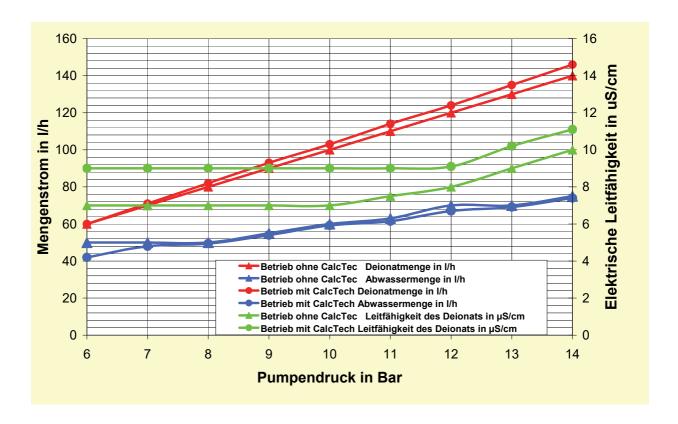


Bild 5: Abhängigkeit der Leistungsparameter vom Druck mit und ohne CalcTech.

Es wird deutlich, dass auch mit den verbliebenen drei Modulen noch ein Deionatdurchsatz von 140 l/h erreicht werden kann, wenn der Pumpendruck bis auf den noch zulässigen Wert von 14 Bar erhöht wird. Der Deionatdurchlauf ist mit der CalcTech-Anlage nur geringfügig höher als ohne. Deutlich höher ist mit der CalcTech-Anlage allerdings die elektrische Leitfähigkeit. Das deutet darauf hin, dass doch der Stofftransport durch die Membran verbessert wird, wodurch es wahrscheinlich auch zum Durchbruch einer geringfügig erhöhten Salzmenge kommt. Die dadurch eintretende Qualitätsverringerung ist jedoch für den vorliegenden

Anwendungsfall völlig unerheblich. Wenn man die bis zum Druck von 12 Bar mit CalcTech etwa gleichbleibende Leitfähigkeit von ca. 9 µS/cm ansetzt, entspräche das einem Salzgehalt von nur etwa 1,3 % des im eingesetzten Trinkwasser enthaltenen Salzgehaltes. Allerdings erwiesen sich bei den späteren Dauerversuchen die in der Anlage gemessenen und angezeigten Leitfähigkeiten im Vergleich zu extern gemessenen Leitfähigkeiten als zu niedrig. Deshalb wurden später die Leitwerte extern gemessen.

Bei den zunächst nur in der Tagschicht durchgeführten Dauerversuchen mit vorgeschalteter CalcTech-Anlage wurde, um Trinkwasser zu sparen, zunächst mit einem Eintritt von 100 l/h gearbeitet, wovon 60 l/h als Deionat anfielen.

Die Anlage wurde in einer ersten Versuchsperiode mit Tagschichtbetrieb über insgesamt 180 h mit vorgeschalteter CalcTech-Anlage unter ständiger Kontrolle betrieben. Während dieser Zeit wurden extern Leitwerte zwischen 22 und 25 μ S/cm gemessen. Der zur Aufrechterhaltung des Deionatdurchsatzes erforderliche Pumpendruck stieg nur geringfügig an.

Im Bild 6 sind die zu Beginn der Versuche sowie nach 180 Betriebsstunden gemessenen Deionatmengen mit und ohne vorgeschaltete CalcTech-Anlage in Abhängigkeit vom Druck ausgewiesen. Es ist daraus ersichtlich, dass die geringe Differenz zwischen den Werten mit CalcTech und ohne CalcTech auch nach 180 Betriebsdauer bestehen bleibt, aber bei insgesamt etwas verringertem Deionatdurchsatz.

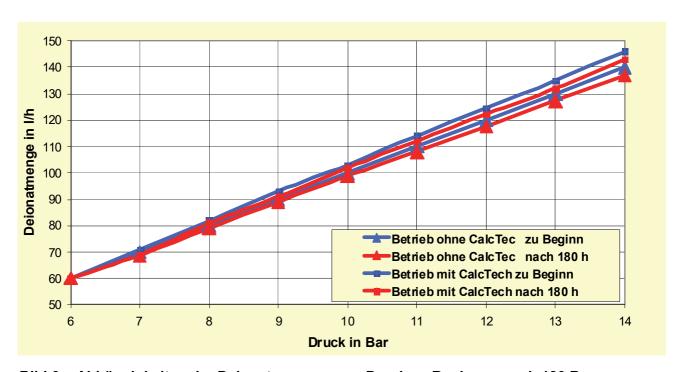


Bild 6: Abhängigkeiten der Deionatmengen vom Druck zu Beginn u. nach 180 Betriebsstunden ohne Enthärtung

Beim Nenndurchsatz von ca. 120 l/h ist der dafür erforderliche Pumpendruck lediglich um ca. 0,3 Bar (von 11,6 auf ca. 11,9 Bar) angestiegen. Das bedeutet, dass die Durchlässigkeit in dieser Zeit ohne Enthärtung nur geringfügig um etwa 4 % abgesunken ist. Trotzdem wurden die UO-Module durch Spülen mit verd. HCl 7,9 g/l) von eventuellen Kalkablagerungen befreit. Aus der Abnahme der Säurekonzentration wurde eine maximale Ca-Einlagerung von insgesamt 7,5 g, pro Modul 2,5 g festgestellt.

Die Dauerversuche wurden nun je nach Bedarf entweder nur in der Tagschicht oder im durchgehenden Betrieb fortgesetzt. Dabei wurde neben dem Trinkwasser versuchsweise auch ein Container mit dem stark salzhaltigen Brunnenwasser der Fa. Blumen Meinhardt durchgesetzt, ohne dass negative Auswirkungen auf den Durchsatz oder die Wasserqualität festgestellt wurden. Nach dieser Erprobungsphase im EUT-Technikum wurde die Anlage für die Pflanzenversuche zur Fa. Blumen Meinhardt überstellt. Das Bild 7 zeigt die Anlage mit der integrierten CalcTech-Anlage zum Abschluss der Pflanzentests bei der Fa. Blumen Meinhardt in Niemberg.



Bild 7: Umkehrosmose-Anlage mit integrierter CalcTech-Anlage zur Durchführung der Pflanzentests bei der Fa. Blumen Meinhardt

Dabei wurde das aus dem Brunnenwasser erzeugte Deionat in einem Speicherbecken zwischengelagert. Für die Pflanzentests wurden für vier Versuchsfelder folgendes Gießwässer bereitgestellt und eingesetzt:

- a) Das eigene, bisher nicht nutzbare Brunnenwasser mit einer zwischen 40 und 70 °dH schwankenden Wasserhärte und einem um 1.250 mg/l schwankendem Salzgehalt.
- b) Das reine Permeat (Deionat) aus der Wasseraufbereitungs-Versuchsanlage
- c) Das Mischwasser aus 50 % Brunnenwasser und 50 % Permeat
- d) Das bisher als Gießwasser zugekaufte Trinkwasser mit einer sehr geringen Härte von ca. 2,5 °dH (Nitratgehalt 5,1 mg/l, Nitrit 0,01 mg/l)

Es wurden zwei Pflanzentest-Versuchsreihen durchgeführt:

- 1. Versuchsreihe in der Winterperiode zwischen dem 01.01.2009. und dem 17.03.2009 mit Primel-Setzlingen
- 2. Versuchsreihe in der Hauptvegetationsperiode zwischen dem 20.05. und dem 15.07.2009 mit Tagetes-Setzlingen.

Wegen teilweise sehr niedrigen Außentemperaturen bei der 1. Versuchsreihe waren die Unterschiede im Pflanzenwuchs nur gering, zumal auch der Gießwasserbedarf trotz der Pflanzzeltbedingungen relativ gering war. Da kein Dünger eingesetzt wurde, blieb der Pflanzenwuchs auf allen vier Versuchsfeldern deutlich hinter der Norm zurück. Erst am Ende der Versuchszeit konnte eingeschätzt werden, dass die mit Brunnenwasser gegossenen Pflanzen etwas weniger kräftig und buschiger waren.

Bei der 2. Versuchsreihe wurde allen Gießwasserbehältern 0,2 % eines Fertigdüngers zugesetzt. Bereits nach 10 Tagen wurden Entwicklungsunterschiede sichtbar. Am besten entwickelten sich die Tagetes mit Trinkwasser, Permeat und dem Mischwasser. Beim Feld mit ausschließlich Brunnenwasser kam es bereits zu einem kleineren Wuchs und auch zu einer beginnenden Vergilbung. Außerdem trat zunehmend ein Mangel an Stickstoff ein. Dabei nahm der Salzgehalt im Boden deutlich zu und der pH-Wert stieg um ca. 15 % an. Von Herrn Meihardt wurde eingeschätzt, dass sich der Salzgehalt bei weiterer Verwendung von Brunnenwasser bis zur Schadgrenze erhöhen und dass dadurch Pflanzen ab der 2. bis 3. Generation auf diesem Boden nicht mehr verkaufsfähig wären. Die mit dem Mischwasser versorgten Tagetes hatten eine erstaunlich gute Entwicklung und auch der Salzgehalt im Boden nahm langsamer zu als erwartet. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Düngemittelzugabe für das bisher ausschließlich eingesetzte Trinkwasser optimiert war, welches ja einen deutlich geringeren Härtegehalt aufwies wie das Mischwasser.

Insgesamt werden die Ergebnisse der Pflanzenversuche recht positiv eingeschätzt, so dass Herr Meinhardt die Anschaffung einer kompletten EUT-Wasseraufbereitungsanlage erwägt.

Weitere Einzelheiten des Pflanzentests sind der ausführlichen Dokumentation von der Fa. Blumen Meinhardt GmbH zu entnehmen, die diesem Sachbericht als Anlage 1 beigefügt ist.

Nach Abschluss der Versuche bei der Fa. Blumen Meinhardt wurde die CalcTech- Umkehrosmose-Versuchsanlage wieder nach Eilenburg überführt und abschließend getestet. Nach insgesamt etwa 700 Betriebsstunden ohne Enthärtung war die Anlage noch einsetzbar, der vorgeschriebene maximale Pumpendruck war noch nicht erreicht. Da die Anlage im Gartenbaubetrieb mehrere Monate im Freien stand, war sie lediglich stark mit Algen befallen. Durch Stoßchlorierung mittels einer Desinfektionszelle wurde der Algenbefall beseitigt (s. Abschnitt 3.6) und durch eine prophylaktische Säurespülung (s. Abschnitt 3.5) wurde die volle Einsatzbereitschaft für die Deionatherstellung wieder erreicht.

3.3 Erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine kleine Wasseraufbereitungsanlage, ausreichend für den Bedarf der Fa. Blumen Meinhardt GmbH

Diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtung soll zugeschnitten werden auf eine Anlage der Größenordnung, die den Bedarf der Fa Blumen Meinhardt GmbH mit einem Spitzenbedarf in den Sommermonaten von etwa 50 m³/d abzudecken in der Lage ist. Dieser Spitzenbedarf gilt für etwa 100 Tage in den Sommermonaten. Für weitere ca. 100 Tage gilt ein reduzierter Bedarf von ca. 25 m³/d. Das bedeutet, dass in den 200 Tagen der Hauptvegetationsperiode insgesamt ca. 7.500 m³ Gießwasser erforderlich sind. Rechnet man für den Rest des Jahres nochmals mit 2.500 m³, ergibt sich ein Jahresbedarf von etwa 10.000 m³/a. Es wird weiter davon ausgegangen, dass dafür ca. 5.000 m³/a Deionat (einschließlich gesammeltes Regenwasser) erforderlich sind, die mit 5.000 m³/a Brunnenwasser verschnitten werden. Dieses Mischungsverhältnis von 1:1 wurde auch den Pflanzenversuchen zu Grunde gelegt. Dadurch wird das vorhandene Brunnenwasser mit einer hohen Härte von ca. 44 °dH und einem Salzgehalt von ca. 1.500 mg/l in ein Gießwasser umgewandelt, welches bei maximal 22°dH einen Salzgehalt von maximal 750 mg/l aufweist.

Bei der Auslegung der Umkehrosmoseanlage kann aber nicht vom durchschnittlichen Verbrauch ausgegangen werden, sondern es muss der Spitzenbedarf in den Sommermonaten berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich aus den 50 m³/d Gießwasser mit einem Anteil von 50 % Deionat zu 25 m³/d = 1,04 m²/h Deionat. Die Umkehrosmose wird deshalb für eine Nennleistung von 1 m³/h ausgelegt. Gießwasser 2 m²/h, Abwasser 0,5 m³/h. Damit ergibt

sich ein Verbrauch an Brunnenwasser von 2,5 m³/h. Für diesen Durchsatz ist auch die Calc-Tec-Anlage auszulegen.

Es ergibt sich auf Grund der Erprobungsergebnisse der Versuchsanlage mit der Kombination CalcTec-Umkehrosmose für 100 l/h Deionat = 200 l/h Gießwasser das folgende Regime: Etwa 2,5 m³/h des Brunnenwassers werden in der CalcTech-Anlage vorbehandelt. Ein Teilstrom von ca. 1,5 m³/h wird direkt einer Umkehrosmoseanlage zugeführt, wovon ca. 0,5 m³/h als Abwasser anfallen (ca. 1/3 der Eintrittsmenge). Es werden die erforderlichen ca. 1,0 m³/h Deionat gebildet. Der restliche Teilstrom des mit CalcTech vorbehandelten Wassers von ca. 1,0 m³/h wird direkt weitergeleitet und mit dem Deionat zu ca. 2,0 m³/h Gießwasser in einer nachgeschalteten Gemischregelanlage vermischt.

Für diese Anlagenkapazität, bestehend aus der CalcTech-Anlage der Umkehrosmoseanlage und der Gemischregelanlage für die erforderliche Gießwassermenge von ca. 2,0 m³/h einschließlich der Steuerung, wurde ein Richtpreis von etwa 22.000 € kalkuliert.

Daraus und aus dem eingeschätzten Energieaufwand von etwa 2,5 kW und einem Preis von 0,20 €/kWh ergeben sich folgende Jahreskosten:

Abschreibungen von 20 % der Investkosten (5 Jahre) =	4.400 €/a
Reparatur und Wartung von ca. 5 % der Investkosten =	1.100 € /a
Energiekosten anteilig ca. 5.000 h/a x 2,5 kW = 12.500 kWh/a x 0,2 €/kWh =	2.500 € /a
Jährliche Gesamtkosten der Wasseraufbereitung	8.000 € /a

Bezogen auf die ca. 10.000 m³/a aufbereitetes Gießwasser sind das spezifische Kosten von fast. 0,8 €/m³. Man würde also für diese relativ kleine Anlage die Zielstellung von ≤ 0,5 €/m³ Wasserbehandlungskosten nicht erfüllen können.

Betrachtet man den Kostenvergleich zum Trinkwasser mit einem Preis von ca. 1,5 €/m³, ergäbe sich für die oben eingeschätzte kleinere Anlage mit dem für die Fa. Blumen Meinhardt GmbH kalkulierten Bedarf eine Einsparung von 1,5 – 0,8 = 0,70 €/m², bei 10.000 m³/a wären das 7.000 €/a. Daraus ergäbe sich eine Rückflussdauer für die Investition von

22.000 € / 7.000 €/a = 3,14 Jahren.

Man kann deshalb davon ausgehen, dass dieser Bedarfsfall von 10.000 m³/a Gießwasser die untere Grenze der Wirtschaftlichkeit für die entwickelten Wasseraufbereitungsanlagen darstellt. Bei dieser Kalkulation wurde jedoch eine Mitverwendung von aufgefangenem Regenwasser noch nicht berücksichtigt. Nach Angaben von Herrn Meinhardt kann mit durch-

schnittlich 450 l/m² pro Jahr gerechnet werden. Es steht eine Auffangfläche von ca. 2.000 m² zur Verfügung, so dass mit durchschnittlich 900 m³/a Regenwasser gerechnet werden kann. Das bedeutet, dass die Betriebszeit der Umkehrosmose-Anlage um 900 h/a verringert werden kann. Dadurch verringern sich die Energiekosten für die Wasseraufbereitungsanlage von 2.500 €/a um 900 x 2,5 x 0,2 = 450 € auf 2.050 €/a. Damit erhöht sich der Jahresnutzen auf 7.450 € und die Rückflussdauer verringert sich auf 22.000 / 7.450 = 2,95 Jahre.

Als Alternative sollen die Kosteneinsparungen eingeschätzt werden, wenn auf eine Anlage mit einer Gießwasserkapazität von 1,5 m³/h anstelle der Anlage für 2,0 m³/h orientiert würde. Insgesamt müsste diese Anlage 10.000 m³/a / 1,5 m³/h = 6.667 h/a, also ca. 6700 h/a betrieben werden, um ohne Mitverwendung von Regenwasser den Jahresbedarf abzudecken. Damit könnte aber der Spitzenbedarf in den Sommermonaten nicht mehr abgedeckt werden. Es muss bereits in der Vorsaison der vorhandene Regenwasserspeicher von ca. 200 m³ unter Mitverwendung von Deionat aus dem Überschuss gefüllt werden, um in den Sommermonaten in Verbindung mit dem Regenwasser die Differenz ausgleichen zu können. Die Anlage könnte dann über das Jahr besser ausgelastet werden. In den angenommenen 100 Tage in den Sommermonaten ergäbe sich ein Defizit von 100 x 24 h x 0,5 m³/h = 1.200 m³ Gießwasser, einer Menge von 600 m³ Deionat + Regenwasser entsprechend. Für die Sommermonate kann mit einem Regenwasseranfall von durchschnittlich 170 bis 200 l/m² gerechnet werden, einer Regenwassermenge von 340 bis 400 m³ entsprechend. Unter der Annahme, dass das Speicherbecken mit ca. 200 m³ Deionat zu Beginn der Sommerperiode gefüllt ist, könnte damit diese Differenz von insgesamt 600 m³ Deionat annähernd ausgeglichen werden. Im günstigsten Fall wird also die Bedarfslücke in den Sommermonaten überbrückt. Es wird wieder mit durchschnittlich 900 m³/a Regenwasser gerechnet. Das bedeutet, dass die Umkehrosmoseanlage 900 m³ / 0,75 m³/h = 1.200 h weniger in Betrieb sein müsste. Damit reduziert sich die jährliche Betriebszeit der Anlage auf 5.500 h/a. Bei eingeschätzten Anlagenkosten von ca. 18.000 € ergibt sich folgende Kostenrechnung:

Energiekosten anteilig ca. 5.500 h/a x 2,0 kW = 11.000 kWh/a x 0,2 €/kWh =	2.200 €/a 6.700 €/a
Reparatur und Wartung von ca. 5 % der Investkosten = Energiekosten anteilig ca. 5 500 h/a x 2 0 kW = 11 000 kWh/a x 0 2 €/kWh =	900 €/a
Abschreibungen von 20 % der Investkosten (5 Jahre) =	3.600 € /a

Bezogen auf die ca. 10.000 m³/a aufbereitetes Wasser sind das ca. 0,67 €/m³.

Betrachtet man den Kostenvergleich zum Trinkwasser mit einem Preis von ca. 1,5 €/m³, ergäbe sich für diese kleinere Anlage mit dem gleichen Gießwasserbedarf von 10.000 m³/a eine Einsparung von 1,5 – 0,67 = 0,83 €/m², bei 10.000 m³/a wären das 8.300 €/a. Daraus ergäbe sich eine Rückflussdauer für die Investition von

18.000 / 8.300 = 2,17 Jahren.

Wenn man also davon ausgeht, dass die Bedarfslücke in den Sommermonaten durch die Speicherkapazität und eine optimale Regenwassermenge geschlossen werden kann, können die jährlichen Betriebskosten der Wasseraufbereitungsanlage von 8.000 auf 6.700 €/a und die Rückflusskennziffer von 3,14 auf 2,17 Jahre gesenkt werden. Wenn allerdings die Bedarfslücke durch ein Minderaufkommen an Regenwasser in den Sommermonaten etwa 100 m³ betragen würde, müssten maximal 200 m³ Trinkwasser zum Preis von 300 € mitbenutzt werden. Es bleibe immer noch ein Zuwachs des Nutzens gegenüber der 2 m³/h-Anlage von 1.000 €/a und eine Verringerung der Rückflusskennziffer von 3,13 auf 2,25 Jahre.

Aus diesem Variantenvergleich lassen sich für die Auslegung und Ausgestaltung der künftigen Anlagentechnik folgende Schlussfolgerungen ableiten:

Es ist nicht sinnvoll, die Umkehrosmoseanlage mit der CalcTech Anlage und der Mischstrecke mit dem mittels CalcTech vorbehandelten Brunnenwasser in einer Anlage fest zu verbinden. Dadurch würde eine variable Anpassung an die unterschiedlichen Erfordernisse der jeweiligen Anwender erschwert. Angepasst werden müssen die für die betreffenden Pflanzenkulturen verträglichen Salzgehalte des Gießwassers, die Anlagenkapazität der Umkehrosmose unter Berücksichtigung der jahreszeitlichen Verteilung der benötigten Gießwassermengen mit Beteiligung der vorhandenen bzw. erforderlichen Speichervolumina.

Es ist deshalb günstiger, die Anlagentechnik modular zu gestalten und mit einer übergeordneten Steuerung der Gesamtanlage auszustatten. Das hat den Vorteil, dass keine größeren Eingriffe in die zuzukaufende Umkehrosmose-Anlage erforderlich sind. Diese bleibt als selbständige Einheit erhalten, einschließlich der darin integrierten Meßtechnik. Vorgeschaltet sowohl für die Umkehrosmose, als auch für die Mischanlage ist die CalcTech-Anlage, die unmittelbar hinter der Brunnenpumpe angeordnet sein müsste (erforderlichenfalls mit einem vorgeschalteten Filter). Das in der Umkehrosmose erzeugte Deionat gelangt nicht direkt in die Mischanlage, sondern in einen Zwischenspeicher, dem auch anfallendes und gesammeltes Regenwasser zugeführt wird.

Aus diesem Zwischenspeicher wird die erforderliche Deionatmenge über einen Filter mittels einer separaten Gemischregelanlage mit dem Brunnenwasser verschnitten. Die Gemischregelung kann über die Leitfähigkeit als Maßstab für den Salzgehalt des gemischten Gießwassers erfolgen. Dieses Mischungsverhältnis kann unter Berücksichtigung der besonderen An-

forderungen der betreffenden Pflanzenkulturen voreingestellt werden. Unabhängig davon, ob die Umkehrosmose in Betrieb ist oder ob die Gemischregelanlage zeitweise ausschließlich aus dem Zwischenspeicher gespeist wird, wird das Brunnenwasser stets mittels der Calc-Tech-Anlage vorbehandelt. Diese Vorbehandlung wirkt sich deshalb sowohl auf eine Minimierung der Verkalkung in der Umkehrosmose, als auch auf eine Verringerung der Kalkabscheidung im gesamten Gießwasserverteilersystem einschließlich der Düsen aus.

Insgesamt ergeben sich für eine solche modular aufgebaute Anlagentechnik die folgenden verschiedenen Betriebszustände, die mittels der Steuerung entsprechend eingestellt werden müssen:

- 1. Die Umkehrosmose-Anlage ist in Betrieb und liefert eine größere Deionat-Menge, als sie von der Gemischregelanlage für das Gießwasser benötigt wird. Damit steigt das Niveau im Zwischenspeicher an. Ist der Speicher gefüllt, wird die Umkehrosmose ausgeschaltet. Die CalcTech-Anlage und die Gemischregelanlage bleiben in Betrieb, so lange wie für die Gießwasserbereitung Deionat aus dem Speicher entnommen wird. Nach Erreichen eines unteren Niveaus für das Speichervolumen wird die Umkehrosmose wieder zugeschaltet.
- 2. Die Umkehrosmose ist in Betrieb, liefert aber nur eine für das benötigte Gießwasser nicht ausreichende Menge Deionat. Dadurch sinkt das Niveau im Speicher ab. Erst wenn der Kontakt für das untere Niveau im Speicher erreicht ist (Signalisation), muss die Gießwassermenge so weit abgesenkt werden, dass das Niveau im Bereich des unteren Kontaktes gehalten wird. Es kann dann nur noch die Deionatmenge verbraucht werden, die in der Umkehrosmose anfällt.
- 3. Während in den ersten beiden Betriebszuständen die Brunnenpumpe, die CalcTech-Anlage sowie die Gemischregeanlage stets in Betrieb bleiben, erfolgt eine komplette Abschaltung, wenn das obere Niveau im Zwischenspeicher erreicht wird und kein Gießwasser benötigt wird.
- 4. Bei Ausfall der Umkehrosmose durch Defekt oder bei Abschaltung zur gezielten Verringerung des Niveaus im Speicher, wird die Gemischregelanlage ausschließlich mit Speicherwasser betrieben. Wenn dann das untere Niveau im Zwischenspeicher erreicht wird und die Umkehrosmose wegen Defekt nicht zugeschaltet werden kann, schaltet sich die gesamte Anlage automatisch ab (Signalisation).

Bei dieser übergeordneten Steuerung der gesamten Anlagentechnik wird die Umkehrosmose komplett abgeschaltet, wenn das obere Niveau im Zwischenspeicher erreicht ist. Das bedeutet, dass die Umkehrosmose stets an der voreingestellten, für den Dauerbetrieb zulässigen Leistungsgrenze betrieben wird. Die jährliche Stundenleistung und damit auch die Deionatmenge kann mittels Betriebsstundenzähler in einfacher Weise kontrolliert werden. Die Einstellung der Druckverhältnisse in der Umkehrosmose-Anlage ist von Zeit zu Zeit zu kontrollieren und bei Druckveränderungen im Rahmen der zulässigen Grenzen neu einzustellen.

3.4 Anlagenkonzept für die Wasseraufbereitungsanlage – Kapazitäts- und Kostenabhängigkeiten

Eine in Varianten durchgeführte Wirtschaftlichkeitsberechnung einer kleineren, auf den Bedarf des Kooperationspartners Blumen-Meinhardt GmbH zugeschnittenen Wasseraufbereitungsanlage hatte ergeben, dass ein modularer Aufbau der Anlagentechnik, kombiniert mit Puffervolumina für Deionat und Regenwasser und einer übergeordneten Steuerung wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Es sind kaum Eingriffe in die zuzukaufenden Umkehrosmose- und CalcTech-Anlagen erforderlich, da diese als weitgehend selbständige Einheiten einschließlich ihrer integrierten Messtechnik erhalten bleiben. Lediglich die zur Kopplung mit den anderen Modulen erforderlichen zusätzlichen Anschlussstutzen und Absperrventile werden erforderlich. Das modulare System sollte wie folgt aufgebaut werden:

Ausgehend von der nicht zur Anlagentechnik der Wasserbehandlungsanlage gehörigen Pumpe zur Förderung des Brunnenwassers wird, erforderlichenfalls über eine Filtereinheit, die benötigte Wassermenge einer ausreichend dimensionierten CalcTech-Anlage zugeführt. Danach erfolgt die Aufteilung des vorbehandelten Brunnenwassers in einen Teilstrom, welcher der Umkehrosmoseanlage zugeführt wird und einen Teilstrom, welcher direkt zur Gemischregelanlage weitergeleitet wird. Das aus der Umkehrosmoseanlage kommende Deionat gelangt zunächst in einen Zwischenspeicher, in den auch aufgefangenes Regenwasser eingespeist werden kann. Aus diesem Zwischenspeicher entnimmt die Gemischregelanlage über einen Saugfilter die erforderlichen Deionat / Regenwassermengen und mischt diese mit dem Brunnenwasser im erforderlichen Mengenverhältnis ab. Von dort wird das abgemischte Gießwasser dem Verteilersystem mit den Zerstäuberdüsen zugeführt. Zur Steuerung der Mischanlage kann die elektrische Leitfähigkeit des abgemischten Gießwassers dienen, die den Erfordernissen der jeweiligen Pflanzenkulturen angepasst werden kann.

Unabhängig davon, ob die Umkehrosmose in Betrieb ist oder ob die Gemischregelanlage zeitweise ausschließlich aus dem Zwischenspeicher gespeist wird, muss das gesamte Brunnenwasser stets mittels der CalcTech-Anlage vorbehandelt werden. Diese Vorbehandlung

wirkt sich sowohl auf eine Minimierung der Verkalkung in der Umkehrosmose, als auch auf eine Verringerung der Kalkabscheidung im gesamten Gießwasserverteilersystem einschließlich der Zerstäubungsdüsen aus.

Das Bild 8 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensfließbild des entwickelten Wasseraufbereitungsverfahrens mit den Modulen CalcTech-Anlage, Umkehrosmoseanlage, übergeordnete Gemischregelanlage sowie mit Speichervolumina für Deionat/Regenwasser und für Gießwasser. Nicht dargestellt ist die erforderliche Sensorik und Meßtechnik zur Steuerung der Anlage.

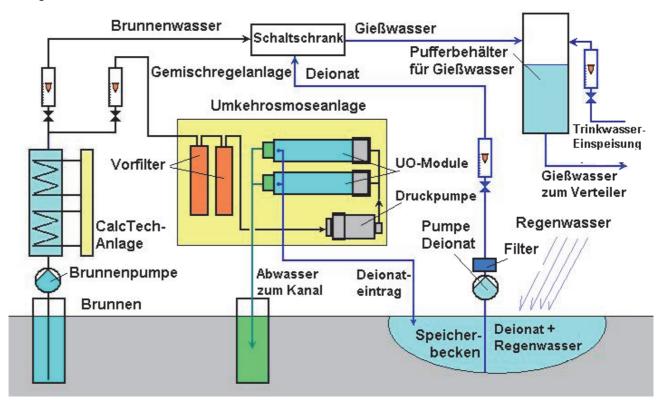


Bild 8: Verfahrensfließbild für die Wasseraufbereitungsanlage

Insgesamt ergeben sich für eine solche modular aufgebaute Anlagentechnik die folgenden verschiedenen Betriebszustände, die mittels der Steuerung entsprechend eingestellt werden können:

1. Entsprechend dem saisonbedingten Wasserbedarf wird die Gießwassermenge aus den beiden Teilströmen Brunnenwasser – Deionat voreingestellt. Mittels der unteren und oberen Kontakte im Gießwasserpuffer wird die Gemischanlage ein- bzw. ausgeschaltet. Ein Zwischenkontakt signalisiert eine bevorstehende Abschaltung, so dass erforderlichenfalls die Voreinstellung der Mengenströme angepasst werden kann. Bei richtiger, dem jahreszeitlich sich verändernden Bedarf weitgehend angepasster Vor-

einstellung der Gießwassermenge kann die Anzahl dieser Schaltvorgänge minimiert werden.

- 2. Die Umkehrosmose-Anlage ist in Betrieb und liefert eine größere Deionat-Menge, als sie zur Gießwasserbereitung benötigt wird. Damit steigt das Niveau im Speicherbecken an. Ist der Speicher vollständig gefüllt, wird die Umkehrosmose ausgeschaltet. Die CalcTech-Anlage und die Gemischregelanlage bleiben in Betrieb, so lange wie für die Gießwasserbereitung Deionat aus dem Speicher entnommen wird. Auch hier wird vor Erreichen des unteren Kontaktes durch einen Zwischenkontakt signalisiert, dass, dass die Umkehrosmose nach Erreichen des unteren Niveaus wieder zugeschaltet wird.
- 3. Die Umkehrosmose ist in Betrieb, liefert aber nur eine für das benötigte Gießwasser nicht ausreichende Menge Deionat. Wenn die Fehlmenge nicht durch Regenwasser ausgeglichen werden kann, sinkt das Niveau im Speicher ab. Wenn der untere Zwischenkontakt erreicht ist (Signalisation) besteht die Gefahr des völligen Deionatausfalls und es muss prophylaktisch die Gießwassermenge so weit abgesenkt werden, dass das Niveau im Bereich zwischen dem Zwischenkontakt und dem unteren Kontakt gehalten wird. Es kann dann nur noch die Deionatmenge verbraucht werden, die in der Umkehrosmose anfällt. Erforderlichenfalls kann die Differenzmenge durch eine Trinkwassereinspeisung in den Pufferbehälter für das Gießwasser ersetzt werden.
- 4. Während in den ersten drei Betriebszuständen die Brunnenpumpe, die CalcTech-Anlage sowie die Gemischregelanlage stets in Betrieb bleiben, erfolgt eine komplette Abschaltung dann, wenn das obere Niveau im Zwischenspeicher erreicht ist und auch kein Gießwasser benötigt wird.
- 5. Bei Ausfall der Umkehrosmose durch Defekt oder bei Abschaltung zur gezielten Verringerung des Niveaus im Speicher wird die Gemischregelanlage ausschließlich mit Speicherwasser betrieben. Wenn dann das untere Niveau im Zwischenspeicher erreicht ist, wird die Umkehrosmose wieder zugeschaltet. Ist das wegen eines Defektes nicht möglich, wird die gesamte Anlage automatisch abgeschaltet bei gleichzeitiger Signalisation.

Bei dieser übergeordneten Steuerung der gesamten Anlagentechnik wird die Umkehrosmose komplett abgeschaltet, wenn das obere Niveau im Zwischenspeicher erreicht ist. Das bedeutet, dass die Umkehrosmose stets an der voreingestellten, für den Dauerbetrieb zulässigen

Leistungsgrenze betrieben werden kann. Die Betriebsstunden der UO-Anlage können mittels eines Betriebsstundenzählers in einfacher Weise kontrolliert werden. Sie sind dann proportional der insgesamt erzeugten Deionatmenge.

Die Einstellung der Druckverhältnisse in der Umkehrosmose-Anlage ist von Zeit zu Zeit zu kontrollieren und bei Druckveränderungen im Rahmen der zulässigen Grenzen nachzujustieren. Bei Überschreitung der vorzugebenden Grenzwerte ist die Regenerierung der Membranen bzw. Vorfilter mittels Säurespülung von Hand einzuleiten. Eine Einbeziehung der Säurespülung in die automatische Anlagensteuerung wird bei kleineren Anlagen auch aus Kostengründen für nicht erforderlich angesehen, zumal nach dem bisherigen Erkenntnisstand diese Spülung nur aller 4 bis 6 Wochen durchgeführt werden muss und nur etwa eine Stunde dauert.

Für die Auslegung der modular aufgebauten Wasseraufbereitungsanlage gelten folgende Randbedingungen:

1. Die Umkehrosmose-Anlage als mit Abstand kostenintensivstes Anlagenmodul ist unter Berücksichtigung des vorhandenen Zwischenspeichervolumens einerseits so zu dimensionieren, dass die in der Hauptvegetationsperiode erforderlichen maximalen Gießwassermengen realisiert werden können, dass aber andererseits die Anlagenkapazität aus Kostengründen so klein wie möglich ausgelegt wird. Für die Auslegung der UO-Anlage gilt vereinfacht die folgende Beziehung für die Kapazität Kuo [m³/h]:

$$K_{UO} [m^3/h] = (V_{GW} [m^3/h] \times VF) - V_{Sp} [m^3/h]$$

Darin bedeuten V_{GW} in $[m^3/h]$ die erforderliche maximale Gießwassermenge, VF der Verteilungsfaktor für den Deionatanteil im Gemisch aus Deionat und Brunnenwasser und V_{Sp} in $[m^3/h]$ die vom Speichervolumen und der Dauer der Spitzenlast abhängige Deionatmenge, die dem Zwischenspeicher entnommen und zugemischt werden kann.

Das soll anhand eines Beispiels erläutert werden: Die maximale Gießwassermenge V_{GW} soll 3 m³/h betragen, der Verteilungsfaktor VF = 0,5 (Mischungsverhältnis Deionat-Brunnenwasser 1:1). Die dem Zwischenspeicher zu entnehmende Deionatmenge beträgt $V_{Sp} = 0,4$ m³/h. Damit ergibt sich eine erforderliche Kapazität der UO-Anlage von 3 x 0,5 – 0,4 = 1,1 m³/h. Ohne die entsprechende Speicherkapazität wäre eine Kapazität der UO-Anlage von 1,5 m²/h erforderlich.

2. Für die Auslegung der CalcTech-Anlage ist zu berücksichtigen, dass diese die Maximalkapazität des Gießwassers abdecken muss, wobei ein Teil des dafür erforderlichen Deionats bei voller Auslastung der UO-Anlage zusätzlich aus dem Zwischenspeicher entnommen werden kann. Hinzu kommt die bei voller Kapazitätsauslastung der UO-Anlage anfallende maximale Abwassermenge, die etwa der halben Kapazität der UO-Anlage entspricht. Es ergibt sich folgende maximale Anlagenkapazität der CalcTech-Anlage KcT in m³/h.

$$K_{CT} [m^3/h] = (K_{UO} + V_{Sp}) / (1 - VF) + 0.5 K_{UO}$$

Das soll am vorliegenden Beispiel mit \mathbf{K}_{UO} = 1,1 m³/h, \mathbf{V}_{Sp} = 0,4 m³/h und \mathbf{VF} = 0,5 erläutert werden: Es ergeben sich (1,1 + 0,4) / (1 - 0,5) + 0,55 = 3,55 m³/h. Die sich aus dem ersten Summanden ergebenden 3 m³/h ergeben die maximale Gießwassermenge, der zweite Summand ergibt die Abwassermenge unter der Annahme, dass etwa 1/3 der der AO-Anlage zugeführten Wassermenge als Abwasser anfällt.

Einschätzung der Kapazitätsabhängigkeit der Anlagenkosten und -Preise

Die folgenden Kapazitäts-Kostenbetrachtungen verfolgen in erster Linie das Ziel, die Wirtschaftlichkeit von Anlagen in Abhängigkeit von der Anlagenkapazität und der Auslastung unter Berücksichtigung von Pufferkapazitäten einschätzen zu können. Dabei musste zunächst von einer Reihe von Annahmen und Schätzungen ausgegangen werden, die erforderlichenfalls weiter zu präzisieren sind. Bei den Kapazitäten für die CalcTech-Anlagen wurde vereinfachend konstant vom etwa Vierfachen der Kapazität der Umkehrosmoseanlage ausgegangen, womit man im Hinblick auf die Anlagen-Gesamtkosten eine größere Sicherheit erreicht.

Folgende weitere Annahmen werden zu Grunde gelegt: Die Anlagenkapazität wird auf die Kapazität der Umkehrosmoseanlage bezogen, die den größten Kostenfaktor darstellt. Für die Einzel- und Gesamtkosten wird auf Basis von einzelnen Richtpreisen für die UO- und Calc-Tech-Anlagen eine kontinuierliche Kapazitätsabhängigkeit zu Grunde gelegt, unabhängig davon, dass sicher bei Zwischenkapazitäten die Anlagenkosten für die nächstgrößere Anlage eingesetzt werden müssten. Für die Gemischregelanlage und die Anlagensteuerung wurden Schätzkosten mit einer ähnlichen Kapazitätsabhängigkeit wie bei den CalcTech-Anlagen angenommen.

Für die Anlagenpreise wurde zu den sich so ergebenden Schätzkosten der Gesamtanlage ein Gewinn- bzw. Sicherheitszuschlag in Höhe von 35 % berechnet.

Im Diagramm Bild 9 sind die Kosten- und Preisabhängigkeiten von der UO-Anlagenkapazität zusammenfassend dargestellt: Im Bild 10 sind die maximalen Gießwassermengen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Kapazität der UO-Anlage mit folgenden Parametern dargestellt: Die beiden Kurvenscharen (blau, rot) gelten für unterschiedliche Deionatanteile am Gießwasser von 50 % (blau) und 60 % (rot). Bei den unteren Kurven wird kein Deionat aus dem Speicher zugemischt, bei den beiden anderen Kurven jeweils 10 bzw. 20 %.

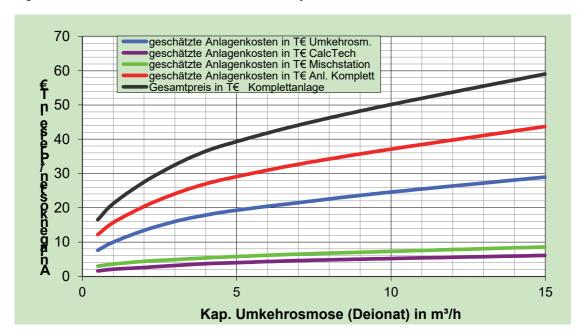


Bild 9: Kosten- und Preisabhängigkeiten von der Kapazität der UO-Anlage

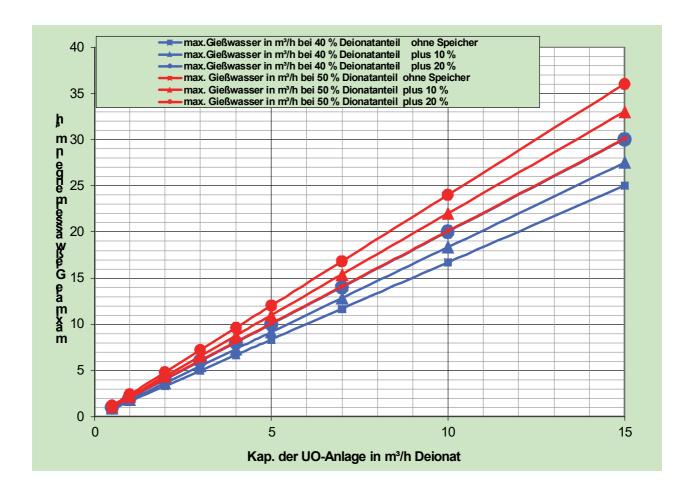


Bild 10: max. Gießwasserdurchsatz in Abhängigkeit von der Kapazität der UO-Anlage

Anhand der beiden Diagramme sollen für einige ausgewählte Anlagenkapazitäten und unterschiedliche Betriebsbedingungen die Wirtschaftlichkeit berechnet werden. Die Jahreskosten werden aus den Investitionskosten wie folgt berechnet:

- 1. Kosten für Amortisationen: es wird mit einer Abschreibung über fünf Jahre gerechnet, jährlich also mit 20 % des Anlagenpreises.
- 2. Kosten für Wartung und Reparatur: es wird mit jährlich 5 % des Anlagenpreises gerechnet, vereinfachend unabhängig von der jährlichen Betriebsdauer.
- 3. Energiekosten für den Betrieb der Anlage: Die Verbrauchsdaten der gesamten Wasseraufbereitungsanlage sind noch nicht für die einzelnen Betriebszustände spezifiziert. Es wird mit einer elektrischen Leistung von 3 kW für die 2 m³/a UO-Anlage gerechnet. Mit steigender Anlagenkapazität wird mit einem Anstieg der elektrischen Leistung analog zu den Kosten für die UO-Anlage kalkuliert.

- Weiter wird von den Jahresbetriebsstunden der AO-Anlage als Hauptverbraucher von Elektroenergie ausgegangen. Die Elektroenergiekosten werden mit 0,2 €/kWh eingesetzt.
- 5. Personalkosten werden nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Wasseraufbereitungsanlage keiner besonderen Bedienung bedarf, da sie für den automatischen Betrieb und eigensicher ausgelegt wird. Es kann deshalb eingeschätzt werden, dass der erforderliche Kontrollaufwand geringer ist als bei der bisherigen Betriebsweise ohne diese neue Anlagentechnik.

Ausgehend von den auf diese Weise ermittelten Jahresmehrkosten für die Wasseraufbereitung wird der Jahresnutzen unter der Annahme ermittelt, dass bisher Trinkwasser mit einem Preis von 1,5 €/m² eingesetzt wurde (wie es bei der Fa. Blumen-Meinhardt GmbH der Fall ist). Mit dem so ermittelten Jahresnutzen wird die Rückflussdauer für die Investition berechnet. Im Diagramm Bild 11 ist für unterschiedliche Kapazitäten der Wasserbehandlungsanlage die Rückflussdauer in Abhängigkeit von den jährlichen Betriebsstunden dargestellt.

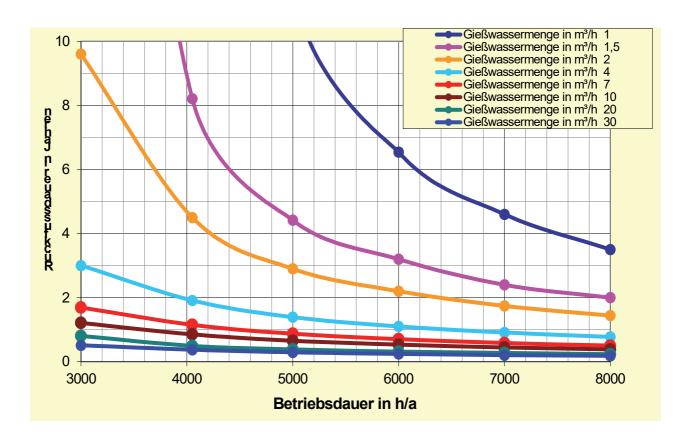


Bild 11: Abhängigkeit der Rückflussdauer in Jahren von den jährlichen Betriebsstunden für unterschiedliche Kapazitäten der Wasserbehandlungsanlage in m³/h

Die diesen Rückflussdauern zu Grunde liegenden Ergebnisse für die Gesamtkosten und den sich bei Ersatz von Trinkwasser ergebenden Jahresnutzen sind für den vorrangig interessierenden Bereich von 1 bis 10 m³/h Gießwasser in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Anlagen-	1 m³/h (Gießwa.	1,5 m³/h Gieß		2 m³/h Gießwa. 4 m³/h Gießwa.		7 m³/h Gießwa.		10 m³/h Gieß-			
Kapazität	0,5 m³/h		wa.		1 m³/h Deionat		2 m³/h Deionat		3,5 m³/h Deio-		wa. 5 m³/h	
	Deionat		0,75 m³/h						nat		Deionat	
			Deionat									
Investauf-	17.000 €		19.000 €		21.000 €		37.000€		41.000 €		53.000 €	
wand												
Kosten/	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a	T€/a
Nutzen												
Nutzungs-												
dauer h/a												
3.000	5,33	-0,83	6,13	0,62	6,80	2,20	8,92	9,09	11,15	20,36	12,65	32,36
4.000	5,73	0,28	6,59	2,41	7,30	4,70	9,60	14,42	11,99	30,02	13,59	46,42
5.000	6,13	1,38	7,05	4,20	7,80	7,20	10,28	19,73	12,35	39,68	14,53	60,48
6.000	6,53	2,48	7,51	5,99	8,30	9,70	10,96	25,05	13,67	49,34	15,47	74,54
7.000	6,93	3,58	7,97	7,78	8,80	12,20	11,64	30,37	14,51	59,00	16,41	88,60
8.000	7,33	4,68	8,43	9,57	9,30	14,70	12,32	35,69	15,35	68,66	17,35	102,66

Auf Grund der Abhängigkeit der Rückflusskennziffern von der Anlagenkapazität und der jährlichen Betriebsdauer ergeben sich folgende prinzipiellen Aussagen: Die kleinste betrachtete Anlage mit einem Durchsatz von 1 m³/h ergibt nur bei annähernd voller Ausnutzung (ca.8.000 h/a) noch eine Rückflussdauer unterhalb von 4 Jahren. Die anzustrebenden Rückflussdauern von maximal 2 Jahren werden erst bei Anlagenkapazitäten von 1,5 m³/h für annähernd vollständige Kapazitätsausnutzung von ca. 8.000 h/a erreicht. Bei einer Kapazität von 2 m³/h wird diese anzustrebende Rückflussdauer von 2 Jahren bereits ab 6.500 h/a, bei 4 m³/h bereits ab 4.000 h/a erreicht. Bei höheren Anlagenkapazitäten wird diese Grenze von 2 Jahren Rückflussdauer schon bei geringeren Auslastungen erreicht. Bei Kapazitäten ab 7 m³/h sind bei höheren jährlichen Kapazitätsauslastungen bereits Rückflusskennziffern von deutlich unter einem Jahr realisierbar.

Es wird durch diese Hochrechnung nochmals bekräftigt, dass man bei der Auslegung der Anlage einschließlich des Speichervolumens bestrebt sein muss, möglichst hohe jährliche Stundenleistungen zu realisieren, um eine bessere Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen. Die untere Grenze der Anlagenkapazität, bei der noch eine wirtschaftliche Nutzung möglich ist, kann bei den angenommenen Voraussetzungen mit etwa 1,5 m³/h Gießwasser angenommen werden. Das ist etwa der Bereich, der für die Anlage beim Kooperationspartner Blumen-

Meinhardt GmbH in Betracht kommt. Die zur möglichst vollständigen Auslastung der Anlagen erforderlichen Speicherkapazitäten sind umso geringer, je gleichmäßiger der Gießwasserbedarf sich über das gesamte Jahr verteilt.

Es soll aber nochmals darauf verwiesen werden, dass das Berechnungsmodell lediglich dazu dienen soll, prinzipielle Abhängigkeiten von den verschiedenen Parametern abzuleiten. Von Zeit zu Zeit müssen die Modellparameter an das sich verändernde Preisniveau angepasst werden. Für einen konkreten Anwendungsfall ist eine genauere Kostenermittlung auf der Grundlage einer Projektierung erforderlich. Dadurch werden sich erforderlichenfalls noch Korrekturen ergeben, die aber kaum die getroffenen prinzipiellen Aussagen der Anlagenauslegung zur Sicherung einer guten Wirtschaftlichkeit in Frage stellen. Bereits auf Grund der bisherigen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich die Projektziele hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens für Anlagen mit einer Mindestkapazität von 2 m³/h erreichen und bei höheren Anlagenkapazitäten sogar deutlich unterbieten lassen.

Die hier abgeleiteten Berechnungsmodelle bilden auch die Grundlage für ein vom Kooperationspartner Steinbeis Transferzentrum (Dr. Sauermann) entwickeltes Kalkulationsprogramm für den künftigen Vertrieb der entwickelten Wasseraufbereitungsanlagen. Wenn man die farbigen Felder von Blatt 1 an ausfüllt, errechnet das Programm alle für den Hersteller und den Kunden relevanten Angaben automatisch. Die meisten Eintragungen sind in den Blättern "Kunde", "Basis-Daten" und "Kalk_EUT" zu machen, in "Kalk_Kunde" nur zwei. In manchen Feldern sind Kommentare zum Ausfüllen enthalten. Es kann auch automatisch ein Angebot für die jeweils ausgelegte Anlage generiert werden. In der Anlage 2 sind die einzelnen Blätter des Excel-Kalkulationsprogramms am Beispiel einer ersten Referenzanlage für die Fa. Blumen Meinhardt GmbH beigefügt.

3.5 Aufbau und Funktion der Anlage zur Säurespülung der Umkehrosmose-Module

Ausgehend von den Versuchen zur Säurespülung der Umkehrosmose-Module im ausgebauten Zustand wurde eine in die Umkehrosmose integrierte Säurespülung entwickelt und erprobt. Dabei wurde der ursprüngliche Aufbau der AO-Anlage beibehalten. Es wurden lediglich zusätzliche Leitungen und Ausrüstungen installiert mit Anschluß- und Absperrmöglichkeiten zur Sicherung des Säurekreislaufes ohne Beeinträchtigung der übrigen, möglicherweise nicht säurefesten Ausrüstungen der UO-Anlage (z. B. Druckpumpe, Leitfähigkeits-Meßgerät u. a.). Das Bild 12 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschema der Umkehrosmoseanlage mit den zusätzlichen Ausrüstungen für die Säurespülung der UO-Module. Alle zusätzlich eingebrachten Ventile und Leitungsanschlüsse wurden rot dargestellt.

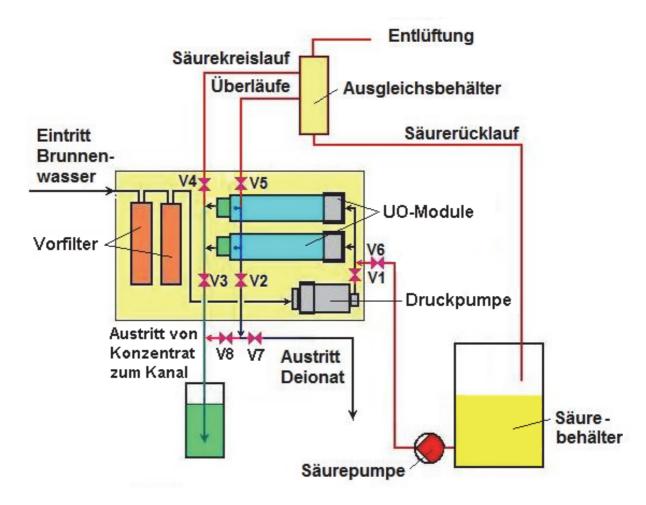


Bild 12: Vereinfachtes Schema einer in die UO-Anlage integrierten Säurespülung

Während der Säurespülung wird die verdünnte Säure mittels der Säurepumpe aus dem Säurebehälter in die Eintrittsstutzen der UO-Module (Brunnenwassereintritt) eingespeist. Der Austritt erfolgt aus den Austrittsstutzen für das Konzentrat. Um sicher zu sein, dass sämtliche Module auf der Druckseite gefüllt und gut durchströmt werden, wird der Auslauf über einen oberhalb der Module angeordneten Ausgleichsbehälter geleitet. Dieser ist mit der Rückleitung zum Säurebehälter verbunden und mit einer Entlüftungsleitung versehen. Vorhandene Gaspolster werden verdrängt und dadurch alle UO-Module auf der Druckseite durchströmt. Da der Pumpendruck der Säurepumpe im Vergleich zur Druckpumpe der UO-Anlage nur gering ist (mehrere m WS), tritt nur ein geringer Anteil der umlaufenden Säuremenge durch die Membranen zur Deionatseite. Auch die dort austretende verd. Säure wird nach oben über den Ausgleichsbehälter geleitet, um eine vollständige Füllung der Deionatseite aller UO-Module zu erreichen. Von dort gelangt auch diese Säuremenge zurück in den Säurebehälter.

Während des Betriebes der Umkehrosmose-Anlage sind die Ventile V1, V2, V3 und V7 geöffnet, die Ventile V4, V5 und V6 und V8 sind geschlossen. Zur Einleitung und Durchführung der Säurespülung wird wie folgt vorgegangen: Die Umkehrosmoseanlage wird außer Betrieb genommen, womit auch die Druckpumpe ausgeschaltet wird. Danach werden die Ventile V1, V2 und V3 geschlossen. Durch das Verschließen des Ventils V1 wird gesichert, dass keine Säure in die Druckpumpe gelangen kann. Die Ventile V2 und V3 sperren die Austritte für das Konzentrat in den Kanal und für das Deionat zur Weiterverwendung. Danach werden die Ventile V4, V5 und V6 geöffnet, wodurch der Säurekreislauf freigegeben wird. Danach wird die Säurepumpe in Betrieb genommen.

Nach erfolgter Säurespülung und nach Entleerung der UO-Module (Druckseite) über die Säurepumpenleitung wird weiter wie folgt vorgegangen: Ventil V7 wird geschlossen und Ventil V8 zum Kanal wird geöffnet. V4, V5 und V6 werden geschlossen, V2 und V3 geöffnet. Nun wird Ventil V1 geöffnet und unmittelbar danach die UO-Anlage in Betrieb genommen. Die auf der Deionatseite und der Konzentratseite austretenden Wässer werden kurzzeitig in den Kanal geleitet, bis sie annähernd neutral austreten. Danach wird V7 geöffnet und V6 geschlossen. Der alte Betriebszustand der UO-Anlage ist damit wieder hergestellt. Die Mengendurchsätze sowie die Druckverhältnisse werden überprüft und erforderlichenfalls neu eingestellt.

3.6 Konzept für ein Ergänzungsmodul zur Desinfektion und zur Beseitigung bzw. Vermeidung der Algenbildung

Die Erprobung der Umkehrosmoseanlage mit vorgeschaltetem CalcTech-Modul bei der Fa. Blumen-Meinhardt hat u. a. ergeben, dass es nach längerer Betriebszeit in den Filtersystemen der UO-Anlage zur Algenbildung kam. Mit einer sogenannten Stoßdesinfektion, bei der kurzzeitig eine Aktivchlor enthaltende Desinfektionslösung in die Wasserzufuhr eingebracht wird, konnte der Algenbefall beseitigt werden. Bei einer solchen Stoßdesinfektion wird eine solche Menge Aktivchlor über einen kurzen Zeitraum von 30 bis 60 min zugeführt, dass sich im Brunnenwasser ein Aktivchlorgehalt von etwa 10 mg/l einstellt. Dabei wurde die Desinfektionslösung durch Diaphragmalyse hergestellt. Dabei wird in einer Diaphragmalysezelle mit durch Diaphragmen oder Kationenaustauschermembranen geteilten Elektrodenräumen nicht nur anodisch Aktivchlor erzeugt, sondern die Anolytlösung wird durch den Transfer von Natrium-lonen durch den Separator so weit angesäuert, dass das gebildete Aktivchlor vorzugsweise in Form undissoziierter hypochloriger Säure vorliegt. Diese besitzt eine um den Faktor 50 bis 80 höhere Desinfektionswirkung als die in neutraler oder schwach alkalischer Lösung vorrangig vorliegende dissoziierte Form des Natriumhypochlorids (s. Publikation von Dr. W. Melvus, Hamburg zur Desinfektion in "der Brunnen.de"). Solche Daphragmalysezellen wurden durch EUT entwickelt und auch für den vorliegenden Anwendungsfall zur Algenbeseitigung erfolgreich erprobt.

Um auch in den neuen Wasserbehandlungsanlagen eine solche Desinfektion zu ermöglichen, ist ein Zusatzmodul erforderlich, mit dem es möglich ist, die gesamte Anlage in den erforderlichen Zeitabständen zu desinfizieren. Dieses Desinfektionsmodul muss es ermöglichen für diese Stoßdesinfektion über ein Zeitintervall von etwa 30 min eine solche Menge an Desinfektionslösung zuzuführen, dass etwa 10 mg/l Aktivchlor eingespeist werden können. Eine solche Stoßdesinfektion sollte je nach Algenbefall in frei zu wählenden Zeitintervallen durchgeführt werden. Günstig wäre deshalb eine Einspeisemöglichkeit in den gesamten Brunnenwasserzufluss. Damit kann auch eine Algenbildung im übrigen Leitungssystem der Wasseraufbereitungsanlage beseitigt werden. Eine solche Stoßdesinfektion sollte aber nur bei starkem Algenbefall unter Beachtung besonderer Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden. Der hohe Aktivchlorgehalt würde dann mit dem Brunnenwasser direkt in die Gemischanlage gelangen und dann auch im Gießwasser vorhanden sein. Da dies zu einer Schädigung des Pflanzenwuchses führen kann, müsste das so behandelte Gießwasser kurzzeitig verworfen und mit dem Abwasser abgeführt werden.

Bei Einspeisung der Desinfektionslösung in den zur UO-Anlage geleiteten Wasserstrom bestehen diese Probleme einer negativen Auswirkung auf den Pflanzenbewuchs nicht, da der Aktivchlorgehalt ohnehin in das Abwasser und nicht in das Deionat gelangt. Voraussetzung ist allerdings, dass die verwendeten Umkehrosmose-Membranen ausreichend oxidationsbeständig sind, so dass sie durch diese Stoßdesinfektion keinen Schaden nehmen.

Die für Awendungen der Desinfektion von Trink- und Brauchwasser von EUT entwickelte Diaphragmalysezelle braucht deshalb nur so groß ausgelegt zu werden, dass sie den maximalen Aktivchlorbedarf zur Stoßdesinfektion bereitzustellen in der Lage ist. Mittels der durch das Institut für innovative Technologien Köthen (ITA) gemeinsam mit EUT entwickelten Komplettanlage "DESINFECTOR pro" kann eine Desinfektionslösung "Oxy-sys" hergestellt werden, die in einem Pufferbehälter gesammelt und zur Stoßdesinfektion in die Wasseraufbereitungsanlage eingespeist werden kann (s. Sachbericht der ITA Köthen 2008) "Hochleistungs-Nano-Diaphragmalyse Reaktorensystem "Verfahrenstechnische Geräteentwicklung und Produktentwicklung für ein Hochleistungs-Nano-Diaphragmalyse-Reaktorensystem zur Desinfektionsmittelproduktion" (FKZ KU0302001AJ6).

Dazu ist ein Puffervolumen erforderlich, dass mindestens die für eine Stoßdesinfektion erforderliche Desinfektionslösung enthält. Für Wasseraufbereitungsanlagen im überschaubaren Durchsatzbereich zwischen 1 und 10 m³/h ergäbe sich die folgende Dimensionierung.

Es wird von einer verd. Solelösung mit einem NaCl-Gehalt im Deionat von ca. 10-20 g/l ausgegangen, die der derzeit kleinsten von EUT gefertigten Diaphragmalysezelle mit einer wirksamen Anodenfläche von 30 cm² zugeführt wird. Bei einer Stromdichte von 0,17 A/cm² wird diese Zelle mit einer Stromstärke von ca. 5 A betrieben. Kalkuliert man mit der in unterschiedlich dimensionierten EUT-Diaphragmalysezellen erreichten Stromausbeute von etwa 55 %, ergibt sich eine stündliche Aktivchlormenge von 5 x 35,5 x 0,55 / 26,8 = 3,6 g/h Aktivchlor. Bei der üblichen Konzentration der Desinfektionslösung OXY-sys von ca. 0,24 g/l Aktivchlor ergibt sich ein Durchsatz an Anolytlösung von.15 I/h (bei ca. 3 I/h Katholytlösung). Rechnet man mit einer maximal verfügbaren Elektrolysedauer von 12 h (bei einer maximal 2maligen Stoßchlorierung an einem Tag), ergibt sich eine maximal herstellbare Desinfektionslösung von 12 x 15 = 188 l mit einem Aktivchlorgehalt von 45 g Aktivchlor. Bei 10 g/m³ Aktivchlor für eine Stoßchlorierung über maximal 30 min würde das für einen maximalen Wasserdurchsatz von 45 x 2/10 = 9 m³/h völlig ausreichend sein. Bei weiterer Verringerung der Zeitdauer der Einspeisung der Desinfektionslösung für eine Stoßchlorierung könnte dieser maximal mögliche Wasserdurchsatz noch bis auf ca. 20 m³/h erhöht werden. Man käme also für alle überschaubaren Anlagengrößen mit dieser kleinsten von EUT angebotenen Diaphragmalysezelle aus.

Für kleinere Anlagen kann die Betriebsdauer der Elektrolyseanlage deutlich reduziert werden. Günstig wäre eine solche Schaltung, bei der über eine Füllstandskontrolle im Desinfektionsmittelbehälter die Elektrolyseanlage nach Erreichen des oberen Niveaus komplett abgeschaltet wird, um sie bei Erreichen des unteren Niveaus wieder einzuschalten. Wird die Behältergröße so bemessen, dass der Inhalt nur für eine Stoßdosierung ausreicht, könnte auf eine Dosierpumpe zur Einspeisung in die Wasseraufbereitungsanlage völlig verzichtet werden. Es wäre lediglich erforderlich, in die Wasserzuleitung eine Venturidüse einzubauen mit einer Saugleitung zum Vorratsbehälter, die über ein Magnetventil in den vorzugebenden Zeitintervallen zugeschaltet wird. Durch ein Ventil in der Saugleitung kann die Durchsatzmenge an Desinfektionslösung so eingestellt werden, dass der Behälter in einer vorzugebenden Zeitspanne geleert wird. Bei Erreichen des unteren Niveaus wird das Magnetventil geschlossen und gleichzeitig die Elektrolyseanlage wieder zugeschaltet.

Bei einer kleinen Wasseraufbereitungsanlage mit ca. 1 m 3 /h Wasserdurchsatz und 30 min Einspeisedauer ergäbe sich ein Desinfektionsmittelbedarf je Einspeisung von 10 g/m 3 x 1 m 3 /h x 0,5 h = 5 g Aktivchlor, enthalten in ca. 21 l Desinfektionslösung. Man käme also in diesem Fall mit einer Behältergröße von 25 l pro Stoßdosierung völlig aus. Die Elektrolysedauer könnte pro Stoßchlorierung auf etwa 80 bis 90 min begrenzt werden.

Innerhalb des Desinfektionsmoduls müssten die erforderlichen Anolyt-und Katholytmengen aus einem Ansatzbehälter für die verd. NaCl-Sole mittels einer kleineren Dosierpumpe, z. B. einer Schlauchdosierpumpe entnommen und in die Elektrolysezelle eingespeist werden. Der Katholytauslauf kann mit dem Abwasserkonzentrat der UO-Anlage dem Abwasserkanal zugeführt werden, während der Anolytauslauf in den Vorratsbehälter für die Desinfektionslösung gelangt. Gefüllt wird der Ansatzbehälter von Hand mit Deionat aus der UO-Anlage und mit der erforderlichen Kochsalzmenge (z. B. in Form von Tabletten). Mittels Hand- oder Motorrührer erfolgt die Auflösung und Vermischung. Das Ansatzgefäß sollte so dimensioniert werden, dass die Solelösung für mehrere Stoßdesinfektionen ausreicht.

Das Bild 13 zeigt ein Beispiel für die Ankopplung einer solchen Desinfektionsanlage an die Wasseraufbereitungsanlage. Dabei wurde auf technische Einzelheiten des Aufbaues der Desinfektionszelle einschließlich der getrennten Abführung der Katholytlösung verzichtet. Es besteht sowohl die Möglichkeit, beide Teilströme des Brunnenwassers zur UO-Anlage und zur Gemischregelanlage zu behandeln oder bei nicht ausreichender Oxidationsbeständigkeit der Umkehrosmose-Membranen ausschließlich den Brunnenwasserteilstrom zur Gemischregelanlage zu desinfizieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es bei einer Stoßdesinfektion zur Beseitigung von Algenbelägen erforderlich ist, das so behandelte Wasser von empfindlichen Pflanzenkulturen fernzuhalten. Das heißt, dass das so mit einem hohen Anteil an Desinfektionsmittel behandelte Wasser lediglich vor der Neubepflanzung versprüht werden darf bzw. nach Reinigung des Leitungssystems in die Kanalisation abgeleitet werden muss.

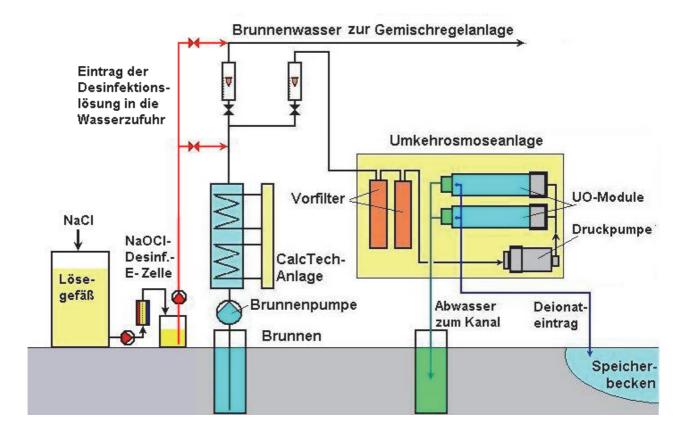


Bild 13: Herstellung und Einspeisung einer Aktivchlor-Desinfektionsmittel-Lösung in die Wasseraufbereitungsanlage (schematisch)

Es bestünde abweichend vom Anlagenschema Bild 13 aber auch die Möglichkeit, sämtliches Brunnenwasser kontinuierlich mit der Desinfektionslösung zu behandeln, um eine Algenbildung von vornherein zu verhindern. Um bei einer solchen Verfahrensweise eine Schädigung der Pflanzenkulturen sowie oxidationsempfindlicher UO-Membranen sicher zu vermeiden, müsste nach erfolgter Desinfektion das verbliebene Aktivchlor durch einen Aktivkohlefilter wieder entfernt werden. Da bei einer solchen kontinuierlichen Desinfektion des eingespeisten Brunnenwassers mit einer durch Diaphragmalyse erzeugten, besonders wirkungsvollen Desinfektionslösung, ein Aktivchloreintrag von ca. 0,3-0,5 mg/l völlig ausreichend wäre, könnten mit dieser kleinsten EUT-Desinfektionszelle für 3,6 g/h Aktivchlor immer noch 7 bis 11 m³/h Wasser kontinuierlich desinfiziert werden.

Eine alternative technische Lösung für die Desinfektion des gesamten Wasserkreislaufes besteht in der Verwendung von Ozon. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass bereits bei einem Ozoneintrag von 0,1 bis 0,2 mg/l eine dem Aktivchloreintrag von 0,3 bis 0,5 mg/l vergleichbare Desinfektionswirkung erreicht wird. Da Ozon wesentlich schneller zerfällt als Aktivchlor, kann in den meisten Fällen auf eine Zerstörung des geringen Rest-Ozons mittels Aktivkohlefilter oder durch einen Katalysator verzichtet werden.

Für die Herstellung von Ozon wurden durch EUT in den letzten Jahren hochwirksame elektrochemische Ozongeneratoren entwickelt und für unterschiedliche Anwendungen getestet (s. z. B. Thiele, W u. Förster H.-J.: "Fortschritte beim Schadstoffabbau und der Desinfektion von Trink- und Brauchwasser mittels elektrochemischer Ozongeneratoren ohne vorherige Enthärtung"

Vortrag anlässlich der Jahrestagung der GDCh-Fachgruppe Angewandte Elektrochemie beim Wissenschaftsforum Chemie 2009 in Frankfurt.

Eine solche kleine, mittels Kationenaustauschermembranen geteilte Elektrolysezelle mit diamantbeschichteter Streckgitteranode einer Fläche von 30 cm² kann bei Verwendung von Deionat als Elektrolyt bei einer Stromdichte von ca. 0,4 A/cm² etwa 700 mg/h Ozon generieren. Damit können 3,5 bis 7 m²/h Wasser desinfiziert werden. Besonders günstig wäre der Einbau einer solchen Ozonzelle in einen Deionat-Teilstrom aus der Umkehrosmoseanlage, der zusammen mit dem sich gasförmig entwickelnden Ozon-Sauerstoffgemisch mit dem Brunnenwasser-Ausgangsstrom vermischt bzw darin gelöst wird. Bild 14 zeigt ein Beispiel für die Einbindung einer solchen Ozon-Zelle in die Wasseraufbereitungsanlage.

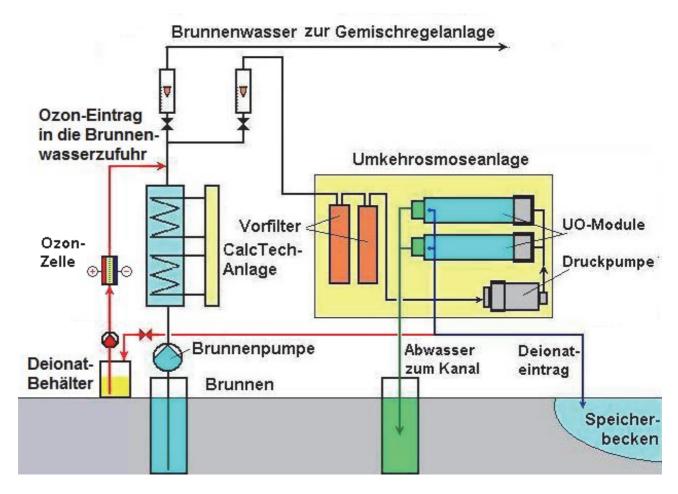


Bild 14: Schema zur Einspeisung elektrochemisch erzeugten Ozons in die Wasseraufbereitungsanlage zum Zwecke der Desinfektion

Im konkreten Einzelfall muss geklärt werden, was mit einer solchen Wasserdesinfektion erreicht werden soll und welche Desinfektionszelle mit welcher Desinfektionsstrategie - Stoßdesinfektion oder kontinuierliche Desinfektion - unter Beachtung der Oxidationsbeständigkeit der UO-Module in die Wasseraufbereitungsanlage eingebunden werden soll. Hier sollte lediglich der Nachweis dafür erbracht werden, dass die von EUT entwickelten und verfügbaren Desinfektionszellen auf Basis von Aktivchlor oder Ozon prinzipiell für den vorliegenden Anwendungsfall eingesetzt werden können.

4.0 Anwendungsmöglichkeiten und Darstellung der geplanten wirtschaftlichen Verwendung

Es ist vorgesehenen, 2010 eine erste Anlage für die Fa. Blumen Meinhard GmbH zu liefern in Betrieb zu nehmen. Diese Anlage soll gleichzeitig als Referenzanlage für künftige Anlagenlieferungen dienen. Für die entwickelte neuartige effiziente Wasseraufbereitungstechnologie besteht nach derzeitigem Kenntnisstand sowohl national, als auch international ein großes Marktpotential. Vom Steinbeis Transferzentrum RTM wurde ursprünglich eingeschätzt, dass ein Marktpotential für 100 bis 150 Anlagen pro Jahr vorhanden wäre. Selbst wenn man vorsichtiger herangeht und mit einem langsamen Einstieg 2011 mit lediglich 5 Anlagen rechnet, mit einer Steigerung bis 2015 auf 40 Anlagen jährlich, käme man in diesen fünf Jahren auf insgesamt etwa 100 Anlagen unterschiedlicher Kapazität. Rechnet man wie im Projektantrag mit einem mittleren Anlagenpreis von 40.000 € (ca. 50.000 m³/a aufbereitetes Wasser), ergäbe sich für die ersten fünf Jahre ein Gesamtvolumen von 100 x 40 T€ = 4 Mio. €, davon allein im Jahr 2015 ca. 1,6 Mio. €. Auf Grund des ursprünglich eingeschätzten wesentlich größeren Marktpotentials ist das eine sehr vorsichtige Herangehensweise mit Steigerungspotential.

In den ersten Jahren der technischen Nutzung muss versucht werden, weitere Einsatzmöglichkeiten für diese Wasseraufbereitungstechnologie zu erschließen. Während die ersten technischen Anlagen wohl insbesondere bei Gartenbaubetrieben einer ähnlichen Struktur wie bei der Fa. Meinhardt ihre Anwender finden werden, müssen parallel dazu auch Anwendungsmöglichkeiten in anderen landwirtschaftlichen Betrieben z. B. beim Gemüseanbau und in kleineren Industriebetrieben geprüft und erschlossen werden.

Zur Erreichung dieser Zielstellung ist eine weitere enge Zusammenarbeit mit dem Steinbeis Transferzentrum und der Blumen Meinhardt GmbH vorgesehen und auch erforderlich. Um diesen Umsatzanstieg zu realisieren, werden müssen 2010 die folgenden nächsten Schritte parallel zum Aufbau Pilotanlage und deren Inbetriebnahme durchgeführt werden:

- Überprüfung der Möglichkeiten für eine Schutzrechtsanmeldung, gegebenenfalls Anmeldung in Deutschland
- 2. Abschluss eines Liefer- und know-how-Vertrages mit ausgewählten Lieferanten der einzusetzenden Umkehrosmose- und CalcTech-Anlagen
- Überarbeitung und Nutzung des Kalkulationsprogramms für eine gezielte Marketing-Arbeit
- 4. Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift unter Berücksichtigung der Ergebnisse des F/E-Projektes und des Probebetriebes der ersten technischen Anlage
- 5. Nutzung aller weiteren Möglichkeiten für eine gezielte Werbung.

Bis zur Realisierung der Punke 1 und 2 muss das Projektergebnis noch vertraulich behandelt werden (s. dazu auch Abschnitt 5.0).

5.0 Angaben zu bereits erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen bzw. Patentanmeldungen

Gegenwärtig wird geprüft, ob das entwickelte Verfahren der Wasseraufbereitung für eine Patentanmeldung die erforderliche Erfindungshöhe besitzt. Bei positivem Ergebnis dieser laufenden Literaturrecherche wird ein Patent bzw. ein Gebrauchsmuster angemeldet. Bis zu einer Entscheidung darüber und gegebenenfalls bis zu einer vorgenommenen Schutzrechtsanmeldung wäre eine an sich vorgesehene Veröffentlichung in Fachzeitschriften neuheitsschädlich und wurde deshalb bisher unterlassen. Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb von 6 Monaten bis Ende Juli 2010 eine eventuelle Schutzrechtsanmeldung erfolgt ist und dann auch Veröffentlichungen vorgenommen werden können. Für die im Rahmen des Projektes mit verwendeten Wasserdesinfektionszellen auf Basis von Aktivchlor bzw. von Ozon wurden bereits Patentanmeldungen vorgenommen [

6.0 Beitrag des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen.

Ein wesentlicher Beitrag des Vorhabens zur Verbesserung der Umweltbedingungen ist darin zu sehen, dass das Verfahren ohne jegliche Chemikalienzusätze bei der Behandlung von Brunnenwasser auskommt. Bei vorgeschalteter Enthärtung sind zur periodischen Regenerierung der Ionenaustauscher erhebliche Mengen an Natriumchlorid erforderlich und es fallen dabei relativ konzentrierte Salzlösungen an. Beim optionalen Betrieb von Wasserdesinfektionszellen auf der Grundlage von Aktivchlor werden lediglich vergleichsweise geringe Zusätze von Natriumchlorid benötigt. Bei Verwendung von Ozon als Desinfektionsmittel werden keinerlei Chemikalienzusätze benötigt.

Auch die Einsparung von bisher oft als Gießwasser eingesetztem Trinkwasser schont die immer knapper werdenden Trinkwasser-Ressourcen und trägt damit zur Verbesserung der Umweltbedingungen bei.

7.0 Einschätzung des Finanzierungs- bzw. Zeitplanes mit Angabe der Arbeiten, die zu keinem Ergebnis geführt haben

Der Finanzierungsplan wurde eingehalten. Auch der Zeitplan erwies sich als realistisch, einige bei der Bearbeitung aufgetretene Rückstände zum geplanten Terminablauf konnten im Prinzip wieder aufgeholt werden. Allerdings brachte dies mit sich, dass die vorgesehenen Pflanzentests erst im Januar begonnen und bis April abgeschlossen werden konnten, das heißt außerhalb der normalen Vegetationsperiode. Um sicherzustellen, dass in der Hauptvegetationsperiode ab April/Mai keine davon abweichenden Ergebnisse erhalten werden, wurden die Pflanzentests ab Mai 2009 wiederholt. Um auswertbare Ergebnisse zu erhalten, mussten sie bis Juli weitergeführt werden. Um die Ergebnisse noch im Rahmen der Projektlaufzeit auswerten zu können, wurde eine kostenneutrale Verlängerung der Themenlaufzeit um einen Monat bis Ende Juli beantragt und auch genehmigt.

Alle im Rahmen des Projektes verfolgten Lösungswege führten zu positiven Ergebnissen, soweit es die wissenschaftlich-technische Zielstellung betraf. Dass die Arbeiten zur alternativen elektrochemischen Teilentsalzung nach dem DesEl-Verfahren nicht weitergeführt wurden, lag an den wirtschaftlich im Vergleich zur Verfahrenskombination Umkehrosmose/Calc Tech nicht konkurrenzfähigen Anlagenkosten und der unklaren Patentsituation, die Nutzungsrechte für Europa betreffend.

8.0 Im Rahmen des Vorhabens hergestellte Sonderbetriebsmittel und deren weitere Verwendung

Es wurden im Rahmen der Projektbearbeitung keine Sonderbetriebsmittel hergestellt. Die Umkehrosmose-Anlage wurde für die Nutzung im Rahmen des Projektes gekauft und im Projekt lediglich die während der Projektlaufzeit anfallenden Abschreibungen angesetzt. Diese Anlage wird nach Abschluss des Projektes durch EUT für die Herstellung von Deionat für Labor und Technikum weiter genutzt.

9.0 Literatur

- 1. Das DesEl-System, Fimenschriften der Aqua & Terra GmbH, Bahnhof 2, 15326 Lebus
- M. D. Adelman, S. Kuran, J. Zulkiewicz: US 20030492938 v. 06.08.03, US 200 401 21204 v. 17.06.03

- 3. R. C. Gunthe, S. Bamberger, G. Valet, M. Crossin, G. Rutherstroth-Bauer: "The Trajectories of Particles Suspended in Electrolytes under the Influence of Crossed Electric and Magnetic Fields", Biophys. Struct. Mechanism. 4 (1978) 87 95
- 4. H. Matschiner, D. Wilke, H. Schulte: "Einfluss von Schwingungen auf Phasengrenzreaktionen", Vortrag am 27.10.05 zur Fachtagung in Halle: Resonate Schwingungen in Fluiden.
- 5. H. Schulte: "Verfahren und Vorrichtung zur Behandlung von Wasser in einem magnetischen Feld", EP 0460248 v.
- 6. H. Schulte: "Kalkschutz-System CALC TECH", Firmenschrift der ECS GmbH
- 7. Y. I. Cho, S.-H.Lee: "Reduction in the surface tension og water due to physical water treatment for fouling control in heat exchangern", Heat and Mass Transfer 32 /2005) 1-9
- 8. H. Schlichting, K. Gersten. "Grenzschicht Theorie", 9.Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1997
- 9. J. Briesovsky: "Resonanzpulsationstechnologie 15 Jahre Entwicklung in Deutschland", Vortrag anläßlich der internationalen Fachtagung: Resonante Pulsation in Fluiden am 27.10.05 in Halle.