PSS Plant Simulation and Safety
Prof. Dr.-Ing. Marco K. Koch

RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM
RUB

FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU
INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK

Experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen

René Vennemann

Technischer Fachbericht zum Vorhaben BMUV 1501618:
Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen (APVOR)

Februar 2024 **PSS-TR-28**

PSS Plant Simulation and Safety
Prof. Dr.-Ing. Marco K. Koch

RUHR UNIVERSITÄT BOCHUM RUB

FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU
INSTITUT FÜR ENERGIETECHNIK

Experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen

Experimental investigation on particle retention in liquid pools

René Vennemann

Technischer Fachbericht zum Vorhaben BMUV 1501618:
Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen (APVOR)

Technical Report of the Project BMUV 1501618:
Analytical and experimental studies on particle retention in liquid pools (APVOR)

Projektleitung/Project Leader: Marco K. Koch

Februar 2024 **PSS-TR-28**

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät Maschinenbau
Institut für Energietechnik
AG Plant Simulation and Safety
Prof. Dr.-Ing. Marco K. Koch
44780 Bochum

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen BMUV 1501618 gefördert. Die Zuständigkeit für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Eine Haftung für Folgen aus der Verwendung oder Weiterverarbeitung durch Dritte bleibt jedoch grundsätzlich ausgeschlossen.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht ist der zweite Technische Fachbericht zum Forschungsvorhaben „Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen” (APVOR), welches vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV 1501618) gefördert und von der Arbeitsgruppe Plant Simulation and Safety an der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet wird. In diesem Bericht werden die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Pool Scrubbing Versuche beschrieben und analysiert.

Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Gastemperatur für die gewählten Randbedingungen im Bereich der Aerosolabscheidung tatsächlich einen eher untergeordneten Einfluss zu haben scheint. Allerdings zeigt sich eine positive Korrelation zwischen der Pooltemperatur und der Abscheideeffizienz: In den hier durchgeführten Experimenten mit Stickstoff als Einspeisegas steigt entgegen bisherigen Untersuchungen in der Literatur mit einer Erhöhung der Pooltemperatur auch die Abscheidung. Der Einfluss der Abscheidung durch Kondensation ist deutlich höher als die höhere Abscheidung durch eine veränderte Pooltemperatur. Auch die Relation des Einflusses der Gastemperatur zum Einfluss der Wasserüberdeckung auf die Partikelabscheidung konnte bestimmt werden.

Die durch nasse Resuspension wieder freigesetzten Partikel wurden nach Größenklassen aufgeschlüsselt gemessen. Dabei zeigte sich, dass die Partikeldurchmesser 0,01 µm, 0,2 µm sowie 2 µm für das CsI bevorzugt wiederfreigesetzt werden. Auf diese drei Partikelgrößen entfielen ca. 56 % der wiederfreigesetzten CsI-Masse. Für das SnO_2 zeigte sich, dass bereits nach einer Stunde des Wiederaufsiedens, die durch das Pool Scrubbing erzielte Abscheideeffizienz von ca. 64 % für Partikel mit dem Durchmesser von 0,03 µm auf ca. 50 % abgefallen ist. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass nicht-lösliche Partikel in einer Flüssigkeitsvorlage wegsedimentieren und daher bei einem Wiederaufsieden der Flüssigkeitsvorlage vernachlässigbar sind. Die im Rahmen der nassen Resuspension insbesondere beachtenswerten Submikronpartikel wurden in den hier durchgeführten Experimenten in nennenswertem Maße wiederfreigesetzt.

Die Auswertung der durchgeführten Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen des Blasenzerplatzens an der Einspeisedüse, zeigten einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Blasenzerplatzrate und freigesetztem Partikeldurchmesser über der Flüssigkeitsvorlage, der bereits in den Experimenten von Becker Technologies aufgezeigt worden ist. Offen bleibt, ob das Verhalten aus einer Tropfen-Partikel-Interaktion an der Wasseroberfläche resultiert, wie von Freitag und Schmidt [FRE18] als eine mögliche Interpretation angeführt.

Abstract

The present report is the second technical report of the research project “Analytical and experimental studies on particle retention in liquid pools” (APVOR), which is funded by the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV 1501618) and projected at the Plant Simulation and Safety Group at the Ruhr Universität Bochum (RUB). This report deals with pool scrubbing experiments carried out as part of the APVOR project.

The experiments carried out here showed that the influence of the gas temperature for the selected boundary conditions in the area of aerosol retention appears to have a rather subordinate influence. However, there is a positive correlation between the pool temperature and the retention efficiency: in the experiments carried out here with nitrogen as the feed gas, contrary to previous studies in the literature, particle retention also increases with an increase in the pool temperature. The influence of particle retention through condensation is significantly higher than the higher retention due to a change in pool temperature. It was also possible to determine the ratio between the influence of the gas temperature and the influence of water coverage on particle retention.

The particles re-released by wet resuspension were measured by size class. This showed that the aerodynamic mass median particle diameters 0.01 µm, 0.2 µm and 2 µm were the preferred particle sizes for CsI to be re-released. These three particle sizes accounted for approx. 56 % of the re-released CsI mass. For SnO_2, it was found that after just one hour of boiling, the separation efficiency achieved by pool scrubbing fell from approx. 64 % for particles with a diameter of 0.03 µm to approx. 50 %. It can therefore not be assumed that non-soluble particles will sediment away in a liquid pool and are therefore negligible when the liquid pool is re-boiled. The submicron particles of particular interest in the wet resuspension were re-released to a notable extent in the experiments carried out here.

The evaluation of the high-speed camera images of the bubble burst at the injection nozzle showed a similar correlation between the bubble burst rate and the released particle diameter above the liquid surface, which has already been observed in the experiments by Becker Technologies. It remains to be seen whether the behaviour results from a droplet-particle interaction at the water surface, as Freitag and Schmidt [FRE18] suggest as a possible interpretation of their findings.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Grundlagen 3

2.1 Pool Scrubbing 3

2.2 Ausgewählte vorausgegangene Pool Scrubbing Experimente 5

3 Versuchsanlage und Versuchsmatrix 6

3.1 Versuchsmatrix 6

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung 9

3.3 Messtechnik (Kaskadenimpaktor) 16

4 Versuchsergebnisse des Pool Scrubbings 18

4.1 Ergebnisse zur ersten Versuchsreihe 18

4.2 Ergebnisse zur zweiten Versuchsreihe 27

5 Zusammenfassung 37

6 Literatur 39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: SAAB-Versuchsbehälter 10

Abbildung 3.2: Heizmannschetten 11

Abbildung 3.3: Tauchsieder 11

Abbildung 3.4: Schaugläser 12

Abbildung 3.5: Isokinetische Probenahme 13

Abbildung 3.6: Fehler bei isokinetischer Probenahme 14

Abbildung 3.7: Aerosolführung zum Messgerät vor Eintritt in den Behälter 14

Abbildung 3.8: Probeentnahme nach Austritt aus der Flüssigkeitsvorlage 15

Abbildung 3.9: Schematische Darstellung eines Kaskadenimpaktors 16

Abbildung 4.1: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimenten mit CsI-Aerosolen bei verschiedenen Einspeisegastemperaturen (01/02 T_{Gas} = 100°C, 03/04 T_{Gas} = 33°C, 05/07 T_{Gas} = 74°C) 18

Abbildung 4.2: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimenten mit SnO_2-Aerosolen bei verschiedenen Einspeisegastemperaturen (12/13 T_{Gas} = 64°C, 14/15 T_{Gas} = 90°C, 16/17 T_{Gas} = 34°C) 19

Abbildung 4.3: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimente mit CsI-Aerosolen bei verschiedenen Poolhöhen und -temperaturen 20

Abbildung 4.4: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimente mit SnO_2-Aerosolen bei verschiedenen Poolhöhen und -temperaturen 21

Abbildung 4.5: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser bei 1,5 m Wasserüberdeckung und 20°C Wassertemperatur 23

Abbildung 4.6: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser bei 1,5 m Wasserüberdeckung und 80°C Wassertemperatur 24

Abbildung 4.7: Vergleich der Reentrainmentfaktoren APVOR und [Cos01] 25

Abbildung 4.8: Massenanteil der einzelnen Partikelgrößenklassen für SnO_2 und CsI über der siedenden Flüssigkeitsvorlage in Bezug auf die eingespeiste Masse der einzelnen Größenklassen 26

Abbildung 4.9: Beobachtete Korrelation von Becker Technologies GmbH zwischen der Blasenzerplatzrate und dem freigesetzten Partikeldurchmesser (Entnommen aus [Fre18]) 27

Abbildung 4.10: Rückhalteeffizienz bei 2 m Eintauchtiefe und einer Erhöhung des Einspeisemassenstroms (Gas und Dampf) 29

Abbildung 4.11: Rückhalteeffizienz bei 5 m Eintauchtiefe und einer Erhöhung des Einspeisemassenstroms (Gas und Dampf) 29

Abbildung 4.12: Vergleich der Weberzahlen 30

Abbildung 4.13: Ausgewählte Kameraaufnahmen an der Einspeisung in den Behälter 33

Abbildung 4.14: Zusammenhang zwischen der Blasenzerplatzrate und dem freigesetzten Partikeldurchmesser im Rahmen der Experimente der zweiten Versuchsreihe 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Versuchsreihe zum Einfluss der Gas- und Wassertemperatur auf die Partikelrückhaltung 7

Tabelle 3.2: Messunsicherheit der Abscheideeffizienz nach 17

Tabelle 4.1: Minima und Maxima der Abscheideeffizienz in den Versuchen zur Variation der Einspeisegastemperatur mit CsI-Aerosolen 19

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Resuspensionsuntersuchungen 25

Tabelle 4.3: Vergleich der Randbedingungen der SAAB-Anlage zur THAI+-Versuchsanlage 28

Tabelle 4.4: Vergleich der Messergebnisse in der SAAB-Anlage zur THAI-Versuchsanlage 32

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Primärblasenuntersuchungen 34

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AG	Arbeitsgruppe
APVOR	Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BZR	Blasenzerplatzrate
PSS	Plant Simulation and Safety Group
RUB	Ruhr-Universität Bochum
SWR	Siedewasserreaktor

Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
AF	[-]	Anreicherungsfaktor
c_a	[kg/m³]	Aerosolkonzentration in der Atmosphäre
c_O	[kg/m³]	Aerosolkonzentration an der Wasseroberfläche
d	[m]	Durchmesser
DF	[-]	Dekontaminationsfaktor
E	[-]	Entrainmentfaktor
H	[m]	Höhe
$\dot{m}$	[kg/s]	Massenstrom
R	[-]	Reentrainmentfaktor
T	[K]	Temperatur
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$\dot{V}$	[m³/s]	Volumenstrom

Griechische Formelzeichen

Symbol	Einheit	Erläuterung
η	[-]	Rückhalteeffizienz
τ	[s]	Relaxionszeit
ρ	[kg/m³]	Dichte

Indizes

Symbol	Erläuterung
g	Gas
mol	Stoffmengenanteil bzw. „Molanteil“
p	Partikel
sed	Sedimentation
spez	spezifisch
sw	Sumpfwasser
tr	Tröpfchen

Dimensionslose Kennzahlen

Bezeichnung	Definition	Erläuterung
Dekontaminations-faktor	$DF = \frac{\dot{m}_{ein}}{\dot{m}_{aus}}$	Verhältnis zwischen eingespeisten und freigesetzten Aerosolpartikeln
Rückhalteeffizienz	$\eta = \frac{\dot{m}_{ein} - \dot{m}_{aus}}{\dot{m}_{ein}}$	Anteil der ausgewaschen Aerosolpartikel
Reentraimentfaktor	$E = \frac{\dot{m}_{tr}}{\dot{m}_{g}}$	Verhältnis der freigesetzten Flüssigkeitstropfen zum Gasstrom durch die Flüssigkeitsoberfläche
Weber-Zahl	$We = \frac{\rho_p {v_V}^2 d_V}{\sigma}$	Verhältnis des dynamischen Drucks zur Oberflächenspannung

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht ist der zweite Technische Fachbericht zum Forschungsvorhaben „Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen” (APVOR), welches vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV 1501618) gefördert und von der Arbeitsgruppe Plant Simulation and Safety (PSS) an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) bearbeitet wird.

In der Spätphase eines postulierten Unfallszenarios in einem Siedewasserreaktor (SWR) kann aus dem Kühlkreislauf über ein Rohrleitungssystem ein spaltproduktbeladenes Gas-Dampfgemisch in die Wasservorlage der Kondensationskammer geleitet werden. Durch das Einleiten in die Wasservorlage entstehen in der Kondensationskammer mit Aerosolen von Spaltprodukten beladene Gasblasen, die zur Flüssigkeitsoberfläche aufsteigen. Insbesondere die Menge der Partikel, die im Pool verbleiben, wird maßgeblich von der Dynamik an der Grenze zwischen Gas und Flüssigkeit in den Blasen sowie den Transportprozessen von Aerosolen innerhalb der Blasen beeinflusst. [ESC95] Das Ziel des Vorhabens ist u. a. die Erweiterung des Wissensstands bzgl. des Pool Scrubbings durch die Bereitstellung eines Algorithmus zur Abschätzung der Partikelrückhaltung in einer Flüssigkeitsvorlage und die Ergänzung der experimentellen Pool Scrubbing Datenbasis. Dazu werden Experimente an der SAAB-Versuchsanlage am Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe werden der Einfluss der Wasser- und der Gastemperatur sowie der Höheneinflusses auf die Abscheidung löslicher und unlöslicher Partikel in einer Wasservorlage untersucht. Weiterhin werden Partikelwiederfreisetzungsvorgänge aus einer Wasservorlage betrachtet und ihr quantitativer Einfluss auf Pool Scrubbing Versuche wird untersucht. In einer zweiten Versuchsreihe werden Experimente unter ähnlichen Randbedingungen wie die Pool Scrubbing Experimente des THAI-VI Vorhabens (BMWi 1501547) durchgeführt. Dabei soll auch der von Becker Technologies GmbH aufgezeigte, mögliche Zusammenhang zwischen Blasenzerplatzrate und Partikelrückhaltung [FRE18] weiterführend untersucht werden.

Im Anschluss an die Einleitung werden in Kapitel 2 die Begriffe Pool Scrubbing, Blasenzerplatzrate und nasse Resuspension bzw. Entrainment so definiert, wie sie im Rahmen dieses Technischen Fachberichts verwendet werden. Anschließend werden ausgewählte experimentelle Pool Scrubbing Ergebnisse aus der Literatur zusammengefasst, um die hier durchgeführten Experimente einordnen zu können.

In Kapitel drei wird zu Beginn eine Versuchsmatrix der geplanten und durchgeführten Experimente vorgestellt. Die Versuchsanlage, die verwendete Messtechnik sowie die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Umbauten werden beschrieben.

In Kapitel vier werden die Versuchsergebnisse vorgestellt und analysiert. Zunächst werden die Experimente der ersten Versuchsreihe auf einen möglichen Zusammenhang zwischen Rückhalteeffizienz und Einspeisegastemperatur hin untersucht. Danach werden die möglichen Einflussfaktoren Wassertemperatur sowie Höhe der Flüssigkeitsvorlage betrachtet. Dabei werden die Ergebnisse auch experimentellen Ergebnissen aus dem SAAB II Vorhaben gegenübergestellt. Anschließend wird die Reduktion der Abscheideeffizienz durch ein mögliches Aufsieden der Flüssigkeitsvorlage und der Wiederfreisetzung der zuvor in der Flüssigkeitsvorlage zurückgehaltenen Partikel untersucht. In der zweiten Versuchsreihe werden Experimente zum Kondensationseinfluss und zur Hydrodynamik durchgeführt. Zusätzlich zu den zuvor experimentell bestimmten Parametern werden noch Bildaufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht und ausgewertet.

Kapitel fünf fasst den Bericht und insbesondere die Versuchsergebnisse zusammen.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden ergänzend zu den im ersten Technischen Fachbericht des Forschungsvorhabens APVOR (BMUV 1501618) [REH22] erläuterten grundlegenden Begriffen, Depositionsphänomenen und hydrodynamischen Grundlagen des Pool Scrubbings der Begriff „Blasenzerplatzrate“ definiert und im Rahmen der Beschreibung von nassen Resuspensionsphänomenen verwendete Kennzahlen erläutert. Daran anschließend wird auf Erkenntnisse aus Versuchsreihen, die für die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Experimente von besonderem Interesse sind, eingegangen.

2.1 Pool Scrubbing

Wie bereits in [REH22] dargelegt, wird zur Quantifizierung der Wirksamkeit von Partikelabscheidephänomenen durch das Pool Scrubbing der Dekontaminationsfaktor DF als das Verhältnis vom eingespeisten Partikelmassenstrom $\dot{m}_{ein}$ und dem aus der Flüssigkeitsvorlage ausströmenden Partikelmassenstrom $\dot{m}_{aus}$ definiert:

$$DF = \frac{\dot{m}_{ein}}{\dot{m}_{aus}} \tag{1}$$

Eine alternative Darstellung ist die Abscheideeffizienz η, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird:

$$\eta = 1 - \frac{1}{DF} \tag{2}$$

Blasenzerplatzrate

Die Blasenzerplatzrate beschreibt wie viele Primärblasen an der Einspeisedüse unter Wasser in einer Sekunde entstehen und wieder aufbrechen bzw. zerplatzen. Der Kehrwert dieser Rate ist gleichbedeutend mit dem zeitlichen Abstand einer voll ausgebildeten Blase zur nächsten voll ausgebildeten Blase in Sekunden. [FRE18]

Nasse Resuspension

Partikel, die durch eine Wasservorlage bereits abgeschieden worden sind, können durch nasse Resuspensionsphänomene wieder aus dieser freigesetzt werden. Mit Hilfe des Reentraimentfaktors lässt sich die wieder freigesetzte Menge abschätzen. Der Reentraimentfaktor E lässt sich aus dem Quotienten der an der Wasseroberfläche vorhandenen Aerosolkonzentration (c_O) zur wieder freigesetzten Aerosolkonzentration in der Atmosphäre (c_a) durch die ausgetragenen Flüssigkeitstropfen berechnen:

$$E = \frac{c_a}{c_O} \tag{3}$$

Diese Berechnung des Reentrainmentfaktors lässt sich mit Hilfe des Resuspensionanteils R herleiten [JAN22]. Der Resuspensionsanteil ist das Produkt aus Reentraimentfaktor und Anreicherungsfaktors AF:

$$R = E \cdot AF \tag{4}$$

Dabei ist der Reentrainmentfaktor definiert als Massenstrom der freigesetzten Flüssigkeitstropfen über der Flüssigkeitsvorlage $\dot{m}_{tr}$ geteilt durch den Gasmassenstrom $\dot{m}_g$, der durch die effektive Flüssigkeitsoberfläche strömt. Der Anreicherungsfaktor ist definiert als die Aerosolkonzentration an der Oberfläche der Flüssigkeitsvorlage c_O bzw. im freigesetzten Flüssigkeitstropfen c_{tr} geteilt durch die Aerosolkonzentration im Sumpfwasser unter der Annahme eines homogen durchmischten Pools c_{sw}. Der Resuspensionsanteil ergibt sich somit in Gleichung (7) als Quotient der Aerosolkonzentration in der Atmosphäre c_a im Verhältnis zu c_{sw}:

$$R = \frac{\dot{m}_{tr}}{\dot{m}_g} \cdot \frac{c_{tr}}{c_{sw}} = \frac{c_a}{c_{sw}} \tag{5}$$

Der Anreicherungsfaktor ist ein Maß für die homogene Verteilung der abgeschiedenen Partikel im Sumpfwasser. Er sagt aus zu welchem Verhältnis sich die Stoffkonzentration an der Wasseroberfläche zu der im angenommenen homogen durchmischten Sumpfwasser unterscheidet:

$$AF = \frac{c_O}{c_{sw}} \; <=> \; c_{sw} = \frac{c_O}{AF} \tag{6}$$

Mit Hilfe der Äquivalenzumformung in (8) lässt sich Rumformen zu dem Quotienten aus der Aerosolkonzentration in der Atmosphäre multipliziert mit dem Anreicherungsfaktor durch die Aerosolkonzentration an der Wasseroberfläche:

$$R = \frac{c_a}{c_{sw}} = \frac{c_a * AF}{c_O}$$

Mit Hilfe dieser Umformungen lässt sich dann der in (5) beschriebene Reentraimentfaktor in (9) wie folgt herleiten:

(7)

$$E = \frac{R}{AF} = \frac{c_a}{c_O}$$

2.2 Ausgewählte vorausgegangene Pool Scrubbing Experimente

In Bezug auf das Pool Scrubbing wurden signifikante Einflussfaktoren aus der Literatur in einem vorherigen Technischen Fachbericht [REH22] des APVOR Projekts analysiert. Für die im Rahmen des APVOR-Projektes durchgeführten Versuchsreihen sind insbesondere die Experimente von [DEH01, FRE18, LI21, LI22] von Interesse:

Dehbi et al. [DEH01] präsentieren Erkenntnisse aus den integralen POSEIDON-II-Experimenten, die weiter zur Aufklärung der Mechanismen des Pool Scrubbings in leicht unterkühlten Wasservorlagen beitragen. Dabei wurde ein exponentieller Zusammenhang von Wasserüberdeckung und DF bestätigt. Die signifikante Verbesserung des DF durch den Dampfanteil im Trägergas wurde festgestellt, ebenso wie der Einfluss des Trägergasvolumenstroms auf die Aerosolabscheidung. Eine weitere Schlussfolgerung war die nachlassende Rückhaltung bei annähernder Sättigung der Pooltemperatur. Die Partikelgröße erwies sich als weiterer Einflussfaktor für den DF, insbesondere im Bereich größerer Partikeldurchmesser.

Freitag et al. [FRE18] präsentieren eine detaillierte Untersuchung der Dekontaminationsfaktoren bei Veränderung der Wassertemperatur und dem Wasservorlagendruck, dem Dampfmassenanteil und dem Dampfmassenstrom, dem Gasstrom des Trägergases und damit der Veränderung der Weberzahl. Eine zentrale Erkenntnis aus dieser Untersuchung ist die erhöhte Unsicherheit der DF-Daten mit zunehmendem DF. Die Partikelgröße erwies sich als ein maßgeblicher Einflussfaktor, wobei größere Partikel tendenziell effizienter entfernt wurden. Darüber hinaus wurde darauf hingewiesen, dass der Dampfanteil und die Wasserüberdeckung der Wasservorlage Einfluss auf den DF ausüben. Jedoch lässt sich laut *Freitag et al.* die Partikelabscheidung nur schwer auf Einzeleffekte zurückführen.

Li et al. [LI21] untersuchten die Wirkung von Betriebsparametern, insbesondere der Dampfmasse und der Wasserüberdeckung, auf das Pool Scrubbing. Hier wurde deutlich gemacht, dass der DF exponentiell mit der Wasserüberdeckung wie bei *Dehbi et al.* [DEH01] variiert und der Dampfmassenanteil einen signifikanten Einfluss ausübt. Es wurde zudem festgestellt, dass die Partikelgröße in bestimmten Größenbereichen wenig Einfluss auf den DF hat, insbesondere bei flachen Wasservorlagen. *Li et al.* [LI22] ergänzen diese Erkenntnisse durch eine Studie zur Rückhalteeffizienz im Jet-Regime. Dabei wurde festgestellt, dass das Strömungsregime signifikante Unterschiede im DF aufweist. Der Einfluss von Dampfanteil und Eintauchtiefe auf den DF wurde ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass ein höherer Massenfluss zu einer verstärkten Aerosolabscheidung führt, während eine Erhöhung der Anfangstemperatur des Beckens den DF abschwächt.

3 Versuchsanlage und Versuchsmatrix

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Pool Scrubbing Experimente erläutert. Zunächst wird ein Überblick über die Versuchsmatrix gegeben und anschließend die Versuchsanlage und -durchführung vorgestellt.

3.1 Versuchsmatrix

Im Rahmen des Forschungsvorhabens APVOR werden zwei Versuchsreihen zum Pool Scrubbing durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe werden verschiedene Versuche zum Temperatur- und Höheneinfluss, sowie der Aerosolzusammensetzung auf die Abscheideeffizienz während eines Pool Scrubbing Prozesses durchgeführt. Darüber hinaus wird untersucht, welcher Anteil, der zuvor in der Flüssigkeitsvorlage abgeschiedenen Aerosolpartikel, beim Aufsieden wiederfreigesetzt würde. In einer zweiten Versuchsreihe werden neben der Abscheideeffizienz bei variierendem Einspeisemassenstrom und dessen Zusammensetzung, mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommene Bilder der Blasenbildung an der Einspeisedüse ausgewertet.

Ein Überblick über die Randbedingungen der einzelnen Experimente der ersten Versuchsreihe ist in Tabelle 3.1 gegeben. Für die Experimente werden die Stoffe Cäsiumiodid (CsI) (wasserlöslich) und Zinndioxid (SnO_2) (wasserunlöslich) als Aerosolmaterial verwendet. Aufgelistet werden in dieser Tabelle neben dem Stoff auch der Versuchsname, die Höhe der Wassersäule über der Einspeisung (Überdeckung), die freie Weglänge (Abstand des oberen Messpunktes zur Wasseroberfläche) und die Gas- und Wassertemperatur. Als Temperaturen werden die Solltemperaturen aufgelistet und in Klammern die gemessenen Temperaturen. Zunächst wurden Experimente mit SnO_2 bei Umgebungsbedingungen und einer Poolüberdeckung von 1,5 m durchgeführt (vgl. APVOR_VV04/05). Anschließend wurden sechs Versuche mit CsI bei einer Wassertemperatur von ca. 80°C mit einer Variation des Einspeisegastemperatur von 20°C über 80°C bis hin zu 120°C (vgl. APVOR_01-07) durchgeführt. Dieses Szenario wurde mit SnO_2 wiederholt (vgl. APVOR_12-17). Bei einer Poolüberdeckung von 4,5 m wurden diese Versuche nochmals für SnO_2 (vgl. APVOR_19-24) und CsI (vgl. APVOR_25-30) durchgeführt. Um die Stichprobe zu erweitern, wurden noch zusätzlich einzelne Versuche mit SnO_2 (APVOR_31/32) und CsI (APVOR_33-36) bei einer Wassertemperatur von ca. 40°C umgesetzt. Nach dem Versuch APVOR_17 wurde die Wiederfreisetzung durch nasse Resuspension durch ein Aufsieden der Flüssigkeitsvorlage untersucht. Auch die Versuche, um einen Wiedereintrag durch Ablagerungen von Aerosolen in den Leitungen darstellen zu können sind in dieser Tabelle nicht gelistet, da weder vor noch nach der Wasservorlage eine Partikelkonzentration mit dem ELPI+ (vgl. Kap. 3.3) gemessen werden konnte.

Tabelle 3.1 Versuchsreihe zum Einfluss der Gas- und Wassertemperatur auf die Partikelrückhaltung

Versuchsbezeichnung	**Partikel**	**h**	**T_{Wasser}**	**T_{Gas}**
		[m]	**[°C]**	**[°C]**
APVOR_VV01/02/03	CsI	1,5	amb. (20)	amb. (33)
APVOR_VV04/05	SnO_2	1,5	amb. (20)	amb. (33)
APVOR_01/02	CsI	1,5	80 (82)	120 (100)
APVOR_03/04	CsI	1,5	80 (82)	80 (74)
APVOR_05/07	CsI	1,5	80 (82)	20 (33)
APVOR_12/13	SnO_2	1,5	80 (82)	80 (64)
APVOR_14/15	SnO_2	1,5	80 (82)	120 (90)
APVOR_16/17	SnO_2	1,5	80 (82)	amb. (34)
APVOR_19/20	SnO_2	4,5	80 (82)	80 (67)
APVOR_21/22	SnO_2	4,5	80 (82)	120 (91)
APVOR_23/24	SnO_2	4,5	80 (82)	amb. (37)
APVOR_25/26	CsI	4,5	80 (82)	120 (107)
APVOR_27/28	CsI	4,5	80 (82)	80 (71)
APVOR_29/30	CsI	4,5	80 (82)	amb. (35)
APVOR_31/32	SnO_2	4,5	40 (43)	amb. (35)
APVOR_33/34	CsI	4,5	40 (43)	amb. (35)
APVOR_35/36	CsI	4,5	40 (43)	80 (68)

Tabelle 3.2 Zweite Versuchsreihe: Untersuchungen zum Einfluss des Dampfmassenanteils und der Blasen

Versuchsbezeichnung	**Stoff**	**h**	**T_{Gas}**	**T_{Wasser}**	$\dot{m}_{N_2}$	$\dot{m}_{Dampf}$
		[m]	**[°C]**	**[°C]**	**kg/h**	**kg/h**
APVOR-BZ_01/02	SnO_2	2,0	120 (117)	80 (82)	16	16
APVOR-BZ_03/04	SnO_2	2,0	120 (117)	80 (82)	20	20
APVOR-BZ_05/06	SnO_2	2,0	120 (117)	80 (82)	24	24
APVOR-BZ_07/08	SnO_2	2,0	120 (117)	80 (82)	28	28
APVOR-BZ_09/10	SnO_2	5,0	120 (117)	80 (82)	16	16
APVOR-BZ_11/12	SnO_2	5,0	120 (117)	80 (82)	20	20
APVOR-BZ_13/14	SnO_2	5,0	120 (117)	80 (82)	24	24
APVOR-BZ_15/16	SnO_2	5,0	120 (117)	80 (82)	28	28

Die zweite Versuchsreihe wird in Tabelle 3.2 dargestellt. Für diese Versuchsreihe wird SnO_2 als Aerosolmaterial verwendet. Aufgelistet werden in dieser Tabelle neben den Partikeln auch die Versuchsbezeichnung, die Höhe der Wassersäule über der Einspeisung (Überdeckung), die Gas- und Wassertemperaturen sowie die Einspeisemassenströme von Stickstoff $\dot{m}_{N_2}$ und Dampf $\dot{m}_{Dampf}$. Wie zuvor in Tabelle 3.1 werden auch hier die Solltemperaturen angegeben und die in den Versuchen gemessenen Temperaturen in Klammern.

Zunächst wurden acht Versuche bei einer Höhe der Wassersäule über der Einspeisung von 2,0 m durchgeführt. Die Wassertemperatur während der Versuche wurde auf 80°C eingestellt. Die Gas- und Dampftemperatur wurde auf 120°C festgelegt, um Kondensation in der Leitungsführung zu vermeiden. In diesen acht Versuchen wurde der Massenstrom von Stickstoff und Dampf systematisch von anfänglich 32 kg/h (kombiniert 16 kg/h N_2 und 16 kg/h Dampf) auf insgesamt 56 kg/h (28 kg/h je Fluid) in Schritten von 16 kg/h (8 kg/h je Fluid) erhöht. Der Dampfmassenanteil wurde konstant auf ca. 50 % gehalten. Dieses Vorgehen wurde in weiteren acht Versuchen bei einer Höhe der Wassersäule von 5,0 m wiederholt.

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Experimente wurden von PSS in der SAAB-Versuchsanlage am Forschungszentrum Jülich durchgeführt. Der Versuchsbehälter ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Er besteht aus fünf identischen Ringen mit einem Durchmesser von 1,5 m und einer Höhe von 1 m und zusätzlich aus einem Bodensegment und einer Haube. Mit Hilfe dieses Setups lassen sich für verschiedene Wasserstände ähnliche Versuchsbedingungen an der Wasseroberfläche schaffen. Auf der linken Seite der Abbildung 3.1 ist der SAAB-Behälter und auf der rechten Seite seine ursprüngliche Instrumentierung dargestellt. Bevor ein Aerosolstrom die Wasservorlage durchläuft, lassen sich vorher die Eigenschaften wie Druck (PI), Temperatur (TI), Feuchtigkeit (MI) und die Partikelkonzentrationen bestimmen. Für die Versuchsführung während der Experimente des APVOR-Projektes wurde die Versuchsanlage entweder mit 2,25 m (1,5 m Eintauchtiefe) oder 5,25 m (4,5 m Eintauchtiefe) Wasser gefüllt. Über der Wasservorlage wurde noch ein weiteres Segment des SAAB gesetzt und somit ca. 1 m freies Gasvolumen erzeugt, um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse im Rahmen der Untersuchung zur nassen Resuspension mit Versuchen der ETH Zürich [COS01] zu gewährleisten (vgl. Kap. 4.1).

Die Durchführung der Versuche verlief immer nach dem gleichen Schema:

Zu Beginn erfolgte die Einspeisung des Aerosols in die Mischkammer, bis eine gleichmäßige Konzentration gewährleistet war. Hierbei wurde das Aerosol über einen Bypass in die Abluft aus der Mischkammer abgeleitet. Nach dieser Phase wurden die Ventile zu den Aerosolmessgeräten geöffnet, und das Aerosol wurde in den Versuchsbehälter eingespeist. Dieser Zustand wurde für etwa 60 Minuten aufrechterhalten, um einen nahezu stationären Zustand zu

erreichen, welcher eine optimale Erfassung der Aerosoleigenschaften ermöglichte. Mit Abschluss dieser stationären Phase wurde die Einspeisung in den Behälter gestoppt, und die gesamte Anlage wurde heruntergefahren. Dieser standardisierte Versuchsablauf wurde konsequent eingehalten, um konsistente Bedingungen zu gewährleisten und präzise Daten zu erfassen.

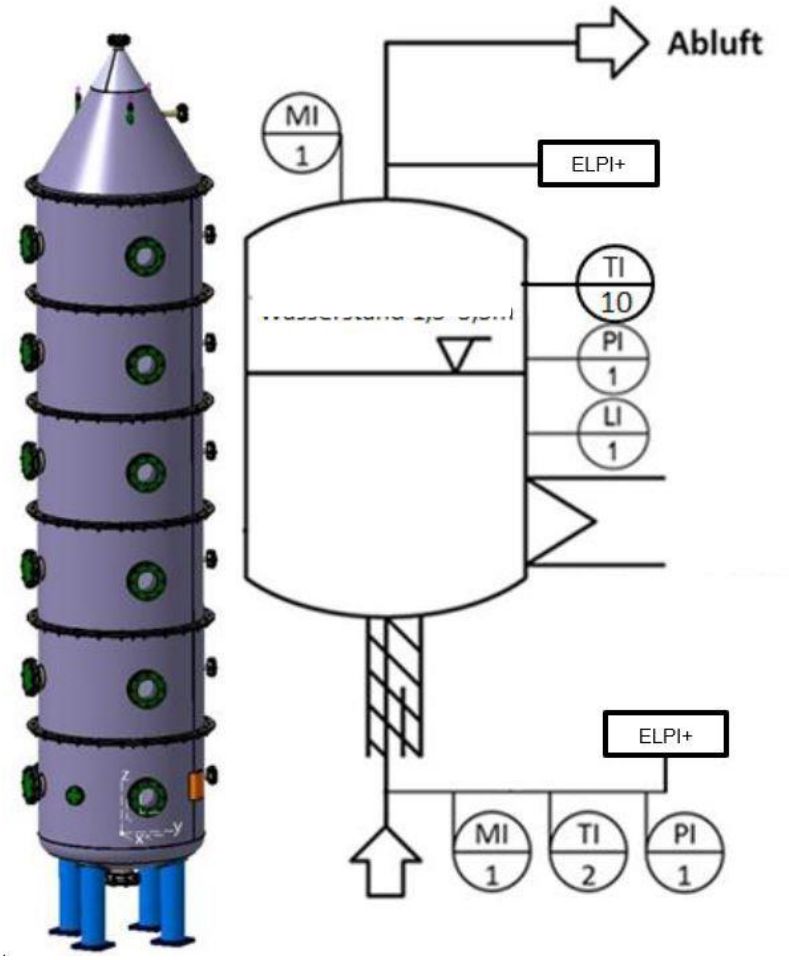

Abbildung 3.1: SAAB-Versuchsbehälter (in Anlehnung an [ALL18])

3.2.1 Erweiterungen der SAAB-Versuchsanlage

Um die geforderten Versuche (vgl. Tabelle 3.1) umsetzen zu können, musste die SAAB-Versuchsanlage entsprechend angepasst werden. Die Versuchsanlage verfügte vor Beginn des Projektes APVOR nur über die Möglichkeit den Pool bis zu einem maximalen Wasserstand von 2,25 m zu beheizen. Um die geplanten Versuche aus Tabelle 3.1 realisieren zu können, wurden für vier weitere Segmente des Behälters Heizmannschetten (vgl. Abbildung 3.2) installiert. So konnten möglichst gleichmäßige thermische Bedingungen innerhalb des Versuchsbehälters bei vollem Aufbau erreicht werden.

Abbildung 3.2: Heizmannschetten

In Abbildung 3.3 ist ein nachgerüsteter Tauchsieder abgebildet. Der Tauchsieder hat eine Nennleistung von 25 kW. Dieser wurde eingebaut, um die Wasservorlage in dem SAAB-Versuchsbehälter schneller und zielgerichteter aufheizen zu können. So konnten die Versuche unter Berücksichtigung einer siedenden Wasservorlage realisiert werden.

Abbildung 3.3: Tauchsieder

Zur Beobachtung der Blasenbildung mittels Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen in der SAAB-Versuchsanlage wurden zusätzliche Schaugläser nachgerüstet (vgl. Abbildung 3.4). Diese ermöglichen die Beobachtung der Strömung innerhalb der Versuchsanlage über den

gesamten Querschnitt. Durch dieses Upgrade besitzt die SAAB-Versuchsanlage für jeden Ring zwei optische Zugänge (vgl. Abbildung 3.1). Einer dieser beiden kann zur Beobachtung und der andere kann zur Beleuchtung benutzt werden. Diese Nachrüstung ermöglicht u. a. die Bestimmung der Blasenzerplatzrate.

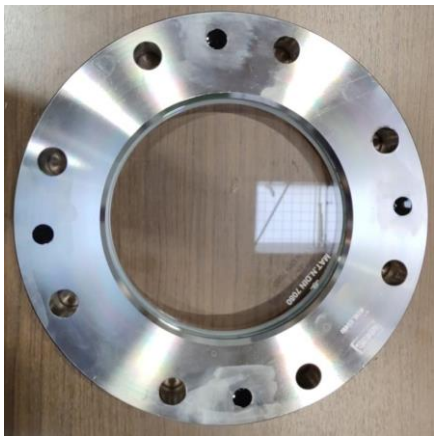

Abbildung 3.4: Schaugläser

3.2.2 Probenentnahme

Am SAAB-Versuchsstand gibt es zwei Möglichkeiten zur Probeentnahme. Aufgrund unterschiedlicher Strömungsverhältnisse unterliegen sie verschiedenen Prinzipien, die in diesem Kapitel näher erläutert werden. Vor dem Eintritt in den Behälter erfolgt eine Probeentnahme nach dem isokinetischen Prinzip, da die Probe aus einem strömenden Gas extrahiert werden muss. Oberhalb der Wasseroberfläche wird die Probe unter sogenannten „Still-Air-Bedingungen“ entnommen, da dort aufgrund niedriger Strömungsgeschwindigkeiten von nahezu ruhender Luft ausgegangen werden kann. Um eine repräsentative Probe aus Aerosolströmen zu entnehmen, müssen die Rahmenbedingungen dieser Prinzipien beachtet werden. Auch die Depositionsmechanismen gilt es zur genaueren Messung möglichst gering zu halten. Bei der Leitungsführung zu den jeweiligen Messgeräten ist somit auf möglichst wenig oder nur geringfügige Umlenkung der Strömung zu achten, um eine Impaktion zu vermeiden. Weiterhin ist zur Minimierung von Ablagerungen durch Diffusion und Sedimentation auf möglichst kurze Leitungsführungen zu achten. Zur Vermeidung von Thermophorese kann es sinnvoll sein, Leitungen zu beheizen. Ebenfalls wird durch eine kurze Leitungsführung die Verweilzeit des Aerosols in den Leitungen möglichst geringgehalten und dadurch Verfälschungen durch Koagulation minimiert.

Isokinetische Probeentnahme

Um eine repräsentative Probe bezüglich der Anzahlkonzentration und Partikelgrößenverteilung aus einem Aerosolstrom zu extrahieren, muss die Probenentnahme unter bestimmten Kriterien erfolgen. Hinds hat in seiner Arbeit „Aerosol Technology“[HIN99] die Faktoren, die

eine Messung negativ beeinflussen (vgl. Abbildung 3.6), und Vorgaben zur Messung (vgl. Abbildung 3.5), herausgestellt:

Wie in Abbildung 3.5 dargestellt, ist bei einer isokinetischen Probeentnahme darauf zu achten, dass die Geschwindigkeiten im Proberohr (U) und in der Hauptströmung (U_0) näherungsweise identisch sind. Bei gegebener Geschwindigkeit der Hauptströmung kann dafür sowohl der Durchmesser der Probenentnahme als auch der Volumenstrom der Beprobung variiert werden. Zugleich sollte darauf geachtet werden, dass das Probeentnahmerohr parallel zur Hauptströmung ausgerichtet und mit einer Phase versehen ist, um eine Ablösung oder Turbulenzen am Eintritt zu vermeiden bzw. möglichst gering zu halten.

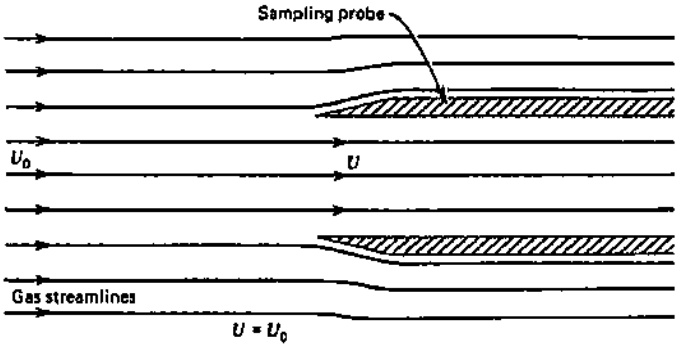

Abbildung 3.5: Isokinetische Probenahme nach Hinds [HIN99**]**

Mögliche Fehler, die bei der isokinetischen Probeentnahme auftreten können, sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Falls die Probenahme nicht parallel, sondern unter einem größeren Winkel erfolgt (vgl. a), führt dies zu einer ungewollten Impaktion von größeren Teilchen und diese werden nicht gemessen. Wenn die Sonde wie im Fall b) richtig ausgerichtet ist, aber die Geschwindigkeit in der Probenentnahme zu hoch ist, führt dies zu einer Überschätzung der Konzentration, insbesondere von kleinen Partikeln. Ist die Geschwindigkeit im Bereich der Probeentnahme zu gering (vgl. c), gelangen speziell zu wenig kleine Partikel in die Probeentnahme. Dies führt wiederum zu einer Unterschätzung der Konzentrationen [HIN99].

Zusammenfassend ist die Probeentnahme also so auszulegen, dass die Stromlinien im Entnahmebereich nur geringfügig abgelenkt werden. Hinds gibt in seiner Arbeit eine Abweichungstoleranz der Geschwindigkeit von ca. 10 % an. An diesem Wert gilt es sich zu orientieren, um eine möglichst repräsentative Probe aus einem Aerosolstrom zu erhalten [HIN99].

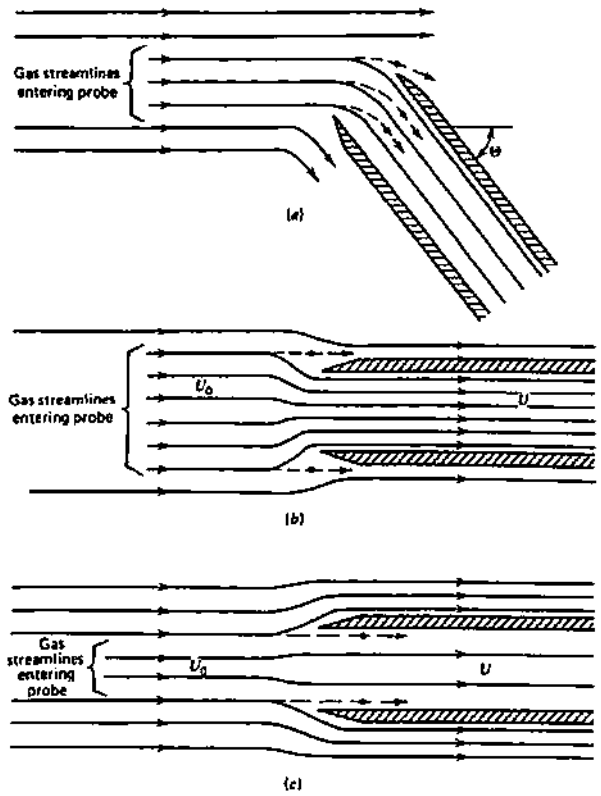

Abbildung 3.6: Fehler bei isokinetischer Probenahmenach Hinds [HIN99]. a) geometrischer Ausrichtungsfehler; b) zu hoher Durchfluss durch die Probenahme; c) zu niedriger Durchfluss

In Abbildung 3.7 wird die Aerosolführung zum Messgerät vor dem Eintritt in den Behälter dargestellt. Nach isokinetischer Entnahme einer Probe aus dem Aerosolstrom wird diese durch eine zweistufige Verdünnung und anschließend in das Messgerät geleitet. Zur Bestimmung des Verdünnungsverhältnisses ist vor Eintritt der Probe in das Messgerät eine Gasanalytik angeschlossen.

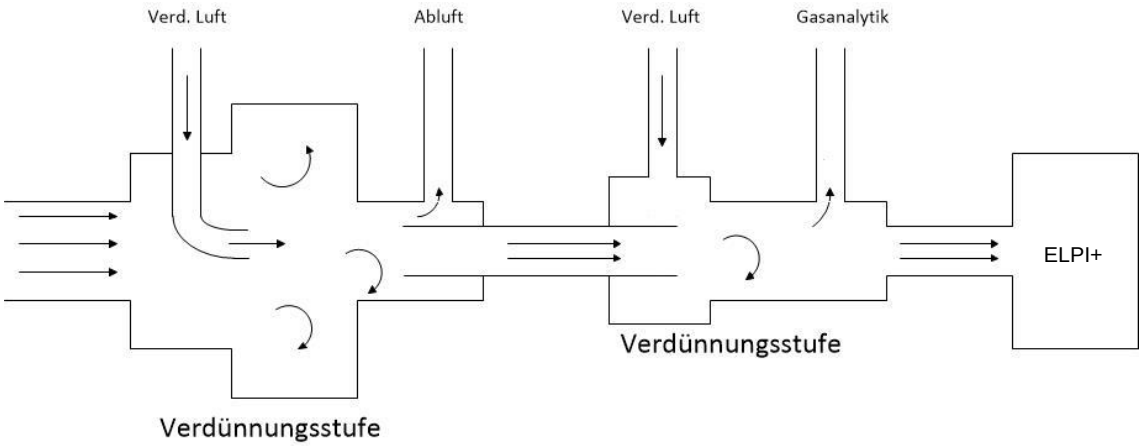

Abbildung 3.7: Aerosolführung zum Messgerät vor Eintritt in den Behälter

Probeentnahme bei „still air“-Bedingungen

Bei nur geringen Strömungsgeschwindigkeiten kann statt der isokinetischen Auslegung der Probeentnahme eine vereinfachte Probeentnahme genutzt werden. Dabei handelt es sich um die Probeentnahme aus ruhender oder nahezu ruhender Luft. Die Anforderungen unter diesen sogenannten „still air“ Bedingungen unterscheiden sich im Vergleich zur isokinetischen Probeentnahme. Mögliche Fehler bei dieser Probeentnahme resultieren aus der Absetzgeschwindigkeit und der Trägheit der Partikel. Zu beachten ist, dass der Durchmesser der Probeentnahme D_S im Rahmen bestimmter Grenzen ausgelegt sein muss. Diese Grenzen lassen sich mithilfe der folgenden Formel bestimmen:

$$10 \cdot \left(\frac{\dot{V} \cdot \tau}{4 \cdot \pi}\right)^{\frac{1}{3}} \leq D_S \leq \frac{2}{5} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{\pi \cdot \tau \cdot g}\right) \tag{8}$$

Hierbei ist g die Erdbeschleunigung, τ die Relaxationszeit und $\dot{V}$ der Volumenstrom. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Geschwindigkeit der Hauptströmung einen Grenzwert von v_{grenz} nicht überschreitet:

$$v_{grenz} \leq \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\dot{V}}{4 \cdot \pi \cdot \tau^2}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{9}$$

Abbildung 3.8 zeigt die Probenentnahme oberhalb der Wasservorlage und die Aerosolführung zum Messgerät. Zur Vermeidung bzw. zur Minimierung von Kondensationseffekten und Deposition von Aerosolen durch Thermophorese, werden die gesamte Leitungsführung und das Messgerät auf 120 °C beheizt.

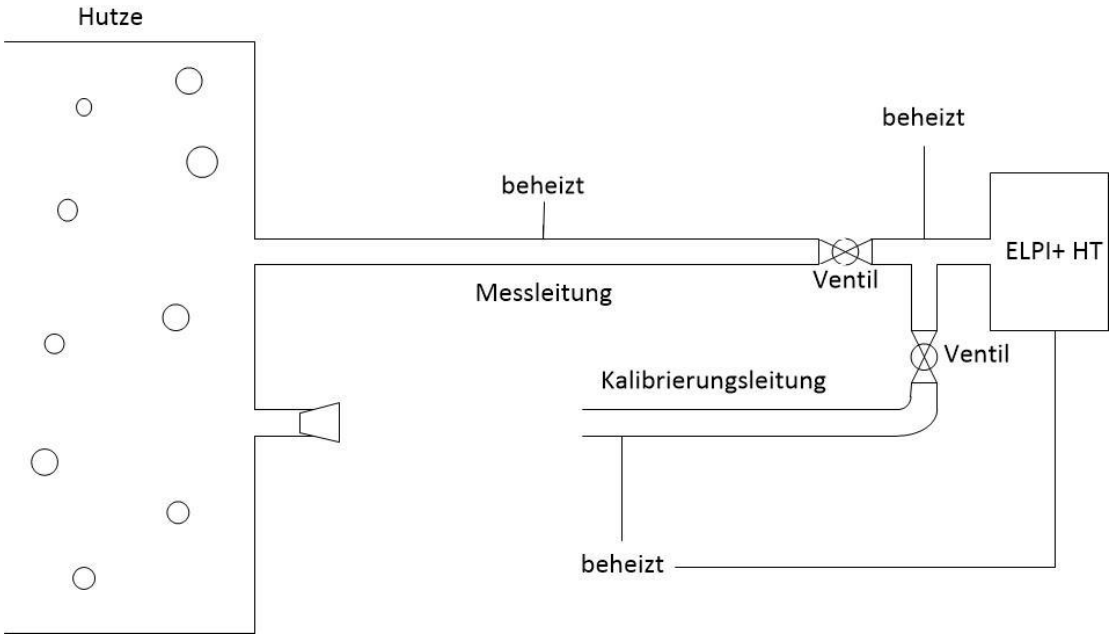

Abbildung 3.8: Probeentnahme nach Austritt aus der Flüssigkeitsvorlage

3.3 Messtechnik (Kaskadenimpaktor)

Die Kaskadenimpaktoren machen sich den Depositionsmechnismus Impaktion zunutze und sind ein sehr gängiges Messverfahren für Aerosole. In dieser Arbeit wurden elektrische Niederdruck-Kaskadenimpaktoren (ELPI, engl.: Electrical Low Pressure Impactors) verwendet. Ein Nachfolgemodell mit dem gleichen Messprinzip wird unter dem Namen ELPI+ geführt. In beheizbarer Variante werden die ELPIs mit dem Zusatz HT (High Temperature) geführt. In Abbildung 3.9 wird das Messprinzip eines Kaskadenimpaktors veranschaulicht.

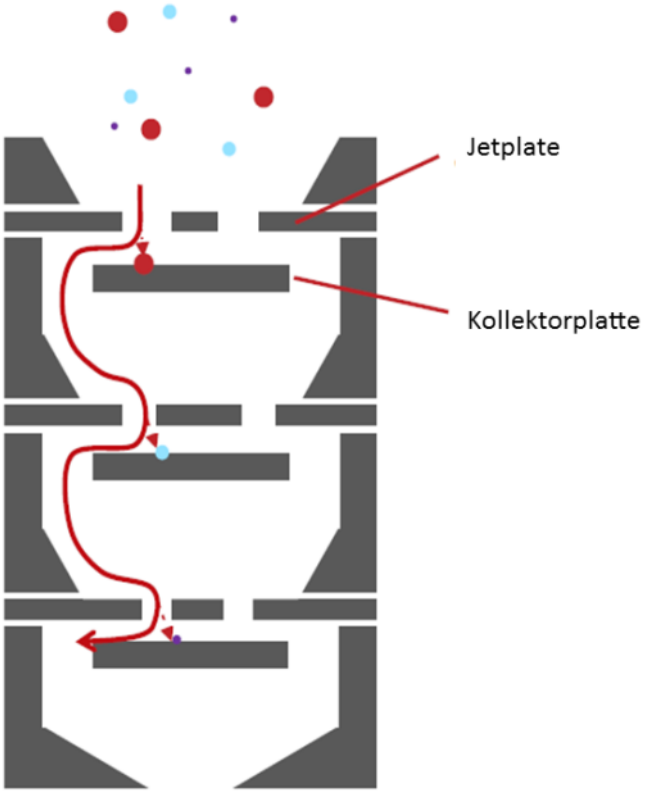

Abbildung 3.9: Schematische Darstellung eines Kaskadenimpaktors [LAM18]

Der Kaskadenimpaktor besteht aus mehreren Impaktorstufen. Jede Stufe besitzt eine so genannte Jetplate zur Beschleunigung des Aerosols und eine Kollektorplatte, auf der die abgeschiedenen Partikel gesammelt werden. Am Einlass sind größere Jetplates vorhanden, an denen kleine Geschwindigkeiten und geringe Umlenkungen auftreten, und somit vorwiegend große Partikel abgeschieden werden. Zum Auslass hin sind immer kleinere Jetplates vorhanden, die eine immer stärkere Umlenkung mit größeren Geschwindigkeiten verursachen, was zum Abscheiden immer kleinerer Partikel führt. Um die Partikel beim Auftreffen auf die Kollektorplatten messen zu können, werden sie vor dem Eintritt in die Kaskade elektrisch aufgeladen. Beim Auftreffen auf der jeweiligen Kollektorplatte wird die Ladung abgegeben und das resultierende Stromsignal über ein Elektrometer abgegriffen. Geräteintern wird von dem

gemessenen Stromsignal auf eine Partikelanzahl zurückgerechnet. So lässt sich mithilfe des ELPIs eine Online-Messung der Anzahl- und Massenkonzentration eines Aerosols erstellen.

Die verwendeten ELPI+ haben eine Größenauflösung von 6 nm bis 10 µm bei 14 Kanälen. Durch die Aerosolmessung vor und nach Eintritt in den Behälter lässt sich über die Massenkonzentrationen eine Filtereffizienz (Rückhalteeffizienz) der SAAB-Anlage bestimmen.

Fehleranalyse der Messtechnik

Neben den potenziellen Unregelmäßigkeiten bei der Probeentnahme und Leitungsführung dürfen auch die Messgerätefehler nicht außer Acht gelassen werden. Deshalb wurde bereits in [VEN22] eine ausführliche Untersuchung der Messunsicherheit für die Abscheideeffizienz durchgeführt, deren Ergebnis in Tabelle 3.2 zusammengefasst dargestellt ist.

Tabelle 3.2: Messunsicherheit der Abscheideeffizienz nach [VEN22]

di [µm]	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,5**	**0,8**	**1,2**	**2,0**	**3,1**	**5,1**
-η [%]	0,2	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,4	2,1
+η [%]	0,2	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,9

4 Versuchsergebnisse des Pool Scrubbings

Nachfolgend werden die Messergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt und erläutert. In Abschnitt 4.1 werden insbesondere die Versuchsergebnisse zum Einfluss der Wasser- und Gastemperatur detailliert präsentiert. In Abschnitt 4.2 werden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe hinsichtlich des Einflusses des Dampfgehaltes und der Weberzahl analysiert.

4.1 Ergebnisse zur ersten Versuchsreihe

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zum Einfluss der Wasser- und Gastemperatur auf die Partikelabscheidung beschrieben. In Abbildung 4.1 sind die Versuche für CsI bei einer Poolabdeckung von 1,5 m und der Veränderung der Einspeisetemperatur dargestellt. Die Rückhalteeffizienz wird über den aerodynamischen Durchmesser der Aerosolpartikel aufgetragen. Diese Auftragung wird auch in den weiteren hier vorgestellten Diagrammen präferiert.

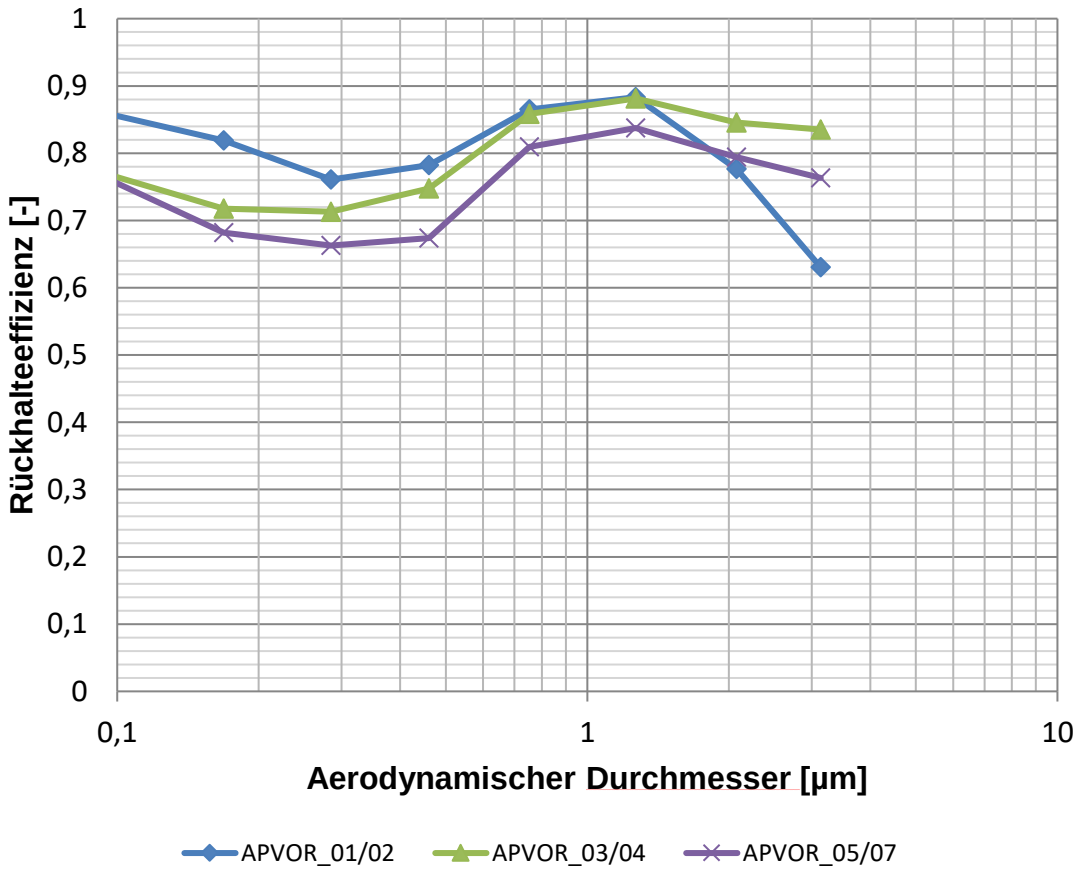

Abbildung 4.1: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimenten mit CsI-Aerosolen bei verschiedenen Einspeisegastemperaturen (01/02 T_{Gas} = 100°C, 03/04 T_{Gas} = 33°C, 05/07 T_{Gas} = 74°C)

Im Bereich von 0,17 µm bis 1,27 µm weisen die drei Einspeisegastemperaturen einen ähnlichen Verlauf auf. Im Bereich von 0,17 µm bis 0,29 µm fällt die Abscheideeffizienz auf ein

Minimum und steigt anschließend bis zu ihrem Maximum bei ca. 1,27 µm wieder an. Anschließend zeigen die Abscheideeffizienzen einen leicht abfallenden Verlauf für 80°C und Umgebungstemperatur, für 120°C Einspeisegastemperatur allerdings einen stark abfallenden Verlauf in der Abscheideeffizienz. Die exakten Werte der Minima und Maxima sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Minima und Maxima der Abscheideeffizienz in den Versuchen zur Variation der Einspeisegastemperatur mit CsI-Aerosolen

T_{Gas}	Minimum		Maximum	
	d_p	η	d_p	η
[°C]	[µm]	[-]	[µm]	[-]
20	0,29	0,66	1,27	0,84
80	0,29	0,71	1,27	0,88
120	0,29	0,76	1,27	0,88

Abbildung 4.2 zeigt die Versuche mit SnO_2 bei einer Poolabdeckung von 1,5 m und einer Veränderung der Einspeisegastemperatur. Im Gegensatz zu den Experimenten mit CsI (vgl. Abbildung 4.1) ist ein deutlich geringerer Einfluss der Einspeisegastemperatur zu erkennen. Die Abscheideeffizienz liegt für SnO_2 für alle Größenklassen in einem Bereich größer 0,8. Durch die Steigerung der Gastemperatur lässt sich eine leicht steigende Abscheideeffizienz über alle Größenklassen außer bei einem Durchmesser von 0,46 µm erkennen. Somit ist eine Änderung des Filterlochs im Bereich von 0,29 µm hin zu 0,46 µm zu erkennen.

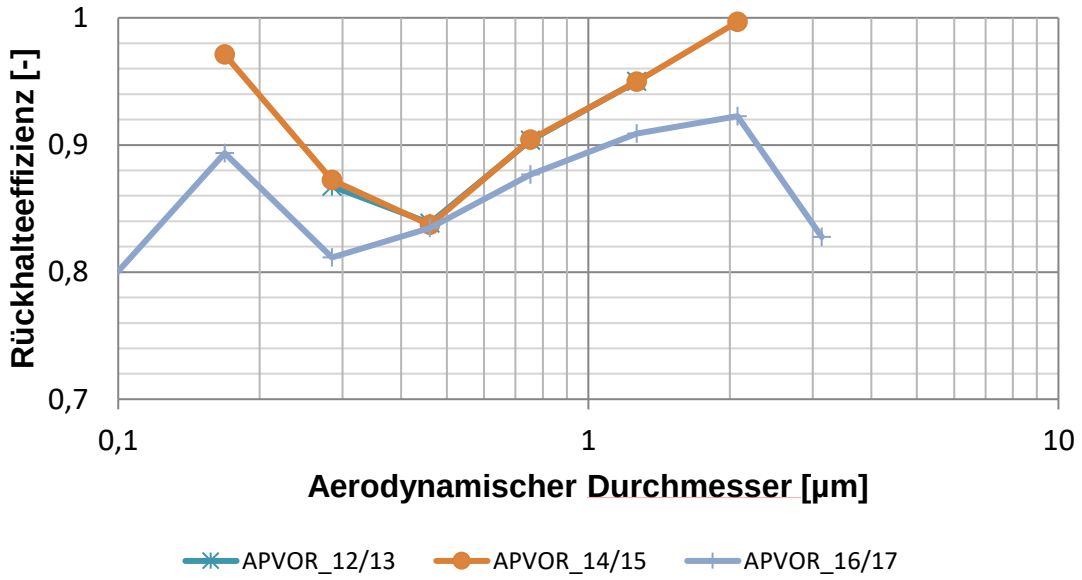

Abbildung 4.2: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimenten mit SnO_2-Aerosolen bei verschiedenen Einspeisegastemperaturen (12/13 T_{Gas} = 64°C, 14/15 T_{Gas} = 90°C, 16/17 T_{Gas} = 34°C)

Über die gesamte hier untersuchte Spanne an Einspeisegastemperaturen zeigen sich zwar Änderungen in der Abscheideeffizienz der einzelnen Partikelgrößenklassen, jedoch kann kein eindeutiger Trend festgestellt werden. In den Experimenten mit SnO_2 zeigt sich zwar eine Steigerung in nahezu allen Partikelgrößenklassen für eine Erhöhung der Einspeisegastemperatur von 30°C auf 60°C, jedoch keinerlei Veränderung der Abscheideeffizienz bei einer weiteren Steigerung der Gastemperatur von 60°C auf 90°C (vgl. Abbildung 4.2).

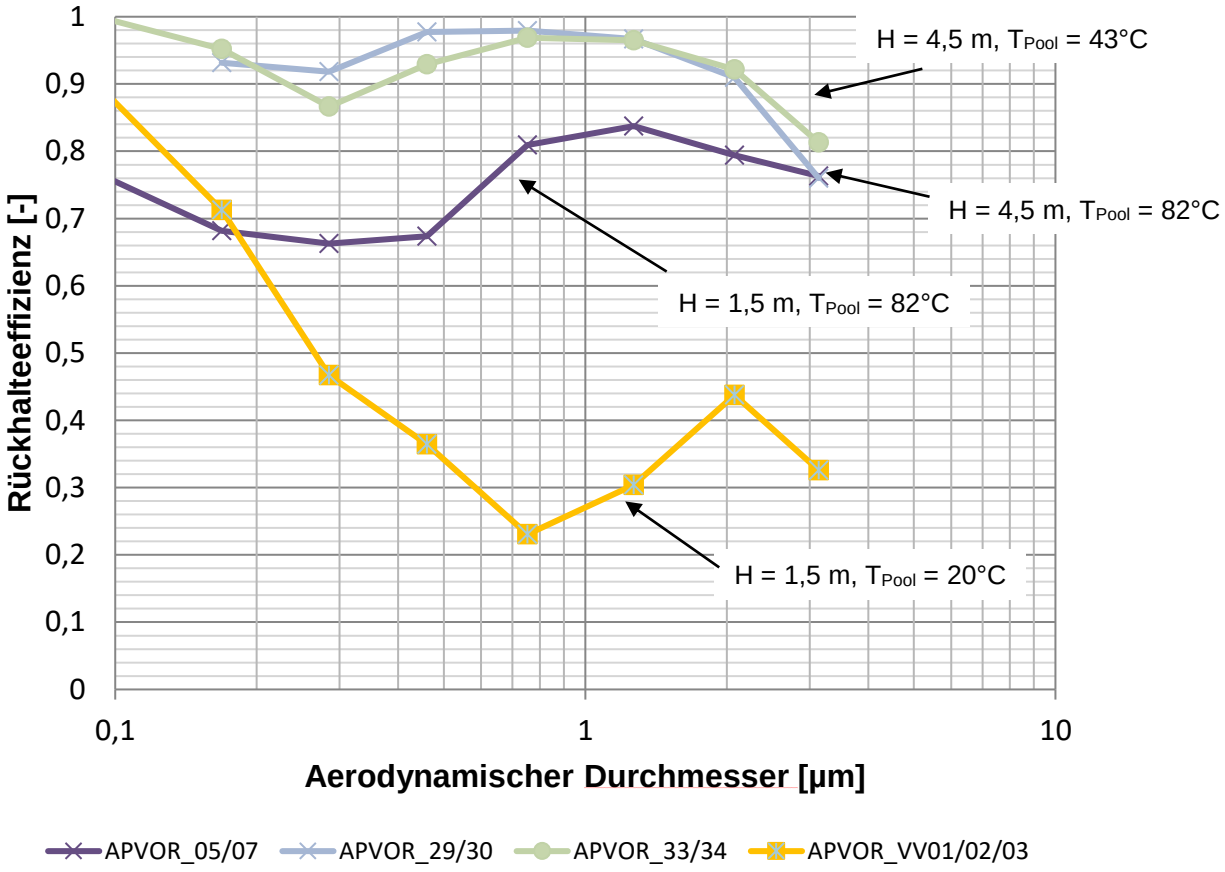

Abbildung 4.3: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimente mit CsI-Aerosolen bei verschiedenen Poolhöhen und -temperaturen

In Abbildung 4.3 sind die Versuche zur Veränderung der Poolhöhe und der Pooltemperatur für CsI dargestellt. Die Ergebnisse zu APVOR_12/13 liegen dabei unterhalb der Ergebnisse zu APVOR _14/15. Die Kurve für CsI bei Umgebungsbedingungen weist die geringste Abscheideeffizienz und das ausgeprägteste Minimum in der Abscheidung (Filtergap) auf. Das Filtergap liegt bei einem Durchmesser von 0,75 µm und einer Rückhalteeffizienz von 0,23. Auch im Bereich von 0,29 µm bis 3,14 µm liegt die Abscheideeffizienz unterhalb 0,5 und damit deutlich niedriger als in den anderen Versuchen mit CsI. Bei einer Einspeisung mit einer Gastemperatur nahe der Umgebungstemperatur und einer Erhöhung der Pooltemperatur auf ca. 80°C ist eine höhere Abscheideeffizienz erkennbar. Sie liegt für alle gemessenen Größenklassen

oberhalb 0,67. Bei einer Erhöhung der Wasserabdeckung auf 4,5 m wird im Bereich von 0,17 µm bis 2,08 µm eine Rückhalteeffizienz über 0,9 ermittelt.

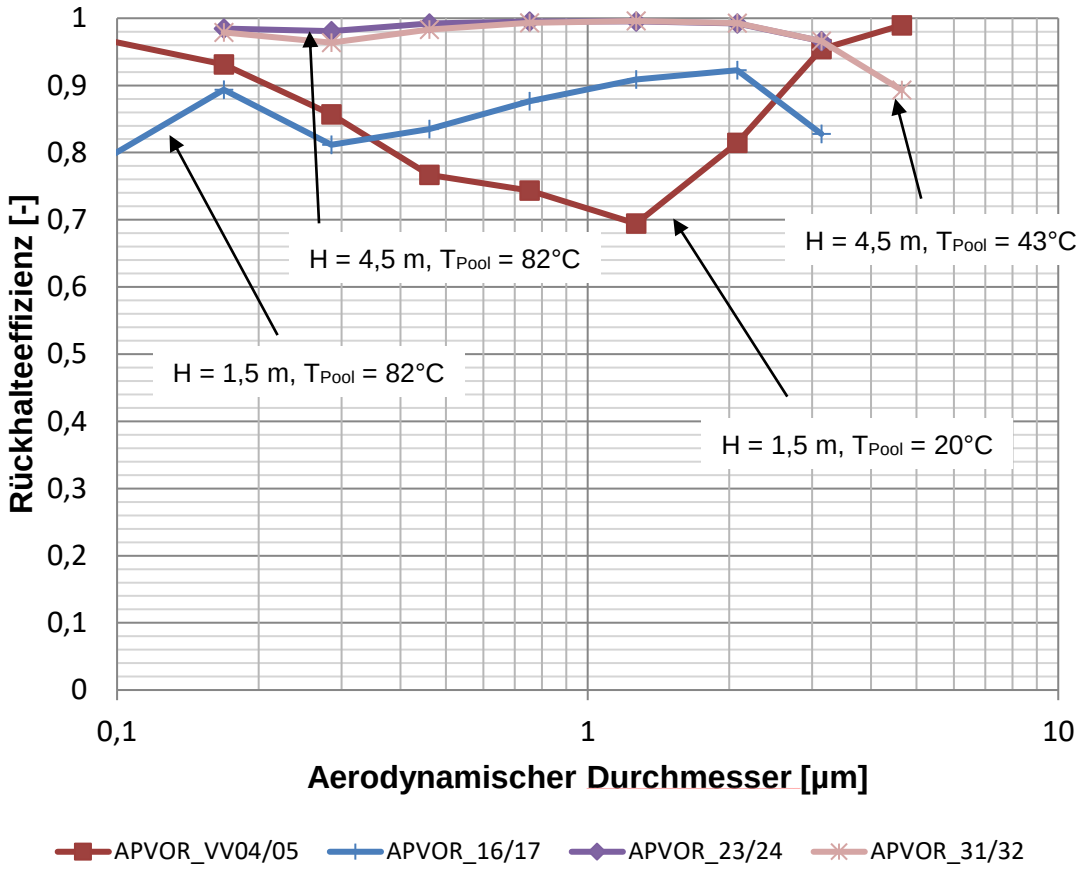

Abbildung 4.4: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene Aerodynamische Partikeldurchmesser in Pool Scrubbing Experimente mit SnO_2-Aerosolen bei verschiedenen Poolhöhen und -temperaturen

Abbildung 4.4 zeigt ähnlich wie Abbildung 4.3 eine Veränderung der Poolhöhe und der Pooltemperatur mit dem Unterschied des verwendeten Aerosols SnO_2. Im Vergleich zur Abbildung 4.3 liegt die Abscheideeffizienz für alle Versuche und Größenklassen bei ca. 0,7 oder höher. Bei der Verwendung von SnO_2 wird ähnlich wie beim CsI die geringste Abscheidung für das Aerosol bei Umgebungsbedingungen (Gas und Wasser) wahrgenommen. Auch hier zeichnet sich die deutlichste Ausprägung eines Filterlochs für diese Randbedingungen ab. Für SnO_2 liegt dieser Bereich allerdings bei 0,69 µm und 1,3 µm (vgl. Abbildung 4.4) und damit höher und bei einem anderen Durchmesser als beim löslichen CsI (vgl. Abbildung 4.3). Für die Erhöhung der Pooltemperatur findet im Bereich vom 0,46 µm bis 2 µm eine Erhöhung der Abscheideeffizienz statt. Die größte Differenz befindet sich bei 1,3 µm. Für eine Pooltemperatur von 80°C liegt das Filtergap bei einem Durchmesser von 0,29 µm. Damit verändert sich der am schlechtesten abgeschiedene Durchmesser analog zu CsI hin zu kleineren Durchmessern bei Erhöhung der Pooltemperatur. Bei erhöhter Poolhöhe und Pooltemperatur zeichnet sich

kein deutliches Filtergap in diesem Bereich mehr ab und eine Tendenz lässt sich wie auch bei 1,5 m bei 0,29 µm erkennen. Die Abscheideeffizienz ist deutlich höher als bei 1,5 m.

Einfluss der Wasserüberdeckung und -temperatur

Die hier durchgeführten Experimente bestätigen vorherige Untersuchungen aus der Literatur, dass die Partikelabscheidung mit steigender Wasserüberdeckung zunimmt. Mit steigender Wasserüberdeckung steigt auch die Verweilzeit der Aerosole im Wasser. Da jeder Abscheidemechanismus abhängig von der Verweilzeit der Blasen innerhalb der Wasservorlage ist, zeigt sich hier eine deutliche Erhöhung der Abscheideeffizienz. Entgegen den Forschungsergebnissen von [LI22, DEH01] steigt mit steigender Pooltemperatur auch die Abscheidung. Dass in vorherigen Untersuchungen gegenteilige Beobachtungen aufgetreten sind, ist darauf zurückzuführen, dass bei den Experimenten von [LI22] und [DEH01] zusätzlich Dampf eingespeist worden ist. Bei einer zusätzlichen Dampfeinspeisung wird der Dampfkondensationseffekt durch eine höhere Pooltemperatur abgeschwächt und somit werden mit höherer Pooltemperatur weniger Aerosole abgeschieden. Wenn jedoch kein Dampf eingespeist wird, sollte die Abscheidung der Aerosole wie beobachtet in den Versuchen mit steigender Pooltemperatur steigen. Eine steigende Pooltemperatur begünstigt die Deposition von Aerosolen durch Diffusion und durch Koagulation, besonders wenn die Gastemperatur höher ist als die Pooltemperatur und das Einspeisegas nicht trocken ist. Des Weiteren verringert sich die Oberflächenspannung von Wasser mit steigender Temperatur und somit lassen sich die Aerosole einfacher vom Wasser „einfangen“. Für die hier vorgestellten Versuche verringert sich die Oberflächenspannung um ca. 12%.

In Abbildung 4.5 ist die Rückhalteeffizienz für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser, die in den Pool Scrubbing Experimenten des SAAB II Vorhabens des Forschungszentrums Jülich (FZJ) mit SnO_2 Partikeln, sowie in den APVOR Experimenten mit SnO_2 und CsI gemessen wurden, dargestellt. Im Größenklassenbereich bis 0,5 µm liegen die ermittelten Werte im SAAB II Versuch und im APVOR Versuch mit SnO_2 nahe beieinander. Überraschenderweise liegen die Rückhalteeffizienzen des SAAB II Versuchs im Bereich von aerodynamischen Partikeldurchmessern größer als 1 µm näher an den im Rahmen des APVOR Vorhabens in den Experimenten mit CsI ermittelten Rückhalteeffizienzen. Insbesondere bei einem aerodynamischen Partikeldurchmesser von ca. 1,3 µm zeigt sich eine enorme Differenz zwischen der ermittelten Rückhalteeffizienz im SAAB II (ca. 20 %) und im APVOR (SnO_2) Versuch (ca. 70 %).

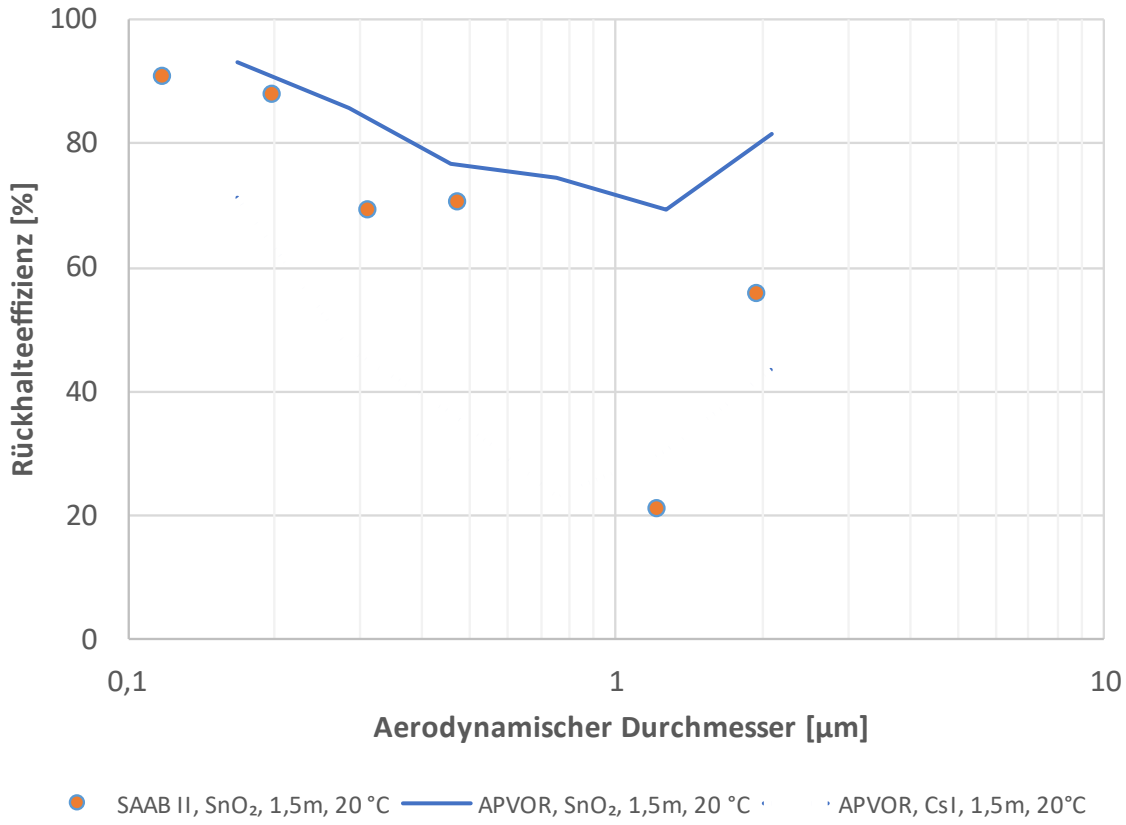

Abbildung 4.5: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser bei 1,5 m Wasserüberdeckung und 20°C Wassertemperatur

Analog zu Abbildung 4.5 ist in Abbildung 4.6 die Rückhalteeffizienz für die Pool Scrubbing Experimente bei einer Wassertemperatur von 80°C dargestellt. Anders als in den Experimenten bei einer Wassertemperatur von 20°C zeigt sich hier eine gute Übereinstimmung zwischen den SAAB II und den APVOR Messungen für die Rückhalteeffizienz in den Experimenten mit SnO_2 bei aerodynamischen Durchmessern von 0,2 µm und 2 µm. Auffällig sind die im SAAB II Vorhaben ermittelten Rückhalteeffizienzen bei aerodynamischen Durchmessern von 0,3 µm, 0,5 µm und 0,8 µm. Hier wurde ein deutliches Absinken der Rückhalteeffizienz bis unter 60 % festgestellt. Diese verringerte Partikelrückhaltung konnte in den APVOR Experimenten weder für SnO_2 noch für CsI beobachtet werden.

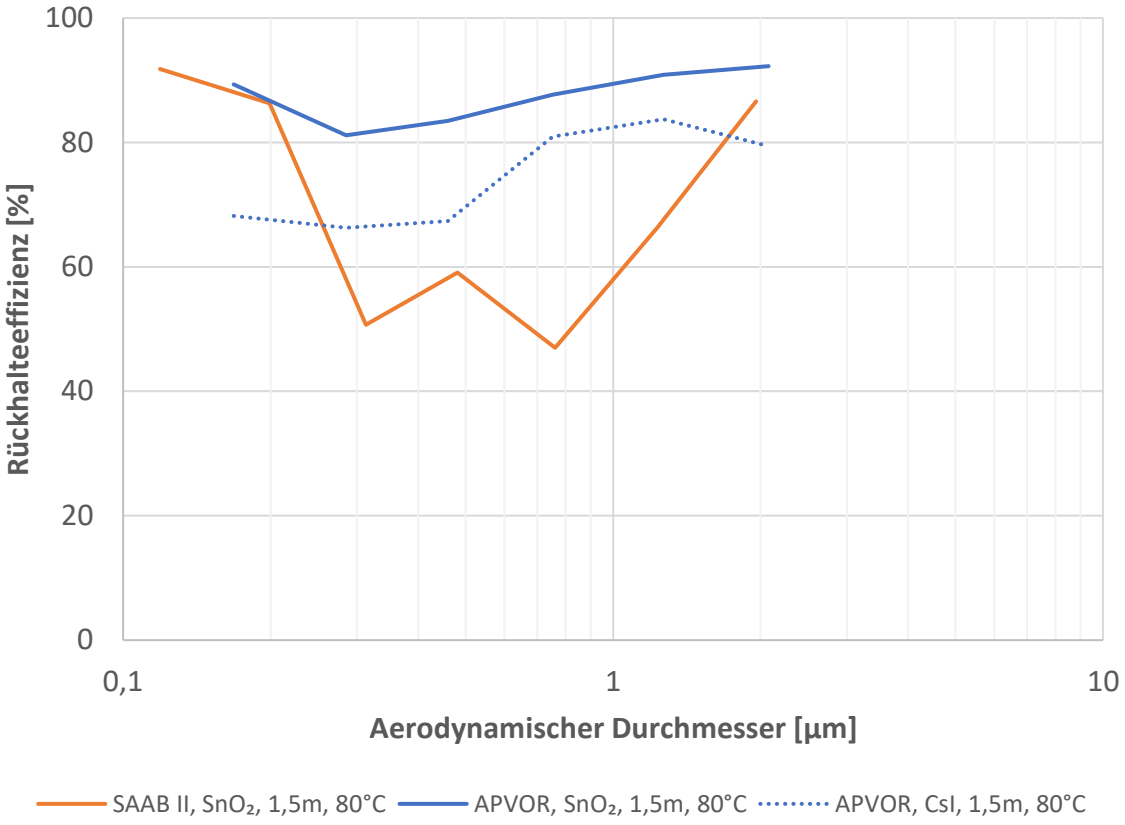

Abbildung 4.6: Ermittelte Rückhalteeffizienz für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser bei 1,5 m Wasserüberdeckung und 80°C Wassertemperatur

Resuspensionsuntersuchungen

Zu Beginn der Resuspensionsuntersuchung in der Folge des letzten Pool Scrubbing Versuchs bei einer Überdeckung von 1,5 m (APVOR_17) wurde an der Pooloberfläche eine Wasserprobe genommen und im Labor analysiert, um die im Wasser abgeschiedene Aerosolmasse zu bestimmen. Die Motivation des Versuchs war es zu ermitteln, welcher Anteil, der durch Pool Scrubbing abgeschiedenen Masse an Spaltprodukten, durch ein Wiederaufsieden der Flüssigkeitsvorlage in die Behälteratmosphäre wiederfreigesetzt würde und mit welcher Partikelgrößenverteilung. Während des Resuspensionsversuchs wird das Wasser des SAAB-Behälters zusätzlich zur Beheizung durch die Heizmanschetten mittels Tauchsieder (vgl. Kap. 3.2.1) zum Sieden gebracht. Sobald ein Siedezustand erreicht wird, werden mit Hilfe des ELPI+ Partikel auf den einzelnen Impaktorstufen gesammelt. Eine Insitu-Messung war hier jedoch nicht möglich, da die Massenkonzentrationen der austretenden Partikel zu gering waren. Deshalb wurden die Impaktorplättchen nach dem Versuch zu einem Labor geschickt, um die einzelnen Impaktorstufen mittels ICPMS-Messung zu analysieren. Dies ließ eine Analyse der Partikelverteilung (SnO_2/CsI und Größenklasse) zu. Die integralen Messergebnisse sowie der gemäß Gleichung (11) ermittelte Reentrainmentfaktor (vgl. Kap. 2.1) sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Resuspensionsuntersuchungen

		SnO_2	CsI
Wasseroberfläche	**[µg/l]**	130	4850
Filterplättchen (gesamt)	**[µg/l]**	0,001	0,021
Reentraimentfaktor	**[-]**	$7{,}927 \times 10^{-6}$	$4{,}269 \times 10^{-6}$

In der Zeile Filterplättchen wird die mittels ICPMS-Messung bestimmte Massenkonzentration über der Flüssigkeitsvorlage während der Resuspensionsphase für SnO_2 und CsI angegeben. Zur Einordnung der Ergebnisse werden diese den von *Cosandey* [COS01] ermittelten Werten in Abbildung 5.1 gegenübergestellt. Verglichen werden die Ergebnisse, die *Cosandey* im Rahmen seiner Dissertation mit der wasserunlöslichen Substanz Al_2O_3 gemessen hat. Der Versuchsaufbau ist ähnlich dem SAAB-Behälter hinsichtlich der Pooloberfläche, dem Gasvolumen oberhalb der Flüssigkeitsvorlage sowie der Art der Beheizung.

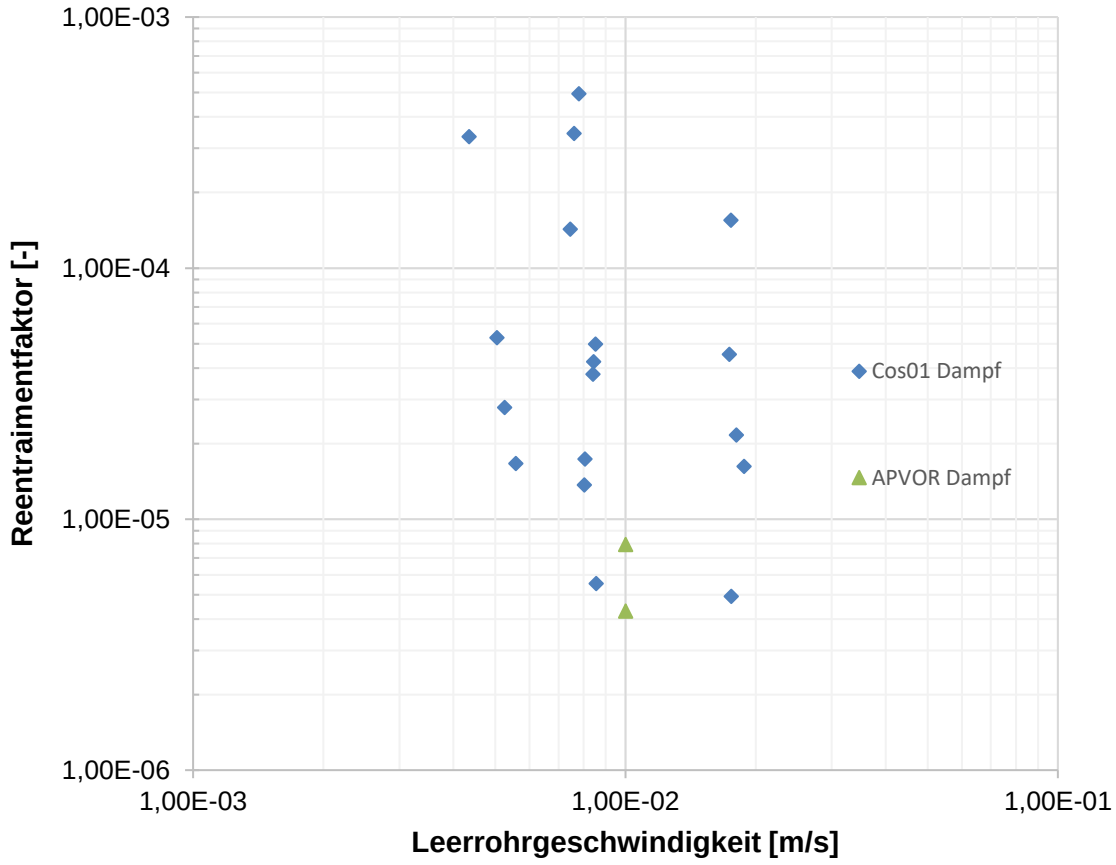

Abbildung 4.7: Vergleich der Reentrainmentfaktoren APVOR und [Cos01]

Wie in Abbildung 5.1 zu erkennen, ordnen sich die hier ermittelten Entrainmentwerte im unteren Bereich der von Cosandey gemessenen Werte ein. Die Werte liegen alle im Bereich der Einzelblasenströmung (Leerrohrgeschwindigkeit < 0,05 m/s).

Zusätzlich zu den in Tabelle 4.2 dargestellten Ergebnissen wird in Abbildung 4.6 die Verteilung des prozentualen Massenanteils für die jeweilige Impaktorstufe nach Wiederfreisetzung aus dem Pool angegeben. Für CsI lassen sich in der Massenverteilung drei Peaks erkennen: im Bereich von 0,009 µm bei 17,8%, bei 0,19 µm und 22,4% und bei 2 µm und 15,5%. Es verteilen sich 55,7% der wiederfreigesetzten Masse auf diese 3 Stufen. Für SnO_2 lässt sich nur ein stark ausgeprägter Peak, nämlich bei 0,009 µm erkennen. Die prozentuale Massenverteilung über die Partikelgrößenklassen zeigt für SnO_2 ein deutlich gleichmäßigeres Bild als die Verteilung von CsI. Darüber hinaus sei auch angemerkt, dass, wie in Abbildung 4.6 zu erkennen ist, die Messunsicherheiten für SnO_2 deutlich größer sind als für CsI.

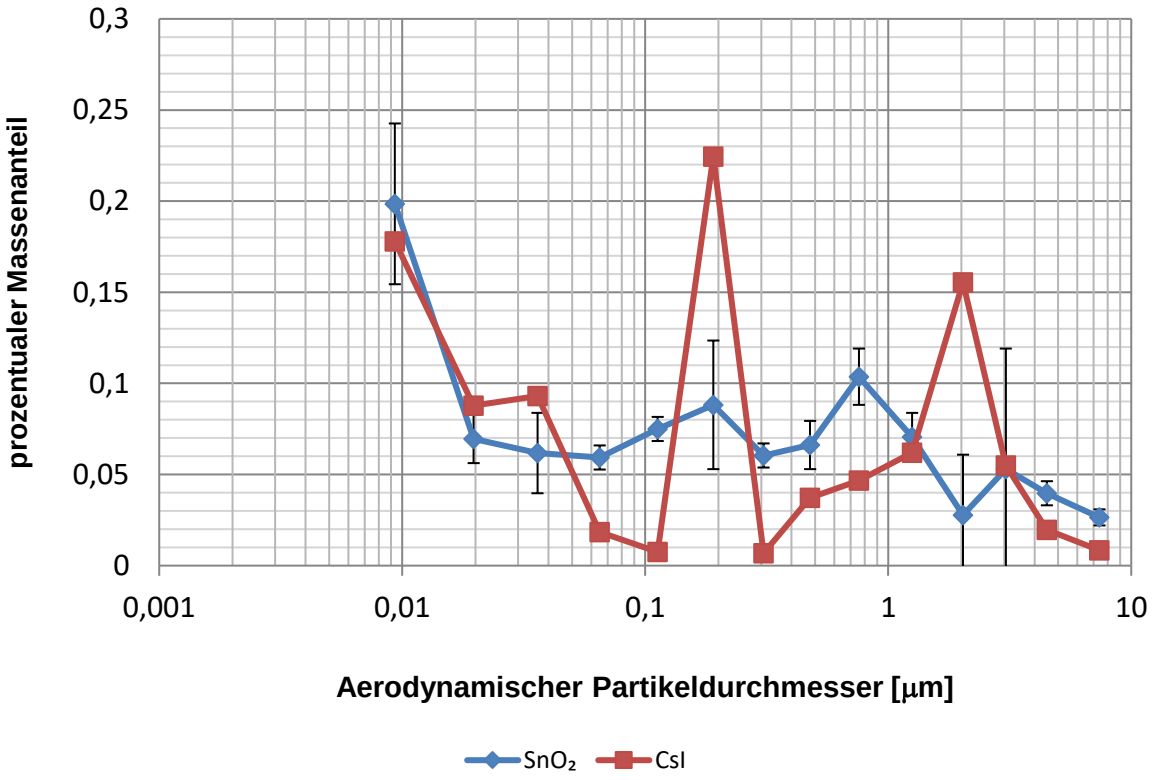

Abbildung 4.8: Massenanteil der einzelnen Partikelgrößenklassen für SnO_2 und CsI über der siedenden Flüssigkeitsvorlage in Bezug auf die eingespeiste Masse der einzelnen Größenklassen

Mit Hilfe dieser Daten lässt sich ein Gesamtentrainmentfaktor von $4{,}36*10^{-6}$ für beide Spezies, oder wie aus Tabelle 4.2 zu entnehmen ist, ein Faktor von $7{,}927*10^{-6}$ für SnO_2 und von $4{,}269*10^{-6}$ für CsI bestimmen.

Die hier untersuchte nasse Resuspension kann im Rahmen postulierter Unfallszenarien aufgrund Ihres potenziell langandauernden Verhaltens **von mehreren Stunden** einen nennenswerten Beitrag zum radioaktiven Quellterm in der Sicherheitsbehälteratmosphäre liefern. In der hier durchgeführten Untersuchung ging es darum, ob nach dem Pool Scrubbing die Spaltproduktmenge an der Flüssigkeitsoberfläche so schnell durch Sedimentation bzw.

Ablagerungsprozesse innerhalb der Flüssigkeitsvorlage abnehmen würde, dass keine nennenswerten Spaltproduktmengen im Nachgang durch die nasse Resuspension wiederfreigesetzt würden und ob dieser Beitrag durch die nasse Resuspension in der Quelltermberechnung vernachlässigbar sei. Die Dauer des durchgeführten Experiments betrug hier lediglich **eine Stunde** und lieferte in dieser verhältnismäßig kurzen Zeitspanne bereits Antworten auf die gestellten Forschungsfragen: Signifikante Beiträge an wiederfreigesetzten Spaltprodukten zeigten sich in der hier durchgeführten Untersuchung im Bereich von Partikeldurchmessern kleiner 0,1 µm. So wurde bspw. im Versuch APVOR_17 (vgl. Tabelle 3.1) für das unlösliche SnO_2 eine Abscheideeffizienz von 63,64 % für Partikel mit einem Durchmesser von 0,03 µm erzielt. Durch die nasse Resuspension wurde diese Abscheideeffizienz innerhalb von einer Stunde bereits auf 49,74 % reduziert. Es lässt sich daher vermuten, dass auch für nicht-lösliche Materialien nicht einfach von einem „Wegsedimentieren“ der Partikel in der Flüssigkeitsvorlage ausgegangen werden kann, sondern dass die nasse Resuspension insbesondere für sehr kleine Partikel schon innerhalb von einer Stunde einen signifikanten, nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Abscheideeffizienz durch Pool Scrubbing nimmt.

4.2 Ergebnisse zur zweiten Versuchsreihe

Neben einer Erweiterung der verfügbaren Datenbasis wird im Rahmen dieser zweiten Versuchsreihe ein Zusammenhang weiterführend untersucht, der im Rahmen der Versuche WH25-27 von Becker Technologies GmbH, Eschborn an der THAI+ Anlage beobachtet wurde. Dieser korrelative Zusammenhang ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

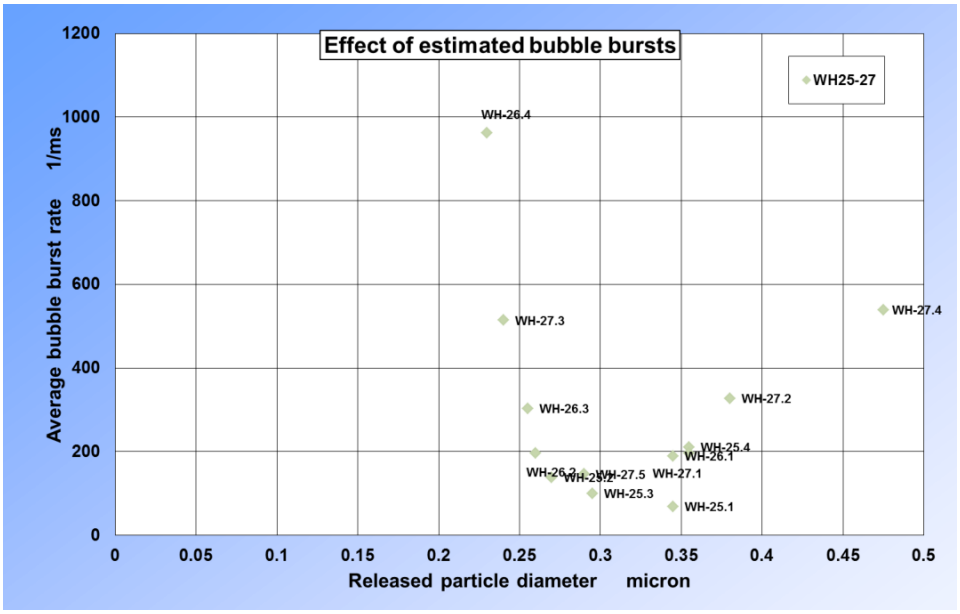

Abbildung 4.9: Beobachtete Korrelation von Becker Technologies GmbH zwischen der Blasenzerplatzrate und dem freigesetzten Partikeldurchmesser (Entnommen aus [Fre18])

Die Abbildung zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Blasenzerplatzrate und dem freigesetzten Partikeldurchmesser. *Freitag und Schmidt* [Fre18] beschreiben diesen Zusammenhang als ähnlich zum Filtergap und vermuten als mögliche Ursache eine Tropfen-Partikel-Interaktion an der Wasseroberfläche oder innerhalb der Gasblase am Gasauslass in die Flüssigkeitsvorlage. Durch die Verwendung einer anderen Einspeisevorrichtung als in der THAI+ Anlage soll hier in einem ersten Schritt ausgeschlossen werden, dass der von Becker Technologies GmbH aufgezeigte Zusammenhang aus einer Tropfen-Partikel-Interaktion an der Wasseroberfläche resultiert. Der Querschnitt des Tauchrohrs mit dem das Gas in der THAI+ Anlage in die Flüssigkeitsvorlage eingespeist wird ist um einen Faktor von 9,5 größer als der Querschnitt der an der SAAB-Versuchsanlage eingesetzten Düse. Neben der Blasenzerplatzrate und der Partikelgröße wurde die Abscheideeffizienz über die verschiedenen Partikelgrößenklassen ermittelt. Ein Vergleich der Randbedingungen der beiden Versuchsanlagen ist in Tabelle 4.3 gegeben.

Tabelle 4.3: Vergleich der Randbedingungen der SAAB-Anlage zur THAI+-Versuchsanlage

Parameter	**SAAB**	**THAI+**
Eintauchtiefe [m]	2,25 - 5,25	1,5
Pooldurchmesser [m]	1,5	1,6
Druck [bar]	Umgebung	2
Dampfmassenstrom [g/s]	4 - 8	2 - 8
Gasmassenstrom [g/s]	4 - 8	2 - 8
Einspeisevorrichtung	Aufwärts (21 mm)	Abwärts (200 mm)
Partikel	SnO_2	SnO_2
Partikelgrößenbereich [µm]	0,28 - 0,46	0,3 - 0,85
Wassertemperatur [°C]	80 - 90	106 - 126

Da im Gegensatz zu den vorherigen Experimenten (APVOR_VV01-APVOR35) der Messbereich (0,3 - 0,46 µm) sehr begrenzt ist, da für die anderen Partikelgrößen oberhalb der Wasseroberfläche keine validen Messwerte gemessen werden konnten, werden die Ergebnisse nur integral über die beiden Größenklassen dargestellt. Bei den restlichen Größenklassen ist aus den oben genannten Gründen von einer Abscheidung von nahezu 100% auszugehen. Abbildung 4.10 zeigt die Versuche für 2 m Eintauchtiefe mit der konstanten Erhöhung des Einspeisegases um ca. 1 g/s und des eingespeisten Dampfes um ca. 1 g/s. Auf der Y-Ache sind die Abscheideeffizienzen geplottet und unterhalb der jeweiligen Balken stehen die

kumulierten Massenströme (Dampf und Stickstoff) der Einspeisung. Die Abscheidung ist für alle Bereiche sehr hoch und liegt über 89 %. Allerdings steigt die Abscheidung erst etwas stärker an auf ca. 96,7% mit der ersten Erhöhung des Einspeisemassenstroms. Anschließend für die weiteren Erhöhung der Massenströme steigt sie nur noch um ca. 1% an.

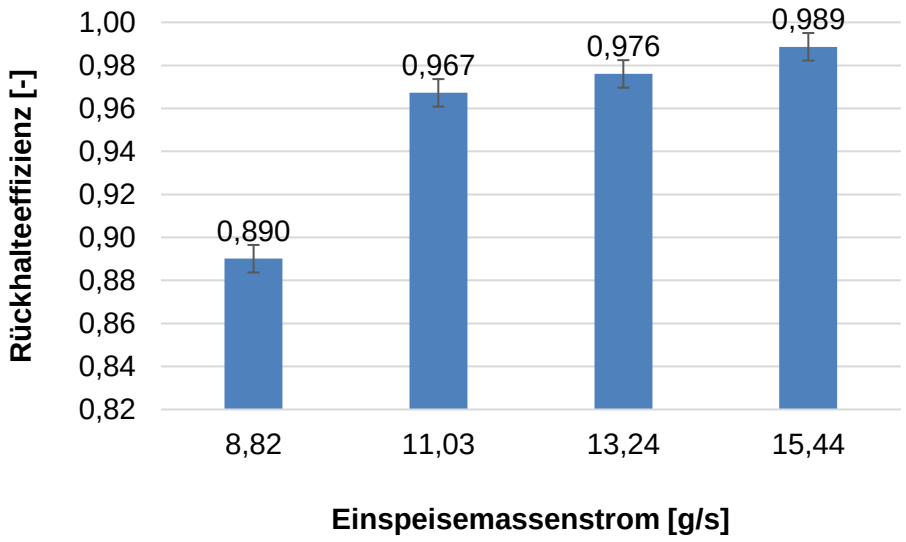

Abbildung 4.10: Rückhalteeffizienz bei 2 m Eintauchtiefe und einer Erhöhung des Einspeisemassenstroms (Gas und Dampf)

In Abbildung 4.11 ist die Rückhalteeffizienz der Experimente mit einer Eintauchtiefe von ca. 5 m und einer analogen Einspeisemassenstromerhöhung wie in Abbildung 4.10 dargestellt.

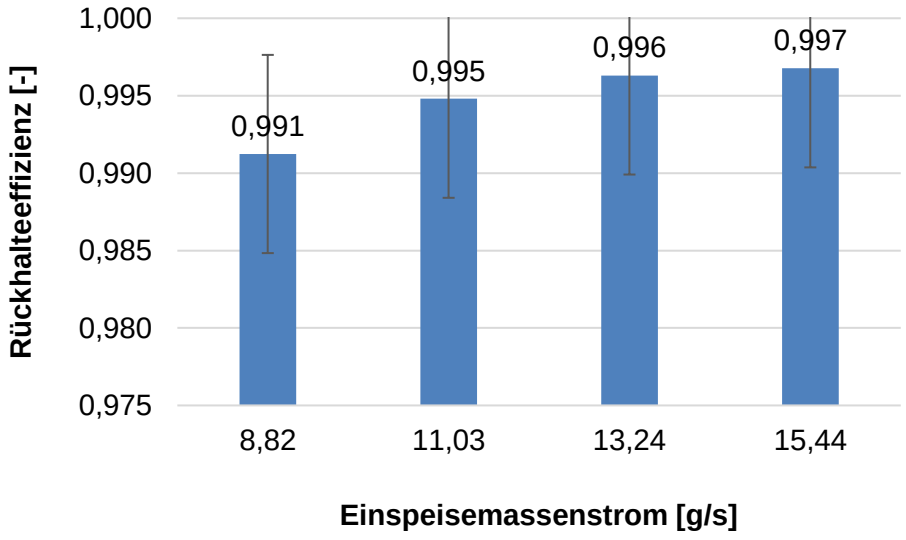

Abbildung 4.11: Rückhalteeffizienz bei 5 m Eintauchtiefe und einer Erhöhung des Einspeisemassenstroms (Gas und Dampf)

Die Abscheidung liegt hier schon deutlich höher und ist bereits bei dem kleinsten Massenstrom (8,82 g/s) bei einem Wert von ca. 99%. Anschließend ändert sich dieser Wert nur noch geringfügig.

Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse der APVOR-Versuche im Vergleich zu den Versuchen von Becker Technologies. Im Bereich von ca. 4 g/s Dampf und 4 g/s als Einspeiseträgergas konnte sowohl in der THAI+-Versuchsanlage als auch im SAAB ein ziemlich ähnlicher DF erzielt werden. Auffällig ist jedoch, dass sich der DF in der THAI+-Versuchsanlage ab ca. 8 g/s (kumuliert) auf einem ähnlichen Niveau von ca. 10 bis 13 hält. In der SAAB-Versuchsanlage steigt der DF von 9,1 auf 87,9 deutlich an. Auch mit einer Steigerung der Eintauchtiefe konnte wieder eine Erhöhung des DF erzielt werden. So liegen die Werte bei einer Eintauchtiefe von 5 m 4 bis 10-mal höher als bei 2 m. Also ist auch bei Versuchen mit einer Dampfkonzentration von ca. 50% durch die Erhöhung der Eintauchtiefe und damit verbundenen erhöhten Verweilzeit in der Wasservorlage eine Steigerung der Abscheideeffizienz zu erzielen.

Abbildung 4.12 zeigt den qualitativen Vergleich der Versuchsergebnisse der APVOR Versuche an der SAAB-Anlage mit den WH-26 Versuchen an der THAI+-Versuchsanlage. Sie zeigt die Abscheideeffizienz aufgetragen über die Weberzahl: links für die Versuchsreihe WH-26 und rechts für die hier im Rahmen des Forschungsvorhabens APVOR durchgeführten Experimente der zweiten Versuchsreihe.

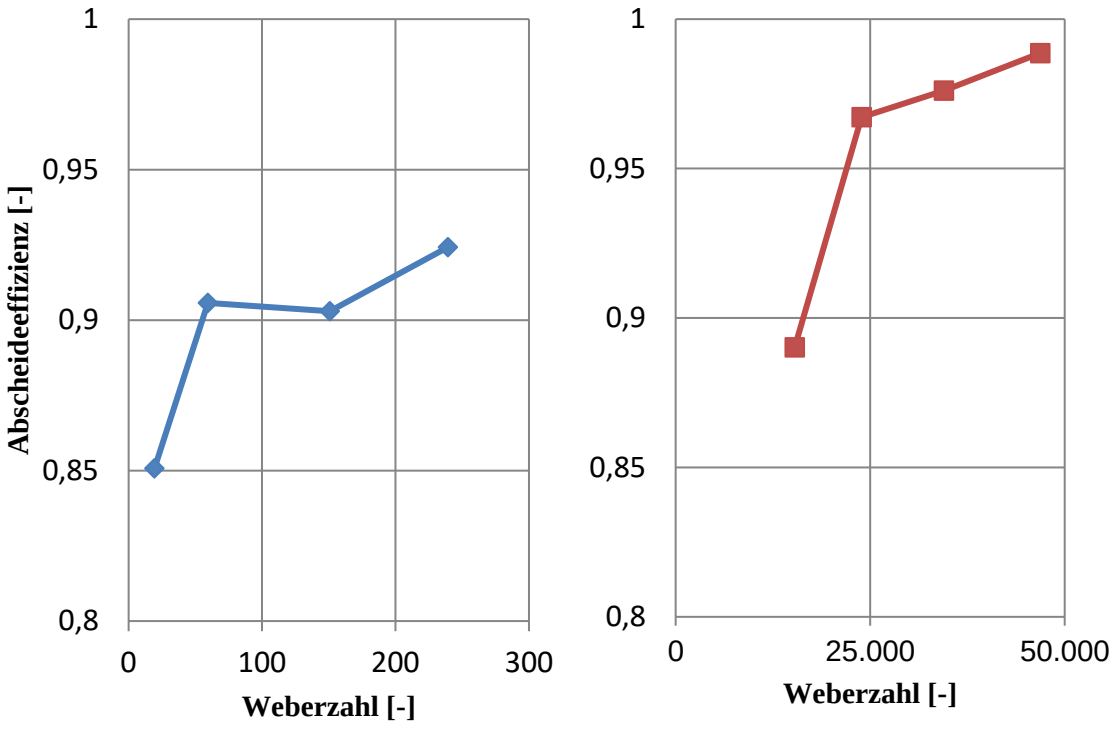

Abbildung 4.12: Vergleich der Weberzahlen von links WH-26 [FRE18] und rechts APVOR

Auch wenn sich die Weberzahlen deutlich unterscheiden, lässt sich in beiden Grafiken erkennen, dass bei steigender Weberzahl auch die Abscheideeffizienz gesteigert wird. Die großen Unterschiede in der Weberzahl werden maßgeblich durch die stark unterschiedlichen Einspeisedurchmesser verursacht.

Tabelle 4.4: Vergleich der Messergebnisse in der SAAB-Anlage zur THAI-Versuchsanlage

Becker Technologies: Eintauchtiefe = 1,5m Partikeldurchmesser: 0,3 - 0,85 µm			**PSS: Eintauchtiefe = 2 m Partikeldurchmesser: 0,3 - 0,46 µm**			**PSS: Eintauchtiefe = 5 m Partikeldurchmesser: 0,3 - 0,46 µm**		
N_2	**Dampf**	**DF**	**N_2**	**Dampf**	**DF**	**N_2**	**Dampf**	**DF**
[g/s]	**[g/s]**	**[-]**	**[g/s]**	**[g/s]**	**[-]**	**[g/s]**	**[g/s]**	**[-]**
2,13	2,03	6,7						
4,41	3,97	10,6	4,38	4,44	9,1	4,38	4,44	114,1
			5,47	5,56	30,5	5,47	5,56	192,6
6,32	5,93	10,3	6,57	6,67	41,7	6,57	6,67	270,9
7,35	7,29	13,2	7,66	7,78	87,9	7,66	7,78	309,7

Ausgewählte Kameraaufnahmen, die im Laufe der Versuche aufgenommen worden sind, sind in Abbildung 4.13 dargestellt. Es werden beispielhaft die maximale Ausdehnung vier aufeinanderfolgender Blasen am Einlass in die SAAB-Versuchsanlage dargestellt. Bei den dargestellten Bildern handelt es sich um unbearbeitete Rohaufnahmen der Kamera. Es zeichnet sich ab, dass die Initialblase unterschiedliche maximale Ausdehnungen besitzt. Deshalb wird als Blasendurchmesser der durchschnittliche Durchmesser über den Zeitraum der Aufnahme (pro Versuch mind. 2 Aufnahmen á 2729 Bilder, pro Parameterauswahl insgesamt 4 Aufnahmen á 2729 Bilder) angegeben.

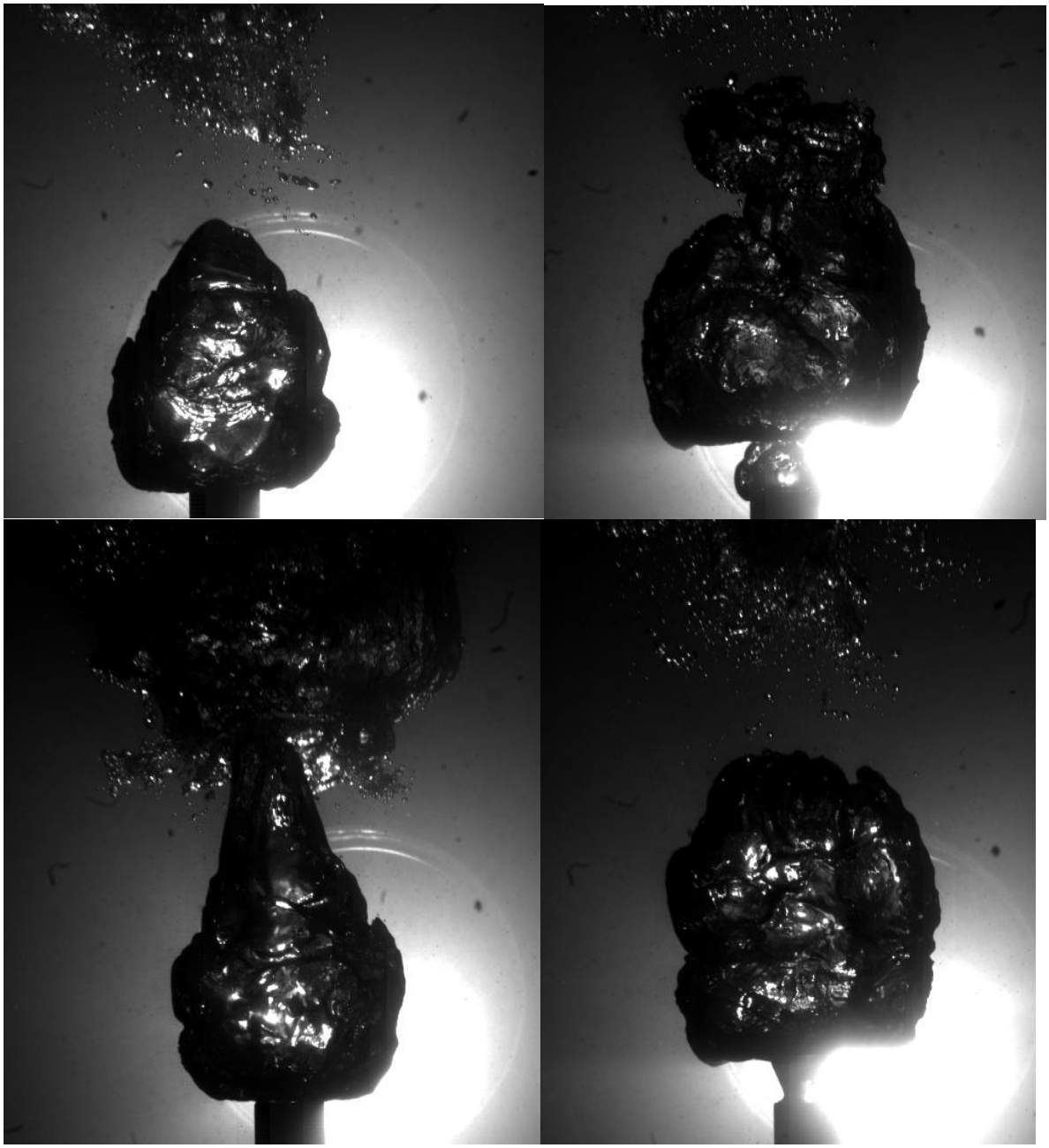

Abbildung 4.13: Ausgewählte Kameraaufnahmen an der Einspeisung in den Behälter

Die Ergebnisse der Analyse der Blasenzerplatzrate sind in Tabelle 4.5 festgehalten. Es werden die Werte BZR (Blasenzerplatzrate), d_{Blase} (der Primärblasendurchmesser) (vgl. Abbildung 4.13) der eingespeiste Trägergasstrom $\dot{m}$ und der DF für zwei verschiede Poolaufbauten aufgelistet.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Primärblasenuntersuchungen

PSS: Eintauchtiefe = 2 m Partikeldurchmesser: 0,3 - 0,46 µm				**PSS: Eintauchtiefe = 5 m Partikeldurchmesser: 0,3 - 0,46 µm**			
$\dot{m}$ **[g/s]**	DF **[-]**	d_{Blase} **[mm]**	BZR **[Hz]**	$\dot{m}$ **[g/s]**	DF **[-]**	d_{Blase} **[mm]**	BZR **[Hz]**
						64	12,97
8,82	9,1	-	-	8,82	114,1	82	11,24
11,03	30,5	87	12,28	11,03	192,6	84	12,54
13,24	41,7	91	16,13	13,24	270,9	77	13,97
15,44	87,9	94	14,36	15,44	309,7	81	12,48

Im ersten Teil der Tabelle bei einer Eintauchtiefe von ca. 2 m lässt sich kein deutlicher Zusammenhang zwischen Blasenzerplatzrate und Partikelrückhaltung erkennen. Allerdings steigt mit steigendem Trägergasstrom auch der Blasendurchmesser der Primärblase und auch der DF. Für eine höhere Poolhöhe ist dieses Phänomen jedoch nicht zu erkennen. Der Blasendurchmesser scheint hier eher mit steigender Höhe abzunehmen. Dies könnte eine Folge des gesteigerten geodätischen Drucks sein. Für die höhere Eintauchtiefe steigt jedoch mit dem Massenstrom der Einspeisung die Abscheidung und die Blasenzerplatzrate anfangs bis zu einem Massenstrom $\dot{m}$ von 13,2 g/s und fällt anschließend auf den Wert der vorherigen Größe von ca. $BZR = 12{,}5$ Hz.

In Abbildung 4.14 ist analog zu Abbildung 4.9 die Blasenzerplatzrate über dem Durchmesser der freigesetzten Partikel für die Experimente der zweiten hier durchgeführten Versuchsreihe dargestellt.

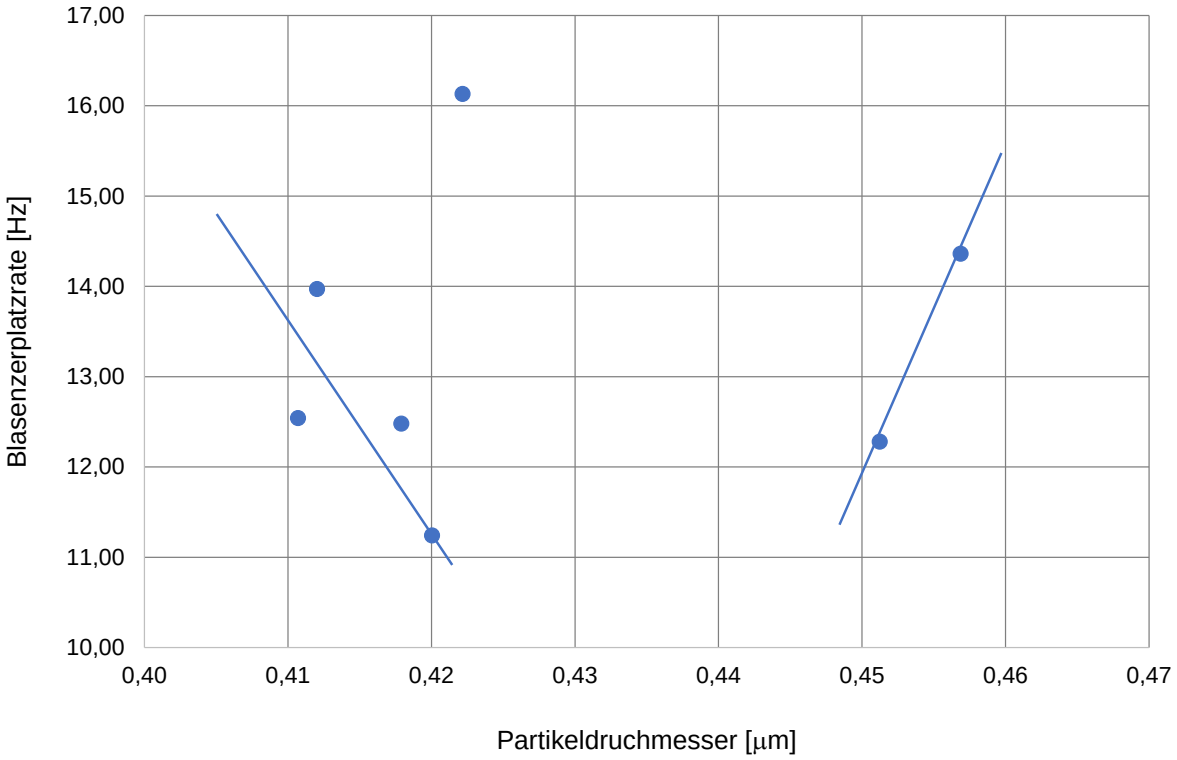

Abbildung 4.14: Zusammenhang zwischen der Blasenzerplatzrate und dem freigesetzten Partikeldurchmesser im Rahmen der Experimente der zweiten Versuchsreihe

Anders als erwartet, lässt sich in Abbildung 4.14 ebenso wie in den von Becker Technologies GmbH durchgeführten Experimenten (vgl. Abbildung 4.9) eine Art Filterloch erkennen. Trotz der Verwendung einer anderen Einspeisegeometrie, nämlich einer Düse anstelle eines Tauchrohres und einem kleinen Auslass gegenüber einem großen Auslassdurchmesser, in den hier durchgeführten Experimenten gegenüber den Experimenten in der THAI+ Anlage, und den daraus resultierenden anderen Größenordnungen der Weberzahl, lässt sich hier ein qualitativ ähnlicher Verlauf erkennen, wenn auch in einem schmaleren Partikelgrößenspektrum und bei höheren Blasenzerplatzraten.

Die hier durchgeführten Experimente zeigen somit, dass dieser von Becker Technologies aufgezeigte Zusammenhang zwischen Blasenzerplatzrate und freigesetztem Partikeldurchmesser nicht nur bei Verwendung eines Tauchrohres aufzutreten scheint und generell nicht nur auf die THAI+ Anlage beschränkt zu sein scheint. Es bleibt allerdings die Frage, ob dieses Phänomen auf eine Tropfen-Partikel-Interaktion an der Pooloberfläche [Fre18] zurückzuführen ist oder am Auslass der Düse in der Flüssigkeitsvorlage auftritt.

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht ist der zweite Technische Fachbericht zum Forschungsvorhaben „Analytische und experimentelle Untersuchungen zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen”, welches vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV 1501618) gefördert und von der Arbeitsgruppe Plant Simulation and Safety an der Ruhr-Universität Bochum bearbeitet wird. In diesem Bericht werden die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Versuche beschrieben und analysiert.

Eine umfangreiche Literaturrecherche hat gezeigt, dass im Bereich des Pool Scrubbings die erhobenen experimentellen Daten mit unlöslichen Stoffen überwiegen und bisher nur eine geringe Menge an Experimenten mit Einzeleffektuntersuchungen in Bezug auf den Einfluss der Gastemperatur und der Wassertemperatur durchgeführt worden sind. Gerade im Bereich der Wassertemperatur wurden überwiegend Versuche mit einem Aerosoldampfgemisch durchgeführt wodurch es Überlagerungseffekte mit weiteren Randbedingungen gab. Diese Wissenslücke spiegelt sich bspw. auch in den einzelnen Modellen zur Berechnung der Depositionsmechanismen in SPARC wieder. Ein Temperatureinfluss wird in keinem der Abscheidemechanismen in SPARC berücksichtigt / modelliert (vgl. Tabelle 3.4 in [REH22]).

Im Rahmen der hier durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass der Einfluss der Gastemperatur für die gewählten Randbedingungen (Pooltemperatur ca. 82°C und Gastemperatur zwischen 33°C und 107°C) im Bereich der Aerosolabscheidung tatsächlich einen eher untergeordneten Einfluss zu haben scheint. Allerdings zeigt sich eine positive Korrelation zwischen der Pooltemperatur und der Abscheideeffizienz: In den hier durchgeführten Experimenten mit Stickstoff als Einspeisegas steigt entgegen bisherigen Untersuchungen in der Literatur (bspw. [LI22] und [DEH01]) mit einer Erhöhung der Pooltemperatur auch die Abscheidung. Eine mögliche Interpretation ist, dass ein Anstieg der Pooltemperatur die Deposition von Aerosolen durch Diffusion und durch Koagulation begünstigt. Die entgegengesetzten Ergebnisse der Versuche von [LI22] und [DEH01] sind durch die zusätzliche Dampfeinspeisung zu erklären. Durch eine höhere Pooltemperatur wird die Dampfkondensation verringert, was zu einer geringeren Partikelabscheidung führt. Der Einfluss der Abscheidung durch Kondensation ist deutlich höher als die höhere Abscheidung durch eine veränderte Pooltemperatur. Analog zu vorangegangen Untersuchungen zeigt sich in den hier durchgeführten Experimenten eine Verbesserung der Partikelrückhaltung mit steigender Wasserüberdeckung. Diese hat darüber hinaus einen größeren Einfluss auf die Partikelrückhaltung als die Pooltemperaturerhöhung.

Nach der Abscheidung der Aerosolpartikel durch das Pool Scrubbing wurde die Flüssigkeitsvorlage mithilfe der Heizmanschetten und des Tauchsieders zum Sieden gebracht. Die dabei durch nasse Resuspension wieder freigesetzten Partikel wurden nach Größenklassen aufgeschlüsselt gemessen. Dabei zeigte sich, dass die Partikeldurchmesser 0,01 μm, 0,2 μm sowie

2 μm für das CsI bevorzugt wiederfreigesetzt werden. Auf diese drei Partikelgrößen entfielen ca. 56 % der wiederfreigesetzten CsI-Masse. Dabei sind insbesondere die Partikel im Submikronbereich von Interesse aufgrund Ihres Potenzials über einen langen Zeitraum hinweg luftgetragen zu bleiben. Für das SnO_2 zeigte sich, dass bereits nach einer Stunde des Wiederaufsiedens, die durch das Pool Scrubbing erzielte Abscheideeffizienz von ca. 64 % für Partikel mit dem Durchmesser von 0,03 μm auf ca. 50 % abgefallen ist. Es kann daher nicht davon ausgegangen werden, dass nicht-lösliche Partikel in einer Flüssigkeitsvorlage wegsedimentieren und daher bei einem Wiederaufsieden der Flüssigkeitsvorlage vernachlässigbar sind. Diese Annahme kann für große Partikel zutreffend sein, diese sind aber im Rahmen der nassen Resuspension generell von untergeordnetem Interesse, da Sie nach einer Wiederfreisetzung verhältnismäßig schnell durch Sedimentation im Gasraum wieder abgeschieden würden. Die im Rahmen der nassen Resuspension insbesondere beachtenswerten Submikronpartikel wurden in den hier durchgeführten Experimenten in nennenswertem Maße wiederfreigesetzt.

In den Experimenten mit einem Stickstoff-Dampf-Gemisch als Einspeisegas (Dampfmassenanteil ca. 50 %) stieg die Abscheideeffizienz auf nahezu 100 % für alle Partikelgrößenklassen, außer im Bereich von 0,3 µm - 0,46 µm an. Mit steigendem Einspeisemassenstrom bzw. einer Erhöhung der Weberzahl stieg in den Versuchen auch die Abscheideeffizienz. Eine zusätzliche Verbesserung konnte wie in den vorangegangenen Experimenten durch eine Erhöhung der Wasserüberdeckung beobachtet werden. Die Auswertung der unter diesen Randbedingungen durchgeführten Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen des Blasenzerplatzens an der Einspeisedüse, zeigten einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Blasenzerplatzrate und freigesetztem Partikeldurchmesser über der Flüssigkeitsvorlage, der bereits in den Experimenten von Becker Technologies aufgezeigt worden ist. Somit kann dieses Verhalten in der THAI+ Anlage weder als Eigenheit der Versuchsanlage noch als alleiniges Resultat des Tauchrohres interpretiert werden. Offen bleibt, ob das Verhalten aus einer Tropfen-Partikel-Interaktion an der Wasseroberfläche resultiert, wie von *Freitag und Schmidt* [FRE18] als eine mögliche Interpretation angeführt.

Um die Aussagekraft für die hier vorliegenden Versuche zu untermauern, sollte die Versuchsmatrix um weitere Substanzen erweitert werden. An der SAAB-Versuchsanlage bietet sich die Möglichkeit eine Erweiterung durch NaCl (löslich) und TiO_2 oder auch Ag (unlöslich) vorzunehmen.

6 Literatur

ALL18 Allelein, H. J. et al.:

Aerosolverhalten bei schweren Störfällen. Abschlussbericht - Reaktorsicherheitsforschung – Vorhaben-Nr.: 1501454, RWTH Aachen, 2018.

BUN92 Bunz, H. et al.:

Resuspension of fission products from sump water - Finalreport - Research Contract No 3009-85-07, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1992

COS01 Cosandey, J. O., Philipp Rudolf von Rohr

Entrainment of soluble and non soluble tracers from a boiling water surface. Nuclear engineering and design, 208. Jg., Nr. 1, S. 87-97, 2001

BRA71 Brauer, H.:

Grundlagen der Einphasen - und Mehrphasenströmungen, Verlag Sauerländer Aarau und Frankfurt am Main, 1971

DEH01 Dehbi, A. et al.:

Aerosol retention in low-subcooling pools under realistic accident conditions, Nuclear Engineering and Design, 203. Aufl., 229–241, 2001

FRE18 Freitag, M. et al.:

Aerosolrückhaltung in einer Wasservorlage - Pool Scrubbing - Versuchsserie WH-25 – WH-27. Experimentelle Untersuchungen zur Spaltproduktrückhaltung und Wasserstoffbeherrschung bei Stör- und Unfallabläufen im Sicherheitsbehälter (THAI-VI) - 1501547 – FB/TR – WH25-27,Becker Technologies, 2018.

HIN99 Hinds, W. C.:

Aerosol Technology. Properties, Behavior, and Measurement of Airbome Particles, ,*John Wiley & Sons, 2. Aufl., 1999.*

JAC14 Jacquemain, D. et al.:

Status Report on Filtered Containment Venting,*OECD, NEA, 2014*

JAN22 Jankowski, T.

Entwicklung eines Ansatzes zur Bestimmung des Tropfenentrainments aus gasdurchströmten Flüssigkeitsvorlagen, Shaker Verlag, 2022.

KUH86 Kuhlmann, M. R.:

Scrubbing of fission product aerosols in LWR water pools under severe accident conditions, Source Term Evaluation for accident conditions, IAEA-SM-281/47, 1986.

KUL11 Kulkarni, P.; Baron, P. A.:

Aerosol Measurement. Principles, Techniques, and Applications, *John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 3. Aufl., 2011.*

LAM18 Lambaerts, P:

*Dekati ELPI Workshop,*2018.

LI21 Li, Y. et al.:

Experimental Study on Influencing Factors of Aerosol Retention by Pool Scrubbing, Frontiers in Energy Research, 9. Aufl., 2021.

LI22 Li, Y. et al.:

Influence of Jet on Aerosol Retention by Pool Scrubbing Under Multihole Injector. Frontiers in Energy Research, 10. Auf., 2022.

OWC91 Owcarski, P. C.; Burk, K. W.:

SPARC-90: A Code for Calculating Fission Product Capture in Suppression Pools, *Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Regulatory Applications; Pacific Northwest Lab., Richland, WA (United States), 1991.*

REH22 Rehrmann, J. et al.:

Bewertung der verfügbaren Datenbasis zur Partikelrückhaltung in Flüssigkeitsvorlagen. PSS-TR-22, Technischer Fachbericht zum Vorhaben BMUV 1501618, Plant Simulation and Safety, Ruhr-Universität Bochum, 2022.

SAG07 Sager, C.:

Der Partikeltransport in turbulent durchströmten Rohrleitungen und seine besondere Bedeutung für die Partikelmesstechnik. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2007.

SHI22 Shim, S.:

Diffusiophoresis, Diffusioosmosis, and Microfluidics: Surface-Flow-Driven Phenomena in the Presence of Flow, Chem. Rev., 122. Aufl., 6986–7009, 2022.

UCH16 Uchida, S. et al.:

Temperature dependent fission product removal efficiency due topool scrubbing, Nuclear Engineering and Design, 298. Aufl., 201–207, 2016.

VEN19 Vennemann, R. et al.:

Experimental Investigation of the retention of hygroscopic aerosols in a water pool, 3rd Meeting of the IPRESCA Project, 2019.

VEN20 Vennemann, R. et al.:

Experimental investigation on the retention of soluble particles by pool scrubbing, 29th International Conference Nuclear Energy for new Europe, 2020.

VEN22 Vennemann, R. et al.:

Experimental Investigation on the Retention of Soluble Particles by Pool Scrubbing, Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol. 8, 2022.