

2.4 Das Wirkprinzip Ultraschall

Ein Ton ist gekennzeichnet durch seine Frequenz, seine räumliche Länge und seine Amplitude.

Die Frequenz beschreibt die Häufigkeit eines periodischen Vorganges, physikalisch gesehen die einer vollen Schwingung, pro Zeiteinheit. Sie drückt sich in der Einheit Hertz (Hz) (Schwingungen pro Sekunde) aus (GÄBEL und WIESNER 1999). Die Amplitude kennzeichnet den maximalen Ausschlag bei wellenförmigen Erscheinungen (GÄBEL 1999). Die Intensität oder auch Schallstärke wird in Watt pro m² ausgedrückt. Sie ist das Maß für den Energiefluss, d.h. die je Zeiteinheit durch eine Fläche eingestrahlte Energie (WIESNER 1999). Unter Energie versteht man in diesem Fall die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten, was in Joule (1 Joule = 1 Wattsekunde) ausgedrückt wird (GÄBEL 1999).

Ein Hörreiz entsteht dann, wenn eine Reizquelle mechanische Schwingungen aussendet, welche dann durch die Luft (oder andere Medien) als Schall in Form elastischer Longitudinalschwingungen weitergetragen wird.

Der Frequenzbereich, der vom menschlichen Ohr wahrgenommen wird, liegt zwischen 16 Hz (untere Hörgrenze) und in Abhängigkeit vom Lebensalter zwischen 16 000 und 20 000 Hz (obere Hörgrenze).

Schwingungen mit Frequenzen oberhalb 18 kHz (18 000 Schwingungen pro Sekunde) werden als Ultraschall bezeichnet. Ultraschall besteht somit aus Schallwellen von Frequenzen, die für den Menschen nicht mehr unbedingt hörbar sind.

Obwohl die in der Praxis eingesetzte Ultraschallfrequenz von 23 kHz außerhalb des menschlichen Gehörs liegt, können bei dieser Frequenz noch als störend empfundene Geräusche wahrgenommen werden. Diese entstehen durch Schwingungen, welche vom Ultraschallgerät ausgesandt werden (N.N. o. J. I).

Der menschliche Wahrnehmungsbereich für die Schallstärke liegt für die untere Hörschwelle in einem Frequenzbereich von 1 kHz bei 10-12 Watt/m² (entspricht 0 Dezibel). Ab ca. 10-3 Watt/m² (entspricht 90 dB) wird Schall gehörschädigend und schmerzhaft im Bereich der oberen Gehörgrenze von 10-1 Watt/m² (entspricht 120 dB).

Das im Vergleich zum Menschen weitaus bessere Gehör der Tiere erlaubt ihnen, Ultraschall deutlich wahrzunehmen. Im Schlachtbetrieb können Ultraschallgeräusche nahe des Zutriebs

Schreckreaktionen auslösen Es ist daher ratsam, Geräte in dieser Umgebung gut zu isolieren (SCHÜTT-ABRAHAM et al. 1992).

2.4.1 Das Prinzip der Kavitation

Schon 1967 sprachen PULEO et al. von Ultraschall als einer genauen und effektiven Technik, um mikrobielle Kontaminationen von Oberflächen zu lösen.

Ab einem Druck von 10 Watt/cm² kann das Prinzip der Kavitation auftreten.

Die Ultraschall- Reinigung beruht auf dem Prinzip der Kavitation. Ultraschallwellen werden über die übertragende Flüssigkeit an das Reinigungsgut herangetragen (SCHÜTT-ABRAHAM et al. 1992).

Durch Piezo-Zirkonat-Citanat (PZT)- Ultraschall-Schwinger wird hochfrequente elektrische Energie in mechanische Schwingungen (Ultraschall) umgewandelt. In Flüssigkeiten werden so kleinste Vakuumbüschchen erzeugt (Zugphase), die sofort wieder implodieren (Druckphase) (N.N. o. J. I).

Niedrige Frequenzen um 20 kHz erzeugen Büschchen größerer Durchmesser mit kräftigen Druckstößen gegenüber höheren Frequenzen um 35 kHz, die bevorzugt zur intensiven und schonenden Reinigung von Oberflächen eingesetzt werden (N.N. o. J. I).

Durch die raschen Folgen von Druckerhöhung und Druckabfall werden gelöste Gase extrahiert (Kavitationsphänomen) und die Zellwände von Mikroorganismen mechanisch überstrapaziert. Dies führt zur Ruptur der Zellwände und zur Zerstörung der Zellen, sprich zur Plasmolyse (SCHÜTT-ABRAHAM et al. 1992; BÖHM 2002). Im Gegensatz zur Wärmebehandlung überwiegt hier die Zerreißung von Zellhüllen und –membranen (SAJAS und GORBATOW 1978).

Der Kavitationseffekt ist abhängig von der Energie (Amplitude) und (weniger) der Frequenz der Schallwellen sowie von der Beschallungsdauer. Die Intensität von Ultraschallwellen verhält sich direkt proportional zu ihrer Amplitude (BERLINER 1984). Je höher diese ist, umso größer sind die Kavitationsbüschchen und die Zone, in der eine Flüssigkeit Kavitationsreaktionen zeigt.

Literatur

Das Phänomen der Kavitation und seines Effektes auf Mikroorganismen- Zellen wurde bereits in den 60er Jahren bearbeitet. Erst in neuerer Zeit erkannte man jedoch das Potenzial von Ultraschall, Bakterienzellen zu zerstören und Enzyme zu inaktivieren (RASO et al. 1998; SCHÜTT-ABRAHAM et al. 1992; BÖHM 2002).

Es gibt eine vorübergehende (transiente) und eine beständige Kavitation. Die transiente Kavitation verursacht an eng lokalisierten Punkten hohen Druck und hohe Temperaturen, während die beständige Kavitation Kräfte freisetzt, welche gegen die Oberfläche der Zellen reiben und den Zelluntergang verursachen (Mikroströmung) (LEADLEY und WILLIAMS 2001).

Die Konglomerate aus Mikroorganismen und Sekreten auf kontaminierten Instrumenten werden durch starke Strömungen und durch Kavitation in der Ultraschallflüssigkeit aufgebrochen und in einzelne Bestandteile zerlegt.

Durch das Prinzip des „elektronischen Bürstens“ reinigt Ultraschall in wenigen Minuten und ist wirksamer als jede manuelle Säuberung. Gleichzeitig ist er schonend, da mechanische Schädigungen vermieden werden.

Auch durch den Ultraschall entstehende lokalisierte hohe Temperaturen sind an diesem Prozess beteiligt, da bei der Implosion eines Kavitationsbläschens Hitze entsteht. Da diese aber auf einen kleinen Raum beschränkt ist und sie außerdem durch das flüssige Medium, welches diese Stelle umgibt, sofort weitergeleitet wird, ist dieser Effekt zu vernachlässigen (RASO et al. 1998).

Ein weiterer Erklärungsansatz liegt in der Vermutung, dass sich freie Radikale bilden. Die auf kleinste Bereiche beschränkten, jedoch sehr hohen Temperaturen und Drücke bewirken eine Dissoziation der umgebenden Wassermoleküle in H^+ - Ionen, OH^- Ionen und Hydrogen-Peroxyd, welche wahrscheinlich auch für eine oxidative Schädigung von Sporen verantwortlich sind (RASO et al. 1998).

Beim gleichzeitigen Einsatz von chemischen Zusätzen zur Reinigungsflüssigkeit reduziert sich die Reinigungszeit um bis zu 90 %. Je nach Verschmutzung beträgt sie wenige Sekunden bis einige Minuten (N.N. o.J. II).

Sind Desinfektionswirkstoffe in der Reinigungsflüssigkeit enthalten, so werden sie durch die Ultraschallmikroströmungen ständig an die zu inaktivierenden Keime herangeführt.

Kavitationsbläschen entstehen auch an schlecht zu erreichenden Stellen und entfalten dort ihre Reinigungskraft (Beispiel: Kettenhandschuh) (VAN KLINK und SMULDERS 1988).

Bei Viren wirkt der Kavitationseffekt nur unzureichend, da Viren aufgrund ihrer nichtzellulären Struktur nicht in nennenswertem Umfang inaktiviert werden. Deutlichen Erfolg hat das Kavitationsphänomen jedoch bei Bakterien-, Hefe- und Pilzzellen, wobei Empfindlichkeitsunterschiede bestehen. Kokken und Sporen sind mehr oder weniger unempfindlich, ebenso Mykobakterien. Die vegetativen Formen anderer stäbchenförmiger Bakterien sowie der Hefen und Pilze werden dagegen relativ rasch und leicht zerstört (BÖHM 2002).

Einen bedeutenden Einfluss auf die Wirksamkeit der Ultraschallbehandlung hat auch die Temperatur der beschallten Lösung. Mit der Temperatur korrelieren verschiedene Eigenschaften der Flüssigkeit, wie Dampfdruck, Viskosität und Oberflächenspannung. Ändern sich diese Eigenschaften, ändert sich auch der Kavitationseffekt. Dampfdruck und Temperatur sind positiv miteinander korreliert (RASO et al. 1998).

Da Verschmutzungen in erwärmten Flüssigkeiten schneller entfernt werden, verkürzen erwärmte Reinigungsflüssigkeiten die Reinigungszeit (N.N. o. J. I).

Die Hersteller von Ultraschallgeräten weisen darauf hin (N.N. o. J. I), dass die während des Betriebes entstehenden Kavitationsgeräusche das Gehör schädigen können. Bei andauernder Tätigkeit im Umkreis von 2 m um ein Ultraschallgerät wird daher zum Tragen eines Gehörschutzes geraten, um eventuellen Gesundheitsschädigungen vorzubeugen.

2.4.2 Aufbau eines Ultraschallgerätes

Elemente des Ultraschallgerätes sind (N.N. o. J. I):

- a) Der HF (Hochfrequenz)- Generator arbeitet amplitudenkonstant, ist kurzschluss- und leerlauffest.
- b) Der Ultraschallwandler besteht aus einem leistungsstarken 4-PZT- Hochleistungsschwingsystem und ist für den Dauerbetrieb geeignet.

- c) Die Sonotroden bilden die schallabstrahlende Fläche.
- d) Das Stufenhorn überträgt die Leistung des Ultraschallwandlers auf die Sonotrode und verstärkt die Amplitude.

Zur Erzeugung des Ultraschalls in der Flüssigkeit wandelt der elektrische Hochfrequenz-Generator die Netzfrequenz in die jeweilige Frequenz des Gerätes um und gibt sie an die elektromechanischen Schwingelemente zur Erzeugung mechanischer Schwingungen ab (N.N. o. J. I).

2.4.3 Weitere Einsatzmöglichkeiten von Ultraschallgeräten

Die Einsatzbreite der Ultraschallreinigung reicht von Instrumenten aus der mikroinvasiven Chirurgie bis hin zur Aufbereitung von Reinigungsgütern in der Großindustrie (N.N. o. J. II).

Das Anwendungsgebiet der Ultraschallbehandlung beschränkt sich derzeit weniger auf Desinfektionszwecke als auf die Gewinnung von Zellbestandteilen, so etwa die Extraktion von Zellinhaltsstoffen, Enzymen und Endotoxinen (BÖHM 2002).

Bei der Extraktion durch Ultraschall werden durch die Zerstörung von Zellgrenzen Extraktionsprozesse beschleunigt. Die Inaktivierung von Mikroorganismen durch Ultraschall ist eine neu diskutierte Variante für die Praxis.

Eine Form des Ultraschall, der sogenannte Power Ultraschall wird derzeit gewerblich genutzt zum Mischen und zur Emulgierung: Fettmoleküle werden bis zu 80 % ihrer Größe reduziert, die resultierenden Emulsionen sind deutlich stabiler als solche, die mit herkömmlichen Methoden produziert wurden. Des weiteren kann Power Ultraschall zum Entgasen, zum Entschäumen, zum Reinigen, zum Schneiden, zum Zartmachen und zum Härten benutzt werden. In der Fleischindustrie kann eine Behandlung mit Power Ultraschall das Wasserbindungsvermögen, die Farbe und die Ausbeute an Fleisch nach Beschallung verbessern.

Aufgabengebiete für High Power Ultraschall, der eine weitere Marktform des Ultraschalls darstellt, sind die Kristallisation von Fetten und Zuckern: Kavitationsblasen können als Kerne für die Kristallisation fungieren.

2.4.4 Studien zum Wirkprinzip des Ultraschall

Wenn Hitze mit Ultraschall kombiniert wird, können Mikroorganismen bei geringeren Temperaturen abgetötet werden als ohne Ultraschall benötigt würde (LEADLEY und WILLIAMS 2001). Die Kombination vermeidet gleichzeitig Hitzeschäden am Produkt.

In einer Studie über die Auswirkung von Ultraschall auf Mikroorganismen konnten SAJAS und GORBATOW (1978) einerseits eine vollständige Zerstörung der Mikroorganismen und andererseits eine Zunahme der Zahl an lebensfähigen Mikroorganismen beobachten. Letzteres wurde häufiger bei einer nur kurzweiligen Beschallung festgestellt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die mechanische Einwirkung eine Aufteilung der Zellagglomerate bewirkt, was eine Zunahme an Kolonie bildenden Einheiten zur Folge hat.

Der Effekt von Ultraschall ist somit abhängig von der Dauer der Ultraschalleinwirkung, ihrer Frequenz und Intensität einerseits und der Bakterienart, der Dicke der Zellhülle – welche mit dem Alter der Zelle zunimmt –, der Konzentration von Mikroorganismen in der Lösung und der Umgebungstemperatur andererseits (SAJAS und GORBATOW 1978).

Nach JENG et al. (1990) war die Ultraschallwirkung auf starren und glatten Materialien stärker als auf flexiblen und rauen Materialien. Die Autoren führen dies darauf zurück, dass flexible Materialien die Schallenergie schlucken und die Schallenergie auch durch Oberflächenrauheit negativ beeinflusst wird.

SCHÜTT-ABRAHAM et al. (1992) behandelten Fleischermesser durch Ultraschall mit Trinkwasser und ohne Zusatz von Detergentien. Der Einsatz von Ultraschall führte bei einer Temperatur von 82 °C zu einer erheblichen Reduzierung der hitzebedingten Eiweißfällung auf den Messerklingen. Bei einer Beschallung um 60 °C konnte ein weitgehendes Freisein der Klingen von Ablagerungen beobachtet werden. Da aber auch unbeschallte Messer bei dieser Temperatur nur wenige Ablagerungen zeigen, war der Erfolg nicht so offensichtlich wie bei der höheren Wassertemperatur. Jedoch zeigte sich, dass sich die Ablagerung bei weiterer Absenkung der Wassertemperatur unter Ultraschallbehandlung weiter reduzieren ließ: Die Reinigungswirkung des Ultraschalls war nach 15 sek weitgehend abgeschlossen.

Durch die häufige Benutzung des Ultraschallbeckens war nach einer gewissen Zeit ein Fleischanteil (die für den Versuch verwendeten Messer waren mit einer „Fleischemulsion“ kontaminiert) von 0,5 % im Wasser vorhanden. Dies führte jedoch laut SCHÜTT-

Literatur

ABRAHAM et al. (1992) bei einer Wassertemperatur von 82 °C nicht zu einer Verminderung der Reinigungswirkung.

MOTT et al. (1998) untersuchten die Wirkung von Ultraschall auf Biofilme: Kurze Ultraschallstöße mit Frequenzen von 150 und 20 kHz waren in der Lage, einen Biofilm entlang einer 50 cm langen Glasröhre zu entfernen.

RASO et al. (1998) untersuchten die Wirkung von Ultraschallwellen in Kombination mit Hitze und Druck auf *Bacillus subtilis*- Sporen. Ein Druck von 500 kPa bei 70 °C und einer Amplitude der Schallwellen von 117 µm über 12 min war ausreichend, um 99 % einer Sporenpopulation zu inaktivieren. Bei einem Druck von 300 kPa und einer Amplitude von 90 µm wurden in ebenfalls 12 min nur 75 % der Population zerstört, während bei sonst gleichen Bedingungen, jedoch einer Amplitude von 150 µm durchschnittlich 99,9 % der Population zerstört wurden.

OULAHAL-LAGSIR et al. (2000) untersuchten den Effekt von Ultraschall bei einer Frequenz von 40 kHz und 10 sek Einwirkdauer auf eine Lösung von Adenosintriphosphat und prokaryotischen Zellen (Kokken und Stäbchen – *S. aureus* und *E. coli*).

Es ergaben sich keine statistisch relevanten Unterschiede zwischen einer Beschallungsdauer von 5 sek zu einer Beschallungsdauer von 60 sek. Jedoch waren mehrere kurze Impulse effektiver als eine längere konstante Beschallung. Des weiteren konnte gemessen werden, dass sich das Ultraschallbad während einer längeren Arbeitsdauer weniger als 1-2 °C aufheizt.

In einer anderen Studie der Autoren wurde die Effektivität von Ultraschall auf die Beseitigung von Biofilmen geprüft. Es ergab sich, dass die Ultraschallmethode reproduzierbar und 4 Mal effektiver war als die verglichene Wischtechnik (83 %ige Beseitigung des unerwünschten Films gegen 20 %ige Beseitigung) (OULAHAL-LAGSIR et al. 2000).

WIRTANEN (1995) konnte mit Ultraschall zehnmal mehr Material von einer definierten Oberfläche lösen als mit der Wischtechnik.