



Faszination **Kavitation.**

Die wunderbare Welt
der Ultraschallreinigung.

Elma Schmidbauer GmbH
David Holly

VORWORT

Leidenschaft für höchste Reinheit. Seit 1948.

Vom Pionier zum Innovationsführer.

Mein Großvater Hans Schmidbauer war ein Tüftler und hatte immer eine große Portion Neugier in seinem Blut. Niemals gab er sich mit dem Status Quo zufrieden. So kam es, wie es kommen musste. Als gelernter Uhrmacher fiel ihm auf, dass der Prozess der Reinigung von Uhren und deren Kleinstteilen zu aufwendig war.

Und so lag es für ihn nahe, ein Produkt zu bauen. Das war die Geburtsstunde seines eigenen Unternehmens, der Präzisionsfabrik für Elektrische Maschinen, der Elma. Sein erstes Produkt, die **Elma Super Elite**, ebnete den Erfolg des jungen Unternehmens. Der Name Elma wurde bei den Uhrmachern zu einem festen Begriff und so gibt es heute wohl kaum noch einen Uhrmacher, der nicht Elma kennt.

Die Erfolgsgeschichte von Elma startete in Singen (Hohentwiel) und entwickelte sich über die Jahre fortlaufend. In den frühen 1960er Jahren wurden die ersten erfolgreichen Schritte im Bereich der **Ultraschalltechnologie** unternommen, welches sich im Laufe der Jahre zu einer unserer Kernkompetenz entwickelt hat.

1973 gab es die erste Staffelübergabe innerhalb der Familie zu meinem Vater Manfred Schmidbauer, der das Unternehmen weiter formte, Ultraschall auch in anderen

Branchen als Reinigungstechnologie etablierte und die internationale Expansion in heute mehr als 80 Länder, vorantrieb. Seit 2021 darf ich nun auf der Kommandobrücke stehen und das Unternehmen in die digitale Zukunft führen.

Beim Lesen unseres Ultraschallmagazins wünsche ich Ihnen nun viel Spaß auf Ihrer Entdeckungsreise in die wunderbare Welt der **Ultraschallreinigung**.

Lassen Sie sich inspirieren.

Herzlichst
Ihre Mirja Schmidbauer

PROLOG

Die wunderbare Welt der Ultraschallreinigung.

Faszination Kavitation.

Ob bei der Säuberung der Brille beim Optiker um die Ecke, bei der Reinigung im Herstellprozess von Medizininstrumenten oder bei einem milliardenschweren Hightech-Unternehmen in der Halbleiterindustrie mit allerhöchsten Reinheitsanforderungen: **Ultraschallreinigung** ist heutzutage ein höchst relevantes professionelles Reinigungsverfahren.

Bemerkenswert ist, dass nur die wenigsten wissen, wie genau Ultraschallreinigung eigentlich funktioniert. Zugegeben, es ist ein nicht gerade einfach zu verstehendes Verfahren, welches aufgrund seiner Komplexität oftmals auch ein wenig mystifiziert wird. Die folgende Wissenssammlung soll daher einen möglichst einfachen Einstieg in die Welt der Ultraschallreinigung bieten und einen Überblick zu den wichtigsten Zusammenhängen schaffen. Es besteht hier kein Anspruch auf Vollständigkeit: Kavitation wird nach wie vor erforscht, ist also noch immer nicht in allen Bereichen verstanden.

Tauchen wir nun gemeinsam unter die Wasseroberfläche des Ultraschallbads und begeben uns in die faszinierende Welt der Kavitation.

Elma Schmidbauer GmbH

David Holly

Juni 2023

PROLOG

Faszination Kavitation.

: Die wunderbare Welt der Ultraschallreinigung.	4
---	---

KAVITATION

Expertenwissen für Ihre Anwendung.

: Die vier Grundparameter der Reinigung.	6
--	---

: Ultraschall und Kavitation.	8
-------------------------------	---

: Ultraschall: Frequenz und Leistung.	14
---------------------------------------	----

: Wellenlänge und Schallfeld.	16
-------------------------------	----

: Ultraschallbetriebsarten oder auch Ultraschallmodi.	20
---	----

: Warum Kavitationsblasen ihre Größe ändern können.	22
---	----

: Warum sich Kavitationsblasen im Ultraschallbad bewegen.	24
---	----

: Die Entstehung von Kavitationsstrukturen.	26
---	----

: Temperatur, Wasserqualität, Gasgehalt und Reinigungschemie.	27
---	----

: Der Reinigungsprozess: Reinigen, Spülen, Trocknen.	28
--	----

: Ultraschallgeräte können nicht nur reinigen.	32
--	----

: Die wichtigsten Begriffe treffend erklärt.	34
--	----

Die vier Grundparameter der Reinigung.

Der Reinigungskreis nach Sinner.

Stellen wir uns einmal vor, wir hätten einen schönen Grillabend mit Freunden oder der Familie verbracht. Am nächsten Morgen wartet nun die unschöne Aufgabe – der Grillrost. Da kann es dann doch von Vorteil sein, wenn man die grundlegenden Parameter der Reinigung kennt. Zusammengefasst werden diese im sogenannten **Sinner'schen Kreis**⁽¹⁾:

Fangen wir beim **Medium** an. Für unseren Grillrost ist sicherlich Wasser mit einem Schuss Spülmittel besser geeignet als einfach nur Leitungswasser. Ist das Wasser dann auch noch möglichst heiß, haben wir auch schon den Parameter **Temperatur** beachtet. Dass es durchaus etwas bringt, den eingebrannten Rost einige Stunden einzuweichen, ist allgemein bekannt und wird hier durch den Parameter **Zeit** (oder Dauer) abgebildet. Last but not least: die mechanische Einwirkung, kurz **Mechanik**. Na, was funktioniert wohl besser, ein Pinsel oder eine Drahtbürste?

Alle vier Parameter bilden gemeinsam eine Art Erhaltungsgröße, eine **Reinigungswirkung**. Es ist leider selten so, dass man die Verringerung einer Größe einfach durch das Verstärken einer anderen ausgleichen kann. Die einzelnen Parameter bedingen sich gegenseitig und zeigen zudem oft eine Art Schwellenverhalten oder ganz allgemein nicht-linearen Charakter.

In unserem Beispiel ist, auch nach längerem Einweichen und der Verwendung von heißem Wasser mit Spülmittel, sicherlich das Schrubben die anstrengendste Aufgabe. Wie wäre es, wenn wir den Grillrost einfach in ein Reinigungsbecken mit Flüssigkeit legen könnten, welches uns den Part mit der Mechanik abnimmt? Im Becken erledigen dann ganz viele kleine „Mikrobürsten“, die überall an dem Rost das Eingebrannte und das Fett ablösen, die Reinigung.

Kaum vorzustellen.

Aber genau das kann die **Ultraschallreinigung**!

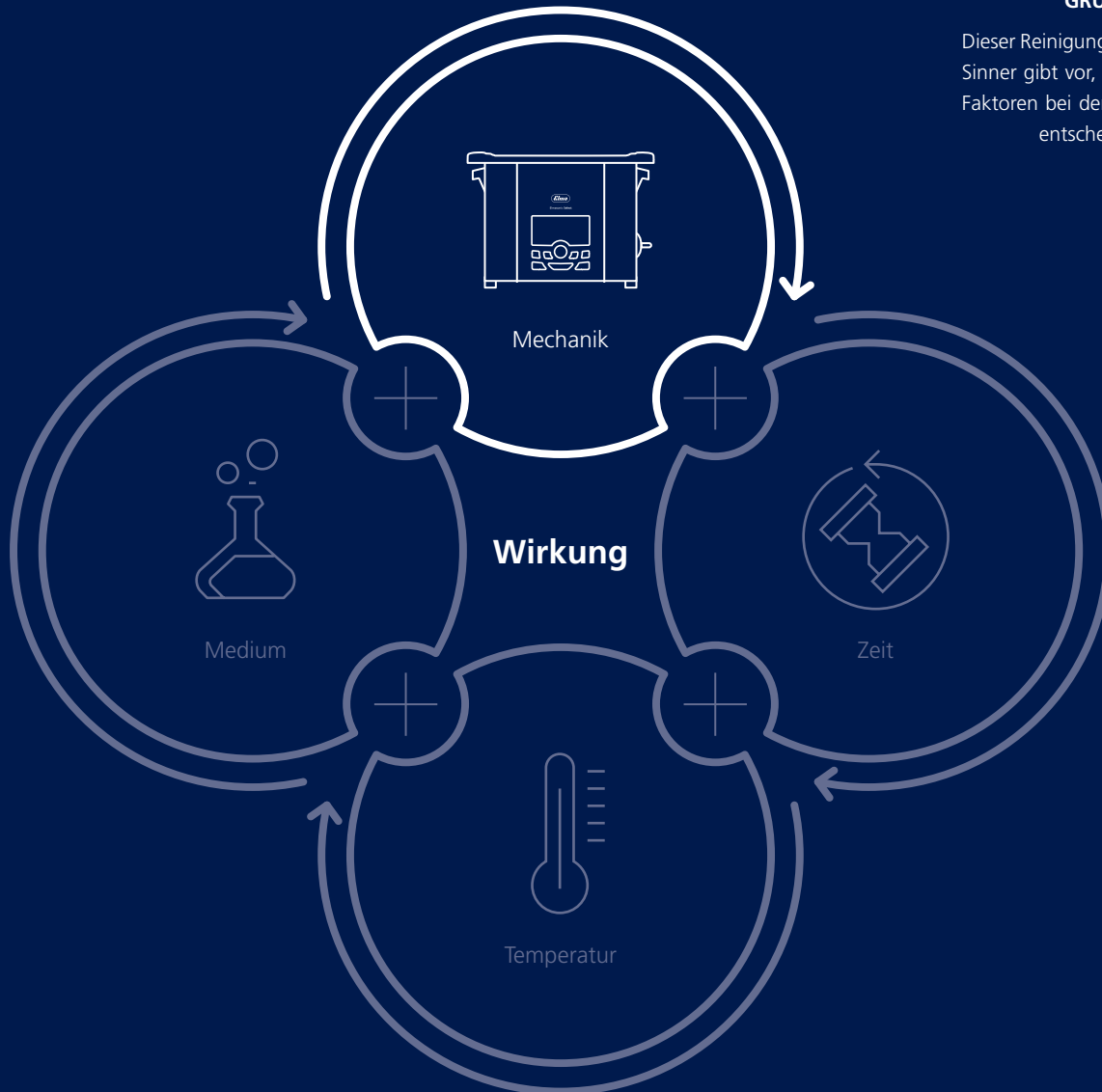
Natürlich sind es in Wirklichkeit keine „Mikrobürsten“, sondern ein besonders faszinierender Effekt: die **Kavitation**.

⁽¹⁾ Benannt nach dem Tensidchemiker Herbert Sinner (* 1900 in Chemnitz, † 1988 in Hilden).



GRUNDLAGEN

Dieser Reinigungskreis nach Sinner gibt vor, welche vier Faktoren bei der Reinigung entscheidend sind.



KAPITEL 2

Ultraschall und Kavitation.

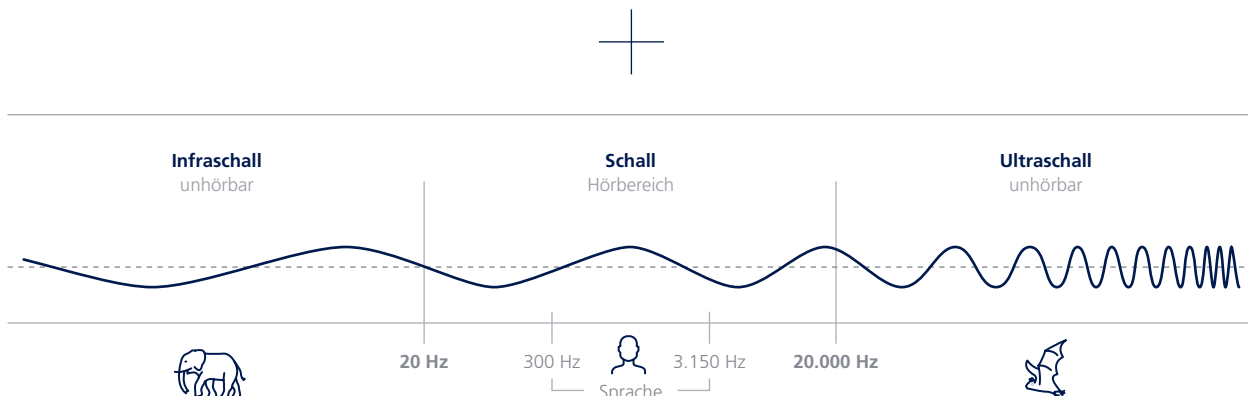
Was ist überhaupt Ultraschall?

Zuallererst gilt es einen feinen, aber wichtigen Unterschied zu klären: Genaugenommen ist der Begriff **Ultraschallreinigung** nicht ganz korrekt. Eigentlich ist es nämlich nicht der Ultraschall, der die reinigende Wirkung bringt, sondern die sogenannte Kavitation. Dennoch stehen **Ultraschall** und **Kavitation** in enger Wirkverbindung, was im Folgenden erklärt werden soll: Aber fangen wir an dieser Stelle einfach mal ganz von vorne an.

Ohne Schallwellenausbreitung könnten wir weder Musik noch Sprache hören. Lautsprecher oder auch die menschlichen Stimmbänder senden Schall in **Form von Druckwellen** in der Luft aus. Das Trommelfell im Ohr nimmt Schallwellen auf und transportiert diese ans Innenohr, wo aus den Wellen Signale geformt und an das Gehirn geleitet werden. Je tiefer

der Ton, den wir wahrnehmen, desto länger sind die Wellen. Üblicherweise verwendet man aber eine andere physikalische Größe, um die Schallwelle zu beschreiben – die sogenannte **Frequenz**. Diese hat die Einheit **Hertz (Hz)**, was einer Schwingung pro Sekunde entspricht. Die Wellenlänge und die Frequenz gehören zusammen: Eine höhere Frequenz bedeutet kürzere Wellen, eine tiefere Frequenz bedeutet längere Wellen.

Alle Schallwellen, die so tief sind, dass der Mensch diese nicht mehr hören kann, also unter 20 Schwingungen pro Sekunde – **20 Hz** – nennt man **Infraschall**. Unter **Ultraschall** versteht man hingegen Schallwellen, die mit einer Frequenz von mehr als **20.000 Hz (20 kHz)** schwingen, also oberhalb des menschlichen Hörbereichs.





Elma
Sonic Easy

Der Vorgang der Ultraschallreinigung.

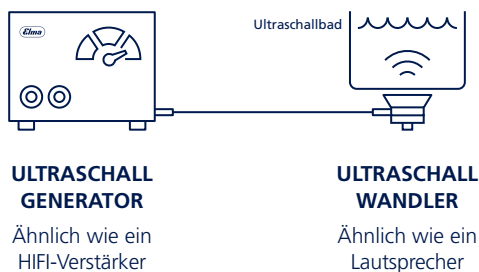
Für die Ultraschallreinigung wird ein sogenannter Ultraschallwandler an der Unterseite, manchmal auch an den Seiten eines Ultraschallbads angebracht. Man kann sich diese Ultraschallwandler ähnlich wie einen Lautsprecher vorstellen. Ein elektrischer Generator erzeugt ein elektrisches Schwingungssignal, und der Ultraschallwandler wandelt das Signal in eine Schallschwingung.

Das bedeutet, dass der Ultraschallwandler die Fläche, an die er angebracht ist, vor und zurück (in unserem Beispiel hoch und runter) bewegt, und zwar mit der Frequenz des Ultraschallsignals. Die Schallschwingung breitet sich im Wasser mit einer Schallgeschwindigkeit von etwa 1400 m/s aus. Die Schallwellen sind dabei üblicherweise sogenannte Longitudinalwellen. Darunter versteht man, dass sich die Schallwellen in Richtung ihrer Anregung ausbreiten.

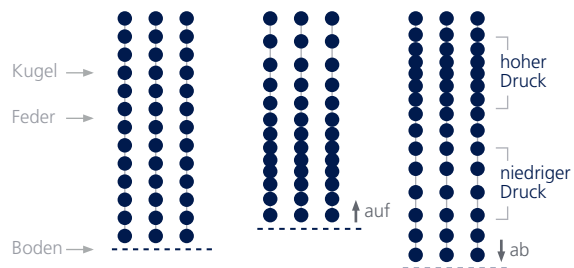
Stellen wir uns das Wasser in dem Reinigungsbad einmal als eine mit mechanischen Federn verbundene Kugelskette vor:

Bewegen wir die untersten Kugeln, also diejenigen, die sich direkt am Boden des Ultraschallbads befinden, auf und ab, dann drücken diese Kugeln die nächsten vor und zurück, diese die nächsten, und so weiter ... So gibt jede Kugel die Energie an die nächste weiter. Da aber jede Kugel zuerst einmal die mechanische Feder vor sich zusammendrücken muss, bevor sie die nächste weiterbewegt, ergibt sich eine gewisse Verzögerung. So bilden sich Bereiche, an denen die Kugeln eng zusammengedrückt werden (hoher Druck) und Bereiche, an denen die Kugeln weit auseinandergezogen werden (niedriger Druck).

Wie weit die Kugeln zusammengedrückt und auseinandergezogen werden, hängt dabei davon ab, wie weit der Boden auf und ab bewegt wird. Das bestimmt dann den sogenannten **Schalldruck**. Man kann das im übertragenen Sinn auch als Lautstärke des Schalls verstehen. In Ultraschallreinigungsbädern werden üblicherweise Schalldrücke bis zu **200 kPa (200.000 Pascal)** erzeugt.



Technischer Aufbau Ultraschallreinigung.



Vereinfachte Darstellung der Schallwellenausbreitung im flüssigen Medium.

Diese Schalldrücke sind derart stark, dass das Auseinanderziehen bei niedrigem Druck die Federn zwischen den Kugeln abreißen lässt.

Rufen wir uns hier nochmal in den Sinn, dass die Kugelkette ja eigentlich nur unser Anschauungsmodell ist, wir reden ja in Wirklichkeit über Wasser! Starker Ultraschall zerreißt Wasser, unglaublich, oder?

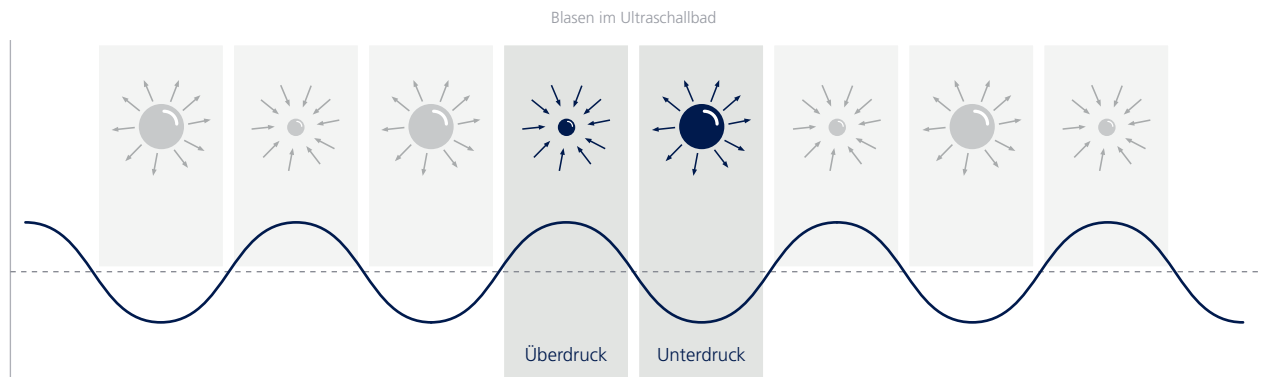
Zugegebenermaßen muss man hier anmerken, dass Wasser meistens keine absolut reine Struktur aufweist. Üblicherweise gibt es Fehlstellen, verursacht durch Salze, Staub, stabilisierte Nanobläschen oder auch kleine Gastaschen an Oberflächen. An diesen sogenannten Nukleationsstellen ist ein Aufreißen wahrscheinlicher als in einer absolut reinen Wasserstruktur. Mit ein wenig Überlegen kommt man recht einfach auf das nun Folgende: Wenn die Struktur des Wassers zerreißt, dann kann an der Stelle des Risses de facto kein Wasser in flüssiger Form mehr vorhanden sein!

Was übrig bleibt, ist in der Tat gasförmig. Genaugenommen nimmt man ein Gemisch aus Wasserdampf und Luft an. Zwischen der Ansammlung der Gasteilchen und dem Wasser bildet sich also eine kugelförmige Grenzschicht, und das ist nichts anderes als eine Blase.

An den Rissstellen bilden sich also kleine **Blasen**. Die Bildung von Blasen durch Zerreißen des Wassers nennt man **Kavitation**. Interessant ist hier auch die Wortbedeutung: lat.: *cavatio* = die Aushöhlung, engl.: *the cavity* = der Hohlraum. An dieser Stelle wissen wir also nun, was Kavitation bedeutet.

Aber wie wirkt Kavitation?

Die entstandenen Blasen sind weiterhin dem um sie herum wechselnden Schalldruck ausgesetzt. Konkret bedeutet dies, dass die Blasen zusammengedrückt (komprimiert) werden, wenn um sie herum Hochdruck herrscht, bzw. ausgedehnt werden, bei Unterdruck.



Wechselnder Schalldruck: Überdruck komprimiert die Blase, Unterdruck dehnt sie aus.

Einfluss des Schalldrucks.

Im Folgenden betrachten wir das Verhalten an einer einzigen Blase, wobei man aber nicht vergessen sollte, dass die folgend beschriebenen Vorgänge viele Male gleichzeitig an unterschiedlichen Orten im Ultraschallbad vonstattengehen. Das Verhältnis der Ausgangsgröße der Blase (Radius) zu der Ultraschallfrequenz und dem Schalldruck, wie noch einigen weiteren wichtigen Einflussparametern, bestimmt das weitere Verhalten.

Betrachtet man niedrigere Schalldrücke, so schwingt die Blase mit dem wechselnden Schalldruck mit, wird also stetig gedehnt und komprimiert. Sind die Schalldrücke ein wenig höher, kann man bereits eine gewisse Eigendynamik der Blase beobachten. Der Radius der Kavitationsblase kann dann beispielsweise folgenden Verlauf nehmen: Die Blase wächst zunächst ein wenig, etwa auf das doppelte ihres Ursprungsradius, um direkt, nachdem der Druck sein Minimum erreicht hat, wieder zu schrumpfen. Da die Blasenwand durch die Oberflächenspannung eine gewisse „federnde“ Wirkung aufweist, kommt es zu einem gewissen „Nachfedern“. Nachfolgend ist dies für eine Ultraschallperiode bei 25 kHz und etwa 100 kPa Schalldruck gezeigt: Dieses Verhalten wird sich nun über eine Vielzahl an aufeinanderfolgenden Perioden wiederholen, weshalb man hier von **Stabiler Kavitation** (S.13) spricht.

Wenn ein höherer Schalldruck, in unserem Beispiel 140 kPa auf die Blase wirkt, kommt es zu einem sehr faszinierenden Effekt. Dieser ist in der Fachwelt unter **Inertial Kavitation** oder **Trägheits-Kavitation** oder auch **Transiente Kavitation** (S.13) bekannt. Die Blase wächst durch den höheren Druck zunächst auf ein Vielfaches, etwa das 7-fache ihres Ausgangsradius. Die Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit vor sich herschiebend, behält sie trägheitsbedingt ihre maximale Größe

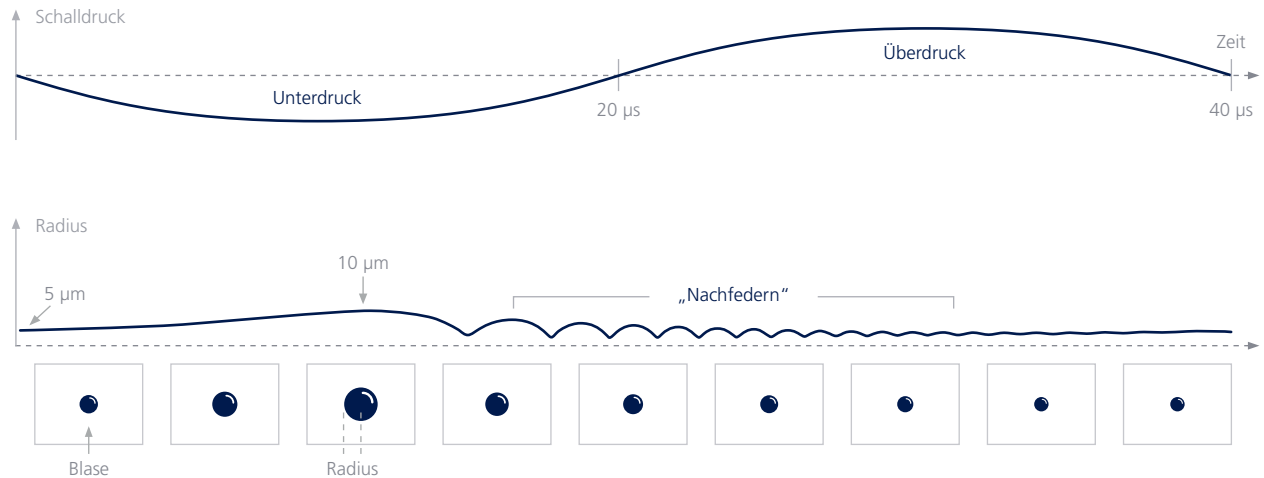
bei, und zwar bis der Schalldruck bereits von Unterdruck zu Überdruck wechselt. Der jetzt folgende Überdruck lässt die Blase zusammen mit der Oberflächenspannung extrem schnell auf ein Minimum schrumpfen. Üblicherweise kann man annehmen, dass die Blasenwand dabei sogar Überschallgeschwindigkeit erreicht. Der Blaseninnendruck steigt dann derartig rasant an, dass Temperaturen von mehreren Tausend °C im Blaseninneren erreicht werden – die Folge: Die Blase **kollabiert**. Man spricht hier auch von einer **Implosion**, die dann, ähnlich wie eine Explosion, eine **Druckwelle** erzeugt. Speziell in der Nähe von Grenzflächen wie der Oberfläche unseres zu reinigenden Objektes, bildet sich zusätzlich zum Blasenkollaps auch ein Flüssigkeitsjet, also ein kleiner Strahl sehr schnell fließender Flüssigkeit.

Sowohl die Stabile Kavitation als auch die Transiente Kavitation sind nützliche Werkzeuge in der Ultraschallreinigung. Die schwingenden Blasen bei der Stablen Kavitation bewegen die Flüssigkeit rund um das zu reinigende Objekt. Damit wird ein permanenter Austausch des Mediums an der Grenzfläche gewährleistet. Das eignet sich besonders, wenn man ultraschallunterstütztes Spülen erzielen möchte, was oftmals einer der letzten Schritte in einem Reinigungsprozess ist. Die durch Transiente Kavitation erzeugten Druckwellen und Flüssigkeitsjets sind für den Reinigungsschritt wesentlich besser geeignet. Die Druckwellen „sprengen“ die Verunreinigung an der Oberfläche des zu reinigenden Objekts regelrecht auf und die Jets befördern den Schmutz weg.

Zwischen Stabiler Kavitation und Transienter Kavitation ist ein gewisses Schwellwertverhalten bekannt. Man spricht hier von der sogenannten **Kavitationsschwelle (cavitation threshold)**.

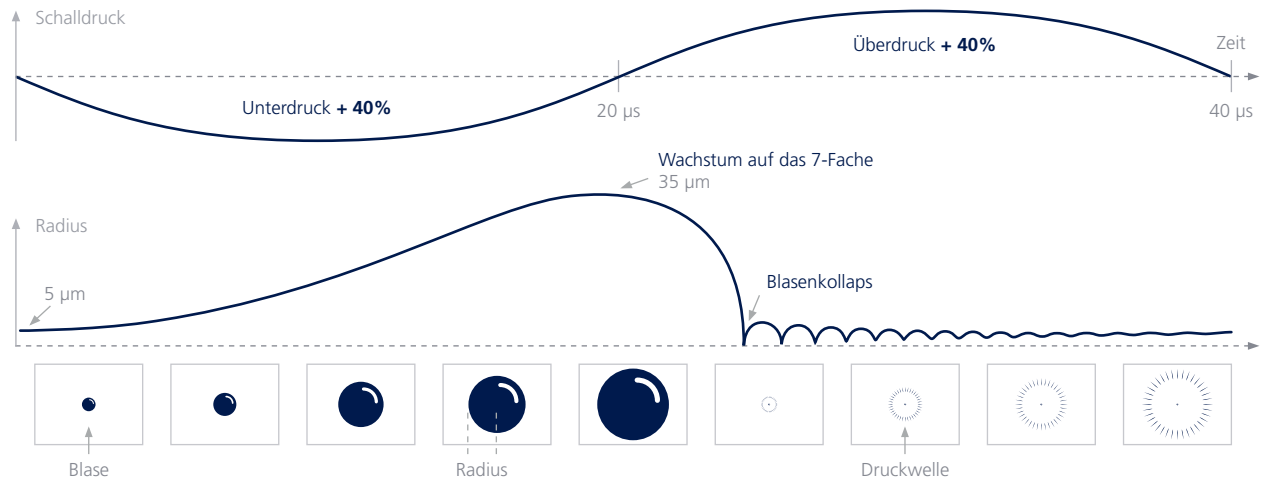
Stabile Kavitation

Leistungswerte in vereinfachter Darstellung



Transiente Kavitation

Leistungswerte in vereinfachter Darstellung



KAPITEL 3

Ultraschall: Frequenz und Leistung.

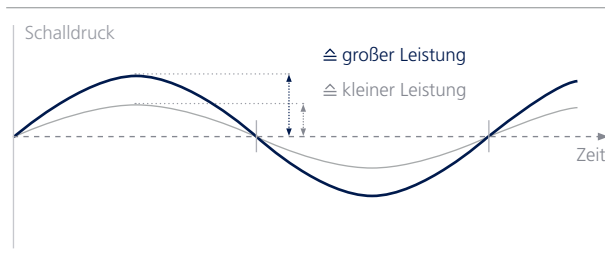
Ultraschallwirkung bewusst regulieren.

Wir haben im ersten Kapitel bereits festgestellt, dass es einen großen Unterschied macht, ob man für die mechanische Einwirkung eine Bürste oder einen Pinsel verwendet. Je nach Verunreinigung, Reinheitsanforderung und auch nach Beschaffenheit unseres Reinigungsguts wäre es wohl von Vorteil, wenn wir zwischen verschiedenen Werkzeugen auswählen könnten. Unser Werkzeug sind die Kavitationsblasen und die Frage lautet nun: Wie beeinflusst man deren Verhalten so, dass sie entweder stark oder eben sanft wirken? Dazu schauen wir uns einmal an, was wir an einem Ultraschallbad üblicherweise einstellen können:

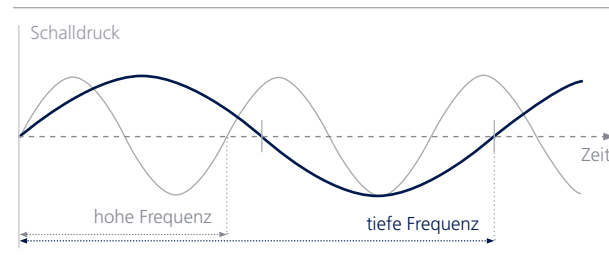
Oftmals lässt sich bei Ultraschallreinigungsgeräten die **Leistung** einstellen. Im übertragenen Sinn können wir diese auch als Lautstärke oder Stärke des Schalldrucks verstehen.

Wenn eine hohe Leistung eingestellt ist, werden die Kavitationsblasen transient wirken und durch die Druckwellen und Jets entsprechend hart auf die Verunreinigung und das Reinigungsgut einwirken. Bei geringerer Leistung werden die Kavitationsblasen eher ein stabiles Verhalten haben, sprich sie pulsieren sanft und bewegen dadurch Reinigungsmedium rund um das zu reinigende Gut. Es können hier dennoch hin und wieder Blasenkollaps-Ereignisse auftreten, was eventuell nicht immer gewollt ist.

Der zuverlässigere Weg zur sanfteren Reinigung führt über die **Frequenz** des Ultraschalls. Man kann ausgehend von gleichbleibender Ultraschallleistung folgenden Zusammenhang annehmen: je tiefer die Frequenz (Bsp: 25 kHz), umso härter die Einwirkung. Umgekehrt gilt, je höher die Frequenz, desto sanfter.



Vergleich: großer vs. kleiner Schalldruck.



Vergleich: tiefe vs. hohe Frequenz.

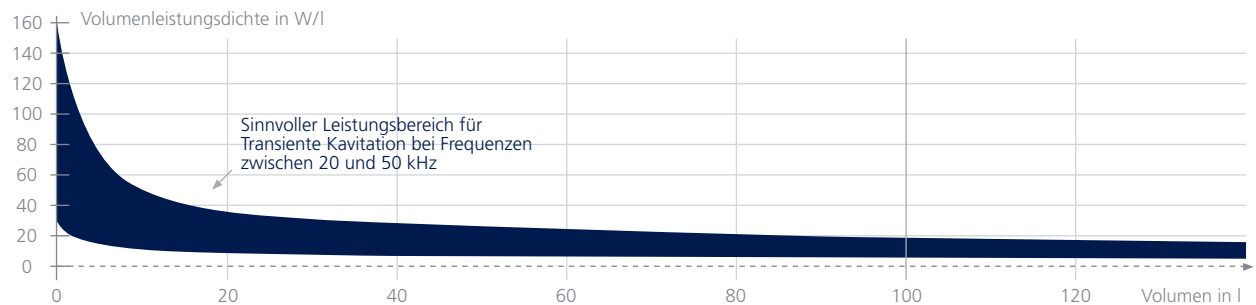
Parameter richtig einstellen.

Für viele Standardanwendungen reicht eine „mittelharte Bürste“ und natürlich die richtige Wahl der restlichen Parameter des Sinner'schen Kreises (Kapitel 1). Bei gängigen Ultraschallreinigungsgeräten entspricht dies dann einer Frequenz im Bereich zwischen 35 kHz und 45 kHz. Die Leistung wird abhängig vom Füllvolumen der Flüssigkeit so gewählt, dass transiente Kavitation auftritt. Für sehr feine und sanfte Reinigung, wie auch für das Spülen nach der Reinigung, verwendet man dann Frequenzen ab 70 kHz und höher. Es ist durchaus auch möglich bei hohen Frequenzen transiente Kavitation zu erzeugen, allerdings ist es so, dass mit steigender Frequenz deutlich höhere Leistungen und teilweise völlig andere Schallwandler nötig sind. Somit ist es schlicht erheblich teurer und deshalb eher selten wirtschaftlich sinnvoll.

In Verbindung mit der Auswahl eines geeigneten Ultraschallgeräts trifft man auch immer wieder auf die sogenannte volumenbezogene (volumenspezifische) Leistung „**Watt pro Liter**“ oder kurz „**W/l**“. Ein verbreiteter Irrglaube ist hier, dass man immer eine **Volumenleistungsdichte** von mindestens 20W je Liter Flüssigkeit benötigt. Diese Annahme ist nicht allgemeingültig! Hier besteht ein, zugegebenermaßen nicht

intuitiv fassbarer Zusammenhang zwischen dem Füllvolumen und der notwendigen Volumenleistungsdichte. Je kleiner ein Becken, desto mehr W/l werden benötigt, je größer, umso weniger! „Viel hilft viel“ gilt hier allerdings auch nicht. Zu viel Leistung führt dazu, dass sich Kavitationsereignisse in unmittelbarer Nähe der Ultraschallwandler bzw. an der schallabstrahlenden Fläche ergeben. Das sorgt im schlechtesten Fall für ineffizientere Reinigung und zudem zu einem deutlich schnelleren Verschleiß der Ultraschallwanne. Ja, auch Edelstahl, woraus die Ultraschallwannen meist bestehen, hält der Einwirkung durch Kavitation nicht unendlich stand.

Man muss hier noch anmerken: Dies ist nur eine grobe Einschätzung, die gewissen Einschränkungen unterliegt. Ist das Ultraschallbecken sehr flach und lang oder sehr schmal und dafür sehr hoch, dann sollte insbesondere unter Berücksichtigung der Richtung der schallabstrahlenden Fläche und der Position der Ultraschallwandler ausgelegt werden. Elma achtet bereits bei der Spezifikation und der Entwicklung der Ultraschallgeräte auf das ideale Verhältnis zwischen Leistung und Füllvolumen, insbesondere unter Berücksichtigung der Badgeometrie.



Grobe Orientierung für eine sinnvoll gewählte spezifische Volumenleistungsdichte.

KAPITEL 4

Wellenlänge und Schallfeld.

Ausbreitung des Schalldrucks.

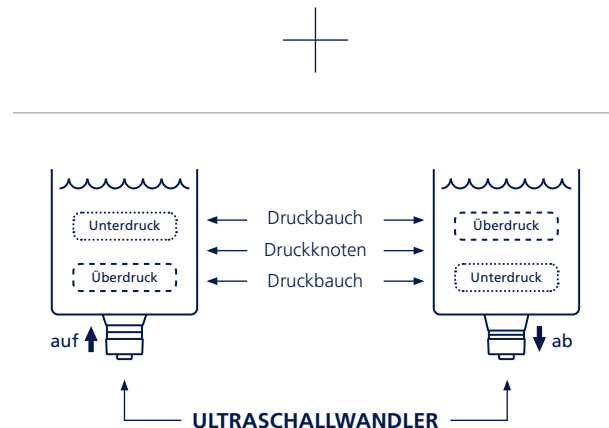
Ein weiterer nicht zu unterschätzender Einfluss in Bezug auf die Frequenz ist die sich daraus ergebende **Wellenlänge** und damit auch die räumliche Verteilung des Schalldrucks und der Kavitationsblasen. Aber erstmal Schritt für Schritt:

In Kapitel 2 haben wir schon geklärt, dass die Wellenlänge und die Frequenz voneinander abhängen. Man kann sich die Wellenlänge ausrechnen, in dem man die **Schallausbreitungsgeschwindigkeit** der Flüssigkeit (hier im Beispiel 1440 m/s) durch die Frequenz teilt. Bei 25 kHz sind die Wellen also ungefähr 5,8 cm lang. Das ist für die Schallwellen im Ultraschallbad aber nur die halbe Wahrheit – und zwar, wie wir gleich sehen werden, im wahrsten Sinne des Wortes: Die vom Schallwandler fortlaufenden Wellen werden nämlich spätestens an der Badoberfläche reflektiert. Sie drehen also um 180° und laufen wieder zurück in Richtung des Schallwandlers. Auf dem Weg kommen ihnen aber weiterhin neue Wellenberge (Überdruck) und -täler (Unterdruck) entgegen. Wenn sich örtlich zwei Wellenberge treffen, ergänzen sich diese. Das Gleiche gilt für zwei Wellentäler.

Wenn sich hingegen ein Wellenberg und ein Wellental treffen, löschen sich diese zu null aus. Man kennt dieses Verhalten in der Physik auch unter dem Namen Welleninterferenz.

Setzen wir uns nun in unserer Vorstellung mal an einen Ort im Ultraschallbad, an dem in einem Moment durch Ergänzung zweier Wellenbergspitzen genau der doppelte Schallüberdruck auftritt.

Wir werden dann feststellen, dass der Druck mit der Zeit immer weniger wird und dann, eine halbe Schwingungsdauer später, der doppelte Unterdruck um uns herum herrscht. In diesem Moment ergänzen sich genau zwei Wellentäler. Dann wird der Druck wieder höher, bis er wieder dem doppelten Schallüberdruck entspricht, und so weiter ... Man nennt diesen Ort **Schalldruckbauch**.



Funktion des Ultraschallwandlers.

A close-up photograph of a metal watch bracelet being cleaned in an ultrasonic bath. The bracelet is suspended by a chain and is covered in a thick, white, foamy substance that is being removed by the cleaning process. The background is a deep blue, and the lighting highlights the texture of the foam and the metallic surface of the bracelet.

Abläufe im Ultraschallbad.

Ultraschall und Kavitation treiben
Verunreinigung aus den Gliedern
eines Uhrenarmbands.

Abläufe im Ultraschallbad.

Gehen wir jetzt an einen zweiten Ort, $\frac{1}{4}$ Wellenlänge weiter (in unserem Beispiel 1,45 cm), dann werden wir feststellen, dass sich hier der Schalldruck über die Dauer überhaupt nicht verändert. Man nennt diesen Ort **Schalldruckknoten**.

Wieder eine viertel Wellenlänge weiter ist wieder ein Bauch, dann wieder ein Knoten und so weiter ... Betrachtet man dieses Verhalten von weiter weg, so wirkt es, als gäbe es gar keine sich fortbewegenden Wellen. Genau aus diesem Grund spricht man hier von einer stehenden Welle oder auch von einem sogenannten **Stehwellenfeld**.

Was man aus diesem Kapitel mitnehmen sollte, ist, dass sich im Ultraschallbad **ortsfeste** Schalldruckzonen ergeben. Wie weit diese voneinander entfernt liegen, hängt dabei von der Frequenz ab.

: **Hohe Frequenz** $\triangleq$ kleiner Entfernung

: **Niedrige Frequenz** $\triangleq$ großer Entfernung

Nimmt man nun das bereits dargestellte über die Entstehung der Kavitation aus Kapitel 2, so führt es einen direkt zu folgender Überlegung: In den Schalldruckknoten kann ja überhaupt keine Kavitation entstehen, das führt doch dann in der Folge zu einer ungleichmäßigen mechanischen Einwirkung?

Ja, das stimmt, und genau aus diesem Grund ist es ratsam, das zu reinigende Teil im Schallfeld langsam in Richtung der schallabstrahlenden Fläche vor und zurück, beziehungsweise hoch oder runter zu bewegen (zu oszillieren).

In den Elmasystem Reinigungsanlagen und auch in größeren Elmasonic Standgeräten kann dies mit einer mechanischen Vorrichtung automatisiert erfolgen. In kleineren Geräten findet oft keine (automatische) Teilebewegung statt. Ein Korb oder Warenträger werden dann ortsfest eingesetzt oder eingehängt. Wie man hier geschickt das bisher Erlern-te anwendet, behandeln wir im folgenden Kapitel.



ELMASONIC SELECT

Leistungstark und individuell – die
Produktsreihe setzt auf maximale
Bedienerfreundlichkeit.



Ultraschallbetriebsarten oder auch Ultraschallmodi.

Vielfältige Funktionen.

In vielen gängigen Ultraschallreinigungsbädern können verschiedene Ultraschallbetriebsarten gewählt werden. Wählt man solch eine Betriebsart, dann werden von dem Ultraschallgenerator entweder die Ultraschallfrequenz oder die Ultraschallleistung oder beides variiert. Die Veränderung von Frequenz oder Leistung geschieht dann auf einer deutlich langsameren Zeitskala als das eigentliche Ultraschallsignal. Um dies nachzuvollziehen, müssen wir erstmal klären, wie wir ein Ultraschallsignal auf der Zeitskala überhaupt beschreiben können: Bisher haben wir ja hauptsächlich von der Frequenz und von der „räumlichen“ Länge einer Welle gesprochen. Es gibt aber auch einen einfachen Zusammenhang zwischen der Dauer einer Welle und deren Frequenz. Dieser ergibt sich bereits aus der bekannten Größe Hertz (Hz) – Kapitel 2. Ein Hertz bedeutet, dass eine Schwingung, also einmal Wellenberg und einmal Wellental, genau eine Sekunde dauert. Bei einer typischen Ultraschallschwingungsfrequenz wie z.B. 37000 Hz (37 kHz) dauert eine Schwingung nur 27 µs. Das sind 0,000027 s. Ziemlich schnell, nicht wahr?

Eco-Modus.

Lange galt die Devise „Hauptsache viel Leistung“. Viel Leistung sorgt zwar für starke Reinigungseffekte, bringt aber auch Nachteile. Hohe Leistung begünstigt den Verschleiß der Ultraschallwanne und bedeutet insgesamt einen hohen Energiebedarf. Moderne Ultraschallgeräte (Elmasonic Select,

Med, Easy) sind daher mit einem sogenannten Eco-Modus ausgestattet. Dieser ist ein leistungsreduzierter Sweep-Modus der unter Standardbedingungen (entgastetes Wasser mit tensidhaltigem Reiniger, ca. 20-70 °C) transiente Kavitation und damit ausreichen mechanische Reinigungswirkung erzeugt. Für viele Reinigungsaufgaben ist dieser Modus also absolut ausreichend. Er ist leiser, energieeffizienter und sorgt für eine längere Gerätelebensdauer.

Sweep-Modus.

Ein typischer Modulationsmodus ist der sogenannte Sweep-Modus, manchmal auch „Frequenz-wobble“ genannt. Insbesondere bei Tischgeräten (z.B. Elmasonic Select, Med, Easy) ist dieser Modus sogar der Standardmodus und muss nicht separat gewählt werden. Das liegt schlicht an dessen Vorteilen: Dieser Sweep-Modus erzeugt eine Modulation in Form einer zeitlich wiederkehrenden Änderung der Frequenz, in der Technik auch unter dem Begriff Frequenzmodulation bekannt. Man kann diese als eine zweite, mit der Ultraschallschwingung vereinte Schwingung verstehen. Wie bereits angedeutet ist diese ergänzende Schwingung deutlich langsamer bzw. tieferfrequent als das eigentliche Ultraschallsignal – etwa im Bereich zwischen 1 s und 100 ms, oder eben 1 Hz und 10 Hz. Und was soll das bringen? Ganz einfach, wir haben ja gelernt, dass eine Änderung der Frequenz auch eine Änderung der Wellenlänge im Bad verursacht.

Ändert man also zyklisch die Frequenz, dann ändert sich mit dem gleichen Zyklus auch der Ort an dem Kavitationsbläschen erzeugt werden. So bewegt das Ultraschallbad den reinigenden Effekt. Die mit der Frequenzverschiebung einhergehende Verschiebung der Wellenlänge reicht jedoch leider nicht ganz aus, um ein völlig homogenes Reinigungsbild zu erhalten. Auf eine mechanische Oszillation sollte insbesondere in größeren Becken also dennoch nicht verzichtet werden.

Pulse-Modus.

Ein weiterer sinnvoller Modulationsmodus betrifft die Leistung des Ultraschallbads. Wir haben ja bereits gelernt, dass höhere Leistung auch stärkere Kavitation erzeugt. Gleichzeitig wissen wir aber auch, dass stärkere Kavitation unser Ultraschallbad stärker beansprucht. Nehmen wir mal an, wir haben ein Gerät, welches 100 W Ultraschallleistung erzeugen kann. Wir brauchen aber einen stärkeren Kavitationseffekt und damit eigentlich eine Leistung von z.B. 130 W. Der Trick ist nun der folgende: Wir teilen die Leistung zeitlich auf, geben für 10 ms 70 W Ultraschallleistung ab und in den nächsten 10 ms 130 W, dann wieder 70 W und so

weiter. Im zeitlichen Mittel haben wir weiterhin 100 W Leistung, für die Hälfte der Zeit haben wir aber den starken Kavitationseffekt mit 130 W. Genau das erzielt man mit dem sogenannten Pulse-Modus.

Dynamic-Modus.

Möchte man also eine möglichst homogene Reinigung und gleichzeitig eine starke Reinigungsleistung, wählt man einen Modus, der beide vorangegangenen kombiniert. Abwechselnd Pulse und Sweep ergibt den sogenannten Dynamic-Modus.

Degas-Modus.

Ein spezifischer Effekt, der eigentlich nicht zum Reinigen gedacht ist, ist der sogenannte Degas-Modus. In diesem Modus wird der Schall zyklisch ein- und ausgeschaltet. Dies ist besonders effizient, um im Medium gelöstes Gas aus dem Becken zu entfernen. Warum das sinnvoll ist, werden wir in den folgenden Kapiteln lernen. Der Degas-Modus dient hier insbesondere der Badvorbereitung, wird also vor der eigentlichen Reinigung angewendet.



ECO-MODUS



SWEEP-MODUS



PULSE-MODUS



DYNAMIC-MODUS



DEGAS-MODUS



Warum Kavitationsblasen ihre Größe ändern können.

Einblick in physikalische Prozesse.

Wie die Kavitationsblasen entstehen und wirken, haben wir bereits, zumindest in groben Zügen gelernt: Bei kleineren Schalldrücken schwingen die Kavitationsblasen, nachdem sie entstanden sind. Sie werden also zyklisch mit dem Ultraschall zusammengedrückt und ausgedehnt und neigen zusätzlich dazu nachzufedern. Bei größeren Schalldrücken werden die Bläschen in der Unterdruckphase so weit ausgedehnt, dass diese anschließend mit Einsetzen des Überdrucks kollabieren.

In der Wissenschaft ist hier die sogenannte **dynamische Blake-Schwelle** bekannt. Wie sich dies ganz exakt verhält, lässt sich leider ohne die Verwendung höherer Mathematik nicht sehr gut beschreiben. Nichtsdestotrotz können wir folgende Zusammenhänge annehmen: Wenn die Ausdehnung innerhalb einer Überdruckphase mehr als das 3-fache der ursprünglichen Größe annimmt, dann wird die Blase mit hoher Wahrscheinlichkeit heftig kollabieren.

Ob die Blasen nun kollabieren oder schwingen, hängt allerdings nicht ausschließlich vom Schalldruck, sondern insbesondere auch von deren Ausgangsgröße und der Ultraschallfrequenz ab. Sehr kleine Bläschen werden nicht auf die Ultraschallanregung reagieren und lösen sich mit der Zeit auf. Große Blasen können sogenannte nichtlineare Schwingungen vollziehen, kollabieren aber eher nicht. Nur

wenn die Blasen die richtige Ausgangsgröße haben, wird ein heftiger Blasenkollaps folgen. Bisher haben wir über die Dynamik einer Blase innerhalb einer oder ggf. weniger Schwingungsperioden gesprochen.

Was die Angelegenheit noch ein wenig komplizierter macht: Die Blasen ändern, stimuliert durch die Ultraschallwirkung ihre Größe, auch oder insbesondere über längere Zeiträume hinweg. Dafür sind zwei **Blasenwachstumseffekte** verantwortlich:

Der erste Effekt wird **Rectified Diffusion** genannt. Darunter versteht man einen Transportmechanismus für im Medium gelöste Gasteilchen – im Wesentlichen Luft: also Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Argon. Stellen wir uns nochmal vor, wie eine Blase überhaupt beschaffen ist: Innen ist die Blase mit Gasteilchen gefüllt. Um diese Teilchen herum schließt eine Blasenwand diese Teilchen ein und schirmt sie gegen das Wasser ab. Wird die Blase durch Überdruck zusammengedrückt, werden auch die darin eingeschlossenen Gasteilchen zusammengedrückt.

Für diese wird es dann aber ein wenig zu eng, weshalb einige Gasteilchen durch die Blasenwand hinaus in das Wasser „flüchten“. Wird hingegen die Blase ausgedehnt, wird mehr Platz im Blaseninneren frei, und somit gelangen

einige im Wasser gelösten Gasteilchen durch die Blasenwand ins Blaseninnere. Diesen Effekt nennt man Diffusion. Es verhält sich aber so, dass in der Unterdruckphase immer mehr Gas in die Blase als bei Überdruck aus der Blase heraus transportiert wird.

In der Folge führt das dann dazu, dass die Blase durch diese nun gerichtete Diffusion über die Dauer mehrerer Ultraschallzyklen immer weiter anwächst.

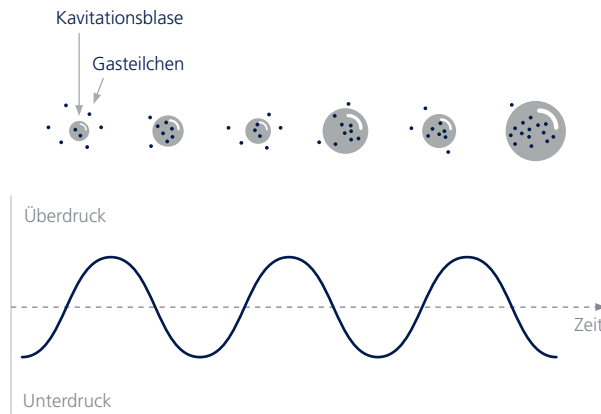
Den zweiten bekannten Effekt nennt man **Koaleszenz**. Man kann sich das Verhalten ähnlich wie bei Seifenblasen in der Luft vorstellen. Da kann es passieren, dass zwei Seifenblasen zusammentreffen, und sich zu einer größeren Blase vereinen. So ähnlich passiert das auch mit Kavitationsblasen, wobei hier noch ein weiterer Effekt eine wichtige Rolle spielt. Diesen behandeln wir aber im nächsten Kapitel.



Rectified Diffusion

Blasendynamik

Über die Dauer diffundieren mehr Teilchen **in die** Blase **als heraus!** Ergebnis: **Die Blase wächst.**

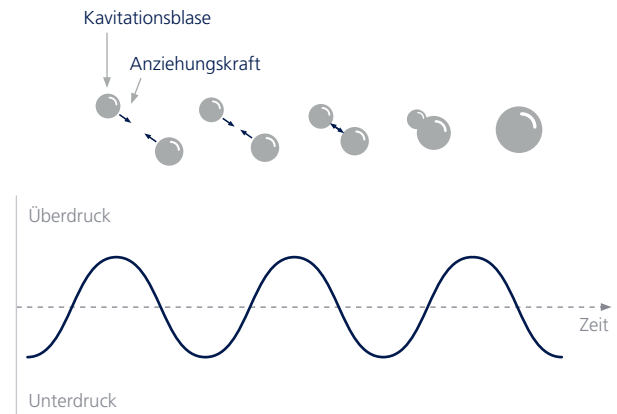


Vereinfachte Darstellung der Blasenwachstumseffekte.

Coalescence

Blasendynamik

Zwei oder mehrere Blasen ziehen sich an und vereinigen sich zu einer **größeren Blase**.



Warum sich Kavitationsblasen im Ultraschallbad bewegen.

Über die Translationskraft.

Kavitationsblasen schwingen oder kollabieren, verschwinden oder wachsen, werden aufgespalten oder vereinen sich. Als ob das nicht schon genug wäre: Kavitationsblasen bewegen sich auch noch durch das Bad. Um ein Objekt in Bewegung zu versetzen, muss üblicherweise eine **Kraft** aufgewendet werden. Man nennt eine solche Kraft auch Translationskraft. Auf Gasblasen unter Wasser wirken mehrere Kräfte.

: **Erdanziehungskraft** = Volumen der Blase * Dichte des Gases in der Blase * Fallbeschleunigung

: **Auftriebskraft** = Volumen der Blase * Dichte des Wassers * Fallbeschleunigung

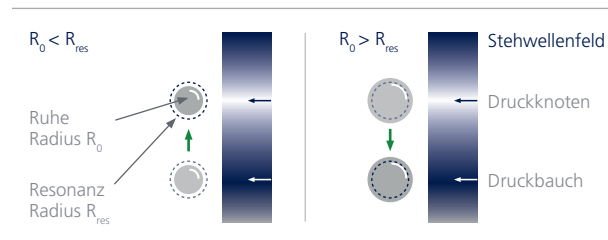
Die erste ist die Erdanziehungskraft oder auch Schwerkraft. Dieser entgegen wirkt die sogenannte Auftriebskraft.

Da sich die Kräfte exakt entgegenstehen, wird die stärkere Kraft immer gewinnen. Man kann sich das wie beim Tauziehen vorstellen. Das Team mit mehr Kraft sorgt dafür, dass sich das Tau immer weiter in seine Richtung zieht. Die aus den zwei entgegengesetzten Kräften entstandene resultierende Kraft ist die tatsächlich wirkende Translationskraft. Da die Dichte des Wassers in unserem Fall offensichtlich immer höher ist, als die Dichte von Gas, wird die Auftriebskraft stärker sein als die Erdanziehungskraft: Die Auftriebskraft gewinnt beim Tauziehen und die Blase steigt zur Oberfläche.

Im Ultraschallbad kann man bei genauem Hinsehen aber auch oft Bläschen beobachten, die während des Ultraschallbetriebs eben nicht zur Oberfläche aufsteigen, sondern scheinbar mitten im Wasser schweben. Wenn der Ultraschall dann ausgeschaltet wird, steigen diese Blasen direkt



Auftriebskraft – die stärkere Kraft.



Primäre Bjerknes-Kraft: Das Schallfeld bewegt die Blasen.

zur Badoberfläche auf. Warum hält der Schall die Blasen fest? Dies liegt offensichtlich an einer weiteren Kraft, die der vorhin behandelten Auftriebskraft entgegenwirkt. Diese nennt man **Primäre Bjerknes-Kraft** (Benannt nach dem Physiker Vilhelm Friman Koren Bjerknes).

$$\text{Primäre Bjerknes-Kraft} = (-1) \cdot \text{Schalldruckgradient} \cdot \text{Volumen der Blase}$$

Der **Schalldruckgradient** beschreibt hier den Verlauf der Änderung des Schalldrucks über einen gewissen räumlichen Bereich des Schallfelds. Stellen wir uns vor, wir wären so klein wie eine Kavitationsblase und befänden uns im Schalldruckknoten des Schallfelds. Wir haben in Kapitel 4 gelernt, dass an diesem Ort kein Druckwechsel stattfindet. Wenn wir jetzt Stück für Stück in Richtung Schalldruckbauch gehen, wird der Druckwechsel immer stärker.

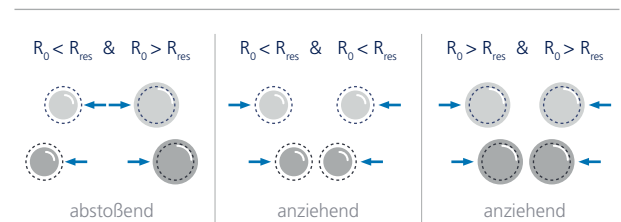
Den Verlauf unseres Wegs, also den Verlauf des Anstiegs der Druckwechselamplitude, nennt man Schalldruckgradient. Der Gradient alleine reicht aber noch nicht aus, um eine Kraft auf die Blase auszuüben, sofern man die Blase mit einer konstanten Größe annimmt. Wie wir aber schon gelernt haben, ändert sich der Radius der Blase, und damit deren Volumen über den Verlauf einer Schwingungsperiode. Hier benötigen wir noch einen weiteren Zusammenhang: den sogenannten Resonanzradius (Minneart-Radius). Nehmen wir als verwandtes Beispiel ein Gewicht, welches an einer mechanischen Feder an der Decke aufgehängt ist: Wenn wir das Gewicht ein Stück nach unten ziehen und loslassen, wird es auf und ab schwingen, und zwar in seiner natürlichen Resonanzfrequenz. Auch eine Blase unter Wasser hat eine solche Resonanzfrequenz.

Kleine Blasen, genauer Blasen, die im zeitlichen Mittel kleiner als ihr sogenannter Resonanzradius (Minneart Radius) sind, werden in Richtung des Schalldruckbauchs bewegt. Blasen, die im Mittel größer als der Resonanzradius sind, in Richtung des Schalldruckknotens.

Da wir die gerade behandelte Kraft „**Primäre Bjerkneskraft**“ nennen, ist es keine Überraschung, dass auch noch eine „**Sekundäre Bjerkneskraft**“ eine wichtige Rolle spielt. Nicht nur das Schallfeld versetzt Blasen in Bewegung: Benachbarte Blasen beeinflussen sich auch gegenseitig.

Hier kann man in einer ersten Annäherung annehmen, dass sich unterschiedlich große Blasen gegenseitig anziehen werden. Wir gehen hier davon aus, dass eine Blase kleiner und eine größer als der Resonanzradius ist. Etwa gleich große Blasen, also zwei Blasen, die beide kleiner oder beide größer als der Resonanzradius sind, stoßen sich ab.

Der Vollständigkeit halber sei noch folgendes angemerkt: Es kann vorkommen, dass sich die Translationswirkung der Bjerkneskräfte bei sehr hohen Schalldrücken umkehrt. Das hat mit der sogenannten Nichtlinearität des dynamischen Verhaltens zu tun. Darauf gehen wir aber hier nicht mehr weiter ein.



Sekundäre Bjerknes-Kraft: Benachbarte Blasen beeinflussen sich gegenseitig.

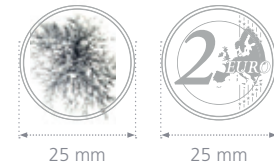
KAPITEL 8

Die Entstehung von Kavitationsstrukturen.

Einblicke in den Mikrobereich.

Kavitationsblasen sind wenige Mikrometer groß und kommen in einer unglaublichen Vielzahl vor. All die genannten Effekte wie Entstehung, Dynamik, Wachstum, Translation und Wechselwirkung der Kavitationsblasen führen nun in der Folge zu sogenannten Kavitationsstrukturen. Es gibt hier eine Menge verschiedener Ausprägungen wie Sternstrukturen, Quallenstrukturen, Raucherstrukturen, Schleierstrukturen und noch einige mehr.

Im rechten Bild ist eine Sternstruktur, etwa von der Größe einer **Zwei-Euro-Münze** dargestellt. Interessant an diesen Kavitationsstrukturen ist, dass uns diese eigentlich nur als „Strukturen“ vorkommen. Für die Umsetzung einer beobachteten Bewegung reichen beim menschlichen Auge weniger als 100 Bilder pro Sekunde aus, um eine Bewegung als flüssig wahrzunehmen. Da der Ultraschallbereich erst bei 20.000 Schwingungen pro Sekunde beginnt, können wir also einzelne Kavitationseignisse überhaupt nicht wahrnehmen. Will man also genauer beobachten, was hier eigentlich passiert, richtet man eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer schnelleren Aufnahmefrequenz als der Ultraschallfrequenz auf solch eine Kavitationsstruktur. Wenn man solch ein Video dann sehr langsam abspielen lässt, erkennt man, dass die einzelnen Verästelungen einer Struktur in Wahrheit einzelne Bläschen sind, die sich eben Zyklus für Zyklus entlang der Astbahnen bewegen.



Kavitationsabbild in Sternstruktur (vergrößerte Darstellung).

Temperatur, Wasserqualität, Gasgehalt und Reinigungschemie.

Einflussfaktoren auf die Kavitation.

Wir wissen bereits, dass die Entstehung der Kavitationsblasen von Fehlstellen in der Wasserstruktur profitiert. Diese Art der Nukleation oder Blasen-Keimbildung nennt man heterogene Nukleation. Damit einhergehend kann man festhalten, dass die mechanische Wirkung in Ultraschallbädern mit mineral-salzhaltigem Wasser aus dem Hahn stärker ist als beispielsweise mit Re-Osmose-gefiltertem, deionisiertem Wasser. Ein weiterer, fast noch wichtigerer Einflussfaktor ist der **Gasgehalt** der Flüssigkeit. Üblicherweise ist in Wasser, insbesondere nach dem frischen Befüllen, relativ viel Gas (Luft) gelöst. Viel Luft bedeutet gleichzeitig, dass die bereits in Kapitel 6 benannten Wachstumseffekte sehr große Blasen erzeugen. Genau hier liegt ein Problem: Große Blasen kollabieren nicht, ergo: **Frisches Wasser reinigt nicht gut**. Genau aus diesem Grund sollte man Bäder immer „entgasen“. Am effizientesten funktioniert dies mit Elma Degas-Modi (s. Seite 21): Diese schalten zyklisch den Schall an, lassen Bläschen anwachsen (s. Seite 23), welche dann durch die primäre Bjerknes-Kraft festgehalten werden. In der darauffolgenden Phase wird der Ultraschall ausgeschaltet, womit die Auftriebskraft die Oberhand gewinnt und die Blasen zur Badoberfläche aufsteigen lässt. Über die Dauer entweicht so immer mehr gelöstes Gas, und zwar bis zu einem gewissen Gleichgewichtszustand. Ist dieser erreicht, haben die Bläschen die richtige Größe: ca. 2 µm bis 10 µm. Wir haben durch Betrachtung des Sinner'schen Kreises bereits gelernt, dass neben der Mechanik auch die ein-

gesetzte Elmaclean Reinigungschemie entscheidend ist. Diese hat neben der eigentlichen Aufgabe, den Schmutz zu lösen auch einen bedeutenden Einfluss auf die Kavitationswirkung. Insbesondere sind hier die Tenside entscheidend. Diese senken die Oberflächenspannung, was die Kavitationsblasendynamik maßgeblich ändert. Die Verringerung der Oberflächenspannung erleichtert die Bildung von Blasenkeimen und macht die Kavitationsblase „weicher“, wodurch Blasen bereits bei geringeren Schalldrücken kollabieren. Tenside helfen uns also nicht nur bei dem Anlösen der Verunreinigung, sondern machen auch den mechanischen Einfluss effizienter. Bleiben wir beim Sinner'schen Kreis und schauen uns die Temperatur des Mediums mal genauer an.

Bei vielen – aber Achtung – nicht bei allen Verschmutzungen sind höhere Temperaturen von Vorteil. Beispielsweise lassen sich Fette besser reinigen, wenn diese flüssig sind, also über Ihre Schmelztemperatur gebracht werden. Es ist sicherlich nicht überraschend, dass auch die Temperatur einen entsprechenden Einfluss auf die Kavitation hat. Grundsätzlich stehen sich hier verschiedene Parameter entgegen. Bei steigender Temperatur, werden Schallgeschwindigkeit und der Dampfdruck höher, während die Viskosität abnimmt. Alles in allem kann man als optimalen Bereich für die Kavitationswirkung in wässrigen Medien den Bereich zwischen 30 °C und 70 °C annehmen. Höhere Temperaturen sind aufgrund des hohen Dampfdrucks zumindest aus Sicht der Kavitation eher nachteilig.

Der Reinigungsprozess: Reinigen, Spülen, Trocknen.

Smarte Automation.

Wir haben unsere Reise mit einem einfachen Reinigungsbeispiel, dem Grillrost, begonnen. Zugegeben, für eine einmalige Reinigung eines Grillrostes ist die Ultraschallreinigung wohl technisch zu aufwändig, zu teuer und daher unverhältnismäßig. Stellen wir uns daher mal eine „professionelle“ Reinigungsaufgabe vor. Diese finden wir beispielsweise im industriellen Herstellungsprozess von chirurgischen Instrumenten.

Solche Instrumente werden oft aus Edelstahl gefertigt und bei der Fertigung geschliffen, geätzt und poliert. Es steht außer Frage, dass die Späne, Kühl-/Schmiermittel und Polierpaste möglichst rückstandsfrei entfernt werden müssen. Darauf folgend werden die Instrumente gespült und passiviert. All diese Schritte für große Stückzahlen händisch durchzuführen, wäre absolut abwegig. Hier beginnt also der Einsatzbereich automatisierter **Ultraschallreinigungsanlagen**. Schauen wir uns den Anlagenprozess genauer an:

Schritt 1: Vorbereiten.

Die gefertigten Instrumente werden in dem Reinigungskorb derart positioniert, dass alle mit einem gewissen Abstand neben- oder hintereinander, manchmal auch übereinander fixiert sind. Bei der Positionierung kann bereits darauf geachtet werden, dass die Instrumente für die spätere Trocknung möglichst ablaufgünstig befestigt werden.

Schritt 2: Beladen.

Der Korb wird nun auf einen Förderer gesetzt, dieser bringt den Korb in eine Position, in der ein Greifer diesen von oben anhebt. Der Greifer bewegt den Korb dann über das erste Reinigungsbecken und setzt diesen im Becken ab, und zwar an der Aufnahme einer sogenannten Oszillationseinheit. Diese bewegt den Korb während der Behandlung automatisch fünfmal pro Minute um etwa 3-5 cm auf und ab.

Schritt 3: Reinigen.

In diesem ersten Becken geht es nun ans Grobe. Als Ultraschallfrequenz wird die Drahtbürste, also 25 kHz im Puls-Modus gewählt. Die Badtemperatur beträgt 60 – 70 °C. Da in der ersten Reinigungsstufe eine starke mechanische Reinigungswirkung wichtiger ist als die Wasserqualität, ist hier gelegentlich Stadtwater oder enthärtetes Water eingefüllt. Als Reiniger kommt 2 Vol.-% des tensidhaltigen, alkalischen **elma lab clean A25** zum Einsatz. Die Behandlungszeit ist auf zehn Minuten je Behandlungsbad eingestellt. Anschließend hebt der Greifer den Korb aus dem ersten Bad heraus und setzt diesen in das Zweite. Währenddessen beginnt eine Pumpen-Filtereinheit damit, die Schmutzpartikel im ersten Bad auszufiltern. Man nennt die einzelnen Stationen mit den Becken in einer Anlage auch Behandlungskammer, oder einfach nur Kammer. Die zweite Kammer verfügt ebenfalls über eine Oszillationseinheit, wie auch alle noch folgenden.



ELMASYSTEM EVO

Anlagen mit System – gebaut
für flexible und erweiterbare
Reinigungsprozesse.



VORBEREITEN
Warenkörbe



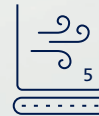
BELADEN
Förderer



REINIGEN
Kammer 1



SPÜLEN
Kammern 2-4



TROCKNEN
Kammer 5



ENTLADEN
Entladeeinheit

Schritt 4 - 6: Spülen.

In Kammer zwei erfolgt der erste Spülvorgang. Dazu ist das Becken mit 50 °C warmem, enthärtetem Wasser (EH-Wasser) befüllt. Als Ultraschallfrequenz kommt hier 45 kHz zum Einsatz. Hier werden jetzt die mitgeschleppten Partikel und Reste des Reinigers entfernt. Auf diese erste Spülung folgen nun noch zwei weitere Becken. Diese sind in einer besonderen Konfiguration angeordnet: Einer sogenannten Kaskadenschaltung. Hierbei hat die Kammer vier, ein höher liegendes Becken als Kammer drei. In Kammer vier wird permanent frisch aufbereitetes deionisiertes Wasser (DI-Wasser) eingeleitet. Dieses stammt aus einem Aufbereitungskreislauf, der das Wasser aus Becken drei entnimmt. Über eine Überlaufschale fließt das Wasser aus Becken vier wieder abwärts in das Becken drei. Mit dieser kleinen Raffinesse wird auf besonders effiziente Weise höchste Reinheit im letzten Spülbecken sichergestellt. Die Wassertemperatur beträgt hier ebenfalls je 50 °C, wobei in Becken drei 37 kHz und in Becken vier 130 kHz, also im übertragenen Sinn der feine Pinsel eingesetzt wird.

Schritt 7: Trocknen.

Auf die Spülbecken folgt nun in Kammer fünf die Trocknung. Hier kommt ein Warmlufttrockner zum Einsatz. Dieser ist bezogen auf die Bauform einer Ultraschallwanne recht ähnlich und trocknet das Reinigungsgut seinem Namen entsprechend mit warmer, strömender Luft.

Schritt 8: Entladen.

Am Ende dieser Reinigungsstraße setzt der Greifer die Körbe auf eine Entladeeinheit, von wo diese weiterverarbeitet oder verpackt werden können. Hier ist noch zu bemerken, dass alle Becken vor dem Einsatz gut eingelaufen, sprich entgast wurden. Dies lässt sich meist geschickt während der Aufheizphase bewerkstelligen.

An diesem Prozessbeispiel, welches für viele „harte Oberflächen“ in dieser Art Anwendung findet, bemerkt man bereits die Wandelbarkeit eines solchen Reinigungsprozesses. Man kann nicht nur die Sinnerkreis-Parameter variieren, es gibt auch Spezialanlagen mit Rotationseinheiten, welche das Reinigungsgut während der Behandlung drehen. Manche Anlagen verfügen über einen „lift-out“. Diese spezielle mechanische Einheit hebt den Reinigungskorb nach dem letzten Spülen (in o.g. Bsp. bei Kammer vier) sehr langsam aus, womit möglichst maximales Abfließen erzielt wird. Es gibt unterschiedlichste Filtertechniken, sowohl was die Filter an sich angeht, als auch was die gezielte Strömung der Flüssigkeit, wie zum Beispiel sogenannte laminare Strömung, betrifft. Spezielle explosionsgeschützte Anlagenkonzepte ermöglichen den Einsatz verschiedener brennbarer Lösemittel, spezielle hermetische Einhausungen mit laminar strömender Luft den Einsatz in Reinraumumgebungen. Für die Trocknung kann außer warmer Luft auch infrarotes Licht oder im Fall von engen Vertiefungen im Reinigungsgut auch Vakuum eingesetzt werden.

Durch geschickten Einsatz all dieser Möglichkeiten ist so gut wie jede Reinigungsaufgabe beherrschbar.



Abläufe im Ultraschallbad.

Ultraschallreinigungswirkung eines
mit Fett und Schmutz bedeckten
Zahnkranzpakets vom Hinterrad
eines Fahrrads.

Ultraschallgeräte können nicht nur reinigen.

Expertenwissen für Ihre Anwendung.

Kavitation eignet sich offensichtlich hervorragend für professionelle Reinigung, aber eben nicht nur! Insbesondere im Laborumfeld gibt es Aufgabenstellungen, die erstaunlich effizient mit Kavitation und Ultraschall anzugehen sind. Ein wichtiger Teilbereich betrifft das **Homogenisieren**.

Darunter versteht man das gleichmäßige Vermischen, beispielsweise eines Pulvers und einer Flüssigkeit. Als allgemeines Beispiel eignet sich hier das Anrühren eines Kakaos. Man kennt es: Man gibt Milch in ein Glas und anschließend ein, zwei Löffel Kakaopulver dazu. Der Kakao geht nur zum Teil unter und es bilden sich Klümpchen. Da muss man schon kräftig rühren, um eine „homogene“-Kakaoflüssigkeit zu erhalten. Viel besser funktioniert das aber mit Ultraschall und Kavitation. Die Druckwellen, Schallstrahlungskräfte und die Jet-Bildung treiben die einzelnen Kakaopartikel auseinander und mischen diese perfekt in die Flüssigkeit. Dabei nennt man das Auseinandertreiben im Fachjargon **Desagglomerieren** und das Untermischen bzw. Verteilen, **Dispergieren**.

Die gleichen Kavitationseffekte helfen auch beim Vermischen von Flüssigkeiten, die sich ohne weiteres Zutun voneinander in zwei oder mehrere Phasen trennen. Man kennt den Effekt von der Salatsoße, das Salatöl schwimmt oben auf dem Essig. Wenn man kräftig rührt oder schüttelt, wird das Öl in feine Tröpfchen geteilt und es bildet sich eine **Emulsion**.

Mit Ultraschall und Kavitation können weitaus feinere Tröpfchen und damit feinere Emulsionen gebildet werden. Ein weiteres breites Anwendungsgebiet ist die sogenannte **Sonochemie**. Die Kavitationseffekte sind in der Lage, chemische Reaktionen zu intensivieren und zu verbessern. Damit werden Herstellprozesse effizienter und umweltschonender.

Degasen von Flüssigkeit mit Ultraschall haben wir bereits als wirksames Instrument der Badvorbereitung kennengelernt. Es gibt aber durchaus Prozesse, in denen gezielt Medium entgast werden muss, ganz unabhängig von Reinigung. Eingesetzt wird dies beispielsweise in der Wasser- und Abwasseraufbereitung, um die Qualität des Wassers zu verbessern, indem gelöste Gase wie Sauerstoff, Kohlendioxid oder Stickstoff entfernt werden.

Akustische Kavitation kann zur Erzeugung von **Nanopartikeln** und **Nanostrukturen** verwendet werden. Durch die Kavitation werden die Flüssigkeit und die darin enthaltenen Materialien intensiv gemischt und aufgebrochen, was zur Bildung von Nanopartikeln führen kann. Diese Nanopartikel finden Anwendung in der Nanotechnologie, Katalyse, Medizin und anderen Bereichen.

Mit Kavitation kann man zerstören und damit die **Entschäumung** in Industrieprozessen wie der Lebensmittel-

und Getränkeherstellung, der chemischen Verarbeitung und der Öl- und Gasindustrie ermöglichen.

In der biologischen Forschung und Medizin kann akustische Kavitation eingesetzt werden, um **Zellaufschluss (Lyse)** durchzuführen. Dabei werden Zellmembranen aufgebrochen, um an den zellulären Inhalt zu gelangen. Dies kann beispielsweise für die Extraktion von Proteinen, DNA oder RNA aus Zellen verwendet werden. Auch die Zerstörung von Viren und Bakterien wird aktuell erforscht.

Ein weiteres Anwendungsgebiet trifft die Auslösung von **Kristallisation**. Kavitationskeimstellen dienen hier als Kristallisationskeimstellen, die dann das Wachstum von Kristallen auslösen.

SCHLUSSWORT

75
YEARS

Leading Cleaning Technology ist seit inzwischen 75 Jahren der Motor unseres Erfolges. Diese 75 Jahre sind durch herausragenden Erfindergeist, unglaubliche Neugierde und dem unermüdlichen Streben nach höchster Qualität und Perfektion geprägt. Das langjährige Sammeln von Erfahrung und Wissen, wozu auch der enge Kontakt in die Grundlagenforschung zählt, versetzt uns in die Lage, mit faszinierenden physikalischen Phänomenen herausragende Produkte und Lösungen zu entwickeln. Am wichtigsten dabei: Es sind Produkte und Lösungen, maßgeschneidert für **Ihre individuelle Reinigungsaufgabe**.

Die wichtigsten Begriffe treffend erklärt.

Ultrasauber sprechen.

Glänzen Sie mit Ihrem neu erlangten Wissen. Nachfolgend finden Sie die wichtigsten Schlüsselbegriffe der Ultraschallreinigung zum schnellen Nachlesen.

Amplitude:

Beschreibt die Höhe des Ausschlags einer schwingenden physikalischen Größe (hier Schalldruck).

Bjerknes-Kräfte:

Benannt nach dem Physiker Vilhelm Friman Koren Bjerknes. Sie werden unterschieden in Primäre und Sekundäre Bjerknes-Kraft und beschreiben Translationskräfte, welche Kavitationsblasen bewegen. Die Primäre Bjerknes-Kraft beschreibt den Einfluss des Schallfelds auf die Bewegung der Blasen und die Sekundäre Bjerknes-Kraft den Einfluss zweier oder mehrerer Blasen aufeinander.

Blasenwachstumseffekte:

Kavitationsblasen wachsen über mehrere Schwingungsperioden an. Verantwortlich sind besonders zwei Effekte: gerichtete Gasdiffusion (Rectified Diffusion) und die Vereinigung zweier oder mehrerer Blasen zu einer größeren Blase (Coalescence).

Degasen:

Austreiben von im Medium gelösten Gasteilchen (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid und Argon). Wichtig zur Badvorbereitung vor dem Ultraschallreinigen und am effektivsten mit dem Degas-Modus.

Frequenz:

Physikalische Größe, die beschreibt, wie oft eine Schwingung in einer Sekunde auftritt. Die Frequenz hat die Einheit Hertz (Hz). Ein Hz entspricht einer Schwingung pro Sekunde.

Kavitation:

Bildung von mit Wasserdampf und Gas gefüllten, Mikrometer großen Bläschen durch starke Druckschwankungen. Diese schwingen oder kollabieren, bewegen sich durch das Medium, wachsen oder verschwinden und bilden Kavitationsstrukturen.

Kavitationsschwelle:

Grenze zwischen Stabiler und Transienter Kavitation. Die Kavitationsschwelle kann durch Steigerung der Ultraschallleistung (implizit des Schalldrucks) überwunden werden. Bei tiefen Ultraschallfrequenzen sind geringere Leistungen zur Überwindung notwendig als bei hohen. Der Einsatz von tensidhaltiger Reinigungsschemie kann die Überschreitung der Schwelle erleichtern.

Kavitationsstrukturen:

Vielzahl an Kavitationsblasen, die sich innerhalb von Mikrosekunden entlang gewisser Trajektorien (Bahnen) bewegen. Die Trägheit des Auges lässt dies dann als Strukturen erscheinen. Die Trajektorien der Blasen können sich aufgrund der verschiedenen physikalischen Einflüsse unterscheiden, woraus sich unterschiedliche Strukturen wie „Sternstrukturen“, „Quallenstrukturen“ und noch viele mehr ergeben.

Nukleation:

Beschreibt die Bildung von Kavitationsblasen. Mehrheitlich entstehen Kavitationsblasen an Schwachstellen in der Molekülstruktur des Mediums. Diese Schwachstellen können Salze, Staub, Mikro- /Nanobläschen oder auch Gastaschen an Oberflächen sein.

Reinigungswirkung:

Die Reinigungswirkung ergibt sich aus den Parametern: Medium, Temperatur, Zeit und Mechanik. Eine grafische Abbildung dieser Parameter ist der sogenannte Sinner'sche Kreis. Die richtige Wahl der Parameter entscheidet über den Reinigungserfolg.

Schalldruck:

Charakteristische physikalische Größe, welche die Stärke von Schallwellen in einem Medium darstellt. Er wird in der Einheit Pascal (Pa) gemessen. Der Schalldruck gibt an, wie stark die Moleküle in einem Medium aufgrund von Schallvibrationen komprimiert und expandiert werden.

Schallfeld:

Dreidimensionale Beschreibung der Schallverteilung (meist der Schalldruckverteilung) in einem Medium.

Schallgeschwindigkeit:

Meistens ist die Schallausbreitungsgeschwindigkeit gemeint. Sie beschreibt, wie schnell sich Schallwellen durch ein Medium bewegen. In der Luft beträgt diese ca. 343 m/s, in Wasser ca. 1480 m/s. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit variiert mit der Temperatur und in Wasser insbesondere auch mit der Existenz und Dichte von Blasen.

Schwingungsperiode:

Dauer, in der eine schwingende physikalische Größe (hier Schalldruck) einmal das Minimum und einmal das Maximum durchlaufen hat. Die Schwingungsperiode ist der arithmetische Kehrwert der Frequenz: Periodendauer = $1 / \text{Frequenz}$.

Sinner'scher Kreis:

Grafische Darstellung der Reinigungsparameter Medium, Temperatur, Zeit und Mechanik, benannt nach dem Tensidchemiker Herbert Sinner (* 1900 in Chemnitz, † 1988 in Hilden).

Stabile Kavitation:

Kavitationsblasen, die bei niedrigeren Schalldrücken mit dem Ultraschall mitschwingen oder bei etwas höheren Schalldrücken nicht linear schwingen aber nicht kollabieren.

Stehwellen:

Man beschreibt vorwiegend ein sogenanntes Stehwellenfeld (siehe Schallfeld). Durch Reflexion der sich ausbreitenden Schallwellen ergibt sich ein Wellenfeld mit örtlich feststehenden Schalldruckzonen, sogenannten Schalldruckknoten (Schalldruck minimal) und Schalldruckbäuchen (Schalldruck maximal).

Tenside:

Chemische Verbindungen, die in Reinigern eingesetzt werden. Sie senken die Oberflächenspannung und verstärken dadurch die Kavitation. Für die Reinigung bringen Tenside den großen Vorteil, dass sie die Grenzflächenspannung zwischen unterschiedlichen Medien senken und so überhaupt erst eine Benetzung und damit eine Abreinigung der Verschmutzung möglich machen.

Schalldruckgradient:

Beschreibt den Verlauf der Änderung des Schalldrucks über einen gewissen räumlichen Bereich des Schallfelds.

Transiente Kavitation:

Wird auch Inertiale Kavitation genannt und beschreibt Kavitationsblasen, die durch starken Ultraschall kollabieren. Die Blasen wachsen in der Unterdruckphase auf über das 3-fache ihrer Ausgangsgröße und fallen in der Überdruckphase schlagartig zusammen. Dabei wird eine Druckwelle und in der Nähe von Oberflächen meist auch ein Flüssigkeitsjet erzeugt.

Ultraschall:

Schallwellen, die mit mehr als 20.000 Schwingungen pro Sekunde (20 kHz) ausgesendet werden. Ultraschall liegt über dem Hörbereich des Menschen und kann deshalb nicht wahrgenommen werden.

Ultraschallgenerator:

Elektronische Schaltung, die starke elektrische Schwingungssignale erzeugt und damit einen Ultraschallwandler in Schwingung versetzt.

Ultraschallwandler:

Ein Ultraschallwandler wandelt elektrische Schwingungssignale in eine mechanische Schwingung und sendet dadurch Ultraschallwellen in ein Medium aus. Das physikalische Prinzip ist verwandt mit dem klassischen Lautsprecher. In Ultraschallwandlern kommen allerdings meistens piezoelektrische Wandler, anstelle elektromagnetischer zum Einsatz.

Wellenausbreitung:

Man unterscheidet Wellenausbreitung anhand der Orientierung der Ausbreitungsrichtung und der Richtung in der die einzelnen Teilchen schwingen. Schallwellen in Wasser oder Luft sind vorwiegend sogenannte Longitudinalwellen, die sich in Richtung der Anregung ausbreiten. Eine Gitarrensaiten schwingt hingegen transversal.

Wellenlänge:

Beschreibt die Länge (räumlich) einer Wellenperiode. Die Wellenlänge ist abhängig von der Schallausbreitungsgeschwindigkeit: $\text{Wellenlänge} = \text{Schallausbreitungsgeschwindigkeit} / \text{Frequenz}$. Je höher die Frequenz, desto kürzer die Wellenlänge.

IHRE NOTIZEN

IHRE NOTIZEN



Elma Schmidbauer GmbH
Gottlieb-Daimler-Straße 17
78224 Singen (Germany)

www.elma-ultrasonic.com



Über den Autor

David Holly

Principal Engineer (Ultrasonic / Cavitation)

Bereits seit einigen Jahren ist er Teil der Elma-Crew und durchweg fasziniert von Ultraschall und Kavitation. In seiner täglichen Arbeit entwickelt er Strategien, um neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in bahnbrechende Technologien zu transformieren.

Damit dies gelingen kann, ist die Vermittlung von Wissen über diese komplexen Systeme an ein breites Publikum unglaublich wichtig. Daher tritt er auch als Speaker und Autor in der Fachwelt der Reinigung auf.

Seit 1948.

Leidenschaft für höchste Reinheit.

