

Vom Sklaven der Wasserwerte zum Dirigenten einer automatisierten Anlage

Ein Praxisbericht zur chlorfreien Whirlpool-Desinfektion mittels Hochleistungs-Ozontechnik



Wichtiger Hinweis: Diese Dokumentation ist explizit keine „Schritt-für-Schritt-Bauanleitung“ für Laien. Sie ist eine technische Analyse für Fachpersonal, das die physikalischen Risiken von Ozon und Hochspannung versteht und beherrscht. Wer die notwendige Sachkenntnis nicht besitzt, sollte von einem Nachbau dringend absehen – Ozon ist in den hier beschriebenen Konzentrationen ein industrielles Werkzeug, das bei unsachgemäßer Handhabung lebensgefährlich sein kann

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Inhalt	Seite
	Haftungsausschluss und Wichtige Hinweise	1
1.	Die Ozon-Erzeugung	2
	Beschreibung der Schaltschrank-Komponenten	2
	Hinweise zu Silikagel und Stickoxiden	2
2.	Die Injektion	3
	Materialwahl (PTFE, Edelstahl, Kugelhahn)	3
	Beschreibung von Pumpe und Venturi-Injektor	3
	Der Statische Mischer (Inlinereaktor)	3
3.	Komponenten und Betriebsbedingungen	4
	Effizienz des Stoffaustauschsystems	4
	Steuerung via ORP-Controller W2839 & Smart-Life-App	4
	Funktionsweise der ORP-Steuerung	4
	Nachlaufzeit und Filterzyklen	4
4.	Die Steuerung (Logik & Hardware)	5
	Abhängigkeit der Zyklen vom Verschmutzungsgrad	5
	Aufbau des Schaltschranks (Relais, SSRs, Logik)	5
5.	Allgemeines über Ozon	6
	Vorteile der Ozon-Nutzung (Klarheit, Geruch)	6
	Historische Meilensteine der Ozon-Wasseraufbereitung	6

Haftungsausschluss und Wichtige Hinweise

Gegenstand der Dokumentation:

Bei diesem Dokument handelt es sich um einen **privaten Erfahrungsbericht** zur technischen Umsetzung einer chlorfreien Wasseraufbereitung mittels Ozon. Die beschriebenen Lösungen (Steuerung via Tuya/SSR, Inliner-Reaktor, Hochfrequenz-Ozonisator) stellen ein individuelles Forschungsprojekt dar und sind **kein zertifiziertes Handelsprodukt**.

1. Fachkunde-Vorbehalt:

Der Aufbau und Betrieb einer Ozonanlage mit Hochleistungskomponenten (10 g/h, 14 kHz) sowie der Anschluss an das Niederspannungsnetz (230V) erfordern fundierte Kenntnisse in der Elektrotechnik und Anlagenhydraulik. Die Umsetzung der hier beschriebenen Inhalte darf **ausschließlich durch qualifizierte Fachkräfte** (z. B. Elektroniker) erfolgen.

2. Gefahrstoff-Hinweis (Ozon):

Ozon (O₃) ist ein hochwirksames Oxidationsmittel und bei Inhalation in höheren Konzentrationen **toxisch**. Der Verfasser betont ausdrücklich, dass der Betrieb nur in gut belüfteten Bereichen (z. B. offener Pavillon) und unter Einhaltung strenger Sicherheitsvorkehrungen (Redox-Steuerung, Überwachung der Ausgasung) erfolgen darf. Eine Verwendung in geschlossenen Räumen ohne zertifizierte Ozon-Vernichter (Aktivkohle) wird strikt untersagt.

3. Haftungsausschluss:

Die Nutzung der in diesem Dokument enthaltenen Informationen erfolgt auf **eigene Gefahr und eigenes Risiko**. Der Verfasser übernimmt keinerlei Haftung für:

- Personenschäden (durch Ozon-Inhalation, elektrischen Schlag oder unsachgemäße Handhabung).
- Sachschäden (an Pool-Komponenten, Verrohrung oder Elektronik).
- Umweltschäden oder rechtliche Konsequenzen durch den Betrieb nicht-zertifizierter Anlagen.

4. Fehlende CE-Zertifizierung:

Dieses System wurde für den privaten Eigenbedarf entwickelt und verfügt über **keine CE-Kennzeichnung**. Es entspricht nicht notwendigerweise den harmonisierten europäischen Normen für den gewerblichen Einsatz. Ein Nachbau oder eine Inbetriebnahme durch Dritte erfolgt eigenverantwortlich unter Verzicht auf jegliche Regressansprüche gegenüber dem Verfasser.

5. Gesundheitlicher Hinweis:

Die beschriebenen subjektiven gesundheitlichen Beobachtungen (z. B. bei pAVK oder Colitis) sind individueller Natur und stellen **kein medizinisches Heilversprechen** dar. Die Anlage ersetzt keine ärztliche Behandlung.

Vorwort: Freiheit durch Technik

Hand aufs Herz: Wer einen Whirlpool besitzt, träumt von Entspannung, klarem Wasser und dem Gefühl von Frische. Doch die Realität sieht oft anders aus. Viele Besitzer werden unfreiwillig zum „Sklaven ihrer Wasserwerte“. Der Alltag ist geprägt vom täglichen Hantieren mit dem Photometer, dem mühsamen Abwiegen von Chlor, dem Kampf gegen Schaumbildung und dem stechenden Geruch von Chloraminen. Trotz höchstem Aufwand bleibt das Wasser oft ein fragiles Gleichgewicht, das bei der kleinsten Benutzung zu kippen droht.

Nach dem Verbot von hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid stand ich vor der Wahl: Zurück zur konventionellen Chemie oder einen völlig neuen Weg gehen?

Als Elektroniker im Ruhestand war mein Anspruch klar: Ich wollte keine Symptome bekämpfen, sondern die Ursache der Wasserbelastung technisch lösen. Aus dieser Motivation heraus entstand über drei Jahre hinweg ein System, das die gewaltige Oxidationskraft von Ozon (O₃) nutzt und diese durch moderne Smart-Home-Technik und präzise Sensorik bündigt.

Heute messe ich keine Werte mehr von Hand. Ich beobachte. Über mein Smartphone sehe ich in Echtzeit, wie das System auf Verschmutzungen reagiert, wie das Redox-Potenzial stabil bleibt und wie das Wasser kristallklar bleibt – ganz ohne den typischen Schwimmbadgeruch. Ich bin nicht mehr der Diener meines Pools, sondern der Dirigent einer automatisierten Anlage, die im Hintergrund perfekt für mich arbeitet.

Dieser Bericht dokumentiert meine Reise, die technischen Details und die Erfahrungen mit einem System, das nicht nur die Wasserqualität, sondern auch die Lebensqualität massiv gesteigert hat.

Viel Erfolg beim Lesen und Entdecken der chlorfreien Freiheit!

Die Ozon-Erzeugung

Bild 1 der Ozon-Schaltschrank ABS Kunststoff IP65 (Ebay) hat eine Größe von 300x400x170 mm.

Unten und links oben sind für die Lüftung 2 runde Ausschnitte mit einem Durchmesser von 120 mm.

Der untere Ausschnitt wird etwas nach rechts versetzt.

Links davon sind 2 Bohrungen für die Kabel-Verschraubung.

Auf der linken Seite wird der Lüfter 12V DC 2,9W 120x120x38mm 234,4m³/h Sunon MEC0381V1-A99 montiert.

Der 12V Netzteil für die Lüfter und dem Thermostat ist im Steuer-Schalt-Schrank verbaut.

Neben den Lüfter ganz vorne wird der Durchflussregler, 0 - 8 l/min mit den mitgelieferten Muttern festgeschraubt.

Die metallische Montageplatte wird durch eine 3mm Acryl-Platte ersetzt und der Ozongenerator so wie auf den Bild montiert. Der Kühlkörper des Ozongenerators wird geerdet.

Die Netzteilplatine und der Generator sollen einen Abstand von 40 mm haben.

Die Netzteilplatine des Ozongenerators wird mit 4 Stück 3 X 12 mm Schrauben mit 5 mm Abstandshülsen befestigt wo in die Montageplatte, das Gewinde geschnitten ist.



Bild 1

Auf den von Pinus longaeva Ozongenerator High-End 10 g/h 80 W 14 kHz werden beidseitig mit 4 Gewindestangen M4, zwei Lüfter 12V DC 1,44W 80x80x25mm 69,6m³/h Sunon EE80251BX-A99 geschraubt sind. Die Ozonerzeugung des High-End-Generator, ist der Netzteil mit den Potentiometer regelbar das auf 60 W zurückgedreht ist um den Generator zu schonen. Beschickt wird er mit der getrockneten Umluft.

Warum die Version mit 14khz

1. Ionisationseffizienz (Corona Discharge)

Bei 14khz erfolgt die Entladung in extrem kurzen, hochenergetischen Pulsen.

- Vorteil: Die Elektronen erreichen die notwendige Energie zur Spaltung der O₂-Moleküle wesentlich effizienter.

- Resultat: Bei gleicher Leistungsaufnahme produziert die 14khz-Röhre eine höhere Ozonkonzentration pro Normkubikmeter Luft als eine 50 Hz-Röhre, da weniger Energie in thermische Verlustleistung (Hitze) umgewandelt wird.

2. Reduktion der Stickoxidbildung (No_x)

Die Bildung von Stickoxiden und der daraus resultierenden Salpetersäure (HNO₃) ist stark temperaturabhängig.

Getaktete Entladung: Die "kalte" Korona der Hochfrequenz-Taktung hält die Gastemperatur in der Entladungsstrecke niedriger.

Effekt: Der Silikagel-Verbrauch sinkt bzw. die Standzeit verlängert sich, da weniger Feuchtigkeit durch chemische Nebenreaktionen im Generator selbst entsteht.

3. Lastmanagement durch das Netzteil (Inverter)

Dass das 10g/h-Netzteil auf die Röhre abgestimmt ist, sorgt für eine saubere **Leistungsfaktor-korrektur (PFC)**

Bei 14khz ist die kapazitive Last der Ozonröhre besser zu händeln als bei niedrigen Frequenzen.

Das schon die Halbleiter in den SSR und im Inverter selbst, da Blindströme minimiert werden.

Auf den Kühlkörper des Generators ist ein Batterie-betriebener Tuya WiFi Thermostat / Hygrometer montiert, der den Lüfter Ø 120 mm ab 25°C einschaltet und ab 35°C den Ozongenerator nicht mehr einschaltet bzw. abschaltet. Ab 35°C wird fast kein Ozon mehr erzeugt. Es reichen im Sommer die kühleren Stunden aus, um das Wasser zu reinigen.

Die Silicagel-Kartusche mit den orange grünen Feuchtigkeitsindikator, enthält Methylviolett, ist vorne rechts so montiert das man sie einfach wechseln kann.

Die Luft wird von Unterseite der Kartusche angesaugt und getrocknet, geht mit einen Silikon-schlauch 6/10 in den Durchflussmesser 0-8 l/min und in den Ozongenerator.

Bei der CD-Ozonerzeugung mit Luft, entstehen geringe Mengen Stickoxide. In Gegenwart von Luftfeuchtigkeit erhöht sich die Stickoxid-Menge und es bildet sich Salpetersäure, die gegenüber Metallen und dielektrischen Materialien in dem Ozongenerator stark korrosiv wirkt.

Die relative Ozonproduktionsrate nimmt mit steigendem Taupunkt schnell ab.

Umso umsichtiger man mit den Silicagel und es rechtzeitig wechselt bzw. regeneriert um so länger hält der Ozongenerator.

Nach den Ozongenerator geht es weiter mit einen PTFE-Schlauch 6/8 in einen 90° Edelstahlwinkel in einen PTFE Schlauch 10/12 (8/10) und verlässt mit einen 90° Edelstahlwinkel 1/4" und einer Edelstahlverschraubung auf der Rückseite den Ozonschaltschrank.

Weiter geht es über einen 90° Edelstahlwinkel, einen PTFE Schlauch 10/12 (8/10) einen 90° Edelstahlwinkel der eine Schleife über den Wasserspiegel führt, zu einen motorisierten Kugelhahn.

Der Kugelhahn ist dafür zuständig, das im Ruhezustand kein Wasser in den Ozongenerator gelangt und wenn nur der Filterkreislauf eingeschaltet ist, das Silicagel nicht unnötig mit Luft durchströmt wird und dadurch verbraucht wird. Magnet-Ventile und Rückschlagventile dichten durch den niedrigen Druck nicht.



Bild 3

Weiter geht es über die Edelstahl-Reduziermuffe 2fach Innengewinde 1 1/4" x 1/4" und dann zum UPVC-Venturi-Injektor 63mm (Ebay) Bild 3. Alle Edelstahlfittig haben Schlauchtüllen. Der UPVC-Venturi-Injektor ist aufgrund seiner Einfachheit, Wirtschaftlichkeit und Effektivität die bevorzugte Methode zur Ozonlösung in Wasser.

Darüber hinaus erreicht ein Venturi-Injektor einen Wirkungsgrad von über 90 %, beim Lösen von Ozon im Wasser.

Die Injektion

Das Wasser kommt von einen im Whirlpool eingebauten Kartuschen-Filter, mit einer Rohrleitung Ø50 mm über eine 2/3 Kupplung 1 1/2" X 50 mm zur SunSun Poolpumpe CPP-16000 (16000 l/h, 0,78bar, 140 W). Nach der Pumpe geht es über einer 2/3 Kupplung 1 1/2" X 50 mm mit einen 90° Winkel Ø50 in den UPVC-Venturi-Injektor 63mm der einen Innendurchmesser von 50 mm hat.

Der Unterdruck vom Venturi-Injektor, saugt das ozonhaltige Gas aus den Ozon-Generator. Bei entsprechender Fließgeschwindigkeit und somit entsprechender Durchmischung, ist die Ozon-Übertragungseffizienz nahezu vollständig.

Weiter geht es mit einen Reduzierring 63 X 75 mm in den Inlinereaktor den Statischen Mischer Ø75 mm X 775 mm mit Edelstahl-Lamellen von XClear aus dem Koifachhandel.

Dieser nimmt das ozonisierte Wasser nach dem Venturi-System auf, um das zugeführte Ozongas gründlich zu vermischen.

Bei diesen starken Turbulenzen nutzt Ozon seine Eigenschaften und macht es sowohl zu einem nützlichen Desinfektionsmittel und Schadstoff-Entferner.

Ozon O_3 zerfällt dabei, auf Grund seiner Instabilität, wieder zum zweiatomigen Sauerstoff O_2 .

Die Auslässe sollten sich in gleicher Höhe oder oberhalb des UPVC-Venturi-Injektor befinden.

Nach den Inlinereaktor wird das Wasser über ein Rohrsystem $\varnothing 50$ mm durch eine Tankverschraubung $\varnothing 50$ mm wieder in das Becken befördert.

Die Leitung darf nicht unter $\varnothing 50$ mm verengt werden, sonst funktioniert die gesamte Injektion nicht mehr.

Die Komponenten und Betriebsbedingungen von diesen Venturi-basierten Stoffaustauschsystem sind für die Anwendung optimiert.

Durch das gut ausgelegte und optimierte System kann bis zu 98 % des Ozongases in die Lösung überführt werden.

In Bild 4 ist die Blasenbildung mit dem ozonhaltigen Luftgemisch ersichtlich.(noch mit Magnetventil was durch den motorisierten Kugelhahn ersetzt wurde.)

Das ergibt eine Förderleistung des ozonhaltigen Gases von maximal 8l/min.

Gedrosselt wird mit dem Durchflussregler, bis man im Whirlpoolbecken das Ozon nicht mehr wahr nimmt. Bei mir ist er auf 4l/min eingestellt.

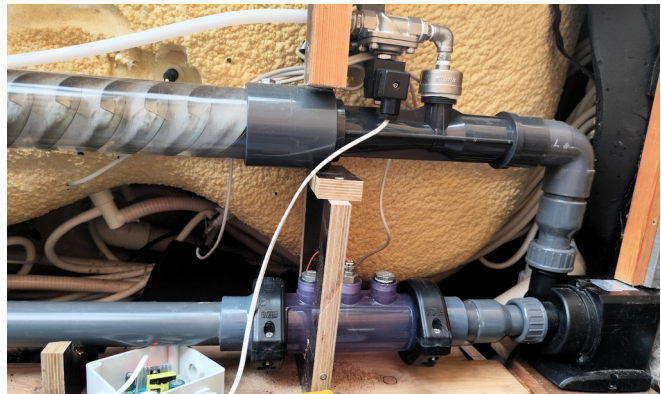


Bild 4

Durch den geringen Luftdurchfluss (4 l/min) Sauerstoffkonzentration der Luft (21%), Temperatur, Luftfeuchtigkeit (Taupunkt $-30^{\circ}C$ bis -20°) und der Luftverschmutzung verringert sich die Ozon-ausbeute erheblich. Geschätzt bleiben von den 10g/h, 1g/h übrig.

Gesteuert wird der Ozongenerator mit den ORP (Oxidation-Reduktion-Potenzial) des W2839 und der Smart-Life-App. Eingeschaltet (Bild 5) wird bei einen ORP von 600 mV. Zuerst schaltet sich für 10 Sekunden der Filterkreislauf ein, um ein Vakuum aufzubauen, Danach öffnet sich der Kugelhahn und das Ozon aus den eingeschalteten Ozongenerator wird angesaugt.

Wenn der ORP die 750 mV erreicht hat, (Bild 6) schaltet sich der Ozongenerator ab und der Kugelhahn schließt.

Der Filterkreislauf bleibt noch für 4 Minuten eingeschaltet, um das restliche Ozon aus dem Inlinereaktor zu entfernen, wo der ORP bis auf 900mV ansteigen kann.

Durch die 4 Minuten Nachlaufzeit und den maximal 60 Einschaltzyklen in 24 Stunden kommt man auch auf genügend mechanische Filterzeiten.

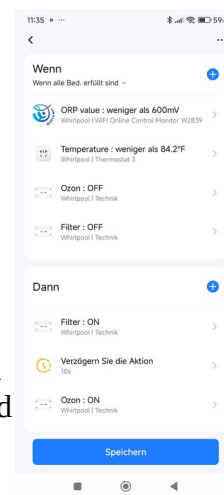


Bild 5

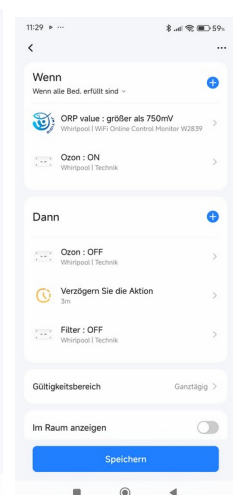


Bild 6

Ziel ist es, dem Wasser nur so viel Ozon zuzuführen, um die Halbwertszeit des Ozons auszugleichen, die Menge auf das zur vollständigen Oxidation oder zur Einleitung der

erforderlichen Reaktionen, notwendige Maß zu beschränken, aber ein ausgasen im Whirlpool zu verhindern, und so eine gleichbleibende Ozonkonzentration zu gewährleisten.

Die vollständige Nutzung des Ozons durch Verbrauch, ist die beste Methode kein Restozon zu erzeugen, das aufwendig vernichtet werden muss.

Bei sachgemäßer Auslegung und Bedienung entstehen nur geringe oder gar keine Abgase.

Die Venturi-Injektor ermöglicht zudem die Handhabung von gasförmigem Ozon unter Vakuumbedingungen, was die Sicherheit und auch die Leistung verbessert.

Druck und Druckvariationen können für einen effizienten Gas-Flüssigkeits-Übergang hilfreich sein, da die Löslichkeit direkt mit dem Druck zunimmt.

In Bild 7 und 8 sieht man wie sich die Einschalt - und Ausschalt-Zeiten nach den Verschmutzungsgrad des Whirlpools richtet.

Bild 7 zeigt 24 Stunden nach der Benutzung des Whirlpools wo der Generator schon 1 Stunde ausgeschaltet und nur 1 Minute benötigt von den ORP 600mV auf die 750mV zu kommen. Nach 48 Stunden ist die Ausschaltzeit auf 2 Stunden gestiegen und die eingeschaltete Zeit von 1 Minute ist gleich geblieben.

Bild 8 zeigt nach der Benutzung des Whirlpools.

Da schaltet sich der Ozongenerator nach dem er die 750 mV erreicht hat und nach der Filternachlaufzeit von 4 Minuten wieder ein.

Während des Aufenthaltes im Whirlpool kann es vorkommen das er die 750 mV nicht erreicht und durchgehend läuft.

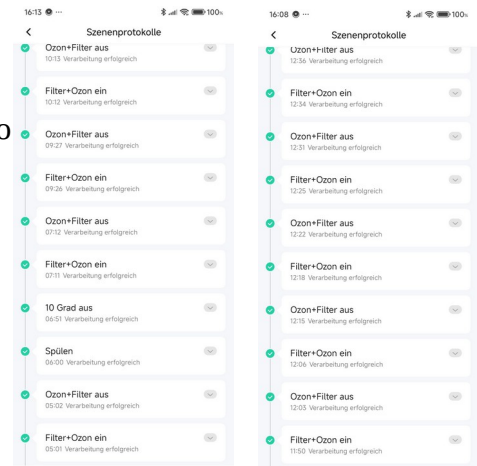


Bild 7

Bild 8

Bild 9 der Schaltschrank

Schaltschrank ABS Kunststoff IP65 (Ebay) hat die gleiche Größe von 300x400x170 mm wie der Ozon-Schaltschrank.

In der oberen Reihe von links nach rechts:

Netzteil 12 V 4 A. Dieser ist zuständig für die Lüfter im Ozon Schaltschrank der Versorgung der Elektronik der Thermostate und Relaisplatinen.

Ein DC DC Wandler von 12V auf 5V das wird für ein Thermostat gebraucht.

Die grauen Klemmen sind für die Verteilung der Niederspannung 12 V und 5V

2 X Thermostate für Durchlauferhitzer Wassertemperatur und Frostschutz.

Tuya WiFi 4 fach Relaisplatine mit Logik-Verriegelung zu Umsetzung einer hardwaregesteuerten Dioden-Logik. Der Ozongenerator und die Heizung sind physisch an den Betrieb der Filterpumpe gekoppelt (Fail-Safe). Die Massagedüsen Sitz können nicht eingeschaltet werden wenn der Filter läuft (selbe Wasserversorgung)

1. Filterpumpe.

2. Ozongenerator,

3. Durchlauferhitzer, Relais ein Wassertemperatur, Relais aus Frostschutz.

4. Lüfter Ozon-Schaltschrank.

Tuya WiFi4 fach Relaisplatine:



Bild 9

1. Wasser-Massage-Düsen.
2. Luft-Massage-Düsen.
3. Sitz-Massage-Düsen gekoppelt mit Filter
4. Licht

Unten von links nach rechts:

Klemmen für die Verteilung der 230 V

2X SSR 250 VAC 8A, Luft-Massage-Pumpe, Sitz-Massage-Pumpe

1X SSR 250 VAC 35 A, Wasser-Massage-Pumpe

5X SSR 250VAC 5A, Filter-Pumpe, Ozongenerator, Durchlauferhitzerpumpe, Licht, Frei.

4 fach Relaisplatine für 2 Jalousien.

Die SSR sind alle stärker ausgelegt um die induktiven Lasten zu schalten.

Historie und Systemoptimierung:

Frühere Konfigurationen nutzten Kompressoren zur Ozon-Injektion (Überdruckverfahren).

Mechanische Defekte führten hierbei zu massiven Wasserschäden an der Ozonröhre und dem Silikagel.

Der Umstieg auf das Vakuum-Prinzip via Venturi-Düse war die Lösung. Durch den erzeugten Unterdruck ist ein Eindringen von Wasser in den Gasweg physikalisch nahezu ausgeschlossen. Zusätzlich sichert die PTFE-Schlauch-führung über den Wasserspiegel und ein motorisierter Kugelhahn das System im Stillstand ab.

Allgemeines über Ozon

Ozon behandeltes Poolwasser ist sauberer, klarer, farblos, nicht färbend, geruchlos, sicherer und sauerstoffreicher.

Ozon kann als Desinfektionsmittel, Entfärber, Desodorierungsmittel, Entgiftungsmittel, Fällungsmittel, Koagulationsmittel und zur Geschmacksbeseitigung eingesetzt werden. Daher sollte der Einsatz von Ozon in Betracht gezogen werden, wenn eines dieser Probleme behoben werden muss, insbesondere bei Verdacht auf wasserbürtige Krankheitserreger.

Ozon ist in Wasseraufbereitungsanlagen besonders wertvoll, da es desinfizieren kann, ohne dass weitere Chemikalien hinzugefügt werden müssen, die später entfernt werden müssten. Wie bei anderen Aufbereitungsverfahren müssen die oxidierten Nebenprodukte der Ozonisierung gegebenenfalls durch Filtration oder Sedimentation entfernt werden, um ausreichend sauberes, klares Wasser zu erhalten.

Wirtschaftlichkeit und System-Autonomie: Der Ausbruch aus der „Chemie-Spirale“

Der konventionelle Betrieb eines Whirlpools basiert weitgehend auf einem Modell der permanenten Abhängigkeit von chemischen Verbrauchsmaterialien.

Chlor, pH-Regulatoren, Algenvernichter und Flockungsmittel bilden eine logische Kette von Folgeprodukten, die für den Handel einen kontinuierlichen Umsatz generieren.

Technisch betrachtet handelt es sich hierbei oft um eine Symptombekämpfung. Organische Lasten werden chemisch gebunden, was wiederum neue chemische Reaktionen (Chloramine, pH-Wert-Schwankungen) auslöst.

Die technologische Alternative: Ozon-Autarkie

Das hier dokumentierte System bricht mit diesem Modell durch den Übergang von der stofflichen zur energetischen Desinfektion.

1.In-Situ-Produktion: Das Desinfektionsmittel wird bedarfsgerecht vor Ort aus der Umgebungsluft synthetisiert. Der logistische und finanzielle Aufwand für den Erwerb und die Lagerung von Gefahrstoffen (Chlor/ Brom/ Aktivsauerstoff) entfällt nahezu vollständig.

2.Reduktion von Folgechemie: Da Ozon organische Stoffe rückstandslos oxidiert („verbrennt“), entstehen keine gebundenen Reststoffe (Chloramine), die wiederum durch Wasserwechsel oder Schockchlorung beseitigt werden müssten. Das System stabilisiert sich physikalisch-technisch, statt chemisch-reaktiv.

3.Betriebskosten: Die laufenden Kosten beschränken sich auf den zusätzlichen elektrischen Energiebedarf ca. 60W-80W sowie die thermische Regeneration des Silikagel.

Physikalische Grenzwerte der Trocknung:

Durch die konsequente Regeneration des Adsorbermittels (Silikagel Orange/Grün) wird ein Taupunkt der Speiseluft von -25°C bis -30°C sichergestellt. Dieser Wert liegt weit über der kritischen Grenze für die Bildung von Säurekondensat und garantiert die Langzeitstabilität der 14Khz -Entladungsröhre. Die Abweichung zum theoretischen Idealwert von -60°C (Sauerstoffbetrieb) ist im privaten Teillastbetrieb verfahrenstechnisch vernachlässigbar.

Beobachtung zur digitalen Fernüberwachung des Silikagels

Batteriebetriebene WiFi-Temperatur-Hygrometer unterliegen einer temperaturabhängigen Sendehysterese. Bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt ($< 2^{\circ}\text{C}$) kann die Funkverbindung aufgrund sinkender Batteriespannung oder fehlender Temperaturdynamik (Delta-T-Trigger) abbrechen.

Ergebnis: Die Hardware bleibt im "Deep Sleep". Erst bei einem Temperaturanstieg erfolgt ein automatischer Re-Connect. Für die Prozesssicherheit ist daher die visuelle Kontrolle des Silikagels (Orange auf Grün) dem digitalen Signal vorzuziehen.

Reaktionskinetik bei Personeneintrag:

Ein signifikanter Abfall des Redox-Potenzials bis zu 400mV während der Nutzungsphase ist ein Indikator für die unmittelbare oxidative Arbeit des Ozons. Durch den unbewussten Eintrag von Stickstoffverbindungen (Harnstoff/Aminosäuren) wird das gelöste Ozon zur Neutralisierung dieser Stoffe verbraucht.

Technischer Vorteil: Im Gegensatz zur Chlorung entstehen keine gesundheitsschädlichen Nebenprodukte (Chloramine). Das System arbeitet im „Echtzeit-Abbau“. Dass die Zielschwelle von 750 mV erst Minuten nach dem Verlassen des Pools wieder erreicht wird, ist der Beweis für eine bedarfsgerechte Dimensionierung ohne gefährliche Überdosierung während des Badens.

Umweltgerechte Entsorgung:

Durch die Ozon-Technologie ist das Abwasser frei von organischen Chlorverbindungen (AOX). Die Einleitung in das Kanalsystem dient gleichzeitig der mechanischen und chemischen Reinigung der Förderpumpen und Druckleitungen. Der regelmäßige Teilaustausch (1/3 des Volumens alle 5 Wochen) garantiert ein stabiles chemisches Gleichgewicht und begrenzt die Akkumulation von Nitraten, die als Nebenprodukt der stillen Entladung mit Umgebungsluft entstehen.

Fazit der Leistungsbilanz:

Trotz einer installierten Bruttoleistung von 10g/h ergibt die technische Wirkungsgrad-Analyse eine reale Netto-Ertragsrate von ca. 1g/h aktivem Ozon. Diese bewusste „Überdimensionierung“ der Hardware ist der Schlüssel zum Erfolg. Sie ermöglicht den Betrieb im materialschonenden Teillastbereich und liefert selbst bei Luftbetrieb eine Oxidationskraft, die marktübliche Standardgeräte (0,05 g/h) um das Zwanzigfache übertrifft. Die erreichten ORP von über 750 mV bestätigen die Richtigkeit dieser Auslegung.

Handelsübliche Whirlpool-Ozonisatoren mit einer Nennleistung von 50mV ohne integrierte Lufttrocknung sind verfahrenstechnisch als wirkungslos einzustufen. Die Kombination aus hoher Umgebungsfuchte und geringer Entladungsenergie führt primär zur Produktion von Stickoxiden statt Ozon.

Die wichtigsten Meilensteine der Ozon-Wasseraufbereitung:

- **1839 (Deutschland Schweiz):** von dem Chemiker **Christian Friedrich Schönbein** entdeckt
- **1893 (Niederlande):** Weltweit erste Anlage zur Desinfektion von Trinkwasser in Oudshoorn.
- **1902 (Deutschland):** Inbetriebnahme eines elektrifizierten Ozonwasserwerks in **Paderborn**, das bis 1922 in Betrieb war.
- **1906 (Frankreich):** Bau der ersten großen kommunalen Anlage in **Nizza** (Werk Bon Voyage). Nizza gilt aufgrund der kontinuierlichen Nutzung oft als "Geburtsort" der Ozonung für Trinkwasser.

Die Entwicklung wurde maßgeblich durch die Erfindung des ersten praktischen Ozongenerators durch **Werner von Siemens** im Jahr 1857 sowie die Pionierarbeit von **Marius Paul Otto** ermöglicht.