

# Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 1: Theoretische Betrachtungen

Almuth D. Schwarz<sup>1,\*</sup>, David Horst<sup>2</sup>, Jörg Meyer<sup>1</sup>, Qian Zhang<sup>2</sup>, Achim Dittler<sup>1</sup> und Eberhard Schmidt<sup>2</sup>

DOI: 10.1002/cite.202100158

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In der Oberflächenfiltration sind die Einflüsse der Prozessbedingungen auf die abgeschiedenen Partikeln von großer Bedeutung. Dazu gehören z. B. Temperatur und Zusammensetzung des Trägergases. Zwei unterschiedliche Erscheinungsformen von Wasser im Trägergas und ihre Auswirkungen auf lösliche Bestandteile im Filterkuchen werden gegenübergestellt. In diesem ersten Teil einer zweiseitigen Arbeit werden zunächst die Grundlagen und ersten Erkenntnisse theoretisch betrachtet. Der Einfluss von erhöhter relativer Feuchte auf die Haftkräfte von löslichen und unlöslichen Partikeln einerseits und von erhöhtem Wassergehalt in Form von Wassertropfen auf den Stofftransport löslicher Partikeln andererseits wird erörtert. Die vielseitigen möglichen Auswirkungen auf das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern durch Wasser und lösliche Partikeln werden aufgezeigt.

**Schlagwörter:** Gasfeuchte, Oberflächenfilter, Salze, Staubabscheidung, Staubkuchen

*Eingegangen:* 06. August 2021; *revidiert:* 04. März 2022; *akzeptiert:* 21. März 2022

## Effects of Increased Water Content on Soluble Dust Cake Components in Surface Filtration – Part 1: Theoretical Considerations

In surface filtration, the effects of the process conditions of the carrier gas on the collected particles are of great importance. Two different phases of water in the carrier gas and their effects on soluble components in the filter cake are contrasted. In this first part of a two-part paper, the fundamentals and initial findings are first considered theoretically. The influence of increased relative humidity on the adhesive forces of soluble and insoluble particles on the one hand and of increased water content in the form of water droplets on mass transfer of soluble matter on the other hand is discussed. The versatile possible effects of water and soluble particles on the operating behavior of surface filters are shown.

**Keywords:** Dust cake, Dust separation, Humidity, Salts, Surface filtration

## 1 Einleitung

Die Staubabscheidung mit Oberflächenfiltern ist ein typisches Abscheideverfahren bei hohen Staubgehalten in der Größenordnung von einigen  $\text{g m}^{-3}$  bis zu einigen  $100 \text{ g m}^{-3}$ . Kennzeichnend bei diesem Verfahren zur Staubabscheidung ist die Bildung einer Staubschicht, des sogenannten Staub- bzw. Filterkuchens, an der Oberfläche des Filtermediums, die dann die eigentliche Funktion der filternden Schicht übernimmt. Um der mit der Bildung bzw. dem Wachstum des Staubkuchens einhergehenden Zunahme des Druckverlusts am Filter entgegen zu wirken, werden Oberflächenfilter periodisch regeneriert, indem der ausgebildete Staub-

kuchen von der Oberfläche des Filtermediums entfernt wird. Dies geschieht meist durch Abwurf des Staubkuchens unter mechanischer und/oder pneumatischer Beanspru-

<sup>1</sup>Almuth D. Schwarz, Dr.-Ing. Jörg Meyer, Prof. Dr.-Ing. Achim Dittler  
almuth.schwarz@kit.edu

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Straße am Forum 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland.

<sup>2</sup>David Horst, Dr.-Ing. Qian Zhang, Prof. Dr.-Ing. Eberhard Schmidt  
Bergische Universität Wuppertal, Institut für Partikeltechnologie, Rainer-Gruenter-Straße 21, 42119 Wuppertal, Deutschland.

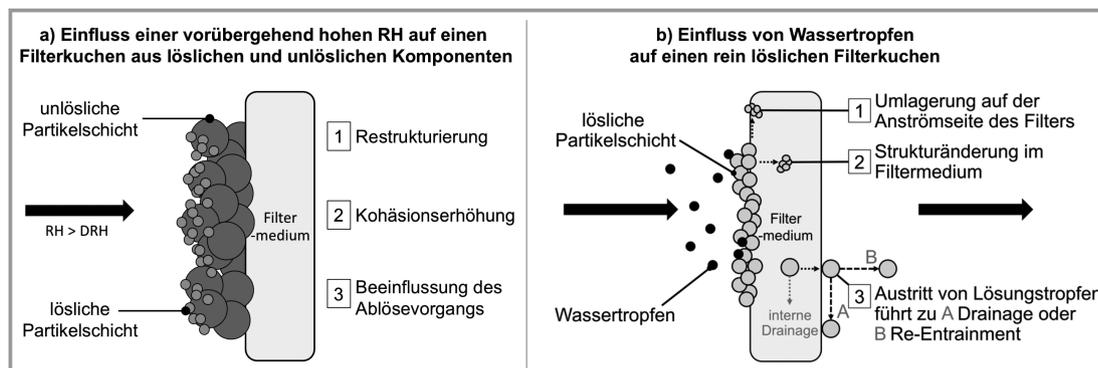
chung des beladenen Filterelements. Das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern wird daher durch die Partikelabscheidung, die Druckverlustentwicklung und das Regenerierungsverhalten des Filters zusammen bestimmt, wobei sich diese Parameter wiederum gegenseitig beeinflussen [1].

Der Feuchteinfluss im Bereich der Oberflächenfiltration zur Staubabscheidung aus Gasen wurde bisher mit dem Ziel untersucht, positive Wirkungen auf das Betriebsverhalten des Filters wie geringeren Druckverlust, gute Regenerierbarkeit und ein günstiges Wiederanlagerungsverhalten zu erzielen [2]. Dafür gelten folgende theoretische Grundlagen aus Bereichen der Schüttguttechnik: Oberhalb einer bestimmten relativen Umgebungfeuchte ist davon auszugehen, dass Kapillarkondensation von Wasser in engen Spalten und Poren eines Haufwerks aus Schüttgütern möglich ist. Schütz [3] gibt eine untere Grenze der Kapillarkondensation von ca. 40 % an, die auf theoretischen Überlegungen [4] und experimentellen Untersuchungen der Adsorption von Gasen in mikroporösen Systemen [5] beruht. Mit steigender Umgebungfeuchte steigt auch die Menge des kondensierten Wassers, das zur Bildung von stabilen Flüssigkeitsbrücken zwischen vorhandenen Festkörperkontakten führt. Durch Flüssigkeitsbrücken werden merklich größere Haftkräfte als im Bereich der van-der-Waals-Kräfte zwischen den Kontaktpartnern übertragen. Bei Haftkraftmessungen an realen Systemen ist in vielen Fällen erst oberhalb einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70–90 % eine deutliche Haftkraftzunahme mit zunehmender Gasfeuchte zu beobachten [3, 6]. Untersuchungen von Schmidt und Pilz zum Einfluss der Gasfeuchte durch Modifikation der Gasfeuchte während des Kuchenaufbaus in Kombination mit verschiedenen Enddruckverlusten und Filteranströmgeschwindigkeiten [2] zeigen zum Beispiel, dass als Beginn der Kapillarkondensation für das untersuchte System Kalksteinpartikeln ( $x_{50,3} = 3,5 \mu\text{m}$ ) und Luft bei Umgebungsbedingungen eine relative Feuchte von 50–70 % angegeben werden kann. Da die gebildeten Flüssigkeitsbrücken durch die Kapillarkondensation des Wassers an Partikelkontakten sowohl die Kohäsion im Staubkuchen als auch die Adhäsion zwischen der Kuchenschicht und der Filtermedienoberfläche stärkt, ist der Feuchteinfluss im Allgemeinen

sehr komplex. Eine Verstärkung der Kohäsion vermindert/verhindert die Kompression des Kuchens während der Filtrationsphase und fördert den Zusammenhalt der Kuchenschicht bei der Regenerierung, ist somit in der Regel erwünscht, während eine Erhöhung der Adhäsion zwischen der Kuchenschicht und der Filtermedienoberfläche die Regenerierung erschweren wird.

Wird die Gasfeuchte bei einer beginnenden Kapillarkondensation von Wasser in einem gegebenen Haufwerk nicht weiter erhöht, so ist die gebildete Menge der flüssigen Phase begrenzt. Die dadurch erzeugten Flüssigkeitsbrücken an Partikelkontakten verstärken zwar die Haftkräfte, jedoch werden hier keine merkbaren morphologischen Änderungen in lokalen Partikel-Clustern vermutet. Mit weiter steigender Menge an flüssiger Phase im Staubkuchen sind signifikante morphologische Änderungen in lokalen Partikel-Clustern bereits bei ausreichend gewachsenen Flüssigkeitsbrücken an Partikelkontakten möglich, obwohl die flüssige Phase bis dahin insgesamt noch keine kontinuierliche Phase im Staubkuchen darstellt. Dieser Effekt kann zum Beispiel erzielt werden, wenn in Anwesenheit von hygroskopischen Salzen (HSP) als Bestandteil des Staubkuchens die Gasfeuchte auf die sogenannte Deliqueszenzfeuchte (DRH) des Salzes erhöht wird. Steigt die Menge der flüssigen Phase im Staubkuchen weiter an, beispielsweise durch Einspeisung von feinen Wassertröpfchen, so entsteht letztendlich eine kontinuierliche Phase der Flüssigkeit, die in allen Fällen für einen Materialtransport, vor allem für lösliche Staubkuchenbestandteile, mit gleichzeitigen morphologischen Änderungen des Staubkuchens sorgt. Diesem theoretischen Gedanken folgend werden im vorliegenden Beitrag (und dem zweiten Teil [22]) zwei laufende, sich ergänzende Projekte in der Grundlagenforschung mit Bezug auf Oberflächenfilter vorgestellt, die sich beide gleichzeitig mit dem Wassergehalt im Trägergas und löslichen Staubkuchenbestandteilen befassen. In Abb. 1 sind die Grundideen und die Forschungsschwerpunkte in den beiden Projekten schematisch dargestellt.

Im ersten Fall (Abb. 1a) liegen hygroskopische Salzpartikeln in einem Staubkuchen aus nicht löslichen Staubpartikeln vor. Der Einfluss einer vorübergehend hohen relativen Feuchte des Rohgases auf den Filterkuchen ist der



**Abbildung 1.** Schematische Darstellung der in der Oberflächenfiltration mit Salzen auftretenden Mechanismen unter Einfluss von Wasser in Form von a) Feuchte und b) Tropfen.

Gegenstand der Untersuchung. Folgende Aspekte liegen besonders im Fokus des Forschungsvorhabens:

- die Restrukturierung des Staubkuchens,
- die Erhöhung der Kohäsion im Staubkuchen sowie
- die Beeinflussung des Ablösevorgangs des Staubkuchens.

Im zweiten Fall (Abb. 1b) liegt ein Filterkuchen aus löslichen Salzpartikeln am Filtermedium vor. Der Stofftransport des Salzes unter Einfluss von Wassertropfen im Rohgas ist Gegenstand der Untersuchung. Zu den Kernaufgaben des Forschungsvorhabens zählen Untersuchungen zu folgenden Aspekten:

- durch Lösungs-, Transport- und Kristallisationsvorgänge bewirkte Umlagerung des Salzes auf der Anströmseite des Filtermediums und Strukturänderungen im Filtermedium sowie
- der Stofftransport in gelöster Form durch das Filtermedium mit anschließender abströmseitiger Drainage oder Re-Entrainment (eine interne Drainage ist in der Regel nur bei sehr dicken, offenporigen Materialien zu erwarten und wird hier daher nicht näher betrachtet).

Die zusammenstellende und vergleichende Darstellung der theoretischen Betrachtungen der beiden Forschungsprojekte in den folgenden Abschnitten (und der experimentellen Ergebnisse im zweiten Teil) dient in erster Linie dem Zweck, gemeinsame Mechanismen, die auf mikroskopischer Ebene wirken, zu identifizieren und zu diskutieren.

## 2 Betrachtung im Falle hygroscopischer Salzpartikeln und hoher relativer Feuchte

Die Gasfeuchte hat, neben zahlreichen Einflussgrößen aus verschiedenen Kategorien, einen großen Einfluss auf das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern [2]. Dabei wird die Gasfeuchte durch die relative Luftfeuchtigkeit (RH) quantifiziert, die sich aus dem Quotienten aus Partialdruck und Sättigungsdampfdruck des in der Luft als Dampf vorliegenden Wassers ergibt. Grund hierfür ist, dass die Partialdruckdifferenz zwischen der Gasphase und der flüssigen Phase des Wassers eine treibende Einflussgröße bei Verdunstungs- und Kondensationsvorgängen ist. Der Einfluss der Gasfeuchte auf das Betriebsverhalten eines Oberflächenfilters lässt sich auf drei Phänomene zurückführen: Sorption, Kapillarkondensation und die Bildung von Flüssigkeitsbrücken zwischen den Feststoffpartikeln des Staubkuchens.

Bereits bei sehr geringer Gasfeuchte bilden sich erste Adsorptionsschichten auf der Oberfläche der Feststoffpartikeln des Staubkuchens aus. Zunächst kommt es zur Bildung einer monomolekularen Schicht, anschließend mit steigender Gasfeuchte zu einer Mehrschichtadsorption [7, 8]. Der an der Oberfläche adsorbierte Dampf liegt hierbei größtenteils in flüssiger Phase vor [9]. Durch die Benetzbarkeit der Feststoffoberflächen bilden sich konkave Grenzflächen der flüssigen Phase. Der dort vorherrschende Kapillardruck führt zu einer Absenkung des Sättigungsdampfdrucks, was mit steigender Gasfeuchte bzw. sinkendem Kapillarradius

bis zur Kondensation des Wasserdampfes führt [4, 9]. Sofern der Kapillarradius klein genug ist, kommt es bereits bei geringeren Gasfeuchten zur Kapillarkondensation. Bei porösen Strukturen, wie beispielsweise einem Staubkuchen, wird jedoch vor allem dann von Kapillarkondensation gesprochen, wenn dieser Effekt gegenüber anderen Mechanismen, die zur Bindung von Flüssigkeit führen, überwiegt [4, 9]. Liegt nun Wasser in flüssiger Form im Staubkuchen vor, was mit zunehmender Gasfeuchte aufgrund der genannten Phänomene in steigender Menge der Fall ist, bilden sich zwangsläufig Flüssigkeitsbrücken an den Kontaktstellen der Feststoffpartikeln untereinander, aber auch zwischen Partikeln und Fasern des Filtermediums aus. Diese konkaven Flüssigkeitsbrücken erhöhen wegen ihrer kohäsiven Kräfte sowohl die mechanische Stabilität des Staubkuchens als auch die Adhäsion des Filterkuchens an der Oberfläche des Filtermediums [2]. Mit steigender Gasfeuchte und damit steigendem Flüssigkeitsvolumen innerhalb des Staubkuchens nehmen diese Einflüsse folglich zu.

Bei der Betrachtung von Staubkuchen, die sowohl aus nicht löslichen Partikeln (NLP) als auch – zu einem geringeren Teil – aus löslichen Partikeln, wie in dem hier betrachteten Fall hygroscopischen Salzpartikeln (HSP), bestehen, sind weitere von der Gasfeuchte abhängige Phänomene relevant. Zum einen sind HSP (bzw. generell lösliche Bestandteile) in der Lage, in der flüssigen Phase des Wassers zu dissoziieren und zum anderen verfügen sie über die Eigenschaft, Wasser aus der sie umgebenden Gasphase beim Erreichen der Deliqueszenzfeuchte (DRH) zu absorbieren und in dieser Flüssigkeit vollständig zu dissoziieren [10]. Die Umkehrung dieses Prozesses, bei dem das Wasser der Lösung schlagartig verdunstet, erfolgt bei Unterschreitung der sogenannten Effloreszenzfeuchte (ERH), die zumindest für freischwebende Partikeln nachweislich deutlich unterhalb der DRH liegt ( $ERH < DRH$ ) [10]. Dieser Prozess, bei dem das gelöste Salz kristallisiert, wird Effloreszenz genannt.

Auch in einem Staubkuchen aus NLP und HSP mit steigender RH werden zunächst Sorptionsschichten gebildet, die bereits zur Bildung erster Flüssigkeitsbrücken führen. Steht die flüssige Phase des Wassers in Kontakt zu den löslichen Bestandteilen des Staubkuchens, also hier den HSP, dann bewirkt ihre Dissoziation in der Flüssigkeit eine Erhöhung der Oberflächenspannung [11] und steigert die durch Flüssigkeitsbrücken wirkenden Kräfte. Mit weiter steigender Gasfeuchte wird nun in besonders kleinen Kapillaren aufgrund der Verringerung des Sättigungsdampfdruckes die DRH lokal erreicht, was für besonders kleine HSP bereits zur vollständigen, an den Kontaktstellen größerer, nicht dissoziierter HSP zu einer partiellen Deliqueszenz führt [12]. Durch dieses Phänomen wird zusätzliche Flüssigkeit in dem Staubkuchen gebunden. Mit weiter steigender RH werden zum einen die Bereiche ausgeweitet, in denen es zur lokalen partiellen Deliqueszenz kommt, zum anderen erfüllen gleichzeitig immer mehr Bereiche, die ausschließlich aus NLP bestehen, die Bedingungen für das Eintreten der Kapillarkondensation. Zusätzlich wachsen die bereits bestehen-

den Flüssigkeitsvolumina weiter an. Wird dann die DRH erreicht, erfolgt die schlagartige vollständige Deliquescenz, was wiederum eine deutliche Flüssigkeitszunahme um ein Vielfaches des ursprünglichen Volumens der festen HSP zur Folge hat. Mit weiter steigender RH erfolgt eine Verdünnung der Salzlösungen sowie eine damit einhergehende exponentielle Volumenzunahme [10]. Hinzu kommen Flüssigkeitsansammlungen durch Erreichen der Kapillarkondensation in immer weiteren Bereichen des Staubkuchens, die exklusiv aus NLP bestehen.

Verändert sich die Rohgasfeuchte der durch einen Staubkuchen aus NLP und HSP strömenden Luft, kann eine Veränderung der Staubkuchenstruktur beobachtet werden [13]. Diese Veränderungen wirken sich u. a. auf den spezifischen Kuchenwiderstand aus und lassen sich in einer Druckverlust-Zeit-Kurve (DZK) feststellen. Abb. 2 zeigt eine Zusammenstellung aus einer DZK, mit der relativen Luftfeuchtigkeit der strömenden Luft im Roh- und Reingas sowie einer schematischen Darstellung der währenddessen im Staubkuchen (aus gemahlenem Kalkstein als NLP mit einer Fraktion von NaCl-Partikeln als HSP) ablaufenden Phänomene und der daraus resultierenden Kuchenstruktur.

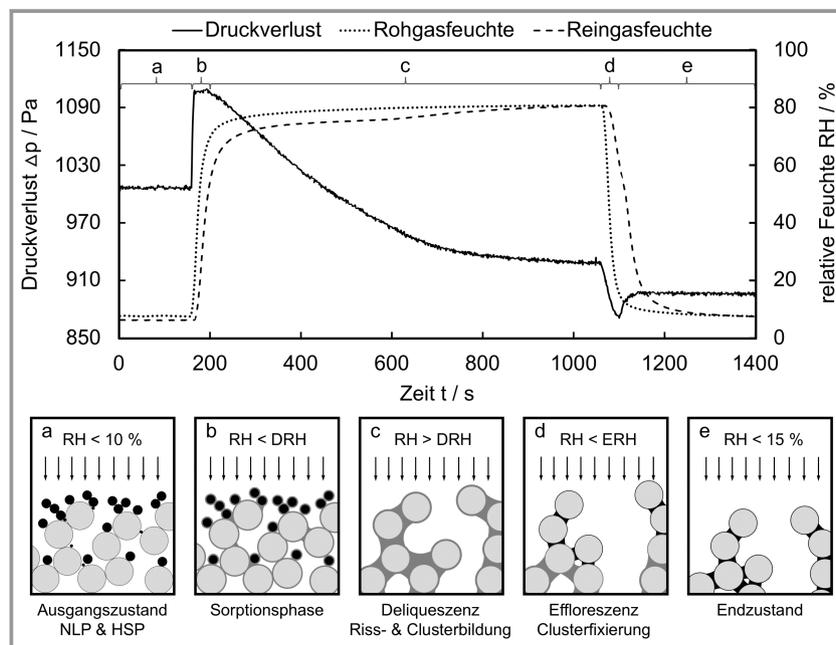
Die DZK des Be- und Entfeuchtungsprozesses im oberen Teil der Abb. 2 ist hier in fünf zeitliche Abschnitte (a–e) unterteilt. Für jeden Zeitabschnitt ist eine schematische Darstellung (Rechtecke a–e im unteren Bereich der Abb. 2) der währenddessen im Staubkuchen ablaufenden Phänomene und der daraus resultierenden Kuchenstruktur gezeigt. Dargestellt werden NLP als hellgraue Kreise, Bereiche mit

Salz als Feststoff in schwarz (bspw. schwarze Kreise für die HSP im Ausgangszustand) sowie Bereiche mit Flüssigkeit (hauptsächlich Salzlösung) in dunkelgrau.

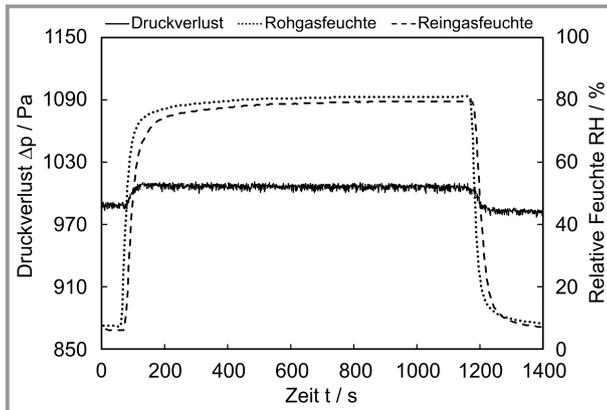
Der *Ausgangszustand* des Staubkuchens, der bei geringer relativer Luftfeuchtigkeit aus NLP und HSP aufgebaut wurde, ist im ersten Zeitabschnitt (Abb. 2, a) dargestellt. Bei einer gleichbleibenden Luftströmung und einer RH unterhalb von 10 % liegt ein konstanter Druckverlust vor ( $\Delta p = 1010 \text{ Pa}$  bei  $v = 5 \text{ cm s}^{-1}$ ). Nahezu keine Flüssigkeit ist im Staubkuchen gebunden.

Die *Sorptionsphase* zeichnet sich durch einen sprunghaften Anstieg des Druckverlusts beim Auftreffen einer feuchten Luftströmung auf den Filterkuchen aus. Dieser sprunghafte Anstieg in diesem zweiten Zeitabschnitt (Abb. 2, b) tritt sowohl in Staubkuchen, die ausschließlich aus NLP bestehen, als auch in Staubkuchen mit einer Fraktion HSP auf. Die Höhe des sprunghaften Druckverlustanstiegs ist abhängig vom Aufbau des Staubkuchens. Die Änderung des Druckverlusts nimmt mit zunehmendem Anteil an HSP zu [14]. Dies ist auf die Abhängigkeit der genannten Phänomene, die zur Bindung von Flüssigkeit im Staubkuchen führen, von der spezifischen Oberfläche, der Größe der Radien der kapillarporösen Bereiche sowie der spezifischen Menge an HSP zurückzuführen. Da die HSP im vorliegenden Fall kleiner als die NLP sind ( $x_{\text{HSP}} < x_{\text{NLP}}$ ), geht ein zunehmender Anteil an HSP mit einer steigenden spezifischen Oberfläche des Staubkuchens einher. Zusätzlich nehmen die kapillarporösen Bereiche mit besonders kleinen Radien zu. Durch die Flüssigkeit, die sich durch Bildung von Sorptionsschichten und durch (partielle) Deliquescenz im Staubkuchen bindet, werden frei durchströmbare, poröse Bereiche im Staubkuchen reduziert bzw. verengt, was wiederum zu einer Erhöhung des spezifischen Kuchenwiderstands und einem damit einhergehenden steigenden Druckverlust führt. Nach aktuellem Kenntnisstand finden in diesem Zeitabschnitt keine nennenswerten Bewegungen der NLP statt. Dies wird ebenfalls bei der Betrachtung der DZK eines Staubkuchens, der ausschließlich aus NLP besteht, deutlich (Abb. 3). Da in diesem Fall während der gesamten Befeuchtung lediglich die Sorptionsphase und die damit einhergehende Reduktion der durchströmbaren Bereiche stattfindet, findet sich der Druckverlust nach der Trocknung des Staubkuchens wieder auf einem ähnlichen Niveau ein wie zu Beginn.

Die *Deliquescenzphase* beginnt, sobald die Effekte der lokalen partiellen Deliquescenz insbesondere in Bereichen, die zumindest zu einem großen Teil aus HSP bestehen, zu ersten Bewegungen der Par-



**Abbildung 2.** DZK an einem Staubkuchen aus NLP mit einer Fraktion von HSP während eines Befeuchtungs- und eines anschließenden Entfeuchtungsprozesses durch regulierte Gasfeuchte, mit schematischer Darstellung der im Staubkuchen ablaufenden Phänomene und der daraus resultierenden Kuchenstruktur in den Zeitabschnitten a bis e (hellgrau für NLP, schwarz für HSP, dunkelgrau für Flüssigkeit).



**Abbildung 3.** DZK an einem Staubkuchen, der ausschließlich aus NLP besteht, während eines Befeuchtungs- und eines anschließenden Entfeuchtungsprozesses durch regulierte Gasfeuchte.

tikelschicht aus HSP führen (vgl. Untersuchungen zur lokalen Deliqueszenz in [12]). Diese Strukturänderung ist ein kontinuierlicher Prozess, der von der Größe der HSP abhängt. In diesem dritten Zeitabschnitt (Abb. 2, c) werden deutlich größere Mengen an Flüssigkeit im Staubkuchen aus der Luftströmung aufgenommen, da die restlichen noch kristallinen HSP mit Überschreiten der DRH eine vollständige Deliqueszenz unterlaufen. Die Einstellung des neuen, auf die NLP wirkenden Kräftegleichgewichts führt zu einer Restrukturierung des Staubkuchens: Verglichen mit der vorherigen Partikelschicht mit kleineren Poren ziehen sich die NLP zu dendritenartigen Clustern zusammen. Dabei entstehen größere Poren, die sogar als Mikrorisse betrachtet werden können. Dies führt zur Reduktion des Durchströmungswiderstands des Staubkuchens [13]. Bei einer RH oberhalb der DRH erfolgt mit weiter steigender RH eine überproportionale Volumenzunahme der flüssigen Phase (vgl. [10]). Eine Änderung der Kräfte, die auf die NLP wirken, erfolgt, solange die RH sich ändert. Da die in diesem Prozess benötigte Menge an Feuchte durch die durchströmende Luft antransportiert wird und die lokal verfügbare Menge an Feuchte zu einem bestimmten Zeitpunkt folglich begrenzt ist, unterliegt die Feuchtebindung im gesamten Staubkuchen stets einem zeitlich gestreckten Prozess. In Bereichen mit einer RH oberhalb der DRH wird der Luftströmung eine entsprechend große Menge an Wasser für die Deliqueszenz des Salzes entzogen.

Die *Effloreszenzphase* (Abb. 2, d) kennzeichnet sich durch einen anfangs deutlichen Abfall des Druckverlusts. Der größte Teil der im Staubkuchen gebundenen Flüssigkeit besteht aus Salzlösung, die beim Auftreffen der Luftströmung mit einer RH unterhalb der ERH in diesem vierten Zeitabschnitt schlagartig kristallisiert. Die großen Mengen verdunstenden Wassers führen zu einer starken Änderung des Flüssigkeitsvolumens. Auf diese Weise werden freidurchströmbare Bereiche geschaffen, was zu einer Reduktion des Durchströmungswiderstands führt. Die erneute

Änderung der Kräfte, die auf die NLP wirken, führt zu einer weiteren spontanen Restrukturierung und einer Fixierung der gebildeten Cluster durch die Ausbildung von Feststoffbrücken zwischen den NLP. Die Entstehung von Mikrorissen im Staubkuchen ist denkbar, durch die der Durchströmungswiderstand ebenfalls weiter sinkt. Die freiwerdenden großen Mengen an Wasser erhöhen die Feuchte der strömenden Luft, wodurch tiefer im Staubkuchen liegende Salzlösung zeitverzögert kristallisieren kann. Ein Zusammenziehen des Staubkuchens in Strömungsrichtung während der Clusterfixierung ist eine mögliche Folge. Unter Umständen führt dies, vor allem ab einem hohen Anteil an HSP im Staubkuchen, zu einer derartigen Kompression des Staubkuchens, dass daraus eine leichte Erhöhung des Durchströmungswiderstands resultiert [13, 14].

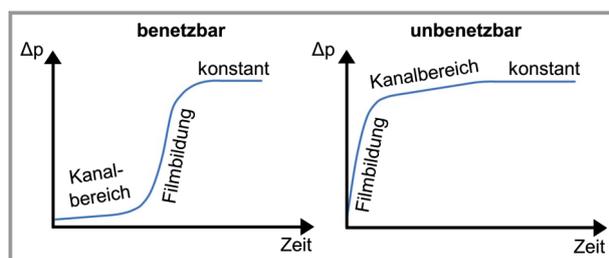
Im *Endzustand* haben sich zwischen den NLP durch die vollständig kristallisierte Salzlösung Feststoffbrücken gebildet. In diesem fünften und letzten Zeitabschnitt (Abb. 2, e) ist die Verkrustung des Staubkuchens zu sehen [13] mit der eine Erhöhung der Kohäsion zwischen den NLP einhergeht. Eine Änderung der Adhäsion des Staubkuchens zum Filtermedium ist zu erwarten, wenn Salzlösung bis in die Kontaktstellen zwischen den NLP und den Fasern des Filtermediums vorgedrungen ist.

Bewirkt die durch die oben ausführlich beschriebenen Mechanismen resultierende Restrukturierung des Staubkuchens eine signifikante Erhöhung der Kohäsion im Staubkuchen ohne eine gleichzeitige Änderung der Adhäsion des Staubkuchens zum Filtermedium, ist ein besseres Regenerierungsergebnis unter vergleichbaren Regenerierungsbedingungen zu erwarten. Dies geht in der Regel immer mit der Bildung von größeren Kuchenbruchstücken bei der Ablösung des Staubkuchens einher. Theoretische Grundlagen hierfür beschreibt Zhang ausführlich in seiner Arbeit [15], bei der die sogenannten transienten kinetischen Effekte während des Ablösevorgangs des Staubkuchens betrachtet werden.

### 3 Betrachtung im Falle von Salzen (löslicher anorganischer Bestandteile) und Wassertropfen

Neben einem erhöhten Wassergehalt in Form von Wasserdampf haben auch Wassertropfen, die in der Praxis durch entsprechende Prozessbedingungen oder Wettereinflüsse und deren Schwankungen auftreten, einen erheblichen Einfluss auf das Betriebsverhalten von Oberflächenfiltern. Aus der Filtration von Aerosolen mit einer flüssigen dispersen Phase ist bekannt, dass sich Filter bei der Filtration von gasgetragenen Tropfen im Betrieb generell anders verhalten als bei der Filtration von Staub – bzw. Schwebstoff-Filter für feste Partikeln – in mancher Hinsicht sogar entgegengesetzt: Während die Effizienz von Staubfiltern mit zunehmender Staubbildung steigt, nimmt der Abscheidegrad mit der Flüssigkeitsbelastung generell ab [16]. Unterschiede sind auf

das Verhalten des abgeschiedenen Materials zurückzuführen. Abgeschiedene Flüssigkeit bleibt im Gegensatz zu festen Partikeln auch nach der Abscheidung noch mobil und wird durch Strömungs- und Kapillarkräfte in die Filterstruktur transportiert. Dabei hängen die Transportwege von Gas und Wasser im Filtermedium stark von der Benetzbarkeit des Filtermediums ab [17]. Eine Beschreibung des Flüssigkeitstransports durch Filtermedien lässt sich im Detail in der Literatur zur Ölnebel filtration finden [18]. Das dort entwickelte Kanal-Film-Modell beschreibt, wie sich abgeschiedene Flüssigkeitsströme im Filtermedium in definierten Flüssigkeitskanälen bewegen, die sich aus koaleszierten Tröpfchen bilden und durch das Filtermedium bis zur Reingasseite ausbreiten. Schematisch ist die DZK, die sich nach dem Modell ergibt, in Abb. 4 dargestellt.



**Abbildung 4.** Die DZK nach dem Kanal-Film-Modell zeigt die Ausbreitung von Flüssigkeit im Filtermedium in der Ölnebel filtration (nach [18]).

Bei der Migration der Flüssigkeit durch das Filtermedium steigt der Druckverlust mit der Zeit in einer instationären Phase der Kanalausbreitung linear an. Von der Struktur und Benetzbarkeit des Filtermediums, von Flüssigkeitseigenschaften und von Prozessbedingungen hängt ab, in welche Bereiche des Filtermediums sich diese Kanäle ausbreiten sowie auch deren Größe. Zusätzlich zu den Kanälen kann sich an der Filtergrenzfläche ein nahezu geschlossener Flüssigkeitsfilm ausbilden, der den Druckverlust sprunghaft ansteigen lässt. Der Druckverlust durch den Film kann als kapillarer Eintrittsdruck im Falle nicht benetzbarer Filtermedien, bzw. als kapillarer Austrittsdruck im Falle benetzbarer Filtermedien interpretieren werden und ist u. a. abhängig von weiteren Filtermedieneigenschaften. Dementsprechend bildet sich der Film entweder auf der Filteranström- bzw. Filterabströmseite aus. Tritt die Flüssigkeit schließlich an der Filterabströmseite aus und drainiert, stellt sich ein annähernd stationärer Zustand ein [18]. Neben der Drainage kann es durch Blasenbildung bei hohen Anströmgeschwindigkeiten durch Aufplatzen der Blasen zu Re-Entrainment, dem Wiedereintrag von Flüssigkeit in den Gasstrom kommen. Dieses Verhalten ist sowohl aus der Ölnebel filtration als auch in Zusammenhang mit Salzwasser insbesondere durch Untersuchungen atmosphärischer Prozesse bekannt [19–21].

Die beschriebenen Vorgänge sind in ähnlicher Form auch bei der Abscheidung von Wassertropfen zu erwarten. Bei

der Betrachtung von Staubkuchen, die aus löslichen HSP bestehen sind der Lösungsvorgang und der Stofftransport der HSP relevant. Da ein Aerosol aus Luft und stabilen Wassertropfen immer mit einer hohen RH einhergeht, sind die in Abschn. 2.1 beschriebenen Mechanismen auch hier zu erwarten und überlagern sich mit der Wirkung der Wasserbeaufschlagung. Die vollständige Lösung eines Staubkuchens aus HSP setzt, anders als bei den zuvor betrachteten, mikroskopischen, lokalen Deliqueszenzeffekten, eine vergleichsweise lange Einwirkungszeit voraus. Durch Beaufschlagung mit Wassertropfen entsteht eine Lösung, die sich im Filtermedium ausbreiten kann. Dadurch wird das gelöste Material der HSP mobilisiert, solange keine Trocknung und damit kein Kristallisieren der HSP aus der Lösung durch eine Unterschreitung der ERH auftritt.

Folgende drei Mechanismen werden durch den Kontakt von Wassertropfen mit dem löslichen Staubkuchen ausgelöst:

Das großflächige Überschreiten der DRH durch Beaufschlagung mit Wassertropfen führt zunächst zu einer anströmseitigen Umlagerung der HSP. Ein trockener Filterkuchen aus feinen HSP weist eine charakteristische Dendritenstruktur auf, die maßgeblich für den Druckverlust im Filtrationsbetrieb verantwortlich ist. Aufgrund der in Abschn. 2 beschriebenen Vorgänge führen teilweise oder vollständig gelöste HSP auf dem Filter zunächst zu einem Einbruch der Dendritenstrukturen. Allgemein zeigt sich das Zusammenfallen der Dendriten bzw. der Aufbruch des Filterkuchens in einem Abfall des Druckverlusts und beeinflusst damit maßgeblich das Betriebsverhalten. Die Umlagerung der HSP auf dem Filtermedium hängt von charakteristischen Parametern der Lösung, wie Oberflächenspannung, und des Filtermediums, insbesondere seiner Benetzbarkeit, ab. Bei kleinen Flüssigkeitsmengen im Falle nicht benetzbarer Filtermedien ist der zu erwartende Flüssigkeitsfilm auf der Anströmseite noch nicht vollständig ausgebildet und der kapillare Eintrittsdruck wird nicht erreicht. Im Falle benetzbarer Filtermedien ist noch nicht genügend Flüssigkeit für eine Kanalbildung vorhanden. Daher findet in beiden Fällen die Umlagerung der Partikeln in der Ebene anströmseitig auf annähernd zweidimensionalem Raum statt. In dieser Anfangsphase befindet sich das gesamte Material, das ursprünglich den trockenen Filterkuchen gebildet hat, noch immer oberflächennah auf der Anströmseite des Filters. Folgt anschließend erneut eine Feststoffbelastung ist dieses Material fortwährender Teil des Filterkuchens.

Durch anhaltende Beaufschlagung mit Wassertropfen steigt das akkumulierte Flüssigkeitsvolumen. Die Salzlösung dringt in das Filtermedium ein und breitet sich damit in der Filtermatrix aus. Bei einer darauffolgenden Trocknung des Filtermediums oder einem lokalen Trocknen der Salzlösung und Unterschreiten der ERH im Filtermedium kristallisiert das Salz im Inneren des Filtermediums. Das führt zu einer Strukturänderung im Filtermedium. Das auskristallisierte Salz verändert für den weiteren Filtrationsprozess somit charakteristische Parameter des Filtermediums wie Faser-

durchmesser und Porosität. Folgt nach der Trocknung erneut eine Feststoffbeladung ist das zuvor umgelagerte Material nicht mehr Teil des Filterkuchens, sondern kann als Teil der Filtermatrix betrachtet werden.

Bleibt eine Trocknung aus und wird die Beaufschlagung mit Wassertropfen fortgesetzt, kommt es zum *Stofftransport* von gelöstem Salz durch das gesamte Filtermedium und die Lösung tritt auf der Reingasseite aus. Bei diesem dritten Mechanismus treten analog zur Ölnebelfiltration zwei Fälle auf: Die Lösung drainiert an der Filtrerrückseite oder Lösungstropfen werden in den Reingasstrom eingetragen. In welchem Verhältnis Drainage und Re-Entrainment zueinanderstehen, hängt von der Strömungsgeschwindigkeit und den Stoffeigenschaften der Lösung und des Filtermediums ab. Dieses dritte Szenario beschreibt den Verlust von zuvor abgeschiedenem Partikelmaterial und den Materialtransport auf die Reingasseite des Filters durch den Einfluss von Wassertropfen auf das beladene Filtermedium. Das zuvor abgeschiedene Material hat den Filter penetriert und verlassen. Bei erneuter Beladung des Filters ist es daher nicht mehr Teil der betrachteten Filtermatrix. Tritt dieses Szenario allein auf, so ist der Filter ausgewaschen und der Zustand vergleichbar mit dem anfangs unbeladenen Filtermedium. Allerdings ist in der Regel eine Überlagerung der drei Szenarien zu erwarten. Schematisch sind die drei Mechanismen, die durch den Kontakt von Wassertropfen mit einem löslichen Filterkuchen ausgelöst werden, in Abb. 1 zusammengefasst.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die gemeinsamen theoretischen Grundlagen zweier Forschungsvorhaben wurden dargestellt. Es wurde gezeigt, dass der Wassergehalt im Trägergas einen Einfluss auf die Betriebsparameter bei der Oberflächenfiltration hat. Dieser Einfluss hängt stark von der Menge des vorhandenen Wassers und damit verbunden mit dem Aggregatzustand des Wassers (also gasförmig oder flüssig) ab.

HSP können bei erhöhter RH durch ihr Deliqueszenzverhalten die Haftkräfte zwischen Partikeln ändern. Dies birgt das Potenzial, bei kontrollierter Zugabe von HSP und  $RH > DRH$  den Filterkuchen insgesamt durch induzierte Flüssigkeit zu beeinflussen.

Ein zusätzlicher Wassereintrag in Form von Wassertropfen könnte mit Blick auf vorhandene Erkenntnisse aus dem angrenzenden Forschungsbereich der Ölnebelfiltration zur vollständigen Mobilisierung des Partikelmaterials und zum Stofftransport von HSP durch das Filtermedium auf die Reingasseite des Filters führen. Durch die Zusammenführung der Projekte und Identifikation gemeinsamer Grundlagen wurde ein umfassender Überblick über die Thematik gegeben, der wiederum weiterführende Forschungsansätze anregen soll. Dieser theoretischen Betrachtung schließt sich ein zweiter Teil an, in dem die theoretische Betrachtung experimentell überprüft und erörtert

wird. Dies beinhaltet die Untersuchung der Regeneration von Oberflächenfiltern bei veränderten Haftkräften durch Zugabe von HSP und  $RH > DRH$  und die Untersuchung des Einflusses von Wassertropfenbeaufschlagung auf mit HSP beladene Oberflächenfilter.

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen der Projekte 406085079 und 281470635. Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

## Formelzeichen

$\Delta p$	[Pa]	Druckverlust
$t$	[s]	Zeit
$v$	[cm/s]	Filteranströmgeschwindigkeit, Filterflächenbelastung
$x_{HSP}$	[ $\mu\text{m}$ ]	charakteristische Partikelgröße hygroskopischer Salzpartikeln
$x_{NLP}$	[ $\mu\text{m}$ ]	charakteristische Partikelgröße nicht löslicher Partikeln

## Abkürzungen

DRH	Deliqueszenzfeuchte
DZK	Druckverlust-Zeit-Kurve
ERH	Effloreszenzfeuchte
HSP	hygroskopische Salzpartikeln
NLP	nicht lösliche Partikeln
RH	relative Luftfeuchtigkeit

## Literatur

- [1] E. Schmidt, *Abscheidung von Partikeln aus Gasen mit Oberflächenfiltern*, VDI Verlag, Düsseldorf **1998**.
- [2] E. Schmidt, T. Pilz, *Filt. Sep.* **1996**, 33 (5), 409–415. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(97\)84301-7](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84301-7)
- [3] W. Schütz, *Haftung von Feststoffpartikeln an Festkörperoberflächen in gasförmiger Umgebung. Einfluss von Anpresskräften und der Umgebungsfeuchte*, Dissertation, Universität Karlsruhe **1979**.
- [4] H. Schubert, *Kapillarität in porösen Feststoffsystemen*, Springer-Verlag, Heidelberg **1982**.
- [5] O. Kadlec, M. M. Dubinin, Comments on the limits of applicability of the mechanism of capillary condensation, *J. Coll. Interface Sci.* **1969**, 31, 479–489.
- [6] F. Löffler, *Untersuchung der Haftkräfte zwischen Feststoffteilchen und Filterfaseroberflächen*, Dissertation, Universität Karlsruhe **1965**.
- [7] D. Bathen, Breitenbach, *Adsorptionstechnik*, Springer, Heidelberg **2001**.
- [8] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzung*, VDI Verfahrenstechnik, 2. Aufl., Springer, Berlin **2021**.

- [9] G. Lindau, *Über Adsorption und Kapillarkondensation*, *Kolloid-Z.* **1932**, *60*, 253–263. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01429779>
- [10] I. N. Tang, *Phase Transformation and Growth of Aerosol Particle Composed of Mixed Salts*, in *Aerosol Chemical Process in the Environment* (Ed: K. R. Spurny), CRC Press, Boca Raton, FL **2000**, Ch. 4.
- [11] K. L. Wolf, *Physik und Chemie der Grenzflächen: Zweiter Band: Die Phänomene im Besonderen*, Springer, Berlin **2013**.
- [12] D. Horst, Q. Zhang, E. Schmidt, Deliquescenz und Effloreszenz hygroskopischer Salzpartikeln in Partikel-Wand- und Partikel-Partikel-Kontakten, *Chem. Ing. Tech.* **2019**, *91* (1–2), 46–54.
- [13] D. Horst, Q. Zhang, E. Schmidt, Deliquescence and efflorescence of hygroscopic salt particles in dust cakes on surface filters, *Chem. Eng. Technol.* **2019**, *42* (11), 2348–2357.
- [14] D. Horst, Q. Zhang, E. Schmidt, *Influence of the deliquescence and efflorescence of hygroscopic salt particles on the performance of surface filters*, in *Conference Proceedings FILTECH 2019*, G03-03.
- [15] Q. Zhang, *Partikelschichtablösung unter Beachtung transients kinetischer Effekte – neuer Ansatz zur Modellierung mit Exkurs zur Post-Coat-Filtration*, Dissertation, Universität Wuppertal, Shaker Verlag, Aachen **2011**.
- [16] P. C. Raynor, D. Leith, *J. Aerosol Sci.* **2000**, *31* (1), 19–34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00029-4)
- [17] I. E. Agranovski, R. D. Braddock, *AIChE J.* **1998**, *44* (12), 2784–2790. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690441218>
- [18] D. Kampa, S. Wurster, J. Buzengeiger, J. Meyer, G. Kasper, *Int. J. Multiphase Flow* **2014**, *58*, 313–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.007>
- [19] S. Wurster, J. Meyer, H. E. Kolb, G. Kasper, *Sep. Purif. Technol.* **2015**, *152*, 70–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.08.012>
- [20] D. J. Moore, B. J. Mason, *Quart. J. R. Met. Soc.* **1954**, *80* (346), 583–590. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49708034607>
- [21] N. Reinke, A. Vofsnacke, W. Schütz, M. K. Koch, H. Unger, *Water Air Soil Pollut.* **2001**, *1*, 333–340. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013188029495>
- [22] A. D. Schwarz, D. Horst, J. Meyer, Q. Zhang, A. Dittler, E. Schmidt, *Chem. Ing. Tech.* **2022**, *94*, (8), in press. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite202100213>

DOI: 10.1002/cite.202100158

## Auswirkungen eines erhöhten Wassergehalts auf lösliche Staubkuchenbestandteile in der Oberflächenfiltration – Teil 1: Theoretische Betrachtungen

Almuth D. Schwarz\*, David Horst, Jörg Meyer, Qian Zhang, Achim Dittler, Eberhard Schmidt

**Research Article:** Ein optimaler, ressourcenschonender Einsatz von Oberflächenfiltern in der Gasreinigung setzt das Verstehen grundlegender auftretender Prozesse am Filter voraus. In dieser zweiteiligen Publikation wird der Einfluss von Feuchte auf abgeschiedenes Partikelmaterial dem Einfluss von Wassertropfen auf selbiges gegenübergestellt. .... ■

