



Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken bei der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) der Fakultät für Maschinenbau
und Schiffstechnik der Universität Rostock.

*vorgelegt von Rabea Steuer geb. Redmann
geboren am 26.06.1983 in Waren (Müritz)*

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler

Universität Rostock
Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik
Lehrstuhl für Werkstofftechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Franz Hoffmann

Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Abgabe: 27.08.2014, Verteidigung: 24.02.2015

„Alles Wissen und alles Vermehren unseres Wissens endet nicht mit einem Schlusspunkt
sondern mit einem Fragezeichen.“

Hermann Hesse

Kurzfassung

Das Abschrecken ist ein wesentlicher Teilschritt der Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe. Es wird überwiegend als Flüssigkeitsabschreckung durchgeführt, die aufgrund der unterschiedlichen Siedphasen inhomogen ist. Die Unterstützung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall ist eine innovative Möglichkeit, das Filmsieden durch eine Destabilisierung des Dampffilms zu beeinflussen. Im Rahmen dieser Arbeit werden der Einfluss der Ultraschallparameter auf Abschreckwirkung und Abschreckgleichmäßigkeit sowie die wirkenden Mechanismen der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung von Aluminium- (EN AW-6082) und Stahlzylindern (X5CrNi18-10, C45E) systematisch untersucht. Die Ultraschallunterstützung führt zu einer signifikanten Beeinflussung der Abschreckvorgänge. Mit Ultraschallunterstützung lässt sich der Wärmeübergang, insbesondere in der Filmsiedephase, im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zum Teil deutlich erhöhen. In axialer Richtung ist eine potentielle Vergleichsmäßigung der Abschreckung zu beobachten. In Umfangsrichtung der Probe zeigt sich eine ungleichmäßige Abschreckung verglichen zur konventionellen Abschreckung, die sich durch zwei gegenüberliegende Sonotroden jedoch deutlich verringern lässt. Ein zunehmender Einfluss auf die Abschreckwirkung ist mit zunehmender Ultraschallamplitude, abnehmendem Abstand zwischen Sonotrode und Probenoberfläche sowie zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche zu verzeichnen. Über die Prozessparameter lassen sich sowohl die Abschreckwirkung als auch die Abschreckgleichmäßigkeit gezielt beeinflussen, so dass sich ein weiter Bereich an Werkstoffstrukturen mit entsprechenden Werkstoffeigenschaften einstellen lässt. Als wesentliche Ursachen für die Beeinflussung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall werden der Schalldruck und der Schallstrahlungsdruck angesehen. Beide werden mit einer Reduzierung der Dampffilmdicke und einer damit verbundenen Erhöhung des Wärmeübergangs in die Abschreckflüssigkeit in Zusammenhang gebracht.

Abstract

Quenching is an important step during heat treatment of metals. Usually liquid quenching is performed, which is inhomogeneous due to the different boiling stages. The ultrasonic assisted liquid quenching is an innovative method to influence the film boiling stage by destabilising the vapour film. Within this study the influence of the ultrasonic parameters on the quenching power and homogeneity as well as the acting mechanisms of ultrasonic assisted liquid quenching of aluminium (6082) and steel cylinders (304, SAE 1045) are investigated systematically. The ultrasonic assistance leads to a significant alteration of the quenching processes. Compared to conventional quenching, the ultrasonic assistance causes an enhancement of the heat transfer, especially during the film boiling stage. Unidirectional ultrasound causes a potential quenching homogenisation in axial direction, but an inhomogeneity in circumferential direction compared to conventional quenching. This non-uniformity of unidirectional ultrasound is markedly reduced by bidirectional ultrasound. An increasing influence on quenching power is achieved by an increasing ultrasonic amplitude, a decreasing distance between sonotrode and sample and an increasing size of the sound emitting surface. By considering the process parameters, the quenching power as well as the quenching homogeneity can be strongly influenced. Consequently, a wide range of material structures and material properties can be achieved through ultrasonic assistance. Both, the acoustic pressure and the acoustic radiation pressure are seen to be the main reasons for influencing liquid quenching. They are associated with a reduction of the vapour film thickness and hence with an enhancement of the heat transfer to the liquid quenchant.

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Ultraschall.....	3
2.1.1	Begriffserläuterungen und Eigenschaften.....	3
2.1.2	Erzeugung von Ultraschall.....	6
2.2	Schallausbreitung in Flüssigkeiten.....	8
2.2.1	Wellengleichung	8
2.2.2	Nichtlineare Effekte	10
2.2.3	Schallgeschwindigkeit	12
2.3	Wärmebehandlung metallischer Bauteile	15
2.3.1	Bedeutung des Abschreckens	15
2.3.2	Flüssigkeitsabschreckung	16
2.3.3	Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken	21
3	Werkstoffe und Methoden	27
3.1	Untersuchte Werkstoffe	27
3.1.1	Aluminiumknetlegierung EN AW-6082	27
3.1.2	Austenitischer Stahl X5CrNi18-10	29
3.1.3	Vergütungsstahl C45E.....	32
3.2	Abschreckexperimente	33
3.2.1	Versuchseinrichtung	33
3.2.2	Proben	36
3.2.3	Versuchsparameter	37
3.2.4	Versuchsdurchführung	40
3.2.5	Auswertung der Temperatur-Zeit-Messdaten	42
3.2.6	Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten.....	44
3.3	Probencharakterisierung.....	50
3.3.1	Metallographische Untersuchungen	50
3.3.2	Härteprüfungen	51

3.3.3	Rissprüfungen.....	52
3.3.4	Eigenspannungsbestimmung.....	52
3.3.5	Verzugsbestimmung	53
4	Experimentelle Ergebnisse.....	55
4.1	Ergebnisdarstellung	55
4.2	Wasserabschreckung am Werkstoff EN AW-6082.....	57
4.2.1	Konventionelle Abschreckung.....	57
4.2.2	Einseitige Ultraschallunterstützung.....	60
4.2.2.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung	60
4.2.2.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	67
4.2.2.3	Charakterisierung der Eigenschaften	70
4.2.3	Zweiseitige Ultraschallunterstützung	73
4.2.3.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung	73
4.2.3.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	80
4.2.3.3	Charakterisierung der Eigenschaften	83
4.3	Wasserabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10.....	85
4.3.1	Konventionelle Abschreckung.....	85
4.3.2	Einseitige Ultraschallunterstützung	86
4.3.2.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung	86
4.3.2.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	95
4.3.2.3	Charakterisierung der Eigenschaften	97
4.3.3	Zweiseitige Ultraschallunterstützung	100
4.3.3.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung	100
4.3.3.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	108
4.3.3.3	Charakterisierung der Eigenschaften	111
4.4	Ölabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10	115
4.4.1	Charakterisierung der Abschreckwirkung	115
4.4.2	Beurteilung der Gleichmäßigkeit.....	121

4.4.3	Charakterisierung der Eigenschaften	123
4.5	Ergebnisse am Werkstoff C45E.....	125
4.5.1	Wasserabschreckung	125
4.5.2	Ölabschreckung	130
5	Simulation	141
5.1	Modellierung	141
5.2	Ergebnisse der Simulation.....	143
5.2.1	Einseitige Ultraschallunterstützung.....	143
5.2.2	Zweiseitige Ultraschallunterstützung	146
6	Diskussion.....	151
6.1	Einfluss des Ultraschalls und der Prozessparameter.....	151
6.2	Zusammenhang tangentialer Abkühlgleichmäßigkeit und Abkühlwirkung ..	158
6.3	Vergleich des Abkühlverhaltens der untersuchten Werkstoffe.....	162
6.4	Wirkmechanismen des Ultraschalls	165
6.5	Vergleich von Experiment und Simulation	169
6.6	Ausblick	172
7	Zusammenfassung.....	175
	Selbständigkeitserklärung.....	I
	Literaturverzeichnis	II
	Anhang	VIII
A.	Abkürzungsverzeichnis	VIII
B.	Symbolverzeichnis.....	VIII
C.	Abbildungsverzeichnis	X
D.	Tabellenverzeichnis	XVIII
E.	Verzeichnis im Rahmen der Promotion betreuter studentischer Arbeiten...XIX	
	Danksagung	XXI

1 Einleitung

Zu den am häufigsten angewandten metallischen Konstruktionswerkstoffen gehören Stähle und Aluminiumlegierungen. Um den hohen Anforderungen, vor allem in Bezug auf die Festigkeit, zu genügen, werden die Konstruktionswerkstoffe häufig einer Wärmebehandlung unterzogen. Die Wärmebehandlung zählt zu den wichtigsten Prozessen zur Einstellung von Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften metallischer Bauteile. Dem Abschrecken als Teilschritt der Wärmebehandlung kommt dabei häufig eine entscheidende Bedeutung zu, beispielsweise beim martensitischen Härteten von Stählen oder beim Ausscheidungshärteten von Aluminiumlegierungen. Während des Abschreckens erzeugte übersättigte Mischkristalle weisen eine hohe Mischkristallverfestigung auf oder stellen einen Ausgangszustand für spätere Teilchenverfestigungen dar.

Aufgrund des relativ geringen Aufwandes und der im Mittel hohen realisierbaren Abkühlgeschwindigkeiten wird das Abschrecken überwiegend in Flüssigkeitsbädern (Wasser, Öl) durchgeführt. Das Verdampfen des flüssigen Abschreckmediums an der Bauteiloberfläche – der sogenannte Leidenfrost-Effekt – führt dabei zu einer unerwünschten Ungleichmäßigkeit der Abschreckung. Bauteilverzug und Eigenspannungen können die Folge sein.

Eine innovative Möglichkeit, insbesondere das Filmsieden zu beeinflussen und somit die Flüssigkeitsabschreckung zu vergleichmäßigen, stellt die Unterstützung der Abschreckung mit Ultraschall dar. In den dazu existierenden Publikationen wird gezeigt, dass sich die Abkühlraten unter Ultraschallunterstützung im Vergleich zur konventionellen Abschreckung beeinflussen lassen. Zudem wird vielfach von einer Vergleichmäßigung des Abkühlprozesses durch die Ultraschallunterstützung gesprochen. Ungeklärt bleiben hingegen die Fragen zum Einfluss der

Ultraschallparameter auf die Abschreckwirkung und zu den zugrunde liegenden Wirkmechanismen als Ursache für die Beeinflussung der Abschreckung durch Ultraschall.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen daher der Einfluss der Ultraschallparameter auf die Abschreckwirkung und die Abschreckgleichmäßigkeit sowie die wirkenden Mechanismen der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung von Aluminium-(EN AW-6082) und Stahlzylindern (X5CrNi18-10, C45E) systematisch untersucht und charakterisiert werden.

Nach Entwicklung und Aufbau eines Versuchsstandes werden charakteristische Abschreckversuche sowohl mit als auch ohne Ultraschallunterstützung mit variierenden Prozessparametern durchgeführt. Anhand gemessener Abkühlverläufe werden Abkühlraten, Wärmeübergangskoeffizienten sowie Temperaturdifferenzen bestimmt, um sowohl Aussagen zur Beeinflussung der Abschreckwirkung als auch der Abschreckgleichmäßigkeit treffen zu können. Ausgewählte Proben werden einer Eigenschaftscharakterisierung unterzogen. Diese umfasst metallographische Untersuchungen, Härteprüfungen, Rissprüfungen, Eigenspannungs- sowie Verzugsbestimmungen. Anhand des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 wird zudem eine thermo-mechanische 3D-Modellierung und Simulation des Abschreckvorgangs mit Ultraschallunterstützung durchgeführt, um die Ergebnisse perspektivisch auf andere Werkstoffe und Geometrien übertragen zu können.

2 Stand der Technik

2.1 Ultraschall

2.1.1 Begriffserläuterungen und Eigenschaften

Die Akustik umfasst die Lehre von mechanischen Schwingungen in elastischen Medien. Dabei kann es sich um Gase, Flüssigkeiten und feste Körper handeln. Alle Erscheinungsformen, die mit der Erzeugung, der Ausbreitung sowie dem Empfang von Schall in Zusammenhang stehen, gehören der Akustik an. Bei der Einteilung dieser in Frequenzbereiche bildet der Infraschall den Bereich sehr niederfrequenter, nicht hörbarer Schwingungen. Mittelfrequente und hörbare Schwingungen werden als Schall bezeichnet, während Ultraschall denjenigen Bereich akustischer Erscheinungen umfasst, der aufgrund seiner hohen Frequenzen von 16 kHz bis 1 GHz [1, 2] im Allgemeinen oberhalb der Grenze des menschlichen Hörvermögens liegt.

Schall setzt sich im Allgemeinen aus mechanischen Schwingungen elastischer Medien zusammen. Derartige Schwingungen entstehen infolge einer sich ausbreitenden Verformung des Übertragungsmediums. Durch die Einwirkung äußerer Kräfte werden die Teilchen des elastischen Stoffes aus dem Gleichgewicht gebracht und sich anschließend selbst überlassen. Aufgrund ihrer Elastizitäts- und Trägheitskräfte kommt es zu einem meist periodischen Hin- und Herpendeln der Materienteilchen um deren ursprüngliche Ruhelage. [1]

Die Ausbreitung von Schall ist im Gegensatz zu der elektromagnetischer Wellen stets an Materie gebunden. Allgemein wird daher zwischen Körper-, Flüssigkeits- und Luftschall unterschieden. Die Schallausbreitung wird entscheidend durch das Medium beeinflusst, da sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch die Ausbreitungsdämpfung stark von diesem abhängig sind. [1, 3]

Der Schall breitet sich aus, indem die zum Schwingen angeregten Teilchen, aufgrund gegenseitiger Kopplungen und anderer Wechselwirkungen, wiederum benachbarte Teilchen zum Schwingen anregen. Diese führen mit einer zeitlichen Verzögerung gleiche oder ähnliche Schwingungen aus. Folge dieser einzelnen Bewegungsabläufe sind sich wellenartig ausbreitende Verdichtungen und Verdünnungen von Teilchen, wie Abbildung 1 veranschaulicht. Es entsteht eine fortschreitende Gesamtbewegung. In Fortpflanzungsrichtung dieser Wellenbewegung wiederholen sich dabei in bestimmten Abständen jeweils die gleichen Erregungszustände. Bei konstanter Anregungsfrequenz ergeben sich zwischen zwei aufeinander folgenden gleichartigen Erregungszuständen gleich große Abstände, welche die Wellenlänge λ der Schwingung darstellen. Das Produkt der Wellenlänge λ und Frequenz f entspricht der Geschwindigkeit c , mit der sich die Erregung ausbreitet. Diese wird als Schallwellen- oder Schallgeschwindigkeit bezeichnet. [1, 3]

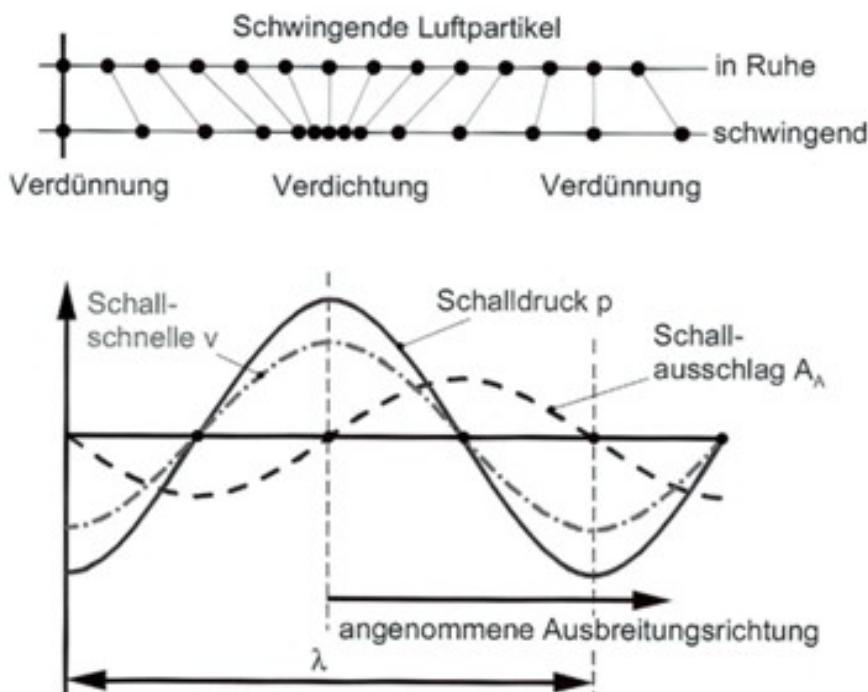


Abbildung 1: Momentdarstellung von Schallfeldgrößen in einer ebenen fortschreitenden Schallwelle [1].

Bei der Schallausbreitung schwingen die Teilchen stets nur um ihre Ruhelage, wandern jedoch nicht weiter, so dass kein Stofftransport stattfindet. Mit der Wellenbewegung kommt es lediglich zur Ausbreitung von Schallenergie. Aufgrund der Lageänderung der Teilchen ist die Schallausbreitung allerdings mit einer räumlichen und zeitlichen Änderung der Mediumdichte verbunden. In der Regel ist diese wiederum mit Druckschwankungen oder dem Auftreten bestimmter Reaktionskräfte verknüpft.

Mitunter können derartige Dichteänderungen des Mediums sogar zu Temperaturschwankungen führen. [1, 3]

In Flüssigkeiten und Gasen erfolgt die Schallausbreitung nahezu nur über Longitudinalwellen, d.h. die Schwingungen der Teilchen des Mediums erfolgen parallel zur Ausbreitungsrichtung des Schalls. Da Festkörper neben einer Volumen- auch eine Formelastizität aufweisen, kann sich der Schall hier auch über Transversalwellen fortpflanzen, d.h. die Mediumteilchen schwingen senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung. In Ausnahmefällen kann es auch in Flüssigkeiten zum Auftreten von Transversalwellen kommen. Voraussetzung hierfür ist eine sehr hohe Viskosität des Mediums. Die Transversalwellen unterliegen in diesen Fällen jedoch einer sehr starken Dämpfung. [1, 2, 4]

Der mit Materie ausgefüllte Raum, in dem sich Schall ausbreitet, wird als Schallfeld bezeichnet. Mit Hilfe sogenannter Schallfeldgrößen, die zum Teil in Abbildung 1 dargestellt sind, lässt sich das Schallfeld quantitativ beschreiben. Es handelt sich um physikalische Kenngrößen, die zur Kennzeichnung der Schallwelle dienen, aber auch von dieser verändert werden können. Zu den Schallfeldgrößen gehören neben der Auslenkung der Teilchen um ihre Ruhelage y auch die Geschwindigkeit \vec{v} , mit der diese Auslenkung erfolgt, welche als Schallschnelle bezeichnet wird, sowie die momentane Dichte ρ , der momentane Druck p_m und die Abweichung des Momentandrucks vom Ruhedruck p_0 , welcher auch Schallwechseldruck oder Schalldruck p genannt wird. [1, 3]

Aufgrund physikalischer Gesetze und der Eigenschaften des Mediums korrelieren die Schallfeldgrößen miteinander. So stellt der Quotient von Schalldruck zu Schallschnelle eine charakteristische Größe für jedes Schallübertragungsmedium dar:

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (2.1)$$

Diese wichtige lineare Kenngröße wird als Wellenwiderstand oder Schallkennimpedanz Z bezeichnet. Das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle ist ein Maß für die in einer Schallwelle transportierte Energie und wird Schallintensität oder –stärke I genannt. Sie leitet sich linear aus der Schallkennimpedanz ab:

$$I = p v = Z v^2 \quad (2.2)$$

Diese beiden Größen sind derart miteinander verknüpft, dass eine zeitliche Änderung der einen Größe eine entsprechende örtliche Änderung der anderen Größe verursacht

und umgekehrt. Bei sich wellenförmig ausbreitenden Schwingungen existieren stets beide Größen, die eine derartige Abhängigkeit voneinander aufweisen. [1, 3]

2.1.2 Erzeugung von Ultraschall

Grundsätzlich lässt sich die Generierung von Schallwellen, durch jegliche Art elastische Verformungen zu erzeugen, umsetzen. Dementsprechend existieren viele Methoden zur Erzeugung von Schall. Dazu gehören mechanische, thermische, optische, elektromechanische, magnetostriktive und piezoelektrische Prinzipien. [1-3]

Technische Ultraschallquellen bestehen, im Gegensatz zu Punktschallquellen, im Wesentlichen aus einer festen Fläche, die in Richtung ihrer Normalen Wechselbewegungen ausführt. Infolgedessen kommt es zur Verdrängung oder zum Ansaugen des umgebenden Mediums mit der Folge entstehender Verdichtungen und Verdünnungen, welche sich als Schallwellen im Medium ausbreiten. Um bei dieser Art Schallquelle eine optimale Schallabstrahlung zu erzielen, ist eine über die schallabgebende Fläche einheitliche Schwingungsschnelle zu realisieren. Bei Ultraschallfrequenzen wird dies erreicht, wenn die erregende Kraft gleichmäßig auf die abstrahlende Fläche einwirkt. Dies lässt sich am besten durch die Ausnutzung des piezoelektrischen Effektes umsetzen. Daher erfolgt der Aufbau elektroakustischer Ultraschallwandler überwiegend nach dem piezoelektrischen Prinzip. Piezoelektrische Wandler haben sich als einfachste und zugleich wichtigste Variante der Ultraschallerzeugung etabliert, da sie sich neben einer einfachen Konstruktion und Handhabung durch die Vielfältigkeit an Anwendungsmöglichkeiten auszeichnen. [1, 3]

Beim piezoelektrischen Effekt entstehen bei der Einwirkung einer Kraft auf ein piezoelektrisches Material infolge einer dielektrischen Verschiebung Oberflächenladungen, in deren Folge sich ein elektrisches Feld aufbaut, das als elektrische Spannung abgegriffen werden kann. Dieser Effekt lässt sich auch umkehren. Wirkt ein elektrisches Feld auf einen piezoelektrischen Körper, so wird dieser verformt bzw. übt eine Kraft aus. Diese Umkehrung wird als reziproker oder inverser piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Voraussetzung für das Auftreten sowohl des direkten als auch des reziproken piezoelektrischen Effekts sind nichtleitende Materialien. Dabei handelt es sich vorwiegend um Kristalle, beispielsweise Quarz, oder synthetisch hergestellte Keramiken. Der piezoelektrische Effekt wird dabei durch eine spezielle Asymmetrie im Kristallaufbau der piezoelektrischen Werkstoffe hervorgerufen.

[3]

Die in der Praxis gängigen Systeme zur Ultraschallerzeugung und –übertragung bestehen aus einem Ultraschallprozessor, einem Booster und einer Sonotrode. Der Ultraschallprozessor besteht aus einer elektrischen Komponente, dem Generator, und aus einer elektromechanischen Komponente, dem Ultraschallwandler. Diese beiden Komponenten sind in den meisten Fällen zur besseren Handhabung bezüglich Installation, Inbetriebnahme und Wartung konstruktiv voneinander getrennt. Durch elektrische Anregung im Generator werden unter Ausnutzung des reziproken piezoelektrischen Effekts im Schallwandler mechanische Schwingungen erzeugt. Über ein Amplitudenpotentiometer am Generator lässt sich eine oft stufenlose Feineinstellung der Ultraschallamplitude in einem festgelegten Bereich realisieren. Die Schallwellen verlassen den Wandler über dessen Horn, über das die Sonotrode bzw. der Booster mit Hilfe eines Gewindestiftes an den Ultraschallwandler gekoppelt werden. Der Booster ist ein Bauteil, das optional zwischen den Ultraschallwandler und die Sonotrode montiert werden kann. In Abhängigkeit von der jeweiligen Einbaurichtung dient dieser der Erhöhung oder der Verringerung der Ultraschallamplitude. Darüber hinaus stabilisiert er das Schwingungsverhalten. Die Sonotrode stellt die abschließende Komponente des Ultraschallsystems dar. Zur Übertragung der Schwingungen auf das zu beschallende Medium wird sie mit dem Ultraschallwandler oder dem Booster verbunden und leitet diese vom Erzeugungsort vorwiegend durch ihre Stirnfläche in das Medium. Abbildung 2 stellt schematisch den Aufbau eines solchen Ultraschallsystems dar.

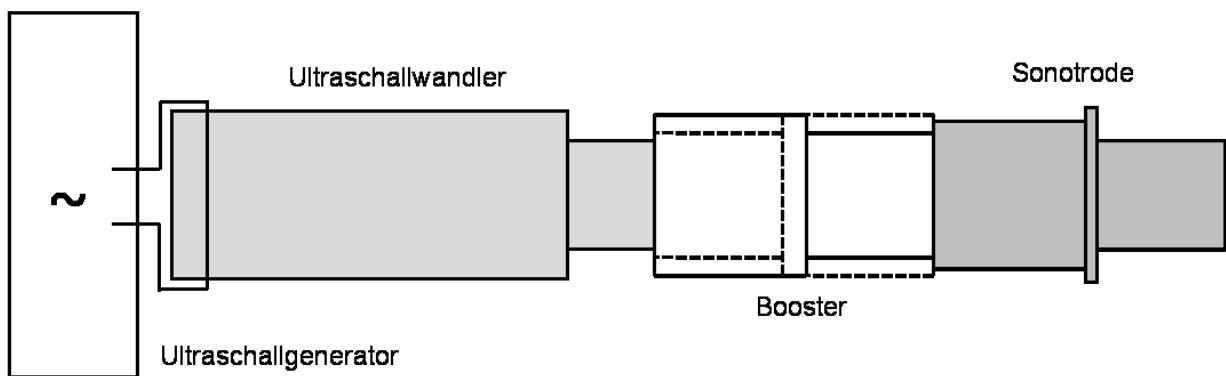


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Ultraschallsystems.

2.2 Schallausbreitung in Flüssigkeiten

2.2.1 Wellengleichung

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, existieren zwischen den Schallfeldgrößen aufgrund physikalischer Gesetze und der Eigenschaften des Mediums Zusammenhänge. Der Gesamtdruck p_g eines jeden Fluids hängt sowohl von der Gesamtdichte ρ_g als auch von der absoluten Temperatur T ab:

$$p_g = p_g(\rho_g, T) \quad (2.3)$$

Dieser Zusammenhang kann zu

$$p_g = p_g(\rho_g) \quad (2.4)$$

vereinfacht werden, da sich die Abhängigkeit des Druckes von der Temperatur im Frequenzbereich des Ultraschalls aufgrund sehr schnell ablaufender Zustandsänderungen und eines damit verbundenen kaum stattfindenden Wärmeaustauschs vernachlässigen lässt. Zustandsänderungen werden demnach als adiabatisch angesehen. [3]

Der Schalldruck und die schallbedingte Dichteänderung ergeben sich bezogen auf den Ruhezustand, welcher durch den Index 0 gekennzeichnet ist, folgendermaßen:

$$p = p_g - p_0 \quad (2.5)$$

$$\rho = \rho_g - \rho_0 \quad (2.6)$$

Die Verbindung von Schalldruck und Dichte mittels Taylorreihe ergibt:

$$p = \frac{A_1}{1!} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) + \frac{A_2}{2!} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^2 + \frac{A_3}{3!} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^3 + \dots + \frac{A_n}{n!} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n \quad (2.7)$$

$$\text{mit } A_i = \rho_0^i \left(\frac{d^i p}{d \rho^i} \right)_0$$

Aufgrund der Forderungen nach Impuls- und Masseerhaltung gelangt man über die folgenden Zusammenhänge zwischen Schalldruck und Dichte sowie Dichte und Schallschnelle \vec{v} neben Gleichung (2.4) zu den zwei weiteren nichtlinearen Grundgleichungen der Akustik [3]:

$$\operatorname{grad} p + \rho_g \frac{d\vec{v}}{dt} = 0 \quad (2.8)$$

$$\operatorname{div}(\rho_g \vec{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.9)$$

In der Akustik bedient man sich zur Beschreibung von Schallwellen für gewöhnlich jedoch einer vereinfachten Wellengleichung, die durch bestimmte Annahmen linearisiert wird. Da die Änderungen von Schalldruck und Dichte während der Schallausbreitung im Medium gegenüber den Werten des Ruhezustandes p_0 und ρ_0 häufig sehr klein sind [3], werden die Terme höherer Ordnung der Gleichung (2.7) vernachlässigt, so dass sich für die erste lineare Grundgleichung folgender Zusammenhang ergibt:

$$p = \frac{A}{1!} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) = \frac{\rho_0}{1!} \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) = c^2 \rho \quad (2.10)$$

$$\text{mit} \quad c^2 = \frac{dp}{d\rho} \approx \left(\frac{dp}{d\rho} \right)_0$$

Die zwei weiteren linearen Grundgleichungen ergeben sich unter der Annahme hinreichend kleiner Schallschnellen. Ersetzt man in den Gleichungen (2.8) und (2.9) außerdem ρ_g durch ρ_0 , erhält man:

$$\text{grad } p + \rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

$$\rho_0 c^2 \text{div } \vec{v} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

Durch Eliminieren der Schallschnelle aus diesen Gleichungen erhält man die partielle Differentialgleichung 2. Ordnung der Wellengleichung:

$$\text{div} (\text{grad } p) = \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.13)$$

In der Regel beschreibt diese Gleichung die Schallausbreitung hinreichend genau. Strenggenommen gilt sie jedoch nur für sehr kleine Schallfeldamplituden. Bei höheren Amplituden treten häufig Effekte auf, die nicht mit der linearisierten Wellengleichung beschrieben werden können. In diesen Fällen werden die nicht berücksichtigten Nichtlinearitäten der Gleichung deutlich. Einige dieser nichtlinearen Effekte spielen besonders im Bereich des Ultraschalls eine wichtige Rolle und sollen daher im Folgenden beschrieben werden. [2, 3]

2.2.2 Nichtlineare Effekte

Ultraschallwind

In akustischen Feldern können sich konstante Strömungen unterschiedlicher Art ausbilden. Beim Ultraschallwind – einem in Ultraschallfeldern auftretenden nichtlinearen Effekt – handelt es sich um solch eine Gleichströmung, welche sich in Fluiden vor einer schwingenden Fläche ausbildet. Während die Teilchen des Mediums in einer Schwingungsphase vom Schallsender in dessen Ausbreitungsrichtung weggeschleudert werden, werden sie in der entgegengesetzten Schwingungsphase aus nahezu allen Richtungen angesaugt. In der folgenden Schwingungsphase werden auch diese Teilchen in Achsrichtung weggestoßen. So entsteht infolge einer Art Gleichrichterwirkung der Ultraschallwind. Dieser wird auch als Quarzwind (veraltet) bezeichnet und ist unter dem englischen Begriff „Acoustic Streaming“ bekannt. Hohe Ultraschallintensitäten (Leistungsultraschall) führen zur Turbulenz des Ultraschallwindes. Die leistungsstarke Strömung sorgt in diesen Fällen für eine intensive Durchmischung des angeregten Fluids. [3, 5, 6]

Langevinscher Schallstrahlungsdruck

Wird in einem ruhenden Medium ein begrenzter Schallstrahl durch eine Schallwelle gebildet, kommt es zum Nachströmen des Mediums aus den Nachbarbereichen in den Schallstrahl. Grund dafür ist ein in einer ebenen Schallwelle entstehender Unterdruck, welcher sowohl temporal als auch lokal konstant ist. Durch die Materieeinströmung erfolgt ein Ausgleich dieses Unterdrucks. Das Nachströmen aus den umgebenden Gebieten findet solange statt, bis sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Bei Verringerung der Energiedichte des Schallstrahls, beispielsweise hervorgerufen durch Verluste im Medium, kommt es zur Freisetzung eines Teils des nachströmenden Mediums, infolgedessen ein in Richtung des Energiedichtegefälles wirkender Druck erzeugt wird. Dabei handelt es sich um den Langevinschen Schallstrahlungsdruck, einem weiteren nichtlinearen Effekt der Akustik. Dieser Schallstrahlungsdruck ist an den Grenzschichten von Flüssigkeiten zu beobachten und zeigt sich durch diverse Strömungseffekte, zum Teil sogar durch die Bildung von Strudeln und Fontänen. [2-5]

Kavitation

Die Kavitation, die ebenfalls zu den nichtlinearen Effekten von Schallfeldern gehört und deshalb zur Inhomogenität des Mediums führt, ist eine typische Erscheinung von

Ultraschallfeldern hoher Intensitäten in Flüssigkeiten. Als Kavitation bezeichnet man die Bildung von Hohlräumen in einer Flüssigkeit unter Einwirkung hoher Zugkräfte. Diese entstehen beim Unterschreiten des statischen Drucks unter den Dampfdruck der Flüssigkeit aufgrund des Bernoullischen Gesetzes und durch die in Schallwellen oder kurzen Schallimpulsen auftretenden Unterdrücke. Die Lebensdauer der so gebildeten Kavitationsblasen ist jedoch entsprechend der äußeren Umstände beschränkt. In Abhängigkeit von Art und Reinheitsgrad der Flüssigkeit, von Stärke und Frequenz des Schallfelds sowie weiteren Bedingungen ergeben sich vielfältige Erscheinungsformen der Kavitation. Grundsätzlich unterscheidet man zwei Grenzfälle: die Gas- und die Dampfkavitation. [3, 4]

Die Gaskavitation, die auch „weiche“ oder stabile Kavitation genannt wird, entsteht in Flüssigkeiten, die gelöste Gase enthalten. Schon relativ kleine Schallwechseldrücke können eine Entwicklung von größeren Gasblasen verursachen. Diese Kavitationsgasblasen entstehen an Keimen, Gasresten oder kleinen festen Partikeln. Der Gasdruck im Blaseninneren ergibt sich aus dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeit und dem von der Oberflächenspannung der Flüssigkeit erzeugten Binnendruck. Somit ist der Gasdruck größer als der Partialdruck des gelösten Gases, was zu einer Diffusion des Gases aus der Blase in die Flüssigkeit führt. Dies wiederum führt entweder zu einer Verkleinerung oder zu einer kompletten Auflösung der Blase. In Überdruckphasen findet keine Diffusion des Blasengases statt und es kommt zum Aufsteigen der Blasen. Folgen der weichen Kavitation bei höheren Ultraschallintensitäten sind das Auftreten von Unterschwingungen sowie entstehende Wellen auf der Blasenoberfläche, durch welche die Blasen mitunter zerstört werden können. [3, 4]

Die Dampfkavitation wird auch als „harte“, „echte“ oder transiente Kavitation bezeichnet. Sie tritt in völlig entgasten oder gereinigten Flüssigkeiten unter Einwirkung sehr hoher Schallintensitäten auf. Wie der Name schon sagt, sind die Kavitationsblasen mit Dampf der Flüssigkeit gefüllt. In Gebieten, in denen der Umgebungsdruck den Dampfdruck übersteigt, fallen die Blasen zusammen und implodieren. Infolge dieses Blasenkollapses entstehen im Blaseninneren extrem hohe Drücke und Temperaturen, die wiederum starke Schallwirkungen, beispielsweise die Erzeugung einer sekundären sphärischen Stoßwelle, kavitationsbedingte Lichterscheinungen (Sonolumineszenz) als auch chemische Umwandlungsprozesse (Sonochemie) mit sich bringen können. Das durch die örtlich auftretenden sehr hohen Druckspitzen entstehende intensive Geräusch ist das sogenannte Kavitationsrauschen. [2-5]

Im realen Ultraschallfeld entsteht eine Vielzahl von Kavitationsblasen. Diese und die einzeln stattfindenden Implosionen beeinflussen sich gegenseitig. Kavitationsblasen ziehen sich einerseits gegenseitig an, können miteinander verschmelzen und sich auch wieder in mehrere Teilblasen aufteilen. Andererseits kann es infolge von Schwingungen "benachbarter" Blasen zu Verformungen und Einschnürungen dieser kommen. Dies führt zur Entstehung feiner Flüssigkeitsstrahlen, welche selbst wiederum Einfluss auf umgebende Blasen haben. Zudem führt die Kavitation zu einer Veränderung der akustischen Eigenschaften der Flüssigkeit. An Kavitationsblasen wird der Ultraschall gestreut und stark gedämpft. Auch der Strahlungsdruck, der die Geschwindigkeit der akustischen Strömung im Medium bestimmt, wird durch Kavitationsblasen derart beeinflusst, dass Strömungen mitunter verstärkt werden oder die Flüssigkeit intensiv durchmischt wird. [3, 5]

2.2.3 Schallgeschwindigkeit

Eine entscheidende Bedeutung bei der Schallausbreitung in Flüssigkeiten kommt der Schallgeschwindigkeit zu. Den Ausgangspunkt zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit soll Gleichung (2.10) darstellen. Der Term $\partial p / \partial \rho$ in dieser Gleichung resultiert daraus, dass in einer kompressiblen Flüssigkeit eine lokale Druckänderung ∂p zu einer Volumenänderung ∂V und damit zu einer Dichteänderung $\partial \rho$ führt. Diese Volumenänderung ergibt sich aus:

$$\partial V = -\beta_{Fl} V_0 \partial p \quad (2.14)$$

mit Ausgangsvolumen V_0

Kompressibilitätszahl der Flüssigkeit β_{Fl}

Wegen der Forderung der Masseerhaltung eines geschlossenen Volumens

$$\frac{\partial V}{V_0} = -\frac{\partial \rho}{\rho_0} \quad (2.15)$$

ergeben sich aus Gleichung (2.14) die Verhältnisse:

$$\frac{\partial V}{V_0} = -\beta_{Fl} \partial p = -\frac{\partial \rho}{\rho_0} \quad (2.16)$$

oder

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = \frac{1}{\beta_{Fl} \rho_0} \quad (2.17)$$

Für die Schallgeschwindigkeit einer Flüssigkeit ergibt sich mit Blick auf Gleichung (2.10):

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{1}{\beta_{Fl}\rho_0}} \quad (2.18)$$

Ersetzt man die Kompressibilitätszahl β_{Fl} durch den Kompressionsmodul K_{Fl}

$$K_{Fl} = \frac{1}{\beta_{Fl}} \quad (2.19),$$

erhält man den allgemeinen Zusammenhang für die Schallgeschwindigkeit [7]:

$$c_{Fl} = \sqrt{\frac{K_{Fl}}{\rho_0}} \quad (2.20)$$

In Tabelle 1 werden die Schallgeschwindigkeiten unterschiedlicher Flüssigkeiten gegenübergestellt.

Tabelle 1: Schallgeschwindigkeiten und Dichten unterschiedlicher Flüssigkeiten im Vergleich (bei einem Druck von 10^5 Pa und einer Temperatur von 20 °C).

Medium	Dichte in g/cm ³	Schallgeschwindigkeit in m/s	Quelle
Aceton	0,792	1190	[8]
		1190	[9]
Hydrauliköl (luftfrei)	0,9	1280	[8]
Abschrecköl (Isomax 166)	0,86	1431	eigene Messung *
Quecksilber	13,551	1451	[8]
		1450	[9]
Destilliertes Wasser	0,998	1482	[10]
		1482	[11]
		1482	eigene Messung *
		1483	[12]
		1483	[9]
Reines Wasser ¹	0,998	1468	[13]
		1482	[14]
		1482	[15]
		1483	[16]
		1483	[17]
Rostocker Leitungswasser	0,998	1483	eigene Messung *
Meerwasser (Salzgehalt von ca. 3 %)	1,025	1520	[15]
		1522	[9]

* gemessen mittels Dichte- und Schallgeschwindigkeitsmessgerät DSA 5000 M (Fa. Anton Paar) am Institut für Chemie | Abteilung Physikalische Chemie | Universität Rostock

Die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten ist von der Dichte und somit auch von der Temperatur abhängig. In nahezu allen Flüssigkeiten sinkt die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur monoton [5, 18]. In Wasser, das eine Ausnahme darstellt, nimmt die Schallgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zunächst bis zu einem Maximum zu, bevor sie dann abfällt. Abbildung 3 veranschaulicht die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur für Wasser.

¹ Übersetzung von "pure water"

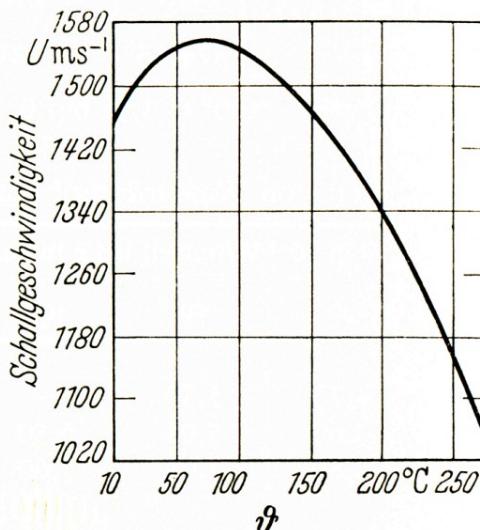


Abbildung 3: Schallgeschwindigkeit von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur [19].

In Tabelle 2 ist das Maximum der Schallgeschwindigkeit in Wasser verschiedener Literaturquellen aufgelistet.

Tabelle 2: Maximale Schallgeschwindigkeit in Wasser.

Maximale Schallgeschwindigkeit in m/s	Temperatur in °C	Wasserart	Quelle
1551	74	nicht angegeben	[18]
1555,47	74	nicht angegeben	[12]
1554,5	73,98	rein	[17]
1555,147	74,2	rein	[14]
1552,7	72,7	destilliert	[20]
1555,09	74,2	destilliert	[21]
1555,11	74,19	destilliert	[22]

2.3 Wärmebehandlung metallischer Bauteile

2.3.1 Bedeutung des Abschreckens

Die Einstellung spezieller mechanischer Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften ist ein primäres Ziel bei der Herstellung metallischer Bauteile. Die Wärmebehandlung stellt einen der wichtigsten Prozesse zur Erzielung solcher gewünschter Eigenschaften dar. Dem Teilschritt des Abschreckens kommt häufig eine entscheidende Bedeutung zu, beispielsweise beim Ausscheidungshärten von Aluminiumlegierungen oder beim martensitischen Härteln von Stählen.

Eine ausreichend schnelle Abkühlung sorgt für die Unterdrückung der Diffusionsvorgänge, wodurch die Ausbildung des Phasengleichgewichts verhindert wird. Die Legierungselemente werden stattdessen in übersättigter Zwangslösung gehalten, so dass ein übersättigter Mischkristall entsteht. Dieser kann entweder Ausgangszustand für eine nachfolgende Teilchenverfestigung sein oder selbst eine hohe Mischkristallverfestigung aufweisen. Die Geschwindigkeit, die mindestens erforderlich ist, um den Mischkristall vollständig übersättigt zu erhalten, wird als kritische Abschreckgeschwindigkeit bezeichnet.

Zur Einstellung eines übersättigten Mischkristalls mit zweckmäßigen Eigenschaften muss das Bauteil mit einer entsprechend hohen Geschwindigkeit abgekühlt werden. Eine zu hohe Geschwindigkeit beim Abschrecken kann jedoch zu vermeidbaren Maß- und Formänderungen sowie zur Ausbildung von hohen Eigenspannungen, mitunter sogar zur Rissbildung im Werkstück führen. Bei einer zu geringen Abschreckgeschwindigkeit kommt es allerdings bereits während des Abkühlprozesses zu Ausscheidungen der überschüssig gelösten Bestandteile, was sich negativ auf die gewünschten Eigenschaften auswirkt. Daher sollte die Geschwindigkeit während des Abschreckvorgangs stets so hoch wie nötig, jedoch so gering wie möglich gewählt werden.

2.3.2 Flüssigkeitsabschreckung

Da sich in Flüssigkeitsbädern im Mittel hohe Abkühlgeschwindigkeiten realisieren lassen, eignen sich diese besonders gut zum Abschrecken. Je nach Lage der Siedetemperatur des Mediums verglichen mit der Eintauchtemperatur des Werkstücks werden zwei Gruppen flüssiger Abschreckmedien unterschieden. Eine dieser Gruppen umfasst die Salz- und Metallschmelzen, bei denen die Siedetemperatur oberhalb der Eintauchtemperatur des Werkstücks liegt (nicht verdampfend). Hier erfolgt der Wärmetransport durch Konvektion. Die wesentlichen Nachteile dieser Gruppe sind die Notwendigkeit einer nachfolgenden, aufwändigen Reinigung der Bauteile sowie die relativ hohen Betriebstemperaturen. Wasser, wässrige Lösungen und Öle gehören der zweiten Gruppe flüssiger Abschreckmedien an (verdampfende Flüssigkeiten). Die Siedetemperatur dieser Medien liegt unterhalb der Eintauchtemperatur des abzuschreckenden Bauteils. Im Gegensatz zur ersten Gruppe zeichnen sich verdampfende Flüssigkeiten neben relativ hohen durchschnittlichen Abschreckgeschwindigkeiten durch relativ günstige Anwendungsbedingungen

bezüglich Aufwand und Kosten aus. [23]

Abbildung 4 und Abbildung 5 veranschaulichen den vierphasigen Abkühlvorgang der verdampfenden Flüssigkeiten schematisch.

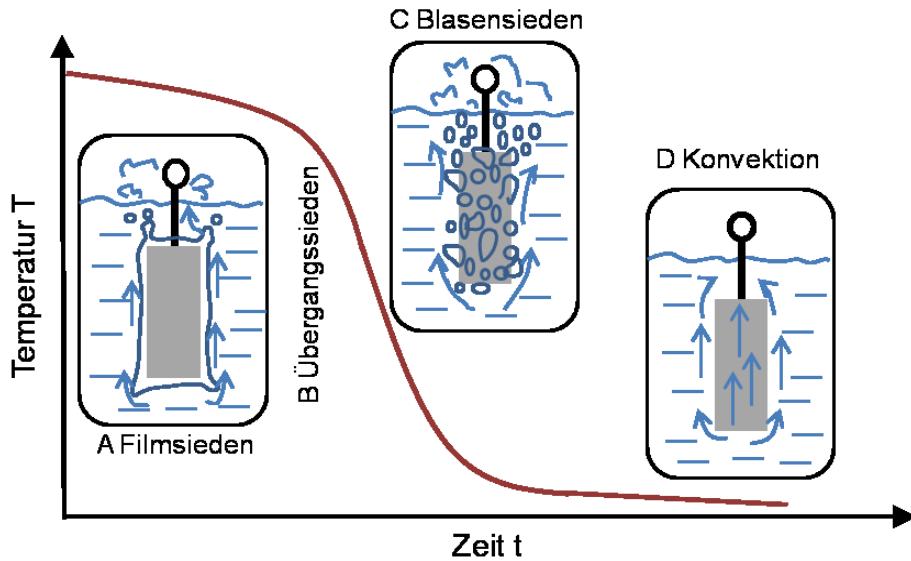


Abbildung 4: Abkühlphasen verdampfender Abschreckflüssigkeiten in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit.

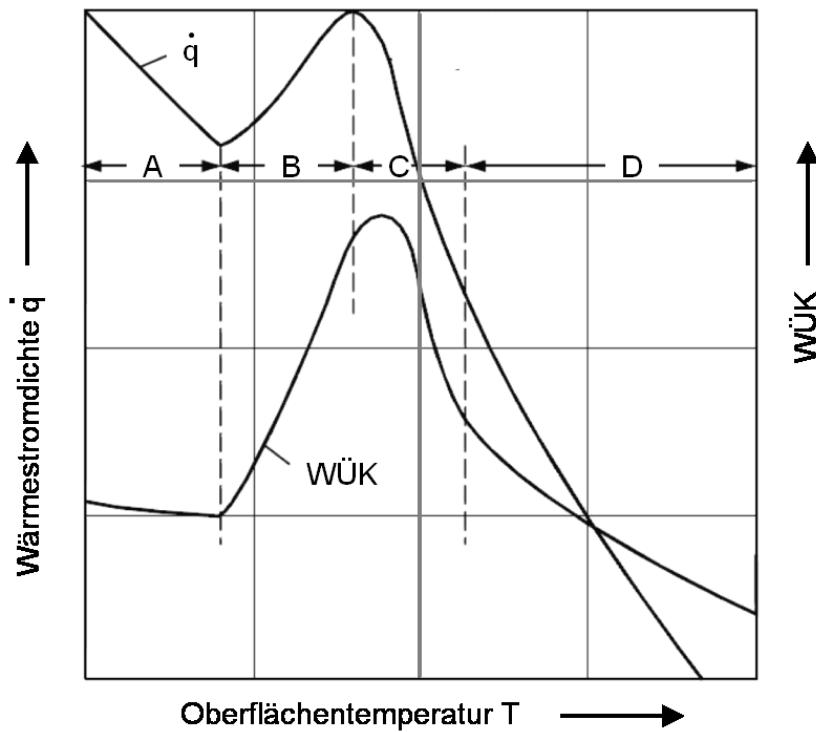


Abbildung 5: Abkühlphasen verdampfender Abschreckflüssigkeiten in Anlehnung an [24] in Abhängigkeit von Wärmestromdichte, Wärmeübergangskoeffizient und Temperatur – A Filmsieden, B Übergangssieden, C Blasensieden, D Konvektion.

Nach dem Eintauchen des heißen Werkstücks nimmt das Abschreckmedium in unmittelbarer Nähe zur Werkstückoberfläche deren Temperatur an. Infolgedessen verdampft das Abschreckmedium. Dieses Phänomen wird Leidenfrost-Effekt genannt.

Der sich bildende Dampffilm weist eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als die Flüssigkeit auf. In dieser Phase des sogenannten Filmsiedens verursacht die wärmeisolierende Wirkung des geschlossenen Dampffilms eine erhebliche Beeinträchtigung der Abkühlung mit einem nur geringen Wärmestrom ins Abschreckmedium und damit verbundenen, relativ kleinen Abkühlgeschwindigkeiten. Der Wärmeübergang in der Filmphase ist dabei hauptsächlich von der Temperatur der Werkstückoberfläche und der Temperatur des Mediums abhängig [25]. Außerdem wird der Wärmeübergang durch Geometrie, Abmessungen und Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils beeinflusst [25].

Die Wärmeabfuhr durch den Dampffilm hindurch bis zur Grenzfläche von Dampf und Flüssigkeit erfolgt durch Wärmeleitung \dot{q}_λ und Wärmestrahlung \dot{q}_ε . An dieser Grenzfläche wird die Wärme zum Teil zur Verdampfung \dot{q}_v des Abschreckmediums genutzt, der Rest wird durch Konvektion \dot{q}_α im Abschreckmedium abgeführt [26, 27]. In Abbildung 6 sind diese Wärmeübergangsmechanismen der Filmsiedephase schematisch dargestellt.

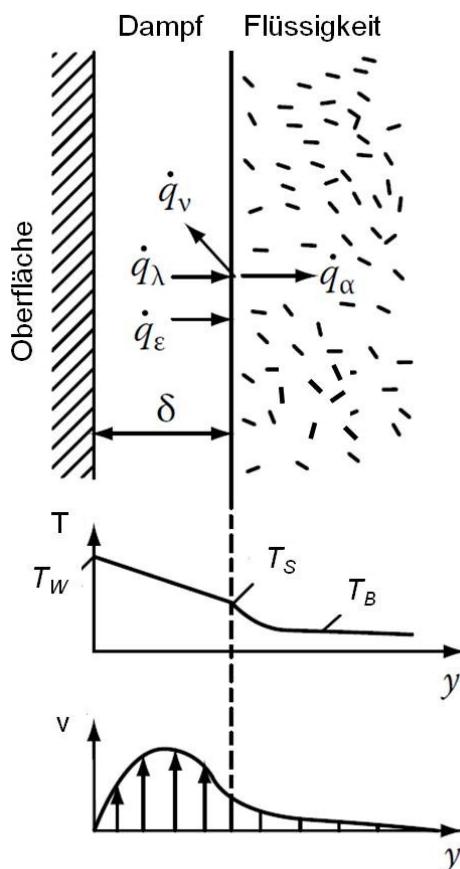


Abbildung 6: Wärmeübergangsmechanismen in der Filmsiedephase in Anlehnung an [25].

Diese Abbildung veranschaulicht zudem die Temperaturabnahme von der Wandtemperatur T_W durch den Dampffilm (mit der Dicke δ) hindurch bis zur Grenzfläche von Dampf und Flüssigkeit, wo die Siedetemperatur T_S der Flüssigkeit erreicht wird. In endlicher Entfernung von der Phasengrenzfläche herrscht dann die Badtemperatur T_B vor. Auch das Geschwindigkeitsprofil $v(y)$ von Dampf und Flüssigkeit, welches aus Dichteunterschieden resultiert, wird gezeigt.

Laut LIŠČIĆ et al. [25] kann die Wärmeabfuhr durch Wärmestrahlung für übliche Bauteiltemperaturen vernachlässigt werden. Zudem herrscht nur bei Badtemperaturen nahe der Siedetemperatur ein merklicher Anteil an Verdampfungswärme vor. Für relevante Badtemperaturen kann diese damit auch vernachlässigt werden.

Setzt man unter diesen Voraussetzungen den Wärmestrom, der durch den Dampffilm mittels Wärmeleitung transportiert wird, und den an der Phasengrenzfläche Dampffilm/Flüssigkeit übertragenen Wärmestrom gleich, erhält man folgenden Zusammenhang [28]:

$$\frac{\lambda_D}{\delta} (T_W - T_S) = \alpha_{konv.} (T_S - T_B) \quad (2.21)$$

mit Wärmeleitfähigkeit des Dampfes λ_D

Die Dampffilmdicke δ ist damit umgekehrt proportional zum Wärmeübergangskoeffizient im Fluid $\alpha_{konv.}$:

$$\delta = \frac{\lambda_D}{\alpha_{konv.}} \frac{T_W - T_S}{T_S - T_B} \quad (2.22)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient im Medium ist dabei neben dessen thermophysikalischen Eigenschaften und der Temperatur wesentlich von den vorherrschenden Strömungsverhältnissen abhängig [29].

Zudem nimmt die Dampffilmdicke mit abnehmender Differenz zwischen Siede- und Badtemperatur, also zunehmender Badtemperatur, zu.

Unterschreitet die Temperatur des Werkstücks die sogenannte Leidenfrost-Temperatur, so kollabiert der Dampffilm und das Blasensieden beginnt. Dies geschieht häufig nicht übergangslos. Das sogenannte Übergangssieden wird als Kombination aus unstabilem Film- und instabilem Blasensieden definiert [25]. Die Leidenfrost-Temperatur ist vom Abschreckmedium, vom abzuschreckenden Bauteil sowie von den Abschreckbedingungen [30], wie beispielsweise der Überführungsphase des Werkstücks vom Ofen zum Abschreckbad [31] oder der Eintauchgeschwindigkeit des Werkstücks [25],

abhängig. Neben der Art des Mediums stellen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit sowie eventuelle Verunreinigungen Einflüsse auf den Leidenfrost-Punkt dar [28, 30]. Bezuglich des abzuschreckenden Werkstücks wirken sich die Oberflächenbeschaffenheit, wie beispielsweise Rauheit, Verzunderung oder Verunreinigungen, die Geometrie und Abmessungen sowie die thermischen Eigenschaften des Werkstoffs auf die genaue Leidenfrost-Temperatur aus [30, 31]. Hinzu kommt, dass der Zusammenbruch des Dampffilms in Abhängigkeit vom Bauteil und den Abschreckbedingungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten sowie lokal zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt. Damit ergeben sich lokal unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten. Ein entscheidender Einflussfaktor bezüglich der Stabilität des Filmsiedens ist die Temperaturdifferenz zwischen Siede- und Badtemperatur. In Wasser beträgt die Temperatur, die das stabile vom instabilen Filmsieden trennt, laut LIŠČIĆ et al. [25] 85 °C. Zwischen 60 °C und 85 °C sinkt dabei mit zunehmender Badtemperatur jedoch die Temperatur, oberhalb welcher das Filmsieden stabil ist.

In der Phase des Blasensiedens, die auch als Kochphase bezeichnet wird, kommt es zum direkten Kontakt des flüssigen Abschreckmediums mit der heißen Werkstückoberfläche. Die Flüssigkeit verdampft dabei lokal schlagartig. Infolge der dabei entstehenden intensiven Blasenentwicklung kommt es zur Ausbildung einer turbulenten Strömung. Der Großteil der Wärmemenge wird durch die entstehende Strömung abgeführt, während die sich bildenden Dampfblasen nur einen geringen Anteil der abgeföhrten Wärmemenge transportieren [32]. Die sich ablösenden Dampfblasen führen die erwärmte Flüssigkeit aus dem Gebiet der Phasengrenze mit sich und kältere Flüssigkeitsanteile strömen nach [32]. Durch eine steigende Anzahl der sich bildenden und ablösenden Blasen mit abnehmender Temperatur kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des Wärmestroms aus dem Werkstück und dementsprechend hohen Abkühlgeschwindigkeiten. Insgesamt ist das Blasensieden durch eine starke Abkühlwirkung gekennzeichnet.

Unterhalb der Siedetemperatur des Abschreckmediums setzt die Konvektionsphase ein. In dieser Phase kommt es zu einer laminaren Strömung des Kühlmediums entlang der Werkstückoberfläche mit entsprechend kleinen Wärmeströmen und Abkühlgeschwindigkeiten. Die Wärme wird in dieser Abkühlphase ausschließlich durch Konvektion abgeführt. Der Wärmeübergang ist dabei von der Strömung und der Viskosität des Mediums abhängig [33].

Aufgrund des Leidenfrost-Effekts findet bei dieser Gruppe flüssiger Abschreckmedien eine ungleichmäßige Abschreckung mit lokal und temporal veränderlichen Wärmeübergangskoeffizienten statt. Folgen dieser inhomogenen Abschreckung sind die Ausbildung von Eigenspannungen und vermeidbarem Bauteilverzug. Außerdem kann es infolge verschiedener Abkühlgeschwindigkeiten zu einer ungleichmäßigen Eigenschaftsverteilung kommen. In konventionellen Abschreckbädern lässt sich der Wärmeübergang, wenn auch nur begrenzt, durch Temperatur, Umlözung oder Zugabe von Zusätzen vergleichmäßigen. Bei der Verwendung von Öl und bei der Abschreckung in Wasser mit Zusätzen ergibt sich der Nachteil einer erforderlichen Reinigung des Abschreckgutes, was wiederum mit einer Erhöhung sowohl des zeitlichen als auch finanziellen Aufwandes verbunden ist.

2.3.3 Ultraschallunterstütztes Flüssigkeitsabschrecken

Um die negativen Folgen der ungleichmäßigen Flüssigkeitsabschreckung, die durch den Leidenfrost-Effekt hervorgerufen wird, zu minimieren bzw. zu beseitigen, wird nach Möglichkeiten gesucht, den Abschreckvorgang homogener zu gestalten.

Eine Variante, eine gleichmäßigere Abkühlung bei Ausnutzung aller Vorteile der Flüssigkeitsabschreckung zu erzielen, ist die derartige Beeinflussung des Abschreckvorgangs, welche insbesondere das Filmsieden in seiner Wirkung verringert oder sogar gänzlich unterdrückt. Eine der in der Literatur diskutierten Möglichkeiten stellt die Anwendung von Ultraschall dar. Diese Variante erscheint aufgrund zahlreicher Vorteile sehr erfolgversprechend. Da sich Ultraschall in Flüssigkeiten einkoppeln lässt, müssen die abzuschreckenden Werkstücke nicht direkt mit dem Schall kontaktiert werden. Die Nachrüstung vorhandener Abschreckbäder mit Ultraschallprozessoren lässt sich relativ einfach gestalten. Der leicht zu erzeugende Ultraschall besitzt zudem die hervorragende Eigenschaft einer geringen Energiedissipation bei der Ausbreitung in Flüssigkeiten. Darüber hinaus ist es möglich, sowohl örtlich als auch zeitlich Variationen des Ultraschallfeldes zu erzeugen und den Abschreckvorgang damit wiederum zu beeinflussen.

Der Einfluss von Ultraschall auf den Wärmeübergang an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen wurde bisher schon in relativ großem Umfang untersucht. Tabelle 3 zeigt eine Übersicht von Literaturquellen, einschließlich einer Auflistung angenommener Ursachen für den Ultraschalleinfluss, der untersuchten Einflussparametern sowie der maximal erzielten Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) im Vergleich zu dem ohne Ultraschall erreichten Wärmeübergang.

Tabelle 3: Literaturübersicht zu Untersuchungen des Wärmeübergangs an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen durch Ultraschallunterstützung.

Autor/Jahr	Ursache für Ultraschalleinfluss	Parameter mit Einfluss	max. erzielte Steigerung des WÜK um
Fand/1965 [34]	Kavitation		33 %
Wong/1969 [35]	Kavitation		800 %
Yukawa/1976 [36]	Ultraschallwind	Ultraschallintensität, Einfallsinkel	300 %
Hoshino/1976 [37]	Schallstrahlungsdruck	Winkel zwischen Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls und Richtung der Wärmeauftriebskraft	
Hoshino/1979 [38]	Schallstrahlungsdruck		50 %
Park/1988 [39]	Ultraschallwind		
Iida/1989 [40]		Ultraschallleistung	100 %
Nakayama/1991 [41]	Kavitation		100 %
Nomura/1993 [42]	Kavitation, Ultraschallwind		
Yamashiro/1996 [43]	Schalldruck	Ultraschallleistung	
Yamashiro/1998 [44]		Ultraschallfrequenz, Ultraschallleistung, Schalldruck	
Yamashiro/1998 [45]	Kavitation	Kavitationsintensität, Schalldruck	
Nomura/2000 [46]	Kavitation, Ultraschallwind, Schalldruck	Ultraschallfrequenz, Schalldruck, Abstand	

Autor/Jahr	Ursache für Ultraschalleinfluss	Parameter mit Einfluss	max. erzielte Steigerung des WÜK um
Nomura/2002 [47]	Kavitation (entgastes Wasser), Ultraschallwind (Leitungswasser)	Ultraschallleistung, Abstand, Gasgehalt im Wasser	1900 %
Kim/2004 [48]	Kavitation		65 %
Kwon/2005 [49]	dynamisches Verhalten der Blasen, Strömung	Wassertemperatur, Einfallwinkel	
Bartoli/2011 [50]	Kavitation	Wassertemperatur, Ultraschallleistung, Abstand	62 %
Bartoli/2012 [51]	Kavitation	Wassertemperatur, Ultraschallleistung, Abstand	57 %
Legay/2012 [52]	Kavitation, Schwingung des Festkörpers		
Baffigi/2012 [53]	Kavitation		24 %
Rahimi/2012 [54]	"Microstreams"		

Der Wärmeübergang an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen kann durch Ultraschall wesentlich gesteigert werden. Eine Nutzung dieser Resultate für die Wärmebehandlung, insbesondere zur Ursache des Ultraschalleinflusses, ist jedoch nur begrenzt möglich, da häufig keine Untersuchungsergebnisse vorliegen, die die angenommenen Ursachen bestätigen.

Neben diesen Studien existieren jedoch nur einige Veröffentlichungen, die sich konkret mit dem ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschrecken als Teil der Wärmebehandlung metallischer Bauteile beschäftigen.

1966 berichtete HARVEY [55] von der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung und deren Vorteilen gegenüber der konventionellen Abschreckung. Durch die Anwendung von Ultraschall mit einer Frequenz von 20 kHz ließen sich Abschreckgeschwindigkeit sowie Gleichmäßigkeit des Abschreckens in Öl, Wasser und Salzschnelzen wesentlich steigern. HARVEY [55] behauptete, dass die Ausbildung der Dampfhaut durch die bei Ultraschallunterstützung induzierte Kavitation völlig eliminiert werden kann.

Im gleichen Jahr erschien eine Veröffentlichung von CHACHIN et al. [56], welche die Öl- und Wasserabschreckung von Kupferkugeln mit und ohne Badumwälzung sowie mit Ultraschallunterstützung untersuchten. Sie stellten fest, dass die Abkühlrate bei Ultraschallunterstützung die der konventionellen Abschreckung sowohl in Öl als auch in Leitungswasser übersteigt. Als Ursache nannten sie die durch den Ultraschall induzierte Kavitation, die den Dampffilm schneller als bei der konventionellen Abkühlung aufreißen lässt.

ZHELOKHOVSEVA [57] untersuchte 1985 die Rissbildung von Stählen, unter anderem von C45, während des Ölabschreckens. Dabei stellte sie fest, dass die Ausbildung von Rissen weniger von der Abkühlrate als vielmehr von der Gleichmäßigkeit des Abschreckens abhängig ist. Bei der ultraschallunterstützten Ölabschreckung aller untersuchten Stähle konnte sie im Temperaturbereich zwischen 300 °C und 200 °C einen deutlichen Anstieg der Abkühlrate beobachten. Die Zahl der Proben, die nach der ultraschallunterstützten Ölabschreckung Risse aufwiesen, sank im Vergleich zur konventionellen Abschreckung in Wasser.

IIDA et al. [58] präsentierten 1990 eine Methode zur Verbesserung und Kontrolle des Abschreckprozesses in Wasser. Dazu wurde eine zylindrische Silberprobe auf eine Temperatur von etwa 700 °C erwärmt und dann in einem Wasserbad unter Einwirkung von Ultraschall mit einer Frequenz von 40 kHz und Leistung von 300 W abgeschreckt. Ihre Experimente zeigten eine Reduzierung der Abkühlzeit und eine Vergleichsmäßigung des Abkühlprozesses. Während des Film- und Übergangssiedens wurden laut IIDA et al. die Abkühlraten gesteigert und der Dampffilm durch die Ultraschallwelle erschüttert. Dies führte zu einer Verschiebung des Leidenfrost-Punktes zu höheren Temperaturen und geringeren Zeiten. Der Grad dieser Verschiebung war wiederum vom Abstand zur Schallwandlerfläche abhängig und stimmte mit der Verteilung des Schalldruckes überein. Bei einem Schalldruckmaximum zeigte sich die größte Erhöhung der Leidenfrost-Temperatur im Vergleich zur konventionellen Abschreckung bei gleicher Wassertemperatur.

Auch LI et al. [59] untersuchten 1992 das Abschreckverhalten von Stählen in Wasser, einer wässrigen Natriumchloridlösung und einem in Wasser gekoppelten Ultraschallfeld. Die Anwendung von Ultraschall bei der Wasserabschreckung steigerte die maximale Abkühlrate, verglichen mit der bei konventioneller Abschreckung erreichbaren Rate, um bis zu 500 K/s, die Leidenfrost-Temperatur ließ sich um mehr als 40 % steigern. Die durch Ultraschallunterstützung schnellere Abkühlung brachte eine Steigerung der

erreichten Härte der Stähle im Vergleich zur konventionellen Abschreckung mit sich. Auch der durch die Abschreckung entstandene Bauteilverzug war nach ultraschallunterstützter Wasserabschreckung deutlich geringer als nach konventioneller.

2011 veröffentlichten PREZELJ und CUDINA [60] ihre Untersuchungen zum Einfluss von Ultraschall auf die Stahlabschreckung in verschiedenen Wasserlösungen. Sie behaupteten, dass die durch ein starkes Ultraschallfeld hervorgerufene Kavitation den Dampffilm zerstört.

KIANI et al. [61] präsentierten 2012 ihre Resultate bezüglich des Ultraschalleffektes auf den Wärmeübergang einer Kupferkugel während des Tauchkühlens in einem Wassergemisch. Durch die Ultraschallunterstützung (25 kHz, 0 W – 300 W) beim Abschrecken ließ sich ein bis zu vierfach erhöhter Wärmeübergang im Vergleich zur konventionellen Abschreckung erzielen. Eine zunehmende Ultraschallintensität sowie ein abnehmender Abstand zur Ultraschallwandlerfläche führten zu einer zunehmenden Abkühlrate. Unabhängig vom Abstand zur Wandlerfläche ließen sich hohe Abkühlraten jedoch auch erzielen, wenn das abzuschreckende Bauteil nahe der Flüssigkeitsoberfläche positioniert wurde. Als Ursache für die verbesserte Abschreckwirkung bei Ultraschalleinsatz verglichen zum ruhenden Abschreckbad nannten KIANI et al. die Kavitation. In Wandernähe ist diese, durch den Ultraschallwind beeinflusst, stärker ausgebildet als in größerer Entfernung. Die nahe der Flüssigkeitsoberfläche zu beobachtenden Kavitationsblasenwolken führen hingegen auch bei größeren Abständen zur Wandleroberfläche zu einer Erhöhung des Wärmeübergangs.

2012 stellten ŽUPAN et al. [62] eine Methode zur Verbesserung der Wärmeübergangscharakteristik von flüssigen Abschreckmitteln vor. Ihre Experimente führten sie in Anlehnung an ISO 9950 durch. Die Ultraschallunterstützung (50 kHz, 120 W) während der Wasserabschreckung führte zu einer Steigerung der maximalen Abkühlrate von 8 %, einer Reduzierung der Dauer der Filmsiedephase sowie einer Erhöhung der Leidenfrost-Temperatur verglichen zur konventionellen Wasserabschreckung. Hauptursachen für die Erhöhung des Wärmeübergangs infolge Ultraschallunterstützung sind laut ŽUPAN et al. [62] der Ultraschallwind sowie die Kavitation.

Im Zuge der genannten Publikationen und durchgeföhrten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die Wärmeübergangskoeffizienten, Abkühlraten sowie Abkühldauern unter Ultraschallunterstützung im Vergleich zur konventionellen

Flüssigkeitsabschreckung beeinflussen lassen. Zudem wird vielfach von einer Vergleichmäßigung des Abschreckvorgangs durch Ultraschall gesprochen. Weitestgehend offen bleibt jedoch, welche Einflüsse die Ultraschallparameter auf die Abschreckwirkung haben. Auch bei der Frage nach der Ursache für die gezielte Beeinflussung des Abschreckvorgangs durch eine Ultraschallunterstützung bleibt es meist nur bei Annahmen ohne experimentellen Nachweis oder wissenschaftliche Begründung.

3 Werkstoffe und Methoden

3.1 Untersuchte Werkstoffe

Das ultraschallunterstützte Flüssigkeitsabschrecken soll im Rahmen dieser Arbeit an technisch relevanten metallischen Werkstoffen mit sich unterscheidenden Lösungsglüh- bzw. Austenitisiertemperaturen untersucht werden.

Die aushärtbare Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 (EN AW-AlSi1MgMn) und der martensitisch umwandelnde Vergütungsstahl C45E gelten als typische Vertreter technisch relevanter metallischer Werkstoffe. Da sich die Lösungsglühtemperatur der Aluminiumknetlegierung ($540\text{ }^{\circ}\text{C}$) deutlich von der Austenitisiertemperatur des Stahls ($840\text{ }^{\circ}\text{C}$) unterscheidet, wurden diese Werkstoffe für die Untersuchungen ausgewählt.

Der austenitische korrosionsbeständige Stahl X5CrNi18-10 erfährt während der durchgeführten Wärmebehandlungsexperimente keine martensitische Umwandlung und stellt deshalb einen optimalen Modellwerkstoff für den martensitisch umwandelnden Stahl dar. Er zeigt im untersuchten Temperaturbereich keine Umwandlungswärme und keine Umwandlungsdehnung. Außerdem weist der austenitische Stahl eine deutlich bessere Oxidationsbeständigkeit als der C45E auf, was die Handhabung bei der Durchführung von Abschreckexperimenten vereinfacht. Daher wurde die Mehrheit der Temperaturmessungen von Stahlabschreckversuchen anhand des X5CrNi18-10 vorgenommen. Der Stahl X5CrNi18-10 wurde ebenfalls zur Aufstellung eines Simulationsmodells genutzt.

3.1.1 Aluminiumknetlegierung EN AW-6082

Die Legierung EN AW-6082 ist ein Vertreter des Legierungssystems Al-Mg-Si (6xxx), welches eine der wichtigsten Gruppen aushärtbarer Aluminiumlegierungen darstellt.

EN AW-6082 vereint die Eigenschaften einer mittleren Festigkeit im warmausgelagerten Zustand, einer guten Schweißeignung und einer relativ geringen Korrosionsanfälligkeit [63]. Außerdem besitzt die Legierung den Vorteil einer hohen spezifischen Festigkeit, hervorgerufen durch eine geringe Dichte und mittlere absolute Festigkeiten. EN AW-6082 gilt daher als Universallegierung des gesamten Maschinenbaus und ist die am häufigsten angewandte aushärtbare Aluminiumknetlegierung, vor allem in den auf Leichtbau angewiesenen Industriezweigen Luft- und Raumfahrttechnik sowie Automobilbau, aber auch im Apparate- und Anlagenbau [64].

Die mittels optischer Emissionsspektroskopie (OES) ermittelten Hauptlegierungselemente der untersuchten Legierungscharge sind in Tabelle 4 im Vergleich zur Norm wiedergegeben. Die chemische Zusammensetzung entspricht dem Normbereich. Die Massenanteile der für die Teilchenverfestigung maßgebenden Legierungselemente Silizium und Magnesium liegen an der unteren Toleranzgrenze der Norm.

Tabelle 4: Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge EN AW-6082.

in Ma.-%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn
OES-Analyse	0,73	0,22	0,05	0,48	0,61	0,003	0,009
DIN EN 573-3	0,7-1,3	≤ 0,5	≤ 0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	≤ 0,25	≤ 0,2

Der Ausgangswerkstoff lag als stranggepresstes und an Luft abgekühltes Rundprofil im Herstellungszustand (Zustand F) mit einem Durchmesser von 30 mm vor. Das Ausgangsgefüge ist homogen und besteht aus gleichachsigen Aluminiummischkristallkörnern sowie groben Primärausscheidungen (Abbildung 7). Die mittlere Korngröße liegt bei etwa 3 µm.

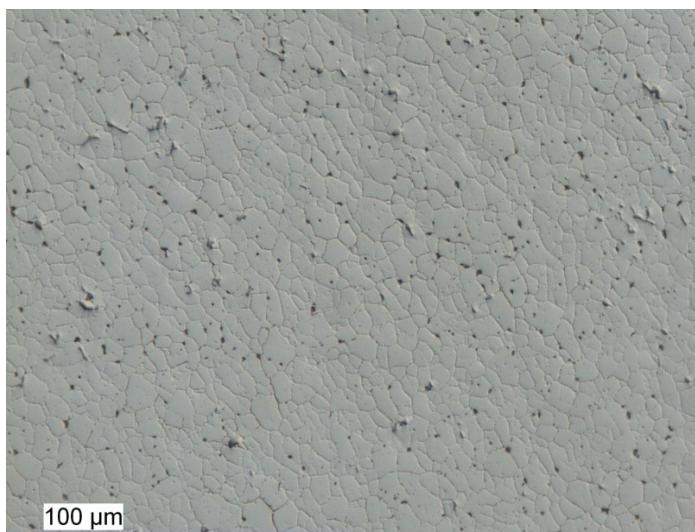


Abbildung 7: Gefüge von EN AW-6082 im stranggepressten Ausgangszustand (Aufnahme senkrecht zur Strangpressrichtung).

Die temperaturabhängigen thermophysikalischen Eigenschaften der Aluminiumknetlegierung sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Werte der Wärmeleitfähigkeit λ und der Dichte ρ wurden der Datenbank der Finite-Element-Software *Sysweld® 2010 Version 12.0* entnommen.

Die spezifische Wärmekapazität c_p wurde via Differential Scanning Calorimetry (DSC) mit Hilfe des Gerätes *Pyris 1* der Fa. *Perkin Elmer* (am Institut für Physik | Arbeitsgruppe Polymerphysik | Universität Rostock) bestimmt. Die DSC-Messungen wurden dazu an abkühlenden Proben mittels "Step-Scan-Methode" [65, 66] bei einer Abkühlrate von 10 K/min und einer Schrittweite von 5 K durchgeführt.

Die für eine thermische Simulation erforderliche Temperaturleitfähigkeit χ wurde errechnet. Diese ergibt sich aus dem folgenden Zusammenhang:

$$\chi = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (3.1)$$

Tabelle 5: Thermophysikalische Eigenschaften von EN AW-6082 für einen Temperaturbereich von 50 °C bis 550 °C.

T in °C	ρ in kgm^{-3}	c_p in $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	λ in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	χ in $10^5\text{m}^2\text{s}^{-1}$
50	2744	906	175	7,03
100	2734	923	170	6,74
250	2704	997	180	6,68
350	2681	1040	180	6,46
450	2657	1095	170	5,84
550	2447	1175	172	5,98

3.1.2 Austenitischer Stahl X5CrNi18-10

X5CrNi18-10 ist ein Standardwerkstoff der korrosionsbeständigen, hochlegierten Stähle. Als Vertreter der austenitischen Stähle verfügt X5CrNi18-10 über eine ausgezeichnete Schweißeignung sowie ein hohes Dehnvermögen, was zu einer sehr guten Kaltverformbarkeit und zu einer günstigen Tiefziehfähigkeit führt. Daraus ergeben sich für X5CrNi18-10 vielfältige Einsatzmöglichkeiten, sei es in technischen Bereichen wie dem Maschinen- und Automobilbau, der chemischen und Lebensmittelindustrie oder in Bereichen hoher korrosiver Materialbeanspruchung.

Die mittels Schmelzanalyse ermittelten Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge sind in Tabelle 6 im Vergleich zur Norm wiedergegeben. Die chemische Zusammensetzung entspricht, mit Ausnahme eines geringfügig zu hohen Schwefelgehaltes, dem Normbereich.

Tabelle 6: Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge X5CrNi18-10.

in Ma.-%	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
Schmelzanalyse	0,026	0,4	1,72	0,036	0,029	0,079	18,2	8,09
DIN EN 10088-1	$\leq 0,07$	$\leq 1,0$	$\leq 2,0$	0,045	$\leq 0,015$	$\leq 0,11$	17,5-19,5	8,0-10,5

Der Ausgangswerkstoff lag als gezogenes Rundprofil mit einem Durchmesser von 30 mm im lösungsgeglühten und abgeschreckten Zustand vor. Das Ausgangsgefüge ist homogen und besteht aus gleichachsigen Austenitkörnern (Abbildung 8). Die mittlere Korngröße liegt bei etwa 11 µm.

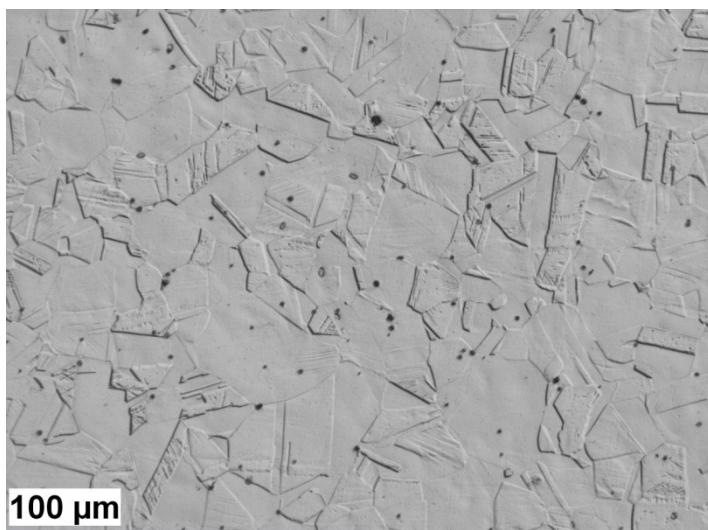


Abbildung 8: Ausgangsgefüge von X5CrNi18-10 (Aufnahme senkrecht zur Ziehrichtung).

Die temperaturabhängigen thermophysikalischen Eigenschaften des austenitischen Stahls für die thermische Simulation sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Diese Werte entstammen der Datenbank der kommerziellen Finite-Element-Software *Sysweld® 2010 Version 12.0*.

Die für eine thermische Simulation erforderliche Temperaturleitfähigkeit χ wurde wiederum gemäß Gleichung (3.1) errechnet.

Tabelle 7: Thermophysikalische Eigenschaften von X5CrNi18-10 für einen Temperaturbereich von 0 °C bis 850 °C.

T in °C	ρ in kgm^{-3}	c_p in $Jkg^{-1}K^{-1}$	λ in $Wm^{-1}K^{-1}$	χ in $10^5m^2s^{-1}$
0	7912	511	16,0	39,6
100	7876 *	527 *	17,1 *	41,2
200	7840	542	18,3 *	43,1
300	7796 *	559 *	19,4 *	44,5
400	7752	575	20,5	46,0
500	7704 *	590 *	21,7 *	47,7
600	7656	605	23,0 *	49,7
700	7608 *	618 *	24,2 *	51,5
800	7560	630	25,5 *	53,5
850	7534 *	636 *	26,1 *	54,5

* mittels linearer Interpolation ermittelt

Die temperaturabhängigen Kennwerte der mechanischen Simulation von X5CrNi18-10 entstammen wie die thermophysikalischen Eigenschaften der Datenbank der kommerziellen Finite-Element-Software *Sysweld® 2010 Version 12.0*. Die Werte des Elastizitätsmoduls E , des mittleren Wärmeausdehnungskoeffizienten α_m sowie der Fließspannung R_e sind in Tabelle 8 dargestellt. Die Querkontraktionszahl ν ist laut *Sysweld®*-Datenbank für den untersuchten Temperaturbereich konstant und beträgt 0,33.

Tabelle 8: Kennwerte der mechanischen Simulation von X5CrNi18-10 für einen Temperaturbereich von 20 °C bis 1000 °C.

T in °C	E in Nmm^{-2}	α_m in $10^{-3}K^{-1}$ *	R_e in Nmm^{-2}
20	200000	0	240
200	190100	0,00306	178
400	174700	0,00677	143
600	150000	0,01065	125
800	124700	0,01467	100
1000	72200	0,01884	85

* bezogen auf 20 °C

Das temperaturabhängige Verfestigungsverhalten des austenitischen Stahls, das ebenfalls der Sysweld®-Datenbank entstammt, ist auszugsweise in Abbildung 9 dargestellt.

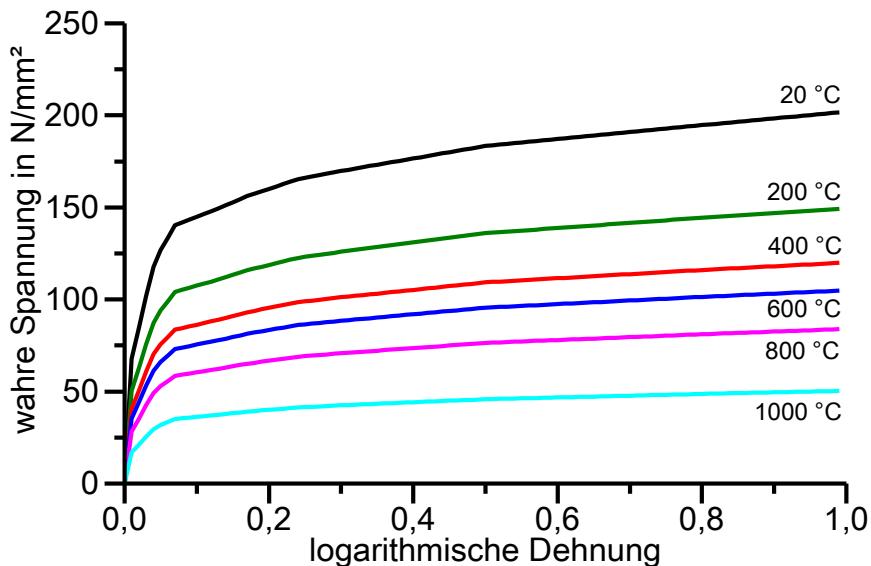


Abbildung 9: Verfestigung von X5CrNi18-10 für unterschiedliche Temperaturen in einem Bereich von 20 °C bis 1000 °C.

3.1.3 Vergütungsstahl C45E

Der Vergütungsstahl C45E ist als Vertreter der unlegierten Qualitätsstähle aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung härtbar. Durch das Vergüten lassen sich die Gebrauchseigenschaften den gewünschten Anforderungen in einem weiten Rahmen anpassen. C45E ist ein vielseitig einsetzbarer Stahl, der nahezu in allen Bereichen des Stahl- und Maschinenbaus Anwendung finden kann. Obwohl es in den einzelnen Einsatzgebieten immer auch besser geeignete Stähle gibt, wird der C45E aufgrund seiner guten Bearbeitbarkeit im normalgeglühten Zustand, seiner nahezu stufenlosen Einstellbarkeit bestimmter Eigenschaftsprofile und nicht zuletzt aufgrund eines relativ geringen Preises sehr geschätzt. Hauptanwendungsgebiet dieses Stahls sind der Automobil- und der allgemeine Maschinenbau, bevorzugt für Bauteile, die relativ geringen Belastungen unterliegen.

Die mittels Schmelzanalyse ermittelten Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge des Vergütungsstahls sind in Tabelle 9 im Vergleich zur Norm wiedergegeben. Die chemische Zusammensetzung entspricht dem Normbereich.

Tabelle 9: Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge C45E.

in Ma.-%	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
Schmelzanalyse	0,44	0,25	0,71	0,016	0,013	k.A.	0,22	0,12
DIN EN 10083	0,42-0,5	$\leq 0,4$	0,5-0,8	$\leq 0,045$	$\leq 0,035$	$\leq 0,1$	$\leq 0,4$	0,4

Der Ausgangswerkstoff lag als gezogenes Rundprofil mit einem Durchmesser von 35 mm im normalgeglühten Zustand vor. Abbildung 10 zeigt das homogene ferritisches perlitische Ausgangsgefüge. Die mittlere Korngröße des Ausgangsgefüges beträgt etwa 10 µm.

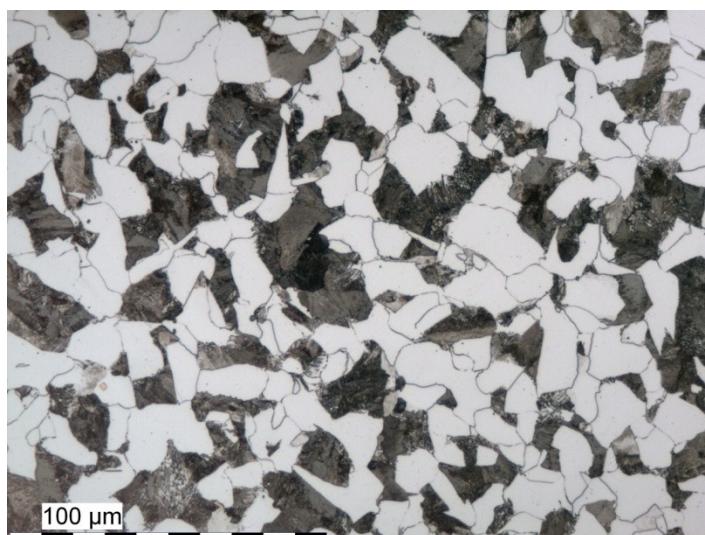


Abbildung 10: Ausgangsgefüge von C45E (Aufnahme senkrecht zur Ziehrichtung).

3.2 Abschreckexperimente

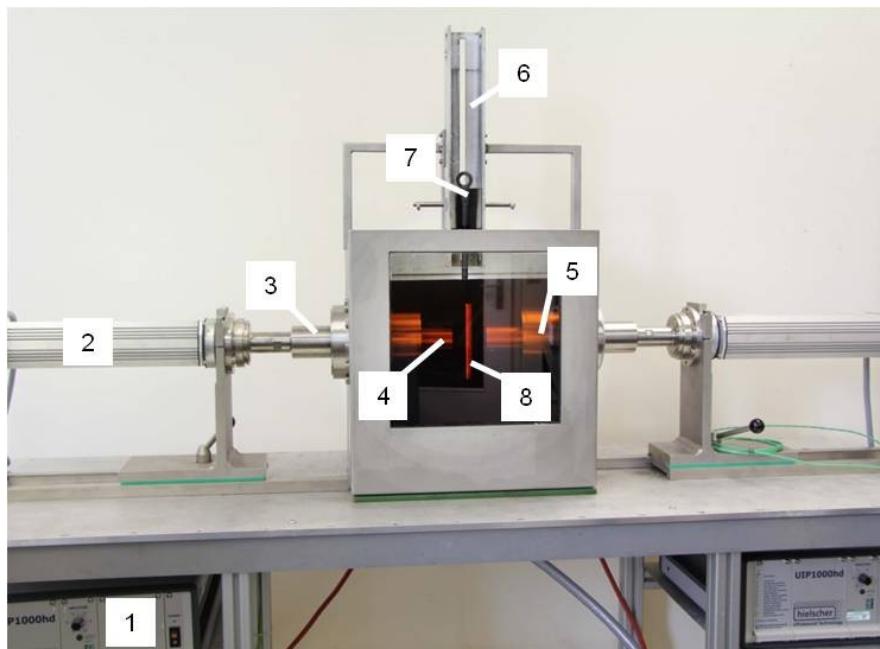
3.2.1 Versuchseinrichtung

Die verwendete Versuchseinrichtung entspricht einer Kombination aus zwei Öfen und einem Abschrecksystem, welches ein Abschreckbecken mit integrierten Ultraschallkomponenten vereint.

Zum Erwärmen und Lösungsglühen bzw. Austenitisieren der Proben aus EN AW-6082 und X5CrNi18-10 wurde ein Umluft-Schachtofen des Typs S120/85A der Fa. Nabertherm verwendet. Dieser Ofen verfügt über ein im Boden integriertes Luftumwälzgebläse, welches für eine gleichmäßige Temperaturverteilung in der Ofenkammer sorgt. Ein Volumen von 120 l und eine Kammerhöhe von 600 mm lassen es zu, dass die Proben im Ofen hängend positioniert werden können.

Die Proben des Vergütungsstahls C45E wurden in einem Schutzgasofen des Typs VMK-39-S der Fa. Linn Therm GmbH unter Stickstoffatmosphäre erwärmt und austenitisiert. Aufgrund einer relativ kleinen Kammer mussten die Proben in diesem Ofen liegend positioniert werden. Um den Kontakt der Probe mit den Kammerwänden und dem Kammerboden zu verhindern, wurde eine keramische Auflagevorrichtung konstruiert, die einerseits eine möglichst kleine Auflagefläche zur Probe bietet und andererseits den Gasstrom in der Kammer nicht behindert.

Die verwendete Abschreckeinrichtung der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung ist in Abbildung 11 dargestellt.



1 Ultraschallgenerator, 2 Ultraschallwandler, 3 Booster, 4 Sonotrode,
5 Schieberohr, 6 höhenverstellbare Führungsschiene, 7 Probenhalterung,
8 Probe

Abbildung 11: Abschreckeinrichtung der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung (hier: Abschreckmedium Öl).

Wesentlicher Bestandteil des Abschrecksystems ist ein Abschreckbecken mit einem Füllvolumen von etwa 40 l. In dieses ist frontseitig ein Sichtfenster aus Glas zu Beobachtungszwecken eingebbracht. Über zwei Heizpatronen lässt sich gemeinsam mit einer Temperaturregelung eine definierte Temperatur des Abschreckmediums in einem Temperaturbereich von 30 °C bis 110 °C einstellen. Die Abschreckungen erfolgen ohne Badumwälzung. Der zweite wesentliche Bestandteil des Abschrecksystems ist die integrierte Ultraschalltechnik bestehend aus Sonotroden, Booster, Schallwandler und Ultraschallgeneratoren. An zwei gegenüberliegenden Seiten des Beckens erfolgt die Aufnahme der Sonotroden über schwingungsfreie Flansche, die mit einem Schieberohr

verbunden sind. Die Schwingungsfreiheit der Flansche resultiert aus deren Positionierung an den Schwingungsknoten der Sonotroden, der sogenannten Nulllinie (Abbildung 12). Die resultierenden Radialschwingungen bei der Longitudinalschwingung der Sonotroden sind minimal und werden nicht auf das übrige Abschrecksystem übertragen. Die Schieberohre und die horizontal verstellbar gelagerten Halterungen der Schallwandler, welche jeweils mit Booster und Sonotrode verbunden sind, lassen die Variation des Abstandes zwischen Sonotrodenstirnflächen und Probenoberfläche zu. Eine stufenlos höhenverstellbare Probenaufhängung dient der Variation der Beschallungshöhe der Probe.

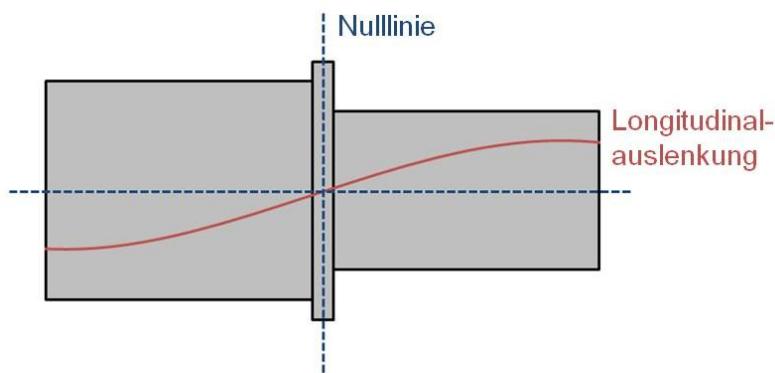


Abbildung 12: Nulllinie der Sonotrode am schwingungsfreien Flansch.

Zur Erzeugung des Ultraschalls dienen zwei Ultraschallprozessoren des Typs *UIP1000hd* der *Fa. Hielscher Ultrasonics GmbH* mit jeweils einer effektiven Abgabeleistung von bis zu 1000 W. Mit dem Prozessor wird Ultraschall mit einer Arbeitsfrequenz von 19,2 kHz erzeugt, welcher den Schallwandler mit einer Amplitude von maximal 25 µm verlässt. Zur Schallübertragung dienen Sonotrode und Booster, in deren Abhängigkeit sich die Ultraschallamplitude ergibt, wie Tabelle 10 zeigt.

Tabelle 10: Sonotrodencharakteristik und resultierende Ultraschallamplituden.

schallabgebende Fläche		Amplitude am Schallwandler <i>in µm</i>	Übersetzungsverhältnis der Amplitude		resultierende Amplitude <i>in µm</i>
Durchmesser <i>in mm</i>	Größe <i>in mm²</i>		Sonotrode	Booster	
18	255	12,5-25	1:3,5	1:0,7 / 1:1,4	31-131
34	908	12,5-25	1:1	1:0,7 / 1:1,4	9-40
50	1964	12,5-25	1:0,5	1:0,7 / 1:1,4	4-19

Für die durchgeführten Versuche wurden drei verschiedene Sonotroden mit Stirnflächendurchmessern der schallabgebenden Fläche von 18 mm, 34 mm und 50 mm verwendet. Die maximale Amplitude der Sonotrode mit der größten Abschallfläche ($19 \mu\text{m}$ bei 1964 mm^2) liegt unterhalb der minimalen Amplitude der Sonotrode mit der kleinsten schallabgebenden Fläche ($31 \mu\text{m}$ bei 255 mm^2). Daher konnten keine Versuche mit allen drei Sonotroden bei gleicher Amplitude durchgeführt werden.

Die entwickelte Versuchs- und Abschreckeinrichtung gestattet somit eine definierte sowohl ein- als auch zweiseitig ultraschallunterstützte Flüssigkeitsabschreckung sowie eine flexible Variation zahlreicher Parameter. Dazu gehören:

- Lösungsglüh- bzw. Austenitisiertemperatur
- Werkstoff
- Abschreckmedium
- Temperatur des Mediums (T)
- Größe/Durchmesser der schallabgebenden Fläche (\emptyset)
- Ultraschallamplitude (A)
- Abstand zwischen Sonotrodenstirnfläche und Probenoberfläche (l)
- Beschallungshöhe der Probe

3.2.2 Proben

Für die Untersuchungen kamen zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 29,5 mm und einer Länge von 120 mm zum Einsatz. In die obere Probenstirnseite wurde für die Befestigung der Probenhalterung eine M5-Gewindebohrung eingebracht. Um mögliche Einflüsse der Oberflächenbeschaffenheit auf die Abschreckwirkung zu vermindern, wurden alle Proben eines Werkstoffs mit den gleichen Drehparametern gefertigt, so dass die Ausgangsrauheit R_z aller Proben in einem Bereich zwischen $2,2 \mu\text{m}$ und $3,5 \mu\text{m}$ lag.

Die Proben wurden zur Aufnahme von Abkühlverläufen in der Regel mit jeweils sechs Thermoelementen mit Durchmessern von 0,5 mm bestückt. Dazu wurden Bohrungen mit Durchmessern von 0,7 mm und Tiefen von 60 mm, d.h. bis zur Probenmittelebene, funkenerosiv derart eingebracht, dass die Temperatur sowohl im Kern als auch randnah unter fünf Winkeln in Umfangsrichtung (0° - 180°) gemessen werden kann. Die Restwandstärke vor den randnahen Thermoelementbohrungen beträgt 0,65 mm. Die Anordnung der Thermoelementbohrungen in Umfangsrichtung der Probe wird schematisch in Abbildung 13, die Probenabmessungen in Abbildung 14 dargestellt.

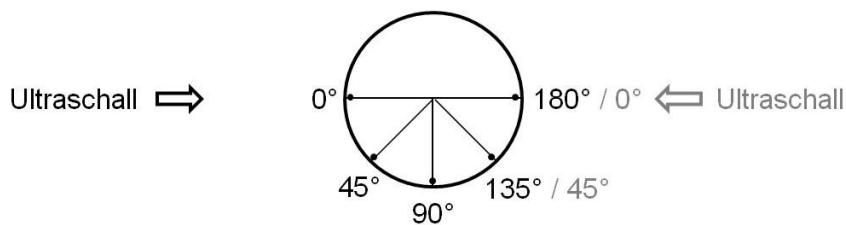


Abbildung 13: Anordnung der Thermoelementbohrungen in Umfangsrichtung der Probe.

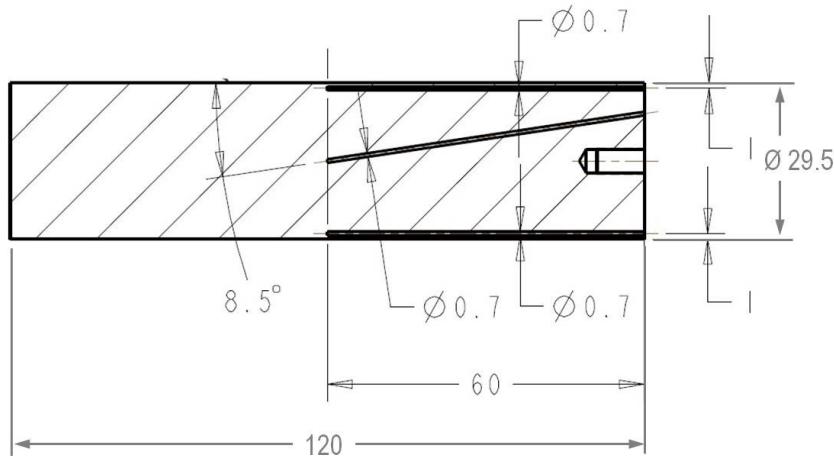


Abbildung 14: Probenabmessungen.

Ausgewählte Proben wurden außerdem mit zwei zusätzlichen Thermoelementbohrungen versehen. Diese Bohrungen befinden sich randnah in zwei verschiedenen Abständen von der oberen Stirnfläche (30 mm, 90 mm) und sind so positioniert, dass die Bohrungsenden mit einer Messposition der Probenmittelebene auf einer Achse parallel zur Probenmittelachse liegen. Diese ausgewählten Proben weisen auf einer Seite somit drei Messpositionen in axialer Richtung auf.

3.2.3 Versuchsparameter

In Abhängigkeit der untersuchten Werkstoffe ergeben sich zwei unterschiedliche Glühtemperaturen. Die Lösungsglühtemperatur der Aluminiumknetlegierung beträgt 540 °C, die Austenitisiertemperatur der Stähle 840 °C.

Bei der Aufzeichnung der Abkühlverläufe wurden die Proben nach Erreichen der Lösungsglüh- bzw. Austenitisiertemperatur im Kern dem Ofen entnommen und abgeschreckt. Die Proben aus EN AW-6082, an denen nach der Wärmebehandlung noch metallographische Untersuchungen und Härteprüfungen folgen sollten, wurden hingegen nach Erreichen der Lösungsglühtemperatur für 20 min gehalten.

Bei C45E wurden im Vorfeld der Abschreckversuche Voruntersuchungen zur Austenitisierung durchgeführt. Das nichtlineare Erwämen der untersuchten

Probengeometrie des Vergütungsstahls auf 840 °C dauert etwa 30 min, wie Abbildung 15 zeigt.

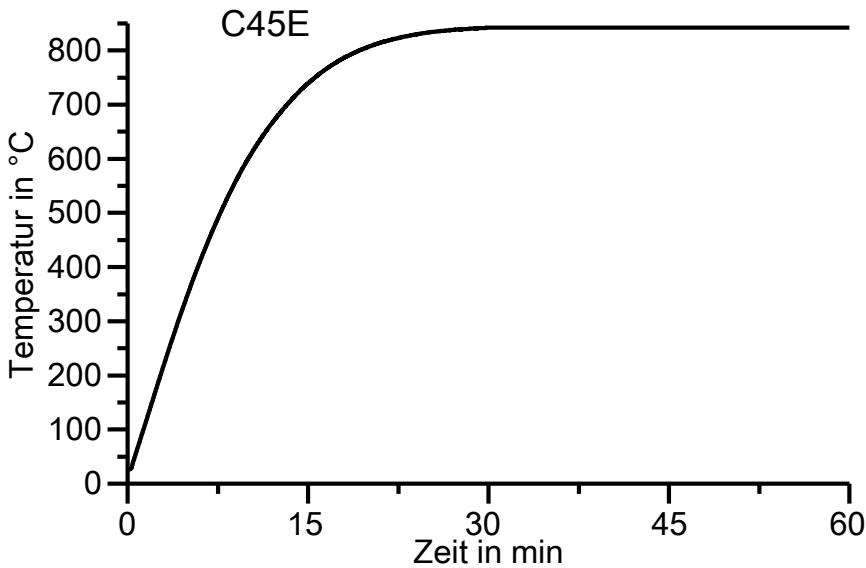


Abbildung 15: Erwärmung eines Zylinders aus C45E von Raumtemperatur auf 840 °C im Schutzgasofen.

Laut ORLICH et al. [67] beträgt die Erwärmtdauer bei einer Erwärmgeschwindigkeit von 0,5 K/s für eine homogene Austenitisierung von C45E bis 840 °C etwa 30 min. Um zu prüfen, ob Erwärmen ohne Halten für eine homogene Austenitisierung der verwendeten Probencharge sorgt, wurden Härteprüfungen an zwei gehärteten Probenlosen mit den Haltedauern 0 min und 30 min durchgeführt und verglichen. In Abbildung 16 ist dieser Vergleich für die zweiseitige ultraschallunterstützte Ölabschreckung exemplarisch dargestellt.

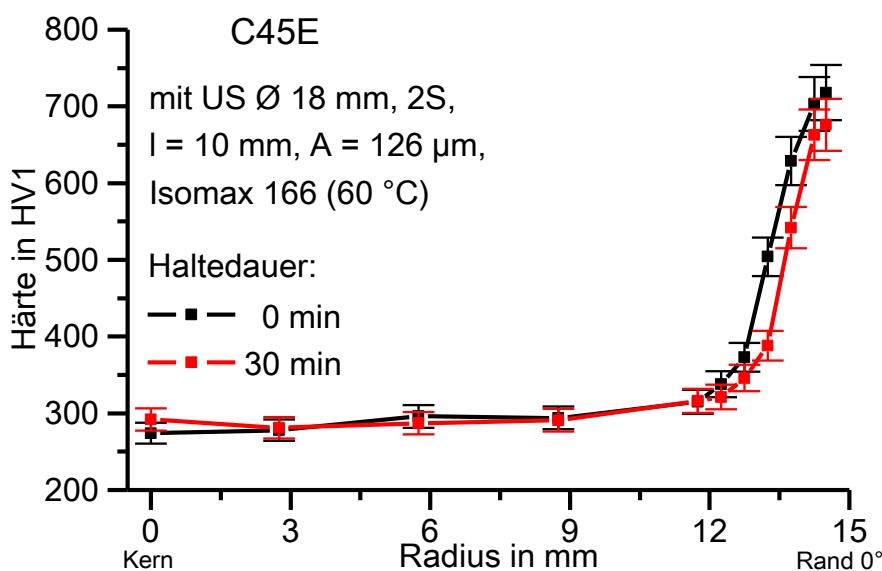


Abbildung 16: Resultierender radialer Härteverlauf in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung von C45E-Zylindern nach unterschiedlichen Haltedauern.

Die ohne Haltedauer mit anschließender Abschreckung resultierenden Härtewerte liegen im Streubereich der nach 30 minütiger Haltedauer erzielten Werte. Da dieses Resultat die Angaben von ORLICH et al. [67] bestätigt, wurde für die Abschreckversuche von C45E mit nachfolgender metallographischer Untersuchung und Härteprüfung eine Austenitisierung ohne Haltedauer festgelegt.

Als Abschreckmedium dienten Rostocker Leitungswasser ("hart", Gesamthärte ca. 2,9 mmol/l [68]) und das dünnflüssige Hochleistungsabschrecköl *Isomax 166* der Fa. *Petrofer*. Die variierten Wassertemperaturen betrugen 30 °C, 45 °C, 60 °C, 75 °C und 85 °C. Für die Abschreckversuche in Öl wurde eine Temperatur von 60 °C gewählt. Diese liegt einerseits im Bereich optimaler Temperaturen von Härteölen (40 °C bis 80 °C [23]) und eignet sich andererseits zum Vergleich der Wasserabschreckversuche.

Das Badvolumen aller Abschreckversuche betrug 35 l. Die Proben wurden jeweils so positioniert, dass die zusammenfallenden Sonotrodenmittelachsen in einer Ebene mit der Probenmittelebene liegen und die Probenlängsachse schneiden (siehe Abbildung 13).

Neben der konstanten Position der Probe im Abschreckbecken und der konstanten Ausrichtung der Sonotroden zur Probe wurde der Abstand zwischen Probenoberfläche und Sonotrodenstirnfläche variiert: 10 mm, 30 mm, 50 mm und 100 mm. Diese Abstände wurden unabhängig von der Wellenlänge des Ultraschalls gewählt, da Resonanzinflüsse aufgrund einer fehlenden ebenen Reflexionsfläche bei einer zylindrischen Probengeometrie irrelevant sind.

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 geschildert wurde, kamen drei verschiedene Sonotroden mit Stirnflächendurchmessern von 18 mm, 34 mm und 50 mm zum Einsatz. Die daraus resultierenden Ultraschallamplituden (siehe Tabelle 10) wurden innerhalb des Versuchsprogramms in einem Bereich von 9 µm bis 131 µm variiert. Der Einfluss der Ultraschallunterstützung auf die Flüssigkeitsabschreckung wurde zunächst anhand der einseitigen Beschallung untersucht. Die spätere Umstellung auf eine zweiseitige Beschallung führte dazu, dass die untersuchten Amplituden geringfügig verändert werden mussten, um zu gewährleisten, dass beide Generatoren bei zweiseitiger Beschallung mit gleicher Amplitude laufen. In Tabelle 11 sind die untersuchten Ultraschallamplituden der einseitigen und zweiseitigen Ultraschallunterstützung wiedergegeben.

Tabelle 11: Untersuchte Ultraschallamplituden.

Durchmesser der Sonotrode in mm	untersuchte Amplituden in μm	
	einseitige Beschallung (1S)	zweiseitige Beschallung (2S)
18	31, 86, 131	37, 92, 126
34	9, 18, 19, 31	9, 13, 18, 37
50	9, 18, 19	9, 13, 18

3.2.4 Versuchsdurchführung

Nach Erreichen der jeweiligen Glühtemperatur im Probenkern bzw. nach dem Halten bei dieser Temperatur wurden die Proben dem Ofen entnommen und manuell zum Abschrecksystem überführt und abgeschreckt. Die Abschreckverzögerung zwischen Ofenentnahme und Eintauchzeitpunkt betrug dabei nie mehr als 10 s.

Zur Überwachung der Ofen- und Mediumtemperatur sowie zur Aufnahme von Temperatur-Zeit-Verläufen während des Abschreckens wurden Mantelthermoelemente des Typs K mit einem Manteldurchmesser von 0,5 mm genutzt.

Beim Einbringen der Thermoelemente in die dafür vorgesehenen Bohrungen der Probe wurde auf die Nutzung einer Wärmeleitpaste verzichtet, da das Einbringen einer solchen Paste die Gefahr einer Fehlpositionierung der Thermoelementspitzen in den hier verwendeten sehr dünnen und langen Thermoelementbohrungen birgt. Dies ermöglicht allerdings einen Wasserdampfeintritt in den Ringspalt zwischen Bohrung und Thermoelement. Dessen Kondensation im Zuge der Probenabschreckung führt zu einem kurzzeitigen, relativ starken Temperaturabfall und Anstieg der Abkühlrate an der Thermoelementspitze und sorgt somit für eine Verfälschung der Messergebnisse. Dieses bei etwa 100 °C auftretende Phänomen ist sowohl bei Abkühlverläufen der konventionellen als auch ultraschallunterstützten Wasserabschreckung zu beobachten.

Zur Aufzeichnung der Abkühlkurven mittels Thermoelementen wurde das hochauflösende Messsystem *LabVIEW® Signal Express* der Fa. National Instruments mit einer Messfrequenz von 50 Hz pro Thermoelement verwendet.

Die Abschreckversuche wurden mit einer Videokamera des Typs EOS 60D der Fa. Canon durch das Beobachtungsfenster des Abschreckbeckens aufgezeichnet. Diese Aufnahmen dienen der unterstützenden Auswertung der gemessenen Abkühlverläufe, um Ort und Zeitpunkt des Aufreißen des Dampffilms identifizieren zu können.

Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit wurde jeder Abschreckversuch einer Parameterkombination wiederholt durchgeführt. Bei der Aluminiumlegierung wurden jeweils sechs Versuche vorgenommen, bei den Stählen jeweils drei.

Die Proben wurden zur Aufnahme von Abkühlverläufen mehrfach verwendet und wiederholt erwärmt und abgeschreckt. Dabei kommt es zu einer Veränderung der Probenoberfläche mit der Folge eines sich unterscheidenden Abkühlverhaltens (Abbildung 17 und Abbildung 18). Ursache ist die zunehmende Oxidation der Oberfläche durch wiederholtes Glühen. Laut LIŠČIĆ et al. [25] kommt es beispielsweise beim Glühen von chromhaltigen Stählen zur Ausbildung einer Chromoxidschicht. Eine zunehmende Oxidation führt zu einer abnehmenden Dauer des Filmsiedens sowie zu höheren Leidenfrost-Temperaturen, die sich jeweils asymptotisch an einen Grenzwert annähern [25]. Diese Einflussgröße der Oxidation der Probenoberfläche auf die Abschreckwirkung nimmt nach einigen Abschreckungen demnach deutlich ab. Daher wurden die Proben vor der eigentlichen Nutzung als Temperaturmessproben jeweils fünfmal konventionell in Wasser bei einer Temperatur von 85 °C abgeschreckt, ähnlich wie es in ISO 9950: 1995 (E) beschrieben wird. Diese Parameter der Vorabschreckungen, die aus Voruntersuchungen resultieren, führen zu einer nahezu vollständigen Passivierung der Probenoberfläche durch Oxidbildung und einer relativ konstanten Rauheit, die sich während der anschließenden Abschreckungen nur noch geringfügig ändern (siehe Abbildung 17). Resultat ist ein reproduzierbares Abkühlverhalten (siehe Abbildung 18).

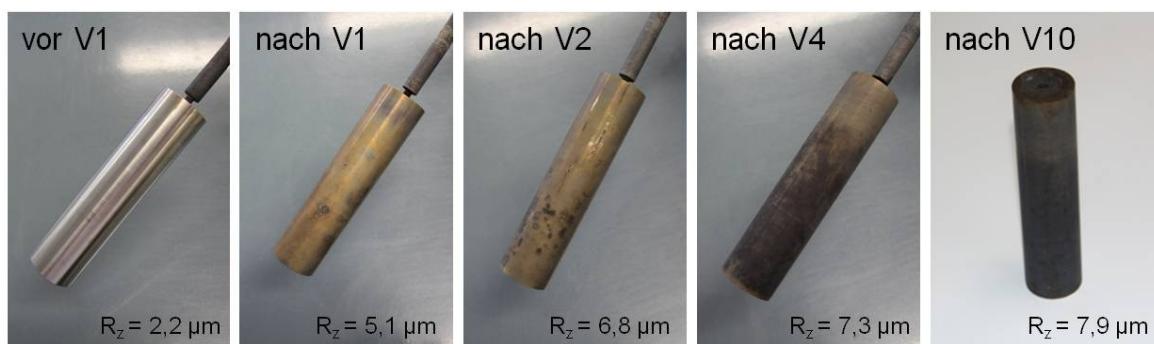


Abbildung 17: Veränderung der Probenoberfläche (X5CrNi18-10) mit zunehmender Anzahl (V_i = Versuch i) konventioneller Abschreckungen in Wasser bei 85 °C.

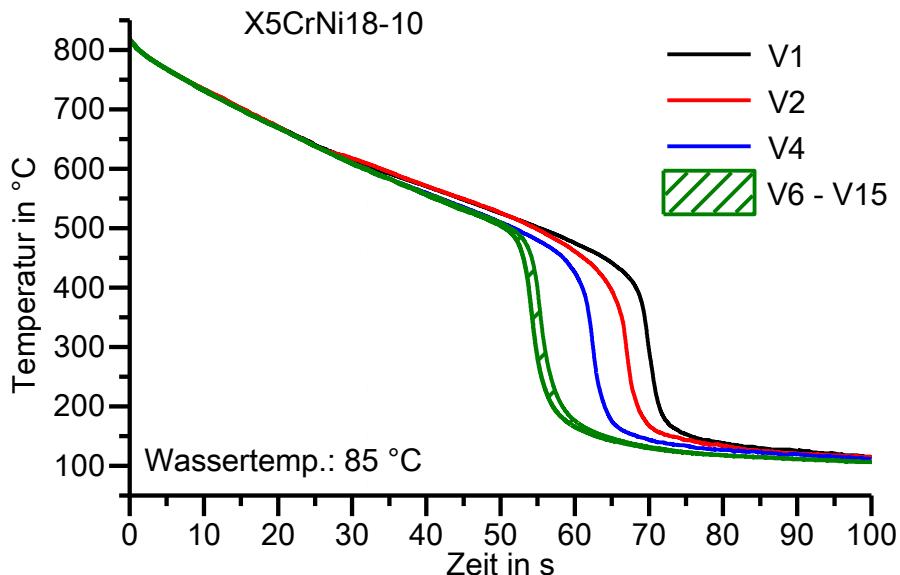


Abbildung 18: Veränderung des Abkühlverhaltens (randnah) von X5CrNi18-10 mit zunehmender Anzahl (Vi = Versuch i) konventioneller Abschreckungen in Wasser bei 85 °C.

Solche nicht frisch zerspanten, sondern bereits zuvor geglühten Oberflächen kommen beispielsweise an Aluminiumlegierungen bei Strangpressprofilen, Schmiedeteilen und Gussteilen häufig vor.

Während der Ölabschreckversuche von X5CrNi18-10 und C45E wurden die Proben nach jeder Abschreckung mit Ethanol gereinigt.

3.2.5 Auswertung der Temperatur-Zeit-Messdaten

In dieser Arbeit dienen hauptsächlich die während der Abschreckversuche mittels Thermoelementen gemessenen Temperatur-Zeit-Daten der Darstellung des Ultraschalleinflusses auf die Flüssigkeitsabschreckung metallischer Proben. Mit diesen lassen sich die zur Beschreibung der Abschreckwirkung und die zur Beurteilung der Gleichmäßigkeit des Abschreckvorgangs wichtigsten Verläufe und Größen – Abkühlkurven, Abkühlraten, Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) sowie Temperaturdifferenzen – ermitteln und darstellen.

Bei der Bestimmung der Abkühlraten wurden die gemessenen Temperatur-Zeit-Verläufe mittels gleitendem Mittelwert auf jeweils etwa ein Drittel der Wertepaare reduziert, um den Einfluss des Messwerttauschens zu vermindern. Dies entspricht einer Datenreduzierung bei der Aluminiumlegierung auf etwa 400 Wertepaare, bei Stahl auf etwa 1000 Wertepaare.

Um sowohl den Einfluss des Ultraschalls als auch den der einzelnen Prozessparameter anhand eines Wertes darzustellen, wird in dieser Arbeit ein normierter Abschreckfaktor

f_{t_n} eingeführt. Zu dessen Ermittlung wurde auf die Zeit, in der eine Probe von 800 °C auf 500 °C abköhlt, die sogenannte $t_{8/5} - \text{Zeit}$ [25], zurückgegriffen.

Für die Stahlabschreckversuche ergibt sich der normierte Abschreckfaktor $f_{t_n}(X5CrNi18-10, C45E)$ aus dem Quotienten der $t_{8/5, \text{konv.}} - \text{Zeit}$ bei konventioneller Abschreckung und der $t_{8/5, \text{us}} - \text{Zeit}$ bei Abschreckung mit Ultraschallunterstützung bei gleicher Badtemperatur:

$$f_{t_n}(X5CrNi18 - 10, C45E) = \frac{t_{8/5, \text{konv.}}}{t_{8/5, \text{us}}} \quad (3.1)$$

Aufgrund eines anderen relevanten Temperaturbereiches bei den Abschreckversuchen der Aluminiumlegierung wurde in Anlehnung an MILKEREIT et al. [69] die $t_{[530,150]} - \text{Zeit}$ definiert, die die Zeit kennzeichnet, in der die Probe von 530 °C auf 150 °C abköhlt. Die in [69] definierte $t_{[530,150]} - \text{Zeit}$ wurde dabei geringfügig an die gegebenen Versuchsbedingungen angepasst, um den Einfluss der Abschreckverzögerung der Probe vom Ofen zum Abschreckbecken in der definierten Abschreckzeit vernachlässigen zu können.

Der normierte Abschreckfaktor $f_{t_n}(EN AW-6082)$ der Aluminiumabschreckversuche ergibt sich somit aus dem Quotienten der $t_{[530,150]\text{konv.}} - \text{Zeit}$ bei konventioneller Abschreckung und der $t_{[530,150]\text{us}} - \text{Zeit}$ bei Abschreckung mit Ultraschallunterstützung bei gleicher Badtemperatur:

$$f_{t_n}(EN AW - 6082) = \frac{t_{[530,150]\text{konv.}}}{t_{[530,150]\text{us}}} \quad (3.2)$$

Je größer der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} ist, desto schneller wird der Temperaturbereich zwischen 800 °C und 500 °C (bei Stahl) bzw. zwischen 530 °C und 150 °C (bei Aluminium) bei der ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Abschreckung durchlaufen.

Die $t_{8/5} - \text{Zeit}$ sowie $t_{[530,150]} - \text{Zeit}$ wurden dabei anhand der sonotrodenseitig bei 0° gemessenen Randabkühlverläufe ermittelt. Da diese Ermittlung anhand repräsentativer Abkühlverläufe vorgenommen wurde, sind die in Kapitel 4 dargestellten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} mit einem abgeschätzten maximalen Fehler von ± 5 % zu betrachten. Aufgrund der Komplexität der Darstellung des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} in Diagrammen mit den vier variablen Prozessparametern – Durchmesser der schallabgebenden Fläche, Abstand zwischen Sonotrode und Probe,

Ultraschallamplitude und Mediumtemperatur – wurde auf die zusätzliche Darstellung eines Fehlerbalkens verzichtet, um die Übersichtlichkeit der Diagramme zu wahren.

Um den Einfluss des Ultraschalls und der einzelnen Prozessparameter auf die tangentiale Abschreckgleichmäßigkeit anhand eines Wertes darstellen zu können, wird in dieser Arbeit ein normierter Temperaturdifferenzfaktor g_{T_n} eingeführt. Dieser wurde anhand der maximalen tangentialen Temperaturdifferenzen der konventionellen und ultraschallunterstützten Abschreckung ermittelt. Bei der einseitigen Beschallung wurde für die Berechnung dabei die maximale Temperaturdifferenz zwischen den randnahen Messpositionen 0° und 180° herangezogen. Bei der zweiseitigen Beschallung wurde hingegen die maximale Temperaturdifferenz zwischen 0° und 90° ausgewertet.

Der normierte Temperaturdifferenzfaktor g_{T_n} ergibt sich aus dem Quotienten der maximalen tangentialen Temperaturdifferenzen bei Ultraschallunterstützung $\Delta T_{max,US}$ und bei konventioneller Abschreckung $\Delta T_{max,konv.}$ bei gleicher Badtemperatur:

$$g_{T_n} = \frac{\Delta T_{max,US}}{\Delta T_{max,konv.}} \quad (3.3)$$

3.2.6 Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten

Für eine erfolgreiche Simulation eines Abschreckprozesses ist eine realistische Beschreibung des Wärmeübergangs essentiell. Daher wird der Einfluss des Ultraschalls auf die Flüssigkeitsabschreckung über eine spezielle Verteilung von Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) beschrieben.

Die Finite-Differenzen-Methode (FDM) ist ein verbreitetes Verfahren für die numerische Bestimmung solcher WÜK [70-72]. Aus diesem Grund wurden WÜK nach diesem Verfahren in Anlehnung an LÜBBEN et al. [73] über gemessene Zeit-Temperatur-Verläufe bestimmt. Das verwendete Programm basiert auf eindimensionaler Wärmeleitung und setzt Rotationssymmetrie voraus. Infolge der Versuchsanordnung einer einseitigen bzw. zweiseitigen Beschallung mit Ultraschall herrscht in der hier verwendeten Anordnung keine Rotationssymmetrie. Dies führt dazu, dass entlang des Probenumfangs unterschiedliche WÜK auftreten. Daher wurden Abkühlkurven an fünf Positionen entlang des Probenumfangs der zylindrischen Proben gemessen (siehe Abbildung 13). Für jedes charakteristische Abschreckexperiment wurden die WÜK für diese fünf Positionen ermittelt.

Um den Einfluss des Messwertaustauschens bei der Bestimmung der WÜK zu vermindern, wurden die gemessenen Abkühlkurven mittels gleitendem Mittelwert auf jeweils etwa ein Zehntel der Wertepaare reduziert. Dies entspricht einer Datenreduzierung bei der Aluminiumlegierung auf etwa 100 Wertepaare, bei Stahl auf etwa 300 Wertepaare.

Für die Bestimmung der WÜK mittels FDM sind darüber hinaus die korrekten thermophysikalischen Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs erforderlich. Dazu gehören insbesondere die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärmekapazität c_p sowie die Dichte ρ . Konkrete Werte sowie Angaben zur Herkunft dieser Größen finden sich in Kapitel 3.1. Mittels FDM wurden so die WÜK für die Aluminiumknetlegierung und für den austenitischen Stahl berechnet.

Im Anschluss an die Berechnung der WÜK mittels FDM wurde eine thermische Simulation via Finite-Elemente-Methode (FEM) mit dem Ziel, die berechneten WÜK zu verifizieren, durchgeführt. In der thermischen FE-Simulation lassen sich Abkühlkurven mit Hilfe von WÜK berechnen. Durch einen Vergleich von simulierten und gemessenen Abkühlkurven ist demnach eine Beurteilung der Qualität der mittels FDM errechneten WÜK möglich. Da der Fokus auf der Untersuchung der lokalen Abhängigkeit der WÜK entlang des Umfangs in der Probenmittelebene – hervorgerufen durch die einseitige bzw. zweiseitige Beschallung – lag, wurde für die thermische Simulation die axiale Dimension der Proben vernachlässigt und ein zweidimensionales FE-Modell, welches in Abbildung 19 dargestellt ist, genutzt.

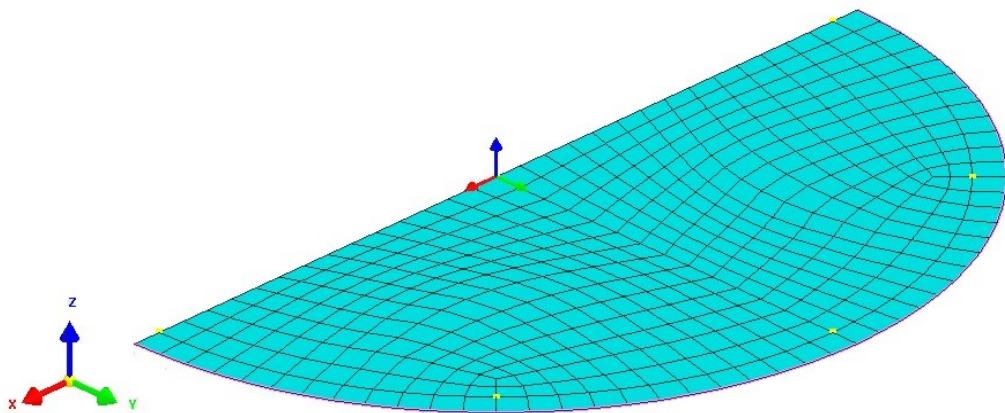


Abbildung 19: 2D-FE-Halbmodell zur thermischen Simulation.

Unter Ausnutzung der Symmetrie wurde ein 2D-FE-Halbmodell mit einem Radius von 14,75 mm und 488 Knoten generiert. Zur Diskretisierung der Probenquerschnittsfläche dienen 432 Flächenelemente, zur Definition von Wärmeübergangsrandbedingungen 48 Linienelemente.

Die nicht rotationssymmetrischen Wärmeübergangsrandbedingungen wurden über eine lokale Verteilung der WÜK in das FE-Modell implementiert. Entlang des Probenmodellumfangs wurde eine abschnittsweise Definition von WÜK-Temperatur-Kurven festgelegt: $WÜK_1(T)$ 0° - $22,5^{\circ}$; $WÜK_2(T)$ $22,5^{\circ}$ - $67,5^{\circ}$; $WÜK_3(T)$ $67,5^{\circ}$ - $112,5^{\circ}$; $WÜK_4(T)$ $112,5^{\circ}$ - $157,5^{\circ}$; $WÜK_5(T)$ $157,5^{\circ}$ - 180° . Diese entsprechen den fünf Thermoelementpositionen der gemessenen Abkühlkurven. In Abbildung 20 ist dies exemplarisch für den Fall der einseitigen Beschallung mit Ultraschall dargestellt. Der Symmetrierand wird als isoliert angenommen. Hier findet kein Wärmeübergang statt.

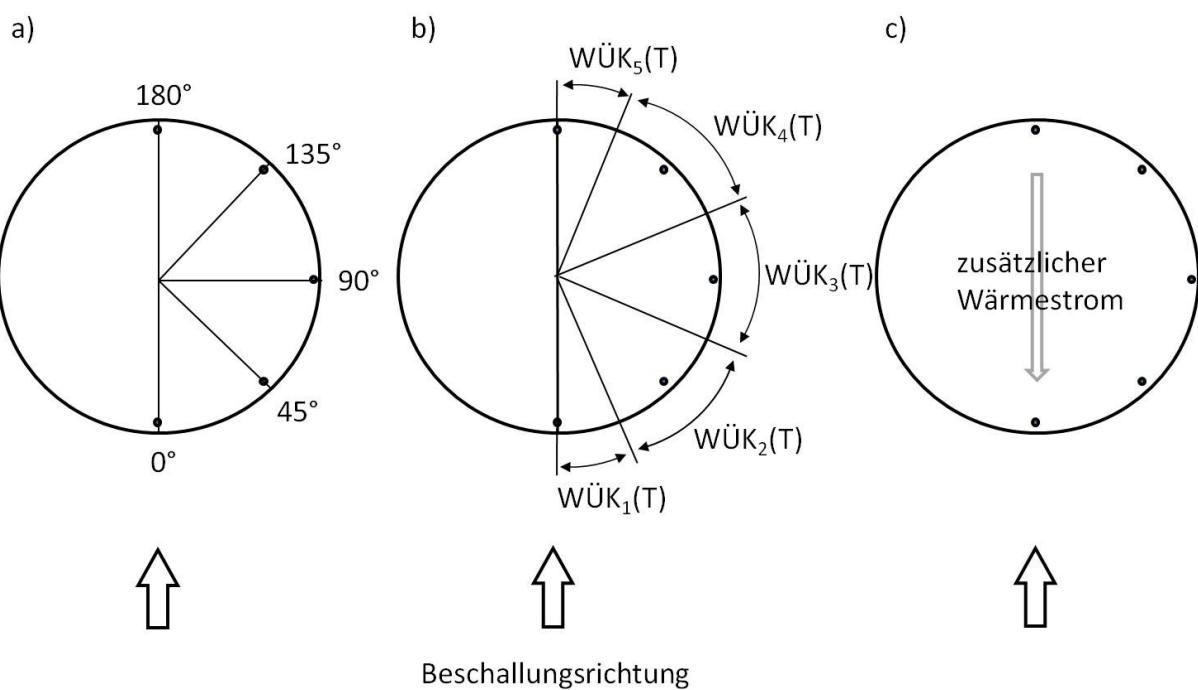


Abbildung 20: Probenquerschnitt bei einseitiger Beschallung – a) Messpositionen der Thermoelemente – b) abschnittsweise Definition der Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) entlang des Umfangs – c) zusätzlicher Wärmestrom durch Schallausbreitungsrichtung entgegengesetzter Wärmestrom durch Ultraschallunterstützung in Anlehnung an [74].

Die thermische Simulation mit transiente Rechnung wurde mit Hilfe der kommerziellen FE-Software *Sysweld® 2010 Version 12.0* durchgeführt. Während dieser Simulation anhand der Werkstoffe EN AW-6082 und X5CrNi18-10 wurden keine Umwandlungsvorgänge berücksichtigt, da die Aluminiumproben im ausscheidungsrelevanten Temperaturbereich oberhalb der kritischen Abschreckgeschwindigkeit [69, 75] abgeschreckt wurden (ausführlicher in Kapitel 4.2.2.3) und der Stahl im gesamten betrachteten Temperaturbereich umwandlungsfrei ist.

Die Verifizierung der berechneten WÜK ergab einen entscheidenden Unterschied zwischen der Aluminiumknetlegierung und dem austenitischen Stahl. Die

abschnittsweise Berechnung der WÜK in Umfangsrichtung der Probe führt bei X5CrNi18-10 zu einer guten Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Abkühlverläufen. Die mittels FDM berechneten WÜK von X5CrNi18-10 können damit direkt als Eingabedaten für die 3D-Simulation des Abschreckprozesses verwendet werden.

Bei EN AW-6082 ergab der Vergleich von gemessenen und simulierten Abkühlkurven zwar eine qualitativ gute Übereinstimmung, die simulierten Abkühlverläufe waren auf der sonotrodenzugwandten Seite (0°) jedoch langsamer und auf der sonotrodenabgewandten Seite (180°) schneller als die gemessenen Verläufe. Abbildung 21 zeigt dazu ein Beispiel. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird hier auf die Darstellung der Abkühlverläufe von 45° und 135° verzichtet.

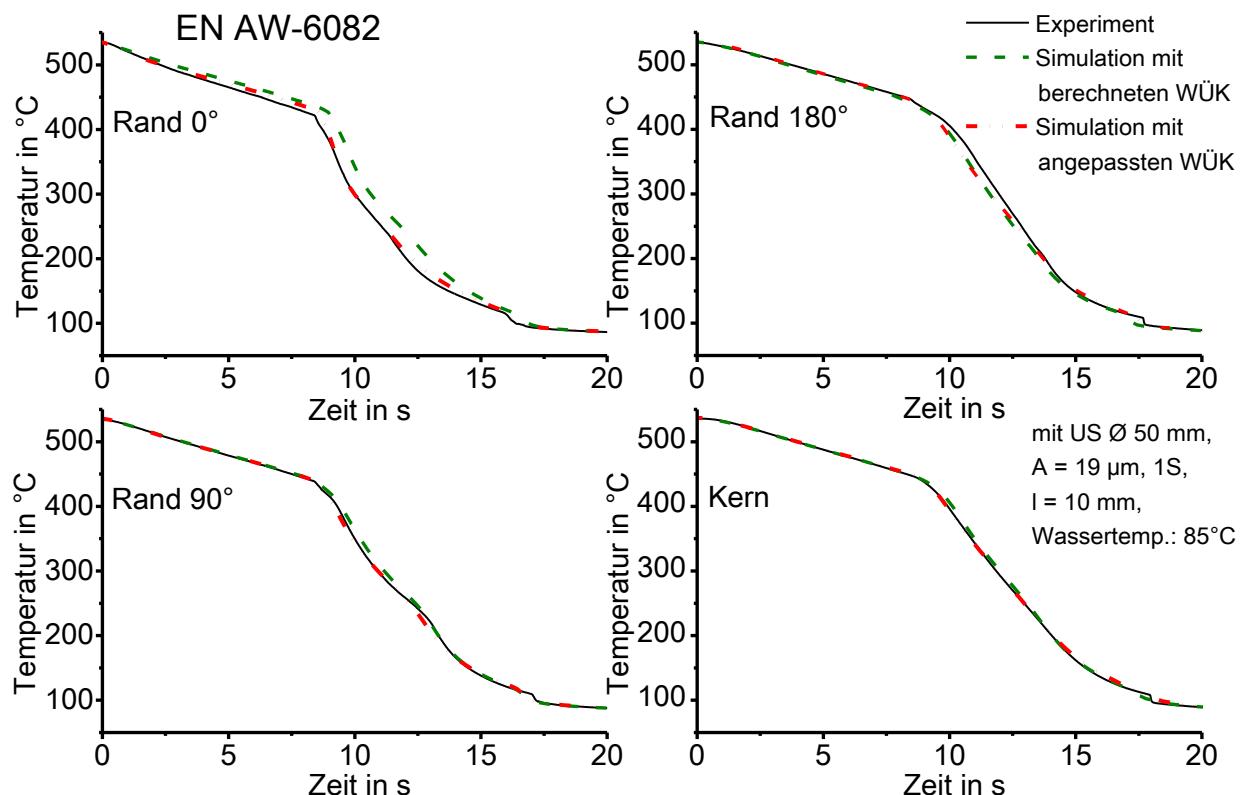


Abbildung 21: Exemplarischer Vergleich von simulierten und gemessenen Abkühlkurven von EN AW-6082 bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 85 °C in Anlehnung an [74].

Die mittels FDM berechneten WÜK von EN AW-6082 weichen demnach von den real vorliegenden WÜK ab. Dieses Phänomen ist mit der rotationsunsymmetrischen Versuchsanordnung in Kombination mit den Werkstoffeigenschaften der Aluminiumknetlegierung zu erklären. Infolge der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit von EN AW-6082, die nahezu dem Zehnfachen des austenitischen Stahls entspricht, kommt es bei der einseitigen Beschallung der Aluminium-Probe zu einem zusätzlichen der

Schallausbreitungsrichtung entgegengesetzten Wärmestrom von der sonotrodenabgewandten zur -zugewandten Seite der Probe (Abbildung 20).

Für die Aluminiumknetlegierung war es daher notwendig, die Unter- bzw. Überschätzung der berechneten WÜK zu kompensieren. Dies wurde mit Hilfe der sogenannten retro-inversen Analyse [76], mit der sich die Qualität der mittels FDM berechneten WÜK beurteilen und die wahren WÜK bestimmen lassen, durchgeführt. Nach einem Vergleich von simulierten und gemessenen Abkühlkurven werden die mittels FDM berechneten WÜK angepasst, um eine Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Abkühlverläufen und damit die real vorliegenden WÜK zu erhalten. In Abbildung 22 ist diese Vorgehensweise schematisch dargestellt.

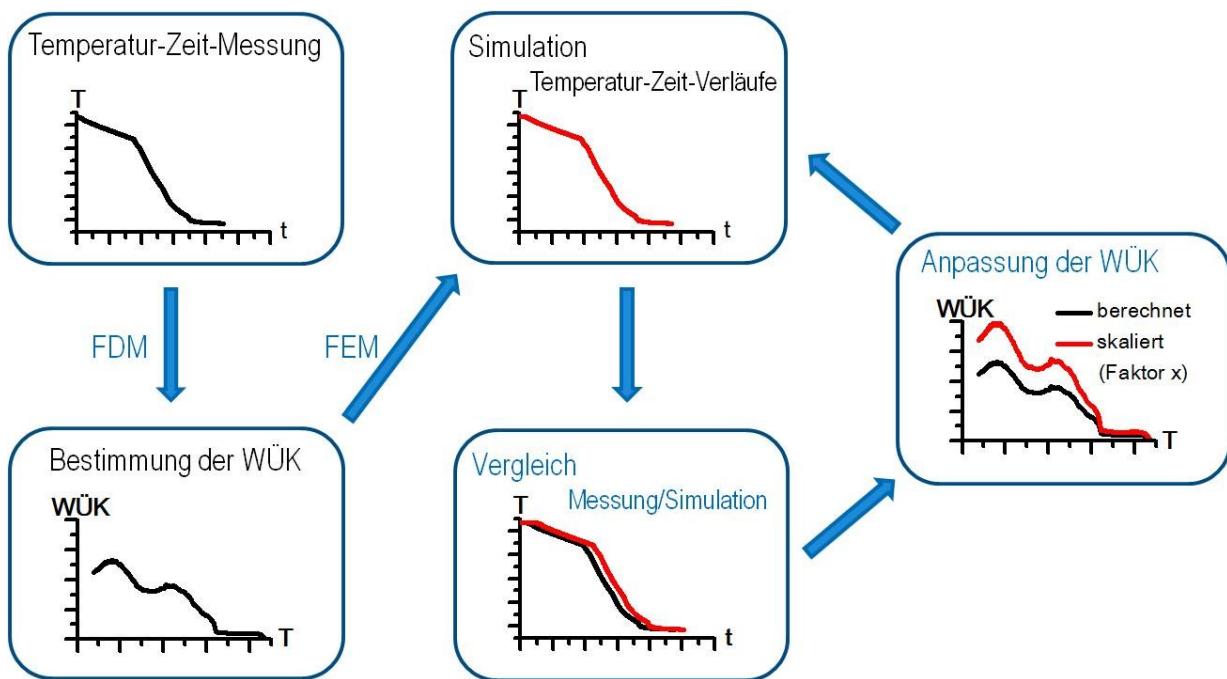


Abbildung 22: Schematische Darstellung der retro-inversen Analyse zur Bestimmung der WÜK von EN AW-6082.

Die Anpassung erfolgte über eine Skalierung der WÜK-Temperatur-Verläufe. Für die Positionen 0° und 45° wurden diese hochskaliert (mit einem Faktor > 1), für 135° und 180° herunter skaliert (mit einem Faktor < 1). Die WÜK von 90° blieben unverändert. Obwohl die Abkühlverläufe auf der sonotrodenabgewandten Seite (180°) nach der Simulation mit den berechneten WÜK zum Teil bereits relativ gut mit den gemessenen Kurven übereinstimmen, wie auch im dargestellten Beispiel aus Abbildung 21, ist eine Skalierung der WÜK an dieser Position notwendig, um die Anpassung der WÜK auf der sonotrodenzugewandten Seite (0° und 45°) auszugleichen.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit der Aluminiumlegierung führt dazu, dass sich eine Änderung der WÜK an einer Position auf die resultierenden Abkühlverläufe aller Umfangspositionen auswirkt. In Abbildung 21 ist ein Vergleich von gemessenen und mittels angepassten WÜK simulierten Abkühlkurven exemplarisch dargestellt. Die zugehörigen Skalierungsfaktoren der berechneten WÜK werden in Tabelle 12 wiedergegeben.

Tabelle 12: Skalierungsfaktoren für die Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten für ein ausgewähltes Beispiel der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

	0°	45°	90°	135°	180°
US Ø 50 mm, A = 19 µm, I = 10 mm, 85 °C	1,4	1,3	1	0,6	0,5

Die Differenzen der zugehörigen mittels FDM berechneten und angepassten WÜK werden in der folgenden Abbildung 23 gezeigt. Anhand der Skalierungsfaktoren und der resultierenden Verläufe der WÜK ist erkennbar, dass die Anpassung der mittels FDM berechneten WÜK erheblich ist.

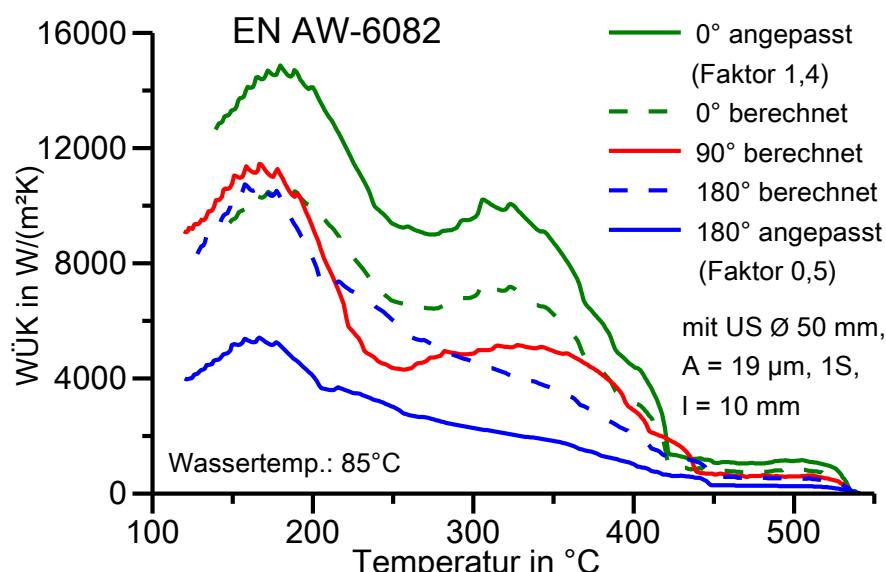


Abbildung 23: Exemplarische berechnete und angepasste Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) von EN AW-6082 bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 85 °C in Anlehnung an [74].

3.3 Probencharakterisierung

3.3.1 Metallographische Untersuchungen

Nach den Wärmebehandlungen wurden vor allem an Proben des umwandelnden Stahls C45E Gefügeuntersuchungen durchgeführt. Einzelne Proben der als abschreckempfindlich bekannten Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 wurden ebenfalls analysiert, um eine mögliche Ausscheidungsbildung während des Abschreckens zu prüfen. Beim austenitischen Stahl X5CrNi18-10 werden keine signifikanten Gefügeveränderungen erwartet, so dass an Proben dieses Stahls keine metallographischen Untersuchungen durchgeführt wurden.

Zur besseren Handhabung bei der Präparation wurden die Probenstücke in kaltaushärtendem Epoxidharz eingebettet. Das Schleifen und Polieren wurde manuell an Standard-Präparationsgeräten durchgeführt. Unter Kühlung mit Leitungswasser wurden die Probenstücke mit Siliziumkarbid-Nass-Schleifpapier in den Körnungsstufen P320 bis P2500 bei der Aluminiumknetlegierung und bis P1000 bei dem Vergütungsstahl geschliffen. Anschließend wurden alle Probenstücke mit wasserfreier Diamantsuspension auf Alkoholbasis mit Körnungen von 6 µm, 3 µm und 1 µm poliert. Die Endpolitur erfolgte mit 0,05 µm oxidischer Poliersuspension (OPS).

Zur Sichtbarmachung der Gefüge erfolgte eine Kontrastierung der Korngrenzen bzw. Kornflächen. Bei der Aluminiumknetlegierung wurde dies durch eine Farbätzung nach WECK [77] umgesetzt. Als Ätzmittel wurde eine Lösung aus 4 g Kaliumpermanganat, 100 ml leicht erwärmtem destillierten Wasser und 1 g Natriumhydroxid verwendet. Eine bei der Ätzung entstandene Ätzhaut wurde abschließend vorsichtig durch Polieren entfernt. Die Probenstücke aus C45E wurden mit 3 %iger Salpetersäure auf Alkoholbasis geätzt.

Die metallographischen Untersuchungen wurden mit Hilfe des Makroskops *M400* der Fa. *Wild Heerbrugg* und des Mikroskops *DMI 5000 M* der Fa. *Leica* durchgeführt.

In Kapitel 4.5 werden makroskopische und mikroskopische Aufnahmen des Zustands nach ultraschallunterstützter im Vergleich zur konventionellen Wasser- und Ölabschreckung gezeigt. Übersichts- und Detailaufnahmen sollen dabei der Darstellung von Härtezonen und der entstehenden Gefüge dienen. Abbildung 24 zeigt schematisch, an welcher Position sich die dargestellten Ausschnitte dieser lichtmikroskopischen Aufnahmen des entsprechenden Schliffes befinden. Wie die schematische Abbildung zeigt, erfolgten die Aufnahmen sonotrodenseitig bei 0°.

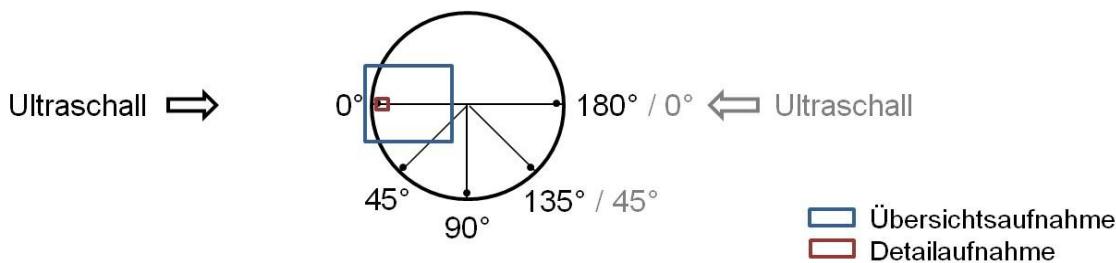


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Positionen der dargestellten Ausschnitte lichtmikroskopischer Aufnahmen.

3.3.2 Härteprüfungen

Um die Ergebnisse der Temperaturmessungen zu untermauern und das Potential der verbesserten Abschreckwirkung bei Ultraschallunterstützung anhand eines mechanischen Kennwertes zu überprüfen, wurden Härteprüfungen an Proben der Aluminiumknetlegierung und des Stahls C45E durchgeführt.

An beiden Werkstoffen wurde nach charakteristischen Abschreckversuchen mit und ohne Ultraschallunterstützung am hochpolierten Querschliff (siehe 3.3.1) der Probenmittelebene die Vickershärte nach DIN EN ISO 6507-1 geprüft. Für den Vergütungsstahl C45E kam ein Härteprüfgerät des Typs *2RC* der Fa. *Wolpert* mit einer Prüfkraft von 98,1 N (HV10) zum Einsatz. In Randnähe wurde des Weiteren ein Kleinlasthärteprüfer des Typs *HMV-2* der Fa. *Shimadzu* mit digitaler Auswertung genutzt, welcher auch für die Härteprüfung der Aluminiumknetlegierung verwendet wurde. Die Prüfkraft betrug hier 9,81 N (HV1).

In Kapitel 4.5 werden radiale und tangentiale Härteverläufe des Zustands nach ultraschallunterstützter im Vergleich zur konventionellen Wasser- und Ölabschreckung gezeigt. In Abbildung 25 ist schematisch dargestellt, an welchen Positionen des entsprechenden Schliffes die Härtegrade ermittelt wurden. Die in Umfangsrichtung der Probe ermittelten Härtegrade wurden in einem Abstand von 0,25 mm von der Probenoberfläche aufgenommen.

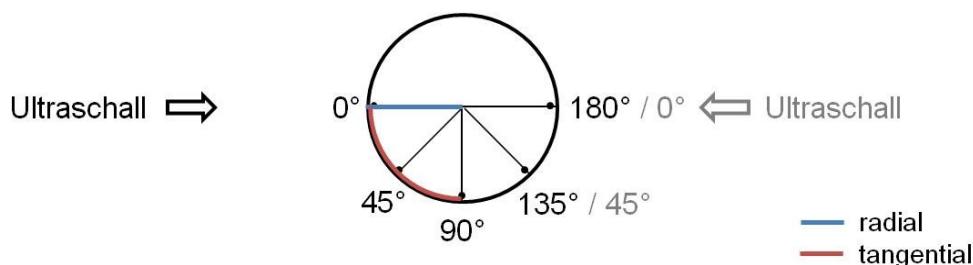


Abbildung 25: Schematische Darstellung der Härteprüfpositionen.

3.3.3 Rissprüfungen

Um festzustellen, ob die ultraschallunterstützte Flüssigkeitsabschreckung zur Rissbildung an der Oberfläche der Proben führt, wurden an ausgewählten Proben aller untersuchten Werkstoffe, die wiederholt mit Ultraschallunterstützung abgeschreckt wurden, Rissprüfungen mittels Wirbelstromverfahren nach DIN EN ISO 15549 und Farbeindringverfahren nach DIN EN 571-1 durchgeführt.

3.3.4 Eigenspannungsbestimmung

Eigenspannungsbestimmungen an Proben des austenitischen Stahls wurden röntgenographisch am Diffraktometer *AXS D8 Discover* der *Fa. Bruker* nach dem $\sin^2 \psi$ -Verfahren [78, 79] durchgeführt.

Bei der Röntgendiffraktometrie wird die Beugung von Röntgenstrahlen an Atomen einer Kristallstruktur ausgenutzt, um Spannungen zu ermitteln. Bei bekannter Wellenlänge des Röntgenstrahls lassen sich Netzebenenabstände über den gemessenen Winkel des gebeugten Strahls bestimmen. Eigenspannungen führen zu einer Verzerrung der Elementarzellen des Werkstoffs verbunden mit einer Änderung des Netzebenenabstandes. Das $\sin^2 \psi$ -Verfahren erlaubt es, durch eine Kippung der zu untersuchenden Probe die unterschiedlichen Orientierungen der einzelnen Kristallite (auch die, die nicht parallel zur Oberfläche liegen) und damit die sich unterscheidenden Netzebenenabstandsänderungen zu erfassen [79]. Somit lässt sich in Abhängigkeit des Kippwinkels ψ über die gemessenen Netzebenenabstände die Dehnung in Belastungsrichtung ermitteln. Die Spannung lässt sich dann über die zuvor bestimmte Dehnung unter Annahme eines ebenen Spannungszustandes berechnen.

Bei der durchgeführten Eigenspannungsbestimmung bestanden am Röntgendiffraktometer folgende Messbedingungen:

- Strahlung: Cu-K_α mit Ni-K_β-Filter
- Röhrenspannung: 40 kV
- Kathodenstrom: 40 mA
- Primärblende: 2 mm
- Liniendetektor: Vantec
- Mode: unlocked coupled – side inclination
- gemessene Gitterebene: γ -Fe (311)
- gemessene ψ -Winkel: 0; $\pm 18,5$; $\pm 26,7$; $\pm 33,4$; $\pm 39,5$; $\pm 45,3$; $\pm 51,1$; $\pm 57,2$; ± 64

Bei den in dieser Arbeit bestimmten Eigenspannungen handelt es sich um Eigenspannungen 1. Ordnung (Makroeigenspannungen), die über einen Bereich mehrerer Körner bestimmt werden.

In Kapitel 4 werden sowohl bei den Ergebnissen der Experimente als auch bei denen der Simulation Axialeigenspannungen dargestellt. Die Darstellung der Axialeigenspannungen erscheint aufgrund der Zylindergeometrie der untersuchten Proben und der in der Praxis überwiegenden Biegebeanspruchung von Wellen geeignet.

3.3.5 Verzugsbestimmung

Um festzustellen, welche Maß- und Formänderungen die zylindrischen Proben des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 infolge des Erwärmens auf 840 °C und anschließenden ultraschallunterstützten Wasserabschreckens erfahren, wurden ausgewählte Proben mit einem 3D-Koordinaten-Messgerät des Typs *KMG Mitutoyo Crysta-Apex C574* vermessen. Vor und nach der Wärmebehandlung wurden in je zwölf Höhen der Proben mit konstantem Abstand jeweils 42 äquidistante Messpunkte um den Probenumfang aufgenommen.

Die Auswertung der Koordinatenmessungen erfolgte mit der kommerziellen Software *PolyWorks® 12.1.13*. Nach dem Import der Koordinaten als Punktewolken wurden aus diesen in dem Softwarepaket *IM Inspector* Regelgeometrien erstellt sowie ein idealer Zylinder eingepasst. Durch einen Vergleich der vor und nach der Wärmebehandlung gemessenen Punktewolken lässt sich der Verzug der Proben veranschaulichen.

Aus Gründen der Veranschaulichung wurden die Abweichungen der einzelnen Punkte der Vorher- und Nachhermessung in den Abbildungen zur Verzugsvisualisierung mit einem Faktor von 200 skaliert und dargestellt.

4 Experimentelle Ergebnisse

4.1 Ergebnisdarstellung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ultraschallunterstützten und konventionellen Flüssigkeitsabschreckungen der Aluminiumknetlegierung sowie der beiden untersuchten Stähle dargestellt. Die Darstellung dieser Ergebnisse erfolgt dabei hinsichtlich der Abschreckwirkung und der Gleichmäßigkeit des Abschreckprozesses sowie hinsichtlich der Auswirkung auf die Werkstoffeigenschaften.

Aufgrund des enormen Umfangs des gesamten Versuchsprogramms werden die gewonnenen Ergebnisse im Folgenden zur Veranschaulichung des Einflusses der untersuchten Prozessparameter – Durchmesser und damit Größe der schallabgebenden Fläche, Ultraschallamplitude, Abstand zwischen Sonotrode und Probe sowie Badtemperatur – exemplarisch für ausgewählte Parameterkombinationen detailliert dargestellt. Diese exemplarischen Darstellungen spiegeln die Einflüsse anderer Parameterkombinationen qualitativ wider. Anschließend werden die Ergebnisse aller Versuche in komprimierter Form anhand normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} gezeigt.

In den Abbildungen zur Charakterisierung der Abschreckwirkung werden hauptsächlich Randabkühlverläufe gezeigt, die in der Probenmittelebene an der randnahen sonotrodenzugewandten Messposition bei 0° aufgenommen wurden.

Die bei konventioneller Abschreckung dargestellten Streuungen ergeben sich aus der mindestens zweimaligen (Stahl) bzw. fünfmaligen (Aluminium) Wiederholung jedes Abschreckversuchs zur Prüfung der Reproduzierbarkeit. Vergleichbare Streuungen treten auch bei Abschreckungen mit Ultraschallunterstützung auf. Daher werden nachfolgend aus Gründen der Übersichtlichkeit nur repräsentative Abkühlkurven dargestellt.

Die im Folgenden dargestellten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} und Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} werden in Säulendiagrammen über den Prozessparametern Abstand zwischen Sonotrode und Probe und Ultraschallamplitude dargestellt. Die Variation der Größe der schallabgebenden Fläche wird über Säulen mit unterschiedlichen Durchmessern realisiert. Diese Säulen beinhalten in der Regel eine Farbskalierung zur Darstellung der Mediumtemperatur. Abbildung 26 veranschaulicht schematisch, wie sich die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} und Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} unterschiedlicher Temperaturen bei ansonsten gleichen Prozessparametern ergeben.

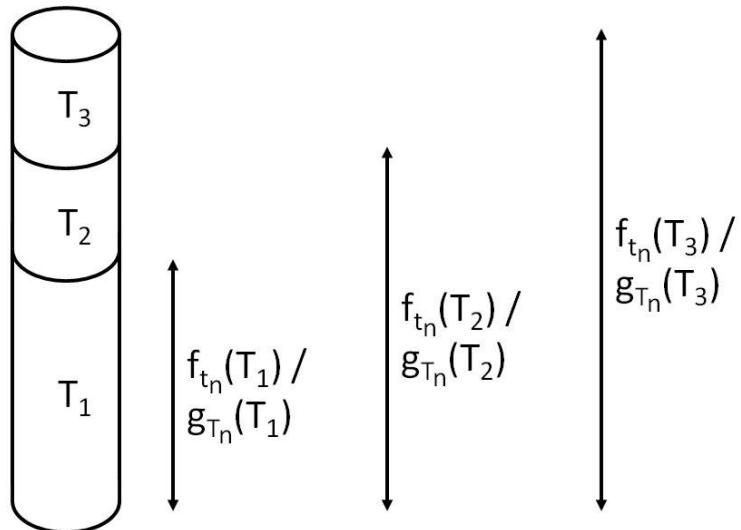


Abbildung 26: Schematische Darstellung zur Angabe der Höhe normierter Abschreckfaktoren und Temperaturdifferenzfaktoren mittels Säulendiagramm bei unterschiedlichen Mediumtemperaturen.

4.2 Wasserabschreckung am Werkstoff EN AW-6082

4.2.1 Konventionelle Abschreckung

In Abbildung 27 sind typische Abkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung eines Aluminiumzylinders mit auftretenden Streuungen bei verschiedenen Wassertemperaturen dargestellt. Infolge eines sich stabilisierenden Dampffilms steigt die Abkühltdauer und sinkt die mittlere Abkühlrate mit zunehmender Wassertemperatur. Während bei Temperaturen von 30 °C und 60 °C kein bzw. kaum Filmsieden zu beobachten ist, nimmt die Stabilität des Filmsiedens mit zunehmender Wassertemperatur stark zu.

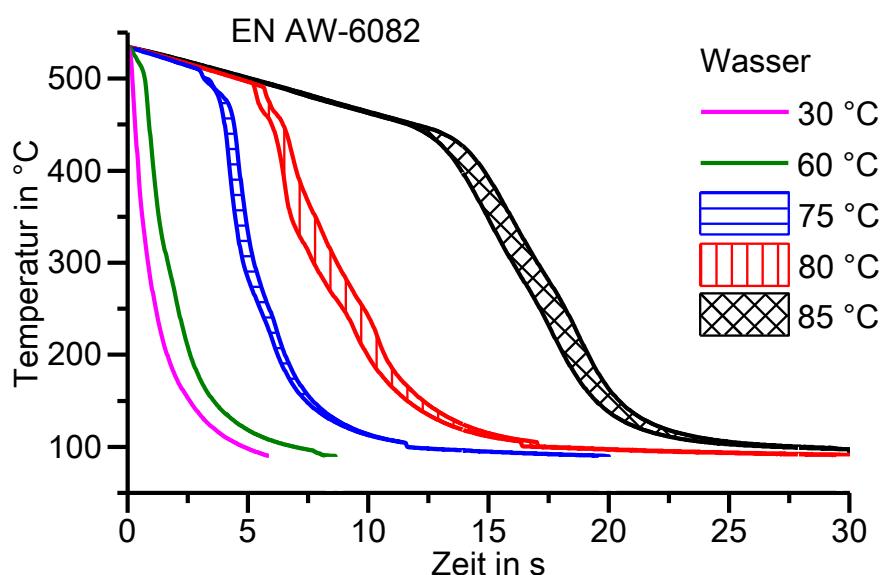


Abbildung 27: Randabkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen [80].

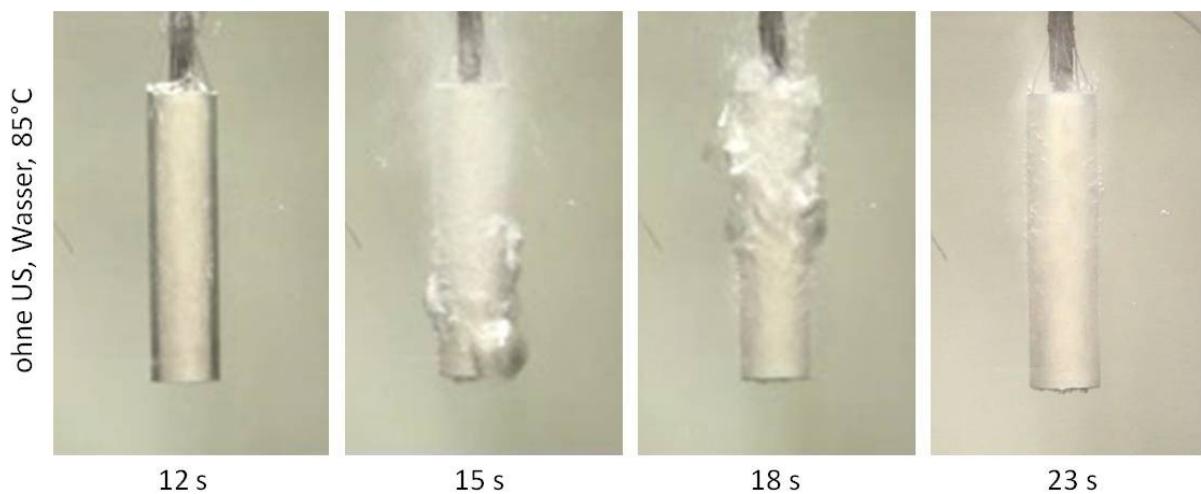


Abbildung 28: Bilderserie der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.

Anhand der in Abbildung 27 dargestellten Abkühlverläufe wird deutlich, dass die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Abschreckversuche von EN AW-6082 gut ist. Mit zunehmender Wassertemperatur nimmt diese leicht ab.

In den dargestellten Abkühlverläufen der Wassertemperaturen von 75 °C und 80 °C zeigt sich bei etwa 100 °C ein kurzzeitiger relativ starker Abfall des Kurvenverlaufs, der mit einem sprunghaften Anstieg der Abkühlrate zu diesem Zeitpunkt einhergeht. Dieses Phänomen, das auch bei Abkühlverläufen der ultraschallunterstützten Abschreckung der Aluminiumknetlegierung beobachtet wird, ist, wie bereits in Kapitel 3.2.4 beschrieben, auf einen Wasserdampfeintritt in den Ringspalt zwischen Bohrung und Thermoelement und dessen Kondensation zu erklären, und findet im Folgenden daher keine Erwähnung mehr.

Die konventionelle Abschreckung der zylindrischen Probe erfolgt über die vier Phasen der Flüssigkeitsabschreckung. In Abbildung 28 ist dies anhand einer Bilderserie bei einer Wassertemperatur von 85 °C dargestellt. Der die Probe umgebende Dampffilm bricht zunächst an der unteren Stirnfläche auf. Die Benetzung nach dem Filmsieden vollzieht sich dann relativ schnell durch ein axiales Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Probenstirnfläche.

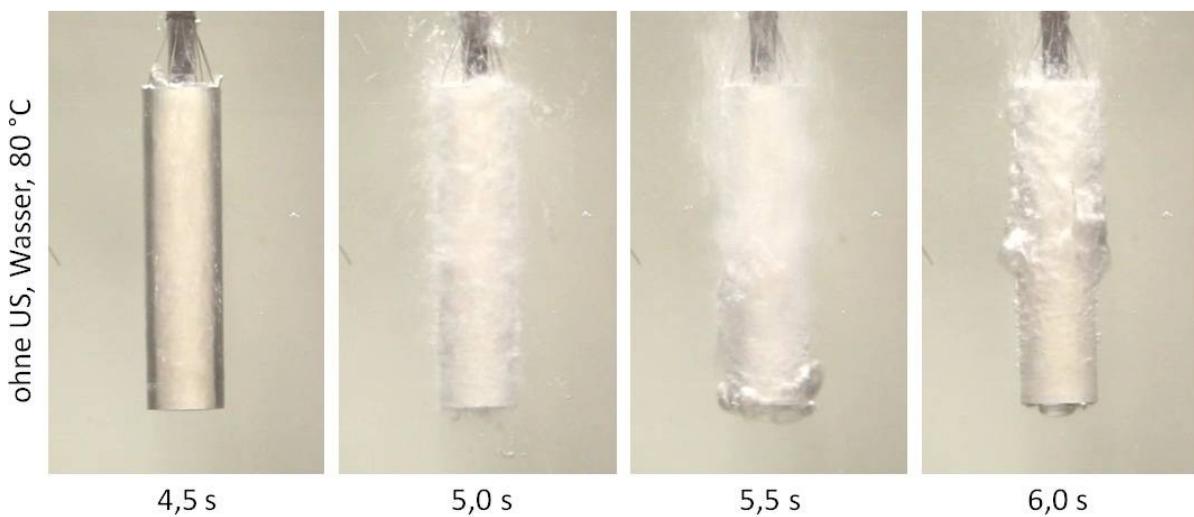


Abbildung 29: Bilderserie der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 80 °C.

Bei den Abschreckungen bei 75 °C und 80 °C konnten darüber hinaus explosionsartige Verdampfungen kurz vor Beginn des Blasensiedens beobachtet werden. In Abbildung 29 wird dies anhand einer Bilderserie am Beispiel einer konventionellen Abschreckung bei 80 °C veranschaulicht. Zwischen dem stabilen Filmsieden bei 4,5 s und dem Beginn des Blasensiedens an der unteren Stirnfläche der Probe bei 5,5 s kommt es zu einer

explosionsartigen Verdampfung um die gesamte Probenoberfläche (5,0 s). Dieses Phänomen lässt sich auch anhand der zugehörigen aufgenommenen Abkühlkurven erkennen, die im Gegensatz zu denen bei 85 °C einen diskontinuierlichen Übergang vom Film- zum Blasensieden aufweisen.

4.2.2 Einseitige Ultraschallunterstützung

Die experimentellen Untersuchungen bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von Zylindern aus EN AW-6082 umfassen folgende Kombinationen von Prozessparametern (Tabelle 13):

Tabelle 13: Untersuchte Parameterkombinationen bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Versuchsreihe: EN AW-6082 1S Wasser					
Sonotrode: Durchmesser in mm	Abstand in mm	Amplitude in μm	Wassertemperatur in °C		
			60	75	85
18	10	31	x	x	x
	30	31	x	x	x
	50	31	x	x	x
34	10	19	x	x	x
	30	19	x	x	x
	50	19	x	x	x
	100	19			x
50	10	19	x	x	x
	30	19	x	x	x
	50	19	x	x	x
	100	19			x

4.2.2.1 Charakterisierung der Abschreckwirkung

Die Unterstützung der Wasserabschreckung mittels Ultraschall führt zu einer signifikanten Beeinflussung der geschilderten Abkühlvorgänge von EN AW-6082.

Zur visuellen Veranschaulichung des Ultraschalleinflusses soll eine Bilderserie zweier Abkühlvorgänge, die in Abbildung 30 dargestellt ist, dienen. In dieser Abbildung ist der Abschreckvorgang der konventionellen im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung eines Aluminiumzylinders bei 85 °C anhand einer Bilderserie mit den ausgewählten Zeitpunkten 9 s, 12 s, 15 s und 18 s wiedergegeben. Während die Probe bei der konventionellen Abschreckung ohne Ultraschall nach 9 s noch komplett von einem Dampffilm umgeben ist, zeigt sich bei der einseitigen Ultraschallunterstützung zu diesem Zeitpunkt ein vorzeitiges Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode. Infolge der Ultraschallunterstützung ist der Dampffilm vor der Sonotrode nach 12 s komplett zerstört. Während nach 15 s bei

Ultraschallunterstützung schon konvektiver Wärmeübergang vorliegt, ist bei der konventionellen Abschreckung noch immer stabiles Filmsieden im oberen Probendrittel und eine intensive Blasenbildung im unteren Probendrittel zu beobachten. Diese hat sich nach 18 s in Richtung der oberen Stirnfläche fortgesetzt. Im unteren Probendrittel wird die Wärme zu diesem Zeitpunkt durch Konvektion abgeführt.

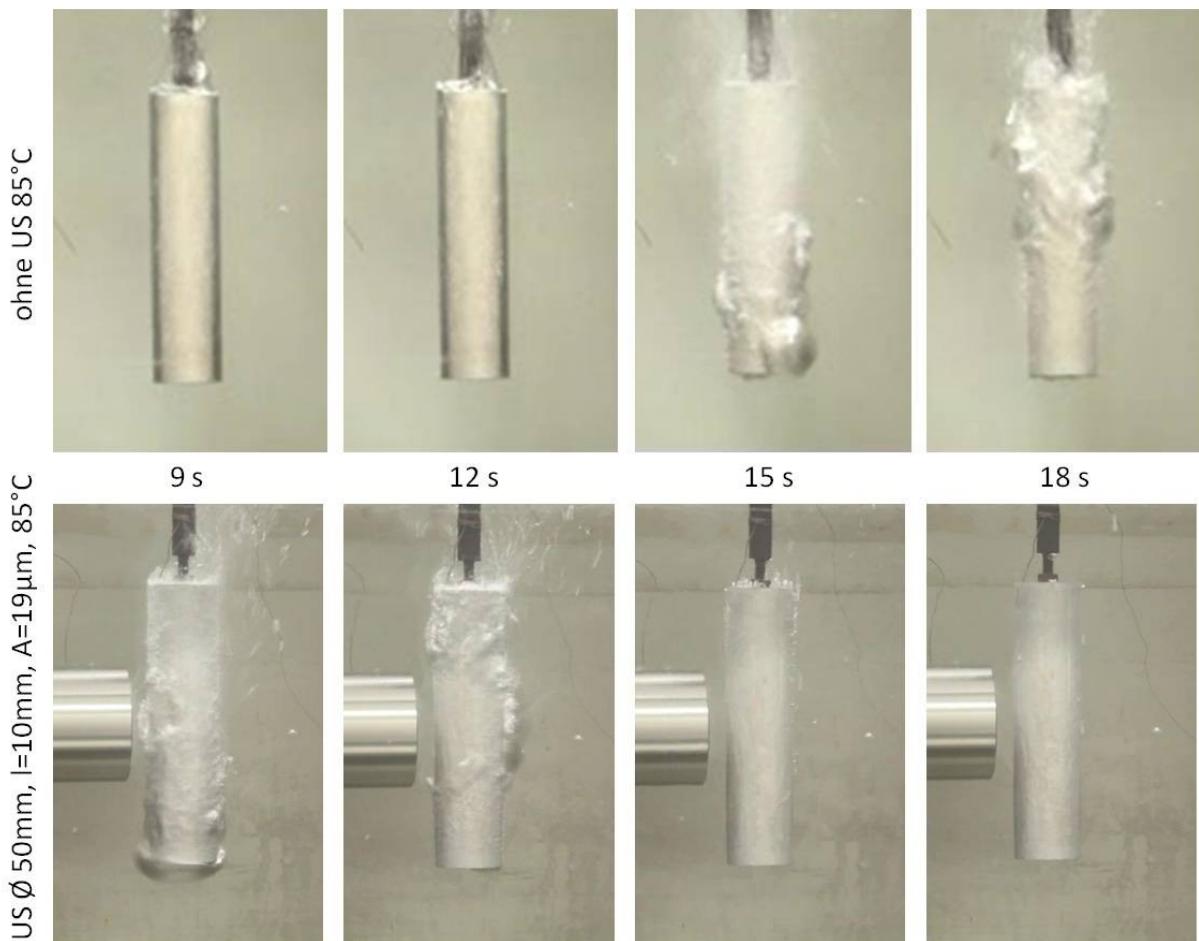


Abbildung 30: Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C in Anlehnung an [80].

Das kontinuierliche Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Stirnseite, wie es bei der konventionellen Wasserabschreckung des Aluminiumzylinders erfolgt, findet unter Ultraschallunterstützung so nicht mehr statt. Es kommt zum erstmaligen lokalen Zusammenbruch des Dampffilms auf Höhe der Probenmittelebene vor der Sonotrode. Erst dann beginnt das Aufreißen der Dampfhaut auf der unteren Stirnseite. Unter Ultraschalleinfluss wird das kontinuierliche Hochwandern der Benetzungsfront von der Wiederbenetzung in der Probenmittelebene überlagert und beschleunigt.

In Abbildung 31 sind beispielhaft Abkühlkurven der einseitigen ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen vergleichend dargestellt. Wie auch bei der konventionellen Abschreckung nehmen die Abkühlzeit sowie die Stabilität des Filmsiedens infolge eines sich stabilisierenden Dampffilms mit zunehmender Wassertemperatur zu. Bei Wassertemperaturen von 30 °C und 60 °C ist jeweils keine Filmsiedephase zu beobachten. Bei 85 °C zeigt sich ein auffällig scharfer Knick im Kurvenverlauf beim Übergang vom Film- zum Blasensieden, der das abrupte Aufreißen des zunächst stabilen Dampffilms vor der Sonotrode durch den Ultraschall kennzeichnet. Am Beispiel der Wassertemperatur von 85 °C ist die Reduzierung der Abschreckzeit durch Ultraschallunterstützung deutlich zu erkennen.

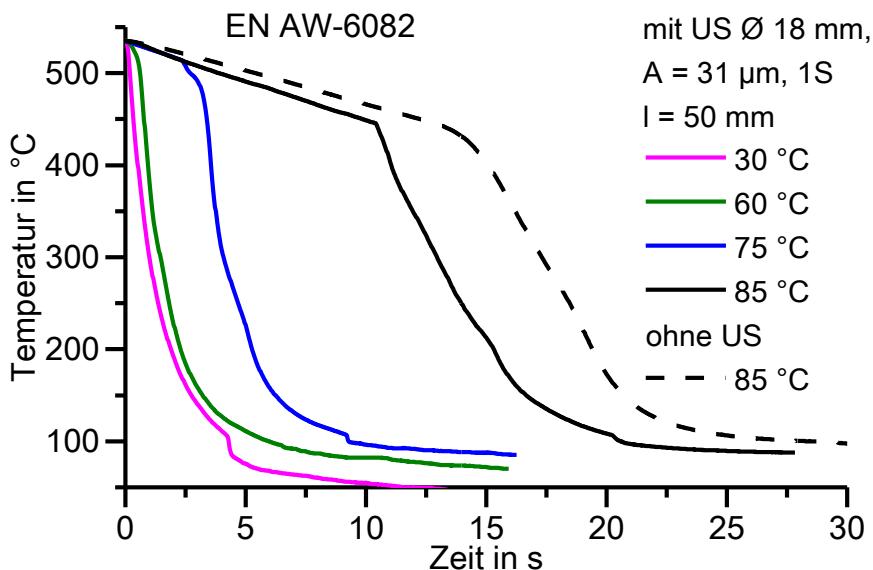


Abbildung 31: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

Abbildung 32 zeigt die zugehörigen Abkühlraten der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen. Bei Ultraschallunterstützung der hier untersuchten Parameter lassen sich in Abhängigkeit der Temperatur Abkühlraten von bis zu 350 K/s erzielen. Die zunehmende Stabilisierung des Dampffilms mit zunehmender Wassertemperatur, trotz Ultraschallunterstützung, zeigt sich durch eine Verringerung der Abkühlrate in dem entsprechenden Temperaturbereich von 540 °C bis etwa 450 °C. Während bei einer Wassertemperatur von 30 °C kein Filmsieden zu beobachten ist, was sich anhand des sofortigen Anstiegs der Abkühlrate zeigt, lässt bei 85 °C eine stabile Filmsiedephase erkennen, in der die Temperatur der Probe nur um etwa 90 K fällt. Durch die zunehmende Stabilisierung des Dampffilms mit zunehmender Wassertemperatur

kommt es außerdem zu einer Verschiebung der maximalen Abkühlrate zu geringeren Temperaturen.

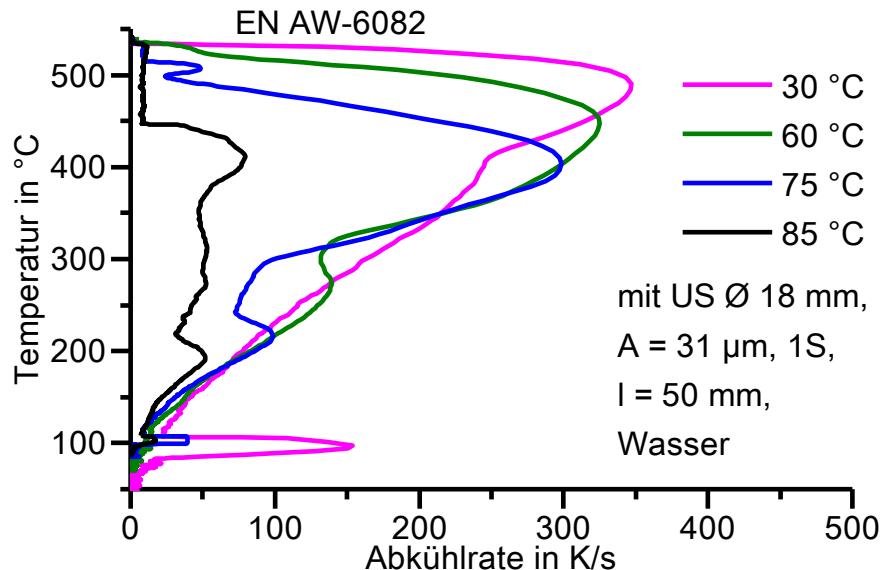


Abbildung 32: Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

Abbildung 33 veranschaulicht exemplarisch den Ultraschalleinfluss anhand der variierenden Größe der schallabgebenden Fläche bei der Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei einer Wassertemperatur von 75 °C.

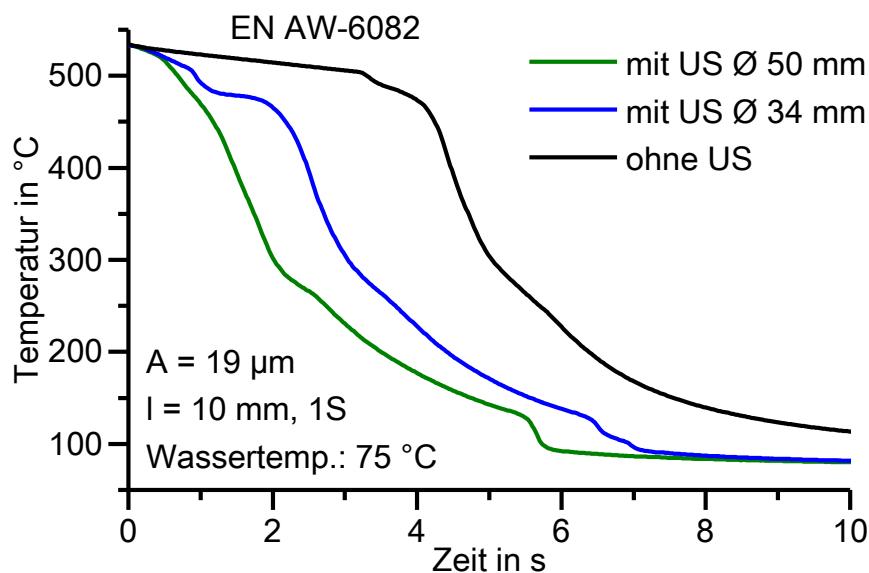


Abbildung 33: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

Im dargestellten Beispiel lässt sich der bei konventioneller Abschreckung existierende Dampffilm mit Ultraschallunterstützung destabilisieren und zerstören. Während die Phase des stabilen Filmsiedens bei konventioneller Abschreckung 3,2 s dauert, existiert

ein stabiler Dampffilm bei Ultraschallunterstützung nur Sekundenbruchteile, bevor sich ein kurzes Übergangssieden und das Blasensieden anschließen. Mit zunehmendem Durchmesser der Sonotrodenstirnfläche und somit Größe der schallabgebenden Fläche steigt der Grad der Destabilisierung, einhergehend mit einer Abnahme der Abkühltdauer und einer Steigerung der mittleren Abkühlrate.

In Abbildung 34 sind die zugehörigen Abkühlraten dargestellt. Obwohl die maximale Abkühlrate in diesem Beispiel bei der konventionellen Abschreckung auftritt, übersteigen die Abkühlraten der Ultraschallunterstützung die der konventionellen Abschreckung zu Beginn der Abschreckung im Bereich des Filmsiedens. Mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche lässt sich die bei konventioneller Abschreckung erzielte Abkühlrate während des Filmsiedens mit Ultraschall in diesem Beispiel um bis zu einem Faktor von 10 steigern.

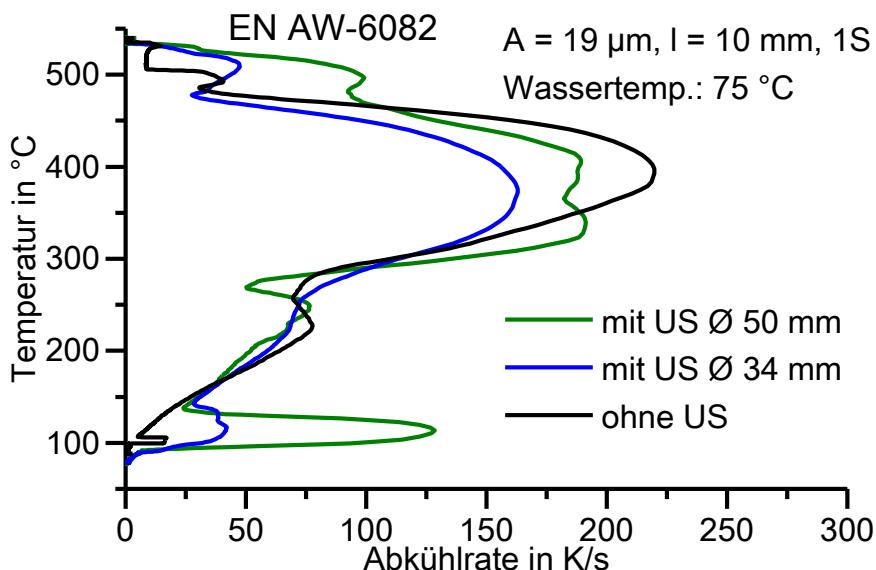


Abbildung 34: Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

In Abbildung 35 ist der Einfluss des Abstandes zwischen Sonotrodenstirnfläche und Probe bei Ultraschallunterstützung im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung bei 85 °C wiedergegeben. Die Filmsiedephase wird durch die Beschallung im Vergleich zur konventionellen Abschreckung verkürzt und beschleunigt. Die Leidenfrost-Temperatur bleibt hingegen auch mit Ultraschallunterstützung mit etwa 450 °C verglichen zur konventionellen Abschreckung nahezu unverändert. Mit geringer werdendem Abstand zwischen abschallender Fläche und Probe verschiebt sich der Leidenfrost-Punkt zu kürzeren Zeiten, die Beschleunigung in der Filmsiedephase nimmt zu, die Gesamtabkühltdauer sinkt und die mittlere Abkühlrate steigt. Im Unterschied zur

konventionellen Abschreckung zeigt sich anhand der mit Ultraschallunterstützung aufgenommenen Abkühlkurven das schlagartige Aufreißen des Dampffilms anhand des Kurvenknicks beim Übergang vom Film- zum Blasensieden. Bei der konventionellen Abschreckung ist dieser Übergang durch das Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Stirnfläche "allmählicher".

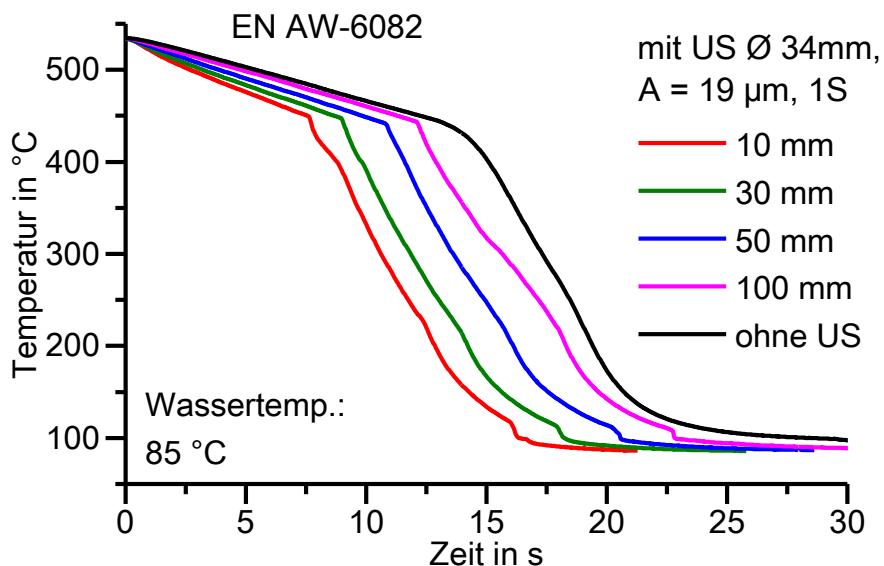


Abbildung 35: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.

Für ein Beispiel der schnellsten einseitig ultraschallunterstützten Abschreckungen von EN AW-6082 im Vergleich zur konventionellen Abschreckung werden in der folgenden Abbildung 36 die resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten gezeigt. Die dargestellten Verläufe spiegeln die bisherigen Ergebnisse wider. Im gesamten Temperaturbereich übersteigen die WÜK der ultraschallunterstützten Abschreckung die der konventionellen. Die Beeinflussung des Abschreckvorgangs durch Ultraschall zeigt sich wie bei den Abkühlverläufen durch den schlagartigen und deutlichen Anstieg der WÜK beim Übergang vom Film- zum Blasensieden, der sich bei der konventionellen Abschreckung so nicht beobachten lässt. Obwohl es auch mit Ultraschallunterstützung zu Beginn der Abschreckungen zu einem Filmsieden kommt, sind die WÜK in dieser Phase deutlich höher als die der konventionellen Abschreckung, in diesem Beispiel um etwa das Dreifache. Während die Ultraschallunterstützung im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zwar zu einer Beschleunigung in der Filmsiedephase führt, bleibt die Leidenfrost-Temperatur bei der Mehrheit der Abschreckversuche etwa konstant. In den hier dargestellten Verläufen der WÜK zeigt sich jedoch, dass sich der Leidenfrost-Punkt bei Ultraschallunterstützung (in diesem Fall bei einem Durchmesser

der Abschallfläche von 50 mm) auch zu geringeren Temperaturen verschieben lässt (hier von ca. 450 °C auf etwa 425 °C).

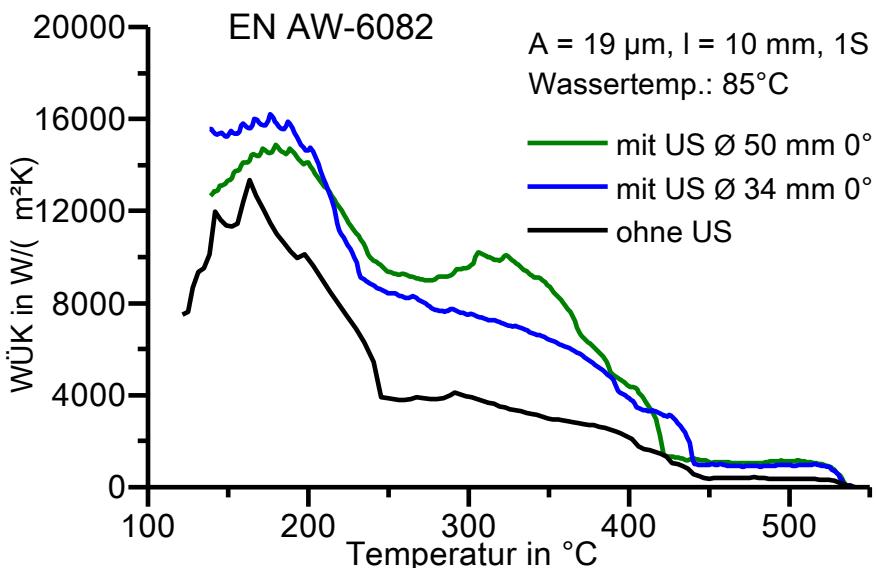


Abbildung 36: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

In einer zusammenfassenden Übersicht wird in Abbildung 37 der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter bei einseitiger Ultraschallunterstützung auf die Wasserabschreckung von EN AW-6082 gezeigt. Dargestellt ist der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} über dem Abstand zwischen Sonotrode und Probe und der Ultraschallamplitude jeweils für die drei verschiedenen Durchmesser der Abschallfläche bei den Wassertemperaturen 60 °C, 75 °C und 85 °C. Die dargestellten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} spiegeln die bisher gezeigten Ergebnisse größtenteils wider. Der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} steigt mit zunehmender Größe der Abschallfläche, mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe sowie, mit gewissen Ausnahmen, mit zunehmender Wassertemperatur. Diese Ausnahmen können hauptsächlich bei einer Wassertemperatur von 75 °C beobachtet werden. Die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} von 75 °C liegen zwar oberhalb der von 60 °C, aber zum Teil auch oberhalb der von 85 °C. In dieser Darstellung zeigt sich außerdem, dass der Einfluss der Prozessparameter Wassertemperatur und Abstand den der Größe der schallabgebenden Fläche übersteigen. Die Werte des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 liegen alle in einem Bereich von $1 \leq f_{t_n} (\text{EN AW-6082, 1S}) \leq 1,75$.

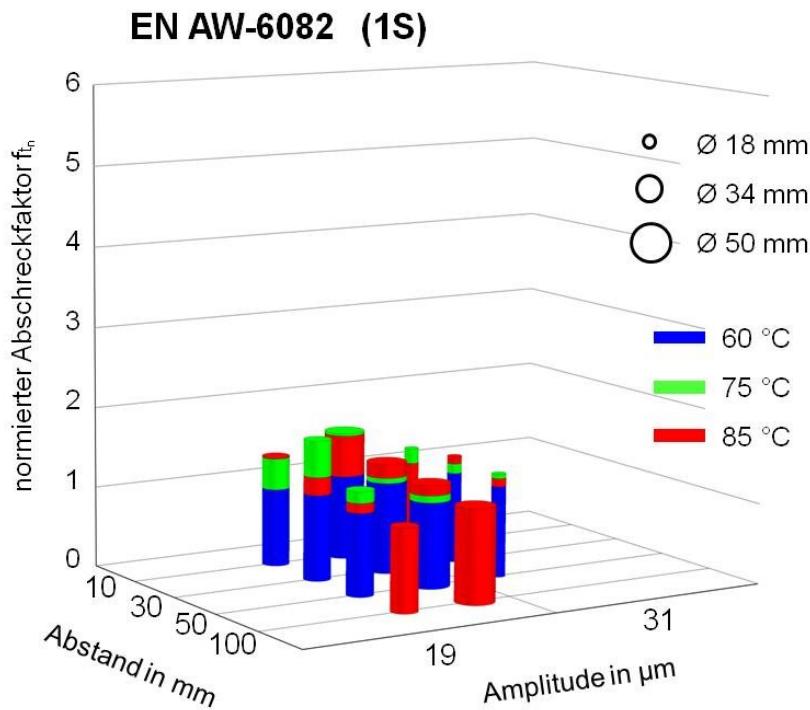


Abbildung 37: Normierte Abschreckfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

4.2.2.2 Beurteilung der Gleichmäßigkeit

Die einseitige Beschallung der Probe führt zu einer ungleichmäßigen Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe. Die sonotrodenzugewandte Seite (0°) kühlt schneller ab als die sonotrodenabgewandte Seite (180°) der Probe. Abbildung 38 zeigt dazu exemplarisch die Abkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung einer Probe. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der bei 45° und 135° aufgenommenen Kurven verzichtet. Die bei 45° gemessene Abkühlkurve verläuft zwischen der 0° - und 90° -Kurve, die bei 135° gemessene zwischen der 90° - und 180° -Kurve. In einem Temperaturbereich zwischen etwa 400°C und 250°C kühlt der Kern der Probe sogar geringfügig schneller ab als der Rand bei 180° . Das bedeutet, dass es bei der einseitigen Ultraschallunterstützung zu einem zusätzlichen der Schallausbreitungsrichtung entgegengesetzten Wärmestrom von der sonotrodenabgewandten (180°) zur sonotrodenzugewandten Seite (0°) kommt (siehe Abbildung 20).

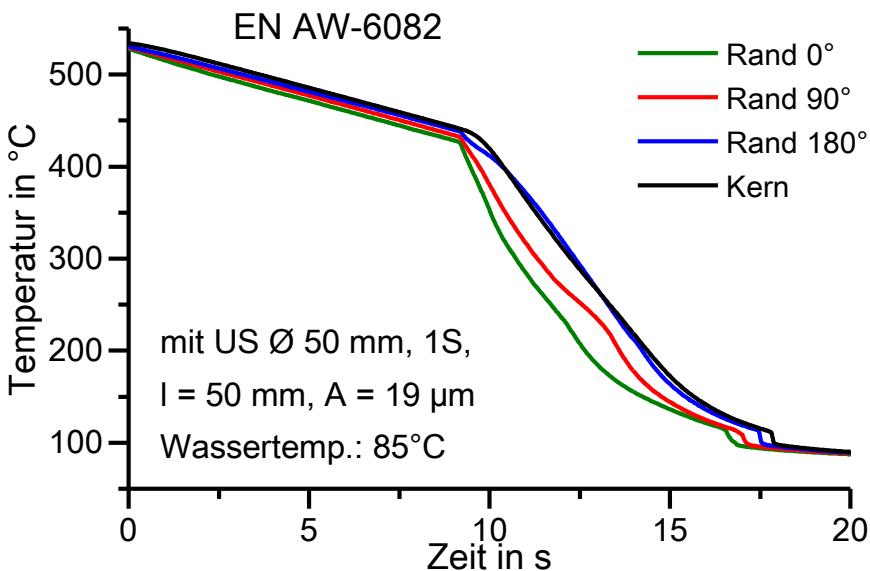


Abbildung 38: Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 (\varnothing 50 mm, $A = 19 \mu\text{m}$, $I = 50 \text{ mm}$, 85°C).

Diese Ungleichmäßigkeit in Umfangsrichtung der Probe wird besonders bei Betrachtung der Wärmeübergangskoeffizienten deutlich. In Abbildung 39 sind die an den Positionen 0° , 90° und 180° ermittelten WÜK exemplarisch für die einseitige ultraschallunterstützte Wasserabschreckung von EN AW-6082 dargestellt.

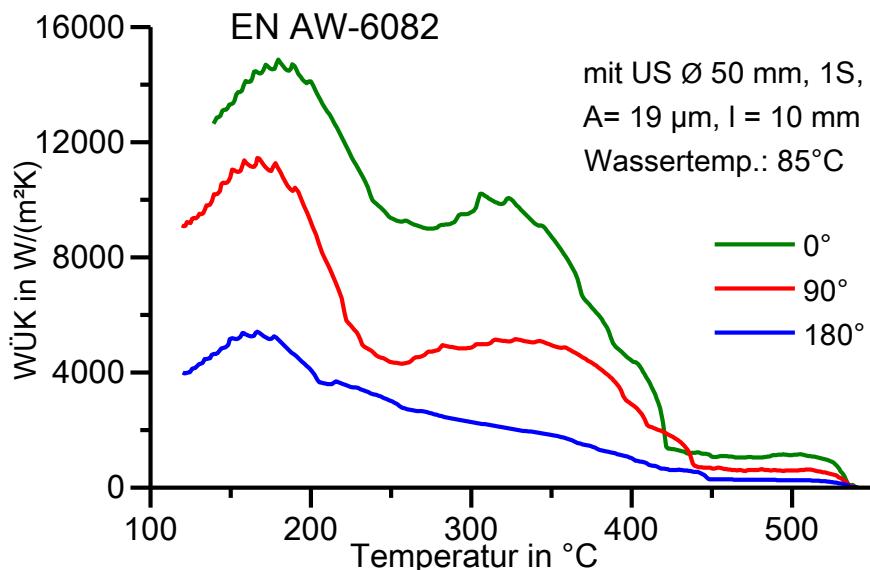


Abbildung 39: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85°C .

Dabei wird deutlich, dass die WÜK mit zunehmendem Umfangswinkel und damit zunehmender Entfernung von der sonotrodenzugewandten Seite (0°) deutlich abnehmen. Der maximale WÜK der dargestellten Verläufe ist auf der sonotrodenzugewandten Seite (0°) der Probe um den Faktor 2,7 höher als auf der

sonotrodenabgewandten Seite (180°). In der Filmsiedephase ist der mittlere WÜK bei 0° sogar etwa viermal größer als bei 180° . Außerdem verschiebt sich die Leidenfrost-Temperatur mit zunehmendem Umfangswinkel zu höheren Temperaturen.

In Abbildung 40 ist der Einfluss der varierten Prozessparameter auf die Gleichmäßigkeit in Umfangsrichtung der Probe bei einseitig ultraschallunterstützter und konventioneller Wasserabschreckung der Aluminiumknetlegierung anhand der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} (Rand 0° – Rand 180°) wiedergegeben.

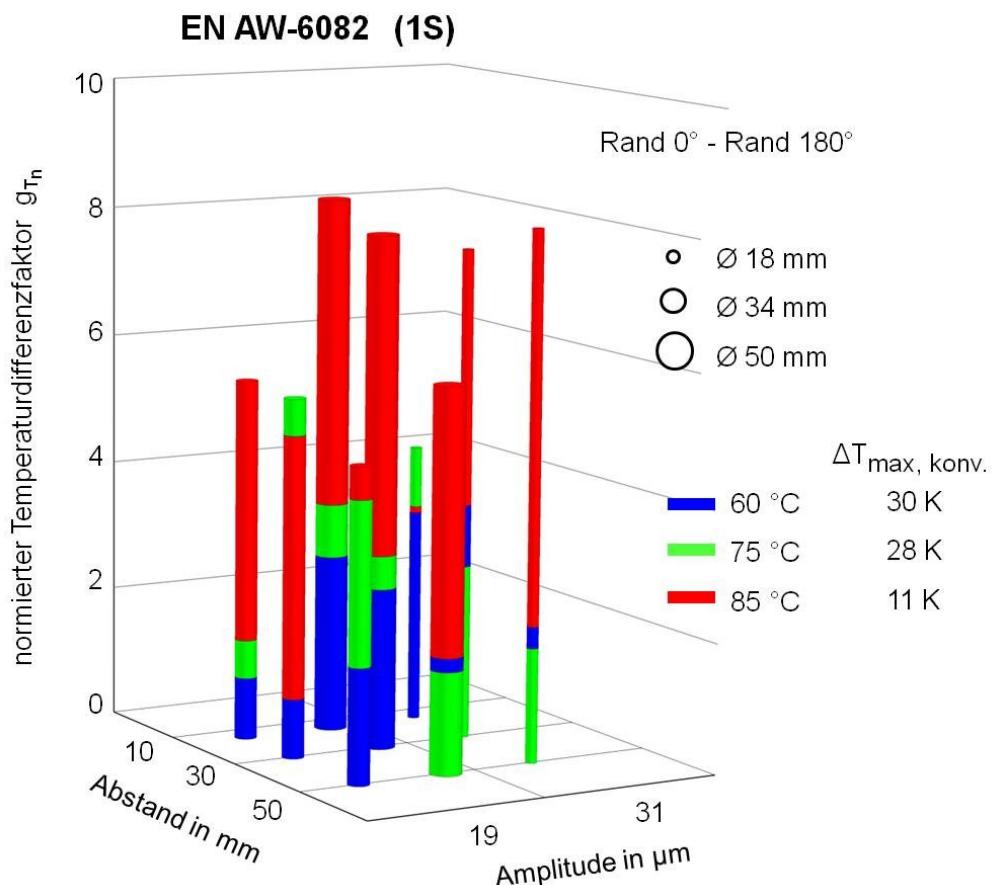


Abbildung 40: Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Bei konventioneller Abschreckung sinken die Temperaturdifferenzen in Umfangsrichtung der Probe mit zunehmender Wassertemperatur. Dies führt dazu, dass die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} mit zunehmender Temperatur steigen, da die Ultraschallunterstützung erwartungsgemäß zu zum Teil deutlich größeren tangentialen Temperaturdifferenzen als bei konventioneller Abschreckung führt. Eine Abhängigkeit der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} von den Prozessparametern ist mit einigen Ausnahmen feststellbar. In der Regel bringt die Verringerung des Abstandes zwischen Sonotrode und Probe und die Zunahme der

Abschallfläche bei gleicher Ultraschallamplitude eine Steigerung der maximalen tangentialen Temperaturdifferenzen mit sich. Auftretende Ausnahmen werden in Zusammenhang mit einer Überlagerung von natürlicher und durch den Ultraschall erzwungener Benetzung gebracht.

4.2.2.3 Charakterisierung der Eigenschaften

Nach dem Abschrecken der zylindrischen Proben liegt ein homogenes Gefüge aus gleichachsigen Aluminiummischkristallkörnern vor. Das wiederholte Erwärmen der Proben auf Lösungsglühtemperatur bei den Abschreckexperimenten bringt ein Kornwachstum mit sich, wie in Abbildung 41 dargestellt wird. Ein signifikanter Einfluss auf die Messung von Abkühlkurven durch dieses Kornwachstum ist jedoch nicht zu erwarten.

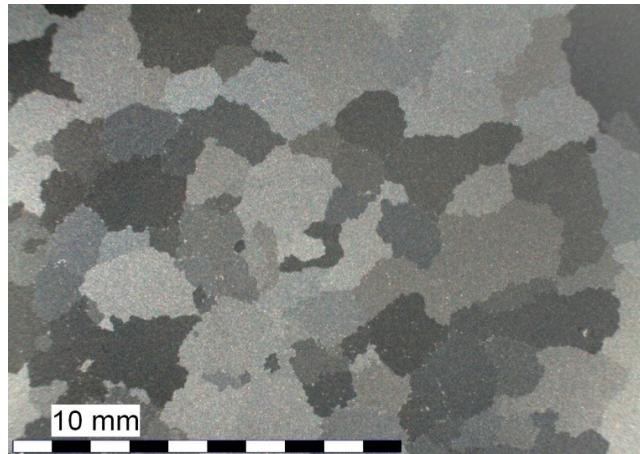


Abbildung 41: Gefüge von EN AW-6082 im Zustand T4 nach konventioneller Wasserabschreckung bei 85 °C.

In Abbildung 42 sind der gemessene Abkühlverlauf und die Abkühlrate der langsamsten Abkühlung des Versuchsprogramms (konventionelle Abschreckung bei einer Wassertemperatur von 85 °C) im zugehörigen kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm der Legierungscharge dargestellt. Ein derartiger Vergleich einer nichtlinearen Abkühlung in einem kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm ist laut MILKEREIT et al. [69] in guter Näherung zulässig.

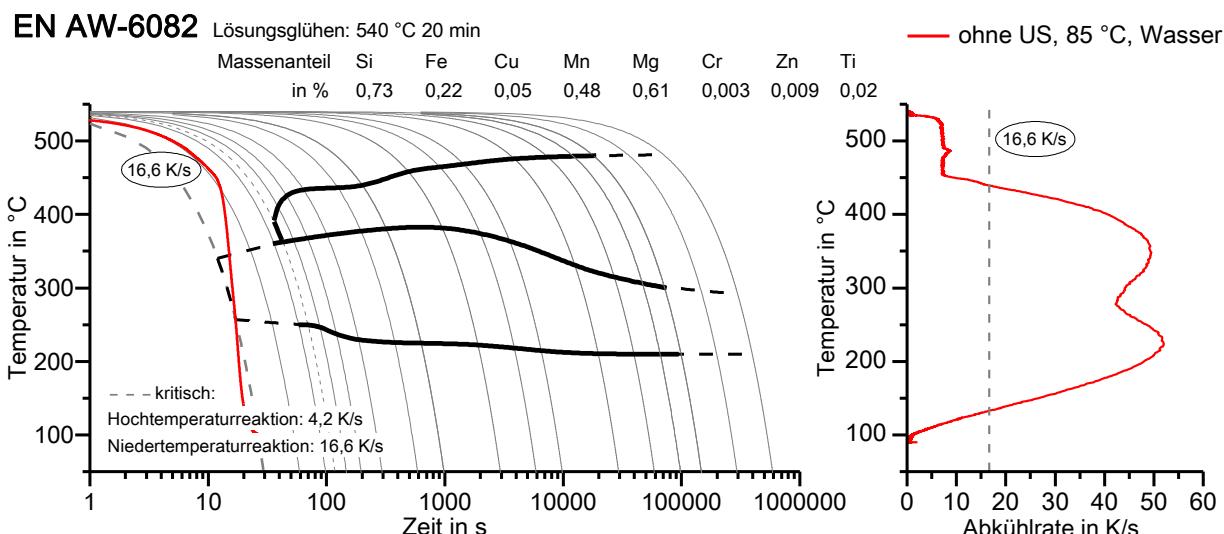


Abbildung 42: Langsamste Abkühlung des Versuchsprogramms im kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm der untersuchten Charge von EN AW-6082 in Anlehnung an [75].

Die Abkühlrate der langsamsten Abschreckung des Versuchsprogramms liegt in einem Temperaturbereich von 540 °C bis etwa 440 °C unterhalb der oberen kritischen Abschreckgeschwindigkeit von etwa 16,6 K/s [75] dieser Legierungscharge. Im ausscheidungsrelevanten Temperaturbereich zwischen ca. 350 °C und 200 °C [75] wird diese mit durchschnittlich etwa 48 K/s jedoch deutlich überschritten. Schon die langsamste Abkühlung des durchgeföhrten Versuchsprogramms der als abschreckempfindlich bekannten Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 führt demnach zu einer vollständigen Unterdrückung der Diffusionsvorgänge ohne Ausscheidungsbildung, wie mit Abbildung 42 gezeigt werden kann.

An Aluminiumproben dieser langsamsten Abkühlung wurde außerdem die Vickershärte (HV1) nach einer typischen Warmauslagerung auf den Zustand T6 geprüft. Die Wärmebehandlungsparameter lauteten:

- Lösungsglühen: 20 min bei 540 °C
- Abschrecken im Wasserbad bei 85 °C
- sofortige Warmauslagerung 4 h bei 180 °C

Über den gesamten Querschnitt der Proben wurde eine Härte von 111 ± 1 HV1 ermittelt. Dieses Ergebnis stimmt mit dem von [69, 75] ermitteltem Härtemaximum von 110 HV1 dieser Legierungscharge überein, welches sich bei überkritischer Abschreckung einstellt. Der hier ermittelte Härtewert entspricht zudem dem nach DIN EN 755-2 typischen Wert von 95 HB dieser Legierung für den Zustand T6, welcher laut DIN EN ISO 18265-4 einem Wert von 111 HV15 gleichzusetzen ist.

In Hinblick auf das durchgeführte Versuchsprogramm kann gefolgert werden, dass es einerseits während der Abschreckung mit Ultraschallunterstützung zu keiner Ausscheidungsbildung kommt und andererseits, dass auch bei Abschreckung mit allen anderen Parameterkombinationen mit Ultraschallunterstützung derartige Härtegrade erzielt werden.

An abgeschreckten Proben wurden mittels Wirbelstrom- und Farbeindringverfahren Rissprüfungen durchgeführt. Die untersuchten Proben aus EN AW-6082 wurden wiederholt mit einseitiger Ultraschallunterstützung in Wasser unterschiedlicher Temperaturen abgeschreckt. Bei den geprüften Proben wurden keine Riss- oder Defektanzeichen festgestellt. Daher ist davon auszugehen, dass für EN AW-6082 und die untersuchte Probengeometrie sowie Abschreckparameter die ultraschallunterstützte Wasserabschreckung in Bezug auf Rissbildung unkritisch ist.

4.2.3 Zweiseitige Ultraschallunterstützung

Bei den Abschreckexperimenten der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Zylindern aus EN AW-6082 wurden folgende Kombinationen von Prozessparametern untersucht (Tabelle 14):

Tabelle 14: Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Versuchsreihe: EN AW-6082 2S Wasser					
Sonotrode: Durchmesser in mm	Abstand in mm	Amplitude in μm	Wassertemperatur in °C		
			60	75	85
18	10	37	x	x	x
		92			x
		126			x
	30	37	x	x	x
	50	37	x	x	x
34	10	9			x
		13			x
		18	x	x	x
		37			x
	30	18	x	x	x
	50	18	x	x	x
50	10	9			x
		13			x
		18	x	x	x
	30	18	x	x	x
	50	18	x	x	x

4.2.3.1 Charakterisierung der Abschreckwirkung

Die zweiseitige Ultraschallunterstützung der Wasserabschreckung von EN AW-6082 führt zu einer signifikanten Beeinflussung verglichen zur konventionellen Abschreckung. Dies wird in Abbildung 43, die einen Vergleich von konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung eines Aluminiumzylinders bei 85 °C anhand einer Bilderserie mit ausgewählten Zeitpunkten darstellt, wiedergegeben.

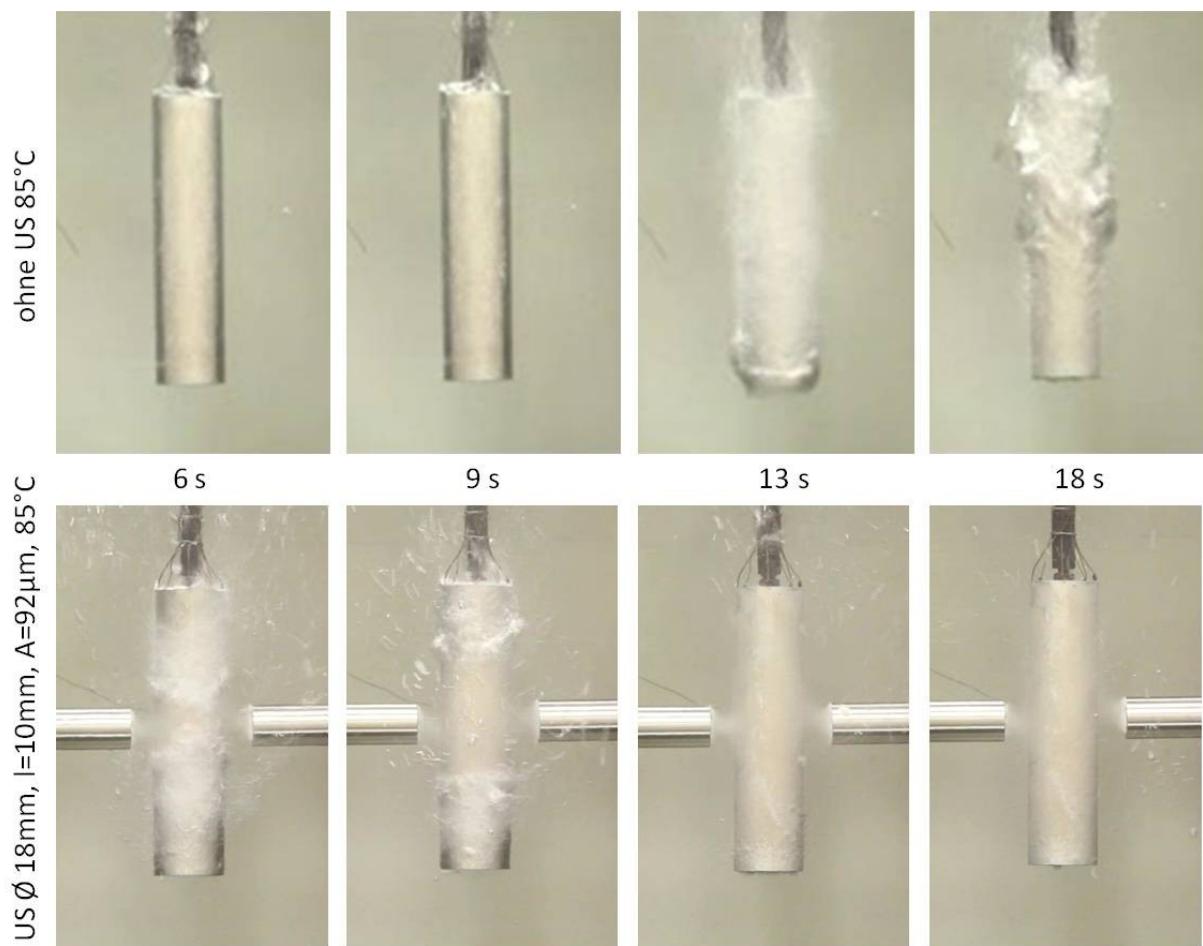


Abbildung 43: Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.

Während das Blasensieden bei der konventionellen Abschreckung ohne Ultraschall erst bei etwa 13 s an der unteren Stirnfläche der Probe beginnt, liegt bei der zweiseitigen Ultraschallunterstützung zu diesem Zeitpunkt bereits die Phase des konvektiven Wärmeübergangs vor. Infolge der Ultraschallunterstützung wird der Dampffilm, der die Probe bei der konventionellen Abschreckung nahezu 13 s stabil umgibt, vor den Sonotroden nach 6 s bereits deutlich zerstört. Das durch Ultraschall induzierte Aufreißen des Dampffilms in der Probenmittelebene von zwei gegenüberliegenden Seiten führt zur Bildung zweier Benetzungsfronten, die dann von der Probenmittelebene zu den beiden Stirnseiten der Probe wandern (9 s).

In Abbildung 44 wird an einem ausgewählten Beispiel der Einfluss der Wassertemperatur bei Ultraschallunterstützung dargestellt. Wie bei der konventionellen Abschreckung kommt es auch bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung zu einer zunehmenden Stabilisierung des Dampffilms mit zunehmender Wassertemperatur. Bei Wassertemperaturen von 75 °C und 85 °C kommt es bei den dargestellten Abschreckungen zu einer Überlagerung der Bewegung der Benetzungsfront und dem

durch Ultraschall induziertem Aufreißen des Dampffilms, was sich am diskontinuierlichen Kurvenverlauf zu Beginn des Blasensiedens zeigt. Am Beispiel der Abkühlverläufe bei 85 °C lässt sich die Reduzierung der Abschreckdauer durch Ultraschallunterstützung deutlich erkennen.

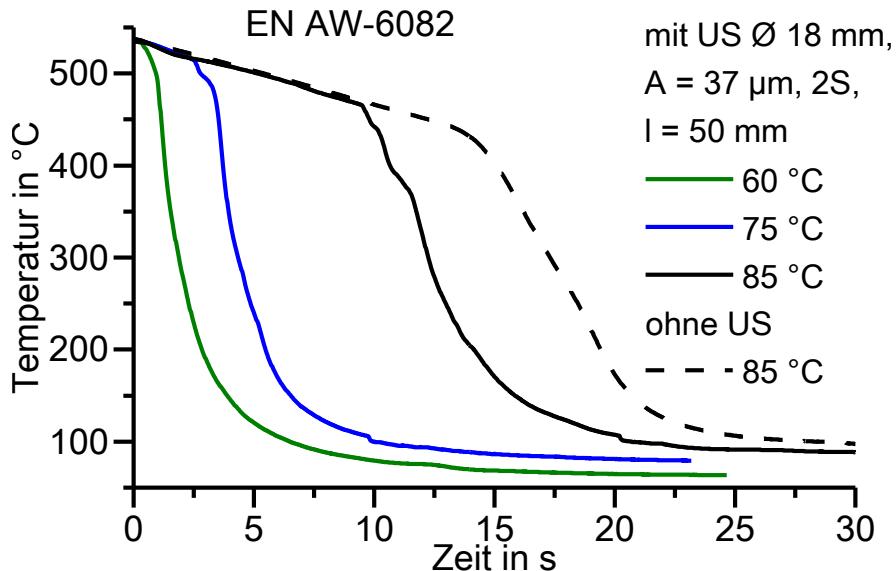


Abbildung 44: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

In Abbildung 45 wird der Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche anhand des Durchmessers im Vergleich zur konventionellen Abschreckung bei 75 °C gezeigt.

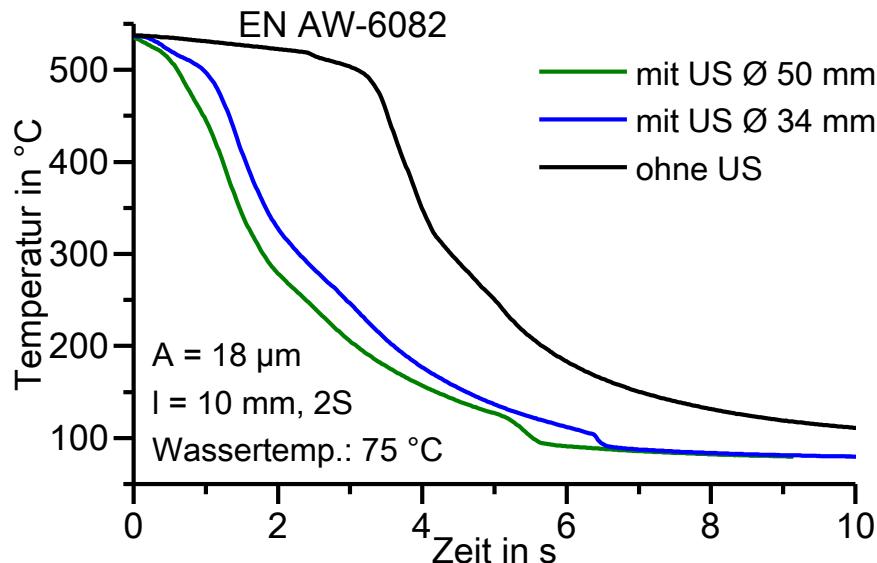


Abbildung 45: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

Der in diesem Beispiel bei konventioneller Abschreckung für 3,2 s stabil existierende Dampffilm lässt sich mit zweiseitiger Ultraschallunterstützung vorzeitig nach weniger als

1 s zerstören. Eine zunehmende Größe der schallabgebenden Fläche führt zu einer Steigerung des Destabilisierungsgrades des Dampffilms, was wiederum mit einer Abnahme der Abkühltdauer und einer Steigerung der mittleren Abkühlrate einhergeht.

Dieser geschilderte Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche auf die Abschreckwirkung trifft auf einige Fälle des durchgeföhrten Versuchsprogramms nicht zu. Bei einer Wassertemperatur von 85 °C, einem Abstand zwischen Abschallfläche und Probe von 10 mm und einer Ultraschallamplitude von 18 µm war beispielsweise zu beobachten, dass die zweiseitig ultraschallunterstützte Abkühlung bei einem Durchmesser der schallabgebenden Fläche von 34 mm schneller abläuft als die bei einem Durchmesser von 50 mm, wie Abbildung 46 zeigt. Die Beschleunigung der Abschreckung während des Filmsiedens im Vergleich zur konventionellen Abschreckung ist bei beiden Sonotroden gleich. Unter Nutzung der Sonotrode mit einem Stirnflächendurchmesser von 34 mm lässt sich der Dampffilm jedoch etwa 3 s früher aufbrechen als unter Beschallung mit der 50 mm-Sonotrode. Ursache für dieses Phänomen scheint eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Ultraschallfelder zu sein. Da der Probendurchmesser deutlich geringer als der der Sonotrodenstirnfläche ist, treffen die Ultraschallwellen der gegenüberliegenden 50 mm-Sonotroden bei der zweiseitigen Beschallung der Probe aufeinander. Dabei kommt es anscheinend zu destruktiven Interferenzerscheinungen.

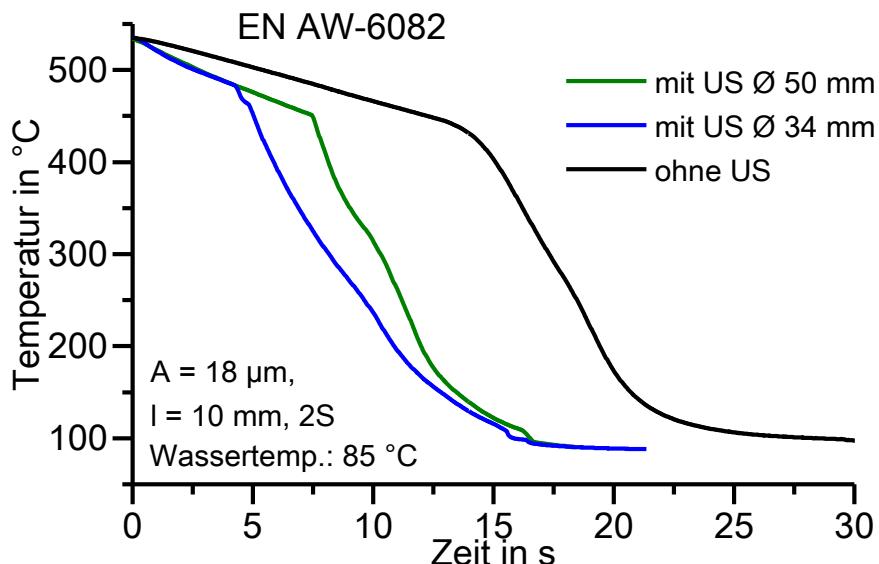


Abbildung 46: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Ausnahmeerscheinung beim Vergleich des Einflusses zweier Größen der schallabgebenden Fläche.

Der Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche bei zweiseitiger ultraschallunterstützter Abschreckung ist in Abbildung 47 beispielhaft im Vergleich zur konventionellen Abschreckung dargestellt. Die Ultraschallunterstützung bei variierenden Abständen zur Probe führt zu einer Reduzierung der Filmsiededauer sowie zu einer Beschleunigung der Abkühlung in dieser Phase. Ein geringer werdender Abstand zwischen Abschallfläche und Probe bringt einen zunehmenden Destabilisierungsgrad des Dampffilms, verbunden mit einer zunehmenden Beschleunigung der Abschreckung in der Filmphase, einer sich verringernden Abkühltdauer sowie einer zunehmenden mittleren Abkühlrate, mit sich. Darüber hinaus zeigt sich mit abnehmendem Abstand zur Probe eine leicht ansteigende Leidenfrost-Temperatur, die bei einem Abstand von 10 mm etwa 50 K über der der konventionellen Abschreckung liegt. Das abrupte Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode zeigt sich in diesem Beispiel wiederum durch einen Kurvenknick beim Übergang vom Film- zum Blasensieden.

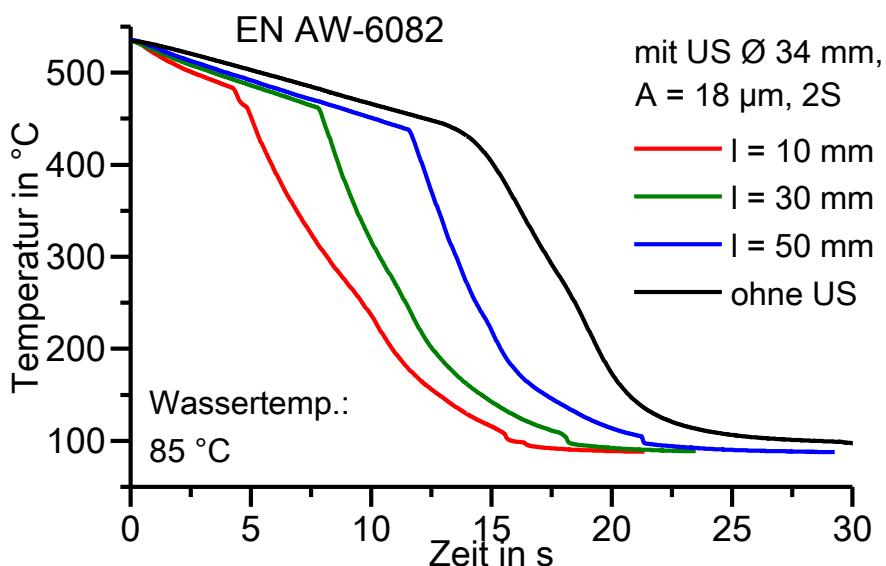


Abbildung 47: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.

Die Beeinflussungsmöglichkeit des konventionellen Abschreckens durch Ultraschall mit variierender Ultraschallamplitude wird in Abbildung 48 veranschaulicht. Durch die zweiseitige Beschallung lässt sich die bei konventioneller Abschreckung für etwa 14 s stabil ausgebildete Filmphase destabilisieren, beschleunigen und verkürzen. Eine zunehmende Ultraschallamplitude führt zu einer zunehmenden Beschleunigung der Abkühlung in der Filmphase sowie zu einer Reduzierung der Dauer. Bei einer Ultraschallamplitude von 37 µm kann die Ausbildung eines Dampffilms vor der

Sonotrode sogar nahezu unterdrückt werden. Insgesamt lassen sich mit zunehmender Ultraschallamplitude die Abkühltdauer reduzieren und die mittlere Abkühlrate steigern.

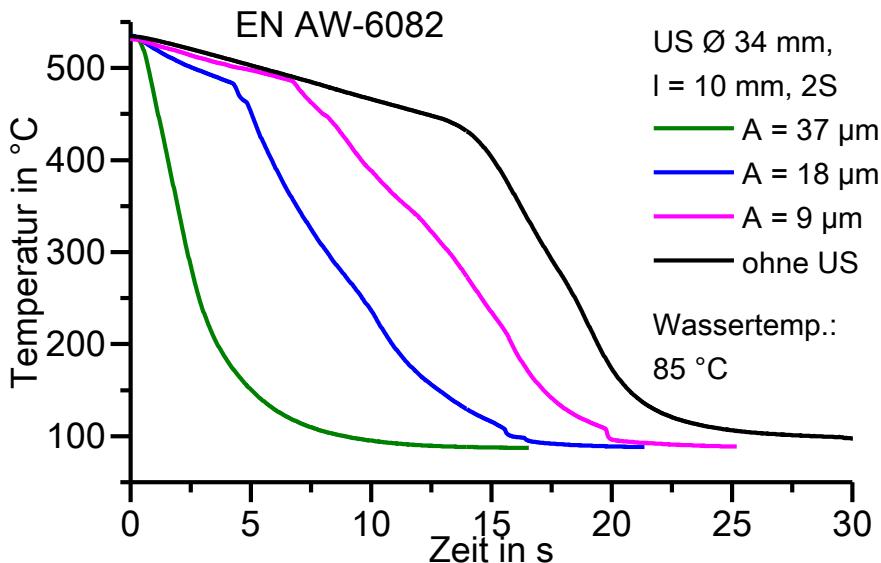


Abbildung 48: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

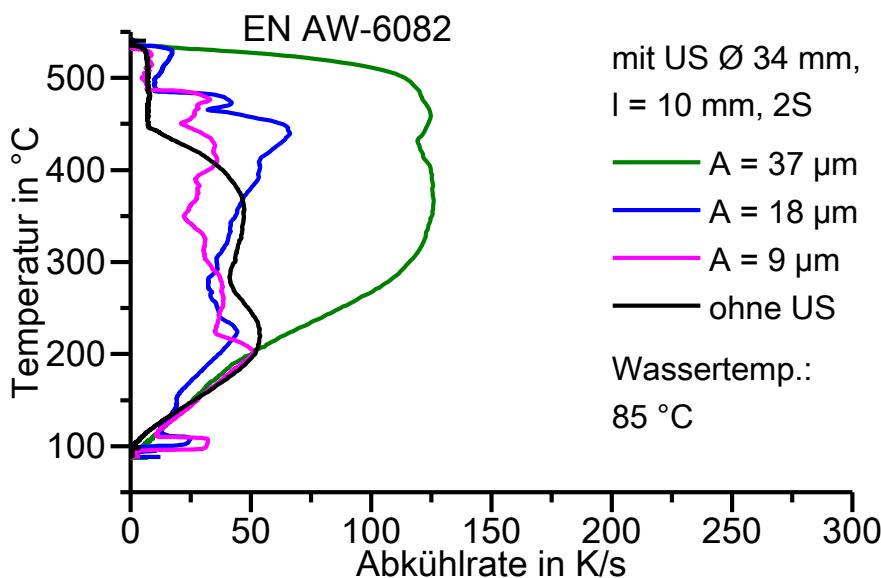


Abbildung 49: Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

In Abbildung 49 sind die zugehörigen Abkühlraten dargestellt. Hier zeigt sich, dass sich die Abkühlraten konventioneller Wasserabschreckungen mit Ultraschallunterstützung in bestimmten Temperaturbereichen um mehr als das 15fache steigern lassen. Auch maximale Abkühlraten lassen sich durch die Anwendung von Ultraschall im Vergleich zur konventionellen Abschreckung mehr als verdoppeln. Außerdem wird deutlich, wie schon in Abbildung 48 gezeigt, wie stark die Variationsmöglichkeit bezüglich der

Abschreckwirkung sein kann. Die Veränderung der Ultraschallamplitude bei gleichbleibender Größe der schallabgebenden Fläche kann zum vorzeitigen Aufreißen des Dampffilms bis hin zur Unterdrückung führen, wie in diesem Beispiel gezeigt wird.

In Abbildung 50 wird der Einfluss der verschiedenen Prozessparameter bei zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von EN AW-6082 zusammenfassend anhand normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} gezeigt.

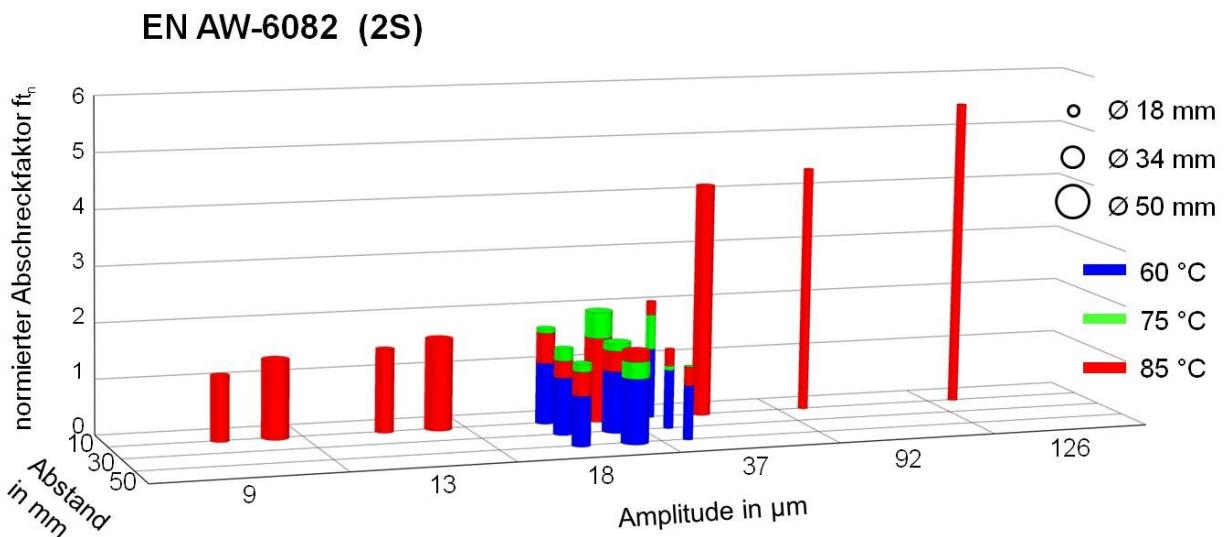


Abbildung 50: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Im Gegensatz zur Übersicht der einseitigen Abschreckung ist in dieser Abbildung ein deutlich größerer Umfang der Amplitudenvariation dargestellt. Wie bei den bisherigen Ergebnissen kann festgestellt werden, dass der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} in der Regel mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche, Wassertemperatur, Ultraschallamplitude sowie mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe steigt. Auffällig sind die bei 75 °C auftretenden Ausnahmen dieser Abhängigkeit. Bei allen Sonotroden kommt es mindestens einmal dazu, dass der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} von 75 °C den von 85 °C übersteigt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Teil dieser Ausnahmen innerhalb der angegebenen Fehlertoleranz von 5 % liegt. Besonders deutlich wird in dieser Abbildung außerdem der dominierende Einfluss der Ultraschallamplitude bezüglich der Abschreckwirkung. Die Erhöhung der Amplitude von 9 µm auf 37 µm bei ansonsten konstanten Parametern ($\varnothing 34$ mm, 85 °C, $l = 10$ mm) führt zu einer Steigerung des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} um mehr als das 3,5fache. Die stärkste Beeinflussung der konventionellen Wasserabschreckung lässt sich bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung mit der größten Amplitude erzielen.

Hier ist die ultraschallunterstützte Abschreckung etwa um den Faktor 5,5 schneller als die konventionelle Abschreckung bei gleicher Wassertemperatur. Insgesamt liegen die Werte des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 in einem Bereich von $1 \leq f_{t_n}(\text{EN AW-6082}, 2S) \leq 5,5$. Die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} der zweiseitigen Beschallung und die der einseitigen Beschallung bei gleichen Prozessparametern stimmen in etwa überein.

4.2.3.2 Beurteilung der Gleichmäßigkeit

Die zweiseitige Beschallung der Probe auf Höhe der Probenmittelebene führt wie die einseitige Beschallung zu einer ungleichmäßigeren Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe als bei konventioneller Abschreckung. Die den beiden sonotrodenzugewandten Rändern der Probe (0° links und 0° rechts) kühlen schneller ab als der Rand bei 90° , wie Abbildung 51 exemplarisch zeigt. Auf die Darstellung der bei 45° links und 45° rechts aufgenommenen Kurven wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Diese verlaufen, ähnlich wie die bei 0° links und 0° rechts aufgenommenen Abkühlkurven nahezu identisch, zwischen den 0° - und 90° -Kurven.

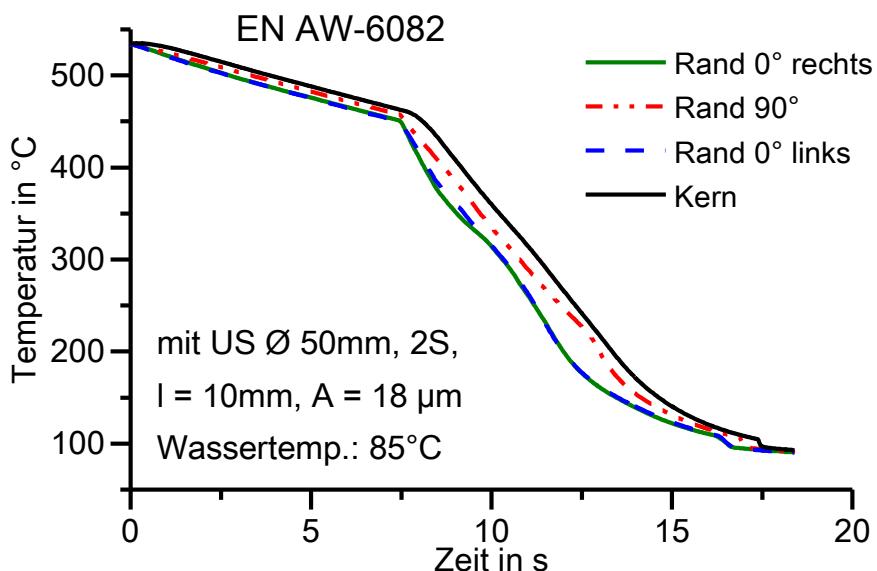


Abbildung 51: Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 ($\varnothing 50\text{ mm}$, $A = 18 \mu\text{m}$, $I = 10\text{ mm}$, 85°C).

Der nahezu identische Verlauf der Abkühlkurven bei 0° links und 0° rechts, der auch bei 45° links und 45° rechts zu beobachten war, veranschaulicht, wie gleichmäßig der Dampffilm von beiden Seiten durch die zwei Sonotroden aufgerissen wird. Im Vergleich

zur einseitigen Ultraschallunterstützung wird durch die zweiseitige Beschallung eine deutlich gleichmäßigere Abkühlung in Umfangsrichtung der Probe erzielt. Durch die zweiseitige Ultraschallunterstützung gelingt es, das Auftreten des bei einseitiger Beschallung vorkommenden zusätzlichen Wärmestroms von der sonotrodenabgewandten zur -zugewandten Seite zu verhindern, so dass die Kernabkühlung in der entsprechenden Ebene zu jedem Zeitpunkt die langsamste ist.

In Abbildung 52 ist der Einfluss der varierten Prozessparameter auf die Gleichmäßigkeit der Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe bei zweiseitig ultraschallunterstützter und konventioneller Wasserabschreckung von EN AW-6082 anhand normierter Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} (Rand 0° – Rand 90°) dargestellt.

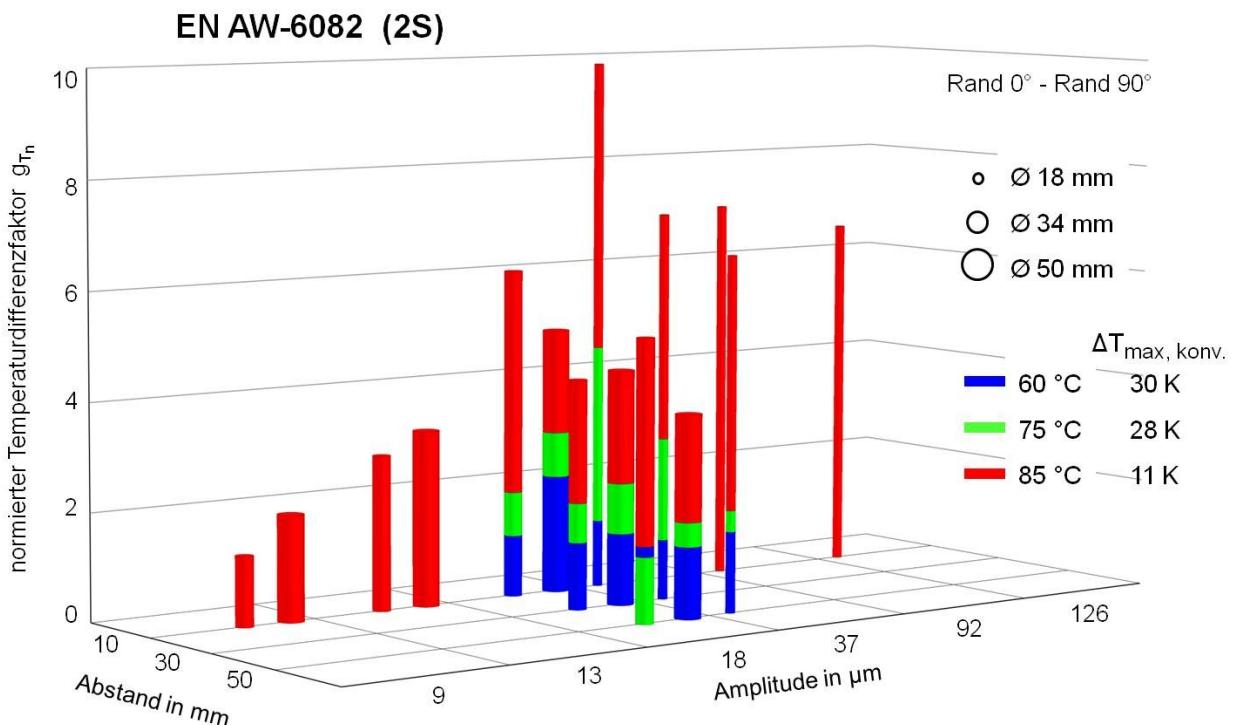


Abbildung 52: Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Mit zunehmender Wassertemperatur sinken die tangentialen Temperaturdifferenzen der konventionellen Abschreckung. Da die maximalen Temperaturdifferenzen am Rand bei konventioneller Abschreckung durch die Anwendung von Ultraschall zum größten Teil erhöht werden, steigen die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} mit zunehmender Temperatur an. Besonders auffällig sind die nahezu konstanten normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} bei 60°C . Bei 75°C und 85°C lassen sich die maximalen Temperaturdifferenzen in Umfangsrichtung nahezu ausnahmslos mit zunehmendem Abstand zwischen Sonotroden und Probe, abnehmender Größe der

schallabgebenden Fläche sowie abnehmender Ultraschallamplitude reduzieren. Wenige Ausnahmen treten nur in Verbindung mit der 50 mm-Sonotrode auf. Im Vergleich zu den normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} der einseitigen Beschallung werden diese bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung im Mittel reduziert.

Für ausgewählte Prozessparameter wurden Abschreckversuche durchgeführt, um Aussagen zur Beeinflussung der axialen Gleichmäßigkeit durch Ultraschallunterstützung treffen zu können. Abbildung 53 zeigt die daraus gewonnenen Ergebnisse anhand von maximalen axialen Temperaturdifferenzen am Probenrand (0°) zwischen den Abständen von der oberen Probenstirnfläche von 30 mm und 90 mm. Mit Ultraschallunterstützung lassen sich die Temperaturdifferenzen zwischen oberem (30 mm) und unterem (90 mm) Probendrittel im Vergleich zur konventionellen Abschreckung bei einer Wassertemperatur von 85°C wesentlich um bis zu etwa 90 % reduzieren. Grund hierfür ist das beginnende Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode auf Höhe der Probenmittelebene (60 mm). Die maximalen axialen Temperaturdifferenzen bei Ultraschallunterstützung lassen sich mit abnehmender Ultraschallamplitude und zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche reduzieren.

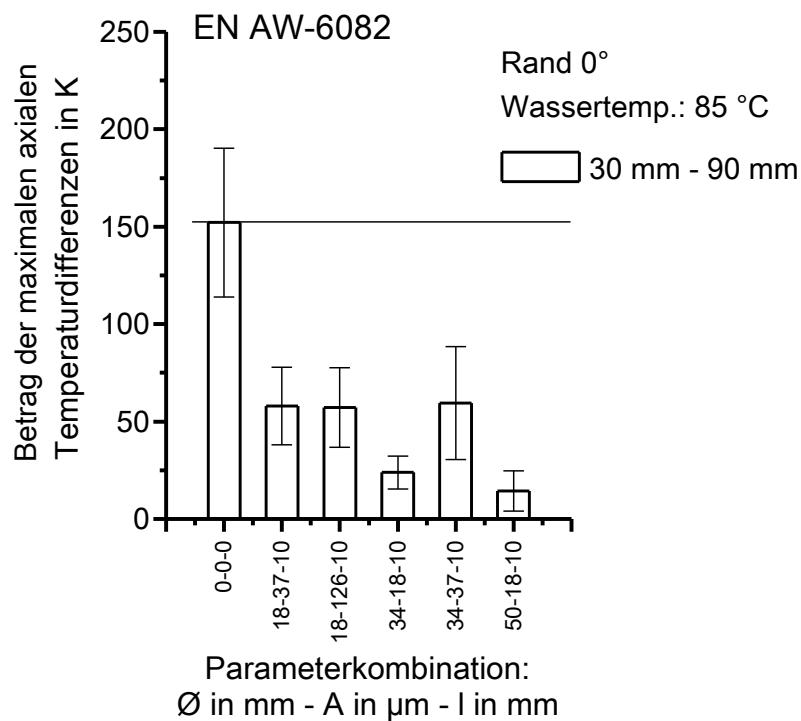


Abbildung 53: Betrag der maximalen axialen Temperaturdifferenzen (Rand 0°) der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85°C .

4.2.3.3 Charakterisierung der Eigenschaften

Mit zweiseitiger Ultraschallunterstützung abgeschreckte Proben aus EN AW-6082 wurden ebenfalls auf Risse geprüft. Diese Proben haben zahlreiche Abschreckungen in Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen erfahren. Wie schon bei den abgeschreckten Proben mit einseitiger Beschallung konnten auch bei denen zweiseitiger Beschallung keine Riss- oder Defektanzeichen festgestellt werden. In Bezug auf Rissbildung ist die ultraschallunterstützte Wasserabschreckung der Aluminiumknetlegierung EN AW-6082 für die untersuchten Abschreckparameter und Probengeometrie daher als unkritisch anzusehen.

4.3 Wasserabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10

4.3.1 Konventionelle Abschreckung

In Abbildung 54 sind typische Abkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung eines Stahlzylinders aus X5CrNi18-10 mit auftretenden Streuungen bei verschiedenen Wassertemperaturen dargestellt.

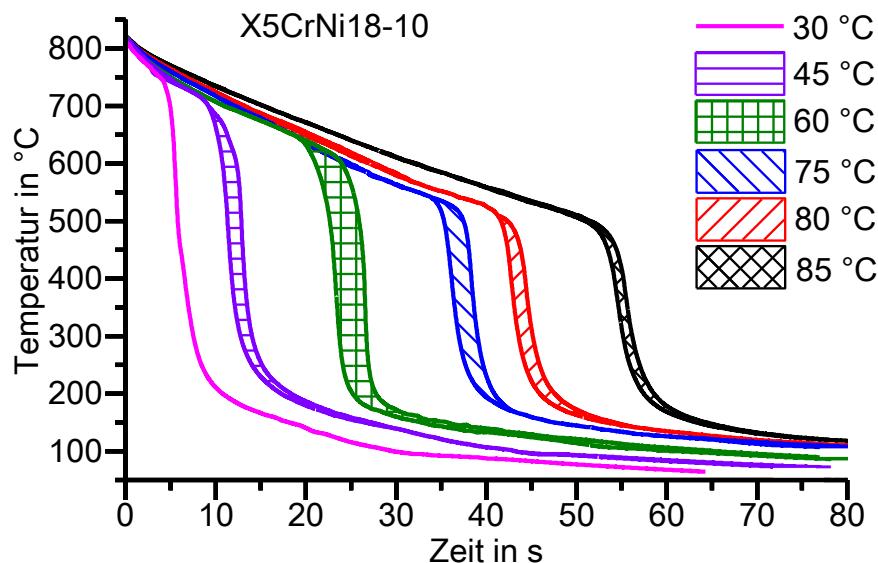


Abbildung 54: Randabkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

Alle Abschreckungen der untersuchten Wassertemperaturen weisen eine ausgeprägte stabile Filmsiedephase auf. Eine zunehmende Wassertemperatur bringt eine zunehmende Stabilisierung des Dampffilms mit sich. Folglich steigt mit zunehmender Wassertemperatur die Abkühltdauer, während die mittlere Abkühlrate sinkt.

Die Reproduzierbarkeit der durchgeführten Abschreckversuche von X5CrNi18-10 ist gut. Diese nimmt mit steigender Wassertemperatur bis 60 °C zunächst leicht ab, ab 60 °C steigt diese dann jedoch wieder.

4.3.2 Einseitige Ultraschallunterstützung

Die durchgeführten Abschreckexperimente der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Zylindern aus X5CrNi18-10 beinhalten folgende Kombinationen von Prozessparametern (Tabelle 15):

Tabelle 15: Untersuchte Parameterkombinationen bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

Versuchsreihe: X5CrNi18-10 1S Wasser					
Sonotrode: Durchmesser in mm	Abstand in mm	Amplitude in μm	Wassertemperatur in °C		
			60	75	85
18	10	31	x	x	x
	30	31	x	x	x
		86			x
		131			x
	50	31	x	x	x
	100	31	x	x	x
34	10	19	x	x	x
	30	9			x
		18			x
		19	x	x	x
	50	19	x	x	x
	100	19	x	x	x
50	10	19	x	x	x
	30	9			x
		18			x
		19	x	x	x
	50	19	x	x	x
	100	19	x	x	x

4.3.2.1 Charakterisierung der Abschreckwirkung

Abbildung 55 zeigt einen Vergleich der Abkühlvorgänge bei konventioneller und einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei einer Wassertemperatur von 75 °C anhand einer Bilderserie mit ausgewählten Zeitpunkten, um die signifikante Beeinflussung durch Ultraschallunterstützung zu veranschaulichen.

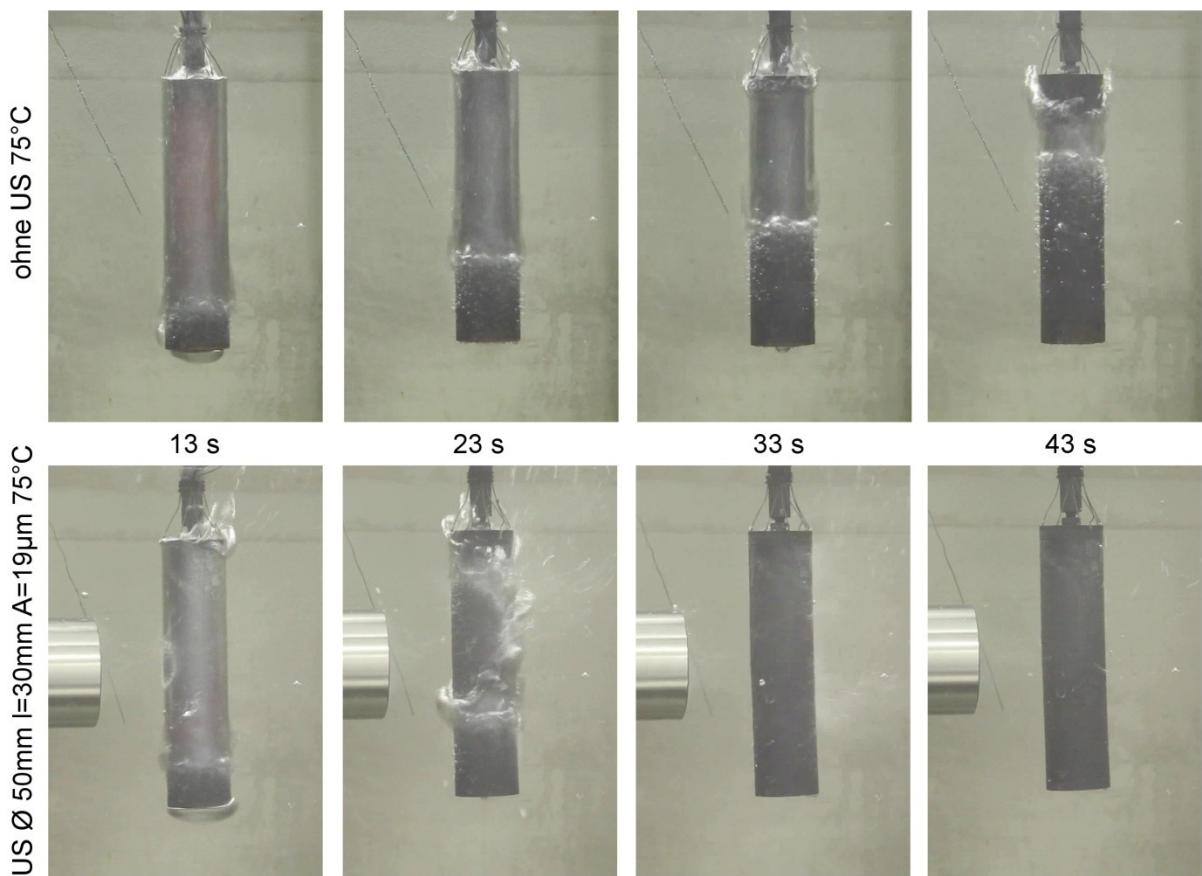


Abbildung 55: Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C in Anlehnung an [81].

Während das Blasensieden bei der konventionellen Abschreckung ohne Ultraschall nach 13 s gerade an der unteren Stirnfläche begonnen hat, zeigt sich zum gleichen Zeitpunkt bei Ultraschallunterstützung ein lokales Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode. Das Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Stirnfläche, wie es bei der konventionellen Abschreckung auftritt (13 s – 43 s), findet bei Ultraschallunterstützung nicht statt. Dem anfänglichen Hochwandern der Benetzungsfront überlagert sich ein durch den Ultraschall induziertes zunehmendes Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode (23 s), was schließlich zu einer beschleunigten Wiederbenetzung der gesamten Probe führt. Nach 33 s ist die Wärmeabfuhr bei Ultraschallunterstützung somit durch Konvektion gekennzeichnet, während bei der konventionellen Abschreckung zu diesem Zeitpunkt noch alle drei Phasen der Flüssigkeitsabschreckung beobachtet werden können.

In Abbildung 56 ist der Einfluss der Wassertemperatur auf die einseitig ultraschallunterstützte Wasserabschreckung des austenitischen Stahls exemplarisch dargestellt. Wie bei der konventionellen nehmen auch bei der ultraschallunterstützten Abschreckung die Stabilität des Filmsiedens und damit die Abkühlzeit mit

zunehmender Wassertemperatur zu. Zudem sinkt die Leidenfrost-Temperatur mit zunehmender Wassertemperatur. Bei 30 °C lässt sich in diesem Beispiel das Filmsieden vor der Sonotrode unterdrücken. Bei den anderen Wassertemperaturen führt die Ultraschallunterstützung zu einer Destabilisierung des Dampffilms mit vorzeitigem Aufreißen dessen im Vergleich zur konventionellen Abschreckung. Dies zeigt sich am Beispiel der bei einer Temperatur von 85 °C aufgenommenen Abkühlkurven. Das schlagartige Aufreißen des Dampffilms bei Ultraschallunterstützung wird hier anhand des Kurvenknicks beim Wechsel vom Film- zum Blasensieden deutlich.

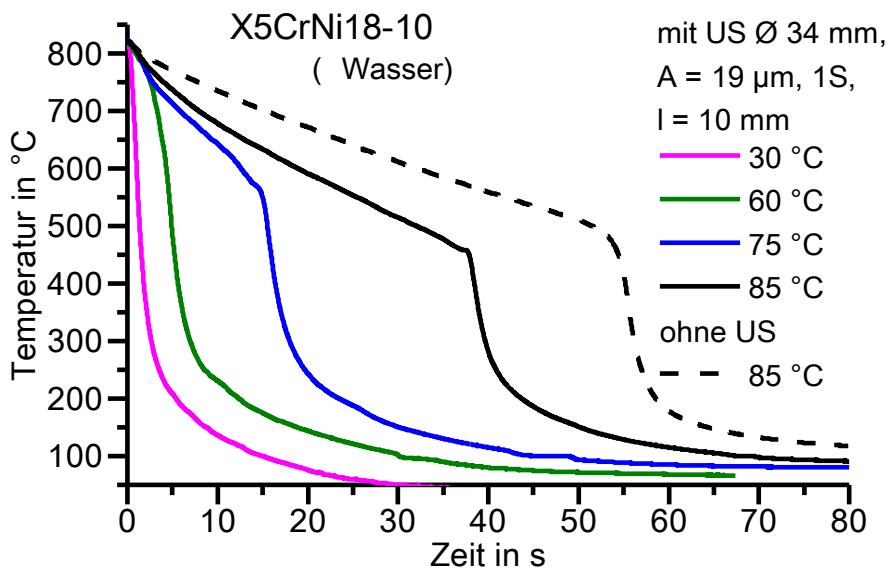


Abbildung 56: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

Abbildung 57 veranschaulicht beispielhaft die Beeinflussungsmöglichkeit der konventionellen Wasserabschreckung durch Ultraschall anhand der Variation der Größe der schallabgebenden Fläche. Während das Filmsieden bei konventioneller Abschreckung bei 60 °C etwa 20 s dauert, kommt es bei Ultraschallunterstützung mit einem Durchmesser der Abschallfläche von 34 mm ab ca. 3 s zu einer Destabilisierung des Dampffilms, die etwa bis 16 s anhält. In dieser Zeit gelingt es zwar, die Dampffilmdicke durch den Ultraschall immer wieder zu reduzieren, nach 13 s kommt es sogar nochmals zu einer Beschleunigung, die Ultraschallenergie reicht jedoch nicht aus, den Dampffilm gänzlich zu zerstören. Diese Phase des mittels Ultraschall induzierten instabilen Filmsiedens zeigt sich durch einen diskontinuierlichen Kurvenverlauf von etwa 3 s bis 16 s. Bei einem Durchmesser der Sonotrodenstirnfläche von 50 mm wird der Dampffilm nach dem Eintauchen der Probe sofort destabilisiert, was sich anhand des deutlich steileren Kurvenanstiegs im Vergleich zum konventionellen Abkühlverlauf

erkennen lässt, und nach wenigen Sekunden zerstört. Mit zunehmendem Durchmesser und damit Größe der schallabgebenden Fläche steigt demnach die Destabilisierungsrate des Dampffilms, einhergehend mit einer Abnahme der Abkühltdauer und einer Steigerung der mittleren Abkühlrate.

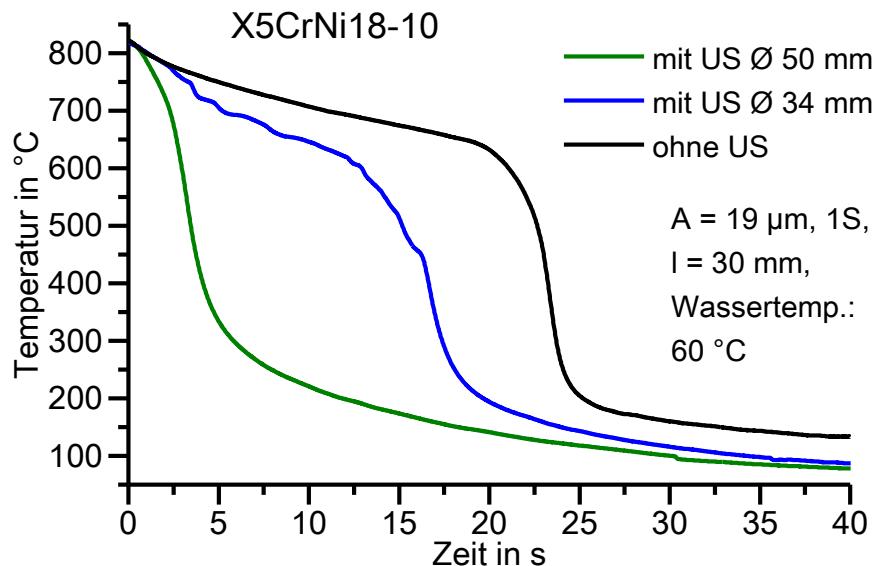


Abbildung 57: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

In Abbildung 58 werden die zugehörigen Abkühlraten gezeigt. Der Vergleich der dargestellten Abkühlraten veranschaulicht, dass für eine rasche Wasserabschreckung nicht zwangsläufig die maximale Abkühlrate entscheidend ist, sondern vielmehr die Dauer des Filmsiedens und damit die Dauer vorherrschender, relativ geringer Abkühlraten. In der Filmphase lässt sich die Abkühlrate der konventionellen Abschreckung durch Ultraschallunterstützung deutlich erhöhen, in diesem Beispiel bei einem Durchmesser der Abschallfläche von 34 mm etwa um den Faktor 2,5, bei einem Durchmesser von 50 mm sogar etwa um den Faktor 5. Bei der Darstellung der Abkühlraten wird außerdem deutlich, dass sich die Leidenfrost-Temperatur durch Ultraschallunterstützung beeinflussen lässt. Während diese bei einem Durchmesser der Sonotrodenstirnfläche von 34 mm etwa der der konventionellen Abschreckung entspricht, führt die Nutzung der 50 mm-Sonotrode zu einer Erhöhung der Leidenfrost-Temperatur um mehr als 100 K.

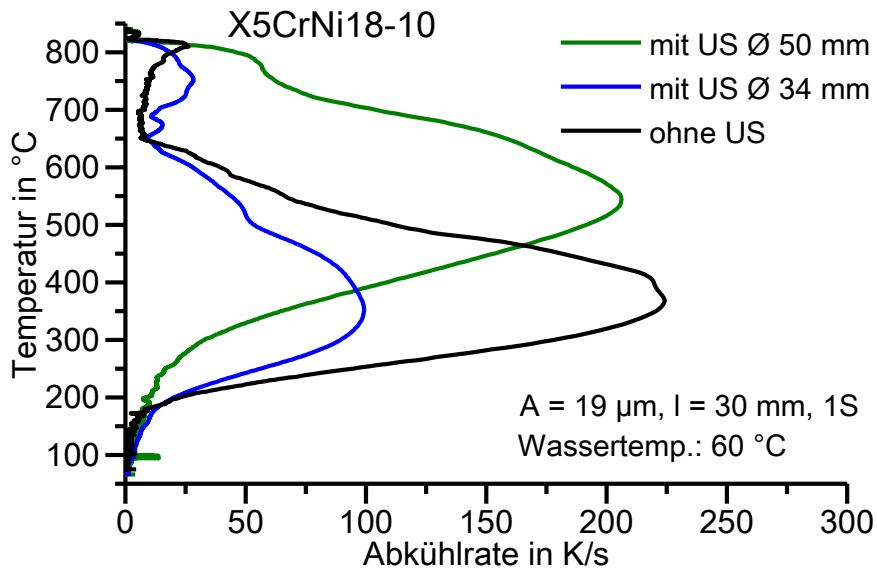


Abbildung 58: Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

Der Einfluss des Abstandes zwischen Sonotrode und Probe auf die Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei einer Wassertemperatur von 75 °C wird in Abbildung 59 wiedergegeben.

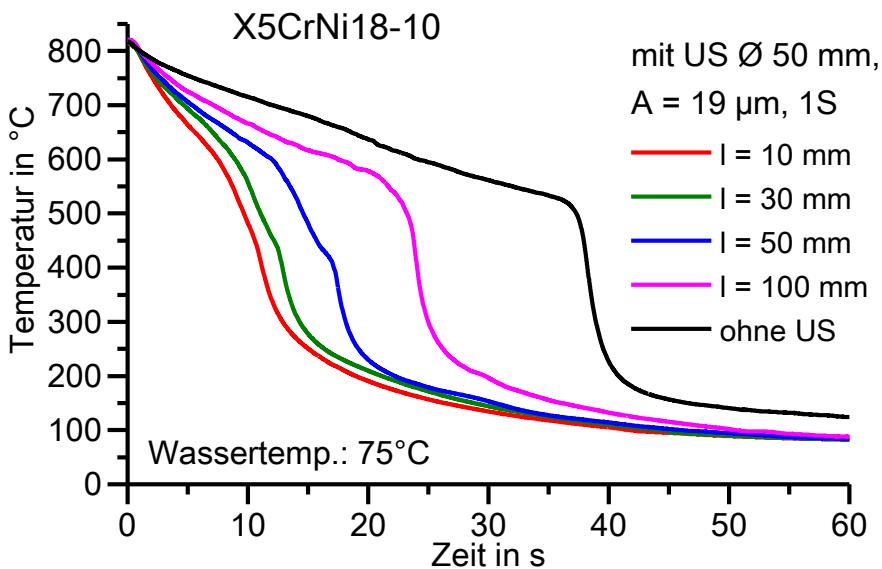


Abbildung 59: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.

Bei Ultraschallunterstützung lässt sich die Filmsiedephase mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zunehmend verkürzen und beschleunigen. Folglich sinkt mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe die Abkühldauer. Außerdem ändert sich die Leidenfrost-Temperatur der konventionellen Abschreckung bei

Ultraschallunterstützung. Dabei steigt diese bei einem Abstand von 100 mm zunächst geringfügig an, sinkt dann bei 50 mm um etwa 100 K und steigt bis zu einem Abstand von 10 mm wieder geringfügig an, bleibt dabei jedoch deutlich unterhalb der konventionellen Abschreckung. Die bei etwa 600 °C zu beobachtende Veränderung der Kurvenanstiege bei den Abständen von 10 mm bis 50 mm entspricht einer zusätzlichen Beschleunigung in der Filmphase und nicht, wie sich vermuten ließe, dem Leidenfrost-Punkt. Dies lässt sich anhand der in Abbildung 60 exemplarisch dargestellten zugehörigen Bilderserie der ultraschallunterstützten Abschreckung bei 50 mm zeigen. Vor der Sonotrode wird der Dampffilm nicht nach 12 s, sondern nach 17 s zerstört.

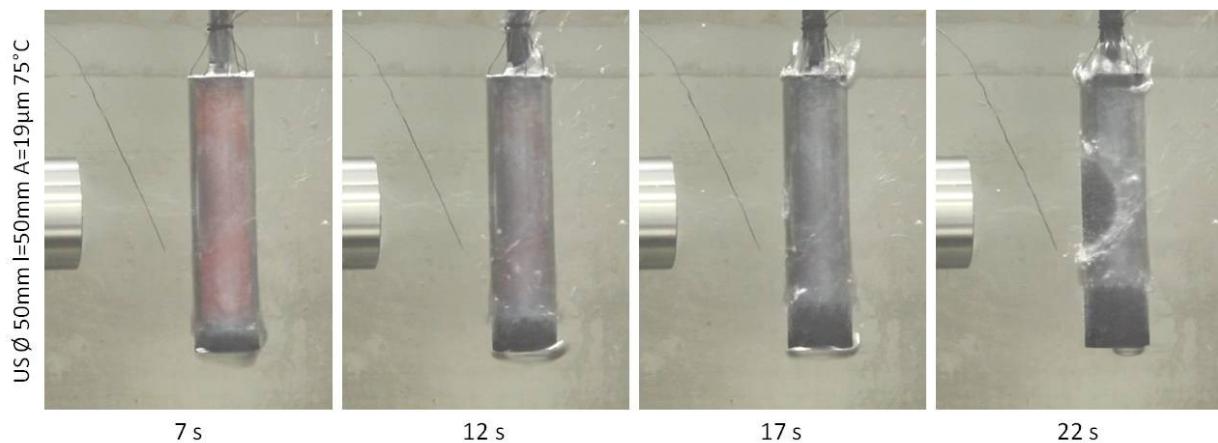


Abbildung 60: Bilderserie der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (\varnothing 50 mm, $A = 19 \mu\text{m}$, $l = 50 \text{ mm}$) eines Zylinders aus X5CrNi18-10 bei 75 °C.

Abbildung 61 zeigt den Einfluss einer variierenden Ultraschallamplitude auf die Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C. Durch die einseitige Beschallung mit Ultraschall lässt sich die bei konventioneller Wasserabschreckung für etwa 50 s stabil ausgebildete Filmphase destabilisieren, beschleunigen und verkürzen. Eine zunehmende Ultraschallamplitude führt zu einer zunehmenden Beschleunigung der Abkühlung in der Filmphase sowie zu einer Reduzierung der Dauer und damit zu einer Verringerung der Gesamtabkühltdauer. Während in dem hier gezeigten Beispiel die Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von 9 µm nur eine sehr geringe Reduzierung der Filmsiededauer mit sich bringt, lässt sich diese bei einer Amplitude von 31 µm mehr als halbieren. Auffällig ist, dass sich der Leidenfrost-Punkt bei Amplituden von 19 µm und 31 µm zu geringeren Temperaturen (um etwa 100 K) verschieben lässt, während die Leidenfrost-Temperatur bei 9 µm etwa der der konventionellen Abschreckung entspricht.

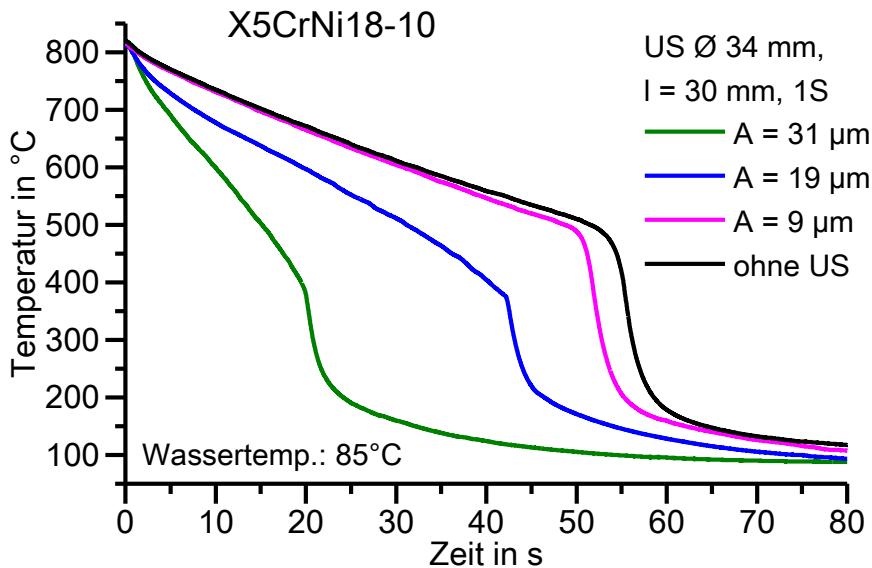


Abbildung 61: Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude in Anlehnung an [81].

Abbildung 62 zeigt den Vergleich der bei konventioneller und einseitig ultraschallunterstützter Abschreckung erzielbarer Abkühlraten exemplarisch für eine Wassertemperatur von 85 °C.

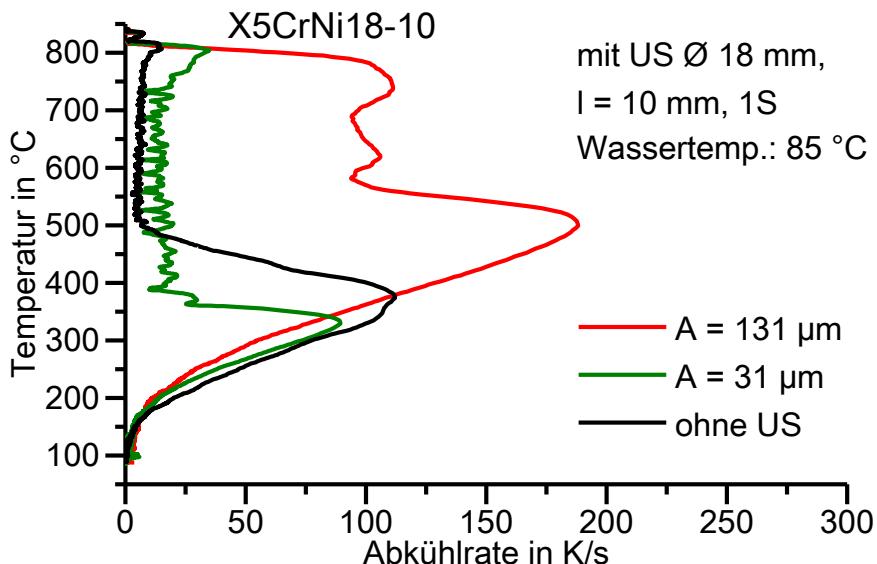


Abbildung 62: Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

Auch in dieser Abbildung zeigt sich, dass es bei Ultraschallunterstützung zu einer Verringerung der Leidenfrost-Temperatur verglichen zur konventionellen Abschreckung kommen kann (siehe Abkühlratenverlauf bei 31 µm). In dieser Abbildung wird außerdem besonders deutlich, wie groß die Beeinflussungsmöglichkeit einer Ultraschallunterstützung sein kann. Bei einer Temperatur von 500 °C lässt sich durch

die Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von $131 \mu\text{m}$ etwa eine 18fache Steigerung der Abkühlrate im Vergleich zur konventionellen Abschreckung erreichen. Diese ultraschallunterstützte Abschreckung entspricht zugleich der schnellsten Abschreckung des zugehörigen Versuchsprogramms.

Das Beeinflussungsvermögen des Abkühlprozesses durch Ultraschallunterstützung zeigt sich auch bei Betrachtung der resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK). In Abbildung 63 ist exemplarisch der Vergleich von WÜK der konventionellen und einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (am Rand bei 0°) von X5CrNi18-10 bei 60°C wiedergegeben. Dabei fällt auf, dass der maximale WÜK der konventionellen Abschreckung den der ultraschallunterstützten übersteigt. Im größten und wichtigsten Teil des Temperaturbereichs wird der WÜK der konventionellen Abschreckung allerdings von dem der Ultraschallunterstützung überschritten. Im Bereich des bei konventioneller Abschreckung vorherrschenden Filmsiedens wird so durch Ultraschallanwendung eine Steigerung des WÜK auf mehr als das Achtfache erzielt.

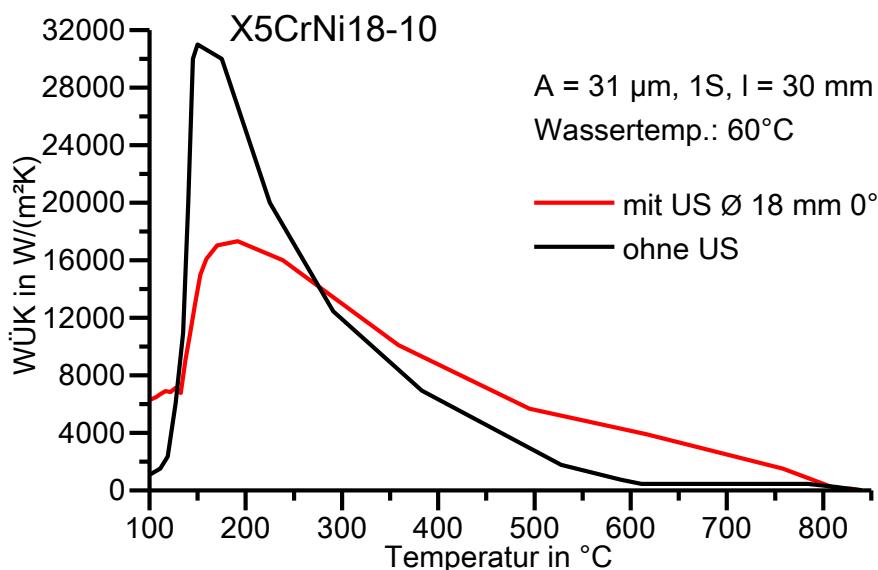


Abbildung 63: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60°C .

In Abbildung 64 ist der Ultraschalleinfluss der einseitigen Beschallung im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung des austenitischen Stahls zusammenfassend für das durchgeführte Versuchsprogramm anhand normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} dargestellt.

X5CrNi18-10 (Wasser, 1S)

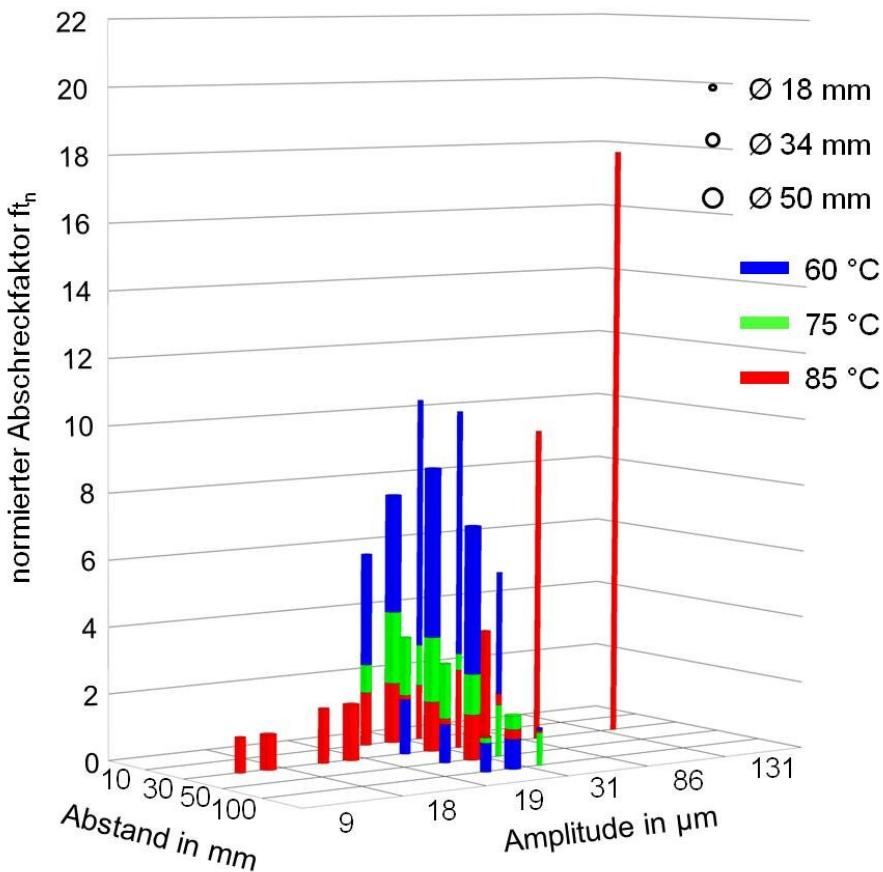


Abbildung 64: Normierte Abschreckfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

Die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} steigen nahezu ausnahmslos mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe, mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche sowie mit zunehmender Ultraschallamplitude. Auftretende Ausnahmen sind hauptsächlich bei einer Wassertemperatur von 75 °C zu beobachten. Ein deutlicher Unterschied zwischen normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 und X5CrNi18-10 ist die Abhängigkeit von der Wassertemperatur. Während die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} bei der Abschreckung von Aluminium mit zunehmender Wassertemperatur stiegen, nehmen diese bei der einseitig ultraschallunterstützten Abschreckung von X5CrNi18-10 mit zunehmender Temperatur größtenteils ab. Wenige Ausnahmen sind wiederum bei einer Wassertemperatur von 75 °C zu beobachten. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zur ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Aluminium ist der Betrag erzielbarer normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} . Besonders bei einer Wassertemperatur von 60 °C werden normierte Abschreckfaktoren zwischen

$5 \leq f_{t_n}(\text{X5CrNi18 - 10}, 1S) \leq 11$ erzielt. Der maximale normierte Abschreckfaktor f_{t_n} dieses Versuchsprogramms wurde bei Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von $131 \mu\text{m}$ erzielt und beträgt 17,9. Dieses Ergebnis deckt sich sehr gut mit der zugehörigen Steigerung der Abkühlrate in Abbildung 62 verglichen zur konventionellen Abschreckung.

4.3.2.2 Beurteilung der Gleichmäßigkeit

Die einseitige Beschallung der Proben bringt eine ungleichmäßige Abschreckung in Umfangsrichtung mit sich. Die sonotrodenzugewandte Seite (0°) kühlt schneller ab als die sonotrodenabgewandte Seite (180°) der Probe. In Abbildung 65 sind dazu exemplarisch die Abkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung einer Probe aus X5CrNi18-10 dargestellt.

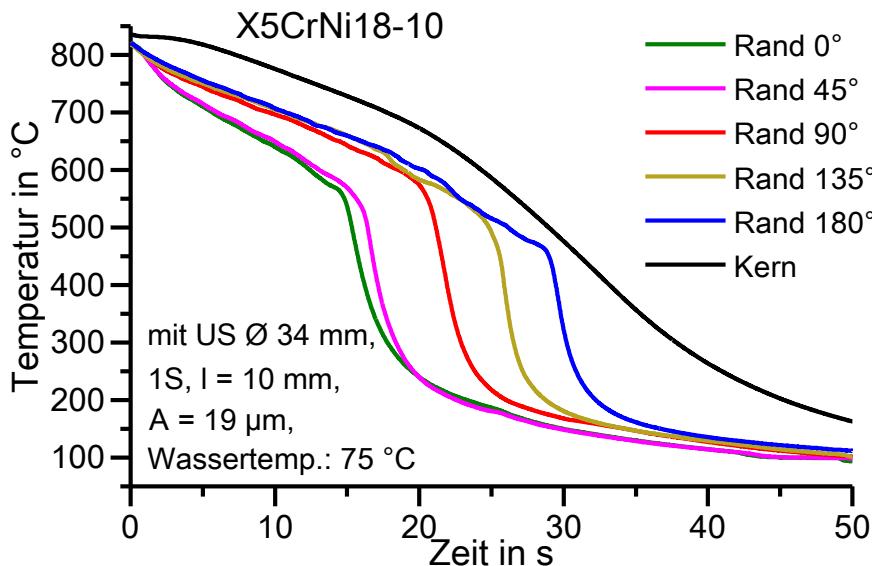


Abbildung 65: Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 ($\varnothing 34 \text{ mm}$, $A = 19 \mu\text{m}$, $l = 10 \text{ mm}$, 75°C).

Mit zunehmendem Winkel steigt die Dauer des Filmsiedens. Das Blasensieden beginnt an der sonotrodenabgewandten Seite der Probe (180°) erst nach ca. 30 s, während das Blasensieden vor der Sonotrode (0°) bereits nach etwa 15 s beginnt. Außerdem zeigt sich, dass es bei 0° und 45° zu einer beschleunigten Filmsiedephase im Vergleich zur abgewandten Seite ($90^\circ - 180^\circ$) kommt. Die Abkühlung der Probenbereiche in Umfangsrichtung unterscheidet sich weiterhin durch die Leidenfrost-Temperaturen. Mit abnehmendem Umfangswinkel steigt die Leidenfrost-Temperatur von etwa 460°C (180°) auf ca. 525°C (135°) und 570°C ($0^\circ - 90^\circ$). Dies entspricht einer Temperaturdifferenz von über 100 K innerhalb des halben Probenumfangs in einer Probenebene.

Diese Ungleichmäßigkeit in Umfangsrichtung der Probe wird auch bei Betrachtung der Wärmeübergangskoeffizienten deutlich. In Abbildung 66 sind die an den Positionen 0°, 90° und 180° ermittelten WÜK exemplarisch für die einseitig ultraschallunterstützte Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 dargestellt. Auf die Darstellung der WÜK-Temperatur-Verläufe von 45° und 135° wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Diese liegen jedoch, ähnlich wie die Temperatur-Zeit-Verläufe, zwischen denen von 0° und 90° bzw. 90° und 180°. Mit zunehmendem Umfangswinkel und damit zunehmender Entfernung von der sonotrodenzugewandten Seite (0°) nehmen die WÜK für den größten Teil des Temperaturbereiches deutlich ab. In der Filmsiedephase ist der mittlere WÜK bei 0° etwa viermal größer als bei 180°.

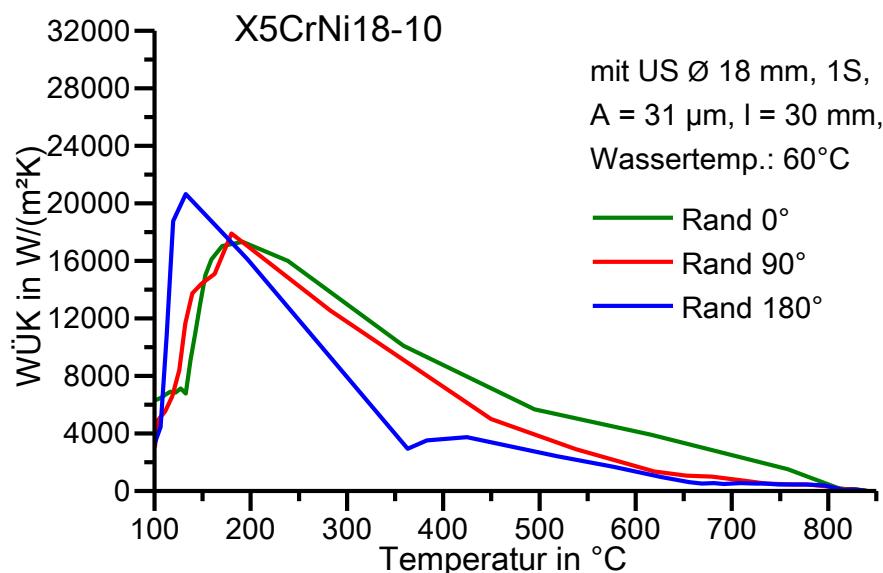


Abbildung 66: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.

In Abbildung 67 ist der Einfluss der Prozessparameter auf die Gleichmäßigkeit der Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe bei einseitig ultraschallunterstützter und konventioneller Wasserabschreckung des austenitischen Stahls anhand der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} (Rand 0° – Rand 180°) wiedergegeben. Bei konventioneller Abschreckung sinken die maximalen tangentialen Temperaturdifferenzen mit zunehmender Wassertemperatur deutlich. Bei Ultraschallunterstützung übersteigen diese erwartungsgemäß deutlich die der konventionellen Abschreckung, sinken jedoch mit zunehmender Temperatur durchschnittlich auch, im Gegensatz zur Aluminiumlegierung. Dies führt dazu, dass die größten normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in der Regel bei 60 °C oder 75 °C auftreten. Eine Abhängigkeit der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in

Umfangsrichtung von den Prozessparametern ist mit wenigen Ausnahmen feststellbar. Eine zunehmende Ultraschallamplitude und Größe der schallabgebenden Fläche sowie ein abnehmender Abstand zwischen Sonotrode und Probe führen bei Ultraschallunterstützung zu einer Steigerung der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} . Ausnahmen dieser Abhängigkeiten lassen sich lediglich bezüglich des Abstandes bei der 50 mm-Sonotrode und Wassertemperaturen von 60 °C und 75 °C beobachten. Hier sind die maximalen Temperaturdifferenzen in Umfangsrichtung mit zunehmendem Abstand etwa konstant.

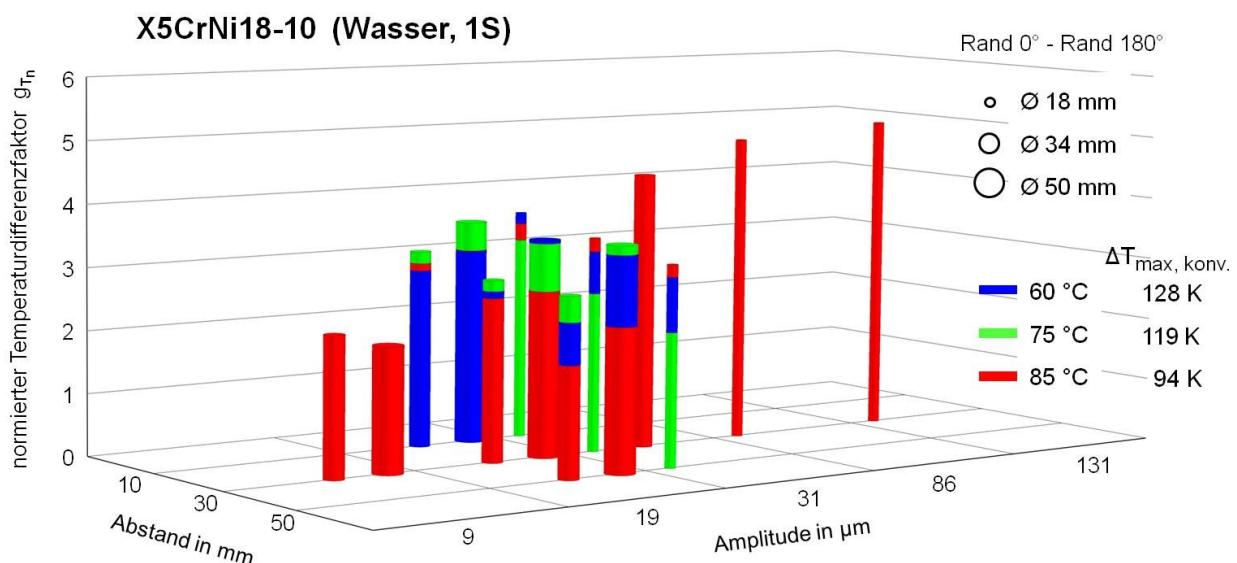


Abbildung 67: Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

4.3.2.3 Charakterisierung der Eigenschaften

Proben aus X5CrNi18-10 wurden wiederholt unter einseitiger Ultraschallunterstützung in Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen abgeschreckt und mittels Wirbelstrom- und Farbeindringverfahren auf Risse untersucht. Bei den geprüften Proben wurden keine Riss- oder Defektanzeichen festgestellt. Unter Berücksichtigung der untersuchten Abschreckparameter und der Probengeometrie wird daher angenommen, dass für X5CrNi18-10 die einseitig ultraschallunterstützte Wasserabschreckung in Bezug auf Rissbildung unkritisch ist.

Die mittels Röntgendiffraktometrie ermittelten Verläufe der oberflächennahen Axialeigenspannungen auf Höhe der Probenmittelebene sind exemplarisch in Abbildung 68 dargestellt. Nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung liegen am Rand der Probe erwartungsgemäß Druckeigenspannungen vor. Diese

betrugen im Mittel etwa -300 MPa. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung sind die axialen Eigenspannungen nahezu unabhängig vom Umfangswinkel der Probe.

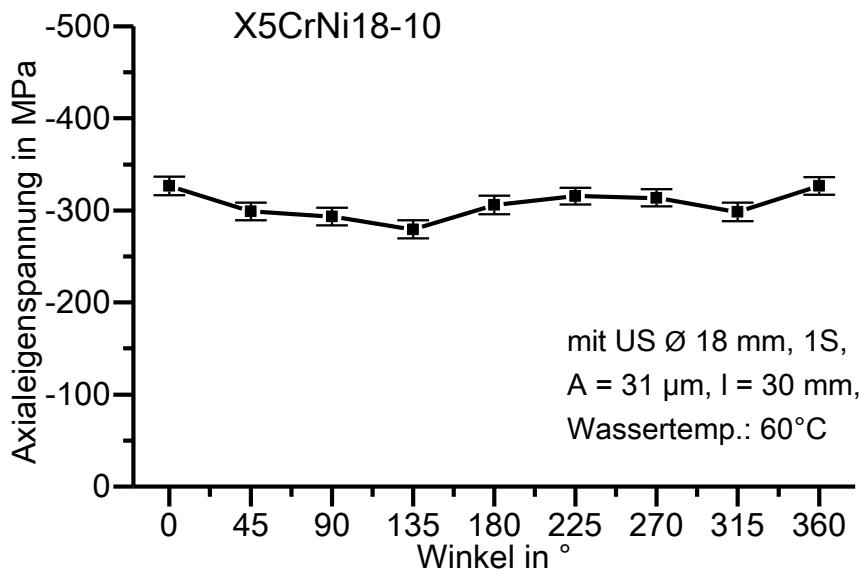


Abbildung 68: Oberflächennahe Axialeigenspannungsverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 69 wird exemplarisch die Verformung einer einseitig ultraschallunterstützt abgeschreckten Probe aus X5CrNi18-10 zur Visualisierung des Verzugs gezeigt.

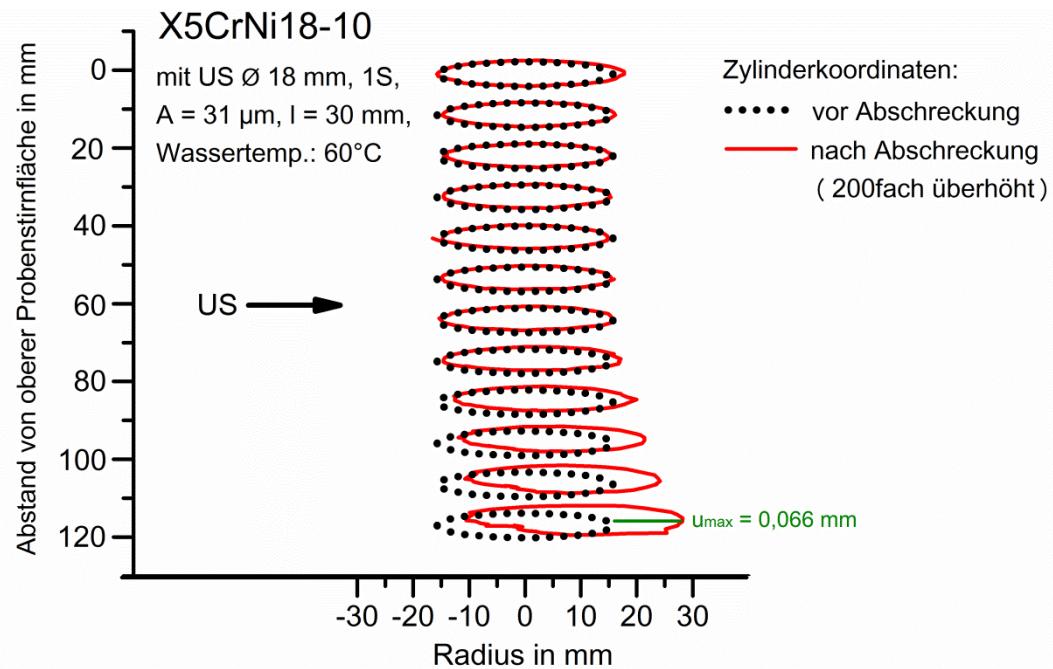


Abbildung 69: Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

Die Probe wurde auf Höhe der Probenmittelebene beschallt. Im Zuge der einseitigen Beschallung kommt es zu einer Krümmung der Probe. Diese resultierende Krümmung nach der ultraschallunterstützten Abschreckung richtet sich von der Sonotrode weg. Die beschleunigte Abkühlung vor der Sonotrode führt zunächst zu einem Verkürzen der Probe auf dieser Seite mit einer zunehmenden Krümmung in Richtung der Sonotrode. Mit fortschreitender Abkühlung zieht sich dann die sonotrodenabgewandte Seite zusammen, so dass sich die Krümmungsrichtung umkehrt, da die plastische Längung der sonotrodenzugewandten Seite bestehen bleibt. Durch die Probenhalterung an der oberen Stirnfläche, die einer festen Einspannung gleichkommt, entsteht somit bei dieser Abschreckvariante die maximale Verschiebung von 0,066 mm an der unteren Stirnfläche. Für alle drei untersuchten Proben beträgt diese maximale Verschiebung in Beschallungsrichtung im Mittel $0,065 \text{ mm} \pm 0,014 \text{ mm}$.

4.3.3 Zweiseitige Ultraschallunterstützung

Die experimentellen Untersuchungen bei zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von Zylindern des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 umfassen folgende Parameterkombinationen (Tabelle 16):

Tabelle 16: Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

Versuchsreihe: X5CrNi18-10 2S Wasser					
Sonotrode: Durchmesser in mm	Abstand in mm	Amplitude in μm	Wassertemperatur in °C		
			60	75	85
18	10	37	x	x	x
		92			x
		126			x
	30	37	x	x	x
	50	37	x	x	x
34	10	9			x
		13			x
		18	x	x	x
		37			x
	30	18	x	x	x
	50	18	x	x	x
50	10	9			x
		13			x
		18	x	x	x
	30	18	x	x	x
	50	18	x	x	x

4.3.3.1 Charakterisierung der Abschreckwirkung

Anhand einer Bilderserie der Abkühlvorgänge von konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C wird in Abbildung 70 die signifikante Beeinflussungsmöglichkeit durch Ultraschall auf den Abkühlvorgang abgebildet.

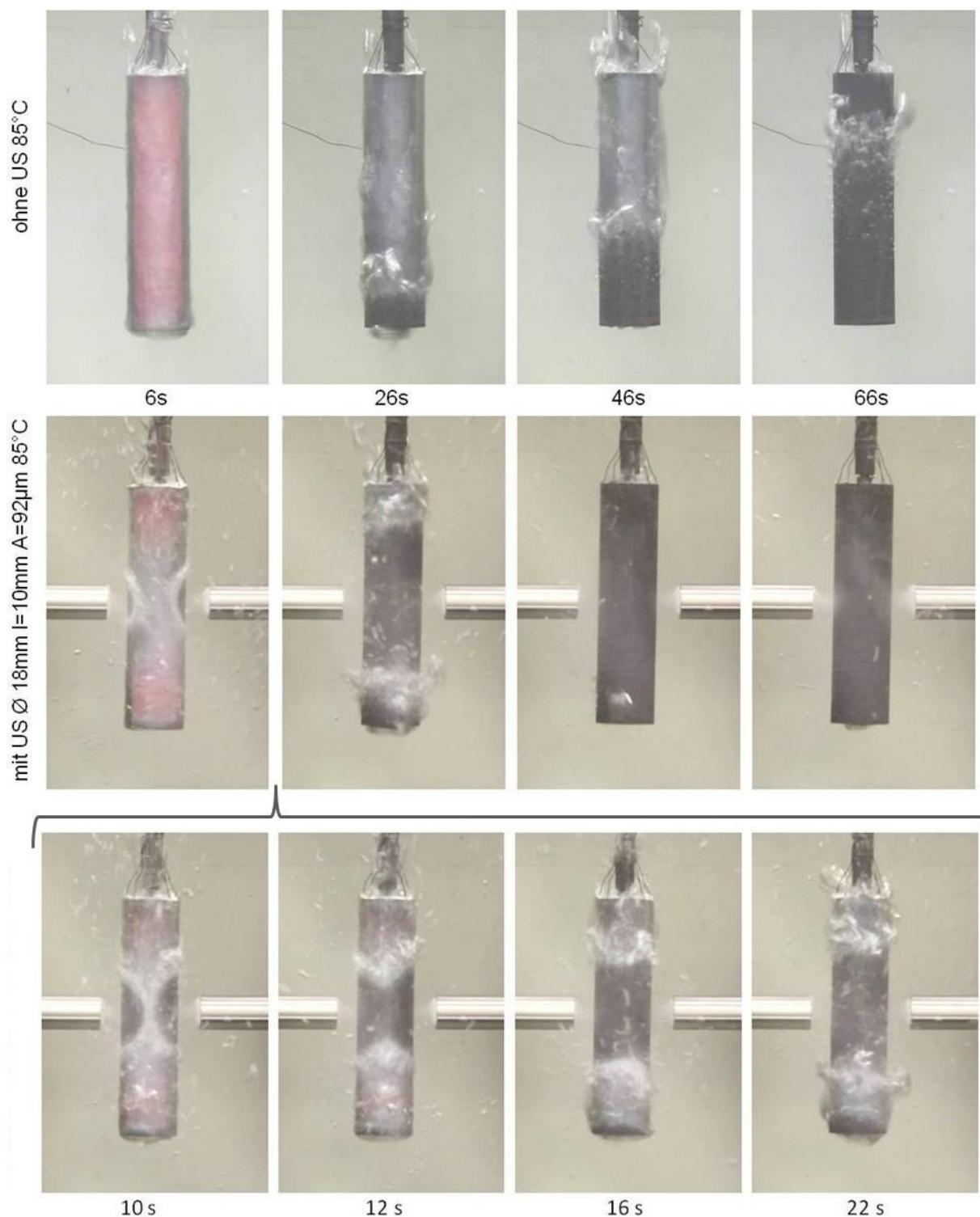


Abbildung 70: Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C (unten: zeitlicher Ausschnitt der Bilderserie der Ultraschallunterstützung).

Während die glühende Probe bei konventioneller Abschreckung nach 6 s noch komplett von einem Dampffilm umgeben ist, zeigt sich bei der zweiseitigen Ultraschallunterstützung ein vorzeitiges Aufreißen des Dampffilms vor den beiden Sonotroden. Im Gegensatz zur konventionellen Abschreckung bilden sich durch die zweiseitige Beschallung zwei Benetzungsfronten aus, die durch die fortwährende

Beschallung zu den beiden Stirnseiten wandern (26 s). Dieser Vorgang wird im Zeitausschnitt zwischen 6 s und 26 s der Abbildung nochmals detaillierter dargestellt. Nachdem sich die beiden kreisförmigen Benetzungsfronten vereinen, entstehen ober- und unterhalb der Probenmittelebene zwei nahezu horizontale Benetzungsfronten, die sich in Richtung der jeweiligen Probenstirnfläche fortbewegen. Die Wiederbenetzung bei Ultraschallunterstützung läuft deutlich schneller als bei konventioneller Abschreckung ab. Nach 46 s liegt bei ultraschallunterstützter Abschreckung Konvektion vor, während die Probe bei konventioneller Abschreckung zu diesem Zeitpunkt noch nicht einmal zur Hälfte wiederbenetzt ist.

Der Einfluss der Wassertemperatur auf die zweiseitig ultraschallunterstützte Wasserabschreckung des austenitischen Stahls ist exemplarisch in Abbildung 71 dargestellt.

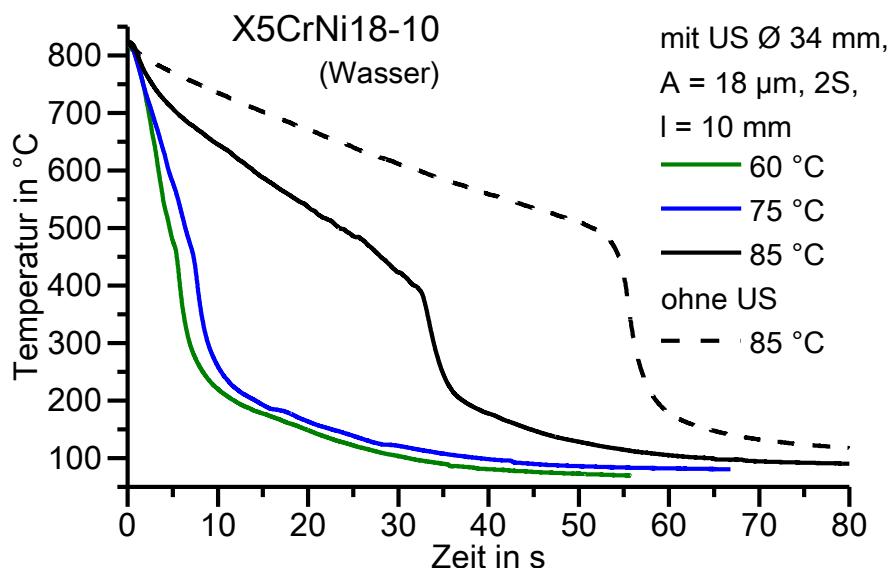


Abbildung 71: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.

Wie bei der konventionellen Abschreckung nehmen die Stabilität des Filmsiedens und damit die Abkühlzeit mit zunehmender Wassertemperatur auch bei Ultraschallunterstützung zu. Dabei ist der Unterschied zwischen 60 °C und 75 °C in dem abgebildeten Beispiel relativ gering, der Unterschied zu 85 °C jedoch sehr deutlich. Außerdem zeigt sich, dass die Leidenfrost-Temperatur bei Ultraschallunterstützung mit zunehmender Wassertemperatur absinkt. Die Ultraschallunterstützung führt zu einer Destabilisierung des Dampffilms, die bei 60 °C und 75 °C hier sogar so stark ist, dass sich die Abkühlintensität des Filmsiedens nur noch geringfügig von der des Blasensiedens unterscheidet. Am Beispiel der Wassertemperatur von 85 °C ist die Reduzierung der Abschreckzeit durch Ultraschallunterstützung deutlich zu erkennen.

In der folgenden Abbildung 72 ist der Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung exemplarisch im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung bei 60 °C wiedergegeben. Die Ultraschallunterstützung mit einem Durchmesser der Abschallfläche von 34 mm führt kurz nach dem Eintauchen der Probe zu einer Destabilisierung des Dampffilms und einer damit verbundenen Reduzierung der Dauer des Filmsiedens um etwa ein Viertel verglichen zur konventionellen Abschreckung. Bei einem Durchmesser der Sonotrodenstirnfläche von 50 mm kommt es mit Eintauchen der Probe zu einer sofortigen Destabilisierung des Dampffilms. Dies zeigt sich anhand des deutlich steileren Kurvenanstiegs im Vergleich zum konventionellen Abkühlverlauf. Nach wenigen Sekunden lässt sich hier der Dampffilm durch die Beschallung zerstören. Mit zunehmendem Durchmesser und damit Größe der schallabgebenden Fläche steigt das Destabilisierungsvermögen des Dampffilms, einhergehend mit einer Abnahme der Abkühldauer und einer Steigerung der mittleren Abkühlrate, besonders für den Fall der 50 mm-Sonotrode.

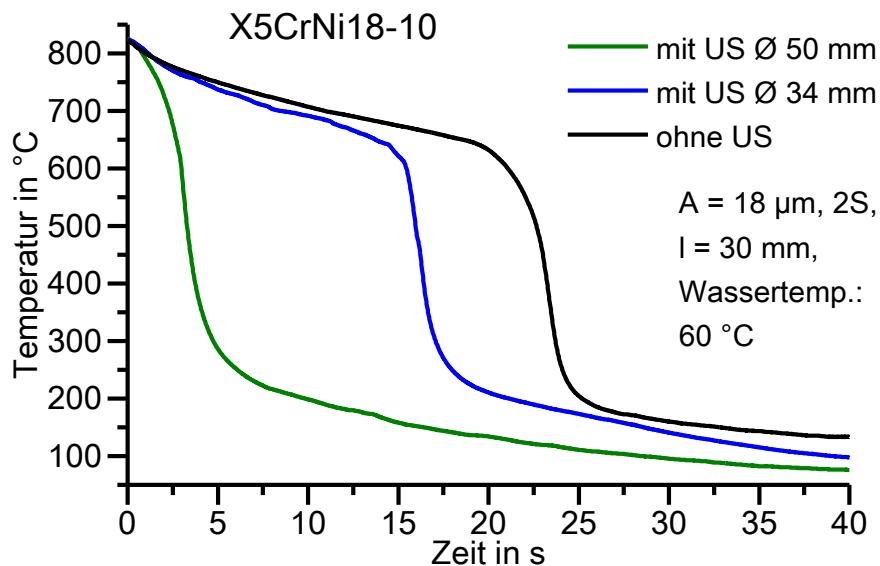


Abbildung 72: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

Abbildung 73 veranschaulicht exemplarisch den Ultraschalleinfluss auf die konventionelle Abschreckung anhand des Abstandes zwischen Sonotroden und Probe bei zweiseitiger Beschallung eines X5CrNi18-10-Zylinders. Mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotroden und Probe im Vergleich zur konventionellen Abschreckung lässt sich die Filmsiedephase zunehmend beschleunigen und verkürzen mit der Folge, dass die Abkühldauer zunehmend sinkt und die mittlere Abkühlrate steigt. Außerdem verschiebt sich der Leidenfrost-Punkt zunehmend zu geringeren

Temperaturen. Die Leidenfrost-Temperaturen der konventionellen und ultraschallunterstützten Abschreckung bei einem Abstand von 50 mm unterscheiden sich nur um etwa 15 K. Bei den Abständen 30 mm und 10 mm sinkt diese um ca. 90 K bzw. 115 K deutlich. Besonders auffällig ist die zunehmende Beschleunigung der Filmphase bei 30 mm und 10 mm. Hier ändern sich im Gegensatz zum Abstand von 50 mm die Anstiege der Abkühlkurven auch innerhalb der Filmsiedephase, was auch bei der einseitigen Beschallung zu beobachten war.

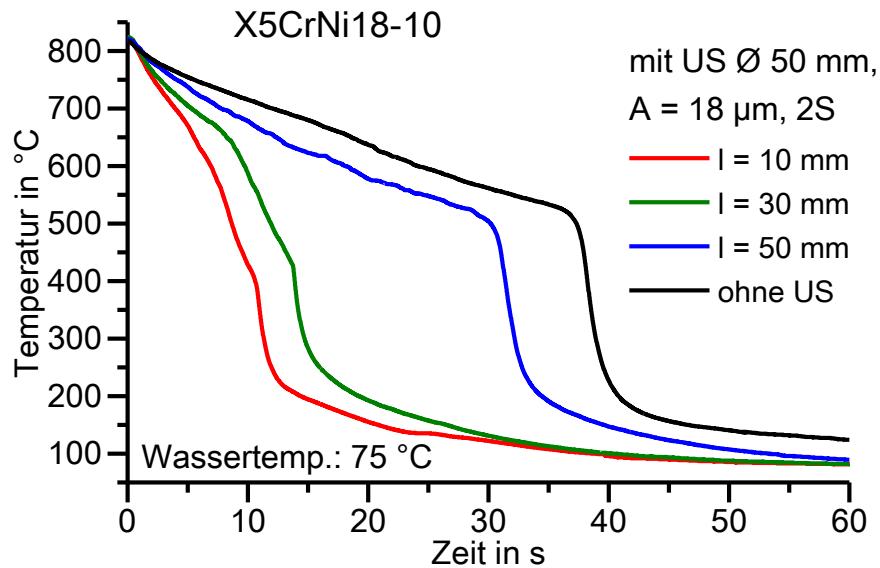


Abbildung 73: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.

In Abbildung 74 ist der Einfluss der Ultraschallamplitude auf die konventionelle Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei zweiseitiger Beschallung exemplarisch für 85 °C dargestellt. Mit ansteigender Amplitude kommt es zu einer zunehmenden Reduzierung der Filmsiededauer. Beschleunigen lässt sich die Filmphase in dem gezeigten Beispiel jedoch erst bei Amplituden von 18 µm und 37 µm, was sich durch die größeren Kurvenanstiege in dieser Abkühlphase zeigt. Während in dem dargestellten Beispiel die zweiseitige Beschallung mit einer Amplitude von 9 µm nur eine sehr geringe Reduzierung der Filmsiededauer von ca. 5 s mit sich bringt, entspricht diese bei einer Amplitude von 37 µm weniger als ein Drittel der Dauer der konventionellen Abschreckung. Besonders auffällig ist, dass sich die Leidenfrost-Temperatur bei Ultraschallunterstützung ändert. Im Vergleich zur konventionellen Abschreckung steigt die Leidenfrost-Temperatur bei einer Amplitude von 9 µm um ca. 30 K und sinkt bei 18 µm deutlich um etwa 100 K, bei 37 µm jedoch nur um etwa 40 K.

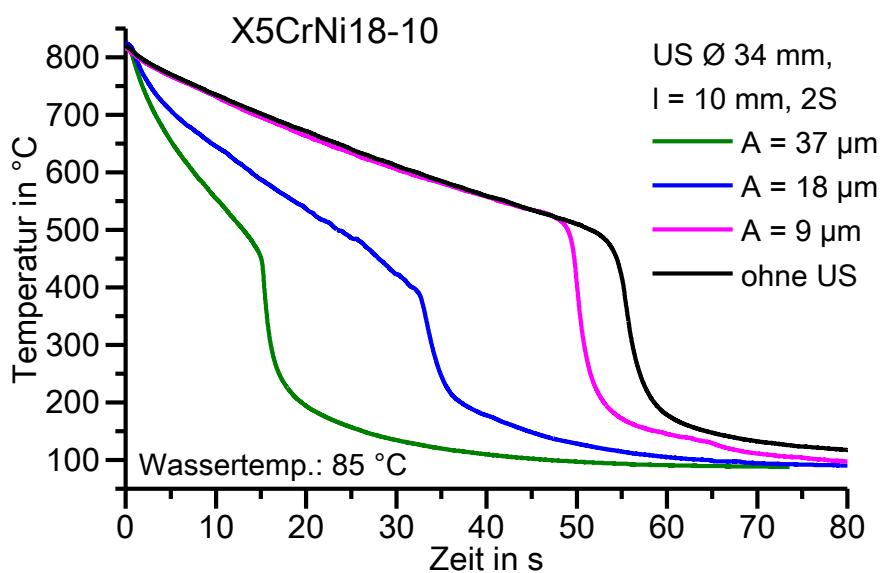


Abbildung 74: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

In Abbildung 75 ist der Vergleich der bei konventioneller und ultraschallunterstützter Abschreckung erzielbarer Abkühlraten exemplarisch für eine Wassertemperatur von 85 °C für den Fall zweiseitiger Beschallung dargestellt. Gezeigt wird dabei u.a. die Abkühlrate der schnellsten Abkühlung des zugehörigen Versuchsprogramms.

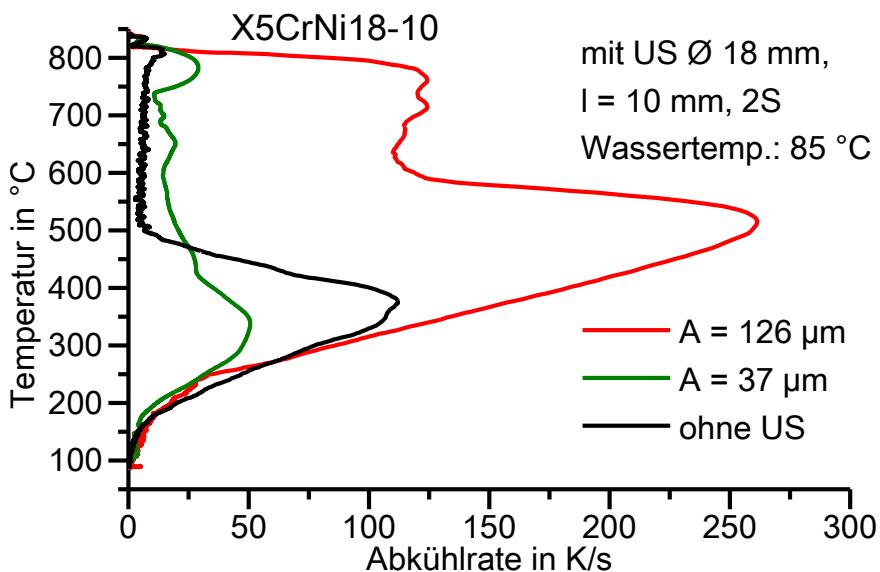


Abbildung 75: Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

In dieser Abbildung zeigt sich der deutliche Unterschied der Abkühlraten während des Filmsiedens mit und ohne Ultraschallunterstützung. Außerdem wird deutlich, wie groß die Beeinflussungsmöglichkeit einer Ultraschallunterstützung auf die konventionelle Abschreckung sein kann. Bei einer Temperatur von etwa 500 °C lässt sich durch die

Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von 126 µm etwa eine etwa 30fache Steigerung der Abkühlrate im Vergleich zur konventionellen Abschreckung erreichen.

Der zuvor geschilderte Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche auf die Abschreckwirkung trifft, wie schon bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082, nicht auf alle Fälle des durchgeföhrten Versuchsprogramms zu. Bei einer Wassertemperatur von 85 °C, einem Abstand zwischen schallabgebenden Flächen und Probe von 10 mm und Ultraschallamplituden von 9 µm und 18 µm war beispielsweise zu beobachten, dass die zweiseitig ultraschallunterstützte Abkühlung bei einem Durchmesser der Abschallfläche von 34 mm schneller abläuft als die bei einem Durchmesser von 50 mm, wie Abbildung 76 zeigt. Während sich die zugehörigen Abkühlverläufe bei einer Amplitude von 9 µm nur geringfügig unterscheiden, zeigt sich bei 18 µm ein deutlicher Unterschied. Beim Vergleich der Abschreckungen mit der 34 mm-Sonotrode und der 18 mm-Sonotrode war dieses Phänomen nicht zu beobachten, wie beispielhaft in der dargestellten Abbildung anhand der Amplitude von 37 µm gezeigt wird. Ursache für dieses Phänomen scheinen destruktive Interferenzerscheinungen beider Ultraschallfelder der zweiseitigen Beschallung bei Nutzung der 50 mm-Sonotrode zu sein, wie bereits in Kapitel 4.2.3.1 beschrieben.

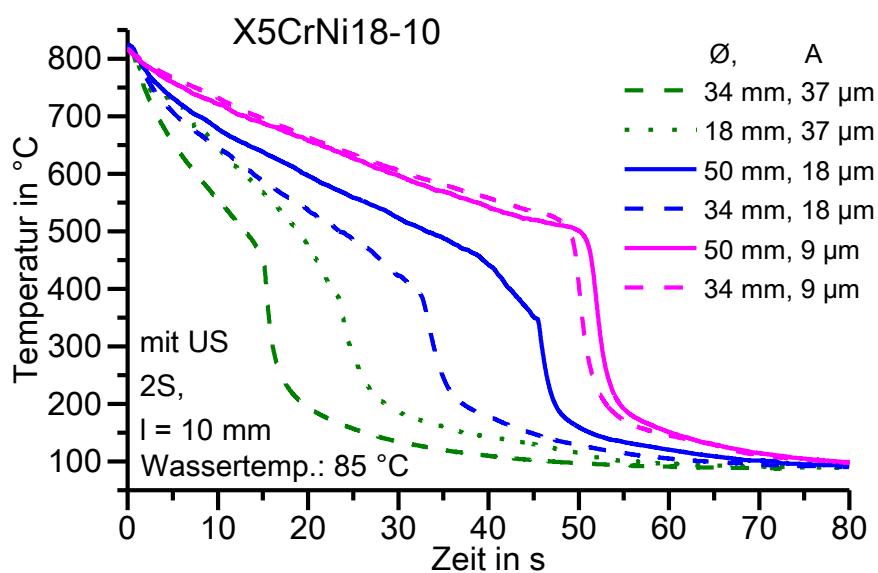


Abbildung 76: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Ausnahmeerscheinungen beim Vergleich des Einflusses der Größe der schallabgebenden Fläche.

Das Beeinflussungsvermögen des Abkühlvorgangs durch Ultraschallunterstützung zeigt sich auch bei Betrachtung der resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK). In

Abbildung 77 ist exemplarisch der Vergleich von WÜK der konventionellen und zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (am Rand bei 0°) von Zylindern aus X5CrNi18-10 bei 60°C wiedergegeben. Bei der ersten Betrachtung dieses Vergleichs fällt auf, dass der maximale WÜK der konventionellen Abschreckung den der ultraschallunterstützten übersteigt. Im größten und für die Abschreckung wichtigsten Teil des Temperaturbereichs wird der WÜK der konventionellen Abschreckung allerdings von dem der Ultraschallunterstützung überschritten. Im Bereich des bei konventioneller Abschreckung vorherrschenden Filmsiedens wird so durch Ultraschallanwendung eine Steigerung des WÜK auf mehr als das Zehnfache erzielt.

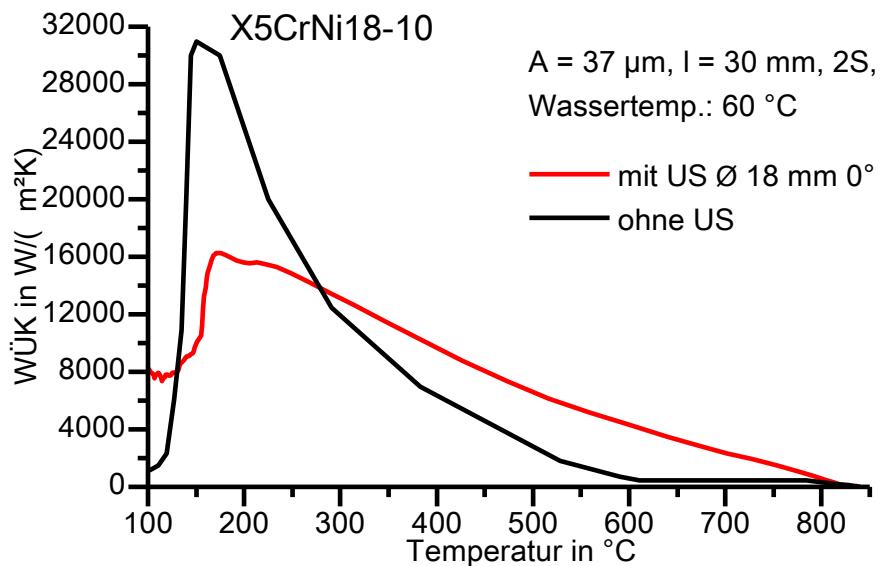


Abbildung 77: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60°C .

In Abbildung 78 ist der Einfluss des Ultraschalls bei zweiseitiger Beschallung von X5CrNi18-10 für das durchgeführte Versuchsprogramm in Wasser zusammenfassend anhand der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} dargestellt. Bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung wurden bei der gegebenen Variation der Prozessparameter normierte Abschreckfaktoren in einem Bereich zwischen $1,1 \leq f_{t_n}(X5CrNi18-10, 2S, \text{Wasser}) \leq 22,2$ erzielt. Der maximale normierte Abschreckfaktor f_{t_n} dieses Versuchsprogramms wurde bei Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von $126 \mu\text{m}$ erzielt. Dieses Ergebnis deckt sich mit der zugehörigen Steigerung der Abkühlrate in Abbildung 75 verglichen zur konventionellen Abschreckung. Mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotrode und Probe sowie mit zunehmender Ultraschallamplitude zeigen sich steigende normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} . Diese Abhängigkeit ist überwiegend auch mit zunehmender

Größe der schallabgebenden Fläche und abnehmender Wassertemperatur zu erkennen. Etwaige Ausnahmen bei den Wassertemperaturen 75 °C und 85 °C treten immer in Verbindung mit einem Durchmesser der Abschallfläche von 50 mm auf, was die in Abbildung 76 dargestellten Ergebnisse widerspiegeln.

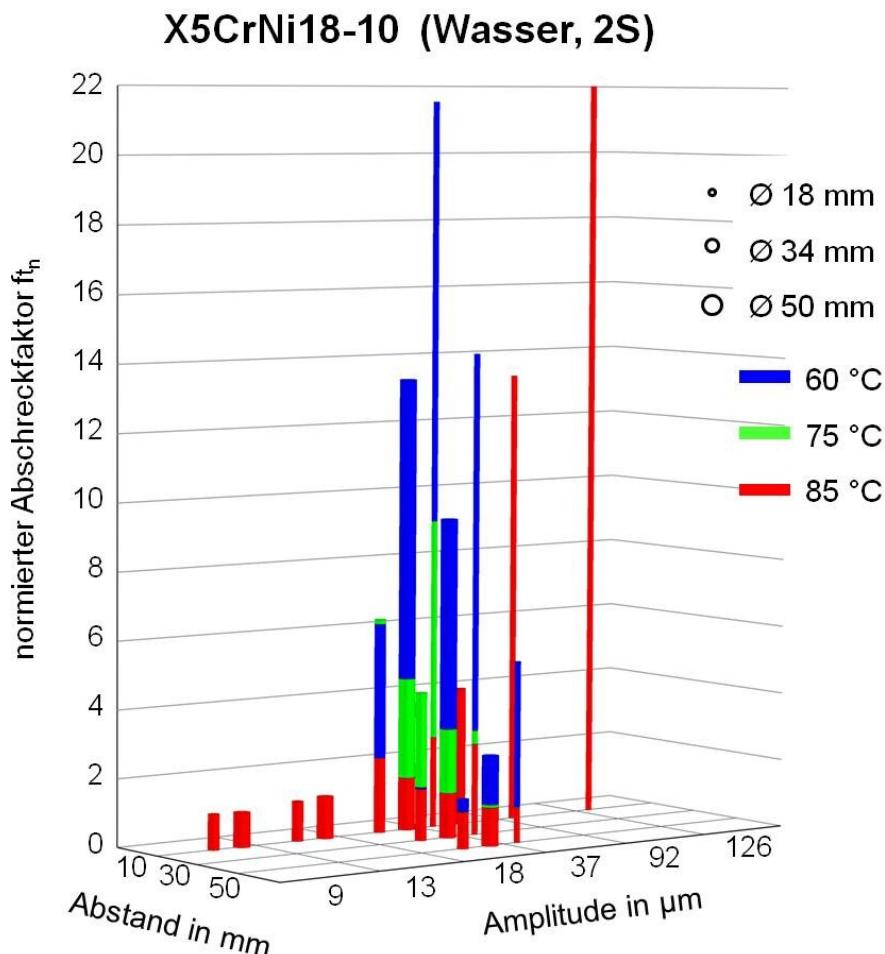


Abbildung 78: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

4.3.3.2 Beurteilung der Gleichmäßigkeit

Die folgende Abbildung 79 veranschaulicht exemplarisch die Gleichmäßigkeit der Wasserabschreckung bei zweiseitiger Beschallung anhand der in Umfangsrichtung der Probe aufgenommenen Abkühlverläufe. Es lässt sich erkennen, dass auch die zweiseitige Ultraschallunterstützung zu einer ungleichmäßigen Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe führt. Die beiden sonotrodenzugewandten Seiten (0°) der Probe kühlen schneller ab als die sonotrodenabgewandte Seite (90°). Mit zunehmendem Winkel in Umfangsrichtung der Probe bis 90° steigt die Dauer des Filmsiedens. Gleichzeitig nimmt die Wärmestromdichte in dieser Phase ab, was sich

anhand der sich verringernden Kurvenanstiege mit zunehmendem Umfangswinkel bis 90° zeigt. Die Abkühlung der Probe in Umfangsrichtung unterscheidet sich außerdem bezüglich der Leidenfrost-Temperaturen. Mit zunehmendem Umfangswinkel steigt die Leidenfrost-Temperatur von etwa $460\text{ }^\circ\text{C}$ (0°) auf ca. $590\text{ }^\circ\text{C}$ (45° und 90°) um etwa 130 K. Im Vergleich zur einseitigen Beschallung lässt sich durch die zweiseitige Ultraschallunterstützung eine deutlich gleichmäßige Abkühlung in Umfangsrichtung erzielen.

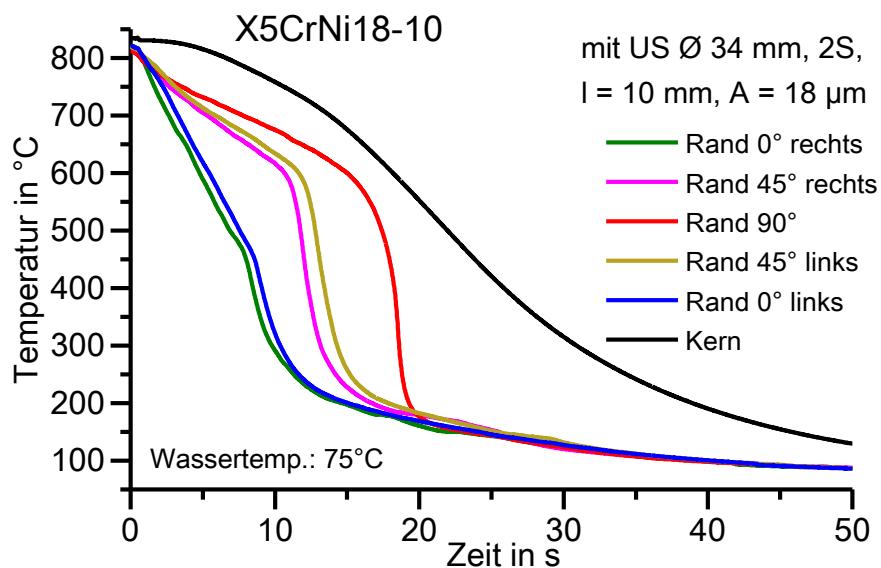


Abbildung 79: Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 ($\varnothing 34\text{ mm}$, $A = 18\text{ }\mu\text{m}$, $I = 10\text{ mm}$, $75\text{ }^\circ\text{C}$).

In Abbildung 80 sind die Wärmeübergangskoeffizienten exemplarisch für die zweiseitig ultraschallunterstützte Abschreckung von X5CrNi18-10 bei einer Wassertemperatur von $60\text{ }^\circ\text{C}$ dargestellt. Im ersten Temperaturbereich von $840\text{ }^\circ\text{C}$ bis zu einer Temperatur von etwa $375\text{ }^\circ\text{C}$ übersteigen die WÜK bei 0° die bei 45° und die bei 45° übersteigen die WÜK von 90° . Während es bei 45° und 90° nach dem Eintauchen zu einer Filmphase kommt, lässt sich diese direkt vor der Sonotrode bei 0° nahezu unterdrücken. Dies führt dazu, dass während des bei 90° vorherrschenden Filmsiedens zum gleichen Zeitpunkt vor der Sonotrode mindestens vierfach höhere WÜK vorliegen. Unterhalb von etwa $375\text{ }^\circ\text{C}$ übersteigen die WÜK von 90° die von 0° und 45° dann deutlich.

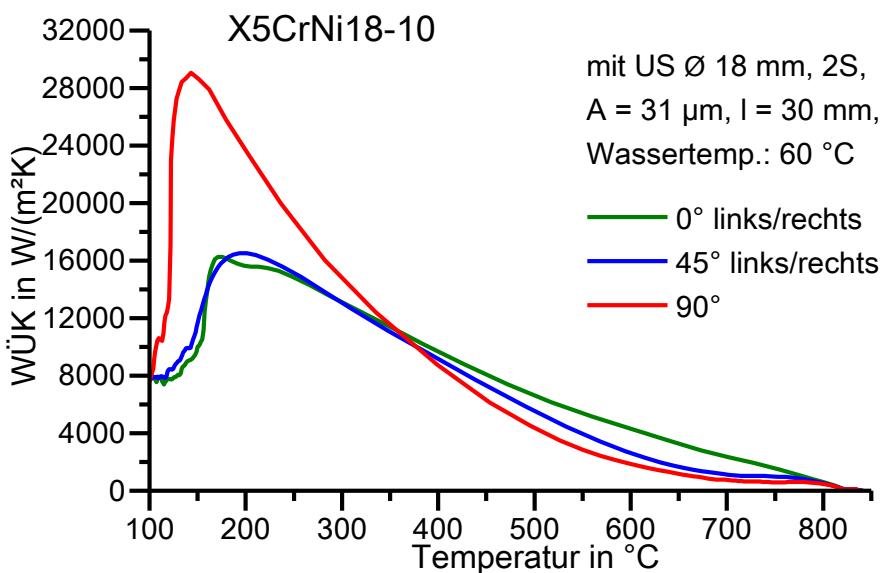


Abbildung 80: Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 $^\circ\text{C}$.

In Abbildung 81 ist der Einfluss der Prozessparameter auf die Gleichmäßigkeit der Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe bei zweiseitig ultraschallunterstützter und konventioneller Wasserabschreckung des austenitischen Stahls anhand der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} (Rand 0° – Rand 90°) wiedergegeben. Diese sinken mit zunehmender Wassertemperatur deutlich. Für das durchgeführte Versuchsprogramm lässt sich eine Abhängigkeit der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in Umfangsrichtung von den Prozessparametern erkennen. Die Zunahme der Ultraschallamplitude sowie die Reduzierung des Abstandes zwischen Sonotroden und Probe führen fast ausnahmslos zu einer Steigerung der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} . Bei Wassertemperaturen von 60 $^\circ\text{C}$ und 75 $^\circ\text{C}$ lassen sich diese mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche reduzieren. Bei 85 $^\circ\text{C}$ führt nur der Wechsel des Sonotrodenstirnflächendurchmessers von 18 mm auf 34 mm zu einer solchen Abhängigkeit. Bei der Änderung von 34 mm auf 50 mm bleiben die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in Umfangsrichtung hingegen weitestgehend konstant. Diese Abhängigkeit der Größe der schallabgebenden Fläche ist ein entscheidender Unterschied zur einseitigen Beschallung von X5CrNi18-10. Zudem führt die zweiseitige Ultraschallunterstützung zu einer Reduzierung der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} .

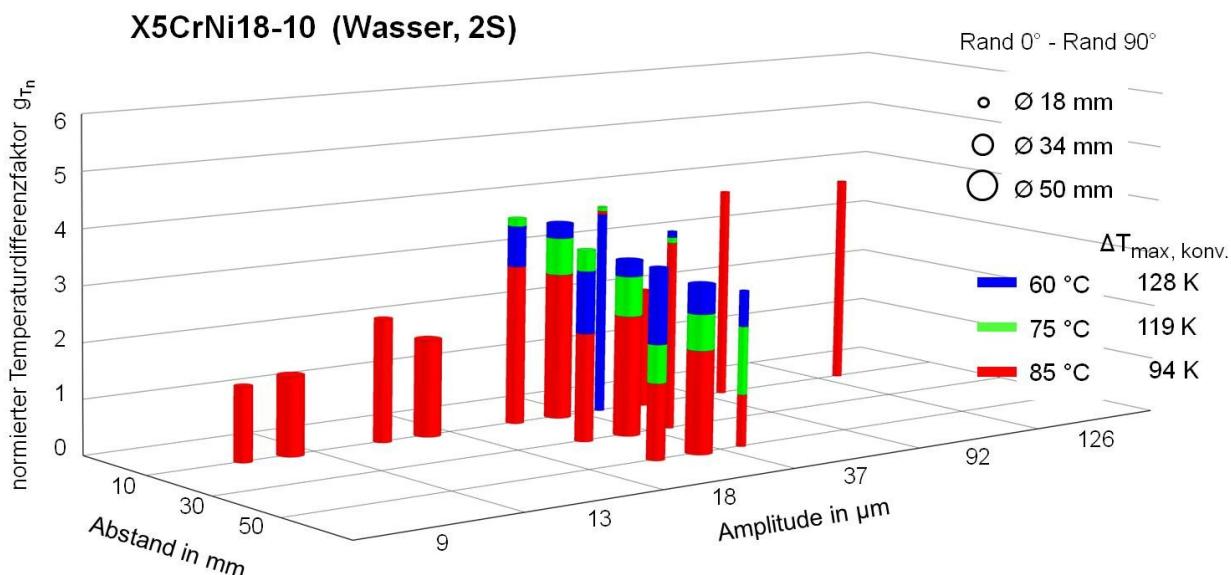


Abbildung 81: Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

4.3.3.3 Charakterisierung der Eigenschaften

An Proben aus X5CrNi18-10, die mehrfach unter zweiseitiger Ultraschallunterstützung in Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen abgeschreckt wurden, erfolgten Rissprüfungen. Dabei wurden keine Risse oder Defekte festgestellt. Es ist daher davon auszugehen, dass die zweiseitige ultraschallunterstützte Wasserabschreckung in Bezug auf Rissbildung für X5CrNi18-10 unter Berücksichtigung der Abschreckparameter und der untersuchten Probengeometrie unkritisch ist.

Abbildung 82 zeigt exemplarische oberflächennahe Axialeigenspannungsverläufe entlang des Probenumfangs auf Höhe der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C. Nach der zweiseitig ultraschallunterstützten Abschreckung liegen am Probenrand den Erwartungen nach, wie nach einseitig ultraschallunterstützter Abschreckung ähnlicher Prozessparameter, Druckeigenspannungen vor. Unter Berücksichtigung der angegebenen Standardabweichungen sind die Axialeigenspannungen nach zweiseitiger Beschallung unabhängig vom Umfangswinkel der Probe. Die Axialeigenspannungen der zweiseitigen Beschallung betragen im Mittel etwa -215 MPa. Damit liegen sie betragsmäßig etwa 85 MPa unterhalb der nach einseitiger Beschallung ähnlicher Prozessparameter ermittelten Axialeigenspannungen.

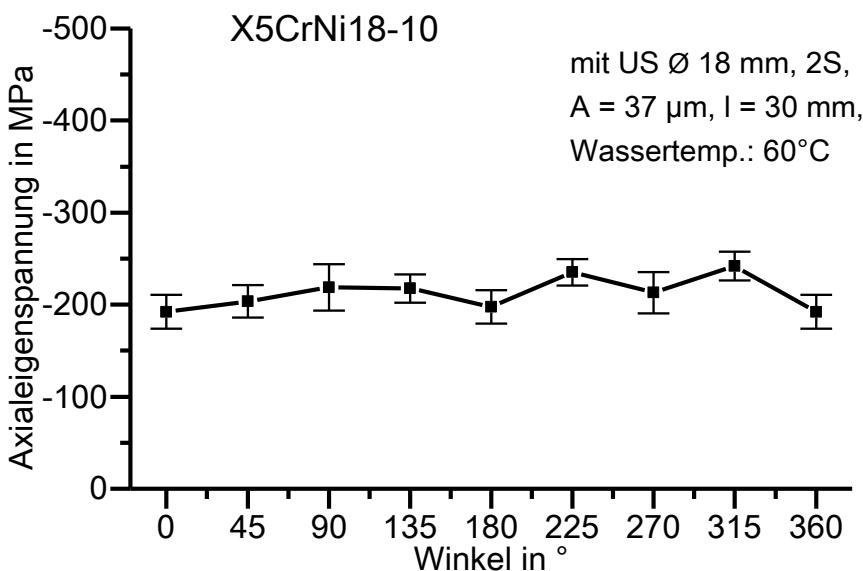


Abbildung 82: Oberflächennahe Axialeigenspannungsverlauf von X5CrNi18-10 in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 83 ist die Verformung einer Probe zur Visualisierung des Verzugs exemplarisch nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C abgebildet.

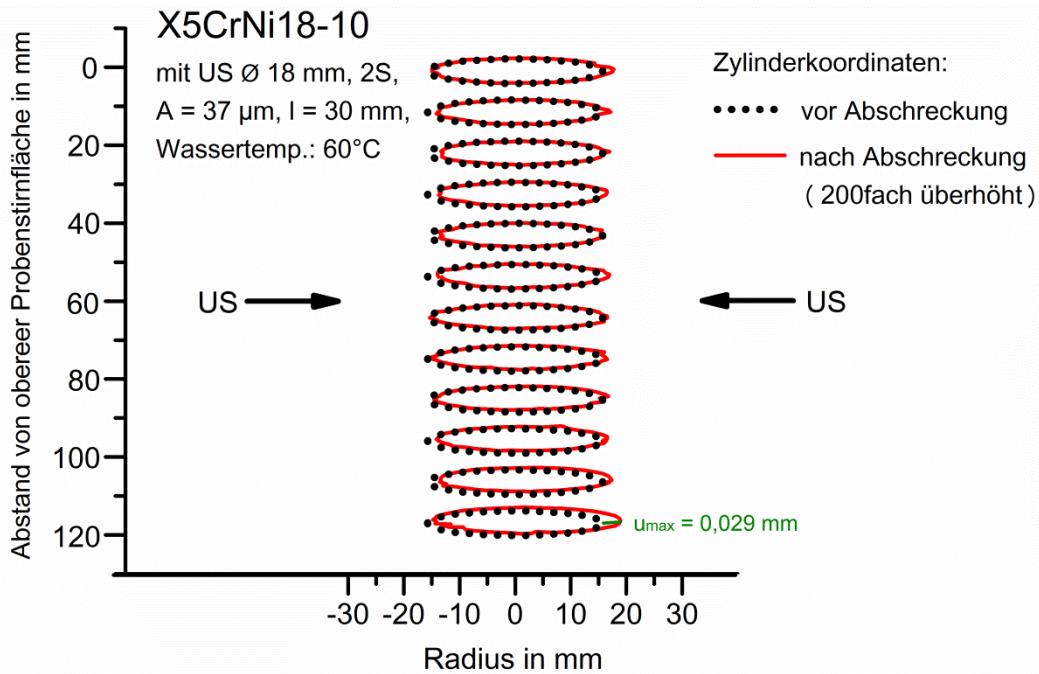


Abbildung 83: Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

Die Beschallung der Probe erfolgte von zwei gegenüberliegenden Seiten. Nach der ultraschallunterstützten Abschreckung weist die Probe eine geringfügige Krümmung in Richtung der rechts angeordneten Sonotrode auf. Dies wäre im Idealfall nicht zu erwarten. Da die zweiseitige Beschallung durch die Nutzung zweier Sonotroden jedoch

nur in gewissen Grenzen gleichmäßig realisiert werden kann, wie bspw. in Abbildung 79 zu erkennen ist, kann das geringfügig zeitversetzte Aufreißen des Dampffilms vor den beiden Sonotroden bereits zu einer geringfügigen Krümmung, wie in diesem Fall, führen. Die zugehörigen Videoaufnahmen des Abschreckvorgangs bestätigen dies. Der Dampffilm vor der linksseitigen Sonotrode bricht etwa 1,5 s früher als der vor der rechtsseitigen Sonotrode auf. Damit entsteht auf der linken Probenseite eine geringfügige plastische Längung und eine resultierende Krümmung in Richtung rechtsseitiger Sonotrode. Aufgrund der Probenhalterung und somit festen Einspannung an der oberen Stirnfläche ist die maximale Verschiebung in diesem Beispiel mit 0,029 mm an der unteren Stirnfläche zu beobachten. Bei drei Versuchen beträgt diese maximale Verschiebung in Beschallungsrichtung im Mittel $0,041 \text{ mm} \pm 0,024 \text{ mm}$. Im Vergleich zum resultierenden Verzug nach einseitiger Beschallung ($u_{x,\max} = 0,065 \text{ mm} \pm 0,014 \text{ mm}$) ist die hier entstandene Krümmung erwartungsgemäß geringer ausgeprägt.

4.4 Ölabschreckung am Werkstoff X5CrNi18-10

Die ultraschallunterstützte Ölabschreckung von X5CrNi18-10 im Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 erfolgte unter zweiseitiger Beschallung bei einer Badtemperatur von 60 °C. Dabei wurden folgende Prozessparameter kombiniert (Tabelle 17):

Tabelle 17: Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10.

Versuchsreihe: X5CrNi18-10 2S Isomax 166 (60 °C)				
Sonotrode: Durchmesser in mm	Abstand in mm	Amplitude in µm		
		18	37	126
18	10		x	x
	30		x	x
	50		x	x
34	10	x	x	
	30	x	x	
	50	x	x	
50	10	x		
	30	x		
	50	x		

4.4.1 Charakterisierung der Abschreckwirkung

Die zweiseitige Ultraschallunterstützung bei der Ölabschreckung von X5CrNi18-10 im Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 führt zu einer signifikanten Beeinflussung verglichen zur konventionellen Abschreckung. In Abbildung 84, die einen Vergleich von konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung eines Stahlzylinders bei 60 °C darstellt, ist dies anhand einer Bilderserie der Abschreckvorgänge mit ausgewählten Zeitpunkten wiedergegeben. Aufgrund des dunklen Öls dienen Pfeile in dieser Abbildung der Kennzeichnung der Position der Benetzungsfronten. Während der Dampffilm bei konventioneller Abschreckung nach 4 s an den Stirnseiten der Probe aufgerissen ist, zeigt sich bei der zweiseitigen Ultraschallunterstützung ein zusätzliches vorzeitiges Aufreißen des Dampffilms vor den beiden Sonotroden auf Höhe der Probenmittelebene. Im Gegensatz zur konventionellen Abschreckung bilden sich durch die zweiseitige Beschallung zwei weitere

Benetzungsfronten aus, die durch die fortwährende Beschallung zu den beiden Stirnseiten wandern (4 s – 8 s). Die Wiederbenetzung bei Ultraschallunterstützung läuft deutlich schneller als bei konventioneller Abschreckung ab. Nach 12 s liegt bei ultraschallunterstützter Abschreckung Konvektion vor, während die Probenmantelfläche bei konventioneller Abschreckung zu diesem Zeitpunkt gerade einmal zur Hälfte wiederbenetzt ist.

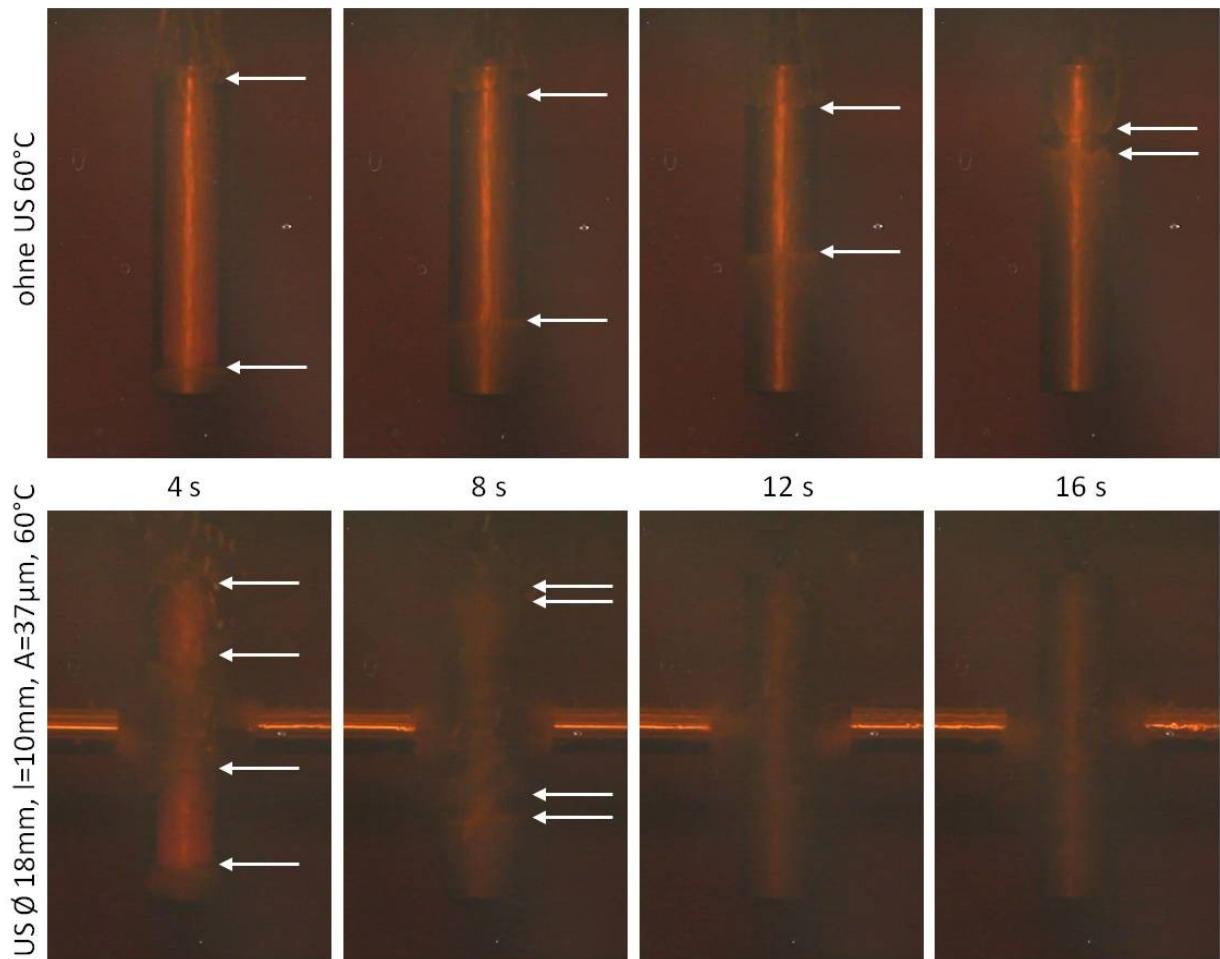


Abbildung 84: Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (Pfeile markieren Wiederbenetzungsfelder).

In der folgenden Abbildung 85 ist der Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche bei zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung exemplarisch im Vergleich zur konventionellen im Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 bei 60 °C wiedergegeben. Die Ultraschallunterstützung bei der Ölabschreckung führt wie bei der Wasserabschreckung zu einer deutlichen Beeinflussung des Filmsiedens. Mit zunehmendem Durchmesser und damit Größe der schallabgebenden Fläche steigt der Destabilisierungsgrad des Dampffilms. Dies bringt eine Beschleunigung der Filmphase und eine Reduzierung der Dauer mit sich. In Bezug auf den gesamten Abkühlvorgang

geht dies mit einer Abnahme der Gesamtabkühlzeit sowie einer Steigerung der mittleren Abkühlrate einher. In dem dargestellten Beispiel lässt sich die Dauer der Filmphase der konventionellen Ölabschreckung mit zweiseitiger Ultraschallunterstützung bei einem Durchmesser der Abschallfläche von 18 mm nahezu um zwei Drittel reduzieren, bei einem Durchmesser von 34 mm sogar nahezu unterdrücken.

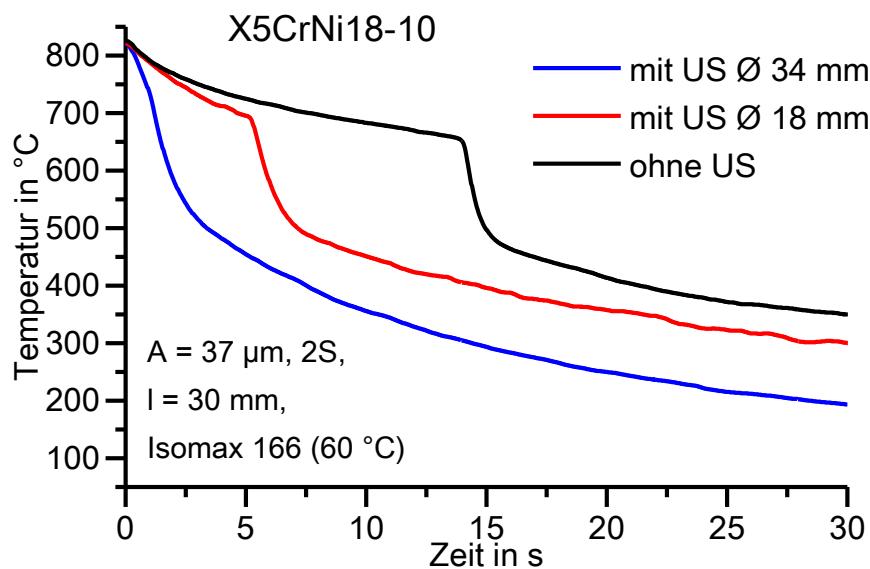


Abbildung 85: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.

Die Verringerung des Abstandes zwischen Sonotroden und Probe hat einen ähnlichen Einfluss auf die Abschreckwirkung von X5CrNi18-10 in Öl, wie in Abbildung 86 beispielhaft dargestellt ist. Mit geringer werdendem Abstand zwischen Sonotroden und Probe wächst der Destabilisierungsgrad des Dampffilms. Dies resultiert in einer geringfügigen Beschleunigung des Filmsiedens und einer deutlichen Reduzierung der Dauer im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung. Bei einem Abstand zwischen schallabgebenden Flächen und Probe von 10 mm lässt sich die Ausbildung eines Dampffilms in diesem Beispiel mit dem Eintauchen der Probe vor den Sonotroden sofort unterdrücken. Bei einem Abstand von 10 mm zeigt sich außerdem ein ausgeprägter diskontinuierlicher Kurvenverlauf in der Phase des konvektiven Wärmeübergangs, der sich auch bei anderen ultraschallunterstützten Abschreckungen beobachten lässt.

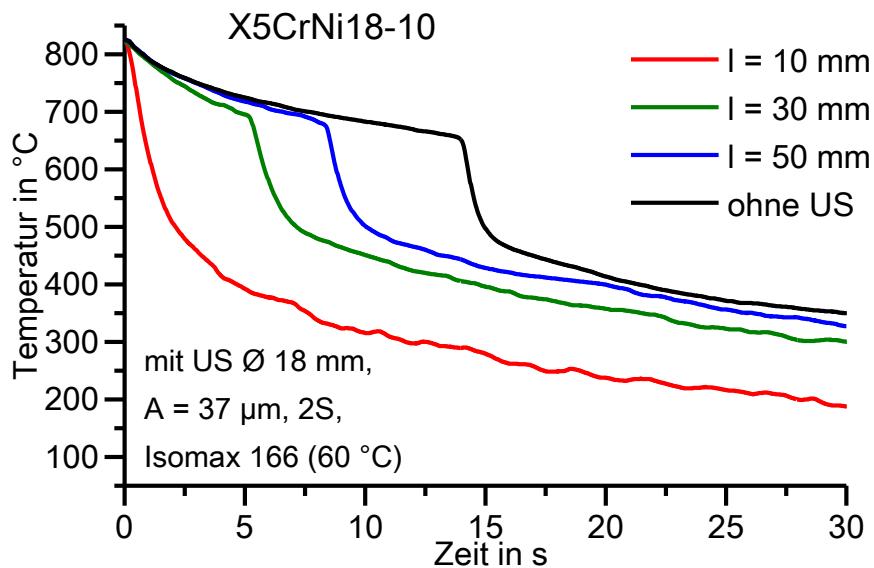


Abbildung 86: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.

In den folgenden Abbildungen ist der Einfluss der Ultraschallamplitude bei Ultraschallunterstützung auf die Ölabschreckung des austenitischen Stahls anhand von Abkühlverläufen (Abbildung 87) und zugehörigen Abkühlraten (Abbildung 88) dargestellt.

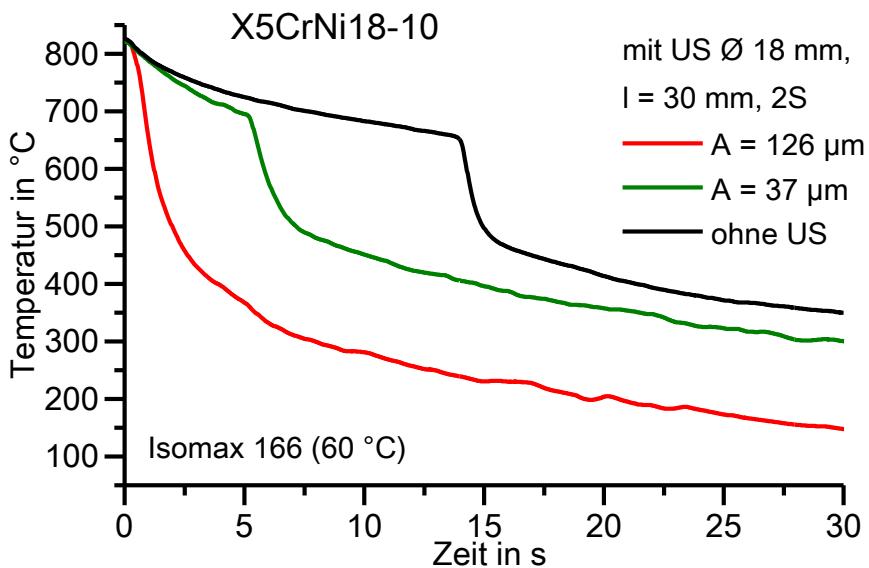


Abbildung 87: Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

Auch bei Variation der Ultraschallamplitude zeigt sich, wie schon bei den anderen Prozessparametern, der große Umfang der Beeinflussungsmöglichkeit gegenüber der konventionellen Ölabschreckung. Mit zunehmender Amplitude lässt sich die Dauer des Filmsiedens zunehmend reduzieren. Das bei konventioneller Ölabschreckung etwa 13 s

stabil andauernde Filmsieden lässt sich bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung mit einer Amplitude von 126 µm nahezu eliminieren. Insgesamt führt die zweiseitige Ultraschallunterstützung mit zunehmender Ultraschallamplitude zu einer abnehmenden Gesamtabkühltdauer und bei hohen Amplituden zu einer zunehmenden mittleren Abkühlrate. Letzteres wird in Abbildung 88 besonders deutlich.

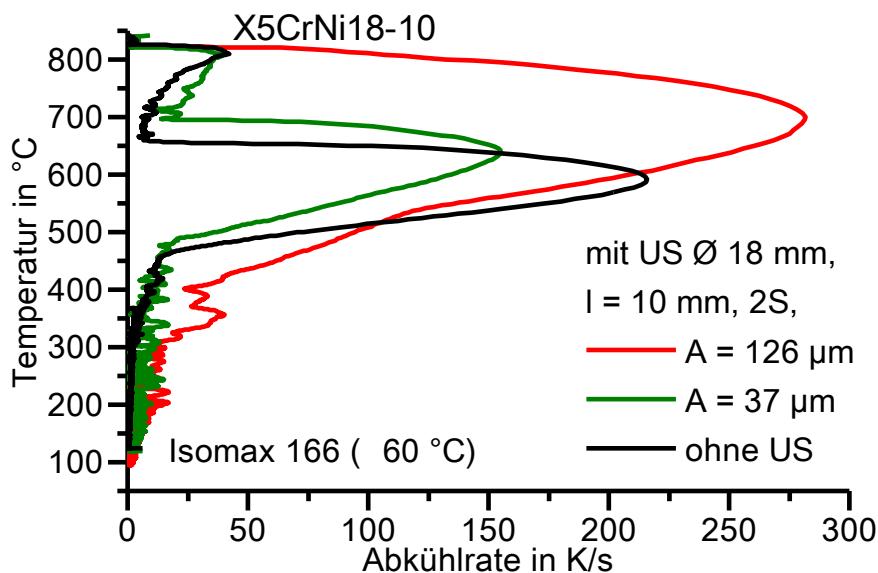


Abbildung 88: Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.

Beim Vergleich der Abkühlraten von konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung mit einer Amplitude von 126 µm zeigt sich, dass die Abkühlrate der Ultraschallunterstützung die der konventionellen nahezu im gesamten Temperaturbereich übersteigt. Im Bereich des bei konventioneller Abschreckung auftretenden Filmsiedens lässt sich die Abkühlrate bei Ultraschallunterstützung auf das 35fache steigern. Auch die maximale Abkühlrate der konventionellen Abschreckung kann mittels Ultraschall nochmals um ca. 65 K/s auf etwa 280 K/s gesteigert werden.

Der Ultraschalleinfluss auf die konventionelle Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C und zweiseitiger Beschallung der Probe ist in Abbildung 89 zusammenfassend dargestellt. Bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung ließen sich für das durchgeführte Versuchsprogramm normierte Abschreckfaktoren zwischen $1,4 \leq f_{t_n}(X5CrNi18-10, 2S, Öl) \leq 12$ erzielen. Der maximale normierte Abschreckfaktor f_{t_n} wurde dabei bei maximaler Ultraschallamplitude von 126 µm und geringstem Abstand von 10 mm erreicht. Bis auf eine Ausnahme lässt sich der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche, mit

geringer werdendem Abstand zwischen Sonotroden und Probe sowie mit zunehmender Ultraschallamplitude erhöhen. Die Ausnahme ist bei einem Durchmesser der schallabgebenden Fläche von 34 mm bei den Amplituden 18 µm und 37 µm zu beobachten. Die Differenz der beiden normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} liegt dabei allerdings unter der angegebenen Fehlertoleranz von 5 %. Im Vergleich zur zweiseitigen Ultraschallunterstützung in Wasser bei gleicher Badtemperatur zeigt sich einerseits, dass die bei der ultraschallunterstützten Ölabschreckung erzielbaren normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} im Mittel kleiner sind. Zudem lässt sich beim Vergleich von Wasser- und Ölabschreckung beobachten, dass die Differenzen der Abschreckfaktoren f_{t_n} bei variierender Größe der schallabgebenden Fläche bei ansonsten konstanten Parametern bei der Ölabschreckung geringer als bei der Wasserabschreckung sind.

X5CrNi18-10 (Isomax 166, 2S)

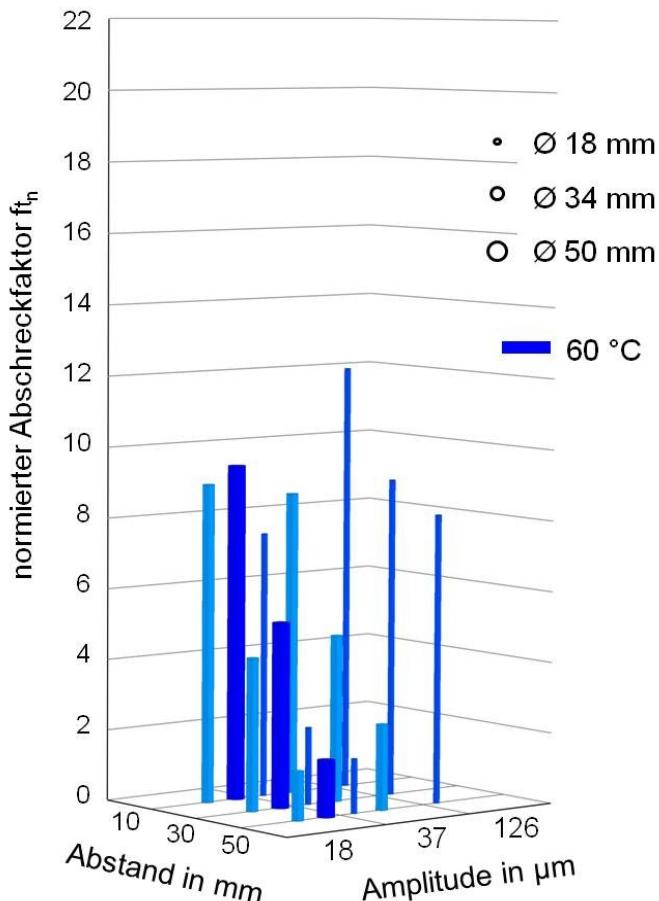


Abbildung 89: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (unterschiedliche Blautöne dienen der Übersichtlichkeit).

4.4.2 Beurteilung der Gleichmäßigkeit

Die Abschreckgleichmäßigkeit in Umfangsrichtung der Probe bei zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung ist in Abbildung 90 anhand von in Umfangsrichtung gemessenen Abkühlkurven exemplarisch dargestellt. Wie bei der Wasserabschreckung zeigt sich eine ungleichmäßige Abschreckung in Umfangsrichtung der Probe. Die sonotrodenzugewandten Seiten (0°) der Probe kühlen geringfügig schneller ab als die sonotrodenabgewandte Seite (90°). Dabei fällt auf, dass die Abkühlung zu Beginn sehr gleichmäßig ist und die Randabkühlverläufe nahezu aufeinander liegen. Ab einer Temperatur von etwa $700\text{ }^\circ\text{C}$ wird die Abkühlung bei 90° dann etwas langsamer als die bei 0° . Die Gleichmäßigkeit des Destabilisierungsvermögens des Dampffilms durch die beiden gegenüberliegenden Sonotroden ist gut. Die zugehörigen Abkühlkurven verlaufen nahezu identisch. Es wird davon ausgegangen, dass die zweiseitige Beschallung im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung zu einer gleichmäßigeren Abkühlung in Umfangsrichtung der Probe führt.

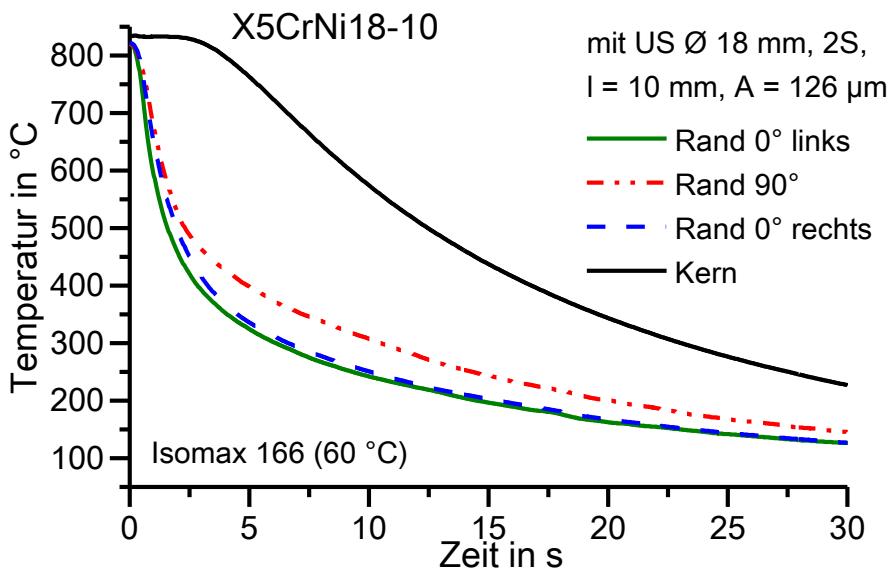


Abbildung 90: Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 ($\varnothing 18\text{ mm}$, $A = 126\text{ }\mu\text{m}$, $I = 10\text{ mm}$, $60\text{ }^\circ\text{C}$).

Der Einfluss der Prozessparameter auf die Gleichmäßigkeit der Ölabschreckung in Umfangsrichtung ist für das durchgeführte Versuchsprogramm in Abbildung 91 anhand der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} (Rand 0° – Rand 90°) am Probenrand für eine Badtemperatur von $60\text{ }^\circ\text{C}$ wiedergegeben. Die unterschiedlichen Blaustufen dienen dabei nur der Übersichtlichkeit. Wie bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bringen eine Zunahme der Größe der

schallabgebenden Fläche sowie eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Sonotroden und der Probe nahezu ausnahmslos eine Reduzierung der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in Umfangsrichtung mit sich. Im Gegensatz zur ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 führt eine Steigerung der Ultraschallamplitude zu einer deutlichen Abnahme der normierten tangentialen Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} .

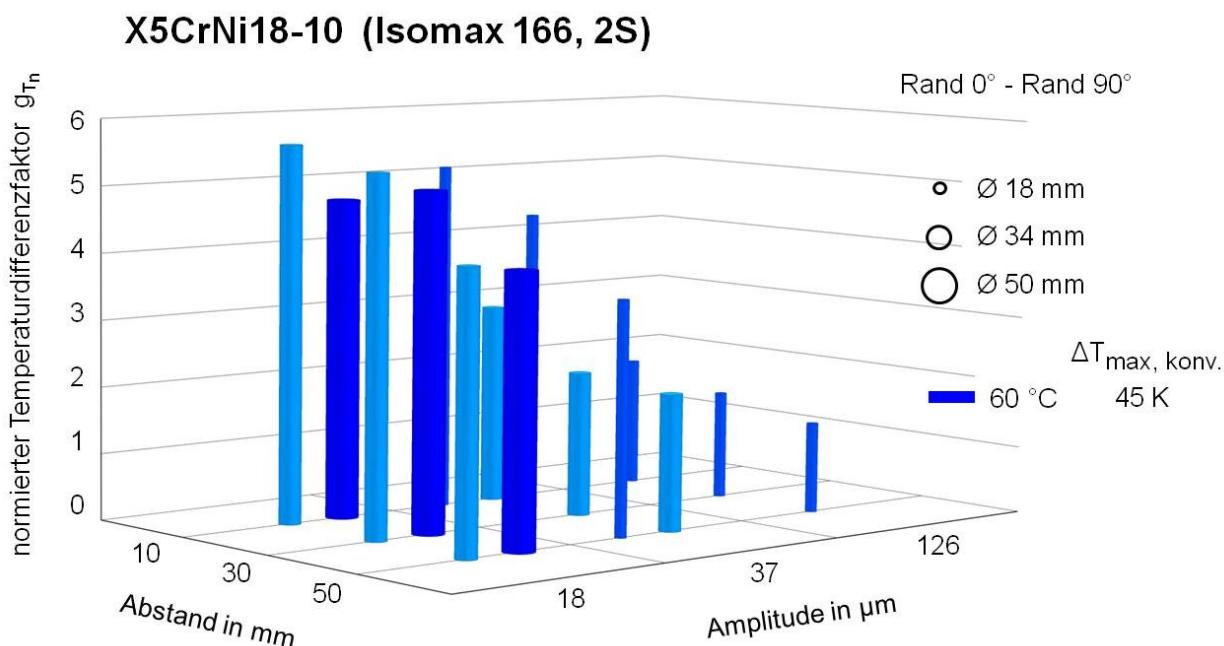


Abbildung 91: Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (unterschiedliche Blautöne dienen der Übersichtlichkeit).

Mit Hilfe der folgenden Abbildung 92 lässt die Gleichmäßigkeit der Ölabschreckung in axialer Richtung anhand der dargestellten Beträge maximaler axialer Temperaturdifferenzen (am Probenrand (0°) zwischen den Abständen von der oberen Probenstirnfläche von 30 mm und 90 mm) beurteilen. Für ausgewählte Prozessparameter wurden Abschreckversuche durchgeführt, um Aussagen zur Beeinflussung der axialen Gleichmäßigkeit durch eine Ultraschallunterstützung treffen zu können. Die Ultraschallunterstützung führt dazu, dass sich die Temperaturdifferenzen zwischen oberem (30 mm) und unterem (90 mm) Probendrittel im Vergleich zur konventionellen Abschreckung bei einer Öltemperatur von 60 °C um bis zu etwa 140 K reduzieren lassen. Das entspricht einer Verringerung um etwa 65 %. Ursache hierfür ist das beginnende Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode auf Höhe der Probenmittelebene (60 mm). Für die durchgeführten Versuche ist eine Abhängigkeit der maximalen axialen Temperaturdifferenzen von den

Prozessparametern festzustellen. Eine Reduzierung lässt sich durch eine zunehmende Ultraschallamplitude und eine zunehmende Größe der schallabgebenden Fläche realisieren.

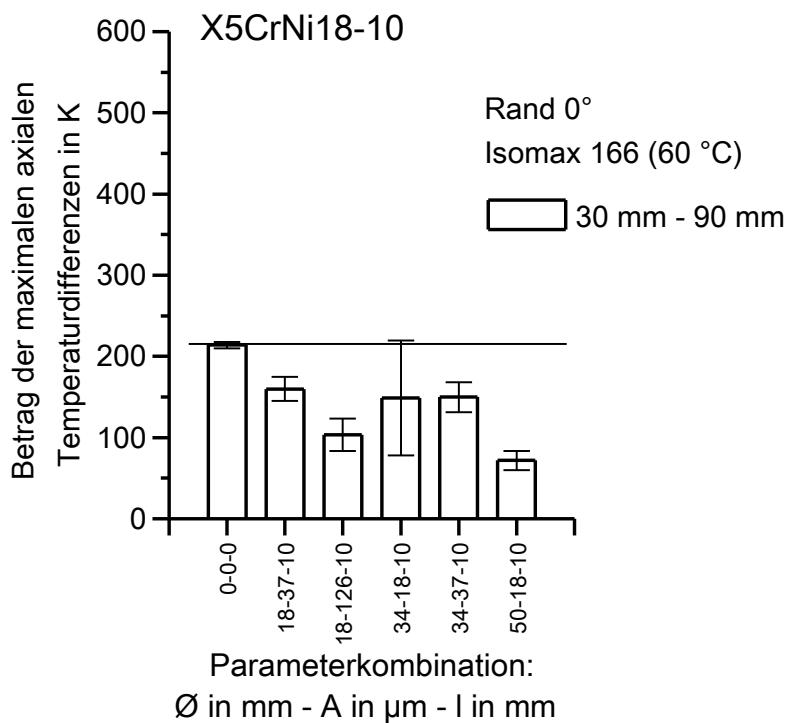


Abbildung 92: Betrag der maximalen axialen Temperaturdifferenzen (Rand 0°) der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.

4.4.3 Charakterisierung der Eigenschaften

An Proben aus X5CrNi18-10, die mehrfach unter zweiseitiger Ultraschallunterstützung in Öl bei einer Badtemperatur von 60 °C abgeschreckt wurden, erfolgten Rissprüfungen. Dabei konnten keine Risse oder Defekte festgestellt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die zweiseitige ultraschallunterstützte Ölabschreckung in Bezug auf Rissbildung für den austenitischen Stahl X5CrNi18-10 unter Berücksichtigung der Abschreckparameter und der untersuchten Probengeometrie unkritisch ist.

4.5 Ergebnisse am Werkstoff C45E

Die ultraschallunterstützten Abschreckexperimente von C45E wurden unter zweiseitiger Beschallung und mit einem Abstand zwischen Sonotroden und Probenoberfläche von 10 mm durchgeführt.

4.5.1 Wasserabschreckung

Bei den Abschreckexperimenten der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Zylindern aus C45E wurden folgende Prozessparameter kombiniert (Tabelle 18):

Tabelle 18: Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von C45E.

Versuchsreihe: C45E 2S ($l = 10 \text{ mm}$) Wasser				
Sonotrode: Durchmesser in mm	Wassertemperatur in °C	Amplitude in μm		
		18	37	126
18	60		x	
	85		x	x
34	60	x		
	85	x	x	
50	60	x		
	85	x		

Der Einfluss der zweiseitigen Ultraschallunterstützung auf die Wasserabschreckung bei 60 °C und 85 °C von C45E ist in Abbildung 93 zusammenfassend anhand normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} dargestellt. Bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung des Vergütungsstahls lassen sich für das durchgeführte Versuchsprogramm normierte Abschreckfaktoren von etwa $1,3 \leq f_{t_n}(C45E, 2S, \text{Wasser}) \leq 9,9$ erzielen. Der maximale normierte Abschreckfaktor f_{t_n} wird dabei bei maximaler Ultraschallamplitude von 126 μm bei einer Wassertemperatur von 85 °C erreicht. Bei 60 °C beträgt der maximale normierte Abschreckfaktor f_{t_n} des Versuchsprogramms etwa 7,1 ($\varnothing 18 \text{ mm}, A = 37 \mu\text{m}$). Bis auf eine Ausnahme lässt sich der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche, abnehmender Wassertemperatur sowie mit zunehmender Ultraschallamplitude erhöhen. Diese Ausnahme betrifft die ultraschallunterstützte Abschreckung unter

Nutzung der Sonotrode mit einem Durchmesser der Abschallfläche von 50 mm, wie auch bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Abschreckung der anderen Werkstoffe beobachtet werden konnte. Bei einer Ultraschallamplitude von 18 µm ist der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} bei der 34 mm-Sonotrode mit 1,31 geringfügig größer als der der 50 mm-Sonotrode mit 1,27. Beide Werte weichen weniger als 5 % voneinander ab und liegen damit innerhalb der Fehlertoleranz (siehe Kapitel 3.2.5).

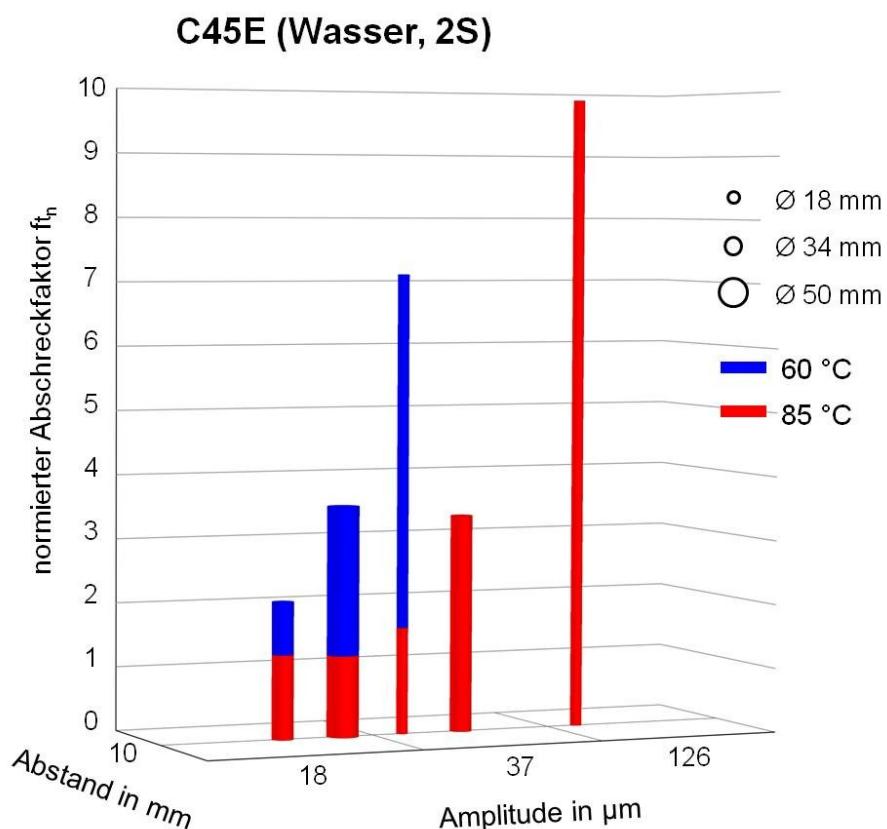


Abbildung 93: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von C45E.

Anhand metallographischer Untersuchungen und Härteprüfungen wurde festgestellt, dass bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung der untersuchten Parameterkombinationen nur eine Variante zu einer partiellen martensitischen Härtung der zylindrische Probe führt:

- $\varnothing 18 \text{ mm}, A = 37 \mu\text{m}, I = 10 \text{ mm}, 60^\circ\text{C}$.

Dies bestätigt sich durch die Darstellung des gemessenen Abkühlverlaufs dieser ultraschallunterstützten Abschreckvariante in einem kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm des Stahls C45 (Abbildung 94). Die randnahe Abkühlung ist so schnell, dass sich hier ein weitestgehend martensitisches Gefüge einstellen sollte.

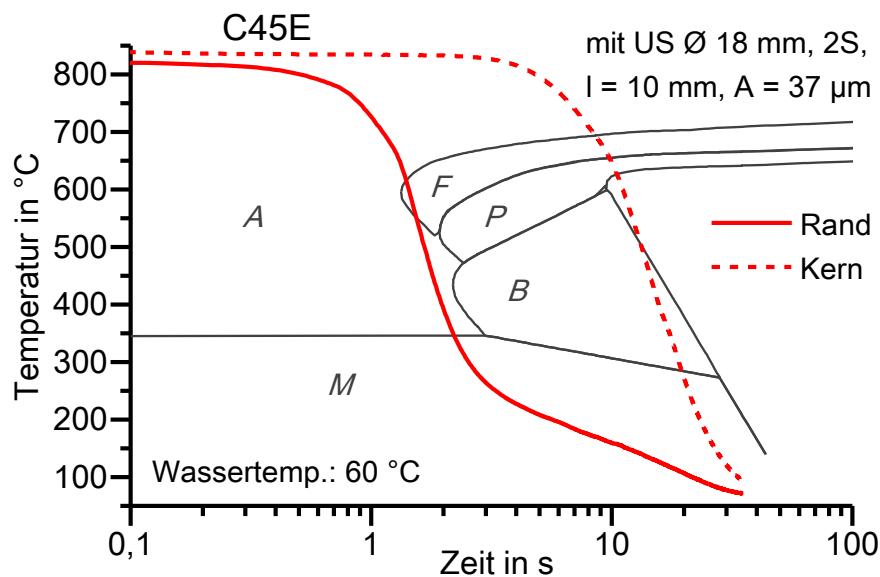


Abbildung 94: Abkühlverlauf einer zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 37 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 60°C) im ZTU-Diagramm von C45E in Anlehnung an [82].

Obwohl sich bei der Variante ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 126 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 85°C) mit 9,9 ein noch deutlich größerer normierter Abschreckfaktor f_{t_n} als bei o.g. Abschreckvariante mit 7,1 erzielen lässt (Abbildung 93), gelingt es nicht, auch diese Probe partiell martensitisch zu härten. Ursache hierfür ist, dass schon die konventionelle Abschreckung bei 85°C sehr langsam ist. Die Beeinflussung auf die Abschreckwirkung durch Ultraschall ist zwar groß, sie reicht jedoch nicht aus, um eine martensitische Härtung hervorzurufen.

In Abbildung 95 ist der Vergleich lichtmikroskopischer Aufnahmen der Probenmittelebene nach konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 37 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 60°C) dargestellt. Infolge der Ultraschallunterstützung kommt es verglichen zur konventionellen Wasserabschreckung zu einer deutlichen Ausbildung einer Randhärtungszone, wie die lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme erkennen lässt. Anhand der zugehörigen Detailaufnahme des Gefüges zeigt sich die deutliche Zunahme festigkeitssteigernder Phasenanteile. Bei der mit Ultraschallunterstützung abgeschreckten Probe lässt sich der Rand partiell martensitisch härteten, während nach konventioneller Abschreckung ein Mischgefüge aus Ferrit, Perlit und Bainit vorliegt.

Wasser, T = 60 °C, Probenmittelebene, Rand 0°

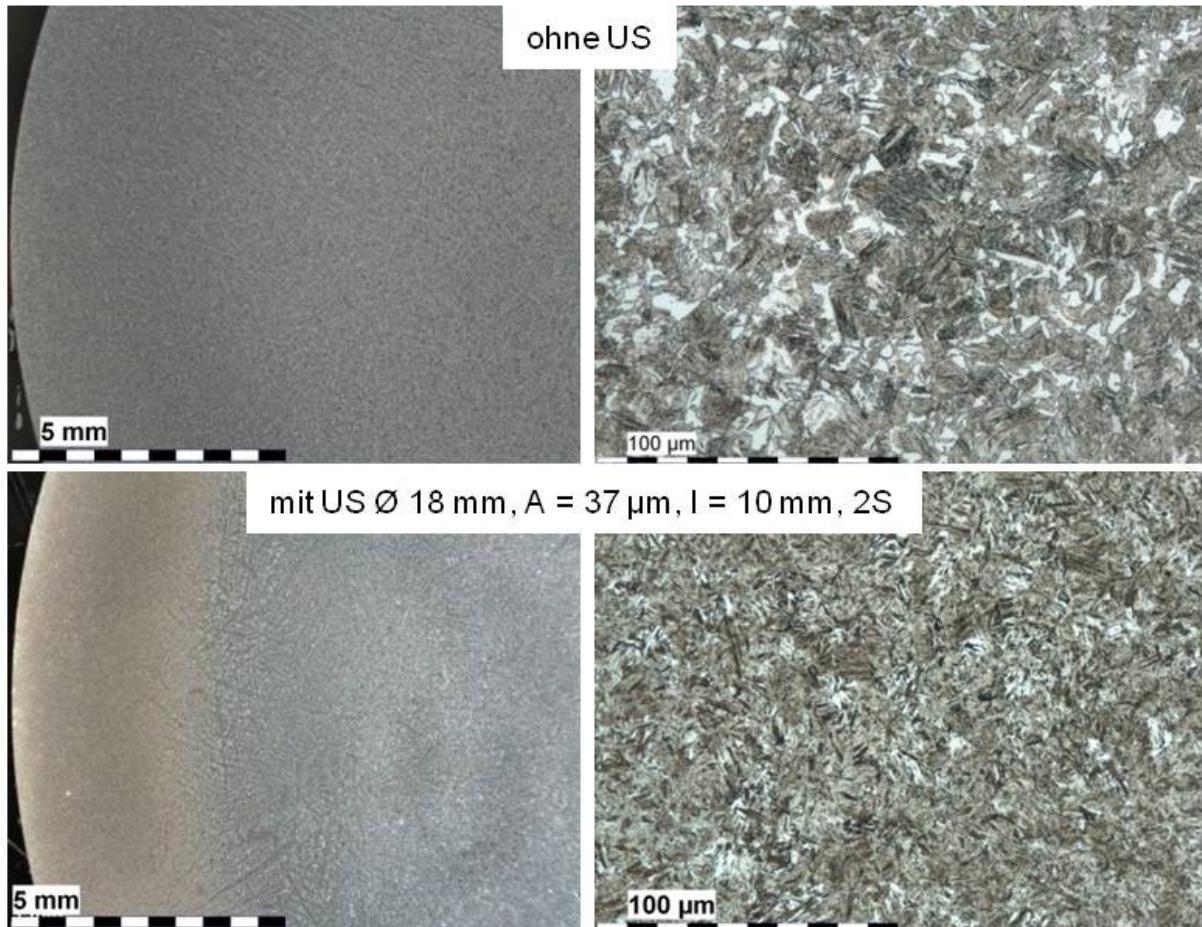


Abbildung 95: Randgefüge von C45E nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 37 µm) im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 96 sind die zugehörigen, resultierenden radialen Härteverläufe dargestellt. Über einen Bereich des Radius` von 0 mm bis 9 mm unterscheiden sich die nach konventioneller und ultraschallunterstützter Wasserabschreckung erzielten Härteverläufe nur wenig (einige 10 HV10) voneinander. Im Randbereich zwischen 9 mm und 14,5 mm zeigt sich hingegen ein enormer Unterschied der Härteverläufe. Nach konventioneller Abschreckung lässt sich am Probenrand eine Härte von etwa 375 HV10 einstellen. Bei Ultraschallunterstützung entspricht diese Randhärte ca. 750 HV10. Im Vergleich zu der nach konventioneller Abschreckung erzielten Randhärte führt die Ultraschallunterstützung in diesem Fall zu einer Steigerung um 100 %. Die detaillierten Härtetiefenverläufe (HV1), die für den Bereich des Probenradius` zwischen 9 mm und 14,5 mm aufgenommen wurden, lassen zudem erkennen, dass die partielle martensitische Härtung am Probenrand eine Tiefe von mindestens 1 mm besitzt.

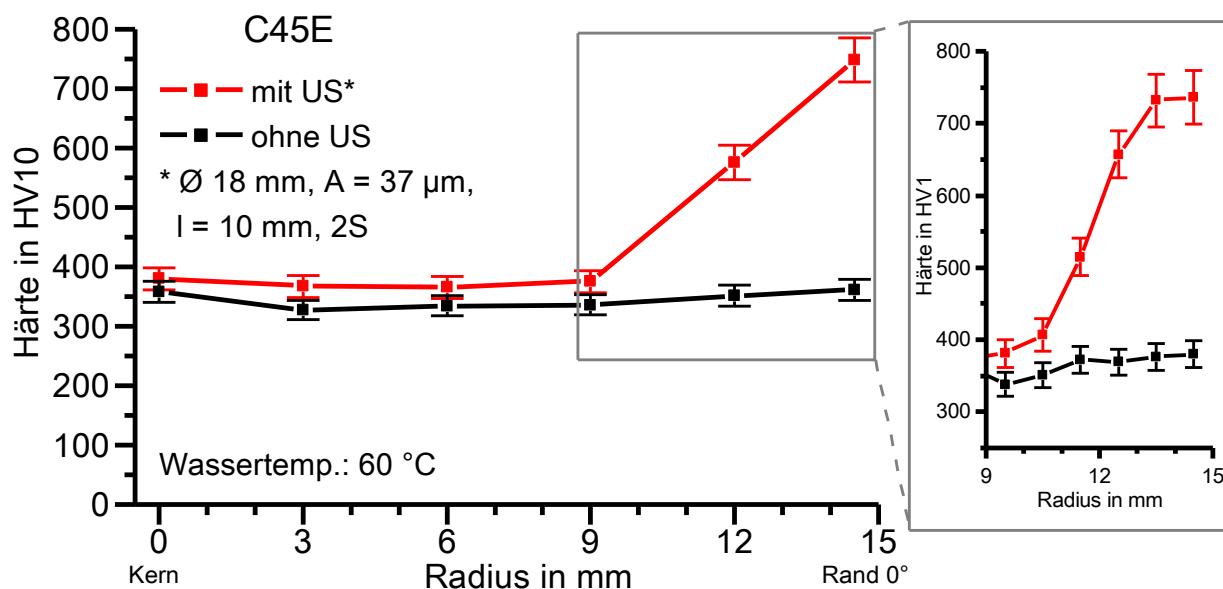


Abbildung 96: Resultierende radiale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 37 \mu\text{m}$) und konventioneller Wasserabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60°C .

Die zugehörigen tangentialen Randhärteverläufe bei einem Radius von 14,5 mm sind in der folgenden Abbildung 97 für einen Winkelbereich von 0° bis 90° dargestellt.

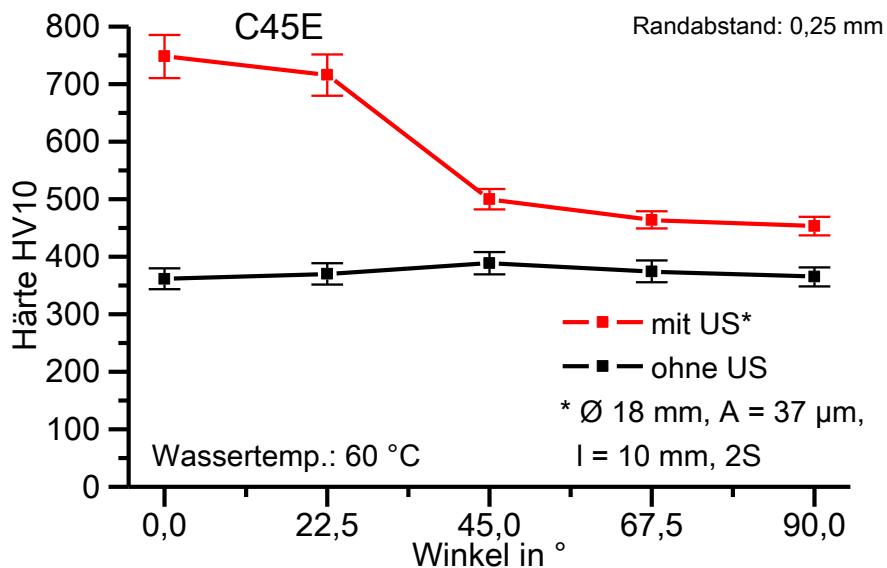


Abbildung 97: Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 37 \mu\text{m}$) und konventioneller Wasserabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60°C .

Der nach konventioneller Wasserabschreckung bei 60°C erzielte Härteverlauf entlang des Probenrandumfangs ist mit etwa 375 HV10 erwartungsgemäß nahezu konstant. Die nach ultraschallunterstützter Abschreckung erzielte Randhärte liegt zum Teil deutlich oberhalb der konventionellen Abschreckung. Nach ultraschallunterstützter Abschreckung lässt sich zudem eine enorme Abnahme der Randhärte mit zunehmendem Umfangswinkel bis 90° auf ca. 450 HV10 beobachten. Dies entspricht

einer Abnahme von etwa 60 %. Durch den im Verhältnis zum Probendurchmesser relativ kleinen Durchmesser der Sonotrodenstirnfläche lässt sich entlang des Probenumfangs ein deutlicher Härtegradient einstellen und eine lokale martensitische Härtung in einem Winkelbereich von mindestens 22,5° erzielen.

Die zur Temperaturmessung dienenden, mit zweiseitiger Ultraschallunterstützung in Wasser abgeschreckten Proben des Stahls C45E wurden, wie auch die Temperaturmessproben der anderen Werkstoffe, auf Risse und Defekte geprüft. Die geprüften Proben wurden mehrfach bei Badtemperaturen von 60 °C und 85 °C abgeschreckt. Bei der Prüfung nach Wirbelstrom- und Farbeindringverfahren konnten auch bei diesen Proben keine Anzeichen auf Risse oder Defekte festgestellt werden. In Bezug auf Rissbildung ist die zweiseitig ultraschallunterstützte Wasserabschreckung von C45E für die untersuchten Abschreckparameter und Probengeometrie daher als unkritisch anzusehen.

4.5.2 Ölabschreckung

Die durchgeführten Abschreckexperimente der ultraschallunterstützten Ölabschreckung von Zylindern aus C45E beinhalten folgende Kombinationen von Prozessparametern (Tabelle 19):

Tabelle 19: Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von C45E.

Versuchsreihe: C45E 2S ($l = 10 \text{ mm}$) Isomax 166 (60 °C)			
Sonotrode: Durchmesser in mm	Amplitude in μm		
	18	37	126
18		x	x
34	x	x	
50	x		

In Abbildung 98 ist der Einfluss der zweiseitigen Ultraschallunterstützung auf die Ölabschreckung von C45E bei 60 °C zusammenfassend anhand normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} wiedergegeben.

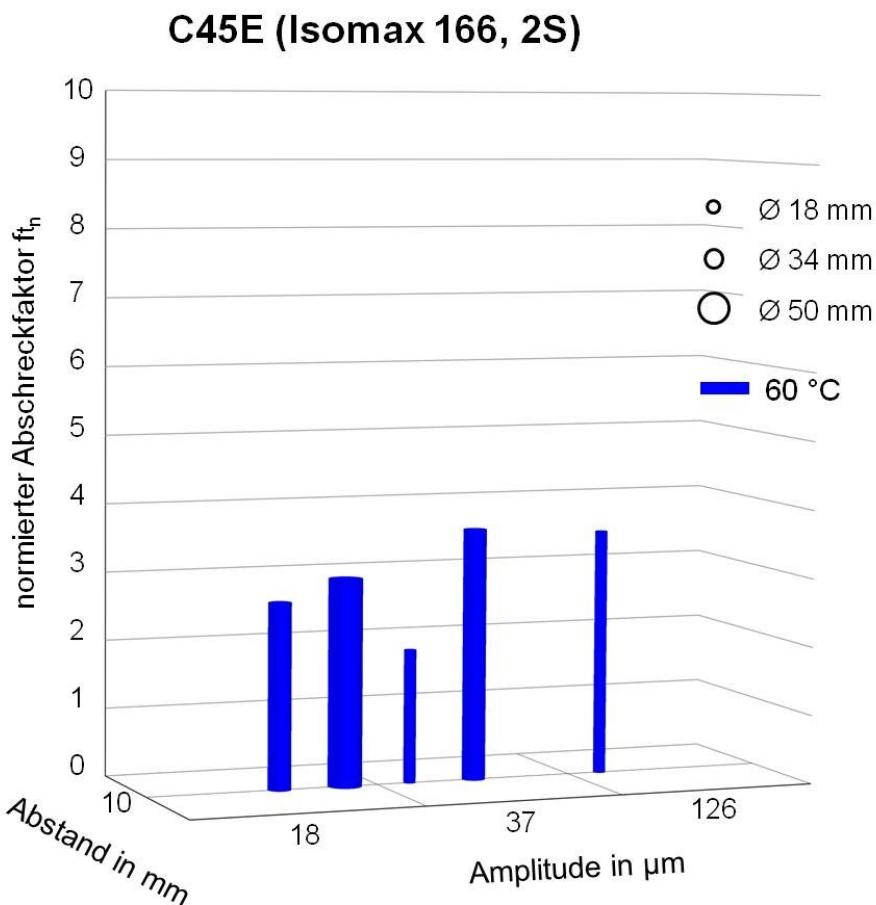


Abbildung 98: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von C45E.

Bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung des Vergütungsstahls lassen sich für das durchgeführte Versuchsprogramm normierte Abschreckfaktoren von etwa $2 \leq f_{t_n}(\text{C45E}, 2\text{S}, \text{Öl}) \leq 3,7$ erzielen. Im Vergleich zur Wasserabschreckung sind diese hier bei gleicher Badtemperatur kleiner. Mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche sowie mit zunehmender Ultraschallamplitude steigen die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} . Im Gegensatz zur Wasserabschreckung lassen sich hier (unter Berücksichtigung des angenommenen Fehlers von $\pm 5\%$, wie in Kapitel 3.2.5 beschrieben) zwei maximale normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} beobachten. Diese haben einen Wert von etwa 3,7 und werden bei den Prozessparametern 126 µm bei $\varnothing 18 \text{ mm}$ und 37 µm bei $\varnothing 34 \text{ mm}$ erzielt.

Mittels metallographischer Untersuchungen und Härteprüfungen wurde festgestellt, dass die zweiseitig ultraschallunterstützte Ölabschreckung folgender Varianten zu einer partiellen martensitischen Härtung der zylindrischen Proben führt:

- $\varnothing 34 \text{ mm}, A = 37 \mu\text{m}, l = 10 \text{ mm}, 60^\circ\text{C}$ und
- $\varnothing 18 \text{ mm}, A = 126 \mu\text{m}, l = 10 \text{ mm}, 60^\circ\text{C}$.

Diese beiden Varianten entsprechen denen mit den größten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} dieses Versuchsprogramms.

Abbildung 99 zeigt einen Vergleich lichtmikroskopischer Aufnahmen der Probenmittelebene nach konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung der Abschreckvariante $\varnothing 34 \text{ mm} / A = 37 \mu\text{m}$. Infolge der Ultraschallunterstützung kommt es verglichen zur konventionellen Ölabschreckung zu einer Zunahme von festigkeitssteigernden Phasenanteilen und der Tiefe der zugehörigen Bereiche. Dabei lässt sich eine partielle martensitische Härtung des Randbereiches erzielen.

Isomax 166, T = 60 °C, Probenmittelebene, Rand 0°

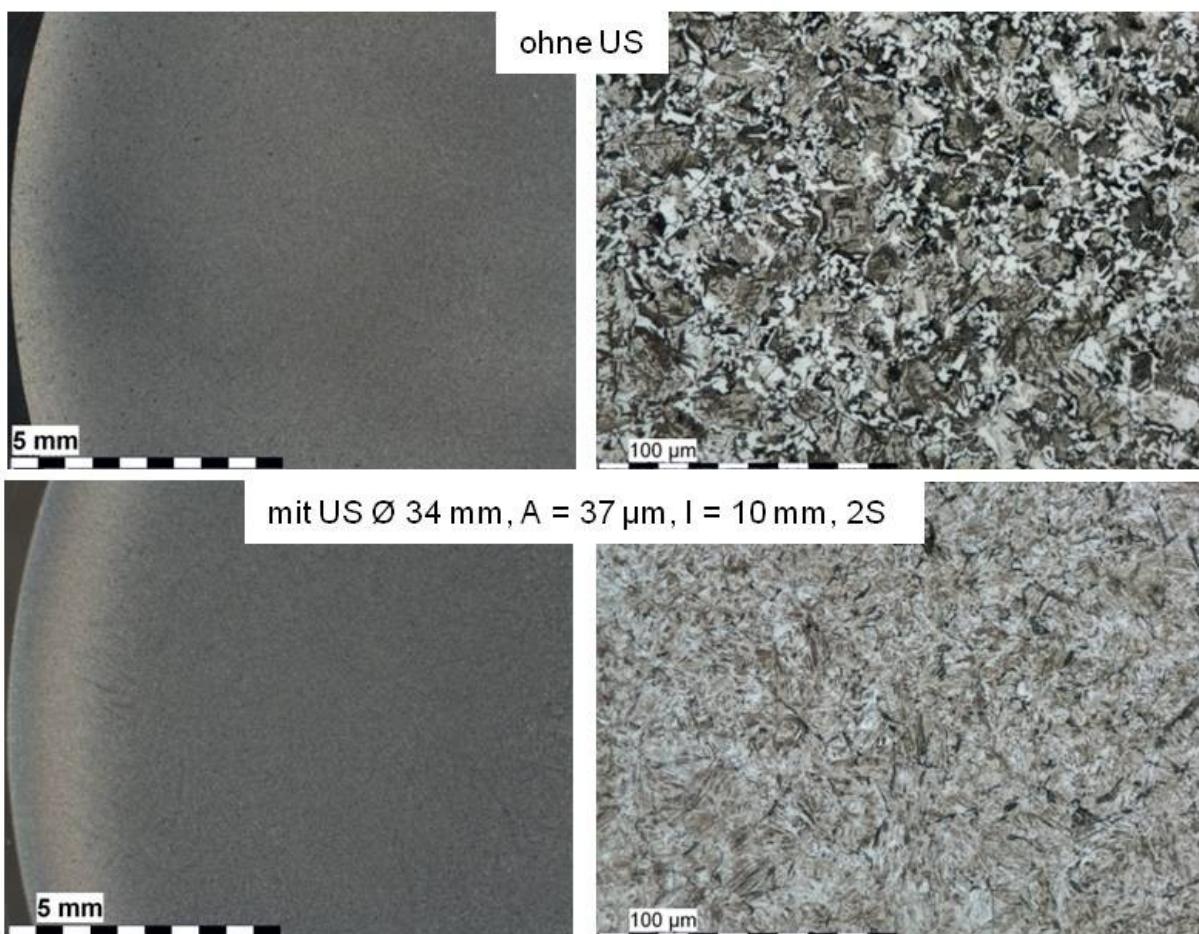


Abbildung 99: Randgefüge nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($A = 37 \mu\text{m}$) im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung bei 60 °C von Zylindern aus C45E.

In Abbildung 100 sind die zugehörigen, resultierenden radialen Härteverläufe dargestellt. Beim Vergleich der nach konventioneller und ultraschallunterstützter Ölabschreckung erzielten radialen Härteverläufe fällt auf, dass sich diese über einen großen Bereich des Radius' nur wenig (einige 10 HV10) voneinander unterscheiden. Im Randbereich zwischen 12 mm und 14,5 mm zeigt sich hingegen ein enormer

Unterschied der Härteverläufe. Bei der konventionellen Abschreckung weist der Probenrand eine Härte von etwa 330 HV10 auf. Bei Ultraschallunterstützung beträgt die Randhärte etwa 670 HV10. Durch die Ultraschallunterstützung lässt sich die nach konventioneller Abschreckung erzielte Randhärte somit um über 100 % steigern. Die detaillierten Härtetiefenverläufe (HV1), die für den Bereich des Probenradius` zwischen 12 mm und 14,5 mm aufgenommen wurden, spiegeln dieses Ergebnis wider und zeigen, dass die Tiefe der martensitischen Randhärtezone kleiner als 1 mm ist. Die maximal erzielte Randhärte nach ultraschallunterstützter Abschreckung beträgt 721 HV1.

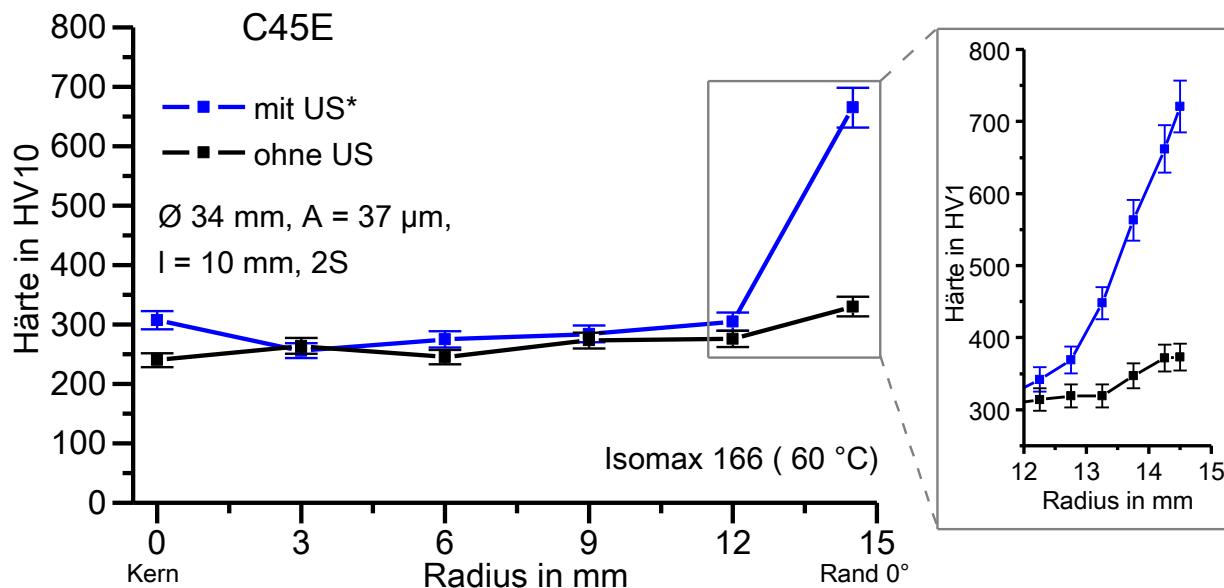


Abbildung 100: Resultierende radiale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($A = 37 \mu\text{m}$) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60°C .

Dieses Ergebnis wird durch die Darstellung des gemessenen Abkühlverlaufs der ultraschallunterstützten Abschreckvariante im kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm des Stahls bestätigt (Abbildung 101). Der randnah aufgenommene Abkühlverlauf liegt nur geringfügig unterhalb der kritischen Abkühlgeschwindigkeit. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Umwandlungsverhalten mit dem ZTU-Diagramm nach HOUGARDY [82] aufgrund einer abweichenden chemischen Zusammensetzung nur näherungsweise auf die hier untersuchte Charge von C45E zu übertragen ist.

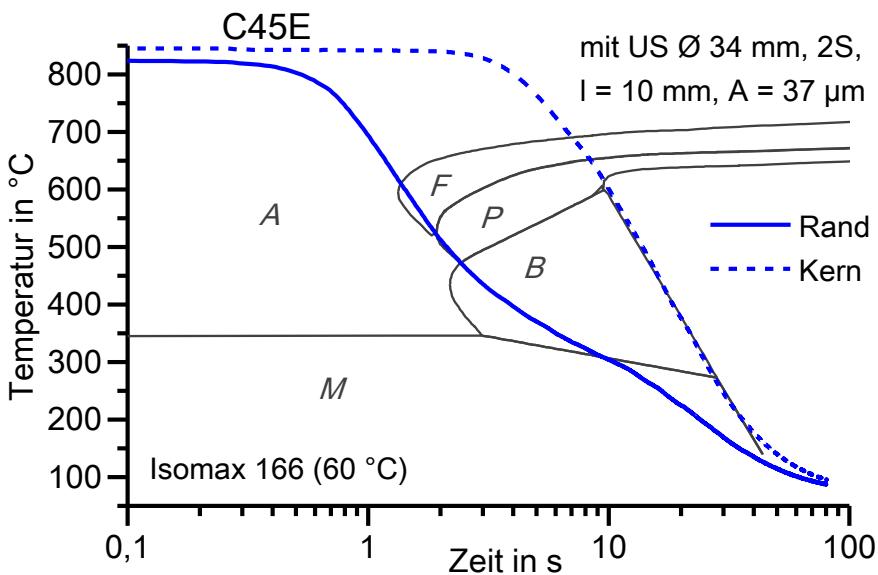


Abbildung 101: Abkühlverlauf einer zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung ($\varnothing 34 \text{ mm}$, $A = 37 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 60°C) im ZTU-Diagramm von C45E in Anlehnung an [82].

Die zugehörigen tangentialen Randhärteverläufe bei einem Radius von 14,5 mm sind in der folgenden Abbildung 102 für einen Winkelbereich von 0° bis 90° dargestellt. Der nach konventioneller Ölabschreckung erzielte Härteverlauf entlang des Probenrandumfangs ist mit etwa 320 HV10 erwartungsgemäß nahezu konstant. Nach ultraschallunterstützter Abschreckung lässt sich ausgehend von etwa 670 HV10 (bei 0°) eine Abnahme der Randhärte mit zunehmendem Umfangswinkel bis 90° beobachten. Diese Abnahme entlang des Winkelbereichs von 90° beträgt etwa 120 HV10. Dies entspricht einer Abnahme von etwa 18 % bezogen auf die Randhärte bei 0° .

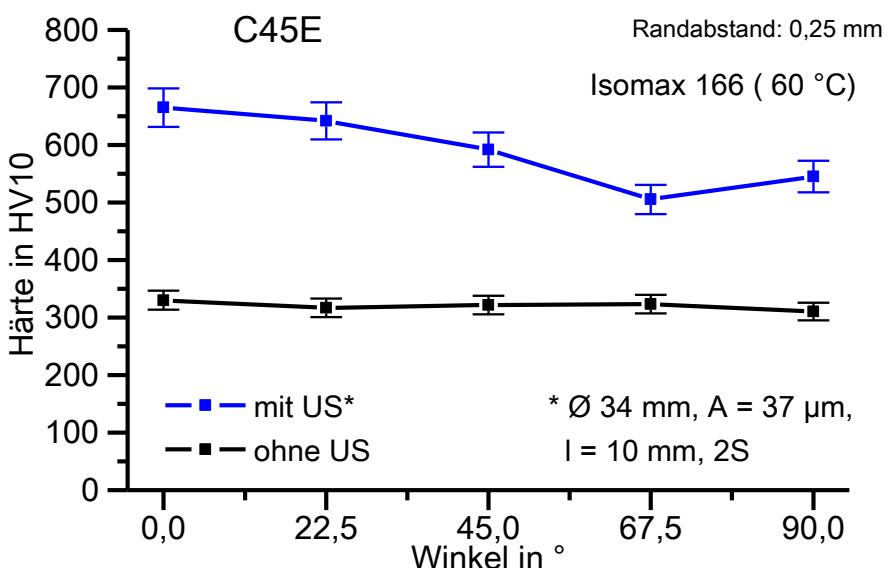


Abbildung 102: Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (A = 37 μm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.

In Abbildung 103 sind lichtmikroskopische Aufnahmen der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung der Abschreckvariante $\varnothing 18 \text{ mm} / A = 126 \mu\text{m}$ dargestellt. Auch mit der größten Ultraschallamplitude des Versuchsprogramms lässt sich eine partielle martensitische Umwandlung im Randbereich der Probe erzielen.

mit US $\varnothing 18 \text{ mm}$, $I = 10 \text{ mm}$, 2S, Isomax 166, $T = 60^\circ\text{C}$, Probenmittelebene, Rand 0°

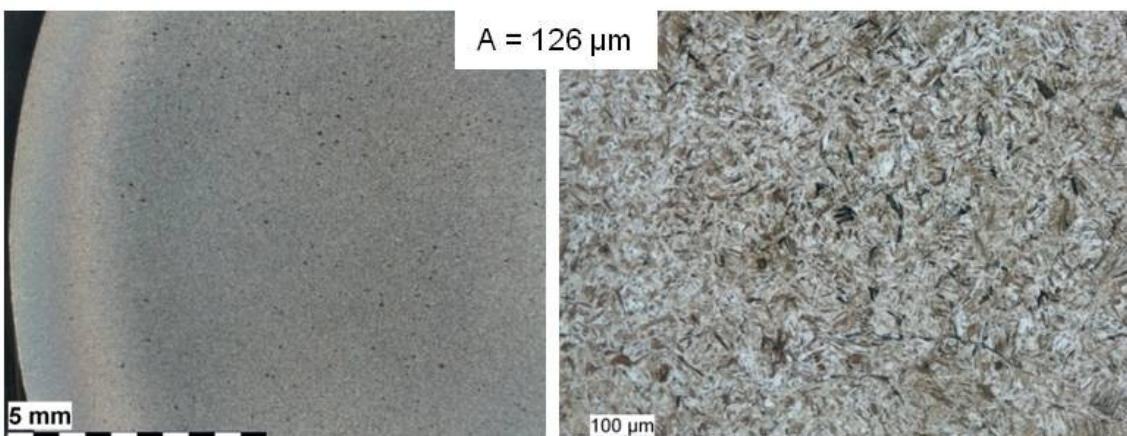


Abbildung 103: Partielle martensitische Härtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung mit einer Amplitude von $126 \mu\text{m}$ ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $I = 10 \text{ mm}$) von Zylindern aus C45E bei 60°C .

In Abbildung 104 sind die resultierenden radialen Härteverläufe nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung dieser Variante im Vergleich zur konventionellen Abschreckung im Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 dargestellt. Bei der größten Ultraschallamplitude des Versuchsprogramms zeigt sich, dass sich der radiale Härteverlauf nach ultraschallunterstützter Abschreckung über einen großen Bereich des Radius' nur wenig (einige 10 HV10) von dem der konventionellen Abschreckung unterscheidet. Im Randbereich zwischen 12 mm und 14,5 mm ist jedoch ein deutlicher Härteanstieg verglichen zur konventionellen Abschreckung zu verzeichnen. Bei einem Randabstand von 0,25 mm lässt sich durch Ultraschallunterstützung eine Härte von circa 660 HV10 erreichen. Die randnähere HV1-Härteprüfung zeigt eine Maximalhärte am Rand von etwa 720 HV1. Anhand des detaillierteren HV1-Härteverlauf-Ausschnitts ist zudem erkennbar, dass sich durch diese Variante der Ultraschallunterstützung eine gehärtete Randschicht von weniger als 1 mm einstellen lässt.

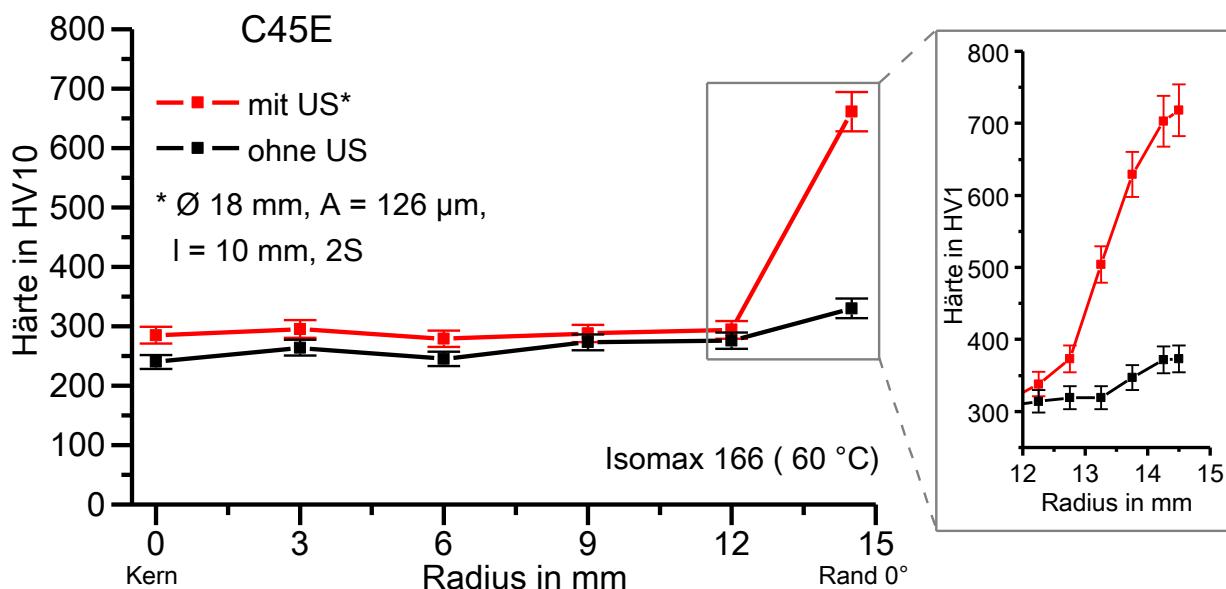


Abbildung 104: Resultierende radale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 126 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 2S) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60°C .

Auch dieses Ergebnis korreliert mit der Darstellung des gemessenen Abkühlverlaufs der ultraschallunterstützten Abschreckvariante im kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm des Stahls ähnlich Abbildung 101.

In Abbildung 105 ist der Vergleich der zugehörigen Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probe dargestellt.

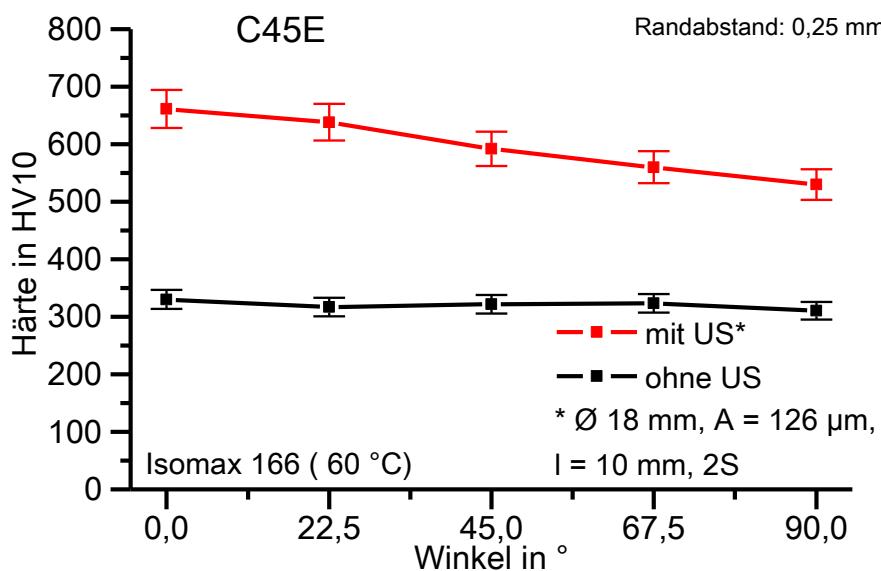


Abbildung 105: Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 126 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$, 2S) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60°C .

Während der nach konventioneller Abschreckung erzielte Randhärteverlauf erwartungsgemäß nahezu konstant (320 HV10) verläuft, führt die ultraschallunterstützte Abschreckung zu einer Randhärteabnahme entlang des Probenumfangs. Über einen

Winkelbereich von 90° kommt es im dargestellten Beispiel ausgehend von etwa 660 HV10 zu einer Abnahme der Randhärte von 130 HV10. Dies entspricht einer Randhärteabnahme, bezogen auf die Randhärte bei 0°, von etwa 20 %.

In Abbildung 106 ist der axiale Gefügevergleich für die konventionelle und ultraschallunterstützte Ölabschreckung der Abschreckvariante $\varnothing 18 \text{ mm} / A = 126 \mu\text{m}$ dargestellt.

ohne US, Isomax 166, T = 60 °C, Rand 0° mit US $\varnothing 18 \text{ mm}, A = 126 \mu\text{m}, I = 10 \text{ mm}, 2S$, Isomax 166, T = 60 °C, Rand 0°

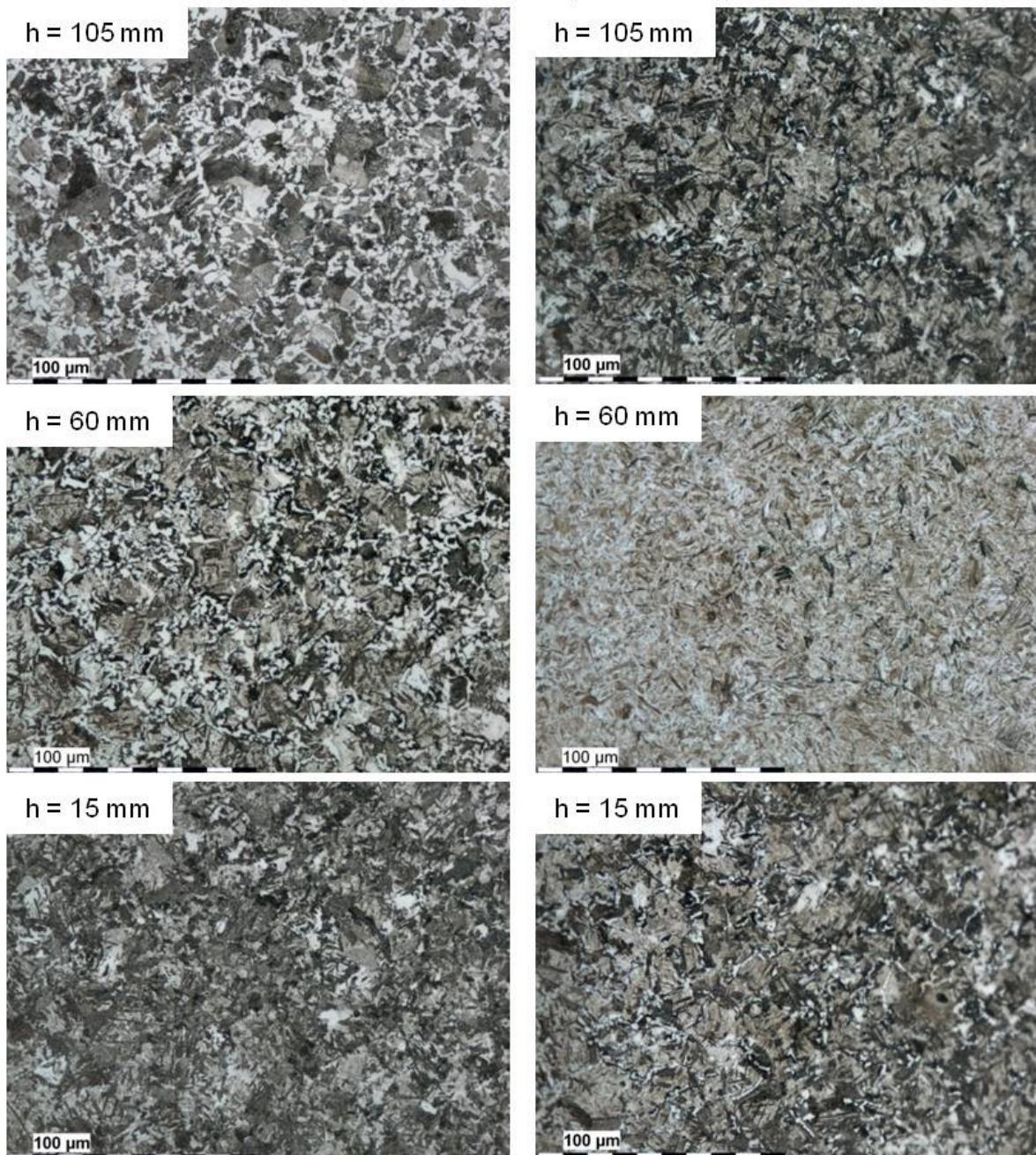


Abbildung 106: Randgefüge in axialer Richtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}, A = 126 \mu\text{m}, I = 10 \text{ mm}$) im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von Zylindern aus C45E im bei 60 °C.

Hier lässt sich ein deutlicher Höheneinfluss bei der konventionellen Abschreckung beobachten. Das axiale Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Stirnfläche zeigt sich deutlich anhand der resultierenden Randgefüge. Mit zunehmendem Abstand zur unteren Stirnfläche h kommt es zu einer Zunahme von ferritischen Gefügeanteilen.

Die Ultraschallunterstützung während der Ölabschreckung führt zu einer gleichmäßigeren Abschreckung in axialer Richtung, was anhand der bei 15 mm und 105 mm resultierenden Gefüge deutlich wird. Diese unterscheiden sich im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung nur geringfügig voneinander. Durch die lokale Beschallung auf Höhe der Probenmittelebene kommt es hier zu einer noch schnelleren Abkühlung, was mit der Entstehung eines martensitischen Gefüges einhergeht.

Abbildung 107 zeigt den zugehörigen Vergleich beider axialer Randhärteverläufe nach konventioneller und zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung von C45E im Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 bei 60 °C.

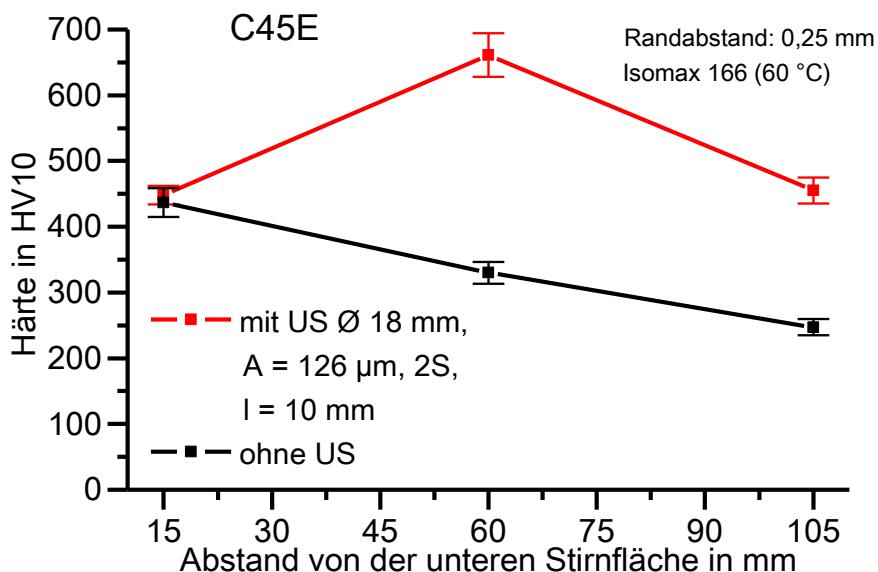


Abbildung 107: Resultierende Randhärteverläufe in axialer Richtung der Probe nach zweiseitig ultraschallunterstützter ($\varnothing 18 \text{ mm}$, $A = 126 \mu\text{m}$, $I = 10 \text{ mm}$) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.

Der axiale Randhärteverlauf der konventionellen Abschreckung spiegelt, wie schon die zugehörigen Gefügeaufnahmen, das Wandern der Benetzungsfront von der unteren zur oberen Stirnfläche wider. Mit zunehmendem Abstand von der unteren Stirnfläche sinkt die Härte. Die resultierende Randhärtedifferenz zwischen unterem (15 mm) und oberen (105 mm) Probenbereich beträgt etwa 190 HV10. Der axiale Randhärteverlauf der ultraschallunterstützten Abschreckung unterscheidet sich grundlegend von dem der konventionellen Abschreckung. In der Probenmittelebene (60 mm) wird die maximale

Randhärte von etwa 660 HV10 erzielt. Die bei 15 mm und 105 mm ermittelte Randhärte ist etwa gleich und beträgt etwa 450 HV10. In der Probenmittelebene lässt sich die Randhärte durch Ultraschallunterstützung verglichen zur konventionellen Abschreckung um 100 % steigern.

An den in Öl abgeschreckten C45E-Proben, die zur Temperaturmessung genutzt wurden, erfolgte ebenfalls eine Rissprüfung nach Wirbelstrom- und Farbeindringverfahren. Die untersuchten Proben wurden zuvor mehrfach bei einer Badtemperatur von 60 °C mit und ohne Ultraschallunterstützung abgeschreckt. Bei der Prüfung wurden auch bei diesen Proben keine Riss- oder Defektanzeichen festgestellt. Daher ist davon auszugehen, dass für die untersuchte Probengeometrie von C45E und die Prozessparameter die ultraschallunterstützte Ölabschreckung in Bezug auf Rissbildung unkritisch ist.

Damit ist der Nachweis erbracht, dass die ultraschallunterstützte Flüssigkeitsabschreckung nicht nur zur Vergleichmäßigung und Beschleunigung der Abschreckung, sondern auch zu einer gezielten lokalen Härtung genutzt werden kann.

5 Simulation

5.1 Modellierung

Anhand des austenitischen Stahls X5CrNi18-10 wurde eine thermo-mechanische 3D-Simulation (mittels kommerzieller FE-Software *Sysweld® 2010 Version 12.0*) des Abschreckvorgangs mit einseitiger und zweiseitiger Ultraschallunterstützung durchgeführt, um zu prüfen, mit welcher Qualität sich die lokale ultraschallunterstützte Wasserabschreckung mittels Finiter-Elemente-Methode abbilden lässt. Ziel der Simulation ist es dabei, die entstehenden Eigenschaften und Verzüge abzubilden. Eine experimentelle Bestimmung von Eigenspannungen sowie Maß- und Formänderungen ist häufig nur lokal und temporal begrenzt möglich. Der große Vorteil einer realitätsnahen Wärmebehandlungssimulation ist hingegen die Möglichkeit, Eigenspannungen und Verzüge sowohl im gesamten Bauteil als auch über die gesamte Wärmebehandlungsdauer abbilden zu können.

Bei den ausgewählten simulierten Abschreckvarianten der einseitigen und zweiseitigen Ultraschallunterstützung handelt es sich um folgende Parameterkombinationen:

- 1S: mit US Ø 18 mm, A = 31 µm, l = 30 mm, Wasser 60 °C
- 2S: mit US Ø 18 mm, A = 37 µm, l = 30 mm, Wasser 60 °C

Für die thermo-mechanische Simulation wurde auf Grundlage des 2D-FE-Halbmodells (Abbildung 19) ein 3D-FE-Halbmodell mit einer Höhe von 120 mm und 28792 Knoten erzeugt, wie Abbildung 108 zeigt.

Zur Diskretisierung des Probenvolumens dienen 25920 Volumenelemente, zur Definition von Wärmeübergangsrandbedingungen 3744 Flächenelemente. Das 3D-FE-Halbmodell ist durch die festgelegten Verschiebungsrandbedingungen (Abbildung 108) so gelagert, dass keine Zwangskräfte in die Struktur eingebracht werden können.

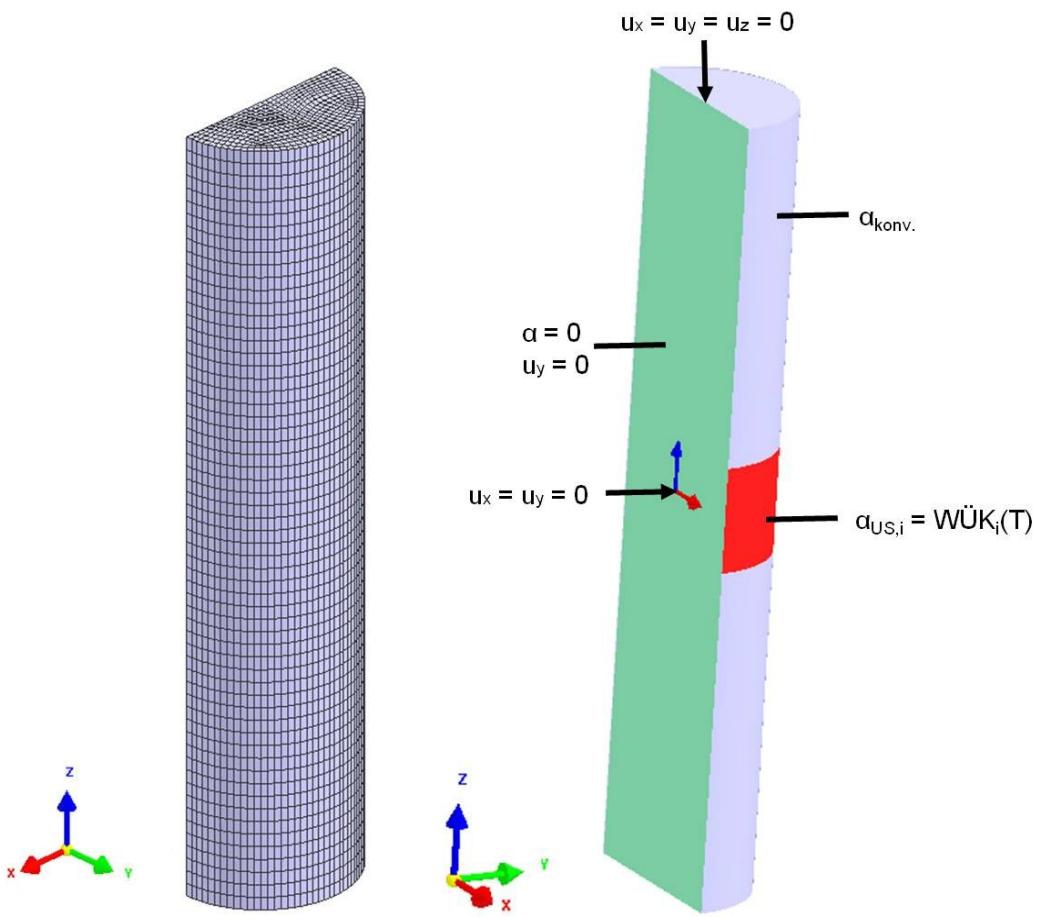


Abbildung 108: 3D-FE-Halbmodell zur thermo-mechanischen Simulation mit Verschiebungs- und Wärmeübergangsrandbedingungen.

Die Wärmeübergangsrandbedingungen wurden über eine lokale Verteilung der WÜK in das FE-Modell implementiert. Dabei wurden grundlegend drei Bereiche der Modelloberfläche unterschieden: die Symmetriefläche (in Abbildung 108 grün), die Stirnflächen und der Teil der Mantelfläche, der nicht im direkten Einflussbereich des Ultraschalls liegt (in Abbildung 108 grau), sowie der restliche Bereich der Mantelfläche, der unmittelbar durch die Ultraschallunterstützung beeinflusst wird (in Abbildung 108 rot). Die Symmetriefläche wird als isoliert angenommen. Hier findet kein Wärmeübergang statt. Im mittleren Bereich der Mantelfläche, mit einer Höhe des entsprechenden Sonotrodenstirnflächendurchmessers von 18 mm, wurde entlang des Modellumfangs eine abschnittsweise Definition der mittels FDM berechneten WÜK-Temperatur-Kurven bei Ultraschallunterstützung folgendermaßen festgelegt: für $WÜK_1(T) \quad 0^\circ\text{-}22,5^\circ$; $WÜK_2(T) \quad 22,5^\circ\text{-}67,5^\circ$; $WÜK_3(T) \quad 67,5^\circ\text{-}112,5^\circ$; $WÜK_4(T) \quad 112,5^\circ\text{-}157,5^\circ$; $WÜK_5(T) \quad 157,5^\circ\text{-}180^\circ$. Für den restlichen Bereich der Mantelfläche und die beiden Stirnflächen wurde ein mittels FDM berechneter WÜK-Temperatur-Verlauf, der für die konventionelle Abschreckung bei der entsprechenden Wassertemperatur ermittelt wurde, angenommen. Die entsprechenden Verläufe der $WÜK_i(T)$ im

Beschallungsbereich der Probe für die ausgewählte Abschreckvariante sind in Abbildung 66 und Abbildung 80 dargestellt. Der WÜK-Temperatur-Verlauf der konventionellen Abschreckung des X5CrNi18-10-Zylinders bei einer Wassertemperatur von 60 °C wird in Abbildung 63 gezeigt.

Zur Verifizierung der Simulation wurde vor der Auswertung der Eigenspannungen und Verzüge und dem Vergleich mit den experimentell gewonnenen Ergebnissen zunächst die Temperaturverteilungsentwicklung überprüft. Dafür wurden insbesondere die simulierten und gemessenen Abkühlverläufe an den charakteristischen Positionen verglichen.

5.2 Ergebnisse der Simulation

5.2.1 Einseitige Ultraschallunterstützung

In Abbildung 109 werden die simulierten und gemessenen Abkühlverläufe der ausgewählten Variante der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C gegenübergestellt. Der dargestellte Vergleich zeigt, dass die simulierten Abkühlverläufe insgesamt gut mit den gemessenen übereinstimmen.

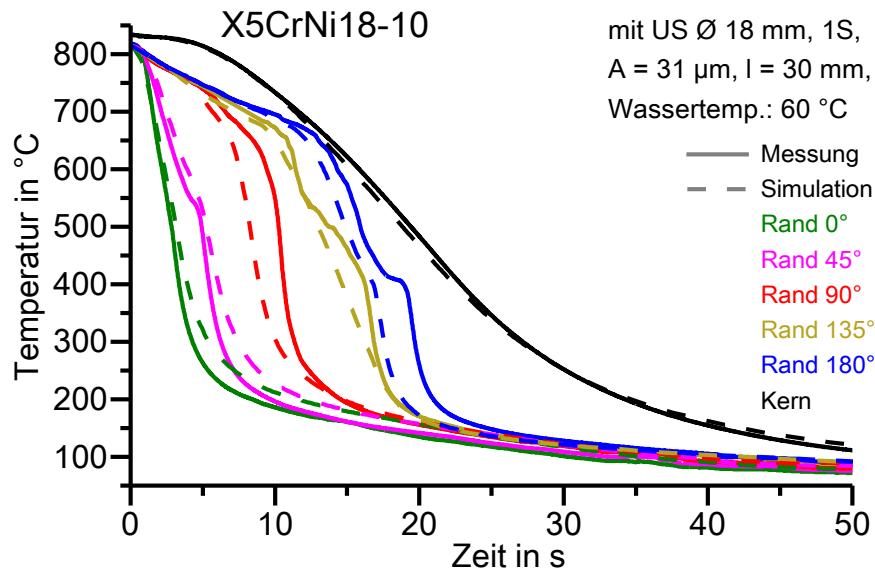


Abbildung 109: Vergleich simulerter und gemessener Abkühlverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 110 sind die zugehörigen simulierten und gemessenen Axialeigenspannungen entlang des halben Probenumfangs von 0° bis 180° auf Höhe der Probenmittelebene dargestellt. Am Probenrand liegen nach der Abschreckung erwartungsgemäß Druckeigenspannungen vor. Diese stimmen mit den experimentell

ermittelten Eigenspannungen sehr gut überein. Die simulierten Axialspannungen sind im Mittel nur etwa 25 MPa kleiner als die mittels Röntgendiffraktometrie bestimmten Spannungen. Diese sind unter Berücksichtigung der Standardabweichung nahezu unabhängig vom Umfangswinkel der Probe. Die simulierten Axialeigenspannungen weisen keine Abhängigkeit vom Umfangswinkel auf.

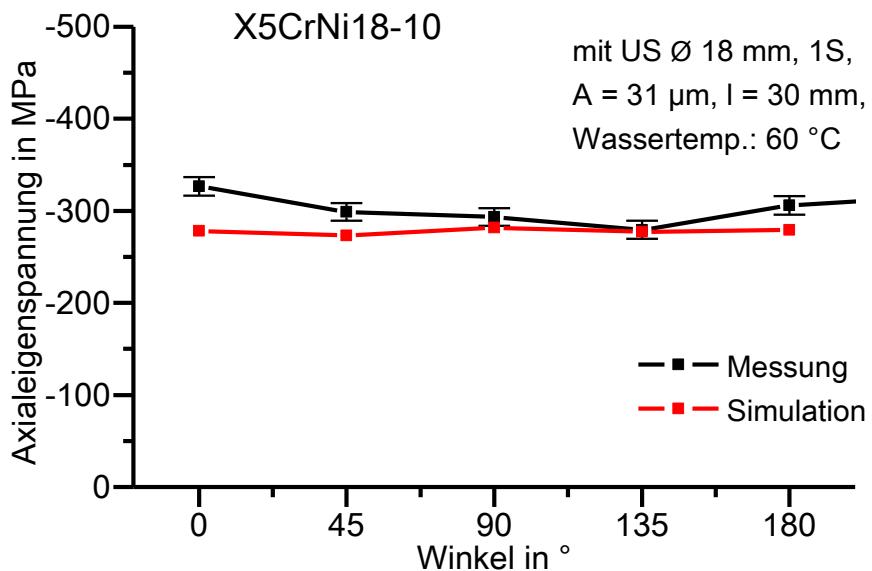


Abbildung 110: Vergleich simulierter und gemessener Axialeigenspannungsverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

Abbildung 111 stellt die simulierte Maß- und Formänderung der Probe in Beschallungsrichtung nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C dar. Zur Hervorhebung sind die resultierenden Verschiebungen unter 200facher Vergrößerung abgebildet. Die einseitige Beschallung führt zu einer Krümmung der Probe, die sich von der Sonotrode wegrichtet. Durch die beschleunigte Abkühlung vor der Sonotrode kommt es hier zunächst zu einer Verkürzung. Die Probe krümmt sich in Richtung der Sonotrode. Mit fortschreitender Abkühlung zieht sich dann die sonotrodenabgewandte Seite zusammen, so dass sich die Krümmungsrichtung umkehrt. Es resultiert eine sonotrodenabgewandte Krümmung, da die plastische Längung der sonotrodenzugewandten Seite bleibt. In Abbildung 112 ist dies anhand einer zeitlichen Abfolge des Verformungszustandes dargestellt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Skalierung der einzelnen Zustände angepasst wurde, um die dominierende thermische Ausdehnung in den Hintergrund zu rücken und den Fokus auf die Formänderung infolge der Ultraschallunterstützung zu legen.

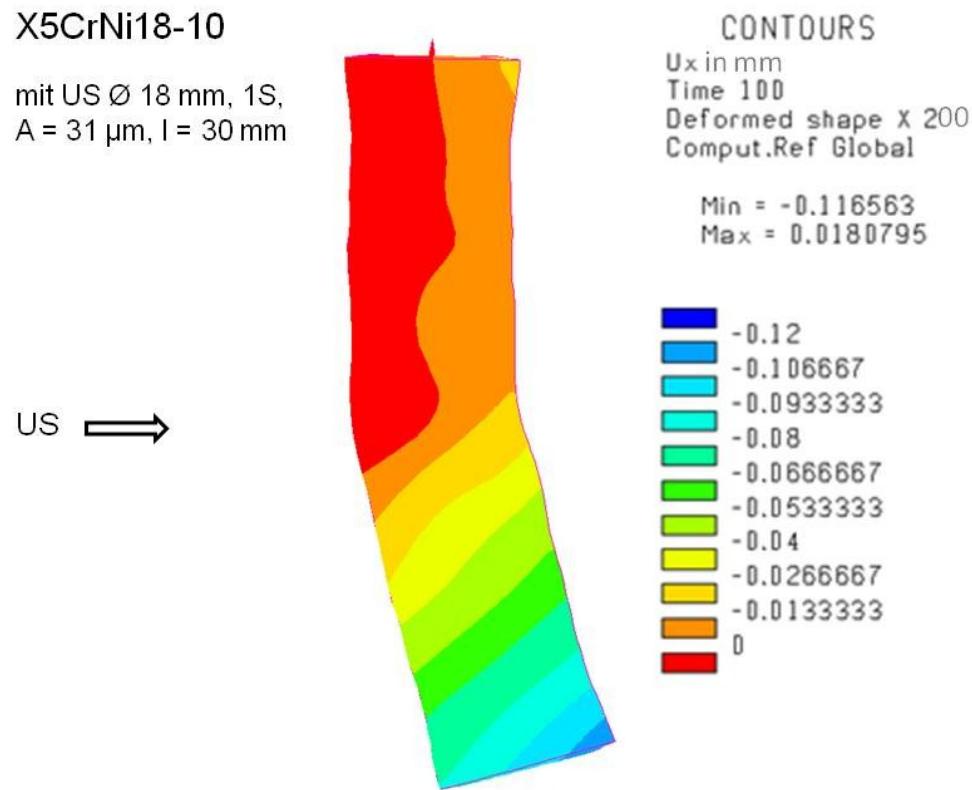


Abbildung 111: Simulierte Maß- und Formänderung in Beschallungsrichtung eines X5CrNi18-10-Zylinders nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

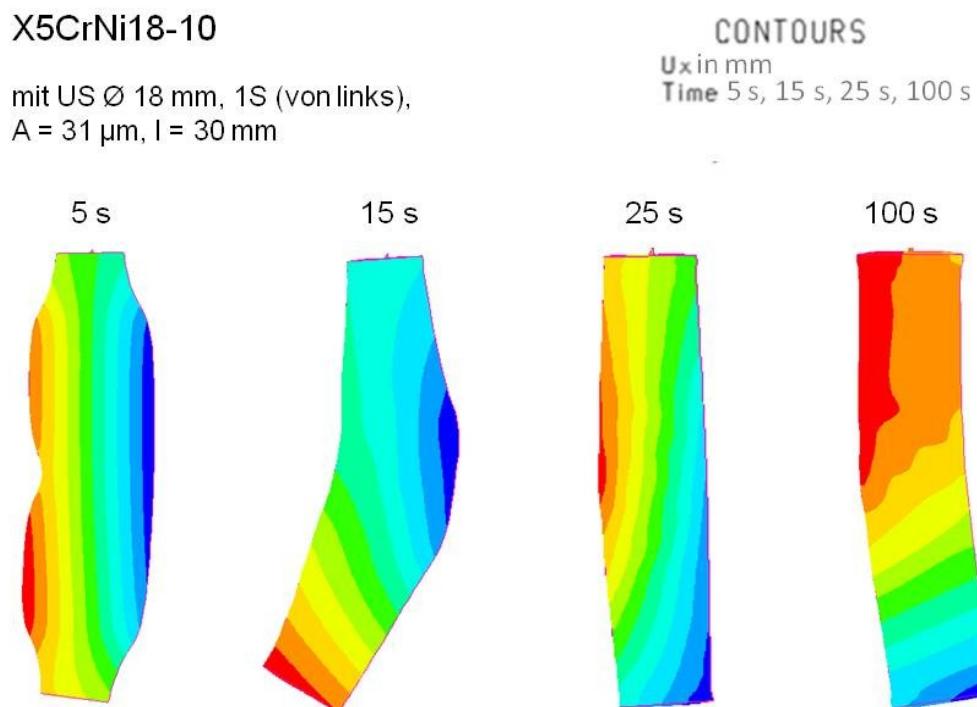


Abbildung 112: Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung während einer einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C.

Aufgrund der Probenhalterung an der oberen Stirnfläche tritt die maximale Verschiebung somit an der unteren Stirnfläche auf. Sie beträgt nahezu 0,12 mm, wie

Abbildung 111 zeigt. Dieses Ergebnis stimmt mit dem experimentellen Ergebnis überein. Sowohl die Richtung der Krümmung als auch die Größenordnung der maximalen Verschiebung stimmen in Experiment und Simulation überein (Vergleich siehe Abbildung 69). Die simulierte maximale Verschiebung in Beschallungsrichtung von 0,12 mm ist dabei jedoch größer als die mittlere ermittelte Verschiebung in x-Richtung von $0,065 \pm 0,014$ mm.

5.2.2 Zweiseitige Ultraschallunterstützung

Abbildung 113 stellt den Vergleich von simulierten und gemessenen Abkühlverläufen der ausgewählten Variante der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C dar. Wie auch bei der Simulation der einseitigen Beschallung zeigt sich insgesamt eine gute Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Abkühlverläufe.

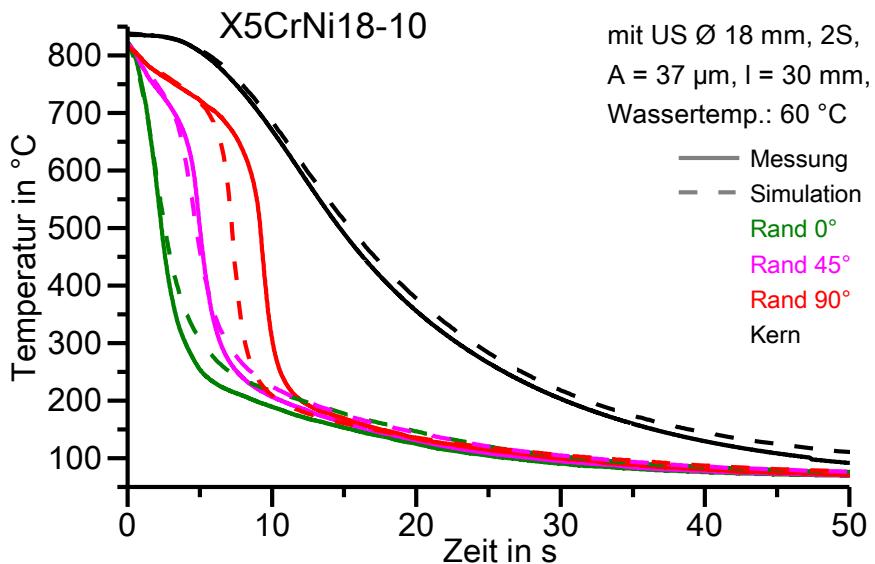


Abbildung 113: Vergleich simulierter und gemessener Abkühlverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 114 sind die zugehörigen Axialeigenspannungen entlang des halben Probenumfangs von 0° bis 180° auf Höhe der Probenmittelebene für die Messung und die Simulation gegenübergestellt. Am Probenrand liegen nach der Abschreckung erwartungsgemäß Druckeigenspannungen vor. Diese stimmen mit den experimentell ermittelten Eigenspannungen relativ gut überein. Im Mittel liegen die simulierten Axialspannungen betragsmäßig etwa 85 MPa oberhalb der mittels Röntgendiffraktometrie bestimmten Spannungen. Damit wird die Größenordnung der entstehenden Eigenspannungen durch die Simulation abgebildet. Weder die

gemessenen noch die simulierten Axialeigenspannungen weisen eine Abhängigkeit vom Umfangswinkel der Probe auf.

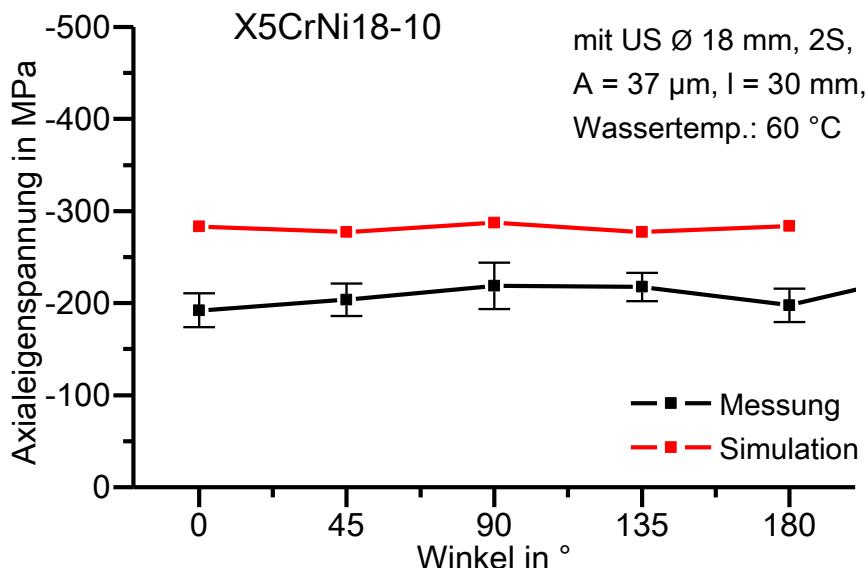


Abbildung 114: Vergleich simulierter und gemessener Axialeigenspannungsverlaue eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

In Abbildung 115 ist die simulierte Maß- und Formänderung der Probe in Beschallungsrichtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C dargestellt. Zur Hervorhebung der resultierenden Verschiebungen sind diese mit 200facher Vergrößerung abgebildet. Die zweiseitige Beschallung der Probe führt zu einer symmetrischen Formänderung, d.h. die Probe krummmt sich im Gegensatz zur einseitigen Ultraschallunterstützung nicht. Durch die schnellere symmetrische Abkühlung vor den beiden Sonotroden zieht sich die Probe dort zunächst zusammen. Auch an den beiden Stirnflächen kommt es aufgrund der schnelleren Abkühlung im Vergleich zu dem Bereich der Mantelfläche, der nicht direkt beschallt wird, zu einem Schrumpfen. Mit fortschreitender Abkühlung folgen die "unbeschallten" Bereiche allerdings nach und ziehen sich zusammen. Abbildung 116 veranschaulicht dies anhand einer zeitlichen Abfolge des Verformungszustandes. Dabei sei, wie bei Abbildung 112 darauf hingewiesen, dass die Skalierung der einzelnen Zustände angepasst wurde, da der Fokus auf die Formänderung infolge der Ultraschallunterstützung und nicht auf die thermische Ausdehnung zu legen ist.

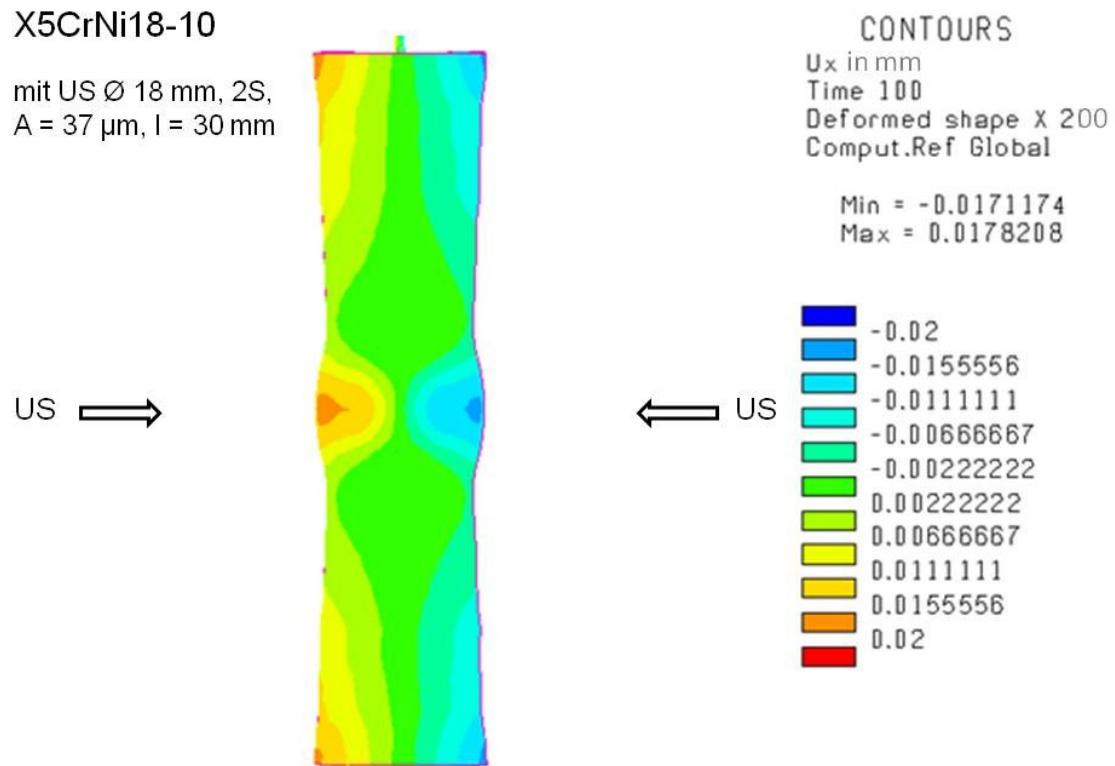


Abbildung 115: Simulierte Maß- und Formänderung in Beschallungsrichtung eines X5CrNi18-10-Zylinders nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.

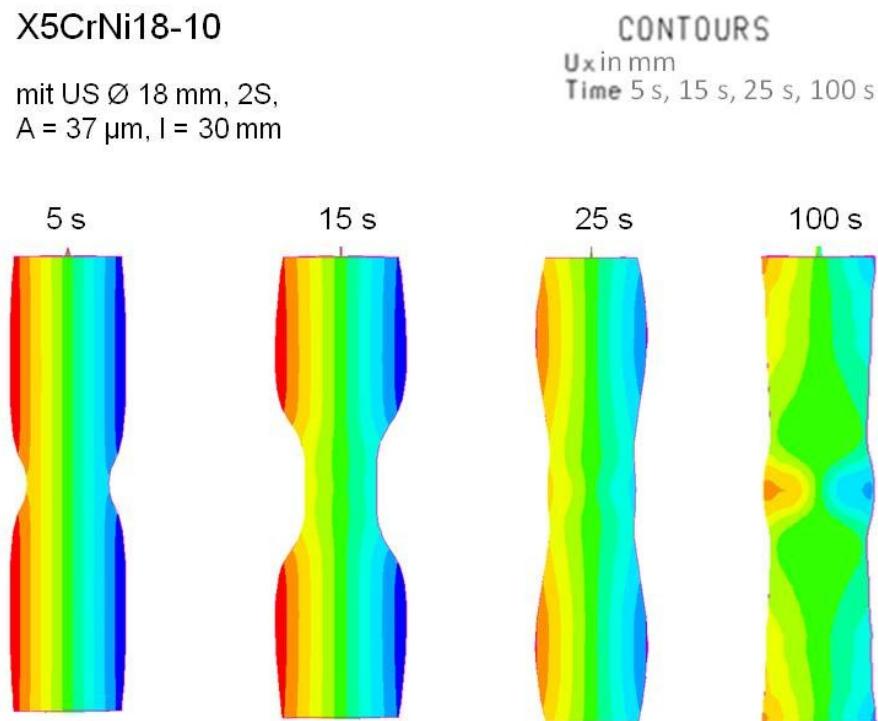


Abbildung 116: Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung während einer zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C.

Als Resultat verbleibt eine Aufweitung des Querschnitts vor den Sonotroden sowie an der oberen und unteren Stirnfläche. Diese beträgt nahezu 0,02 mm. Dieses Ergebnis stimmt mit dem experimentellen Ergebnis überein. Die maximalen Verschiebungen in Beschallungsrichtung stimmen in Experiment ($0,041 \pm 0,024$ mm) und Simulation (0,02 mm) gut überein (Vergleich siehe Abbildung 83).

Damit wurde erfolgreich ein Modell zur Simulation des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens erstellt.

6 Diskussion

6.1 Einfluss des Ultraschalls und der Prozessparameter

Die Unterstützung der Flüssigkeitsabschreckung metallischer Proben mittels Ultraschall bringt eine signifikante Beeinflussung der Abkühlvorgänge mit sich. Darüber hinaus haben die Prozessparameter wesentlichen Einfluss auf die Abschreckwirkung. Die Ultraschallunterstützung führt zu einer Destabilisierung des sich während des Filmsiedens ausbildenden Dampffilms und damit zu einer Reduzierung der Abkühldauer. Neben der Beeinflussbarkeit der Abschreckwirkung durch Ultraschall wirkt sich dieser auch auf die Gleichmäßigkeit des Abkühlvorgangs aus. In axialer Richtung der zylindrischen Proben weist die Ultraschallunterstützung ein hohes Vergleichmäßigungspotential auf. In Umfangsrichtung tritt im Vergleich zur konventionellen Abschreckung erwartungsgemäß eine ungleichmäßige Abschreckung auf. Diese wird im Vergleich zur einseitigen Ultraschallunterstützung durch die Beschallung mit zwei gegenüberliegenden Sonotroden jedoch deutlich verringert.

Die Stärke des Ultraschalleffektes auf die Abschreckung ist wesentlich von den Prozessparametern abhängig. Über den Abstand zwischen Sonotrode und Probe lässt sich die Destabilisierung des Dampffilms gezielt einstellen. Ein abnehmender Abstand führt zu einer zunehmenden Destabilisierung des Dampffilms. Dies ist mit der zu erwartenden Zunahme der Ultraschallintensität und der damit verbundenen Schallfeldgrößen bei abnehmender Schichtdicke des Mediums infolge geringerer Schallschwächung durch Schallabsorption und -streuung gemäß folgender Gleichung [4] zu erklären:

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x} \quad (6.1)$$

mit Absorptionskoeffizient α

Die Ultraschallintensität I nimmt mit zunehmender Schichtdicke x exponentiell ab. I_x ist hierbei die Intensität an der Stelle x , I_0 die Intensität an der Stelle $x = 0$. Ähnliche Zusammenhänge gelten für die Schallschnelle v [6], die Ultraschallamplitude A [6, 83], den Schalldruck p [4, 6] sowie den Langevinschen Schallstrahlungsdruck p_L [83].

Eine Erhöhung der Ultraschallamplitude führt zu einer Zunahme des Ultraschalleffektes auf die Abschreckung. Eine Ursache hierfür stellt der Schalldruck dar. Dieser ist laut Gleichung (6.2) proportional zur Ultraschallamplitude:

$$p = Z v = c \rho A \omega \cos(\omega t) = x A \quad (6.2)$$

$$\text{mit} \quad x = c \rho \omega \cos(\omega t)$$

Ein erhöhter Schalldruck lässt eine stärkere Destabilisierung des Dampffilms infolge einer Reduzierung der Dampffilmdicke erwarten.

Auch mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche steigt der Beeinflussungsgrad der Abschreckung. Dies lässt sich mit der Proportionalität zur Wirkleistung des Ultraschalls erklären. Diese ergibt sich zu:

$$P = I S_0 = c \rho A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) \frac{1}{4} \pi d^2 = y d^2 \quad (6.3)$$

$$\text{mit} \quad y = c \rho A^2 \omega^2 \cos^2(\omega t) \frac{1}{4} \pi$$

Ein zunehmender Ultraschalleffekt ist durch eine erhöhte Wirkleistung des Ultraschalls zu erwarten. Abbildung 117 zeigt dazu exemplarisch gemessene elektrische Leistungen bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10. Diese Leistung, die mittels Leistungsmessgerät *CLM1000 Professional(Plus)* der Fa. *Christ Elektronik* gemessen wurde, entspricht der elektrischen Leistung des Ultraschallgenerators und nicht direkt der Ultraschallleistung, da vorherrschende Verluste nicht berücksichtigt werden. Trotzdem lässt sich diese elektrische Wirkleistung zur Vorhersage eines Trends bei der Einflussnahme auf die Abschreckwirkung durch Ultraschall verschiedener Größen der schallabgebenden Fläche nutzen. Bei gleicher Ultraschallamplitude übersteigt die Wirkleistung der Sonotrode mit größerem Durchmesser und damit größerer Abschallfläche die Wirkleitung der Sonotrode mit geringerer Abschallfläche. Zudem zeigt sich, dass die Wirkleistung bei gleicher Sonotrode mit zunehmender Ultraschallamplitude steigt, was auch anhand Gleichung (6.3) ersichtlich wird.

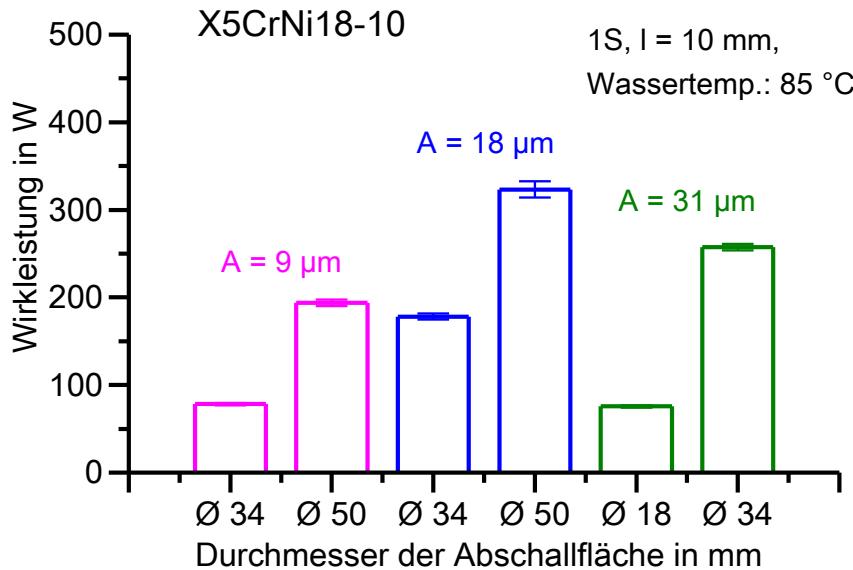


Abbildung 117: Elektrische Leistung des Ultraschallgenerators bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C.

Mit zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche lässt sich der Abschreckvorgang in axialer Richtung zudem deutlich vergleichmäßigen. Grund hierfür ist der zunehmende Wirkungsbereich des Ultraschalls. Mit zunehmender Größe der Abschallfläche nimmt die Größe der vor der Sonotrode wiederbenetzten Fläche zu. Gleichzeitig werden die Distanzen der entstehenden Benetzungsfronten zu den Stirnflächen der Probe reduziert. Folglich lassen sich die axialen Temperaturdifferenzen bei Ultraschallunterstützung mit zunehmender Größe der Abschallfläche zunehmend reduzieren.

Bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Abschreckung aller untersuchten Werkstoffe konnten Ausnahmen zum Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche beobachtet werden. Diese traten nur in Verbindung mit der 50 mm-Sonotrode auf. Bei dieser Sonotrode ist das Verhältnis der Durchmesser von schallabgebender Fläche und Probe mit 1,7 deutlich größer eins. Die gegenüberliegend eingebrachten Ultraschallfelder können sich demnach gegenseitig beeinflussen, da der Wirkungsbereich der jeweiligen Sonotrode größer als der Probendurchmesser ist. Die Ursache für die auftretenden Ausnahmen bezüglich des Beeinflussungsvermögens auf die Abschreckwirkung wird daher in destruktiven Interferenzerscheinungen beider Ultraschallfelder gesehen.

Lässt man diese auftretenden Ausnahmen außer Betracht, herrschen bezüglich der Abschreckwirkung bei einseitiger und zweiseitiger Beschallung nur geringfügige Unterschiede. Die erzielten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} von ein- und zweiseitiger Ultraschallunterstützung besitzen bei gleichen Prozessparametern etwa den gleichen Betrag. Dies ist zu erwarten, da durch gleiche Prozessparameter lokal die gleiche

Ultraschallwirkung erzeugt wird, unabhängig von der Anzahl der Sonotroden. Geringe Unterschiede lassen sich mit den geringfügig veränderten Amplituden im Zuge der Versuchsumstellung von einseitiger auf zweiseitige Beschallung (Tabelle 11) erklären. Die zweiseitige Ultraschallunterstützung führt im Vergleich zur einseitigen jedoch zu einer Reduzierung der Gesamtabkühlzeit der Probe. Der Dampffilm wird zwar nicht schneller aufgerissen, der Benetzungsprozess verläuft aufgrund der gegenüberliegenden Benetzungsfronten jedoch großflächiger.

Hinsichtlich der Abschreckgleichmäßigkeit herrscht ein entscheidender Unterschied zwischen einseitiger und zweiseitiger Beschallung. Aufgrund der gegenüberliegenden Benetzungsfronten wird die tangentiale Abschreckgleichmäßigkeit bei der zweiseitigen Ultraschallunterstützung im Vergleich zur einseitigen Beschallung verbessert. Die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in Umfangsrichtung der Probe sind bei zweiseitiger Ultraschallunterstützung geringer als die bei einseitiger Beschallung.

Einen weiteren entscheidenden Einfluss besitzt die Mediumtemperatur. Mit zunehmender Annäherung der Mediumtemperatur an ihre Siedetemperatur nimmt die Stabilität des sich ausbildenden Dampffilms während der Filmsiedephase zu (Vergleich Kapitel 2.3.2), da weniger Energie benötigt wird, um die Flüssigkeit zu verdampfen [25]. Dies führt dazu, dass die Dampffilmdicke mit zunehmender Mediumtemperatur ansteigt (Vergleich Gleichung (2.22)). Gleichzeitig wird das durch die Auftriebskraft gesteuerte Aufsteigen der Blasen aufgrund einer verminderten Dichtedifferenz und einer deutlich verringerten Oberflächenspannung mit zunehmender Annäherung an die Siedetemperatur reduziert [25]. Insgesamt resultiert eine zunehmende Badtemperatur daher in einer Verringerung der Geschwindigkeit der Benetzungsfront.

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsprogramme haben gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit bei den Wassertemperaturen 60 °C und 75 °C am schlechtesten ist. Dies wird mit der Temperaturabhängigkeit des stabilen Filmsiedens erklärt. Laut LIŠČIĆ et al. [25] herrscht stabiles Filmsieden in Wasser erst ab einer Badtemperatur von 85 °C vor, bei geringeren Badtemperaturen instabiles Filmsieden.

Das Auftreten von instabilem und stabilem Filmsieden wird auch als eine mögliche Ursache der zu beobachtenden Ausnahmen der Temperaturabhängigkeit der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} bei 75 °C angesehen. Unabhängig von der Ultraschallunterstützung ist das Filmsieden, besonders bei Temperaturen zwischen 60 °C und 85 °C [25], instabil. Andere Einflussfaktoren wie eine leichte Bewegung des Wassers, Unterschiede in der Überführungszeit der Probe ins Becken oder variierende

Eintauchgeschwindigkeiten wirken sich bei dieser Wassertemperatur demnach deutlich stärker aus. Eine weitere mögliche Ursache der bei 75 °C auftretenden Ausnahmen in Abhängigkeit der Ultraschallunterstützung stellt der Schalldruck dar. Die Schalldruckamplitude ergibt sich gemäß Gleichung (2.1) aus dem Produkt von Dichte, Schallgeschwindigkeit und Schallschnelle. Unter Annahme einer Temperaturunabhängigkeit der Schallschnelle ist die Schalldruckamplitude proportional dem Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit. Dabei ist der Einfluss der Schallgeschwindigkeit, die bei etwa 75 °C maximal (Abbildung 3) ist, größer als der der Dichte, die mit zunehmender Temperatur abnimmt, wie die folgende Rechnung (Angaben für Dichte und Schallgeschwindigkeit nach [19]) zeigt:

$$p(H_2O, 60^\circ C, v) = 1550 \frac{m}{s} * 983 \frac{kg}{m^3} * v = 1523650 \frac{kg}{sm^2} * v$$

$$p(H_2O, 75^\circ C, v) = 1555 \frac{m}{s} * 975 \frac{kg}{m^3} * v = 1576125 \frac{kg}{sm^2} * v$$

$$p(H_2O, 85^\circ C, v) = 1552 \frac{m}{s} * 968 \frac{kg}{m^3} * v = 1502336 \frac{kg}{sm^2} * v$$

Bei 75 °C herrscht somit eine größere Schalldruckamplitude als bei 60 °C und 85 °C. Ein größerer Schalldruck lässt eine stärkere Destabilisierung des Dampffilms durch eine Reduzierung der Dampffilmdicke erwarten.

Ein weiterer wichtiger Prozessparameter, infolge dessen sich die Abschreckwirkung und die Gleichmäßigkeit unter Ultraschallunterstützung beeinflussen lassen, ist die Art des Abschreckmediums. In dieser Arbeit wurden Rostocker Leitungswasser und das Hochleistungsabschrecköl Isomax 166 untersucht. Ein wesentlicher Unterschied dieser beiden Medien ist die Siedetemperatur. Die Siedetemperatur von Isomax 166 liegt mit etwa 300 °C ca. 200 K oberhalb der Siedetemperatur von Wasser. Anhand dieser enormen Siedetemperaturdifferenz beider Medien lassen sich die Mehrheit der auftretenden Unterschiede bezüglich Abschreckwirkung und -gleichmäßigkeit bei der ultraschallunterstützten Wasser- und Ölabschreckung erklären.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass bei der Ölabschreckung deutlich geringere normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} erzielt wurden als bei der Wasserabschreckung. Ursache hierfür ist einerseits die relativ hohe Siedetemperatur und die damit verbundene relativ geringe Temperaturdifferenz zur Eintauchtemperatur der Probe. Folglich ist die Dauer des stabilen Filmsiedens bei der Ölabschreckung geringer als bei der Wasserabschreckung bei gleicher Badtemperatur und der

Benetzungs vorgang verläuft schneller. Das Beeinflussungspotential auf die Stabilität des Dampffilms ist durch die hohe Siedetemperatur bei Öl demnach deutlich geringer als bei Wasser.

Zudem ist der Schalldruck in Öl bei gleichen Ultraschallparametern durch die geringere Dichte und die geringere Schallgeschwindigkeit bei gleicher Badtemperatur von 60 °C geringer als in Wasser, wie aus Gleichung (6.2) hervorgeht und die folgende Rechnung zeigt. Ein höherer Schalldruck lässt eine stärkere Reduzierung der Dampffilmdicke und damit höhere normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} erwarten.

$$p(H_2O, 60^\circ C, A, \omega, t) = 1550 \frac{m}{s} * 983 \frac{kg}{m^3} * A \omega \cos(\omega t) = 1523650 \frac{kg}{sm^2} * A \omega \cos(\omega t)$$

$$p(\text{Öl}, 60^\circ C, A, \omega, t) = 1290 \frac{m}{s} * 834 \frac{kg}{m^3} * A \omega \cos(\omega t) = 1075560 \frac{kg}{sm^2} * A \omega \cos(\omega t)$$

Die Schallgeschwindigkeiten und Dichten des Abschrecköls Isomax 166 und des Rostocker Leitungswassers bei 60 °C wurde dabei mittels Dichte- und Schallgeschwindigkeitsmessgerät DSA 5000 M (Fa. Anton Paar) am Institut für Chemie | Abteilung Physikalische Chemie | Universität Rostock gemessen.

Auch der Unterschied bezüglich der Abhängigkeit der axialen und tangentialen Gleichmäßigkeit von der Ultraschallamplitude beider Medien lässt sich damit erklären. Mit einer hohen Amplitude lässt sich der Dampffilm in Wasser zwar lokal aufreißen, die gesamte Benetzung wird jedoch hauptsächlich durch die hohe Stabilität des Dampffilms in den "unbeschallten" Bereichen geprägt. Durch die weitaus geringere Dauer des stabilen Filmsiedens bei Öl verglichen zu Wasser wird die natürliche Benetzung durch eine zunehmende Ultraschallamplitude unterstützt. Bei der Ölabschreckung führt die Steigerung der Amplitude im Gegensatz zu Wasser daher zu einer Verringerung der axialen und tangentialen Temperaturdifferenzen.

Bei der ultraschallunterstützten Ölabschreckung ließ sich anhand der Abkühlverläufe in der Konvektionsphase ein diskontinuierlicher Kurvenverlauf beobachten (z.B. Abbildung 86). Ein derartiges Phänomen zeigte sich bei der Ultraschallunterstützung in Wasser nicht. Erklärt wird diese Beobachtung mit dem großen Viskositätsunterschied von etwa einer Größenordnung beider Medien. Die Beschallung führt dazu, dass durch die induzierte Strömung ständig kühleres Öl bzw. Wasser aus umliegenden Bereichen an die Probe transportiert wird. Durch die hohe Viskosität des Öls lässt sich in Probennähe im Gegensatz zu Wasser jedoch keine homogene Temperaturverteilung des Mediums einstellen. Bei hohen Temperaturen macht sich dies nicht bemerkbar.

Während der Konvektion führt dies jedoch folglich zu einem diskontinuierlichen Abkühlverlauf.

Die Ultraschallunterstützung führt zu einer signifikanten Beeinflussung der Abkühlvorgänge. Die Filmsiedephase lässt sich unter Ultraschallunterstützung beispielsweise beschleunigen. Diese Beschleunigung wird mit einer Reduzierung der Dampffilmdicke durch den Ultraschall und der damit einhergehenden erhöhten Wärmeabgabe ins Medium (Vergleich Gleichung (2.21)) in Zusammenhang gebracht.

Während die Leidenfrost-Temperatur von EN AW-6082 bei ultraschallunterstützter Abschreckung bei der Mehrheit der Versuche bei gleicher Wassertemperatur konstant blieb, war zum Teil auch eine Verringerung im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zu beobachten. Bei X5CrNi18-10 führte die Ultraschallunterstützung bei gleicher Badtemperatur teilweise sowohl zu einer Verringerung als auch zu einer Erhöhung der Leidenfrost-Temperatur verglichen zur konventionellen Abschreckung. Gründe hierfür lassen sich einerseits in abhängig vom Ultraschall, andererseits auch unabhängig vom Ultraschall finden.

Unabhängig vom Ultraschall sind Ursachen zur Beeinflussung des Leidenfrost-Punktes in Abhängigkeit des Mediums, der Versuchsdurchführung sowie der Probe möglich. Durch eine wiederholte Nutzung der Proben kommt es zu einer Passivierung der Probenoberfläche durch Oxidbildung. Die Oxidation bringt eine erhöhte Benetzbarkeit und erhöhte Leidenfrost-Temperaturen mit sich [25, 32, 84]. Auch eine variierende Eintauchtemperatur der Probe, bedingt durch das manuelle Überführen und Absenken der Probe, beeinflusst die Stabilität des Filmsiedens und kann zu einem vorzeitigen Zusammenbruch des Dampffilms mit erhöhter Leidenfrost-Temperatur führen [32, 85]. Eine Verringerung der Leidenfrost-Temperatur kann Folge von Verunreinigungen des Mediums sein. Trotz eines regelmäßigen Wasserwechsels kann die wiederholte Abschreckung von Probekörpern zu einer zunehmenden Verunreinigung des Mediums führen. Verunreinigungen sorgen für ein Herabsetzen der Oberflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Dampf mit der Folge eines langsameren Aufreißens des Dampffilms und einer Verringerung der Leidenfrost-Temperatur [32].

Mögliche Ursachen zur Beeinflussung des Leidenfrost-Punktes in Abhängigkeit des Ultraschalls lassen sich in Verbindung mit einer Beeinflussung des Mediums durch den Ultraschall erklären. So lässt sich die Temperaturlage des Leidenfrost-Punktes beispielsweise durch das Lösen von Gasen herabsetzen [32]. Die

Ultraschallunterstützung sorgt hingegen für eine Entgasung der Flüssigkeit, was schließlich mit einer Steigerung der Leidenfrost-Temperatur verbunden ist. Außerdem ist die Temperaturlage des Leidenfrost-Punktes in Wasser von dessen Strömungsgeschwindigkeit und Temperatur abhängig. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit und abnehmender Temperatur steigt die Leidenfrost-Temperatur in Wasser [25]. Die Beschallung führt zu einer ausgeprägten Strömung. Im Vergleich zur konventionellen Abschreckung ist somit ein Geschwindigkeitszuwachs mit Zunahme der Leidenfrost-Temperatur bei Ultraschallunterstützung zu verzeichnen. Gleichzeitig könnte die Anwendung von Ultraschall in Abhängigkeit der Prozessparameter einen Temperaturanstieg im Medium infolge der Schallabsorption mit sich bringen. In diesem Fall würde die Leidenfrost-Temperatur reduziert werden. Im Gegensatz zu Wasser herrscht in Öl keine Abhängigkeit zwischen Leidenfrost-Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit oder Temperatur vor [25]. Hier lässt sich als Ursache für die Beeinflussung der Temperaturlage des Leidenfrost-Punktes nur eine Erhöhung durch einen abnehmenden Gasgehalt bei Ultraschallunterstützung angeben. Dies korreliert auch mit den hier gewonnenen Erkenntnissen der ultraschallunterstützten Ölabschreckung.

6.2 Zusammenhang tangentialer Abkühlgleichmäßigkeit und Abkühlwirkung

Ein Zusammenhang zwischen tangentialer Abschreckgleichmäßigkeit und Abschreckwirkung lässt sich über die Darstellung der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} in Abhängigkeit der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} gewinnen. In Abbildung 118 bis Abbildung 122 ist dieser Zusammenhang für die einseitig und zweiseitig ultraschallunterstützte Wasser- und Ölabschreckung von Zylindern aus EN AW-6082 und X5CrNi18-10 dargestellt.

Unabhängig von den konkreten Ultraschallprozessparametern lässt sich bei der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 erkennen, dass die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} mit zunehmenden normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} steigen. Da die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Aluminium einen relativ kleinen Bereich umfassen, lassen sich ähnliche normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} bei sich zum Teil deutlich unterscheidenden normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} einstellen.

Durch die größere Bandbreite varierter Prozessparameter, insbesondere der Ultraschallamplitude, bei der zweiseitigen im Vergleich zur einseitigen Beschallung zeigt sich, dass sich hier auch variierende normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} bei ähnlichem normierten Temperaturdifferenzfaktor g_{T_n} (z.B. bei $g_{T_n} = 7$) einstellen lassen. Zudem lässt sich erkennen, dass die Steigung der Punktewolke bei der zweiseitigen Beschallung im Vergleich zur einseitigen Beschallung bei gleichen Prozessparametern flacher und die Abschreckung damit gleichmäßiger ist.

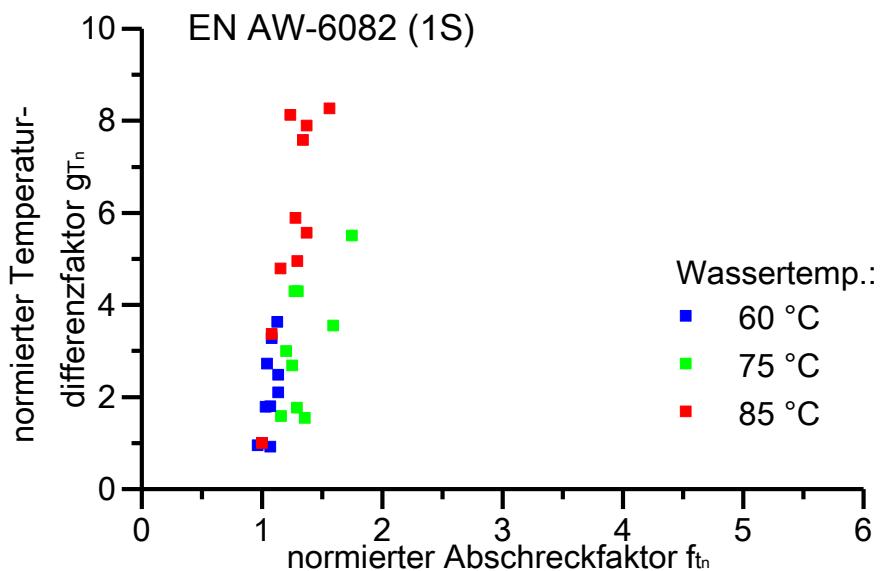


Abbildung 118: Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

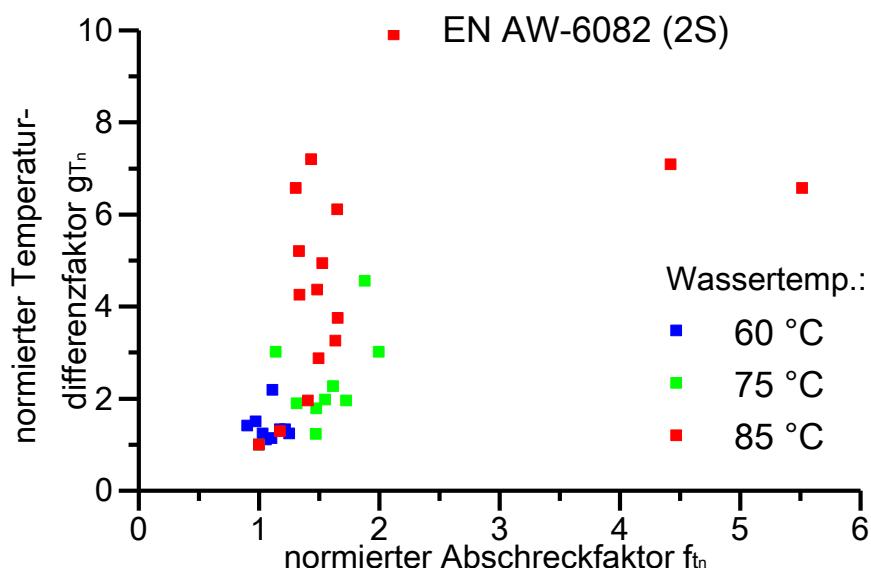


Abbildung 119: Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.

Auch bei der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 wird deutlich, dass die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} mit zunehmenden normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} steigen. Dabei ist die Zunahme der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} deutlich stärker ausgeprägt als die Zunahme der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} . Bei der zweiseitigen Beschallung nähern sich die normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} dabei scheinbar einem Grenzwert von $g_{T_n} = 4$ an.

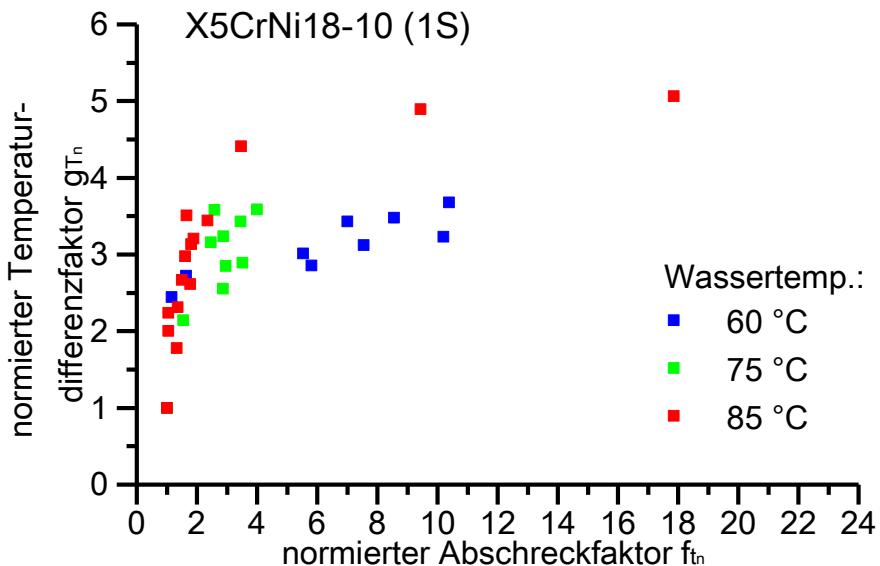


Abbildung 120: Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

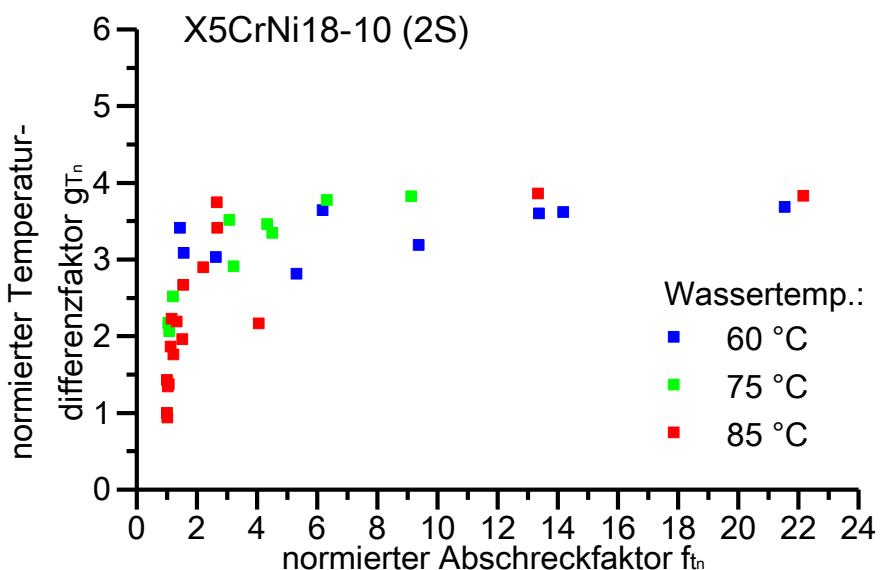


Abbildung 121: Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.

Das bringt eine enorm große Variationsbreite an normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} bei ähnlichen normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} mit sich (z.B. bei $g_{T_n} = 3,5$). Bei geringen normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} lassen sich hingegen in Abhängigkeit der Prozessparameter auch variierende normierte Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} einstellen. Wie schon bei Aluminium lässt sich auch bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Stahl eine gleichmäßige Abschreckung bei gleicher Abschreckwirkung als bei einseitiger Beschallung beobachten. In Abbildung 120 und Abbildung 121 wird zudem der Einfluss der Wassertemperatur deutlich. 60 °C scheint eine geeignete Wassertemperatur für eine rasche und zugleich gleichmäßige Abschreckung zu sein.

Die dargestellten Abbildungen spiegeln außerdem wider, dass sich bei der ultraschallunterstützten Stahlabschreckung größere normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} bei gleichen normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} als bei der Abschreckung von Aluminium erzielen lassen.

Wie bei der Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 lässt sich bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung eine funktionale Abhängigkeit zwischen normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} und normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} erkennen. Mit zunehmenden normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} steigen die normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} .

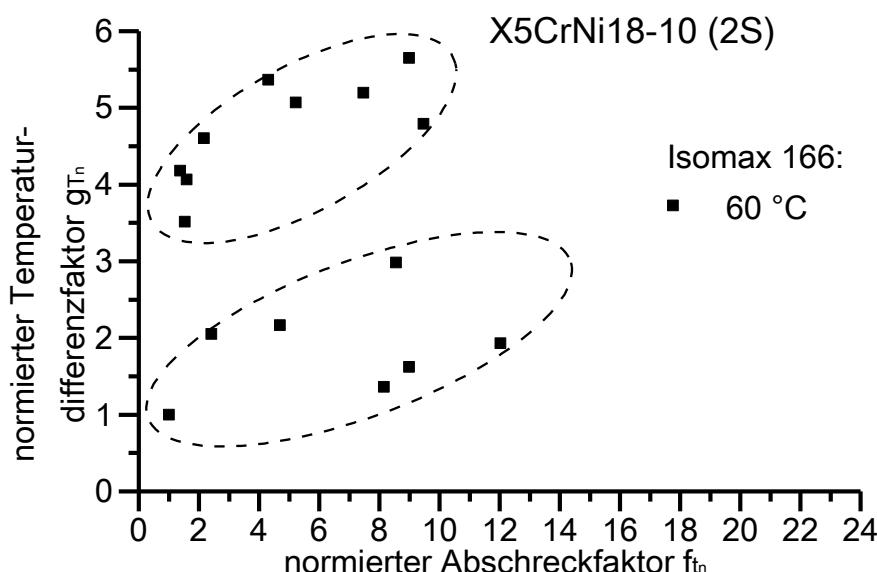


Abbildung 122: Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 (gestrichelte Ellipsen kennzeichnen zwei Punktewolken).

Im Gegensatz zur ultraschallunterstützten Wasserabschreckung ist diese Abhängigkeit jedoch in Zusammenhang mit dem Prozessparameter Ultraschallamplitude zu bringen, was sich anhand der beiden Punktwolken (gestrichelte Ellipsen) erkennen lässt. Bei kleineren Ultraschallamplituden ergeben sich hohe normierte Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} , bei höheren Amplituden werden geringe normierte Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} eingestellt. Bei kleineren Amplituden ist die Abschreckung bei ähnlicher Abschreckwirkung somit ungleichmäßiger als bei höheren Amplituden. Durch die geringere Dauer des stabilen Filmsiedens bei Öl im Vergleich zu Wasser wird die natürliche Benetzung durch eine zunehmende Ultraschallamplitude unterstützt. Bei der Ölabschreckung führt eine Zunahme der Amplitude daher zu einer Verringerung der tangentialen Temperaturdifferenzen. In Wasser wird im Gegensatz dazu die gesamte Benetzung hauptsächlich durch die hohe Stabilität des Dampffilms in den "unbeschallten" Bereichen geprägt.

6.3 Vergleich des Abkühlverhaltens der untersuchten Werkstoffe

Die Ultraschallunterstützung der Flüssigkeitsabschreckung metallischer Proben bringt neben einer signifikanten Beeinflussung der Abkühlvorgänge auch Unterschiede, bedingt durch die Werkstoffe, mit sich. Diese Unterschiede werden zum Teil den Werkstoffeigenschaften, aber auch der eingebrachten Wärmemenge zugeschrieben.

Bei der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 waren zum Teil zwei Beschleunigungsphasen während des Filmsiedens zu beobachten (z.B. Abbildung 59, Abbildung 73, zwei "Knickpunkte" in den Abkühlkurven). Nach einer anfänglichen Beschleunigung in der Filmsiedephase verglichen zur konventionellen Abschreckung kam es bei der Stahlabschreckung nach einigen Sekunden zu einer nochmaligen Beschleunigung, bevor der Dampffilm zerstört wurde. Die Ultraschallunterstützung führt bei dem Stahl in Abhängigkeit der Prozessparameter offensichtlich zu einer nochmaligen Reduzierung der Dampffilmdicke, bevor der Dampffilm zusammenbricht. Diese zweite Reduzierung der Dampffilmdicke lässt sich auch anhand der zugehörigen Videoaufnahmen erkennen. In Abbildung 123 ist ein Beispiel einer derartigen ultraschallunterstützten Abschreckung anhand zweier Bildausschnitte dargestellt. Nach 12 s wird die Probe in diesem Beispiel auf Höhe der Probenmittelebene noch komplett von einem geschlossenen Dampffilm umgeben. Es

lässt sich jedoch eine Grenze erkennen, an der sich die Dicke des Dampffilms zu ändern scheint (Pfeile). Diese Fläche mit reduzierter Filmdicke auf der sonotrodenzugewandten Seite der Probe besitzt etwa den gleichen Durchmesser wie die schallabgebende Fläche der Sonotrode. Nach 22 s lässt sich nochmals ein Unterschied zwischen Benetzungsfront und Grenzfläche der reduzierten Filmdicke erkennen (Pfeile).

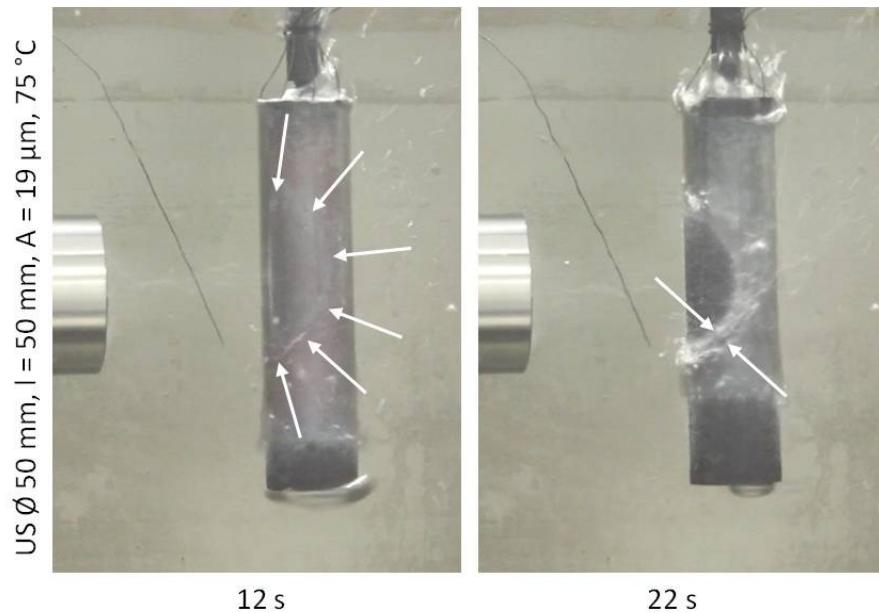


Abbildung 123: Reduzierung der Dampffilmdicke bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung ($\varnothing 50 \text{ mm}$, $A = 19 \mu\text{m}$, $l = 50 \text{ mm}$) eines Zylinders aus X5CrNi18-10 bei 75°C (Pfeile kennzeichnen Grenzen der Dampffilmdickenänderung).

Bei der Abschreckung von EN AW-6082 konnten solche zwei Beschleunigungsphasen in der Filmsiedephase nicht nachgewiesen werden. Bei der Aluminiumlegierung wird durch die weitaus geringere Temperaturdifferenz zwischen Probe und Badtemperatur vor einer weiteren Verringerung der Dampffilmdicke bereits der Beginn des Blasensiedens erreicht.

Ein wesentlicher Unterschied der Abschreckwirkung der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung von Stahl und Aluminium ist der Betrag der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} . Diese sind für Stahl bei gleichen Ultraschallprozessparametern deutlich größer als die der Aluminiumlegierung. Auch hier ist die Ursache im Unterschied der eingebrachten Wärmemenge zu sehen. Bei EN AW-6082 ist die Abschreckung aufgrund der relativ geringen Temperaturdifferenz zwischen Probentemperatur und Badtemperatur relativ schroff. Selbst bei Badtemperaturen von 75°C und 85°C entspricht die Dauer der Filmsiedephase nur einem Bruchteil der der Stahlabschreckung. Bei ohnehin relativ kurz andauernden Filmsiedephassen resultieren

durch die Ultraschallunterstützung bei EN AW-6082 demnach auch relativ geringe normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} . Bei der Stahlabschreckung sind die Filmphasen länger stabil, so dass sich die Ultraschallunterstützung stärker auswirkt.

Mit diesem Erklärungsansatz lässt sich auch die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} beider Werkstoffe begründen. Mit zunehmender Wassertemperatur kommt es bei der Abschreckung von EN AW-6082 zu einer Steigerung der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} , für Stähle ergibt sich hingegen eine Verringerung der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} . Bei der Abschreckung der Aluminiumlegierung reicht die Ultraschallwirkung bei allen untersuchten Badtemperaturen aus, um den Dampffilm zu destabilisieren und aufzubreßen. Bei der Stahlabschreckung liegen im Gegensatz dazu um etwa 300 K höhere Eintauchtemperaturen vor. Hier überwiegt bei höheren Badtemperaturen die Stabilität des Filmsiedens durch den weitaus größeren Wärmeeintrag über den wirkenden Ultraschalleffekt. Unterstützt wird dieser Erklärungsansatz durch den Vergleich der Filmsiededauern bei konventioneller Wasserabschreckung der Aluminiumlegierung bei 85 °C (13 s) und des austenitischen Stahls bei 60 °C (22 s). Die Dauer der Filmsiedephase der Stahlabschreckung entspricht bereits nahezu dem 1,7 fachen der Filmsiededauer der Aluminiumlegierung.

Ein weiterer Unterschied beider Werkstoffe lässt sich in Hinblick auf die Abschreckgleichmäßigkeit erkennen. Bei beiden Werkstoffen führt eine zunehmende Größe der schallabgebenden Fläche bei der einseitigen Ultraschallunterstützung zu einer Zunahme der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} . Bei der zweiseitigen Beschallung von EN AW-6082 ist dies genauso. Ursache hierfür ist, dass mit zunehmender Größe der Abschallfläche der normierte Abschreckfaktor f_{t_n} steigt. Der Dampffilm lässt sich lokal zunehmend schnell aufbreißen. Die gesamte Benetzung wird jedoch hauptsächlich durch die hohe Stabilität des Dampffilms in den "unbeschallten" Bereichen geprägt. Bei der zweiseitigen Beschallung des austenitischen Stahls bringt eine zunehmende Größe der schallabgebenden Fläche hingegen eine Abnahme der normierten Temperaturdifferenzfaktoren g_{T_n} , insbesondere bei einer Wassertemperatur von 85 °C, mit sich. Hier kommt es zu einer Kombination der Größe des Wirkbereichs bei zweiseitiger Beschallung (im Verhältnis zum Probendurchmesser) und der hohen lokalen Abschreckwirkung. Diese wiederum ist einerseits mit der Zunahme des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} mit zunehmender Größe der Abschallfläche zu erklären. Andererseits ist diese entscheidend von der weitaus größeren eingebrachten

Wärmemenge bei der Stahlabschreckung und den daraus resultierenden größeren Beträgen der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} verglichen zur Aluminiumabschreckung abhängig.

Auch die Verifizierung der berechneten Wärmeübergangskoeffizienten ergab einen entscheidenden Unterschied zwischen Aluminiumknetlegierung und austenitischem Stahl. Die abschnittsweise Berechnung der WÜK in Umfangsrichtung der Probe führte bei X5CrNi18-10 zu einer guten Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Abkühlverläufen. Die mittels FDM berechneten WÜK von EN AW-6082 wichen allerdings von den real vorliegenden WÜK ab und mussten mit Hilfe einer retro-inversen Analyse angepasst werden. Infolge der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit von EN AW-6082 kommt es bei der einseitigen Beschallung der Aluminium-Probe zu einem zusätzlichen Wärmestrom von der sonotrodenabgewandten zur -zugewandten Seite der Probe (Abbildung 20). Durch die deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit des Stahls, die nur etwa einem Zehntel der der Aluminiumlegierung entspricht, wird hier bei der einseitig ultraschallunterstützten Abschreckung das lokale Aufreißen des Dampffilms vor der Sonotrode bei 0° , im Gegensatz zur Aluminiumlegierung, auf der sonotrodenabgewandten Seite der Probe bei 180° nicht registriert.

6.4 Wirkmechanismen des Ultraschalls

Zum Verständnis des Ultraschalleffektes auf die Flüssigkeitsabschreckung müssen die Wärmeübergangsmechanismen in der Filmsiedephase (Abbildung 6) betrachtet werden. Grundsätzlich wird die Dampffilmdicke durch die Ultraschallunterstützung reduziert und damit der konvektive Wärmeübergang $\alpha_{konv.}$ an der Grenzfläche Dampf/Flüssigkeit gemäß Gleichung (2.22) erhöht. Vergleiche können zunächst zur Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen durch die Anwendung von Ultraschall gezogen werden [35, 43, 46, 47, 50-54].

Als Ursache für dieses Steigerungspotential des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten sind sowohl die linearen als auch die nichtlinearen Anteile der Schallausbreitung zu berücksichtigen, wenngleich letztere in der Literatur deutlich häufiger Erwähnung finden.

In der zugrunde liegenden Literatur zum Einfluss von Ultraschall auf den Wärmeübergang an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen (Tabelle 3) wird bezüglich der linearen Effekte als Ursache für den Ultraschalleinfluss nur der Schalldruck genannt

[43, 46]. Auch IIDA et al. [58], die sich konkret mit dem ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschrecken als Teil der Wärmebehandlung metallischer Bauteile beschäftigten, nennen den Schalldruck als eine der Hauptursachen für den Ultraschalleinfluss auf die Flüssigkeitsabschreckung.

Zur Diskussion des Schalldrucks als Wirkmechanismus des Ultraschalls bezüglich der Beeinflussung des Wärmeübergangs ist eine Modellvorstellung des Filmsiedens vorteilhaft. Der Dampffilm zwischen heißer Bauteiloberfläche und flüssigem Medium kann so lange aufrecht erhalten werden, wie der Druck des Dampfes p_D dem der Flüssigkeit p_{Fl} entspricht. Sinkt der Dampfdruck p_D unter den Flüssigkeitsdruck p_{Fl} , bricht der Dampffilm zusammen und das Blasensieden beginnt. Wird der Druck der Flüssigkeit nun durch eine Ultraschallunterstützung erhöht, kommt es zu einer Reduzierung der Dampffilmdicke, zu einer Erhöhung des Wärmeübergangs und schließlich zu einem vorzeitigem Zusammenbruch des Dampffilms im Vergleich zu einem ruhenden Bad. Unterstützt wird diese These durch den dominierenden Einfluss der Ultraschallamplitude auf die Flüssigkeitsabschreckung mit Ultraschallunterstützung und den proportionalen Zusammenhang zwischen Ultraschallamplitude und Schalldruck (Gleichung (6.2)).

Daneben müssen zum Verständnis des Ultraschalleffektes auch die gegebenenfalls parallel ablaufenden nichtlinearen Effekte der Schallausbreitung berücksichtigt werden. In der zugrunde liegenden Literatur werden der Schallstrahlungsdruck [37, 38], aber vor allem der Ultraschallwind [36, 42, 62, 86] und die Kavitation [34, 35, 41, 45, 48, 50-53, 55, 56, 60-62, 86, 87] vielfach als Wirkmechanismen des Ultraschalls genannt.

Während der durchgeführten Abschreckversuche ließ sich das Auftreten einer Strömung von der schallabgebenden Fläche der Sonotrode zur Probe beobachten. Dabei handelt es um Ultraschallwind. Vergleichen lässt sich der mögliche Einfluss des Ultraschallwindes mit dem bewegter Abschreckbäder. MAAß [28] untersuchte die Abschreckung eines Nickelzyinders mit einem Durchmesser von 30 mm bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten und Wassertemperaturen. Er berichtet, dass es bei Wassertemperaturen von 40 °C und 60 °C mit zunehmender Anströmgeschwindigkeit zu einer Erhöhung der Leidenfrost-Temperatur und einem damit verbundenen frühzeitigeren Aufreißen des Dampffilms verglichen zu einem ruhenden Bad kommt. Ein Vergleich zu den hier gewonnenen Ergebnissen der ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Aluminium- und Stahlzyindern ist aufgrund der sich unterscheidenden Bedingungen (Probengeometrie, Werkstoff,

Wärmebehandlungsparameter) nur begrenzt möglich. Eine entscheidende Erkenntnis von MAAß [28] lässt sich jedoch für die Diskussion des Ultraschalleinflusses nutzen. Im Zuge seiner Untersuchungen stellte er fest, dass die Wärmestromdichte in der Filmsiedephase unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit ist. Wie hier festgestellt werden konnte, führt die Ultraschallunterstützung im Gegensatz dazu jedoch zu einer Erhöhung der Wärmestromdichte in der Filmphase, was sich anhand der zugehörigen Kurvenanstiege der Temperatur-Zeit-Verläufe erkennen lässt. Daraus resultiert, dass der beschriebene Einfluss des Ultraschalls auf die Abschreckwirkung nicht alleine auf die durch den Ultraschall induzierte Strömung zurückzuführen ist.

In den bisherigen Publikationen zum Ultraschalleinfluss auf die Abschreckwirkung wurde häufig die Kavitation als Hauptursache genannt. Laut HELLER [88] und ŠUTILOV [5] wird das Auftreten von Kavitation bei abnehmender Zerreißfestigkeit der Flüssigkeit begünstigt. Gelöste Gase und Partikel in Flüssigkeiten wirken als Kavitationskeime und verursachen eine geringe Zerreißfestigkeit. Reines entgastes Wasser weist hingegen eine sehr hohe Zerreißfestigkeit auf, was das Auftreten von Kavitation erschwert. Eigene Abschreckversuche mit X5CrNi18-10 haben gezeigt, dass sich der Einfluss des Ultraschalls auf die Abschreckwirkung in destilliertem Wasser und in Leitungswasser unterschiedlicher Herkunft und somit unterschiedlicher Härtegrade unter den gleichen Bedingungen signifikant unterscheidet. Tabelle 20 zeigt dazu exemplarische Versuchsergebnisse anhand des normierten Abschreckfaktors f_{t_n} in Abhängigkeit des Prozessparameters Größe der schallabgebenden Fläche sowie des Härtegrades bzw. der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers. Anhand dieser Tabelle wird deutlich, wie sehr sich der Härtegrad und der damit verbundene Ionenanteil in Wasser unterschiedlicher Herkunft auf den Abschreckvorgang auswirken. Zudem zeigt sich, dass es im Zuge des Transports und der Verwendung von destilliertem Wasser als Abschreckmedium zu einer Anreicherung mit Ionen kommt. Diese Anreicherung ist im Verhältnis zum Ionenanteil des Leitungswassers dennoch sehr gering. Selbst nach den Abschreckversuchen (ca. zehn Abschreckversuche mit X5CrNi18-10) weist das destillierte Wasser eine um eine Größenordnung geringere elektrische Leitfähigkeit als Leitungswasser auf. Anhand der normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} zeigt sich der stärkste Ultraschalleinfluss auf die Abschreckwirkung in destilliertem Wasser. In "weichem" Leitungswasser werden höhere normierte Abschreckfaktoren f_{t_n} als in "hartem" Wasser erzielt. Ursache hierfür ist der Gasgehalt des Wassers, der in Korrelation mit dem Härtegrad zu sehen ist. Einen ungünstigen Einfluss auf das

Abkühlvermögen besitzen laut PETER [90] härtebildende Bicarbonate. Diese können nur mit einer ausreichenden Menge Kohlensäure in Lösung gehalten werden. Selbst wenn Leitungswasser keine Kohlensäure besitzt, entsteht es als Reaktionsgas beim Abschrecken in carbonathaltigem Wasser. Als Bestandteil im Abschreckmedium Wasser verursacht ein zunehmender Kohlensäuregehalt eine Zunahme der Dampffilmdicke, eine zunehmende Stabilität des Dampffilms und eine Verringerung der Leidenfrost-Temperatur [90]. Mit abnehmendem Härtegrad und in destilliertem Wasser wird aufgrund der nach HELLER [88] und ŠUTILOV [5] höheren Zerreißfestigkeit des Wassers das Auftreten von Kavitation (zunehmend) gehemmt. Dennoch treten hier die höchsten normierten Abschreckfaktoren f_{t_n} auf. Damit lässt sich schlussfolgern, dass auch die Kavitation nicht maßgebend für die Beeinflussung der Abschreckung durch Ultraschallunterstützung ist.

Tabelle 20: Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei unterschiedlichen Wasserhärtegraden.

Versuchsreihe: X5CrNi18-10 2S Wasser (85 °C, A = 37 µm, l = 10 mm)				
Wasserart	Härtegrad in mmol/l	elektrische Leitfähigkeit (bei 20 °C) *	Normierter Abschreckfaktor f_{t_n}	
		in mS/cm	Ø 18 mm	Ø 34 mm
Rostocker Leitungswasser	"hart" 2,9 [68]	0,64	2,67	4,06
Bremer Leitungswasser	"weich" 1,22 [89]	0,38	3,13	4,33
Destilliertes Wasser		neu 0,0005 transportiert 0,0018 gebraucht 0,03	4,69	4,77

* gemessen mittels Leitfähigkeitsmessgerät Portamess 913 Cond (Fa. Knick) am Institut für Chemie | Abteilung für Analytische und Technische Chemie | Universität Rostock

Da der Ultraschallwind und die Kavitation als ausschlaggebende Ursachen des Ultraschalleffektes auf die Flüssigkeitsabschreckung ausgeschlossen wurden, wird bezüglich der nichtlinearen Effekte der Schallstrahlungsdruck als wesentliche Ursache des Ultraschalleinflusses auf die Abschreckwirkung angesehen. Unterstützt wird diese These durch die folgenden Zusammenhänge.

Der Wert des Schallstrahlungsdrucks entspricht [6]:

$$p_L = \frac{I}{c} \quad (6.4)$$

Bei zwei sich unterscheidenden, aneinander grenzenden Medien ergibt sich der auf die Grenzfläche dieser Medien wirkende Schallstrahlungsdruck aus der Differenz beider Strahlungsdrücke. Der resultierende Schallstrahlungsdruck wirkt dabei immer in Richtung des Mediums mit dem geringeren Strahlungsdruck. [6]

Wendet man dies auf das Filmsieden beim ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschrecken an, zeigt sich, dass die Beträge der Schallstrahlungsdrücke in der Flüssigkeit und innerhalb des Dampffilms unabhängig von den Ultraschallparametern entscheidend von der jeweiligen Dichte abhängen (Gleichung (6.3)). Da die Dichte des Dampfes geringer als die der Flüssigkeit ist, wirkt der Schallstrahlungsdruck beim ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschrecken in Richtung des Dampffilms. Wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, kann der Schallstrahlungsdruck so stark wirken, dass es zur Ausbildung von Sprudeln und Fontänen kommt. Damit lässt sich schlussfolgern, dass der gerichtete Schallstrahlungsdruck, ähnlich wie der Schalldruck, eine Reduzierung der Dampffilmdicke und eine damit verbundene Erhöhung des Wärmeübergangs ins Medium erwarten lässt.

Der Schalldruck und der Schallstrahlungsdruck werden demnach als wesentliche Ursachen für die Beeinflussung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall angesehen.

6.5 Vergleich von Experiment und Simulation

Im Zuge dieser Arbeit konnte erfolgreich ein Modell zur Simulation des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens erstellt werden. Das Ziel, die entstehenden Eigenspannungen und Verzüge mittels Simulation abzubilden, wurde erreicht. An dieser Stelle sollen einige wichtige Modellparameter und deren Einfluss auf den Vergleich zwischen Experiment und Simulation diskutiert werden.

Beim Vergleich der experimentell bestimmten Eigenspannungen fällt auf, dass sowohl nach der einseitig als auch zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung keine Abhängigkeiten der Axialeigenspannungen in Umfangsrichtung der Probe vorliegen, obwohl während des Abschreckprozesses infolge der Ultraschallunterstützung tangentiale Temperaturgradienten am Probenrand

vorherrschen. Dies konnte durch die Simulation am Stahl X5CrNi18-10 bestätigt werden. Diese tangentialen Temperaturgradienten werden von den radialen Temperaturgradienten überlagert, die den Eigenspannungszustand dominieren.

Der Vergleich simulierter und experimentell ermittelter Axialeigenspannungen zeigt außerdem, dass sich die simulierten Eigenspannungen nach ein- und zweiseitiger Ultraschallunterstützung von den experimentell ermittelten Spannungen betragsmäßig um maximal 85 MPa unterscheiden. Diese Unterschiede sind in Relation zu dem komplexen Wärmebehandlungsmodell als relativ gering einzuschätzen. Eine Ursache für die Unterschiede könnten mit der experimentellen Erfassung der temperatur- und ortsabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten erklärt werden. Schon geringfügige Änderungen der WÜK können die simulierten Eigenspannungen laut MAJOREK et al. [91] entscheidend beeinflussen.

Bei der durchgeführten Simulation wurden vereinfachende Annahmen bezüglich der über die Randbedingungen implementierten WÜK getroffen. In Umfangsrichtung der Probenmittelebene wurden die vorliegenden WÜK einerseits, wie in Kapitel 3.2.6 beschrieben, abschnittsweise in 45°-Schritten bestimmt und im FE-Modell implementiert. Für den Wirkbereich des Ultraschalls wurde eine konstante Anfangshöhe, die dem Durchmesser der schallabgebenden Fläche von 18 mm entspricht, festgelegt. Bei der realen Abschreckung mit Ultraschallunterstützung ist es hingegen so, dass der Dampffilm nahezu punktuell aufreißt. Erst mit einer gewissen Zeitdifferenz entspricht der Durchmesser der dampffreien Fläche dem der Abschallfläche. Weiterhin wurden an den Stirnflächen der Probe WÜK vorgegeben, die aus der Messung der konventionellen Abschreckung bei 60 °C in der Probenmittelebene stammen. Dabei ist außerdem zu bedenken, dass der real vorliegende Unterschied der WÜK an der unteren und oberen Stirnfläche aufgrund von sich unterscheidenden Druck- und Strömungsverhältnissen somit keine Berücksichtigung findet.

Eine weitere entscheidende Einflussgröße auf die Temperatur- und Ortsabhängigkeit der WÜK stellen die korrekten thermophysikalischen Eigenschaften dar. Diese bilden die Grundlage für die WÜK-Berechnung mittels FDM. Die thermophysikalischen Eigenschaften wurden der *Sysweld*®-Datenbank entnommen und weichen sehr wahrscheinlich von denen der untersuchten Charge X5CrNi18-10 ab.

Neben den korrekten thermophysikalischen Eigenschaften besitzen auch das zugrunde gelegte Verfestigungsmodell und die mechanischen Werkstoffkennwerte entscheidende

Bedeutung, um den Abkühlvorgang eines metallischen Bauteils in einer verdampfenden Flüssigkeit simulieren zu können. Auch diese Kennwerte stammen aus der *Sysweld*®-Datenbank und weichen sehr wahrscheinlich von denen der untersuchten Charge X5CrNi18-10 ab.

Zudem wird bei der Simulation ein eigenspannungsfreier Ausgangszustand der Probe vor dem Abschrecken angenommen. In der Realität sind die Werkstücke jedoch nie eigenspannungsfrei. Auch durch ein vorheriges Erwärmen lassen sich die vorherrschenden Eigenspannungen nicht gänzlich abbauen, so dass der Ausgangszustand des Werkstücks entscheidenden Beitrag zum Eigenspannungszustand nach dem Abschrecken leistet.

Die genannten Erklärungsansätze können auch für die Begründung der Abweichungen bezüglich des entstehenden Verzuges zwischen Simulation und Experiment genutzt werden. Die maximalen Verschiebungen in Beschallungsrichtung sind für den Fall der einseitigen Ultraschallunterstützung nach der Simulation etwas größer als im Experiment. Für die zweiseitige Beschallung sind diese nach der Simulation hingegen etwas kleiner als die gemessenen. Grundsätzlich sind aber auch diese Unterschiede als gering einzuschätzen. Neben den bisher genannten Ursachen gibt es einen weiteren wichtigen Einflussfaktor auf das Ergebnis der berechneten Verzüge, welcher bei der Simulation ohne Berücksichtigung bleibt. Bei der Simulation wird ein homogener und isotroper Werkstoff angenommen. Der tatsächliche Ausgangszustand des untersuchten Werkstoffs wird nicht erfasst. In Hinblick auf entstehende Verzüge werden damit jedoch Verzugspotentiale aus vorangegangenen Fertigungsschritten vernachlässigt. Eine inhomogene Legierungselementverteilung durch Mikro- und Makroseigerungen weist beispielsweise ein Potential auf, zu einer anisotropen Längenänderung mit der Folge eines zusätzlichen Verzugsbeitrags zu führen [92, 93]. Daher besitzen selbst konventionell abgeschreckte Proben in der Regel eine Krümmung [92]. Damit könnte auch der relativ hohe Krümmungsbetrag bei zweiseitiger Beschallung aus dem Experiment erklärt werden.

Die simulierte und experimentell ermittelte Krümmungsrichtung nach einseitiger Ultraschallunterstützung stimmt überein. Die Richtung der Krümmungsänderung zeigt in Richtung der am längsten existierenden Filmsiedephase auf der sonotrodenabgewandten Seite bei 180° . Dies weist darauf hin, dass die Krümmung auf thermische

Spannungen zurückzuführen ist [94].

Nach zweiseitig ultraschallunterstützter Abschreckung wurde ebenfalls eine geringe Krümmung in Richtung der rechtsseitigen Sonotrode gemessen, während die Simulation keine Krümmung ergab. Dies ist einerseits mit der vereinfachenden Annahme gleicher WÜK vor den Sonotroden während der Simulation zu erklären und andererseits auf das geringfügig zeitversetzte Aufreißen des Dampffilms durch die gegenüberliegenden Sonotroden im Experiment zurückzuführen. Die verwendeten Ultraschallprozessoren sind zwar baugleich, jedoch nicht identisch, so dass sich geringe Unterschiede der Amplitude trotz vorheriger Messung nicht vermeiden ließen.

6.6 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Ultraschallunterstützung zu einer signifikanten Beeinflussung der Flüssigkeitsabschreckung metallischer Proben führt. Mit Hilfe der Prozessparameter lässt sich die Abschreckwirkung gezielt beeinflussen. Die Flüssigkeitsabschreckung lässt sich einerseits beschleunigen und vergleichmäßigen, andererseits lässt sich ebenso eine gezielt ungleichmäßige Abschreckung durchführen. Der Vorteil einer derartigen Variationsmöglichkeit des Abschreckvorgangs ist die Einstellung eines weiten Bereichs an Werkstoffstrukturen mit entsprechenden Werkstoffeigenschaften, was mittels konventioneller Flüssigkeitsabschreckung so nicht möglich ist. Daraus ergeben sich beispielsweise verschiedene Einsatzmöglichkeiten der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung. Die Beschleunigung und Vergleichmäßigung der Abschreckung lässt sich beispielsweise beim Durchhärteten von Stählen nutzen. Bei Stählen mit niedriger Einhärbarkeit könnten die durchhärtbaren Abmessungen vergrößert werden. Bei Stählen mit hoher Einhärbarkeit ließe sich eine Verringerung von Verzug und Eigenspannungen erzielen. Die gezielt ungleichmäßige Abschreckung könnte beispielsweise bei Stählen mit geringer Einhärbarkeit für eine gezielte lokale Härtung genutzt werden. Bei Stählen mit hoher Einhärbarkeit ließen sich wiederum Verzug und Eigenspannungen gezielt beeinflussen.

Bei der Abkühlung von Aluminiumbauteilen komplexer Geometrie wird häufig eine schonende Abkühlung gewünscht. Dabei sind Wasserabkühlungen bei Temperaturen zwischen 65 °C und 80 °C [95] üblich. Anhand der dargestellten Ergebnisse wird ersichtlich, dass die Ultraschallunterstützung in diesem Temperaturbereich zu einer

signifikanten Beeinflussung des Abkühlvorgangs führt. Folglich könnte die Ultraschallunterstützung bei derartigen Wassertemperaturen eine sinnvolle Anwendung finden.

Eine weitere Erhöhung normierter Abschreckfaktoren f_{t_n} ist denkbar. Diese ließe sich durch eine Anpassung der Beschallungsrichtung umsetzen, so dass die natürliche Bewegung der Benetzungsfront unterstützt wird. Bei dem hier verwendeten Versuchsaufbau wäre beispielsweise eine Beschallung der zylindrischen Probe von schräg unten (Winkel zwischen Sonotrodenmittelachse und Zylinderlängsachse $\neq 90^\circ$) vorstellbar. Des Weiteren könnte der Bereich der Ultraschallamplituden erweitert werden, um gerade bei der Stahlabschreckung bei höheren Badtemperaturen noch größere normierte Abschreckfaktoren zu erzielen.

Eine weitere Verbesserung der Abschreckgleichmäßigkeit ist ebenfalls möglich. Die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich durch Anwendung zusätzlicher Sonotroden eine weitere Verbesserung sowohl der axialen als auch der tangentialen Abschreckgleichmäßigkeit erzielen lässt. Es ist zu erwarten, dass sich mit weiteren Sonotroden zudem die gesamte Abschreckung auch größerer Bauteile vergleichmäßigen ließe.

In Hinblick auf die industrielle Anwendbarkeit bieten vereinzelte Bauteile oder einlagige Bauteilchargen günstige Voraussetzungen. Bei mehrlagigen Bauteilchargen wären Abschattungseffekte zu berücksichtigen und geeignete Sonotrodenanordnungen festzulegen. Vorstellbar wären auch großflächig ultraschallabgebende Beckenwände (ähnlich Ultraschall-Reinigungsbädern).

7 Zusammenfassung

Zur Einstellung von Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften metallischer Bauteile zählt die Wärmebehandlung zu den wichtigsten Verfahren. Das Abschrecken als Teilschritt der Wärmebehandlung ist dabei häufig von entscheidender Bedeutung, da währenddessen erzeugte übersättigte Mischkristalle selbst eine hohe Mischkristallverfestigung aufweisen oder einen Ausgangszustand für spätere Teilchenverfestigungen darstellen (beispielsweise beim martensitischen Härteten von Stählen oder beim Ausscheidungshärteten von Aluminiumlegierungen).

Das Abschrecken wird aufgrund eines relativ geringen Aufwandes und hoher mittlerer Abkühlgeschwindigkeiten überwiegend in Flüssigkeitsbädern (Wasser, Öl) durchgeführt. Der dabei auftretende Leidenfrost-Effekt führt jedoch zu einer ungleichmäßigen Abschreckung. Die Unterstützung der Flüssigkeitsabschreckung mit Ultraschall stellt eine neuartige Möglichkeit dar, den sich während des Filmsiedens bildenden Dampffilm zu destabilisieren und eine beschleunigte und gleichmäßige Abkühlung zu realisieren.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der Ultraschallparameter auf die Abschreckwirkung und die Abschreckgleichmäßigkeit sowie die wirkenden Mechanismen der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung von Aluminium- (EN AW-6082) und Stahlzylindern (X5CrNi18-10, C45E) systematisch untersucht und charakterisiert.

Dazu wurden anhand eines entwickelten Versuchsstandes charakteristische Abschreckversuche sowohl mit als auch ohne Ultraschallunterstützung mit variierenden Prozessparametern durchgeführt. Anhand gemessener Abkühlverläufe wurden Abkühlraten, Wärmeübergangskoeffizienten sowie Temperaturdifferenzen bestimmt und Aussagen zur Beeinflussung der Abschreckwirkung sowie der Abschreck-

gleichmäßigkeit getroffen. Ausgewählte Proben wurden einer Eigenschaftscharakterisierung (metallographische Untersuchungen, Härteprüfungen, Rissprüfungen, Eigenspannungs- sowie Verzugsbestimmungen) unterzogen.

Die durchgeführten Abschreckversuche haben gezeigt, dass die Ultraschallunterstützung in Abhängigkeit der Prozessparameter zu einer signifikanten Beeinflussung der Abschreckvorgänge führt. Infolge der Ultraschallunterstützung kommt es im Vergleich zur konventionellen Abschreckung zu einer Destabilisierung des Dampffilms. Diese ist mit einer Beschleunigung der Abschreckung in der Filmphase, einer Reduzierung der Filmsiededauer, einer Steigerung der Abkühlraten vor der Sonotrode sowie mit einer Reduzierung der Gesamtabkühlzeit verbunden. In axialer Richtung lässt sich auf den sonotrodenzugewandten Seiten eine potentielle Vergleichsmäßigung der Abschreckung beobachten. In Umfangsrichtung der Probe zeigt sich bei der einseitigen Beschallung eine ungleichmäßige Abschreckung verglichen zur konventionellen Abschreckung. Diese tangentiale Ungleichmäßigkeit lässt sich durch die zweiseitige Ultraschallunterstützung deutlich verringern.

Ein zunehmender Einfluss auf die Abschreckwirkung ist mit zunehmender Ultraschallamplitude, abnehmendem Abstand zwischen Sonotrode und Probenoberfläche sowie zunehmender Größe der schallabgebenden Fläche zu verzeichnen. Über diese Prozessparameter sowie unter Berücksichtigung eines geeigneten Abschreckmediums (Wasser oder Öl) mit einer geeigneten Badtemperatur lassen sich sowohl die Abschreckwirkung als auch die Abschreckgleichmäßigkeit gezielt einstellen. Die Flüssigkeitsabschreckung lässt sich einerseits beschleunigen und vergleichmäßigen, andererseits lässt sich ebenso eine gezielt ungleichmäßige Abschreckung durchführen. Eine derartige Variationsmöglichkeit des Abschreckvorgangs bringt den Vorteil mit sich, einen weiten Bereich an Werkstoffstrukturen mit entsprechenden Werkstoffeigenschaften einstellen zu können. Anhand des Vergütungsstahls wurde der Nachweis erbracht, dass sich mittels Ultraschallunterstützung eine gezielte lokale Härtung realisieren lässt.

Als wesentliche Ursachen für die Beeinflussung der Flüssigkeitsabschreckung mittels Ultraschall werden der Schalldruck und der Schallstrahlungsdruck angesehen. Beide werden mit einer Reduzierung der Dampffilmdicke und einer damit verbundenen Erhöhung des Wärmeübergangs in die Abschreckflüssigkeit in Zusammenhang gebracht. Weitere in der Literatur häufig genannte nichtlineare Effekte der Ultraschallausbreitung (Ultraschallwind und Kavitation) können hingegen als

Hauptursachen für den Ultraschalleffekt auf die Abkühlwirkung ausgeschlossen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte zudem erfolgreich ein Modell zur Simulation des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens erstellt werden. Mit diesem Simulationsmodell ist es möglich, die bei der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung entstehenden Eigenschaften und Verzüge abzubilden.

Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens lassen sich qualitativ auf andere Werkstoffe und andere Bauteilgeometrien übertragen.

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rabea Redmann

Rostock, den 27.08.2014

Literaturverzeichnis

1. Günther, B., Hansen, K. H. und Veit, I.: "Ausgewählte Kapitel; Grundlagen, aktuelle Probleme und Messtechnik" *Technische Akustik*, 8, Expert Verlag, Renningen, **2008**.
2. Schlegel, W. und Bille, J.: "Medizinische Strahlenphysik" *Medizinische Physik*, Band 2, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, **2002**.
3. Kuttruff, H.: "Physik und Technik des Ultraschalls" S. Hirzel Verlag, Stuttgart, **1988**.
4. Millner, R.: "Wissensspeicher Ultraschalltechnik" VEB Fachbuchverlag, Leipzig, **1987**.
5. Šutilov, V. A.: "Physik des Ultraschalls" *Grundlagen*, Verlag der Leningrader Universität, Leningrad, **1984**.
6. Matauscheck, J.: "Einführung in die Ultraschalltechnik" 1st edition, VEB Verlag Technik, Berlin, **1957**.
7. Henn, H., Sinambari, G. R. und Fallen, M.: "Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele" *Ingenieurakustik*, 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, **2008**.
8. DIN: "Akustik, Lärmminderung und Schwingungstechnik: VDI 3733 Geräusche bei Rohrleitungen" *DIN-Taschenbuch 317*, 4, 1. Auflage, Beuth, Berlin Wien Zürich, **1997**.
9. Kohlrausch, F.: "Praktische Physik" Band 1, 24, Teubner-Verlag, **1996**.
10. Wilson, W. D.: "Speed of Sound in Distilled Water as a Function of Temperature and Pressure", THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 31 (8) **1959**, S. 1067-1072.
11. Fujii, K. I. and Masui, R.: "Accurate measurements of the sound velocity in pure water by combining a coherent phase-detection technique and a variable path-length interferometer", Journal of the Acoustical Society of America, 93 (1) **1993**, S. 276-282.
12. Schaaffs, W.: "Landolt-Börnstein Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik" Neue Serie, Bd. 5 Molekularakustik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, **1967**.
13. Benedetto, G., Gavioso, R. M., Albo, P. A. G., Lago, S., Ripa, D. M. and Spagnolo, R.: "Speed of sound in pure water at temperatures between 274 and 394 K and at pressures up to 90 MPa", International Journal of Thermophysics, 26 (6) **2005**, S. 1667-1680.
14. Del Grosso, V. A. and Mader, C. W.: "Speed of sound in pure water", Journal of the Acoustical Society of America, 52 (5 Pt 2) **1972**, S. 1442-1446.
15. Kroebel, W. and Mahrt, K. H.: "Recent results of absolute sound velocity measurements in pure water and sea water at atmospheric pressure", Acustica, 35 (3) **1976**, S. 154-164.
16. Isay, W. H.: "Kavitation" 3. erweiterte Auflage, Schiffahrts-Verlag "Hansa" Hamburg, Hamburg, **1989**.
17. Chavez, M., Tsumura, R. and Sosa, V.: "Speed of sound in saturated pure water", Journal of the Acoustical Society of America, 77 (2) **1985**, S. 420-423.
18. Kočiš, S. and Figura, Z.: "Ultrasonic Measurements and Technologies" 1st edition, Chapman & Hall and Ister Science Limited Translation, London, **1996**.
19. D'Ans, J. und Lax, E.: "Makroskopische physikalisch-chemische Eigenschaften" *Taschenbuch für Chemiker und Physiker*, Band 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, **1967**.
20. Jones, P. L. F. and Gale, A. J.: "Ultra-sonic velocity in water", Nature, 157 (3985) **1946**, S. 341.

-
21. Barlow, A. J. and Yazgan, E.: "Phase change method for the measurement of ultrasonic wave velocity and a determination of the speed of sound in water", British Journal of Applied Physics, 17 (6) **1966**, S. 807-819.
 22. McSkimin, H. J.: "Velocity of Sound in Distilled Water for the Temperature Range 20 -75 °C", THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 37 (2) **1965**, S. 325-328.
 23. Eckstein, H.-J.: "Technologie der Wärmebehandlung von Stahl" 1. Auflage, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, **1976**.
 24. Nukiyama, S.: "Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure", Journal of the Japanese Society of Mechanical Engineering, 37 **1934**, S. 367-374.
 25. Liščić, B., Tensi, H. M., Canale, L. C. F. and Totten, G. E.: "Quenching Theory and Technology" 2nd edition, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, **2010**.
 26. Jeschar, R., Maaß, R. und Köhler, C.: "Wärmeübertragung beim Kühlen heißer Metalle mit verdampfenden Flüssigkeiten", Härterei Technische Mitteilungen, 44 (3) **1989**, S. 133-137.
 27. Maaß, R. und Jeschar, R.: "Einflussgrößen des Wärmeüberganges beim Abschrecken von Metallen in Wasser", Gas Wärme International, 38 (3) **1989**, S. 142-150.
 28. Maaß, R.: "Untersuchung zur Wärmeübertragung beim Abschreckhärteten", Dissertation, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen, Clausthal, Technische Universität Clausthal, **1988**.
 29. Jeschar, R., Koehler, C., Specht, E. und Heidt, V.: "Methoden zur definierten Abkühlung metallischer Werkstoffe", Gas Wärme International, 38 (4) **1989**, S. 223-229.
 30. Tensi, H. M., Stich, A., Spies, H. J. und Spengler, A.: "Grundlagen des Abschreckens durch Tauchkuehlen", Härterei Technische Mitteilungen, 50 (4) **1995**, S. 254-258.
 31. Yao, S. C. and Henry, R. E.: "Experiments of quenching under pressures" 6th International Heat Transfer Conference, **1978**, S.
 32. Stenzel, W. und Schultze, R.: "Verdampfungskühlung Teil 2 Theorie der Verdampfungskühlung und Messung des Wärmeübergangs bei Härteölen und Salzlösungen", Chemie ingenieur-Technik, 30. Jahrgang (11) **1958**, S. 720-728.
 33. Wünning, J.: "Berechnung und Steuerung des Temperaturverlaufs beim Abschrecken von Stahl in Wasser und Öl", Härterei Technische Mitteilungen, 36 **1981**, S. 231-141.
 34. Fand, R. M. and Cheng, P.: "The influence of sound on heat transfer from a cylinder in crossflow", International Journal of Heat and Mass Transfer, 6 (7) **1965**, S. 571-596.
 35. Wong, S. W. and Chon, W. Y.: "Effects of ultrasonic vibrations on heat transfer to liquids by natural convection and by boiling", Aiche Journal, 15 (2) **1969**, S. 281-288.
 36. Yukawa, H., Hoshino, T. and Saito, H.: "Effect of ultrasonic vibration on free convective heat transfer from an inclined plate in water", Heat Transfer - Japanese Research, 5 (4) **1976**, S. 1-16.
 37. Hoshino, T., Yukawa, H. and Saito, H.: "The effect of ultrasonic vibrations on free convective heat transfer from heated wire to water", Heat Transfer - Japanese Research, 5 (1) **1976**, S. 37-49.
 38. Hoshino, T. and Yukawa, H.: "Physical mechanism of heat-transfer from heated and cooled cylinder to water in ultrasonic standing wave field", Journal of Chemical Engineering of Japan, 12 (5) **1979**, S. 347-352.

39. Park, K. A. and Bergles, A. E.: "Ultrasonic enhancement of saturated and subcooled pool boiling", International Journal of Heat and Mass Transfer, 31 (3) **1988**, S. 664-667.
40. Iida, Y. and Tsutsui, K.: "Augmentation of film boiling heat transfer by an ultrasonic wave (1st report, experiments with a platinum wire)", Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 55 (509) **1989**, S. 194-199.
41. Nakayama, A. and Kano, M.: "Enhancement of saturated nucleate pool boiling heat transfer by ultrasonic vibrations", Heat Transfer - Japanese Research, 20 (5) **1991**, S. 407-417.
42. Nomura, S. and Nakagawa, M.: "Cavitation intensity and heat transfer on bottom surface by applying ultrasonic vibration", Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 59 (562) **1993**, S. 2028-2034.
43. Yamashiro, H., Honda, H., Takamatsu, H. and Yano, T.: "Enhancement of cooling rate during rapid quenching of a thin horizontal wire by ultrasonic vibration", Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 62 (603) **1996**, S. 3943-3949.
44. Yamashiro, H., Takamatsu, H. and Honda, H.: "Enhancement of cooling rate during rapid quenching of a thin wire by ultrasonic vibration", Heat Transfer - Japanese Research, 27 (1) **1998**, S. 16-30.
45. Yamashiro, H., Takamatsu, H. and Honda, H.: "Effect of ultrasonic vibration on transient boiling heat transfer during rapid quenching of a thin wire in water", Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme, 120 (1) **1998**, S. 282-286.
46. Nomura, S., Murakami, K., Aoyama, Y. and Ochi, J.: "Effects of changes in frequency of ultrasonic vibrations on heat transfer", Heat Transfer - Asian Research, 29 (5) **2000**, S. 358-372.
47. Nomura, S., Yamamoto, A. and Murakami, K.: "Ultrasonic heat transfer enhancement using a horn-type transducer", Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers, 41 (5 B) **2002**, S. 3217-3222.
48. Kim, H. Y., Kim, Y. G. and Kang, B. H.: "Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration", International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (12-13) **2004**, S. 2831-2840.
49. Kwon, Y. C., Kwon, J. T., Jeong, J. H. and Lee, S. H.: "Experimental study on CHF enhancement in pool boiling using ultrasonic field", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 11 (5) **2005**, S. 631-637.
50. Bartoli, C. and Baffigi, F.: "Effects of ultrasonic waves on the heat transfer enhancement in subcooled boiling", Experimental Thermal and Fluid Science, 35 (3) **2011**, S. 423-432.
51. Bartoli, C. and Baffigi, F.: "Use of ultrasonic waves in sub-cooled boiling", Applied Thermal Engineering, 47 **2012**, S. 95-110.
52. Legay, M., Simony, B., Boldo, P., Gondrexon, N., Le Person, S. and Bontemps, A.: "Improvement of heat transfer by means of ultrasound: Application to a double-tube heat exchanger", Ultrasonics Sonochemistry, 19 (6) **2012**, S. 1194-1200.
53. Baffigi, F. and Bartoli, C.: "Influence of the ultrasounds on the heat transfer in single phase free convection and in saturated pool boiling", Experimental Thermal and Fluid Science, 36 **2012**, S. 1-11.

54. Rahimi, M., Dehbani, M. and Abolhasani, M.: "Experimental study on the effects of acoustic streaming of high frequency ultrasonic waves on convective heat transfer: Effects of transducer position and wave interference", International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (5) **2012**, S. 720-725.
55. Harvey, R. F.: "Ultrasonic Quenching", Metal Treating, **1966**, S. 2-5.
56. Chachin, V. N. and Eremin, V. E.: "Effect of ultrasonic vibrations on the cooling capacity of the quenching medium", Metal Science and Heat Treatment, 8 (9) **1966**, S. 692-693.
57. Zhelokhovtseva, R. K.: "elimination of quenching cracks by means of optimization of cooling conditions", Steel in the USSR, 15 (5) **1985**, S. 238-239.
58. Iida, Y., Tsutsui, K. and Sasaki, J.: "Effect of ultrasonic wave application for the rapid cool-down process of high-temperature solids submerged in liquid", Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 56 (526) **1990**, S. 1780-1784.
59. Li, Y., Yu, G., Cheng, C. and Niu, Y.: "Investigation on Characteristics of Ultrasonic Field Quenching", Transactions of Metal heat Treatment, 13 (3) **1992**, S. 10.
60. Prezelj, J. and Cudina, M.: "A sound pressure field during the quenching of a steel specimen in different water solutions", Metalurgija, 50 (1) **2011**, S. 37-40.
61. Kiani, H., Sun, D. W. and Zhang, Z.: "The effect of ultrasound irradiation on the convective heat transfer rate during immersion cooling of a stationary sphere", Ultrasonics Sonochemistry, 19 (6) **2012**, S. 1238-1245.
62. Župan, J., Filetin, T. and Zmak, I.: "Enhancement of heat transfer characteristics of liquid quenchants" Quenching Control and Distortion - Proceedings of the 6th International Quenching and Control of Distortion Conference, Including the 4th International Distortion Engineering Conference, **2012**, S. 519-527.
63. Polmear, I. J.: "From Traditional Alloy to Nanocrystals" Light Alloys, 4th edition, Butterworth-Heinemann, **2006**.
64. Kammer, C.: "Grundlagen und Werkstoffe" Aluminium-Taschenbuch, Band 1, 15. Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, **1998**.
65. Cassel, B.: "A stepwise specific heat technique for dynamic DSC", American Laboratory, 32 (1) **2000**, S. 23-26.
66. Merzlyakov, M. and Schick, C.: "Step response analysis in DSC - A fast way to generate heat capacity spectra", Thermochimica Acta, 380 (1) **2001**, S. 5-12.
67. Orlich, J., Rose, A. und Wiest, P.: "Zeit-Temperatur-Austenitisierung-Schaubilder" Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 3, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, **1973**.
68. Eurawasser-Nord: [URL: <http://www.eurawasser-nord.de/>], Stand **01/2010 - 06/2014**.
69. Milkereit, B., Beck, M., Reich, M., Kessler, O. and Schick, C.: "Precipitation kinetics of an aluminium alloy during Newtonian cooling simulated in a differential scanning calorimeter", Thermochimica Acta, **2011**, S.
70. Hernandez-Morales, B., Brimacombe, J. K. and Hawbolt, E. B.: "Application of inverse techniques to determine heat- transfer coefficients in heat- treating operations", Journal of Materials Engineering and Performance, 1 (6) **1992**, S. 763-771.
71. Majorek, A., Mueller, H. und Macherauch, E.: "Untersuchungen zur Ortsabhängigkeit des Wärmeübergangs beim Tauchkuehlen von Stahlzylindern", HTM - Haerterei-Technische Mitteilungen, 50 (1) **1995**, S. 36-41.
72. Ling, X., Keanini, R. G. and Cherukuri, H. P.: "A modified sequential function specification finite element-based method for parabolic inverse heat conduction problems", Computational Mechanics, 36 (2) **2005**, S. 117-128.

73. Lübben, T., Bomas, H., Hougardy, H. P. und Mayr, P.: "Beschreibung der Abschreckwirkung flüssiger Abschreckmittel am Beispiel zweier Härteöle (1. Teil)", Härterei Technische Mitteilungen, 46 (1) **1991**, S. 24-34.
74. Redmann, R., Reich, M. and Kessler, O.: "Heat transfer coefficients of ultrasonic assisted water quenching of AlSi1MgMn-cylinders" Proc. 3rd International Conference on Distortion Engineering, 3, **2011**, S. 525-532.
75. Milkereit, B., Wanderka, N., Schick, C. and Kessler, O.: "Continuous cooling precipitation diagrams of Al-Mg-Si alloys", Materials Science and Engineering A, 550 **2012**, S. 87-96.
76. Demirel, C.: "Experimentelle Untersuchung und Simulation des Abschreckprozesses von bauteilähnlichen Geometrien aus G-AlSi7Mg", Dissertation, Fakultät III - Prozesswissenschaften, Berlin, Technische Universität Berlin, **2009**.
77. Weck, E. und Leistner, E.: "Metallographische Anleitung zum Farbätzen nach dem Tauchverfahren, Teil 3: Nichteisenmetalle, Hartmetalle und Eisenwerkstoffe, Nickel-Basis- und Kobalt-Basis-Legierungen" Deutscher Verlag für Schweißtechnik, Düsseldorf, **1986**.
78. Steeb, S.: "Röntgen- und Elektronenbeugung - Grundlagen und Anwendungen in der Rohstoff- und Produktkontrolle" Kontakt & Studium: Mess- und Prüftechnik, Band 144 Expert-Verlag, Sindelfingen, **1985**.
79. Spiell, L., Schwarzer, R., Behnken, H. und Teichert, G.: "Moderne Röntgenbeugung" Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker, 1. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, **2005**.
80. Redmann, R. und Kessler, O.: "Charakterisierung der Abschreckwirkung einer ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von Aluminiumzylinern", HTM Journal of Heat Treatment and Materials, 66 (5) **2011**, S. 281-289.
81. Redmann, R. and Kessler, O.: "Ultrasonic assisted water quenching of aluminium and steel cylinders", International Heat Treatment and Surface Engineering, 6 (3) **2012**, S. 115-121.
82. Hougardy, H. P.: "Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle" 2. neubearb. Auflage Nachdr., Stahleisen-Verlag, **2010**.
83. Herforth, L. und Winter, H. M.: "Grundlagen und Anwendungen in Physik, Technik, Industrie, Biologie und Medizin" Ultraschall, B.G.Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, **1958**.
84. Segerberg, S.: "Inverkan av härdgadsets yta pa kylningsförlopp och härdningsresultat" ivf-resultat 88605, Institutet för Verkstadsteknisk Forskning, Förlag, M., **1988**, S. 1-29.
85. Flament, G., Moreaux, F. and Martin, M.: "Destabilisation de la calefaction: Propagation du front de mouillage", Letters in Heat and Mass Transfer, 6 (3) **1979**, S. 205-213.
86. Nomura, S., Murakami, K. and Sasaki, Y.: "Streaming induced by ultrasonic vibration in a water vessel", Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers, 39 (6 A) **2000**, S. 3636-3640.
87. Nomura, S. and Nakagawa, M.: "Cavitation intensity and sound pressure by ultrasonic vibration on surface of heating elements in water vessel", Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, 60 (571) **1994**, S. 989-996.
88. Heller, W.: "Hydrodynamische Effekte unter besonderer Berücksichtigung der Wasserqualität und ihre Messverfahren", Habilitation, Institut für Strömungsmechanik, Dresden, Technische Universität Dresden, **2005**.

-
- 89. swb-Gruppe: [URL: <http://www.swb-gruppe.de>], **Stand 10.2011 - 06.2014.**
 - 90. Peter, W.: "Über den Abkühlungsvorgang in flüssigen Härtemitteln und seine Beeinflussung durch die Oberflächenbeschaffenheit des Härtgutes", Härterei Technische Mitteilungen, 5 **1950**, S. 65-95.
 - 91. Majorek, A., Scholtes, B., Muller, H. and Macherach, E.: "Influence of heat transfer on the development of residual stresses in quenched steel cylinders", Steel Research, 65 (4) **1994**, S. 146-151.
 - 92. Prinz, C. and Rentsch, R.: "Experimental investigation concerning the development of distortion potential during the production of 20MnCr5", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 43 (1-2) **2012**, S. 63-67.
 - 93. Hunkel, M.: "Modelling of phase transformations and transformation plasticity of a continuous casted steel 20MnCr5 incorporating segregations", Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 43 (1-2) **2012**, S. 150-157.
 - 94. Frerichs, F., Lübben, T., Hoffmann, F., Mayr, P., Zoch, H. W., Scholtes, B. und Krug, P.: "Einfluss von gezielt asymmetrischen Fertigungsbedingungen auf den Verzug von Wellen infolge von Abschreckprozessen", HTM - Haerterei-Technische Mitteilungen, 60 (6) **2005**, S. 323-330+303.
 - 95. ASM-International: "Heat Treating" ASM Handbook, 4, 8, **2007**.

Anhang

A. Abkürzungsverzeichnis

DSC	Differential Scanning Calorimetry
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
OES	Optische Emissionsspektroskopie
OPS	oxidische Poliersuspension
US	Ultraschall
WÜK	Wärmeübergangskoeffizient(en)
ZTU	Zeit-Temperatur-Umwandlung
1S	einseitig
2S	zweiseitig
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

B. Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Ultraschallamplitude
c	Schallgeschwindigkeit
c_p	spezifische Wärmekapazität
d	Durchmesser
E	Elastizitätsmodul
f	Frequenz
f_{t_n}	normierter Abschreckfaktor
g_{T_n}	normierter Temperaturdifferenzfaktor
h	Abstand von der unteren Stirnfläche der Probe
I	Schallintensität
K_{Fl}	Kompressionsmodul der Flüssigkeit
l	Abstand zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche
P	Leistung
p	Schalldruck
p_L	Langevinscher Schallstrahlungsdruck
q_α	konvektiver Wärmestrom

q_ε	Wärmestrom durch Wärmestrahlung
q_λ	Wärmestrom durch Wärmeleitung
q_v	Wärmestrom durch Verdampfung
R_e	Fließspannung
R_z	gemittelte Rautiefe
S_0	Fläche
T	Temperatur
T_B	Badtemperatur
T_S	Siedetemperatur
T_w	Wandtemperatur
t	Zeit
u	Verschiebung
V	Volumen
v	Schallschnelle, Geschwindigkeit
y	Auslenkung der Teilchen von der Ruhelage
Z	Schallkennimpedanz

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient, Absorptionskoeffizient
α_m	mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient
β_{Fl}	Kompressibilitätszahl der Flüssigkeit
Δ	Differenz
δ	Dicke des Dampffilms
λ	Wellenlänge, Wärmeleitfähigkeit
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
χ	Temperaturleitfähigkeit
ω	Kreisfrequenz

Sonstige Symbole

\emptyset	Durchmesser (der schallabgebenden Fläche)
-------------	---

C. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Momentdarstellung von Schallfeldgrößen in einer ebenen fortschreitenden Schallwelle [1].....	4
Abbildung 2:	Schematischer Aufbau eines Ultraschallsystems.....	7
Abbildung 3:	Schallgeschwindigkeit von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur [19].....	15
Abbildung 4:	Abkühlphasen verdampfender Abschreckflüssigkeiten in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit.	17
Abbildung 5:	Abkühlphasen verdampfender Abschreckflüssigkeiten in Anlehnung an [24] in Abhängigkeit von Wärmestromdichte, Wärmeübergangskoeffizient und Temperatur – A Filmsieden, B Übergangssieden, C Blasensieden, D Konvektion.	17
Abbildung 6:	Wärmeübergangsmechanismen in der Filmsiedephase in Anlehnung an [25].	18
Abbildung 7:	Gefüge von EN AW-6082 im stranggepressten Ausgangszustand (Aufnahme senkrecht zur Strangpressrichtung).	28
Abbildung 8:	Ausgangsgefüge von X5CrNi18-10 (Aufnahme senkrecht zur Ziehrichtung).	30
Abbildung 9:	Verfestigung von X5CrNi18-10 für unterschiedliche Temperaturen in einem Bereich von 20 °C bis 1000 °C.	32
Abbildung 10:	Ausgangsgefüge von C45E (Aufnahme senkrecht zur Ziehrichtung).	33
Abbildung 11:	Abschreckeinrichtung der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung (hier: Abschreckmedium Öl).	34
Abbildung 12:	Nulllinie der Sonotrode am schwingungsfreien Flansch.	35
Abbildung 13:	Anordnung der Thermoelementbohrungen in Umfangsrichtung der Probe.....	37
Abbildung 14:	Probenabmessungen.	37
Abbildung 15:	Erwärmung eines Zylinders aus C45E von Raumtemperatur auf 840 °C im Schutzgasofen.	38
Abbildung 16:	Resultierender radialer Härteverlauf in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung von C45E-Zylindern nach unterschiedlichen Haltedauern.	38
Abbildung 17:	Veränderung der Probenoberfläche (X5CrNi18-10) mit zunehmender Anzahl (Vi = Versuch i) konventioneller Abschreckungen in Wasser bei 85 °C.	41
Abbildung 18:	Veränderung des Abkühlverhaltens (randnah) von X5CrNi18-10 mit zunehmender Anzahl (Vi = Versuch i) konventioneller Abschreckungen in Wasser bei 85 °C.	42
Abbildung 19:	2D-FE-Halbmodell zur thermischen Simulation.	45

Abbildung 20:	Probenquerschnitt bei einseitiger Beschallung – a) Messpositionen der Thermoelemente – b) abschnittsweise Definition der Wärmeübergangs-koeffizienten (WÜK) entlang des Umfangs – c) zusätzlicher der Schallausbreitungsrichtung entgegengesetzter Wärmestrom durch Ultraschallunterstützung in Anlehnung an [74].....	46
Abbildung 21:	Exemplarischer Vergleich von simulierten und gemessenen Abkühlkurven von EN AW-6082 bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 85 °C in Anlehnung an [74].	47
Abbildung 22:	Schematische Darstellung der retro-inversen Analyse zur Bestimmung der WÜK von EN AW-6082.....	48
Abbildung 23:	Exemplarische berechnete und angepasste Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) von EN AW-6082 bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 85 °C in Anlehnung an [74].	49
Abbildung 24:	Schematische Darstellung der Positionen der dargestellten Ausschnitte lichtmikroskopischer Aufnahmen.....	51
Abbildung 25:	Schematische Darstellung der Härteprüfpositionen.....	51
Abbildung 26:	Schematische Darstellung zur Angabe der Höhe normierter Abschreckfaktoren und Temperaturdifferenzfaktoren mittels Säulendiagramm bei unterschiedlichen Mediumtemperaturen.	56
Abbildung 27:	Randabkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen [80].	57
Abbildung 28:	Bilderserie der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.	57
Abbildung 29:	Bilderserie der konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 80 °C.	58
Abbildung 30:	Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C in Anlehnung an [80].	61
Abbildung 31:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.....	62
Abbildung 32:	Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasser-abschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.....	63
Abbildung 33:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.	63
Abbildung 34:	Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.	64

Abbildung 35:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.....	65
Abbildung 36:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.....	66
Abbildung 37:	Normierte Abschreckfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082	67
Abbildung 38:	Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 (\varnothing 50 mm, A = 19 μm , l = 50 mm, 85 °C)	68
Abbildung 39:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.....	68
Abbildung 40:	Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082.....	69
Abbildung 41:	Gefüge von EN AW-6082 im Zustand T4 nach konventioneller Wasserabschreckung bei 85 °C.....	70
Abbildung 42:	Langsamste Abkühlung des Versuchsprogramms im kontinuierlichen Zeit-Temperatur-Ausscheidungs-Diagramm der untersuchten Charge von EN AW-6082 in Anlehnung an [75].....	71
Abbildung 43:	Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.....	74
Abbildung 44:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei verschiedenen Wassertemperaturen.....	75
Abbildung 45:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 75 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.....	75
Abbildung 46:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Ausnahmerscheinung beim Vergleich des Einflusses zweier Größen der schallabgebenden Fläche.....	76
Abbildung 47:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.....	77
Abbildung 48:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.....	78

Abbildung 49:	Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.....	78
Abbildung 50:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.	79
Abbildung 51:	Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082 (\varnothing 50 mm, A = 18 μm , l = 10 mm, 85 °C).	80
Abbildung 52:	Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082.	81
Abbildung 53:	Betrag der maximalen axialen Temperaturdifferenzen (Rand 0°) der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von EN AW-6082 bei 85 °C.	82
Abbildung 54:	Randabkühlverläufe der konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.	85
Abbildung 55:	Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C in Anlehnung an [81].	87
Abbildung 56:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.....	88
Abbildung 57:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.	89
Abbildung 58:	Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.	90
Abbildung 59:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.	90
Abbildung 60:	Bilderserie der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (\varnothing 50 mm, A = 19 μm , l = 50 mm) eines Zylinders aus X5CrNi18-10 bei 75 °C.	91
Abbildung 61:	Randabkühlverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude in Anlehnung an [81].	92
Abbildung 62:	Randabkühlratenverläufe der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.	92

Abbildung 63:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der einseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.....	93
Abbildung 64:	Normierte Abschreckfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	94
Abbildung 65:	Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 (\varnothing 34 mm, A = 19 μm , l = 10 mm, 75 °C).	95
Abbildung 66:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.....	96
Abbildung 67:	Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der einseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	97
Abbildung 68:	Oberflächennahe Axialeigenspannungsverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	98
Abbildung 69:	Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	98
Abbildung 70:	Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C (unten: zeitlicher Ausschnitt der Bilderserie der Ultraschallunterstützung).....	101
Abbildung 71:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei verschiedenen Wassertemperaturen.....	102
Abbildung 72:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.....	103
Abbildung 73:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 75 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.....	104
Abbildung 74:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude	105
Abbildung 75:	Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude	105
Abbildung 76:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C – Ausnahmeerscheinungen beim Vergleich des Einflusses der Größe der schallabgebenden Fläche.	106

Abbildung 77:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.....	107
Abbildung 78:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	108
Abbildung 79:	Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 (\varnothing 34 mm, A = 18 μm , l = 10 mm, 75 °C).	109
Abbildung 80:	Wärmeübergangskoeffizienten (WÜK) in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.....	110
Abbildung 81:	Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	111
Abbildung 82:	Oberflächennahe Axialeigenspannungsverlauf von X5CrNi18-10 in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	112
Abbildung 83:	Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	112
Abbildung 84:	Bilderserien der konventionellen im Vergleich zur zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (Pfeile markieren Wiederbenetzungsfronten).	116
Abbildung 85:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Größe der schallabgebenden Fläche.....	117
Abbildung 86:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss des Abstandes zwischen schallabgebender Fläche und Probenoberfläche.	118
Abbildung 87:	Randabkühlverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.	118
Abbildung 88:	Randabkühlratenverläufe der zweiseitig ultraschallunterstützten im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C – Einfluss der Ultraschallamplitude.	119
Abbildung 89:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (unterschiedliche Blautöne dienen der Übersichtlichkeit).....	120
Abbildung 90:	Abkühlverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 (\varnothing 18 mm, A = 126 μm , l = 10 mm, 60 °C).	121
Abbildung 91:	Normierte Temperaturdifferenzfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C (unterschiedliche Blautöne dienen der Übersichtlichkeit).....	122

Abbildung 92:	Betrag der maximalen axialen Temperaturdifferenzen (Rand 0°) der zweiseitig ultraschallunterstützten und konventionellen Ölabschreckung von X5CrNi18-10 bei 60 °C.....	123
Abbildung 93:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von C45E.....	126
Abbildung 94:	Abkühlverlauf einer zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (\varnothing 18 mm, A = 37 μm , I = 10 mm, 60 °C) im ZTU-Diagramm von C45E in Anlehnung an [82].....	127
Abbildung 95:	Randgefüge von C45E nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 37 μm) im Vergleich zur konventionellen Wasserabschreckung bei 60 °C.....	128
Abbildung 96:	Resultierende radiale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 37 μm) und konventioneller Wasserabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	129
Abbildung 97:	Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 37 μm) und konventioneller Wasserabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	129
Abbildung 98:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von C45E.....	131
Abbildung 99:	Randgefüge nach zweiseitig ultraschallunterstützter (A = 37 μm) im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung bei 60 °C von Zylindern aus C45E.....	132
Abbildung 100:	Resultierende radiale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (A = 37 μm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	133
Abbildung 101:	Abkühlverlauf einer zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung (\varnothing 34 mm, A = 37 μm , I = 10 mm, 60 °C) im ZTU-Diagramm von C45E in Anlehnung an [82].....	134
Abbildung 102:	Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (A = 37 μm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	134
Abbildung 103:	Partielle martensitische Härtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter Ölabschreckung mit einer Amplitude von 126 μm (\varnothing 18 mm, I = 10 mm) von Zylindern aus C45E bei 60 °C...135	
Abbildung 104:	Resultierende radiale Härteverläufe in der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 126 μm , I = 10 mm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	136
Abbildung 105:	Resultierende Randhärteverläufe in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 126 μm , I = 10 mm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	136

Abbildung 106:	Randgefüge in axialer Richtung nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 126 μm , l = 10 mm) im Vergleich zur konventionellen Ölabschreckung von Zylindern aus C45E im bei 60 °C.....	137
Abbildung 107:	Resultierende Randhärteverläufe in axialer Richtung der Probe nach zweiseitig ultraschallunterstützter (\varnothing 18 mm, A = 126 μm , l = 10 mm) und konventioneller Ölabschreckung von Zylindern aus C45E bei 60 °C.....	138
Abbildung 108:	3D-FE-Halbmodell zur thermo-mechanischen Simulation mit Verschiebungs- und Wärmeübergangsrandbedingungen.	142
Abbildung 109:	Vergleich simulierter und gemessener Abkühlverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	143
Abbildung 110:	Vergleich simulierter und gemessener Axialeigenspannungsverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	144
Abbildung 111:	Simulierte Maß- und Formänderung in Beschallungsrichtung eines X5CrNi18-10-Zylinders nach einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	145
Abbildung 112:	Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung während einer einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C.....	145
Abbildung 113:	Vergleich simulierter und gemessener Abkühlverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	146
Abbildung 114:	Vergleich simulierter und gemessener Axialeigenspannungsverläufe eines X5CrNi18-10-Zylinders in Umfangsrichtung der Probenmittelebene nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	147
Abbildung 115:	Simulierte Maß- und Formänderung in Beschallungsrichtung eines X5CrNi18-10-Zylinders nach zweiseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung bei 60 °C.....	148
Abbildung 116:	Verformung eines X5CrNi18-10-Zylinders in Beschallungsrichtung während einer zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung bei 60 °C.....	148
Abbildung 117:	Elektrische Leistung des Ultraschallgenerators bei einseitig ultraschallunterstützter Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei 85 °C.....	153
Abbildung 118:	Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082. ...	159
Abbildung 119:	Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082. ...	159

Abbildung 120:	Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	160
Abbildung 121:	Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	160
Abbildung 122:	Zusammenhang zwischen normiertem Temperaturdifferenzfaktor und normiertem Abschreckfaktor bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10 (gestrichelte Ellipsen kennzeichnen zwei Punktewolken).....	161
Abbildung 123:	Reduzierung der Dampffilmdicke bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung (\varnothing 50 mm, $A = 19 \mu\text{m}$, $l = 50 \text{ mm}$) eines Zylinders aus X5CrNi18-10 bei 75 °C (Pfeile kennzeichnen Grenzen der Dampffilmdickenänderung).....	163

D. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Schallgeschwindigkeiten unterschiedlicher Flüssigkeiten im Vergleich (bei einem Druck von 10^5 Pa und einer Temperatur von 20 °C).....	14
Tabelle 2:	Maximale Schallgeschwindigkeit in Wasser.....	15
Tabelle 3:	Literaturübersicht zu Untersuchungen des Wärmeübergangs an Festkörper-Flüssigkeits-Grenzflächen durch Ultraschallunterstützung.....	22
Tabelle 4:	Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge EN AW-6082.....	28
Tabelle 5:	Thermophysikalische Eigenschaften von EN AW-6082 für einen Temperaturbereich von 50 °C bis 550 °C.....	29
Tabelle 6:	Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge X5CrNi18-10.....	30
Tabelle 7:	Thermophysikalische Eigenschaften von X5CrNi18-10 für einen Temperaturbereich von 0 °C bis 850 °C.....	31
Tabelle 8:	Kennwerte der mechanischen Simulation von X5CrNi18-10 für einen Temperaturbereich von 20 °C bis 1000 °C.....	31
Tabelle 9:	Massenanteile der Hauptlegierungselemente der untersuchten Charge C45E.....	33
Tabelle 10:	Sonotrodencharakteristik und resultierende Ultraschallamplituden....	35
Tabelle 11:	Untersuchte Ultraschallamplituden.....	40
Tabelle 12:	Skalierungsfaktoren für die Anpassung der Wärmeübergangskoeffizienten für ein ausgewähltes Beispiel der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.	49
Tabelle 13:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082.....	60

Tabelle 14:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von EN AW-6082	73
Tabelle 15:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der einseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	86
Tabelle 16:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10.....	100
Tabelle 17:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von X5CrNi18-10.	115
Tabelle 18:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von C45E.	125
Tabelle 19:	Untersuchte Parameterkombinationen bei der zweiseitig ultraschallunterstützten Ölabschreckung von C45E.....	130
Tabelle 20:	Normierte Abschreckfaktoren der zweiseitig ultraschallunterstützten Wasserabschreckung von X5CrNi18-10 bei unterschiedlichen Wasserhärtegraden.	168

E. Verzeichnis im Rahmen der Promotion betreuter studentischer Arbeiten

Holtz, Christoph: "*Charakterisierung der Abschreckwirkung des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens nach Variation des Abstandes zwischen Sonotrode und Probe*", Bachelorarbeit SS 2010

Brast, Alexander: "*Anpassung eines dreidimensionalen Finite-Elemente-Modells für die Wärmebehandlungssimulation des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens*", Bachelorarbeit SS 2010

Mildner, Alexander: "*Charakterisierung der Abschreckwirkung des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens bei verschiedenen Wassertemperaturen (an EN AW-6082)*", Projektarbeit 2011

Hoffmann, Maik: "*Entwicklung einer Probenaufhängung für einen Versuchsstand der ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckung*", Bachelorarbeit SS 2011

Fett, Miriam: "*Charakterisierung der Abschreckwirkung des ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschreckens anhand von Zylindern des austenitischen Stahls X5CrNi18-10*", Bachelorarbeit SS 2011

Steinhöfel, Christian: "*Erstellung eines FE-Modells zur mechanischen Simulation der einseitigen ultraschallunterstützten Wasserabschreckung für ausgewählte Prozessparameter anhand von Zylindern des austenitischen Stahls X5CrNi18-10*", Master-Studienarbeit WS 2011/2012

Kemsies, Richard: "*Charakterisierung der Abschreckwirkung des ultraschallunterstützten Wasser- und Ölabschreckens anhand von Zylindern des Vergütungsstahls C45 und des austenitischen Stahls X5CrNi18-10*", Bachelorarbeit SS 2012

Möschner, Christine: "*Untersuchung der Resonanz beim ultraschallunterstützten Flüssigkeitsabschrecken*", Master-Studienarbeit SS 2013

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock, hauptsächlich im Rahmen eines von 2009 bis 2012 geförderten Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

In meiner Promotionszeit gab es viele Menschen, die mich auf unterschiedlichste Art unterstützt und zum Gelingen dieser Arbeit entscheidend beigetragen haben, weshalb ich all denjenigen ganz herzlich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Olaf Keßler, der sein Vertrauen in mich setzte und mir die Möglichkeit gab, dieses interessante Thema zu bearbeiten. Seine engagierte Betreuung sowohl mit produktiven Diskussionen als auch entgegengebrachtem Verständnis und gewährten Freiräumen wirkte sich in Hinblick auf meine Promotion stets motivierend auf mich aus, hat mich jedoch gleichermaßen auch menschlich beeindruckt und geprägt.

Bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Werkstofftechnik möchte ich mich ebenfalls aufrichtig für die herzliche Aufnahme in den Arbeitskreis sowie das mehr als angenehme und zum Teil freundschaftliche Arbeitsklima bedanken. Der Austausch auf fachlicher aber auch privater Ebene hat zu einer fruchtbaren Zusammenarbeit geführt, die ich als sehr wertvoll empfunden habe. Hervorheben möchte ich dabei meinen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Michael Reich, der „guten Seele“ des Lehrstuhls, der mir mit seiner immerwährenden Hilfsbereitschaft stets als Diskussions- und Ansprechpartner, besonders in puncto Simulation, zur Seite stand.

Für die Unterstützung in Bezug auf die umfangreichen experimentellen Arbeiten möchte ich sowohl den beteiligten Studenten, speziell für ihr Engagement, als auch den Mitarbeitern der Standortwerkstatt, insbesondere für die Fertigung der zahlreichen Proben, Dank sagen.

Mein größter Dank für die außeruniversitäre Unterstützung gilt meinen Freunden, aber ganz besonders meiner Familie und meinem Mann. Sie haben mir während meiner Promotionszeit den Rückhalt, die Geduld und die Toleranz, aber auch das Vertrauen und die Freude gegeben, diesen Lebensabschnitt erfolgreich zu beschreiten.