

# TRINKWASSERDESINFEKTION IN PASSAGIERFLUGZEUGEN

K. Thudt

Apparatebau Gauting GmbH  
Ammerseestr. 45-49, 82131 Gauting

## KURZFASSUNG

Es werden die Ergebnisse neuer Arbeiten zur Trinkwasseraufbereitung, die im Rahmen der Luftfahrtforschungsprojekte UVTEC (LuFoIV-1) und SIMKAB (LuFoIV-2) durchgeführt wurden vorgestellt. Ziel der Arbeiten ist die Bereitstellung einer neuen Technologie zur nachhaltigen Desinfektion des Wassers, das im Flugzeug über das Frischwassersystem bereitgestellt wird.

Ausgehend von einer Gegenüberstellung gängiger Desinfektionsverfahren wird eine Bewertung ihrer Anwendbarkeit in der Luftfahrt vorgenommen. Das ausgewählte Prinzip der UV-Desinfektion wird detailliert und die Kriterien zur Auswahl der Gerätebauweise und geeigneter UV-Strahler werden vorgestellt. Es wird auf wesentliche Fragestellungen zur Wartung der UV-Desinfektionsgeräte, der Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer der Strahler sowie zur Reduzierung der Belagbildung auf Quarzschutzrohren eingegangen.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Motivation

Die häufige Beanstandung der Trinkwasserqualität in Verkehrsflugzeugen durch nationale Aufsichtsbehörden wie den Gesundheitsämtern führte in Europa und in den USA zu verschärften Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien zur Sicherung der gesundheitlichen Anforderungen an Trinkwasser. Im November 2002 wurde mit einem Artikel des *Wall Street Journal* das öffentliche Interesse an der Sicherheit von Trinkwasser in Passagierflugzeugen geweckt. Da es bis dahin keine fundierten, gesicherten Befunde zur Trinkwasserqualität in Flugzeugen gab, startete die U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) gemeinsam mit der Air Transport Association (ATA) im Jahr 2003 eine erste Untersuchungskampagne. Die Proben aus 265 untersuchten Flugzeugen waren 2,4% coliform positiv. Darauf hin wurden im Sommer 2004 327 weitere Flugzeuge umfassender von der USEPA geprüft. Bei dieser Untersuchung wurden in zwei Flugzeugen E. coli gefunden, 15% der Flugzeuge waren coliform-positiv und in 41% der Flugzeuge war kein Restchlorgehalt nachweisbar [1].

Auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse meldete die USEPA einen beschleunigten Prozess zur Neuregelung der bestehenden Vorschriften (National Primary Drinking Water Regulations NPDWRs) [2] an, die auf traditionelle stationäre Anwendungen ausgerichtet waren ohne die besonderen Belange in mobilen Anwendungen zu berücksichtigen.

In Europa wurde 1998 die EU Richtlinie 98 [3] mit dem Ziel der Harmonisierung der nationalen Vorschriften und in Deutschland die „Neue“ Trinkwasserverordnung 2001 TrinkwV 2001 [4] verabschiedet. Die besonderen Anforderungen an Planung, Bau und Betrieb von

Wasserversorgungsanlagen an Bord von Land-, Luft- und Wasserfahrzeugen werden in der 2008 verabschiedeten DIN 2001 Teil 2 festgelegt.

Auf der anderen Seite beklagen Fluglinien ihren hohen Wartungsaufwand zur Sicherstellung der Wasserqualität und zur Einhaltung bestehender Richtlinien. Zurzeit werden die Trinkwassersysteme turnusmäßig mit hoch konzentrierten Desinfektionslösungen vollständig befüllt und nach einer Einwirkzeit von einigen Stunden entleert. Anschließend werden die Systeme durch erneute Füllung mit Trinkwasser ein- bis zweimal gespült. Um eine ausreichende Desinfektionsmittelkonzentration und anschließend eine ausreichende Spülung sicher zu stellen müssen während der Prozedur sämtliche Entnahmestellen geöffnet und geschlossen werden. Dies führt zu erheblichen Kosten und nicht zuletzt zu langen Ausfallzeiten.

### 1.2 Ergebnisse aus LuFo II und dem Förderprogramm der Hansestadt Hamburg

Im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms II und des Förderprogramms der Hansestadt Hamburg wurden zunächst vergleichende Untersuchungen verschiedener Desinfektionsverfahren an einem Prüfstand mit zwei Wassersystemen durchgeführt, welche typische Systemkonfigurationen eines Flugzeugs nachbildeten und originale Luftfahrtkomponenten enthielten. Die Systeme wurden mit Wasser aus einem gemeinsamen Vorratstank betrieben, eines der beiden Systeme diente als Referenz, in das andere wurde eine Desinfektionsanlage integriert (s. Bild 1).

Zu den gemäß Liste nach § 11 der TrinkwV 2001 zulässigen Desinfektionsverfahren [5], die für die Anwendung in der Luftfahrt in Frage kommen, zählen die „Dosierung und elektrolytische Herstellung von Chlor vor Ort“ und die UV-Bestrahlung.



BILD 1 Testaufbau zur Untersuchung von Trinkwasserdesinfektionsverfahren

Die Wirksamkeit der beiden Verfahren bezüglich Keimzahlreduktion und Hemmung des Biofilmwachstums wurde zunächst mit Hilfe von kommerziell verfügbaren Geräten für Bodenanwendungen untersucht. Nach mehrwöchigem Betrieb wurde die Keimzahl (als Kolonienbildende Einheiten pro ml Wasser, KBE/ml) von Wasserproben verschiedener Wasserentnahmestellen aus Küchen und Waschräumen bei 20°C und 37°C nach Trinkwasserverordnung bestimmt. Die Keimzahlreduktion bezogen auf das Referenzsystem betrug für das beste der untersuchten UV-Geräte 96% bei 37°C und 99% bei 20°C. Mit dem ausgesuchten besten Elektrolysegerät wurde eine Reduktion von 88% bei 37°C und 94% bei 20°C erreicht.

Während die Leistungsfähigkeit der beiden Verfahren bezüglich Keimzahlreduzierung im Wasser vergleichbar, wenn auch mit der UV-Bestrahlung etwas höher war, so zeigte sich bei der Reduzierung des Biofilmwachstums auf den Oberflächen des Systems ein anderes Bild. In diesem Versuch wurden die zwei Wassersysteme parallel unter gleichen Bedingungen betrieben. Ein System wurde mit dem ausgesuchten UV-Gerät, das andere mit dem bevorzugten Elektrolysegerät betrieben. Nach ca. 6 Wochen waren die Edelstahlrohre des Systems mit dem Gerät zur elektrolytischen Chlorbildung erwartungsgemäß deutlich weniger besiedelt als die Rohroberfläche des Wassersystems mit einem UV-Gerät. Ein Rohrstück im Zulauf zu den beiden Systemen, in dem keines der beiden Verfahren wirksam war, wurde jedoch deutlich stärker besiedelt als die Oberflächen der beiden Wassersysteme mit Desinfektionsanlagen. Somit hemmte auch die UV-Bestrahlung die Ausbildung eines Biofilms (s. Bild. 2).

Bei der elektrolytischen Herstellung von Chlor wird Hypochlorit aus Chlorid in einer Elektrolysezelle erzeugt. In dem einfacheren „Durchflussverfahren“ wird dabei das natürlich im Wasser vorkommende Chlorid in der Zelle umgesetzt. Die Vorhaltung von Natriumchlorid oder einer Solelösung sind nicht erforderlich. Bei dem aufwändigeren Membranverfahren sind Anoden- und Kathodenraum einer Zelle durch eine semipermeable

Membran voneinander getrennt, das zugesetzte Natriumchlorid (Speisesalz oder Solelösung) und enthärtetes Wasser werden in eine Natriumhypochloritlösung mit einer Konzentration von ca. 25 bis 30 mg/l umgesetzt. Diese Lösung wird mit einer Dosierpumpe dem Trinkwasser zugeführt, bis die maximal zulässige Konzentration von 0,3 mg/l erreicht ist. Zur Überwachung der Konzentration ist ein Messsystem vorgeschrieben.

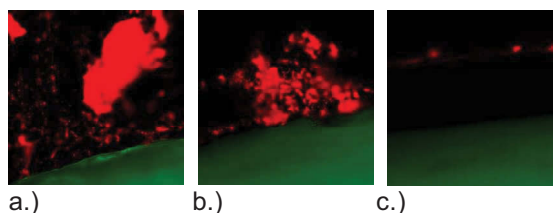


BILD 2 Mikroskopische Aufnahmen (eines konfokalen Laser-Scanning-Mikroskops) der Oberflächenbesiedlung von Edelstahlrohren ohne Wasserbehandlung (a.), mit UV-Bestrahlung (b.) und mit elektrolytischer Desinfektion (c.) nach 58 Betriebstagen.

Wegen des einfacheren Aufbaus und aus Gründen der Wartungsfreundlichkeit und Logistik wurde zunächst die elektrolytische Durchflussdesinfektion für die Anwendung im Flugzeug bevorzugt. Bild 3 zeigt eine Elektrolysezelle mit Schnittbild, die als Prototyp für den Einsatz im Flugzeug gebaut und untersucht wurde.



BILD 3: Durchfluss-Elektrolysezelle mit Schnittbild und Chlorsensor

Parallel zu der Entwicklung der Elektrolysezelle bildete die Suche einer geeigneten Messzelle zur Überwachung der Chlorbildung einen Schwerpunkt der Arbeiten. Die handelsüblichen Messsysteme zur Bestimmung der Chlorkonzentration in Wasserwerken und anderen Bodenanwendungen sind aufgrund ihrer Bauweise für Umgebungstemperaturen zwischen -55°C und +85°C nicht geeignet. Dies ist eine Standardanforderung für den Lagerungstemperatur-Bereich von Wasserkomponenten in der Luftfahrt. Es wurde daher verschiedene Messsysteme zur kontinuierlichen Konzentrationsbestimmung von aktivem Chlor hinsichtlich Langzeit-Stabilität, Linearität im Bereich 0,1 bis 6 mg/l und Querempfindlichkeit gegenüber anderen Wasserinhaltsstoffen untersucht.

Neben den extremen Temperaturanforderungen konnten auch weitere luftfahrtspezifische Anforderungen wie die wechselnde Wasserzusammensetzung und das häufige Ein/Ausschalten von marktüblichen Messsystemen nicht erfüllt werden, so dass eine eigene Sensorentwicklung für diese Anwendung erforderlich wäre.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurde gemeinsam mit Airbus eine Bewertung der elektrolytischen Chlorherstellung im Vergleich zur UV-Desinfektion, durchgeführt. Dabei wurden neben den Auswahlkriterien der Keimzahlreduktion und des Biofilmwachstums auch weitere wesentliche Kriterien wie die Eigensicherheit (Gefährdung durch Wasserstoffbildung), die Depotwirkung, die Betriebskosten, die Toleranz gegenüber verschiedenen Wasserqualitäten, der Integrationsaufwand, das Gewicht, das technologische Entwicklungsrisiko und die Zuverlässigkeit und Prozess-Überwachung berücksichtigt. Im Ergebnis schnitt die UV-Desinfektion aufgrund ihrer Überlegenheit bezüglich Eigensicherheit, Zuverlässigkeit, Gewicht und Entwicklungsrisiko besser ab.

Amalgamstrahlern wesentlich niedriger.

Für die Anwendung im Flugzeug wurden Hochleistungs-Amalgamstrahler gegenüber Mitteldruckstrahlern aus folgenden Gründen bevorzugt:

- Die Oberflächentemperatur der Amalgamstrahler ist mit 100-140°C wesentlich niedriger als die der Mitteldruckstrahler, die eine Temperatur von 600-900° erreichen, was zu einer verstärkten Belagbildung auf den Quarzschutzrohren führt.
- Die Nutzungsdauer der Mitteldruckstrahler ist mit 4.000 h wesentlich geringer als die der „Longlife“ Amalgamstrahler, deren Lebensdauer von den Herstellern mit 12.000 bis 16.000 Stunden angegeben wird.
- Der Wirkungsgrad der Amalgamstrahler ist um das 2-2,5 fache höher.

## 2 GRUNDLAGEN DER UV-DESINFEKTION

### 2.1 Wirkungsweise der UV-Desinfektion

Im Gegensatz zu Oxidationsmitteln wie Chlor, welche die Zelloberfläche der Mikroorganismen angreifen, durchdringen UV-Strahlen im Wellenlängenbereich von 240 bis 280 nm (UVC- Strahlung) Bakterien und Viren und schädigen die Erbsubstanz (DNA) der Mikroorganismen dauerhaft durch einen Prozess, der „Thymindimerisierung“ genannt wird. Vergleichbar mit einem defekten Reißverschluss kann dadurch der DNA-Doppelstrang nicht mehr korrekt getrennt und kopiert werden. Die sogenannte DNA-Transkription und damit die Vermehrung der Mikroorganismen werden unterbunden, die Mikroorganismen werden „inaktiviert“.

### 2.2 UV-Strahlertypen

In UV-Desinfektionsanlagen werden üblicherweise Quecksilberdampfstrahler eingesetzt. Abhängig von den Anforderungen kommen bei der Wasserdessinfektion Niederdruckstrahler oder Mitteldruckstrahler zum Einsatz. Niederdruckstrahler emittieren ausschließlich Strahlung der Wellenlänge 254nm, Mitteldrucklampen geben hingegen ein breitbandiges Spektrum über den Wellenbereich 200-300nm ab. Während klassische Niederdruckstrahler UVC- Strahlung mit einer spezifischen Leistung von 0,1 bis 0,4 W/cm Leuchtlänge erzeugen, können Hochleistungs-Amalgamstrahler bis zu zehnfach höhere Leistungsdichten von 0,5 bis 2 W/cm erreichen. Mitteldruckstrahler erzeugen zwar einen noch wesentlich höheren Strahlungsfluss von 12-18W/cm, ihr Wirkungsgrad ist jedoch bezogen auf die elektrische Leistung mit 12-15% gegenüber 30-40% bei

### 2.3 Aufbau von UV- Desinfektionsgeräten

In einer Bestrahlungskammer, dem so genannten UV-Reaktor wird das durchfließende Wasser UV-Strahlung ausgesetzt, die von UV-Lampen erzeugt wird. Die Strahler werden von Quarzschutzrohren umhüllt und über hochspannungssichere Kabel von Elektronischen Vorschaltgeräten (EVG) versorgt. Diese zünden die Lampen durch einen Stromstoß von mehreren Tausend Volt, stellen die richtige Betriebsspannung der Lampen sicher und überwachen die elektrischen Funktionen der Strahler.

UV-Strahlung wird vom Wasser stark absorbiert. Die Absorption hängt von der Zusammensetzung des Wassers ab. Beläge auf den Quarzschutzrohren und die Alterung der Strahler führen zu einer Abnahme der Strahlungsintensität. Die UV-Intensität muss deswegen mit UV-Sensoren überwacht werden.

## 3. ANFORDERUNGEN

Die UV-Technologie ist ein international anerkanntes Verfahren zur primären Desinfektion von Trinkwasser, vorausgesetzt die Anlagen erbringen den Nachweis ihrer Leistungsfähigkeit. Das Prüfverfahren und die Anforderungen an die UV-Desinfektionsgeräte sind in nationalen Richtlinien festgelegt. In Deutschland gilt das DVGW Arbeitsblatt W 294 [8], in Österreich die ÖNORM M 5873-1 [9], in Kanada und USA die NSF/ANSI Standard 55 [10]. Gemeinsamkeit der genannten Richtlinien ist die Forderung einer Fluenz von mindestens 400 J/m<sup>2</sup>. Diese ist eine Funktion der Bestrahlungsstärke in W/m<sup>2</sup> und der Bestrahlungsdauer und wird als Maß der Desinfektionswirksamkeit einer Anlage herangezogen. Die Fluenz eines UV-Gerätes wird mit einem standardisierten Verfahren „biodosimetrisch“ ermittelt.

Dazu wird die Abtötungsrate eines bestimmten Mikroorganismenstyps ermittelt. Eine weitere Anforderung zur Zulassung der Anlage ist die Überwachung der Bestrahlungsintensität mit einem UV-Sensor.

Die Transmission bzw. der spektrale Schwächungskoeffizient bei 254 nm (SSK-254) und der Volumenstrom des Wassers durch die UV-Einheit sind dimensionierende Größen der Reaktorauslegung.

Der Volumenstrom des Wassers und damit die Anforderung an die UV-Strahlungsintensität hängen entscheidend von dem Betriebszustand des Wassersystems ab. Während der Betankung kann der Volumenstrom bis zu 100 m<sup>3</sup>/h erreichen. Im Laufe eines Fluges ist der Versorgungsvolumenstrom hingegen erheblich geringer und hängt von der Wasserentnahme in den Küchen und Toiletten ab.

#### 4. UNTERSUCHTE UV-REAKTOR BAUWEISEN

Die Eignung verschiedener UV-Reaktorbauweisen wurde zunächst aufgrund von Simulationsrechnungen geprüft und bewertet. Üblicherweise werden zur Trinkwasseraufbereitung UV-Reaktoren mit „negativer Bestrahlungsgeometrie“ eingesetzt (s. Bild 4). Bei diesem Reaktortyp wird ein oder mehrere UV-Strahler, die von einem Quarzrohr geschützt werden, in das Wasser „getaucht“, das Wasser wird in diesem Reaktortyp von innen nach außen bestrahlt. Reaktoren mit „positiver Bestrahlungsgeometrie“ enthalten dagegen ein zentrales UV-durchlässiges Quarzglasrohr, durch welches das Wasser fließt. Die UV-Strahler befinden sich in diesem Fall außerhalb des Quarzrohres. Ein wesentlicher Vorteil der Reaktoren mit positiver Bestrahlungsgeometrie ist die geringere Neigung zur Belagbildung auf dem Quarzrohr. Dies ist auf die höhere Fließgeschwindigkeit in dem zentralen Rohr mit kleiner Querschnittsfläche und die niedrigere Oberflächentemperatur des Quarzrohres zurückzuführen. Das durchströmte Quarzrohr hat einen größeren Querschnitt und muss so ausgelegt werden, dass es dem Innendruck standhält, was zu einem erheblichen Gewichtsachteil dieser Bauweise führt.

Die Leistungsfähigkeit der in Bild 4 schematisch dargestellten Konzepte wurde berechnet und die Konzepte wurden hinsichtlich folgender Bewertungskriterien verglichen:

- Erreichte Fluenz bei verschiedenen Wasserqualitäten (UV-Transmission von 70 bis 99%) und Volumenströmen
- Integrierbarkeit, kompakte Bauweise
- Wartungsintervalle
- Herstellkosten und
- Zuverlässigkeit

Die UV-Reaktorbauweise mit positiver Geometrie wies erhebliche Nachteile auf. Dazu gehörten die geringere Strahlungsausbeute, der größere Bauraum und das große Gewicht des durchströmten Quarzglasrohres.

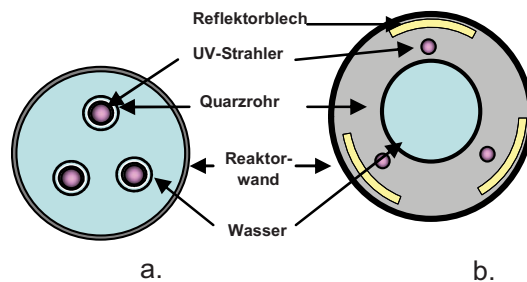


BILD 4 Schematische Darstellungen der Reaktorkonzepte mit negativer (a) und mit positiver Bestrahlungsgeometrie (b)

Für die Anwendung im Trinkwassersystem wurde daher die Bauweise mit negativer Bestrahlungsgeometrie ausgesucht und weiter entwickelt.

Insbesondere für eine Desinfektion des Wassers während der Betankung, hat ein Mehrstrahler-Reaktor entscheidende Vorteile. Selbst große Volumenströme können in kompakten Anlagen sicher desinfiziert werden. Redundant vorhandene Strahler bieten zudem eine hohe Zuverlässigkeit.



BILD 5. Modell des 3-Strahler-UV-Reaktors

Für das Konzept des 3-Strahler-Reaktors (s. Bild 5) wurde die Verteilung der Strahlungsintensität über den Querschnitt des Reaktors mit einem Simulationsprogramm berechnet (s. Bild 6).

Wird ein Reaktor dieses Typs auch während des Fluges zur Desinfektion des Wassers, das von den Tanks zu den Entnahmestellen in den Küchen und Waschräumen fließt, eingesetzt, so ist die UV-Leistung der drei UV-Strahler für den viel kleineren Volumenstrom um ein Vielfaches überdimensioniert. Wird dagegen nur einer der Strahler eingeschaltet, so hat dies den Vorteil kürzerer Betriebszeiten pro Strahler und damit verlängerter Wartungsintervalle. Nachteilig ist jedoch in dieser Betriebsweise die ungleichmäßige „Ausleuchtung“ des Reaktors (s. Bild 7), die zu einer ungenügenden Desinfektionswirksamkeit und einem



schlechten Ergebnis der biodosimetrischen Prüfung führt.

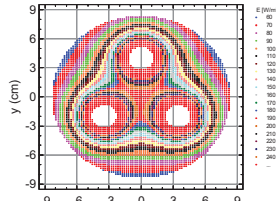


BILD 6. Verteilung der Strahlungsintensität (rechte Skala) über den Reaktorquerschnitt in einer Bestrahlungskammer mit drei eingeschalteten UV-Strahlern

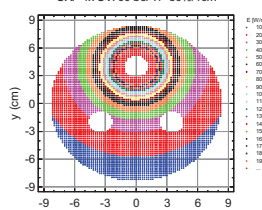


BILD 7. Verteilung der Strahlungsintensität über den Reaktorquerschnitt mit einem eingeschalteten UV-Strahler

Werden UV-Strahler hingegen in das Zentrum des UV-Reaktors integriert, so wird in einem Reaktor mit einem kleineren Durchmesser eine höhere Fluenz erreicht. So kann mit dieser Bauweise mit einem Strahler gleicher Strahlerleistung eine mehr als doppelt so hohe UV-Dosis erreicht werden, als in dem Mehrstrahlerreaktor.

Werden zwei UV-Strahler hintereinander in einen UV-Reaktor integriert (s. Bild 8), so kann während des Fluges mit nur einem eingeschalteten Strahler eine UV-Dosis von über  $400 \text{ J/m}^2$  selbst nach Minderung der Strahlungsintensität durch Alterung oder Belagbildung und mit Wasserqualitäten mit extrem niedriger UV-Transmission sicher erreicht werden. Der wechselseitige Betrieb der zwei UV-Strahler führt zu einer erheblichen Ausdehnung der Wartungsintervalle. Werden beide Strahler eingeschaltet, kann Wasser mit einer durchschnittlichen UV-Transmission von ca. 90%/cm auch bei hohen Volumenströmen während der Betankung sicher desinfiziert werden.

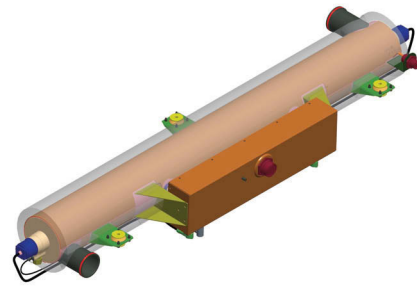


BILD 8. UV-Reaktor mit zwei UV-Strahlern, UV-Sensoren und einer Elektronik-Box mit Steuerung und elektronischen Vorschaltgeräten



BILD 9. Experimentaleinheit mit zwei UV-Strahlern und nach DVGW W294 geprüften UV-Sensoren

## 5 HYDRODYNAMISCHE OPTIMIERUNG

Die Desinfektionswirkung eines UV-Gerätes hängt von der Leistungsfähigkeit der UV-Strahler und deren Vorschaltgeräte und von den hydraulischen Eigenschaften des Reaktors ab.

Die ausgesuchten UV-Reaktorenvarianten wurden mit Hilfe einer 3-dimensionalen numerischen Modellierung kurz CFD-(Computational Fluid Dynamic) Simulation mit dem Ziel der Leistungsoptimierung untersucht. Maßgaben der Optimierung waren eine hohe UV-Dosis von mindestens  $400 \text{ J/m}^2$  unter verschiedenen Betriebszuständen, ein niedriger Druckverlust, ein geringes Gewicht, niedriger Platzbedarf und nicht zuletzt die Reduzierung des Fertigungsaufwandes. Eine weitere Forderung war eine annähernd gleiche Desinfektionsleistung der beiden UV-Strahler. Bild 10 zeigt exemplarisch die Geschwindigkeitsverteilung in einem Modell der UV-Einheit bei hohem und niedrigem Volumenstrom.

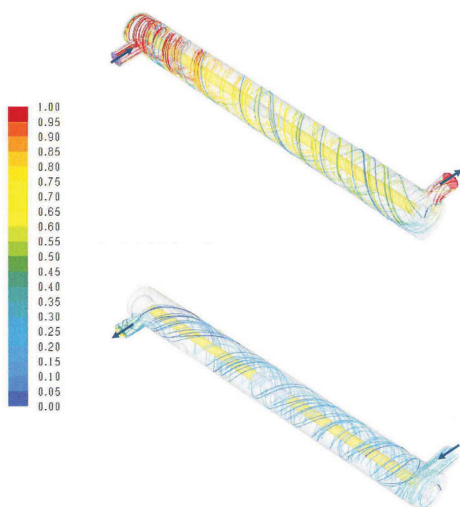


BILD 10: Geschwindigkeitsverteilung [m/s] bei einem Volumenstrom von 6 m<sup>3</sup>/h und 1,2 m<sup>3</sup>/h.

## 6 MAßNAHMEN ZUR REUZIERUNG DES WARTUNGSaufwandes

### 6.1 Untersuchung der Alterung und Lebensdauer ausgesuchter Niederdruck Amalgamstrahler

Ziele der laufenden Untersuchungen im Rahmen des Verbundvorhabens SIMKAB sind die Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer sowie die Reduzierung des Wartungsaufwandes der UV-Desinfektionsanlagen. Zuverlässigkeit und Lebensdauer der UV-Desinfektionsanlagen werden maßgeblich von den eingesetzten UV-Strahlern und den dazugehörigen Vorschaltgeräten bestimmt. Zur Auswahl eines optimalen Strahlers wurde daher frühzeitig ein Testprogramm gestartet, bei dem die UV-Intensität der Strahler nach Alterung durch zahlreiche Zündungen und durch die Brenndauer geprüft wurde. Zwei UV-Strahlertypen verschiedener Hersteller wurden im ersten Testlauf mit kommerziell verfügbaren, von den Strahlerherstellern empfohlenen Vorschaltgeräten betrieben. Die kommerziell verfügbaren Vorschaltgeräte waren für eine Stromversorgung mit 220V Wechselspannung ausgelegt.

Als Ergebnis dieser ersten Langzeituntersuchungen zeigte sich, dass die Zündfestigkeit der beiden Strahlertypen sehr unterschiedlich war. Während einer der beiden Strahlertypen bereits nach 1100 bis 1300 Schaltzyklen ausfiel, wiesen die Strahler des anderen Typs eine hohe Schaltfestigkeit von über 12.000 Zyklen auf. Danach wurde dieser Versuch abgebrochen. Die Strahler dieses Typs erreichten jedoch im Dauerbetrieb mit einer Zündung pro Tag die vom Hersteller spezifizierte Lebensdauer nicht.

Die Ursache der niedrigen Schaltfestigkeit des einen Strahlertyps war auf die verwendeten Vorschaltgeräte zurückzuführen. Sie zündeten die Strahler ohne

Vorheizung, d.h. die Elektrodenwendeln wurden vor dem Zünden nicht „vorgeglüht“, was zu einer Schädigung der Emitterpaste auf den Elektroden führte.

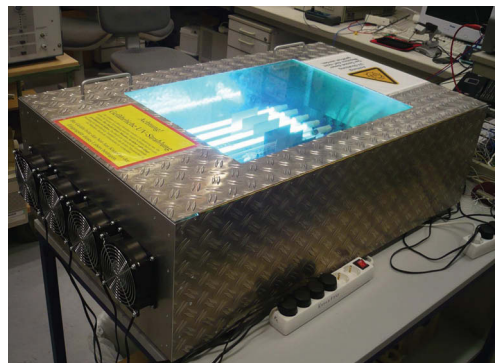


BILD 11. Prüfstand zur Untersuchung der Alterung der UV-Strahler.

Deswegen wurden die Vorschaltgeräte für die Anwendung im Flugzeug für eine Zündung mit Vorheizung entwickelt. Dauer und Stromstärke der Vorheizung wurden in Tests ermittelt und auf die Lampenelektroden maßgeschneidert.

Mit diesen Vorschaltgeräten wurde ein zweiter Lebensdauertest gestartet. In diesem Test werden außer dem Verlauf der Strahlungsintensität auch weitere Charakteristika der Strahler wie Spannung und Temperatur der Strahler aufgezeichnet. Die Strahler werden entweder durch häufiges Ein-Aus-Schalten oder durch eine lange Brenndauer mit nur einer Zündung pro Tag gealtert. Der Versuch läuft seit September 2009. Die Strahler sind auch nach über 12.000 Schaltzyklen voll einsatzfähig.

### 6.2 Reduzierung der Belagbildung auf Quarzschutzrohren

Im Laufe des Betriebs von UV-Desinfektionsanlagen kommt es zur Bildung von mineralischen und organischen Ablagerungen auf den Quarzschutzrohren. Diese Beläge sind in der Regel UV-absorbierend und vermindern daher die Desinfektionsleistung der Geräte.

Um die Wirksamkeit der UV-Einheiten zu erhalten, sind daher regelmäßige Wartungsarbeiten zur Entfernung dieser Beläge erforderlich. Eine Verlängerung der Wartungsintervalle kann „aktiv“ z. B. mit Wischern erfolgen. Dies ist insbesondere in der Abwasseraufbereitung üblich. Nachteil dieses Verfahrens ist die Notwendigkeit zusätzlicher Komponenten und die dadurch bedingte höhere Reparaturanfälligkeit. Eine Alternative stellen „passiven Maßnahmen“ zur Belagreduzierung dar. Dazu gehören z.B.:

- Schutzrohre aus Schmutzabweisenden Materialien
- Schutzfolien oder Schrumpfschläuche auf den

### Quarzschutzrohren

- Quarzrohrbeschichtungen

Vorversuchen mit Schutzrohren aus schmutzabweisendem Fluorpolymer mit einer Wandstärke von 1,5 mm führten aufgrund der niedrigen UV-Transmission zu einer Reduzierung der UV-Intensität um 35% im Vergleich zu Quarzrohren und wurden deswegen nicht weiter untersucht.

In den weiteren Versuchen wurde die Eignung von dünnen Schutzfolien aus Fluorpolymer und von Quarzbeschichtungen geprüft. Die Versuche zielten auf:

- die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der UV-Intensitätsverminderung bei unterschiedlichen Wasserqualitäten und
- die Quantifizierung von Unterschieden zwischen verschiedenen Materialien hinsichtlich der Neigung zur Belagbildung

In einem speziell für die Versuche angefertigten Teststand (s. Bild 12) wurden zwei UV-Geräte unter den gleichen Bedingungen parallel betrieben. Die Wassertemperatur wurde durch eine Kühlanlage zunächst bei konstant 20°C und später bei 15°C gehalten um die Belagbildung zu beschleunigen. Unterschiedliche Wasserqualitäten wurden durch Zusatz von Eisen, Mangan, Huminsäuren und Härtebildnern zum Leitungswasser alle zwei Tage neu hergestellt und eingesetzt.



BILD 12. Versuchsanlage zur Untersuchung der Belagbildung. Auf der Rückseite befindet sich ein zweites baugleiches UV-Gerät.

Im Verlauf von mehreren Wochen wurde die UV-Intensität der beiden UV-Geräte aufgezeichnet. Eines der beiden Geräte diente als Referenz und enthielt ein unverändertes Quarzrohr, das andere enthielt in der ersten Versuchsreihe ein Quarzrohr mit Schutzfolie und in der zweiten Versuchsreihe ein Quarzrohr mit Nanobeschichtung.

In Bild 13 und 14 ist der Verlauf der gemessenen UV-

Sensorwerte während der zwei Versuchsreihen dargestellt.

Um die Belagbildung besser zu visualisieren wurden nur die Sensorwerte bei bestmöglicher Wasserqualität miteinander verglichen. Diese Werte sind mit den jeweiligen Startwerten vergleichbar und konnten zur weiteren Auswertung herangezogen werden.

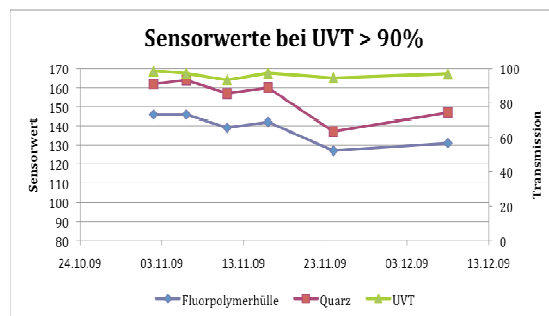


BILD 13. Verlauf der UV-Intensität in einem Gerät mit Fluorpolymerhülle auf dem Quarzschutzrohr.

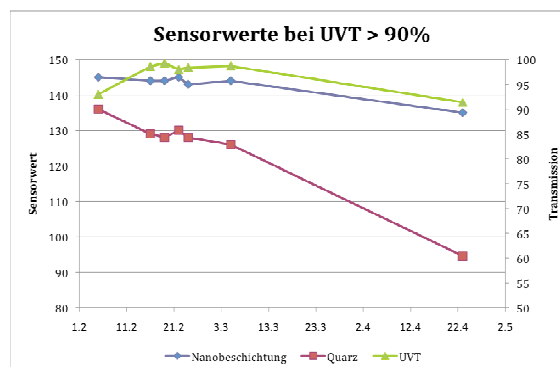


BILD 14. Verlauf der UV-Intensität in dem UV-Gerät mit einem Quarzschutzrohr mit Nanobeschichtung.

Während im ersten Versuch kein signifikanter Unterschied zwischen Schutzfolie und Quarz verzeichnet wurde, konnte im zweiten Versuch mit der Nanobeschichtung eine deutlich geringere Abnahme der UV-Intensität von 7% gegenüber 30% Abnahme der UV-Intensität ohne Nanobeschichtung beobachtet werden.

Die Effekte der Strahleralterung und der Belagbildung konnten in diesem Versuch nicht sauber getrennt werden. Unter der Annahme, dass die Strahler der zwei Geräte ungefähr gleich gealtert sind, betrug die Abnahme der Strahlung in dem Gerät ohne Nanobeschichtung aufgrund der Belagbildung mindestens 23%. Diese Ergebnisse geben einen eindeutigen Hinweis auf die mögliche Eignung der ausgesuchten Nanobeschichtung zur passiven Belagsprävention. In einer dritten Versuchsreihe soll dieser Hinweis unter verschärften

Bedingungen erhärtet werden.

Insgesamt zeigten die Ergebnisse unter den vorgegebenen Bedingungen eine vergleichsweise geringe Belagsbildung. So wurde von Bernhardt et al. [11] für Bedingungen ohne Eliminierung von Eisen und Mangan über eine praktisch 100%ige Absorption der UV-Strahlung innerhalb von 20-60 Tagen berichtet, wobei 20% Verlust schon nach etwa 5 Tagen zu beobachten waren.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

UV-Reaktoren mit negativer Bestrahlungsgeometrie erwiesen sich als erheblich leistungsfähiger als Reaktoren mit positiver Bestrahlungsgeometrie. Bei gleicher Strahlerleistung können damit höhere Volumenströme bzw. auch Wasserqualitäten mit niedriger UV-Transmission sicher desinfiziert werden. UV-Reaktoren mit mehreren symmetrisch in den Reaktor integrierten Strahlern sind zwar kompakt, die Strahler können jedoch nicht wechselweise betrieben werden, da dies zu einer niedrigen UV-Dosis führt. Aus diesem Grund wurde für den Einsatz in Passagierflugzeugen eine Bauweise mit zwei Strahlern, die hintereinander im Zentrum der Bestrahlungskammer eingebaut werden, vorgezogen. Damit ist ein vielseitiger Einsatz sowohl bei hohen Volumenströmen während der Betankung als auch mit vergleichsweise niedrigen Volumenströmen zur Wasserversorgung möglich. Lediglich während der kurzen Betankungsdauer werden beide Strahler eingeschaltet, während des Fluges können die Strahler hingegen im Wechsel betrieben werden, was nahezu eine Verdopplung der Wartungsintervalle ermöglicht.

Neben den hydrodynamischen Eigenschaften des UV-Reaktors wird die Leistungsfähigkeit der UV-Geräte von den UV-Strahlern und den dazugehörigen Vorschaltgeräten bestimmt. Um die Wartungsintervalle auf ein Maximum auszudehnen, wurden Strahler mit der längsten Lebensdauer auf Grundlage von vergleichenden Langzeittests ausgesucht und dafür maßgeschneiderte Vorschaltgeräte mit Vorheizung entwickelt.

In einem ersten Versuch konnte gezeigt werden, dass die Anwendung von Quarzschutzrohren mit einer schmutzabweisenden Nanobeschichtung zu einer erheblich Verzögerung der Belagbildung auf Quarzoberflächen führt und damit eine weitere Ausdehnung der Wartungsintervalle erlaubt. Die Eignung dieser Beschichtung soll bei einem weiteren Testlauf unter etwas geänderten Bedingungen geprüft werden.

## ANERKENNUNG

Die Projekte die dieser Veröffentlichung zugrunde liegen wurden im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo IV vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] U.S. Environmental Protection Agency, Aircraft Public Water Systems, Public Meeting, Summary Report, June 2005
- [2] National Primary Drinking Water Regulations (NPDWRs)
- [3] Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption
- [4] Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch Trinkwasserverordnung vom Mai 2001 TrinkwV 2001
- [5] Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz 2007 · 50:1087–1104, DOI 10.1007/s00103-007-0291 Online publiziert: 7. August 2007, 7. Änderungsmitteilung zur Liste1 der Aufbereitungsstoffe und Desinfektionsverfahren gemäß § 11 Trinkwasserverordnung 2001
- [6] DVGW Arbeitsblatt W 229 Verfahren zur Desinfektion von Trinkwasser mit Chlor und Hypochloriten, Mai 2008
- [7] DIN 2001 Trinkwasserversorgung aus mobilen Anlagen
- [8] DVGW Arbeitsblatt W 294-1, W 294-2, W 294-3 Juni 2006, UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung
- [9] ÖNORM M 5873-1: 2001-03-01, Anlagen zur Desinfektion von Wasser mittels Ultraviolett-Strahlen-Anforderungen und Prüfung
- [10] NSF/ANSI Standard 55; Ultraviolet Microbiological Water Treatment Systems. The standard is specifically for small "point-of-use" and "point of-entry" systems"
- [11] Bernhardt et al.: GWF 135, 1994, 677ff: Desinfektion aufbereiteter Oberflächenwässer mit UV-Strahlen