

## Untersuchung der luftreinigenden Wirkung einer temperierten Wasserwand in Innenräumen hinsichtlich Feinstaub PM<sub>10</sub>

Mirjam Grimme  
Rafael Gramm  
Christoph Mitterer  
Hartwig Künzel

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis  
zum 80. Geburtstag gewidmet*



# Untersuchung der luftreinigenden Wirkung einer temperierten Wasserwand in Innenräumen hinsichtlich Feinstaub PM<sub>10</sub>

Zum Zwecke der Raumluftkonditionierung wurde am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP ein vertikales Flächenelement entwickelt, über das temperiertes Wasser fließt. Da es sich bei diesem Element um eine Art Zimmerbrunnen handelt, der die Raumluft sowohl kühlt als auch be- oder entfeuchtet, wird diese Anlage auch als Klimabrunnen bezeichnet. Aufgrund von Beobachtungen besteht die Vermutung, dass dieser Klimabrunnen auch in der Lage ist, die umgebende Luft von Fremdpartikeln zu reinigen. Am Beispiel von Feinstaub der Größe PM<sub>10</sub> wurde daher mithilfe eines Grimm-Messgerätes untersucht, wie sich eine einmalig eingebrachte Feinstaubmenge vor dem Klimabrunnen verhält und welchen Einfluss die Wassertemperatur auf den zeitlichen Verlauf der Schadstoffkonzentration hat. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt einen beachtlichen Zusammenhang zwischen Wassertemperatur und Abnahmegeschwindigkeit der Feinstaubmenge in der Luft. Ein auf 7°C gekühlter Klimabrunnen schafft es, die PM<sub>10</sub>-Konzentration ausgehend von 200 µg/m<sup>3</sup> rund 21 Minuten schneller unter den gesetzlichen Grenzwert von 50 µg/m<sup>3</sup> zu senken als ein ungekühlter Klimabrunnen. Die Reduktion auf unter ein Prozent der Startmenge geschieht sogar über eine Stunde schneller. Dabei spielt nachweislich die Luftzirkulation eine bedeutende Rolle, die aufgrund von Konvektion infolge der Temperaturunterschiede an der Grenzschicht zwischen Wasser und Raumluft entsteht. Hier zeigt sich ein klarer Vorteil des Klimabrunnens gegenüber ungekühlten Wasserwänden.

**Stichworte:** Klimabrunnen; Luftreinigung; Raumluftkonditionierung; Feinstaub; Konvektionswalze

## 1 Einführung

Der Klimabrunnen, eine Entwicklung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, stellt eine neuartige Form der Raumluftkonditionierung dar. Wesentliche Komponente ist ein vertikales Flächenelement, über das im Regelbetrieb gekühltes Wasser fließt, um die Umgebung zu kühlen und – für den Fall, dass sich die Wassertemperatur unterhalb der Taupunkttemperatur der Luft befindet – die Luft zeitgleich zu entfeuchten (vgl. Bild 1). Im ungekühlten Zustand kann der Klimabrunnen darüber hinaus die Luft durch Verdunstung befeuchten, was insbesondere in den Wintermonaten Anwendung finden kann. Das innovative Konzept sorgt dafür, dass die Raumluft durch Strahlungskälte zugfrei gekühlt und zeitgleich entfeuchtet werden kann. Dadurch trägt der Klimabrunnen nicht nur zur Behaglichkeit des Raumes bei, sondern hebt sich in diesem Aspekt auch deutlich von herkömmlichen Klimaanlage

**Experimental study of the air purifying effect of the chilled water wall in indoor facilities regarding particulate matter PM<sub>10</sub>.** *The Chilled Water Wall, a vertical panel over which temperature-controlled water flows, was developed at the Fraunhofer Institute for Building Physics IBP for indoor air conditioning. Due to observations, it is assumed that the Chilled Water Wall is able to clean the surrounding air from external particles. Using the example of fine dust of the size PM<sub>10</sub>, the examination with a GRIMM instrument shows how a concentration of introduced pollutants changes over time with the help of the Chilled Water Wall and reveals the influence of the water temperature on the chronological trajectory. The evaluation of the test indicates a significant coherence between the water temperature and the decline velocity of the fine dust volume in the air. The Chilled Water Wall cooled down to 7°C is capable of reducing a PM<sub>10</sub> concentration of 200 µg/m<sup>3</sup> at the beginning of the measurement to below the statutory value of 50 µg/m<sup>3</sup> about 21 minutes faster than the uncooled Water Wall. The reduction to under one percent of the initial amount of fine dust volume happens even more than one hour faster. Evidently, air circulation, which results from convection due to the differences in temperature at the barrier between the water and the indoor air, plays an important role here. In this case the Chilled Water Wall shows its clear advantage over uncooled water panels.*

**Keywords:** Chilled Water Wall, air purification, air conditioning, particulate matter, convective circulation

ab. Darüber hinaus weist er eine bis zu vierfach höhere Kühlleistung auf als übliche Kühldecken [1, 2, 3].

Aufgrund mehrfacher Beobachtungen wird dem Klimabrunnen neben seiner Klimatisierungsfunktion als zusätzliche Besonderheit der positive Nebeneffekt einer luftreinigenden Wirkung zugeschrieben. Beispielsweise konnten im Wasserauffangbecken eines Klimabrunnens, der in einer Zahnarztpraxis in Gebrauch war, nach einiger Zeit Kalkstäube qualitativ nachgewiesen werden. Zu diesen qualitativen Beobachtungen gab es allerdings bislang keine quantitativen Untersuchungen, die die Hypothese der luftreinigenden Wirkung belegen. Theoretische Überlegungen lassen jedoch darauf schließen, dass infolge des thermodynamischen Ungleichgewichts zwischen Wasser und Raumluft ein leichter Luftstrom entsteht, der Luftverunreinigungen zur Wasseroberfläche des Klimabrunnens hin transportiert, an der diese anschließend gebunden werden könnten.

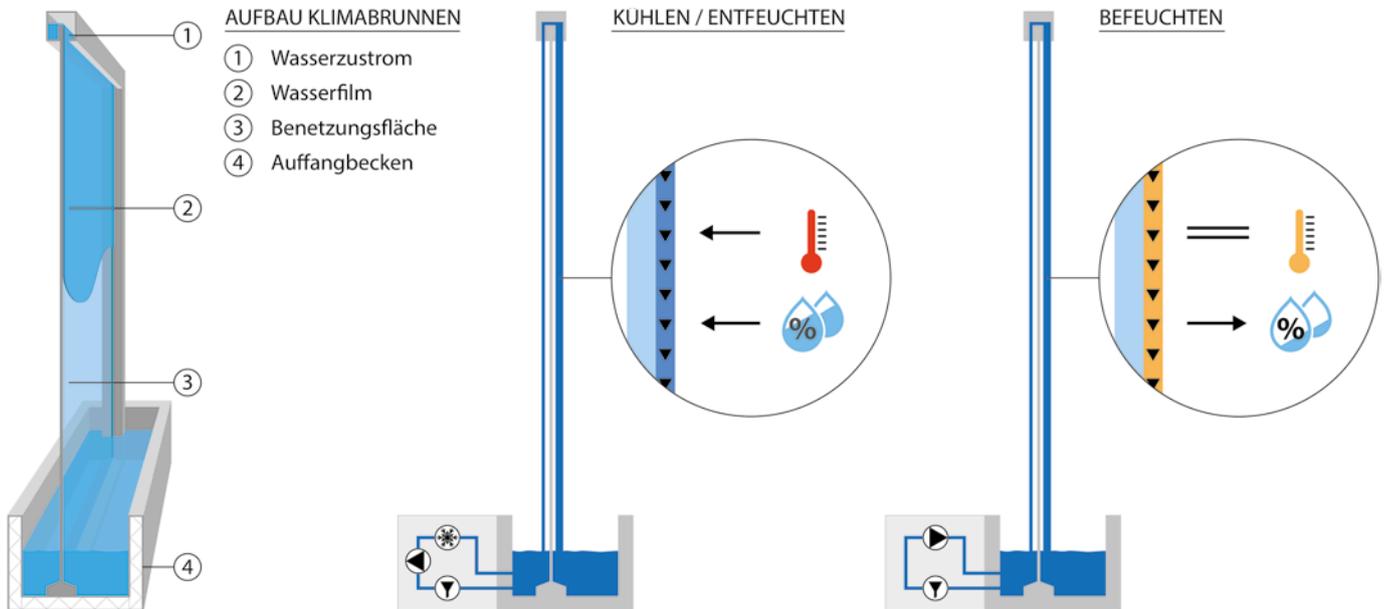


Bild 1. Schematische Darstellung des Klimabrunnens  
Fig. 1. Schematic representation of the chilled water wall

Tabelle 1. Gemessene PM<sub>10</sub>-Konzentrationen in Innenräumen in Anlehnung an [5]  
Table 1. Measured PM<sub>10</sub>-concentrations in indoor facilities based on [5]

Art des Innenraumes	Median PM <sub>10</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]
Wohnung	4–63
Schule	65
Büro	42
Restaurant/Café	199
Diskotheek	1014

Ein Schadstoff, der sich in vielerlei Hinsicht für die Innenraum-Untersuchungen am Klimabrunnen eignet, ist Feinstaub. Er kann etwa durch Fensterlüftung vom Außenraum in das Gebäudeinnere gelangen, aber auch selbst dort entstehen. Quellen hierfür sind unter anderem Kochprozesse, das Abbrennen von Kerzen oder Zigaretten sowie der Betrieb von Laserdruckern [4]. Zu Feinstaubbelastungen in Innenräumen veröffentlichte die Ad-hoc-Arbeitsgruppe „Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden“ im Jahr 2008 eine Vielzahl an Messwerten, die aus den Ergebnissen unterschiedlicher Studien zusammengetragen wurden. Ausdrücklich verweist sie darauf, dass in Innenräumen oftmals höhere Feinstaubbelastungen vorliegen als im Außenraum [5]. Tabelle 1 zeigt PM<sub>10</sub>-Konzentrationen, die in verschiedenartigen Innenräumen aufgezeichnet wurden.

Als Vergleichswert dient jeweils der Median, sodass jeweils die Hälfte der Messwerte über bzw. unter dem angegebenen Wert liegt und Extremwerte nicht abgebildet werden. In Innenräumen sind Feinstaubkonzentrationen oberhalb des Grenzwertes von 50 µg/m<sup>3</sup> für PM<sub>10</sub> also keine Seltenheit, sondern eher die Regel. Dieser Grenzwert gilt europaweit für das Tagesmittel im Außenraum,

mit einer maximal zulässigen Überschreitungshäufigkeit von 35 Tagen im Jahr [6]. Da für die PM<sub>10</sub>-Konzentration in Innenräumen kein eigener Grenzwert definiert ist, dient der Grenzwert für den Außenraum unverändert als Orientierung. Dieser Grenzwert ist allerdings kritisch zu hinterfragen, nachdem Untersuchungen der Weltgesundheitsorganisation WHO ergeben haben, „dass es keine Feinstaubkonzentration gibt, unterhalb derer keine schädliche Wirkung zu erwarten ist. Hierin unterscheidet sich Feinstaub von vielen anderen Schadstoffen wie Schwefeldioxid oder Stickstoffdioxid, für die man Werte angeben kann, unter denen keine schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit zu erwarten sind.“ [7]. Folglich können bereits sehr niedrige Feinstaubkonzentrationen die Gesundheit beeinträchtigen. So belegen Studien, dass die Exposition gegenüber Feinstaub beispielweise pollenbedingte Allergien verstärken [8, 9], Asthma begünstigen [10] oder das Risiko für Schlaganfälle erhöhen [11] kann.

Aufgrund der gesundheitlichen Relevanz sowie der häufig hohen Konzentrationswerte in Innenräumen wird Feinstaub im Folgenden exemplarisch für die Untersuchungen zur luftreinigenden Wirkung des Klimabrunnens herangezogen.

Diese Untersuchung war Teil einer Initiative, bei der in unterschiedlichen Arbeiten verschiedene Komponenten des Klimabrunnens beleuchtet wurden, zum Beispiel die Wartungsintensität oder die Transportmechanismen am Wasserfilm.

## 2 Methodik

Um sich der Frage anzunähern, ob der Klimabrunnen tatsächlich eine luftreinigende Wirkung besitzt, wurden entsprechende Versuche im High Performance Indoor Environment Technikraum (HiPIE) (vgl. Bild 2) am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP am Standort Holzkirchen durchgeführt. Dieser besitzt ein Volumen von 196 m<sup>3</sup> und wurde zu Beginn einer jeden Messeperiode auf rund 21°C



**Bild 2.** High Performance Indoor Environment Technikraum (Foto: Fraunhofer IBP)

**Fig. 2.** High performance indoor environment technical room (photograph: Fraunhofer IBP)



**Bild 3.** Der mobile Klimabrunnen mit Blick auf die unterhalb verbauete Kältetechnik (links); Messbäume im ersten Versuchsaufbau (rechts) (Foto: Fraunhofer IBP)

**Fig. 3.** The mobile chilled water wall with the below installed refrigeration machine (left); measuring trees in the first experimental assembly (right) (photograph: Fraunhofer IBP)

geheizt. Während der Messungen erfolgte keinerlei Raumluftkonditionierung, um den Raum so „unberührt“ wie möglich zu lassen und keine weiteren Randbedingungen in Betracht ziehen zu müssen. Da die Versuche im Winter durchgeführt wurden, war die relative Feuchte im Raum mit rund 30% recht gering.

Für die Versuche fand ein mobiler Klimabrunnen mit einer wasserbenetzten Fläche von rund 1 m<sup>2</sup> Verwendung. Die Kältemaschine ist in dieser Ausführung unterhalb des Wasserauffangbeckens verbaut (vgl. Bild 3 links). Nachdem das Wasser darin über den Kupferwärmetauscher auf die Zieltemperatur herabgekühlt wurde, wird es bis zum oberen Abschluss der Glasfläche gepumpt, tritt dort aus und beginnt an der Glasfläche herabzufließen.

Der erste Versuchsaufbau hatte das Ziel, den Wirkungsbereich des mobilen Klimabrunnens zu untersuchen, um zunächst eine Vorstellung von der Luftbewegung im Raum zu erhalten (vgl. Bild 3 rechts). Dafür kamen vier

**Tabelle 2.** Messhöhen für Behaglichkeitsmessungen gemäß DIN EN ISO 7726:2002 [12]

**Table 2.** Measuring heights for comfort measurements according to DIN EN ISO 7726:2002 [12]

Anordnung der Messsensoren	Empfohlene Höhe (Anhaltswerte)	
	Sitzend	Stehend
Kopfhöhe	1,1 m	1,7 m
Unterleibshöhe	0,6 m	1,1 m
Knöchelhöhe	0,1 m	0,1 m

gleichartige Messbäume zum Einsatz, an denen wiederum in vier unterschiedlichen Höhen Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitssensoren angebracht waren. Die gewählten Messhöhen entsprechen den standardisierten Behaglichkeitshöhen nach DIN EN ISO 7726:2002 „Umgebungs-klima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen“ (vgl. Tabelle 2).

Aufgestellt wurden die Messbäume in einer zur Wasserwand senkrecht verlaufenden Linie in 0,75 m, 1,0 m, 1,5 m sowie 2,0 m Entfernung zum Klimabrunnen.

Im zweiten Versuchsaufbau wurde der Messpunkt für die Feinstaubmessungen in einer Höhe von 1,1 m und in 1,5 m Entfernung zum Klimabrunnen platziert. Dadurch kann zum einen die Einatemhöhe einer sitzenden Person in Büroräumen, Klassenzimmern oder Ähnlichem abgebildet werden. Zum anderen garantiert die Entfernung von 1,5 m neben dieser Simulation eines möglichen Anwendungsfalls, dass der Messpunkt trotz der kleinen wasserbenetzten Fläche des mobilen Klimabrunnens noch innerhalb des Wirkungsbereiches innerhalb des verhältnismäßig großen Versuchsraumes liegt. Durchgeführt wurden die Feinstaubmessungen mithilfe eines Grimm-Messgerätes (Model 1.105). Dabei handelt es sich um ein optisches Aerosolspektrometer, welches mittels Laser die Partikelmassenkonzentration in der eingesaugten Luft bestimmt und explizit die PM<sub>10</sub>-Konzentration ausgeben kann. Für die Versuche wurde der Raum gezielt mit Feinstaub verunreinigt, indem eine immer gleiche Menge Feinstaub mittels „Ausschütteln“ eines Handtuchs aus einer Höhe von rund 2,5 m eingebracht wurde (vgl. Bild 4). Ventilatoren sorgen für eine Durchmischung der Luft.

Dafür wurde eine Staubmischung aus Cellulosepulver und Arizonastaub der Firma DMT im Verhältnis 20:80 angefertigt, um das reale Verhältnis von organischem zu anorganischem Anteil im Feinstaub näherungsweise abzubilden [13, 14]. Die Feinstaubmenge wurde so gewählt, dass sich kurze Zeit nach dem Einbringen eine hohe und doch realistische Belastung im Versuchsraum einstellt. Jedes Messszenario wurde dreimal in Folge durchgeführt, um die Ergebnisse untereinander zu validieren und besser einordnen zu können. Die Versuchsreihe besteht aus folgenden Messungen:

- 3 Messungen der PM<sub>10</sub>-Konzentration – ohne Klimabrunnen
- 3 Messungen der PM<sub>10</sub>-Konzentration – mit Klimabrunnen bei 7°C Wassertemperatur
- 3 Messungen der PM<sub>10</sub>-Konzentration – mit Klimabrunnen und ungekühltem Wasser
- 3 Messungen der PM<sub>10</sub>-Konzentration – mit Klimabrunnen bei 14°C Wassertemperatur



Bild 4. Versuchsaufbau der Feinstaubmessungen (Foto: Fraunhofer IBP)  
 Fig. 4. Experimental setup of the fine dust measurements (photograph: Fraunhofer IBP)

Parallel zu den Luftmessungen wurden jeweils am Anfang und am Ende einer jeden Messung Wasserproben aus dem Auffangbecken entnommen, um den organischen Anteil im Wasser mittels einer TOC-Analyse (Total Organic Carbon, Gesamter organischer Kohlenstoff) zu ermitteln.

### 3 Ergebnisse und Interpretation

#### 3.1 Lufttemperaturen und -geschwindigkeiten vor dem Klimabrunnen

Die Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsverhältnisse vor dem Klimabrunnen sind in Bild 5 dargestellt. Die Ausdehnung eines Kreises um den zugehörigen Messpunkt gibt richtungsunabhängig die Luftgeschwindigkeit an dieser Stelle an. Der Kreisradius verhält sich dabei proportional zum Wert der gemessenen Geschwindigkeit. Das aufge-

zeichnete Temperaturspektrum wird in vier Bereiche zu je 0,4°C unterteilt. Jedem Bereich wird eine Farbe zugewiesen, wobei dunkelblau für die niedrigste und rot für die höchste Temperatur steht.

Auf diese Weise wird ersichtlich, dass in Fußseshöhe, also 0,1 m über dem Boden, die höchsten Luftgeschwindigkeiten und zugleich die niedrigsten Temperaturen auftreten. Dabei ergibt sich die Maximalgeschwindigkeit von 0,113 m/s in nächster Nähe zum Klimabrunnen. Im oberen Bereich des Raumes deuten dagegen rote Kreise auf hohe Temperaturen hin. Besonders sticht eine Art „Loch“ in mittlerer Höhe und einer Entfernung zwischen 0,75 m und 1,0 m zum Klimabrunnen hervor. Wie an der Kreisgröße zu erkennen, liegt dort die geringste Luftbewegung vor. Wengleich nicht direkt vor der Wasseroberfläche gemessen wurde, kann man aufgrund der höheren Luftgeschwindigkeiten am Fuße des Klimabrunnens davon ausgehen, dass die Luft vor der Wasserwand nicht nur abgekühlt, sondern auch in Richtung des Bodens beschleunigt wird. Betrachtet man die Messung in 2,0 m Entfernung, hat sich die Luft in Bodennähe im Vergleich zu den Messpunkten daneben erwärmt. Die darüber liegenden Messungen lassen darauf schließen, dass sie hier bereits wieder in Richtung Zimmerdecke aufsteigt. Die Abwärtsbeschleunigung der Luft vor dem Klimabrunnen erfordert ein Nachströmen weiter oben liegender Luftmassen. Die größeren Kreisradien in 1,7 m Höhe bestärken diese Vermutung, da sie eine Bewegung hin zum Klimabrunnen andeuten.

Zusammenfassend wird versucht, mit der grau hinterlegten Darstellung in Bild 5 auch die wahrscheinliche Strömungsrichtung abzubilden. Die durchgeführten Messungen stützen die Vermutung einer sich ausbildenden Konvektionswalze vor dem Klimabrunnen. Diese Erkenntnis ist nicht nur für die luftreinigende Wirkung des Klimabrunnens von Bedeutung, da durch die beschriebene Luftzirkulation Partikel zum Klimabrunnen hin transportiert und von der Wasseroberfläche herausgefiltert werden können.

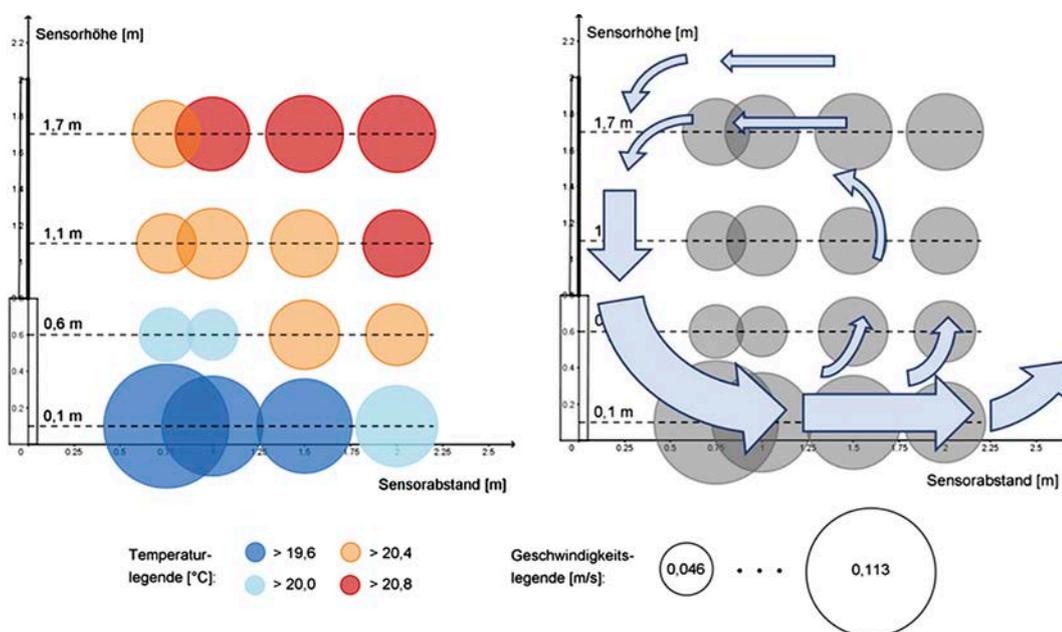


Bild 5. Temperatur- und Luftgeschwindigkeitsverhältnisse vor dem Klimabrunnen  
 Fig. 5. Temperature and airspeed conditions in front of the chilled water wall

Die Konvektionswalze führt im Sommerbetrieb dem Fußbodenbereich ähnlich wie bei einer Quelllüftung auch gekühlte und entfeuchtete Luft zu.

### 3.2 Feinstaubmessungen

Unmittelbar nach der Staubeinbringung schwankt die Konzentration erheblich zwischen 300 und 500 µg/m<sup>3</sup>, beginnt aber nach wenigen Minuten Messzeit ab einer Konzentration von rund 200 µg/m<sup>3</sup> gleichmäßig zu sinken. Um einen fundierten Vergleich der einzelnen Messungen ziehen zu können, wird daher die Zeitachse aller Messungen so verschoben, dass die Startkonzentration bei ca. 200 µg/m<sup>3</sup> liegt. Der Verlauf der Feinstaubkonzentration stellt sich dann für alle Messungen als fallende Kurve dar. Nach rund 150 Minuten hat sich die Konzentration bei allen durchgeführten Versuchen bereits um mehr als 80% reduziert, weswegen eine Messdauer von drei Stunden als ausreichend erachtet wird. Bild 6 zeigt die jeweiligen Verläufe der Feinstaubkonzentration für die beiden Messreihen „mit Klimabrunnen und 7°C Wassertemperatur“ und „ohne Klimabrunnen“.

Von kleinen Schwankungen abgesehen, sind die Kurven einer jeden Messreihe nahezu deckungsgleich und zeigen große Übereinstimmung in ihren Steigungsverhalten. Gleiches gilt für die zwei weiteren Messreihen. Daher werden die einzelnen Messungen mithilfe von Exponentialfunktionen modelliert. Die zugehörigen Funktionsterme und -graphen sind Bild 7 zu entnehmen. Der Kurvenverlauf der Messreihe „ohne Klimabrunnen“ entspricht dem der Messreihe „mit Klimabrunnen – ungekühlt“.

Je stärker das Wasser des Klimabrunnens gekühlt ist, desto schneller fällt die Kurve der angenäherten Exponentialfunktion und damit auch die PM<sub>10</sub>-Konzentration am Messpunkt. Ein deutlicher Effekt ist aber erst ab 7°C Wassertemperatur zu verzeichnen. Allerdings bringt ein auf 14°C gekühlter Klimabrunnen immerhin noch eine leichte Veränderung gegenüber der Messreihe ohne Klimabrunnen hervor. Kein Effekt zeigt sich bei ungekühltem Wasser.

Tabelle 3. Vergleich der Halbwertszeiten der verschiedenen Messreihen

Table 3. Comparison of the half-lives of the different measurements

Messreihe	Halbwertszeit (Unterschreitung der 100 µg/m <sup>3</sup> )	Zeit bis zur Grenzwertunterschreitung (50 µg/m <sup>3</sup> )
Ohne KB	38,7 min	77,4 min
Mit KB, ungekühlt	39,0 min	77,9 min
Mit KB, 14°C Wassertemperatur	34,7 min	69,4 min
Mit KB, 7°C Wassertemperatur	28,0 min	56,1 min

Dem Klimabrunnen bei maximaler Kühlung (rund 7°C) gelingt es also, eine realitätsnahe Feinstaubbelastung von 200 µg/m<sup>3</sup> (vgl. Tabelle 2 – Wert in Restaurants) in weniger als einer Stunde unter den gesetzlich festgelegten Grenzwert zu senken. Verzichtet man auf den Klimabrunnen, vergehen für denselben Prozess 21 Minuten mehr. Man kann also von einer deutlichen Verbesserung gegenüber dem Normalfall sprechen. Durch den Betrieb des Klimabrunnens mit 14°C Wassertemperatur wird der Grenzwert lediglich 8 Minuten schneller unterschritten als ohne Klimabrunnen.

Tabelle 3 vergleicht noch einmal die Halbwertszeiten für die jeweilige Feinstaubkonzentration. Die Zeit bis zur Grenzwertunterschreitung von 50 µg/m<sup>3</sup> entspricht für die hier betrachtete Startkonzentration der doppelten Halbwertszeit.

Hervorzuheben ist, dass der zeitliche Vorteil der gekühlten Varianten allem Anschein nach fast ausschließlich der erzeugten Konvektionswalze zuzuschreiben ist. Höhere Temperaturdifferenzen zwischen der Wasserwand und der davor befindlichen Luft erzeugen größere Dichteunterschiede, die für eine schnellere Vertikalbewegung der

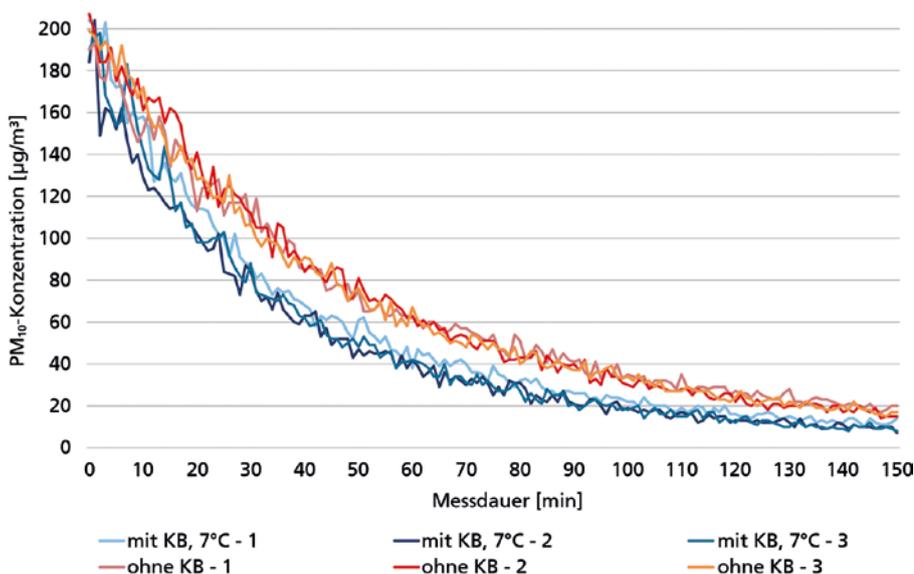


Bild 6. Gemessene Feinstaubkonzentrationsverläufe der Versuchsreihen „mit Klimabrunnen und 7°C Wassertemperatur“ (blaue Kurven) und „ohne Klimabrunnen“ (rote Kurven)

Fig.6. Measured fine dust concentration courses of the test series “with the chilled water wall and 7°C water temperature” (blue curves) and “without the chilled water wall” (red curves)

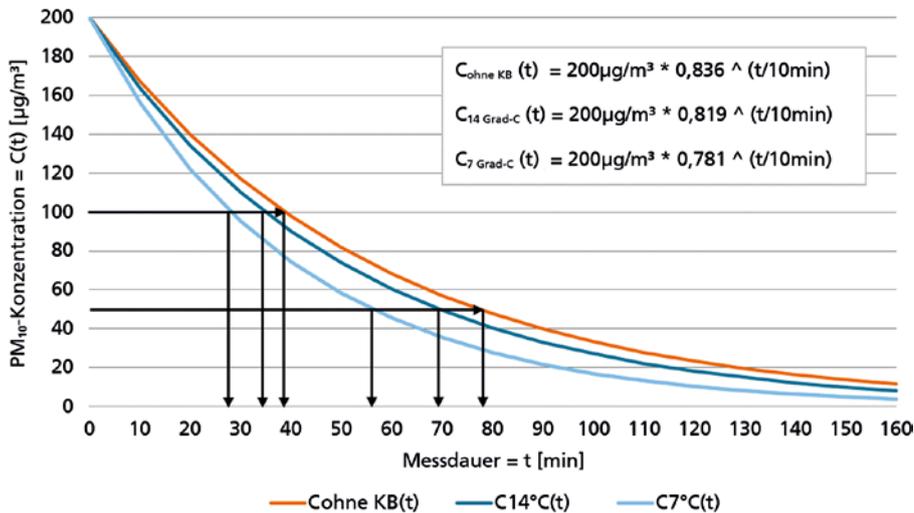


Bild 7. Vergleich der modellierten Funktionen  
Fig. 7. Comparison of the modeled functions

Luft an dieser Stelle sorgen. Eine stärkere Konvektionswalze ist dann imstande, mehr Feinstaub weg vom Messpunkt hin zum Klimabrunnen zu befördern. Da sich ohne Kühlung des Wassers keine merkliche Veränderung der Feinstaubabnahme einstellt, ist der durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers aufgebrachte mechanische Impuls offensichtlich unerheblich für die Ausbildung und Ausprägung der Luftzirkulation.

Die TOC-Analyse des Wassers im Klimabrunnenaufangbecken lässt keinen Schluss auf einen exakten Zusammenhang zwischen der Abnahme der Feinstaubkonzentration in der Luft und der Zunahme an organischem Material im Wasser zu. Obwohl tendenziell eine Zunahme von organischen Stoffen über den Messzeitraum hinweg zu verzeichnen ist, schwanken die Einzelergebnisse so stark, dass kein Rückschluss auf die Luftmessungen gezogen werden kann. Somit lässt sich zwar vermuten, dass sich der Feinstaub aus der Luft abschließend auch im Klimabrunnenwasser wiederfindet, belegt ist dies durch die TOC-Messungen allerdings nicht. Offenbar eignet sich eine TOC-Messung beim vorliegenden Versuchsaufbau nicht als Nachweismethode von Feinstaub im Wasser.

#### 4 Fazit

Wichtigste Voraussetzung für die luftreinigende Wirkung ist die Ausbildung einer zunächst nur in der Theorie bestehenden Konvektionswalze, die permanent Feinstaubpartikel in Richtung des Klimabrunnens transportiert. Eine derartige Luftzirkulation konnte in Experimenten nachgewiesen werden. Ursächlich für dieses Phänomen ist der Temperaturunterschied zwischen der wasserbenetzten Glasfläche und der Raumluft.

Auch die zentrale Ausgangsfrage, ob eine luftreinigende Wirkung durch den Klimabrunnen für Innenräume quantitativ nachgewiesen werden kann, kann zu großen Teilen positiv beantwortet werden. Dazu müssen die durchgeführten Feinstaubmessungen zu Partikeln der Größe PM<sub>10</sub> herangezogen werden. Aus ihnen wird ein Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur des Klimabrunnens und der Abnahmegeschwindigkeit der Feinstaubkonzentration am Messpunkt ersichtlich. Je käl-

ter nämlich das Wasser des Klimabrunnens ist, desto schneller fällt die Feinstaubkonzentration am Messpunkt ab. Der stärkste Effekt zeichnet sich mit einem auf 7°C temperierten Klimabrunnen ab. Ausgehend von einer Startkonzentration von 200 µg/m<sup>3</sup> wird der gesetzliche Grenzwert von 50 µg/m<sup>3</sup> in dieser Konstellation knapp 21 Minuten schneller erreicht, als dies ohne Klimabrunnen der Fall wäre. Der genannte Grenzwert ist aus medizinischer Sicht aber durchaus kritisch zu betrachten, da tatsächlich kein Schwellenwert existiert, bei dem eine vorhandene Feinstaubkonzentration nicht schädlich auf die menschliche Gesundheit wirkt. Lässt man den Grenzwert deshalb außer Acht und ermittelt die Zeitspanne, nach der die Anfangskonzentration auf ein Prozent gesunken ist, ergibt sich ein noch stärkerer zeitlicher Vorteil des gekühlten Klimabrunnens von über einer Stunde.

Zudem wurde herausgefunden, dass der ungekühlte Betrieb des Klimabrunnens hinsichtlich der Feinstaubreduzierung am Messpunkt keine Unterschiede zur Situation ohne Klimabrunnen ergibt. Das unterstreicht erneut, dass die Konvektionswalze, die gerade aus dem Temperaturunterschied zwischen Wasser und angrenzender Luft resultiert, eminent wichtig für den luftreinigenden Effekt ist. Die bloße Wasserbewegung ohne Kühlung schafft es zumindest hinsichtlich Feinstaub nicht, die Schadstoffkonzentration am Messpunkt zu beeinflussen.

Die genannten Resultate gelten wohlgerne nur für die beispielhafte Untersuchung von Feinstaub der Größe PM<sub>10</sub> und können nicht allgemein auf alle weiteren Luftschadstoffe übertragen werden. Außerdem ist der Nachweis eines luftreinigenden Effektes lediglich teilweise erbracht, da die Feinstaubkonzentrationen am Messpunkt mit gekühltem Klimabrunnen zwar schneller abnehmen, die abschließenden TOC-Messungen zur Ansammlung organischer Bestandteile im Wasserbecken des Klimabrunnens jedoch keine eindeutigen Aussagen zulassen. Dadurch bleibt unklar, ob die organischen Stoffe, deren Anteil im Klimabrunnenwasser über die Experimente hinweg zunimmt, tatsächlich aus dem Feinstaub der Luft stammen oder ob die Stäube durch die Konvektionswalze lediglich schneller vom Messort entfernt und an unbekannter Stelle im Raum abgelagert werden.

Nichtsdestotrotz muss zusammenfassend betont werden, dass der Klimabrunnen mit gekühltem Wasser zu einer signifikant schnelleren Reduktion von Feinstaub der Größe PM<sub>10</sub> auf Atemhöhe führt und damit einen Beitrag zu einer reineren Luft in Innenräumen leisten kann. Dadurch hebt er sich von herkömmlichen, ungekühlten Wasserwänden klar ab. Nachdem der Einzelne hinsichtlich der Reduktion von Emissionen kaum eine Handlungsmöglichkeit besitzt und vor allem die Ursache nicht maßgeblich bekämpfen kann, stellt der Klimabrunnen daher eine neue Chance dar, den bereits in der Luft befindlichen Schadstoffen in seiner nahen Umgebung entgegenzuwirken und somit die eigene Gesundheit zu schützen.

Dem Klimabrunnen kann schlussendlich – neben der bereits nachgewiesenen, der Behaglichkeit zuträglichen Raumklimatisierung – zumindest teilweise ein weiterer positiver Effekt zugeschrieben werden: die luftreinigende Wirkung.

## 5 Ausblick

Nachdem der Nachweis der luftreinen Wirkung nur für die Luftmessung erbracht werden konnte, die Wassermessung aber keinen klaren Rückschluss zulässt, sollte der Fokus künftiger Untersuchungen hierauf liegen. Denkbar ist beispielsweise, dass ein Nachweis von Feinstäuben über eine Filtration (Membranfiltration) des Wassers und anschließendem Auswiegen erfolgreicher verläuft. Dadurch basiert die Konzentrationsbestimmung nicht auf einer sehr kleinen Wasserprobe, sondern kann für die gesamte Wassermenge exakt bestimmt werden. Trotzdem können auch hier vorherige Verunreinigungen, zum Beispiel durch Ausputzen des Beckens oder Staubrückstände in der Luft aus Vorversuchen, leicht zu starken Messabweichungen führen. Hinsichtlich der Nachweismethode von Feinstaub im Wasser besteht folglich weiterhin Forschungsbedarf.

Zudem erscheint es sinnvoll, die Feinstaubkonzentration zeitgleich an mehreren Stellen im Raum zu bestimmen, um die Feinstaubverteilung besser erfassen zu können. Damit könnte ebenfalls untersucht werden, ob sich die Differenz der am Messpunkt verminderten Staubkonzentration gleichzeitig an einem anderen Punkt im Raum wiederfindet oder tatsächlich der Luft entzogen und somit vom Wasser gebunden wurde.

Darüber hinaus sollten Messungen bei höheren relativen Luftfeuchten erwogen werden, wie sie normalerweise im Sommer vorkommen, da alle Messungen dieser Arbeit im Winter bei einer relativen Raumluftfeuchte von nur 30 Prozent durchgeführt wurden. Infolgedessen wurde die Raumluft durch den Betrieb des Klimabrunnens fast kontinuierlich befeuchtet. Es wird aber eine stärkere luftreinigende Wirkung durch den gegenteiligen Effekt der Entfeuchtung erwartet, wenn zusätzlich Partikel aus der Raumluft durch auskondensierendes Wasser in den Wasserfluss des Klimabrunnens gebracht werden. Daraus resultiert die Annahme, dass der Klimabrunnen im Entfeuchtungsfall in der Lage ist, die Staubkonzentration in seiner unmittelbaren Nähe noch effizienter zu reduzieren – eine Hypothese, die Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten sein könnte.

Generell ist der Gedanke, dass der Klimabrunnen als Nebeneffekt zur Luftreinigung dienen kann, ein sehr span-

nender und zugleich innovativer Ansatz, der es wert scheint, in unterschiedlichen Richtungen weiter verfolgt zu werden.

## Literatur

- [1] Künzel, H. M., Sedlbauer, K.: Raumluftentfeuchtung durch gekühlten Wasserfilm. IBP-Mitteilung 34, Nr. 481, 2007.
- [2] Winkler, M., Antretter, F., Mitterer, C., Künzel, H. M.: Chilled Water Wall. Proceedings 12<sup>th</sup> World Congress (CLIMA 2016), 22.–25. May, 2016, Aarlborg.
- [3] Mitterer, C., Gramm, R.: Cooling and Dehumidifying Indoor Environments using the Chilled Water Wall. Econet Monitor, Beijing, September 2017.
- [4] DIN ISO16000-34: Innenraumluftverunreinigungen – Strategien zur Messung von Schwebstoffen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- [5] Fromme, H., Englert, N., Sagunski, H.: Gesundheitliche Bedeutung von Feinstaub in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, Heft 51, 2008.
- [6] Umweltbundesamt: Luftschadstoffe im Überblick, Abgerufen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick> (Zugriff am 31.7.2018).
- [7] Umweltbundesamt: Feinstaub in Innenräumen, Abgerufen unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/feinstaub-in-innenraeumen> (Zugriff am 31.7.2018).
- [8] Süring, Katrin et al.: PM10 contains particle-bound allergens. Environmental Technology & Innovation, 2016.
- [9] Bergmann, K.-C. et al.: Verteilung von Pollen und Feinstaub in einem städtischen Ballungsraum am Beispiel der Großstadt Berlin. Allergo Journal, 2013.
- [10] Peters, A.: Kurzzeiteffekte von Luftschadstoffen auf die Lungenfunktion und die Symptome von Asthmatikern. GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF-Bericht 10/96, 1996.
- [11] Busch, M.: Mehr Schlaganfälle bei hoher Feinstaubbelastung, CardioVasc, Band 12, Ausgabe 2, 2012.
- [12] DIN EN ISO 7726: Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [13] Schneider, J., Lorbeer, G.: Inhaltsstoffe von PM10 und PM2,5 an zwei Messtationen, Wien. 2002, Abgerufen unter: <http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/BE208.pdf> (Zugriff am 31.7.2018).
- [14] Hamburger Institut für Hygiene und Umwelt, Staatliches Umweltamt Itzehoe: Untersuchung zur Zusammensetzung des Feinstaubes in Hamburg und Schleswig-Holstein, 2008, Abgerufen unter: <http://luft.hamburg.de/contentblob/6606446/0b26edb56226e6a24f42828a06816239/data/bericht-zusammensetzung-des-feinstaubs-2008.pdf> (Zugriff am 31.7.2018).

## Autoren dieses Beitrages:

M.Sc. Mirjam Grimme, mirjam.grimme@ibp.fraunhofer.de  
 M.Sc. Rafael Gramm, rafael.gramm@ibp.fraunhofer.de  
 M.Eng. Christoph Mitterer, christoph.mitterer@ibp.fraunhofer.de  
 Prof. Dr.-Ing. Hartwig Künzel, hartwig.kuenzel@ibp.fraunhofer.de

Alle:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP  
 Abteilung Hygrothermik  
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley  
[www.ibp.fraunhofer.de](http://www.ibp.fraunhofer.de)