

LAUSIGE WELLEN

Wie Sie Fehler im **Ultraschallschweißprozess** aufspüren.

Ein Ratgeber für Praktiker...



**FEINTECHNIK
RITTMAYER**



**FEINTECHNIK
RITTMAYER**



© FEINTECHNIK
R.Rittmeyer GmbH
Höltenweg 103
48 155 Münster
Germany

Telefon 0251 . 96 115 – 0
Telefax 0251 . 62 45 25
E-mail: rittmeyer.beri@t-online.de
Web: www.rittmeyer-beri.de
www.sonotrodenbau.de



Wenig ist peinlicher als ein unnötiger Serviceeinsatz – und noch weniger ist teurer....

Machen Sie sich selbst zum Spezialisten im Ultraschall, mit dem vorliegenden kleinen Praxisratgeber. Sie finden darin viele nützliche Informationen, mit deren Hilfe Sie selbst entscheiden können, was zu tun ist. Wir zeigen Ihnen, wie man die Qualität von Sonotroden und die vom Schweißprozess sofort erkennen und entsprechend handeln kann.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg.

Ihre

FEINTECHNIK

R.Rittmeyer GmbH – „der Sonotrodenspezialist“



Inhalt

1 Einführung

- 1.1 Vorbemerkungen
- 1.2 Definition Ultraschallschweißen
- 1.3 Funktionsprinzip
- 1.4 Einsatzbereich
- 1.5 Vorteile

2 Maschine und Prozess

- 2.1 Aufbau einer Ultraschall – Schweißmaschine
 - 2.1.1 Weitere Ultraschallschweißgeräte bzw. –maschinen und Anwendungen
- 2.2 Der Generator
- 2.3 Das Halte- und Vorschubelement
- 2.4 Die Schweißeinheit
 - 2.4.1 Der Konverter (Ultraschallwandler)
 - 2.4.2 Der Booster (Verstärkungs- oder Transformationsstück)
 - 2.4.3 Die Sonotrode
 - 2.4.3.1 Anforderungen an die Sonotrode
 - 2.4.3.2 Beispiele verschiedener Bauformen von Sonotroden
 - 2.4.3.3 Sonderformen: die „Booster-Konverter-Sonotrode“

3 Der Schweißprozess

- 3.1 Die wichtigsten Prozesse beim Ultraschallschweißen
- 3.2 4 Phasen der Kunststoffschmelze
- 3.3 Schweißarten

4 Das Werkstück

- 4.1 Material- und Materialeigenschaften
- 4.2 Fügezonengestaltung
- 4.3 Fernfeld, Nahfeld
- 4.4 Der Energierichtungsgeber (ERG)



Diese Abschnitte werden überarbeitet
und der nächsten Ausgabe zugefügt

5 Die häufigsten Fehler

- 5.1 Fehlerquelle Sonotrode
 - 5.1.1 Frequenz
 - 5.1.1.1 Generator geht sofort in Überlast; mögliche Gründe:
 - 5.1.1.1.1 Bauteile nicht korrekt angekoppelt
 - 5.1.1.1.2 Gewinde in der Sonotrode defekt
 - 5.1.1.1.3 Frequenz ist nicht in Ordnung
 - 5.1.1.1.3.1 Sonotrode falsch nachgearbeitet



- 5.1.1.1.3.2 Konstruktion ungünstig
- 5.1.1.2 Generator steigt erst nach einer gewissen Laufzeit aus
- 5.1.1.3 Sonotrode reißt nach kurzer Zeit
- 5.1.1.4 Sonotrode „kreischt“
- 5.1.1.4.1 Beginnender Riss
- 5.1.1.4.2 Keine feste Verbindung der Bauteile
- 5.1.1.4.3 Übersetzung zu hoch
- 5.1.1.4.4 Aufnahme ungünstig

- 5.1.2 Resonanzfrequenz
- 5.1.3 Schwingungsform
- 5.1.4 Leerlaufleistung
- 5.1.5 Amplitude
- 5.1.6 Amplitudenverteilung
- 5.1.7 Geometrie der Arbeitsfläche
- 5.1.8 Präzision
- 5.1.9 Übersetzung
- 5.1.10 Werkstoff
- 5.1.12 Die „Nulllinie“
- 5.1.13 Stressverteilung
- 5.1.14 Temperatur
- 5.1.15 Lebensdauer

- 5.2 Fehlerquelle Booster

- 5.3 Fehlerquelle Generator

- 5.4 Fehlerquelle Konverter

- 5.5 Fehlerquelle Teileaufnahme / Amboss
- 5.5.1 Falsche Geometrie bzw. nicht ausreichende Präzision
- 5.5.2 Schlecht ausgerichtete Aufnahme
- 5.5.3 Zu geringe Masse
- 5.6 Fehlerquelle Ankoppelung



1 Einführung

1.1 Vorbemerkungen

Thermoplastische Kunststoffteile, Folien und Gewebe werden bereits seit Jahrzehnten mittels Ultraschall bearbeitet. Zu den „klassischen“ Ultraschall – Bearbeitungsaufgaben gehören das Verbinden mittels Schweißen, das Nieten, Bördeln, Einbetten, Schneiden, Trennen und Stanzen.

Doch sind in den letzten Jahren auch immer wieder neue Anwendungsmöglichkeiten hinzugekommen, wie beispielsweise das Bohren in spröde Werkstoffe (z.B. Glas) oder im kosmetisch – medizinischen Bereich Mikromassagen zur Behandlung von Hauterkrankungen oder zur Stimulierung der Durchblutung.

Allen Verfahren gemein ist der Einsatz von Schweißwerkzeugen, den sogenannten „Sonotroden“. Sonotroden sind i.d.R. metallische Körper, die in eine hochfrequente Resonanzschwingung versetzt werden. Der Kontakt dieser Werkzeuge mit dem Werkstück (i. d. R. einem Thermoplast) führt schließlich zu der beabsichtigten Bearbeitung.

Da der gesamte Vorgang der Ultraschallbearbeitung sehr komplex ist und viele Aspekte beachtet werden müssen, können an jeder Stelle des Prozesses Fehler auftreten. Dieser Ratgeber soll helfen, derartige Fehler in der betrieblichen Praxis aufzuspüren, wobei der Schwerpunkt in der Bewertung der Qualitätseigenschaften der Sonotrode und deren Auswirkungen auf den Schweißprozess liegt.

Der Ratgeber ist aus den Erfahrungen unserer Sonotrodenentwicklung und –optimierung und unserer praktischen Beratungstätigkeit entstanden und für den Praktiker geschrieben. Ganz bewusst wurde auf die tiefer gehende Erörterung mathematisch – physikalischer Zusammenhänge verzichtet¹.

Zudem konzentrieren wir uns auf die häufigsten Ultraschallanwendungen, wie beispielsweise das Fügen mittels Ultraschall, also das klassische Ultraschallschweißen.



Dieser Ratgeber ist nicht für den Sonotrodenbau vorgesehen und dafür auch nicht geeignet. Er dient lediglich zum schnellen Aufspüren von Fehlern im Schweißprozess.

¹ Für weitergehende Literatur sei verwiesen auf die Bücher:

- Potente, H.: Fügen von Kunststoffen. Verlag Hanser (2004)
- Thews, H.: Zeitgemäße Kunststoff-Verbindungs-Technik. Uta Groebel – infotip, Limeshain 1986



Im Text wird einige male auf das Amplituden- und Frequenzmessgerät AFM 9.3 aus unserem Hause verwiesen. Natürlich nutzen wir gerne die Gelegenheit der Eigenwerbung. Andererseits gibt es unseres Wissens nach weltweit kein vergleichbares Gerät, das im Prozess vor Ort an der Ultraschallanlage eingesetzt werden kann und mit dem schnell, einfach und kostengünstig Qualitätsaussagen zum Ultraschall – Schweißprozess und speziell zur Qualität der eingesetzten Sonotrode möglich sind.

Das Gerät ist aus den eigenen Anforderungen unserer Sonotrodenfertigung entstanden. Wir brauchten die Möglichkeit eines „Quicktests“ und wollten nicht ständig das Oszilloskop herumtragen müssen. Da wir das AFM auch im Einsatz bei unseren Kunden benutzt hatten, wurden wir immer wieder gefragt, ob es das auch zu kaufen gibt. Deshalb haben wir schließlich das Gerät zur Serienreife weiterentwickelt.

Zentrales Thema des vorliegenden Ratgebers ist die „Sonotrodenqualität“. Leider gibt es in Deutschland bis heute keine Qualitätsvereinbarungen, geschweige denn Standards dazu. Da wir es jedoch für wichtig halten, Qualitätsansprüche zu formulieren, haben wir für unseren eigenen Sonotrodenbau Grenzwerte eingeführt, an denen wir uns orientieren. Werden diese Grenzwerte überschritten – was manchmal unvermeidlich ist² – bekommen unsere Kunden eine entsprechende Information.

In den Teilen 1 – 4 beschreiben wir die grundlegenden Arbeitsprinzipien und Arbeitsmittel des Ultraschall (US) – Schweißens.

Im Teil 5 beschreiben wir die gängigsten Fehler und wie Sie diese aufspüren und beseitigen können.

In eigener Sache:

Der Ratgeber soll in der Folge immer wieder überarbeitet und erweitert werden. Dazu sind uns natürlich Ihre Ratschläge sehr willkommen. Schreiben Sie uns, wenn Sie weitere Themen behandelt wissen wollen, oder geben Sie uns Tipps, welche Fehler es noch gibt neben denen, wie wir bislang aufgeführt haben.

© FEINTECHNIK
R.Rittmeyer GmbH
Walter Rittmeyer

Münster, September 2008

² Tatsächlich ist es nicht immer möglich, Sonotroden in der besten Geometrie zu bauen, weil die Geometrie des Schweißteils das nicht zulässt, oder weil z.B. der Zugang zum Schweißteil erschwert ist (z.B. in Sonderanlagen), oder auch aus anderen Gründen.



1.2 Definition Ultraschallschweißen

„Ultraschallschweißen“ von Kunststoffen meint: *das stoffschlüssige Fügen thermoplastischer Kunststoffe mittels Aufschmelzen des Werkstoffs durch das Einleiten einer hochfrequenten mechanischen Schwingung.*

Auch Metalle können durch Ultraschall miteinander verbunden werden, allerdings gibt es bislang deutlich engere Grenzen in der Anwendungsvielfalt. Am verbreitetsten beim Metallschweißen ist bislang das Verdichten von Kabellitzen miteinander oder mit kleinen Kontaktblechen.

Zudem fallen heute auch Anwendungen unter den Begriff „Ultraschallschweißen“, die nicht mehr eigentliche Schweißarbeiten sind, wie z.B. das Schneiden von Gefriergut mittels schwingender Sonotroden, das Trennen von Gummi etc.

1.3 Funktionsprinzip

Ein **Ultraschall - Generator** erzeugt die notwendige Spannung von mehreren hundert Volt und eine Frequenz von bis zu 70.000 Hz – und er kann eine Leistung bis zu mehreren Kilowatt bereitstellen.

Die hochfrequente Spannung wird einem **Konverter** zugeführt, in dem sich piezokeramische Bauteile oder auch Wandler befinden. Die Piezos wandeln die angelegte elektrische Spannung um in eine mechanische Auslenkung mit einer bestimmten Amplitude (Schwingweite) genau in der Frequenz, die vom Generator bereitgestellt wurde. Diese Auslenkung wird vom Konverter weitergeleitet in den Booster.

Der **Booster** verändert durch seine Bauform die Amplitude und leitet diese (in der Regel verstärkte) Amplitude weiter in die **Sonotrode**. Oft dient der Booster zusätzlich als Lagerung für die Schweißeinheit.

Auch eine Sonotrode wird in der Regel so konstruiert, dass sie die bereitgestellte Amplitude verstärkt, da die meisten Kunststoffe nur mit einer relativ großen Amplitude (> ca. 20 µm) bearbeitet werden können.

Konverter, Booster und Sonotrode bilden die sog. **Schweißeinheit** (auch „Schwingeinheit“).

Die Schweißeinheit wird mittels einer **Träger- und Vorschubmechanik** dem zu bearbeitenden Kunststoff zugeführt.



1.4 Einsatzbereich

Überall dort, wo kleinere bis mittelgroße thermoplastische Kunststoffteile miteinander verbunden werden müssen, kommt das Ultraschallschweißen in Frage. Es gehört zu den am weitesten verbreiteten Fügeverfahren überhaupt bei thermoplastischen Kunststoffen.

1.5 Vorteile

Das US-Schweißverfahren bietet eine Reihe von Vorteilen, die wichtigsten sind:

kurze Taktzeiten	die reinen Schweißzeiten (ohne Zuführung) liegen oft im Bereich von Zehntelsekunden
geringe Kosten	im Vergleich zu anderen Verfahren der Verbindungstechnik wie Vibrationsschweißen, Heizelementschweißen etc.
große Bearbeitungsvielfalt	Schweißen, Nieten, Bördeln, Einbetten, Schneiden, Trennen, Umformen, Stanzen – all das ist möglich mit Ultraschall
umweltfreundlich	es wird kein weiteres Medium mehr benötigt wird (wie z.B. beim Kleben)
hohe Festigkeit in der Fügezone	die Fügezonen selbst sind häufig fester als das umgebende Material
Homogenität in der Fügezone	bei einer guten Schweißung entsteht eine sehr homogene Materialzone
gut zu automatisieren	Die Schweißeinheit ist leicht zu handeln und kann gut in Sondermaschinen oder in der Robotertechnik eingesetzt werden
Gestaltungsvielfalt der Fügezonen	Je nach verwendetem Kunststoff kann die Fügezone sehr unterschiedlich gewählt werden
geringer Energieverbrauch	im Vergleich zu anderen Fügetechniken wie thermische Verfahren, Vibrations- oder Laserschweißen
Nicht lösbarer Materialverbund	US - Schweißverbindungen können nicht ohne Zerstörung wieder gelöst werden – ein oft gewünschter Schutz innerer Bauteil...



2 Maschine und Prozess

2.1 Aufbau einer Ultraschall – Schweißmaschine

Allgemein bestehen Ultraschall-Schweißpressen aus: der **Steuerung**, einem **Generator**, der **Aufnahme für die Schweißeinheit**, verfahrbar an der **Pressensäule**, der **Schweißeinheit** (bestehend aus Konverter, Booster und Sonotrode), einem **Amboss** bzw. einer Teileaufnahme und der **Grundplatte** der Presse.

Abb. 1 zeigt eine Standard - Schweißpresse, wie sie sehr häufig für einen Einzel – Arbeitsplatz mit manueller Bedienung eingesetzt wird.



Abb. 1 Standard – Ultraschall – Schweißpresse, 40 kHz
(Werksfoto MTH)



2.1.1 Weitere Ultraschallschweißgeräte bzw. -maschinen und Anwendungen

Ultraschallschweißanwendungen haben sich im Laufe der letzten Jahrzehnte immer neue Märkte erobern können und in viele neue Branchen Einzug gehalten. Entsprechend hat sich die Maschinentechologie weiterentwickelt und sich den jeweiligen Anwendungen angepasst. Weitere Beispiele sind:

- Das Nieten oder Punktschweißen mit Handschweißgeräten



Abb. 2 Handschweißgerät
(MTH)

- Das Verschweißen von Folien bzw. Geweben mittels rotierender Sonotroden. Über die in Ultraschallfrequenz pulsierende radiale Oberfläche werden Gewebe verschweißt und ggf. geschnitten.

Schweißfläche der Sonotroden:

- unterschiedliche Breiten der Schweißfläche
- unterschiedliche Oberflächenbeschichtung

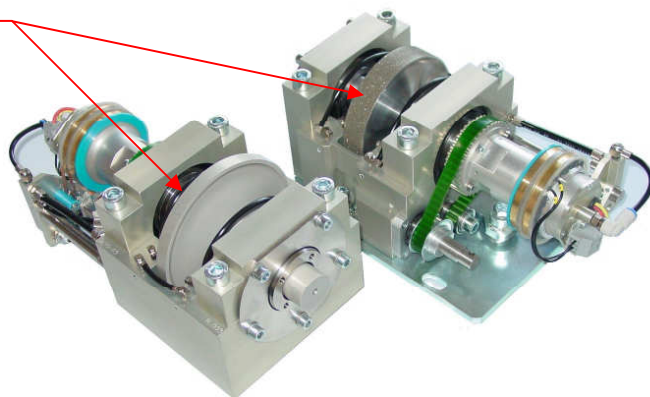


Abb. 3 Rotorköpfe mit Rollsonotroden
(Werksfoto TEC-B)



Sonotrode seitlich im Rotorkopf

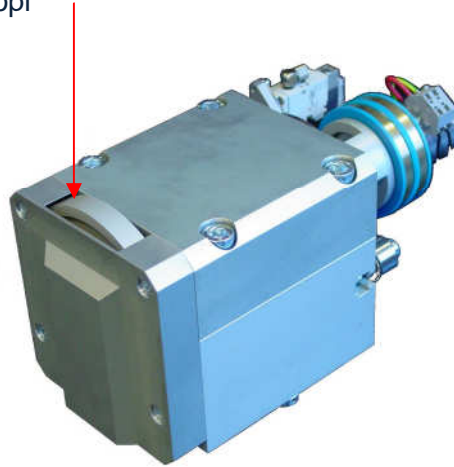


Abb. 4 Rotorkopf mit seitlicher Sonotrode
(TEC-B)

Rotorköpfe werden für das Verschweißen und das Schneiden von thermoplastischen Folien und Geweben eingesetzt. Die Ultraschallwellen sind im Gegensatz zu den sonstigen Sonotroden „quer“ wirksam.

Die besondere Herausforderung an die Konstruktion von Rollsonotrode besteht darin, über den gesamten Umfang eine gleichmäßig, möglichst konstante Amplitude zu erzeugen.

Schweißfläche einer Rollsonotrode

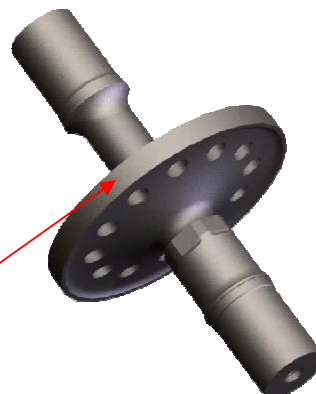


Abb. 5 Rollsonotrode



2.2 Der Generator

Der Generator dient zur Stromversorgung des Konverters. Er erzeugt eine Spannung von mehreren hundert Volt mit einer Frequenz von 20 - 70 kHz. Gewöhnlich ist der Generator in einem eigenen, separaten Gehäuse untergebracht.

Generatoren werden in einer Vielzahl von Leistungsstufen angeboten, die Palette reicht von wenigen hundert Watt bis zu mehreren Kilowatt. Entscheidend für die Auswahl ist natürlich die Schweißaufgabe: Wird eine kontinuierliche Schweißung benötigt (wie z.B. beim Folienschweißen), wie viel einzubringende Energie benötigt die Fügezone, soll der Generator über eine Amplitudenregelung verfügen etc. – all das sind Fragen, die geklärt werden müssen. Jeder Hersteller ist Ihnen gerne bei der richtigen Auswahl behilflich.

2.3 Das Halte- und Vorschubelement

Das Halte- und Vorschubelement nimmt die Schweißeinheit auf und führt diese mit dem erforderlichen Anpressdruck dem entsprechenden Werkstück zu. Im Sondermaschinenbau werden u.U. eine Vielzahl von Vorschubeinheiten eingesetzt.

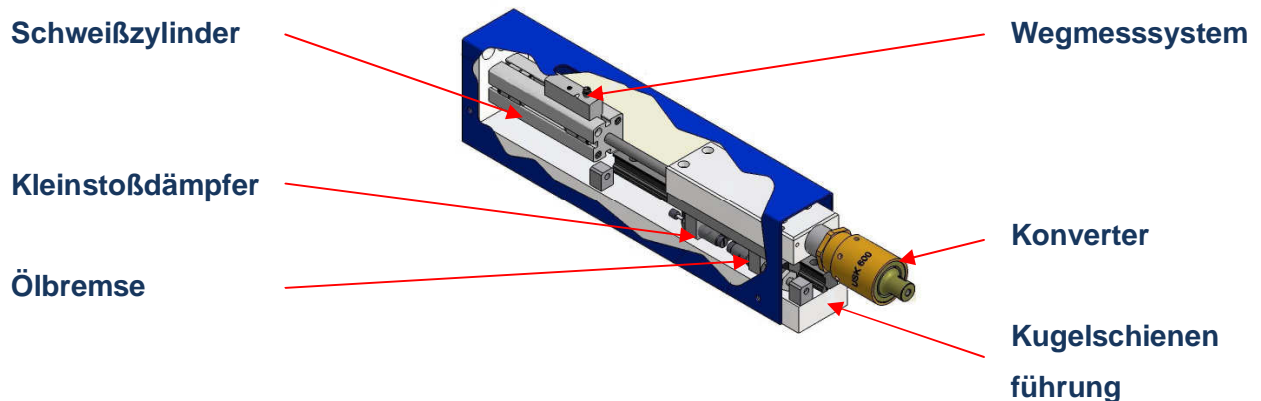


Abb. 6 Vorschubeinheit für den Sondermaschinenbau
(MTH)



2.4 Die Schweißeinheit

Die Schweißeinheit besteht aus dem Konverter, dem Booster und der Sonotrode. Die Sonotrode ist das Schweißwerkzeug mit direktem Kontakt zum Werkstück.

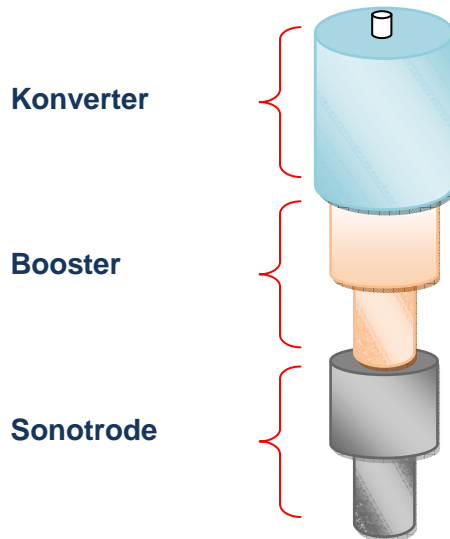


Abb. 6 Prinzipsaufbau Schweißeinheit

2.4.1 Der Konverter (Ultraschallwandler)

Konverter³ (auch: Schallwandler) sind elektromechanische Bauteile in Ultraschall-Schweißeinheiten. Sie haben die Aufgabe, die durch einen Generator bereitgestellte hochfrequente Spannung in mechanische Schwingungen umzuwandeln, indem die Wirkungen der Piezoelektrizität genutzt werden.

Der Konverter wandelt mittels piezokeramischer Bauteile die hochfrequente, elektrische Schwingung um in eine mechanische Auslenkung gleicher Frequenz. Die Ausgangsamplitude, die der Konverter bereitstellt, hängt ab vom Generator und den eingesetzten Piezokeramiken. Sie liegt bei 20kHz – Anwendungen in der Regel nahe bei etwa 10 µm (1 µm = 1/1000 mm). Diese Amplitude wird weitergeleitet in den Booster.

³ Die Abschnitte zum Konverter und zum Booster sind aus *Wikipedia* (www.wikipedia.de) übernommen (Stand: 09.08.2008). Sie sind im Original seinerzeit von uns selbst geschrieben und in *Wikipedia* eingestellt worden).



2.4.2 Der Booster (Verstärkungs- oder Transformationsstück)

Der **Booster** in Ultraschall-Schweißsystemen hat u.a. die Funktion, die vom Konverter bereitgestellte Amplitude zu verändern und sie in die Sonotrode weiter zu leiten. Je nach Bauform des Boosters kann die Amplitude verkleinert oder vergrößert werden.

In der Regel vergrößern die beim US – Schweißen eingesetzten Booster die Amplitude, weil die Kunststoffe größere Amplituden benötigen. Die Übersetzungen von Boostern liegen gewöhnlich zwischen 1 : 1 bis 1 : 3,0.

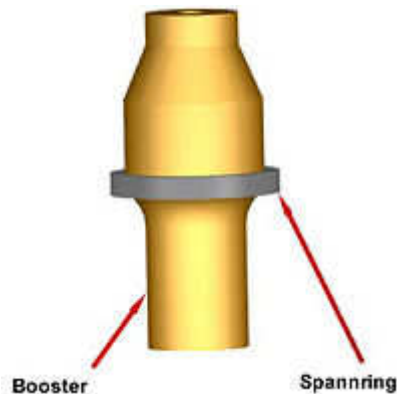


Abb. 8 Booster mit einer Übersetzung von 1 : 1,5

Eine weitere Funktion des Booster ist in vielen Systemen die Lagerung der gesamten Schweißeinheit. Booster werden i.d.R. aus Aluminium oder Titan gefertigt.

2.4.3 Die Sonotrode

Die Sonotrode ist das Ultraschall - Schweißwerkzeug und damit das Bindeglied zwischen Schweißsystem und Werkstück. Nur sie hat direkten Kontakt zum Werkstück.

Bei der Konstruktion und beim Bau sind eine Vielzahl von Anforderungen zu beachten (siehe 2.4.3.1). Falsch konstruierte oder schlecht gefertigte Sonotroden können eine ganze Kette von Problemen verursachen, obwohl sie auf den ersten Blick in Ordnung zu sein scheinen. Z.B. kann durchaus die gemessene Frequenz stimmen und vordergründig scheint die Sonotrode somit in Ordnung. Tatsächlich aber schwingt die Sonotrode womöglich nicht in der richtigen Schwingungsform.

In Kapitel 5 sind die wichtigsten und häufigsten Sonotrodenfehler aufgelistet.



2.4.3.1 Anforderungen an die Sonotrode

Sonotroden sind hochkomplexe Werkzeuge, auch wenn man ihnen das mitunter nicht auf den ersten Blick ansehen kann. Nachfolgend die wichtigsten Anforderungen, die an eine Sonotrode zu stellen sind:

Frequenz	verbreitet sind 20, 30, 35, 36, 40 und 70 kHz
Resonanzfrequenz	Die Sonotrode muss nicht nur in der richtigen Frequenz schwingen – diese muss auch die Resonanzfrequenz sein
Schwingungsform	Meistens wird die longitudinale Schwingungsform benötigt. Zu vermeiden sind Quer- oder Torsionsschwingungen
Leerlaufleistung	Die Leerlaufleistung sagt indirekt etwas aus über die Qualität der Schwingung; sie sollte möglichst gering sein
Amplitude	sie ist abhängig vom zu verschweißenden Werkstoff und dessen Schmelzeigenschaften
Amplitudenverteilung	sie sollte immer möglichst gleichmäßig sein
Geometrie der Arbeitsfläche	sie ist direkt abhängig von der Geometrie des Schweißteils
Präzision	Insbesondere bei 3 – D – Geometrien und bei heiklen Anwendungen ist höchste Fertigungspräzision erforderlich
Übersetzung	abhängig von der Schweißaufgabe bzw. vom Schmelzverhalten des Kunststoffes
Werkstoff	gewöhnlich Titan, Aluminium oder diverse Stähle; Lunken oder sonstige Gefügeschäden müssen ausgeschlossen sein
Oberflächengüte der Arbeitsfläche	z.B. beschichtet, gehärtet, geschliffen etc.
die Nullpunktlage	Sinuswellen haben zwingend eine Zone geringster Ausdehnung – dies ist der „Nullpunkt“ bzw. die Nullpunktlage
Stressverteilung	Stressspitzen sind zu vermeiden – an diesen Stellen neigen Sonotroden zum Reißen



2.4.3.2

Beispiele verschiedener Bauformen von Sonotroden

Nachfolgend eine kleine Übersicht über verschiedenste Bauformen von Sonotroden aus unserer Fertigung:



Stahl, 20 kHz



Titan, 30 kHz Mutter – Tochter



Aluminium, 35 kHz, Rotor



Stahl, 30 kHz



Stahl, 30 kHz, Schneidsonotrode



Stahl, 20 kHz



Aluminium, 20 kHz



Titan, 20 kHz



Titan, 20 kHz

Abb. 9

Sonotrodenbeispiele aus unserer Fertigung



2.4.3.3 Sonderform: die „Booster-Konverter-Sonotrode“

In dieser Spezial – Schweißeinheit sind aufgrund spezifischer technischer Anforderungen alle Einzelkomponenten in einem einzigen Bauteil integriert.



Abb. 7 Sonderentwicklung Konverter - Booster - Sonotrode

3 Der Schweißprozess

3.1 Die wichtigsten Prozesse beim Ultraschallschweißen (Schweißparameter farbig hervorgehoben)

Teilezufuhr	Je nach Automatisierungsgrad werden die Schweißteile per Hand durch die Bedienperson oder automatisch / halbautomatisch zugeführt
Arbeitsdruck	Der Arbeitsdruck (i.d.R. mittels Druckluftzylinder einstellbar) wird anhand der erforderlichen Leistung, Fügefläche und der Teilegröße festgelegt
Absinkgeschwindigkeit	Einstellbare Vorfahrtgeschwindigkeit des Vorschubzylinders
Schweißzeit	Ultraschall - Einwirkzeit auf das zu verschweißende Teil
Haltezeit	Zeitlich regelbarer Kräfteinfluss der Sonotrode auf die Fügezone während des Erstarrens der Schmelze
Triggerdruck	Erst nach Überschreiten eines vorwählbaren Triggerdrucks (= Andruck der Sonotrode auf das Schweißteil) wird der Ultraschall ausgelöst
Energiezufuhr	Die vorwählbare Energiemenge, die in das Schweißteil einfließen soll, bevor der Ultraschall gestoppt wird
Teileabtransport	Je nach Automatisierungsgrad werden die Schweißteile manuell oder automatisch der Schweißmaschine entnommen und weitergeleitet



3.2 4 Phasen der Kunststoffschmelze⁴

Das Anschmelzen des ERG	Anschmelzen des ERG (Energierichtungsgebers) durch Grenzflächenreibung und Beginn der Plastifizierung
Ankopplung Ober- und Unterteil	Bei weiterer Energiezufuhr durch den Ultraschall wird weitere Schmelze im Ober- und Unterteil erzeugt, die sich miteinander vermischt
Stationäre Abschmelzphase	Es bildet sich in der Naht eine konstante Schichtdicke der Schmelze; die weitere Zuleitung von Energie ist nicht erforderlich
Haltephase	Das Werkstück wird positionsgenau gehalten und kühlt unter Nachdruck, bei dem die Sonotrode geringfügig nachsackt, ab.

3.3 Schweißarten

wegabhängig	Beim wegabhängigen Schweißen werden die Verfahrswege vorgewählt. Nach Erreichen eines Endpunktes wird der Ultraschall abgeschaltet.
zeitabhängig	Der Schweißprozess wird nach einer bestimmten, vorwählbaren Zeit abgeschaltet.
energieabhängig	Eine vorgegebene Energiemenge wird in das zu schweißende Teil eingebracht.

⁴ Nach Potente, H.: Fügen von Kunststoffen. Verlag Hanser (2004)



4 Das Werkstück

- 4.1 Material- und Materialeigenschaften
 - 4.2 Fügezonengestaltung
 - 4.3 Fernfeld, Nahfeld
- } Diese Abschnitte werden später zugefügt

4.4 Der Energierichtungsgeber (ERG)



Abb. 10 Aufbauchema Energierichtungsgeber

Sollen thermoplastische Kunststoffteile miteinander ultraschallverschweißt werden (z.B. Handies, USB – Sticks etc.), werden die Fügezonen gewöhnlich mit Energierichtungsgebern (ERG`s) versehen.

Energierichtungsgeber sind ca. 0,4 – 0,6 mm hohe, umlaufende, angespritzte Materialstege mit dreieckigem Querschnitt. Der Winkel in der Spitze des ERG wird gewöhnlich zwischen ca. 60° - 90° gewählt, die Höhe liegt zwischen 0,4 – 1,0 mm.

Durch den Energierichtungsgeber wird eine gezielte und konzentrierte Energieeinleitung erreicht. Die Reibungswärme führt zu einem sofortigen Anschmelzen des ERG`s, dadurch wird das umgebende Material ebenfalls schnell zum Schmelzen initiiert. Fehlt der ERG, dauert die Plastifizierung des Materials länger. Oft ist ein zusätzlicher Andruck erforderlich. Die Schweißnaht wird häufig schlecht.

In Prozessen wie Ultraschallschneiden oder -nieten oder bei der Bearbeitung von Folien und Geweben wird der fehlende Energierichtungsgeber im Werkstück durch die Geometrie an der Arbeitsfläche der Sonotrode kompensiert (z.B. durch Rändelung; Nietzapfen etc.).



5 Die häufigsten Fehler

5.1 Fehlerquelle Sonotrode

An Sonotroden werden eine Vielzahl von Anforderungen gestellt. Sonotroden, die diesen Anforderungen nicht genügen, die schlecht konstruiert oder schlecht gefertigt wurden, oder die im Schweißprozess „falsch behandelt“ wurden, sind die häufigste Fehlerquelle für Störungen im Fertigungsprozess.⁵



Schwingende Sonotrode darf man mit bloßen Händen – wenn überhaupt – nur ganz sachte und vorsichtig berühren. Schon geringster Druck gegen die schwingende Sonotrode führt sofort zu schmerzhaften Verletzungen!

5.1.1 Frequenz

Die konkrete Anwendung sollte bestimmen, mit welcher Frequenz gearbeitet wird. Dabei sind die zu verarbeitenden Kunststoffe und die Teilegröße für die Auswahl entscheidend. Dem Kunden stehen eine Vielzahl unterschiedlicher Generatoren mit verschiedensten Leistungsstufen im Frequenzbereich zwischen 20 – 70kHz zur Verfügung.

Wichtig ist, dass die gesamte Schweißeinheit (bestehend aus Konverter, Booster, Sonotrode) in der vom Generator bereitgestellten Frequenz schwingt.

Zwar haben Generatoren ein bestimmtes Fenster, innerhalb dessen noch Frequenzabweichungen „gefangen“ werden können. Liegt die Frequenz der Sonotrode bzw. die der Schwingeinheit jedoch zu weit außerhalb dieses Fensters, geht der Generator gewöhnlich in Überlast – er „steigt aus“. Mitunter ist das Fenster sehr groß, doch gewöhnlich liegt es bei etwa 0,5 - 1% der angegebenen Nennfrequenz des Generators.

Genauere Angaben zum jeweiligen Frequenzbereich oder -fenster kann der jeweilige Generatorhersteller machen.

Hinweise darauf, dass die Sonotrode nicht in der richtigen Frequenz schwingt, sind beispielsweise:

⁵ Natürlich kann eine Sonotrode auch wegen Materialermüdung und daraus resultierender Rissbildung ausfallen. Dieser Fall wird an dieser Stelle nicht betrachtet.



5.1.1.1 Generator geht sofort in Überlast; mögliche Gründe:

5.1.1.1.1 Bauteile nicht korrekt angekoppelt

Maßnahmen:

- Bauteile lösen; Gewindegänge und Gewindeschrauben überprüfen
- Kontaktflächen säubern
- Bauteile gegeneinander **mit definiertem Drehmoment** anziehen (Angaben des Herstellers beachten; Als Faustregel gilt: bei 20 kHz – Komponenten Sonotrode gegen Booster mit Drehmoment von ca. 30 – 40 Nm anziehen; bei 40 kHz – Komponenten Sonotrode gegen Booster mit Drehmoment von ca. 10 – 20 Nm anziehen).
- Spezielles Werkzeug für das gegenseitige Verschrauben der Bauteile benutzen; spezielle Bohrungen in den Bauteilen für das Verschrauben der Bauteile nutzen
- Vorschlag: Schraube zwischen Booster und Konverter zunächst fest gegen den Grund im Gewindegang des Boosters anziehen; erst dann Booster gegen Konverter verschrauben; Schraube zwischen Sonotrode und Booster zunächst fest gegen den Grund im Gewindegang der Sonotrode anziehen; erst dann Booster gegen Sonotrode verschrauben

5.1.1.1.2 Gewinde in der Sonotrode defekt (seltener im Booster)

Insbesondere bei Aluminiumsonotroden kommt dieser Fehler häufiger vor. Schon geringe Falschbehandlung (wie z.B. einseitige Belastung; kein korrektes Drehmoment der Sonotrode zum Booster) kann dazu führen, dass das Gewinde geschädigt wird.

Maßnahmen:

Gewinde eine Nummer größer nachschneiden. In der Regel ist die daraus resultierende Frequenzänderung nicht erheblich.

Allerdings unbedingt darauf achten, dass

- kein „Slot“ in unmittelbarer Nähe ist, wie z.B. bei Rechteck-Stufen-Sonotroden mit nur einem Slot unterhalb des Ankoppelgewindes. Bei solchen Sonotroden kann eine Vergrößerung des Gewindes bereits zu einer zu großen Materialschwächung führen.

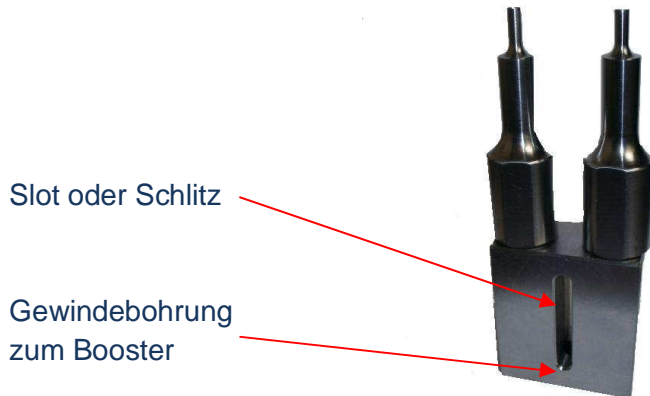


Abb. 11 Mutter – Töchter Sonotrode⁶.

- das Gewinde ganz exakt zentrisch ist (siehe auch unter 5.1.8)
- Frequenzmessung nach dem Gewindeschneiden
- An Stufenschraube denken! Im Booster sollte ja noch das alte Gewinde sein, deshalb wird eine Schraube mit zwei unterschiedlichen Gewinden benötigt.

5.1.1.1.3 Frequenz ist nicht in Ordnung

Im Leerlauf lassen Generatoren Frequenzabweichungen der eingesetzten Sonotrode innerhalb gewisser Grenzen zu. Erst unter Last steigen diese Generatoren dann aus, weil sich zum Beispiel die Sonotrode erwärmt und sich die Frequenz dadurch weiter „verschlechtert“. In solchen Fällen ist eine Frequenzmessung der Sonotrode möglich.

Ist die Frequenzabweichung groß, kann das folgende Gründe haben:

5.1.1.1.3.1 Sonotrode falsch nachgearbeitet

Grundsätzlich ist es möglich, Sonotroden nachzuarbeiten, allerdings sollten dann ein entsprechendes Fachwissen sowie die erforderlichen Messmittel vorhanden sein.

Darüber hinaus sollte sichergestellt sein, dass mit einer geometrischen Änderung der Sonotrode keine Änderung der Schwingungsform (siehe hierzu 5.1.3) einhergeht.

⁶ Beispiel einer Sonotrode mit nur einem Slot. In diesem Fall ist eine Gewindevergrößerung sehr kritisch, da sich die Gewindebohrung direkt im Slotbereich befindet.



5.1.1.1.3.2 Konstruktion ungünstig

Die falsche Konstruktion einer Sonotrode kann nur in den seltensten Fällen durch irgendwelche Korrekturmaßnahmen behoben werden. Allerdings sollten Sie unbedingt vermeiden, länger mit schlechten Sonotroden zu arbeiten, weil teure Folgeschäden möglich sind. So können Ihre Sonotrode übermäßig schnell verschleifen oder reißen, oder es wird sogar der Schallkopf (Konverter) geschädigt. Auch wird die Qualität Ihrer Schweißung durch schlechte Sonotroden beeinflusst.

Bei Verdacht auf eine falsch konstruierte Sonotrode wenden Sie sich an den Hersteller oder an einen neutralen Fachbetrieb. Eine FEM⁷ – Analyse kann das Schwingverhalten darstellen und Schwachstellen aufzeigen⁸.

5.1.1.2 Generator steigt erst nach einer gewissen Laufzeit aus

Typisch für dieses Verhalten sind Sonotroden, deren Frequenz sich unter Arbeitseinsatz verändert. Gründe für Erwärmungen sind u.a. auch im Kapitel 5.14 beschrieben.

Problem machen gelegentlich:

- große Sonotroden, betrieben mit
- digitalen Generatoren, konstruiert mit einem
- „engen Frequenzband“.

Viele digital arbeitende Generatoren „scannen“ sich auf eine bestimmte Frequenz ein. Das ist gewöhnlich die Resonanzfrequenz, denn dort ist die Leerlaufleistung, also die einzubringende Energie, um die Sonotrode zum Schwingen zu bringen, am geringsten.

Die Sonotrode wird aber in der Regel warm werden, da ihre Oberfläche, über die ja nur die entstehende Wärme abgeführt werden kann, im Verhältnis zum Volumen ungünstig klein ist. Ist die Sonotrode zudem nicht optimal konstruiert, hat also einen hohen Anteil an Querschwingungen, wird die Erwärmung noch schneller gehen.

Damit aber fällt die Frequenz. Der Generator unterstützt noch die ursprüngliche Frequenz, die Sonotrode schwingt aber schon in einer anderen. Fällt die Frequenz weiter und ist sie schließlich irgendwann außerhalb des Fensters, das der Generator „fängt“, wird der Generator in Überlast gehen, eine Meldung machen oder den Betrieb einstellen.

Eine einfache Abhilfe kann sein, die Sonotrode mittels Druckluft zu kühlen.

⁷ FEM = Finite Elemente Methode;

⁸ Die auffälligsten (und häufigsten) Fehler können Sie jedoch auch z.B. mit dem Amplituden- und Frequenzmessgerät AFM 9.3 selbst herausfinden.



5.1.1.3 Sonotrode reißt nach kurzer Zeit

(obwohl alles in Ordnung zu sein scheint)

Unter bestimmten Bedingungen kann es aber auch sein, dass der Generator auf eine Frequenz trifft, die zwar eine Resonanzfrequenz ist, aber eine mit einem zu hohen Anteil an Transversalwellen / Querschwingungen.

Dieser Fall tritt häufiger dann ein, wenn der „Ultraschaller“ erst am Ende des Prozesses mit ins Boot genommen wird und alle wichtigen Schweißteileparameter wie z.B. das Design des Kunststoffteils und seine Lage in der Aufnahme bereits feststehen.

Dann kann es sein, dass eine „optimale“ Konstruktion der Sonotrode einfach nicht mehr möglich ist und dass zu viele Kompromisse eingegangen werden müssen.

Der Generator „merkt“ nur, dass die Frequenz stimmt, deshalb scheint alles in Ordnung. Er prüft nicht und er kann nicht prüfen, ob die Schwingungsform auch die richtige ist. Das Schweißergebnis wird womöglich schlecht sein, so dass in der Praxis häufig der Schweißdruck bzw. die Schweißzeit oder auch beides erhöht werden. Das System arbeitet also ohne Warnung weiter, was schließlich zum Reißen der Sonotrode führen kann.

Sinnvoll wäre in einem solchen Fall natürlich, die Teilegeometrie und ggf. die Situation in der Aufnahme zu verbessern. In der Praxis bleibt leider oft nur, eine neue Sonotroden zu konstruieren und irgendwie das Dilemma der falschen Frequenz zu vermeiden.

Auch bei einer zu hohen Übersetzung kann eine Sonotrode schnell reißen (siehe 5.1.1.5).

5.1.1.4 Sonotrode „kreischt“

5.1.1.4.1 Beginnender Riss

Das deutet in den meisten Fällen auf einen beginnenden Riss in der Sonotrode hin. Reißt die Sonotrode weiter, wird der Generator in Überlast gehen, weil sich mit der Rissbildung gleichzeitig die Frequenz verändert und auch die Schwingungsform. (Die Frequenzen, die dann zu hören und sind, sind nicht die im Ultraschallbereich⁹, sondern darunter liegende.)

Ein Riss in der Sonotrode kann nicht „repariert“ werden. Sinnvoll ist jedoch, die Ursachen für den Riss zu kennen. Natürlich kann es sich um Materialermüdung handeln. Ein genaueres Bild erlaubt jedoch eine Analyse der Sonotrodengeometrie auf eventuelle Schwachstellen.

Oft sind Optimierungen möglich, die die Lebensdauer einer Sonotrode erheblich verlängern.

⁹ Der erwachsene Mensch hört in der Regel Frequenzen nur bis ca. 16 - 18.000 Hz



5.1.1.4.2 Keine feste Verbindung der Bauteile

Ein „Kreischen“ ist auch dann zu hören, wenn die einzelnen Bauteile der Schwingeinheit nicht korrekt miteinander verbunden sind oder wenn die Gewindeschraube locker oder defekt ist (siehe auch 5.1.1.1.1).

5.1.1.4.3 Übersetzung zu hoch

Auch wenn die Übersetzungen von Booster und Sonotrode zu hoch gewählt wurden kann mitunter ein Kreischen zu hören sein.

5.1.1.4.4 Aufnahme ungünstig

Schließlich kann auch die Teileaufnahme mit zu großen Toleranzen bzw. können zu große Toleranzen in den Kunststoffteilen der Grund für das Kreischen beim Schweißen sein. Mitunter reicht es schon, Toleranzen in der Aufnahme durch eingeklebte Gewebepänder auszugleichen.

5.1.2 Resonanzfrequenz

Eine Sonotrode muss nicht nur in der richtigen Frequenz schwingen, sondern diese muss auch die sog. **Resonanzfrequenz**¹⁰ sein. Das bedeutet: Kann eine Sonotrode bei nur geringer Energiezufuhr (Erregungsenergie) von außen in eine Eigenschwingung versetzt werden, hat sie in der gleichen Frequenz wie die Erregungsfrequenz eine Resonanz.

Das klassische Beispiel: Nur wenige im Gleichschritt marschierende Menschen reichen u.U. aus, eine stabile Brücke bis zur sog. Resonanzkatastrophe aufschwingen zu lassen. Über die gleiche Brücke könnten eine Vielzahl von LKW's Masse fahren, ohne das etwas passieren würde.

Schwingt eine Sonotrode nicht in Eigenresonanzfrequenz, muss sie vom Generator in die Arbeitsfrequenz „gezwungen“ werden. Das erfordert erhöhten Arbeitsaufwand des Generators und eine erhöhte Belastung des gesamten Systems.

Ob die gemessene Frequenz einer Sonotrode tatsächlich deren Resonanz- oder Eigenfrequenz ist, kann in der Regel rückgeschlossen werden aus der benötigten Leerlaufleistung. Ist diese gering – nahe bei Null – kann man davon ausgehen, dass die gemessene Frequenz auch die Resonanzfrequenz ist.

Das Problem allerdings ist, dass die Resonanzfrequenz einer Sonotrode nicht unbedingt die gewünschte Schwingungsform (siehe dazu auch 5.1.3) haben muss.

¹⁰ Siehe auch unter www.wikipedia.de unter [Eigenfrequenz](#)



5.1.3 Schwingungsform

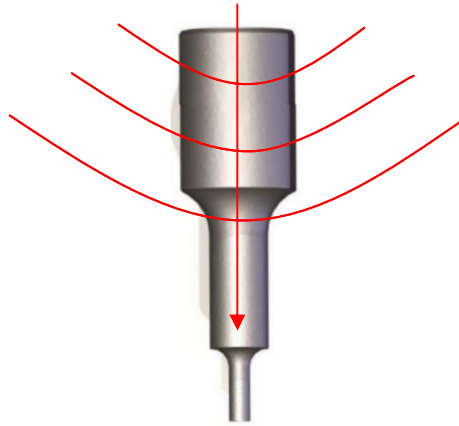


Abb. 12 idealtypischer Schallwellenverlauf

In den allermeisten Anwendungen in der Ultraschallbearbeitung werden sogenannte *Longitudinalwellen* des Ultraschalls benötigt, da diese Schallwellen senkrecht auf das Werkstück treffen und damit die beste Wirkung haben. Zu vermeiden sind möglichst Querschwingungen oder Transversalwellen¹¹. Sie erfordern häufig höhere Schweißzeiten als nötig oder einen höheren Andruck der Sonotrode an das Werkstück und verkürzen damit die Lebensdauer von Sonotroden und mitunter sogar vom Konverter.

Eine gute Longitudinalschwingung sorgt für eine stabile und gleichmäßige Amplitude an der Arbeitsfläche der Sonotrode. Eine solche Amplitude zeigt am Oszilloskop eine gleichmäßige Sinuskurve.

Ist der Anteil von Transversalwellen zu groß, verläuft der Prozess nicht optimal.

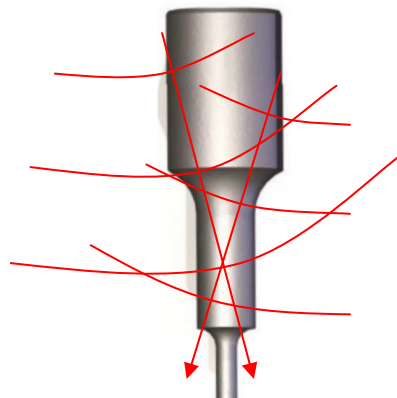


Abb. 13 Transversalwellenverlauf (schematisch)

¹¹ Es gibt immer Querschwingungen in Sonotroden – es sollten nur nicht zu viele sein.



Mit einem Laservibrometer können Amplituden berührungslos gemessen und analysiert werden. Das Verfahren ist sehr genau. Für die betriebliche Praxis allerdings ist es weniger geeignet – die Geräte sind sehr teuer und die Handhabung ist recht aufwändig.



Abb. 14 Das Amplituden- und Frequenzmessgerät von Rittmeyer

Speziell für die betriebliche Praxis hat die FEINTECHNIK R.Rittmeyer GmbH deshalb das *Amplituden- und Frequenzmessgerät AFM 9.3* entwickelt. Dieses Gerät misst permanent die Frequenz der schwingenden Sonotrode und es lassen sich - indirekt - sofort Amplituden erfassen und Amplitudenrelationen herstellen.

Mit dem „Messkopf“
Stellung des Kopfes



Abb. 15 Messkopf USM

wird die schwingende Sonotrode „abgetastet“. Je nach werden die Amplituden der Längs- und die der Querschwingungen erfasst und miteinander in Beziehung gesetzt. Die „Amplitudenrelation“ lässt Rückschlüsse auf die Qualität von Sonotroden zu.

„Die“ Schwingungsform einer Sonotrode gibt es nicht; Ultraschallschwingungen setzen sich stets aus mehreren Schwingungen zusammen, die in unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich stark wirken. Die „Schwingungsform“ ist also eine Resultierende sämtlicher vorhandenen und einander überlagernder Schwingungen. In welche Richtung die Sonotrode ihre stärkste Auslenkung hat ist abhängig von der gewählten Konstruktion.

Die Sonotroden in den unten stehenden Beispielen (Abb. 16 + 17) schwingen alle in der korrekten Frequenz (in diesem Fall 40 kHz). Im Beispiel Abb. 16 jedoch liegt der Anteil an Querschwingungen sehr hoch. Dies führt zu einer nicht linearen Auslenkung.



Zusätzlich wird die Sonotrode druckbelastet (Anwendung: Nieten). Das und die fehlerhafte Konstruktion führen zu vorzeitigem Bruch der Sonotrode.

Das Problem kann durch die Wahl einer geeigneteren Geometrie recht einfach behoben werden (Abb. 17). Die geometrischen Unterschiede zwischen den Sonotroden vor und nach einer Optimierung sind mitunter kaum erkennbar – die Auswirkungen indes sind enorm.

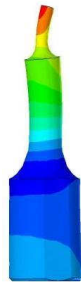


Abb. 16 vor Optimierung



Abb. 17 nach Optimierung

Bei der Konstruktion einer Sonotrode muss deshalb unbedingt beachtet werden, dass die gewünschte Schwingungsform auch die wirksame ist. Das ist die eigentliche Aufgabe des Entwicklers und wird durch die Wahl der „korrekten“ Sonotrodengeometrie erreicht.

5.1.4 Leerlaufleistung

Mit "Leerlaufleistung" ist die Leistungseingabe in Watt gemeint, welche der Generator noch zur Verfügung stellen muss, damit ein Körper in Eigenresonanzfrequenz schwingt. Sie sollte bei Sonotroden möglichst gering sein. (im Gegensatz zum sonstigen Maschinenbau – da sind Resonanzschwingungen in aller Regel unbedingt zu vermeiden)¹².

Die Leerlaufleistung sagt indirekt etwas aus über die Qualität der Schwingung. Insbesondere ein hoher Anteil an Transversalwellen, also an unerwünschten Querschwingungen, erfordert zusätzliche Leistungen des Generators.

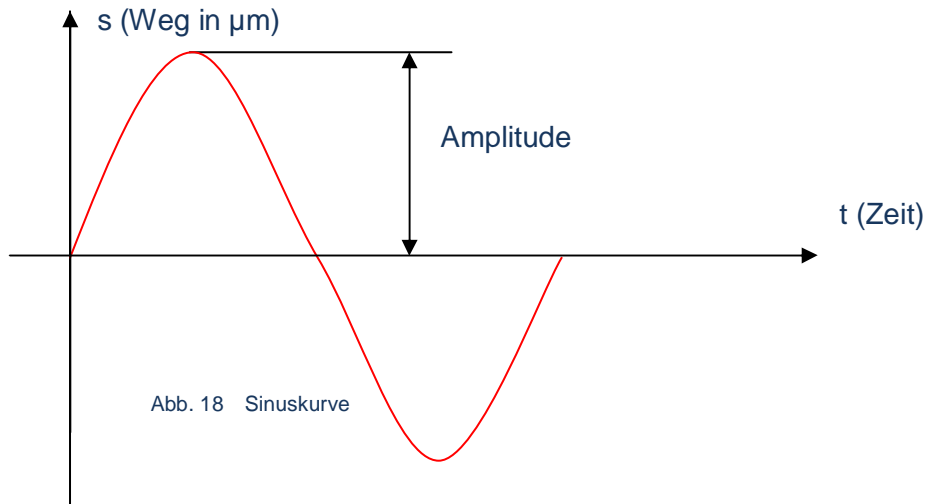
Eine erhöhte Leerlaufleistung kann auch erforderlich sein bei stärkeren Abweichungen von der vorgegebenen Frequenz des Generators. In jedem Fall bedeutet eine hohe Leerlaufleistung eine zusätzliche Belastung des gesamten Systems.

¹² Wir versuchen bei unseren Sonotrodenkonstruktionen unter 5% der Leistung des Generators zu bleiben. Bei einem 2 kW – Generator wären das dann etwa 100 Watt.

Das ist zwar ein willkürlicher Wert, aber als Richtlinie für die Beurteilung der Sonotrodenqualität ganz hilfreich. Von den meisten Generatoren wird die Leerlaufleistung angegeben.



5.1.5 Amplitude



Die Amplitude ist die Schwingweite einer Sonotrode an ihrer Arbeitsfläche, sie wird in μm (Mikrometer) angegeben. Die Größe der Amplitude wird beeinflusst von der Ausgangsamplitude, die der Konverter (Transformationsstück) bereitstellt, und von der jeweiligen Verstärkung durch den Booster und durch die Sonotrode selbst.

Das Doppelte der Amplitude, also der Abstand zwischen Maximum und Minimum (gültig bei symmetrischen Schwingungen), wird auch als Spitze-Spitze-Wert bezeichnet

Im Sprachgebrauch wird das oft nicht genau unterschieden - vergewissern Sie sich deshalb sicherheitshalber, was genau gemeint ist: die normale Amplitude oder die Amplitude „Spitze : Spitze“.

Die benötigte Amplitude wird u.a. durch das Schmelzverhalten der eingesetzten Kunststoffe bestimmt und kann erheblich schwanken. Bei der Konstruktion der Sonotrode ist die benötigte Amplitude (unter Einbeziehung des zur Verfügung stehenden Boosters) zu berücksichtigen.

Die wichtigsten einstellbaren Parameter beim Ultraschallschweißen sind die Schweißzeit, die einzubringende Energie und der Anpressdruck der Sonotrode (siehe auch 3.1).

Stellt jedoch die Sonotrode beispielsweise eine zu geringe Amplitude zur Verfügung, wird der Schweißprozess nicht oder nur unzureichend gelingen.

Ist eine Sonotrode falsch konstruiert, kann die Amplitude an der Arbeitsfläche an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich groß sein.



5.1.6 Amplitudenverteilung

Schwieriger ist, die Amplitude gleichmäßig über die gesamte Arbeitsfläche zu „verteilen“. Besonders heikel ist diese Aufgabe bei Sonotroden mit verschiedenen Arbeitsebenen oder gar mit eingebrachten 3D – Geometrien bzw. bei asymmetrischem Grundaufbau. Hier sind Amplitudenabweichungen häufig immens, gleichwohl aber u.U. aufgrund der Teilegeometrie unvermeidlich.

Es ist Aufgabe der Konstruktion, das Design der Sonotrode so zu wählen, dass eine möglichst gleichmäßige Amplitudenverteilung erreicht wird. Dazu stehen eine Reihe konstruktiver Möglichkeiten zur Verfügung.

Mit dem AFM 9.3 lassen sich die Amplituden der longitudinalen und die der Querschwingungen an den Außenflanken einer Sonotrode erfassen.

5.1.7 Geometrie der Arbeitsfläche

Sie ist direkt abhängig von der Geometrie des Schweißteils bzw. von dem gewünschten Ergebnis.

Nietsonotroden beispielsweise sind so gearbeitet, dass nach ihrem Einsatz ein „Nietkopf“ entsteht.

Für die Anwendung *Ausstanz*en – wie für Knopflöcher in Gurte – werden häufig gehärtete Stahlsonotroden eingesetzt mit gerader, geschliffener Arbeitsfläche. Derartige Sonotroden haben Kontakt mit dem Ausstanzwerkzeug und unterliegen einem besonderen Verschleiß. Damit nicht ständig neue Sonotroden eingesetzt werden müssen, können diese Sonotroden innerhalb der Grenzen des Fangbereichs des Generators ein wenig länger gebaut werden – die Frequenz liegt dann leicht unterhalb der Nennfrequenz. Werden diese Sonotroden nachgeschliffen, also gekürzt, steigt die Frequenz. Das kann man einige male machen, bis die Frequenz so hoch ist, dass der Generator in Überlast geht.



Abb. 19 Stahlsonotrode für Gewebearbeitung



Für die Konstruktion von Sonotroden ist sehr von Vorteil, wenn es einen gewissen Gestaltungsspielraum insbesondere bei der Wahl der äußeren Form gibt. Es ist leider so, dass nicht jedes Baumaß einer Sonotrode zu besten Ergebnissen führt. Quadratische Grundformen beispielsweise erzeugen selten eine brauchbare Schwingung.

Deshalb ist von Vorteil, wenn der Sonotrodenbauer möglichst früh im Prozess der Teileentwicklung mit ins Boot genommen wird.

5.1.8 Präzision

Insbesondere bei 3 – D – Geometrien und bei heiklen Anwendungen ist höchste Fertigungspräzision erforderlich



Abb. 20 Sonotrode mit 3D – Geometrie in der Arbeitsfläche

Manchen Sonotroden sieht man als Laie nicht unbedingt an, wie komplex sie sind. Sie sind offenbar einfach herzustellen und somit leicht zu kopieren – ein 1 : 1 Nachbau scheint also problemlos möglich zu sein.

Abgesehen davon, dass ein Nachbau oft zu Problemen führt, gibt es durchaus Sonotroden, deren Fertigungstoleranzen sind trotz einfach scheinender Geometrie extrem eng. Schon geringste Abweichungen können das Schwingverhalten komplett ändern. Bei der Fertigung derartiger Sonotroden ist also höchste Präzision gefragt.

Alle Winkel in den Achsen sollten exakt 90° groß sein.

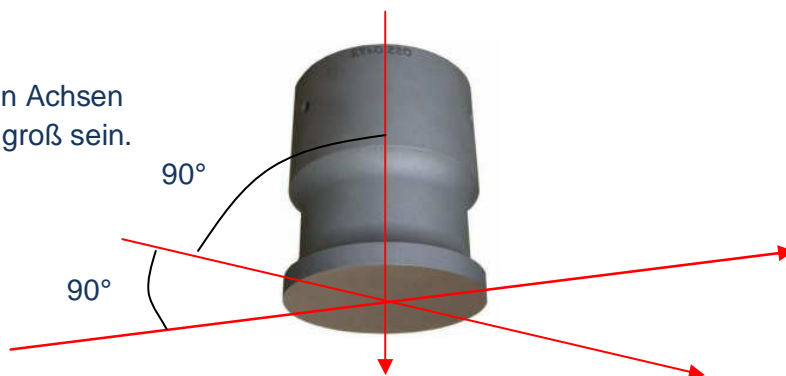


Abb. 21 Hohe Präzision in allen Achsen



Wichtig ist auch, dass die Arbeitsfläche exakt im 90°- Winkel zur senkrechten Achse der Sonotrode steht. Nur so ist gewährleistet, dass der Anpressdruck gleichmäßig über die Arbeitsfläche der Sonotrode verteilt wird¹³. Einseitiger Druck auf die Arbeitsfläche ist immer wenn irgendwie möglich zu vermeiden.

5.1.9 Übersetzung

Mit „Übersetzung“ ist das Verhältnis von Eingangs- zur Ausgangsamplitude gemeint.

Üblicherweise wird beim Ultraschallschweißen mit Amplituden > 10 µm gearbeitet, da die meisten thermoplastischen Kunststoffe Arbeitsamplituden zwischen 15 – 50 µm erfordern, um zu einer optimalen Schmelze zu kommen. Für die richtige Auslegung aller Schweißkomponenten ist die erforderliche Amplitude an der Sonotrode stets ein ganz wichtiges Maß. Nachlässigkeiten an dieser Stelle rächen sich in der Regel.

Bei 20kHz – Anlagen stellen die Generatoren etwa 10 µm Ausgangsamplitude (Spitze : Spitze) zur Verfügung. Bei Einsatz eines Boosters mit dem Übersetzungs- oder Verstärkungsfaktor 1 : 1,5 und einer Ausgangsamplitude von 10 µm des Konverters liegen also 15 µm Amplitude am Booster an.

Eine Sonotrode wird in der Regel ebenfalls mit Übersetzung gebaut, erkennbar an der Verjüngung ihres Querschnitts zur Arbeitsfläche hin.

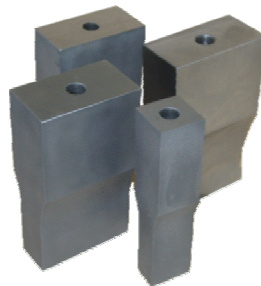


Abb. 20 Rechteck - Stufen – Sonotroden mit Querschnittverjüngung

Liegt die gewählte Übersetzung der Sonotrode ebenfalls bei z.B. 1 : 1,5, ergibt sich demnach an der Arbeitsfläche der Sonotrode ein Amplitudenwert von etwa 22,5 µm.

10 µm am Konverter	x	Übersetzung Booster	1,5	= 15,0 µm
15 µm am Booster	x	Übersetzung Sonotrode	1,5	= 22,5 µm ¹⁴ .

¹³ Natürlich gilt das nur für Sonotroden, die mit gerader Arbeitsfläche auf die Schweißteile aufsetzen können. Bei 3D – Geometrien oder schrägen Arbeitsflächen können ungleichmäßige Belastungen durch entsprechende Konstruktionsmaßnahmen häufig weitgehend ausgeglichen werden.

¹⁴ Mit dem Amplituden- und Frequenzmessgerät können Sie die Eingangs- und die Ausgangsamplituden messen, die Daten speichern und sich das Verhältnis der gespeicherten Werte anzeigen lassen.



Für Messungen mit dem AFM 9.3 bedeutet dies, dass der Amplitudenwert an der Arbeitsfläche der Sonotrode um etwa 1,5 höher sein muss als der Amplitudenwert der Sonotrode an der Koppelfläche zum Booster.

5.1.10 Werkstoff

Sonotroden werden in speziellen Titan-, Aluminium- oder Stahllegierungen gebaut – all diese Materialien sind grundsätzlich geeignet und bieten jeweils spezifische Vorteile. Einige Vor- und Nachteile sind nachfolgend aufgeführt:

Material	Titan	Aluminium	Stahl
Kriterien			
Rohmaterialkosten	hoch	mittel	gering
Spanbarkeit	Know How erforderlich	leicht	mittel
Grundhärte	gering	gering - mittel	hoch
Durchhärten	nicht möglich	nicht möglich	bis ca. 64 HRC möglich
Beschichtung	möglich	möglich	möglich
Baugröße	sehr groß möglich	groß möglich	eingeschränkt
Amplitudenweite	hoch	mittel	gering
mögliches Übersetzungsverhältnis	hoch	mittel	gering
Arbeitsfläche Nachschleifen	eingeschränkt	eingeschränkt	gut
Dauerbelastung	gut	mittel	mittel

Sie erhalten über das AFM 9.3 also keinen Absolutwert der Amplitude einer Sonotrode, können auf diesen aber einfach zurückrechnen. Sie müssen dazu lediglich die Ausgangsamplitude des Generators/Konverters kennen (vom Hersteller zu erfragen) und wissen, welche Übersetzung der eingesetzte Booster hat (Booster sind in der Regel mit einem entsprechenden Übersetzungsfaktor oder einer entsprechenden Farbe gekennzeichnet).

Benötigt Ihre Schweißanwendung eine Amplitude von z.B. 30 µm, müssen demnach entsprechende Übersetzungen – möglichst gleichmäßig verteilt – im Booster und in der Sonotrode vorgesehen werden.



5.1.12 Die „Nulllinie“

Amplituden als die gemessenen Werte einer Schallwelle können beispielsweise mit dem Messkopf USM 3.1 und einem Oszilloskopen visualisiert werden. Sie folgen einem sinusförmigen Kurvenverlauf.

Tief- bzw. Hochpunkte der Sinuskurve markieren die Bereiche größter bzw. geringster Ausdehnung. Der Durchgang durch die Nulllinie markiert entsprechend die Zone ohne Ausdehnung. Aus physikalischen Gründen wird in diese Zone die geometrische Reduzierungsstufe gelegt, um die Amplitude zu vergrößern.

Mit dem Messkopf USM 3.1, angeschlossen an ein Oszilloskop, kann die Sonotrode „abgefahren“ und können die Amplituden sichtbar gemacht werden: die Eingangsamplitude, die – meist größere - Ausgangsamplitude, und die „Null – Amplitude“.

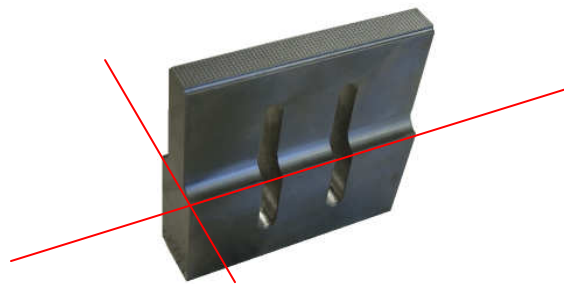


Abb. 21 Verlauf Nulllinie

Das Fehlen der Nulllinie i.d.R. deutet auf eine fehlerhafte Konstruktion der Sonotrode hin.

5.1.13 Stressverteilung

In der Konstruktionsphase einer Sonotrode wird deren geometrische Gestalt festgelegt. Obwohl Frequenz, Amplitudenwerte, Übersetzungsverhältnisse, Material, Geometrie etc. in Ordnung sein können, kann es ungünstige Spitzen in der Materialbelastung geben, Zonen größerer „Stressbildung“. Solche Zonen sind häufig um die Gewindebohrung herum oder an den „Slots“ anzutreffen. Hier entstehen bei schlecht konstruierten Sonotroden Risse.

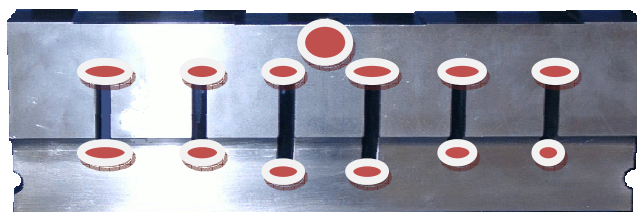


Abb. 22 typische Stressbereiche

Es ist Aufgabe der Konstruktion, die Geometrie der Sonotrode so zu wählen, dass zu große Stressspitzen vermieden werden, um das Reißen der Sonotrode an diesen Stellen zu verhindern.



5.1.14 Temperatur

Sonotroden können sich erwärmen oder sogar erhitzen.

Die Gründe hierfür sind vielfältig. Gründe für Erwärmung können z.B. sein, dass

- die zugeführte Energie nicht komplett in Bewegungsenergie umgesetzt wurde oder werden konnte – z.B. wegen eines zu hohen Anteils an Transversalschwingungen - oder
- die Oberfläche der Sonotrode in einem ungünstigen Verhältnis zum Volumen der Sonotrode steht, wie es bei großen Sonotroden der Fall ist...

Speziell im Dauerbetrieb arbeitende, große Sonotroden erwärmen sich naturgemäß schneller als kleine Sonotroden mit größeren Abkühlphasen zwischen den Schweißeinsätzen.

Das Hauptproblem von sich erwärmenden Sonotroden – neben dem der möglichen Gefährdung der Bedienperson durch Hautkontakt – ist, dass die Resonanzfrequenz fällt. Dieser Frequenzabfall kann mehrere hundert Hertz groß sein. Das jedoch bedeutet unter Umständen, dass die Frequenz außerhalb des „Fangbereichs“ des Generators liegen kann.

Ein typischer Hinweis auf dieses Phänomen ist, wenn der Generator immer erst nach einer gewissen Betriebsdauer aussteigt.

Eine sinnvolle und einfach zu realisierende Gegenmaßnahme ist der Einbau einer Druckluftkühlung. Sollte auch die nicht helfen, ist eine Analyse der Sonotrode und der Amplitudenverteilung sinnvoll und ggf. eine Neukonstruktion.

5.1.15 Lebensdauer

Die „Lebensdauer“ einer Sonotrode hängt naturgemäß von vielen Faktoren ab. Nachfolgend seien genannt:

- Materialermüdung
- Materialeigenschaften
- Konstruktion

Es gibt die Möglichkeit, die Materialermüdung der Sonotrode in einem angenommenen Betriebsmodus zu simulieren. Als Parameter können berücksichtigt werden: die Schlagfrequenzen, die Materialeigenschaften unter Berücksichtigung ihrer Molekularstruktur und Dehnungskoeffizienten, die Häufigkeit des Einsatzes etc. Die sog. „Wöhlerkurve“ kann dann darüber Auskunft geben, wie lange die Sonotrode unter den angenommenen Bedingungen hält.



Allerdings geht der zugrunde liegende mathematische Algorithmus von idealtypischen Voraussetzungen aus, die in der Praxis unrealistisch sind. Es ist einfach unter üblichen Produktionsbedingungen unmöglich, immer gleiche Bearbeitungsparameter zu gewährleisten. Deshalb auch sind derartige Berechnungen leider nur bedingt tauglich.

Dennoch sollte man durchaus den Punkt Lebensdauer im Auge behalten, denn: Einen ganz erheblichen Einfluss darauf hat einfach die Qualität der Konstruktion. Oft können scheinbar kleine geometrische Verbesserungen enormen Einfluss haben, wie im Beispiel unter 5.1.3 angegeben.

5.2 Fehlerquelle Booster

Dass ein Booster im Ultraschall – Schweißbetrieb zerstört wird, ist eher selten. Booster werden gewöhnlich in der sehr stabilen Geometrie eines Zylinders mit einer Reduzierungsstufe gebaut und sind mechanisch sehr robust. Was gelegentlich vorkommt ist, dass sich die Koppelschraube zur Sonotrode (seltener die zum Konverter) löst. Dann kann es zu Beschädigung des Gewindes kommen, selten zum Bruch des Boosters.

Ein defektes Gewinde kann durchaus größer nachgeschnitten und somit repariert werden.

5.3 Fehlerquelle Generator

Generatoren verfügen in aller Regel über einen Überlastschutz, der bei Fehlfunktionen sofort die Elektronik schützt. Deshalb sind auch bei Generatoren Zerstörungen eher selten.

Ein grundsätzliches Problem ist allerdings, wenn sich im Schweißprozess die Frequenz der Sonotrode ändert. Das ist z.B. dann der Fall, wenn sie sich erwärmt.

In einem solchen Fall kann es sogar sein, dass durch die veränderte Frequenz auch eine veränderte Schwingungsform gewählt wird. Dann kann es vorkommen, dass der Generator wegen Überlast in den Störbetrieb geht.

Ein Hinweis darauf ist, wenn ein Generator erst nach einer gewissen Laufzeit und nachdem sich die Sonotrode aufgewärmt hat. In solchen Fällen kann z.B. die Sonotrode gekühlt werden durch einen permanenten Luftstrahl..



5.4 Fehlerquelle Konverter

Dass ein Konverter zerstört wird kommt häufiger vor¹⁵. Das ist besonders ärgerlich, weil diese Bauteile sehr teuer verkauft werden. Es sollte deshalb unbedingt darauf geachtet werden, dass nicht falscher Umgang mit dem System zu Zerstörungen führt. Der häufigste Grunde für Schäden am Konverter sind schlecht schwingende Sonotroden.

5.5 Fehlerquelle Teileaufnahme / Amboss

Auch die Teileaufnahme kann der Grund sein für ein fehlerhaftes Schweißergebnis.

5.5.1 Falsche Geometrie bzw. nicht ausreichende Präzision

Denken Sie daran, wie filigran viele Schweißaufgaben sind. Der ERG (Energierichtungsgeber) ist oft gerade mal 0,3 mm hoch, der zurückzulegende Schweißweg ist demzufolge kaum länger. Man kann sich vorstellen, wie stark sich dann schlecht positionierte oder schlecht gefertigte Aufnahmen auswirken können. Wenige Zehntel Millimeter Ungenauigkeit können dann schnell katastrophale Auswirkungen haben.

5.5.2 Schlecht ausgerichtete Aufnahme

Achten Sie darauf, die Aufnahme korrekt auszurichten. Viele Hersteller bieten Pressentische an, die ausgerichtet werden können. Ansonsten bedienen Sie sich geeigneter Unterlagen wie Blechstreifen unterschiedlicher Stärke, um die Aufnahme exakt zur Arbeitsebene der Sonotrode auszurichten.

5.5.3 Zu geringe Masse

Ein weiteres Problem von Aufnahmen kann ihre zu geringe Masse sein.

In das Oberteil der beiden Fügeteile werden durch die Sonotrode hochfrequente Schallwellen eingeleitet. Diese sollen dazu führen, dass sich in der Fügezone das Material durch Reibung verflüssigt. Das kann allerdings nur dann funktionieren, wenn die Schallwellen nicht durch das Unterteil in die Aufnahme weitergeleitet werden. Die Aufnahme (der Amboss) muss deshalb ein festes Widerlager bilden. Das ist am einfachsten durch eine große Masse zu erreichen.

5.6 Fehlerquelle Ankoppelung

Denken Sie daran, die Bauteile untereinander mit dem richtigen Andruck anzuschrauben. In Kapitel 5.1.1.1.1 haben wir bereits darauf hingewiesen.

¹⁵ In der Regel werden lediglich die Piezokeramiken im Konverter zerstört.