

9. Regeneration mit Ultraschall

Als alternatives Regenerationsverfahren zu einer herkömmlichen Wasserspülung wurde die Möglichkeit einer Regeneration der beladenen PSK mit Ultraschall untersucht. In der Versuchsanlage (vgl. Bild 7.1) mit einer Filtersäule von 284 mm Durchmesser wurde ein Ultraschallwandler-Modul so installiert, daß die beladenen PSK mit Ultraschall direkt in der Filtersäule gereinigt werden konnten. Das Wandler-Modul in Flanschbauweise wurde anstelle eines Düsenbodens zwischen Reinwasserkammer und Filtrationsraum eingebaut. Bild 9.1 zeigt, daß das Wandler-Modul aus 3 parallel zu betreibenden Stabwandlern besteht, die den erzeugten Ultraschall mit einer Frequenz von 44 kHz in Richtung des Filtrationsraums abstrahlen. Die Flächen zwischen den Stabwandlern sind mit engmaschigen Gittern belegt, so daß die PSK im Filtrationsbetrieb der Versuchsanlage sowohl auf den Ultraschall-Stabwandlern als auch den Gittern liegen. Die Gitter zwischen den Stabwandlern dienen neben der Fixierung der PSK auch dem Passieren des Filtratstromes bzw. während der Regenerationsphase des Spülwasserstromes.

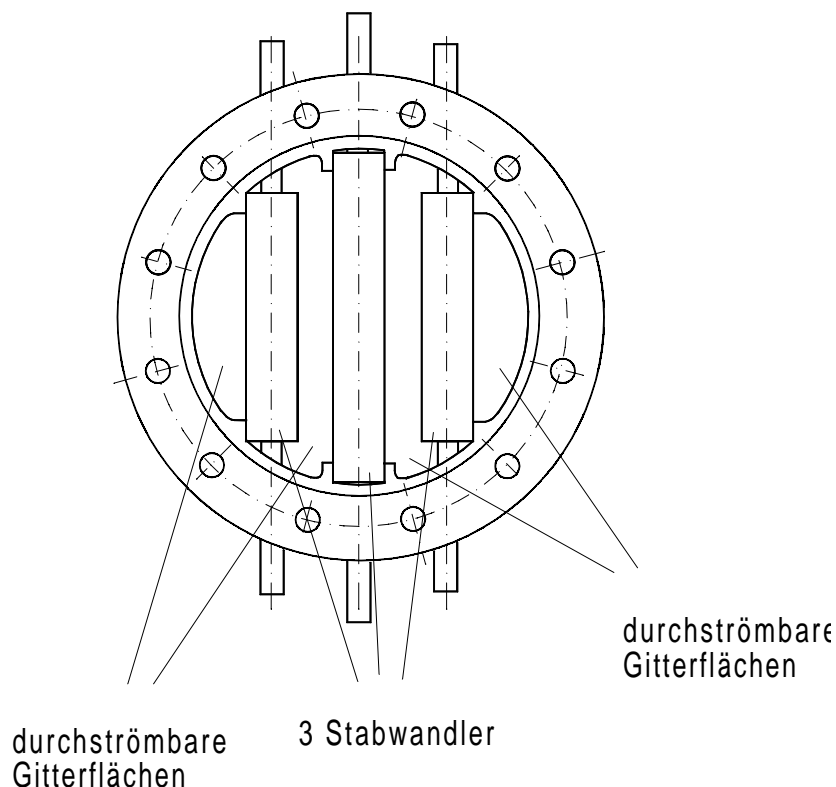


Bild 9.1: Darstellung des Ultraschallwandler-Moduls, das in der Filtersäule zur Reinigung der PSK installiert wurde.

Die Stabwandler bestehen aus 5 bzw. 7 parallel geschalteten Ultraschallwandlern, die wegen ihrer charakteristischen Bauform auch als Tonpilze bezeichnet werden (vgl. Bild 9.2). Kernstück der Tonpilze sind Piezokristalle, die mit einem Bolzen zwischen zwei Stahlmassen

verspannt werden. Legt man eine periodische, z. B. sinusförmige Spannung an die Piezokeramik, so reagiert die Keramik mit einer Dickenänderung, die je nach Vorzeichen der angelegten Spannung eine Kontraktion oder Expansion darstellen kann. Wechselt die angelegte Spannung ihr Vorzeichen mit hoher Frequenz, z. B. 44 kHz wie bei den vorliegenden Versuchen, so reagiert der Ultraschallwandler wie ein durch einen Motor zu Schwingungen angeregtes Feder-Masse-System. Der Vorspannbolzen ist hier als die Feder und die Piezokeramik als der Antriebsmotor aufzufassen. Der Tonpilz ist so konzipiert, daß die Schwingungsbewegungen des Tonpilzes sich einseitig als Schallwellen ins umgebende Wasser fortpflanzen.

Die Signalform, mit der der Tonpilz angeregt wird, wird für die Ultraschallreinigung als sehr wesentlich angesehen. Neben der Verwendung eines kontinuierlichen Sinussignales findet man in der Praxis der Ultraschallreinigung sogenannte Doppelhalbwellensignale, die zu besseren Reinigungsergebnissen führen sollen. Bei dieser Betriebsweise wird die Spannungsamplitude des sinusförmigen Signals während der positiven Halbwelle der 50 Hz Netzfrequenz um den Faktor $\sqrt{2}$ verstärkt und verschwindet während der negativen Halbwelle. Im Mittel bleibt die eingetragene Wirkleistung gegenüber einem Sinusbetrieb zwar gleich, jedoch steigt die eingetragene Ultraschalleistung während der Beschallungsphasen um den Faktor 2. Diese Signalform müßte daher ein deutlich besseres Reinigungsergebnis erwarten lassen.

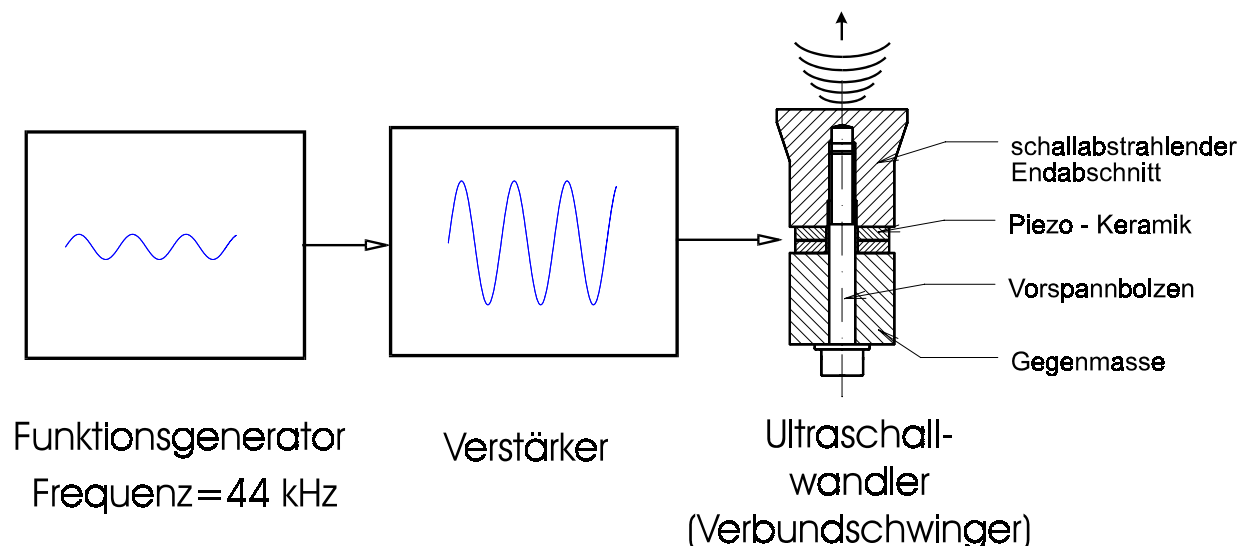


Bild 9.2: Prinzip der Ultraschall-Erzeugung

In den Versuchen zur Regeneration der PSK werden sowohl ein Sinussignal als auch Doppelhalbwellensignale verwendet. Die Signale werden im weiteren nicht kontinuierlich eingetragen sondern in einem sogenannten Burstbetrieb. Hier folgt einer Beschallungsphase von bspw. 10 sec eine Phase von 10 sec ohne Beschallung. Weitere für die Ultraschallreinigung wesentliche Parameter sind in Tabelle 9.1 zusammengefaßt.

Tabelle 9.1: Betriebsparameter für die Ultraschallreinigung

Arbeitsfrequenz der Ultraschallwandler	44 kHz
effektive Leistung	einstellbar bis 1700 W
Wandlerfläche	1 x 118 cm ² + 2 x 87 cm ²
Reaktorvolumen	21 dm ³
Signalformen der Ultraschallerzeugung	Sinus oder Doppelhalbwelle
Betriebsweise der Ultraschallwandler	unterbrochener Betrieb: 10 sec an / 10 sec aus
Säulendurchmesser	284 mm
Spülwassergeschwindigkeit	31,6 m/h

9.1 Versuche zur Ultraschallreinigung

Zur Beurteilung der Reinigungsleistung von Ultraschall wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, die den Einfluß der wesentlichen Verfahrensparameter deutlich machen sollten. Neben der erforderlichen Ultraschalleistung für eine vollständige Reinigung sollte insbesondere untersucht werden, welchen Einfluß die Hauptparameter des permeablen Kollektors, d. h. Durchmesser und Porosität des PSK, auf den Reinigungsprozeß haben. Man erhält somit die Möglichkeit, einen synthetischen Kollektor im Sinne einer Gesamtoptimierung aus guter Abscheideleistung und Regenerierbarkeit auszuwählen bzw. zu konzipieren. Weiterhin war zu prüfen, inwieweit durch die Verwendung des Doppelhalbwellenbetriebes eine Verbesserung der Reinigungsleistung erzielt werden kann.

Die Versuchsreihen wurden folgendermaßen durchgeführt:

- gleichmäßige, definierte Beladung der PSK im Filter (Kreislaufbetrieb) mit einer Kalziumkarbonatsuspension bis die Trübung im System unter 10 FNU lag
- Regeneration der PSK durch Ultraschall und gleichzeitiger Wasserspülung mit ca. 32 m/h im Aufstrom

Während der Reinigung wurde das obere Gitter in seiner oberen Endposition fixiert (vgl. Bild 7.1), so daß die permeablen Kollektoren unter dem Einfluß der Wasserspülung und des Ultraschallfeldes sich z. T. sehr intensiv bewegen konnten. Der dominierende Einfluß auf die Bewegungen des Bettes ist dabei dem Schallstrahlungsdruck zuzuschreiben. Das führt dazu, daß in den Beschallungsphasen das Bett angehoben wird und in den Beschallungspausen langsam sedimentiert. Durch diesen als Burst bezeichneten Betriebsmodus (An/Aus der Beschallung im Zeitverhältnis 10 sec/10sec) wird das PSK-Bett intensiv durchmischt und immer wieder beladene und somit relativ schnell sedimentierende PSK in die Zonen stärkster Reinigungswirkung an den Ultraschallwandlern transportiert. Optimal eingestellte Beschallungs- und Pausenzeiten können insofern auch die Effektivität der Ultraschallreinigung steigern, was allerdings nicht weiter verfolgt werden konnte.

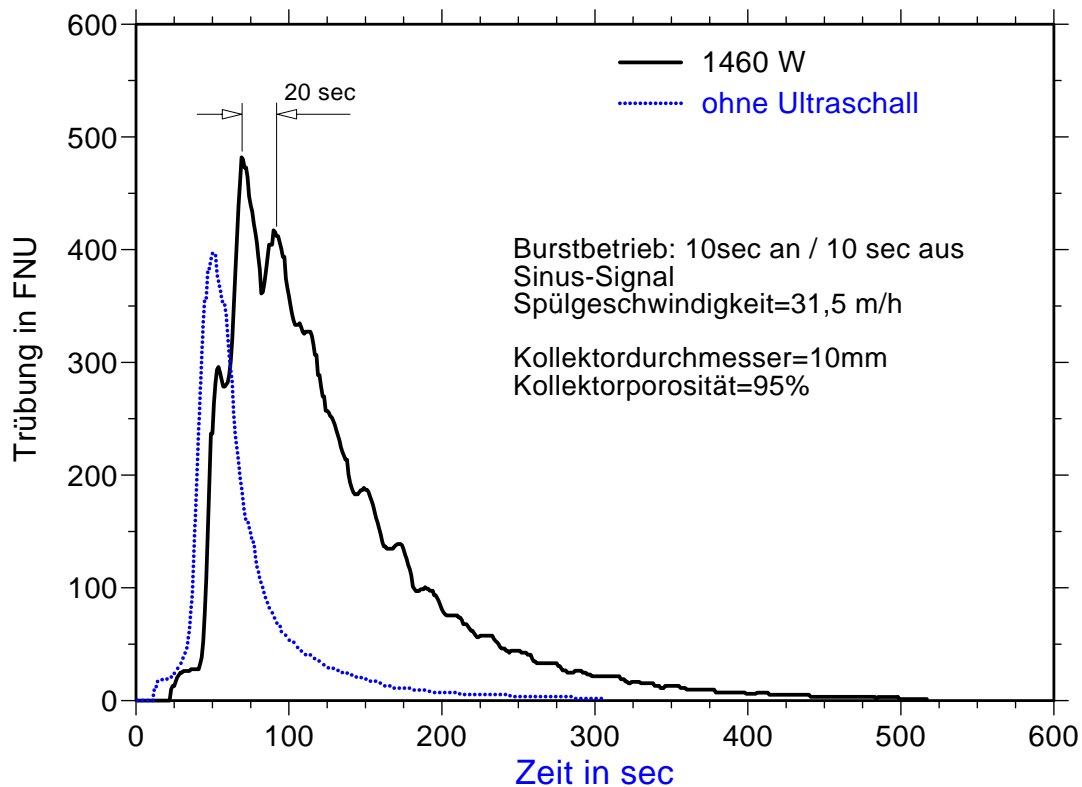


Bild 9.3: Trübung im Spülabwasser bei einer Regeneration der PSK durch eine reine Wasserspülung und durch eine Ultraschall-Spülung beim Material I60-10mm

Zur Quantifizierung der abgelösten Beladung wurde die Trübung im Spülabwasser kontinuierlich ermittelt (vgl. Bild 9.3) und mit dem im Kapitel 7.1.1 beschriebenen Verfahren durch die Trübungsmessung die abgelöste Masse bestimmt. Prinzipiell kann man sagen, daß eine Steigerung der eingetragenen Ultraschalleistung zu einem Anstieg des Trübungspeaks und somit der insgesamt abgelösten Beladung führt. Die Trübungsmessung wurde auch dazu verwendet, den Spülwasserverbrauch zu bestimmen. Dazu wurde im Spülabwasser eine Resttrübung von 20FNU definiert, bei dem die Reinigungsphase als abgeschlossen gilt.

9.2 Versuchsergebnisse zur Ultraschallreinigung

In Bild 9.4 sind die Untersuchungsergebnisse zum Einfluß der Ultraschalleistung auf den permeablen Kollektor I60-10mm mit einer Porosität von 95% dargestellt. Es wird deutlich, daß erst ab einer Leistung von 50 W eine Steigerung der ablösbaren Beladung gegenüber der unbeschallten Regeneration (nur Wasserspülung) erkennbar wird. Nach einem schnellen Anstieg der ablösbaren Beladung bis zu einer Leistung von ca. 300 W, bei der schon mehr als 90 % der Beladung abgelöst werden kann, führt eine weitere Steigerung der Ultraschalleistung zu lediglich noch geringen Verbesserungen des Reinigungsergebnisses. Ab einer Leistung von ca. 1000 W kann die Regeneration als vollständig betrachtet werden. Die in Bild 9.4 ebenfalls dargestellte Kurve zum spezifischen Spülwasserverbrauch in m^3 je m^2 Filterfläche zeigt zunächst einen steilen Anstieg mit einem Maximum der Verbrauchskurve.

Der Anstieg ist mit dem gleichzeitigen steilen Anstieg der ablösbaren Beladung zu erklären: es muß mehr Spülwasser zum Abtransport der abgelösten Beladung aufgewendet werden. Der langsame Abfall der Verbrauchskurve nach Durchlaufen des Maximums trotz steigender ablösbarer Beladung belegt, daß die Ablösung der Beladung mit steigender Leistung effektiver, d. h. schneller, erfolgt.

Durch Verminderung der Kollektorporosität von 95% auf 91% (Kollektor I100-10mm) wird die Regenerierbarkeit der PSK durch Ultraschall deutlich schlechter (Bild 9.5), was sich in höheren Restbeladungen und einem höheren Spülwasserverbrauch äußert. Um bspw. eine Ablösung von 80% der Beladung zu erzielen, müssen bei dem Material mit 95 % Porosität ca. 150W und bei dem Material mit 91% Porosität ca. 350W, also mehr als die doppelte Leistung, aufgewendet werden.

Vermindert man bei dem mit 91% Porosität vergleichsweise schwierig zu reinigenden Kollektormaterial den Kollektordurchmesser von 10 mm auf 6mm, wird die Regenerierbarkeit dagegen sehr viel stärker verbessert, als wenn die Porosität bei gleichem Durchmesser von 91% auf 95% gesteigert wird (Bild 9.6). Eine Entfernung von 95 % der Beladung wird bei dem PSK mit 6 mm bei einer Leistung von 100 W, d. h. lediglich 10% der Leistung für eine 95%ige Regeneration der 10mm großen PSK, erzielt. Im weiteren ist der Spülwasserverbrauch für eine vollständige Regeneration der 6mm PSK um ca. 30% niedriger als bei den 10 mm PSK.

In den bisher dargestellten Versuchen sind die Ultraschallwandler sinusförmig erregt worden. Um die Wirkung des Doppelhalbwellenbetriebes auf die Reinigungswirkung zu prüfen, wurden am Beispiel der 10mm großen PSK vom Typ I60-10mm (95% Kollektorporosität) Vergleichsmessungen durchgeführt (Bild 9.7). Man erkennt überraschenderweise, daß sich die Untersuchungsergebnisse von Sinus- und Doppelhalbwellenbetrieb weder hinsichtlich Restbeladung noch Spülwasserverbrauch unterscheiden. Der in der Regel bei Reinigungsbädern verwendete Doppelhalbwellenbetrieb konnte bei der Regeneration von PSK keine Vorteile aufzeigen, obwohl beim Doppelhalbwellenbetrieb in 50Hz-Perioden die eingetragene Ultraschalleistung kurzfristig (für 10 msec) doppelt so hoch wie beim Sinusbetrieb wird.

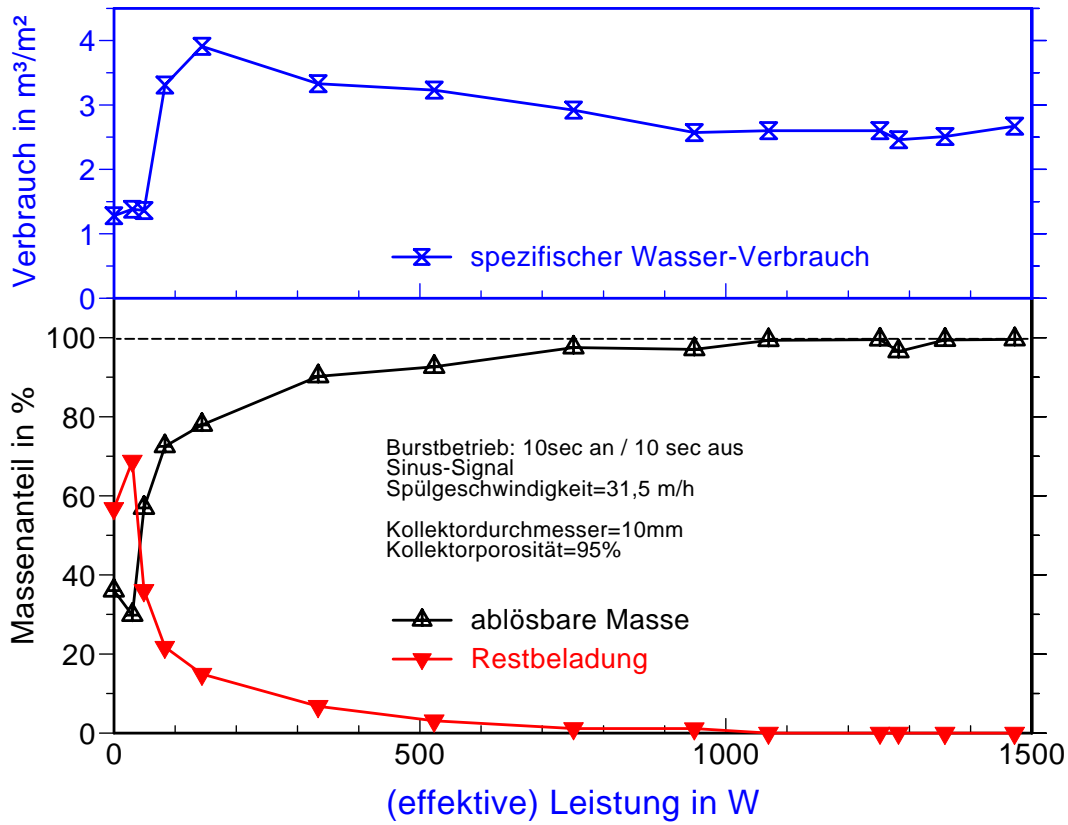


Bild 9.4: Einfluß der eingetragenen Ultraschalleistung auf die Regeneration der I60-10mm.

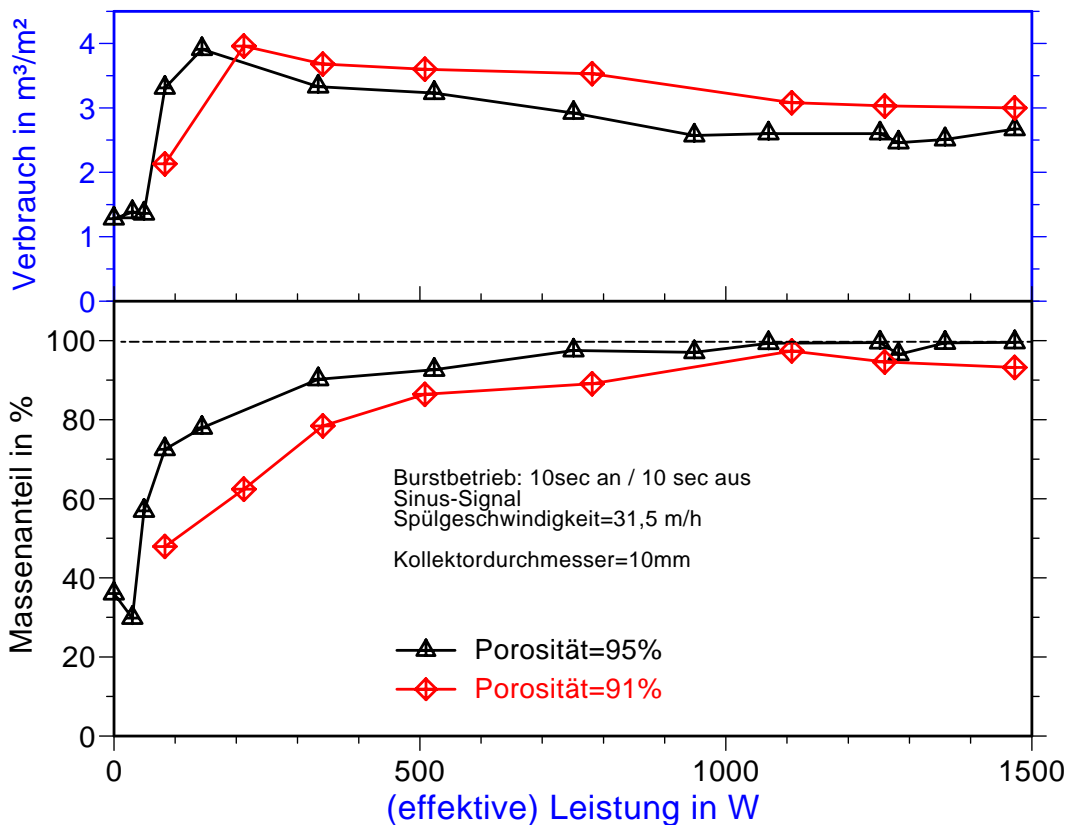


Bild 9.5: Einfluß der Kollektorporosität auf die Regeneration von PSK der Typen I60-10mm und I100-10mm.

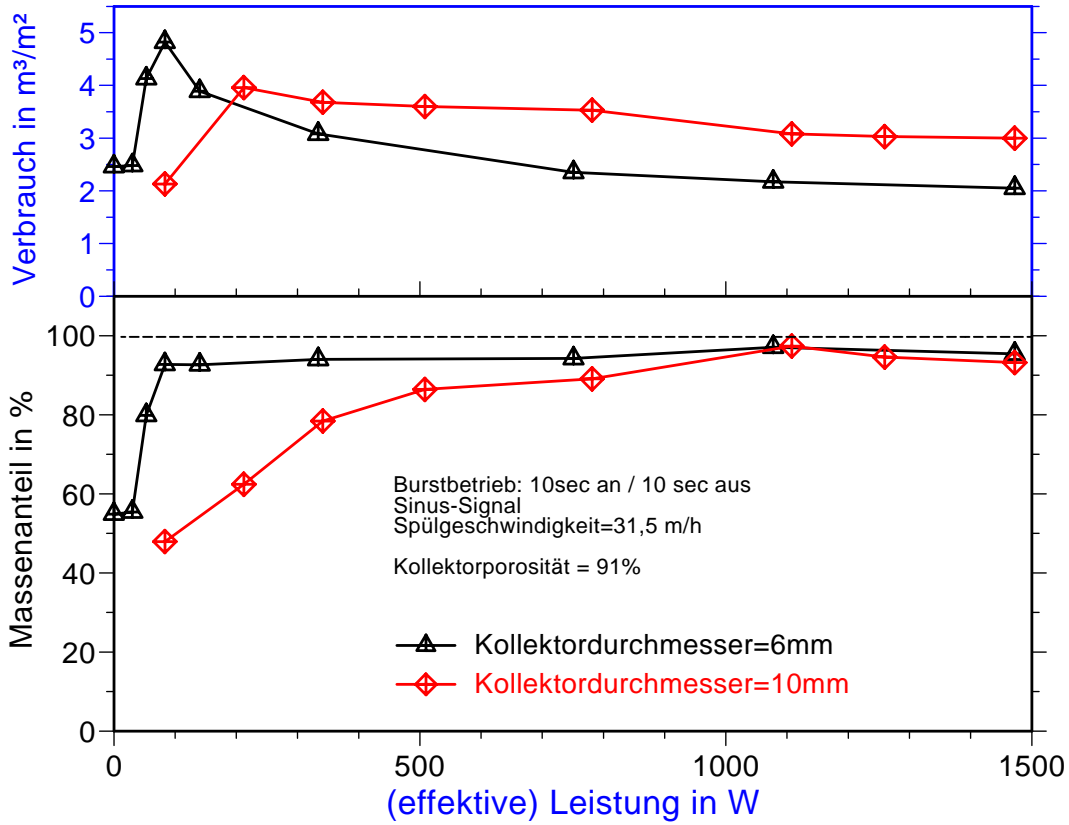


Bild 9.6: Einfluß des Kollektordurchmessers auf die Regeneration der PSK vom Typ I100-10mm und I100-6mm

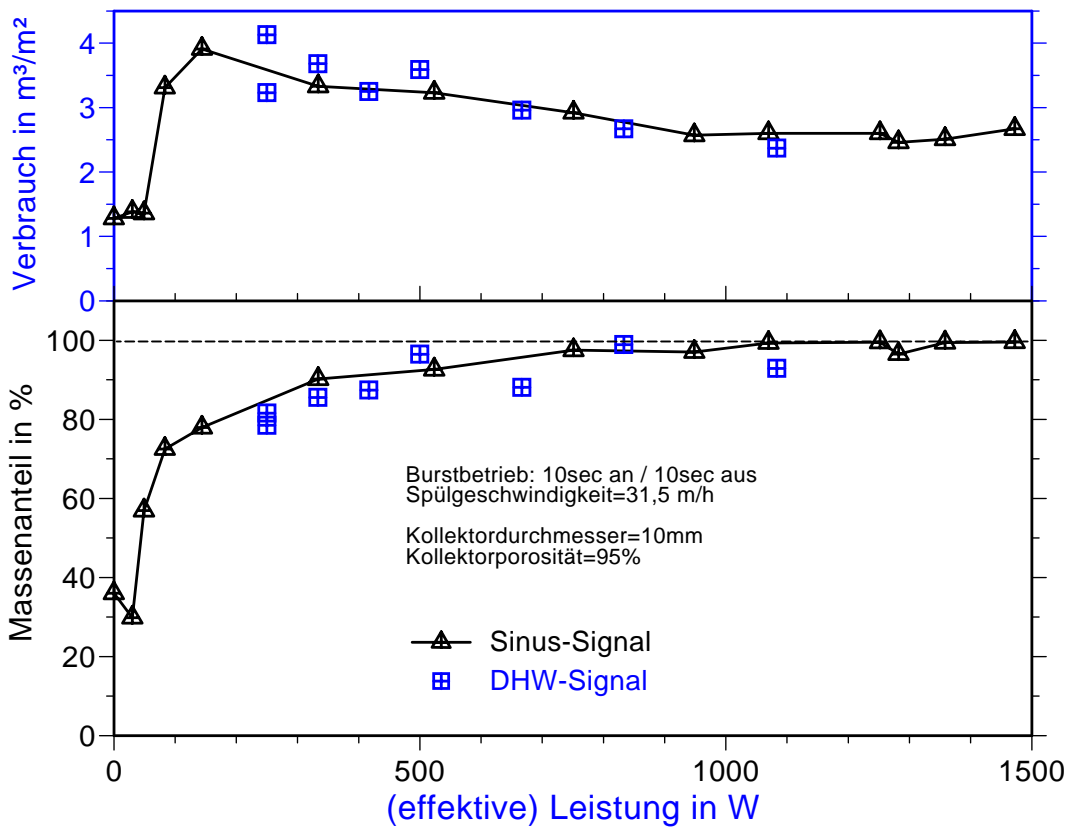


Bild 9.7: Einfluß der Signalform der Ultraschallerzeugung auf die Regeneration der PSK bei I60-10mm

9.3 Mechanismen der Trübstoffablösung durch Ultraschall

Unter der Einwirkung eines Ultraschallfeldes führen die Fluidelemente des Wassers periodische Bewegungen um eine Ruhelage aus, die umso heftiger werden, je größer die dazu aufgewendete Ultraschalleistung wird. In Tabelle 9.2 sind beispielhaft die physikalischen Zustände zusammengefaßt, die sich für den Fall einer eindimensionalen Wellenausbreitung in Abhängigkeit der eingetragenen Leistung einstellen (vgl. Anhang A9.1). Die mittlere Leistung ist hier als relative Größe bezogen auf die schallabstrahlende Fläche, als sogenannte Schallintensität, angegeben. Die Tabelle 9.2 gibt einen realistischen Intensitätsbereich wieder, wie er bei den Versuchen an den Wandleroberflächen auch vorlag.

Tabelle 9.2: Übersicht über die Größenordnungen der stationären Schallfeldgrößen bei 44 kHz

Intensität in W/cm ²	Schalldruckamplitude in bar	Schnelleamplitude in m/h	Bewegungsamplitude in µm
0,5	1,21	295,2	0,295
1	1,73	421	0,422
2	2,43	590	0,593
4	3,44	835	0,839
5,7	4,10	993	1,000

Vergleicht man die Größenordnung der Schnelleamplitude in Tabelle 9.2 mit den erforderlichen Strömungsgeschwindigkeiten zur Ablösung der Beladung von den Kollektormatten in Bild 6.9, so läßt sich hierdurch schon eine weitgehende Ablösung der Beladung auf einer frei zugänglichen Oberfläche erwarten. Die Beladung der permeablen Kollektoren befindet sich allerdings auf den Faseroberflächen im Inneren des permeablen Kollektors, so daß eine freie Zugänglichkeit für den Ultraschall sicherlich nicht vorliegt.

Neben den geschilderten Primärwirkungen des Ultraschallfeldes ergibt sich eine für die Reinigung sehr wesentliche Sekundärwirkung, die sogenannte Kavitation. Sie kann Fluidbewegungen erzeugen, die um Zehnerpotenzen höhere Geschwindigkeiten und Drücke zur Folge haben als die Primärwirkung. Ursache für die Kavitation sind in natürlichen Wässern vorhandene mikroskopisch kleine Gasblasen, die bei Einwirkung eines Druckfeldes in den Unterdruckphasen stark vergrößert und in den Druckphasen komprimiert werden.

Die im Ultraschallfeld entstehenden stationären Blasenschwingungen können mit einer erstmals von NOLTINGK und NEPPIRAS (KUTTRUFF, 1988) angegebenen Differentialgleichung für den Blasenradius berechnet werden (vgl. Anhang A9.2). Die hier vorgestellten Berechnungsergebnisse dürfen aber lediglich als phänomenologische Deutung der äußerst komplexen Vorgänge aufgefaßt werden. Auf der Grundlage der sogenannten NOLTINGK-NEPPIRAS-Gleichung sind in Bild 9.8 für eine Kavitationsblase von anfänglich 10µm die zeitlichen Änderungen des Blasenradius und der Verschiebungsgeschwindigkeit der

Blasenwand, die formal als Radialgeschwindigkeit der Blasenwand aufzufassen ist, berechnet worden. Man erkennt, daß die Blasenwand für den gewählten Parametersatz mit einer Schalldruckamplitude von 1,21 bar und einer Frequenz f des anregenden Ultraschallfeldes von 44 kHz Geschwindigkeiten bis zu ca. 150 m/sec (=540.000 m/h) erreicht. Aus einem Vergleich mit den Versuchsbedingungen zur ablösbaren Beladung an Kollektormatten in Kapitel 6., bei denen mittlere Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/h eingestellt wurden, lassen sich aufgrund der extremen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten bei einer kavitierenden Gasblase noch weitaus bessere Reinigungsergebnisse absehen. Dabei werden am Rand der kavitierenden Blase Drücke bis zu 100 bar im Fluid erreicht, die z. B durch Druckkräfte auf die Beladung oder mechanische Deformationen der Faseroberflächen, einen zusätzlichen Beitrag zur Ablösung leisten. Die Modellrechnungen zeigen im weiteren auch, daß schwingende Kavitationsblasen an ihren Oberflächen ca. die 1.800-fache Maximalgeschwindigkeit und ca. das 80-fache des Maximaldruckes des stationären Ultraschallfeldes erreichen (vgl. Tabelle 9.2) und somit im Vergleich zum stationären Ultraschallfeld erheblich wirksamer im Hinblick auf die Ablösung von Partikeln von einer Oberfläche einzuschätzen sind.

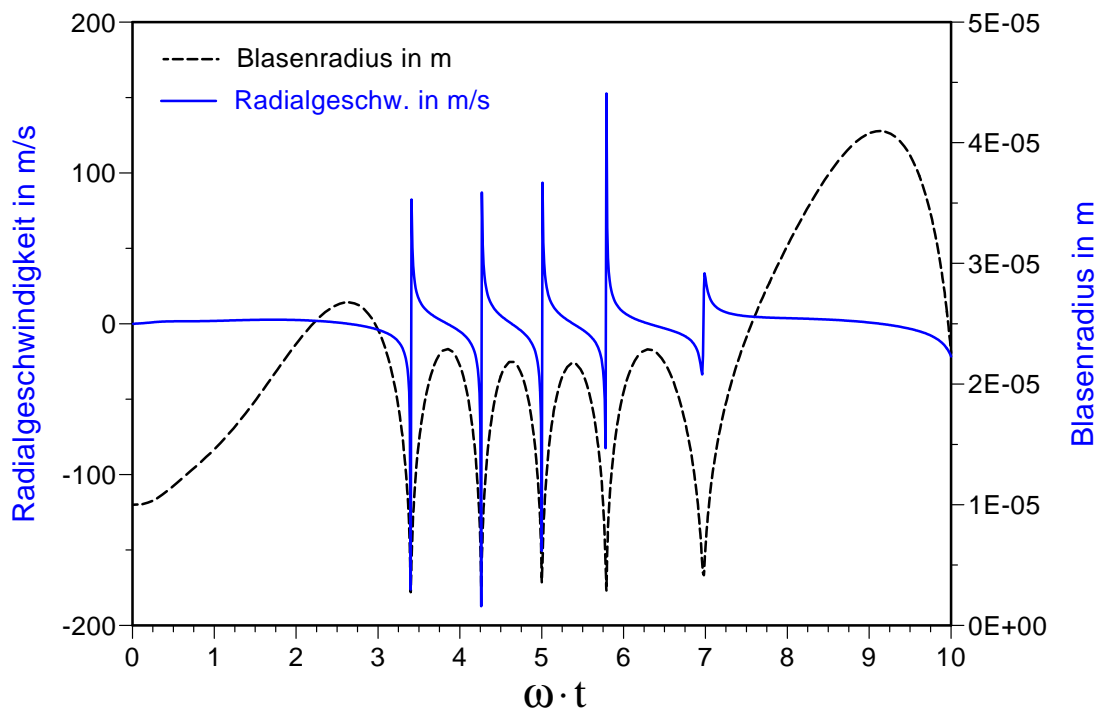


Bild 9.8: Bewegungen einer Kavitationsblase im Ultraschallfeld (Frequenz $f = 44\text{kHz}$, Schalldruckamplitude = 1,21 bar, statischer Druck = 1,1 bar, Anfangsradius = $10\mu\text{m}$, Kreisfrequenz $\omega=2\pi f$)

Die Erhaltungsgleichungen für die Masse und den Impuls der Flüssigkeit ermöglichen im weiteren auch die Berechnung des Druck- und Geschwindigkeitsfeldes in der umgebenden Flüssigkeit (vgl. Anhang A9.2). Es läßt sich hier zeigen, daß die Strömungsgeschwindigkeit bei Annahme eines inkompressiblen Fluids proportional zum Kehrwert des Abstandes zur

kavitierenden Blase zum Quadrat abnimmt. Die von der Blase ausgesendeten Druckwellen nehmen näherungsweise proportional zum Kehrwert des Abstandes ab (vgl. Gl. A9.32).

Bild 9.9 verdeutlicht die Bedeutung des Abstandes auf das Geschwindigkeitsfeld in dem die Blase umgebenden Fluid. Für die Regeneration der PSK mit Ultraschall bedeutet dies im Hinblick auf die Ablösemeechanismen, daß eine Kavitationsblase für eine gute Reinigungswirkung in hinreichender Nähe zur beladenen Faseroberfläche vorliegen muß.

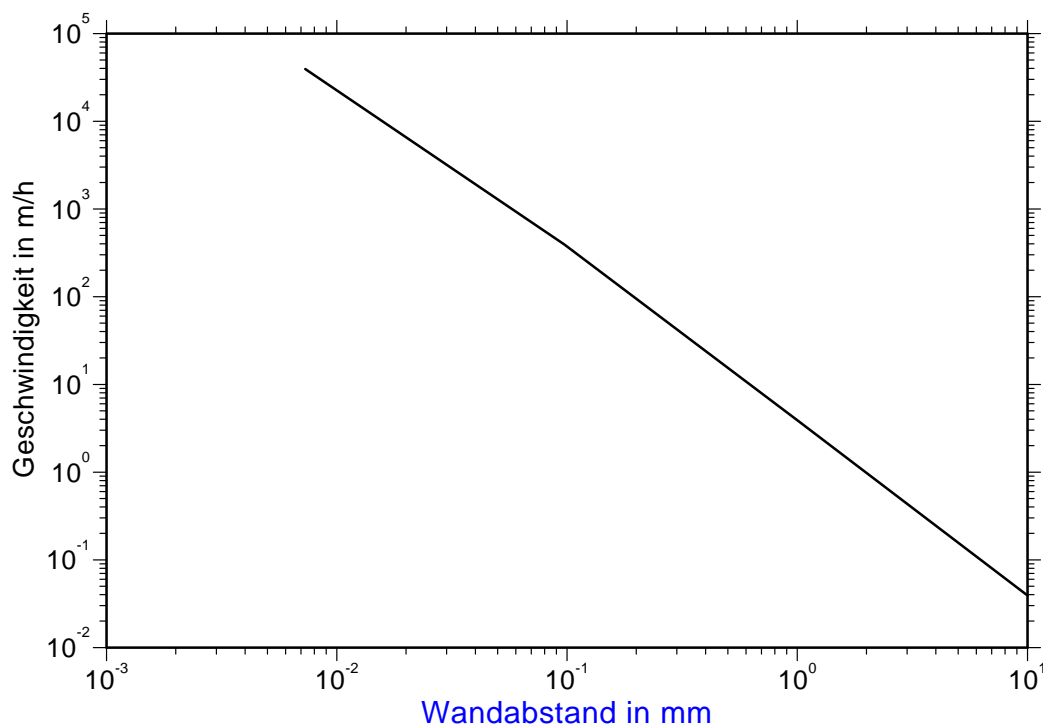


Bild 9.9: Einfluß des Abstandes von einer Kavitationsblase auf die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten im umgebenden Fluid bei einer Radialgeschwindigkeit der Blasenwand von 150 m/sec

Die durchgeführten Versuche zur Regeneration von PSK durch Ultraschall zeigten, daß neben der verwendeten Ultraschalleistung die Hauptparameter der PSK, d. h. ihre Größe und Porosität, einen z. T. überragenden Einfluß auf die Regenerierung haben. Da die Regenerierbarkeit umso schlechter wird, je dichter und Größer die PSK werden, bestimmen diese beiden Größen quasi die Eindringtiefe des Ultraschalls in den Kollektor. Darunter kann man die Dämpfung und Auslöschung der auf den Kollektor einwirkenden Schallwellen mit zunehmender zu durchstrahlender Schichtdicke des Schaumstoffes verstehen. Da Polyurethan als Polymerwerkstoff keine ideal elastischen Eigenschaften hat, sondern stark dissipativ ist, wird mit steigendem Polymeranteil im PSK, d. h. abnehmender Porosität, die für die Kavitation erforderliche Ultraschallenergie zunehmend in Wärmeenergie innerhalb des Polymers umgesetzt. Die Porosität und der Durchmesser des Kollektors beeinflussen also beide die Zugänglichkeit des Ultraschalls zu den beladenen Fasern im Inneren des Kollektors.

Hinsichtlich der Idee einer Gesamtoptimierung aus guter Abscheideleistung und guter Regenerierbarkeit bedeutet dies, daß für die Ultraschallreinigung der Kollektordurchmesser und die Kollektorporosität als die freien Optimierungsparameter aufzufassen sind. Gleichzeitig stellt die eingesetzte Ultraschalleistung einen Parameter für eine zusätzlich zu formulierende Kostenoptimierung dar, da mit zunehmender Leistung das Spülwasseraufkommen und somit die Nachentsorgungskosten vermindert werden können, aber gleichzeitig die Energiekosten zum Betrieb der Ultraschallanlage sowie deren nicht unerheblichen Investitionskosten ansteigen.

Die verminderte Zugänglichkeit des Ultraschalls in die inneren Bereiche des PSK führt dazu, daß im Inneren der PSK die extrem reinigungswirksamen Kavitationsblasen nicht entstehen können, sondern lediglich in den Randzonen des PSK gebildet werden. Wie die vorgestellten Ergebnisse der Modellrechnungen über Kavitationsblasen weiter zeigten, nehmen die durch die Kavitation ausgelösten Drücke und Fluidgeschwindigkeiten mit zunehmenden Abstand vom Rand der Kavitationsblase schnell ab. Diese Zusammenhänge führen dazu, daß für einen wirtschaftlich vertretbaren Einsatz der Ultraschallreinigung die PSK einen nicht wesentlich größeren Durchmesser als 6 mm, keinesfalls jedoch über 10 mm haben sollten.