

Sachbericht

VKA-Control: Neue Bewertungsmethodik der Hygiene von Verdunstungskühlanlagen im Hinblick auf Legionellen

Reg.-Nr.: 49VF200049

Laufzeit des Projekts vom: 1.1.2021

bis: 30.06.2024

Institut für Umwelt & Energie, Technik & Analytik e. V. (IUTA), Bliersheimer
Straße 58 - 60, 47229 Duisburg

„VKA-Control: Neue Bewertungsmethodik der Hygiene von Verdunstungskühlanlagen im Hinblick auf Legionellen“ wurde im Rahmen des Förderprogramms „FuE-Förderung gemeinnütziger externer Industrieforschungseinrichtungen – Innovationskompetenz“ INNO-KOM Modul „Vorlaufforschung finanziell vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 49VF200049 gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1. Technisch-technologische Zielstellung des Vorhabens

Verdunstungskühlanlagen (VKA) sind bei vielfältigen Industrie- und Serviceeinrichtungen im Einsatz, um dort anfallende und nicht nutzbare Prozesswärme abzuführen. Das Prinzip von diesen Anlagen besteht darin die über ein flüssiges Prozessmedium zugeführte Wärme an die Umgebungsluft abzuleiten. Dazu wird das warme Prozesswasser, auch Kreislauf- oder Kühlwasser genannt, innerhalb der Anlage großflächig verteilt und rieselt über Tropf- oder Rieselkörperschichten in eine Kühlturmtasse am Fuß der Anlage. Durch den Kontakt zu meist im Gegenstrom zugeführter Umgebungsluft kühlt das Prozesswasser dabei ab und kann dem jeweiligen wärmeerzeugenden Prozess erneut zugeführt werden. Während des Kontaktes zur meist kälteren Umgebungsluft kühlt das Prozesswasser ab. Dieser Wärmeaustausch kann indirekt geschehen, indem das Prozesswasser in einem geschlossenen Kreislauf geführt und für den Wärmeaustausch z. B. in luftumströmten Rohrbündeln geführt wird, vgl. Abbildung 1, linker Bildteil. Häufig anzutreffen ist der direkte Wärmeaustausch, bei dem ein unmittelbarer Kontakt zwischen Luft und Prozesswasser vorliegt, vgl. Abbildung 1, rechter Bildteil. Bei diesem als Nasskühlturm oder offener Nasskühler bezeichneten Anlagenart findet zusätzlich die Verdunstung von Teilen des Prozesswassers und damit eine weitere Abkühlung statt, soweit die Umgebungsluft während des Kontaktes nicht wasserdampf-gesättigt vorliegt. Dieser zusätzliche Kühleffekt ermöglicht eine kompaktere Bauform der Anlagen als bei dem indirekten Wärmetausch. Verdunstungskühlanlagen werden oftmals kontinuierlich betreiben.

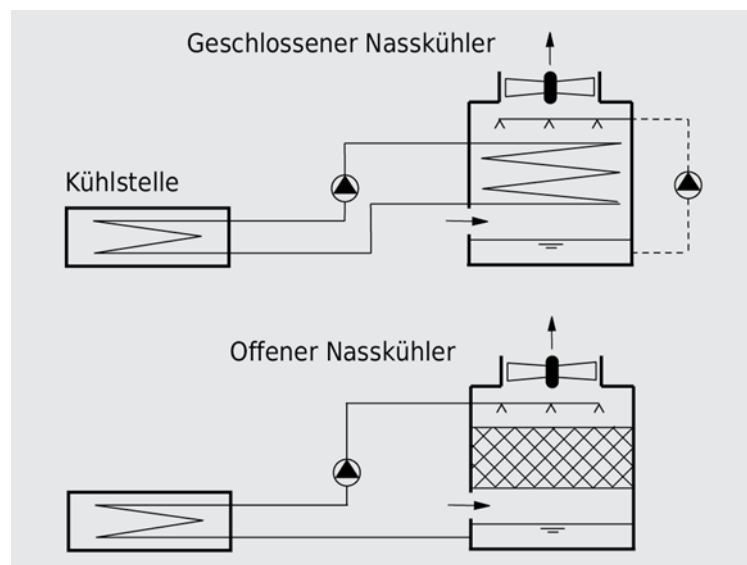


Abbildung 1 Schema von geschlossenem und offenem Nasskühler [1]

Das Prozesswasser wird mit Temperaturen von einigen zehn Grad in die VKA eingespeist und wird durch den Prozess typischerweise um fünf bis zehn Grad abgekühlt. Durch die in der Anlage feuchte Atmosphäre mit gegenüber der Umgebung erhöhten Temperaturen herrschen gute Wachstumsbedingungen für aerobe Mikroorganismen vor. Im umlaufenden Prozesswasser können daher oftmals erhöhte Konzentrationen an Mikroorganismen nachgewiesen. Zusätzlich weisen die dauer-feuchten Wandungen der Anlagen einen Biofilmbewuchs auf. Während in die zugeführte Luft verdunstende Anteile des Prozesswassers eher keine Mikroorganismen aufweisen, können mitgerissene Tröpfchen mit der Fortluft aus der Anlage in die Atmosphäre ausgetragen werden. Kommt es zu einer Inhalation dieses Tröpfchenaerosols durch den Menschen, bevor die Mikroorganismen inaktiviert werden,

können schwere Atemwegserkrankungen die Folge sein. Bei konservativer Abschätzung sind jährlich mindestens 110 Infektionen mit Legionellen auf derartige Ausbruchsgeschehen zurückzuführen [2]. In Deutschland werden derzeit mehr als 10.000 solcher Anlagen betrieben [3]. Andere Schätzungen gehen sogar von 30.000 bis 50.000 Anlagen aus [4]. Zur Gewährleistung eines hygienisch einwandfreien Betriebs und Verhinderung nicht ordnungsgemäßer Betriebszustände ist 2017 die 42. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) in Kraft getreten [5]. Diese soll die Umsetzung von technischen und organisatorischen Maßnahmen bei Errichtung und Betrieb von Verdunstungskühlanlagen, Kühltürmen und Nassabscheidern gewährleisten.

Die darin vorgesehene Überwachungsstrategie basiert vor allem auf der Untersuchung des Umlaufwassers, obwohl die Legionellenkonzentration im Aerosolpfad für eine Infektion entscheidend ist. Derzeit werden weder die Konzentration an Mikroorganismen in Aerosoltropfen noch eine in die Atmosphäre freigesetzte Aerosolfracht kontinuierlich überwacht. Diese Größen stellen aber aus Sicht der Antragssteller das zentrale Maß des Gefährdungspotentials einer jeweiligen Anlage dar. In erster Näherung kann angenommen werden, dass die Konzentration der unmittelbar bei der Wasserverteilung freigesetzten Tropfen (Primärtropfen) der Konzentration der Mikroorganismen im Umlaufwasser der entspricht. Weitere Effekte führen allerdings dazu, dass in der Praxis Abweichungen auftreten können, beispielsweise durch eine Verdünnung aufgrund von Kondensationseffekten oder eine Konzentrationserhöhung durch Wechselwirkungen mit Mikroorganismen aus Biofilmen oberhalb der Verrieselungsebene.

Ziel des Vorhabens ist die Ableitung einer aussagekräftige, funktionale und repräsentativen Probenahmestrategie für Aerosolprobenahme an Verdunstungskühlanlagen, um deren Gefährdungspotential hinsichtlich einer Freisetzung von pathogenen Keimen mit der Fortluft abzuleiten. Diese dient der systematischen Untersuchung des differenzierten Gefahrenpotentials unterschiedlicher Bautypen von Verdunstungskühlanlagen in Hinblick auf deren tatsächliche Aerosolfreisetzung. Die Untersuchungsstrategie soll als Grundlage weitergehender Untersuchungen im Falle des Ausbruchsmanagements herangezogen werden können. Gegenüber der gemäß 42. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz aktuell praktizierten Untersuchung des Umlaufwassers soll damit der für Atemwegsinfektionen relevante Transmissionspfad der Luftpfadmissionen realitätsnaher abgebildet werden, indem auch die Emission sämtlicher bei derartigen Anlagen auftretenden Tropfenarten berücksichtigt werden. Neben den Primärtropfen als mitgerissenes Umlaufwasser sind hier insbesondere Sekundärtropfen zu nennen, die durch Wechselwirkungen der Fortluft mit solchen Anlagenteilen entstehen, die potentiell mit Biofilmen überzogen sind und nicht unmittelbar dem Umlaufwasserkreislauf zuzuordnen sind. Eine praxisorientierte Probenahme orientiert sich an den aktuell gültigen technischen Richtlinien zu Partikel- und Aerosolprobenahme. Dabei sind insbesondere die besonderen Begebenheiten an der Kühlturmmündung zu berücksichtigen, welche deutlich von denjenigen an „klassischen“ geführten Quellen wie beispielsweise Abgaskaminen abweichen, für deren Beprobung die derzeit vorliegenden Richtlinien ursprünglich abgeleitet worden sind bzw. in die Flächenquellen für eine Probenahme oftmals überführt werden. Eine repräsentative Probenahme stellt einen wesentlichen Schritt zur Charakterisierung des Anlagen-Emissionspotentials und Umsetzung von Emissionsminderungsmaßnahmen seitens der Anlagenbetreiber und -anbieter dar, um einen hygienischen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Der Hygieniezustand der Anlagen soll dabei mittels geeigneter Kennzahlen beschrieben werden. Diese

Kennzahlen sollen aerosolspezifische sowie technologische Parameter berücksichtigen. Dadurch sollen Emissionsvermeidungs- oder Minderungsmaßnahmen anlagenspezifisch abgeleitet werden können. Das Vorhaben fokussiert auf zwangsbelüftete Zellenkühltürme und kompakte Rückkühlanlagen, da diese Anlagentypen in vielfältigen Industrie- und Wirtschaftssektoren in hoher Zahl zum Einsatz kommen und ihnen ein hohes Potential in Bezug auf die Legionellenfreisetzung zugesprochen wird.

Die Erkenntnisse des Projektes sollen Gutachter, Hygieniker und Betreiber bei der Umsetzung anlagenbezogener Hygienemaßnahmen unterstützen sowie Grundlagen für eine ggf. automatisierte Überwachung zu schaffen. Weiterhin sollen die gewonnenen Informationen bei der Umsetzung konstruktiver Anpassungen der Anlagentechnik zur Gewährleistung einer verbesserten dauerhaften Anlagenhygiene unterstützen, um die Gefahr einer Legionellenepidemie weiter zu senken.

2. Darstellung der erzielten Vorhabenergebnisse

Arbeitspaket 1: Typisierung von Verdunstungskühlanlagen

Da sich verschiedenen Bauformen von Verdunstungskühlanlagen bereits konstruktionsbedingt in ihrem Emissionsverhalten unterscheiden, wurde im Rahmen von Betreiber- und Anbieteranfragen sowie Gesprächen mit Gutachtern Informationen abgefragt, um eine Typisierung von Anlagen vornehmen zu können. In diesem Rahmen fand auch ein erstes Onlinemeeting am 03. März 2021 mit 13 externen Unternehmensvertretern und einem Sachverständigen statt, in dem das Vorhaben und seine Entwicklungsziele vorgestellt wurden. Mit verschiedenen Betreibern konnten Vor-Ort-Termine vereinbart werden, um die Vielfalt der konstruktiven Lösungen aufnehmen und dokumentieren zu können, soweit diese in Bezug auf die Beeinflussung einer standardisierten Probenahme relevant erscheinen. Insgesamt wurden in der Projektlaufzeit 17 verschiedene Anlagen besichtigt und Anlagen- und Daten anhand eines zuvor ausgearbeiteten Formblattes standardisiert vor Ort erfasst. Die dabei angefertigte Fotodokumentation hilft bei der Typisierung von Anlagentechnik sowie Probenahmebedingungen (Aufnahmen stationär sowie teils als Luftaufnahme mittels Kameradrohne). Diese Angaben helfen ebenfalls bei den späteren Messkampagnen, Punkten im Anlagenumfeld zur ungestörten Beprobung der Umgebungsluft festzulegen.

Nahezu alle Vor-Ort-Termine konnten bereits dazu genutzt werden, erste orientierende bzw. qualitative Messdaten zum 3D-Strömungsprofil aufzunehmen (vgl. Ausführungen zu AP 3). Bei einigen Begehungen ließen sich bereits erste Messungen zum Tropfenspektrum durchführen.

Die anlagenbezogenen Daten wurden für die weitere Auswertung in einer tabellarischen Übersichtsdatei zusammengefasst. Die Zusammenstellung umfasst neben Angaben zur Anlagenkapazität sowie technischen und geometrischen Kenndaten auch arbeitstechnische Hinweise im Zusammenhang mit einer Aerosolprobenahme an der Auslassfläche, z. B. bestehenden Zugangsmöglichkeiten, Größe und Charakter der Arbeits- bzw. Traversierfläche sowie Verfügbarkeit von Hilfsmitteln wie Elektrizität auf der Arbeitsebene. Zusätzlich sind Hinweise zu weiteren Bioaerosol-Quellen in der Umgebung aufgenommen. Die Daten stellen die Grundlage der im Rahmen der Auswertung angefertigten Datenbank dar, vgl. die Ergebnisse von AP 8.

Die Auswertung erfolgte insbesondere in Bezug auf die Möglichkeiten der repräsentativen Probenahme sowie ihrer praktischen Durchführung, vgl. AP 5 und AP 6.

Demnach stellt die saugseitige oder druckseitige Anordnung des Ventilators eine zentrale Einflussgröße der Strömungsbildung im messtechnisch bedeutsamen Austrittsquerschnitt dar. Während drückend betriebene Anlagen eher homogene Strömungsprofile aufweisen, zeigt sich bei saugend betriebenen Anlagen i. d. R. ein deutlich inhomogenes ausgeprägtes Strömungsprofil über den Austrittsquerschnitt. Eine Unterteilung der Anlagen mit saugend angeordnetem Ventilator in die zwei Untergruppen „Zellenkühlturm“ und „Serienkühlturm“ hat sich als bedingt sinnvoll erwiesen, da diese zwei Unterarten sich zwar in ihrem Leistungsspektrum, aber nicht grundsätzlich in ihrer Zugänglichkeit unterscheiden. Während Zellenkühltürme vor Ort gefertigt werden, werden Serienkühltürme komplett oder in Teilen an den Einsatzort geliefert und dort aufgestellt. Sie werden in einem Leistungsspektrum von eher kleinen Geräten mit einem Wasserdurchsatz von einstelligen Kubikmeterzahlen je Stunde bis hin zu mittleren Kühlleistungen mit einer fünfstelligen Kubikmeterzahl an Wasserdurchsatz je Stunde angeboten.

Sowohl bei Zellen- als auch bei Serienkühltürmen liegt oftmals eine begehbare Ebene auf dem eigentlichen Baukörper vor, auf der die Diffusoren mit den mit vertikaler Achsorientierung eingesetzten Ventilatoren aufgesetzt werden. Diese Ebene kann als Arbeitsebene der Probenahme fungieren, wobei zum Erreichen der Diffusoroberkante ggf. zusätzlich die Verwendung von Standleitern zur Probenahme erforderlich ist, vgl. Abbildung 2.

Als ein weiterer, die Probenahme und die Zugänglichkeit der Auslassebene beeinflussender Effekt konnte die in Einzelfällen vorhandenen Abluft-Schalldämpferkulissen oberhalb des Ventilators und Diffusors bei saugend bzw. oberhalb des Tropfenabscheiders bei drückend betriebenen Anlagen festgestellt werden.

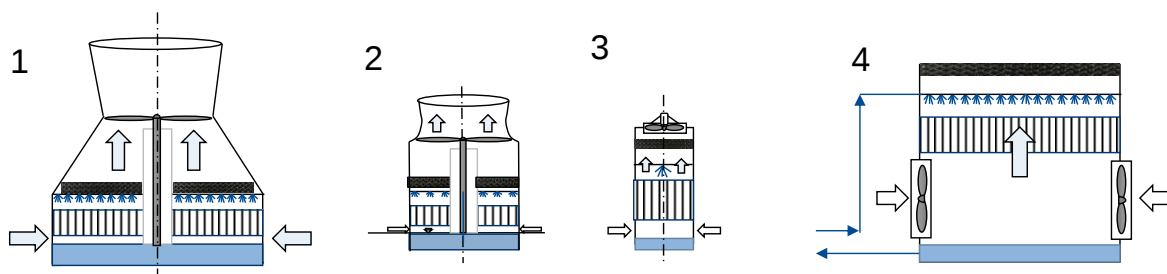


Abbildung 2 Bauformen von Verdunstungskühlanlagen

Als weiterer Anlagentyp seien beispielhaft Anlagen mit saugend angeordnetem Ventilator genannt, bei denen die Baukörperabmessungen im Bereich der Rieselkörper und Wasserverteilungsebene kleiner als im Bereich der Kühlturmtasse sind, und die entsprechend über Gitterrostabdeckungen in diesem Bereich verfügen. Bei eingeschaltetem Ventilator kann eine Ansaugung von Luft durch diese Öffnung als wahrscheinlich angenommen werden. Je nach Bedarf werden solche Anlagen allerdings auch im Naturzug betrieben, daher wurden auch an einer solchen Anlage orientierende Messungen durchgeführt, um die Möglichkeit der Aerosolfreisetzung aus diesem Bereich zu prüfen.

Für saugend betriebene Verdunstungskühlanlagen wurde ein umfassender Überblick über Varianten und emissionsbeeinflussende Faktoren gewonnen, insgesamt wurden 13 Anlagen besichtigt. Für drückend betriebene Verdunstungskühlanlagen liegen hingegen weniger Praxisdaten vor, es wurden

insgesamt vier drückende Anlagen besichtigt und eine beprobt da weniger Vor-Ort-Termine durchgeführt werden konnten.

Im Verlaufe der Untersuchungen konnten weitere Bauformen von Verdunstungskühlanlagen identifiziert werden, bei denen Fortluft nicht nur an der Haupt-Auslassfläche austritt, sondern aufgrund ihrer speziellen Konstruktion weitere, teils größerflächige Öffnungen oberhalb der Rieselebene vorhanden sind, aus denen Fortluft ebenfalls austreten kann. Ein Beispiel ist im rechten Bildteil von Abbildung 9 dargestellt. Hier tritt ebenfalls Fortluft aus, allerdings über eine kleinere Fläche und mit geringerer Geschwindigkeit als über die Hauptausslassfläche. Das Emissionsverhalten dieser Anlagen lässt sich ggf. nicht allein durch die Beprobung der Haupt-Auslassöffnung der Anlage charakterisieren.

Arbeitspaket 2: Auslegung einer modifizierten S-Pitot-Sonde

Bei der Charakterisierung des Strömungsprofils liegt das Ziel darin, die Fortluftgeschwindigkeit und Strömungsrichtungen im Austrittsquerschnitt zu bestimmen. Bei Anlagen mit saugend betriebenen Ventilator ist es typisch, dass keine reine vertikale Strömungsrichtung vorherrscht, sondern eine Drallströmung auftritt, die aus der tangentialen Strömungskomponente resultiert, die durch den Ventilator induziert wird, sowie der vertikalen Strömung durch die Anlage. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit ist notwendig, um eine isokinetische/isoaxiale Probenahme sicherzustellen und zur Berechnung der Fracht und Tropfenmassendichte in Verbindung mit der Tropfenmessung.

Da die Messebene sich in Nähe einer Auslassöffnung zur Atmosphäre befindet und bei der häufig anzutreffenden Bauform der saugend betriebenen Anlagen zusätzlich eine Drallströmung in Auslassnähe aufgeprägt wird, sind die in einschlägigen Normen und Richtlinien standardisierten Empfehlungen zur Geschwindigkeitsmessung in Abgaskanälen nur bedingt anwendbar, vgl. Abbildung 3.

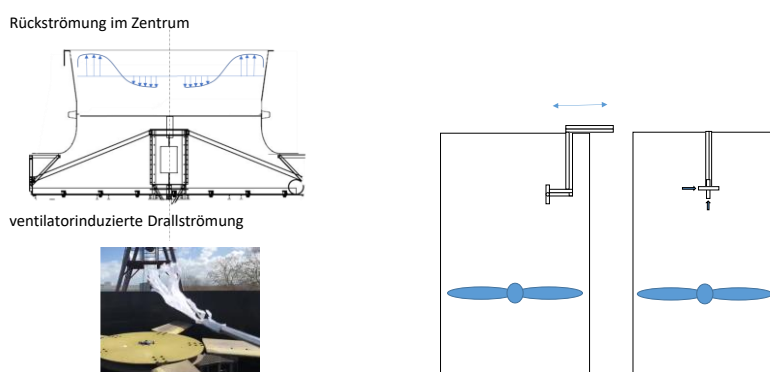


Abbildung 3 *Strömungscharakterisierung bei saugend betriebenen Verdunstungskühlanlagen und Anwendung der messtechnischen Entwicklung „X-Pitot-Sonde“ (gekröpfte Konstruktion, gleichzeitige Signalerfassung für mehrere orthogonal zueinanderstehende Strömungsrichtungen) in der Messebene der Bioaerosol-Sammlung*

Um reproduzierbare Daten zum Geschwindigkeitsprofil zu erhalten erfolgte die Auslegung, Konstruktion und messtechnische Überprüfung einer unter den anzutreffenden Strömungsbedingungen universell einsetzbaren Strömungsmesssonde im Rahmen vom AP 2. Diese Konstruktion stellt ein modifiziertes S-Pitot-Staurohr zur gleichzeitigen Erfassung des Strömungsdrucks in zwei orthogonal zueinanderstehende Raumrichtungen dar, vgl. Abbildung 3. Mithilfe weiterer Messgrößen wie

beispielsweise dem statischen Druck, der Gastemperatur sowie der relativen Feuchtigkeit lässt sich daraus richtungsabhängig die Gasgeschwindigkeit und damit die Richtung und Geschwindigkeit der vorherrschenden Strömung berechnen. Das konstruktiv modifizierte S-Pitot-Staurohr wird intern auch als „X-Pitot-Sonde“ oder „Kreuz-Pitot-Sonde“ bezeichnet. Zusätzlich berücksichtigt die Konstruktion durch eine geeignete Kröpfung, dass die Erfassung der Strömungskenngrößen unterhalb der Ebene erfolgt, in der die Sonde von außen zugeführt wird. Somit können die Verhältnisse unmittelbar in der Messebene der späteren Bioaerosolmessung abgebildet werden, ein Einfluss der vorherrschenden Windgeschwindigkeit wird zudem erfolgreich verhindert.

Die Konstruktion erfolgte in enger Kooperation mit dem langjährigen Hersteller für staub- und strömungstechnische Messgeräte, Paul Gothe GmbH, Bochum. Dort erfolgte ausgehend von den eingereichten IUTA-Konstruktionsskizzen die fertigungstechnische Optimierung und anschließende Anfertigung eines aus Edelstahl gefertigten Prototypen im Unterauftrag. Abbildung 4 zeigt den Prototyp der Messsonde. Die ebenfalls dargestellte Geräteperipherie umfasst Signalaufnehmer und -umformer für vier Drucksignale, ein Handgerät zur Datenaufzeichnung und -visualisierung sowie Verbindungsschläuche in zur leichteren Handhabung im Feld in farbcodierter Ausführung.

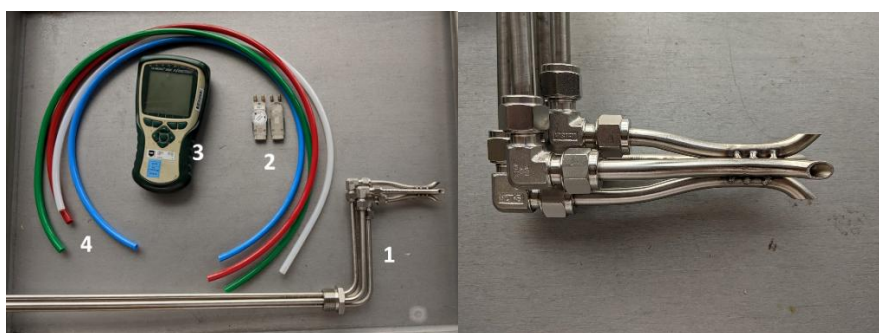


Abbildung 4 Konstruktive Ausführung „X-Pitot-Sonde“

Links: 1: Gekröpfte vierkanalige Druckmesssonde (X-Pitot-Sonde). 2: Zwei 2-Kanal-Druck-Messumformer 3: Handgerät zur Messwertvisualisierung und Datenaufzeichnung. 4: Farbcodierte Druck-Transmissionsschläuche zur Verbindung der vier Kanäle an Sonde und Messumformer. Rechts: Kreuzförmig angeordnete Druckmess-Öffnungen der Sonde

Ein zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit erforderliche gerätespezifischer Korrekturfaktor wurde anhand von Vergleichsmessungen mit einem zertifizierten Drucksensor bei der Fa. Paul Gothe sowie ebenfalls bei IUTA bestimmt.

Weitere Anwendungsprüfungen erfolgten wie vorgesehen anhand eines umfangreichen Versuchsplans an verschiedenen Versuchseinrichtungen im IUTA-Technikum. Diese Untersuchungen hatten zum einen zum Ziel, die Querempfindlichkeit in Bezug auf eine erwartete (Wasser-)Tropfenbeaufschlagung zu untersuchen und Bewertung der Messcharakteristik in Bezug auf andere Strömungsmessgeräte zu bewerten, zum anderen die neuen Möglichkeiten der Strömungsrichtungsbestimmung im Raum anhand der gewonnenen Messdaten zu untersuchen und die praktische Handhabung zur Vorbereitung von Feldmessungen zu testen. Die angestrebten Zielgrößen konnten erreicht werden:

- Der gerätespezifische Korrekturfaktor wurde messtechnisch bestimmt
- Die Beaufschlagung mit einem Tropfenaerosol in einem Gaswäscher führte nicht zu einer Verstopfung der Sondenöffnungen der X-Pitot-Sonde, wie sie bei Prandtl-Staudruckrohren

häufig der Fall ist.

- Aus den mittels X-Pitot-Sonde aufgenommen Druckmesswerten für zwei senkrecht zueinanderstehenden Richtungen lässt sich die vorherrschende Strömungsrichtung und Gasgeschwindigkeit auch dann trigonometrisch mit ausreichender Genauigkeit berechnen, wenn die Richtung der Messsonden-Öffnungen in maximalem Winkel von der Strömungsrichtung abweichen (45°).
- Erfolgt die Bestimmung einer definierten Strömungsgeschwindigkeit unter Praxisbedingungen, liefern bei gleicher Ausrichtung im Strömungskanal beiden Messkanäle der X-Pitot-Sonde vergleichbare Werte. Diese Ergebnisse decken sich mit den Angaben der Prüfbescheinigung der Fa. Paul Gothe GmbH, für die Sonde, wonach für beide Messrichtungen derselbe gerätespezifische Korrekturfaktor bei der Geschwindigkeitsermittlung zur Anwendung kommt.

Mit Abschluss des Arbeitspaketes liegt eine validierte Messsonde zur problemangepassten messtechnischen Charakterisierung auch komplexer Strömungsverhältnisse an Verdunstungskühlanlagen vor.

Arbeitspaket 3: Untersuchung des 3D-Strömungsprofils

Es wurden zahlreiche, umfangreiche Messungen an Realanlagen durchgeführt, wobei bis zu 60 Messpunkte je Querschnitt vermessen wurden. Unter anderem wurde die gleiche Anlage an verschiedenen Messtagen, aber auch bei verschiedenen Ventilatorstufen Daten zur Strömungsverteilung erhoben. Dies ermöglichte die Bewertung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und die Charakterisierung der Geschwindigkeitsverteilung.

Die Anzahl und Position der Messpunkte einer Netzmessung im Messquerschnitt werden basierend auf dem Durchmesser der Auslassöffnung festgelegt. Die Geschwindigkeitsmessung wird so durchgeführt, dass die Messpunkte einer Messachse nacheinander für jeweils 30 Sekunden angefahren werden, beginnend beim wandungsnahen bis zum innersten Punkt. Anschließend erfolgt für jeden Messpunkt von innen nach außen eine weitere Wiederholungsmessung. Die Differenzdruckwerte werden dabei mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde aufgezeichnet und im Anschluss an die Messung zu einem Mittelwert aggregiert. Aus diesen vertikal und tangential zur Ventilatorachse verlaufenden gemessenen Geschwindigkeitskomponenten lassen sich die resultierende Geschwindigkeit und der Strömungswinkel als Vektoraddition berechnet. Schwankungen der lokalen Strömungsgeschwindigkeit durch die Rotorbewegung direkt unterhalb der Messebene werden bei dieser Darstellung nicht wiedergegeben, da es sich um die 30 s Mittelwerte der Sekundenwerte handelt.

In nachfolgender Abbildung 5 sind beispielhaft ein Messergebnis für das Strömungsprofil an einer Anlage mit saugendem Ventilator dargestellt. Die Messachsen sind im 90° -Winkel zueinander orientiert. Die Fehlerbalken geben jeweils die Standardabweichung der zwei Wiederholungsmessungen je Messpunkt an. Die Geschwindigkeiten im äußeren Bereich der Austrittsfläche sind jeweils deutlich höher als weiter in das Zentrum hinein. Im Zentrum selbst herrschen in der Regel negative Geschwindigkeiten vor, entsprechend einer Rückströmung in die Anlage hinein.

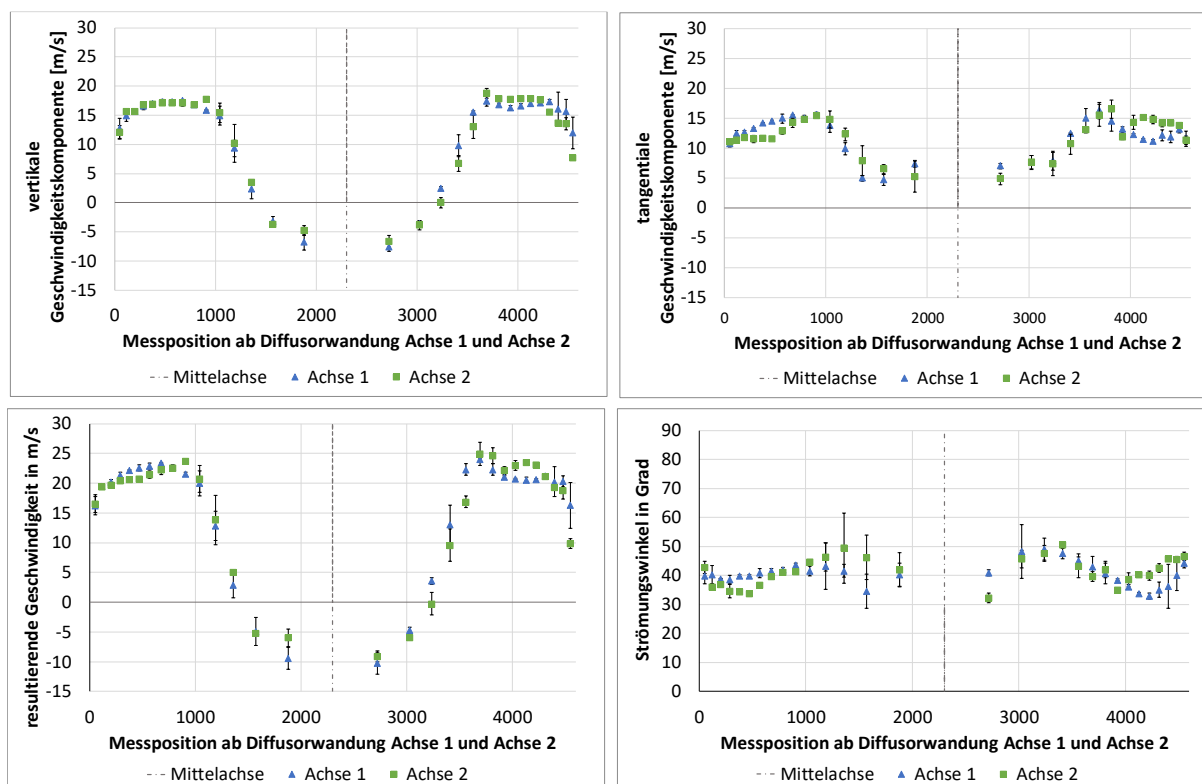


Abbildung 5 Strömungsprofil am Auslass einer Verdunstungskühlanlage mit saugendem Ventilator.
Dargestellt sind gemessene vertikal und tangential zur Rotorachse Strömungskomponenten sowie die daraus durch Vektoraddition bestimmte resultierende Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit

Die Austrittsgeschwindigkeit der Fortluft und damit das lokale Strömungsprofil stellt eine wesentliche Größe der Emissions-Frachtschätzung dar. Die messtechnische Erfassung des Strömungsprofils stellt damit ein wesentliches Element der jeweiligen anlagenbezogenen Feldmessung dar, vgl. AP 5 und AP 7. Aus lokal ermittelten bzw. gemittelten Austrittsgeschwindigkeit der Fortluft und der jeweiligen Querschnittsfläche der Auslassöffnung lässt sich der jeweilig austretende Fortluft-Volumenstrom berechnen. Dieser bestimmt in Verbindung mit der Tropfenfracht der Fortluft und dem Gehalt an Mikroorganismen die austretende Bioaerosolfracht, vgl. die nachfolgenden Ausführungen zu AP 8. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt durch den Einsatz der X-Pitot-Sonde simultan in zwei Raumrichtungen, vgl. die Ausführungen zum AP 2.

Im Rahmen von Messkampagnen erfolgte die Aufnahme der Strömungsprofile an 60 Messpunkten je Messquerschnitt. Soweit im Rahmen der teils mehrtägigen Kampagnen die Bioaerosolprobenahme selbst an einem anderen Messtag stattfand, wurden an diesem zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit im Messquerschnitt an 20 Messpunkten ermittelt, um eventuelle Abweichungen identifizieren zu können. Aufgrund des Zeitaufwandes und der bestehenden Termine für den Probentransport in das Labor war es meist nicht möglich, hier jeweils alle 60 Messpunkte zu vermessen.

An einer ausgewählten Anlage wurde zusätzlich das Strömungsprofil bei zwei verschiedenen Ventilator Drehzahlen aufgenommen. Die erhaltenen Geschwindigkeitsverläufe sind sehr ähnlich, der wesentliche Unterschied besteht erwartungsgemäß in der Höhe der Messwerte. Es zeigte sich über die

jeweilige Messachse keine deutlich voneinander abweichenden Profile der Geschwindigkeitsverteilung. Abbildung 6 gibt die Ergebnisse dieser beiden Messungen wieder. Es ist jeweils die resultierende Geschwindigkeit über der Position auf der Messachse dargestellt, gemittelt aus zwei Werten je Messpunkt. Die Position auf der Messachse wird ausgehend von einem Punkt an der Diffusorwandung fortlaufend in Millimetern angegeben. Die gestrichelte Linie zeigt die Mittelachse der Verdunstungskühlanlage, entsprechend auch der Position der Rotorachse. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Mittelwerte je Messpunkt an. Die (Mess-)Achsen 1 und 2 stehen dabei im 90°-Winkel zueinander.

Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten werden ebenfalls eher im wandungsnahen Bereich gemessen. Die Winkel der Hauptströmungsrichtung zur Vertikalen sind im äußeren Bereich ebenfalls geringer. Es zeigt sich, dass die Werte im wandungsnahen Bereich geringere Standardabweichungen aufweisen als im Zentrum des Auslassquerschnitts. Diese Tatsachen sprechen dafür, eine Probenahme bevorzugt in diesem Bereich durchzuführen. Probenahmen sind auch aus technischen Gründen im wandungsnahen Bereich besser umsetzbar, da die Handhabung sehr langer Messlanzen ohne zwischenliegende Punkte, an denen ihre Last abgefangen werden kann, erschwert ist. Der Punkt der mittleren Geschwindigkeit liegt i. d. R. etwas weiter im Zentrum. In diesem Bereich herrschen gemäß der aufgezeichneten Werte teilweise sehr hohe Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit vor. Soll die Anzahl der Bioaerosolmessungen je Querschnitt begrenzt werden, wird im Sinne einer Worst-Case-Abschätzung eine Messung am Punkt der höchsten resultierenden Geschwindigkeit vorgeschlagen. Aufgrund verschiedener Faktoren wie Wandungsnähe und Geschwindigkeit kann für diesen Messpunkt angenommen werden, dass Sekundärtropfenemissionen bei einer Probenahme mit erfasst werden.

Diese Ergebnisse gelten für die Mehrzahl der untersuchten Anlagen mit saugendem Ventilator. Sie sind unabhängig von Betriebspunkt und Luftvolumendurchsatz.

Insgesamt konnte eine sehr große Datenmenge aufgenommen werden. Diese Daten sind insbesondere in Hinblick auf die Auswahl des idealen Probenahmepunktes wertvoll.

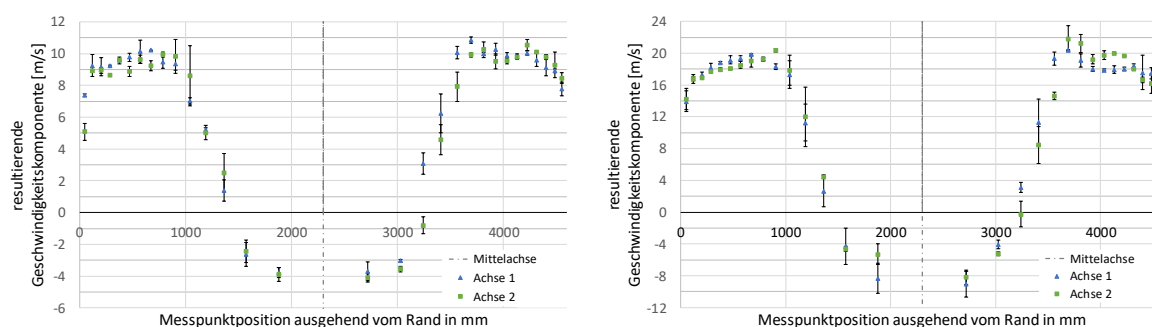


Abbildung 6 Geschwindigkeitsprofil am Auslass einer VKA, links: bei niedriger Ventilatordrehzahl; rechts: bei hoher Ventilatordrehzahl

Arbeitspaket 4: Schaffung geeigneter Voraussetzungen für eine weitgehend verlustfreie Probenahme

Bei der angestrebten isoaxialen Probenahme mit dem Zyklonsammler aus einer eher vertikal gerichteten Gasströmung weist die Einlassöffnung der Probenahmeeinrichtung nach unten und ist der erste Abschnitt der die Probenahmestrecke vertikal ausgerichtet. Hier können Sammelverluste

ausgehend von bereits bei der Probenahme erfasster Tropfenaerosole auftreten, wenn diese durch Trägheitseffekte bei Umlenkung in der Probenahmestrecke vor Erreichen des Zyklonsammlers an Innenwandungen der Sammeleinrichtung abgeschieden werden und in Richtung der Probenahmeöffnung ablaufen. Um diese Fraktion zu erfassen und dem Probenmaterial vor Analyse zuschlagen zu können, wurden für einen Tropfenfang Konstruktionsunterlagen für das *Rapid Prototyping* erstellt und das Bauteil im 3D-Druck-Verfahren hergestellt. Die Auswahl des dazu verwendeten Kunststoffs erfolgte dahingehend, dass eine Desinfektion des Bauteils möglich ist und bei direktem Kontakt zu Oberflächen keine grundsätzlich schädigende Wirkung auf Mikroorganismen bekannt sind.

Diese Konstruktion wurde anhand von Labormessungen im Hinblick auf eine effiziente Tropfensammlung weiter optimiert. Optimiert werden musste insbesondere die Abmessungen des angesetzten Rohrabchnitts, über den der Flüssigkeitsablauf erfolgt. Hier zeigte sich ein großer Einfluss der Oberflächenspannung der verwendeten Flüssigkeit Wasser. Die Auswertung der durchgeführten Laboruntersuchungen zur physikalischen Fluid-Sammeleffizienz zeigten für die aktuelle Version des Tropfenfangs (siehe Abbildung 7), dass die Sammeleffizienz von gasgetragenen Flüssigkeitstropfen durch den Einsatz des Bauteils verbessert werden konnte.

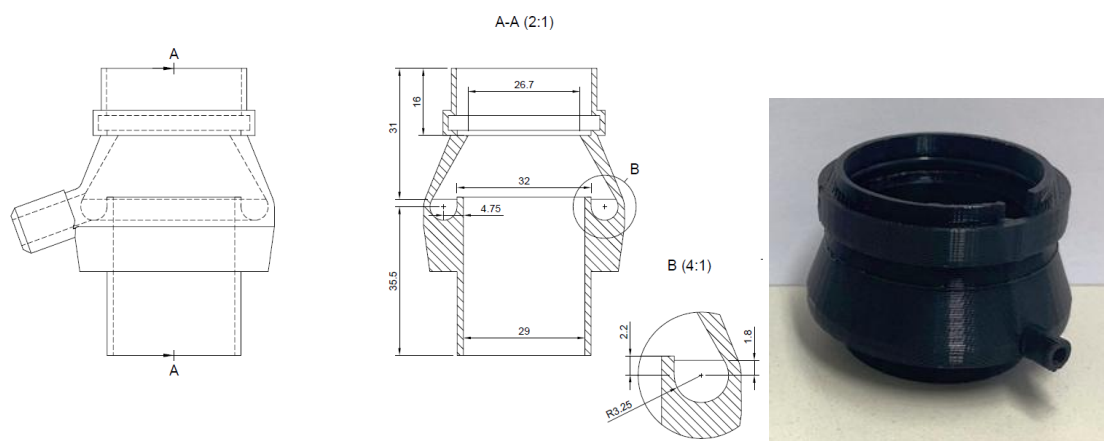


Abbildung 7 Optimierter Tropfenfang. Links: Konstruktionszeichnungen. Rechts: Foto des im 3D-Druck hergestellten Bauteils

Im Anschluss an die Bestimmung der physikalischen Sammeleffizienz erfolgten Untersuchungen zur biologischen Sammeleffizienz und die Erprobung der Tropfenfangeinrichtung im Feldeinsatz. Dazu wurde an zwei Anlagen an insgesamt neun verschiedenen Messpunkten eine Aerosolprobenahme mit und ohne Tropfenfang durchgeführt und die mit dem Gerät bei der jeweiligen Probenahme erfasste Gesamt-KBE-Zahl ermittelt.

In diesem Zusammenhang war eine geeignete Spülstrategie zu entwickeln, um während der Probenahme in der Sammeleinrichtung abgeschiedenes Material möglichst verlustfrei der Probe zuschlagen zu können. Als zielführend hat sich ein Spülvorgang der Innenwandungen des Probenahmesystems erwiesen, wobei ca. 10 - 20 ml Ringerlösung in die Probenahmeverrichtung eingefüllt werden und diese für ca. dreißig Sekunden bis eine Minute ausgeschwenkt wird. Die Spülflüssigkeit wurde gemeinsam mit den eigentlichen gesammelten Proben ins Labor gegeben ebenfalls auf enthaltene Mikrobiologie untersucht. Um im Feld die Probenahmeeinrichtung mit eingefüllter Spülflüssigkeit relativ problemlos ausschwenken zu können, wurden die jeweiligen

Probenahmedüsen mit passenden Stopfen verschlossen. Nach dem Schwenken wird der Stopfen entfernt und die Flüssigkeit in einem sterilen Zentrifugenröhrchen aufgefangen. Die Stopfen werden vor einer Wiederverwendung mit Alkohol gereinigt. Bei Einsatz der Rinne wurde die aus der Rinne gelaufene Flüssigkeit in einem daran befestigten Schlauch vorab aufgefangen und mit der Spülprobe zusammengeführt.

Um Verschleppung in die nächste Probe zu vermeiden, wird in einem nachfolgenden Schritt mit einer größeren Menge Ringerlösung gründlich nachgespült. Diese wird nach dem Spülvorgang verworfen.

Laboruntersuchungen zeigten, dass der Tropfenfang die erfasste physikalische Tropfenmenge signifikant erhöht. Im Feld brachte der Tropfenfang jedoch keinen nachweisbaren Vorteil gegenüber der einfacheren Probenahme ohne Tropfenfang. Weitere Optimierungen im Probenahmeprozess reduzierten Verschleppungsverluste und erleichterten die Arbeit, wie der Einsatz reinigbarer Verschlussstopfen. Es ließ sich bei Einsatz des zusätzlichen Tropfenfangs nicht wie erwartet eine signifikant höhere KBE-Zahl nachweisen als ohne Tropfenfang, vgl. Abbildung 8. Insbesondere ist auffällig, dass in den Spülproben bei Einsatz des Tropfenfangs jeweils weniger Mikrobiologie gefunden wurde als ohne Tropfenfang.

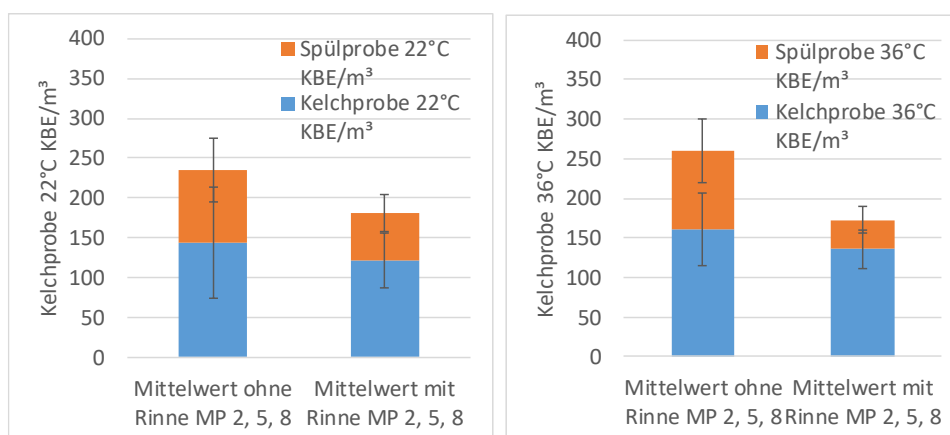


Abbildung 8 Umfang der erfassten Keimzahl bei der emissionseitigen Bioaerosolsammlung mittels modifiziertem Zyklonsammler mit und ohne Tropfenfang (jeweils $n = 6$); links: Gesamtkeimzahl 22°C KBE/m³; Mitte: Gesamtkeimzahl 36°C KBE/m³

Arbeitspaket 5: Messungen zur Entwicklung einer repräsentativen Probenahmestrategie (AP 5)

Es wurden Feldmessungen an insgesamt 18 Tagen an vier verschiedenen Anlagen durchgeführt, wobei an 15 Tagen Aerosolproben entnommen wurden. Die verbleibenden drei Messungen wurden zur Charakterisierung des Strömungsprofils und Erfassung des Tropfenaustrags genutzt, vgl. den Textabschnitt zu Arbeitspaket 3.

Untersuchungsgegenstand war unter anderem die technische Konfiguration des zur Probenahme verwendeten Zyklonsammlers einschließlich Peripherie. Diese umfasste vergleichende Untersuchungen der Immissions- und Emissionsausführung des Probenahmesystems sowie Emissionsausführungen mit und ohne Auffangrinne (vgl. AP 4). Weiterhin wurden Parameterstudien durchgeführt, in denen die Probenahmedauer und der Sammlerdurchsatz variiert wurde.

An einer Anlage wurde die Zuluft über die Haupt-Ansaugöffnungen zusätzlich durch ein umlaufendes horizontales Gitter auf halber Bauhöhe angesaugt, vgl. Abbildung 9, rechts. Bei ausgeschaltetem

Ventilator wurde dort sichtbar Aerosol freigesetzt. An dieser Stelle wurden ebenfalls eine Aerosolprobenahme und eine Tropfenmessung durchgeführt.

Untersuchungen zum Probenahmepunkt im Querschnitt umfassten Netzmessungen an fünf Punkten einer Halbachse sowie an je einem Punkt auf acht Halbachsen, die im 45°-Winkel zueinander positioniert waren.

Bei allen Messungen wurden begleitend Hintergrundproben, Feldblindwertproben und Wasserproben entnommen.

Es wurden Messprotokollvorlagen und Checklisten zur Vorbereitung, Durchführung und Nachbereitung erstellt.



Abbildung 9 links, Mitte: Probenahmeeinrichtung am Auslass einer VKA, rechts: oberhalb eines Lufteinlassgitters

Es wurden 15 Probenahmekampagnen durchgeführt, bei denen verschiedene Probenahmekonfigurationen getestet wurden. Die gesammelten Daten wurden vergleichend ausgewertet.

Die **Probenahme** umfasst die Entnahme einer Umlaufwasserprobe gemäß den Vorgaben der 42. BImSchV. Zusätzlich wird die Hintergrundaerosolkonzentration gemessen, und die Aerosolkonzentration am Emissionsort wird an einem oder mehreren Punkten am Auslass ermittelt.

Für die Aerosolprobenahme kommt ein Nasszyklonabscheider zu Einsatz (Coriolis Micro, Fa. Bertin Technologies SAS, Montigny le Bretonneux, Frankreich), der standardmäßig zur Immissionsüberwachung dient, hier aber speziell für Emissionsmessungen modifiziert wurde. Zentrales Bauelement des Sammlers stellt ein Zyklon dar, in den über eine horizontal ausgerichtete Ansaugöffnung ein Aerosolstrom eintritt. Der Gasstrom wird über eine nachgeschaltete Pumpe erzeugt und über ein Tauchrohr aus dem Zyklon abgesaugt. Mit der mitgelieferten intergrierten Pumpe und Steuereinheit kann ein Probenvolumenstrom zwischen 100 und 300 L/min gewährleistet werden. Durch die im Zyklon vorherrschende Zentrifugalkraft werden Partikel oder Tropfen, die eine ausreichender Trägheit aufweisen, aus dem angesaugten Aerosol abgeschieden und in einem unterhalb des Zyklons angebrachten kelchförmigen, mit Flüssigkeit gefüllten Sammelgefäß aufgefangen. Die Sammelflüssigkeit bildet bei eingeschalteter Absaugpumpe einen Vortex aus, der sich als rotierender Flüssigkeitsfilm an der Kelchwandung bis zum Zyklon hinaufzieht und in welchen die abgeschiedenen Partikel und Tropfen überführt werden sollen. Nach der Probenahme wird das Sammelgefäß luftdicht verschlossen und gekühlt zur Analyse ins Labor gebracht. Die Verwendung von Ringerlösung als Sammelmedium hat sich bewährt.

Bei Feldmessungen und den Laboruntersuchungen war die Förderung des Probengasstroms durch Schlauchleitungen über z. T. einige Meter erforderlich, insbesondere um bei einer Probenahme an 49VF200049 Schlussnachweis-Sachbericht VKAControl für IUTA Homepage

Auslassöffnungen mit Durchmessern von bis zu acht Metern alle vorgesehen Messpunkte erreichen zu können. Daher kam eine externe Pumpe zum Einsatz, deren Volumenstrom über eine Messstrecke und Bypassregelung an den gewünschten Probenahmeerfordernisse angepasst werden konnte. In der Regel erfolgte die Probenahme bei dem herstellerseitig für das Gerät angegebenen maximale Volumenstrom von 300 /min, entsprechend einem je Probenahme erfassten Luftvolumens von 3 m³ über 10 Minuten.

Das Gerät weist nach Herstellerangaben mit einen d50-Wert von ca. 0,5 µm eine hohe physikalische Sammeleffizienz auf. Um eine isokinetische Probenahme zu gewährleisten, werden Ansaugdüsen unterschiedlichen Durchmessers verwendet, die anhand der Ergebnisse einer vorherigen Geschwindigkeitsmessung ausgewählt werden. Der Ansaugstutzen ist drehbar gelagert und kann je nach Bedarf auf einen gewünschten Winkel ausgerichtet werden. Ein in die Strömung gehaltenes Fähnchen wird verwendet, um die Mittelachse der Ansaugöffnung auf die Hauptachse der Geschwindigkeitskomponente auszurichten. Der Probenahmestrom wird am Gebläse eingestellt und die Probe über einen Zeitraum von zehn Minuten gezogen.

Nach der Probenahme wird das Ansaugsystem zur Rückgewinnung von Anlagerungen im Ansaugstutzen gespült, und die Spülflüssigkeit wird ebenfalls analysiert.

Die Ergebnisse umfassen die Umlaufwasserkonzentration sowie die Aerosolkonzentration für das Hintergrundaerosol und die Emissionskonzentration in KBE/ml.

Folgende Arbeitsschritte konnten als wesentliche Elemente einer Bioaerosolmessung an Verdunstungskühlanlagen identifiziert werden:

- Umgebungsluft (Hintergrund-Messung): Ortswahl, ungestörte Messung von Temperatur und Luftdruck, Erfassung der Bioaerosol-Konzentration
- Messstelleneinrichtung, Materialhandling
- Einrichtung einer Dauermessstelle für die Gasgeschwindigkeit über die gesamte Messdauer aller Probenahmen vor Ort an einem Messtag („Fixpunkt-Messung“)
- Fortluft: Messung der Gasgeschwindigkeit und Strömungsrichtung (Netzmessung)
- Tropfenaerosol: Messung der (Netzmessung)
- Bioaerosolprobenahme
- Handhabung von Probenmaterial

Diese Punkte stellen die Inhalte einer Vorlage für ein strukturiertes Probennahmeprotokoll dar, welches für die Messkampagnen verwendet und sukzessive anhand gewonnener Praxiserfahrung und neuen Erkenntnisse fortentwickelt und angepasst wurde.

Arbeitspaket 6: Bestimmung der mitgerissenen Tropfenfracht

Mit der Impaktormethode wurde eine Methode zur Tropfenmessung am IUTA etabliert. Diese in Richtlinie VDI 3679 Blatt 3 [6] dargestellte Methode ist insbesondere gut zur Vor-Ort-Bioaerosolmessung unter den Bedingungen im Feld geeignet. Die Probenahme erfolgt dabei durch kurzzeitige Exposition von Glas-Impaktorplatten, auf denen eine Pulverschicht aufgebracht ist. Auftreffende Tropfen hinterlassen in Abhängigkeit von ihrer Masse und Geschwindigkeit Krater, aus deren Durchmesser auf die Tropfengröße geschlossen werden kann, wenn die Gasgeschwindigkeit und

Tropfendichte bekannt ist. Die Auswertung erfolgt computergestützt anhand von Mikroskopaufnahmen der beladenen Platten. Alternativ zu den Impaktorplatten kann wassersensitives Papier verwendet werden, welches sich beim Auftreffen von Wassertropfen lokal einfärbt. Das Verfahren wurde von der Fertigung der Impaktorplatten bis hin zur größtenteils automatisierten Auswertung bei IUTA neu etabliert. Abbildung 10 gibt exemplarisch die Anzahl- und Volumenverteilung für eine Messung an einer VKA wieder. Daraus kann bei Annahme der Kugelform das Volumen des Partikel- oder Tropfenkollektivs ermittelt werden. Dieses stellt das Volumen dar, in dem Legionellen entsprechend der nachgewiesenen Konzentration auftreten und emittiert werden können.

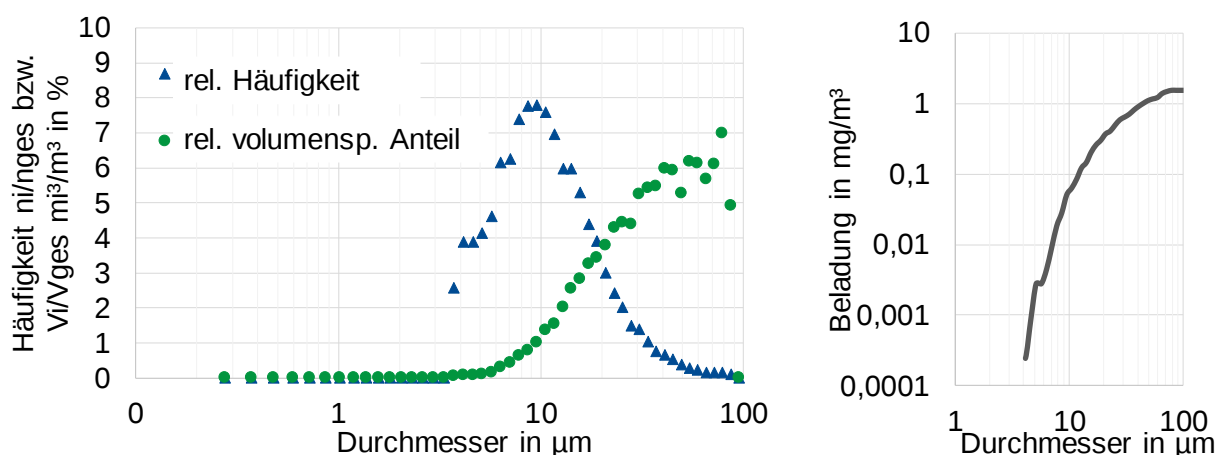


Abbildung 10 Mittlere Tropfenverteilung am Auslass einer Verdunstungskühlanlage.
links: blau: relative Häufigkeitsverteilung, grün: relative volumenbezogene Verteilung; rechts: kumulierte Beladung, aufgetragen über dem Tropfendurchmesser

Eine höhere Gasgeschwindigkeit ermöglicht die Erfassung kleinerer Tropfen. Die Abscheideeffizienz ist damit größenklassenabhängig. Bei der Auswertung wird diese Abscheideeffizienz größenklassenabhängig berücksichtigt und für jede Messung die Anzahl der in dieser Größenklasse im Aerosol tatsächlich vorhandenen Partikel entsprechend rechnerisch korrigiert.

Aufgrund der am Auslass von VKA angetroffenen Geschwindigkeiten erfolgt für die Messungen dieses Vorhabens die Auswertung des Tropfenspektrums für die Durchmesserklassen 5 µm und größer, auch wenn an Messpunkten mit höheren anzutreffenden Gasgeschwindigkeiten evtl. auch kleinere Tropfen abgeschieden werden können.

Zur Ermittlung der Anzahlhäufigkeit kann die Krateranzahl und -größenverteilung entweder computergestützt durch manuelle Zählung oder automatisiert ermittelt werden.

Zur automatisierten Auswertung wurde ein KI-gestütztes Mask R-CNN-Modell entwickelt, welches mit Hilfe von Trainingsdaten für die Auszählung von Kratern auf den Impaktorplatten optimiert wurde. Zur Qualitätskontrolle der entwickelten automatisierten Auswerteprozedur erfolgte ein Ergebnisvergleich mit der manuellen Auswertung, die aktuell als Referenz-Auswerteverfahren angesehen werden kann, dessen Ergebnisse die geringste Abweichung vom wahren Wert aufweist. Zusätzlich wurde mit dem Programm ImageJ eine Threshold-Segmentierung als teilautomatisierte Bildauswertung durchgeführt, die ein etabliertes zeitoptimiertes Auswerteverfahren darstellt. Es wurden jeweils 8 Platten mit insgesamt 640 Kratern ausgewertet.

Die KI-gestützte automatisierte Auswertung und die Referenz zeigen eine gute Übereinstimmung ab

einer Tropfengröße oberhalb etwa 16 μm , vgl. Abbildung 11. Die teilautomatisierte Bildauswertung liefert davon leicht abweichende Ergebnisse. Nach erfolgtem Training ist der Zeitaufwand für alle nachfolgend KI-gestützt durchgeführten Auswertungsvorgänge erheblich geringer als für die teilautomatisierte bzw. die rein manuelle Bildauswertung.

Die Erfahrungen der Vor-Ort-Messungen an VKA haben gezeigt, dass bei den Anlagen eine hohe Tropfenzahl im Durchmesserbereich unterhalb etwa 30 μm gemessen werden und nur sehr wenige Tropfen im großen Tropfenbereich $>100 \mu\text{m}$. Um über alle Größenbereiche statistisch verlässliche Ergebnisse zu erzielen, erfolgt die Mikroskop-gestützte Bildauswertung jeder Impaktorplatten an bei drei Vergrößerungsfaktoren 2-fach, 5-fach und 10-fach erstellten Mikroskopaufnahmen. Hintergrund ist, dass kleinere Tropfen eher bei Aufnahmen mit hoher Vergrößerung und entsprechend kleineren dargestellten Flächenausschnitten detektierbar sind, wohingegen größere Tropfen bereits bei geringster Vergrößerung auf den dann größten dargestellten Flächen nachgewiesen werden können. Die Auswertung erfolgte nach dem Superpositionsprinzip, wobei durch entsprechende Routinen die Doppelberücksichtigung von Tropfen, die auf beiden Platten abgebildet sind, unterbunden wird.

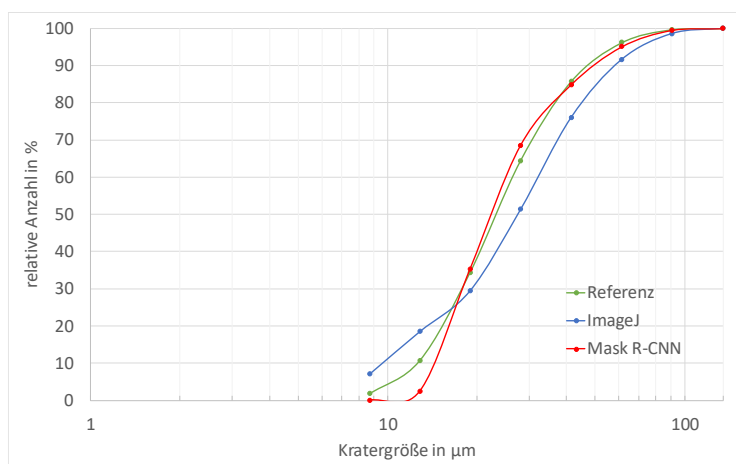
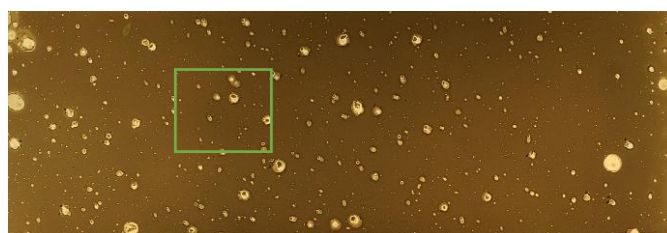


Abbildung 11 Vergleich der manuellen Auswertung („Referenz“) und automatisierten Auswertung der Impaktorplatten per KI-Unterstützung (Mask R-CNN) sowie „klassischer“ teilautomatisierter Bildauswertung (ImageJ). Dargestellt ist die kumulierte Anzahl der je Größenklasse detektierten Krater

Auf vereinzelt Impaktorplatten wurden sehr große Tropfen ($> 600 \mu\text{m}$) detektiert. Um für diese Tropfenfraktion repräsentative Ergebnisse zu erhalten, muss die ganze Platte betrachtet werden. Dies ließ sich durch den Einsatz einer Spiegelreflexkamera anstelle eines Mikroskops ermöglichen (siehe Abbildung 12).



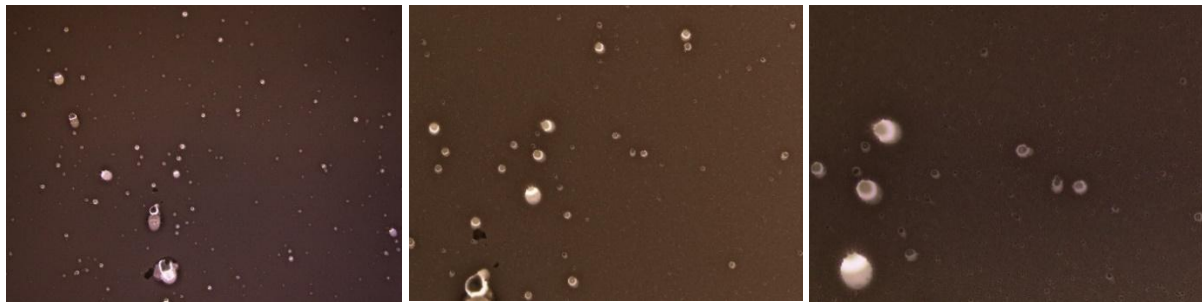


Abbildung 12 Impaktorplatte zur Tropfenmessung in verschiedenen Vergrößerungen: oben: Gesamtansicht 2 x vergrößert. Die Markierung zeigt den Bereich der darunter angeordneten Mikroskopaufnahmen bei unterschiedlicher Vergrößerung. Unten: links: 20 x vergrößert; Mitte: 50 x vergrößert; rechts: 100 x vergrößert

In Abbildung 13 ist für eine exemplarische Messung am Fortluftauslass einer VKA die durch Auswertung von Impaktorplatten ermittelte Tropfenbeladung der Fortluft dargestellt. Die Werte sind in der Einheit mg/m^3 über der jeweiligen Messposition auf der Messachse aufgetragen (grüne Punkte). Zusätzlich ist auf der vertikalen Sekundärachse der mittlere volumenbezogene Durchmesser angegeben (blaue Dreiecke). Die Gesamt-Tropfenfracht der VKA mit saugend angeordnetem Ventilator und ca. fünf Meter durchmessender kreisförmiger Auslassöffnung betrug mit den Messwerten ermittelt etwa 450 g/h. Die Ergebnisse zeigen auf, dass eine erhöhte Beladung direkt mit einem erhöhten mittleren Tropfendurchmesser einhergeht. Die Beladung variiert mit der Messposition bis zu einem Faktor 2.

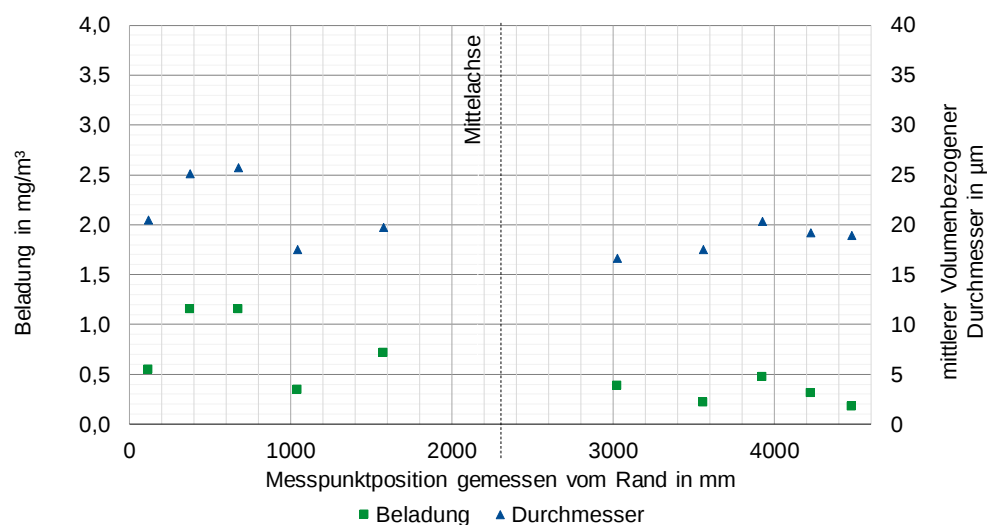


Abbildung 13 Verteilung der Tropfenbeladung auf einer Messachse einer Verdunstungskühlanlage

Das lokal ermittelte Tropfenspektrum und die Tropfenbeladung sowie haben sich im Verlauf der Projektbearbeitung als sehr wichtige Kenngrößen zur Ermittlung der Emissionsfracht und Bewertung der Emission aus VKA erwiesen. Zur Bearbeitung dieses Arbeitspaketes war daher ein höherer Personalbedarf erforderlich als ursprünglich beantragt. Die erzielten Ergebnisse im Zusammenhang mit der KI-gestützten Bildauswertung ermöglichen aber eine zeitsparende Auswertung der Impaktorplatten. Aufgrund dieses Zeitvorteils und der weitgehenden Übereinstimmung der Auswerteresultate mit den Ergebnissen des Referenzverfahrens der manuellen Bildauswertung kann die automatisierte Auswertung als wertvolles Ergebnis angesehen werden und kommt daher im weiteren Verlauf des Vorhabens bevorzugt zur Anwendung.

Arbeitspaket 7: Durchführung zweier Messkampagnen an Anlagen verschiedener Bauart unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete

Vier Anlagen mit saugendem Ventilator und eine Anlage mit drückendem Ventilator wurden beprobt. Die Messdaten aus Arbeitspaket 5 und 7 wurden hinsichtlich Emissionskonzentration, Tropfenmasse und Mikrobiologie analysiert.

Der umfangreiche Datenbestand an Messungen zur Gasgeschwindigkeit, zum Tropfenspektrum, zu Ergebnissen der mikrobiologischen Analysen sowie Fortlufttemperatur wurden ebenso wie anlagenbezogene Angaben und Messdaten zur mikrobiologischen Hintergrundbelastung und Luftqualität in einer relationalen Datenbank abgelegt. Der Versuch einer systematischen Datenauswertung ohne dieses Instrument gestaltete sich als sehr aufwändig und war im Rahmen der Bearbeitungszeit nicht leistbar.

Anhand der tabellarischen Darstellung in Abbildung 14 wird ein spezielles Problem deutlich, das sich im Verlaufe der Bearbeitung des Vorhabens insbesondere im AP 7.1 und 7.2 gezeigt hat. Dargestellt sind Ergebnisse von Aerosol- und Umlaufwasserproben, die an verschiedene Messtagen an derselben Anlage gewonnenen wurden. Mit den Betreibern war vereinbart, den Messzeitpunkt möglichst weit entfernt von der letzten Bioziddosierung entfernt zu wählen, um zu den Messterminen zur Kompensation der niedrigen Empfindlichkeit der Aerosol-Probenahme und anschließenden Laboranalytik im Rahmen des normalen Betriebszyklus möglichst hohe Werte an Mikrobiologie anzutreffen. Die Ergebnisse zeigen auf, dass trotz dieser Voraussetzungen *Legionella spp.* nur an einem Messtag nachgewiesen werden konnten. Bei den übrigen untersuchten Anlagen waren Nullbefunde die Regel. Eine direkte Korrelation zwischen den Laborwerten für *Legionella spp.* und Gesamtmikrobiologie liegt nicht vor.

Die Messkampagne kann somit als sehr hilfreich in Bezug auf die Durchführung eines standardisierten Probenahmeverfahrens angesehen werden, da einer Vielzahl von Messungen an unterschiedlichen Anlagen durchgeführt werden konnten. Somit konnten umfangreiche Praxiserfahrungen in die Messplanung einfließen, die wertvolle Hinweise zur Optimierung der Messdurchführung und Datenauswertung lieferten. Konkrete Hinweise auf anlagentypische Aspekte der Emission von legionellenhaltigen Bioaerosolen liegen nach aktuellen Auswertungsstand nicht vor.

		Umlaufwasser	Aerosol	Umlaufwasser	Aerosol	Tropfen
Messzeit- punkt Jahr - Monat	Ventilator- stufe	<i>Legionella</i> spp. KBE/100ml	<i>Legionella</i> spp. KBE/m ³	Gesamtmikro- biologie 36°C KBE/ml	Gesamtmikro- biologie 36°C KBE/m ³	Tropfen- Beladung in mg/m ³
2023-01	1	135	0	4.550	178,3	3,4
2023-01	1	125	0	4.300	525,0	-
2023-03	1	283	0	3.450	312,4	-
2023-03	1	145	0	3.300	371,3	5,1
2023-06	2	255	11,9	3.400	228,1	4,3
2023-06	2	120	3,8	3.500	277,2	-
2023-11	2	<5	0	2.000	345,8	-
2023-11	2	<5	0	2.150	91,2	-
2023-11	2	<5	0	9.000	132,3	1,2
2023-11	1	<5	0	9.000	84,4	3,8

Abbildung 14 Tabellarische Übersicht über Wiederholungs- Messungen an einer VKA

AP 8 Auswertung der Messergebnisse zur Validierung einer kennzahlbasierten Bewertungsmethodik

Es konnten im Wesentlichen zwei Kennzahlen zur Charakterisierung des Emissionsverhaltens von VKA identifiziert werden. Zum einen erfolgt eine Bewertung der am Auslass gemessenen mittlere Aerosolkonzentration in Bezug auf die Hintergrundkonzentration (MLBF, Mikrobiologischer Luftbelastungsfaktor), zum anderen eine Bewertung der Emissionsfracht ausgehend von Messungen der mikrobiologischen Belastung des Umlaufwassers in Kombination mit Abgaben zum verwendeten Tropfenabscheider im Verhältnis zu den am Fortluftauslass gewonnenen Messgrößen (KVE, Konzentrationsverhältnis Emission).

Aus der Konzentration des Umlaufwassers in KBE/ml und der mittels Impaktorverfahren erhaltenen Tropfenbeladung in ml/m³ lässt sich die am Auslass theoretisch freigesetzte Legionellenkonzentration in KBE/m³ berechnen. Dieser berechnete Konzentrationswert hat insofern einen eher theoretischen Charakter, da er die Freisetzung von Sekundärtropfen aus dem System vernachlässigt bzw. nicht explizit berücksichtigt.

Mit dem Verhältnis dieses Beladungs- oder Konzentrationswertes zum am Fortluftauslass im Aerosol gemessenen Beladung erhält man eine Kennzahl, aus der sich ggf. das Auftreten von Sekundärtropfen in der Anlage unter den aktuellen Betriebsbedingungen ableiten lässt. Das Konzentrationsverhältnis

Emission (KVE) der Bioaerosol-Emission kann demnach anhand der wie folgt ermittelt werden:

$$KVE = \frac{\text{gemessene Beladung}}{\text{berechnete Beladung}} = \frac{c_{KBE, \text{Aerosol}} \left(\frac{KBE}{m^3} \right)}{c_{KBE, \text{Umlaufwasser}} \left(\frac{KBE}{ml} \right) * m_{\text{Tropfenbeladung}} \left(\frac{ml}{m^3} \right)}$$

Mit

$c_{KBE, \text{Aerosol}}$: am Fortluftauslass der Anlage gemessene Konzentration an Bioaerosol

$c_{KBE, \text{Umlaufwasser}}$: Konzentration an Bioaerosol, gemessen in der Fortluftebene

$m_{\text{Tropfenbeladung}}$: Tropfenmenge je m^3 Abluft, gemessen in der Fortluftebene

Dieses Verhältnis kann als Konzentrations- oder Frachtwert dargestellt werden und lokal am jeweiligen Messpunkt ermittelt werden. Ebenfalls scheint die Betrachtung dieses Parameters als Mittelwertes über die gesamte Austrittsfläche möglich. Die lokale Freisetzung von Sekundärtropfen wird dabei allerdings nicht erfasst. In nachfolgende Abbildung 15 sind noch einmal die drei zentralen Größen, die zur Faktorermittlung herangezogen werden, dargestellt.

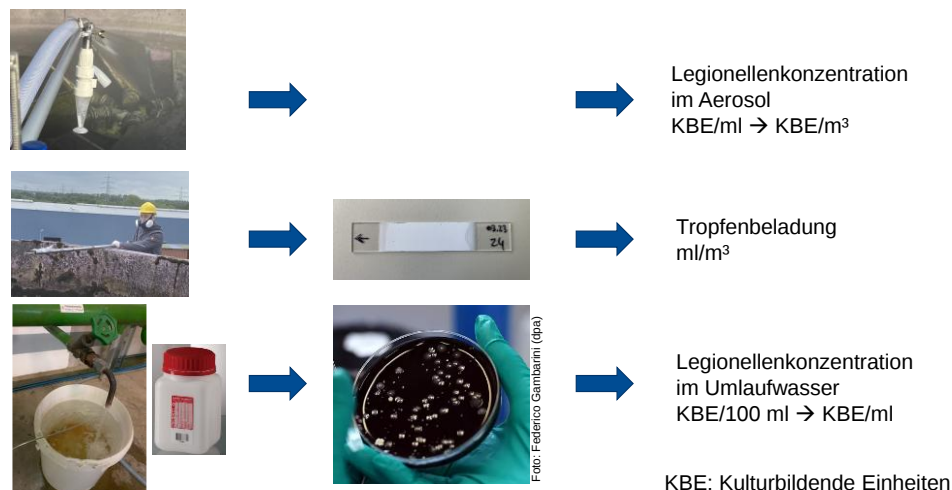


Abbildung 15 Verteilung der Tropfenbeladung auf einer Messachse einer Verdunstungskühlanlage

Ein KVE-Wert von 1 weist darauf hin, dass als mikrobiologiehaltige Tropfenfraktion ausschließlich Primärtropfen aus der Anlage freigesetzt werden. Ein KVE-Wert unter 1 deutet demnach auf eine Abnahme der Keimzahl hin, beispielsweise durch Kondensationseffekte oder Austrocknung/Inaktivierung der Mikroorganismen. Dieser Fall wird jedoch als unwahrscheinlich betrachtet.

Ein KVE-Wert über 1 weist folglich auf eine Freisetzung von Sekundärtropfen hin, beispielsweise durch die Interaktion von Tropfen mit Biofilmen.

Bei diesem Ansatz wird der aerosolführende Teil (Düsenebene bis Fortluftauslassesebene) als Black Box betrachtet. D. h. es wird nicht berücksichtigt, inwieweit die Tropfenfracht zwischen Tropfenabscheider und Anlagenauslass durch die Abscheidung legionellenhaltiger Tropfen reduziert wird bzw. durch Aufkondensation von Wasserdampf (legionellenfrei) anwächst.

Zur Berechnung der am Fortluftauslass der VKA unmittelbar durch Messung bestimmten Bioaerosol-Fracht sind wie vorangehend dargestellt umfangreiche Einzelmessungen vorzunehmen und zueinander in Beziehung zu setzen. Um die Bestimmung der lokalen Konzentration und insbesondere die

Ermittlung des freigesetzten Emissionsstroms an Legionellen realitätsnah vornehmen zu können, sind eine Reihe von Kenngrößen zu bestimmen. Diese sind insbesondere die Legionellenkonzentration im gesammelten Tropfenvolumen im Labor, der Flüssigwasser-(Tropfen-)gehalt im freigesetzten Aerosol sowie der ausgestoßene Fortluftvolumenstrom.

Um Einflüsse auf räumlich-lokale Variationen der Parameter orientierend ermitteln zu können, wurden an über 20 Messtagen verschiedene Parameterstudien an Realanlagen durchgeführt. Ziel ist dabei insbesondere auch die Ermittlung von für den kompletten Messquerschnitt repräsentativen Probenahmepunkten, um den Aufwand der Probenahmekampagne auf ein sinnvolles Maß zu begrenzen.

Diese Untersuchungen umfassten unter anderem wiederholte

- Bioaerosol-Probenahme auf einer Halbachse und jeweils bis zu fünf Messpunkten,
- Bioaerosol-Probenahme auf einem Umfangsradius an 8 Positionen,
- Bioaerosol-Probenahme mit verschiedenen Sammeldauer bzw. verschiedenen Absaugvolumina bzw. verschiedenen Sammelvorrichtungen,
- Tropfenmessungen auf vier Halbachsen und jeweils bis zu fünf Messpunkten sowie
- Tropfenmessungen auf einem Umfangsradius an 8 Positionen.

Bei zahlreichen durchgeführten Probenahmen wurden keine Legionellen im Aerosol nachgewiesen. Die Ergebnisse einer Anlage mit Legionellenbefund im Aerosol sind in Abbildung 16 dargestellt.

Der Hersteller des Tropfenabscheiders hat einen maximalen Tropfendurchgang von 0,001 % des Kühlwassermassenstroms angegeben. Bei dem am Messtag vorliegenden Massenstrom von 450 m³/h ergibt sich damit rechnerisch eine maximale Tropfenfracht von 4.500 ml/h. Unter Berücksichtigung der im Umlaufwasser nachgewiesenen Legionellen-Konzentration von 255 KBE/100 ml läge die Emissionsrate an Legionellen hinter Tropfenabscheider rechnerisch bei einem Wert von maximal 11.475 Legionellen pro Stunde. Dieser Wert stellt eine integrale Betrachtung über den gesamten Auslassquerschnitt dar.

Die mittels Impaktormessung ermittelte Tropfenbeladung kann gemeinsam mit der im Umlaufwasser nachgewiesenen Legionellen-Konzentration als Nenner bei der Berechnung der Kenngröße KVE verwendet werden. Weiterhin wird aus der Tropfenbeladung unter Einbezug der jeweils am Messort vorherrschenden Gasgeschwindigkeit die Tropfenfracht berechnet, diese beträgt über den gesamten Auslassquerschnitt gemittelt 4.400 ml/h und liegt damit knapp unter der Herstellerangabe des Tropfenabscheiders.

In Abbildung 16 ist die lokal an verschiedenen Messpunkten erfassten Legionellenkonzentration wiedergegeben, welche als Zähler in die Berechnung des KVEs eingeht. Es handelt sich jeweils um den Mittelwert zweier aufeinanderfolgend durchgeführter Wiederholungsmessungen. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der beiden Messungen an. Da an Messpunkt 3 bei nur einer der beiden Messungen Legionellen nachgewiesen werden konnten, ergibt sich rechnerisch ein großer Fehlerbalken.

Die Ergebnisse der Auswertung deuten darauf hin, dass in den Einzelfällen, in denen Legionellen messtechnisch nachgewiesen werden konnten, eine Sekundärtropfenfreisetzung wahrscheinlich ist.

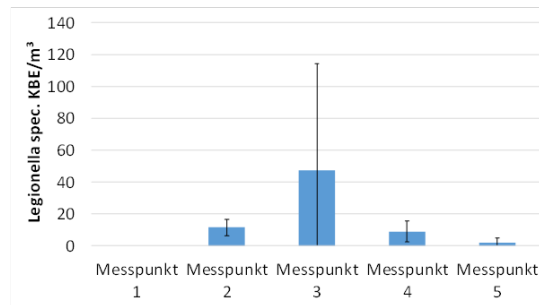


Abbildung 16: Ergebnisse Legionellenkonzentration in KBE pro m³ Luft, aufgetragen über der Messpunktnummer eine Halbachse. Messpunkt 1: wandungsnächste Punkt, Messpunkt 5: achsennächste Punkt (im Zentrum der Austrittsfläche)

Es konnten im Wesentlichen zwei Kennzahlen zur grundsätzlichen Charakterisierung des Emissionsverhaltens von VKA identifiziert werden. Zum einen erfolgt eine Bewertung der am Auslass gemessenen mittlere Aerosolkonzentration in Bezug auf die Hintergrundkonzentration (LBF, Luftbelastungsfaktor), zum anderen eine Bewertung der Emissionsfracht ausgehend von Messungen der mikrobiologischen Belastung des Umlaufwassers in Kombination mit Abgaben zum Abscheidegrad des verwendeten Tropfenabscheiders im Verhältnis zu den am Fortluftauslass gewonnenen Messgrößen (KVE, Konzentrationsverhältnis Emission). Anhand des KVE-Wertes lassen sich ggf. Aussagen zur Emission von Sekundärtropfen ableiten. Für *Legionella spp.* sowie *Legionella pneumophila* ließen sich die Werte lediglich exemplarisch ermitteln, da die Konzentration nur in Einzelfällen oberhalb der Nachweisgrenze lag. Die angestrebte grundsätzliche Unterscheidung der untersuchten Anlagen anhand dieses zentralen Parameters war somit nicht möglich.

3. Bewertung der erzielten Ergebnisse in Gegenüberstellung mit den Zielsetzungen des Antrages, Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

In nachfolgender Auflistung werden die oben ausführlich dargestellten Forschungsergebnisse den ursprünglichen Zielen des FuE-Antrags gegenübergestellt. Demnach konnten die angestrebten Forschungsziele erreicht werden.

Ziel des Vorhabens ist die Ableitung einer aussagekräftige, funktionale und repräsentativen Probenahme-strategie für Aerosolprobenahme an Verdunstungskühlanlagen, um deren Gefährdungspotential hinsichtlich einer Freisetzung von pathogenen Keimen mit der Fortluft abzuleiten. Diese dient der systematischen Untersuchung des differenzierten Gefahrenpotentials unterschiedlicher Bautypen von Verdunstungskühlanlagen in Hinblick auf deren tatsächliche Aerosolfreisetzung. Die Untersuchungsstrategie soll als Grundlage weitergehender Untersuchungen im Falle des Ausbruchsmanagements herangezogen werden können. Gegenüber der gemäß 42. Verordnung zum Bundes-Immissions-

schutzgesetz aktuell praktizierten Untersuchung des Umlaufwassers soll damit der für Atemwegsinfektionen relevante Transmissionspfad der Luftpfademissionen realitätsnaher abgebildet werden, indem auch die Emission sämtlicher bei derartigen Anlagen auftretenden Tropfenarten berücksichtigt werden. Neben den Primärtropfen als mitgerissenes Umlaufwasser sind hier insbesondere Sekundärtropfen zu nennen, die durch Wechselwirkungen der Fortluft mit solchen Anlagenteilen entstehen, die potentiell mit Biofilmen überzogen sind und nicht unmittelbar dem Umlaufwasserkreislauf zuzuordnen sind. Eine praxisorientierte Probenahme orientiert sich an den aktuell gültigen technischen Richtlinien zu Partikel- und Aerosolprobenahme. Dabei sind insbesondere die besonderen Begebenheiten an der Kühlturmmündung zu berücksichtigen, welche deutlich von denjenigen an „klassischen“ geführten Quellen wie beispielsweise Abgaskaminen abweichen, für deren Beprobung die derzeit vorliegenden Richtlinien ursprünglich abgeleitet worden sind bzw. in die Flächenquellen für eine Probenahme oftmals überführt werden. Eine repräsentative Probenahme stellt einen wesentlichen Schritt zur Charakterisierung des Anlagen-Emissionspotentials und Umsetzung von Emissionsminderungsmaßnahmen seitens der Anlagenbetreiber und -anbieter dar, um einen hygienischen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.

Der Hygienezustand der Anlagen soll dabei mittels geeigneter Kennzahlen beschrieben werden. Diese Kennzahlen sollen aerosolspezifische sowie technologische Parameter berücksichtigen. Dadurch sollen Emissionsvermeidungs- oder Minderungsmaßnahmen anlagenspezifisch abgeleitet werden können.

Mit den Arbeitspaketen sind folgende Forschungsziele verbunden:

AP 1: Unterteilung der Emissionswahrscheinlichkeit von VKA anhand des Anlagentyps

AP 2: Auslegung einer modifizierten S-Pitot-Sonde

AP3: Strategie zur Charakterisierung eines 3D-Strömungsprofils

AP 4: Schaffung geräteseitiger Voraussetzungen für eine verlustfreie (Bioaerosol-)Probennahme

AP 5: Entwicklung einer repräsentativen Probenahmestrategie anhand von Feldmessungen

AP 6: Bestimmung der mitgerissenen Tropfenfracht

AP 7: Durchführung zweier Messkampagnen an Anlagen verschiedener Bauart unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete

AP 8: Validierung einer kennzahlbasierten Bewertungsmethodik auf Basis der Messergebnisse

Nachfolgend soll dargestellt werden, inwieweit die angestrebten Forschungsziele mit den vorangehend ausführlich dargestellten Ergebnissen des FuE-Vorhabens erreicht werden konnten.

AP 1: Unterteilung Typisierung von Verdunstungsanlagen zur effektiven Messdurchführung anhand des Anlagentyps

Da die Möglichkeiten der repräsentativen Probenahme am Auslass von Verdunstungskühlanlagen stark von den vor Ort anzutreffenden technischen und räumlichen Verhältnissen abhängig sind, erfolgte eine eingehende Datenerhebung. Durchgeführte Ortsbegehungen sowie eingehende Expertengespräche zeigten auf, dass sich Anlagen derselben technischen Kategorie in der Zugänglichkeit bzw. einzelnen technischen Parametern deutlich unterscheiden können, so dass nicht in jedem Fall

eine Zugänglichkeit des bzw. die Einrichtung einer Messebene am gesamten Fortluftauslass möglich ist. Die Vor-Ort-Termine zeigten dabei zusätzlich besondere Bauformen von VKA auf, die bei Antragstellung nicht bekannt waren, aber eine besondere Emissionsrelevanz aufweisen und für die daher eine individuelle Messstrategie angeleitet werden sollte. Wie erwartet konnten deutlich mehr Anlagen mit saugend angeordnetem Ventilator angetroffen werden als Anlagen mit drückend angeordnetem Ventilator.

Bewertung: Ziel vollumfänglich erreicht.

AP 2: Auslegung einer modifizierten S-Pitot-Sonde

Auf Basis einer S-Pitot-Messsonde konnte für Messungen hoch flüssigkeitsbeladenen Aerosolströmungen eine Messeinrichtung zur simultanen Staudruckmessung in mehreren Raumrichtungen konzipiert, konstruiert, in Kooperation mit einem Hersteller für messtechnisches Gerät gefertigt und in der Praxis erfolgreich getestet werden. Mit Abschluss des Arbeitspaketes liegt mit der sog. X-Pitot-Sonde eine validierte Messsonde zur problemangepassten messtechnischen Charakterisierung auch komplexer drallgeprägter Strömungsverhältnisse an Verdunstungskühlanlagen vor.

Bewertung: Ziel vollumfänglich erreicht.

AP 3: Nutzung der Mehrrichtungs-Messsonde zur Charakterisierung eines 3D-Strömungsprofils

Im Arbeitspaket fand die Ableitung einer praxisnahen Vorgehensweise zur Erfassung eines mehrdimensionalen Strömungsprofils mit dem im vorangehenden Arbeitsschritt optimierten Probenahmegerät statt. Es zeigte sich eine deutliche Zeitersparnis gegenüber der Messung der Einzelkomponenten in vertikaler und tangentialer Raumrichtung. Eine Schwierigkeit ergibt sich konstruktionsbedingt aufgrund der Schenkellängen des gekröpften Messgerätes bei Messpunkten, deren Abstand zur Wandung des Kühlturms weniger als ca. 15 cm beträgt. Hier erfolgt eine Aufnahme von Messpunkten unmittelbar in der Auslassebene.

Bewertung: Ziel weitgehend erreicht.

AP 4: Schaffung geräteseitiger Voraussetzungen für eine weitgehend verlustfreie Probennahme

In Ergänzung zu den gemäß allgemeinen Anforderungen an Entnahmesonden nach VDI 2066 konstruierten Ansaugdüsen erfolgte die Auslegung eines zylindrischen Rohrstückes mit innenliegender Rinne, in der ablaufendes Fluid gesammelt werden kann, sowie die Konstruktion dieses Bauteils mittels *Rapid Prototyping*. Trotz der bei Labortests größeren aufgefangenen Menge an Tropfenflüssigkeit konnten bei Einsatz des zusätzlichen Tropfenfangs in Felduntersuchungen (vgl. AP 5) nicht wie erwartet eine signifikant höhere KBE-Zahl nachgewiesen werden als ohne Tropfenfang. Ebenfalls wurde in messtechnischen Untersuchungen eine Spülstrategie abgeleitet, um anhaftende Fluidbestandteile dem Probenmaterial zuschlagen zu können.

Bewertung: Ziel vollumfänglich erreicht.

AP 5: Entwicklung einer repräsentativen Probenahme-strategie anhand von Feldmessungen

Eine geeignete Vorgehensweise zur repräsentativen Erfassung der zentralen Messgrößen Fortluftgeschwindigkeit, Tropfenfracht und Bioaerosolfracht sowie weiterer Messgrößen konnte im Rahmen einer Feldmesskampagne abgeleitet werden. Dabei zeigte sich, dass die in den Technischen Richtlinien für eine Aerosol- bzw. Partikelmessung geforderten Randbedingungen nicht in vollem Umfang am Auslass von Verdunstungskühlanlagen vorliegen, sondern eine in Teilen angepasste Vorgehensweise verfolgt werden muss. Mit dem vorliegenden Probenahmegerät lassen sich zentralen Kenngrößen der Aerosol- oder Partikelprobenahme auch bei Messungen am Auslass von VKA berücksichtigen. Da Legionellen in den gewonnenen Aerosolproben oftmals nicht nachgewiesen werden konnten, wurde als Parameter zur Beurteilung der biologischen Sammeleffizienz die allgemeine Koloniezahl herangezogen.

Bewertung: Ziel weitgehend erreicht.

AP 6: Bestimmung der mitgerissenen Tropfenfracht

Die Methode der Tropfengrößen- und Anzahlverteilung mittels Impaktorplatten wurde am IUTA etabliert und jeweils bei den Vor-Ort-Bioaerosolmessungen als begleitende Messung durchgeführt. Dies umfasst die Arbeitsschritte von der Fertigung der Impaktorplatten bis hin zur größtenteils automatisierten Auswertung, wurde. Die automatisierte, KI-gestützte Auswertung der Mikroskop-aufnahmen der Impaktorplatten zeigen eine gute Übereinstimmung ab einer Tropfengröße oberhalb etwa 16 μm , vgl. Abbildung 5. Nach erfolgtem Training des Modells ist der Zeitaufwand für alle nachfolgend durchgeführten KI-gestützten Auswertungsvorgänge erheblich geringer als für die bislang praktizierte teilautomatisierte bzw. die rein manuelle Bildauswertung.

Bewertung: Ziel vollumfänglich erreicht.

AP 7.1 und 7.2: Durchführung zweier Messkampagnen an Anlagen verschiedener Bauart unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitspakete

Die in Feldmesskampagnen ausgeführten Aerosolprobenahmen sowie Messungen der physikalischen Parameter folgte der vorab abgeleiteten standardisierten Vorgehensweise. Das Emissionsverhalten angetroffener Sonderbauformen konnte in zusätzlichen Einzelmessungen charakterisiert werden.

Bewertung: Ziel weitgehend erreicht.

AP 8: Auswertung der Messergebnisse zur Validierung einer kennzahlbasierten Bewertungsmethodik

Es konnten im Wesentlichen zwei Kennzahlen zur grundsätzlichen Charakterisierung des Emissionsverhaltens von VKA identifiziert werden (LBF, Luftbelastungsfaktor sowie KVE, Konzentrationsverhältnis Emission). Anhand des KVE-Wertes lassen sich ggf. Aussagen zur Emission von Sekundärtropfen ableiten. Für *Legionella spp.* sowie *Legionella pneumophila* ließen sich die Werte lediglich exemplarisch ermitteln, da die Konzentration nur in Einzelfällen oberhalb der Nachweisgrenze lag. Die angestrebte grundsätzliche Unterscheidung der untersuchten Anlagen anhand dieses zentralen Parameters war

somit nicht möglich.

Bewertung: Ziel teilweise erreicht.

Bezugnahme auf die wichtigsten Positionen im zahlenmäßigen Nachweis sowie Bezugnahme auf die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Gemäß Nachkalkulation fielen die Kosten für Personal um ca. 4 % höher aus als ursprünglich beantragt und bewilligt, da das Gehalt für eine der eingebundenen Personen gestiegen ist (Mehrkosten von ca. 8.000,- EUR)

Die allgemeinen Kosten fielen um ca. 5 % höher aus als beantragt. Als Ursache können höhere Reisekosten aufgrund längerer Reiseentfernungen angegeben werden sowie der Umstand, dass wg. Reparaturbedarf am unternehmenseigenen Kleintransporter eine externe Anmietung von Fahrzeugen erfolgen musste.

Kosten für Leistungen Dritter fielen um ca. 8.000,- € niedriger aus als ursprünglich kalkuliert. Ursächlich war, dass die Laboranalytik zu günstigeren Konditionen je Probe vergeben werden konnte als anhand der ursprünglichen Kalkulation auf Basis eines Richtpreisangebotes abgeschätzt wurde. Insgesamt konnten 34 Wasserproben und 355 Aerosolproben zur Analyse gebracht werden. Der ursprünglichen Kalkulation lag ein Probenumfang von etwa 348 Proben zugrunde.

Die Projektmittel mussten über einen längeren Zeitraum als ursprünglich geplant verausgabt werden. Grund waren zum einen Pandemie-bedingte zeitliche Verzögerungen durch eingeschränkte Zugänglichkeit von Anlagen aufgrund von Kontakteinschränkungen sowie aufgrund betrieblicher Belange bei den Unternehmen, an deren Anlagen Messungen durchgeführt werden sollten. So mussten bspw. Termine aufgrund von vorab nicht bekannter Biozidzugabe verschoben werden, fiel eine Anlage im Verlauf von Messungen aus bzw. war eine Anlage aufgrund von Kapazitätsanpassungen der Produktion nicht wie ursprünglich bei der Terminplanung vorgesehen in Betrieb. Ebenfalls lagen Engpässe bei der Verfügbarkeit des eigenen Personals vor.

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die Ziele des Forschungsprojektes zu erreichen. Bei der Durchführung des Projektes, hier insbesondere bei den kostenaufwändigen Vor-Ort-Messkampagnen, wurde eine effektive Arbeitsweise angestrebt. Die Angemessenheit des Aufwandes konnte durch Vorab-Ortstermine sowie intensive Abstimmung mit den Anlagenbetreibern gewährleistet werden.

Da die Tropfenfracht ebenso wie die Fortluftgeschwindigkeit über den Messquerschnitt sehr stark schwanken kann, wird die Erfassung dieser Kenngrößen mit hoher räumlicher Auflösung angestrebt. Daher war für die Bestimmung der Tropfenfracht ein höherer Arbeitsaufwand als ursprünglich im Antrag vorgesehen aufgebracht. Aufgrund des großen Zeitvorteils der automatisierten Bildauswertung und der weitgehenden Übereinstimmung der Auswerteresultate mit den Ergebnissen des Referenzverfahrens kann dies als wertvolles Ergebnis für die Durchführung der Feldmesskampagnen angesehen werden.

4. Darstellung der Innovationspotenziale und Applikationsmöglichkeiten

4.1. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse

Im Rahmen des FuE-Vorhabens erfolgte erstmals die systematische Übertragung der Grundzüge einer emissionsseitigen Partikelprobenahme aus einem Gasstrom bzw. Bioaerosolprobenahme auf die Probenahme von Bioaerosolen am Auslass von Verdunstungskühlanlagen.

Es konnte ein Spektrum an physikalischen und mikrobiologischen Kenngrößen identifiziert werden, mit denen eine quantitative Abschätzung des Emissionsstroms von Bioaerosolen mit der Fortluft unmittelbar an großflächigen Auslassöffnungen von Verdunstungskühlanlagen messtechnisch möglich ist. Insbesondere lässt sich mit der Ableitung spezifischer Kennzahlen die potentielle Gefährdung durch Sekundäraerosole beschreiben, was mittels Umlaufwasserbeprobung nach 42. BImSchV nur bedingt möglich ist. Die Messungen zeigten insgesamt den hohen zeitlichen und personellen Aufwand für eine solche Messung ebenso auf wie die Problematik der geringen Konzentration an *Legionella* spp. Als zentralem Zielparameter.

Es konnten umfangreiche Erfahrungen bezüglich einer Bioaerosolprobenahme in stark flüssigkeits-beladenen, großvolumigen Abluftströmen gewonnen werden, aus denen verschiedene messtechnische Entwicklungen zur Optimierung der Messvorgänge resultierten. So konnte für Messungen in derartigen Gasströmungen eine Messeinrichtung zur simultanen Staudruckmessung in mehreren Raumrichtungen konzipiert, konstruiert und in der Praxis erfolgreich getestet werden (X-Pitot-Sonde). Ein für Immissionsmessungen vorgesehener handelsüblicher Nasszyklonsammler ließ sich durch konstruktive Modifikationen auf die Messung von Emissionsströmen adaptieren.

Methoden zur Messung des Tropfen-Anzahl und –größenspektrums konnten für die systematische Tropfenmessung unter den rauen Praxisbedingungen der Messung an Verdunstungskühlanlagen etabliert werden. Diese Messgrößen stellen einen zentralen Parameter bei der Frachtabschätzung dar, neben der Messung der Strömungsgeschwindigkeit und der Bioaerosolmessung.

Eine Aerosolprobenahme mit anschließender Analytik kann damit ausschlaggebende Ergebnisse zur Beurteilung des Gefährdungspotentials einzelner Anlagen liefern und somit im Falle des Ausbruchsanagement ein Instrument zur Gefährdungsanalyse darstellen.

Die wirtschaftliche Bedeutung einer frühzeitig erkannten Gefährdungssituation im Zusammenhang mit einer epidemischen Lage lässt sich allerdings an dieser Stelle nur sehr schwer abschätzen.

4.2. Internes Innovations- und Anwendungspotenzial (eigene Nutzung der Ergebnisse, Folgeprojekte)

Die Forschungsergebnisse können die Basis für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungspartnerschaften mit Anlagen- und Apparateherstellern darstellen, um ein manuelles Probenahmesystem zur (Bio-)Aerosolprobenahme an Verdunstungskühlanlagen zur Marktreife zu entwickeln bzw. Grundlagen einer automatisierten Probenahme zu schaffen. Darüber hinaus sind vielfältige weitere Anwendungen überall dort möglich, wo mikrobiologische Kenngrößen eines Aerosols ermittelt werden sollen, bspw. im Rahmen von Arbeits- und Produktschutzmaßnahmen.

Aufgrund der relativ geringen Konzentration des Zielparameters der Legionellenkonzentration im Aerosol wird eine Kooperation mit Forschungspartnern angestrebt, um für die vorliegende Probenmatrix ein Nachweisverfahren mit einer höheren Empfindlichkeit zu etablieren (z. B. PCR) bzw. den Sammelvolumenstrom bzw. die möglichst verlustfreie Aufkonzentrationsrate des Probenmaterials zu vergrößern. Aufgrund des hohen personellen und zeitlichen Aufwandes zur repräsentativen Erfassung aller erforderlichen Messgrößen über den Auslassquerschnitt ist eine Umsetzung im Rahmen der Routineanalytik nicht zu erwarten. Die erarbeiteten Ergebnisse zur differenzierten Quantifizierung der Bioaerosolfreisetzung über den Auslassquerschnitt können aber eine Grundlage für die Ableitung eines weitgehend automatisierten Aerosol-Probenahmeverfahrens darstellen.

Die Methode der Tropfenmessung mittels Impaktorplatten wurde am IUTA etabliert, von der Fertigung der Impaktorplatten bis hin zur KI-gestützten automatisierten Bildauswertung. Die Durchführung derartiger Messungen kann von IUTA zukünftig als Dienstleistung angeboten werden. Erste Anfragen liegen bereits vor. Auch bieten die im Rahmen der Datenauswertung etablierten KI-gestützten Methoden das Potential für weitere Projekte in diesem auch für die Industrie sehr aktuellen Forschungsfeld.

4.3. Darstellung erworbener bzw. anzumeldender Schutzrechte

Es wurden im Rahmen der Vorhabensbearbeitung keine Schutzrechte erworben oder angemeldet.

4.4. Spätere Applikationsmöglichkeiten für die mittelständische Industrie und Transferkonzept

Die Untersuchungsergebnisse zur Aerosolprobenahme am Auslass von Verdunstungskühlanlagen können im Grundsatz zur Eigenüberwachung bei Anlagenbetreibern genutzt werden. Im Rahmen von Emissionsmessungen und der Ableitung geeigneter Kennzahlen lässt sich auf ggf. vorliegende Sekundäraerosol-Emissionen schließen. Darüber hinaus stellt die zielgerichtete Emissions-Probenahme im Ausbruchfall ein weiteres Instrument bei der Identifizierung von relevanten Quellen dar.

Grundsätzlich ist eine Vermarktung bzw. Nutzung der neuen messtechnischen Entwicklungen durch Unternehmen möglich.

Die erzielten Erkenntnisse werden in angewandten Fachzeitschriften und in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht, um auf diese Weise den Erkenntnisfortschritt zu Anwendern und möglichen Kooperationspartnern für Folgeprojekte zu tragen.

Die Integration der gewonnenen messtechnischen Erfahrungen zu (bio-)aerosolbezogenen Fragestellungen in die akademische Lehre im Bereich Verfahrenstechnik erfolgt beispielsweise durch Lehr-tätigkeiten von Prof. Dr.-Ing. Dieter Bathen (Thermische Verfahrenstechnik), Prof. Dr.-Ing. Christof Asbach (Umweltmesstechnik) und Dr.-Ing. Stefan Haep (Luftreinhaltung) an der Universität Duisburg-Essen. Die Ergebnisse des Projekts fließen ebenfalls in die Normen- und Richtlinienarbeit im Bereich der Bioaerosole ein, in die verschiedene Mitarbeitende von IUTA bereits jetzt intensiv eingebunden sind. Hier sei bspw. die aktuell in der Erarbeitung befindliche Richtlinie VDI 4250 Blatt 2, Umweltmedizinische Bewertung von Bioaerosolen – Risikobeurteilung von legionellenhaltigen Aerosolen, genannt. Darüber hinaus werden bestehende Kontakte insbesondere zum VGB energy e.V.,

Essen (ehemals VGB Power Tech), genutzt, um die Ergebnisse über kooperierenden Unternehmen der Wirtschaft zu verbreiten. Erste Anfragen bezüglich der abschließenden Projektergebnisse liegen von Betreiberseite bereits vor. Trockenkühler mit Adiabatik, bei denen Verdunstungseinrichtung und Wärmeübertrager getrennt sind, sind derzeit häufig Diskussionsthema in Expertenkreisen.

5. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten

Veröffentlichungen (Artikel in Zeitschriften, Seminare, Schulungen, Vorträge, Messen, Ausstellungen, Präsentationen)

Vorträge auf Fachtagungen bzw. Posterpräsentationen:

Welp, L., Hugo, A., Haep, S., VKA Control - Bewertung von Legionellenemissionen aus Verdunstungskühlanlagen: Neue Erkenntnisse und Methoden, 7. VDI-Fachtagung Emissionsminderung 2024, Nürtingen, 03.06.2024

Welp, L., Hugo, A., Haep, S., Neue Methoden zur Probenahme von Bioaerosolen aus Anlagen VDI Expertenforum „Messen und Bewerten von Bioaerosolen und Legionellen in der Außenluft“, Freising bei München, 20.04.2023

Mielke, M., Welp, L., Hugo, A., Haep, S., Datensynthese zum Training eines Mask-RCNN Modells für die automatisierte Analyse von Impaktorplatten Jahrestreffen Dechema-Fachgruppe Mehrphasenströmung und Partikelmesstechnik, Paderborn 29.03.2023 (Poster)

Welp, L., Hugo, A., Haep, S., Probenahme von Bioaerosolen am Auslass von Verdunstungskühlanlagen (VKA) mittels Nass- Zyklonabscheider VDI Wissensforum „Legionellen aus Rückkühlwerken“, Würzburg, 22.02.2022

Welp, L., Hugo, A., Haep, S., Heining, L., Seidel, M., Bioaerosolprobenahme an Verdunstungskühlanlagen mittels Zyklonabscheider B2-Seminar, Forum Biostoffe, Institut für Arbeitsschutz (IFA), Sankt Augustin, 08. – 09.12.2021

Welp, L., Hugo, A., Haep, S., Experience with aerosol sampling from evaporative cooling systems – physical aspects European Aerosol Conference EAC (online), 30.08.2021 – 03.09.2021

Publikationen:

Welp, L., Hugo, A., Neue Bewertungsmethodik der Hygiene von Verdunstungskühlanlagen im Hinblick auf Legionellen Immissionsschutz 26. Jahrgang, Juni 2021, S. 100

Hugo, A., Welp, L., Haep, S., Bioaerosolabscheidung - Probenahme von Legionellen am Auslass von Verdunstungskühlanlagen (VKA). VDI-Berichte 2397 (2022), S. 53 – S. 66. Düsseldorf 2022. ISBN 978-3-18-092397-0

Bewertung der Hygiene von Verdunstungskühlanlagen im Hinblick auf Legionellen. IUTA-aktuell 2021-01

Geplante Veröffentlichungen:

Publikation zur Charakterisierung des Emissionsverhaltens von Verdunstungskühlanlagen anhand geeigneter Kennzahlen.

Vorgesehen in Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, geplantes Einreichungsdatum ist Sommer 2025

6. Quellenverzeichnis

- 1 <https://enbau-online.ch/heizung-lueftung-elektrizitaet/6-4-kuehlanlagen/>, abgerufen 2024-12-16
- 2 Bundesrat Drucksache 242/17, 23.03.17: Verordnung der Bundesregierung: Zweiundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider - 42. BImSchV)
- 3 Hahn, S.: Die Umsetzung der 42. BImSchV aus Sicht eines Betreibers. In: VGB PowerTech - International Journal for Electricity and Heat Generation 2018 (2018), 1/2, S. 50–57
- 4 Sinder, Ch.; Ringel, M.; Hardt, H.; Langbein, H. (2020): Legionellenrisiken in Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen - Ursachen und Vermeidung. Berlin, VDE Verlag 2020
- 5 Zweiundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verdunstungskühlanlagen, Kühltürme und Nassabscheider 42. BImSchV), Bundesgesetzblatt 2017 Teil 1 Nr. 47, 19.07.2017.
URL https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_42/
- 6 VDI 3679 Blatt 3, Nassabscheider – Tropfenabscheider. 2019-08, Beuth-Verlag, Berlin