

# UV-Desinfektion von Rohwasser – Ergebnisse einer Pilotstudie

Norbert Konrad<sup>1,3</sup>, Stephan Kamphausen<sup>1</sup>, Matthias Rammler<sup>1</sup>, Birgitt Schmitt<sup>1</sup>, Hans-Peter Rohns<sup>1</sup>, Christoph Wagner<sup>1</sup>, Jutta Eggers<sup>2</sup>, <sup>1</sup>Stadtwerke Düsseldorf AG, Qualitätsüberwachung Wasser, Wiedfeld 50, D-40589 Düsseldorf, <sup>2</sup>DVGW-Technologiezentrum Wasser, Karlsruher Straße 84, D-76139 Karlsruhe, <sup>3</sup>Korrespondenzautor [info@trinkwasser-consulting.de](mailto:info@trinkwasser-consulting.de)

## Zusammenfassung

Als erste Stufe in der Rohwasserleitung wurde im Wasserwerk eine Mitteldruck-UV-Desinfektionsanlage installiert, die zwei Jahre lang als Ergänzung, aber auch als möglicher Ersatz einer oxidativen Behandlungsstufe getestet wurde. Während der Pilotphase traten keine Störungen auf und die Anlage konnte wie geplant und ausgelegt kontinuierlich betrieben werden.

Das gelegentliche Auftreten von Colibakterien und E. coli, begleitet von einer erhöhten Trübung im Rohwasser, konnte durch die installierte UV-Anlage sicher eliminiert werden. In den zulaufenden Edelstahlrohren und in geringerem Ausmaß in den Ablaufrohren wurde Algenbildung festgestellt. Die installierten Beobachtungsfenster zeigten eine zunehmende Biofilmbildung mit zunehmender Entfernung zum UV-Reaktor.

Während der Mitteldruckbestrahlung mit einer Reduktionsäquivalentdosis (RED) von 400 J/m<sup>2</sup> wurde ein Photoabbau organischer Spurenstoffe beobachtet. Die Konzentrationen von Acesulfam, Diatrizoat, Iopamidol und Methylbenzotriazol wurden um bis zu 18 % reduziert. Für die Metabolite Dimethylsulfamid (DMS) und Desphenylchloridazon (DPC) konnte hingegen keine Reduktion festgestellt werden. Der Abbau organischer Spurenstoffe kann daher bei der UV-Desinfektion von Rohwasser relevant sein, wobei sich die entstehenden Transformationsprodukte von denen bei oxidativen Desinfektionsverfahren unterscheiden.

## Einleitung

Die UV-Desinfektion ist eine anerkannte Methode in der Trinkwassergewinnung. Typischerweise wird sie als letzter Schritt nach der Wasseraufbereitung durchgeführt. Zwar zeigt die UV-Desinfektion gute Ergebnisse bei der Inaktivierung aller relevanten Bakterien und Viren im Trinkwasser [3], bei der Deaktivierung von Algen ist sie jedoch weniger erfolgreich. Zur Deaktivierung von Algen müssen Dosen von über 400 J/m<sup>2</sup> eingesetzt werden. In verschiedenen Anlagen wurde beispielsweise nach der UV-Lampe Algenwachstum beobachtet. Insbesondere der sichtbare Teil des Emissionsspektrums von Mitteldruck-UV-Lampen ist hierfür verantwortlich [2].

Mit dem Bau einer UV-Desinfektion als ersten Schritt einer Aufbereitungsanlage sollte die weitere Aufbereitungsanlage auf einem niedrigen bakteriellen Niveau gehalten werden. Insbesondere sollte eine bakterielle Besiedlung unserer Aktivkohlefilter vermieden werden. Daher wurde eine Mitteldruck-UV-Anlage zur Teilstromaufbereitung des Rohwassers installiert.

## Experimentelles

### Aufbau der Pilotanlage

Im Rohwasserzulauf wurde eine Siemens-Mitteldruck-Barriere M 275 UV mit DVGW-Zulassung installiert, die vom 01.03.2016 bis zum 27.03.2018 in Betrieb war. Die Anlage wurde gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 294-1 [1] ausgelegt. Der für die Auslegung relevante Parameter SSK wurde auf maximal  $2,1 \text{ m}^{-1}$  festgelegt. Demzufolge konnte die Anlage mit einem maximalen Volumenstrom von  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  und einer minimalen Bestrahlungsstärke von  $106 \text{ W}/\text{m}^2$  betrieben werden. Die Entscheidung fiel auf eine Mitteldruck-UV-Quecksilberdampf Lampe, da diese eine hohe Bestrahlungsstärke bietet, die den Bau kompakter Anlagen ermöglicht, und eine variable Lampenleistung, die an kurzfristige Trübungserhöhungen angepasst werden kann. Die automatische mechanische Reinigung des Hüllrohrs erfolgte stündlich. Das Wasser wurde der Rohwasserleitung entnommen, einem Mischwasser aus zwei von drei Pumpwerken. Dadurch ergab sich eine gewisse Variabilität der Rohwassereigenschaften. Nach der UV-Behandlung wurde das Wasser einer Kläranlage zugeführt.

In den Zu- und Ablaufrohren der UV-Anlage waren im Abstand von 30–60 cm Quarzfenster installiert, um das Algenwachstum visuell zu beobachten. Zusätzlich waren vor und nach der UV-Anlage Probenahmestellen zur Qualitätskontrolle installiert.

Die Betriebsparameter der UV-Anlage, der Wasserdurchfluss und die Trübung wurden kontinuierlich aufgezeichnet.

## Ergebnisse

### Betrieb der Pilotanlage

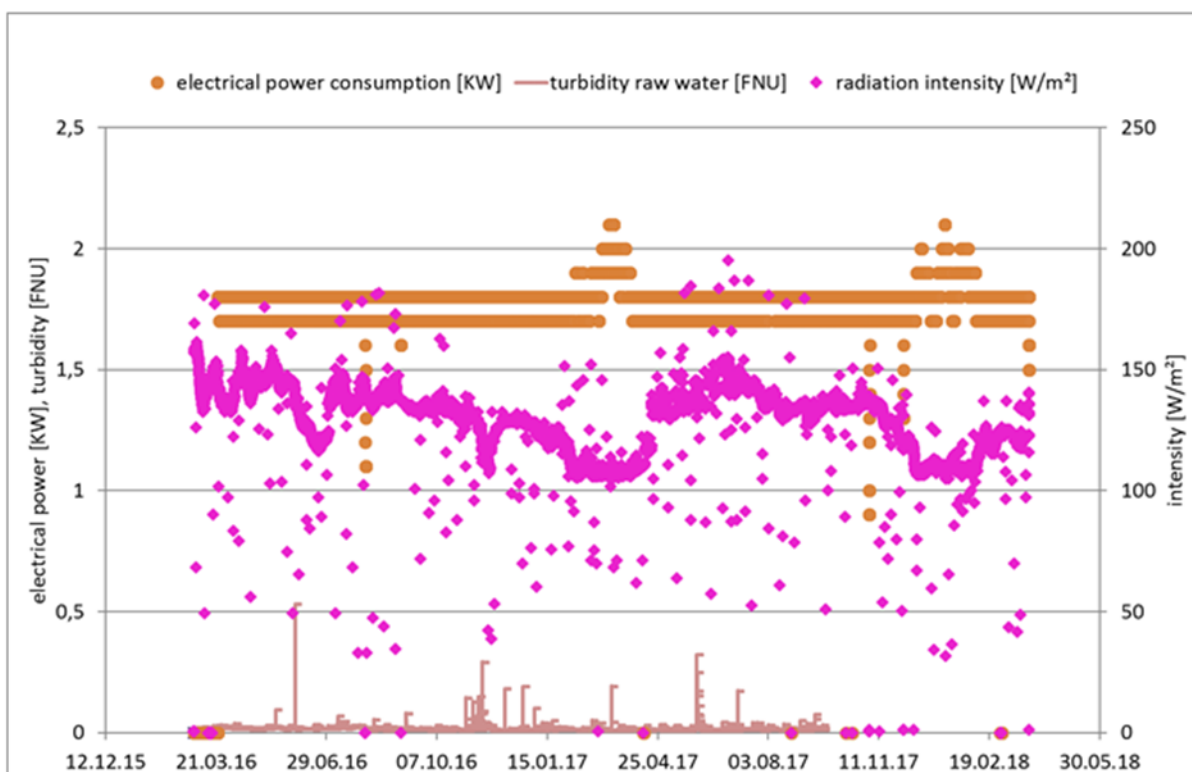


Abbildung 1: Leistungsaufnahme und Bestrahlungsstärke der UV-Anlage und Rohwassertrübung in Abhängigkeit von der Betriebszeit

Die Mitteldruck-UV-Anlage funktionierte während des gesamten Testzeitraums einwandfrei. Ein Wechsel der UV-Lampe war nicht erforderlich. Nach einem Betriebsjahr wies der UV-Sensor eine Differenz von 20 % gegenüber einer Referenzmessung auf. Die Lampenleistung erreichte erst gegen Ende des Testzeitraums den Regelbereich.

Abbildung 1 zeigt die Leistung der UV-Anlage. Es wurde eine konstante Leistungsaufnahme zwischen 1,7 und 1,8 kW beobachtet. Lediglich im März 2017 und im Januar 2018 blockierte die Steuerung und erhöhte die Leistung vorübergehend auf 2,2 kW. Auslösendes Ereignis war in beiden Fällen eine Trübung durch einen erhöhten Rheinwasserstand, die mit einem Minimum der Strahlungsintensität einherging.

Datenpunkte oberhalb und unterhalb des Intensitätsdiagramms sind auf die Verkleidung zurückzuführen, welche zu Abschattungen oder Reflexionen auf dem Strahlungssensor führte.

## Mikrobiologische Ergebnisse

Von November bis Januar traten im Rohwasser vereinzelt Coliforme und E. coli auf, begleitet von einer erhöhten Trübung. Diese wurden durch die installierte UV-Anlage abgetötet (siehe Tabelle 1). Auch die Gesamtkeimzahl bei 36 °C sowie die Koloniezahl auf R2A, einem nährstoffarmen Agar, reduzierten sich durch die UV-Behandlung wie erwartet.

Tabelle 1: Mikrobiologische Ergebnisse der UV-Desinfektion

samling point	date and time of sampling	temperature °C	total colony count, 20°C	total colony count, 36°C	Coliformes membran filtration	Coliformes MPN	E. coli membran filtration	E. coli	Germ counts on R2A agar, 20°C	SSK 254 nm
			KBE/ml	KBE/ml	KBE/100 ml	MPN/100 ml	KBE/100 ml	MPN/100 ml	KBE/ml	1/m
FR1	20.11.2017 11:50	13,5	0	0		19,2		0	37	2
FUVA	20.11.2017 11:53	13,8	0	5	0 ←		0		12	2
FR1	27.11.2017 12:15	14,4	0	0		1		0	18	2,05
FUVA	27.11.2017 12:18	14,5	0	0	0 ←		0		0	1,95
FR1	04.12.2017 11:55	13,9	0	0		4,2		0	8	2,32
FUVA	04.12.2017 12:09	14,4	0	0	0 ←		0		12	
FR1	18.12.2017 12:15	13	0	0		3,1		0	53	3,06
FUVA	18.12.2017 12:18	13,1	0	0	0 ←		0		16	2,99
FR1	02.01.2018 09:55	10,7	0	0		1		0	18	
FUVA	02.01.2018 10:07	10,6	0	0	0 ←		0		2	
FR1	08.01.2018 10:45	9,1	0	0		1		0	72	3,24
FUVA	08.01.2018 11:15	9,1	0	0	0 ←		0		0	3,18
FR1	10.01.2018 12:10	12,9	0	0		5		4 ←		
FUVA	10.01.2018 12:13	13,1	0	0	0 ←		0			
FR1	29.01.2018 12:10	10,2	0	0		1		0	50	3,12
FUVA	29.01.2018 12:12	10,6	0	0		0		0	0	3,09

FR1: raw water

FUVA: effluent UV

## Chemische Ergebnisse

Die statistische Auswertung der wöchentlichen Proben bis zum 26.02.2018 ist in Tabelle 2 für Roh- und UV-behandeltes Wasser dargestellt. Da die Messunsicherheit von SSK und SAK gleich groß war, wurde nach dem anfänglichen Vergleich nur der SAK-Wert bestimmt. SAK und SSK lagen sehr nahe beieinander, was auf die gute Partikelelimination in der Uferfiltration zurückzuführen ist, sofern keine Hochwasserereignisse auftreten. Im Vergleich zu den mittleren SAK/SSK-Werten wird durch die UV-Behandlung ein geringer Anteil (4,1/1,4 %) reduziert. Eine photoinduzierte Reduktion von Nitrat zu Nitrit wurde nicht beobachtet. Um diesen unerwünschten Prozess zu verhindern, schreibt das DVGW-Arbeitsblatt W294-1 die Verwendung von dotiertem Quarzglas mit einem Cut-off bei 240 nm vor.

Tabelle 2: Statistik der physikalischen und chemischen Parameter der UV-Behandlung

	raw water				effluent UV			
	SAK 254	SSK 254	nitrate mg/l	nitrite mg/l	SAK 254	SSK bei	nitrate mg/l	nitrite mg/l
	nm 1/m	nm 1/m			nm 1/m	254 nm 1/m		
maximum	3.19	3.24	18	0	3.01	3.44	16.6	0
minimum	1.27	1.33	7.6	0	0.79	1.07	7.1	0
total number	66	86	95	0	51	87	86	44
medium	2.19	2.15	11.22	-	2.10	2.12	11.14	-

## Transformationsprodukte

Durch die UV-Behandlung konnten verschiedene organische Spurenstoffe im Rohwasser um bis zu 18 % abgebaut werden (siehe Tabelle 3). Wie bei anderen Desinfektionsverfahren auch ist mit der Bildung von Transformationsprodukten (TPs) zu rechnen. In der Literatur sind Photo-TPs von Acesulfam [4, 5, 6], Diatrizoat, Iopamidol [7, 8, 9] sowie von Benzotriazolen [10, 11] bekannt. In der Forschung stand meist der photochemische Abbau von Spurenstoffen durch Sonnenlicht in Oberflächengewässern im Mittelpunkt. Die identifizierten Transformationsprodukte unterscheiden sich stark von denen anderer Desinfektionsverfahren wie Ozonung oder Chlorung.

Tabelle 3: Reduktion organischer Spurenstoffe durch UV-Behandlung

substance	acesulfame	amidotrizoic acid	Desphenyl-chloridazone	dimethyl-sulfamide	4/5-methyl-benzotriazole	iopamidole
reduction [%]	14.6	18.0	-0.8	0.3	13.4	16.3

## Außerbetriebnahme der Anlage

Bei der Inspektion während der Außerbetriebnahme wurden keine Ablagerungen an der Ummantelung der UV-Lampe oder an den Reaktorwänden festgestellt. Im gebogenen Rohr des UV-Auslasses wurde eine leichte Algenbildung festgestellt, am Rohwasserzulauf ein starker Bewuchs. Auf den Quarzfenstern war, insbesondere im Zulauf, mit zunehmender Entfernung von der UV-Lampe ein stärkeres Biowachstum zu beobachten. Dies ist auf die höhere Eindringtiefe des sichtbaren Lichts im Vergleich zur desinfizierenden UV-Strahlung zurückzuführen [2].

## Ausblick

Eine Desinfektion von Rohwasser mit einem hohen Anteil an Uferfiltrat ist technisch umsetzbar. Problematisch sind jedoch die Bildung von Algen sowie von Transformationsprodukten, für die eine toxikologische Bewertung fehlt. Es wird erwartet, dass die Einführung von UV-LEDs das Algenwachstum reduziert, da sich die emittierte Wellenlänge an die Desinfektionsanforderungen anpassen lässt.

Es wird empfohlen, die bei der UV-Desinfektion von mit Spurenstoffen belastetem Rohwasser entstehenden Transformationsprodukte zu identifizieren. Dieses Problem tritt nicht nur bei Flussuferfiltrat, sondern auch bei Grundwasser mit Pestizidrückständen auf. Erste Ergebnisse mit Niederdruck-UV zeigten einen starken Abbau von Melamin und Oxipurinol, die wichtige Verunreinigungen des Rohwassers sind.

## Literature

- [1] Arbeitsblatt W294-1:06-2006, UV-Geräte zur Desinfektion in der Wasserversorgung; Teil 1: Anforderungen an Beschaffenheit, Funktion und Betrieb
- [2] Jutta Eggers, Dirk Hochmuth, Tim Schwarzenberger, Bestandsaufnahme zum Wachstum von Algen im Wirkungsbereich von UV-Anlagen, DVGW-Forschungsbericht W201516, 2017
- [3] W.A.M. Hijnen, E.F. Beerendonk, G.J. Medema, inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review, *Water Research*, 40 (2006), 3-22 in
- [4] M. Scheurer, B. Schmutz, O. Happel, H.-J. Brauch, R. Wülser, F.R. Storck, *Science of the Total Environment*, 481 (2014), 425-432.
- [5] O. Happel, M. Scheurer, B. Schmutz, F.R. Storck, R. Wülser, H.-J. Brauch, *Vom Wasser*, 112 (2014), 83-85
- [6] N. Perkola, S. Vaalgamaa, J. Jernberg, A. Vähätalo, Degradation of artificial sweeteners via direct and indirect photochemical reactions, *Environmental Science and Pollution Research* 23 (2016), 13288-97
- [7] S. Allard, J. Criquet, A. Prunier, C. Falantin, A. Le Person, J. Yat-Man Tang, J.-P. Croué, Photodecomposition of iodinated contrast media and subsequent formation of toxic iodinated moieties during final disinfection with chlorinated oxidants, *Water Research* 103 (2016), 453-461
- [8] T. Rastogi, C. Leder, K. Kümmerer, Qualitative environmental risk assessment of photolytic transformation products of iodinated X-ray contrast agent diatrizoic acid, *Science of The Total Environment*, 482–483 (2014), 378-388
- [9] F. Tian, B. Xu, Y. Lin, C.Y. Hu, T. Y. Zhang, N. Y. Gao, Photodegradation kinetics of iopamidol by UV irradiation and enhanced formation of iodinated disinfection by-products in sequential oxidation processes, *Water Research* 58 (2014), 198-208
- [10] C. Weidauer, C. Davis, J. Raecke, B. Seiwert, T. Reemtsma, Sunlight photolysis of benzotriazoles – identification of products and pathways, *Chemosphere* 154 (2016), 416-424
- [11] S. Bahnmüller, C. H. Loi, K. L. Linge, U. von Gunten, S. Canonica, Degradation rates of benzotriazoles and benzothiazoles under UV-C irradiation and the advanced oxidation process UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, *Water Research*, 74 (2015), 143-154