

Dekontamination von Rohrleitungen mittels Vibration

Tanja Bösing¹, Frank Ambos¹, Akramullah Aminy², Sascha Gentes²

¹sat. Kerntechnik GmbH, 67547 Worms, Deutschland

²Karlsruher Institut für Technologie, Technologie und Management im Baubetrieb, 76131 Karlsruhe, Deutschland

1 Einleitung

Natürlich vorkommende radioaktive Stoffe (NORM - Naturally Occurring Radioactive Materials) kommen überall im Erdreich vor und verursachen die bekannte terrestrische Strahlung. Besonders häufig treten NORM in tiefen Gesteinsformationen auf und können bei der Gewinnung von Stoffen aus der Erde freigesetzt werden. Durch den Einsatz von großen Mengen Wasser bei der Erdgas- und Erdölförderung werden NORM in der geförderten Flüssigkeit gelöst und transportiert. Beim Bewegen der Flüssigkeit durch die Steigrohre kommt es zu einer Zustandsänderung der Flüssigkeit und infolgedessen zur Ausfällung von unterschiedlichen Stoffen. Im Laufe der Zeit setzen sich die ausgefällten Stoffe an den Rohrwänden ab und bilden feste Inkrustationen aus. Zum größten Teil handelt es sich bei diesen Ablagerungen um ungefährliches Bariumsulfat und Calciumcarbonat, daneben aber auch um NORM-Stoffe. Dabei handelt es sich unter anderem um Radionuklide, wie beispielsweise Ra-226, Ra-228, Pb-210, Po-210, Strontium und außerdem Quecksilber [1, 2, 3]. Aufgrund der Gefährlichkeit der Ablagerungen unterliegen diese generell der Strahlenschutzverordnung: Sie sind dort als überwachungsbedürftige Rückstände deklariert [4]. Norm-Stoffe, welche durch technische Prozesse verstärkt anfallen sind unter dem Begriff TENORM (technologically enhanced naturally occurring radioactive materials) bekannt.

Bei Wartung und Rückbau von Erdgas- und Erdöl-Förderanlagen werden kontaminierte Rohrleitungen aus der Erde gezogen und müssen vor der Rückführung in den Wertstoffkreislauf dekontaminiert werden. Die bisher eingesetzten Techniken basieren vorwiegend auf diversen Strahlverfahren wie dem Wasser-Hochdruckstrahlverfahren und dem Sandstrahlverfahren [3]. Die verfahrensbedingte Einbringung von Hilfsstoffen für die Dekontamination führt zu einer Vergrößerung der Menge an kontaminierten Abfall [3]. Aufgrund der großen Menge der jährlich anfallenden kontaminierten Rohrablagerungen stellt die Reduzierung der Sekundärabfallmenge eine außerordentlich große Herausforderung dar. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, ist die Entwicklung eines auf der Vibrationstechnologie basierenden mechanischen Verfahrens zur Dekontamination dieser Rohrleitungen unter Vermeidung von Sekundärabfall und infolgedessen Ermöglichung einer umweltfreundlicheren Dekontamination.

2 Dekontamination mittels Vibration

Erste Grundlagenuntersuchungen haben gezeigt, dass es zum Abplatzen der spröden kontaminierten Ablagerungen infolge mechanischer Einwirkung kommt. Fig. 1 zeigt Bruchstücke der Ablagerungen, die durch mechanisches Einschlagen mit einem Werkzeug aus der Rohrwand herausgebrochen wurden. Um eine durchgehende Dekontamination des ganzen Rohres zu ermöglichen, muss ein geeignetes Werkzeug hochfrequente Stöße erzeugen.



Fig. 1 und 2. Rohr nach Bearbeitung mittels mechanischem Verfahren, abgeplatzte Beschichtungsstücke nach der Bearbeitung

Ausgehend von dieser Idee wurden Überlegungen für ein alternatives Dekontaminationsverfahren angestellt und folgende Herausforderungen ermittelt, um diese Idee in ein Lösungskonzept zu überführen:

- Bestimmen eines geeigneten Werkzeugträgers zur Erzeugung von hochfrequenten Stößen, welcher unter engen Bauraumrandbedingungen eines Rohres zum Einsatz kommen soll.
- Entwicklung eines geeigneten Werkzeuges zum Übertragen der Energie des Werkzeugträgers auf die Ablagerungen und zum Herauslösen derselben aus dem Rohr.
- Durchführen von Voruntersuchungen zur Ermittlung von Einflussfaktoren auf den Abtragprozess.
- Ermittlung der genauen Wirkung der Einflussfaktoren und Optimierung des gesamten Prozesses.

Eine zusätzliche Herausforderung ist die gefährliche Natur der Ablagerungen, die eine genaue Untersuchung des Verfahrens von Beginn an erschwert. Hierfür wurde eine Strategie gewählt, bei der die relevanten Eigenschaften der Ablagerungen durch ähnliche, jedoch unproblematische Stoffe nachgebildet werden, und an diesen dann die Abtragungsversuche durchgeführt werden.

Zur näheren Untersuchung dieses neuen Abtragverfahrens wurde ein Versuchstand aufgebaut, der die Untersuchung von zwei Meter langen Rohren ermöglicht. Die eingespannten Rohre sind über Einspannbacken und Scherkraftsensoren mit einem massiven Betonblock verbunden. Dies verhindert, dass Schwingungsverluste durch Anregung von anderen Bauteilen verursacht werden. Neben der Messung der Kraft durch Scherkraftsensoren können die auftretenden Schwingungen über einen Schwingungssensor gemessen und analysiert werden. Die folgenden zwei Bilder zeigen Ausschnitte aus der Einspannvorrichtung.

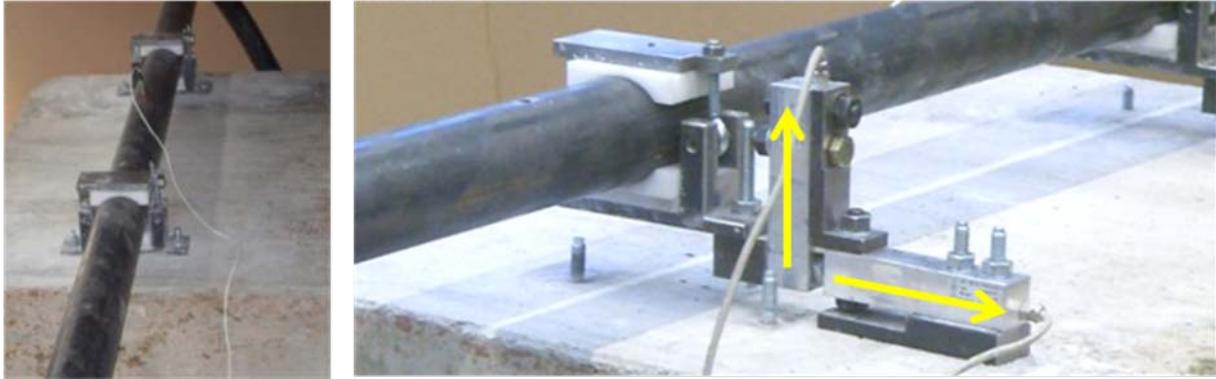


Fig. 3 und 4. Versuchstand für Untersuchungen des Abtragprozesses mittels Vibration und Messung der auftretenden Kräfte mit Hilfe von Scherkraftsensoren

3 Werkzeugträger zur Erzeugung der Vibrationen

In Fig. 5 ist eine Prinzipskizze des Abtragverfahrens mittels Vibration dargestellt. Ziel ist es, die Ablagerungen mit Hilfe eines vibrierenden Werkzeugträgers, welches in die Rohre eingeführt wird, aus den Rohren durch Einschlagen herauszulösen.

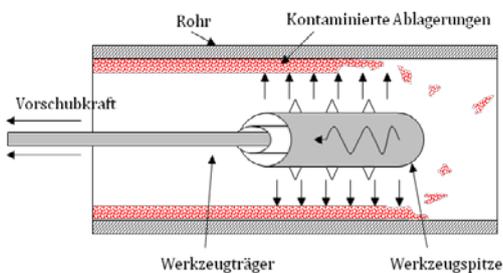


Fig. 5 und 6. Prinzipskizze des Abtragprozesses und eingesetzter Werkzeugträger

Bei den in der Erdöl- und Erdgasindustrie zumeist eingesetzten Rohren handelt es sich um zwei 7/8-Inch-Rohre mit einem Innendurchmesser von 62mm. Hierfür wird ein Werkzeugträger benötigt, welches unter diesen minimalen Bauraumbedingungen ausreichend hohe Vibrationen bereitstellt. Um solche Vibrationen zu ermöglichen wurde eine aus dem Baubereich bekannte Vibrationsflasche in modifizierter Form als Werkzeugträger eingesetzt, wie in Fig. 6 dargestellt. Die Vibrationsflasche ist über eine flexible Welle mit einem Elektromotor verbunden.

Üblicherweise werden Vibrationsflaschen in der Bauindustrie zur Verdichtung von Beton eingesetzt. Die Vibrationen werden dabei durch eine gelagerte Unwuchtmasse erzeugt, welche durch den Elektromotor in Rotation versetzt wird. Die vorgenommenen Modifikationen betreffen die Erhöhung der Freiheitsgrade des Werkzeugträgers sowie die Ermöglichung der freien Einstellbarkeit der Drehzahl der Unwuchtmasse. Der zusätzliche Freiheitsgrad wurde durch ein Drehgelenk, das zwischen der Welle und dem Werkzeugträger platziert ist, realisiert. Es ermöglicht dem Werkzeugträger die Ausführung einer rotatorischen Bewegung und erhöht

damit die Kontaktwahrscheinlichkeit des Werkzeuges mit den Ablagerungen im Rohr. Darüber hinaus wurden Anpassungen für die Befestigung eines Dekontaminationswerkzeuges auf dem Werkzeugträger vorgenommen.

Die Drehzahl des Elektromotors und damit die der Unwuchtmasse kann mithilfe eines Spannungsverstärkers frei verändert werden. Bei der maximalen Drehzahl des eingesetzten Elektromotors können Schwingungen mit einer Frequenz von 217 Hz erzeugt werden. Fig. 7 zeigt die Beziehung zwischen den Spannungsstufen und den auftretenden Frequenzen für zwei Werkzeugträger mit dem Durchmesser 35 mm und 45 mm. Die ermittelten Frequenzen der Schwingungen wurden mithilfe eines Beschleunigungssensors direkt am Vibrationskörper ermittelt. Die Beziehung zwischen Frequenz und Beschleunigung ist in Fig. 8 dargestellt.

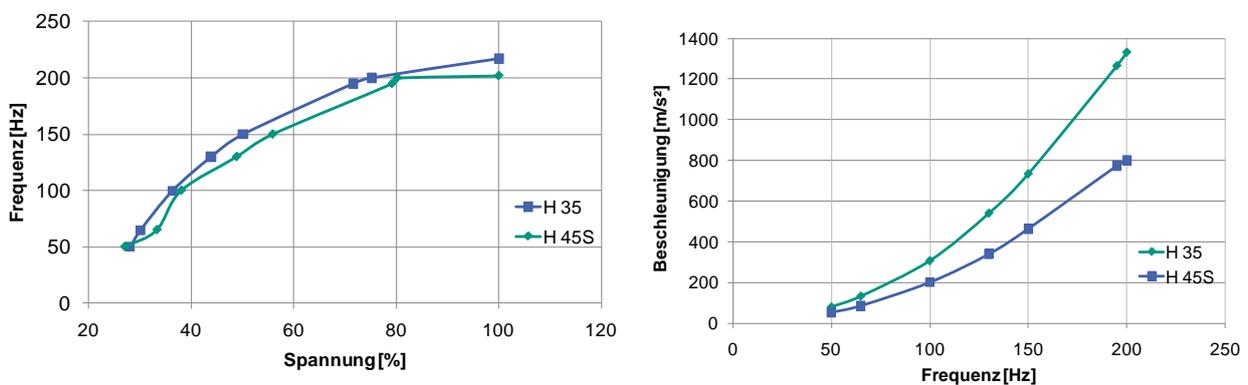


Fig. 7 und 8. Beziehung zwischen der Spannung des Elektromotors und der Frequenz des Werkzeugträgers sowie Zusammenhang zwischen Frequenz und auftretender Beschleunigung für Werkzeugträger mit 35mm und 45mm Durchmesser

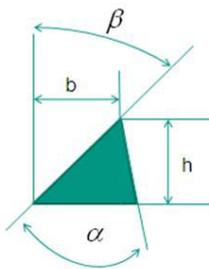
Die unwuchterregten Schwingungen des Werkzeugträgers werden durch folgende Formel beschrieben

$$F(t) = m \cdot e \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

Diese beschreibt die durch die rotierende Masse erzeugte Fliehkraft, wie sie auch durch die obigen Messungen verifiziert worden sind. So ist zu erkennen, dass die Drehzahl der Unwuchtmasse eine wichtige Einflussgröße für die Beschleunigung und damit die erzeugte Fliehkraft darstellt. Im Vergleich zu anderen Einflussgrößen besitzt die Drehzahl einen quadratischen Anteil. Die Unwuchtmasse m und die Größe der Unwucht beziehungsweise die Exzentrizität e besitzen im Gegensatz zur Drehzahl nur einen einfachen Anteil. Um eine große Fliehkraft und Beschleunigung des Werkzeugträgers zu ermöglichen, bieten sich auf der konstruktiven Seite die Veränderung der Unwuchtmasse und deren Exzentrizität an. Die in diesem Fall vorliegende Bau- raumrandbedingung führt jedoch dazu, dass eine Erhöhung der Masse nicht notwendigerweise zielführend hinsichtlich der Erzeugung einer möglichst großen Fliehkraft ist. Eine Erhöhung der Unwuchtmasse resultiert in einer kleineren Exzentrizität und damit, wie in Fig. 8 dargestellt, in einer kleineren Beschleunigung des Werkzeugträgers. Der nichttriviale Zusammenhang dieser Größen erfordert einen guten Kompromiss und stellt eine konstruktive Herausforderung für die Gestaltung des Werkzeugträgers dar.

4 Dekontaminationswerkzeuge

Die kinetische Energie des Werkzeugträgers soll beim Aufschlagen auf die Ablagerungen im Idealfall die Bruchgrenze überwinden und damit die Ablagerungen zum Abplatzen bringen. Entsprechend ist ein geeignetes Werkzeug erforderlich, welches diese Anforderung erfüllt. Es gibt beim Aufprall drei mögliche Kontaktformen zwischen dem Werkzeug und Ablagerungen, welche linien-, punkt- oder flächenförmig ausfallen können. Auch eine Kombination ist vorstellbar. Ein flächiger Kontakt des Werkzeuges ist für die Erzeugung von Spannungen nicht geeignet. Bei einem punktförmigen Kontakt ist die eingebrachte Spannung zwar am größten, jedoch ist dieser aufgrund der nur lokalen Einwirkung nicht effektiv für einen gleichmäßigen Abtrag. Dagegen hat sich ein linienförmiger Kontakt bereits bei der Bearbeitung von Betonen und ähnlichen Stoffen bewährt, sodass zunächst der Fokus auf dieser Form als Werkzeuggeometrie gesetzt wurde. Die Ausführungsform des Werkzeuges stellt eine Kantengeometrie dar, die wie in der nachfolgenden Fig. 9 gezeigt, je nach Anordnung und geometrischen Randbedingungen eine große Gestaltungsfreiheit bietet.



Variationsgrößen eines Werkzeuges mit Kantengeometrie
Kantenwinkel α
Flankenwinkel β
Richtung der Anordnung der Kante: längs, radial, schräg
Anzahl der Kanten

Fig. 9. Gestaltungsfreiheiten und Einflussfaktoren beim Werkzeug am Beispiel einer Kantengeometrie

Eine wichtige Anforderung beim Einsatz eines Werkzeuges in einer kontaminierten Umgebung ist dessen Langlebigkeit. Leistungsmindernde Verschleißerscheinungen am Werkzeug führen dazu, dass ein Werkzeugwechsel erforderlich wird. Neben der üblichen Aufwendung zum Wechsel des Werkzeuges ist es notwendig, dass das im kontaminierten Bereich eingesetzte Werkzeug zusätzlich freigemessen oder in eine sichere Lagerung überführt wird. Besonders die stoßartigen Belastungen beim Dekontaminieren mittels Vibrationsschlagen führen dazu, dass das Werkzeug großen Beanspruchungen unterliegt, welche die Verschleißerscheinungen verstärken können. Fig.10 zeigt zunächst den Ausgangszustand eines Werkzeuges mit Kantengeometrie, welches als Aufsatz für den Werkzeugträger vorgesehen ist.



Fig. 10. Ausgangszustand und Verschleißerscheinungen am Dekontaminationswerkzeug

Im mittleren und rechten Bild weist das Werkzeug nach dem Einsatz bei der Rohrdekontamination Verschleißerscheinungen an den Kanten auf. Gut zu erkennen sind die abgeflachten Kanten, die von Stoßbeanspruchung im Rohr verursacht wurden. Möglichkeiten zur Verringerung der Verschleißerscheinungen sind von Seiten der konstruktiven Gestaltung der Kantengeometrie, der Prozessführung und des verwendeten Werkstoffes gegeben.

In diesem Fall wurde ein werkstoffspezifischer Ansatz verfolgt, um die Lebensdauer des Werkzeuges zu erhöhen. Mit Hilfe der gemessenen Kräfte bei der Dekontamination konnten die Anforderungen an einen verschleißarmen Werkstoff definiert und ein geeigneter Werkstoff mit einer hohen Verschleißfestigkeit ausgewählt werden. Durch entsprechende Wärmebehandlungen nach der Fertigung des Werkzeuges konnten die Verschleißerscheinungen auf ein Minimum reduziert werden.

5 Nachbildung der Ablagerungen

Um diese Vibrationsverfahren zu qualifizieren, sind viele Abtragsuntersuchungen erforderlich. Solche Untersuchungen können aufgrund der radioaktiven und giftigen Natur der Originalablagerungen nicht ohne Weiteres durchgeführt werden. Stattdessen wurden die Originalablagerungen durch ähnliche, aber unproblematische Stoffe mit möglichst ähnlichen Eigenschaften nachgebildet. Hierzu wurden zunächst Untersuchungen an Originalablagerungen durchgeführt, um die relevanten Eigenschaften zu erfassen. Eine der wichtigen Größen stellt hierbei die Härte dar. Diese ist definiert als der mechanische Widerstand, den ein Werkstoff dem mechanischen Eindringen eines härteren Körpers entgegensetzt [5]. Diese Kenngröße ist wichtig bei der Charakterisierung der Ablagerungen, da beim Abtragungsprozess der Widerstand der Ablagerung gegen das Eindringen des Werkzeuges überwunden werden muss, bevor es zum Abplatzung der Ablagerungen kommen kann. Es wurden Härtemessungen an Originalablagerungen an einer Erdgasförderstelle in Ostdeutschland durchgeführt. Die Untersuchungen dort haben ergeben, dass die Härte nach Mohs in der Regel bei 2-3 lag. Aus der Literatur ist bekannt, dass die maximale Härte bei barythaltigen Ablagerungen vorkommt. Die maximale Härte nach Mohs von Baryt beträgt 3 - 3,5 [6]. Ebenso wurden Untersuchungen durchgeführt, um die mittlere Dicke der Ablagerungen zu bestimmen. Untersuchungen zur Bestimmung der Dicken haben ergeben, dass diese zwischen 1 mm - 3 mm liegen.

Anhand dieser Ergebnisse wurde nach einem Stoff gesucht, welcher die gegebenen Eigenschaften – Sprödigkeit und Härte – erfüllt und zudem in unterschiedlichen Dicken in Rohren eingebracht werden kann. Der Baustoff Zement erfüllt diese Kriterien gut, da die Festigkeit sowie die Härte in einem vorgegeben Bereich variiert werden können und so eine definierte Härte eingestellt werden kann. In Versuchen wurden die Einflüsse des Wasser/Zement-Wertes und der Trocknungszeit ermittelt und in den Hauptuntersuchungen berücksichtigt. In Fig. 11 sind die Ergebnisse der Härtemessung an Zementstein dargestellt. Demnach kann die Härte durch die Variation der Trocknungszeit und des W/Z-Wertes verändert werden. Außerdem ist auf der rechten Seite der Fig. 11 die plastische Verformung des Probekörpers aufgeführt, welche bei der modifizierten Brinellhärtemessung zusätzlich gemessen wurde. Diese Größe kann als ein Maß für die Sprödigkeit herangezogen werden und trägt damit zur besseren Charakterisierung der untersuchten Stoffe bei.

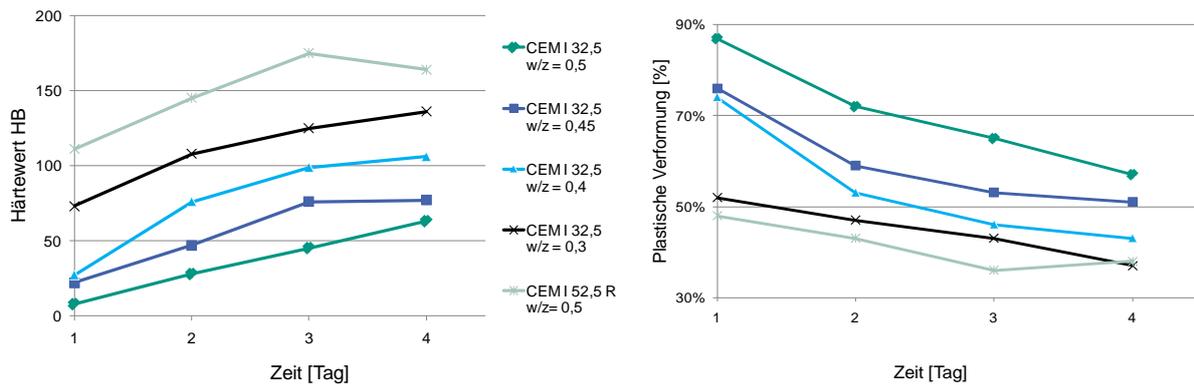


Fig. 11. Verlauf der Härte und der plastischen Verformung von zementgebundenen Stoffen

Auch lässt sich der flüssige Zementleim gut in Rohren einbringen; hierzu wurden Rohre benutzt, die aus jeweils zwei Rohr-Halbschalen bestehen. Der Zementleim wurde in den Halbschalen eingebracht und durch einen Überstreicher die gewünschte Dicke eingestellt. Danach erfolgte das Zusammensetzen der Halbschalen zu ganzen Rohren, welche durch mehrere Rohrschellen festgehalten wurden. Anschließend wurden die zusammengesetzten Halbschale rotiert, um eine gleichmäßige Verteilung des Zementleimes über die gesamte Rohrlänge und in den Fugen zu erreichen. Der Nachbildungsprozess wurde nach einer vordefinierten Trocknungszeit abgeschlossen und die Abtragversuche an den Rohren durchgeführt. In Fig. 12 ist der Prozess der Nachbildung der Ablagerungen dargestellt.

Bei der radioaktiven Strahlung der Ablagerungen handelt es sich um leicht abschirmbare Alpha-Strahlung. Die Gefährlichkeit dieser Art von Strahlung liegt vor allem in der Inkorporation von kontaminiertem Material, was im menschlichen Körper Schäden am Zellgewebe verursachen kann. Insbesondere bei mechanischer Dekontamination kann es zu einer gefährlichen Staubbildung kommen. Damit eine mögliche Gefahr für Mensch und Umwelt durch das Auftreten von Aerosolen vermieden wird, müssen Maßnahmen getroffen werden, um das unkontrollierte Freisetzen von kontaminiertem Staub zu verhindern. Hierzu wurde der Lösungsansatz verfolgt, welcher ein am Rohrende angeflanshtes Sauggerät vorsieht. Der Staub und die losen Ablagerungen werden mithilfe des Luftstroms im Rohr sicher in einen Auffangbehälter transportiert. Dieser kann in einer endlagergerechten Ausführung vorliegen und damit zusätzlich zur Reduzierung der Handhabung von kontaminiertem Material beitragen.



Fig. 12. Nachbilden der Ablagerungen in Rohr-Halbschalen

6 Untersuchungen der Einflussfaktoren auf den Abtragprozess

Wichtig für das Verständnis und die Qualifizierung von neuen Verfahren ist die Kenntnis der Einflussfaktoren, die in diesem Fall den Prozess, die Ablagerung und das Werkzeug betreffen. Durchgeführte Voruntersuchungen an simulierten Ablagerungen haben folgende Einflussfaktoren aufgezeigt:

- Härte und Dicke der Ablagerungen
- Werkzeuggeometrie (Fig. 9)
- Vorschubkraft des Werkzeugträgers
- Drehzahl und Masse der Unwucht des Werkzeugträgers
- Abstand des Werkzeugs von der Rohrwand
- Haftverbund zwischen Ablagerung und Rohrwand
- Einschlagrichtung des Werkzeuges auf die Ablagerungen
- Rotation des Werkzeugträgers
- Korngröße der herausgelösten Ablagerungen
- Einfluss der Erdbeschleunigung

Die genaue Wirkung dieser Einflussfaktoren wird in den Hauptuntersuchungen ermittelt. Bisher wurde der Einfluss der Prozessgrößen auf den Abtragprozess ermittelt. Diese sind die Drehzahl beziehungsweise Frequenz der Unwuchtmasse, sowie die Vorschubkraft des Werkzeugträgers. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurden Voruntersuchungen durchgeführt und der interessante Bereich der Permutationen ermittelt. Diese sind in der folgenden Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1 Untersuchte Permutationen der Einflussfaktoren Frequenz, Vorschubkraft und Ablagerungstyp

Frequenz [Hz]	150	180	200	217
Vorschubkraft [cm/s]	2,7	4	6	
Ablagerungsart: CEM I 32,5	Härte: 76 HB/ 143 HB		Dicke: 2 mm/ 4 mm	

Die Ablagerungen wurden in zwei 7/8-Inch-Rohren mit einer Länge von zwei Metern nachgebildet. Zur statistischen Absicherung wurde jeder Versuch dreimal wiederholt. Das sich ergebende Balkendiagramm in Fig.13 links zeigt die mittlere Abtragleistung für die jeweils drei Rohre pro Balken an. An jedem Rohr wurde bei konstant gehaltenen Parametern Dekontaminationsversuche so lange wiederholt, bis mindestens 50 % des Rohres dekontaminiert war. Das Beispiel in Fig. 13 zeigt, dass für jedes untersuchte Rohr bei den aufgeführten Parametereinstellungen insgesamt vier Versuche erforderlich waren. Es wurden vier verschiedene Frequenzen untersucht, sodass in Summe ein Umfang von 48 Einzelversuchen für das Diagramm in Fig. 13 auf der linken Seite notwendig war. Neben der mittleren Abtragleistung wird in den Diagrammen die maximale und minimale Abweichung vom Mittelwert für den jeweils ersten Versuch dargestellt.

In der Fig. 13 wurde zuerst die mittlere Abtragleistung für einen Vorschub von 6 cm/s untersucht. Es zeigt sich, dass diese zunächst mit steigender Frequenz leicht abfällt, um dann wieder anzusteigen. Durch die Erhöhung der Frequenz kann zwar die Abtragleistung verbessert werden, jedoch ist dies noch kein zufriedenstellendes Ergebnis, zumal die maximale Abtragleistung hier nach erst vier Versuchen bei 80 % liegt.

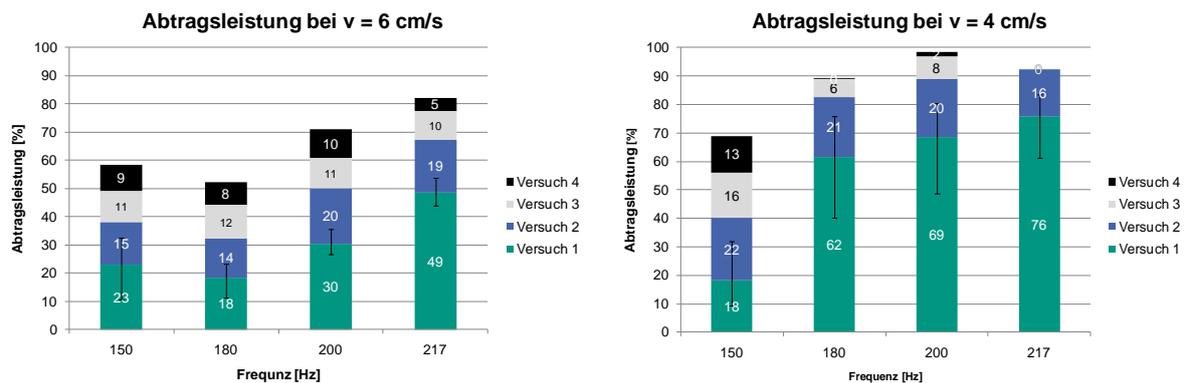


Fig. 13. Einflüsse der Prozessparameter auf den Abtragprozess bei einem Vorschub von 6 cm/s und 4 cm/s

Wie in Fig. 13 dargestellt wurden pro Rohr vier Durchläufe ohne Veränderung der Parameter durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Abtragsleistung am gleichen Rohr in der Regel abnimmt. Bei höheren Frequenzen ist dies nachvollziehbar, da im ersten Versuch bereits viele Ablagerungen aus dem Rohr entfernt wurden. Die nachfolgenden Versuche können den Gesamtabtrag verbessern, sind von der Abtragsleistung aber geringer. Bei den niedrigen Frequenzen zeigt sich, dass trotz der geringen Abtragsleistung zu Beginn diese in weiteren Versuchen nicht verbessert werden kann. Dies lässt vermuten, dass an gewissen Stellen im Rohr die Ablagerungen bei niedrigen Frequenzen generell nur sehr schwer oder gar nicht entfernt werden können. Die Ursache hierfür ist, dass bei den kleinen Frequenzen von 150 Hz bzw. 180 Hz nur eine kleine Amplitude erzeugt werden kann. Eine Durchdringung der Ablagerungen mit dem Werkzeug ist auf dieser Weise nicht möglich. Stattdessen werden die Ablagerungen nur oberflächlich zerstört. Dies lässt sich auch bei der Analyse der Korngrößen des Abtrages erkennen, da bei niedrigen Frequenzen sehr viel mehr sehr kleine Teilchen vorzufinden sind. In Fig. 14 rechts ist die mittlere Korngrößenverteilung bei zunehmender Frequenz bei einem Vorschub von 2,7 cm/s dargestellt. In der Regel nimmt die Korngröße mit steigender Frequenz zu.

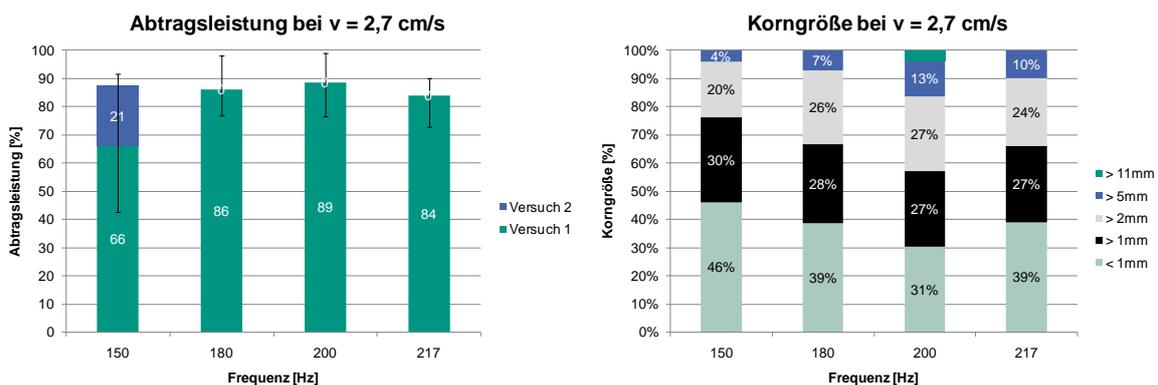


Fig. 14. Einflüsse der Prozessparameter auf den Abtragprozess bei einem Vorschub von 2,7 cm/s

Die Kenntnisse über die entstehenden Korngrößen bei der Dekontamination helfen auch bei der Konzeption des Fördersauggeräts, welches die Ablagerungen aus dem Rohr sicher und unter Vermeidung eines unkontrollierten Austretens von Staub heraus befördern soll.

Um eine weitere Leistungssteigerung zu erzielen, wurde als nächstes der Einfluss des Vorschubes untersucht. In Fig. 13 auf der rechten Seite zeigt sich, dass die Verringerung um ca. 40 % auf 4 cm/s eine deutli-

che Steigerung des Abtrags zur Folge hat. Bereits bei den niedrigen untersuchten Frequenzen ist nun ein Abtrag von über 60 % zu verzeichnen, bei den höheren Frequenzen sogar eine mittlere Dekontamination der Rohre von annähernd 90 %. Allerdings sind diese Ergebnisse erst nach wiederholter Bearbeitung erzielt worden.

Eine weitere Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit um ca. 30 % auf 2,7 cm/s erhöht wie in Fig. 14 links dargestellt nochmals deutlich die Abtragleistung. Bei einigen Rohren kann nun sogar eine Dekontamination von fast 100 % erreicht werden. Die mittlere Abtragleistung liegt jetzt auch bei den höheren Frequenzen schon nach dem ersten Versuchsdurchgang bei knapp 90 %.

Um den Einfluss der Härte zu untersuchen, wurden als nächstes Abtragversuche an Ablagerungen durchgeführt, die eine annähernd doppelte Härte besitzen. Ähnlich wie vorhin ist auch hier der Einfluss der Frequenz zu erkennen: Bei steigender Frequenz wird die Abtragleistung wie in der Fig. 15 dargestellt weiter verstärkt.

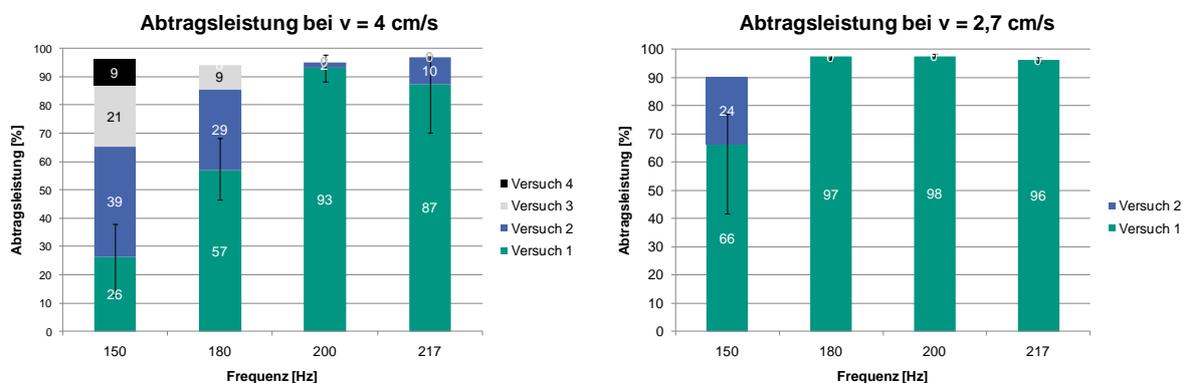


Fig. 15. Untersuchung der Prozessparameter bei doppelter Härte der Ablagerungen

Wird der Vorschub von 4 cm/s auf 2,7 cm/s reduziert, so stellt man fest, dass zunächst bei einer Änderung der Frequenz von 150 Hz auf 180 Hz eine Steigerung der Abtragleistung festgestellt werden kann, jedoch nicht, wenn die Frequenz noch weiter erhöht wird. Die Abtragleistung bleibt wie in Fig. 15 auf der rechten Seite dargestellt konstant bzw. nimmt sogar leicht ab: Offensichtlich wird bei dieser Härte die Bruchgrenze bereits bei 180 Hz erreicht; eine zusätzliche Steigerung der Frequenz hat keine Auswirkung auf die Abtragleistung, da bereits bei 180 Hz eine 97 %ige Dekontamination beim ersten Versuchsanlauf erreicht worden ist.

Interessant ist auch der direkte Vergleich mit den zuvor untersuchten Ablagerungen kleinerer Härte, welcher in Fig. 14 auf der linken Seite dargestellt ist. Das Ergebnis verwundert zunächst, weil es zeigt, dass die härteren Ablagerungen für jede untersuchte Frequenz besser zu entfernen sind. Es ist jedoch nachvollziehbar, wenn man bedenkt, dass härtere Ablagerungen entsprechend spröder sind, wie zuvor in Fig. 11 gezeigt. Die Überschreitung der Bruchgrenze führt dazu, dass die Ablagerungen besser abplatzen als die weniger spröden Ablagerungen geringerer Härte, was bei gleicher Parametereinstellung in einer besseren Abtragleistung resultiert.

Von Seiten der Ablagerung existiert die Dicke als weitere Einflussgröße auf den Abtragprozess. Um auch diese Größe zu ermitteln, wurde eine annähernd 4 mm dicke Ablagerungsschicht simuliert und mit den gleichen Parametereinstellungen wie zuvor untersucht.

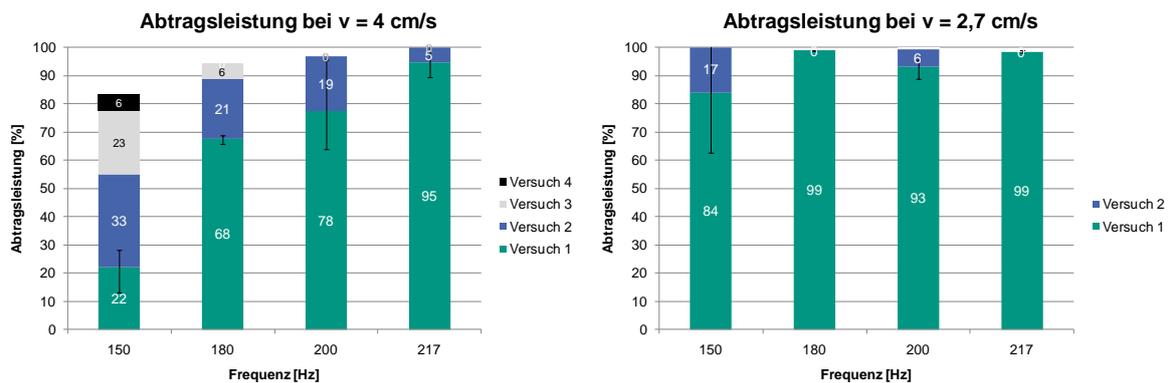


Fig. 16. Untersuchung der Prozessparameter bei doppelter Dicke der Ablagerungen

Es zeigt sich hier besonders gut, dass eine kontinuierliche Verbesserung des Abtrags mit steigender Frequenz zu verzeichnen ist. Bei der Frequenz von 217 Hz ist schon eine 95 % Dekontamination des Rohres festzustellen, wie in Fig. 16 auf der linken Seite dargestellt. Auch hier zeigt sich der große Einfluss der Verweilzeit des Werkzeuges im Rohr sehr deutlich. Bei der Reduzierung des Vorschubes ist schon eine annähernd vollständige Dekontamination des Rohres zu verzeichnen und das schon bei einer Frequenz von 180 Hz.

7 Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise

Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass der Vorschub und die Frequenz einen großen Einfluss auf die Dekontamination mittels des Vibrationsverfahrens haben und mit den entsprechenden Parametereinstellungen eine annähernd vollständige Dekontamination erzielt werden kann. Es existieren viele weitere Einflussgrößen, welche ein sehr großes Optimierungspotenzial für dieses Verfahren besitzen. Die Erforschung der genauen Wirkungen und das Festhalten dieser Größen in einem Modell ist das Ziel der folgenden Untersuchungen. Für die bisher untersuchten Ablagerungen hat sich gezeigt, dass das Vibrationsverfahren eine effektive und umweltfreundlichere Alternative für die Rohrdekontamination zum aktuellen Stand der Technik darstellt.

8 Literatur

- [1] K. P. SMITHT: "An Overview of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in the Petroleum Industry, Environmental Assessment and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, 9700 South Caas Avenue, Argonne, Illinois 1992.
- [2] R. Gellerman, H. Schulz, Ch. Küppers: „Mengenaufkommen an NORM-Rückständen für das deutsche Entsorgungskonzept“, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesamtes für Strahlenschutz SR 2416, Darmstadt, 2003.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Methodische Weiterentwicklung des Leitfadens zur radiologischen Untersuchung und Bewertung bergbaulicher Altlasten und Erweiterung des Anwendungsbereichs (Bericht I)“, Bonn 2007, ISSN 1612-6386.

- [4] StrlSchV - Strahlenschutzverordnung, Anlage XII (zu §§ 97 bis 102): „Verwertung und Beseitigung überwachungsbedürftiger Rückstände“, (2001).
- [5] W. Domke, „Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung“, Giradet, 1986, ISBN 3-59081220-6.
- [6] K. Haase: „Mineralien unserer Erde“, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2009, ISBN: 978-3-8370-5251-0.