

# Beurteilung der Online-Belagsabreinigung durch Rußbläser und Klopfer

Dipl.-Ing. (FH) Jens Harpeng, CUTEC Clausthal

Dr.-Ing. Stefan Vodegel, CUTEC Clausthal

Dr.-Ing. Ragnar Warnecke, GKS Schweinfurt

(veröffentlicht in: Born, M. (Hrsg.): Dampferzeugerkorrosion. Saxonia: Freiberg, 2005)

## Gliederung

1. Einleitung
2. Online-Reinigungsverfahren für Strahlungs- und Konvektionsheizflächen
3. Grundlagen und Wirkung von Rußbläsern
4. Grundlagen und Wirkung von Klopfern
5. Haftkräfte abreinigbarer Belägen
6. Zusammenfassung

Die in diesem Vortragsmanuskript enthaltenen Ergebnisse entstammen zum Teil einem von der VGB-Forschungsstiftung bei CUTEC geförderten sowie von vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und der EU im Rahmen von EFRE bei GKS durchgeführten Forschungsprojekten.

## 1. Einleitung

Beläge auf den Heizflächen von MVA- und Kohlekesseln haben nachteilige Auswirkungen auf deren Betrieb (**Abb. 1**) und beeinträchtigen durch resultierende Wirkungsgradeinbußen, erforderliche Reinigungsmaßnahmen und verursachte Stillstandszeiten die Wirtschaftlichkeit dieser Anlagen.

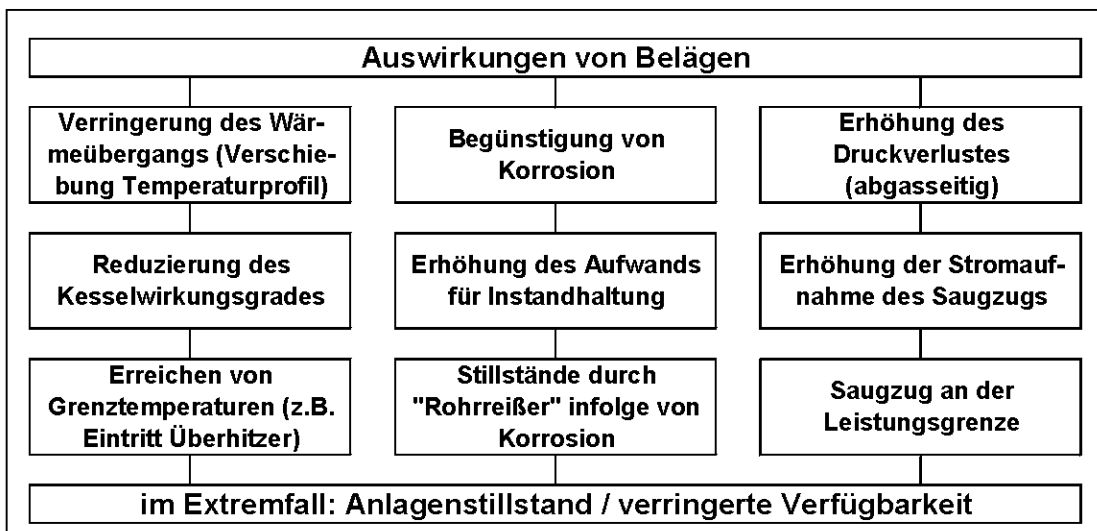
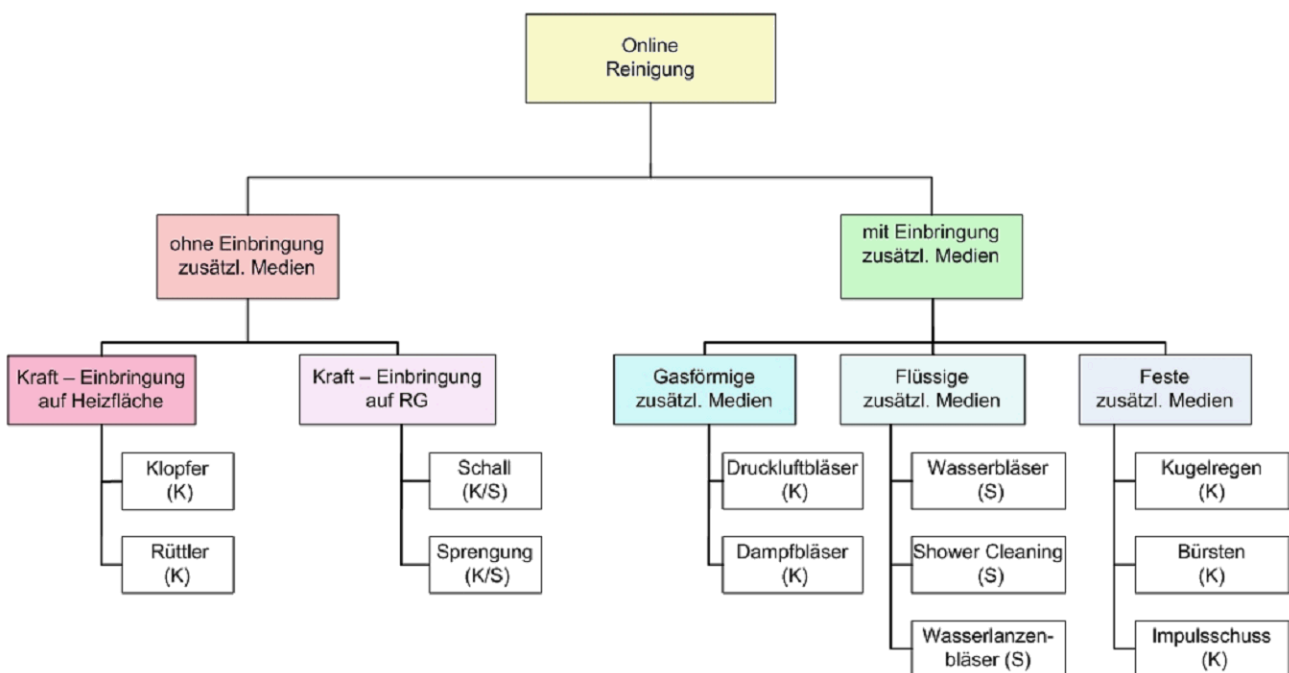


Abb. 1: Auswirkungen von Belägen

Um der Belagsbildung und den damit verbundenen Auswirkungen entgegen zu wirken bzw. diese zu vermindern werden Online-Reinigungen durchgeführt. Dazu sind entsprechende Apparate (z.B. Rußbläser) installiert; zusätzlich können weitere Methoden (z.B. Sprengreinigung) eingesetzt werden.

Um Belagsteile abzulösen, müssen diese einer Kraft ausgesetzt werden, die größer ist als die Haftkraft zum Rohr bzw. zur Belagschicht darunter. Entsprechend lassen sich die Reinigungsmethoden nach der zur Kraftübertragung genutzten Materie einteilen (**Abb. 2**).



**Abb. 2:** Online-Reinigungsmethoden gegliedert nach dem Medium zur Kraftübertragung (geeignet für: K = Konvektionsheizflächen; S = Strahlungsheizflächen)

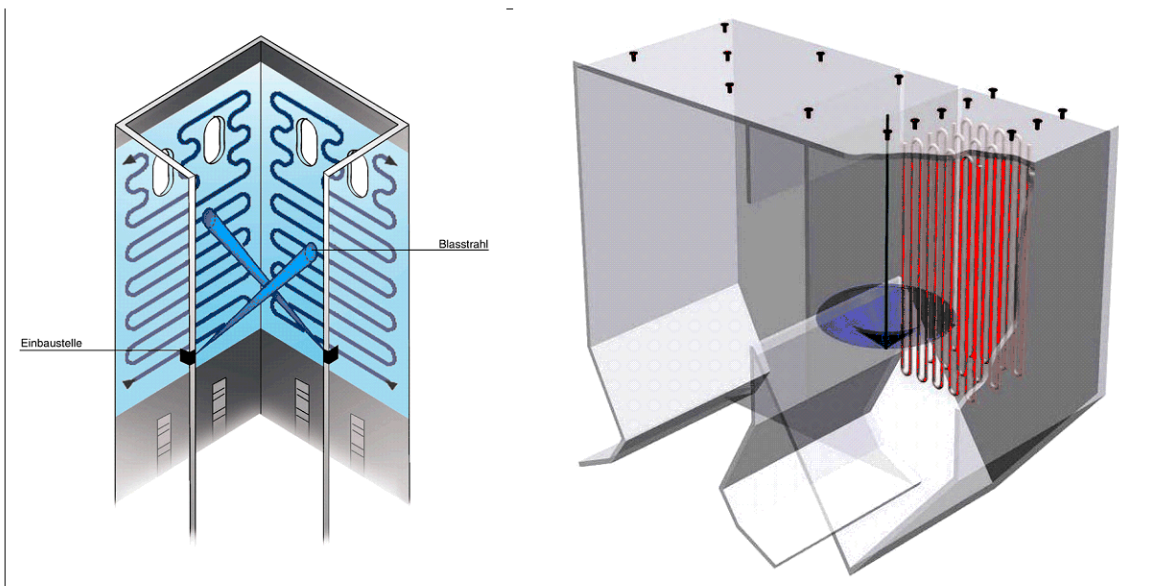
In den Dampferzeugern von Müllverbrennungsanlagen, um die es in diesem Vortrag primär gehen soll, werden Rüttler, die Schallreinigung und Bürstensysteme nur selten eingesetzt, so dass auf diese nachfolgend nicht weiter eingegangen wird. Auf Wasserbläser wird ebenfalls nicht explizit weiter eingegangen, da diese in MVA nicht als Wandbläser eingesetzt werden und die anderen Bauformen bei den Dampf- und Druckluftbläsern abgehandelt werden. Die rot unterlegten Verfahren Shower-Cleaning-System (SCS) und Wasserlanzenbläser (WLB) werden in den Strahlungszügen eingesetzt, die blau gekennzeichneten in den Konvektionszügen, die Sprengreinigung in beiden.

## 2. Online-Reinigungsverfahren für Strahlungs- und Konvektionsheizflächen

### Wasserlanzenbläser und Shower-Cleaning-System

Die beiden in den Strahlungszügen eingesetzten Online-Reinigungsverfahren sind in **Abb. 3** schematisch dargestellt. Wasserlanzenbläser reinigen gegenüberliegende Membranwände und teilweise seitliche Wände ab. Sie sind besonders für Kesselzüge mit großem Querschnitt geeignet. Das Shower-Cleaning-System ist eher für kleinere Querschnitte geeignet und reinigt auch zwischen Schotten und Kesseldecken. Da beim

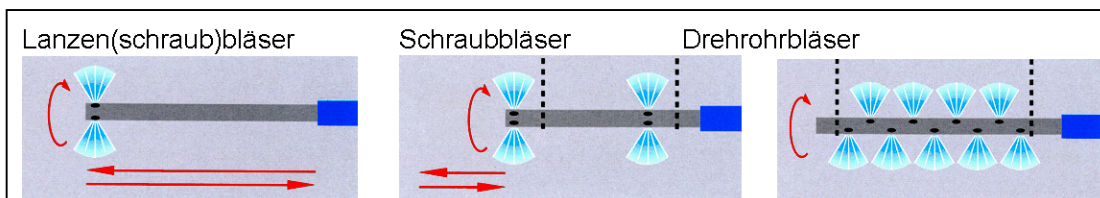
SCS die auftreffenden Wassertropfen keinen nennenswerten Impuls besitzen, muss die Reinigungswirkung im Wesentlichen auf der Verdampfung des durch Kapillarkräfte in die Belagsporen eingedrungenen Wassers beruhen, dessen Volumenvergrößerung Belagsteile abplatzen lässt. Wenn Wasser auf eine heiße Oberfläche gelangt, bildet sich zwischen diesen eine Dampfschicht (Leidenfrost-Phänomen), die den Wärmeübergang begrenzt. Diese Dampfschicht kann sich bei auftreffenden Sprühtropfen (SCS) besser ausbilden als bei einem gebündelten Strahl mit hoher Geschwindigkeit (WLB). Vorstellbar ist allerdings auch die Erklärung des Phänomens der Lockerung der Beläge durch Temperaturreduktion (Schrumpfung mit Aufbrechen der Bindungen). SCS ist in jedem Falle für den Rohwerkstoff ein sicheres bzw. schonendes Verfahren.



**Abb. 3:** Schemata zum Wasserlanzenbläser (links) und Shower-Cleaning-System (rechts); (Abb. von Fa. Clyde-Bergemann)

## Rußbläser

Die wohl am weitesten verbreiteten Apparate zur Reinigung von Konvektionsheizflächen sind Rußbläser, die in aller Regel Dampf, manchmal Druckluft oder Wasser zur Reinigung verwenden. Die üblichen Bauformen sind in **Abb. 4** dargestellt.



**Abb. 4:** Bläserbauformen (Abb. von Fa. Rosink)

Die Lanzenschraubbläser (Ruheposition außerhalb des Kessels) werden eher bei hohen Abgastemperaturen eingesetzt, die Drehrohrbläser bei niedrigeren (dort kein Einsatz von Wasser als Online-Reinigungsmedium). Aus den unterschiedlichen Vorschublängen resultieren weitere Unterschiede, die in **Abb. 5** dargestellt sind.

	Vorschub	Platzbedarf außerhalb des Kessels	Düsenanzahl (Stück, z.B.)	Düsendurchmesser	Massenstrom pro Düse	Reinigungskraft
Lanzenschraubbläser	sehr groß	klein (2)	groß			
Schraubbläser	mittel	mittel (8)	mittel			
Drehrohrbläser	keiner; klein	groß (32)	klein			

**Abb. 5:** Gegenüberstellung von Bläserbauformen

## Klopfer

Zur Erzeugung des Klopfimpulses werden sowohl mechanisch Hämmer, die über eine Welle angetrieben werden, als auch pneumatische Klopferwerke eingesetzt. Pneumatische Klopferwerke haben den Vorteil, dass der Schlagimpuls relativ leicht variiert werden kann und dass auch einzelne Rohrschlangen gereinigt werden können. Der Einsatz von Klopferwerken erfolgt überwiegend in Horizontalzügen auf hängende Heizflächen. Der Schlagimpuls wird dort auf den unteren Sammler übertragen. Ferner werden Klopfer vielfach zur Abreinigung von Schottenheizflächen eingesetzt. Die Auftreffpunkte auf die Schotten liegen in der Regel auf mittlerer Schottenhöhe oder auch auf mehreren Höhen.

## Kugelregenanlagen

Der Einsatz von Kugelregenanlagen ist in MVA nur aus dem Economiser-Bereich bekannt. Eine Anlage reinigt dabei jeweils einen kompletten Vertikalzug.

## Sprengreinigung

Im Gegensatz zu den vorgenannten Verfahren sind für die Sprengreinigung keine Apparate installiert. Stattdessen handelt es sich um eine Dienstleistung darauf spezialisierter Anbieter. Dies spiegelt sich auch in den nachfolgend aufgeführten Aspekten wider.

Positive Aspekte:

- Keine Investitionskosten für den Betreiber
- Flexibler Einsatz (bei Online nur soweit geeignete Luken vorhanden sind)
- Als Ergänzung anderer Reinigungsverfahren einsetzbar

Negative Aspekte:

- Behördliche Genehmigung ist einzuholen
- Abstimmung mit Versicherung erforderlich
- Abhängigkeit vom Dienstleister („Reaktionszeit“)
- Sperrung des Kesselhauses für die Zeit der Sprengung
- Anfall großer Aschemengen in kurzer Zeit

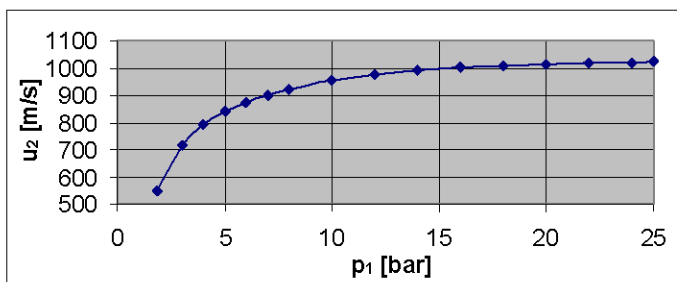
### 3. Grundlagen und Wirkung von Rußbläsern

Nachfolgend werden mit dem Begriff „Rußbläser“ nur mit Dampf- oder Druckluft, nicht jedoch mit Wasser arbeitende Rußbläser gemeint!

Rußbläser sind in vielfältigen Ausführungen am Markt vorhanden. Über ihre Auslegung und ihren Einsatz bestehen umfangreiche Erfahrungen. Um eine Schädigung der Rohre durch Tropfenerosion zu vermeiden, muss

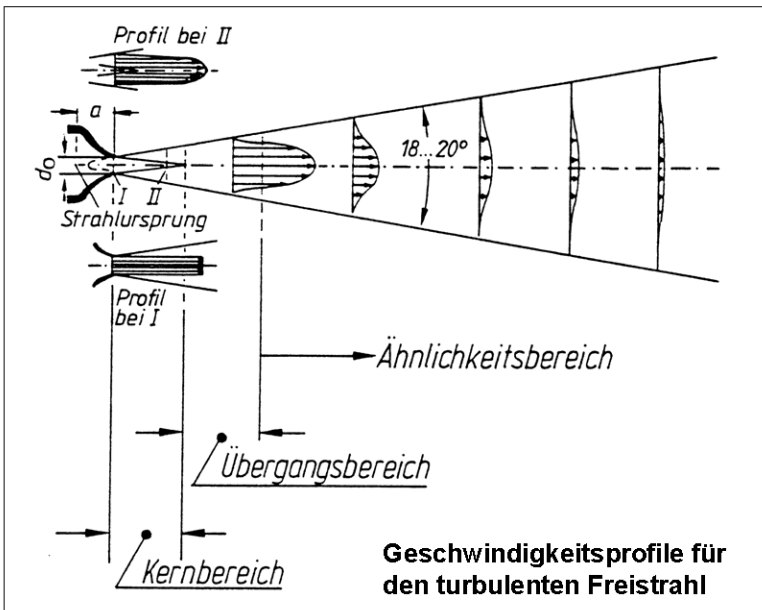
- die Dampfleitung vor dem Blasvorgang vorgewärmt und entwässert werden sowie
- der Dampf auch nach der Expansion in der Düse noch überhitzt sein.

Der Dampfdruck wird üblicherweise vor dem Eintritt in das Blasrohr reduziert. Anschließend erfolgt eine überkritische Expansion in Venturidüsen auf Überschallgeschwindigkeit. Der austretende Dampfmassenstrom verhält sich dabei proportional zum Quadrat des Düsendurchmessers und proportional zum Dampfdruck am Düseneintritt. Die Austrittsgeschwindigkeit des Dampfes steigt in etwa logarithmisch mit dem Dampfeintrittsdruck. Die Austrittsgeschwindigkeit nähert sich mit zunehmendem Dampfdruck asymptotisch einem Maximalwert (**Abb. 6**).



**Abb. 6:** Für typischen Bläser berechnete Austrittsgeschwindigkeit

Nach dem Verlassen der Düse durchläuft der Dampfstrahl zunächst einen „Kern- und einen Übergangsbereich“, bevor er ab einer Entfernung von 8 x Düsendurchmesser in den „Ähnlichkeitsbereich“ gelangt (**Abb. 7**). Nach den dort gültigen „Freistrahlförmeln“ nimmt die Geschwindigkeit im Zentrum umgekehrt proportional zur Entfernung ab. Bei Hochtemperaturendoskopieaufnahmen konnte keine stärkere Belagsstärke zu den weiter vom Bläser entfernten Kesselecken festgestellt werden. Die größere Entfernung könnte durch den veränderten Winkel und den resultierenden Scherkräften des auftreffenden Strahls kompensiert werden.



**Abb. 7:** Strahlausbreitung ab Düsenaustritt

Anstelle der während des Vortrags vorgeführten Videosequenzen werden nachfolgend beispielhaft einige Standbilder aus der HT-Endoskopie dargestellt (Anmerkung: Da Videoaufnahmen aus überlagerten Halbbildern bestehen, weisen die Standbilder (=Halbbilder) eine geringere Qualität auf als die Videosequenz). **Abbildung 8** lässt im Vergleich vor/nach Rußblasen keine Veränderung der Beläge erkennen, obwohl die Heizfläche in starke Bewegungen versetzt wird. Diese ist bei den Standbildern anhand des erhöhten Abstandes zwischen Überhitzerrohr und Tragrohr auf dem mittleren Bild zu erkennen.



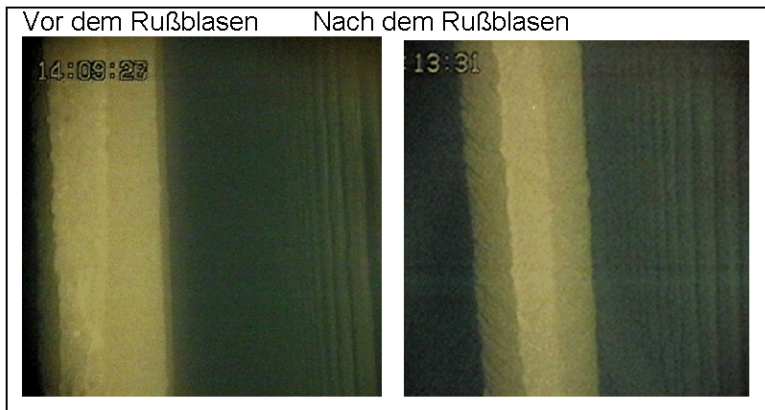
**Abb. 8:** Abströmseite eines Überhitzers (linkes Rohr) und Tragrohr (rechtes Rohr)

In **Abbildung 9** ist die deutliche Zunahme der Staubbelastung des Abgases durch den Betrieb eines davor angeordneten Rußblägers zu erkennen.



**Abb. 9:** Staubbeladung des Abgases im „Normalzustand“ und während des Rußblasens

In **Abbildung 10** ist, wie in den allermeisten Fällen, kaum eine Veränderung an der Belagskontur an der Anströmseite eines Überhitzers durch das Rußblasen sichtbar. **Abbildung 11** zeigt den einzigen festgestellten Fall, in dem durch einen Rußbläser eine deutliche Zerstörung von Belagsstrukturen erkennbar ist. Es handelt sich dabei jedoch nicht um einen Überhitzer, sondern um eine Verdampferfahne.



**Abb. 10:** Anströmseite eines Überhitzerbündels



**Abb. 11:** Anströmseite einer Verdampferfahne

Die Betriebsdaten einer Linie zeigten eine erhöhte Absenkung der Abgastemperatur um ca. 1 Kelvin über den Endüberhitzer sowie um ca. 0,4 Kelvin über den 3. Kesselzug (**Abb. 12**).

Veränderung der Temperaturdifferenz des Abgases zw. vor und nach Rußblasen						
		1. Bündel	2. Bündel	3. Bündel	4. Bündel	5. Bündel
M1	Kelvin	4,4	1,2	1,8	-0,1	-2,0
M2	Kelvin	0,2	-0,8	-0,3	-2,0	-2,1
M3	Kelvin	4,7	2,4	-0,1	0,3	-1,2
Mittelwerte Bündel	Kelvin	3,1	1,0	0,5	-0,6	-1,8
Mittelwert über 3. Zug	Kelvin			<b>0,4</b>		

Abb. 12: Beispiel für die bewertete Reinigungswirkung von Rußbläsern (M = Messung)

#### 4. Grundlagen und Wirkung von Klopfen

Beim Klopfen werden die Heizflächen einem Schlagimpuls ausgesetzt, der diese beschleunigt und in Bewegung versetzt. Die Bewegung der Rohre führt zu einer elastischen Verformung. Einerseits bekommen auf den Rohren haftende spröde Beläge, die sich nicht mit den Rohren verformen können, Risse und fallen teilweise als eher große Partikel ab. Andererseits treten bei einer Beschleunigung der Rohre zwischen diesen und den darauf haftenden Belägen und Partikeln aufgrund deren Massenträgheit Kräfte ( $F = m \cdot a$ ) und damit Spannungen auf. Diese können insbesondere bei locker anhaftenden Partikeln ebenfalls zu Ablösungen führen. Beide Mechanismen sind schematisch in **Abb. 13** dargestellt.

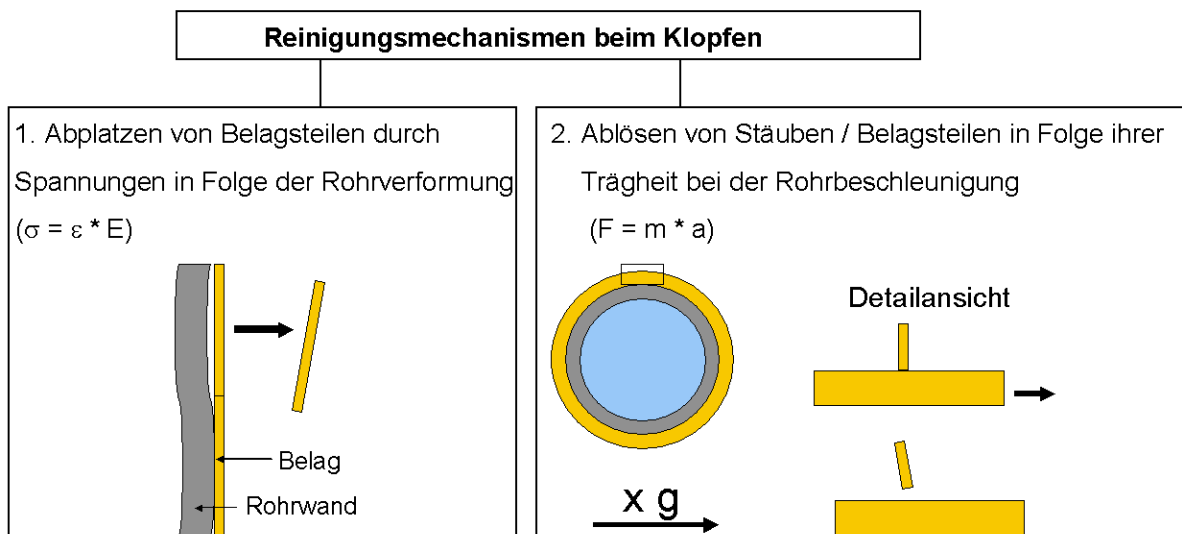
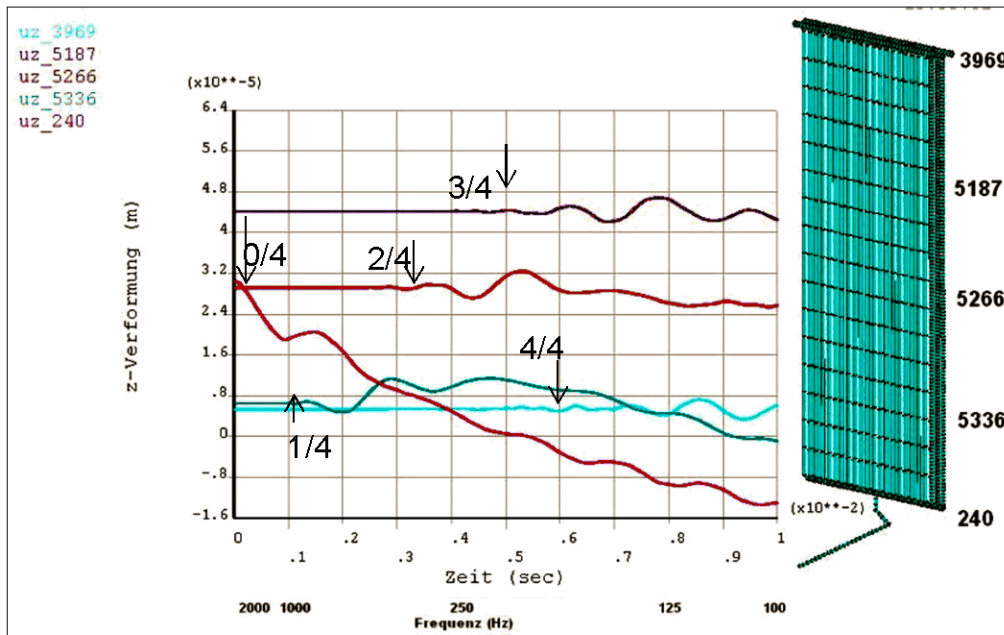
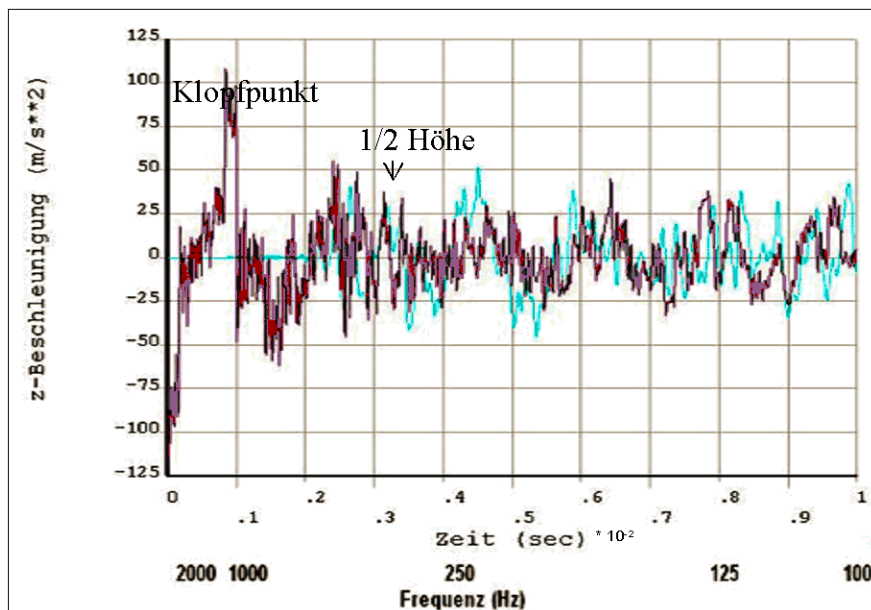


Abb. 13: Wirkmechanismen der Klopfung (links: Verformung, rechts: Trägheit)

Zur Durchführung von Berechnungen wurde eine existierende „Harfe“ abgebildet. Nachfolgende Berechnungen erfolgten unter Zugrundelegung eines Schlagimpulses, einer Hertz'schen Pressung und einer Dämpfung der Harfe, die sich aus den Stoffdaten der verwendeten Materialien und dem aufgeprägten Impuls ergeben. Die Berechnungsergebnisse zeigten eine weitgehende Übereinstimmung mit DMS-Messergebnissen von dieser Harfe. Ausmaß und zeitlicher Verzug der Verformung vom Klopfpunkt nach oben sind in **Abb. 14** dargestellt.

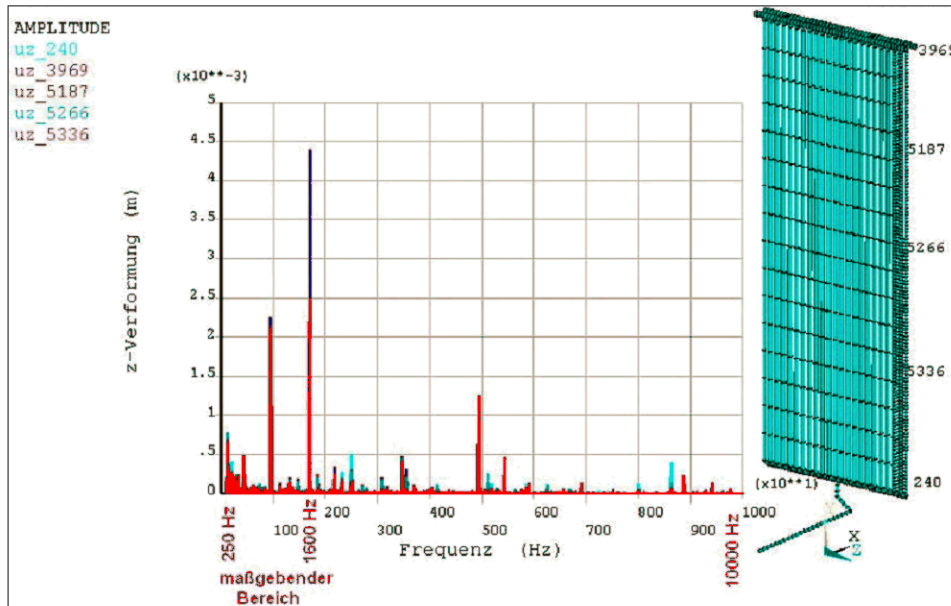


**Abb. 14:** Verformung der Harfe in verschiedenen Höhen (0/4 = unten = 240; 4/4 = oben = 3969)



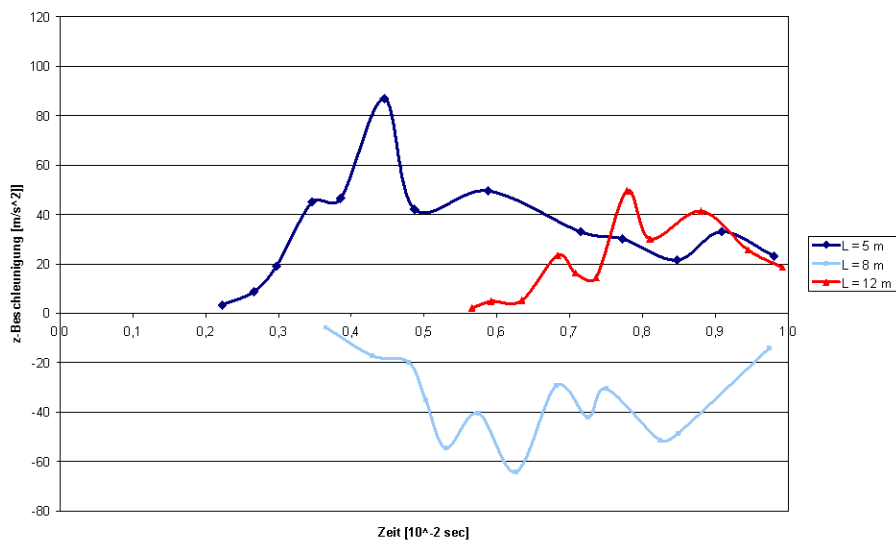
**Abb. 15:** Beschleunigung der Harfe am Klopfpunkt (unten) und auf halber Höhe.

Eine zeitliche Verzögerung versehen mit einer Dämpfung existiert auch bei der Beschleunigung (**Abb. 15**). Die Frequenzganganalyse (**Abb. 16**) zeigt, dass der maßgebliche Frequenzbereich mit großen Verformungen und hohen Beschleunigungen von ca. 200 bis ca. 2000 Hz reicht.

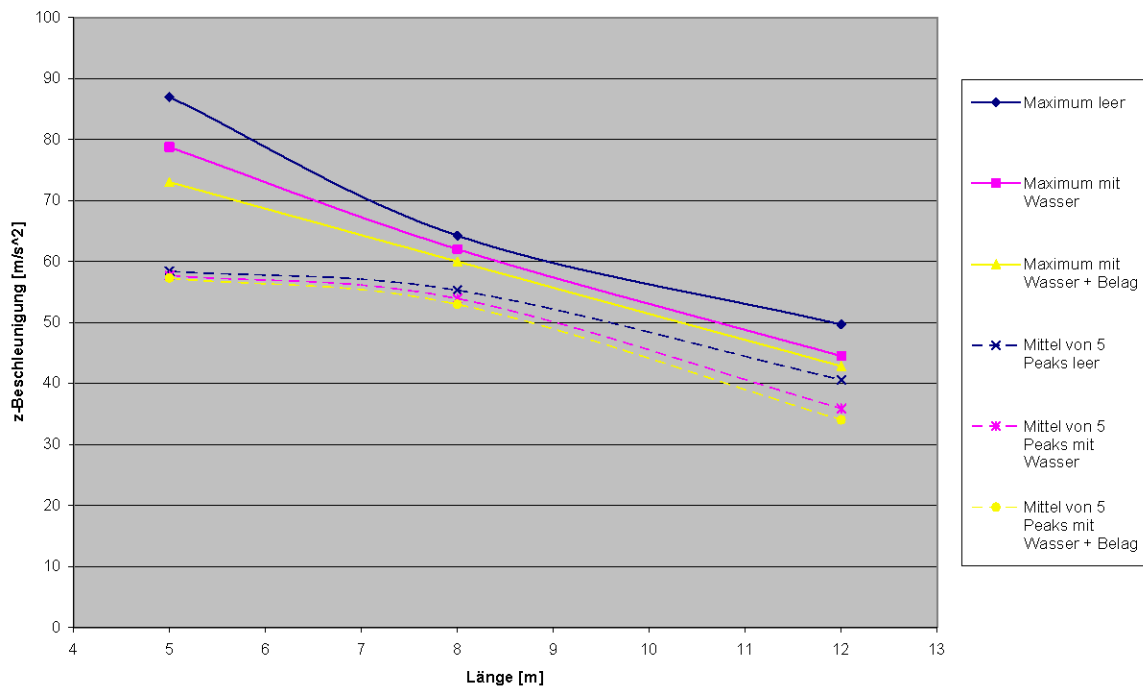


**Abb. 16:** Frequenzganganalyse

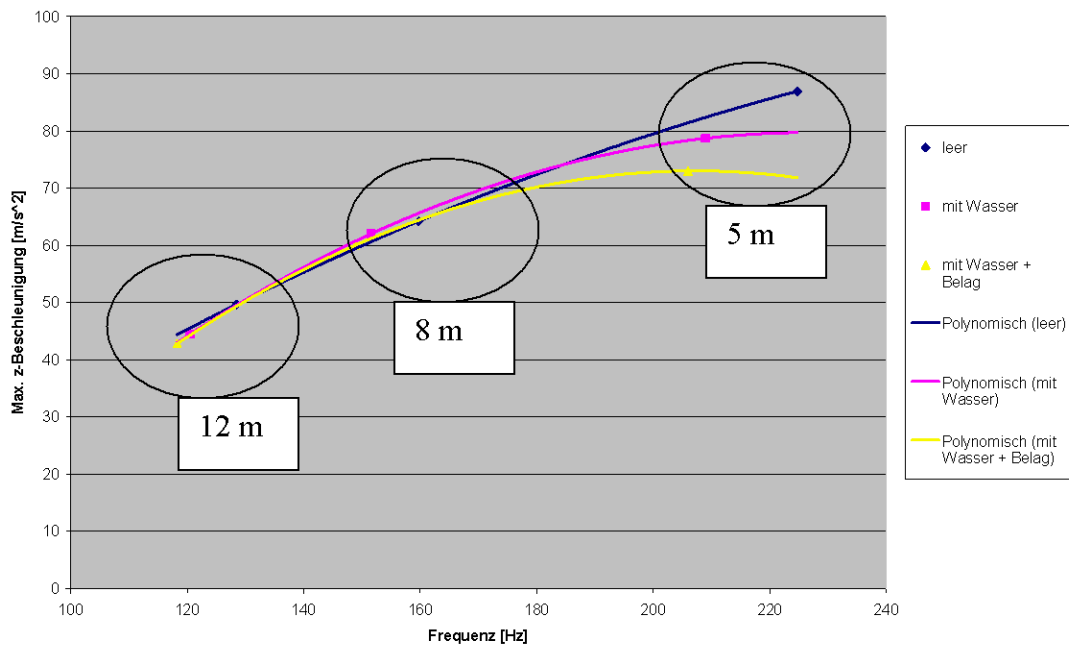
Die Verlängerung der Rohre führt einerseits zu einer Dämpfung der Beschleunigung und einer Verschiebung zu niedrigeren Frequenzen (**Abb. 17**). Eine Veränderung der zu klopfenden Heizfläche hinsichtlich der Rohrlänge der „Harfen“ und der Beladung mit Wasser-Füllung und Belägen wird in **Abb. 18** und **19** dargestellt.



**Abb. 17:** Umhüllende für die Extremwerte der Beschleunigungskurven für unterschiedliche Harfen-Längen am oberen Harfenpunkt (nahe oberem Sammler)



**Abb. 18:** Beschleunigung in Abhängigkeit der Harfen-Länge und deren Beladung im oberen Harfenpunkt (nahe oberem Sammler)



**Abb. 19:** Korrelation von maximaler Beschleunigung und Frequenz

Die Gewichtszunahmen durch Wasser und Belag sind weniger relevant als die Veränderung der Rohrlängen. Die Veränderung des Klopfimpulses geht linear ein, so dass die Erhöhung der Beschleunigung der längeren Rohre direkt durch eine Erhöhung des Impulses erreicht werden kann (z.B. für 12m-Rohr etwa eine Verdoppelung des Impulses). Noch nicht betrachtet ist hier die tatsächliche konstruktive Krafteinleitung über die Konstruktion (Klopfer- bzw. Sammlerboden etc.).

Anstelle der während des Vortrags vorgeführten Videosequenzen werden nachfolgend beispielhaft einige Standbilder dargestellt. **Abb. 20** zeigt die stark verschmutzte Anströmseite des ersten Konvektionsbündels einer Linie, an dem bei den Videoaufnahmen nur ein langsames Schwingen zu erkennen ist. Letzteres hat im Allgemeinen keine Reinigungswirkung, was obige Berechnungen bestätigt.



**Abb. 20:** Anströmseite eines Überhitzers (1. Bündel)

In **Abb. 21** ist auf dem mittleren Bild der durch die Klopfung abgelöste Staub von einem Überhitzer zu erkennen. In beiden Abbildungen ist jedoch im Vergleich vor/nach Klopfung keine Veränderung der Belagskonturen zu erkennen. An einem Economiser (**Abb. 22**) wurde dagegen ein Abplatzen von schalenförmigen Belagsteilen festgestellt, was vermutlich durch die im Vergleich zum Überhitzer niedrigere Temperatur begünstigt wird. Die beiden Pfeile im mittleren Bild markieren davonfliegende Belagsteile. Der Pfeil im rechten Bild weist auf den soeben erfolgreich gereinigten Rohrbereich.



**Abb. 21:** Anströmseite eines Überhitzers

Eine Auswertung von Betriebsdaten einer Linie über mehrere Tage ergab eine zusätzliche Absenkung der Abgastemperatur über die Überhitzerbündel um ca. 0,8 Kelvin nach der Klopfung (**Abb. 23**). Auffällig ist dabei die starke Streuung der Messergebnisse. Um zu verlässlichen Aussagen zu kommen, ist eine aufwändige Auswertung erforderlich.



Abb. 22: Anströmseite eines Economisers

Zeitliche Änderungen zwischen vor und nach Klopfung					
	Dampfmenge	RG-Temperatur vor ÜH 1	RG-Temperatur nach ÜH 2	RG-Temperatur Kesselaustritt	Frischdampf-Temperatur
	t/h	K	K	K	K
M1	-0,3	7,8	4,5	2,5	4,5
M2	-0,5	-6,7	-8,8	-4,0	-2,2
M3	0,6	-7,5	-12,0	-5,3	-11,2
M4	0,0	-4,2	-1,5	-4,0	-0,8
M5	0,1	-2,8	-1,3	0,3	-3,8
M6	0,1	-0,8	0,0	0,5	2,7
Mittelwert	0,0	-2,4	-3,2	-1,7	-1,8
Differenz		-0,8			

Abb. 23: Beispiel für die bewertete Reinigungswirkung von Klopfen (M = Messung)

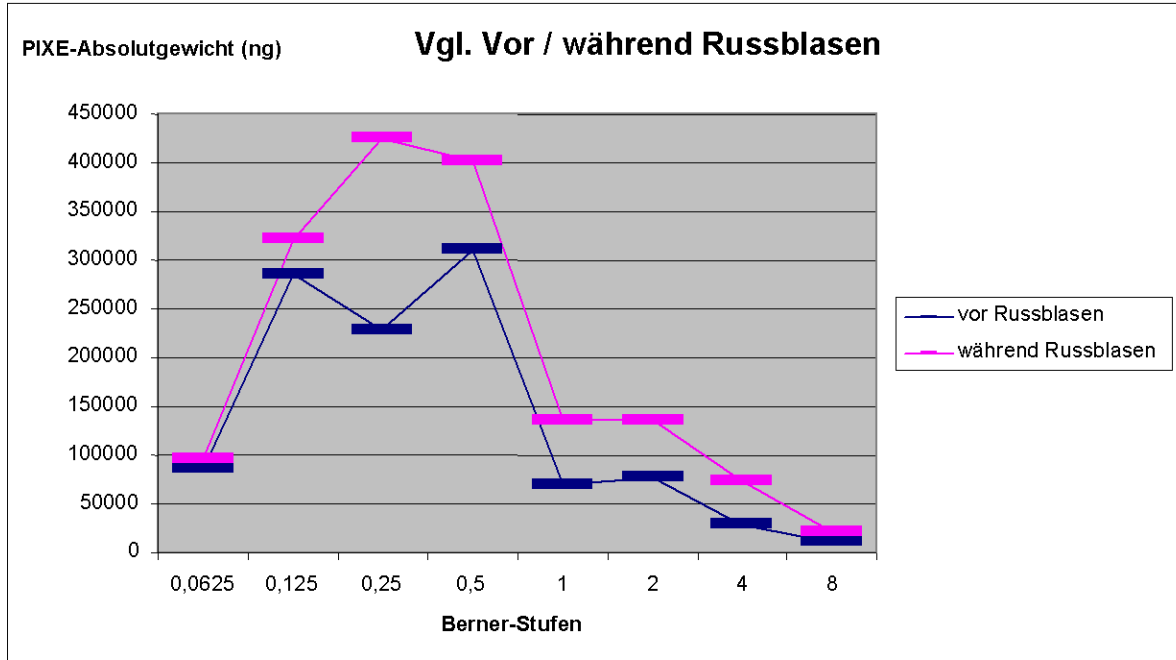
## 5. Haftkräfte abreinigbarer Beläge

Obige Überlegungen führen zu der Frage nach dem Widerstand, der sich der Online-Reinigung entgegenstellt. Dieser Widerstand ist in den Haftkräften der Partikel (incl. Kondensierbaren) an dem Rohr bzw. an dem bereits existierenden Belag sowie an den nachfolgenden chemisch/mineralogischen Reaktionen begründet. Die Kenntnis der Haftkräfte kann hilfreich sein, um die erforderliche Reinigungskraft für das System abschätzen zu können. Daraus kann möglicherweise auf verbesserte Abreinigungsmethoden bzw. -parameter geschlossen werden. Messungen dieser Haftkräfte unter den im Betriebszustand herrschenden Bedingungen sind nicht bekannt.

Zur Beschreibung der Haftkräfte ist die Kenntnis der Partikeleigenschaften erforderlich. Im Rahmen der oben genannten EFRE-Projekte wurde u.a. die Größenverteilung der auf dem Rauchgasweg in einem Müllverbrennungskessel vorhandenen Partikel bestimmt. Dabei sind erste Ergebnisse hinsichtlich der Partikelgrößen vor und während Rußblasen gewonnen worden (**Abb. 24 und 25**).

Die Reinigungswirkung von Rußbläsern und Klopfen ist in der Praxis etwa gleichwertig (siehe Abschn. 3 und 4). In erster Näherung könnten die Partikelgrößen folglich ähnlich sein. Unter dieser Annahme werden die Beschleunigungskräfte beim Klopfen auf die gemessenen Partikel angewandt.

Da nicht nur die maximalen Beschleunigungen/Impulse sondern auch geringere lange einwirkende Beschleunigungen für die Reinigungswirkung entscheidend sein können, ist für die richtige Wahl der Beschleunigung eine Abschätzung der Dauer der Reinigungswirkung maßgeblich, um daraus die Reinigungswirkung abzuschätzen.

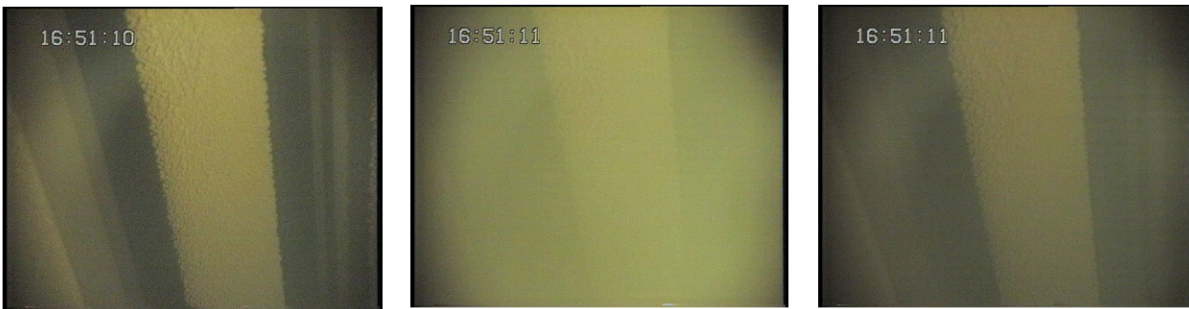


**Abb. 24:** Partikelgrößenverteilung der online gemessenen Partikel kleinerer Fraktionen aus Berner-Impaktor (in  $\mu\text{m}$ ) vor und während dem Rußblasen [Deuring, 2005]

Messung	Partikel < 10 $\mu\text{m}$	Partikel > 10 $\mu\text{m}$	Gesamt Part.-Konz.
Vor RB	75 Mas.-%	25 Mas.-%	4,2 $\text{g}/\text{m}_{\text{n.tr.}}^3$
Während RB	46 Mas.-%	54 Mas.-%	8,9 $\text{g}/\text{m}_{\text{n.tr.}}^3$

**Abb. 25:** Mengenverteilung der Partikel vor und während des Rußblasens (RB) (vorläufige Ergebnisse)

Die Beobachtung der Trübung beim Klopfen in **Abb. 26** zeigt eine Trübungsdauer von maximal 0,5 sec. Dies wurde aus einem Klopfwellen-Umlauf von rund 16 sec. bei 32 Klopfstellen, also etwa 0,5 sec. je Klopfstelle, ermittelt. Bei der Schaltung der Klopfung müsste an der Beobachtungsstelle etwa alle 2,5 sec eine Staubwolke vorbei kommen, so dass die Bilder aus **Abb. 26** sicher nur einen Klopfvorgang zeigen. Mit 0,5 sec liegen somit auch die berechneten Frequenzen in der richtigen Zeiteinheit. Dies gilt insbesondere auch dadurch, dass der Vorgang der Trübung durch strömungstechnische Verzögerungen (Turbulenzen etc.) in die Länge gezogen wird.



**Abb. 26:** Trübungsdauer beim Klopfen

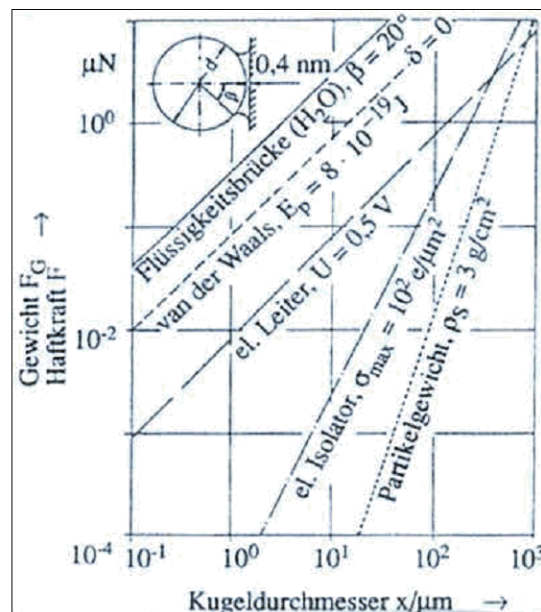
Wird für die Partikelmasse beispielsweise eine mittlere hydrodynamisch runde Partikelgröße von 1  $\mu\text{m}$  angenommen, ergibt sich bei einer Dichte von 2.000  $\text{kg/m}^3$  und unter Berücksichtigung einer mittleren Beschleunigung der anhaftenden Partikel von 50  $\text{m/s}^2$  (siehe Abschn. 4) eine Beschleunigungskraft von:

$$F_{\text{Beschleunigung}} = m \cdot a = \rho \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (d/2)^3 \cdot a \approx 1 \cdot 10^{-15} \text{ kgm/s}^2 = 1 \text{ E-15 N}$$

Die Haftkraft kann dieser Beschleunigungskraft beim Ablösen gleichgesetzt werden:

$$F_{\text{Beschleunigung}} = F_{\text{Haftkraft}} = 1 \text{ E-15 N.}$$

Stellt man dieser Haftkraft der mindestens wirkenden van-der-Waals-Kraft gegenüber, die sich aus **Abb. 27** mit etwa 1 E-7 N abschätzend lässt, zeigt sich ein Unterschied von 8 Größenordnungen. Erst bei einer Partikelgröße von rund 500  $\mu\text{m}$  wäre somit die Überwindung der Haftkräfte durch Beschleunigung möglich. Dies lässt die messtechnisch schwierig zu bestimmende Partikelgröße der Zyklonfraktion erahnen.



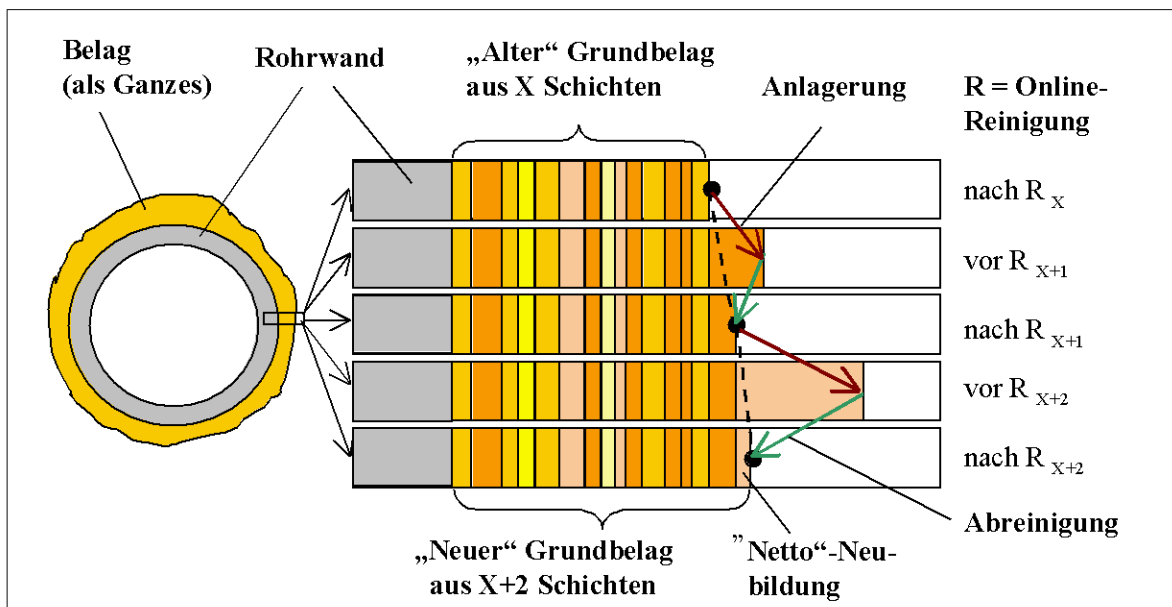
**Abb. 27:** Berechnete bezogene Haftkraft F zwischen Kugel und Platte in Abhängigkeit des Durchmessers x für verschiedene Haftmechanismen nach H. Rumpf

Da diese vorläufige Betrachtung der Partikelgrößen auch einen nennenswerten Anteil kleinerer Partikel zeigt, lässt dies darauf schließen, dass entweder die Partikel bei der Abreinigung zerkleinert werden oder aber ein zusätzlicher Mechanismus das Ablösen der Partikel erleichtert, also zu einer Reduzierung der Haftkraft führen kann. Letzteres könnte z. B. die „Vorschädigung“ der Haftkräfte durch mechanische oder thermische Wechselbeanspruchungen sein.

An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Partikelgrößen-Verteilungen beim Klopfen bzw. die detaillierten Effekte beim Rußblasen zu bestimmen, sowie weitere Einblicke in die Eigenschaften und Stoffdaten der Beläge zu gewinnen.

## 6. Zusammenfassung

Aus den Filmaufnahmen und dem Vergleich von Standbildern vor und nach der Reinigung geht hervor, dass im Überhitzerbereich gebildete feste Beläge in aller Regel durch die Online-Reinigung mit Rußbläsern und Klopfen in nur sehr begrenztem Umfang entfernt werden. Andererseits ist auf den Videoaufnahmen ein Ablösen von Stäuben (Klopfung) bzw. eine erhöhte Staubbeladung des Abgases hinter im Betrieb befindlichen Rußbläsern zu erkennen. Zudem ist nach Reinigungsmaßnahmen meist ein erhöhter Staubanfall in den Austragsvorrichtungen festzustellen. Daraus folgt, dass in der Regel nur frisch angelagerte Stäube mehr oder weniger abgelöst werden. Der Einfluss auf eine erhöhte Wärmeaufnahme durch das gereinigte Bündel beschränkt sich auf eine Rauchgas-Temperaturabsenkung um ca. 1 Kelvin. Bei primärer Betrachtung der Zeitpunkte nach den Reinigungsvorgängen kann man von einer quasikontinuierlichen Belagsbildung ausgehen, wie sie in **Abb. 28** schematisch dargestellt ist.



**Abb. 28:** Schema „Quasikontinuierliche Belagsbildung“ [Harpeng, 2005]

Ein dauerhafter Verbleib einmal gebildeter Belagsschichten auf einem Rohr bedeutet, dass

- das Rohr nach dem Aufbau einer ersten Belagsschicht gegen Erosion geschützt ist

- der ersten Belagsschicht, auch wenn Stofftransporte in und durch den Belag möglich sind, hinsichtlich möglicher Korrosion eine besondere Bedeutung zukommt

## **7. Literatur**

[Deuerling, 2005] - DEUERLING, CHR.; MAGUHN, J.; NORDSIECK, H.; WARNECKE, R.; ZIMMERMANN, R.: Gas- und Aerosol-Dynamik in Leerzügen von MVA. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen beim Einsatz Heizwert- und Schadstoffreicher Fraktionen –Seminar am 14.-15. Juni 2005 in Hannover*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005

[Harpeng, 2005] - HARPENG, J.; VODEGEL, S.; WARNECKE, R.: Beurteilung der Online-Belagsabreinigung durch Rußbläser und Klopfer. In: VDI-Wissensforum (Hrsg.): *Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen beim Einsatz Heizwert- und Schadstoffreicher Fraktionen –Seminar am 14.-15. Juni 2005 in Hannover*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005

[Leschonski, 1998] - LESCHONSKI, K.: Vorlesungsskript – Mechanische Verfahrenstechnik. TU Clausthal, 1998