

Schriftenreihe

LBF-Berichte

FB-246

Christoph G. H. Bleicher

**Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von
Großgussbauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit
mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen
von Lunkern auf die Bauteillebensdauer**

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF

Schriftenreihe
LBF-Berichte

FB-246

Christoph G. H. Bleicher

**Ein Beitrag zur Beurteilung der Schwingfestigkeit von
Großgussbauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit
mit besonderer Berücksichtigung der Auswirkungen
von Lunkern auf die Bauteillebensdauer**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47
64289 Darmstadt
Telefon 06151 705-0
Telefax 06151 705-214
E-Mail info@lbf.fraunhofer.de
URL www.lbf.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8396-1048-0

ISSN 0721-5320

D 17

Zugl.: Darmstadt, TU, Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2016

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-25 00
Telefax 0711 970-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

**Ein Beitrag zur Beurteilung der
Schwingfestigkeit von Großgussbauteilen
aus Gusseisen mit Kugelgraphit mit
besonderer Berücksichtigung der
Auswirkungen von Lunkern auf die
Bauteillebensdauer**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Christoph Gottfried Heinz Bleicher
aus Weinheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Cetin Morris Sonsino
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Tag der Einreichung: 19.01.2016
Tag der mündlichen Prüfung: 26.04.2016

Darmstadt 2016
D17

Meiner Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Ingenieur beim Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz für seine Unterstützung bei der Umsetzung dieser Arbeit und seine Bereitschaft das Hauptreferat hierzu zu übernehmen. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Cetin Morris Sonsino bedanke ich mich für seine umfassenden und hilfreichen Hinweise bei der Fertigstellung der Arbeit sowie für die Übernahme der Mitberichterstattung. Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechner bedanken, der durch sein Interesse an meiner Arbeit und mit der Übernahme der weiteren Mitberichterstattung den Abschluss dieser Arbeit ermöglicht hat.

Weiterer Dank gebührt meinen Vorgesetzten und Kollegen. Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Heinz Kaufmann und Herrn Dr.-Ing. Rainer Wagener bin ich zu Dank verpflichtet, die durch ihre über Jahre fortwährende Unterstützung meiner Person und die damit verbundenen Mühen diese Arbeit erst möglich machten. Ihre stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft aber auch das kritische Hinterfragen von Ergebnissen war und ist für mich bei meiner Arbeit stets hilfreich.

Für die im Rahmen der Durchführung dieser Arbeit zur Verfügung gestellten Werkstoffe und die anregenden Diskussionen, möchte ich mich bei meinen Kollegen des Fraunhofer IZFP, Saarbrücken, allen voran bei Herrn Dr. Jochen Kurz, Herrn Dr.-Ing. Justin Bisping der ThyssenKrupp Industrial Solutions AG, Herrn Dr.-Ing. Andrey Bulavinov der I-Deal Technologies GmbH, Herrn Dipl.-Ing. Peter Mikoleizik der Siempelkamp Giesserei GmbH, Herrn Dr.-mont. Georg Geier (ehem. Siempelkamp Giesserei GmbH), Herrn Dr. Jörg Richter von der Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH, Herrn Mark Vierbaum von der Friedrich Wilhelms-Hütte, Herrn Jens Stellmacher (ehem. Friedrich Wilhelms-Hütte – Eisenguss GmbH) sowie den Kollegen der AREVA Wind GmbH, der GE Wind Energy GmbH und der Robert Bosch GmbH bedanken.

Meiner Familie und insbesondere meinen Eltern danke ich für alles Liebe und Gute, das ich durch sie erfahren darf sowie Ihre stetige Unterstützung, die mir meine gesamte Ausbildung ermöglichte. Für ihren Rückhalt, ihr Vertrauen sowie ihre Hilfe mir während der Ausbildung und nicht zuletzt für diese Arbeit immer wieder Freiräume zu schaffen, danke ich ihnen von Herzen.

Kurzfassung

Für das Erreichen eines reduzierten CO₂-Ausstoßes und einer Schonung von Ressourcen spielt der Einsatz von leistungsfähigen Großgussbauteilen, z.B. im Bereich der Windenergie, eine immer größere Rolle. Höhere Anlagenleistungen mit verbessertem Wirkungsgrad tragen dazu bei, die Nutzung der Windenergie weiter auszubauen. Gleichzeitig gewinnt auch im Allgemeinen Maschinenbau eine verbesserte Werkstoffausnutzung im Sinne des Leichtbaus für die Herstellung von Großgussbauteilen etwa für Großmotoren und Mahlanlagen stetig an Bedeutung. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Auslegung und Produktion von Großgusskomponenten ist dabei die Anlagenverfügbarkeit und Anlagensicherheit. Um Großgusskomponenten zuverlässig gegen zyklische Belastungen bemessen zu können, ist die Kenntnis des zyklischen Werkstoffverhaltens, der Mittelspannungsempfindlichkeit sowie des Größeneinflusses erforderlich. Zudem bedarf es Bewertungsmethoden für lokal vorliegende Werkstoffunzulänglichkeiten wie Lunker. Häufig fehlen für die eingesetzten Werkstoffe jedoch abgesicherte Werkstoffkennwerte und Informationen über schwingfestigkeitsmindernde Einflussgrößen. Gleichzeitig ist damit der Wunsch verbunden, Kennwerte der zerstörungsfreien Prüfung für die nachträgliche Festigkeitsbeurteilung verwenden zu können, um aufwendige Nacharbeiten oder sogar Verschrottungen zu umgehen. Aktuelle Verfahren der Festigkeitsbeurteilung durch die Vergabe von Gütestufen anhand eines Befundes der zerstörungsfreien Prüfung bieten keine Möglichkeit das Bauteil lokal korrekt zu bemessen, da eine tatsächliche Verbindung von Schwingfestigkeit zu Gütestufen fehlt. Die zerstörungsfreie festgelegte Gütestufe wird dabei lediglich durch einen werkstoffunabhängigen, pauschalen Abschlagfaktor seitens der zulässigen Beanspruchbarkeit berücksichtigt. Jedoch bieten neuere Ultraschallprüfmethoden wie die Sampling Phased Array Technik die Möglichkeit, den Lunker dreidimensional aufzulösen und eine lokale Dichte zu ermitteln, um diese Informationen für eine Festigkeitsbeurteilung nach dem Abguss zu nutzen.

Die nachfolgend dargestellten Arbeiten, die unter anderem im Rahmen des durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) geförderten Forschungsvorhabens LUNKERFEST am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Zusammenarbeit mit Großgießern, Anwendern sowie dem Germanischen Lloyd als Zertifizierungsorgan entstanden sind, zeigen das zyklische Werkstoffverhalten für die Kugelgraphitgusswerkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 sowie EN-GJS-700-2 auf. Es wird gezeigt, wie sich Kennwerte aus dem Ultraschall und der Durchstrahlungsprüfung für eine lokale Bauteilfestigkeitsbeurteilung bei Vorhandensein von Lunkern verwenden lassen. Die Arbeit diskutiert hierzu neben dem Stand der Technik, die zerstörungsfreien Arbeiten an Großgusskomponenten mit Lunkern mittels Durchstrahlungs- und Ultraschallmethoden. Anschließendes Kapitel beschäftigt sich mit Ergebnissen von zerstörungsfreien aber auch zerstörenden Untersuchungen für Schwingproben mit und ohne Lunker in Form von Dehnungs- und Spannungswöhlerlinien, zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Mittelspannungsempfindlichkeiten und dem Größeneinfluss. Der darauf folgende Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der Schwingfestigkeitsversuche der mit Lunkern behafteten Schwingproben. Diese beziehen sich zunächst auf eine Korrelation zur einfachen Lunkerklassifizierung nach Durchstrahlungsprüfnormen, formulieren aber Maßnahmen, um die Aussagefähigkeit dieser rein visuellen Auswertung zu verbessern. Um eine reproduzierbare Festigkeitsbeurteilung des Bauteils vornehmen zu können, zeigt der letzte Abschnitt eine Verbindung zwischen zerstörungsfreier Prüfung und der Schwingfestigkeit. Dabei werden Schwingfestigkeit und Dichte sowie Dichte, ein an den Schwingproben gemessener, fiktiver Elastizitätsmodul und die Kerbwirkung der Lunker verbunden. Ein Konzept zur Beurteilung der Bauteilfestigkeit verbindet final die aus dem Ultraschall in Abhängigkeit der vorliegenden Lunker bestimmten, lokalen Dichten unter Zuhilfenahme einer Spannungsreferenzwöhlerlinie für den unzulängkeitsfreien Werkstoff mit der Schwingfestigkeit.

Abstract

For reducing the output of carbon dioxide and preserve resources the usage of more efficient thick-walled cast iron products becomes more and more important e.g. for the usage in wind energy application. New and more powerful wind energy turbines with increased efficiency contribute developing the usage of wind energy. Besides wind energy, for all thick-walled cast iron constructions methods for a better material saturation for a light weight design e.g. for presses, grinding mills and heavy duty engines get more and more important. For thick-walled cast iron products the machine's availability and safety are furthermore crucial points to consider. But to design those components properly, the correct cyclic material behaviour, mean-stress sensitivity, size effect and methods to assess local material imperfections like shrinkages need to be known. Nevertheless assured information concerning cyclic material parameters and the influence of e.g. shrinkages are mostly not available for the used materials. At once measures for determining the influence of local material imperfections by means of non-destructive testing are desired to prevent rework or even rejecting the heavy cast components. Presently severity levels indicating the influence of material imperfections on fatigue life are given to each component depending on the results of non-destructive testing. But this measure offers no possibility for a real fatigue design, since a true correlation between a severity level and the present local fatigue strength is not given. Nevertheless, new methods of non-destructive testing like the ultrasonic technique Sampling Phased Array provide possibilities like a three-dimensional solution of the shrinkage's geometry as well as the determination of a local density for involvement in design process.

The presented work, done in the framework of the research project LUNKERFEST at the Fraunhofer Institute for Structural Durability and System Reliability LBF together with foundrymen, operators and the Germanischer Lloyd as a certifier of thick-walled cast iron components funded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, discusses both cyclic material parameters for the sound nodular cast iron materials EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 and EN-GJS-700-2 and ways for a local fatigue design with parameters from ultrasonic testing when shrinkages are present.

The first chapters of the work describe, besides the state-of-the-art, the tested nodular cast iron materials, non-destructive investigations performed with X-ray and ultrasonic testing on thick-walled cast iron components with shrinkages. The following chapters discuss results of X-ray and X-ray computer tomography investigations on the removed specimens and summarise results of the cyclic material tests conducted on sound fatigue specimens in form of stress-life, strain-life and cyclic stress-strain curves as well as results concerning the influence of mean-stresses and size effect. Subsequent fatigue results for the specimens with shrinkages are given. In the first instance these results are still based on a correlation with a shrinkage classification. Further, the chapter discusses measures improving the evaluation of radiographic films.

In order to perform a reproducible component fatigue assessment, the last chapters of this work show correlations between parameters of non-destructive testing and fatigue strength. Thereby fatigue strength and density as well as density, the virtual Young's modulus and the shrinkages' fatigue notch effect are correlated. A design concept finally links the local component's density measured by the ultrasonic testing method Sampling Phased Array to fatigue life with the help of a reference stress-life curve determined for sound baseline material.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Gusseisenwerkstoffe.....	5
2.2	Werkstoffungängen im Gusseisen mit Kugelgraphit.....	9
2.2.1	Graphitentartungen.....	9
2.2.2	Dross.....	10
2.2.3	Lunker.....	11
2.3	Betriebsfestigkeit.....	13
2.3.1	Definition der Betriebsfestigkeit.....	13
2.3.2	Grundbegriffe der zyklischen Werkstoffprüfung	14
2.3.3	Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit.....	15
2.3.4	Experimentelle Bestimmung der Schwingfestigkeit	25
2.3.5	Festigkeitshypothesen.....	34
2.3.6	Bemessungskonzepte	36
2.3.7	Bauteilauslegung im Eisengroßguss	39
2.4	Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur volumetrischen Abbildung von Ungängen	40
2.4.1	Durchstrahlungsprüfung.....	41
2.4.2	Ultraschallprüfung	43
2.5	Abhängigkeit von zerstörungsfreier Prüfung und Schwingfestigkeit	45
2.6	Zusammenfassung.....	48
3	Werkstoffe und Entnahme von Schwingproben	50
3.1	Untersuchte Werkstoffe.....	50
3.2	Entnahme der Schwingproben aus Gussplatten und Bauteil.....	52
3.3	Schwingproben	54
3.4	Quasistatische Werkstoffkennwerte.....	56
3.5	Zusammenfassung.....	57
4	Zerstörungsfreie und zerstörende Werkstoffuntersuchungen	58
4.1	Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen	58
4.1.1	Radiographische Untersuchungen	58
4.1.2	Röntgen-computertomographische Untersuchungen.....	59

4.1.3	Bestimmung des quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens.....	59
4.2	Zyklische Werkstoffuntersuchungen	60
4.2.1	Servo-hydraulische Prüfmaschinen	61
4.2.2	Elektro-magnetische Resonanzprüfmaschinen	62
4.2.3	Versuchsdurchführung unter Dehnungsregelung	62
4.2.4	Versuchsdurchführung unter Spannungsregelung.....	63
4.3	Zusammenfassung.....	63
5	Ergebnisse.....	64
5.1	Zyklische Prüfung der Werkstoffe ohne Ungängen	64
5.1.1	Dehnungsregelung.....	64
5.1.2	Kompatibilität	66
5.1.3	Spannungsregelung	69
5.1.4	Mittelspannungsempfindlichkeit	79
5.2	Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung von Schwingproben mit Lunkern	86
5.2.1	Radiographische Untersuchungen	86
5.2.2	Röntgen-computertomographische Untersuchungen	87
5.2.3	Ergebnisse der Messung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben.....	87
5.2.4	Ergebnisse der zyklischen Prüfung der Lunkerproben	90
5.3	Metallographie	97
5.3.1	Ergebnisse für Schwingproben aus Bereichen ohne Lunker	98
5.3.2	Ergebnisse für Schwingproben aus Bereichen mit Lunkern	99
5.4	Zusammenfassung.....	101
6	Abhängigkeit zerstörungsfreier und zerstörender Prüfergebnisse	102
6.1	Dichte und Schwingfestigkeit	102
6.2	Informationen aus Röntgenbildern.....	103
6.2.1	Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild mit komplettem Prüfvolumen.....	103
6.2.2	Bestimmung des Versagensortes aus dem Röntgenbild	106
6.2.3	Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild mit verkleinertem Prüfvolumen	109
6.3	Dichte, fiktiver Elastizitätsmodul und Schwingfestigkeit.....	110
6.4	Zusammenfassung.....	115
7	Schwingfestigkeitsbeurteilung auf Basis der zerstörungsfreien Prüfung	117
7.1	Beurteilungskonzept.....	117

7.2	Verifikation.....	125
8	Zusammenfassung und Ausblick	128
9	Summary and Outlook.....	133
10	Literatur	138
	Bildverzeichnis.....	155
	Tabellenverzeichnis.....	159
	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	160
	Anhang T	
	Tabellenverzeichnis	T1 – T60
	Anhang B	
	Bildverzeichnis	B1 – B52
	Anhang D	
	Dokumentverzeichnis.....	D1 – D9

1 Einleitung und Zielsetzung



Bild 1 Rotornabe einer Windenergieanlage /Mik14/

Der Einsatz von Gusswerkstoffen im Maschinenbau hat sich in den vergangenen Jahrzehnten vor allem durch verbesserte Werkstoffe und Gießtechniken auf viele Einsatzbereiche erweitert und umfasst von kleinsten Druckgussbauteilen aus Aluminium bis hin zu Gusskomponenten aus Gusseisen für den Schwermaschinenbau eine hohe Vielfalt an Werkstoffen und Anwendungsbereichen. Dabei kommen dem Gießprozess im Allgemeinen vor allem dessen hohe gestalterische Freiheit in der Formgebung und die Möglichkeit einer beanspruchungsgerechten Konstruktion bei optimaler Bauraumausnutzung zu Gute. Zudem stehen heute Simulationsmethoden für den Gießprozess selbst, wie auch für die Erstarrung der vergossenen Werkstoffe zur Verfügung, die es erlauben, bereits im Entwurfsstadium eine Abschätzung über das lokale Bauteilverhalten zu erhalten und einen zeit- und ressourcenraubenden Neuabguss weitestgehend zu vermeiden. Aus diesen Gründen gelingt es zunehmend, Schweiß- sowie Schmiedekonstruktionen durch Gießereierzeugnisse zu ersetzen und so neue Märkte zu erschließen.

Einen hohen Anteil im Bereich der Gießereierzeugnisse haben Gusseisenwerkstoffe, die als un-, niedrig- und hochlegierte Varianten hauptsächlich als Gusseisen mit Lamellen- (GJL), Vermicular- (GJV) und Kugelgraphit (GJS) vom Automotivebereich bis zum Großbauteilguss im Schwermaschinenbau zum Einsatz kommen. Dabei hat der GJS eine besondere Bedeutung. Dieser lässt sich mittlerweile in Stückgewichten von 320 t /Sie13/ abgießen und auf Grund seiner vergleichsweise guten Festigkeitseigenschaften, des höheren Streckgrenzenverhältnisses gegenüber vielen Stahllegierungen und der hohen Duktilität /Has08, ZGV07/ vielseitig einsetzen. Gusseisen mit Kugelgraphit ist unter den Gusseisenwerkstoffen neben dem Gusseisen mit Lamellengraphit der am häufigsten eingesetzte Werkstoff. Durch Legieren oder Wärmebehandeln ist GJS an viele Anwendungen anpassbar /ZGV07/. So findet der niedriglegierte GJS beispielsweise mit Zugfestigkeiten bis 1400 MPa im Fahrzeugbau oder als niederfeste Variante in Tragstrukturen in Windenergieanlagen, Bild 1, und Großpressen Anwendung. Zudem lassen sich GJS-Legierungen durch Zulegieren von u.a. Nickel, Chrom und Mangan für Hoch- und Tieftemperaturanwendungen mit verbesserter Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit herstellen /ZGV07/.

Im Rahmen der Bemessung von Großgussbauteilen aus GJS ergeben sich jedoch immer wieder Herausforderungen sowohl im Umgang mit Werkstoffungängen als auch mit der Berücksichtigung des Einflusses von Kerben, Mittelspannungen und Größeneinflüssen. Auch ist die Kenntnis des transienten Werkstoffverhaltens, also der Beschreibung von Festigkeitsänderungen des Werkstoffs infolge zyklischer Belastungen, für die Bauteilbemessung unumgänglich. So ist der Einsatz von Gusseisenwerkstoffen je nach Legierung und Herstellung mit mehr oder weniger umfangreichen Werkstoffungängen verbunden, die bei der Bauteilauslegung zu berücksichtigen sind. Im Fall des Gusseisens mit Kugelgraphit umfassen diese Werkstoffungängen je nach Bauteilgröße und Herstellung Lunker, Seigerungen, Dross und Graphitentartungen, die je nach Erscheinungsform die Beanspruchbarkeit des Werkstoffes in Form der quasistatischen und zyklischen Festigkeit teilweise deutlich verringern /Kau98, Pri91, Bou12, Kai13, Bar81, Gag10, Tro14, Mul16/. Trotz vorheriger Gießsimulationen und einem hohen Erfahrungswert bei den Gießereien im Vermeiden von diesen Werkstoffungängen, sind diese nicht gänzlich vermeidbar und bedeuten oftmals den Ausschuss eines Bauteils und den teuren, aufwändigen Neuabguss. Ungängen sind somit vor allem für die Einzelteil- und Kleinserienfertigung eine Herausforderung. Gießereien setzen umfangreiche zerstörungsfreie Prüftechniken (ZfP) ein, um bereits kurz nach dem Ausformen des Gussbauteils Art, Größe und Auswirkung der Ungängen möglichst gut bestimmen zu können. Je nach der vorliegenden Bauteilgröße lassen sich die Gießereierzeugnisse nahezu lückenlos z.B. mittels der Röntgen-Computertomographie (CT) oder stichprobenartig durch eine Ultraschallaufnahme (UT) eines Bauteilbereiches auf Lunker und Einschlüsse prüfen. Letztere ist die einzige Möglichkeit, große Bauteilvolumina bei Bauteilmassen von bis zu 320 t und mehreren 100 mm Wanddicke effizient zu untersuchen. Allen anwendbaren Verfahren der ZfP zur Bestimmung von Werkstoffungängen ist gemein, dass, abhängig von der detektierten Ungänge, eine Abschätzung des lokalen quasistatischen und zyklischen Werkstoffverhaltens notwendig ist, um ein Bauteil mit erkannter Werkstoffungänge zutreffend zu beurteilen und für den Betrieb freizugeben. Wichtige Parameter, die die ZfP hierbei ermitteln muss, sind neben der Lage und Form der Ungänge auch dessen Dichte.

Der Lunker, der als Gießungänge meist bei dickwandigen Komponenten auftritt, lässt sich bei den sehr großen Bauteilabmessungen im Großguss nur noch mittels einer einfachen Durchstrahlung oder durch Ultraschallmethoden im Volumen ermitteln. Er schwächt den tragenden Querschnitt und trägt durch seine Kerbwirkung zu einer erhöhten örtlichen Werkstoffbeanspruchung bei. Dabei ist eine Ermittlung von betriebsfestigkeitsrelevanten Geometrie Kennwerten mittels der ZfP eine große Herausforderung. Das auf der Ultraschalltechnik basierende Verfahren Sampling Phased Array bietet neuerdings die Möglichkeit mit deutlich erhöhter Auflösung die Lage, Verteilung und die Dichte des Lunkers zu ermitteln und damit deutlich mehr Informationen für einen Festigkeitsnachweis zur Verfügung zu stellen /Lun14, Kur14, Bul14/. Jedoch sind diese Daten noch nicht mit Kenngrößen der Betriebsfestigkeit bzw. der zyklischen Bauteilauslegung verknüpft. Ein Beurteilungskonzept, das Informationen über Lage, Dichte und Geometrie der Lunker nutzt und über eine einfache globale Abwertung der Beanspruchbarkeit, wie im Gütestufenkonzept /DIN90, GL10, VDG01/, hinausgeht, existiert nicht. Darüber hinaus bestehen momentan für die am häufigsten im Dickwandguss eingesetzten Legierungen gar keine oder nur wenige Erkenntnisse über deren zyklisches Werkstoffverhalten und deren Schwingfestigkeit im ungängenfreien Werkstoffzustand.

Zudem ist die Ermittlung der Festigkeit für den ungängenfreien Grundwerkstoff auf Grund der großen Bauteilabmessungen häufig eine Herausforderung für die Ermittlung gültiger Beanspruchbarkeiten am Großgussbauteil. Bauteilabmessungen von teilweise mehreren Metern und die aufwendige Herstellung dieser oftmals als Einzelteil gegossenen Bauteile, erschweren die sichere Detektion der Werkstoffungängen und ermöglichen in der Regel keine Probenentnahme im Bereich der Ungänge oder dem un-

gänzenfreien Werkstoff. Eine zyklische Prüfung des kompletten Bauteils scheidet vor allem vor dem Hintergrund sehr großer Bauteilabmessungen, Bild 2, hoher benötigter Prüflasten, hoher Kosten sowie einer Einzelteil- oder Kleinserienherstellung von Großgussbauteilen gänzlich aus. Eine Aussage über die lokale Bauteilbeanspruchbarkeit ist somit deutlich erschwert.



Bild 2 Gussbauteile einer Großpresse /Fas14/

Jedoch ist ein Ausschuss des Bauteils mit der anschließenden erneuten Herstellung und der damit verbundenen Belastung für die Betriebswirtschaft sowie materielle, personelle und energetische Ressourcen in jedem Fall zu vermeiden. Für die ZfP und die Betriebsfestigkeit bedeutet dies, Methoden bereitzustellen, die es ermöglichen, die Werkstoffungängen in ihrer Charakteristik (Form, Lage im Bauteil, Werkstoffkennwerte, etc.) möglichst präzise zu ermitteln und diese Eigenschaften für eine Beurteilung der Schwingfestigkeit des Bauteils zur Verfügung zu stellen. Dabei sind vom zyklischen Werkstoffverhalten des Grundwerkstoffes ausgehend auch die Einflüsse durch Ungängen entsprechend zu berücksichtigen. Dies kann aktuell nur in eingeschränktem Maße stattfinden, da auf Grund der großen Bauteilabmessungen nur sehr wenige zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Detektion von Ungängen im Großguss anwendbar sind und häufig keine ausreichenden Informationen über das zyklische Werkstoffverhalten dickwandiger GJS-Werkstoffe vorliegen. So lässt sich an Bauteilen eine Röntgen-CT-Prüfung gar nicht mehr und eine einfache Durchstrahlungsprüfung nur eingeschränkt durchführen. Möglichkeiten für Volumenuntersuchungen an Bauteilen bietet oftmals nur noch die Ultraschallprüfung. Aktuell existieren nur wenige Ansätze, Großgussbauteile anhand von Informationen über Ungängen der zerstörungsfreien Prüfung lokal zutreffend zu beurteilen und eine gesicherte Entscheidung darüber zu treffen, wie mit einem ungängenbehafteten Bauteil umzugehen ist. Es wird vor allem auf die Gütestufeneinteilung z.B. /DIN90, VDG01/ bei der spannungsbasierten Bauteilbemessung zurückgegriffen. Dabei wird der z.B. bei der Durchstrahlungsprüfung ermittelten Werkstoffungänge anhand von Fehlervergleichskatalogen ein Fehlerwert zugewiesen. Dieser Fehlerwert führt über Normen /DIN90, VDG01/ auf eine bauteilbezogene Gütestufe. Ist die zugewiesene höher als die zwischen Kun-

de und Gießereien vereinbarte Gütestufe, wird das Bauteil entweder als Ausschuss deklariert oder es findet eine Nachberechnung statt. Die vergebenen Gütestufen basieren jedoch nicht auf experimentell ermittelten, zyklischen Werkstoffkennwerten, sodass stattdessen auf Regelwerke wie /GL10/ zurückgegriffen wird. Diese legen die im quasistatischen Zugversuch bestimmten Festigkeiten sowie Gütestufen zu Grunde, um synthetische Schwingfestigkeitskennwerte für den Grundwerkstoff wie auch Abschlagsfaktoren für die Beanspruchbarkeit des mit Ungängen behafteten Bauteils zu ermitteln. Allerdings fehlt häufig der Bezug zu den tatsächlichen Gegebenheiten der vorliegenden Ungänge sowie den zyklischen Eigenschaften des Grundwerkstoffes. Ein lokaler, dehnungsbasierter Auslegungsansatz für ungängenbehaftete dickwandige Bauteile aus GJS-Werkstoffen existiert nicht.

Ziel ist es daher, Informationen aus der zerstörungsfreien Prüfung mit der Betriebsfestigkeit zu verknüpfen und für eine Schwingfestigkeitsbeurteilung von mit Ungängen behafteten Bauteilen zu verwenden. Dabei soll im Speziellen auf die Durchstrahlungsprüfung und die Methoden der Ultraschallprüfung eingegangen werden, die als einzige Verfahren für eine Volumenprüfung bei Großgussbauteilen in Frage kommen. Informationen, die diese Verfahren zu den Ungängen ermitteln können, sollen dargestellt und Verbindungen mit Betriebsfestigkeitskenngrößen hergestellt werden. Im Fokus steht der Lunker als einer der wichtigsten Werkstoffungängen beim Gusseisen mit Kugelgraphit im Großgussbereich. Ziel ist es, anhand von zerstörenden und zerstörungsfreien Untersuchungen für die Werkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 mit und ohne Lunker, ein Beurteilungskonzept zu erarbeiten, das Informationen der zerstörungsfreien Prüfung berücksichtigt und eine verfeinerte Schwingfestigkeitsbeurteilung für mit Lunker behaftete Bauteilbereiche zulässt. Die Ergebnisse sollen helfen zu entscheiden, ob und in welchem Maße schwingfestigkeitsmindernde Lunker in zyklisch belasteten Bauteilbereichen zu tolerieren sind. Für das zu erarbeitende Beurteilungskonzept sollen Informationen aus der zerstörungsfreien Prüfung mit der Schwingfestigkeit des ungängenfreien Werkstoffzustandes kombiniert werden. Durch eine zyklische Charakterisierung der drei Werkstoffe zur Bestimmung der Kerb- und Mittelspannungsempfindlichkeit sowie des transienten Werkstoffverhaltens sind Wege zu erarbeiten, um mit überschaubarem Aufwand Bauteile mit Lunkern lokal zutreffend zu beurteilen. Aus den bestehenden Herausforderungen

- einer fehlenden Einbindung des tatsächlichen, zyklischen Werkstoffverhaltens von Werkstoffungängen sowie Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung in die Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit,
- einer globalen und pauschalen Abwertung der ertragbaren bzw. der zulässigen Bauteilbeanspruchbarkeit über das Gütestufenkonzept ohne die Lage oder Geometrie des Lunkers zu berücksichtigen sowie
- fehlender Erkenntnisse über das zyklische Werkstoffverhalten von dickwandigen, mischkristallverfestigten und höherfesten Kugelgraphitgusswerkstoffen

ergeben sich die Ziele der Arbeit in Form

- der Bestimmung des zyklischen Werkstoffverhaltens der wichtigsten Kugelgraphitgusswerkstoffe im Großguss,
- der Erarbeitung von Möglichkeiten, die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung bei der Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit zu berücksichtigen sowie
- der Erarbeitung einer Beurteilungsmethode für Großgussbauteile bei Vorhandensein von Lunkern.

2 Stand der Technik

2.1 Gusseisenwerkstoffe

Die im Rahmen der Arbeit zerstörend und zerstörungsfrei untersuchten Gusswerkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 gehören zu den niedriglegierten Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit (GJS), die zu den Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffen zählen. Unter diesem Begriff sind die weiß- und grauerstarrenden Gusseisenlegierungen sowie die höher bzw. hochlegierten Sondergusseisen zusammengefasst /Bar99/. Den Gusseisenwerkstoffen ist gemein, dass sie gegenüber Stahl einen wesentlich höheren Anteil an Kohlenstoff (> 2 %) aufweisen /Bar99/. Unterschiede ergeben sich aber hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sowie ihrer Erscheinungs- und Erstarrungsformen. So wird etwa zwischen weißem und grauem Gusseisen unterschieden /Bar99, Ro12a, Has08/. Diese Einteilung bezieht sich auf die Farbe der Bruchfläche des Werkstoffs und ist auf die unterschiedliche Erstarrung zurückzuführen /Bar99, Ro12a, Has08/. Während die weißen Gusseisenlegierungen (Hartguss und Temperguss) ebenso wie die Stahlwerkstoffe durch eine schnelle Abkühlung nach dem metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Diagramm erstarren und damit der Kohlenstoff in der Regel als Zementit (Fe_3C) im Gefüge ausfällt, erstarren die grauen Gusseisenwerkstoffe nach dem stabilen Eisen-Kohlenstoff-Diagramm und der Graphit fällt im Gefüge elementar aus /Bar99, Ro12a, Has08/. Dies wird in der Regel durch eine langsame Abkühlung und durch die Zugabe von graphitstabilisierenden Elementen wie Cer und Magnesium erreicht /Bar99, Ro12a, Has08/. Die grauen Gusseisenwerkstoffe umfassen neben dem Gusseisen mit Kugelgraphit auch das Gusseisen mit Lamellen- und Vermiculargraphit. Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften ergeben sich ebenfalls deutliche Unterschiede. Während Hart- und Temperguss als verschleißfeste Werkstoffe eher hart, spröde und schwer zu zerspanen sind, können die grauen Gusseisenlegierungen stahlähnliche quasistatische und zyklische Eigenschaften und besonders im Fall des GJS hohe Bruchdehnungen bis $A = 22\%$ /DIN63/ bereits im niedriglegierten Zustand aufweisen. Eine Systematik der Gusseisenwerkstoffe zeigt Bild 3.

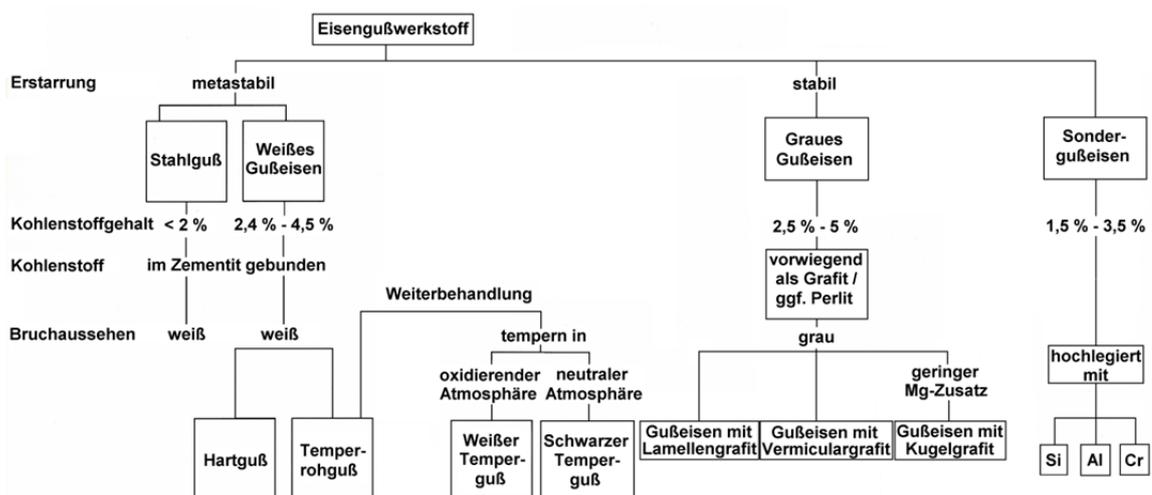


Bild 3 Systematik der Gusseisenwerkstoffe nach /Bar99/

Der Temperguss, der in /DIN62/ genormt ist, erstarrt metastabil und ist nach der Erstarrung als Temperhuss kaum bearbeitbar und deshalb einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Nach der Wärmebe-

handlung, die in oxydischer oder neutraler Atmosphäre stattfinden kann, ist der Temperguss zäh und bearbeitbar und bietet neben einer hohen Verschleiß- und Maßbeständigkeit auch eine gute Zähigkeit. Wird der Temperguss in einer entkohlenden (oxydischen) Atmosphäre bei etwa $\vartheta = 1050\text{ °C}$ /Bar99/, Ro12a/ geglüht, zerfällt der Zementit durch die Abgabe von Kohlenstoff an die Atmosphäre, in der er sich zu Kohlenstoffdioxid verbindet /Bar99/. Im entkohlten Bereich bleibt Ferrit zurück /Bar99/. Abhängig von der Materialdicke wird nur die Randzone oder das ganze Bauteil entkohlt und es entsteht weißer Temperguss, wobei die Werkstoffeigenschaften wanddickenabhängig sind /Bar99/. Der weiße Temperguss besitzt eine deutlich erhöhte Zähigkeit gegenüber dem Ausgangszustand und wird mit GJMW abgekürzt (GJ=Gusseisen, M=malleable cast iron, W=white) /DIN62/. Im Gegensatz hierzu wird der schwarze Temperguss (GJMB: GJ=Gusseisen, M=malleable cast iron, B=black) durch ein zweistufiges Glühen hergestellt /DIN62/. Der Zementit zerfällt dabei zunächst bei etwa $\vartheta = 950\text{ °C}$ in Austenit und Temperkohle und im zweiten Glühschritt durch langsames Abkühlen des Austenits in Ferrit und Temperkohle /Bar99/. Der Kohlenstoff bleibt damit im Gefüge zurück, weshalb dieses schwarz erscheint /Bar99/. Durch die durchgehende Glühbehandlung liegen im Wesentlichen keine wanddickenabhängigen Materialeigenschaften vor /Bar99/. Schwarzer Temperguss kann vergütet sowie gehärtet werden und bietet bei äußerer Verschleißfestigkeit eine hohe Zähigkeit /Bar99/.

Der metastabil erstarrende Hartguss besitzt ein weißes Gefügebild, in dem der Kohlenstoff im Eisen-carbid (Fe_3C) im Grundgefüge ausfällt /Ro12a/. Der Hartguss ist in DIN EN 12513 /DIN13/ genormt und findet auf Grund seiner Härte und Verschleißfestigkeit in Bauteilen Verwendung, die durch Druck bzw. Reibung hoch beansprucht werden /Bar99/. Allerdings ist der Hartguss sehr spröde und stoßempfindlich /Bar99/.

Die grauen Gusseisenlegierungen unterscheiden sich durch die Art der Form des im Gefüge vorliegenden Graphits, Bild 4.

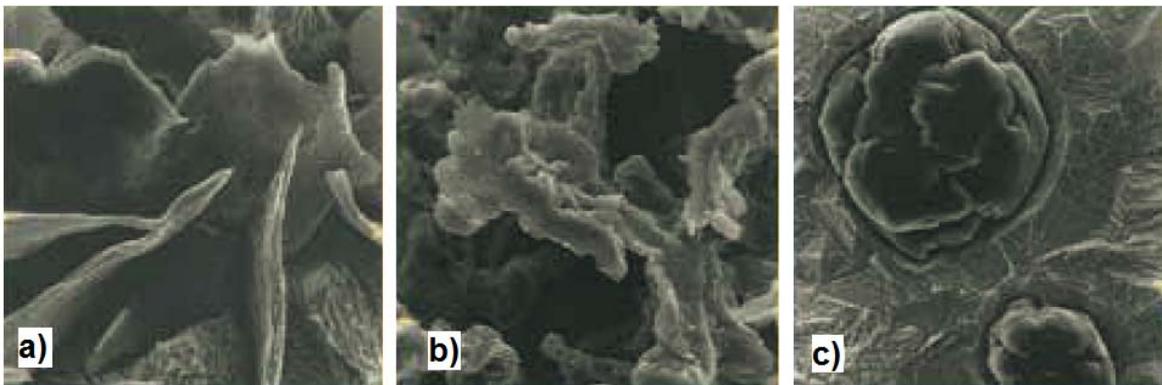


Bild 4 Graphitstruktur des GJL (a), des GJV (b) und des GJS (c) /ZGV07/

Gusseisen mit Lamellengraphit, GJL, das auch als graues Gusseisen oder Grauguss bezeichnet wird /Has08/, ist in der DIN EN 1561 /DIN61/ bis Zugfestigkeiten von $R_m = 350\text{ MPa}$ genormt. Das spröde Bruchverhalten dieser Legierungen ist auf die Lamellenform des ausgeschiedenen Graphits zurückzuführen, die den Kraftfluss stört und somit als innere Kerbe wirkt /Bar99/. Auf Grund der Selbstschmierung des eingelagerten Graphits hat der GJL gute Gleiteigenschaften /Bar99/. Gleichzeitig muss jedoch eine hohe Härte garantiert sein, die der Perlitanteil im Gefüge maßgeblich bestimmt. Der Perlitanteil und die Perlitfeinheit lassen sich durch die Zugabe von Legierungselementen wie Nickel, Mangan und

Kupfer durch eine Unterbindung der Kohlenstoffdiffusion oder eine beschleunigte Abkühlung einstellen /Roe15/. Zusätzlich ist der Kohlenstoffanteil so gering wie möglich einzustellen /Roe87/. Der GJL findet im Motorenbau, z.B. für Kurbelgehäuse und Zylinderköpfe, sowie auf Grund seiner guten Wärmeleit-, Tribologie- und Dämpfungseigenschaften sowie seiner guten Gieß- und Zerspanbarkeit auch für Maschinenbetten und Getriebegehäuse Anwendung /Bar99, Roe87/. Eine Übersicht über die üblichen Legierungselemente sowie die Temperatur- und Korrosionsfestigkeit gibt /Roe87/.

Neben dem Lamellengraphit liegt der Graphit im Gusseisen mit Vermiculargraphit (GJV) in wurmartiger Form vor und wird in der DIN EN 945 /DIN45/ als Form III gekennzeichnet /Lam14/. Der Werkstoff ist in der DIN EN 16079 /DIN79/ für Zugfestigkeiten zwischen $R_m = 250$ und 500 MPa genormt und besitzt quasistatische und zyklische Werkstoffeigenschaften, die im Wesentlichen zwischen denen des GJL und denen des GJS liegen /Roe87/. Dies ist zu erreichen, indem durch die gezielte Einstellung der Gehalte an Schwefel, Sauerstoff und Magnesium in der Schmelze der Lamellengraphit des GJL in Richtung der runden Graphitstruktur des GJS modifiziert wird. Gegenüber dem GJL weist GJV eine höhere Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$ und Zähigkeit auf /Roe87, Has08, Lam14/, ohne dass dazu die Gießprozesse im Vergleich zum GJL wesentlich zu ändern sind. Weitere Vorteile liegen in der höheren Maßbeständigkeit und Oberflächengüte im Vergleich zum GJL /Lam14/. Gegenüber dem GJS bietet der GJV u.a. ein besseres Dämpfungsvermögen, eine höhere Wärmeleitfähigkeit sowie ein besseres Formfüllungsvermögen, wodurch der Werkstoff z.B. für Zylinderköpfe, Bremsen und Auspuffkrümmer Verwendung findet /Has08/. Die Grundgefüge des GJV sind im Gegensatz zum GJL aber wie beim GJS entweder ferritisch, perlitisch oder ferritisch/perlitisch. Sie lassen sich durch verschiedene Verfahren, die hauptsächlich auf der kontrollierten Behandlung der Schmelze mit kugelbildenden Legierungselementen wie Magnesium und Seltene Erden, kugelzerstörenden Elementen wie Titan und Aluminium und/oder einer Schwefelbehandlung beruhen, herstellen /Roe87, Has08/. Eine optimale Einstellung des Anteils an Kugelgraphit im Gefüge (< 20 %) des GJV ist entscheidend, um die guten Gießeigenschaften, Bearbeitbarkeit und Wärmeleitfähigkeit zu behalten, auch wenn dies mit einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften einhergeht /Has08/.

Über höhere quasistatische und zyklische Festigkeiten gegenüber Gusseisen mit Lamellen- und Vermiculargraphit verfügt Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS). Nach der zugrunde liegenden Norm DIN EN 1563 /DIN63/ variiert die Zugfestigkeit je nach Grundgefüge (ferritisch, perlitisch und ferritisch/perlitisch) für die niedriglegierten Sorten im Bereich von $R_m = 320$ bis 900 MPa und weist Bruchdehnungen zwischen $A = 2$ und 22 % auf. Aus diesem Grund wird der GJS auch als duktiles Gusseisen bezeichnet. Die gesteigerte quasistatische Festigkeit beruht auf einer deutlich verringerten Kerbwirkung des Graphits im Vergleich zum GJL und GJV, der nach der Erstarrung als Kugel vorliegt und damit den Kraftfluss deutlich weniger stört. Der GJS wird dabei durch ein Zulegieren unter anderem von Magnesium und/oder Cer erzeugt. Das zu Grunde liegende Patent wird von C. Adey angemeldet. Die Weiterentwicklung seitens der Herstellung über einen Cer-Zusatz geht auf H. Morrogh und W. J. Williams (1947) zurück /ZGV07/. Die Verwendung von Magnesium für die Herstellung beruht auf Ideen von K. D. Mills, A. P. Gagnebin und N. Pilling (1947) /ZGV07/. Die Herstellung von GJS beginnt mit dem Erschmelzen des Basiseisens im Simplex-Verfahren, Induktionstiegelofen oder im Duplex-Verfahren, Kuppel-, Lichtbogen- oder Drehtrommelofen mit anschließendem Umsetzen in einen Induktionsofen /Has08/. In den weiteren Schritten der Herstellung werden nacheinander die Entschwefelung, die Magnesiumbehandlung und das Impfen durchgeführt /Has08, ZGV07/. Dabei ist der Ausgangsschwefelgehalt zu berücksichtigen, der für eine technisch und wirtschaftlich optimale Magnesiumbehandlung unter $0,02$ % liegen sollte /Has08, ZGV07/, da sonst die Gefahr von ungewollten Nebenprodukten wie Magnesiumsulfid steigt. Das Entschwefeln erfolgt mit Calciumcarbid in Schüttelpfannen sowie

Balkenrührgeräten oder durch Einblasen in die Schmelze und Einstreuen in die Behandlungspfanne /Has08, ZGV07/. Ein Zulegieren von Magnesium ist auf Grund seines niedrigen Siedepunktes und seiner geringen Dichte nicht ohne Weiteres möglich. Magnesium wird daher mit anderen Metallen legiert und als sogenannte Vorlegierung durch das Übergießverfahren oder Sandwich-Verfahren /Has08, ZGV07/ in die Schmelze eingebracht. Bei diesen Verfahren befindet sich die Vorlegierung bereits beim Füllen in Vertiefungen in der Pfanne. Weitere Methoden bedienen sich einer Tauchglocke /Has08, ZGV07/ oder dem Einspulen eines Drahtes aus einer Magnesiumvorlegierung /ZGV07, Ste13/, wenn die Pfanne bereits mit Schmelze gefüllt ist. Beim Inmold-Verfahren befindet sich eine magnesiumarme Vorlegierung direkt in der Gießform und reagiert mit der einlaufenden Schmelze /ZGV07/. Reines Magnesium ist dagegen in geschlossenen Gefäßen in die Schmelze einzubringen, wozu sich z.B. das Konverterverfahren von Georg Fischer eignet /ZGV07, Has08/. Um die Ausscheidung von Graphitkugeln in Anzahl und Größe und damit das Gefüge und die Werkstoffeigenschaften gezielt zu beeinflussen, erfolgt das Impfen der Schmelze meist durch Zuführung von feinen Körnern auf Basis von Ferrosilicium in Verbindung mit sauerstoff- und schwefelaffinen Elementen /ZGV07, Has08/. Dies geschieht bei allen Magnesiumbehandlungsmethoden außer dem Inmold-Verfahren vor dem Gießen in der Gießpfanne oder dem Gießstrahl /ZGV07, Has08/. Allerdings ist die Impfwirkung zeitlich sowie kalorisch begrenzt, klingt mit der Zeit ab (Fading) und ist somit auch wanddickenabhängig /Has08/. Die Bildung des Graphits ist von den Legierungselementen abhängig, die den Aufbau des Graphits stören oder begünstigen. Eine umfangreiche Zusammenstellung gibt hierzu /Roe87, ZGV07, Roe15/. Als wichtigstes Element wirkt Silizium /ZGV07/, das in Gehalten von 2 bis 3 % /Has08/ (2 bis 2,5 % /Ste13/) im Gefüge vorhanden ist. Darüber hinaus trägt das Silizium in erhöhten Gehalten zu einer Mischkristallverfestigung und damit zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften z.B. beim EN-GJS-450-18 bei. /Ste13/ stellt eine Versprödung und einen Abfall von Zugfestigkeit R_m , 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Bruchdehnung A im Bereich von 4,2 bis 4,6 Gew.-% Silizium durch dessen versprödende Wirkung fest. Dennoch lassen sich durch eine Mischkristallverfestigung höhere Schwingfestigkeiten erreichen /Bl14a/.

Eine weitere festigkeitssteigernde Maßnahme bei un- und niedriglegierten GJS-Werkstoffen ist die Wärmebehandlung zur gezielten Einstellung des Gefüges, zur Gewährleistung der mechanischen Eigenschaften, zur Eigenspannungsreduktion oder der Randschichtbehandlung /ZGV07/. Hierzu zählt auch die Herstellung der hochfesten ADI-Werkstoffe (Austempered Ductile Iron oder auch Ausferritisches Gusseisen) mit austenitisch-ferritischem Grundgefüge nach DIN EN 1564 /DIN64/, die Legierungen mit Zugfestigkeiten von $R_m = 800$ bis 1400 MPa enthält. Die Herstellung erfolgt durch eine Zwischenstufenumwandlung: Das Werkstück wird auf $\vartheta = 840$ bis 950 °C erhitzt und isotherm gehalten, um eine Umwandlung des Grundgefüges in Austenit und dessen Sättigung mit Kohlenstoff zu ermöglichen /Has08/. Anschließend erfolgt ein Abschrecken und isothermes Halten zwischen $\vartheta = 230$ und 400 °C ($\vartheta = 260 - 385$ °C nach /Rim04/), bis sich die Grundmasse in Ausferrit umwandelt /Has08/. Bevor die Bainitstufe erreicht wird, ist das Bauteil auf Raumtemperatur abzukühlen /Has08/. Alternativ ist ein Vergütungsprozess aus der Austenitisierung mit einem schnellen Abschrecken und mehreren anschließenden Anlassphasen durchzuführen, der jedoch Nachteile in Bezug auf Warmrisse und die Einhaltung von Maßtoleranzen besitzt /Rim04/. Hervorzuheben ist die gute Bearbeitbarkeit des ADI bei gleichzeitig hoher Härte, guten Dämpfungs- und Verschleißigenschaften, die erhöhte Schwingfestigkeit sowie Zähigkeit /Rim04, Son09, Woh11, ZGV07, Zin06/ gegenüber den nicht wärmebehandelten GJS-Werkstoffen. Dem gegenüber steht die geringere Bruchdehnung von $A = 1 - 8$ % /DIN64/.

Insgesamt weist Gusseisen mit Kugelgraphit im Vergleich zu Stahl eine deutlich höhere Werkstoffausnutzung in Form eines höheren Streckgrenzenverhältnisses /ZGV07/ auf und kann vor allem durch die

wärmebehandelten ausferritischen Legierungen einige Stahlwerkstoffe substituieren /Rim04/. Zudem sind eine Reihe von Oberflächennachbehandlungsverfahren, wie Induktivhärten, Vernickeln, Pulverbeschichten, Kugelstrahlen und Festwalzen bei GJS wie auch das Schweißen des Werkstoffs möglich /ZGV07/. Durch die Zulegierung etwa von Nickel, Chrom und Mangan ist die Leistungsfähigkeit von Gusswerkstoffen weiter steigerbar. Diese höher legierten Werkstoffe haben ein austenitisches Gefüge und weisen unter anderem eine Korrosions-, Zunder- und Temperaturwechselbeständigkeit auf. Hochlegierte Gusseisen mit Kugelgraphit oder Lamellengraphit sind in DIN EN 13835 /DIN35/ genormt. Eine Zusammenfassung der Herstellung, der Eigenschaften und Einsatzzwecke beschreiben z.B. /ZGV07, Roe04, Has08, Roe15/.

2.2 Werkstoffungängen im Gusseisen mit Kugelgraphit

Eine optimale Ausbildung des Gefüges ohne Werkstoffungängen bestimmt die zyklische und quasistatische Festigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit wesentlich. Vor allem im Dickwandguss ist jedoch mit Werkstoffungängen zu rechnen, welche die Schwingfestigkeit maßgeblich beeinflussen. Im Folgenden werden die wesentlichen Werkstoffungängen im dickwandigen GJS und deren Auswirkungen auf die quasistatische und zyklische Festigkeit vorgestellt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf Lunkern. Für eine Gesamtübersicht der anzutreffenden Werkstoffungängen, deren Ursachen und Gegenmaßnahmen sei auf die Literatur verwiesen, z.B. /Has99, Kau98, Kau02, Roe15/.

2.2.1 Graphitentartungen

Im Gusseisen mit Kugelgraphit fällt der Kohlenstoff als Graphit in kugelförmiger Form aus. Dies trifft aber nur zu, wenn eine optimale Gießführung, Legierungszusammensetzung ohne schädliche Spurenelemente und die Abkühlrate eingehalten werden. Andernfalls treten Graphitentartungen auf. Die üblicherweise auftretenden Graphitformen sind in DIN EN ISO 945-1 /DIN45/ zusammengestellt. Nach Norm /DIN63/ nimmt der Graphit im GJS die Graphitform nach Richtreihenbild V oder VI /DIN45/ an. Bei einfachen Entartungen geht dieser in eine mehr sternförmige oder lamellare Struktur über (Richtreihenbilder I bis III /DIN45/), die üblicherweise einen GJL oder GJV kennzeichnet und verringert damit die mechanischen und zyklischen Festigkeiten gegenüber dem idealen Gefüge eines GJS deutlich. Zu den Entartungen zählen auch der Unterkühlungs- und Widmannstätten-Graphit, eine Art Lamellengraphit /Has99/, dessen spitze Enden eine hohe Kerbwirkung im Werkstoff hervorrufen. Die Entartungen kommen dabei z.B. durch das Fehlen von kugelbildenden Elementen wie Magnesium, Seltene Erden und Cer oder durch das Auftreten von zu hohen Gehalten an kugelzerstörenden Elementen (Störelemente) wie Blei, Wismut, Titan, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und Phosphor, die durch Begleit- bzw. Spurenelemente in die Schmelze gelangen, zustande /Has99, Ro12a, Roe13/. Die Wirkung dieser Störelemente beruht dabei auf dem Abbinden von Magnesium, der nicht mehr für die Stabilisierung der Kugeln zur Verfügung steht. Zu einer Verarmung an Magnesium kommt es aber auch durch Magnesiumabbau und dem Abklingen des Impfeffektes infolge einer zu lange stehenden Schmelze. Andererseits fördern zu hohe Gehalte an Cer und Seltene Erden einen sogenannten explodierten Graphit /Roe13/. Eine umfangreiche Zusammenstellung der Wirkungsweisen der einzelnen Elemente der Impfmittel, Einsatz- und auch Formstoffmaterialien gibt z.B. /Roe15/.

Unter den Graphitentartungen ist Chunky-Graphit hervorzuheben, Bild 5, den unter anderem hohe Anteile an Cer, Seltene Erden und Silizium in der Schmelze hervorrufen. Er tritt hauptsächlich bei dick-

wandigen Bauteilen bzw. in Bereichen langsamer Erstarrung /Udr13, Roe13, Has99, Bar81, Pri91, Mul16, Ma15b/, in dünnwandigen Bauteilen mit erhöhtem Siliziumgehalt zum Zwecke einer Mischkristallverfestigung oder in austenitischem Gusseisen mit hohem Nickelgehalt auf /Roe13, Mul16, Ma15b/. Chunky-Graphit versprödet den Werkstoff und setzt die mechanischen Eigenschaften wie die Duktilität deutlich herab /Mul16, Bar81, Gag10, Pri91, Ma15b/. Chunky-Graphit lässt sich durch die korrekte Einstellung der Gehalte an Seltenen Erden und Cer verhindern. Zudem bietet sich die Möglichkeit eine abgestimmte Menge Antimon zuzugeben, um die Wirkung von Cer auf die Bildung von Chunky-Graphit zu minimieren /Ro12a, Roe13, Gag10/. /Lar09/ schlägt ein Verhältnis von Antimon zu Cer von $> 0,8$ vor. Ebenso sollte das Kohlenstoffäquivalent reduziert werden /Gag10, Bar81/. Siliziumgehalte sollten nach /Has99/ unter 2,2 % bleiben und bei höheren Anteilen an Nickel nochmals um 0,2 bis 0,4 % verringert werden. /Ste14/ diskutiert die negative Wirkung von Bor und die positive Wirkung von Bismut bzgl. der Bildung von Chunky-Graphit, stellt aber die alleinige Wirkung von Cer in Frage /Ste14/. Bei Anwesenheit von Chunky-Graphit nimmt die Schwingfestigkeit des dickwandigen GGG-40 um 22 % ab sowie die Mittelspannungsempfindlichkeit um 62 % zu /Kau98/. Neben den bereits genannten, stellt /Ma15b/ weitere Maßnahmen zu Vermeidung von Chunky-Graphit zusammen.

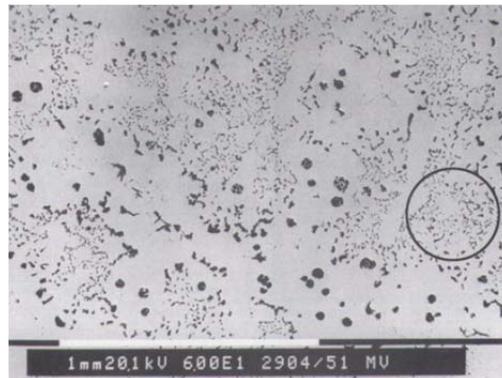


Bild 5 Chunky-Graphit /Has99/

2.2.2 Dross

Dross tritt hauptsächlich im Großgussbereich auf und bezeichnet schlackenartige Anhäufungen von Magnesiumoxid, -sulfid und -silikat sowie Anteilen von Silizium, Sauerstoff, Schwefel, Mangan und Kalzium /Tro14/, die während dem Gießprozess und während der Erstarrung entstehen. Die geringen Erstarrungsgradienten bei Großgussbauteilen fördern Dross, indem sie ihm Zeit geben, sich zu bilden und gießoberseitig zu sammeln /Bes02/. Wegen der geringeren Dichte von Dross gegenüber der Schmelze wandert dieser durch die Schmelze an die Gießoberseite /Roe01/ und wirkt dort auf Grund seiner reduzierten Festigkeit als metallurgische Kerbe /Kau98, Gag09/. Die Werkstoffungänge tritt bei Gusseisen mit Kugelgraphit unabhängig vom Formverfahren auf, da dieser zur Kugelbildung erhöhte Anteile an Magnesium voraussetzt, und setzt wie Chunky-Graphit die mechanischen Eigenschaften deutlich herab /Has99, Kau98, Roe01, Tro14/. Die Entstehung von Dross ist schwierig zu kontrollieren. Ebenso schwierig sind die einheitliche Definition der Ungänge und die Bestimmung seines Einfluss auf die Festigkeit. Hauptsächlich wird in der Literatur auf langgezogene Strukturen, wie Adern, Streifen und Schlieren /Roe01, Gag10/, vernetzte Oxidfilme /Bou12/, Einschlussnester und kompakte Einschlüsse z.B. in Verbindung mit Formsand verwiesen /Roe01, Bes02/. Ebenso findet in /Bes02/ eine Einteilung anhand der Bestandteile des Drosses statt. Danach bildet der Typ 1 die sulfidischen Einschlüsse, Typ 2

die oxydischen und Typ 3 die oxydisch-sulfidischen Verbindungen /Bes02/. Nach /Gag10/ weist jedoch der Dross im Unterschied zu Schlacke keine Anteile an Calciumoxid auf. Da der Dross bei seiner Bildung Magnesium aufnimmt, sind häufig stark entartete Graphitkugeln in Regionen mit Dross zu finden /Roe01, ZGV07/. Entstehungsursachen sind neben dreckigen Gusspfannen, zu hohen Impfdosen, zu niedrigen Gießtemperaturen, in die Schmelze übertragene Formsandstücke und Korrosionsprodukten an den Einsatzstoffen auch ein zu langsames Abgießen oder die Giebturbulenz, wobei sich jeweils die Sauerstoffaufnahme der Schmelze deutlich erhöht /Gag09, Bes02, Roe01, Sta82/. Bei Vorhandensein von Dross nimmt die Schwingfestigkeit um 44 % ab /Kau98/. Bei Annahme einer Dauerfestigkeit weist /Kai13/ beim EN-GJS-400-18-LT eine Reduktion der Schwingfestigkeit von bis zu 29 % nach dem Abknickpunkt aus. In einer Versuchsreihe stellt /Bou12/ eine Reduktion der Schwingfestigkeit bei $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen von 158 MPa für den Werkstoff ohne Ungängen auf 94 MPa bei Vorliegen von Oxidhäuten fest. /Tro14/ gibt quasistatische und zyklische Festigkeitskennwerte an. Für die Zugversuche lässt sich eine Einteilung der ermittelten Kennwerte anhand der vom Dross beeinflussten Bruchquerschnittsfläche durchführen. Die Zugfestigkeiten liegen im Bereich von $R_m = 201$ bis 310 MPa und der Elastizitätsmodul im Bereich von $E = 128$ bis 167 GPa /Tro14/. Die zyklischen, dehnungsgeregelt durchgeführten Wöhlerversuche zeigen Streuspannen bis $T_N = 1:2 \cdot 10^5$ in Lebensdauerrichtung /Tro14/. /Rip08/ spricht je nach Größe der Drossstruktur von einer Reduktion der Schwingfestigkeit von 19 bis 33 % im Vergleich zum ungängenfreien Werkstoff. /Sta82/ berichtet von einer Schwingfestigkeitsreduktion von 20 % bei einem nicht näher bezeichneten Gusseisen mit Kugelgraphit unter Biegebelastung bei Vorliegen von Drosseinschlüssen unterhalb der Gusshaut. Der Vergleich wird gezogen zwischen Schwingproben mit Gusshaut und bearbeiteten Schwingproben.

2.2.3 Lunker

Von Lunkern, Bild 6, sind verschiedene Arten im Gusseisen mit Kugelgraphit bekannt. Sie lassen sich nach ihrer Lage in Innen- und Außenlunker /Has99/ sowie nach ihrer Größe in Mikro- und Makrolunker unterscheiden. Die Außenlunker liegen meist gießoberseitig und sind bereits nach dem Ausformen zu erkennen, während innenliegende Lunker entweder durch eine zerstörungsfreie Prüfung oder eine Bearbeitung zu Tage treten /Has99/.

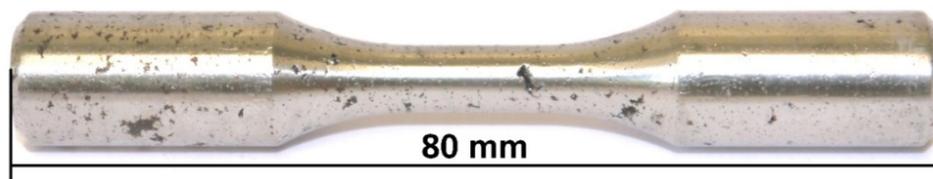


Bild 6 Lunker in einer Schwingprobe aus EN-GJS-700-2

Die Entstehung von Lunkern beim Gusseisen mit Kugelgraphit ist stets auf das Fehlen von nachfließender Schmelze zurückzuführen bzw. auf die Materialschwindung, die auf Grund des größeren Volumens der Schmelze im Vergleich zum Erstarrungsvolumen bei der Erstarrung entsteht. Daher treten vor allem im Großgussbereich Lunker meist als Innenlunker auf, da hier teilweise Wanddicken von mehreren 100 mm erstarren müssen und ein Nachfließen der Schmelze nur schwer zu gewährleisten ist. Die Erstarrung erfolgt beim GJS eher breiartig bzw. schwammartig, sodass sich oft größere zusammen-

hängende Lunkerfelder bilden. Dabei entstehen Gebilde von Makrolunkern mit mehreren 100 mm Länge. Für die Bezeichnung Mikrolunker lässt sich der Literatur keine Größenangabe entnehmen und wird des Öfteren im Zusammenhang mit Gasporosität genannt. Es ist jedoch generell zwischen Lunkern und Poren oder (Gas-)Porosität zu unterscheiden. Letztere entstehen in der Regel durch eine Gasbildung in der Schmelze, wenn sich die Gaslöslichkeit der Schmelze beim Erstarren verringert. Das von der Schmelze abgegebene Gas kann nicht mehr aus dem Bauteil entweichen und es bilden sich Poren. Folglich sind die Poren mit einem Gas gefüllt, während zumindest im Innenlunker ein Vakuum herrscht. Kennzeichnend sind ebenfalls die vergleichsweise glatten Wände der Poren.

Der Lunker weist abhängig davon, ob die Schmelze exogen, von der Formwand her, oder endogen, an Kristallen aus der Schmelze heraus, erstarrt, unterschiedliche Charakteristiken auf. Im Falle des GJS erstarrt der Lunker glattwandig, rauhwandig oder schwammartig nach der exogenen Erstarrung /Has99/. Die Lunkerbildung hängt dabei auch von der chemischen Zusammensetzung des Keimhaushalts und der Abkühlung ab, sodass je nach vorliegendem Zustand die Volumenkontraktion durch eine Gefügeumwandlung während der Erstarrung ausgeglichen werden kann (Eigenspeißung) /Ro12b, Has99/. Um das Auftreten von Lunkern zu verhindern oder zumindest einzuschränken, bietet sich die Möglichkeit die Speisertechnik entsprechend anzupassen und auf eine gerichtete Erstarrung von der dem Einguss am weitesten entfernten Stelle zum Ort der letzten Erstarrung hin zu achten /Ro12b/. /Whi12/ diskutiert Maßnahmen der Vermeidung von Lunkern unter anderem in Form der richtigen Wahl des Kohlenstoffgehalts, einer geringen Haltedauer bis zum Abguss und dem Einsatz der Gießsimulation. Eine Formfüllungs- und Erstarrungssimulation und der Einsatz von Kühlkokillen für eine gerichtete Wärmeabfuhr können die Lunkerneigung verringern. Wanddickenübergänge sind ebenfalls zu vermeiden.

Wie alle Werkstoffungängen setzen auch Lunker die mechanischen Werkstoffeigenschaften bzw. Festigkeiten der Gusswerkstoffe herab. Zum einen durch die Verringerung des tragenden Querschnitts. Zum anderen tragen sie zu einer Kerbwirkung bei. In /Kau98/ wird der dickwandige GGG-40 hinsichtlich der Schwingfestigkeit im Zusammenhang mit Makrolunkern untersucht. Dabei wird eine Klassifizierung anhand von Röntgenbildern nach der ASTM E802 /AST82/ vorgenommen und Schwingfestigkeitsreduktionen von 48 % bei der höchsten Lunkerklasse festgestellt. Weitere Ergebnisse aus /Kau98/ zum Schwingfestigkeitsverhalten der Lunker diskutiert Kapitel 2.5. /Kai11/ stellt Untersuchungen an Makrolunkern aus Y-Proben vor. Neben Simulation und Rekonstruktion der Lunker über deren schichtweise Vermessung wird auch von Versuchen an Platten mit Makrolunkern aus dem Bereich der Speiser unter Zugschwellbelastung, $R = 0$, bis zu einer Grenzschwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ gesprochen. Zyklische Werkstoffkennwerte oder eine Wöhlerlinie gibt /Kai11/ nicht an. In /B114b, B114c/ werden zyklische Ergebnisse für Schwingproben mit Makrolunkern aus EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 vorgestellt. Es zeigt sich, dass sich auf Grund der Kerbwirkung der Lunker die Schwingfestigkeiten der drei untersuchten Werkstoffe einander angleichen. Im Rahmen einer Untersuchung werden Ergebnisse für den EN-GJS-400-15 und den EN-GJS-500-14 mit Schwindungsporositäten in Korrelation von der Durchstrahlungsprüfung und Dichte zur Schwingfestigkeit vorgestellt /IfG14/. Auf Basis der Durchstrahlungsprüfung definiert /IfG14/ Porositätsniveaus und ermittelt Wöhlerlinien für Schwingproben des gleichen Porositätsniveaus. Zusätzlich wird die Porosität einzelner Schwingproben zu deren Lebensdauer in Verbindung gesetzt. Allerdings handelt es sich lediglich um im Labor erzeugte, dünnwandige Probestäbe mit einem Durchmesser der gegossenen Proben von lediglich $d = 40$ mm für dünnwandigere Anwendungen. Zudem zielen die Untersuchungen auf die Detektion von Mikroporositäten ab. Eine Verbindung zum Ultraschall oder ein auf den Ergebnissen basierendes Beurteilungskonzept stellt die Arbeit nicht vor.

2.3 Betriebsfestigkeit

2.3.1 Definition der Betriebsfestigkeit

Ziel der Betriebsfestigkeit ist es, den Werkstoff unter Berücksichtigung der vorliegenden Bauteilgeometrie, der Betriebsbelastung und der Fertigungsverfahren im Sinne eines Leichtbaus für eine definierte Bauteillebensdauer optimal auszunutzen. Die Definition der Betriebsfestigkeit geht auf Ernst Gaßner zurück, der das Verhalten von Werkstoffen für den Flugzeugbau unter zeitlich veränderlichen, also variablen Belastungsamplituden untersuchte /Gaß39/. Im Gegensatz zu August Wöhler /Woe70/ und Wilhelm August Julius Albert /Alb37/ berücksichtigte er nicht nur das zyklische Werkstoffverhalten von Werkstoffen unter einstufiger Belastung, sondern auch die Beanspruchung und Beanspruchbarkeit durch Messungen von zyklischen Betriebslasten und die Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen unter solchen Betriebslasten. Neben der Berücksichtigung reiner Betriebslasten liegt nach dem heutigen Verständnis der Betriebsfestigkeit das Augenmerk bei der betriebsfesten Bemessung von Bauteilen auch auf Aspekten wie Sonder-, Missbrauchs- und Kriechbelastungen sowie Verschleiß, Bild 7 /Son08/. Eine umfangreiche Übersicht über den Stand der Technik geben darüber hinaus /Bux92, Gud99, Hai06, Rad07, See96, So05a/.

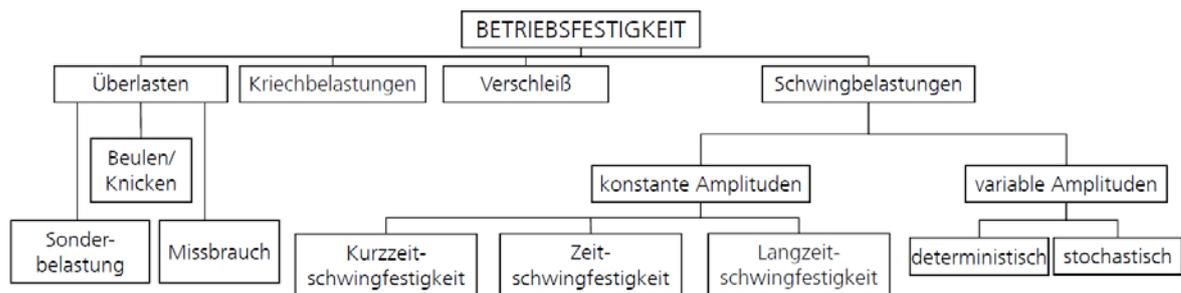


Bild 7 Einteilung der Betriebsfestigkeit nach /Son08/

Mittlerweile existieren zahlreiche Regelwerke für eine Abschätzung der Beanspruchbarkeit von Bauteilen und Werkstoffen /Hue81, FKM12, GL10, Gud99, Ber13/. Diese gehen von quasistatischen Werkstoffkennwerten aus und ermitteln die Beanspruchbarkeit anhand weiterer Parameter wie der Oberflächenrauheit, den Kerben, des Fertigungsverfahrens oder den Werkstoffungängen. Trotz dieser Auslegungsrichtlinien ist ein experimenteller Nachweis unverzichtbar. Bei diesen Versuchen werden Wöhlerlinien unter konstanter Belastungsamplitude oder Gaßnerlinien für unter variablen, sich ändernden Betriebsbelastungsamplituden ermittelt und über Bemessungskonzepte (Nennspannungs- oder Kerbgrundkonzept) auf ein Bauteil übertragen, wenn nicht schon direkt ein Bauteilversuch unter anwendungsspezifischen Belastungen stattfinden kann. Gerade für den Einsatz von Gusseisen im Großgussbereich werden nach wie vor umfangreiche zyklische Werkstoffuntersuchungen durchgeführt, um für sein heterogenes und wanddickenabhängiges Gefüge sowie sein fertigungsabhängiges Materialverhalten korrekte Werkstoffkennwerte abzuleiten. Diese Untersuchungen beschränken sich jedoch meist auf Probenversuche, da Großgussbauteile auf Grund ihrer Abmessungen nur schwer einer direkten Schwingfestigkeitsprüfung unterzogen werden können.

2.3.2 Grundbegriffe der zyklischen Werkstoffprüfung

Grundsätzlich wird in der zerstörenden Werkstoffprüfung von (quasi-)statischer oder auch zügiger Prüfung (Zugversuch) /DIN92/, der schlagartigen Prüfung (Kerbschlagbiegeversuch) /DIN48/ und der zyklischen Prüfung /DIN00/ gesprochen. Bei der zyklischen Prüfung werden Werkstoffe und Bauteile unter verschiedenen Belastungssituationen (Axial-, Biege- oder Torsionsbelastung und deren Kombinationen), ein- oder multiaxial (Kombination von z.B. mehreren gleichzeitigen und auch phasenverschobenen Belastungen) bei einer konstanten oder variablen Lastamplitude geprüft. Die Spannungsamplitude σ_a ist dabei eine wichtige Kenngröße, die zusammen mit dem Spannungsverhältnis R oder der Mittelspannung σ_m die von außen aufgeprägte Belastung eindeutig beschreiben, Bild 8.

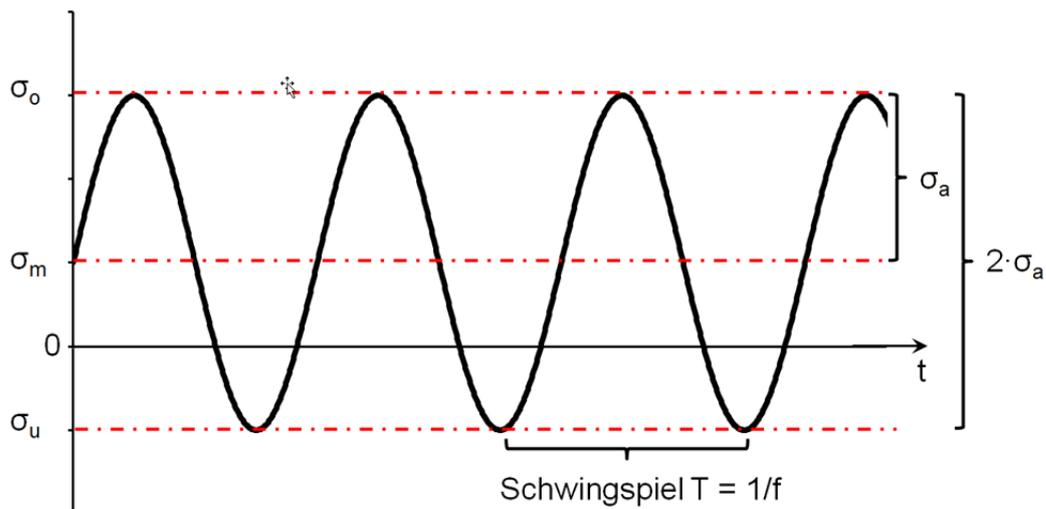


Bild 8 Kennzeichnung von Schwingspielen

Die Begriffe aus Bild 8 sind:

- Schwingbreite $\Delta\sigma = 2 \cdot \sigma_a$
- Spannungsamplitude σ_a
- Mittelspannung σ_m
- Spannungsverhältnis $R = \sigma_u / \sigma_o$
- Oberspannung σ_o
- Unterspannung σ_u
- Prüffrequenz f
- Periode/Schwingenspiel T

Die genannten Bezeichnungen sind hier für die Spannungsbelastung notiert, gelten aber auch für kraftgeregelter (F) wie auch für weg- (s) oder dehnungsgeregelter (ϵ) Belastungen und Momente (M_B , M_T). Die Bezeichnungen der Wöhlerlinie sind ebenfalls für die Gaßnerlinie gültig, allerdings wird zur Kennzeichnung der variablen Belastung jede Größe mit einem Querstrich versehen (\bar{R} , $\bar{\sigma}_a$ etc.). Für den Belastungsfall der Dehnungsregelung werden zur Ermittlung des zyklischen Werkstoffverhaltens und der Bestimmung von elastischen und plastischen Dehnungsanteilen die werkstoffabhängigen Spannungs-Dehnungs-Hysteresen ausgewertet. Eine schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungs-Hysterese zeigt Bild 9. Darin sind neben den bereits erwähnten Begriffen mit

- ϵ die Dehnung
- ϵ_a die Dehnungsamplitude
- ϵ_m die Mitteldehnung
- ϵ_e die elastische Dehnung
- ϵ_p die plastische Dehnung
- ϵ_t die totale Dehnung

abgebildet.

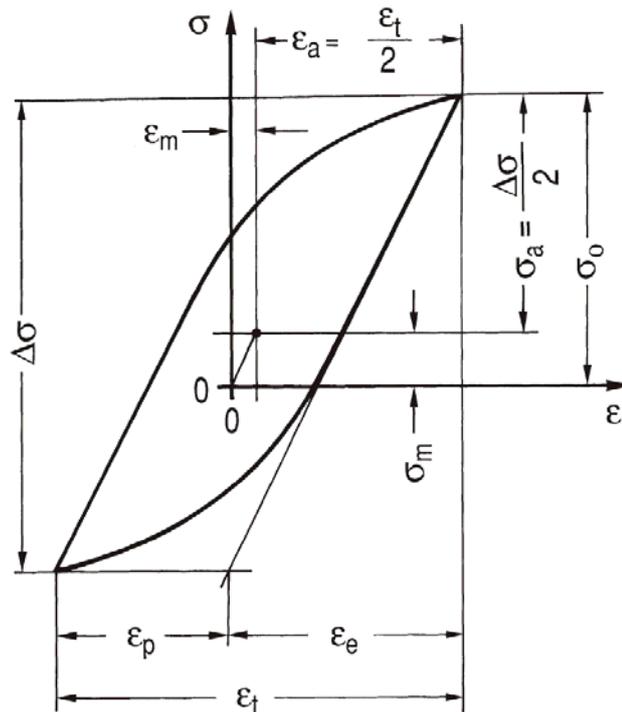


Bild 9 Kenngrößen der Spannungs-Dehnungs-Hysterese in Anlehnung an /Hai06/

2.3.3 Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit

Auf die Schwingfestigkeit von Bauteilen wirken eine Reihe von Größen ein, die bei der Bemessung zu berücksichtigen sind. Dies betrifft beispielsweise die Bauteilgeometrie und die Art der Belastung selbst. Zu den wesentlichen Einflussparametern zählen die Mittelspannungs- und Kerbempfindlichkeit sowie der Größeneinfluss. Darüber hinaus haben auch Korrosion, Betriebstemperatur, Oberflächenverfestigungsverfahren und Eigenspannungen einen Einfluss auf die Höhe der Schwingfestigkeit. Jeder dieser Faktoren stellt für sich ein umfangreiches Themengebiet dar. Da deren Erläuterung nicht zum Verständnis der Arbeit beitragen, sei für den Bereich der GJS-Werkstoffe auf die Literatur /ZGV07, Bau01, Bau06, Bl14d, Boo13, Fis88, Hai06, Kau98, Kau99, Kle07, Klo76, Rad07, Son08, Son09, Son89, So90a, So95b/ verwiesen.

2.3.3.1 Mittelspannungsempfindlichkeit

Die Überlagerung von statischen Belastungen beeinflusst die Lebensdauer im Vergleich zur Wechselbelastung. Zur Darstellung dieses Mittelspannungseinflusses existieren mehrere Schaubilder /Ger74, Goo54, Hai15, Moo27, Smi10/. Diese Schwingfestigkeitsdiagramme geben für eine konstante Lebensdauer – beispielsweise bei der Grenzschwingspielzahl N_G – darüber Auskunft, wie sehr die Schwingfestigkeit eines Werkstoffes von einer Mittellast abhängig ist.

In der Betriebsfestigkeit hat sich die Darstellung des Mittelspannungseinflusses nach Haigh /Hai15/ im sogenannten Haigh-Diagramm etabliert, da dort direkt die zur Spannungsamplitude σ_a gehörige Mittellast σ_m bzw. das Lastverhältnis R ablesbar ist. Im Haigh-Diagramm wird die ertragbare Spannungs-

amplitude σ_a auf der Ordinate über der zugehörigen Mittelspannung σ_m als Abszisse aufgetragen. Die Ordinate spiegelt damit die Mittelspannung für ein Lastverhältnis von $R = -1$ wider. Die Winkelhalbierende im 1. Quadranten gibt das Ergebnis der Zugschwellbelastung, $R = 0$, wider. Ein vollständiges Haigh-Diagramm in Anlehnung an die FKM-Richtlinie /FKM12/ mit den Grenzbereichen 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ und Zugfestigkeit R_m zeigt Bild 10.

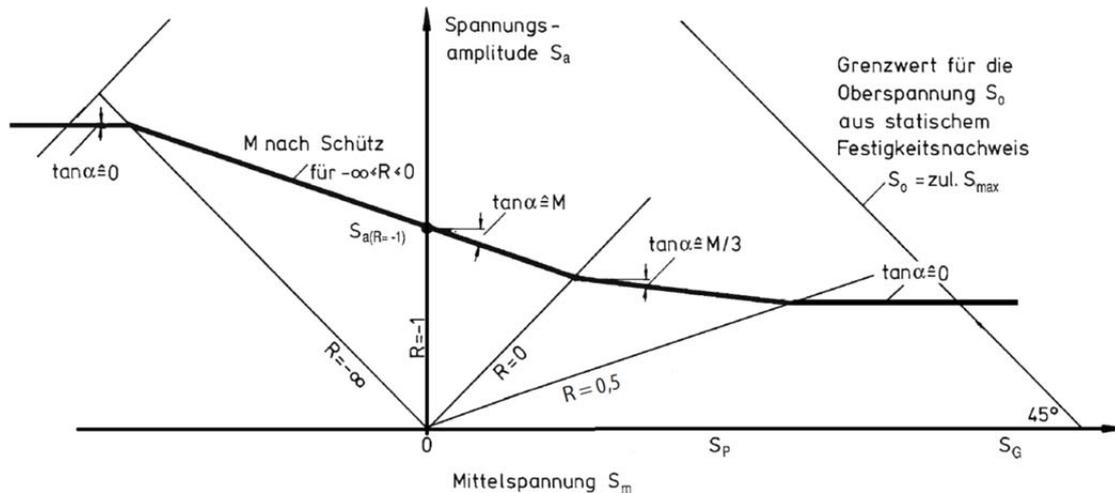


Bild 10 Haigh-Diagramm mit der Definition der Mittelspannungsempfindlichkeit nach Schütz sowie für den Verlauf der Mittelspannungsempfindlichkeit von $R = -\infty$ bis $R > 0,5$ nach /FKM12/ nach /Hai06/

Eine weitere Möglichkeit den Einfluss der Mittelspannung darzustellen, bietet das Diagramm nach /Smi10/. Es bildet die Ober- und Unterspannung über der Mittelspannung ab. /Ger74/ und /Goo54/ tragen in Diagrammen die Oberspannung über der Unterspannung sowie /Moo27/ die Oberspannung über dem Spannungsverhältnis auf. Die beschriebenen Darstellungsarten sind in /Rad07/ zusammengefasst.

Um die Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von der Mittelspannung zu beschreiben, ist in /Sch67/ die Mittelspannungsempfindlichkeit M nach Gleichung (1) über die Spannungsamplitude bei Wechselbelastung, $\sigma_{a,n}(R = -1)$, sowie bei Zugschwellbelastung, $\sigma_{a,n}(R = 0)$, definiert.

$$M = \frac{\sigma_{a,n}(R = -1)}{\sigma_{a,n}(R = 0)} - 1 \quad (1)$$

Auf Basis von Ergebnissen an Stahl-, Aluminium-, Schmiede- sowie Gusswerkstoffen gibt /Sch67/ einen linearen Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit R_m und der Mittelspannungsempfindlichkeit M an. /Sch67/ verweist darauf, dass Gusswerkstoffe eine höhere Mittelspannungsempfindlichkeit bei gleicher Zugfestigkeit aufweisen als Schmiedewerkstoffe. Titan-Legierungen beschreibt /Sch67/ als weniger mittelspannungsempfindlich. Basierend auf diesen Erkenntnissen existieren verschiedene Approximationen zur Bestimmung der Mittelspannungsempfindlichkeit, die sich auf die Zugfestigkeit stützen. So gibt /FKM12/ in Anlehnung an Gleichungen aus /Hue81/ für nichtgeschweißte Bauteile unter Normalspannung bei normalen und höheren Temperaturen Gleichung (2) an.

$$M_{\sigma} = a_m \cdot 10^{-3} \cdot \frac{R_m}{\text{MPa}} + b_m \quad (2)$$

Hierin sind a_m und b_m Werkstoffkonstante, die für Gusseisen mit Kugelgraphit die Werte $a_m = 0,35$ bzw. $b_m = 0,08$ annehmen. Diese Kennwerte finden sich auch in /GL10, Gud99/. Auch für den Verlauf der Schwingfestigkeit im Haigh-Diagramm macht die FKM-Richtlinie /FKM12/ eine Aussage. /FKM12/ schlägt zwischen $R = -\infty$ und $R = 0$ eine Gerade mit Neigung M , darüber hinaus bis $R = 0,5$ nur noch eine Neigung von $M/3$ vor. Oberhalb von $R = 0,5$ ist $M = 0$ anzusetzen, Bild 10.

Bild 11 zeigt die Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeiten von der Zugfestigkeit für verschiedene Werkstoffgruppen /So95a/. Der Ursprung dieses Diagrammes findet sich in /Sch67/. Höher-feste Werkstoffe reagieren damit deutlich stärker auf Zugmittellasten, als dies bei niedrigfesten Werkstoffen der Fall ist.

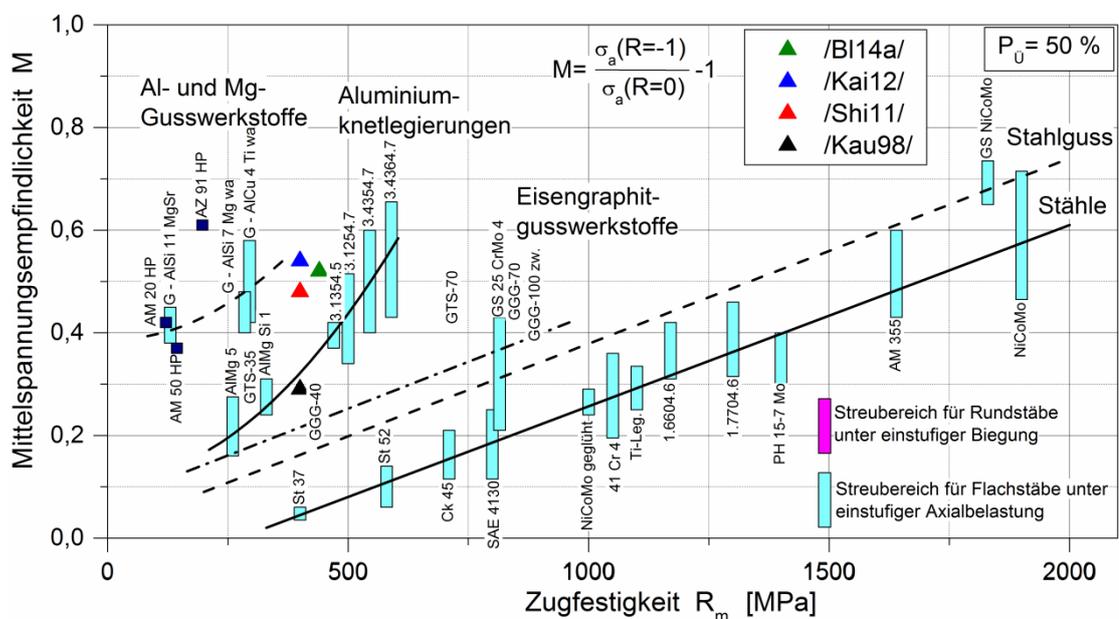


Bild 11 Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeit von Werkstoff und Zugfestigkeit /Sch67, So95a/

Während die Literatur /Son89, So90a, Sch11, Son85/ Ergebnisse zur Mittelspannungsempfindlichkeit dünnwandiger Bauteile aus GJS diskutiert, sind Erkenntnisse über die Mittelspannungsempfindlichkeit für den Dickwandguss selten. Es werden lediglich Ergebnisse für einzelne, in der Regel ferritische Legierungen diskutiert. Während /Kau98/ eine Mittelspannungsempfindlichkeit von $M = 0,29$ beim dickwandigen GGG-40 ausweist, finden /Kai12/ mit $M = 0,54$ und /Shi11/ mit $M = 0,48$ deutlich höhere Werte für den EN-GJS-400-18U-LT. Auch für den mischkristallverfestigten, ferritischen SiWind® Werkstoff sind Werte für die Mittelspannungsempfindlichkeit von $M = 0,37$ bis $M = 0,52$ veröffentlicht /BI14a/. Die Ergebnisse von /BI14a, Kai12, Shi11/ für den SiWind® bzw. den EN-GJS-400-18U-LT sind ebenfalls in Bild 11 eingetragen und dem GGG-40 /Kauf98/ gegenübergestellt. Während $M = 0,28$ für die Mittelspannungsempfindlichkeit des GGG-40 bereits am oberen Rand der in /So95a/ gezeigten Kennwerte liegt, überschreiten die Werte von /BI14a, Kai12, Shi11/ diese deutlich. /Kau98/ hat eben-

falls Ergebnisse zur Mittelspannungsempfindlichkeit am GGG-40 bei Vorhandensein von Werkstoffungängen wie Lunkern und Dross ermittelt. Diese Ergebnisse erreichen Werte der Mittelspannungsempfindlichkeit bis $M = 0,5$ /Kau98/ und sind in Bild 28 zusammengefasst.

Im Rahmen neuerer Untersuchungen von /Klu01/ wird die in /Sch67/ beschriebene lineare Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeit von der Zugfestigkeit R_m nicht bestätigt. /Klu01/ gibt stattdessen Potenzfunktionen für den Zusammenhang zwischen Wechselfestigkeit und Schwellfestigkeit für verschiedene metallische und nichtmetallische Werkstoffe für Kerbformzahlen $K_t < 5$ an. Bei Kerbformzahlen $K_t > 5$ gilt eine werkstoffübergreifende Funktion. Die Erkenntnisse aus /Klu01/ lassen eine belastungsabhängige und lebensdauerunabhängige Betrachtung der Mittelspannungsempfindlichkeit zu. Die ermittelten Funktionen basieren auf der Zusammenführung vieler Einzeluntersuchungen. Es wird ferner angegeben, dass die Schwingproben- bzw. höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen keinen relevanten Einfluss auf die ermittelten Zusammenhänge haben. Ob ebenfalls Ergebnisse aus Untersuchungen am dickwandigen, insbesondere höherfesten Gusseisen mit Kugelgraphit mit eingeflossen sind, wird nicht ausgewiesen. Für Gusseisen mit Kugelgraphit wird Gleichung (3) mit $K_a = 0,69$ und $q = 1,01$ vorgeschlagen /Klu01/.

$$\sigma_a(R = 0) = K_a(\sigma_a(R = -1))^q \quad (3)$$

Weiterhin schlägt /Klu01/ vor, aus der Wöhlerlinie für Wechselbelastung, $R = -1$, diejenige für Schwellbelastung abzuleiten. Aus der Herleitung von Gleichung (3) ergibt sich damit die Neigung der Wöhlerlinie für $R = 0$ im Zeitschwingfestigkeitsbereich nach Gleichung (4) /Klu01/.

$$k(R = 0) = \frac{k(R = -1)}{q} \quad (4)$$

Bei dieser Umrechnung wird eine eventuelle Verschiebung des Abknickpunktes unter Zugschwellbelastung oder auch die Neigung nach dem Abknickpunkt nicht berücksichtigt.

2.3.3.2 Einfluss von geometrischen Kerben

Kerben beeinflussen die Lebensdauer von Schwingproben und Bauteilen durch eine Veränderung bzw. Einschnürung des Kraftflusses und einer damit verbundenen Spannungsüberhöhung /Thu32/. Diese können durch Riefen auf der Bauteiloberfläche, Fasen, Bohrungen und auch bei Werkstoffungängen wie Gefügeänderungen, Lunkern und Drossbereichen als „metallurgische“ Kerben wirken.

Zur Beschreibung der Kerbe dient die Kerbformzahl K_t bei linearelastischem Werkstoffverhalten. Diese beschreibt die maximale Überhöhung der örtlich größten Hauptspannung $\sigma_{1,max}$ an der Kerbe bezogen auf die Nennspannung σ_n des ungestörten Probenquerschnitts. Gleichung (5) beschreibt die Kerbformzahl für eine Zug-, Druck- oder Biegebelastung /Thu32/.

$$K_t = \frac{\sigma_{1,max}}{\sigma_n} \quad (5)$$

Die Formzahl hängt dabei von den Abmessungen des Kerbradius, der Belastungsart (Biegung, Axial, Torsion) und den Absolutwerten der Bauteilabmessungen ab, nicht jedoch vom Werkstoff /Rad07/.

Für geometrisch einfache Fälle lässt sich die Formzahl K_t analytisch bestimmen. Dabei sind hauptsächlich der Querschnitt $A_{\text{prüf}}$, der Kerbradius r , die Tiefe der Kerbe t sowie die Bauteilbreite B von Bedeutung. Neuber /Neu85/ sowie auch /Thu60, Pet74, Rai78/ geben für verschiedenste Belastungsfälle (Axial, Biegung, Torsion) in Abhängigkeit des Probestabes (flach, rund) und der Kerb- bzw. Bauteilgeometrie Gleichungen und Parametersätze an, um K_t zu ermitteln.

Kerben beeinflussen die Schwingfestigkeit nachhaltig. Dabei ist vor allem die Kerbschärfe, die die Höhe der Kerbformzahl ausdrückt, für die Verringerung der Schwingfestigkeit entscheidend. Liegt eine scharfe Kerbe am Bauteil vor, kann auch die Wahl eines höherfesten Werkstoffes in Abhängigkeit der Belastungsart die Schwingfestigkeit nicht weiter steigern /Hue85, So95b, Son00/. /Hue85/ untersuchte die Gusseisenlegierungen GGG-40, GGG-60, GGG-80 sowie GTS-55-04 auf ihre Anwendungsmöglichkeiten im Fahrzeugbau unter Berücksichtigung teils scharf gekerbter Schwingproben bis $K_t > 8$. Für die untersuchten Werkstoffe ließ sich feststellen, dass eine Erhöhung der Werkstofffestigkeit ab einer Kerbformzahl $K_t = 4,0$ für Biegewechselbelastung und $K_t = 2,8$ für Biegeschwellbelastung keine Steigerung der ertragbaren Schwingfestigkeitsamplitude mehr erwarten lässt, Bild 12.

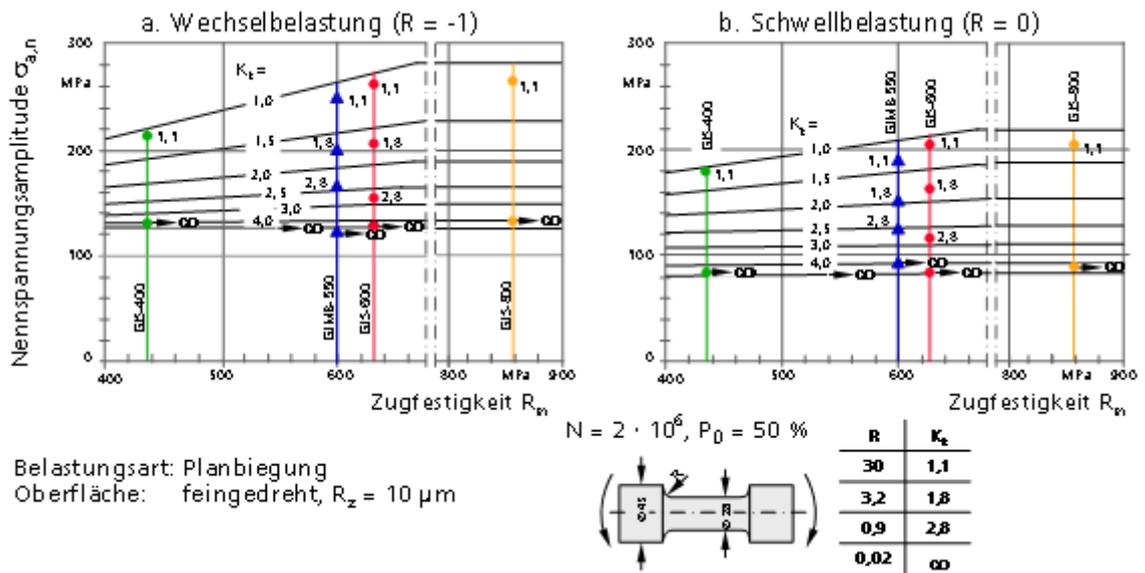


Bild 12 Kerbempfindlichkeit für Gusseisenwerkstoffe /Hue85/

Die Kerbformzahl ist ein reiner Geometriewert, der die Beeinflussung der Schwingfestigkeit durch Kerben nicht allein erklärt. Für die genaue Beschreibung der Wirkung von Kerben auf die Schwingfestigkeit ist das Spannungsgefälle oder auch der Spannungsgradient χ zu beachten /Hai06/. Der Spannungsgradient bestimmt den Abfall der Spannungen vom Kerbgrund zum Bauteilinneren in Abhängigkeit von Kerbgeometrie, Bauteilgröße und Maximalspannung /Sie49, Sie55/. Dieser ist in Zusammenhang mit Bild 13 nach Gleichung (6) definiert.

$$\chi = \tan\varphi = \left(\frac{d\sigma}{dx}\right)_{\sigma_{\max}} \tag{6}$$

Kerbform	Bezogenes Spannungsgefälle χ^* [1/mm]		
	Axialbean-spruchung	Biegebean-spruchung	Torsionsbe-anspruchung
	0	$\frac{2}{D}$	$\frac{2}{D}$
	0	$\frac{2}{D}$	$\frac{2}{D}$
	$\frac{2}{r}$	$\frac{2}{r} + \frac{2}{d}$	$\frac{1}{r} + \frac{2}{d}$
	$\frac{2}{r}$	$\frac{2}{r} + \frac{2}{d}$	$\frac{1}{r} + \frac{2}{d}$
	$\frac{2}{r}$	$\frac{2}{r} + \frac{4}{D+d}$	$\frac{1}{r} + \frac{4}{D+d}$
	$\frac{2}{r}$	$\frac{2}{r} + \frac{4}{D+d}$	$\frac{1}{r} + \frac{4}{D+d}$

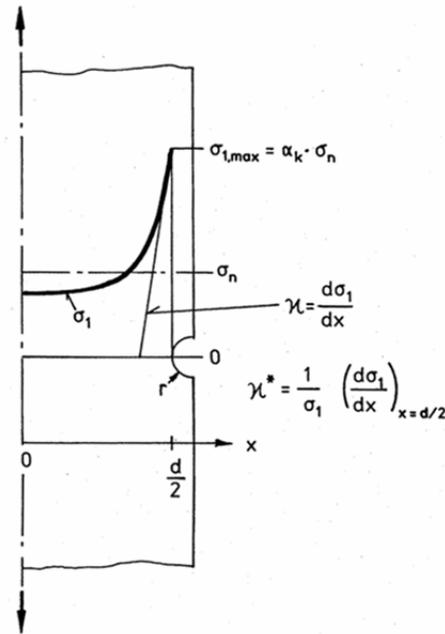


Bild 13 Spannungsgradient /Sie49, Sie55/

Der Spannungsgradient wird oft als auf die maximale Hauptspannung σ_{max} bezogener Spannungsgradient χ^* angegeben, Gleichung (7), /Sie55/.

$$\chi^* = \frac{1}{\sigma_{max}} \left(\frac{d\sigma}{dx} \right)_{\sigma_{max}} \tag{7}$$

Formeln für den bezogenen Spannungsgradienten χ^* für einfache Kerbfälle finden sich in /Sie55, Rad07, Hai06, Gud99/. Der Spannungsgradient beschreibt geometrisch den sogenannten Stützwirkungseffekt des um die Kerbe liegenden Werkstoffes. Dabei kommt es je nach Größe des Spannungsgradienten zu mehr oder weniger großen Beanspruchungen benachbarter Werkstoffvolumenelemente. Diese Stützwirkung lässt sich in eine Mikro- und Makrostützwirkung unterteilen. Die Mikrostützwirkung ist dabei abhängig von der Kerbschärfe, dem Spannungsgradienten und dem hoch beanspruchten Werkstoffvolumen im Bereich der Kerbe /Neu85/. Die Makrostützwirkung beschreibt den Fall, dass bei lokaler Überschreitung der Fließgrenze im Kerbgrund die Lastübernahme benachbarter, weniger beanspruchter Werkstoffelemente ein unkontrolliertes Fließen verhindert /Neu85, Gru82, Kau94/. Durch die Stützwirkung wirkt sich die Kerbwirkung vor allem bei duktilen Werkstoffen nicht vollständig in einer Schwingfestigkeitsminderung in Höhe der Kerbformzahl K_t aus. Diese geringere Abminderung beschreibt die Kerbwirkungszahl K_f als Quotient der Schwingfestigkeit des ungekerbten zur Schwingfestigkeit des gekerbten Probestabes bei gleicher Schwingspielzahl N , Gleichung (8), /Thu32/. Dabei gilt, dass $1 \leq K_f \leq K_t$ ist.

$$K_f = \frac{\sigma_{a,n,ungekerbt}}{\sigma_{a,n,gekerbt}} \tag{8}$$

Der Spannungsgradient hat unter anderem für die Bewertung der Wirkung von Oberflächenverfestigungsmaßnahmen Bedeutung, da diese nur eine begrenzte Einwirktiefe besitzen. Fällt die Spannung in Abhängigkeit des lokal vorliegenden Spannungsgradienten zur Bauteilmitte nur langsam ab, kann der Anriss auch unter der Oberfläche der verfestigten Schicht zum Grundwerkstoff ohne Verfestigung hin auftreten, falls dort die lokale Beanspruchung größer ist als die lokale Beanspruchbarkeit. Dies ist jedoch auch abhängig von der Beanspruchungsart (Axial- und Biegebelastung, Lastverhältnis R) /Son97/. Demnach ist stets der Zusammenhang zwischen Bauteilgeometrie, Belastung, Spannungsgradient und Oberflächenverfestigungsmaßnahme zu ermitteln /Rad07/.

Die Mikrostützwirkung lässt sich nach /Thu32/ auch als Kerbempfindlichkeitsziffer n_k oder nach /Sie55/ als Stützziffer n_x beschreiben. Beide Ansätze gehen davon aus, dass die Kerbwirkungszahl K_f umso mehr hinter der Kerbformzahl K_t zurückbleibt, je geringer der Kerbgrundradius und somit je höher die Spannungskonzentration ist /Hai06/. Am gebräuchlichsten ist dabei die Stützziffer nach Gleichung (9) nach /Sie55/. Sie wird in Abhängigkeit des Spannungsgradienten angegeben und durch Diagramme sowie Gleichungen /Hai06, FKM12, Rad07/ approximiert.

$$n_x = \frac{K_t}{K_f} \quad (9)$$

Zur Abschätzung der spannungsmechanischen (dynamischen) Stützziffer n_x gilt nach /Die85/ die Näherungsformel, Gleichung (10), in die nicht der Spannungsgradient, sondern der Kerbradius r und die Konstanten C_1 , C_2 , K und m nach Tabelle 1 eingehen.

$$n_x = 1 + \left(\frac{C_1}{K}\right)^m \cdot \sqrt{\frac{C_2}{r}} \quad (10)$$

Tabelle 1 Konstanten für die Berechnung von n_x nach Gleichung (10) /Die85/

Werkstoff	C_1	C_2		K	m
		Zug, Druck oder Biegung	Torsion oder Schub		
Austenitische Stähle	28,0	2	1	$R_{p0,2}$	0,45
Ferritische Stähle	55,0	2	1	$R_{p0,2}$	1,00
Grauguss, Stahlguss	12,0	2	1	R_m	0,20

Weitere Formeln für die Bestimmung der Stützziffer n_x finden sich beispielsweise in /Hue81, Gud99, Rad07/. Um die Stützwirkung im Rahmen des Festigkeitsnachweises berücksichtigen zu können, sind weiterführende Verfahren bzw. Methoden entwickelt worden. Hierzu ist etwa der Spannungsmittelungsansatz nach Neuber, der Spannungsabstandsansatz nach Peterson, der Anrissstreckenansatz nach Kogaev oder der Werkstoffvolumenansatz nach Kuguel /Kug61, Son93/ zu nennen /Rad07/.

Für die Untersuchung der Kerbwirkung bei Gusseisen mit Kugelgraphit finden sich beispielsweise Ergebnisse in /Sch11/ für GJS-400-18, GJS-500-7, Sibodur-700 und MAD1. An Schwingproben mit $K_t = 2,08$ werden Kerbwirkungszahlen K_f von $K_{f,400-18} = 1,30$, $K_{f,500-7} = 1,51$, $K_{f,Sibodur} = 1,50$ und

$K_{f,MADI} = 1,70$ ermittelt und daraus Stützziffern n abgeleitet. Es ergibt sich für den GJS-400-18 $n_{400} = 1,60$, für den GJS-500-7 $n_{500-7} = 1,38$, für den Sibodur-700 $n_{Sibodur} = 1,39$ und für den MADI $n_{MADI} = 1,22$ /Sch11/. Beim Probenausgangsmaterial handelt es sich um Bauteile von Verbrennungskraftmaschinen und somit um eher dünnwandige Gussanwendungen.

2.3.3.3 Größeneinfluss

In der Betriebsfestigkeit wird stets nach Möglichkeiten der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus einfachsten quasistatischen und zyklischen Versuchen mit Werkstoffproben auf komplexe Anwendungsfälle gesucht und bestehende Konzepte weiterentwickelt. Hierzu dienen auch die Konzepte des sogenannten Größeneinflusses. Dabei wird unterschieden zwischen geometrischem oder auch spannungsmechanischem, technologischem, oberflächentechnischem und statistischem Größeneinfluss, um so den Einfluss der Herstellung, der Oberflächenrauheit, der Oberflächennachbehandlung und der Bauteilgeometrie auf die Schwingfestigkeit berücksichtigen zu können /Klo76, Hai06/.

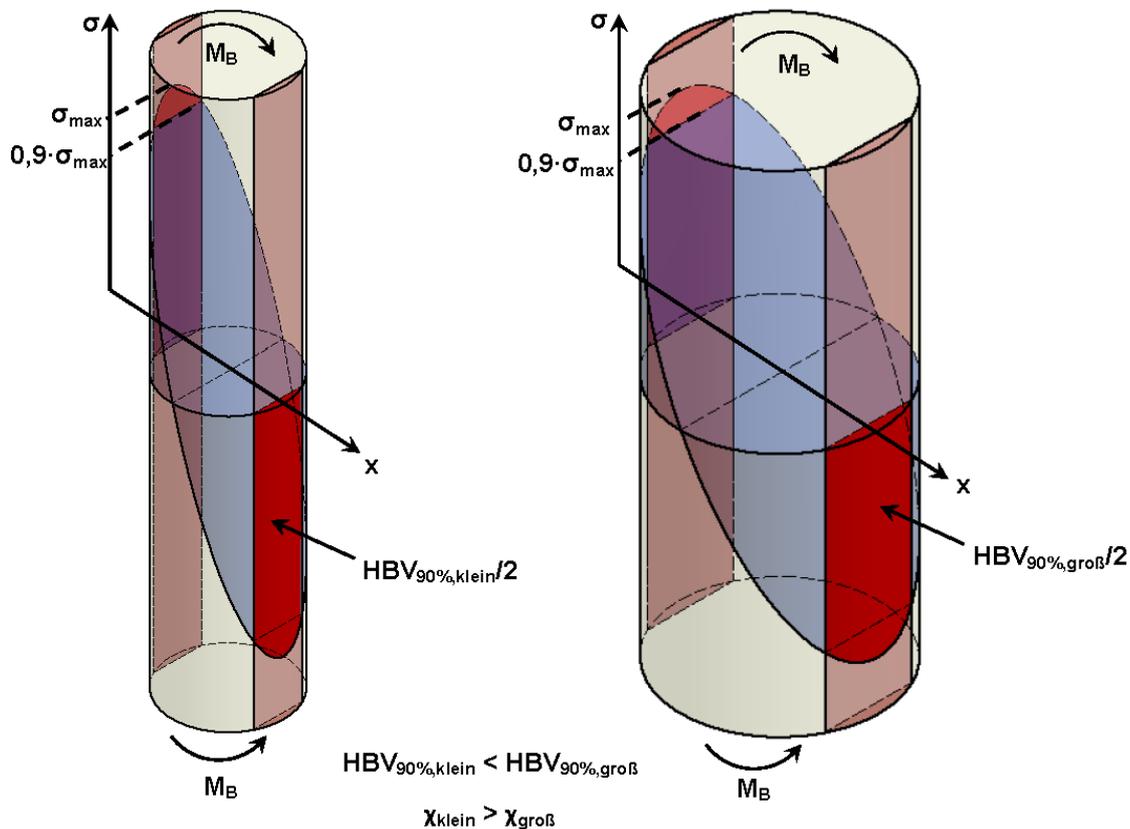


Bild 14 Darstellung der volumenbezogenen Stützwirkung

Der *geometrische* oder *spannungsmechanische Größeneinfluss* bezieht sich auf den Einfluss der Bauteil- oder Probengeometrie auf die Schwingfestigkeit. Er berücksichtigt, dass unterschiedliche Bauteilgeometrien unterschiedliche Spannungsgradienten bzw. Stützwirkungen und damit unterschiedliche Lebensdauern aufweisen /Hai06, Rad07/. Nach /Rad07/ ist der spannungsmechanische Größeneinfluss ab Probendurchmessern von $d > 50$ mm vernachlässigbar klein. In Bild 14 ist die Wirkung des spannungsmechanischen Größeneinflusses auf Basis zweier unterschiedlich großer Probendurchmesser

dargestellt. Der Gradient der Spannung steigt dabei zu kleineren Probendurchmessern bei gleichem Biegemoment M_B deutlich an.

Im *oberflächentechnischen Größeneinfluss* sind unter anderem die Rauigkeit und die Auswirkungen einer Randschichtnachbehandlung berücksichtigt. Letztere betrifft das Einbringen von Druckeigen-
spannungen, von Beschichtungen oder einer Randschichthärtung, die die Schwingfestigkeit direkt beeinflussen /Klo76/. Dabei kommt es vor allem auf die Einwirktiefe dieser Verfahren, bezogen auf den Probenquerschnitt sowie auf die Belastungssituation (Axial, Biegung, Schub) an. Hierüber ist der oberflächentechnische direkt mit dem spannungsmechanischen Größeneinfluss verknüpft.

Für die Bauteilbeurteilung kommen häufig Abschlagfaktoren beispielsweise für die Wirkung von Randschichtzuständen zum Einsatz. So berücksichtigt /FKM12/ die Randschichtbehandlung durch den Randschichtfaktor K_V bei der Bauteilauslegung und gibt Richtwerte für K_V für verschiedene Materialien und Oberflächenbehandlungsverfahren wie Nitrieren oder Festwalzen an. Gleiches gilt für die Oberflächenrauheit. /FKM12/ berücksichtigt diese im Rauheitsfaktor $K_{R,\sigma}$. Gleichung (11) beschreibt die Berechnung von $K_{R,\sigma}$ für Normalspannung und Gusseisen mit Kugelgraphit in Abhängigkeit der mittleren Rauheit R_z und der Zugfestigkeit R_m /FKM12/.

$$K_{R,\sigma} = 1 - 0,16 \cdot \lg\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right) \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot R_m}{400 \text{ MPa}}\right) \quad (11)$$

/Hue81/ und später auch /Gud99/ geben ebenfalls eine Formel für den Korrekturfaktor F_0 bezüglich der Oberflächenrauheit an, Gleichung (12). Diese hat nach /Hue81/ jedoch nur Gültigkeit für Stahl und Stahlguss. Für Grauguss wird $F_0 = 1$ gesetzt /Hue81/.

$$F_0 = 1 - 0,22 \cdot \lg\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right)^{0,64} \cdot \lg R_m + 0,45 \cdot \lg\left(\frac{R_z}{\mu\text{m}}\right)^{0,53} \quad (12)$$

In /GL10/ wird Gleichung (12) auch für GJS übernommen, allerdings mit der Korrektur der Zugfestigkeit um den Faktor 1,06.

Der *technologische Größeneinfluss* berücksichtigt die Auswirkung von herstellungsbedingten Schwingfestigkeitsunterschieden. Diese treten durch örtlich unterschiedliche Gefüge auf, die sich auf Grund unterschiedlicher Wanddicken und damit auch unterschiedlicher Abkühlbedingungen einstellen können. Ebenfalls werden Fehlstellen und nichtmetallische Einschlüsse im Werkstoff oder Bauteil unter dem technologischen Größeneinfluss zusammengefasst /Klo76, Hai06/. Häufig wird dieser Einfluss in der Zugfestigkeit R_m /FKM12/ oder auch einem Wanddickenfaktor S_t , der seitens der Beanspruchbarkeit mit der tatsächlichen Wanddicke t nach Gleichung (13) eingeht /GL10/, berücksichtigt.

$$S_t = \left(\frac{t}{25}\right)^{-0,1} \quad (13)$$

Die resultierende Schwingfestigkeit wird von der Größe des untersuchten Werkstoffvolumens beeinflusst. Dabei macht sich der *statistische Größeneinfluss* bemerkbar, der davon ausgeht, dass statistisch gesehen in einem größeren Werkstoffvolumen mehr potentielle versagensauslösende Fehlstellen zu finden sind als in kleineren Volumina und darauf, dass die schwächste Stelle im Bauteil oder System deren Gesamtausfall beeinflusst /Klo76/. Allgemein basiert der statistische Größeneinfluss auf dem „Weakest Link Concept“ nach /Wei39/. Damit ist dieser Größeneinfluss sehr eng mit dem spannungsmechanischen Größeneinfluss bzw. mit dem Spannungsgradienten verbunden, da bei jeder Änderung der Probengröße auch eine Änderung dieser Parameter eintritt. Hierzu wichtige Untersuchungen führt /Gra96/ durch.

2.3.3.4 Konzept des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens (HBV)

Das Konzept des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens HBV geht auf /Kug61/ zurück und beschreibt ein Volumen, in dem die maximal auftretenden Beanspruchungen auf ein definiertes Maß (z.B. 95 % /Kug61/) abgefallen sind. Für Anwendungen in der Bauteilbemessung schlägt Sonsino in /Son93, So95a/ ein Volumen vor, in dem die maximale Vergleichsspannung auf 90 % abgefallen ist. In Bild 14 ist das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$ dunkelrot in Abhängigkeit des Spannungsgradienten bzw. der Bauteilgröße dargestellt. Es ist dennoch zu beachten, dass dieses doppelt so groß ist wie aus Gründen der Übersichtlichkeit in Bild 14 dargestellt, da die Spannung auch unter bzw. oberhalb der dargestellten Trennebene wirkt und zum höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen beiträgt. Grenzen des Konzeptes des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens sind spröde Werkstoffe, die keine plastische Verformungsfähigkeit aufweisen /Son92, Son93/. Das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen ist neben der Bauteilgeometrie (gekerbt, ungekerbt) auch von der Bauteilbelastung (Axial, Biegung, Torsion) abhängig /Son10/. Bild 15 stellt diese Zusammenhänge schematisch für die Axial- und Biegebelastung dar.

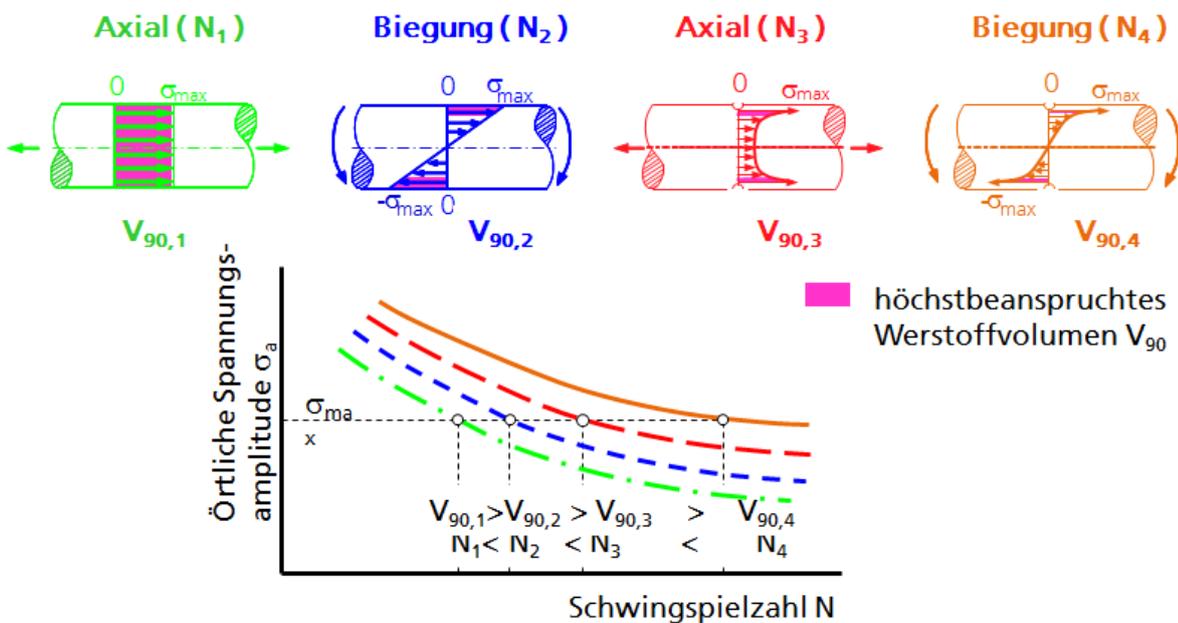


Bild 15 Einfluss des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens auf die örtliche Beanspruchbarkeit in Abhängigkeit von Belastungsart und Bauteilgeometrie /Son10/

Für die Festlegung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens ist die Beanspruchung durch eine geeignete Festigkeitshypothese zu ermitteln. Basierend auf dieser Methode lässt sich bei festem Lastverhältnis R für eine gegebene Lebensdauer, z.B. der Grenzwahrscheinlichkeit N_G , und eine gegebene Überlebenswahrscheinlichkeit, z.B. $P_{\bar{u}} = 50 \%$, die Schwingfestigkeit für ein Werkstoffvolumen ableiten, ohne, dass für diesen konkreten Fall experimentelle Ergebnisse vorliegen müssen. Graphisch lässt sich der Zusammenhang zwischen höchstbeanspruchtem Werkstoffvolumen und der resultierenden Schwingfestigkeit in einem doppeltlogarithmischen Diagramm darstellen. Darin ist auf der Ordinate die Schwingfestigkeit und auf der Abszisse das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen aufgetragen, Bild 16. Beispiele für diese Diagramme finden sich für Gusseisen mit Kugelgraphit und hauptsächlich dickwandige Anwendungen unter anderem in /Kau98, Euf13, So95a, B114a, B115a, Lin98/.

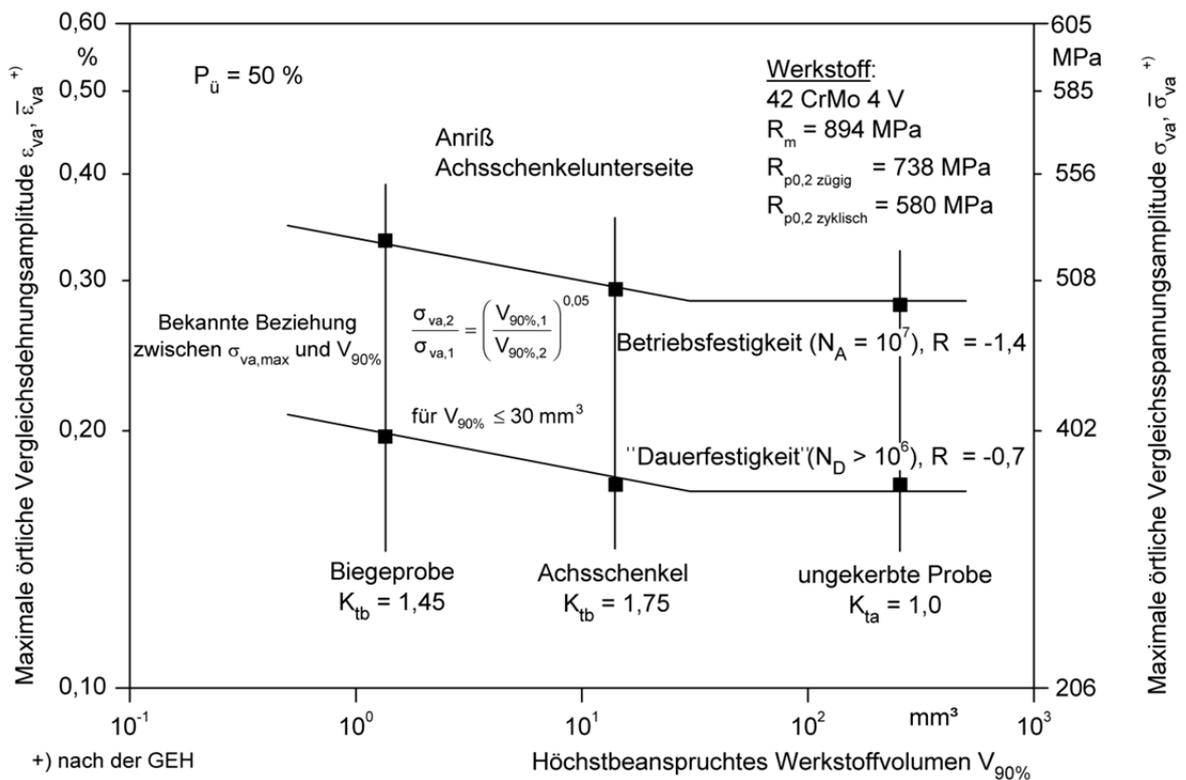


Bild 16 Darstellung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens /So95a/

Innerhalb zweier Werkstoffvolumina ist eine Umrechnung über Gleichung (14) möglich. Der Exponent v ist dabei abhängig vom Werkstoff und dem Belastungszustand.

$$\sigma_{a,2} = \sigma_{a,1} \left(\frac{HBV_{90\%,1}}{HBV_{90\%,2}} \right)^v \tag{14}$$

2.3.4 Experimentelle Bestimmung der Schwingfestigkeit

Um die Beanspruchbarkeit von Bauteilen und Schwingproben ermitteln zu können, werden Wöhlerversuche unter konstanten Belastungsamplituden und Gaßnersversuche unter variablen Belastungs-

amplituden zum direkten Nachweis der Betriebsfestigkeit durchgeführt. Bei den Versuchen lassen sich neben dem reinen Grundwerkstoff auch Einflussgrößen wie die Oberflächenrauheit oder eine Wärmebehandlung untersuchen. Das Ergebnis der Prüfung wird in Wöhler- und Gaßnerlinien dargestellt.

2.3.4.1 Wöhlerversuche – last geregelt

Die zyklische Prüfung von Werkstoffen und Bauteilen /DIN00/ unter einstufiger Belastung wird Wöhlerversuch genannt und deren Ergebnis im doppeltlogarithmischen Diagramm als Wöhlerlinie dargestellt, Bild 17. Die Wöhlerversuche werden für unterschiedliche Werkstoffe, Randbehandlungszustände, Belastungsarten, Mittellasten sowie Umgebungsbedingungen durchgeführt. Die Prüfung erfolgt bis zu einer definierten Grenzschwingspielzahl N_G oder bis zum Versagen der Schwingprobe, wobei der technische Anriss oder der Probenbruch als Versagenskriterium dienen können. Typischerweise erfolgen Untersuchungen für metallische Werkstoffe bis zu $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspiele.

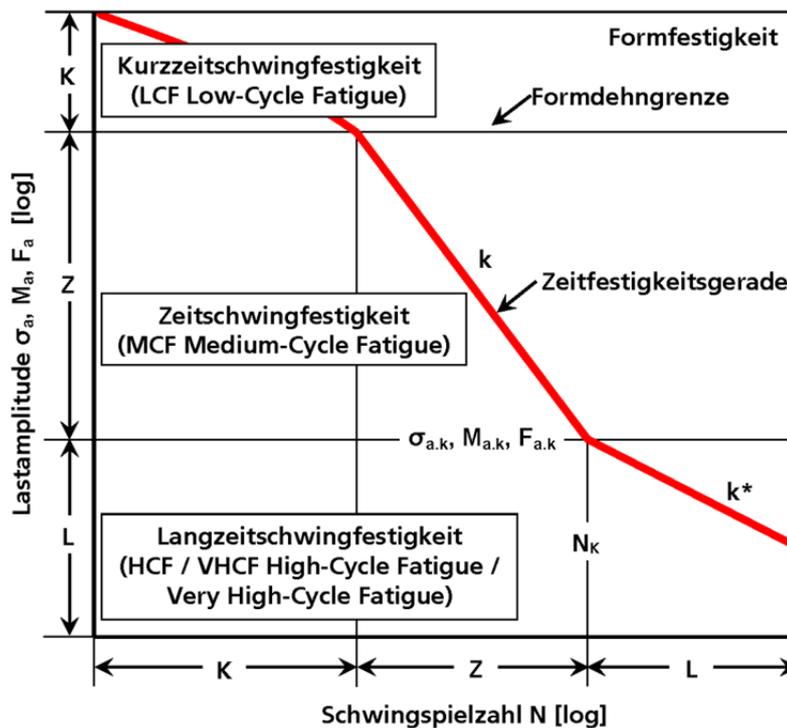


Bild 17 Kennwerte der Wöhlerlinie in Anlehnung an /Hai06/

In Bild 17 bezeichnet:

- K den Lebensdauerbereich der Kurzeitschwingfestigkeit
- L den Bereich der Langzeitschwingfestigkeit
- N die Lebensdauer in Schwingspielen
- $\sigma_{a,k}$ die Spannungsamplitude am Abknickpunkt
- Z den Lebensdauerbereich der Zeitschwingfestigkeit
- k die Neigung der Wöhlerlinie im Zeitschwingfestigkeitsbereich
- k^* die Neigung der Wöhlerlinie im Langzeitschwingfestigkeitsbereich
- N_k die Schwingspielzahl am Abknickpunkt der Wöhlerlinie

Nach /Son10/ lassen sich für die drei Bereiche der Wöhlerlinie folgende Schwingspielzahlbereiche angeben:

- Kurzzeitschwingfestigkeit: $N < 5 \cdot 10^4$ Schwingspiele
- Zeitschwingfestigkeit: $5 \cdot 10^4 < N < \text{Abknickpunkt } N_k \text{ bei } \approx 1 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^7$
- Langzeitschwingfestigkeit: $N > N_k$

Der Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit unterscheidet sich vom Bereich der Zeitschwingfestigkeit vor allem dadurch, dass der Werkstoff unter der zyklischen Belastung höhere plastische als elastische Verformungsanteile aufweist. Die Neigung k im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit ist deutlich geringer als im Zeitschwingfestigkeitsbereich. Dabei hängen beide Neigungen vom elastisch-plastischen Werkstoffverhalten bzw. dem zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhalten und der Stützwirkung ab. Bei hohen Totaldehnungen bewirken kleinste Spannungsänderungen hohe Dehnungsänderungen und damit hohe Änderungen der Lebensdauer. In technischen Regelwerken, die sich mit der Ermittlung von Wöhlerlinienverläufen anhand von quasistatischen Materialkennwerten beschäftigen, wird die Wöhlerlinie z.B. in /GL10/ abhängig von der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ oder in /Gud99/ in Abhängigkeit der Zugfestigkeit R_m nach oben hin begrenzt. Den Bereich der Zeitschwingfestigkeit kennzeichnet eine elastisch-plastische Beanspruchung im Kerbgrund und schließt mit dem Abknickpunkt zum Bereich der Langzeitschwingfestigkeit hin ab. Für Gusseisenwerkstoffe liegt der Abknickpunkt N_k in der Regel im Bereich von $N = 5 \cdot 10^5$ bis $2 \cdot 10^6$ Schwingspielen, z.B. /Kau98, Bl14a, So90a, Woh11/. Zahlreiche Untersuchungen wie etwa /Bat05, Gaß41, Mur94, Sta01/ beschäftigen sich mit dem Ermüdungsverhalten metallischer Werkstoffe oberhalb von $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen, also im Very High-Cycle Fatigue Bereich (VHCF). Sie alle stellen auch oberhalb von $N = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen noch einen Schwingfestigkeitsabfall und damit das nicht Vorhandensein der Dauerfestigkeit fest. Daher wird ein Abfall der Schwingfestigkeit von 5 % pro Dekade für Stahl und Gusseisen mit Kugelgraphit bzw. 10 % pro Dekade für Aluminium und Schweißverbindungen angenommen, sofern kein oder nur unzureichend experimentell abgesichertes Wissen über den weiteren Verlauf der Wöhlerlinie nach dem Abknickpunkt N_k vorliegt /So05b, Son07/. Für die hier untersuchten GJS-Werkstoffe bedeutet dies eine Neigung von $k^* = 44,9$, also einen Abfall der Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt um 5 % pro Dekade, wenn keine Korrosion, erhöhte oder erniedrigte Temperaturen vorliegen /So05b, Son07/. Allgemein lässt sich die Wöhlerlinie in ihren unterschiedlichen Schwingspielzahlbereichen durch

$$N = N_i \cdot \left(\frac{\sigma_{ai}}{\sigma_a} \right)^{-k} \quad (15)$$

beschreiben. Gleichung (15) geht auf /Bas10/ zurück und gilt nach der ursprünglichen Definition nur für den Bereich der Zeitschwingfestigkeit. Es bezeichnet k die Neigung allgemein und ist entsprechend im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit durch k^* zu ersetzen. Die Neigung k ergibt sich aus Gleichung (16).

$$k = \tan \alpha = \left(\frac{\lg N_2 - \lg N_1}{\lg \sigma_2 - \lg \sigma_1} \right) \quad (16)$$

Die zyklischen Versuche zur Ermittlung der Schwingfestigkeit werden spannungs- bzw. kraft- oder dehnungsgeregelt und dabei nach unterschiedlichen Konzepten durchgeführt, um die Neigung der Zeitschwingfestigkeitsgeraden k , den Abknickpunkt N_k , die Schwingfestigkeit $\sigma_{a,k}$ bei vorgegebener Lebensdauer N im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit und das Streumaß T_N bzw. T_σ zu erhalten. Dieses errechnet sich aus der Standardabweichung der Versuchsergebnisse bei Vorliegen einer logarithmischen Normalverteilung in Last- oder Lebensdauerrichtung, Gleichung (17) /Hai06/.

$$s_\sigma = 0,39 \cdot \lg\left(\frac{1}{T_\sigma}\right) \quad (17)$$

Eine Umrechnung zwischen T_σ und T_N ist mit Hilfe der Neigung k möglich, Gleichung (18) /Mau99/.

$$T_\sigma = (T_N)^{\frac{1}{k}} \quad (18)$$

Die statistische Auswertung und die Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Wöhlerlinie erfolgt nach verschiedenen Konzepten für die Bereiche der Zeit- und Langzeitschwingfestigkeit /Ma15a, DIN00/. Im Bereich der Zeitschwingfestigkeit findet das Horizonte- und das Perlschnurverfahren Verwendung, wobei das Perlschnurverfahren im Gegensatz zum Horizonteverfahren keine Information zur Streuung der Ergebnisse auf unterschiedlichen Prüfhorizonten liefert. Zur Bestimmung der Schwingfestigkeit bei einer vorgegebenen Lebensdauer ist das Treppenstufenverfahren mit der Auswertung von /Hue83/ oder /Dix48/ zu bevorzugen /DIN00/. Beim Probit- und Abgrenzungsverfahren ist der Versuchsumfang wesentlich höher, ohne, dass dies mit einem signifikanten Erkenntnisgewinn einhergeht. Für die Auswertung wird stets von einer logarithmischen Normalverteilung der Versuchsergebnisse ausgegangen. Die einzelnen Verfahren werden in der Fachliteratur ausgiebig diskutiert /Rad07, Hai06, Mau99, Mue15/, da auf Grund des oft kleinen Stichprobenumfangs je nach angestrebter Aussage andere Verfahren zu verwenden sind.

Für die vorliegenden, spannungsgeregelten Untersuchungen richtet sich die Durchführung der Versuche nach dem Horizonteverfahren /Son10, Zen00, Mau99/, weil dieses Verfahren auch eine statistische Auswertung der spannungsgeregelten Versuche erlaubt. Hierbei sind alle Lasthorizonte im Zeit- und Langzeitschwingfestigkeitsbereich mit mehreren Schwingproben belegt. Für die Verteilung der Ergebnisse wird eine logarithmische Normalverteilung zu Grunde gelegt /Bux92, Hai06, Rad07/. Die Ergebnisse können nach dem in /Spi78/ beschriebenen Verfahren, das wiederum auf der zuerst von /Fis12/ umfangreich für quasistatische Auswertungen genutzten Maximum-Likelihood-Methode basiert, statistisch bewertet werden. Das Verfahren findet für einen vorgegebenen Satz Versuchsdaten, bestehend aus Schwingspielzahl N und Spannungsamplitude σ_a , unter Berücksichtigung der jeweiligen Verteilungsfunktionen, den besten Wertesatz für die Spannungsamplitude am Abknickpunkt $\sigma_{a,k}$, die Neigung im Zeitschwingfestigkeitsbereich k und das Streumaß in Spannungsrichtung T_σ . Berücksichtigung finden ebenso die Lage von Versuchsergebnissen vor und nach dem Abknickpunkt N_k sowie ob bei einem Versuch die Grenzschwingspielzahl N_G erreicht wird (Durchläufer). Der Algorithmus optimiert dabei nicht die Gesamtwahrscheinlichkeit P_{ges} als Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten P_i dafür, dass die gesuchten Einzelparameter die Versuchsergebnisse möglichst gut treffen, sondern den nach /Edw72/ definierten Support; den natürlichen Logarithmus der Einzelwahrscheinlichkeiten P_i . Im vorlie-

genden Fall ist die Schwingenspielzahl am Abknickpunkt N_k vorzugeben. Sie lässt sich aber auch in den Parametersatz der Maximum-Likelihood-Methode einbinden.

Mit dieser Auswertung ergibt sich im Gegensatz zum klassischen Horizonteverfahren ein konstantes Streumaß im Bereich der Zeitschwingfestigkeit, wie es bei der Auswertung von Versuchen nach den Perlschnurverfahren /Zen00, Mau99/ der Fall ist. Die Streuung wird für den Bereich der Langzeitschwingfestigkeit bis zur Grenzschwingenspielzahl N_G beibehalten. Während bei der Auswertung die Neigung k im Zeitschwingfestigkeitsbereich bestimmt wird, ist die Neigung nach dem Abknickpunkt k^* vorzugeben. Dafür wird beispielsweise eine Reduktion der Schwingfestigkeit von 5 % pro Dekade ($k^* = 44,9$) für Stahl und Gusseisenwerkstoffe vorgeschlagen /So05b, Son07/, falls keine Korrosion vorliegt und experimentelle Ergebnisse in diesem Bereich nicht ermittelt worden sind.

2.3.4.2 Wöhlerversuche – dehnungsgeregelt

Die Durchführung und Auswertung von dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen unterscheidet sich deutlich von denjenigen unter Last- bzw. Spannungsregelung. Um dem unterschiedlichen Werkstoffverhalten im Bereich der Kurzzeit- (elastisch-plastisch) und ab dem Beginn der Zeitschwingfestigkeit (elastisch) Rechnung zu tragen, erfolgt die Belastung der Prüfobjekte durch eine Dehnungsregelung mittels Extensometer und die Aufzeichnung von Dehnung ϵ , Kraft F sowie der Schwingenspiele N bis zum technischen Anriss. Das Ergebnis der Prüfung sind zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Ramberg-Osgood /Ram43/ und die Dehnungswöhlerlinie basierend auf Coffin, Manson, Basquin und Morrow /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/. Beide Kurven bzw. deren Kennwerte beschreiben das zyklische Werkstoffverhalten des untersuchten Werkstoffes und dienen etwa als Eingangsparameter für einen Bauteilfestigkeitsnachweis mit Hilfe numerischer Methoden. Die Prüfung erfolgt dabei in der Regel für Wechselbelastung, $R_\epsilon = -1$.

Die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach /Ram43/ setzt sich nach Gleichung (19) aus der Summe der elastischen ($\epsilon_{a,e}$) und plastischen Dehnungsanteile ($\epsilon_{a,p}$) der Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ zusammen.

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{K'}{E}\right)^{\frac{1}{n'}} \quad (19)$$

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt für jede Spannungs-Dehnungs-Kurve durch Bestimmung des elastischen Dehnungsanteils $\epsilon_{a,e}$ als Quotient von Spannungsamplitude σ_a zu Elastizitätsmodul E . Der plastische Anteil $\epsilon_{a,p}$ ergibt sich als Differenz von $\epsilon_{a,e}$ zur Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$. In doppellogarithmischer Auftragung der Spannungsamplitude σ_a über den plastischen Dehnungsanteilen $\epsilon_{a,p}$ ist durch lineare Regression durch die Versuchspunkte der Parameter K' (zyklischer Verfestigungskoeffizient) als Wert der Spannung bei 100 % plastischer Dehnung und der Parameter n' (zyklischer Verfestigungsexponent) aus der Steigung bestimmbar /Hai06/, Bild 18.

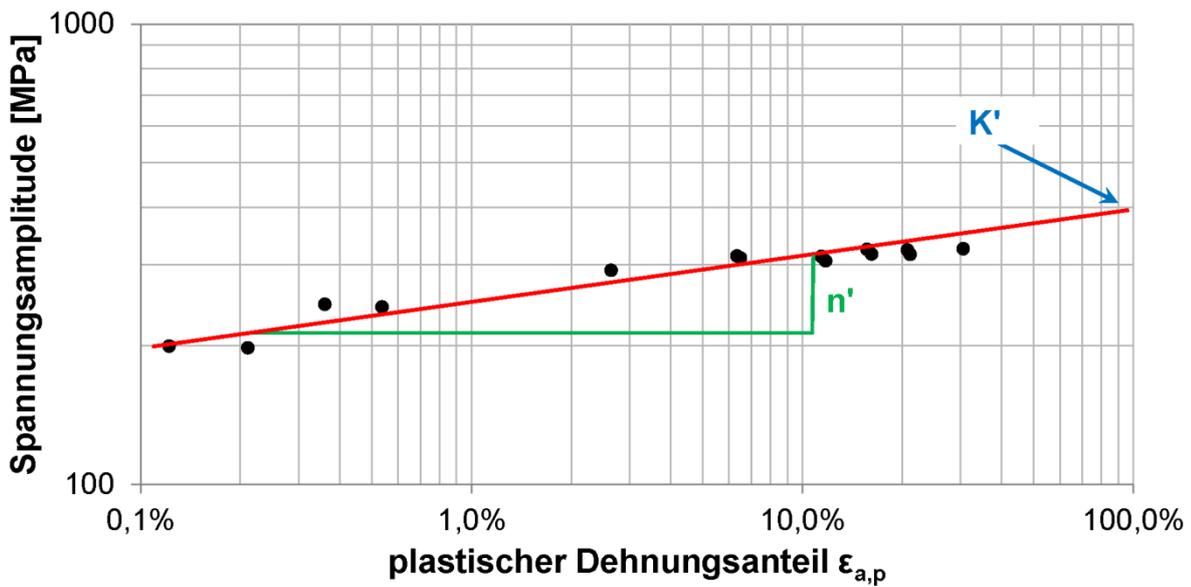


Bild 18 Bestimmung von K' und n'

Eine zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve zeigt Bild 19. Zusätzlich ist im Diagramm die Erstbelastungskurve des Versuchs mit der höchsten Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ aufgetragen. Die Auftragung beider Kurven lässt einen Vergleich des Werkstoffverhaltens bei quasistatischer und zyklischer Belastung zu und gibt Aufschluss darüber, ob ein Werkstoff unter der zyklischen Belastung ver- oder entfestigt oder ein neutrales Verhalten aufweist. Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit weisen in der Regel ein zyklisch verfestigendes Verhalten auf /So90a, B114a, B115a/.

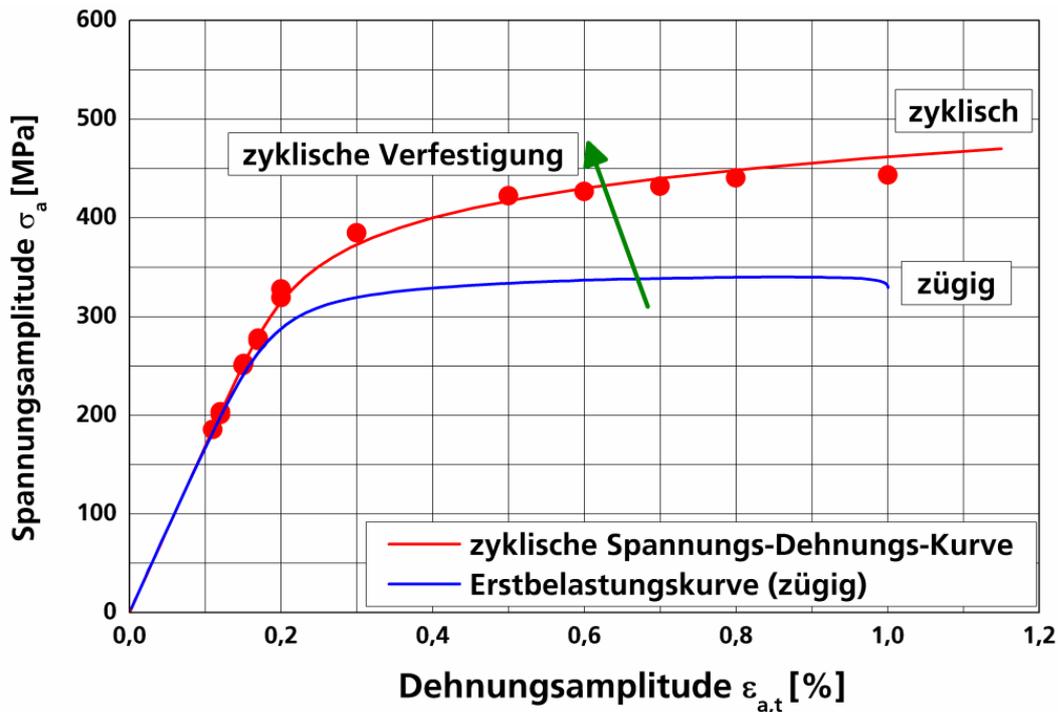


Bild 19 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und Erstbelastungskurve für einen EN-GJS-400

Auch die Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie basiert auf der Unterscheidung von plastischen und elastischen Dehnungsanteilen, Gleichung (20).

$$\epsilon_{a,t} = \epsilon_{a,e} + \epsilon_{a,p} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2 \cdot N_i)^b + \epsilon'_f \cdot (2 \cdot N_i)^c \tag{20}$$

/Bas10/ beschreibt einen Ansatz für eine Gerade im doppeltlogarithmischen Diagramm für den elastischen Dehnungsanteil $\epsilon_{a,e}$ der Totaldehnung $\epsilon_{a,t}$ in Abhängigkeit der Lebensdauer N . Auch der plastische Anteil der Totaldehnung ergibt nach Ansätzen von /Cof54, Man65/ eine Gerade. Die Addition dieser beiden Geraden führt zu der Dehnungswöhlerlinie für die Gesamtdéhnung nach /Mor65/. In Gleichung (20) sind σ'_f der zyklische Spannungskoeffizient, ϵ'_f der zyklische Dehnungskoeffizient, b der zyklische Spannungsexponent und c der zyklische Dehnungsexponent. Jeder der beiden Summanden in Gleichung (20) bildet für sich eine Lebensdauerlinie im doppeltlogarithmischen Wöhlerdiagramm, deren Summe die (Gesamt-)Dehnungswöhlerlinie in Bild 20 ergibt.

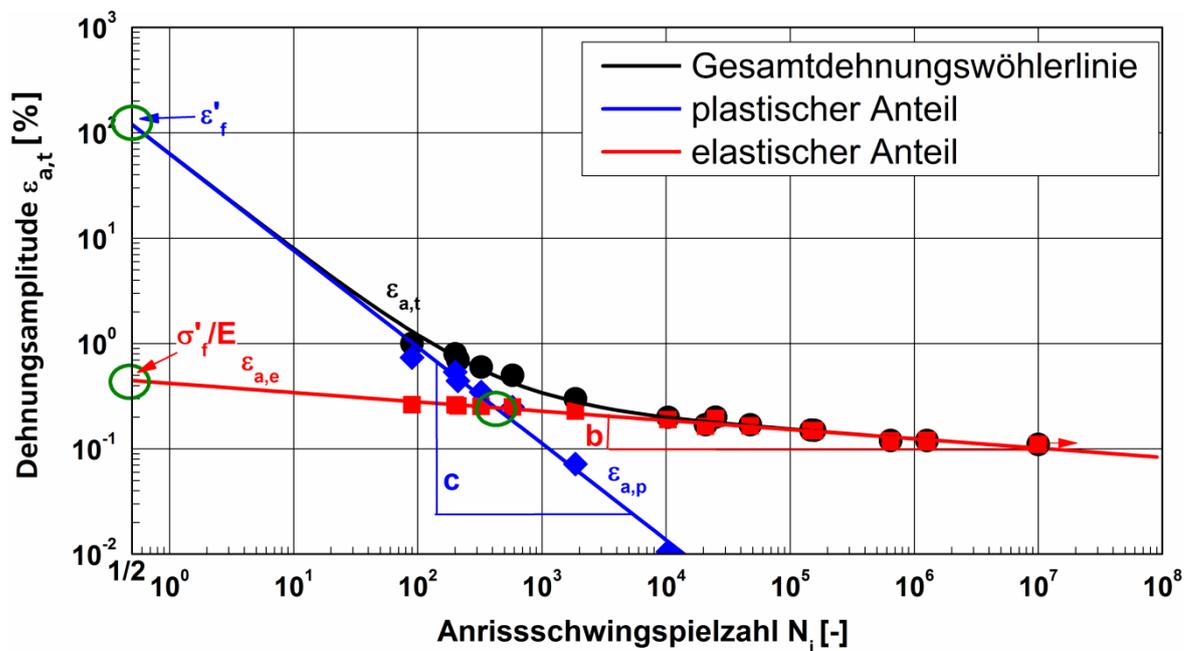


Bild 20 Darstellung der elastischen, plastischen und der summierten Dehnungswöhlerlinie

Auf Basis der Parameter der Dehnungswöhlerlinie lassen sich, sofern die Kompatibilitätsbedingung erfüllt ist /Nie08/, die Parameter K' und n' der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven nach Gleichung (21) und (22) ermitteln. Eine detaillierte Herleitung dieser Beziehung findet sich beispielweise in /Nie08/.

$$K' = \frac{\sigma'_f}{(\epsilon'_f)^{n'}} \tag{21}$$

$$n' = \frac{b}{c} \tag{22}$$

Allerdings ist die Kompatibilitätsbedingung vor allem bei Gusseisenwerkstoffen mit Kugelgraphit häufig nicht erfüllt z.B. /B114a, B115a/ und eine Ableitung der Parameter für die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach /Ram43/ aus den Kennwerten der Dehnungswöhlerlinie nach /Bas10, Cof54, Man65, Mor65/ nur mit Vorbehalt möglich.

Die Durchführung der dehnungsgeregelten Versuche ist in Richtlinien festgehalten und gibt etwa die Prüffrequenzen in Abhängigkeit der Dehnungsamplituden vor. Für metallische Werkstoffe erfolgt das Vorgehen der Prüfung meist in Anlehnung an das Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP1240 /SEP06/. Wenn ausreichende Versuchspunkte vorhanden sind, erfolgt die statistische Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche analog zu den lastgeregelten Wöhlerversuchen. Die Umrechnung der Dehnungswöhlerlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_0 = 50\%$ auf andere Überlebenswahrscheinlichkeiten zeigt /Gr79a/.

Um in kurzer Zeit eine Information über das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten eines Werkstoffes zu erhalten, bietet sich der Incremental Step Test (IST) an /Lan69/. Dieser basiert auf der Belastung der Werkstoffprobe mit variablen Dehnungsamplituden unter Wechselbelastung, $R = -1$. Der Amplitudenverlauf ist in Bild 21 dargestellt und beginnt mit dem Aufzug auf die maximale Dehnungsamplitude $\epsilon_{a,max}$, um gleichzeitig die quasistatische Erstbelastungskurve aufzunehmen. Die weiteren Belastungen werden kontinuierlich um ein festgelegtes Inkrement verkleinert und anschließend wieder vergrößert, Bild 21.

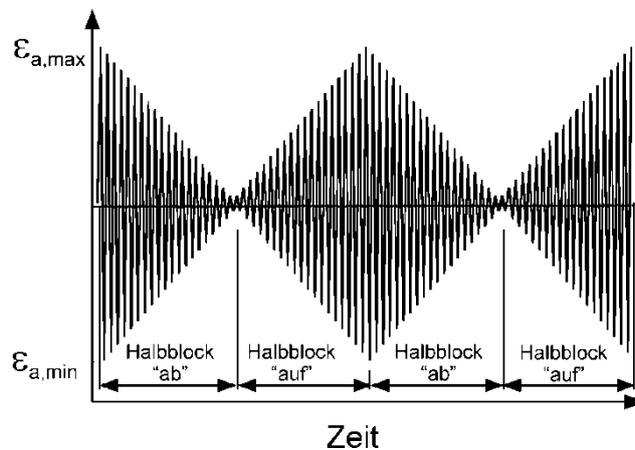


Bild 21 Belastungsverlauf beim Incremental Step Test /Lan69/

Neben dem konventionellen IST wird auch ein verkürzter IST entwickelt /Son79/. Mit der damit bestimmten zyklischen 0,2 %-Dehngrenze $R'_{p0,2}$ wird für verschiedene Stahlwerkstoffe eine Korrelation mit Betriebsfestigkeitskennwerten aus Gaßnerlinien ermittelt /Son79/.

Durch den IST lässt sich mit nur einer Werkstoffprobe das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten abschätzen, wobei die Parameter K' und n' analog wie oben beschrieben anhand der Umkehrpunkte berechnet werden. Weiterführende Hinweise zur Anwendung von Incremental Step Tests in der Materialprüfung und deren Aussagefähigkeit im Vergleich zu dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen stellt /Wag07/ für einige Aluminium- und Stahlwerkstoffe dar. Dort wird auch gezeigt, dass das Spannungs-Dehnungs-Verhalten aus Incremental Step Tests das Werkstoffverhalten unter variablen Amplituden – also Gaßnerversuchen – besser beschreiben kann, als dies mit den Kennwerten der Dehnungswöhlerversuchen der Fall ist.

2.3.4.3 Gaßnerversuche

Ernst Gaßner erkannte in den 1930er Jahren, dass für die Lebensdauer die Höhe und die Häufigkeit der auftretenden Belastungsamplituden von entscheidender Bedeutung sind. Er führte Schwingfestigkeitsversuche unter standardisierten Blockprogrammen durch, die die im Betrieb wechselnden Belastungsamplituden und damit auch die realen Bauteillebensdauern widerspiegeln sollten /Gaß39/. Dabei bieten die mittlerweile durch variable Amplitudenversuche ersetzen Blockprogrammversuche die Möglichkeit, Werkstoffproben und Bauteile direkt unter realen Belastungsbedingungen zu prüfen /Hai06/. Die Ergebnisse dieser sogenannten Gaßnerversuche unter Dehnungs- oder Spannungsregelung werden wie die Wöhlerversuche im doppeltlogarithmischen Diagramm als Gaßnerlinie aufgetragen. Auch hier finden zur Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung die gleichen Methoden Anwendung, die bereits bei den Wöhlerversuchen erläutert wurden. Die zur Prüfung herangezogenen variablen Lastzeitreihen oder Lastkollektive basieren meistens auf durch Zählverfahren aufbereitete Lastmessungen am Realbauteil. Zählverfahren unterscheiden sich in einparametrische (z.B. Klassengrenzenüberschreitungs- oder Bereichspaarzählung) oder zweiparametrische (z.B. Rainflow-Klassierung). Eine Übersicht über die Zählverfahren und die Ermittlung von Belastungskollektiven findet sich in /Bux92, Hai06, Gud99, Koe12, Rad07/. Die dem Gaßnerversuch zu Grunde liegenden Kollektive werden charakterisiert durch den Kollektivformparameter ν , den Kollektivhöchstwert (Maximallast), das Lastverhältnis \bar{R} als Verhältnis des größten zum kleinsten Wert des Kollektivs sowie den Kollektivumfang H_0 /Bux92, Hai06/. Je fülliger die Form des Kollektivs, desto näher kommt das Gesamtkollektiv dem Wöhlerversuch. Ein Beispiel für unterschiedliche Kollektivformen zeigt Bild 22 mit dem Kollektivumfang H_0 in Form der Summenhäufigkeit H , dem Kollektivhöchstwert $\bar{\sigma}_a$, der Spannungsamplitude σ_a sowie dem Kollektivformparameter ν . Das Kollektiv lässt sich durch Gleichung (23) unter Nutzung von ν beschreiben.

$$H = H_0 \left(1 - \left(\frac{\sigma_a}{\bar{\sigma}_a}\right)^\nu\right);$$

$\nu = 1$: Geradenkollektiv; $\nu = 2$: Gaußkollektiv;

(23)

$\nu = \infty$: Rechteckkollektiv (Wöhlerversuch)

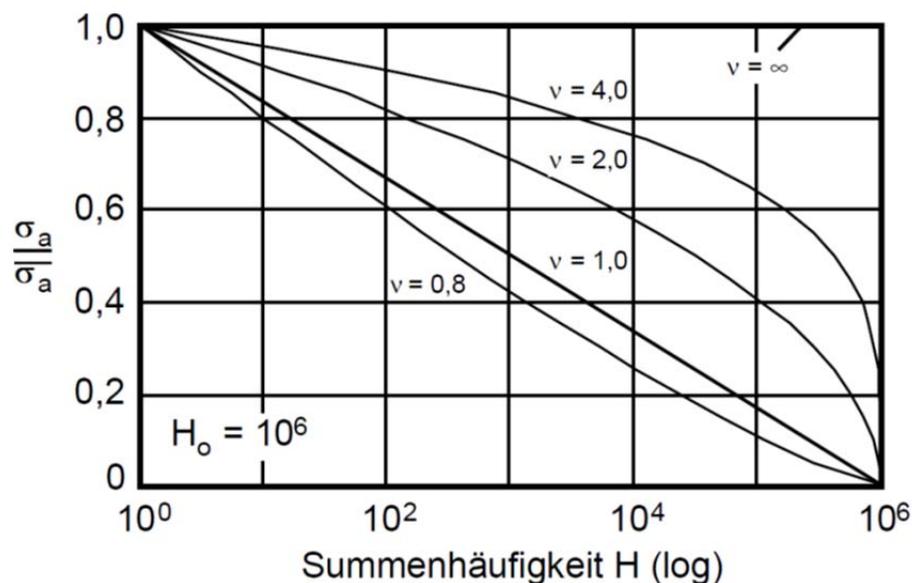


Bild 22 Kollektivformen und Formparameter (bezogene Kollektive) nach /Bux92, Zen00/

Der Kollektivform kommt eine entscheidende Bedeutung bezüglich der Bauteillebensdauer zu. Bild 23 zeigt Ergebnisse von Untersuchungen an Spurstangen in Form einer Wöhler- und zweier Gaßnerlinien unterschiedlicher Kollektivform /Son08/. Je geringer die Kollektivfülligkeit und damit der Anteil an hohen Belastungsamplituden an der Belastungsteilfolge wird, desto höher ist die ertragbare Schwingfestigkeit. Damit verbunden ist die Möglichkeit, den lasttragenden Bauteilquerschnitt zu verringern, um beispielsweise Gewicht einzusparen /Son08/.

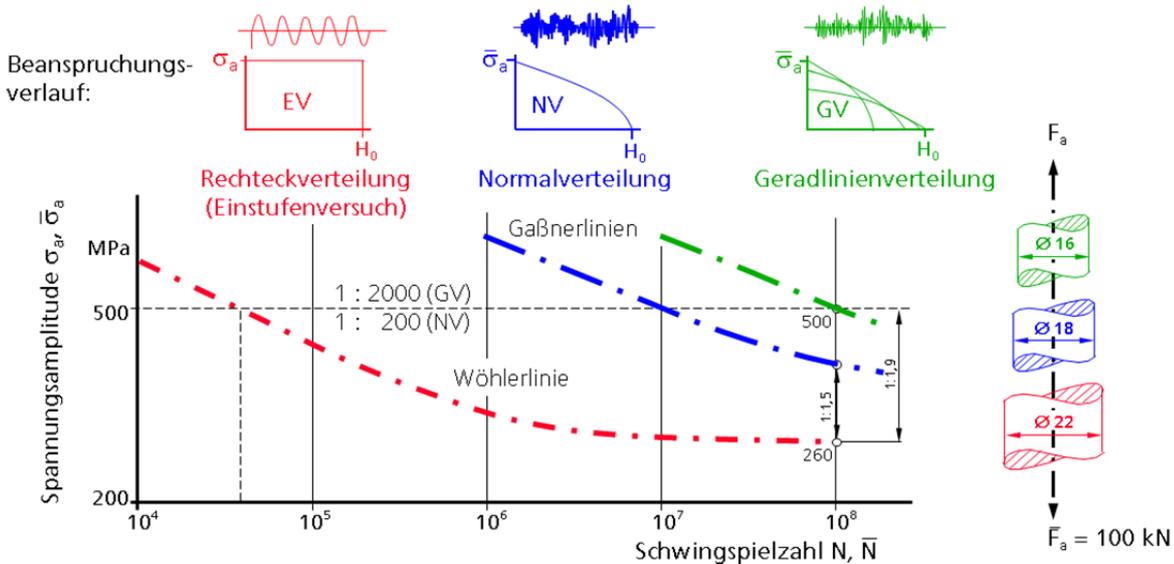


Bild 23 Einfluss der Kollektivform auf die Lebensdauer nach /Son08/

2.3.5 Festigkeitshypothesen

Unter realen Belastungen liegen selten nur einachsige Beanspruchungen im Bauteilquerschnitt vor. Durch die Kerbwirkung von Fasen, Wanddickenübergängen und Bohrungen entstehen stets mehraxiale Belastungen, auch wenn nur eine einachsige Beanspruchung vorliegt. Zudem können sich unterschiedliche Belastungen (Torsions-, Axial- und Biegebelastung) einander überlagern und führen ebenso zu einer mehraxialen Beanspruchung. Um diese Spannungszustände bei der Bauteilauslegung berücksichtigen zu können, werden Festigkeitshypothesen eingesetzt, mit denen eine Vergleichsbeanspruchung bestimmt und die mehraxialen Beanspruchungen auf die einaxiale Beanspruchung in Form einer Vergleichsspannung abgebildet wird. Die gebräuchlichen Festigkeits- oder auch Vergleichsspannungshypothesen sind die Gestaltänderungsenergie- (GEH), die Schubspannungs- (SH) und die Normalspannungshypothese (NH). Ihr Geltungsbereich erstreckt sich bis auf die Normalspannungshypothese /Son11/ nur über proportionale Beanspruchungen. Treten drehende Hauptspannungen auf, gelten die Gestaltänderungsenergie- und die Schubspannungshypothese nicht und es ist auf andere Hypothesen, etwa die der kritischen Schnitt Ebene, oder auf integrale Methoden zurückzugreifen /Sim75, Soc00, Son11, Wie12, Zen80/.

2.3.5.1 Die Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH)

Die Gestaltänderungsenergiehypothese nach Maximilian Tytus Huber, Richard von Mises /vMi13/ und Heinrich Hencky kommt für zähe, duktile Werkstoffe zum Einsatz und vergleicht die zur Gestaltänderung bei konstantem Volumen auf Grund von Gleitungen zu Beginn des Fließens erforderlichen Arbeiten. Sie gilt für quasistatische und dynamische Belastungen, wobei im quasistatischen Fall die Streck- oder Dehngrenze und für dynamische Fälle die Schwingfestigkeit als maximal zulässiger Wert für die Vergleichsspannung angesetzt wird. Für den zweidimensionalen Spannungszustand gilt die Vergleichsspannung $\sigma_{v,GEH}$ nach Gleichung (24) /Gro12/.

$$\sigma_{a,zul} \geq \sigma_{v,GEH} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (24)$$

2.3.5.2 Die Schubspannungshypothese (SH)

Henri Édouard Tresca definiert innerhalb der Schubspannungshypothese eine Vergleichsspannung /Tre64/ derart, dass die maximale Schubspannung τ_{max} die Materialbeanspruchung charakterisiert /Gro12/. Die Schubspannungshypothese findet dabei hauptsächlich bei spröden Werkstoffen Anwendung. Dabei ist die Vergleichsschubspannung $\sigma_{v,SH}$ für den dreidimensionalen Spannungszustand definiert als die Differenz zwischen minimaler und maximaler Hauptspannung, die dem doppelten der maximal auftretenden Schubspannung entspricht Gleichung (25) /Gro12/.

$$\sigma_{a,zul} \geq \sigma_{v,SH} = \sigma_1 - \sigma_2 = 2 \cdot \tau_{max} \quad (25)$$

Für den zweidimensionalen Spannungszustand gilt Gleichung (26) /Gro12/.

$$\sigma_{a,zul} \geq \sigma_{v,SH} = 2 \cdot \tau_{max} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (26)$$

2.3.5.3 Die Normalspannungshypothese (NH)

Die Normalspannungshypothese geht auf Galileo Galilei /Gal38/ und ihre analytische Formulierung auf William John Macquorn Rankine /Ran58/ zurück und findet hauptsächlich Anwendung bei spröden bis wenig duktilen Materialien, bei denen von einem ebenen Trennbruch, also ohne vorheriges Fließen, auszugehen ist oder bei Vorliegen eines eingeschränkten Verformungsvermögens unter der äußeren Belastung (z.B. allseitiger Zug oder Stoßbelastung). Für den dreidimensionalen Spannungszustand gilt, dass die Vergleichsspannung $\sigma_{v,NH}$ gleich der maximalen Hauptspannung σ_1 ist, Gleichung (27), /Gro12/.

$$\sigma_{a,zul} \geq \sigma_{v,NH} = \sigma_1 \quad (27)$$

Im zweidimensionalen Spannungszustand gilt Gleichung (28).

$$\sigma_{a,zul} \geq \sigma_{v,NH} = \frac{1}{2} \cdot \left[\sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \right] \quad (28)$$

Für Gusseisenwerkstoffe kommt die Normalspannungshypothese zur Anwendung /Gr79b, Mu94a, Neu86, Son85/, da von einem im Gegensatz zu Stahl weniger duktilen Werkstoffverhalten auszugehen ist. Auch wenn in diesem Zusammenhang duktile Gusseisenwerkstoffe /ZGV07, Has08/ untersucht werden, sind diese im Vergleich zu Stahlwerkstoffen als vergleichsweise weniger duktil anzusehen und weisen im Zugversuch bei geringer Duktilität Spaltbruchanteile auf.

2.3.6 Bemessungskonzepte

Für die Bemessung von Bauteilen, die unter zyklischer Beanspruchung stehen, existieren unterschiedliche Konzepte. Bei der sogenannten dauerfesten Auslegung soll bei zyklischer Beanspruchung das Bauteil diese Beanspruchung beliebig oft ohne Versagen ertragen. Dies ist im Sinne einer meist endlichen Nutzungsdauer und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll. So erfolgt häufig eine betriebsfeste Auslegung des Bauteils, bei der die Belastung nur über die tatsächliche Bauteilnutzungsdauer ohne Versagen von diesem zu ertragen ist /Bux92, Zen00, Hai06/. Hierzu werden Bemessungskonzepte auf Basis von Nennspannungen, örtlichen Spannungen und Dehnungen oder Strukturspannungen angewendet, Bild 24, /Son08/. Darüber hinaus dienen die Methoden der Bruchmechanik zur Auslegung, falls ein Anriss bereits erfolgt ist. Die Bruchmechanik wird der Vollständigkeit halber erwähnt und auf /Hai06, Gro11, FKM01, Rad07/ verwiesen.

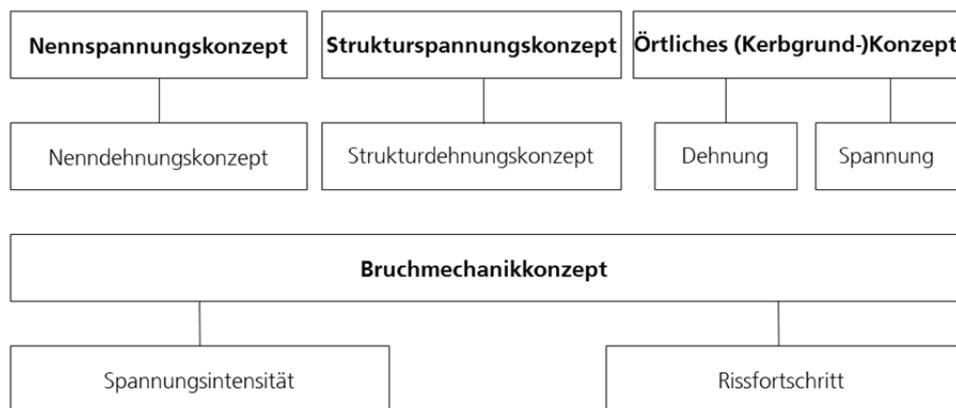


Bild 24 Bemessungskonzepte /Son08/

2.3.6.1 Spannungsbasierte Bemessungskonzepte

Die spannungsbasierten Bemessungskonzepte arbeiten auf Basis von Spannungen und im Bereich des linear-elastischen Werkstoffverhaltens. Als bekanntester Vertreter der spannungsbasierten Bemessungskonzepte ist das *Nennspannungskonzept* zu nennen. Dies ist ein globales Auslegungskonzept und findet Anwendung, wenn im zu betrachtenden Bauteilquerschnitt eine Nennspannung eindeutig

definierbar ist sowie für den vorliegenden Kerb- und Belastungsfall entsprechende Wöhlerlinien zur Gegenüberstellung von Belastung und Belastbarkeit vorliegen /Hai06/. Dabei wird die Nennspannung mit der Beanspruchbarkeit verglichen, die über die Wöhlerlinie mit der Lebensdauer verknüpft ist. Somit müssen entsprechende Nennspannungswöhlerlinien für einen Betriebsfestigkeitsnachweis in umfangreicher Anzahl für verschiedene Lastverhältnisse, Kerbgeometrien und Werkstoffzustände bereitstehen /Hai06/. Im Idealfall liegen direkt Nennspannungsbauteilwöhlerlinien vor. Analytisch lässt sich der Festigkeitsnachweis auf Basis der Nennspannungen z.B. anhand von /FKM12/ durchführen. Allerdings ist es auf Grund komplexer Geometrien oftmals schwer eine eindeutige Nennspannung zu definieren, sodass das Konzept auf grundlegende Anwendungsfälle mit einfachen geometrischen Verhältnissen beschränkt bleibt.

Auf Grund der Einschränkungen des Nennspannungskonzeptes wird das linear-elastische *Kerbspannungskonzept* entwickelt /Thu60/. Dabei werden durch Dehnungsmessungen oder mittels Finite-Element-Berechnungen in schwingbruchkritischen Bauteilbereichen die örtlichen Dehnungen ermittelt, in Spannungen überführt und unter Berücksichtigung von Gradientenmodellen anhand zutreffender örtlicher Spannungswöhlerlinien bewertet /Gru70/. Eine Weiterentwicklung daraus hat für Schweißverbindungen durch den Einsatz von Finite-Element-Methoden an Bedeutung gewonnen. Die Kerbformzahl K_t wird aus dem Verhältnis der maximalen Kerbgrundhauptspannung für die mit einem geeigneten Referenzradius modellierten Schweißnahtkerbe und der Hot-Spot-Spannung bestimmt, sofern keine einfach zu beschreibende Geometrie vorliegt und sich Nennspannungen definieren lassen /Rad00, Rad06, Rad09/. Die Kerbwirkung ist dann als elastisch durch die Kerbformzahl K_t anzunähern. Lässt sich diese Formzahl nicht eindeutig bestimmen, bietet sich die Möglichkeit, örtliche Spannung und äußere Belastung durch einen Übertragungsfaktor anzunähern /Rad07/. Die Bewertung der Schweißverbindung erfolgt dann anhand entsprechender Kerbspannungswöhlerlinien in Abhängigkeit des Referenzradius.

Zu den spannungsbasierten Konzepten gehört ebenfalls das *Strukturspannungskonzept*. Es hat ausschließlich Bedeutung für die Berechnung von Schweißverbindungen /Rad00, Rad06, Rad07, Rad09/ und existiert in zwei Varianten. Nach /Hai06/ erfolgt die Ermittlung von Strukturspannungen in einem definierten Abstand zum Nahtauslauf mit Dehnungsmessstreifen und/oder Finite-Element-Methoden. Nach der heute gängigen und in Regelwerken verwendeten Methode erfolgt eine Extrapolation von Oberflächenspannungen auf den Nahtauslauf zur Ermittlung der Hot-Spot-Spannung /Hob06, Rad00, Rad06, Rad07/. Eine Bewertung findet hier mit Hilfe von entsprechenden Spannungswöhlerlinien statt. Die Struktur- bzw. Hot-Spot-Spannungen folgen aus Dehnungsmessungen /Rad00, Rad06, Rad07, Rad09/. Für weitere Varianten von Strukturspannungen sei auf /Rad06/ hingewiesen.

2.3.6.2 Dehnungsbasiertes Bemessungskonzept (Kerbdehnungskonzept)

Für die Bemessung elastisch-plastisch beanspruchter Bauteilbereiche finden dehnungsbasierte Konzepte wie das *Kerbdehnungskonzept* Anwendung /Rad07/. Dieses betrachtet die Festigkeit lokal, das heißt im Kerbgrund bzw. im Bereich höchster Beanspruchung. Es berücksichtigt die Wirkung der vorliegenden Kerben bzw. der Spannungsüberhöhungen im Kerbgrund und kann eingesetzt werden, wenn das Nennspannungskonzept nicht anwendbar ist /Hai06, Rad07/.

Bei den Auslegungen nach dem Kerbdehnungskonzept wird unterstellt, dass die Spannungs- bzw. Dehnungsgradienten örtlich die Verformung kontrollieren, insbesondere dann, wenn sie elastoplastisch werden. Ein Vorteil der Anwendung ist, dass sich örtliche Beanspruchungen durch den mitt-

lerweile umfangreichen Einsatz von Finite-Element-Analysen direkt beurteilen lassen. Hierfür ist der Vergleich des zyklischen Werkstoffverhaltens anhand der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve und der Dehnungswöhlerlinie mit den lokal am Bauteil vorliegenden Dehnungen notwendig. Der Vergleich ist dann zulässig, wenn davon ausgegangen wird, dass sich der Werkstoff in der Kerbe vergleichbar zu einem Werkstoffelement verhält, das unter zyklischer Belastung in einer kerbfreien Werkstoffprobe beansprucht wird /Rad07/. Die örtlichen Beanspruchungen lassen sich entweder durch Finite-Element-Analysen (FEA) oder durch Messungen an bestehenden Bauteilen oder Baumustern unter Realbelastungen ermitteln. Ein großer Vorteil in der Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes ist der relativ überschaubare Versuchsumfang, der für die Ermittlung der notwendigen Materialkennwerte abzuarbeiten ist. Bis auf die Ermittlung einer werkstoffbezogenen Dehnungswöhlerlinie und der entsprechenden zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven an ungekerbten Schwingproben sind nach /Sch88/ keine weiteren Untersuchungen durchzuführen. Hingegen hat /Gru82/ darauf hingewiesen auch den Beanspruchungsgradienten und das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen mit zu berücksichtigen. Ebenfalls zeigt /See96/, wie die Stützwirkung einzubinden ist. Randschichteffekte, z.B. durch das Induktivhärten, sind im Idealfall bereits im Berechnungsmodell durch geänderte Werkstoffmodellierungen oder Überschlagnsfaktoren der Richtlinien, z.B. /FKM12/, vorzusehen.

Im Kerbdehnungskonzept erfolgt die Berücksichtigung unterschiedlicher Lastverhältnisse bzw. Mittelspannungseinflüsse ursprünglich durch die Erweiterung der Coffin-Manson-Basquin-Gleichung durch eine Mittelspannung durch Morrow /Mor65/ und später durch Schädigungsparameter. Diese bilden mittelspannungsbehaftete Schwingspiele in schädigungsäquivalente Schwingspiele mit einer Mittelspannung von i.d.R. $R = -1$ ab. Meistens kommt der Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper /Smi70/, P_{SWT} , nach Gleichung (29) zum Einsatz. Er impliziert jedoch eine Mittelspannungsempfindlichkeit $M = 0,4$ für alle Werkstoffe, die jedoch keine Allgemeingültigkeit besitzt, wie aus Bild 11 hervorgeht.

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \varepsilon_{a,t} \cdot E} \quad (29)$$

Zur Anwendung des Schädigungsparameters in Schädigungsrechnungen wird dieser mit der Gleichung der Dehnungswöhlerlinie verknüpft und so eine Schädigungsparameter-Wöhlerlinie ermittelt. Für eine unter Wechselbelastung ermittelte Dehnungswöhlerlinie, $R_\varepsilon = -1$ bzw. $\varepsilon_m = 0$, ergibt sich aus Gleichung (29) zusammen mit Gleichung (20) und Gleichung (30) die Schädigungsparameter-Wöhlerlinie, Gleichung (31).

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 \cdot N_i)^b \quad (30)$$

$$P_{SWT} = \sqrt{\sigma'^2_f \cdot (2 \cdot N_i)^{2b} + E \cdot \sigma'_f \cdot \varepsilon'_f \cdot (2 \cdot N_i)^{b+c}} \quad (31)$$

Zahlreiche Modifikationen des P_{SWT} sowie von der Mittelspannungsempfindlichkeit unabhängige Schädigungsparameter fassen /Hai06, Rad07/ zusammen. Diese basieren entweder auf energetischen oder rissbruchmechanischen Betrachtungen. Beispiele für die Anwendung des Kerbdehnungskonzeptes finden sich z.B. in /Bis14, Gr79a, Gru82, Kau94/.

2.3.7 Bauteilauslegung im Eisengroßguss

Die Bauteilauslegung im Großguss ist gekennzeichnet durch die Nutzung von synthetischen Kennwerten auf Basis quasistatischer Zugfestigkeitskennwerte aus Angussproben. Eine umfangreiche, lokale Entnahme von Schwingproben oder gar die Prüfung des kompletten Bauteils wird entweder auf Grund einer Einzelteilfertigung und/oder Bauteilmassen von mehreren 100 t häufig verhindert. Im Auslegungsprozess bzw. dem Festigkeitsnachweis gegen zyklische Belastungen von Großgussbauteilen kommt daher häufig die Richtlinie des Forschungskuratoriums Maschinenbau /FKM12/ oder im speziellen Fall der Auslegung von Windenergiekomponenten die Auslegungsrichtlinie des Germanischen Lloyd /GL10/ zum Einsatz. Dabei beziehen sich die Berechnungsgrundlagen in vielen Teilen auf das Konzept der synthetischen Wöhlerlinien, die auf /Hue81/ zurückgehen. Die Erkenntnisse hieraus erweitern /Gud99, Ber13/ in verschiedenen Arbeiten und ergänzen diese um neue Werkstoffgruppen. Allerdings erfolgt die Auslegung mit Hilfe des Nennspannungskonzeptes /Gud99, Ber13/.

Die Basis der Bauteilbemessung wie beispielsweise in /GL10, FKM12/, bilden an Angussproben oder anderen Halbzeugen gemessene oder aus den Werkstoffnormen übernommene quasistatische Werkstoffkennwerte. Berücksichtigt man speziell die Berechnungsvorschriften /GL10, FKM12/, folgt auf Grundlage der Mess- oder Normwerte in weiteren Schritten die Ermittlung der Wöhlerlinienparameter. Hierzu zählt die Wöhlerlinienneigung k im Zeitschwingfestigkeitsbereich, die Bestimmung des Abknickpunktes N_k und der sogenannten Dauerschwingfestigkeit. Jedoch gibt /FKM12/ die Neigung k und den Abknickpunkt N_k im Gegensatz zu /GL10/ in Abhängigkeit der Bauteilherstellung (geschweißt / nicht geschweißt) und dem verwendeten Werkstoff fest vor. Weitere Formeln schätzen bei beiden Bemessungsrichtlinien die Mittelspannungsempfindlichkeit auf Basis der quasistatischen Kennwerte ab. Ergebnisse aus /Bl14a, Kai12, Shi11/ haben jedoch gezeigt, dass hier deutliche Unterschiede zwischen den synthetisch ermittelten und den tatsächlichen Kennwerten vorliegen können. Wird die Bemessung wie üblich mit der synthetisch ermittelten Wöhlerlinie für Wechselbelastung, $R = -1$, begonnen und auf eine Schwellbelastung, $R = 0$, mittels des synthetischen Wertes für die Mittelspannungsempfindlichkeit umgerechnet, liegt das Ergebnis auf der deutlich nicht konservativen Seite.

Nach der Ermittlung der Wöhlerlinie ist diese mit proben- und bauteilspezifischen Faktoren abzumindern. Sowohl /GL10/ wie auch /FKM12/ berücksichtigen die Rauheit der Bauteiloberfläche R_z in einem Oberflächenrauheitsfaktor und die zu bemessende Wanddicke in einem Wanddickenfaktor. Letzterer darf bei /GL10/ entfallen, falls die quasistatischen Werkstoffkennwerte an dem lokal zu bemessenden Werkstoff ermittelt und nicht aus Normen entnommen werden. Der wichtigste Abschlagfaktor in /GL10/ stellt jedoch der Gütestufenfaktor S_d dar, der die zulässige Beanspruchbarkeit auf Basis der am Bauteil vorliegenden Werkstoffungängen reduziert. Dazu findet für ein mittels zerstörungsfreier Prüftechnik untersuchtes Bauteil eine Gütestufeneinteilung z.B. nach /VDG01, DIN90/ in Abhängigkeit der gefundenen Ungängen und des hierzu verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahrens statt. Diese Vorgehensweise beinhaltet nach der Prüfung z.B. mittels Ultraschall oder Durchstrahlung zuerst die Einteilung der gefundenen Ungängen in Fehlerklassen anhand z.B. von Vergleichsmustern /AST10, VDG01/, die der lokalen Ungänge einen Fehlerwert zuweisen. Dieser Fehlerwert kann eine Lunckerklasse nach /VDG01, AST10/ sein. Bezogen auf die untersuchte Wanddicke übersetzt z.B. /VDG01/ den Fehlerwert dann in eine Gütestufe, die zwar lokal gilt, letztendlich aber für die Qualität des Gesamtbauteils steht. Wird die vorher zwischen Gießer, Kunde und Zertifizierer für das Bauteil festgelegte Gütestufe überschritten, erfolgt entweder eine Nachbearbeitung oder der zeit-, kosten- und ressourcenaufwändige Ausschuss des Bauteils. Im Auslegungsprozess berücksichtigt /GL10/ das Prüfverfahren und die Gütestufe im Gütestufenfaktor S_d auf Seite der Beanspruchbarkeit. So ist beispielsweise die synthetisch

ermittelte Spannungswöhlerlinie für eine Gütestufe 3, die mittels Ultraschall ermittelt wurde, nach /GL10/ in Spannungsrichtung auf 61 % abzumindern. Ein vergleichbares Vorgehen existiert in /FKM12/ nicht. Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung werden somit nicht berücksichtigt und lokal auftretende Werkstoffungängen können mit /FKM12/ nicht im Bauteilbemessungsprozess berücksichtigt werden.

Das Vorgehen über Gütestufen berücksichtigt allerdings nur unzureichend die tatsächliche Charakteristik der Ungänge wie deren Ausdehnung, Dichte oder auch dessen Lage in Bezug zum höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen bzw. zur neutralen Faser. Auch wird die Kerbwirkung der Lunker bzw. die Kerbempfindlichkeit der eingesetzten Werkstoffe nicht berücksichtigt. Eine exakte Betriebsfestigkeitsbetrachtung der vorliegenden Werkstoffbeanspruchung findet damit nicht statt. Eine Gütestufeneinteilung etwa auf Basis der Durchstrahlungsprüfung ist stark subjektiv und damit fehleranfällig. Exaktere Methoden zur Beschreibung der Schwingfestigkeit ungängenbehafter Bauteile fehlen ebenso wie Verknüpfungen von Charakteristiken der Werkstoffungängen mit der Schwingfestigkeit mit Hilfe der zerstörungsfreien Prüftechnik. Im Bauteilauslegungsprozess wird speziell bei der Beurteilung von örtlichen Spannungskonzentrationen (Hot-Spot) immer häufiger auf das örtliche dehnungsbasierte Konzept zurückgegriffen, z.B. für die Bemessung von Gesteinsmühlen /Bis14/. Das Konzept lässt sich durch die Ergebnisse der rechnergestützten Finite-Element-Analyse sowie auf Basis von Spannungs-Dehnungs-Kurven bzw. Dehnungswöhlerlinien anwenden. Dennoch bietet das Konzept noch keinen Ansatz wie etwa durch Lunker lokal vorliegende Festigkeiten korrekt zu bewerten sind, da hier Eingangsgrößen der zerstörungsfreien Prüfung sowie Kennwerte aus der Betriebsfestigkeit fehlen. Damit verknüpft ist die Frage nach dem korrekten zyklischen Werkstoffverhalten wie auch der Bewertung von Mittelspannungen.

2.4 Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur volumetrischen Abbildung von Ungängen

Im Rahmen der Qualitätssicherung, der Überprüfung von Annahmen hinsichtlich der zu erwartenden Werkstoffungängen sowie der Bestimmung ihrer Charakteristik werden bei Großgussbauteilen zerstörungsfreie Prüftechniken eingesetzt. Die Prüfung von Bauteilwanddicken im Bereich von 100 bis zu über 1000 mm ermöglichen jedoch nur wenige Verfahren der volumetrischen, zerstörungsfreien Prüfung, wie die Ultraschall- und die Durchstrahlungsprüfung. Verfahren der Röntgen-Computertomographie (Röntgen-CT) scheiden hierfür momentan noch aus. Eine Prüfung der aus dem Ungängenbereich entnommenen Werkstoffproben ist jedoch realisierbar. Sonstige im Qualitätssicherungsprozess angewendete Verfahren, wie etwa die Magnetpulverprüfung /DIN69/ oder die Farbeindringprüfung /DIN71, Chr85/, finden auf Grund fehlender Volumeninformationen für die Detektion von Lunkern oder anderer Volumenfehler keine Anwendung. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung finden dann z.B. im Rahmen der Bauteilbeurteilung Eingang in die Ermittlung der synthetischen Wöhlerlinien nach /GL10/.

Verfahren der zerstörungsfreien Prüftechnik, die sich an dickwandigen Gussstücken zur Volumenprüfung einsetzen lassen, beschränken sich damit auf die Ultraschall- und die Durchstrahlungsprüfung, da nur diese entsprechend hohe Wanddicken durchdringen können. Vor allem die Detektion der dreidimensionalen Ausdehnung der Lunker mittels der Ultraschalltechnik Sampling Phased Array (SPA) ist hier zu nennen. Im Folgenden werden daher die Durchstrahlungsprüfung, die Röntgen-Computer-

tomographie und die Ultraschallprüfung seitens ihrer Technik und Anwendung kurz erläutert. Für weitere Informationen sei auf beispielsweise /Fuc11, Ste95, Buz08, Kra86, Sch68/ verwiesen.

2.4.1 Durchstrahlungsprüfung

Die Durchstrahlungs- oder Röntgenprüfung stellt seit Jahrzehnten ein bewährtes Verfahren der Werkstoffprüfung dar. Sie geht auf die Entdeckung der Röntgenstrahlen durch W. C. Röntgen in den 1890er Jahren zurück /Roe95/ und ermöglicht die Durchstrahlung von Bauteilen und Werkstoffproben zur Detektion von Ungängen. Das Ergebnis ist ein Summenbild der Dichteinformation im Inneren des Prüfobjektes. Für die Durchstrahlung lassen sich zwei Strahlungsarten nutzen: Röntgenstrahlung und γ -Strahlung, die beide eine hochenergetische elektromagnetische Strahlung darstellen /Ste95/.

Röntgenstrahlung entsteht in der Röntgenröhre durch die Wechselwirkung von Elektronen mit metallischen Objekten (z.B. Wolfram /Fuc11/). Dazu emittiert ein Heizwendel (Kathode) Elektronen. Eine zwischen Elektronenquelle und metallischem Objekt (Target / Anode) angelegte Hochspannung U_e beschleunigt diese Elektronen in einem Vakuum /Fuc11/ in Richtung des Targets /Buz08, Ste95/. Durch das Durchlaufen dieser Beschleunigungsspannung U_e erhalten alle Elektronen die gleiche kinetische Energie E_{kin} , die sie infolge von Bremsprozessen nahe der Atomkerne oder Stoßprozesse mit Elektronen in den Atomschalen des Targetmaterials entweder teilweise oder komplett in Form von Strahlung bzw. Photonen wieder verlieren /Buz08, Ste95, Fuc11/. Da nahezu unendlich viele Bremsvorgänge auftreten, wird beim Bremsprozess Bremsstrahlung mit Energien von 0 bis E_{kin} emittiert /Fuc11/. Beim Stoß schlägt ein Elektron ein weiteres Elektron aus der Atomhülle des Targetmaterials heraus /Fuc11/. Da der Atomschale hierdurch ein Elektron fehlt, besetzt ein Elektron aus einer anderen Atomschale den frei gewordenen Platz unter Abgabe eines Photons (Fluoreszenzstrahlung) /Fuc11/. Die in Form des Photons abgegebene Energie ist abhängig vom Atomaufbau des Targets und wird als charakteristische Röntgenstrahlung bezeichnet /Buz08, Fuc11, Ste95, Tip07/. In der Röntgenröhre entsteht als Summe der Brems- und der charakteristischen Strahlung somit ein kontinuierliches Röntgenspektrum /Fuc11/. Für technische Anwendungen kommen zur Erzeugung von Röntgenstrahlen Röntgenröhren sowie Linear- und Ringbeschleuniger in Frage. Bild 25 zeigt den schematischen Aufbau einer Röntgenröhre.

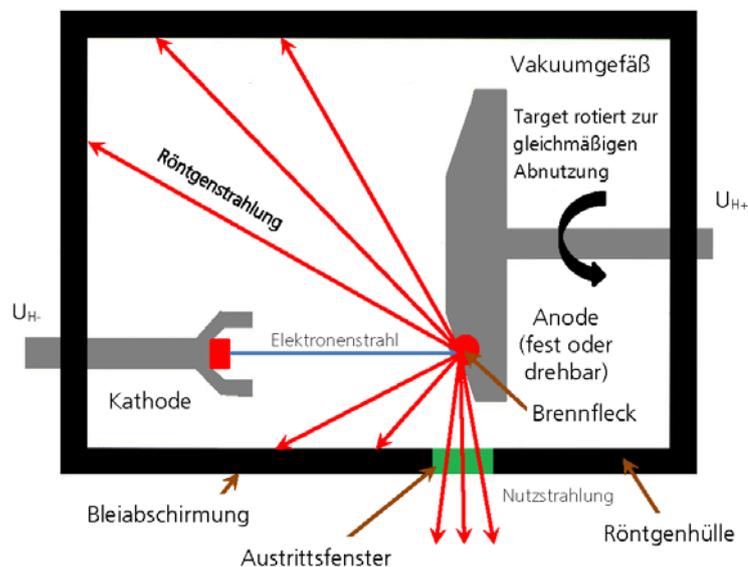


Bild 25 Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre nach /Fuc11/

γ -Strahlung entsteht, wenn ein angeregter Atomkern in seinen Grundzustand zurückkehrt. Dies geschieht z.B. beim radioaktiven Zerfall von Isotopen /Tip07/. Beim Übergang in den Grundzustand emittiert der Atomkern die überschüssige Energie in Form von γ -Strahlung. Auf Grund der festen Übergänge emittiert jedes Isotop nur bestimmte, feste Energien in Form eines Linienspektrums /Ste95/. Der Vorteil bei der Verwendung von Isotopen liegt in deren Mobilität. Während ein Betrieb von Röntgenröhren und Beschleunigern meist nur stationär möglich ist, bietet die Verwendung von γ -Strahlen in Form von transportablen Isotopen (z.B. ^{192}Ir , ^{60}Co) Vorteile beispielsweise für die Durchstrahlung von Bauwerken oder Schweißnähten an Pipelines.

Beim Auftreffen der Röntgen- oder γ -Strahlung auf Materie ergeben sich erneut Wechselwirkungen in Form des Photoeffekts, des Compton-Effekts oder der Paarbildung, wodurch sich die Strahlenintensität hinter dem Prüfobjekt verringert /Buz08, Fuc11, Ste95/. Die Schwächung der Strahlung beim Durchtritt durch Materie beschreibt das Bouguer-Lambert-Beersche Schwächungsgesetz /Bou29, Lam60, Bee52/, Gleichung (32):

$$I_S(x) = I_S(0) \cdot e^{-\mu x} \quad (32)$$

Hierin beschreibt $I_S(0)$ und $I_S(x)$ die Strahlungsintensität vor und nach dem durchstrahlten Material sowie x die Materialdicke und μ den Schwächungskoeffizienten. Dieser ist sowohl vom Material als auch von der Strahlenenergie abhängig /Ste95/. Liegt eine Ungänze im Material und damit eine im Vergleich zum Grundmaterial geänderte Dichte bzw. ein anderer Schwächungskoeffizient vor, werden an dieser Stelle mehr oder weniger Strahlenquanten absorbiert. Der Nachweis dieser lokalen Änderung der Strahlenintensität erfolgt anhand von Röntgenfilmen (Radiographie) /Ste95/. Auf der Rückseite des durchstrahlten Materials reagieren die im Film enthaltenen Silberbromidkörnchen auf die einfallenden Strahlungsquanten. Bei der Filmentwicklung verbleibt das Silber auf dem Film und verleiht diesem die optische Schwärzung. Die Charakteristika der Filme und Filmsysteme (Körnigkeit, Filmempfindlichkeit) /DIN41/, die Filmentwicklung sowie die Aufnahmetechniken sind in /Ste95/ beschrieben. Ebenso finden sich dort Hinweise für die Nachweisverfahren der Bildgüte nach /DIN21, DIN22/ und der Bildunschärfe /DIN25/. Neben Filmen lassen sich auch Fluoreszenz- und Szintillationsdetektoren oft in Kombination mit Bildwandlern für einen Nachweis der Strahlungsintensität nutzen (Radioskopie) /Ste95/.

Für technische Anwendungen der Durchstrahlungsprüfung sind die allgemeinen Grundlagen der Prüfung in der Norm DIN EN 444 /DIN44/ und darüber hinaus die Hinweise zur Durchstrahlungsprüfung im Bereich des Gießereiwesens in DIN EN 12681 /DIN81/ festgehalten. Im Falle der Durchstrahlungsprüfung von Gussbauteilen oder Gussproben erfolgt eine rein visuelle Bewertung der Ungängen (Lunker, Dross, Risse) anhand von Fehlervergleichskatalogen wie dem VDG-P 541 /VDG01/ oder der ASTM /AST10/. Beide Normen lassen die Bewertung unterschiedlicher Wanddicken zu. Während /VDG01/ Ungängen in Wanddicken ab 50 mm für Gusseisenbauteile bewertet, findet dies in /AST10/ auch für geringere Wanddicken, allerdings für Stahlgussbauteile, statt. Beide Normen verwenden den Kennbuchstaben C für die Werkstoffungänge Lunker. Die ASTM-Norm unterscheidet zusätzlich die Lunkerart nach faden-, federförmig und schwammartig mit den Kennungen a, b und c. Beiden Normen liegt ein visueller Vergleich von Lunkergröße zu ungängenfreier Materialfläche auf dem Film zu Grunde, jedoch unterscheidet /AST10/ fünf, /VDG01/ acht Lunkerklassen.

Die Röntgentechnik findet Verwendung in der 3D-Computertomographie, bei der Prüfobjekte in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten unter verschiedenen Winkeln durchstrahlt werden. Als Strahlen-

quelle dient in der Regel eine Röntgenröhre, die entweder einen fächer- oder kegelförmigen Strahl aussendet /Fuc11, Ste95/. Nach einer Belichtung dreht je nach Anlagenkonzept entweder Strahlenquelle und Detektor oder üblicherweise das Prüfobjekt im Strahlengang. Aus allen Aufnahmen errechnet eine Software eine dreidimensionale Rekonstruktion des Messobjektes zur digitalen Weiterverarbeitung /Fuc11/. Als Detektoren kommen Szintillations- und Halbleiterdetektoren zum Einsatz, die die durch Ionisierungsprozesse zwischen eintreffenden Photonen und Detektormaterial auftretenden elektrischen Ströme messen und digitalisieren /Fuc11/. Durch die Digitalisierung und die Aufnahmegüte der Detektoren lassen sich gegenüber der konventionellen Durchstrahlung bessere Auflösungen erzielen. Techniken, Anlagensysteme, mathematische Hintergründe der Rekonstruktion sowie Herausforderungen der Röntgen-Computertomographie sind in /Buz08, Fus11, Ste95/ beschrieben.

Während die Anwendung der Computertomographie im Bereich des Gusseisens bezüglich der durchstrahlbaren Wanddicke relativ schnell an ihre Grenzen stößt, lassen sich radiographische Aufnahmen z.B. mit Linearbeschleunigern auch bei Gusseisenbauteilen mit Wanddicken bis mehrere 100 mm durchführen. Da Handhabung und Gerätetechnik für Durchstrahlungsaufnahmen aufwendig sind und der Strahlenschutz in Gießereien häufig nicht umsetzbar bzw. einhaltbar ist, lässt sich eine Volumenprüfung des Bauteils vor Ort allerdings nur mittels Ultraschallverfahren durchführen. Die Grenzen der Anwendbarkeit der Durchstrahlungsprüfung liegen somit im Wesentlichen in den zur Verfügung stehenden Prüf- und Schutzeinrichtungen für die Durchstrahlung von Bauteilen aus z.B. Kugelgraphitguss mit Massen bis 320 t. Hinzu kommt eine wanddicken- und werkstoffabhängige Auflösung der Ungängen. Je nach Wanddicke, Werkstoff und Durchstrahlungstechnik liegt die maximale Bildunschärfe nach dem Stand der Technik zwischen 0,1 und 1,6 mm /DIN25/.

2.4.2 Ultraschallprüfung

Auf Basis des Sendens und Empfangens von Ultraschallwellen arbeitet die Ultraschallprüftechnik. Sie lässt sich in zahlreiche Verfahren und Techniken unterteilen, von denen zuerst das Schatten- oder Durchschallungsverfahren eingesetzt wurde /Kra86/. Es kommt der Durchstrahlungsprüfung sehr nahe, da hierbei ebenso von einem Sender Schallwellen ins Prüfobjekt eingeleitet und auf der gegenüberliegenden Seite von einem Empfänger registriert werden /Kra86/. Steht eine Werkstoffungänge im Wellengang, reduziert sich die Intensität und die Schalldruckamplitude an der Empfängerseite entsprechend /Kra86/. Die am häufigsten eingesetzte Methode ist das Impulsechoverfahren, bei dem eine Ungänge den vom Sender ausgesandten Ultraschallimpuls an einen Empfänger reflektiert /Kra86, Sch68/. Die Ungänge wirkt als Reflektor. Der Empfänger misst neben der eintreffenden Schalldruckamplitude zusätzlich die Impulslaufzeit, womit sich Größe und Abstand der Ungänge von der Bauteiloberfläche abschätzen lassen /Kra86/. Allerdings wirken auf die reflektierte Schalleistung unterschiedliche Faktoren, wie die Reflektorgröße und Oberflächenbeschaffenheit, aber auch die Absorption des Prüfobjektes und Abschattungseffekte durch vorgelagerte Ungängen /Kra86/. Die verwendeten Prüfköpfe arbeiten in der Regel auf piezoelektrischer Basis und sind als Senkrecht- und –Winkelprüfköpfe verfügbar /Kra86/. Um die elektromagnetischen Wellen in den Werkstoff optimal einzuleiten und den Prüfkopf nicht durch Oberflächenunebenheiten zu beschädigen, kommt für die Prüfung ein Koppelmedium zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt zum Einsatz. Dies geschieht durch Wasser in Form der Wasserspaltankopplung oder der Tauchtechnik /Kra86/. Auch Öl findet hierfür Verwendung /Sch68/. Im Umfeld der Prüfung von Großgussbauteilen ist die handgeführte Ultraschallprüfung mit Einschwingerprüfköpfen nach /DIN80/ fester Bestandteil des Qualitätssicherungsprozesses zur Detektion der meisten

Gussungängen. Auf Grund der häufig durch unterschiedliche Abkühlungsraten entstehenden Gefügebereiche ist eine zweifelsfreie Bestimmung von Größe, Form und Art der Ungänge anhand des Impulsechos nicht immer einfach und die Fehlerauflösung ist eingeschränkt. Zu diesem Zweck wird das gemessene Impulsecho über Tabellen und Diagramme mit Echos von Testreflektoren verglichen /Kra86, Sch68/. Zu den Testreflektoren zählen der Kreisscheibenreflektor, aber auch Nuten oder Sacklochbohrungen für komplexere Prüfobjekte wie Rohre und komplex geformte Objekte, an denen zusätzliche Winkelreflektionen entstehen /Kra86/.

Um größere Volumina zu prüfen, kann ein Prüfkopf mit mehreren Einzelementen bestückt sein. Der so entstandene Gruppenstrahler (Array) kann durch sequentielles Ansteuern der Einzelemente das Verschieben des gesamten Prüfkopfes simulieren /Kra86, Erh90/. Da solche Gruppenstrahler viel Bau- raum benötigen, werden heute sogenannte gesteuerte Gruppenstrahler (Phased Arrays) verwendet, die mehrere kleine Strahler aufweisen und sich unabhängig voneinander elektronisch ansteuern lassen /Erh90/. Bei gleichzeitiger Anregung entspricht der Gruppenstrahler einem Einzelschwinger. Durch separate Ansteuerung des Arrays ergibt sich eine flexible Anzahl von Elementarwellen, die sich nach dem Huygens'schen Prinzip überlagern und eine Fokussierung der Wellenfront unter dem Prüfkopf ermöglicht /Pud13/. Dies ist sonst nur mit einer Vielzahl von Einzelschwingern mit unterschiedlichen Einschallwinkeln umsetzbar /Pud13/. Es sind Prüfköpfe als lineare und Matrixgruppenstrahler verfügbar, die entweder eine Prüfung in der Ebene oder im Raum zulassen. Bei der Sampling Phased Array Technik (getakteter Gruppenstrahler) /Kro06, Kro07, Bul05, Bul08/ übernehmen nicht wie bei der Phased Array Technik alle Elemente des Gruppenstrahlers Sende- und Empfangstätigkeiten, sondern nur einzelne Elemente. Dabei sendet zunächst ein Element, während alle anderen empfangen /Pud13, Bul05/. Der Prüfdurchlauf auf einer Messstelle ist abgeschlossen, wenn nacheinander alle Elemente gesendet und empfangen haben. Der wesentliche Unterschied zur Phased Array Technik besteht nun darin, dass die Superposition der Schallwellen nicht im Werkstoff, sondern synthetisch im Messrechner stattfindet, zusätzliche Ultraschallmessungen zur Einstellung des Einschallwinkels bzw. der Fokustiefe entfallen und damit die Prüfzeit verkürzt wird /Pud13, Bul05/.

Das Zusammenspiel von Sender und Empfänger der Sampling Phased Array Technik bietet auch für die Rekonstruktion der Daten mit Hilfe des SAFT-Algorithmus (Synthetische-Apertur-Fokussierungstechnik) /Bul08, Zim07/ Vorteile. So können beispielsweise Ergebnisse einer bestimmten Sender-Empfänger-Kombination ausgewertet werden. Im Allgemeinen rekonstruiert der Algorithmus in der Rückprojektion der Daten zu jeder Sender-Empfänger-Kombination in Abhängigkeit von Schallgeschwindigkeit und Position des Senders einen Amplitudenwert für ein Werkstoffelement und lässt damit eine dreidimensionale Abbildung der Werkstoffungänge im Prüfvolumen zu /Bul05, Pud13/, Bild 26.

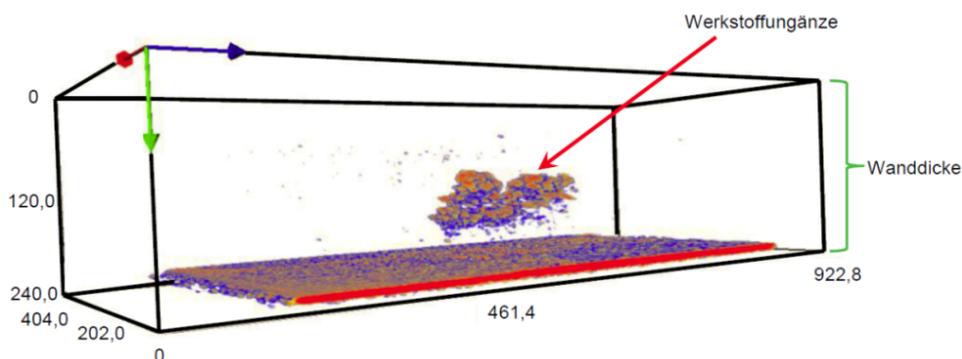


Bild 26 Rekonstruktion der Aufnahme einer Messung mit Sampling Phased Array nach /Kur14/

Die Sampling Phased Array Technik wird in /Lun14/ umfangreich an Gusseisen mit Kugelgraphit im Hinblick auf die Detektion und Abbildung von Lunkern weiterentwickelt und bietet eine hohe Auflösung der Fehlergeometrie /Bul14, Kur14, Lun14/. Die Ergebnisse aus /Kur14, Lun14/ zeigen, dass der Informationsgehalt über die Ausprägung des Lunkers mittels Sampling Phased Array mit derjenigen einer einfachen radiographischen Untersuchung am gleichen Werkstoffvolumen gut übereinstimmt. In den weiteren Untersuchungen zeigt sich zudem, dass die Summe der Amplitudenwerte der Rückwandabschattung mit der am gleichen Ort gemessenen Dichte korreliert /Lun14, Kur14/. Auch wenn dies noch mit Streuungen behaftet ist, Bild 27, zeigen sich durch die Ermittlung von lokaler Dichte und Geometrie durch die Ultraschall Sampling Phased Array Technik Möglichkeiten für eine wesentlich detailliertere Betriebsfestigkeitsanalyse von Großgussbauteilen. Der Einsatz der Ultraschalltechnik wird aktuell noch begrenzt durch die Messung in kleinen Radien und an Kanten der Bauteilgeometrie. Zusätzlich sind für unterschiedliche Werkstoffe und Bauteildicken unterschiedliche Prüfköpfe zu wählen /Kra86/. Grenzen der Ultraschalltechnik Sampling Phased Array liegen zusätzlich bei der Auflösung der lokalen Bauteildichten sowie der Größe der Ungängen. Diese liegt in Abhängigkeit der Prüffrequenz beim GJS zwischen etwa 0,3 und 6,0 mm /Lun14, Kur14/. Eine umfangreiche Übersicht über die technischen, historischen und mathematischen Hintergründe sowie die Anwendungen über die Prüfung von Gusseisenwerkstoffen hinaus gibt /Kra86/.

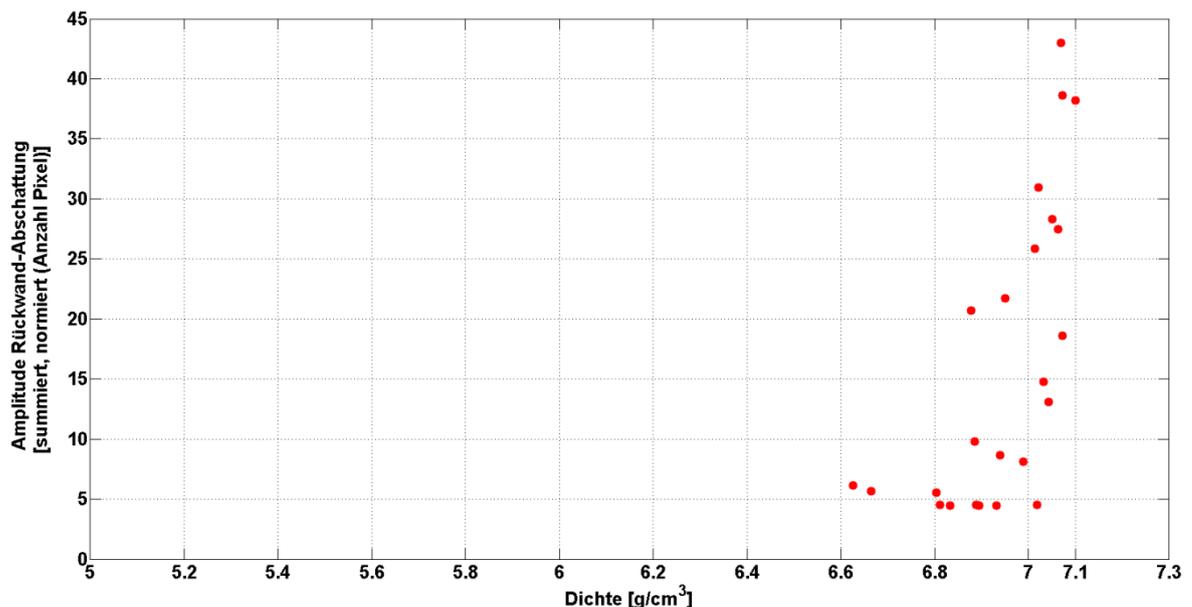


Bild 27 Amplitudenwerte des Rückwandechos in Abhängigkeit der lokalen Dichte /Kur14/

2.5 Abhängigkeit von zerstörungsfreier Prüfung und Schwingfestigkeit

Einen ersten Zusammenhang zwischen der Schwingfestigkeit von dickwandigem Gusseisen mit Ungängen und der zerstörungsfreien Prüfung in Form einer radiographischen Durchstrahlungsuntersuchung an Biegeproben stellt /Kau98/ her. Die Grundlage bildet die Bewertung von Ungängen wie Dross und Lunker durch die Fehlervergleichskataloge der ASTM-Norm /AST82/. Die Einteilung der Lunker in fünf Klassen wird auf Klasse 6, 7 und 8 erweitert und so die Abstufung innerhalb der Lunker-

Klassierung verfeinert /Kau98/. Auf Basis dieser Einteilung finden zyklische Versuche unter Wechsel- und Zugschwellbelastung statt. Die Ergebnisse zeigen zum einen eine Verringerung der Schwingfestigkeit für Schwingproben höherer Lunkerlassen sowie zum anderen eine deutliche Erhöhung der Mittelspannungsempfindlichkeit M von 0,28 auf 0,46 /Kau98/, Bild 28. Für die Lunkerklasse Cc-5 ergibt sich ein Abfall der Nennspannungsamplitude auf 53 % im Vergleich zum ungängenfreien Ausgangszustand /Kau98/, Bild 28. Als Streumaß wird $T_\sigma = 1:1,30$ für den ungängenfreien Werkstoffzustand wie auch für den Fall vorliegender Ungängen abgeleitet. Für die spätere Bauteilbeurteilung werden jedoch noch weitere Sicherheits- und Risikofaktoren eingeführt /Kau98/.

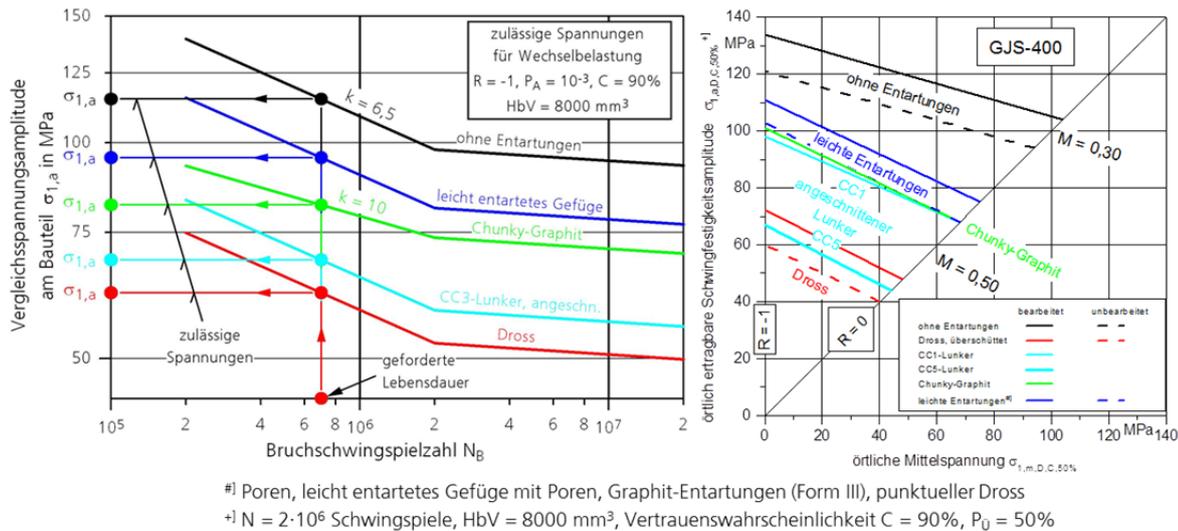


Bild 28 Schwingfestigkeit und Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Ungängen nach /Kau98/

Eine Abhängigkeit von Schwingfestigkeit und Porositäten von Kugelgraphitgusswerkstoffen zeigt /fG14/. Auch hier bilden ASTM-Normen die Grundlage, um der resultierenden Schwingfestigkeit einer Lunkerklasse zuzuordnen. Jedoch handelt es sich bei den Schwingproben mit Porositäten um Laborerzeugnisse. Die Ausarbeitungen beschränken sich auf Untersuchungen mittels Durchstrahlungsprüfung und Röntgen-Computertomographie und beschreiben keine Abhängigkeit zu Ultraschallmessungen. Auf Basis der Röntgenbefunde wird eine Einteilung in Porositätsgrade 1 – 3 durchgeführt /fG14/. Gleiches erfolgt auch bei Untersuchungen zum Porositätsverhalten bei Aluminium-Gusswerkstoffen /So90b/, bei denen die Porositätsgrade, die anhand von ASTM-Normen ermittelt werden, als Einteilungskriterium für die Schwingfestigkeitsergebnisse dienen. Zudem existieren Forschungsergebnisse für Aluminiumwerkstoffe hinsichtlich der Verknüpfung der Porosität und der Schwingfestigkeit auf Basis von Untersuchungen mittels Röntgen-Computertomographie. Auch dort findet eine Klassierung der gefundenen Poren in Porositätsgrade statt, um deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit bewerten zu können /Hei13, Fag05, Pow10, Zha04/.

Eine Bewertung von Poren, Schlauchporen und Lunkern im Stahlguss und bei Schweißverbindungen findet bei /Mu94b/ statt. Über die Ableitung einer Gleichung für die Kerbwirkungszahl K_f für den Bereich der Kurz- und Langzeitschwingfestigkeit sowie die Wahl einer Fehlerersatzgeometrie für jede versagensauslösende Ungänge werden die mit Ungängen behafteten Schwingproben mit einer Kerbwirkungszahl bewertet. Die dazu notwendigen Kerbradien werden nach dem Bruch der Schwingprobe

unter dem Mikroskop ausgemessen und durch eine Korrektur der Ergebnisse über die ermittelte Kerbwirkungszahl K_f Referenzwöhlerlinien abgeleitet /Mu94b/. Ob sich die Werkstoffwöhlerlinie des ungespannten Werkstoffes als Referenzwöhlerlinie verwenden lässt, wird nicht nachgewiesen. Die Bewertung der Werkstoffungängen vor der Prüfung findet dabei ebenfalls nach ASTM-Normen statt. Es wird auf die Ultraschallprüfung verwiesen, um die Ungängen am Bauteil zu detektieren und Kerbwirkungszahlen vor der Prüfung abzuleiten /Mu94b/. Jedoch wird der entsprechende Funktionsnachweis dieses Vorschlags nicht erbracht /Mu94b/. Eine Ergebnisübertragung auf Eisengroßgussbauteile ist zudem eine Herausforderung, da die zerstörungsfreie Prüfung die Bestimmung der Kerbgeometrie der Ungängen nur bedingt zulässt. Ebenfalls am Stahlguss untersuchen /Sig03, Har04, Bla05, Har09/ die Lebensdauer von Schwingproben mit Lunkern aus AISI 8630. Mit Hilfe von spannungs- und bruchmechanischen Ansätzen wird die Kerbwirkung K_f über Ersatzkerbradien der Lunker ermittelt und versucht die Lebensdauer der Schwingproben abzuschätzen. Um die Ersatzkerbradien zu ermitteln, werden die Lunker jedoch zusätzlich unter dem Rasterelektronenmikroskop vermessen, was am späteren Realbauteil nicht möglich ist /Sig03/. In weiteren Schritten wird aus digitalisierten, zweidimensionalen Röntgenbildern die Lunkerverteilung in wenige 10 μm dicken Schichten orthogonal zur Längsachse der Schwingprobe abgeschätzt. Diese wird der errechneten Kerbwirkungszahl K_f sowie dem aus kraftgeregelten Versuchen ermittelten Elastizitätsmodul gegenübergestellt /Har04, Bla05, Har09/. Dabei ergeben sich allerdings in beiden Gegenüberstellungen hohe Streuungen, sodass beispielsweise für ein Verhältnis von maximaler Lunkerausdehnung in der betrachteten Schicht der Schwingproben zu Probendurchmesser d von 0,9, Kerbwirkungszahlen K_f zwischen 2,5 und 8 abgeschätzt werden /Bla05/, Bild 29.

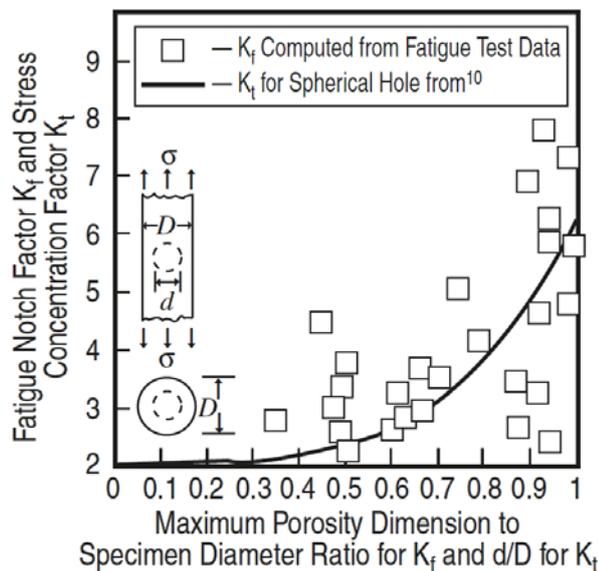


Bild 29 Abschätzung der Kerbwirkung K_f der Lunker für AISI 8630 nach /Bla05/

/Har04, Bla05, Har09/ gehen in ihren Untersuchungen davon aus, dass die Kerbwirkung und der in Folge der Lunker verringerte Elastizitätsmodul im Bereich einer wenige 10 μm dünnen Schicht der Schwingprobe entstehen. Vor allem für die Ableitung eines Elastizitätsmoduls erscheint dieses Vorgehen als nicht hinreichend, da der Elastizitätsmodul durch eine volumetrischen Ausdehnung der Lunker bzw. einer Aneinanderreihung von einzelnen Werkstoffsteifigkeiten innerhalb der Messlänge des Deh-

nungsaufnehmers repräsentiert wird. Die Messlänge des Dehnungsaufnehmers wird jedoch nicht angegeben. So ist es unter Umständen zu erklären, dass /Har04/ zwar einen linearen Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul E und der maximalen Ausdehnung des Lunkers in einer wenige $10\ \mu\text{m}$ dicken Werkstoffschicht, ermittelt aus dem digitalisierten Röntgenbild der Schwingprobe, vermutet, es aber nicht gelingt für eine ungeschnitzte Schwingprobe den tatsächlichen Elastizitätsmodul für Stahl zu bestimmen und in den Auswertungen hohe Streuungen auftreten. Die Untersuchungen in /Sig03, Har04, Bla05, Har09/ finden lediglich an dünnwandigen Laborproben statt. Eine Übertragbarkeit auf Großgussbauteile insbesondere aus Kugelgraphitguss, die nicht geröntgt, sondern nur mittels Ultraschall untersucht werden können und bei denen ein Ersatzkerbradius sowie die Lunkerverteilung in einer wenige $10\ \mu\text{m}$ dicken Schicht auf Grund fehlender Möglichkeiten für eine Röntgen-Computertomographie nicht ermittelbar ist, ist nicht möglich. Für die Untersuchungen werden nur ein Stahlwerkstoff und nur innenliegende Lunker herangezogen. Eine Übertragbarkeit auf weitere Werkstoffe und auf angeschnittene Lunker findet nicht statt. Die abschließende Ableitung der Lebensdauer der Schwingproben in /Sig03, Har04, Bla05, Har09/ zeigt ebenfalls hohe Streuungen und wird erst dann verbessert, wenn zusätzliche lokale Finite-Element-Analysen durchgeführt werden. Hierfür wird jedoch eine möglichst exakte Auflösung der lokalen Lunker beispielsweise durch Röntgen-Computertomographie benötigt, die für Großgussbauteile nicht in Frage kommt.

/Olk15/ versucht den an Zugproben aus Stahlguss gemessenen Elastizitätsmodul bei Vorhandensein von Lunkern deren Volumen gegenüberzustellen. Dazu wird das für die komplette Zugprobe inklusive Einspannbereich bestimmte Lunkervolumen mit dem Elastizitätsmodul korreliert, der lediglich im verjüngten Bereich der Zugprobe gemessen worden sein dürfte. Angaben über die Messlänge des Dehnungsaufnehmers, dessen Position auf der Zugprobe, Aussehen und Verteilung der Lunker sowie Hinweise zu eventuell im Einspannbereich befindlichen Lunkern, die bei der hydrostatischen Messung des Lunkervolumens der kompletten Zugprobe den Wert des tatsächlich in der Messlänge vorliegenden Lunkervolumens verfälschen, nennt /Olk15/ nicht. Die Gegenüberstellung von Elastizitätsmodul und Lunkervolumen zeigt daher hohe Streuungen. Auch hier gelingt es nicht, für Zugproben ohne Lunker aus den ermittelten Ausgleichsgeraden den Elastizitätsmodul E des ungeschnitzten Stahlgusses zu bestimmen /Olk15/. /Olk15/ gibt zudem nicht an, für welchen Bereich der Zugprobe der Elastizitätsmodul bestimmt und welche Fläche als Bezug herangezogen wird.

In /Wan13/ wird für den EN-GJS-400-18U-LT die Porosität in bereits geprüften Schwing- und Zugproben nach der Prüfung unter dem Rasterelektronenmikroskop auf der Bruchfläche bestimmt und der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und der Lebensdauer vereinzelt geprüfter Schwingproben gegenübergestellt. Die Schwingfestigkeitsuntersuchungen erfolgen unter Zugschwellbelastung, jedoch nur an einigen wenigen Schwingproben. Die Bestimmung der Porosität erfolgt nur anhand der bereits gebrochenen Schwingproben. Eine Übertragbarkeit auf Bauteile und eine Beurteilung anhand zerstörungsfreier Prüfung zeigt /Wan13/ nicht auf.

2.6 Zusammenfassung

Das Kapitel stellt zunächst die Werkstoffgruppe der Gusseisenwerkstoffe und insbesondere Gusseisen mit Kugelgraphit als wichtigsten Werkstoff für den Einsatz im Großmaschinenbau vor. Allerdings treten bei dickwandigen Anwendungen Werkstoffungängen wie Lunker und Dross auf, die die Werkstofffestigkeit deutlich verringern und im Rahmen der Betriebsfestigkeitsbewertung zu berücksichtigen sind. In weiteren Abschnitten werden die Kenn- und Einflussgrößen der Betriebsfestigkeit, wie die

Mittelspannungs- und Kerbempfindlichkeit, allgemein erläutert und Ergebnisse aus der Literatur speziell für dickwandige Gusseisenwerkstoffe diskutiert. Besonders für höherfeste Gusseisenwerkstoffe liegen aktuell nur wenige Ergebnisse zur Mittelspannungsempfindlichkeit, dem Kerbeinfluss oder dem transienten Werkstoffverhalten vor, was eine präzise Bauteilauslegung erschwert. Für die Auslegung von Großgussbauteilen wird daher häufig auf synthetische, spannungsbasierte Konzepte wie /Hue81, FKM12, GL10, Gud99, Ber13/ zurückgegriffen. Auch die mittels Durchstrahlungs- oder Ultraschallprüfung nachgewiesenen Werkstoffungängen finden über überschlägige Abschlagfaktoren Eingang ins synthetische Konzept, ohne das lokale zyklische Werkstoffverhalten zu berücksichtigen. Mit der Ultraschalltechnik ist es allerdings möglich, neben einer detaillierten Geometrie der Ungänge auch eine lokale Dichteinformation zu ermitteln.

Für die Verknüpfung von Betriebsfestigkeit und lokalen Werkstoffungängen liegen Arbeiten aus den Bereichen Eisen-, Aluminium- und Stahlguss vor, denen gemein ist, dass sich deren Ergebnisse nur schwerlich für die Bewertung von dickwandigen Bauteilen aus Gusseisen übertragen lassen, da die geometrische Ausbildung von Lunkern und Poren unterschiedlich ist. Weiterhin verhalten sich Aluminium- oder Stahlgusswerkstoffe auf Grund ihres Gefüges beispielsweise in Bezug auf ihre Schwingfestigkeit anders als Gusseisen mit Kugelgraphit. Auch wird auf Methoden der zerstörungsfreien Prüfung zurückgegriffen, die für die üblichen Wanddicken im Eisengroßguss keine verwertbaren Aussagen liefern. Die bisher erarbeiteten Ansätze in der Literatur zur Abhängigkeit von Schwingfestigkeit und zerstörungsfreier Prüfung lassen sich damit nur in Ansätzen auf die vorgestellte Zielsetzung anwenden, vor allem, wenn eine Röntgen-Computertomographie auf Grund der Bauteilabmessungen nicht mehr durchführbar ist. Somit sind volumetrische Aufnahmeverfahren wie die Durchstrahlungsprüfung und die Ultraschalltechnik in den Fokus der folgenden Untersuchungen zu rücken.

3 Werkstoffe und Entnahme von Schwingproben

Für die Schwingfestigkeitsuntersuchungen kommen Schwingproben unterschiedlichster Geometrien aus Gussplatten und einem Bauteil einer Windenergieanlage zum Einsatz. Sowohl vor als auch nach der Probenentnahme finden zerstörungsfreie Prüfungen an diesen Gussplatten, dem Bauteil und den Schwingproben mit verschiedenen Methoden statt. Neben den zyklischen Versuchen werden auch quasistatische Zugversuche zur Ermittlung der mechanischen Werkstoffkennwerte durchgeführt. Den Ablauf der Arbeiten und den Einsatz der zerstörungsfreien Prüftechnik gibt das Ablaufdiagramm in Bild 30 wieder.

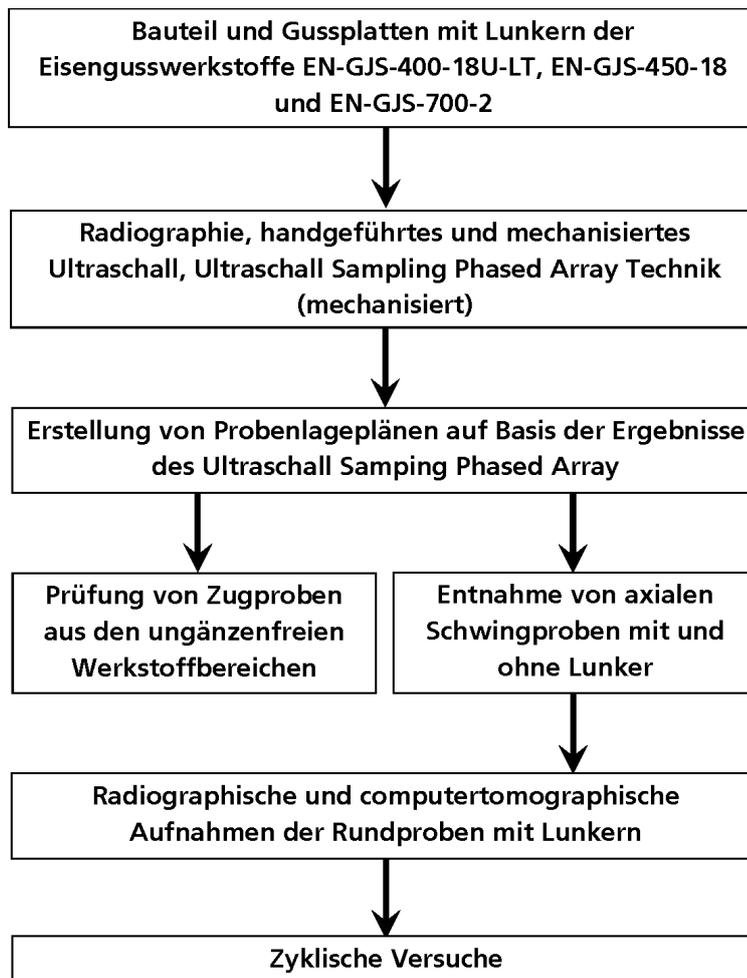


Bild 30 Ablaufdiagramm der Entnahme von Schwingproben aus Gussplatten und Bauteilen

3.1 Untersuchte Werkstoffe

Aktuell wird im Bereich der Windenergie und dem übrigen Großmaschinenbau vornehmlich der EN-GJS-400-18U-LT als tieftemperaturzäher Volumenwerkstoff eingesetzt, der sich zudem in Bezug auf die Legierungselemente kostengünstig herstellen und bearbeiten lässt. Die Bestrebungen gehen jedoch dahin, den rein ferritischen Werkstoff durch Zulegieren von erhöhten Massenanteilen Silizium durch Mischkristallbildung zu verfestigen /Mik14, BI14a/ und damit leistungsfähigere Werkstoffe bei

ähnlich duktilem Werkstoffverhalten zu entwickeln. Auch wenn die Nutzung von höherfesten GJS-Legierungen (z.B. EN-GJS-700 oder ADI) auf Grund der geringen Bruchdehnung seitens der Auslegungsrichtlinien /GL10, FKM12/ für höher belastete Bauteile im Windenergiebereich eingeschränkt ist, ist auch hier die Anfälligkeit für Lunker bei hohen Wanddicken und der damit verbundenen Bauteil-schwächung ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Bauteil-auslegung. Daher wird das Werkstoffverhalten des EN-GJS-400-18U-LT, des EN-GJS-450-18 und des EN-GJS-700-2 zerstörungsfrei und zerstörend untersucht. Für eine systematische Untersuchung stehen Gussplatten zur Verfügung, die durch entsprechend gezielte Gießführung und Abkühlbedingungen makroskopische, schwammartige Schwindungslunker in großen Bereichen enthalten. Um eine mit realen Bauteilen vergleichbare Mikrostruktur einzustellen, besitzen die Gussplatten hohe Wanddicken. Für die Untersuchungen am EN-GJS-400-18U-LT stehen eine Platte mit der Dicke $d = 230$ mm, Bild 31, und ein Bauteil einer Windenergieanlage (Rotorlagerdeckel), Bild 32, zur Verfügung.

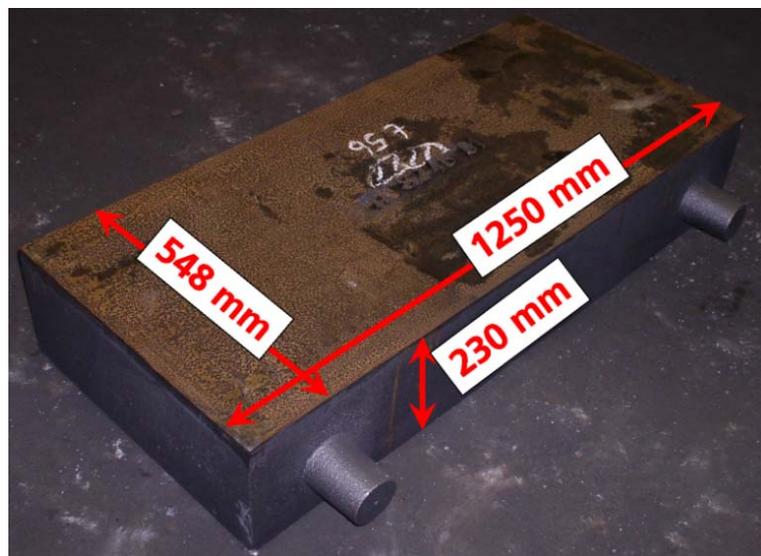


Bild 31 Gussplatte aus EN-GJS-400-18-U-LT, Dicke: 230 mm

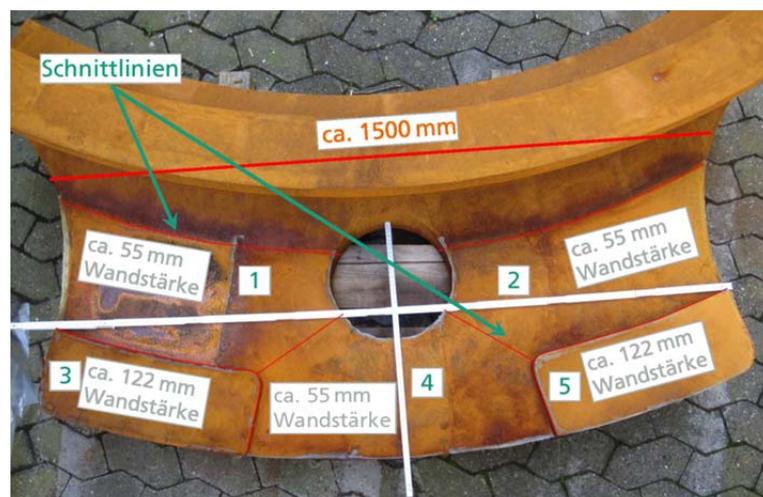


Bild 32 Einer von drei Abschnitten des Rotorlagerdeckels mit Maßen und Wanddicken /Lun14/

Im Bauteil liegen in Wanddicken von 50 mm und 120 mm ebenfalls Lunker vor. Daneben dienen zwei Gussplatten aus EN-GJS-450-18 mit je 120 mm Dicke und eine Gussplatte des EN-GJS-700-2 mit 200 mm Dicke als Halbzeug für weitere Werkstoffproben. Metallographische Untersuchungen zeigen beim EN-GJS-400-18U-LT ebenso wie beim EN-GJS-450-18 eine nahezu rein ferritische Matrix mit weniger als 5 % Perlit. Mit einem Siliziumanteil von 3,18 % besitzt letzterer ein mischkristallverfestigtes Gefüge. Der EN-GJS-700-2 weist im Vergleich zu den anderen beiden Werkstoffen auf Grund des perlitischen Gefüges eine deutlich höhere Zugfestigkeit bei wesentlich geringerer Bruchdehnung ($A_5 < 2\%$) und Duktilität auf. Jedoch ist die Nutzung von Werkstoffen mit einer Bruchdehnung $A < 12,5\%$ seitens /GL10/ für zyklisch belastete Bauteile ohne hohe Sicherheitsfaktoren unzulässig. Untersuchungen aus der Vergangenheit zeigen jedoch deutliche Schwingfestigkeitsvorteile gegenüber rein ferritischen Legierungen /B115a, B114d, So90a, Son89/. Die chemischen Zusammensetzungen der untersuchten Werkstoffe sind in Tabelle 2 zusammengefasst und zeigen etwa gleiche Anteile an Magnesium Mg und Kohlenstoff C, jedoch deutliche Unterschiede beim Silizium (EN-GJS-400-18U-LT und EN-GJS-450-18) und beim Mangangehalt (Mn) als Perlitbildner für den EN-GJS-700-2. Es ist zu berücksichtigen, dass das perlitische Gefüge der Gussplatte aus EN-GJS-700-2 durch eine Wärmebehandlung eingestellt wurde. Die mechanischen Kennwerte der Werkstoffe werden im Kapitel 3.4 erörtert.

Tabelle 2 Chemische Zusammensetzungen der untersuchten Werkstoffe /B114d/

Werkstoff	Kohlenstoff C	Silizium Si	Mangan Mn	Phosphor P	Schwefel S	Magnesium Mg
	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]
EN-GJS-400-18U-LT	3,410	2,200	0,172	0,033	0,006	0,049
EN-GJS-450-18	3,320	3,180	0,160	0,017	0,008	0,051
EN-GJS-700-2	3,700	2,410	0,500	0,020	0,006	0,051

3.2 Entnahme der Schwingproben aus Gussplatten und Bauteil

Nach dem Abguss der Gussplatten und des Windenergieanlagenbauteils findet zunächst in der Gießerei eine Ultraschalluntersuchung mittels handgeführtem Ultraschall statt. Hieran schließen sich Ultraschalluntersuchungen mit mechanisiertem Ultraschall und der Ultraschalltechnik Sampling Phased Array an /Lun14, Bul14/. Dabei lassen sich Bereiche mit Lunkern von mehr als 200 mm Ausdehnung und im Falle des Sampling Phased Arrays mit einer Auflösung von etwa 1 bis 6 mm – je nach verwendeter Prüffrequenz – ermitteln /Lun14/. Um die im Ultraschall identifizierten Lunkerbereiche verifizieren zu können, werden an allen Gussplatten zerstörungsfreie Durchstrahlungsprüfungen nach /DIN81/ in Richtung der Plattendicke d durchgeführt. In Verbindung mit den Fehlervergleichskatalogen /AST84, VDG01/ werden so die lokalen Gefüge der Gussplatten auf Grund der ermittelten Ungängen bzw. Lunker den Gütestufen 3 bis 5 nach /DIN90/ zugeschrieben /Bu12a, Bu12b, Bu12c, Bu12d/.

Für die Korrelationsanalyse der lokalen Schwingfestigkeit und der lokalen, volumetrischen Anzeige des Sampling Phased Array bzw. der Durchstrahlungsprüfung ist die geometrische Zuordnung des Ergebnisses der zerstörungsfreien Prüfung zur Probenlage entscheidend. Diese feste Zuordnung erfordert detaillierte Probenlagepläne für die Gussplatten und das Bauteil. Dazu werden auf Basis der Sampling Phased Array Messung für die Gussplatten, die Summen-B-, -C- und -D-Bilder, d.h. die Draufsicht und die zwei Seitenansichten, ermittelt, die mit den Abschnitten der Röntgenbilder korrespondieren

/Lun14/. Unter Berücksichtigung der lokalen Anzeigen innerhalb der drei Summenbilder werden Schwingfestigkeitsproben in ihrer Lage innerhalb der Gussplatte derart festgelegt, dass das Prüfvolumen der Schwingproben in möglichst deutlichen Anzeigen liegt, um die Lunkerausdehnung (Röntgenanzeige) und die lokale Dichte (Ultraschallanzeige) einer Schwingfestigkeit eindeutig gegenüberzustellen. Bild 33 zeigt beispielhaft einen solchen Abschnitt der Gussplatte aus EN-GJS-700-2 mit den farblich indizierten, großflächigen Lunkern. Der Grad der Reflexion wird von weiß bis rot bzw. von 0 bis 100 % angegeben. Die in Bild 33 im B- und D-Bild unten erkennbaren roten Balken sind Artefakte der Rekonstruktion und ergeben sich auf Grund der Rückwandechos am Übergang vom Plattenrand zur Luft. Diese liegen außerhalb der Gussplatte.

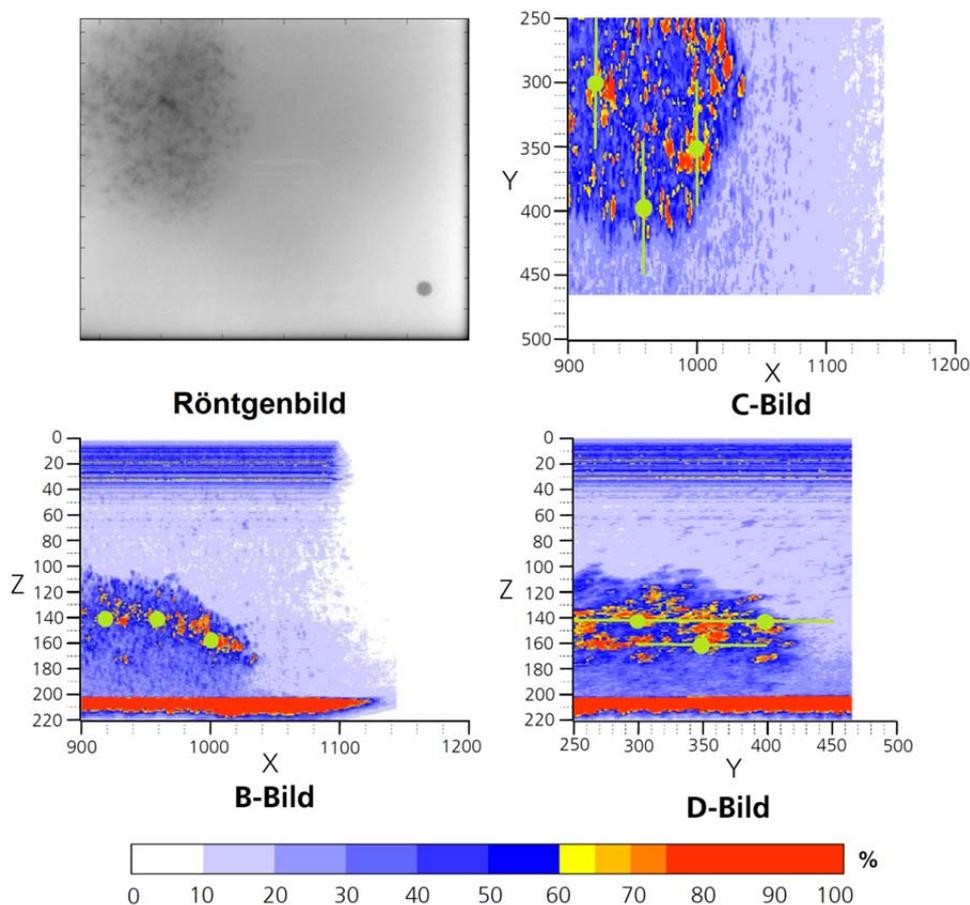


Bild 33 Röntgenbild sowie SPA-Summen-B-, -C- und -D-Bild eines Abschnitts der Gussplatte aus EN-GJS-700-2 mit der Markierung der Lage des Schwerpunktes (grüner Punkt) und der Längsausdehnung der Schwingproben (grüner Strich) basierend auf /Pud12/

Bild 34 zeigt den kompletten Probenlageplan für die Gussplatte des EN-GJS-700-2 mit den unterschiedlichen Probenhalbzeugen. In violett und grün sind die Probestäbe für die Fertigung ungänzenfreier Referenzwerkstoffproben und in grau die Schwingproben mit potentiellen Lunkern dargestellt. Die Entnahme von ungänzenfreien Schwingproben erfolgt sowohl im Bereich der Lunker als auch vom Plattenrand, um für die späteren Korrelationsanalysen auf das Werkstoffverhalten des ungänzenfreien Werkstoffes referenzieren und dabei Gefügeveränderungen auf Grund unterschiedlicher Erstarrungsbedingungen berücksichtigen zu können. Aus den Komplettübersichten der Probenlagepläne, Bild 34, werden Teilansichten mit exakten Bemaßungen für jede einzelne Schwingprobe für eine möglichst

präzise Rückverfolgung der Probenlage erstellt. Die Teilansichten enthalten neben der Bemaßung auch eindeutige Probenbezeichnungen, die sich aus einem Synonym für den Werkstoff (MW = EN-GJS-400-18U-LT; S5 = EN-GJS-450-18 Gussplatte S005; S6 = EN-GJS-450-18 Gussplatte S006; FWH = EN-GJS-700-2; AV-O1 = EN-GJS-400-18U-LT Bauteilabschnitt 1 von 3), der Größe („G“ = groß; „K“ = klein) und der Probenlage („I“ = innen; „A“ = außen) der Schwingproben zusammensetzen. Die weiteren Probenlagepläne in der Gesamtübersicht finden sich im **Anhang B** in **Bild B 1** bis **Bild B 4**.

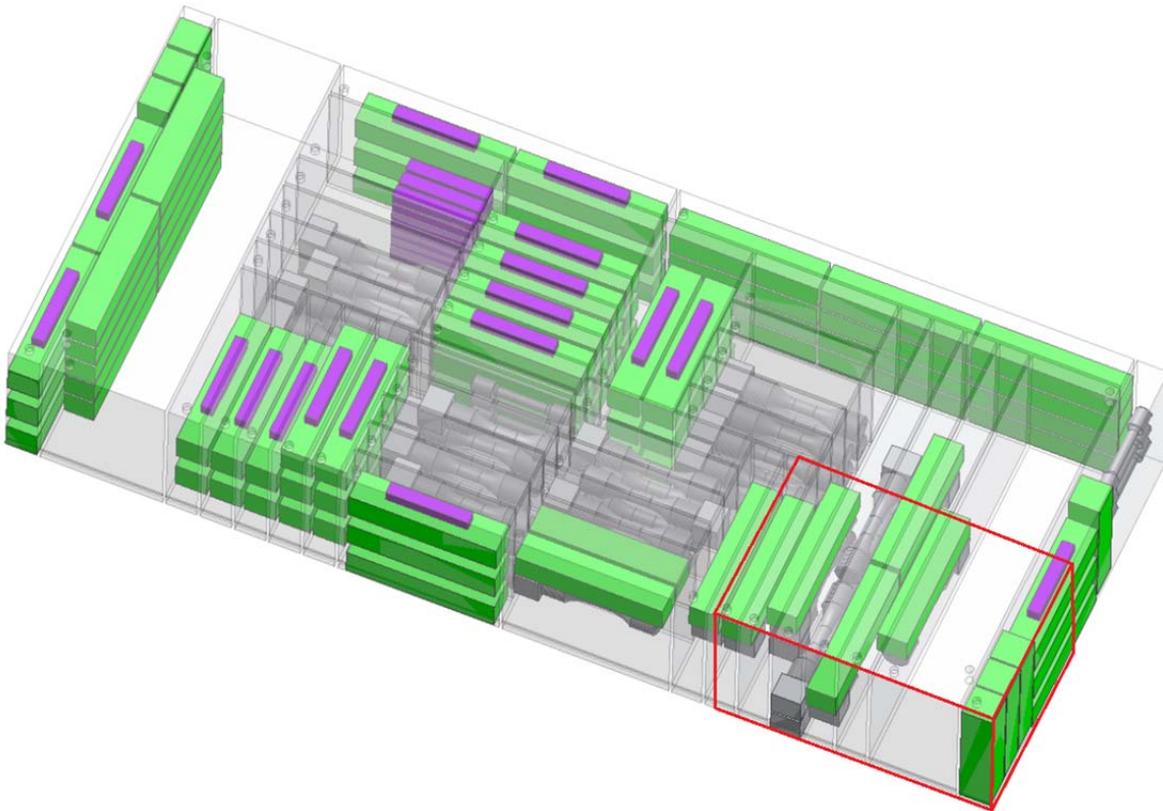


Bild 34 Gussplatte aus EN-GJS-700-2 mit Lage der Schwingproben mit Lunkern (grau) und der ungängigen Schwingproben (grün und violett) sowie Markierung des in Bild 33 gezeigten Bereiches

Um einen Bezug zu den Ergebnissen in /Kau98/ und zu den gängigen Regelwerken der Durchstrahlungsprüfung /DIN81/, bzw. –Bewertung /VDG01, ASTM10/ herzustellen, erfolgt nach der Probenentnahme eine 2D-Durchstrahlungsprüfung der Schwingproben nach /DIN44, DIN81/ mit anschließender Bewertung der Lunker nach der ASTM-Norm E446 /ASTM46/.

3.3 Schwingproben

Für die zyklischen Versuche kommen Schwingproben mit einer Prüflänge von $l = 25$ mm und einem Prüfdurchmesser von $d = 15$ mm zum Einsatz, Bild 35. Diese Geometrie ermöglicht die Probenentnahme zum einen aus den Bereichen, die laut der Sampling Phased Array Untersuchung mit Lunkern behaftet sind, und zum anderen aus ungängigen Bauteilbereichen zur Bestimmung von Referenzwerten der Basiswerkstoffe. Die Entnahme und die zyklische Prüfung von Schwingproben gemäß

Bild 36, Bild 37 und Bild 38 aus ungenüchtfreien Bauteilbereichen ergänzen diese Versuche, um die Werkstoffe hinsichtlich ihres Größen- und Kerbeinflusses untersuchen zu können.

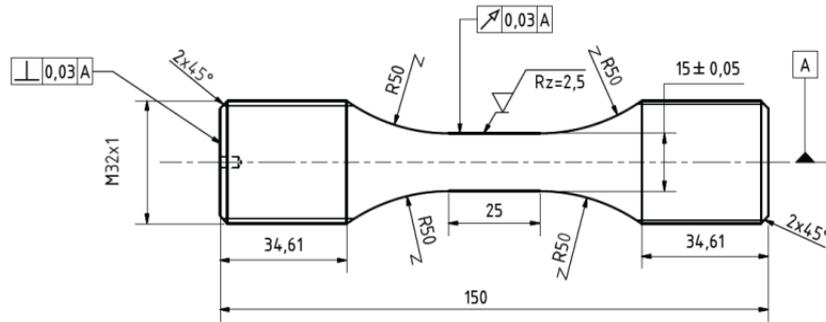


Bild 35 Runde Schwingprobe für Lunker und Referenzversuche, $d = 15$ mm, ungekerbt, $K_t = 1,05$

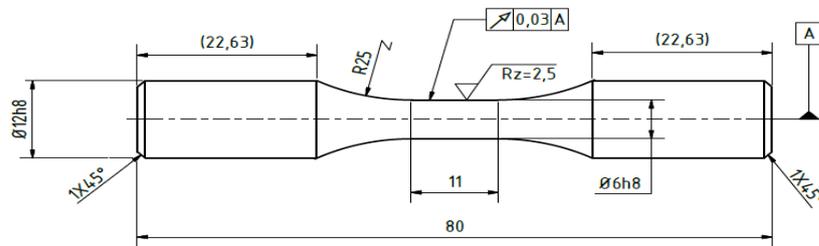


Bild 36 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, ungekerbt, $K_t = 1,04$

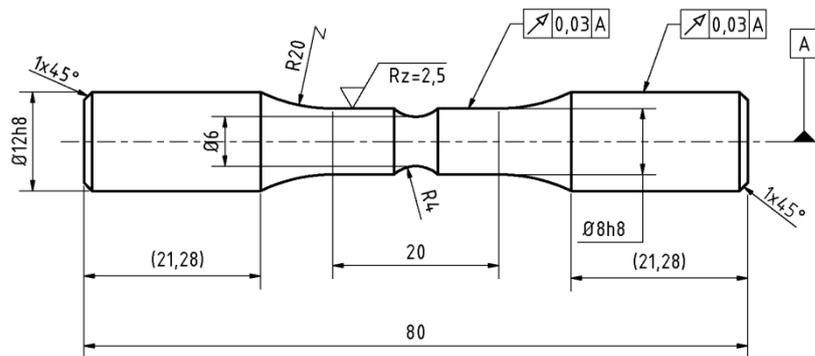


Bild 37 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, mild gekerbt, $K_t = 1,19$

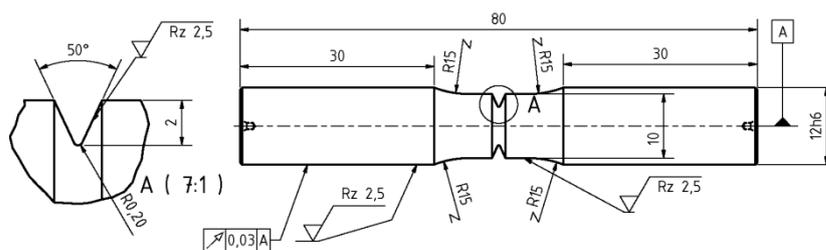


Bild 38 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, scharf gekerbt, $K_t = 4,14$

Für die vier untersuchten Probengeometrien wird jeweils das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$ anhand linear-elastischer Finite-Element-Analysen (FEA) ermittelt, Bild 39. Zusätzlich lassen sich so für jede Probengeometrie die Kerbformzahl K_t auf Basis der Normalspannungshypothese ermitteln. Die Kennwerte für die einzelnen Schwingproben inklusive dem höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$ stellt Tabelle 3 zusammen.

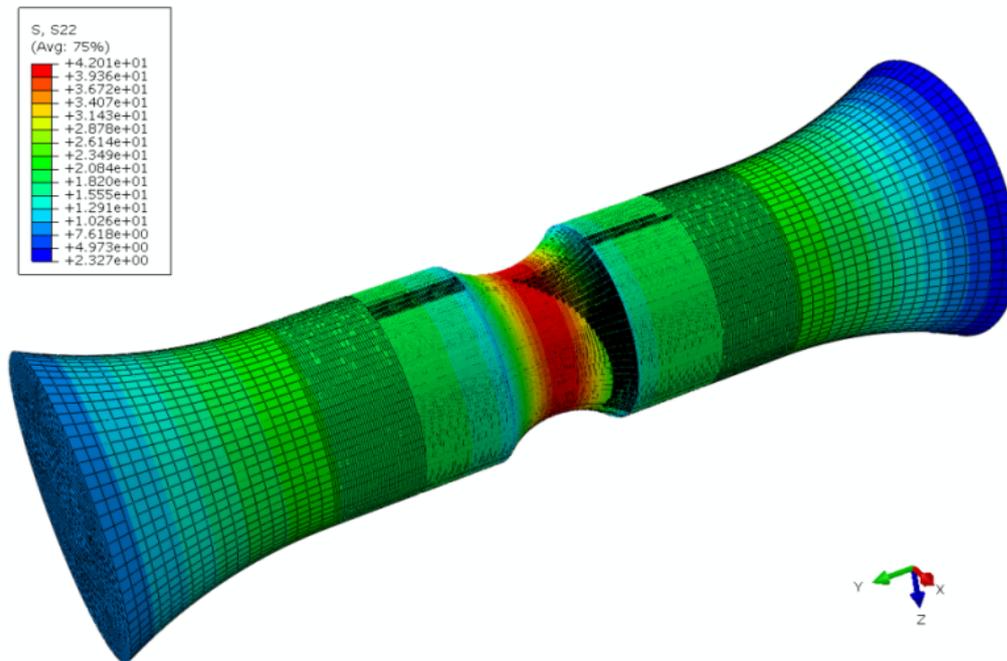


Bild 39 FEA der mild gekerbten Schwingprobe mit Spannungskonzentration im Kerbgrund

Tabelle 3 Kennwerte der Schwingfestigkeitsproben

Probenprüfdurchmesser d [mm]	gekerbt	$HBV_{90\%}$ [mm ³]	K_t [-]
15	Nein	6122,33	1,05
6	Nein	441,65	1,04
6	Ja	11,46	1,19
6	Ja	0,03	4,14

3.4 Quasistatische Werkstoffkennwerte

Zur Charakterisierung des quasistatischen Werkstoffverhaltens werden mit Hilfe von Zugversuchen die quasistatischen Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit R_m , 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ sowie Bruchdehnung A_5 für je drei Zugproben aus den Bereichen nahe der Lunkerfelder und aus dem Gussplattenrand bestimmt. Die über die drei Schwingproben je Material und Entnahmeort gemittelten Kennwerte enthält Tabelle 4. Hervorzuheben ist die niedrige Zugfestigkeit R_m des EN-GJS-700-2 bei gleichzeitig nur mäßig verminderter 0,2 %-Dehngrenze in der Kernzone. Dies führt zu einem Streckgrenzenverhältnis von 87 %.

Tabelle 4 Quasistatische Materialkennwerte der untersuchten Werkstoffe ohne Lunker

Werkstoff	EN-GJS-400-18U-LT		EN-GJS-450-18		EN-GJS-700-2	
	Randzone (außen)	Kernzone (innen)	Randzone (außen)	Kernzone (innen)	Randzone (außen)	Kernzone (innen)
Zugfestigkeit R_m [MPa]	351	352	443	431	713	566
0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [MPa]	235	233	325	318	537	492
Bruchdehnung A_5 [%]	13,6	15,8	20,4	16,8	1,9	0,9
Streckgrenzenverhältnis [-]	0,67	0,66	0,73	0,74	0,75	0,87

3.5 Zusammenfassung

Das Kapitel 3 stellt die Arbeiten an Gussplatten, Bild 31, und einem Bauteil, Bild 32, der Gusseisenwerkstoffe EN-GJS-400-18U-LT (ferritisch), EN-GJS-450-18 (ferritisch, mischkristallverfestigt) sowie EN-GJS-700-2 (perlitisches) vor. Anhand von zerstörungsfreien Untersuchungen mittels Durchstrahlung und Ultraschall werden in Gussplatten und Bauteilen dieser Werkstoffe Lunkerbereiche ermittelt und unterschiedliche Schwingproben sowohl aus den Lunkerbereichen als auch aus dem ungeschnittenen Grundwerkstoff für zyklische Untersuchungen entnommen. Dabei stehen für die weiteren Untersuchungen an ungeschnittenem Material Schwingproben mit innenliegenden aber auch außenliegenden, sogenannten angeschnittenen, Lunkern zur Verfügung. Chemische Analysen sowie quasistatische Zugversuche ermitteln die Werkstoffkennwerte der drei untersuchten Werkstoffe. Probenlagepläne halten die Lage der Schwingproben in den Halbzeugen fest, um in Korrelationsuntersuchungen die ermittelte Schwingfestigkeit für den Werkstoffbereich mit Lunkern den Ergebnissen der zerstörungsfreien Prüfung gegenüberzustellen.

4 Zerstörungsfreie und zerstörende Werkstoffuntersuchungen

Für eine Verknüpfung von zerstörungsfreier Prüfung mit der Schwingfestigkeit für mit Lunkern behaftete Bauteilbereiche sind gesicherte Werkstoffdaten der zyklischen Werkstofffestigkeit notwendig. Dies beinhaltet neben der Prüfung von Schwingproben mit Lunkern die Ermittlung der zyklischen Festigkeit des Grundwerkstoffes. Diese Informationen stellen zyklische dehnungs- und spannungsgeregelte Versuche an den ungekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm sowie spannungsgeregelte Versuche an den gekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm für alle drei Werkstoffe ohne Lunker bereit. An diese Versuche schließen sich solche an Schwingproben mit Lunkern mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm unter Spannungsregelung an. Vor der zerstörenden Prüfung werden alle Schwingproben aus den Gussplattenbereichen mit Lunkern einer Durchstrahlungs- und Röntgen-Computertomographieprüfung unterzogen und deren quasistatisches Spannungs-Dehnungs-Verhalten bestimmt, Bild 40.

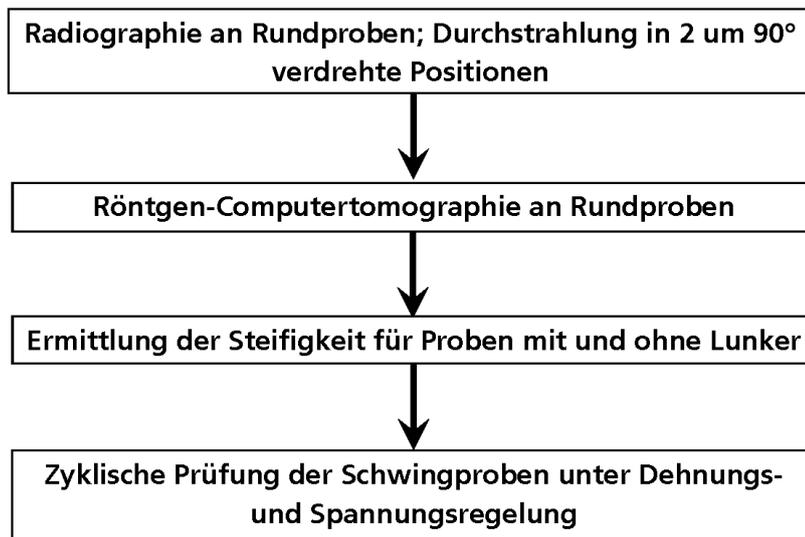


Bild 40 Ablaufplan der zerstörungsfreien und zerstörenden Untersuchungen an Rundproben

4.1 Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen

4.1.1 Radiographische Untersuchungen

Nach der Probenentnahme erfolgen für die ungekerbten Schwingproben aus Bereichen mit Lunkern konventionelle radiographische Untersuchungen nach /DIN81/. Jede Schwingprobe wird von zwei Seiten um 90° zueinander verdreht und in Mehrfilmtechnik durchstrahlt, um die deutlich unterschiedlichen Durchmesser d zwischen Probeneinspannung und Probenprüfquerschnitt gemäß /DIN44, DIN81/ korrekt im Durchstrahlungsbild abzubilden. Diese Aufnahmetechniken ermöglichen für die anschließende Filmbetrachtung auch das Auffinden von schlanken faden- oder schlauchförmigen Lunkern. Eine erste Bewertung der geprüften Rundproben erfolgt gemäß /AST10/. Die Aufnahmebedingungen,

wie Film-Objekt-Abstand, Art der Röntgenquelle und Filmparameter bleiben innerhalb der Untersuchungen für die verschiedenen Werkstoffe konstant. Die Parameter sind lediglich an die Durchstrahlung der Schwingproben mit $d = 6$ und 15 mm entsprechend /DIN44, DIN81/ angepasst. Die verwendeten Parameter sind im **Anhang T** in **Tabelle T 1** für die beiden Schwingprobegeometrien festgehalten /Bu12e, Bu12f, Bu13a, Bu13b, Bu13c, Ha13a, Ha13b, Han99/. Ein exemplarisches Prüfprotokoll der radiographischen Untersuchung findet sich im **Anhang D**. Einige Beispiele für Schwingproben Prüfdurchmesser $d = 6$ mm und umfangreichen Lunkern sowohl im Prüfvolumen als auch im Einspannbereich zeigt Bild 41.

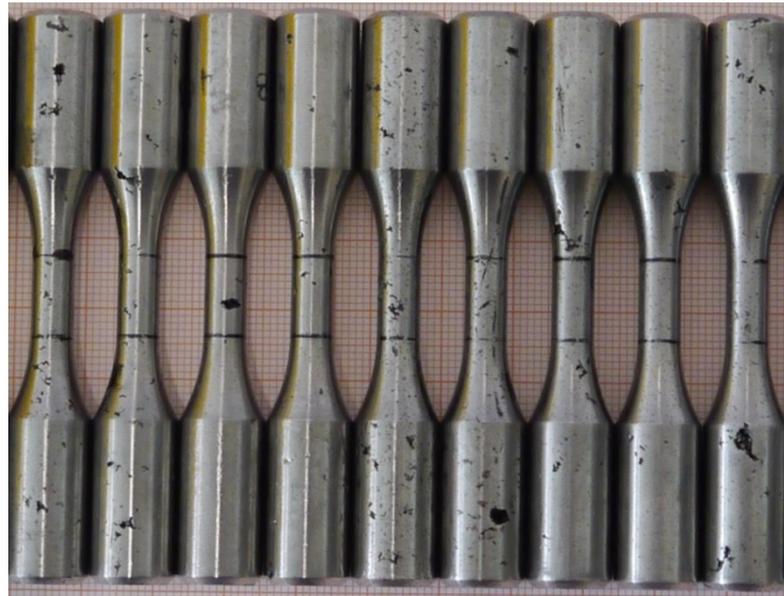


Bild 41 Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm und Lunkern

4.1.2 Röntgen-computertomographische Untersuchungen

Im Rahmen der zerstörungsfreien Röntgen-Computertomographie werden Aufnahmen an etwa 100 Schwingproben mit Lunkern mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm im Probenprüfquerschnitt durchgeführt. Für die Aufnahmen wird eine Röntgenröhre mit einer maximalen Betriebsspannung von 220 kV eingesetzt /Lun14/. Die Auflösung erreicht eine Genauigkeit von etwa $30 \mu\text{m}$, sodass auch feinere Strukturen im Bereich der Lunker und auch die Graphitkugeln gut auflösbar sind. Die Aufnahmen erfolgen derart, dass die Schwingproben mit der in Bild 35 gezeigten zentrischen Bohrung nach oben im Kegelschichtstrahl der Röntgen-CT-Anlage positioniert werden. Dies erleichtert die Rekonstruktion des Prüfvolumens.

4.1.3 Bestimmung des quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens

Da auf Grund der Lunker in den Schwingproben mit einer Änderung des quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens im Vergleich zum ungespannten Zustand zu rechnen ist /Sig03, Har04, Bla05, Har09, Olk15/, ist es das Ziel dieser Messung einen sogenannten fiktiven Elastizitätsmodul E_f als ein weiteres, systematisches Charakterisierungsmerkmal der mit Lunkern behafteten Schwingproben aus Gusseisen mit Kugelgraphit in Anlehnung an /Sig03, Har04, Bla05, Har09, Olk15/ zu bestimmen. Die

Übernahme des Begriffs „Elastizitätsmodul“ wird bewusst vermieden, da der Elastizitätsmodul E die Werkstoffsteifigkeit charakterisiert, aber gemeinhin nur für den ungespannten Werkstoffzustand definiert ist. Im Falle der mit Lunkern behafteten Schwingproben gilt jedoch, dass diese einen Ungleichspannungszustand des Werkstoffes darstellen und die Verteilung sowie Ausbildung der Lunker bei rein axialer Belastung innerhalb der Schwingprobe eine Biegebeanspruchung hervorruft. Als Formelzeichen wird fortan anstatt E für Elastizitätsmodul das Zeichen E_f für den fiktiven Elastizitätsmodul verwendet.

Zur Ermittlung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben mit und ohne Lunker mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm unter Axialbelastung kommt eine servo-hydraulische Prüfmaschine zum Einsatz. Die Schwingproben werden mechanisch geklemmt, mit einem Dehnungsaufnehmer mit einer Messlänge von 10 (Schwingproben $d = 6$ mm) bzw. 25 mm (Schwingproben $d = 15$ mm) versehen und über eine Sollwert-Rampe kraftgeregelt im linear-elastischen Bereich bis zu einer vorher festgelegten Maximalkraft be- und anschließend wieder entlastet. Der Dehnungsaufnehmer zeichnet während des Versuchs den Weg und damit die Dehnung der Schwingprobe im Bereich des Prüfvolumens auf. Um Einflüsse der möglicherweise auftretenden unterschiedlichen Verschiebung der axial belasteten Schwingproben infolge der inhomogen verteilten Lunker zu kompensieren und zu berücksichtigen, finden je untersuchter Schwingprobe vier separate Messungen statt. Der Dehnungsaufnehmer wird bei jeder neuen Messung um einen Winkel von 90° rund um die Schwingprobe weiter versetzt. Den Prüfaufbau für eine mit Lunkern behaftete Schwingprobe mit den vier Messpositionen „vorne“, „links“, „hinten“ und „rechts“ von der Maschinenvorderseite aus inklusive der oberen und unteren Klemmung zeigt Bild 42. Die Ergebnisse der Messung diskutiert Kapitel 5.2.3.

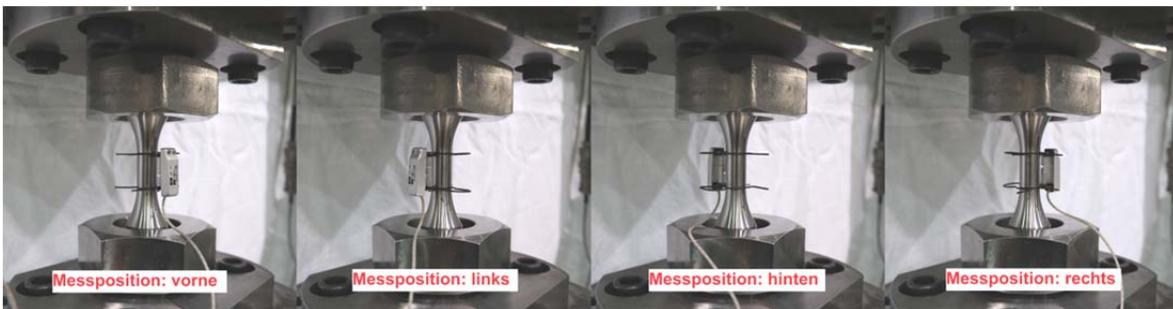


Bild 42 Messaufbau für die Bestimmung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben mit den Messpositionen /BI15b/

Für jede Lunkerklasse wird eine angepasste Maximalkraft überschlägig festgelegt. Eine Überwachung der Dehnung bei der Maximalkraft, der zurückbleibenden Dehnung bei vollkommener Entlastung der Schwingproben und die Kontrolle des zu erwartenden linearen Dehnungsverlaufs über der aufgebracht Kraft stellen sicher, dass die Maximalkraft nicht zu hoch angesetzt ist. Gegebenenfalls wird diese für die folgende Messung nach unten korrigiert.

4.2 Zyklische Werkstoffuntersuchungen

Für die zyklischen Werkstoffuntersuchungen an Rundproben mit und ohne Lunker sowie unterschiedlicher Schwingprobengrößen kommen sowohl servo-hydraulische Prüfmaschinen als auch elektromagnetische Resonanzprüfmaschinen zum Einsatz.

4.2.1 Servo-hydraulische Prüfmaschinen

Servo-hydraulische Prüfmaschinen arbeiten über hydraulische Zylinder, die die Prüfkräfte bereitstellen. Da der Zylinder die Schwingprobe oder das Prüfobjekt direkt belastet und vor allem die Frequenz sowie die Art der Belastungsabfolge z.B. als Sinus, Rampe oder Dreieck frei einstellbar ist, bildet dieser Prüfaufbau einen Zwangsantrieb. Allerdings sind servo-hydraulische Prüfmaschinen meist auf maximale Prüffrequenzen von etwa $f = 50$ Hz beschränkt. Diese ist zudem von der Steifigkeit und vom Verformungszustand des Prüfobjektes abhängig. Lediglich durch Sonderlösungen lassen sich auch Prüffrequenzen über $f = 100$ Hz realisieren. Die Regelbarkeit der Prüffrequenz beim servo-hydraulischen Prüfkonzept und die variable Sollwertvorgabe ermöglichen aber die Prüfung von Schwingproben unter Kraft- und Dehnungsregelung mit konstanten und variablen Amplituden.

Für kraftgeregelte Schwingfestigkeitsversuche steht eine servo-hydraulische Prüfmaschine mit einer Maximallast von 25 kN zur Verfügung, die auf Grund ihrer Bauweise Prüffrequenzen von über 100 Hz zulässt. Deren Einsatz bleibt aber auf Grund der niedrigen Maximallast auf einige Versuchsreihen an den Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm beschränkt. Für die Ermittlung des transienten Werkstoffverhaltens durch dehnungsgeregelte Versuche kommen servo-hydraulische Prüfstände mit maximalen Lasten von 63 kN und 160 kN, Bild 43, zum Einsatz. Ein Dehnungsaufnehmer mit einem Schneidenabstand von 10 mm für die Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm und einer mit einem Schneidenabstand von 25 mm für die Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm dienen zur Dehnungsmessung. In Bild 43 sind eine Schwingprobe mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm und der darauf befestigte Dehnungsaufnehmer zu sehen. Zwei Klammern mit einer Anpresskraft von jeweils 2 N halten dabei die Schneiden bzw. den Dehnungsaufnehmer auf der Schwingprobe gemäß /SEP06/. Die Prüfung der Schwingproben orientiert sich dabei an /SEP06/.

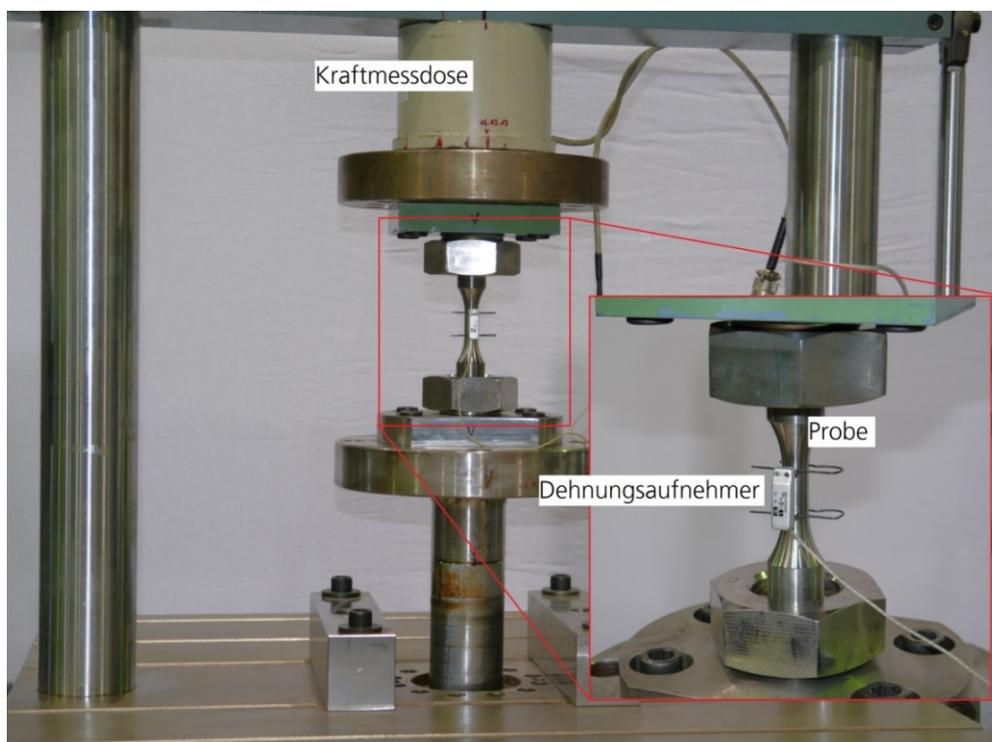


Bild 43 Servo-hydraulische Prüfmaschine (160 kN Maximallast), Schwingprobe und Dehnungsaufnehmer

4.2.2 Elektro-magnetische Resonanzprüfmaschinen

Im Hauptunterschied zu servo-hydraulischen Prüfmaschinen lässt sich bei elektro-magnetischen Resonanzprüfmaschinen die Prüffrequenz nur sehr eingeschränkt beeinflussen. Diese wird bestimmt durch die Steifigkeit des zu prüfenden Objektes, der Maschinensteifigkeit und der in Schwingung versetzten Masse. Da die Maschinensteifigkeit konstant bleibt, bilden die sich je Prüfobjekt variierende Steifigkeit und die variable Maschinenmasse, die frequenzbestimmenden Größen. Während die Steifigkeit des Prüfobjekts im Allgemeinen nicht beeinflussbar ist, lässt sich die schwingende Maschinenmasse durch Zu- und Abschalten von Gewichten an der Prüfmaschine in Schrittwerten von etwa 10 bis 20 Hz je Einzelgewicht beeinflussen. Variiert die Steifigkeit des Prüfobjekts, so variiert auch die Prüffrequenz von Versuch zu Versuch. Gegenüber dem servo-hydraulischen Prüfkonzept lassen sich so in Abhängigkeit der Proben- und Maschinensteifigkeit deutlich höhere Prüffrequenzen bis $f \geq 200$ Hz erreichen. Jedoch ist auf elektro-magnetischen Prüfmaschinen in der Regel nur die Prüfung unter einer sinusförmigen Belastung mit konstantem Mittelwert und konstanter Amplitude möglich. Nur unter erhöhtem Aufwand im Bereich der Maschinenregelung und der Aufbereitung der Lastkollektive ist auch eine Prüfung unter variablen Belastungsamplituden möglich. Da die Prüffrequenzen und die Belastungsverhältnisse nicht leicht zu beeinflussen sind, kommen diese Prüfmaschinen in der Regel nur für die Prüfung von Schwingproben und Bauteilen unter Kraft- bzw. Spannungsregelung in Frage.

Ebenso wie die Umsetzung der Prüfung variabler Belastungen, ist die Umsetzung dehnungsgeregelter Schwingversuche somit nur schwer möglich. Auch wenn die weg- bzw. dehnungsgeregelte Prüfung von Schwingproben und Bauteilen zur Dokumentation des zyklischen Spannungs-Dehnungsverhaltens des Werkstoffes rein theoretisch möglich ist, kommen elektro-magnetische Prüfmaschinen hierfür kaum zum Einsatz, da solche Versuche eine gute Regelbarkeit auf Grund eines sich ändernden Werkstoffverhaltens während des Versuchs voraussetzen.

Die spannungsgeregelten Versuche werden auf vertikalen, elektro-magnetischen Resonanzpulsern mit einer maximalen Last von 100 und 150 kN bei Prüffrequenzen bis etwa $f = 190$ Hz durchgeführt. Geprüft werden mit diesen Maschinen die Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm im ungespannten und im mit Lunkern behafteten Zustand.

4.2.3 Versuchsdurchführung unter Dehnungsregelung

Die Ermittlung des transienten Werkstoffverhaltens, d.h. der zyklischen Ver- und Entfestigung des Werkstoffes, durch dehnungsgeregelte Schwingfestigkeitsversuche finden für die ungekerbten, ungespannten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm beim Dehnungsverhältnis $R_{\epsilon} = -1$ statt. Es wird hierbei zunächst zwischen Schwingproben aus Rand- und Kernzone unterschieden. Die Grenzschnitzspielzahl beträgt für die dehnungsgeregelten Versuche $N_G = 1 \cdot 10^7$ Zyklen. Die Versuche werden nicht bis zum Bruch der Schwingproben, sondern bis zu einem Abfall deren Steifigkeit von 20 % geprüft. In Abhängigkeit der Lasthorizonte stellen sich untere Grenzschnitzspielzahlen im Bereich von mehreren 10 Zyklen ein.

Versuchsmatrizen der durchgeführten Versuchsreihen mit deren Bezeichnung sowie einer Unterscheidung nach Art der Schwingprobe, Schwingprobenlage und der Anzahl der je Versuchsreihe durchgeführten Einzelversuche sind im **Anhang T** in **Tabelle T 2** für den EN-GJS-400-18U-LT, in **Tabelle T 23** für den EN-GJS-450-18 und in **Tabelle T 46** für den EN-GJS-700-2 zusammengefasst.

4.2.4 Versuchsdurchführung unter Spannungsregelung

Für eine möglichst umfassende Charakterisierung des ungesunden Werkstoffzustandes der drei untersuchten Werkstoffe finden Versuche unter Spannungsregelung sowohl auf elektro-magnetisch angetriebenen, vertikalen Resonanzpulsern, als auch auf einer servo-hydraulischen Prüfmaschine bei Frequenzen zwischen etwa $f = 100$ und 200 Hz statt. Die Versuche konzentrieren sich dabei auf die Spannungsverhältnisse $R_\sigma = -1$ und $R_\sigma = 0$. Aus den Ergebnissen für beide Lastfälle lässt sich anschließend für jeden Werkstoff eine Mittelspannungsempfindlichkeit M ableiten. Die Prüfung selbst erfolgt nach dem Horizontverfahren /Son10, Zen00, Mau99/ bis zur Grenzschnwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ oder bis zum Bruch der Schwingproben, um statistische Merkmale erfassen zu können. Da üblicherweise Großgussbauteile im Rahmen ihrer teilweise weit über 20-jährigen Nutzung etwa im Bereich der Windenergie Lastspielzahlen von weit über $1 \cdot 10^9$ Zyklen erreichen, wird dies bei der Auswertung mit einer Neigung $k^* = 44,9$ (5 % Schwingfestigkeitsabfall pro Dekade) im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit berücksichtigt, sofern keine anderen Erkenntnisse vorliegen /So05b, Son07/. Die spannungsgeregelten Versuche finden an Schwingproben aller vier Schwingprobengeometrien (Bild 35, Bild 36, Bild 37 und Bild 38) mit der Unterscheidung nach der Schwingprobenlage innerhalb der Gussplatte in Rand- und Kernzone (innen und außen) statt.

Die Schwingproben mit Lunkern werden auf Grund der geringeren Anzahl an Schwingproben je Lunkerklasse und Werkstoff nur bei dem Spannungsverhältnis $R_\sigma = -1$ aber ebenfalls bis zur Grenzschnwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ oder bis zum Bruch der Schwingprobe geprüft. Die Lasthorizonte werden anhand der Ergebnisse aus /Kau98/ über die anhand der Durchstrahlungsprüfung entsprechend dem Stand der Technik ermittelten Lunkerlassen je Schwingprobe abgeschätzt. Die Prüfung erfolgt ebenfalls nach dem Horizontverfahren /Son10, Zen00, Mau99/.

Versuchsmatrizen der durchgeführten Versuchsreihen mit deren Bezeichnung sowie einer Unterscheidung nach Art der Schwingprobe, Schwingprobenlage, Lunkerklasse, Lastverhältnis R und der Anzahl der je Versuchsreihe durchgeführten Einzelversuche sind im **Anhang T** in **Tabelle T 3** für den EN-GJS-400-18U-LT, in **Tabelle T 24** für den EN-GJS-450-18 und in **Tabelle T 47** für den EN-GJS-700-2 zusammengestellt.

4.3 Zusammenfassung

Kapitel 4 beschreibt die Versuchsaufbauten und Prüfcharakteristika der zerstörungsfreien und zerstörenden Untersuchungen. An den entnommenen Schwingproben mit Lunkern wie auch an den ungesunden Schwingproben finden radiographische Untersuchungen für deren Einteilung in Lunkerlassen sowie Untersuchungen mit Röntgen-Computertomographie zur Bestimmung der Lunkerverteilung im Prüfquerschnitt der Schwingproben statt. Mit der systematischen, quasistatischen Prüfung der Schwingproben unter linear-elastischer Beanspruchung werden die zerstörungsfreien Untersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung erweitert und für jede Schwingprobe aus vier Einzelmessung ein fiktiver Elastizitätsmodul über einen Dehnungsaufnehmer am kompletten Prüfvolumen der Schwingproben definiert. Die Versuchsaufbauten und die eingesetzten Prüfmaschinen der zerstörenden Schwingfestigkeitsversuche der ungesunden und mit Lunkern behafteten Schwingproben sowie die Versuchsparmeter werden beschrieben.

5 Ergebnisse

5.1 Zyklische Prüfung der Werkstoffe ohne Ungängen

5.1.1 Dehnungsregelung

Um Bauteile lokal und hinsichtlich elastisch-plastischer Beanspruchungen korrekt zu bemessen, ist die Kenntnis des transienten Werkstoffverhaltens in Form der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie der Dehnungswöhlerlinie erforderlich. Daher finden für die zu untersuchenden Werkstoffe für beide ungekehrte Schwingprobengeometrien getrennt nach Schwingprobenlage innen und außen dehnungsgeregelte Schwingfestigkeitsuntersuchungen bei $R_\epsilon = -1$ statt. Als Ergebnis liegen daraus zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven nach /Ram43/ sowie Dehnungswöhlerlinien nach /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/ vor, die im **Anhang B** zusammengestellt sind. Die bei der Auswertung ermittelten Parameter der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve sowie der Dehnungswöhlerlinie für den ungängenfreien Werkstoffzustand sind im **Anhang T** in **Tabelle T 2**, **Tabelle T 23** und **Tabelle T 46** zusammengestellt. Bild 44 stellt zum Vergleich die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven sowie die Erstbelastungskurven der drei Werkstoffe für die Schwingproben mit dem Prüfdurchmesser $d = 15$ mm der Schwingprobenlage außen zusammen. Der Vergleich der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven zeigt deutliche Festigkeitsunterschiede zwischen EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und dem höherfesten EN-GJS-700-2 für den ungängenfreien Werkstoffzustand.

Von Stahl- und Aluminiumwerkstoffen ist bekannt, dass sich Werkstoffe unter zyklischer Dehnungsbeanspruchung nicht unbedingt neutral verhalten müssen /Ber83, Nie08, Rad07, Wag07/. So können Versetzungsbewegungen oder sogar Phasenumwandlungen Verfestigungseffekte hervorrufen. Der Werkstoff setzt dann der Verformung einen höheren Widerstand entgegen. Umgekehrt können auch Entfestigungen beispielsweise durch das Entstehen von Lüdersbändern auftreten. Für die Bauteilauslegung von dickwandigen Kugelgraphitgusslegierungen ist das zyklische Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Beziehung zu berücksichtigen, um lebensdauerermindernde oder lebensdauersteigernde Effekte durch lokale Ver- und Entfestigungen zu beschreiben.

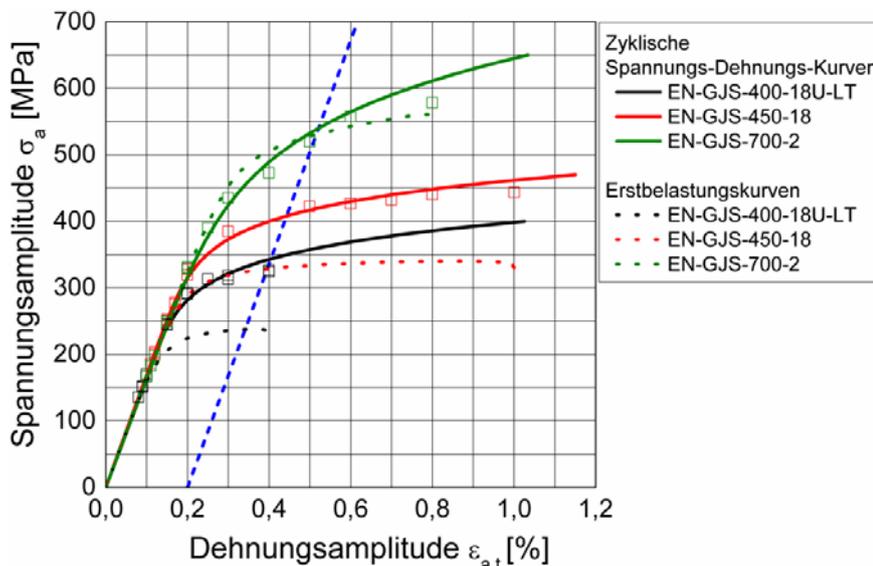


Bild 44 Zyklische Spannungs-Dehnungs- und Erstbelastungskurven, Schwingprobenlage außen

Für die Lebensdauerabschätzung unter Betriebslastkollektiven ist in diesem Zusammenhang vor allem zu berücksichtigen, ob, wann und in welcher Höhe Sonderereignisse in Form von Überlasten auftreten und transiente Werkstoffeffekte auslösen.

Alle drei untersuchten Werkstoffe verhalten sich grundsätzlich unabhängig von ihrer Schwingprobenlage oder der Schwingprobengröße zyklisch verfestigend, Bild 44. Dennoch zeigt der perlitische EN-GJS-700-2 im Übergang vom linear-elastischen in den elastisch-plastischen Werkstoffzustand zunächst eine leichte Entfestigung. Dieses Verhalten ist bei allen am EN-GJS-700-2 durchgeführten Versuchsreihen zu beobachten. Erst ab einem Bereich zwischen $0,35 \% \leq \epsilon_{a,t} \leq 0,5 \%$ tritt eine zyklische Verfestigung ein. Für alle Versuchsreihen der ferritischen Legierungen ist dagegen eine kontinuierliche Verfestigung im elastisch-plastischen Bereich festzustellen. Dennoch verfestigen die Werkstoffe nicht im gleichen Maße. Je höher die Zugfestigkeit der drei Werkstoffe, desto geringer fällt das Verhältnis von zyklischer zu quasistatischer Festigkeit aus. So weist der EN-GJS-400-18U-LT bei $\epsilon_{a,t} = 0,4 \%$ ein Verhältnis von 1:1,4 von quasistatischer zu zyklischer Spannung auf, während der EN-GJS-450-18 nur ein Verhältnis von 1:1,2 erreicht, Bild 44. Der EN-GJS-700-2 ist hier noch im Bereich der Entfestigung, sodass sich ein Verhältnis von 1:0,9 ergibt.

Bild 45 zeigt die Dehnungswöhlerlinien für die drei Werkstoffe, ermittelt an ungekerbten Schwingproben mit dem Prüfdurchmesser $d = 15 \text{ mm}$ für die Entnahmeposition außen. Nach der Auswertung der Dehnungswöhlerlinien gelten diese für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50 \%$. Um Dehnungswöhlerlinien für anderen Überlebenswahrscheinlichkeiten P_0 zu ermitteln, gibt /Gr79a/ eine Auswertung der Streubänder aus dehnungsgeregelten Versuchen an.

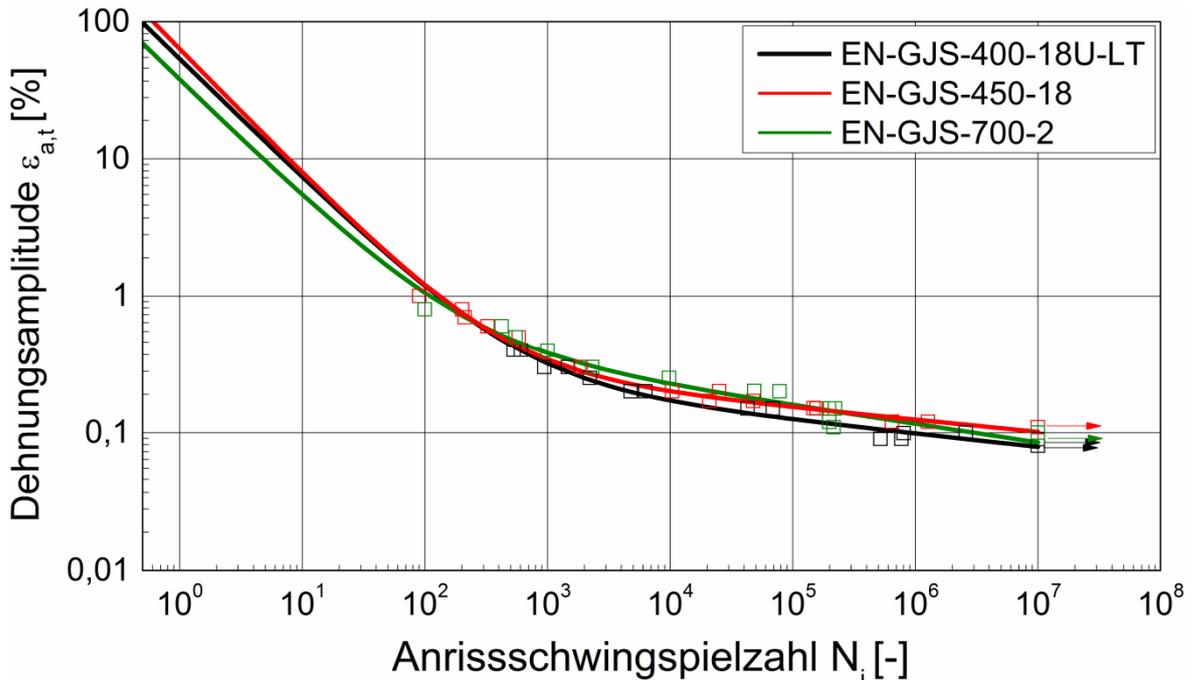


Bild 45 Dehnungswöhlerlinien der untersuchten Werkstoffe für die Entnahmeposition außen ($d = 15 \text{ mm}$)

5.1.2 Kompatibilität

Im Rahmen der Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche fällt auf, dass die anhand der Kompatibilitätsbedingung ermittelten Parameter n' und K' für die Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve die tatsächlichen Versuchspunkte nur sehr unzureichend beschreiben. Bei näherer Betrachtung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der drei Werkstoffe (**Anhang B**) ist die Abweichung für alle Schwingprobengrößen und Entnahmepositionen mehr oder weniger stark ausgeprägt. Trifft die Kompatibilitätsbedingung zu, müssen die Parameter n' und K' jedoch auch über die Auftragung der Spannungsamplitude über dem plastischen Dehnungsanteil gemäß Bild 18 ermittelbar sein. Bild 46 stellt für den EN-GJS-400-18U-LT für die Versuchsreihe MWR01 die mittels Regression durch die plastischen Dehnungsanteile $\varepsilon_{a,p}$ ermittelten Parameter n' und K' der Ausgleichsgerade gegenüber, die anhand der über die Kompatibilitätsbedingung errechneten Werte für n' und K' gemäß Gleichungen (21) und (22) bestimmt werden. Wie sich für alle untersuchten Werkstoffe auf gleiche Weise für den EN-GJS-450-18 und den EN-GJS-700-2 (beispielhaft gezeigt in **Bild B 68** und **Bild B 69** im **Anhang B**) zeigt, trifft die Kompatibilitätsbedingung für die untersuchten Gusseisenlegierungen somit nicht zu.

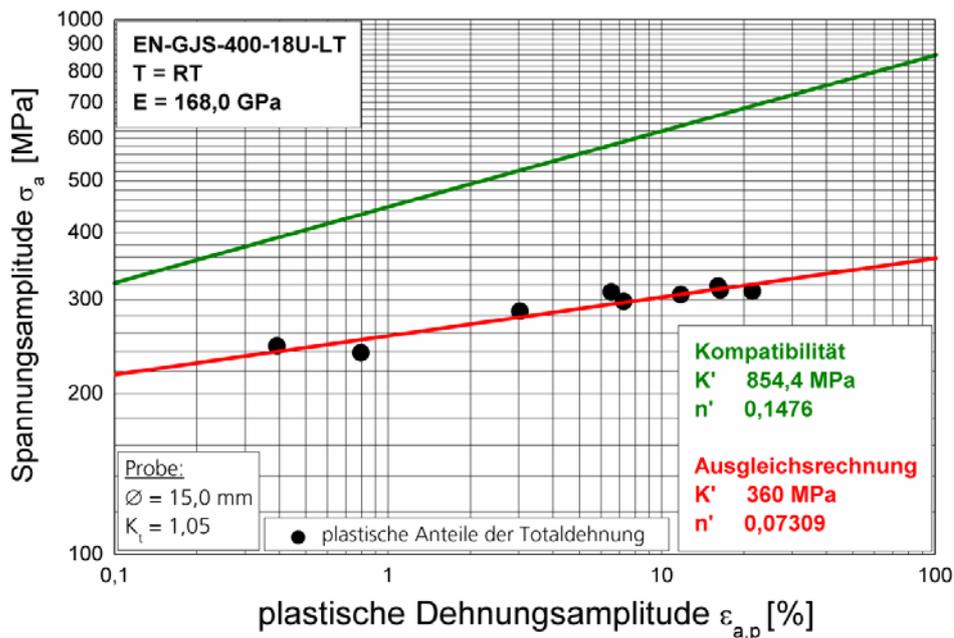


Bild 46 Vergleich n' und K' aus Kompatibilität und Ausgleichsrechnung (MWR01)

Ein ähnliches Verhalten wird auch für die Ungültigkeit der Kompatibilitätsbedingung für ebenfalls zyklisch verfestigende Aluminiumwerkstoffe festgestellt /Fat05, End69, San77, Wag07/. /Wag07/ führt dies in Zusammenhang mit Ergebnissen von /Fat05/ auf die ungenügende Regression der elastischen Dehnungsanteile zur Bestimmung der Dehnungswöhlerlinie zurück. Für Aluminiumlegierungen schlägt /Wag07/ daher in Anlehnung an das Vorgehen in /Fat05/ die Bestimmung einer trilinearen Dehnungswöhlerlinie vor. Diese berücksichtigt nicht nur die ungenügende Regression der elastischen Anteile durch den Ansatz von /Bas10/, sondern auch ein Abknicken der Dehnungswöhlerlinie wie bei der Spannungswöhlerlinie zum Bereich der Langzeitschwingfestigkeit hin. Dies erhöht die Abbildungsgenauigkeit der Dehnungswöhlerlinie im Langzeitschwingfestigkeitsbereich bezüglich der Versuchspunkte /Kle73/. Da auch die untersuchten Gusseisenwerkstoffe eine teilweise starke zyklische Verfesti-

gung aufweisen, ist zu prüfen, ob auch hier ein trilinearer Ansatz für die elastische Dehnungswöhlerlinie die Kompatibilitätsbedingung besser erfüllt und somit das zyklische Werkstoffverhalten präziser abbildet. Analog zum Vorgehen in /Wag07/ stellt dazu Bild 47 die elastischen Anteile aller dehnungsgeregelt geprüften Einzelversuche einander gegenüber. Ein Vergleich der Regressionen über alle elastischen Anteile gemäß /Bas10/ mit den tatsächlich vorliegenden Einzelversuchsergebnissen zeigt, dass diese wie bei Aluminiumwerkstoffen deutlich besser durch abschnittsweise definierte Regressionsgeraden zu approximieren sind. Für die Bestimmung der abschnittswisen Ausgleichgeraden wird zunächst analog zur Spannungswöhlerlinie für die elastische Dehnungswöhlerlinie ein Abknickpunkt z.B. bei $N_k = 1 \cdot 10^6$ Schwingspielen festgelegt und anschließend im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit gemäß /So05b, Son07/ von einer Neigung $k^* = 44,9$ ausgegangen (Bereich III, Bild 47), wenn keine anderen Erkenntnisse über k^* aus Versuchen vorliegen. Diese Analogie ist zulässig, da die Spannungswöhlerlinie nur für elastisches Werkstoffverhalten gültig ist. Dass dieser Zusammenhang für die untersuchten Gusseisenlegierungen korrekt ist, zeigt die im Kapitel 5.1.3 durchgeführte Umrechnung dieser dehnungsgeregelt durchgeführten Einzelversuche in das Streuband der Spannungswöhlerlinien. Die verbliebenen Versuchspunkte mit einer Lebensdauer unterhalb des Abknickpunktes lassen die Ermittlung von zwei Ausgleichsgeraden in den Bereichen I und II zu, Bild 47. Mit einem Knickpunkt im Bereich von 30.000 Schwingspielen liegt der Schnittpunkt beider Ausgleichsgeraden in der gleichen Größenordnung wie für die in /Wag07/ untersuchten Aluminiumlegierungen, Bild 47.

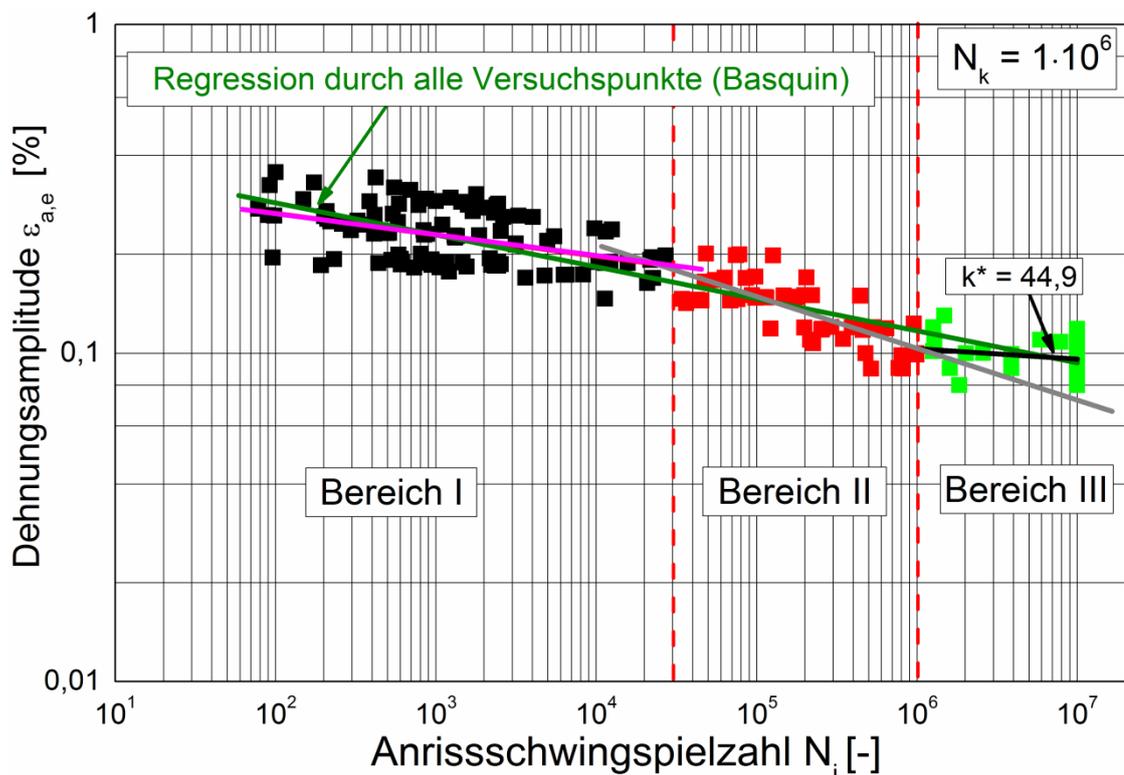


Bild 47 Regression über elastische Dehnungsanteile aus 179 Einzelversuchen

In Anlehnung an das Vorgehen in /Wag07/ bzw. /Fat05/ werden nun für jeden der beiden linearisierten Bereiche I und II Werte sowohl für σ'_{f1} und σ'_{f2} als auch für b_1 und b_2 ermittelt. Es gilt $\sigma'_{f2} > \sigma'_f > \sigma'_{f1}$ sowie $b_1 > b > b_2$. Für den Bereich III ist ein zusätzliches σ'_{f3} und b_3 zu bestimmen.

Die Parameter K' und n' der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve errechnen sich nun nach den Gleichungen (33) und (34).

$$K' = \frac{\sigma'_{f1}}{(\varepsilon'_f)^{n'}} \quad (33)$$

$$n' = \frac{b_1}{c} \quad (34)$$

Unter Berücksichtigung der Dreiteilung der elastischen Dehnungswöhlerlinie ergibt sich beispielhaft der in Bild 48 für die Versuchsreihe MWR01 des EN-GJS-400-18U-LT gezeigte Verlauf für die Dehnungswöhlerlinie sowie der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die aus der Kompatibilität der trilinearen Dehnungswöhlerlinie ermittelte zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve approximiert die Versuchspunkte deutlich besser, Bild 48. Damit flacht der Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve zu höheren Dehnungsamplituden deutlich ab. Der Wert für die zyklische 0,2 %-Dehngrenze $R'_{p0,2}$ verringert sich für die Versuchsreihe MWR01 dabei ebenfalls von 341 MPa auf 314 MPa. Der konventionelle Ansatz zur Beschreibung des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens weist demnach im Vergleich zum trilinearen Ansatz bei gleicher Dehnung eine höhere Spannung auf und suggeriert damit eine höhere zyklische Werkstoffverfestigung für den EN-GJS-400-18U-LT. In der Dehnungswöhlerlinie bewirkt die Verwendung eines trilinearen Ansatzes, dass diese die Ergebnisse für hohe Lebensdauern deutlich besser abbildet, Bild 48.

Für den mischkristallverfestigten EN-GJS-450-18 werden die Versuchspunkte im Spannungs-Dehnungs-Diagramm und in der Dehnungswöhlerlinie durch den trilinearen Ansatz ebenfalls besser erfasst. Es zeigt sich aber auch, dass die Werte für die zyklische 0,2 %-Dehngrenze $R'_{p0,2}$ über den konventionellen Ansatz weniger stark bis gar nicht überschätzt werden, wie dies beim EN-GJS-400-18U-LT der Fall ist (z.B. **Anhang B, Bild B 28**).

Die erneute Auswertung der dehnungsgeregelten Versuchsreihen am EN-GJS-700-2 auf Basis des trilinearen Ansatzes zeigt nun deutlich größere Bereiche zyklischer Entfestigung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, wie dies für den konventionellen Ansatz der Fall ist. Gleichzeitig fallen auch hier die Werte für die zyklische 0,2 %-Dehngrenze $R'_{p0,2}$ ab (z.B. **Anhang B, Bild B 47**). Das bedeutet, dass die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach der konventionellen Methode für den EN-GJS-700-2 eine zu hohe zyklische Verfestigung ermittelt und diese somit überschätzt. Vielmehr lässt der Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve auf Basis des trilinearen Ansatzes ein neutrales Werkstoffverhalten über dem kompletten durch die Versuche abgedeckten elastisch-plastischen Bereich erkennen. Eine zyklische Verfestigung, die die konventionelle Methode im Bereich von Totaldehnungen oberhalb von $\varepsilon_{a,t} = 0,5$ % vermittelt, findet tatsächlich nicht statt.

Für alle Versuchsreihen ist die trilineare Wöhlerlinie sowie die aus der Kompatibilität bestimmte Spannungs-Dehnungs-Kurve mit den neu ermittelten Parametern in den entsprechenden Diagrammen im **Anhang B** im Vergleich zum konventionellen Ergebnis mit eingetragen. Dabei weichen die Abknickpunkte bei den einzelnen Versuchsreihen auf Grund der statistischen Auswertung vom in Bild 47 ermittelten Abknickpunkt ($N_k = 1 \cdot 10^6$ Schwingspiele) für die gemeinsame Auswertung aller Versuchspunkte ab.

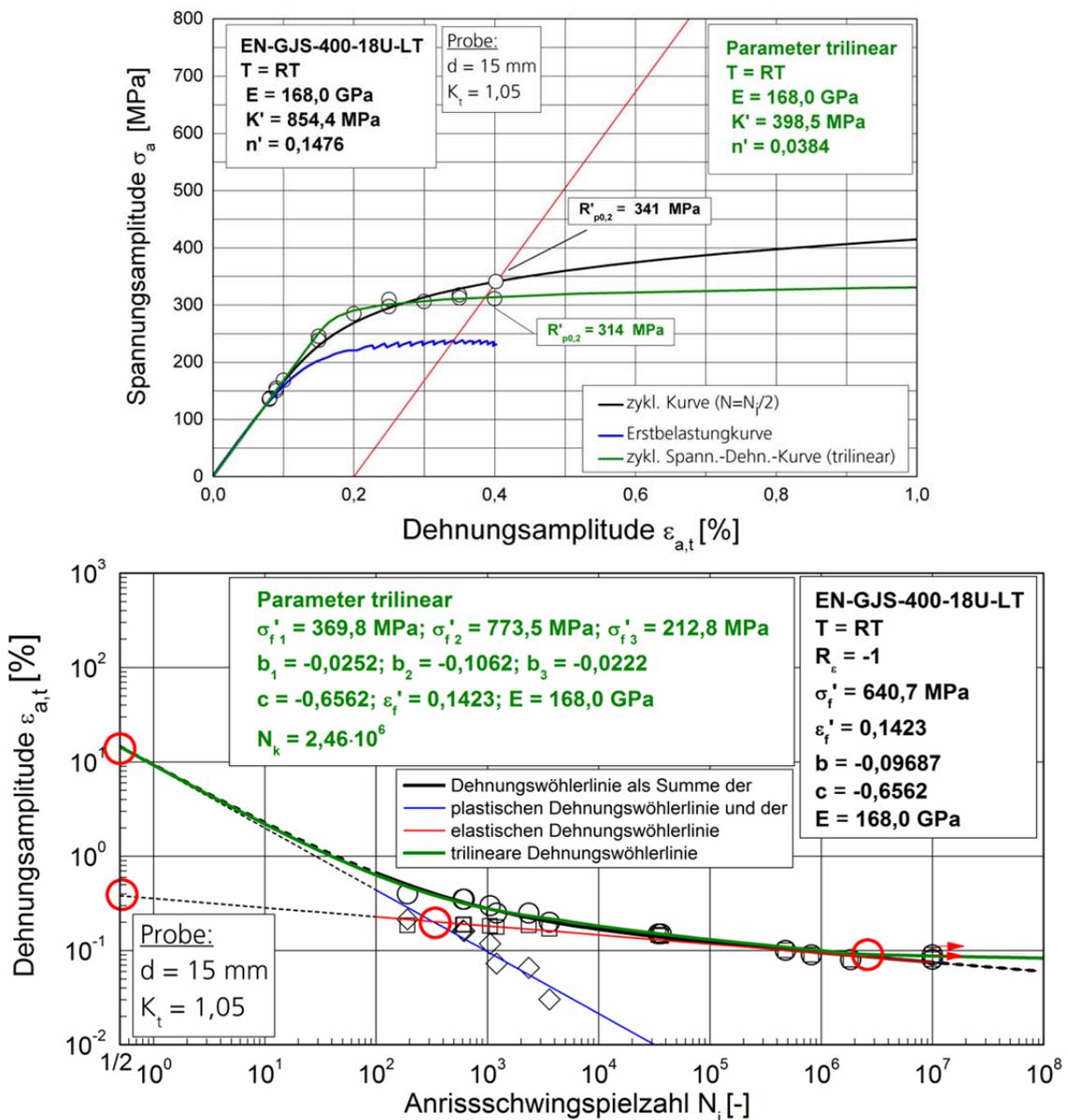


Bild 48 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und trilineare Dehnungswöhlerlinie (MWR01)

5.1.3 Spannungsregelung

Für die Ermittlung der Schwingfestigkeit für den ungenügend eingespannten Werkstoffzustand unter Spannungsregelung finden die Wöhlerversuche für jeden Werkstoff und für jede Schwingprobengeometrie für Wechsel-, $R_\sigma = -1$, und Zugschwellbelastung, $R_\sigma = 0$, zunächst getrennt nach der Probenlage innen und außen bis zum Bruch der Schwingproben oder bis zum Erreichen der Grenzschwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ statt. Hierbei zeigt sich, dass zum einen die Lebensdauer bei Vorliegen eines technischen Anrisses etwa 80 bis 90 % der Lebensdauer bis zum Bruch der Schwingproben entspricht und somit eine relativ kurze Rissfortschrittslebensdauer vorliegt. Zum anderen zeigt sich, dass die Schwingfestigkeit für alle drei Werkstoffe innerhalb einer Schwingprobengröße für die Entnahmepositionen innen und außen dicht zusammenliegt. Dazu seien die ermittelten Schwingfestigkeiten in den Tabellen in **Anhang T (Tabelle T 3, Tabelle T 24 und Tabelle T 47)** je Probengeometrie und Werkstoff mitei-

inander verglichen. So ergeben sich beispielsweise für den EN-GJS-700-2 für den ungespannten Werkstoffzustand für die ungekerbten Schwingproben mit dem Prüfdurchmesser $d = 15$ mm unter Wechselbelastung Nennspannungsamplitude von $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{au\ss}en,R=-1} = 181$ MPa und $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{innen},R=-1} = 175$ MPa jeweils bei der Grenzschnitzspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$. Die Nennspannungsamplitude unter Zug-schwellbelastung ergibt sich zu $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{innen},R=0} = 116$ MPa für die Schwingprobenlage innen und zu $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{au\ss}en,R=0} = 117$ MPa für die Schwingprobenlage außen. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der deutlich unterschiedlichen Zugfestigkeiten R_m und 0,2 %-Dehngrenzen $R_{p0,2}$, Tabelle 4, bemerkenswert. Eine Abhängigkeit der Schwingfestigkeit von den quasistatischen Werkstoffkennwerten, wie sie z.B. /Hue81/ für Gusseisenwerkstoffe angibt, lässt sich damit zumindest für den EN-GJS-700-2 für den ungespannten Werkstoffzustand nicht ermitteln. Vergleichbare Ergebnisse für die Entnahmeposition innen und außen ergeben sich auch für die anderen beiden Werkstoffe im ungespannten Werkstoffzustand. Lediglich die Ergebnisse für die Nennspannungsamplitude beim EN-GJS-450-18 der Schwingproben mit dem Prüfdurchmesser $d = 15$ mm zeigen mit $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{au\ss}en,R=-1} = 168$ MPa und $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{au\ss}en,R=0} = 119$ MPa für die Entnahmeposition außen trotz gleicher Zugfestigkeit mit etwa 10 % Unterschied vergleichsweise höhere Schwingfestigkeiten wie für die Entnahmeposition innen ($\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{innen},R=-1} = 153$ MPa und $\sigma_{a,n,N_G,50\%,\text{innen},R=0} = 105$ MPa). Die einzelnen Wöhlerlinien, unterschieden nach den Entnahmepositionen und Schwingprobengeometrien für den ungespannten Werkstoffzustand, sind ebenso wie die Einzelergebnisse als Diagramme und Tabellen dem **Anhang B** sowie dem **Anhang T** zu entnehmen.

Auf Grund der guten Übereinstimmung der Schwingfestigkeiten aber auch der Neigungen k im Bereich der Zeitschwingfestigkeit zwischen beiden Entnahmepositionen je Werkstoff findet eine erneute Auswertung der Einzelergebnisse für alle Probengeometrien ohne Berücksichtigung der Entnahmeposition statt. Dafür wird im vorliegenden Fall davon ausgegangen, dass das versagensauslösende Kriterium für eine Werkstofflegierung sowie eine Schwingprobengröße gleich ist und sich die Wöhlerlinien mit einem gleichen Abknickpunkt sowie einer ähnlichen Streuung beschreiben lassen. Dies trifft für die vorliegenden Einzelwöhlerlinien in guter Näherung zu. Die Zusammenführung der Einzelergebnisse zweier Versuchsreihen bietet den Vorteil eines vergrößerten Stichprobenumfangs für die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse. Um den Datenumfang zusätzlich zu erweitern, werden die Ergebnisse aus den dehnungsgeregelten Versuchen mit in die Auswertung einbezogen. Dies kann allerdings nur für diejenigen Ergebnisse erfolgen, deren Spannungs-Dehnungs-Hysteresen hinreichend kleine plastische Anteile zeigen. Dies ist nach Auswertung der zyklisch stabilisierten Spannungs-Dehnungs-Hysteresen bei den drei untersuchten Werkstoffen gegeben, deren Einzelversuche Lebensdauern oberhalb von 30.000 Schwingspielen erreichen. Für diese gilt dann $\epsilon_{a,p} \leq 0,04$ %.

Die im Rahmen der Auswertung der dehnungsgeregelten Versuche ermittelte Nennspannungsamplitude für den zyklisch stabilisierten Werkstoffzustand darf jedoch nicht direkt für die Auswertung der spannungsgeregelten Versuche übernommen werden. Bei der Umrechnung ist zu berücksichtigen, dass die Mittelspannung auf Grund des zyklischen Werkstoffverhaltens nicht konstant bleibt und sich leicht in den Druck- oder Zugbereich verschiebt. Die Umrechnung auf das Lastverhältnis $R_o = -1$ erfolgt dann mit Hilfe der Mittelspannungsempfindlichkeit des Werkstoffes und einer schädigungsequivalenten Amplitudentransformation. Graphisch veranschaulicht dies das Haigh-Diagramm in Bild 49. **Tabelle T 69**, **Tabelle T 70** und **Tabelle T 71** im **Anhang T** fassen die Ergebnisse dieser sogenannten Mittelspannungstransformation für alle Versuchsreihen unterschieden nach Werkstoff und Schwingprobengröße zusammen.

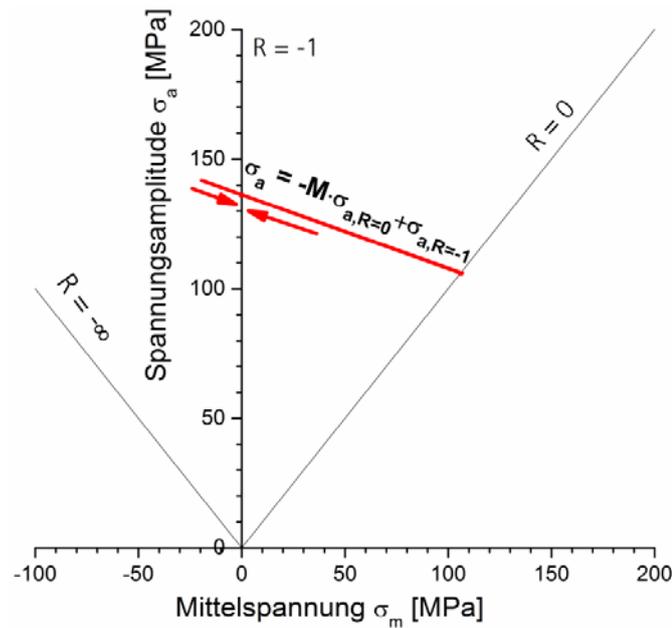


Bild 49 Mittelspannungskorrektur im Haigh-Diagramm

Mit den vorhandenen Einzelergebnissen der Amplitudentransformation aus den unterschiedlichen Entnahmepositionen und den umgerechneten Einzelversuchen aus den dehnungsgeregelten Wöhlerversuchen steht eine deutlich höhere Anzahl an Versuchspunkten für eine statistische Auswertung der spannungsgeregelten Versuche an ungekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm zur Verfügung. Die Ergebnisse der zusammengefassten Auswertung zeigt in Form der Wöhlerlinienparameter Tabelle 5 sowie im **Anhang B Bild B 17** und **Bild B 18** für den EN-GJS-400-18U-LT, **Bild B 38** und **Bild B 39** für den mischkristallverfestigten EN-GJS-450-18 sowie **Bild B 59** und **Bild B 60** für den perlitischen EN-GJS-700-2.

Die Auswertung ergibt für die drei Werkstoffe unterschiedliche Abknickpunkte. So liegt dieser bei $N = 1 \cdot 10^6$ Schwingspielen für den EN-GJS-700-2, bei $N = 1,58 \cdot 10^6$ Schwingspielen für den EN-GJS-400-18U-LT sowie bei $N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen für den EN-GJS-450-18.

Auf Grund der unterschiedlichen Schwingprobengeometrien bzw. Kerbformzahlen K_t erfolgt der Vergleich der Schwingfestigkeiten innerhalb der Werkstoffe und Schwingprobengeometrien auf Basis örtlicher Spannungen. Die höchste örtliche Schwingfestigkeit zeigt der EN-GJS-700-2 für die ungekerbten Schwingproben beider Prüfdurchmesser sowie für die mild gekerbte Schwingprobe. Hieran schließt sich der EN-GJS-450-18 und der EN-GJS-400-18U-LT an. Für die Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm ergeben sich für den EN-GJS-400-18U-LT örtliche Spannungsamplituden bei der Grenzschiwingspielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ von $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=-1} = 143$ MPa und $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=0} = 95$ MPa. Einen vergleichbaren Wert für die Schwingfestigkeit bei $R_G = -1$ ermittelt auch /Kau98/ für den GGG-40 bei vergleichbarem höchstbeanspruchten Schwingprobenvolumen. Allerdings liegt der Kennwert für $R_G = 0$ für den EN-GJS-400-18U-LT mit $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=0} = 95$ MPa deutlich unter dem Ergebnis für den GGG-40 ($\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=0} = 106$ MPa, /Kau98/). Der mischkristallverfestigte EN-GJS-450-18 erreicht bei der gleichen Schwingprobengröße örtliche Spannungsamplituden von $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=-1} = 168$ MPa und $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=0} = 117$ MPa und bestätigt damit Ergebnisse aus /B114a/ ermittelt am SiWind®. Deutlich höhere örtliche Schwingfestigkeiten zeigt der EN-GJS-700-2 mit $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=-1} = 183$ MPa unter Wech-

selbelastung. Im Vergleich zum EN-GJS-450-18 fällt der Zuwachs der örtlichen Schwingfestigkeit unter Zugschwellbelastung mit $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 122$ MPa jedoch gering aus. Für die ungekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm steigt die Schwingfestigkeit bei allen Werkstoffen im Vergleich zu den Ergebnissen an den Schwingproben mit $d = 15$ mm leicht an. Hier macht sich der statistische Größeneinfluss bemerkbar. So ergeben sich örtlich ertragbare Spannungsamplituden von $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 158$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 102$ MPa für den EN-GJS-400-18U-LT, $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 174$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 126$ MPa für den EN-GJS-450-18 sowie $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 199$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 138$ MPa für den EN-GJS-700-2. Durch die weitere Verringerung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens bei den mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) steigt die Schwingfestigkeit weiter an. Es werden örtliche Spannungsamplituden von $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 159$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 117$ MPa für den EN-GJS-400-18U-LT erreicht. Für den EN-GJS-450-18 ergeben sich $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 180$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 130$ MPa sowie $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=-1} = 217$ MPa und $\sigma_{a,\sigma,N_G,50\%,R=0} = 145$ MPa für den höherfesten EN-GJS-700-2. Über alle Versuchsreihen hinweg ergeben sich Streuungen in Spannungsrichtung im Bereich $1:1,09 \leq T_\sigma \leq 1:1,30$. Diese Werte liegen im für dickwandiges Gusseisen mit Kugelgraphit üblichen Bereich /Kau98, Shi11, BI14a/. Der Vorschlag in /Kau98/ zur Verwendung einer einheitlichen Streuung von $T_\sigma \leq 1:1,30$ für dickwandigen GGG-40 lässt sich ohne weiteres auch für die untersuchten Werkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 empfehlen.

5.1.3.1 Kerbempfindlichkeit

Im Gegensatz zu den ermittelten Schwingfestigkeiten für die ungekerbten und die mild gekerbten Schwingproben zeigen die scharf gekerbten Schwingproben mit $K_t = 4,14$ abweichende Ergebnisse. Bei Übernahme des Abknickpunktes je Werkstoff aus den Versuchsreihen an un- bzw. mild gekerbten Schwingproben ergeben sich innerhalb der Werkstoffe vergleichbare Schwingfestigkeiten im Bereich von $65 \text{ MPa} \leq \sigma_{a,n,N_G,50\%,R=-1} \leq 72 \text{ MPa}$ für $R_\sigma = -1$ und im Bereich von $64 \text{ MPa} \leq \sigma_{a,n,N_G,50\%,R=0} \leq 65 \text{ MPa}$ für $R_\sigma = 0$, Tabelle 5. Somit zeigt sich, dass infolge der scharfen Kerben die Schwingfestigkeiten für $R_\sigma = -1$ und $R_\sigma = 0$ innerhalb der drei Werkstoffe auf ein ähnliches Niveau zusammenfallen /Rad07, Hai06, Son10, Hue85/. Dies steht im Einklang mit Untersuchungen aus /Hue85/ hinsichtlich des Kerbeinflusses. Dennoch liegen die hier ermittelten Schwingfestigkeiten auf einem deutlich geringeren Niveau als dies bei den Untersuchungen in /Hue85/ der Fall ist. Dies ist unter Umständen auf den unterschiedlichen Gefügestand zurückzuführen. Für die vergleichsweise dünnwandigen Halbzeuge und Bauteile, aus denen in /Hue85/ die Schwingproben entnommen werden, ist von einer besseren Gefügeausbildung auf Grund geringerer Erstarrungszeiten und somit von einer höheren Grundschwingfestigkeit auszugehen. Neben vergleichbaren Werten der Schwingfestigkeit innerhalb der drei Werkstoffe für ein Lastverhältnis liegen auch die Schwingfestigkeiten nach dem Abknickpunkt für $R_\sigma = -1$ und $R_\sigma = 0$ innerhalb eines Werkstoffes auf ähnlichen Niveaus, Tabelle 5. Der Einfluss von Zugmittelspannungen auf die Schwingfestigkeit lässt sich somit für die drei Werkstoffe bei einer Kerbformzahl von $K_t = 4,14$ kaum mehr nachweisen. Lediglich die Neigungen im Bereich der Zeitschwingfestigkeit unterscheiden sich bei jedem Werkstoff für Wechsel- und Zugschwellbelastung deutlich. Dabei gilt stets $k_{R=-1} < k_{R=0}$, Bild 50. Die auf Basis der Ergebnisse an den scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) ermittelten Kerbwirkungszahlen K_f und Stützziffern n_x finden sich in **Tabelle T 72** im **Anhang T**.

Die Wöhlerlinien für die scharf gekerbten Proben getrennt nach Werkstoff finden sich im **Anhang B** in **Bild B 19**, **Bild B 40** und **Bild B 61**. Im Hinblick auf einen vergrößerten Stichprobenumfang für die

statistische Auswertung der Wöhlerversuche und somit zur Ableitung von Kennwerten ist es erlaubt, eine werkstoffübergreifende Auswertung der Einzelergebnisse getrennt nach Zugschwell- und Wechselbelastung durchzuführen. Bei dieser Auswertung stellt sich sowohl für die Zugschwell- als auch für die Wechselbelastung der Abknickpunkt bei $N_k = 2 \cdot 10^6$ Schwingspielen ein und die örtlichen Spannungsamplituden erreichen unter Wechselbelastung $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=-1} = 269$ MPa und unter Zugschwellbelastung $\sigma_{a,\delta,N_G,50\%,R=0} = 265$ MPa. Ein Einfluss der Zugmittellast auf die drei Werkstoffe nach dem Abknickpunkt ist damit nicht mehr nachweisbar. Im Bereich der Zeitschwingfestigkeit weichen die Neigungen mit $k_{R=-1} = 3,80$ und $k_{R=0} = 5,78$ jedoch voneinander ab. Dies ist damit begründet, dass beide bei unterschiedlichen Spannungsamplituden die Dehngrenze erreichen. Dazu ist in Bild 50 zur Veranschaulichung die Oberspannung über der Schwingenspielzahl dargestellt. Bild 51 fasst die Ergebnisse zur örtlichen Schwingfestigkeit unter Spannungsregelung bei der Grenzschwingenspielzahl N_G zusammen. Auch diese Ergebnisse finden sich in Tabelle 5 („kombiniert“) sowie im **Anhang B** in **Bild B 67**.

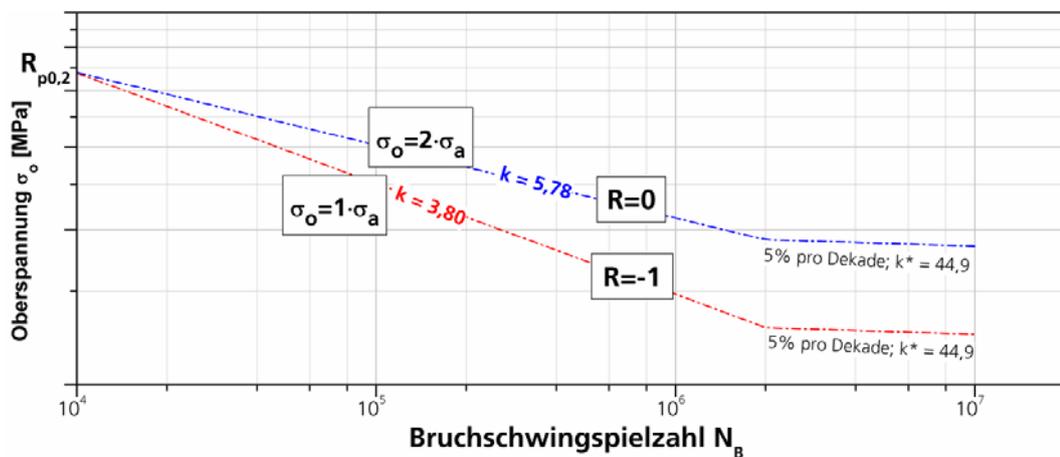


Bild 50 Vergleich der Neigung k mit der 0,2 %-Dehngrenze und der Langzeitschwingfestigkeit

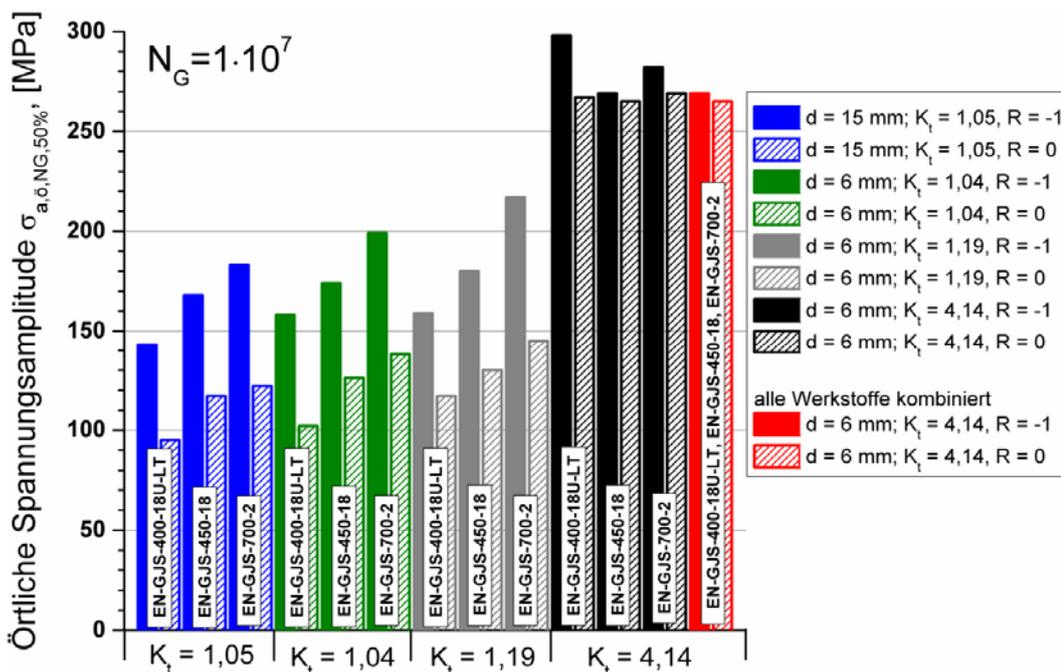


Bild 51 Zusammenfassung der spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsergebnisse

Tabelle 5 Wöhlerlinienparameter der untersuchten Werkstoffe

Werkstoff	Durchmesser der Schwingproben [mm]	Lastverhältnis [-]	Kerbradius r [mm]	Kerbformzahl [-]	Schwingspielzahl am Abknickpunkt [-]	Neigung [-]	Nennspannung am Abknickpunkt für $P_{\dot{u}} = 50\%$ [MPa]	Nennspannung amplitude bei $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen für $P_{\dot{u}} = 50\%$ [MPa]	Örtliche Spannung amplitude bei $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen für $P_{\dot{u}} = 50\%$ [MPa]	Mittelspannungsempfindlichkeit [-]	Streuung [-]	Anzahl der untersuchten Schwingproben
	d											
EN-GJS-400-18U-LT	15	-1	-	1,05	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	142	136	143	0,51	1,21	46
	15	0	-	1,05	$1,58 \cdot 10^6$	8,55	94	90	95		1,17	23
	6	-1	-	1,04	$1,58 \cdot 10^6$	7,77	158	152	158	0,55	1,26	27
	6	0	-	1,04	$1,58 \cdot 10^6$	8,99	102	98	102		1,21	12
	6	-1	4,0	1,19	$1,58 \cdot 10^6$	6,94	140	134	159	0,37	1,26	16
	6	0	4,0	1,19	$1,58 \cdot 10^6$	10,64	102	98	117		1,12	16
	6	-1	0,2	4,14	$1,58 \cdot 10^6$	4,25	75	72	298	0,12	1,30	11
	6	0	0,2	4,14	$1,58 \cdot 10^6$	5,86	67	64	267		1,09	11
EN-GJS-450-18	15	-1	-	1,05	$2,00 \cdot 10^6$	7,03	166	160	168	0,44	1,23	50
	15	0	-	1,05	$2,00 \cdot 10^6$	11,28	115	111	117		1,20	28
	6	-1	-	1,04	$2,00 \cdot 10^6$	7,26	173	167	174	0,38	1,28	39
	6	0	-	1,04	$2,00 \cdot 10^6$	13,72	125	121	126		1,13	24
	6	-1	4,0	1,19	$2,00 \cdot 10^6$	8,08	156	151	180	0,39	1,22	12
	6	0	4,0	1,19	$2,00 \cdot 10^6$	8,38	113	109	130		1,22	12
	6	-1	0,2	4,14	$2,00 \cdot 10^6$	3,76	67	65	269	0,02	1,11	9
	6	0	0,2	4,14	$2,00 \cdot 10^6$	5,99	66	64	265		1,15	10
EN-GJS-700-2	15	-1	-	1,05	$1,00 \cdot 10^6$	4,94	183	174	183	0,50	1,27	46
	15	0	-	1,05	$1,00 \cdot 10^6$	5,37	122	116	122		1,26	26
	6	-1	-	1,04	$1,00 \cdot 10^6$	6,12	201	191	199	0,44	1,28	39
	6	0	-	1,04	$1,00 \cdot 10^6$	7,96	140	133	138		1,24	26
	6	-1	4,0	1,19	$1,00 \cdot 10^6$	6,40	192	182	217	0,49	1,10	14
	6	0	4,0	1,19	$1,00 \cdot 10^6$	5,59	129	122	145		1,15	15
	6	-1	0,2	4,14	$1,00 \cdot 10^6$	3,00	71	68	282	0,05	1,24	13
	6	0	0,2	4,14	$1,00 \cdot 10^6$	4,00	69	65	269		1,17	11
kombiniert	6	-1	0,2	4,14	$2,00 \cdot 10^6$	3,80	68	65	269	0,02	1,27	33
	6	0	0,2	4,14	$2,00 \cdot 10^6$	5,78	66	64	265		1,15	31

5.1.3.2 Größeneinfluss

Die aus den spannungsgeregelten Versuchen ermittelten, örtlichen Schwingfestigkeiten sind in Bild 52 dem höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen gegenübergestellt. Für die drei untersuchten Werkstoffe lässt sich so zwischen den Schwingfestigkeiten für unterschiedliche, höchstbeanspruchte Bauteilvolumina interpolieren. Dabei entfallen üblicherweise kleinere, zu bemessende höchstbeanspruchte Werkstoffvolumina auf Kerben an Gewindeübergängen, engen Radien oder am Zahnfuß von Zahnrädern. Hierbei können höchstbeanspruchte Werkstoffvolumina von einigen wenigen mm^3 auftreten. Höchstbeanspruchte Volumina oberhalb von 1000 mm^3 treten dabei etwa im Bereich von Windenergieanlagen an großen Radien von z.B. Mannlöchern und Wartungsdurchstiegen auf.

Für die drei untersuchten Werkstoffe stellt Bild 52 die örtlichen Schwingfestigkeiten bei der Grenzschwingspielzahl N_G für Zugschwell- und Wechselbelastung und eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_0 = 50\%$ für die vier geprüften höchstbeanspruchten Werkstoffvolumina $HBV_{90\%}$ zusammen. Angegeben sind ebenfalls die abschnittsweise definierten Volumenexponenten bzw. Neigungen v . Im Bereich zwischen $11,46 \text{ mm}^3$ und $6122,33 \text{ mm}^3$ ergeben sich für alle drei Werkstoffe Volumenexponenten v von $0,01$ bis $0,03$ sowohl für $R_\sigma = -1$ als auch $R_\sigma = 0$. Zu kleineren Prüfvolumina hin steigen die Volumenexponenten deutlich an und erreichen Werte zwischen $0,07$ und $0,14$ und sind umso größer, je geringer die Werkstoffgrundfestigkeit ist.

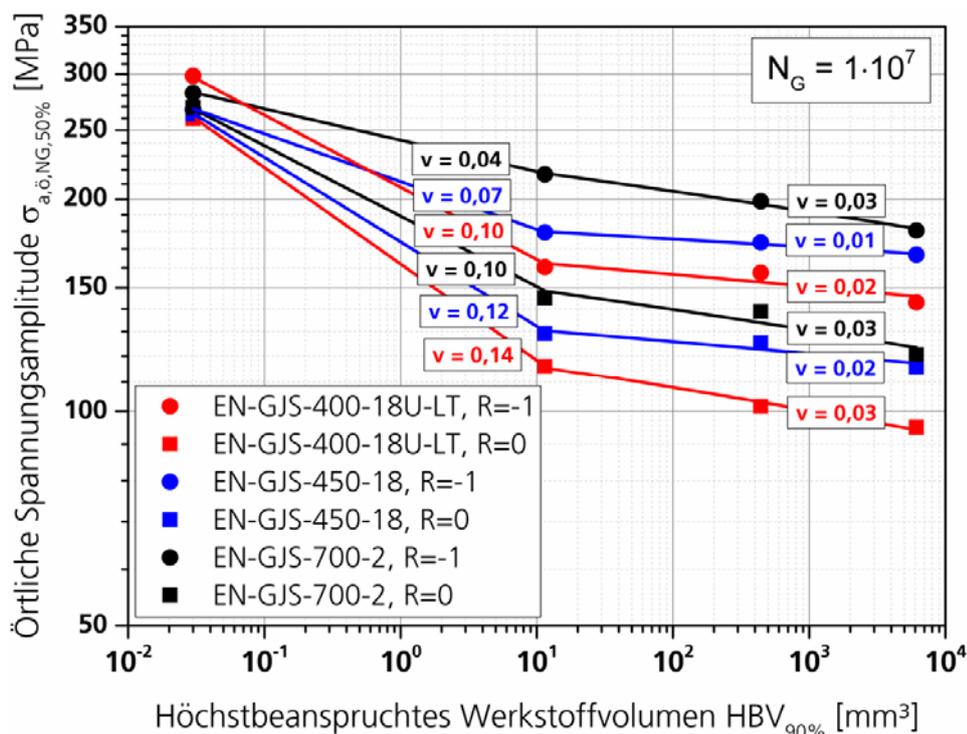


Bild 52 Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ für den EN-GJS-400-18U-LT, den EN-GJS-450-18 sowie den EN-GJS-700-2

Für dickwandiges Gusseisen stellt unter anderem /Kau98/ ein Diagramm zum GGG-40 bereit, in dem zwei Bereiche mit unterschiedlichem Volumenexponent v ausgewiesen sind. Zwischen 300 und 8000 mm^3 gilt $v = 0,09$ sowie $v = 0,01$ für $HBV_{90\%} \geq 8000 \text{ mm}^3$ /Kau98/. Bild 53 stellt die Ergebnisse für $R_\sigma = -1$ und den EN-GJS-400-18U-LT denjenigen von /Kau98/ am GGG-40 bei der Grenzschwing-

spielzahl $N_G = 1 \cdot 10^7$ gegenüber. Während der GGG-40 für ein höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen $HBV_{90\%} = 4000 \text{ mm}^3$ die gleiche örtliche Spannungsamplitude aufweist wie der EN-GJS-400-18U-LT bei $HBV_{90\%} = 6122,33 \text{ mm}^3$, zeigen sich bereits bei einem höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen von $HBV_{90\%} = 400 \text{ mm}^3$ deutliche Unterschiede in der Schwingfestigkeit. Das Ergebnis aus /Kau98/ liegt hier deutlich über den in dieser Arbeit am EN-GJS-400-18U-LT ermittelten Ergebnissen. Eine ähnliche Tendenz zeigen auch Untersuchungen von /Euf13/ ebenfalls für den EN-GJS-400-18U-LT. Auf kleinere Volumina mit $v = 0,09$ extrapoliert, würde sich zusätzlich beim kleinsten untersuchten höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen von $HBV_{90\%} = 0,03 \text{ mm}^3$ ein Faktor zum experimentell ermittelten Wert von 1,44 ergeben. Die tatsächliche Schwingfestigkeit würde somit durch einen konstanten Volumenexponenten von $v = 0,09$ überschätzt.

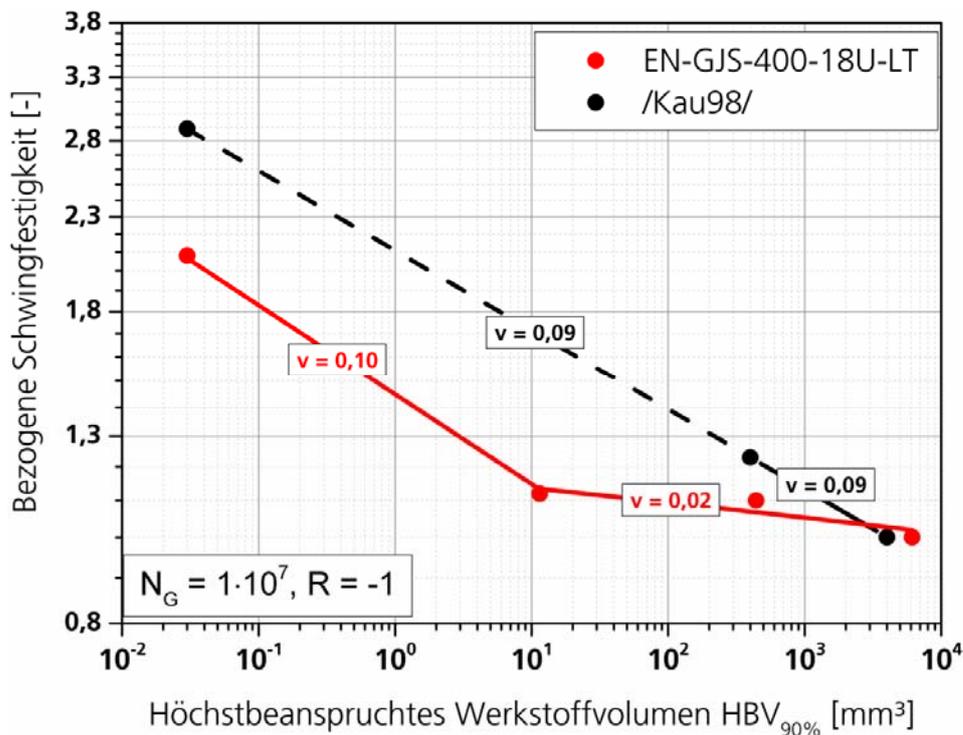


Bild 53 Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ für den EN-GJS-400-18U-LT im Vergleich zu Ergebnissen aus /Kau98/

Das Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens wird wie auch ein Haigh-Diagramm für eine konstante Lebensdauer angegeben. Dennoch ist der Zusammenhang lebensdauerabhängig. Dies trifft dann zu, wenn sich die Neigungen im Zeitschwingfestigkeitsbereich und/oder die ermittelten Abknickpunkte für die dem Diagramm zu Grunde liegenden Wöhlerlinien unterscheiden. Ist das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen für Lebensdauerabschätzungen und für Lebensdauern im Zeitschwingfestigkeitsbereich für eine Bauteilauslegung zu verwenden, ist dies zwingend zu berücksichtigen. Um die Verhältnisse korrekt abzubilden, macht daher eine Darstellung der örtlichen Spannungsamplituden im dreidimensionalen Koordinatensystem über Lebensdauer und höchstbeanspruchtem Werkstoffvolumen Sinn. Für alle drei untersuchten Werkstoffe zeigt im **Anhang B Bild B 70, Bild B 71** und **Bild B 72** diese dreidimensionale Darstellung des Zusammenhangs zwischen höchstbeanspruchtem Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$, Lebensdauer N und örtlicher Spannungsamplitude $\sigma_{a,\delta}$.

5.1.3.3 Wöhlerlinien nach dem synthetischen Konzept

Liegen für eine Bauteilbemessung keine Schwingfestigkeitskennwerte aus Versuchen vor oder lassen sich diese nur unter erhöhtem Aufwand ermitteln, erfolgt häufig ein Rückgriff auf die synthetischen Wöhlerlinien etwa nach /Hue81, Gud99, GL10, Ber13/. Speziell für Großgusskomponenten, bei denen eine experimentelle Schwingfestigkeitsermittlung stets schwierig ist, kommen nicht selten synthetisch ermittelte Wöhlerlinien zum Einsatz. Die Parameter der synthetischen Wöhlerlinien werden anhand der an Angussproben oder getrennt gegossenen Proben ermittelten quasistatischen Werkstoffkennwerte zunächst für Wechselbelastung bestimmt. Ebenfalls auf Basis quasistatischer Kennwerte kann eine Mittelspannungsempfindlichkeit und damit auch eine Wöhlerlinie für z.B. Zugschwellbelastung errechnet werden. Die Berechnung der synthetischen Wöhlerlinien nach /GL10/ berücksichtigt gegenüber der Darstellung in /Hue81, Gud99, Ber13/ darüber hinaus noch bauteilspezifische Gegebenheiten wie die mittels zerstörungsfreier Prüfung festgestellte Gütestufe. Liegen Werkstoffungängen vor, wird die synthetische Wöhlerlinie für die Bauteilbemessung mit einem in /GL10/ festgelegten Faktor in Abhängigkeit der Bauteilgütestufe abgemindert. Ein Bezug zu der tatsächlich lokal vorliegenden Schwingfestigkeit lässt sich damit im Konzept der synthetischen Wöhlerlinie jedoch nicht abbilden.

Ein Vergleich der für die drei Werkstoffe experimentell bestimmten Wöhlerlinienkennwerte an Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm mit den synthetischen Ergebnissen soll zeigen, wie gut die auf quasistatischen Kennwerten ermittelten Wöhlerlinien die Realität abbilden. Für den Vergleich werden die höheren, quasistatischen Werkstoffkennwerte aus dem Gussplattenrandbereich herangezogen. Die synthetisch erzeugten Wöhlerlinien liegen dann zwar auf der unsicheren Seite; d.h. bei gleicher Lebensdauer ist die abgeschätzte, ertragbare Spannungsamplitude größer als die anhand der niedrigeren, quasistatischen Werkstoffkennwerte aus dem Gussplattenmittenbereich ermittelte Schwingfestigkeit. Ein Vergleich zu den experimentell ermittelten Kennwerten zeigt dann allerdings deutlicher das eigentliche Potential der untersuchten Werkstoffe. Dem stehen als konservatives Ergebnis die örtlichen Kennwerte für die ungekerbten Schwingproben mit einem Prüfdurchmesser $d = 15$ mm gegenüber, die auf Grund des größeren höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens die geringsten Schwingfestigkeiten ergeben. Das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen wird aktuell von synthetischen Bemessungskonzepten nicht berücksichtigt.

Neben den quasistatischen Materialkennwerten ist im synthetischen Konzept ferner die Oberflächenrauheit des Bauteils zu berücksichtigen. Der Vergleich zwischen experimentell und synthetisch ermittelter Schwingfestigkeit ist dann korrekt, wenn die Oberflächenrauheit der Schwingproben mit $R_z = 2,5$ μm gemäß Zeichnung, Bild 35, Berücksichtigung findet. Neben den Kennwerten für $R_\sigma = -1$ ist der Vergleich der Zugschwellfestigkeit von besonderem Interesse. Dazu wird die Mittelspannungsempfindlichkeit nach /GL10/ bzw. Gleichung (2) ermittelt. Auch die nach /GL10/ geforderten Sicherheitsfaktoren sind zu berücksichtigen. Die synthetischen Wöhlerlinien sind mit dem Sicherheitsfaktor für die Gütestufe S_d mit 0,85 für den Nachweis mittels Ultraschall und Durchstrahlung ($j_0 = 0$) für die an den Gussplatten im Bereich ohne Ungängen festgestellte Gütestufe 1 ($j = 1$) abzumindern. Zudem sind alle synthetischen Wöhlerlinien zur Berücksichtigung der Streuung mit $S_{P_{\bar{u}}} = \frac{2}{3}$ auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}} = 97,7$ % abzumindern /GL10/. Der Wanddickenfaktor S_t darf an dieser Stelle für das weitere Abmindern entfallen, da die quasistatische Festigkeit den gemessenen, Tabelle 4, und nicht den Normwerten entspricht /GL10/. Insgesamt ergibt sich ein Sicherheitsfaktor nach Gleichung (35) zu.

$$S_{ges} = S_d \cdot S_{P_{\bar{u}}} \cdot S_t = 0,85^{(j-j_0)} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = 0,85^{(1-0)} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = 0,57 \quad (35)$$

Die Wöhlerlinienparameter der synthetischen Wöhlerlinien für alle drei Werkstoffe sind in Tabelle 6 sowie in Bild 54 den örtlichen, experimentellen Kennwerten der Wöhlerlinien für Zugschwell- und Wechselbelastung der Schwingproben mit einem Prüfdurchmesser von $d = 15 \text{ mm}$ für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 97,7 \%$ jeweils bei $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen gegenübergestellt.

Die Parameter der synthetischen Wöhlerlinien unterscheiden sich teilweise deutlich von den experimentell ermittelten Kennwerten. Dies gilt insbesondere für die Neigung k im Bereich der Zeitschwingfestigkeit. Während die Neigung der synthetischen Wöhlerlinie für alle Werkstoffe und Versuchsreihen bei $k \approx 11$ liegt, zeigen die experimentellen Ergebnisse Werte zwischen $4,94 \leq k \leq 11,28$. Eine Neigung nach dem Abknickpunkt berücksichtigt das Konzept der synthetischen Wöhlerlinie darüber hinaus nicht und nimmt eine sogenannte Dauerfestigkeit an. Nach /GL10/ werden Abknickpunkte für alle Versuchsreihen bei etwa $3 \cdot 10^6$ Schwingspielen ermittelt. Die experimentellen Abknickpunkte liegen dagegen bei um den Faktor 1,5 bis 3 kürzeren Lebensdauern.

Tabelle 6 Gegenüberstellung experimenteller und synthetischer Wöhlerlinienparameter

Werkstoff	Spannungsverhältnis R	Parameter der Spannungswöhlerlinien					
		synthetisch nach /GL10/			experimentell*		
		Abknickpunkt	Neigung	Örtliche Spannungsamplitude bei N_G und $P_0 = 97,7 \%$ [MPa]	Abknickpunkt	Neigung	Örtliche Spannungsamplitude bei N_G und $P_0 = 97,7 \%$ [MPa]
		N_k	k	$\sigma_{a,0,N_G}$	N_k	k	$\sigma_{a,0,N_G}$
EN-GJS-400-18U-LT	-1	$3,00 \cdot 10^6$	11,13	107	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	123
	0	$3,00 \cdot 10^6$	11,13	89	$1,58 \cdot 10^6$	8,55	84
EN-GJS-450-18	-1	$2,97 \cdot 10^6$	11,01	119	$2,00 \cdot 10^6$	7,03	143
	0	$2,97 \cdot 10^6$	11,01	96	$2,00 \cdot 10^6$	11,28	101
EN-GJS-700-2	-1	$2,92 \cdot 10^6$	10,74	154	$1,00 \cdot 10^6$	4,94	152
	0	$2,92 \cdot 10^6$	10,74	116	$1,00 \cdot 10^6$	5,37	102

* Unter Berücksichtigung einer Neigung von $k^* = 44,9$ nach dem Abknickpunkt

Verglichen mit den experimentellen Schwingfestigkeiten zeigen die Spannungsamplituden bei der Grenzschwingspielzahl N_G deutliche Unterschiede zu den Werten der synthetischen Wöhlerlinie bei gleicher Lebensdauer. Für Wechselbelastung liegen die synthetischen Nennspannungsamplituden für die beiden ferritischen Werkstoffe deutlich auf der konservativen Seite. Während /GL10/ für den EN-GJS-400-18U-LT eine Nennspannungsamplitude von $\sigma_{a,0,N_G,97,7\%,R=-1} = 107 \text{ MPa}$ ermittelt, liefert die Auswertung der experimentellen Ergebnisse mit $\sigma_{a,0,N_G,97,7\%,R=-1} = 123 \text{ MPa}$ einen um 16 MPa (+ 15 %) höheren Kennwert. Für den EN-GJS-450-18 unterschätzt die synthetisch errechnete die experimentelle Schwingfestigkeit sogar um 24 MPa (+ 20 %), Tabelle 6. Dabei ist zu bedenken, dass bei den experimentell ermittelten Schwingfestigkeiten bereits ein weiterer Abfall der Wöhlerlinie nach dem Abknick-

punkt mit $k^* = 44,9$ nach /So05b, Son07/ berücksichtigt und der Abstand zwischen experimentellen und synthetische Wöhlerlinien am Abknickpunkt dementsprechend noch größer ist. Lediglich für den EN-GJS-700-2 wird die Nennspannungsamplitude mit $\sigma_{a,\dot{o},N_G,97,7\%,R=-1} = 154$ MPa um 2 MPa überschätzt. Teilweise gegensätzlich liegen die Ergebnisse unter Zugschwellbelastung. Hier liegen die synthetischen Ergebnisse mit $\sigma_{a,\dot{o},N_G,97,7\%,R=0} = 89$ MPa für den EN-GJS-400-18U-LT und $\sigma_{a,\dot{o},N_G,97,7\%,R=0} = 116$ MPa für den EN-GJS-700-2 auf der nicht konservativen Seite. Die Beanspruchbarkeit des EN-GJS-450-18 wird mit $\sigma_{a,\dot{o},N_G,97,7\%,R=0} = 96$ MPa konservativ abgeschätzt. Da die Kennwerte der Zugschwellbelastung auf Basis der Mittelspannungsempfindlichkeit nach /GL10/ umgerechnet werden, ist davon auszugehen, dass die in /GL10/ hinterlegte Gleichung für die Mittelspannungsempfindlichkeit die tatsächlichen Werte unterschätzt.

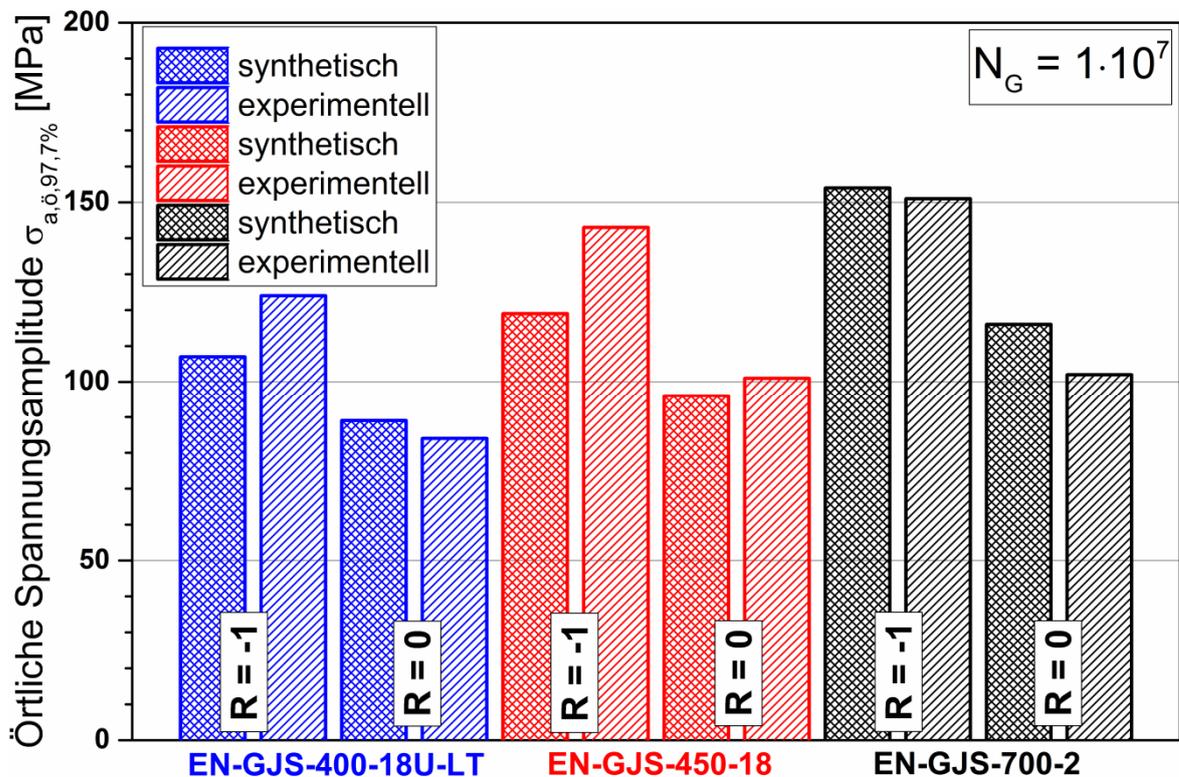


Bild 54 Vergleich experimentelle und synthetische Schwingfestigkeit

5.1.4 Mittelspannungsempfindlichkeit

Auf Basis der für jede Schwingprobengeometrie und jeden Werkstoff ermittelten Wechsel- und Zugschwellfestigkeiten werden Mittelspannungsempfindlichkeiten für die Grenzschiwingspielzahl N_G und einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50\%$ abgeleitet. Die Ergebnisse stellt Bild 55 im Haigh-Diagramm einander gegenüber. Die Einzelwerte finden sich in Tabelle 5.

Für die ungekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm weist der EN-GJS-400-18U-LT mit $M_{d15mm} = 0,51$ und $M_{d6mm} = 0,55$ im Vergleich zum EN-GJS-450-18 ($M_{d15mm} = 0,44$; $M_{d6mm} = 0,38$) und EN-GJS-700-2 ($M_{d15mm} = 0,50$; $M_{d6mm} = 0,44$) die höchste Mittelspannungsempfindlichkeit M auf. Für den EN-GJS-400-18U-LT und den EN-GJS-450-18 entsprechen die an ungekerbten Schwingproben ermittelten Mittelspannungsempfindlichkeiten der Literatur

/Kai12, Shi11, Bl14a/. Eine Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeit von der Zugfestigkeit, wie durch Untersuchungen in /Sch67, Hue81/ festgestellt, lässt sich jedoch nicht zeigen.

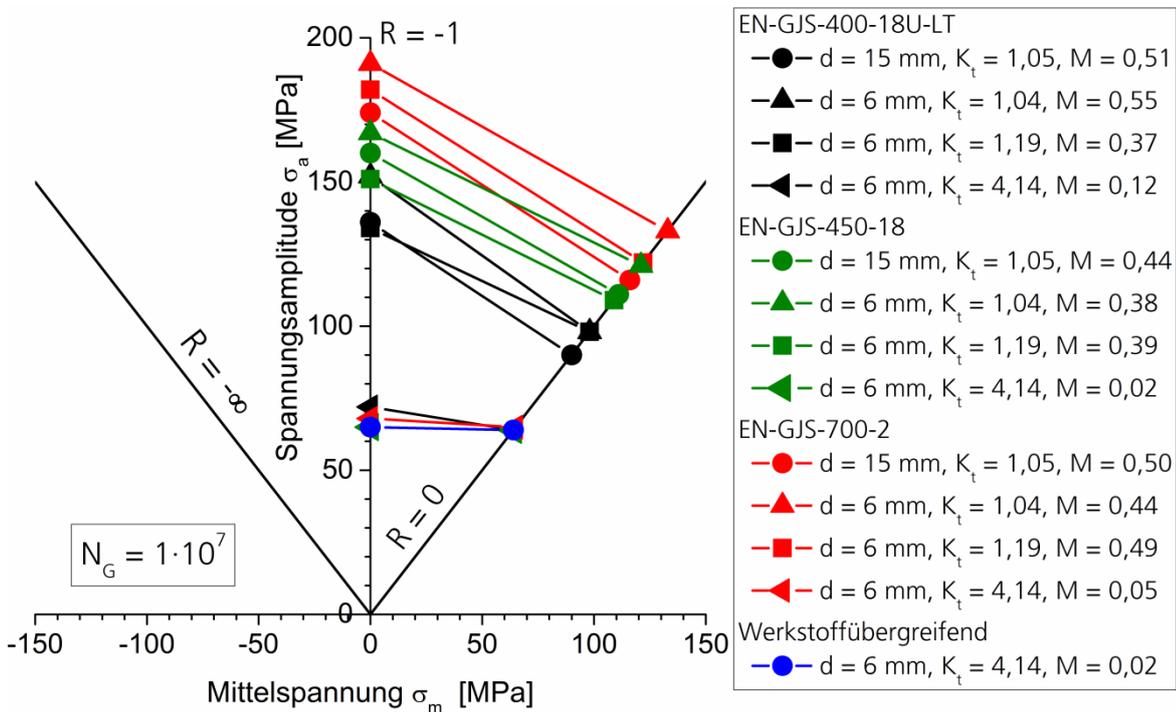


Bild 55 Haigh-Diagramm für die untersuchten Werkstoffe

Die Mittelspannungsempfindlichkeit scheint sich für die mild und scharf gekerbten Schwingproben zu ändern. Für den EN-GJS-400-18U-LT verringert sich die Mittelspannungsempfindlichkeit zunächst auf $M_{d6mm1,19} = 0,37$ für die mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) und bei den scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) weiter auf $M_{d6mm4,14} = 0,12$. Eine vergleichbare Entwicklung zeigt der EN-GJS-450-18. Hier bleibt die Mittelspannungsempfindlichkeit mit $M_{d6mm1,19} = 0,39$ für die mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) quasi konstant, fällt jedoch für die scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) auf fast 0 ab ($M_{d6mm4,14} = 0,02$). Für den EN-GJS-700-2 steigt die Mittelspannungsempfindlichkeit für die mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) mäßig an ($M_{d6mm1,19} = 0,49$), um dann ebenfalls auf etwa 0 für die scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) abzufallen. Es muss jedoch zumindest bei den scharf gekerbten Schwingproben von einer *scheinbaren* Mittelspannungsempfindlichkeit gesprochen werden bzw. davon, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit *scheinbar* verschwindet. Der Grund liegt in hohen elastisch-plastischen Beanspruchungen im Kerbgrund der scharf gekerbten Schwingproben, die eine Mittelspannungsrelaxation auf Grund von Spannungsumlagerungen (Makrostützwirkung) zur Folge haben. Dies erläutert Bild 56 exemplarisch für den EN-GJS-450-18 für die Zugschwellbelastung, $R_G = 0$, für Schwingproben mit $K_t = 4,14$. Ausgang ist die Erstbelastungskurve aus dem dehnungsgeregelten Versuch. Zur Abschätzung der örtlichen Dehnung wird ein Ansatz von /Son82, Son93/ verwendet, der die örtliche Dehnung $\epsilon_{\text{örtlich}}$ als Mittelwert zwischen der linear-elastischen Dehnung ϵ_{lin} bei der örtlichen Maximalspannung $\sigma_{a,\delta}$ und der örtlichen Dehnung beim Schnitt der Neuber-Hyperbel ϵ_{Neuber} /Neu68, Neu85/ mit der Erstbelastungskurve verwendet, da die Neuber-Regel die örtliche Dehnung überschätzt, Bild 56.

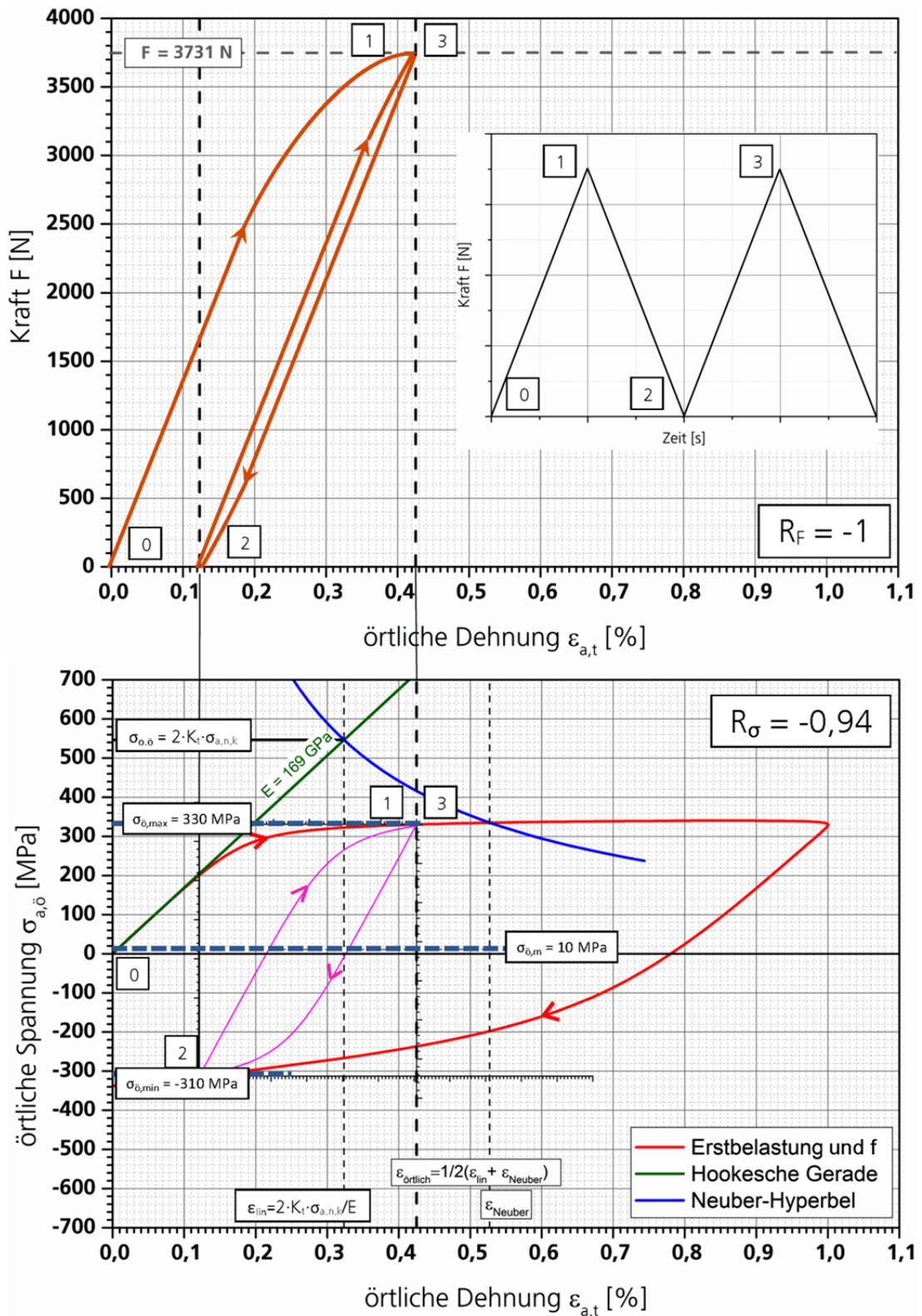
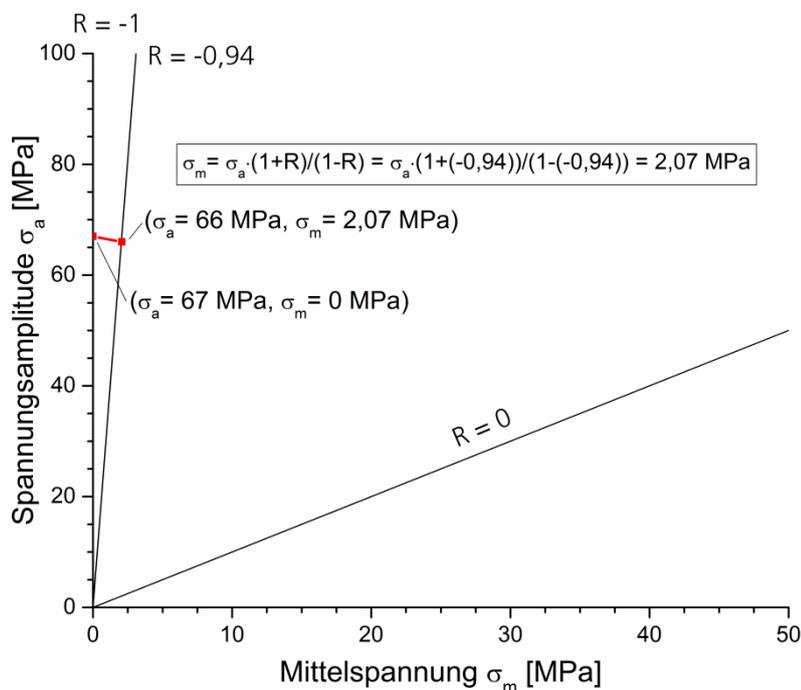


Bild 56 Örtlicher Dehnungsverlauf am Beispiel der scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) des EN-GJS-450-18 mit Kompensation der Verformungsüberschätzung nach /Son82, Son93/

Während die Schwingprobe zwischen Punkt 0 und Punkt 1 bis auf die Maximallast F_{max} belastet wird, erreicht die Spannungs-Dehnungs-Kurve auf der Erstbelastungskurve die örtliche Dehnung nach

/Son82, Son93/. Bei der anschließenden Entlastung zwischen Punkt 1 und Punkt 2 folgt die Spannung dem Masing-Verhalten /Mas26/. Dass das Masing-Verhalten für die untersuchten Werkstoffe gültig ist, zeigt eine Überprüfung der Last-Dehnungs-Aufzeichnungen der dehnungsgeregelten Versuche. Diese zeigen eine kinematische Verfestigung des Werkstoffes. Im Unterpunkt 2 beginnt die Belastung der Schwingprobe erneut. Das zugehörige Spannungs-Dehnungs-Verhalten folgt erneut dem Masing-Verhalten bis zum Punkt 3. Somit stellt sich in den Umkehrpunkten der Hysterese (Punkt 1, 2 und 3) eine minimale, örtliche Spannung von $\sigma_{\bar{o},\min} = -310$ MPa und eine maximale, örtliche Spannung von $\sigma_{\bar{o},\max} = +330$ MPa ein, die lediglich eine örtliche Mittelspannung von $\sigma_{\bar{o},m} = 10$ MPa ergibt. Dies entspricht einem Spannungsverhältnis von $R_{\sigma} = -0,94$. Im Haigh-Diagramm, Bild 57, ergeben sich damit zwei Punkte für das Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = -1$ ($\sigma_a = 67$ MPa, $\sigma_m = 0$ MPa) sowie für das Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = -0,94$ ($\sigma_a = 66$ MPa, $\sigma_m = 2,07$ MPa). Aus Gleichung (36) lässt sich dann eine Mittelspannungsempfindlichkeit von $M = 0,48$ errechnen, die in guter Näherung mit den Ergebnissen für die un- und mild gekerbten Schwingproben in Tabelle 5 übereinstimmt.



**Bild 57 Mittelspannungsempfindlichkeit der scharf gekerbten Proben
($K_t = 4,14$) für den EN-GJS-450-18**

$$M = -\frac{\sigma_{a,n}(R = -0,94) - \sigma_{a,n}(R = -1)}{\sigma_m(R = -0,94)} = -\frac{66 \text{ MPa} - 67 \text{ MPa}}{2,07 \text{ MPa}} = 0,48 \quad (36)$$

Liegen keine Mittelspannungsempfindlichkeiten aus Versuchen vor, werden diese etwa nach /Hue81, FKM12, GL10, Ber13/ synthetisch für die Bauteilbemessung ermittelt. Unter Verwendung der quasistatischen Werkstoffkennwerte (Tabelle 4) ergeben sich so, ohne die Schwingprobengröße oder die Kerbschärfe zu berücksichtigen, Mittelspannungsempfindlichkeiten $M_{\text{GJS-400}} = 0,20$ für den EN-GJS-400-18U-LT, $M_{\text{GJS-450}} = 0,23$ für den EN-GJS-450-18 und $M_{\text{GJS-700}} = 0,30$ für den EN-GJS-700-2. Wird bei der Ermittlung der Wöhlerlinie für die Zugschwellbelastung von experimentellen oder synthetischen Wöhlerlinien für die Wechselbelastung ausgegangen, liegt das Ergebnis bei Verwendung der

synthetischen Mittelspannungsempfindlichkeiten somit deutlich auf der unsicheren Seite. Die Zugwechselfestigkeit wird demnach überschätzt. Die in /FKM12, GL10/ verwendete Gleichung zur Abschätzung der Mittelspannungsempfindlichkeit basiert auf Untersuchungen von /Hue81/. Diese sind aus deutlich kleineren Halbzeugen entnommen und außerdem nach den Qualitätskriterien für Fahrwerksteile gegossen. Für den Dickwandguss ist jedoch mit längeren Erstarrungszeiten und geänderten Gefügeausbildungen zu rechnen. Zudem wird in /Hue81/ kein mischkristallverfestigter, ferritischer Kugelgraphitguss untersucht. Für einen korrekten Einsatz entsprechender Abschätzungsformeln für die Mittelspannungsempfindlichkeit sollten diese auf den aktuellen Stand der Werkstoffe und der Werkstoffentwicklung angepasst werden und auch dickwandige Gefügestände repräsentieren.

Ein Weg, die Mittelspannungsempfindlichkeit besser abzuschätzen, basiert auf /Klu01/. Diesem Ansatz folgend sind in Bild 58 die experimentell ermittelten Ergebnisse dem Untersuchungsergebnis von /Klu01/ in Form der Ausgleichsgeraden für Gusseisenwerkstoffe mit Kugelgraphit gegenübergestellt. Dabei wird die Abhängigkeit der Nennspannungsamplitude für die Zugschwellbelastung, $R_0 = 0$, von derjenigen für Wechselbelastung, $R_0 = -1$, für die ungekerbten sowie mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) überschätzt; für die scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) jedoch leicht unterschätzt.

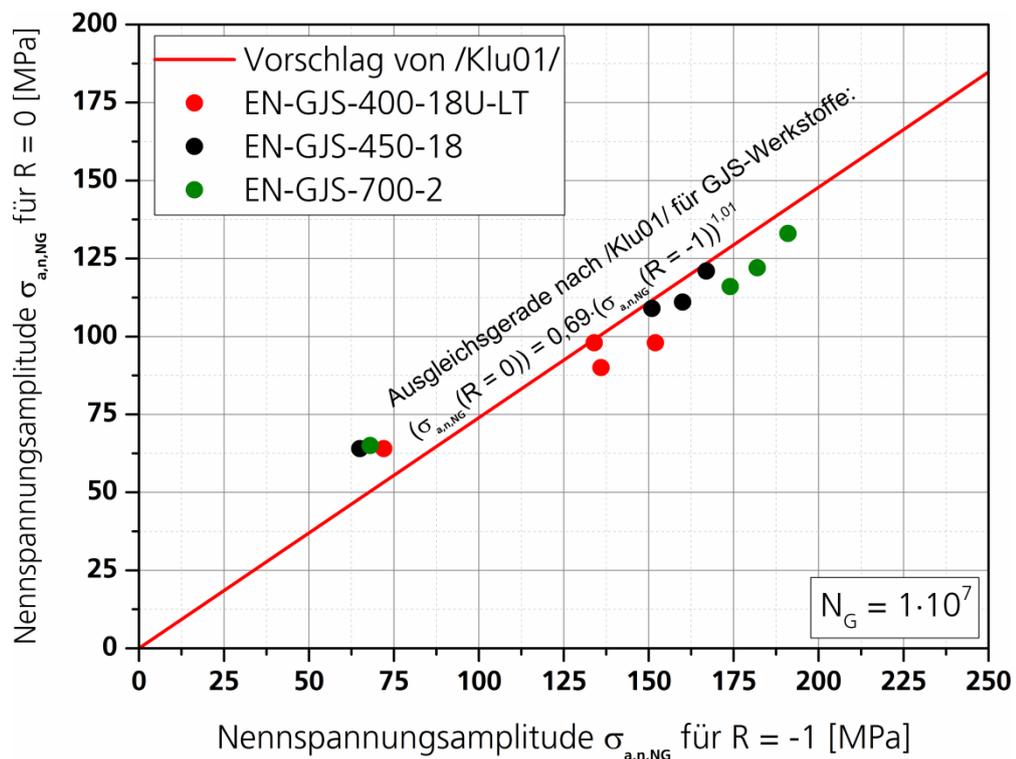


Bild 58 Vergleich der Mittelspannungsempfindlichkeit mit Ergebnissen von /Klu01/

Bei allen Darstellungen des Mittelspannungseinflusses ist zu berücksichtigen, dass diese in der Regel nur für eine definierte Schwingspielzahl Gültigkeit besitzen und sich nicht für jede beliebige Lebensdauer verallgemeinern lassen. Dies ist dann der Fall, wenn die Lebensdauer am Abknickpunkt und/oder die Neigung der Zeitschwingfestigkeitsgeraden der Wöhlerlinien für Wechsel- und Zugschwellbelastung differieren. Dies birgt Herausforderungen für die Ableitung von Wöhlerlinien unter Zugschwellbelastung aus Wöhlerlinienparametern für Wechselbelastung sowie der Lebensdauerabschätzung.

Ausgehend vom Vorschlag von /Klu01/ zur Ableitung der Wöhlerlinienneigung der Zeitschwingfestigkeitsgeraden für Zugschwellbelastung $k_{R=0}$ aus der Neigung unter Wechselbelastung $k_{R=-1}$, stellt Bild 59 die experimentell ermittelten Neigungen $k_{R=0}$ und $k_{R=-1}$ der Ausgleichsgeraden nach Gleichung (4) gegenüber. Es zeigt sich, dass die experimentell ermittelten Neigungen $k_{R=0}$ und $k_{R=-1}$ für die untersuchten Werkstoffe und Kerbgeometrien deutlich vom vorgeschlagenen Zusammenhang gemäß Gleichung (4) abweichen, Bild 59. Vielmehr lassen die experimentell ermittelten Neigungen der Wöhlerlinien keine eindeutige Abhängigkeit vom Werkstoff, der Schwingfestigkeit oder der Kerbformzahl erkennen, was eine synthetische Bestimmung der Neigungen $k_{R=0}$ und $k_{R=-1}$ verhindert.

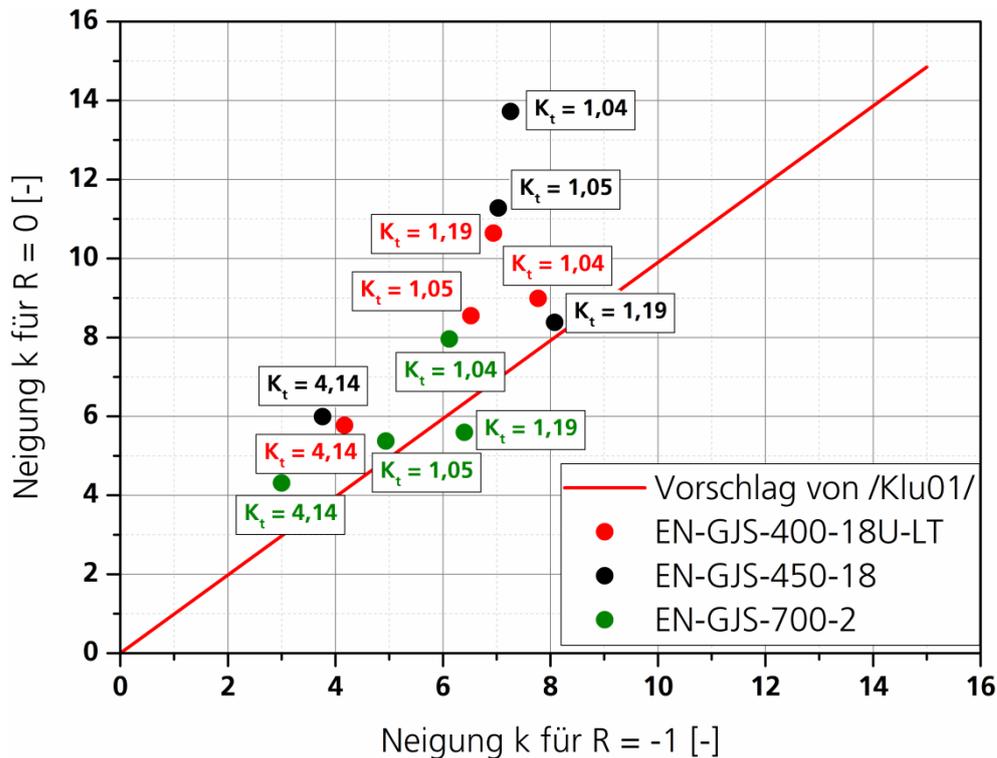


Bild 59 Vergleich der Neigungen $k_{R=-1}$ und $k_{R=0}$ mit /Klu01/

Für eine Bewertung der drei untersuchten Werkstoffe hinsichtlich ihrer Mittelspannungsempfindlichkeit bedeutet dies, dass zum einen keine Ableitung der Wöhlerlinie für $R_\sigma = 0$ aus den Parametern der Wöhlerlinie für $R_\sigma = -1$ möglich ist und zum anderen, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit lebensdauerabhängig ist. Bild 60 zeigt als Beispiel die Änderung der Mittelspannungsempfindlichkeit im Schwingzahlbereich $5 \cdot 10^4 \leq N \leq 1 \cdot 10^7$ für den EN-GJS-400-18U-LT. In diesem Lebensdauerbereich schwankt die Mittelspannungsempfindlichkeit zwischen 0,38 und 0,78. Wird die Mittelspannungsempfindlichkeit für den Abknickpunkt ermittelt, kann eine Umrechnung der kompletten Wöhlerlinie für Zugschwellbelastung aus der Wöhlerlinie für Wechselbelastung die tatsächlich ertragbare Schwingfestigkeit im Bereich der Zeitschwingfestigkeit deutlich überschätzen. Dazu zeigt Bild 61 beispielhaft die Spannungswöhlerlinien der Versuchsreihen SR11 und SR12 (Anhang, Bild B 36) des EN-GJS-450-18. Wird die Wöhlerlinie für die Zugschwellfestigkeit aus derjenigen für Wechselfestigkeit ermittelt, liegt bei $5 \cdot 10^4$ Schwingspielen eine Überschätzung der tatsächlich ertragbaren Schwingfestigkeit bei Zugschwellbelastung von 32 % vor.

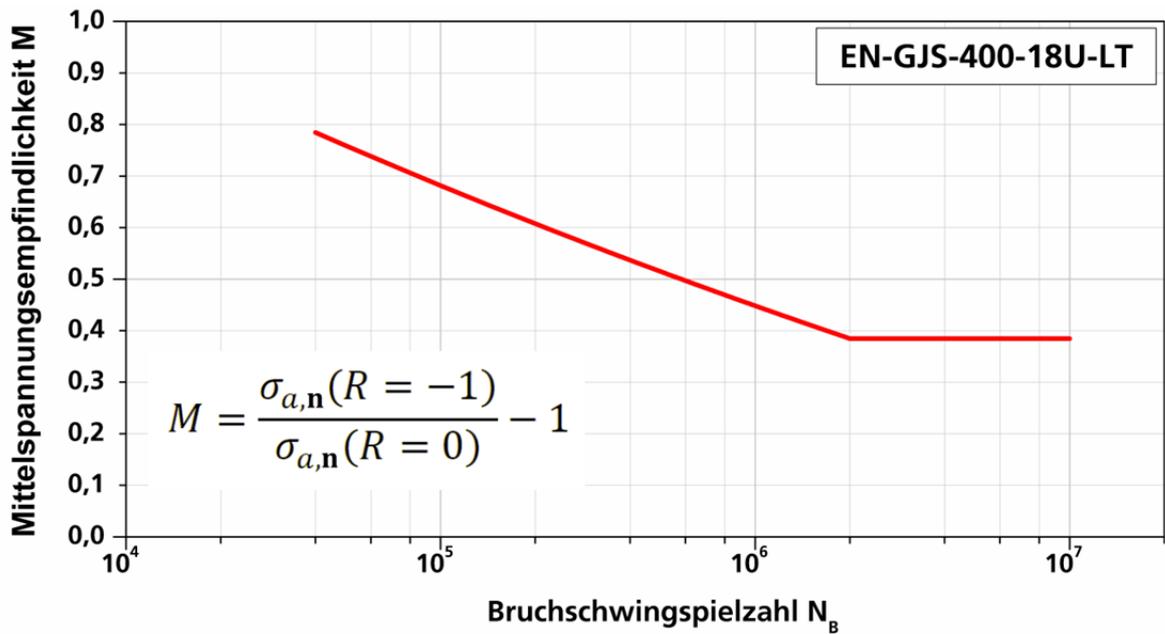


Bild 60 Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Lebensdauer

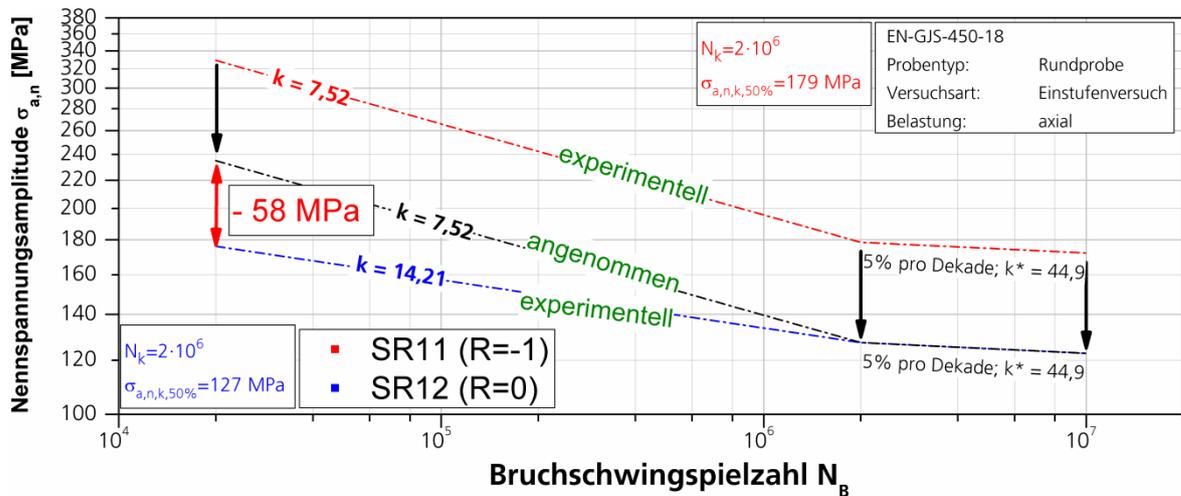


Bild 61 Einfluss einer als konstant angenommenen Mittelspannungsempfindlichkeit auf die Schwingfestigkeit

Die vorgestellten Ergebnisse zur Mittelspannungsempfindlichkeit für dickwandiges Gusseisen mit Kugelgraphit zeigen keinen Zusammenhang zur Zugfestigkeit R_m des Werkstoffes wie ihn /Sch67, Hue81/ angeben und Regelwerke wie /FKM12, Gud99, GL10, Ber13/ nutzen. Weiterhin zeigt sich, dass die Mittelspannungsempfindlichkeit nicht unabhängig von der Schwingprobengröße bzw. vom höchstbeanspruchten Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$ ist. Allerdings findet sich keine eindeutige Tendenz. Besonders hervorzuheben ist, dass für scharf gekerbte Geometrien ($K_t \geq 4,14$) für den EN-GJS-400-18U-LT, den EN-GJS-450-18 sowie den EN-GJS-700-2 nicht nur die ertragbare Spannungsamplitude innerhalb der Werkstoffe, sondern auch für die Zugschwell- und die Wechselbelastung auf Grund der Mittelspannungsrelaxation vergleichbare Werte annehmen.

5.2 Zerstörungsfreie und zerstörende Prüfung von Schwingproben mit Lunkern

5.2.1 Radiographische Untersuchungen

Ein Beispiel für zwei durchstrahlte Rundproben zeigt Bild 62 in Form des weniger empfindlichen der beiden Filme. Der Einspannbereich ist nur unwesentlich belichtet und daher beinahe ohne Schwärzung.

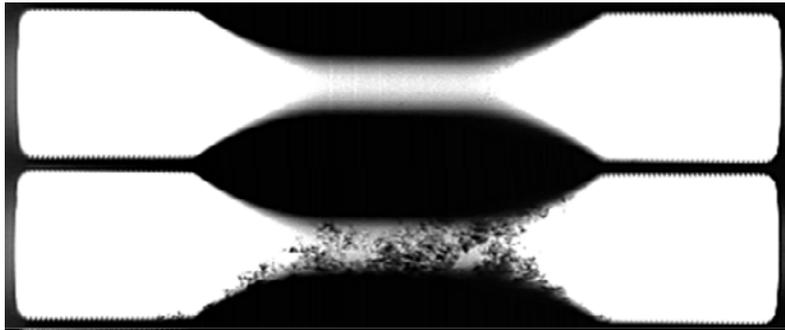


Bild 62 Beispiel für zwei durchstrahlte Rundproben; oben: ohne Lunker; unten: Lunkerklasse Cc-5 /Bu13a/

Bei der Einteilung der Schwingproben in Lunkerklassen findet im Wesentlichen nur das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen, also der verjüngte Bereich, Berücksichtigung. Die Einteilung erfolgt auf visueller Basis im Abgleich zu den Fehlervergleichsbildern der ASTM-Norm E-446 /AST10/ und ist damit nicht vollständig reproduzierbar bzw. abhängig vom Prüfer.

Für die Schwingproben, die einen Lunker aufweisen, ergibt sich gemäß der /AST10/ für die ungekerbten Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm die in Tabelle 7 zusammengefasste Verteilung auf die einzelnen Lunkerklassen /Bu12e, Bu12f, Bu13a, Bu13b, Bu13c, Ha13a, Ha13b, Han99/. Für eine Zusammenfassung der Befunde aus den beiden um 90° gedreht aufgenommenen Bildern wird der Schwingprobe die höhere der beiden ermittelten Lunkerklassen zugeordnet.

Tabelle 7 Ergebnisse der Lunkerklassifizierung nach Lunkerklasse, Werkstoff und Schwingproben

Werkstoff	Schwingproben- durchmesser d [mm]	Cc-1	Cc-2	Cc-3	Cc-4	Cc-5
		Schwingprobenanzahl je Lunkerklasse				
EN-GJS-400-18U-LT	15	7	1	4	1	3
	6	6	0	3	0	0
EN-GJS-450-18	15	16	10	4	9	7
	6	12	3	1	1	1
EN-GJS-700-2	15	6	5	10	11	8
	6	5	7	6	4	1

Mit der Klassifizierung der Lunker nach /AST10/ steht damit ein erstes Mittel bereit, die Schwingproben mit Lunker für die Schwingfestigkeitsversuche einzuteilen /Kau98/.

Für die weiteren Untersuchungen der Abhängigkeit von Schwingfestigkeit und zerstörungsfreier Prüfung stehen neben der Lunkerklasse auch die Röntgenbilder selbst zur Verfügung. Diese werden mit einem hochauflösenden Scanner digitalisiert und stehen für digitale Auswertungen als Datensatz mit 16-bit, also 65536 Grauwerten, und einer Auflösung von 50 μm zur Verfügung.

5.2.2 Röntgen-computertomographische Untersuchungen

Durch die röntgen-computertomographischen Untersuchungen an den Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 15 \text{ mm}$ stehen neben dem reinen Summenbild der radiographischen Aufnahmen genauere Informationen hinsichtlich der Verteilung und der Geometrie der Lunker in jeder Schwingprobe zur Verfügung /Lun14/. Da die mittels Röntgen-Computertomographie untersuchten Prüfvolumina für eine Weiterverarbeitung in Form von Einzelschichten vorliegen, bietet sich zusätzlich die Möglichkeit, die in der Bruchposition vorliegenden Lunkerbereiche digital zu analysieren. Jede Einzelschicht repräsentiert dabei eine Volumenschicht, die einer realen Dicke in Höhe der Auflösung von etwa 30 μm entspricht /Lun14/. Ein Beispiel für ein mittels Röntgen-Computertomographie untersuchtes Prüfvolumen der Schwingproben sowie einer Einzelschicht zeigt Bild 63.

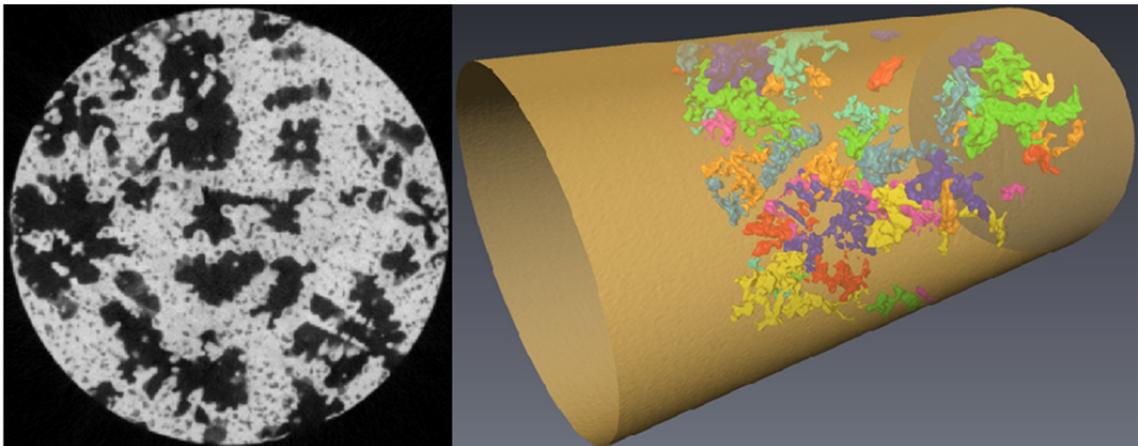


Bild 63 Beispiel für ein Ergebnis der CT-Untersuchungen (links: Querschnitt durch die Schwingprobe; rechts: komplettes Prüfvolumen einer Schwingprobe mit Lunkern)

5.2.3 Ergebnisse der Messung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben

Um von der rein visuellen Bewertung der Lunkerklassen Abstand nehmen zu können, werden durch systematische Dehnungsmessungen die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Schwingproben genauer im Bereich des Prüfvolumens der Schwingproben bestimmt. Darum finden systematische Messungen der Dehnung bei vorgegebener Belastung an den Schwingproben sowohl an den ungeschnittenen als auch an den Schwingproben mit Lunkern der Prüfdurchmesser $d = 6$ und 15 mm statt. Jede Schwingprobe wird in Abhängigkeit der Lunkerklasse und Schwingprobengröße über eine Rampe mit Maximalkräften von 1 bis 13 kN je Messposition belastet und anschließend entlastet. Der montierte Dehnungsaufnehmer zeichnet, sowohl bei Belastung als auch bei Entlastung die Dehnung im Prüfvolumen auf.

lumen der Schwingproben auf. Die aufgebrachten Maximallasten werden den Schwingproben in Abhängigkeit ihrer Lunkerklasse frei zugeordnet. Anschließend ermittelt eine Auswertung der Messungen neben den Spannungs-Dehnungs-Verläufen den fiktiven Elastizitätsmodul E_f für jede Messposition. Die Bestimmung des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f bedient sich nicht wie üblich der Steigung im linear-elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve, wie es für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls üblicherweise der Fall ist. Vielmehr wird auf einen Ansatz zurückgegriffen, der die Ermittlung eines hyperbolischen Elastizitätsmoduls vorschlägt /Fan95/. Die Methode ermittelt einen Elastizitätsmodul aus einem Diagramm, in dem die Ordinate nicht die Spannung, sondern das Verhältnis aus Dehnung zu Spannung anzeigt. Die Spannung ist als Nennspannung zu verstehen und ergibt sich für alle Schwingproben mit und ohne Lunker als Verhältnis der Prüfkraft zur Nennquerschnittsfläche. Die Querschnittsreduktion durch die Lunker findet keine Berücksichtigung. Als Abszisse dient weiterhin die Dehnung. Ein Beispiel für diese Auftragung gibt Bild 64.

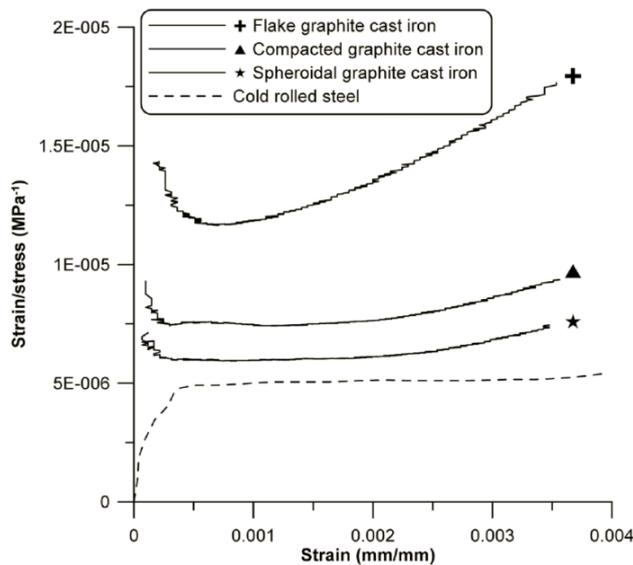


Bild 64 Ermittlung des hyperbolischen Elastizitätsmoduls nach /Sjo07/

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass diese Methode eventuelle Nichtlinearitäten, die eine zweifelsfreie Ermittlung eines Elastizitätsmoduls erschweren, beseitigt. Ebenso umgeht die Methode den Einfluss von Spannungskonzentrationen am Graphit, die bei einer Belastung Verformungen im Mikrobereich zur Folge haben, ohne, dass diese makroskopisch ermittelbar wären /Fan95/. Mit Hilfe des hyperbolischen Ansatzes zeigt sich im Dehnung/Spannungs-Dehnungs-Diagramm ein Plateau, das den reziproken Wert des Elastizitätsmoduls ausweist /Fan95/. Bild 65 zeigt beispielhaft die Spannungs-Dehnungs-Verläufe von zwei Schwingproben des EN-GJS-450-18. Die Röntgenfilmbetrachtung zeigt für Schwingprobe S5-I-G-05 einen ungänzenfreien Werkstoffzustand und für Schwingprobe S5-I-G-20 einen Lunker der Lunkerklasse Cc-5. Während die ungänzenfreie Schwingprobe auf Grund messtechnischer Genauigkeit zwischen Werten für den Elastizitätsmodul $E = 162$ und 166 GPa schwankt, lässt sich für die Schwingprobe S5-I-G-20 je nach Messposition ein fiktiver Elastizitätsmodul E_f zwischen $E_f = 118$ und 139 GPa ermitteln. Die unterschiedlichen Werte je Messposition für den fiktiven Elastizitätsmodul E_f ergeben sich durch die Inhomogenität der Lunker und der damit verbundenen Biegung der Schwingproben bei axialer Belastung. Für die ungänzenfreie Schwingprobe ist der fiktive Elastizitätsmodul E_f mit dem Elastizitätsmodul E gleichzusetzen.

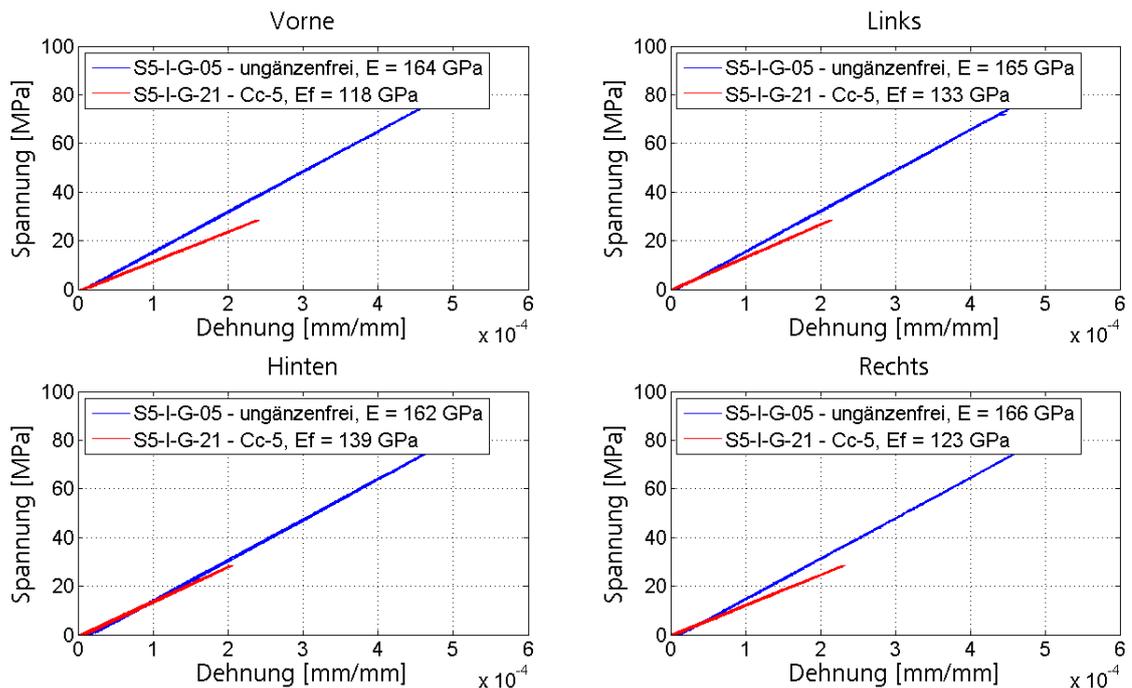


Bild 65 Auswertung des fiktiven Elastizitätsmoduls für die vier Messpositionen für eine ungespannte Schwingprobe und eine Schwingprobe der Lunckerklasse Cc-5

Alle Ergebnisse dieser Messungen sind im **Anhang T** in **Tabelle T 73** für den EN-GJS-400-18U-LT, in **Tabelle T 74** für den EN-GJS-450-18 und in **Tabelle T 75** für den EN-GJS-700-2 nach Messposition untergliedert sowie in Form des Mittelwertes aufgelistet. Ausgehend von der Auswertung an den ungespannten Schwingproben ergibt sich für den EN-GJS-400-18U-LT ein gemittelter Elastizitätsmodul von $E = 168$ GPa sowie für den EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 von $E = 167$ GPa und $E = 164$ GPa. Eine Zusammenfassung der fiktiven Elastizitätsmoduli der Schwingproben für die drei untersuchten Werkstoffe zeigt Bild 66. Es zeigt sich, dass mit einer aus der Durchstrahlungsprüfung ermittelten höheren Lunckerklasse der fiktive Elastizitätsmodul geringer wird. Unabhängig von der Lunckerklasse bildet jeder fiktive Elastizitätsmodul für sich betrachtet einen Kennwert, der die jeweilige Schwingprobe weiter charakterisiert und darüber hinaus eindeutig messbar ist.

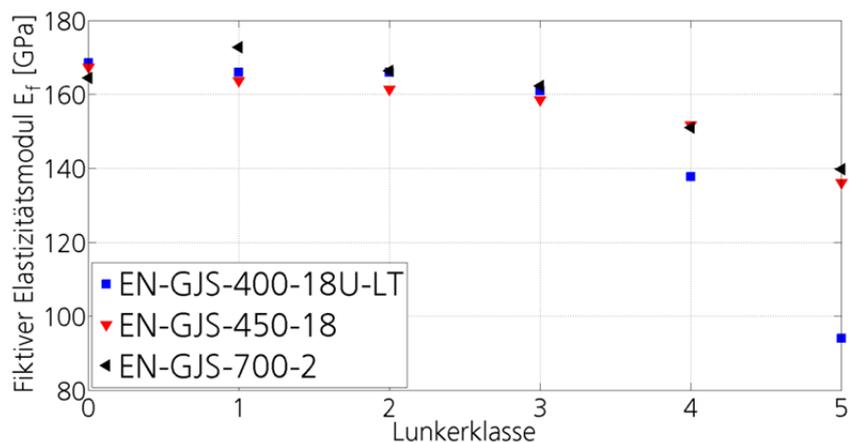


Bild 66 Gemittelte fiktive Elastizitätsmoduli je Werkstoff und Lunckerklasse

5.2.4 Ergebnisse der zyklischen Prüfung der Lunkerproben

Für die Auswertung der Versuche an den Schwingproben mit Lunkern wird schrittweise vorgegangen. So werden die einzelnen Schwingfestigkeitsergebnisse in einem ersten Schritt unter Vernachlässigung der Querschnittreduktion durch die Lunker je Lunkerklasse ausgewertet, wie dies bereits in /Kau98/ am GGG-40 durchgeführt wird. Im zweiten Schritt erfolgt eine Zusammenfassung der Einzelergebnisse einer Lunkerklasse über alle drei Werkstoffe hinweg. Durch die erneute Auswertung der Röntgenbilder und die anschließende Einbeziehung der Ergebnisse der Röntgen-Computertomographie wird der Aussagegehalt der Schwingfestigkeitsversuche an den Schwingproben mit Lunkern weiter gesteigert. Den Ablauf fasst Bild 67 zusammen.

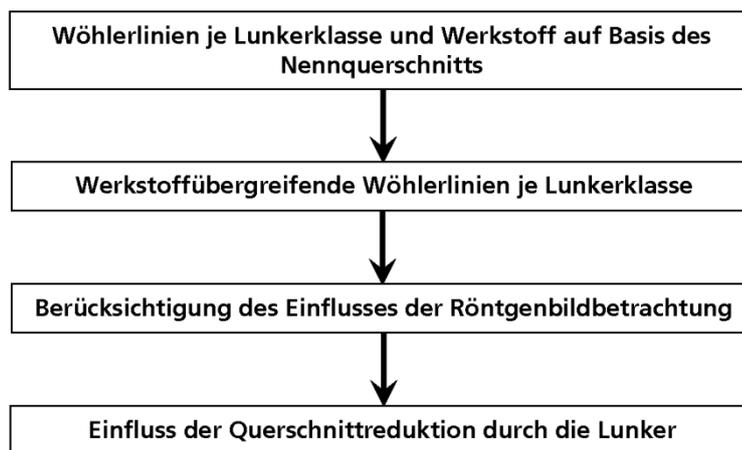


Bild 67 Ablauf der Auswertung der Schwingproben mit Lunkern

5.2.4.1 Auswertung unter Berücksichtigung des Nennquerschnitts

Zunächst wird davon ausgegangen, dass ein homogener Prüfquerschnitt ohne Lunker vorliegt und somit, wie auch bei den Schwingproben ohne Lunker, der komplette Nennquerschnitt A_{Nenn} für die Berechnung der Belastungsamplitude unter Wechselbelastung, $R_\sigma = -1$, herangezogen wird. Im nächsten Schritt wird jede Schwingprobe hinsichtlich ihrer tatsächlichen Bruchposition untersucht, da auf Grund der Struktur der Lunker einige Schwingproben im Bereich des Übergangsradius zum Einspanngewinde hin gebrochen sind. Um der Auswertungsmethodik nach Nennspannungen zunächst zu folgen, wird für die Ermittlung der Wöhlerlinien je Lunkerklasse bei jeder im Übergangsradius gebrochenen Schwingprobe der Prüfdurchmesser messtechnisch erfasst und über den neuen, tatsächlichen Bruchquerschnitt A_{Bruch} auf eine korrigierte, tatsächliche Nennspannung $\sigma_{a,\text{tat}}$ geschlossen. Auch hier bleibt die Querschnittsreduktion durch die vorhandenen Lunker unberücksichtigt.

Aus den einzelnen Schwingfestigkeitsergebnissen auf Basis des Nennquerschnitts lässt sich zunächst getrennt nach Werkstoff eine Wöhlerlinie je Lunkerklasse ermitteln. Deren Verlauf übernimmt sowohl die Neigung k im Bereich der Zeitschwingfestigkeit als auch den Abknickpunkt N_k aus den Wöhlerlinien für den Werkstoffzustand ohne Ungängen. Dies hat den Vorteil ohne größeren Aufwand Wöhlerlinien für diejenigen Lunkerklassen ermitteln zu können, denen teilweise nur wenige Einzelversuchsergebnisse zu Grunde liegen. Für die Neigung k^* nach dem Abknickpunkt wird wiederum ein Abfall von 5 % pro Dekade ($k^* = 44,9$) nach /So05b, Son07/ unterstellt. Bild 68 zeigt beispielhaft die so ermittelte Wöhlerlinie für die Schwingproben mit Lunkerklasse Cc-4 für den EN-GJS-450-18. In der Darstellung

sind bereits die im Übergangsradius gebrochenen Schwingproben mit dem korrigierten Prüfquerschnitt berücksichtigt.

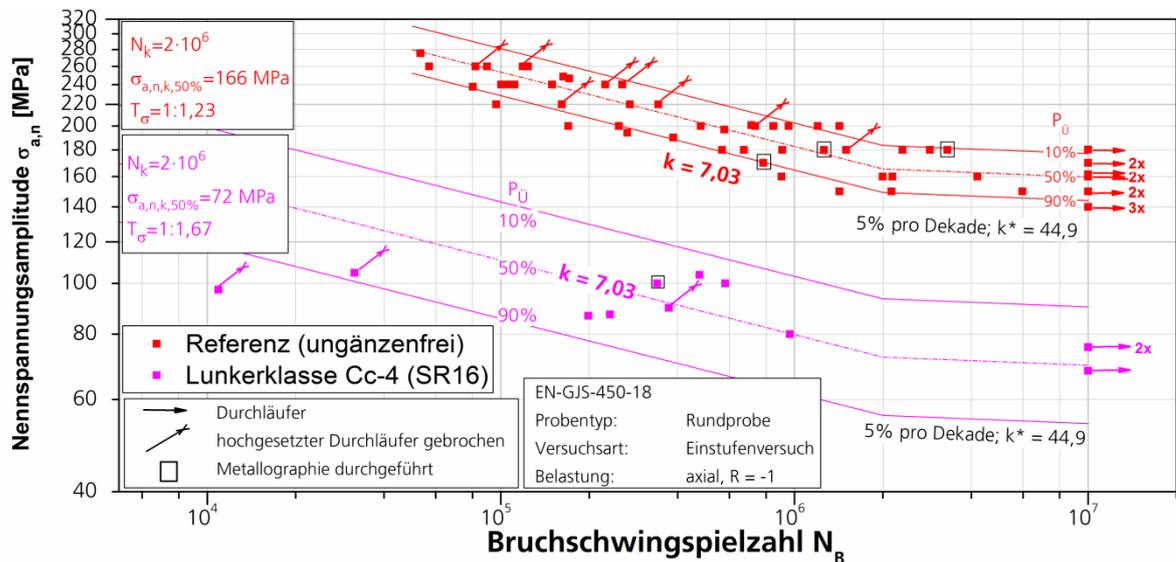


Bild 68 Wöhlerlinie für die Schwingproben der Lunkerklasse Cc-4 und den ungänzenfreien Werkstoffzustand (EN-GJS-450-18)

Als Referenz für jede Wöhlerlinie mit Lunkern finden die Wöhlerlinien für Wechselbelastung, $R_\sigma = -1$, für die Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm gemäß den Kennwerten in Tabelle 5 Verwendung. Die einzelnen Versuchsergebnisse sind in tabellarischer Form mit dem Verweis auf eine eventuelle Bruchposition im Übergangsradius sowie der Lunkerklasse jeder Schwingprobe im **Anhang T** zusammengestellt. In **Tabelle T 3**, **Tabelle T 24** und **Tabelle T 47** sind die Wöhlerlinienparameter für die ermittelten Wöhlerlinien zusammengefasst. Im **Anhang B** finden sich nach Werkstoff getrennt die einzelnen Wöhlerdiagramme für jede Lunkerklasse. Die Lebensdauern der Lunkerproben zeigen eine hohe Streuung. Die Streumaße aller ermittelten Wöhlerlinien für Schwingproben mit Lunkern liegen im Bereich von $1:1,23 \leq T_\sigma \leq 1:2,68$ (**Anhang T**, **Tabelle T 3**, **Tabelle T 24** und **Tabelle T 47**) und gehen dabei teilweise weit über das maximale Streumaß von $T_\sigma = 1:1,30$ für den Werkstoffzustand ohne Ungänzen hinaus. Teilweise lassen sich auf Grund zu geringer Anzahl der Schwingproben keine Streubänder ableiten. Dies betrifft z.B. Wöhlerlinien für den EN-GJS-400-18U-LT (**Anhang T**, **Tabelle T 3**). Für diese wird nur die Wöhlerlinie mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50$ % angegeben.

5.2.4.2 Ermittlung werkstoffübergreifender Wöhlerlinien

Neben der schwächenden Wirkung der Lunker durch die Verringerung des Prüfquerschnitts bildet auch deren Kerbwirkung eine wichtige Einflussgröße. In Untersuchungen an Lunkern in Stahlguss werden Kerbformzahlen bis $K_t = 15$ festgestellt [Mu94b]. Auf Grund der Struktur des Lunkers ist dementsprechend davon auszugehen, dass lokal hohe Kerbwirkungen und Beanspruchungen auch bei den in dieser Arbeit vorliegenden Lunkern auftreten. Da die Untersuchungen an den scharf gekerbten Schwingproben mit $K_t = 4,14$ der drei Werkstoffe zudem zeigen, dass deren Schwingfestigkeit auf einem Niveau zusammenfällt, dürfen die Einzelversuche einer Lunkerklasse werkstoffübergreifend

gemeinsam ausgewertet werden. Die unterschiedlichen Lunkerlassen bleiben dennoch erhalten, da diese die Anteile der Lunker im Prüfvolumen und damit statistische Effekte (Größeneinfluss) berücksichtigen. Die Ergebnisse der gemeinsamen, werkstoffübergreifenden Auswertung der Wöhlerversuchsergebnisse sind dem **Anhang B** in **Bild B 73** bis **Bild B 77** sowie in Form der Wöhlerlinienparameter der Tabelle 8 zu entnehmen. Die werkstoffübergreifend ermittelte Wöhlerlinie für die Lunkerklasse Cc-3 zeigt Bild 69. Nach der Zusammenführung der Einzelergebnisse ergeben sich Streumaße im Bereich von $1:1,54 \leq T_\sigma \leq 1:2,24$, Tabelle 8.

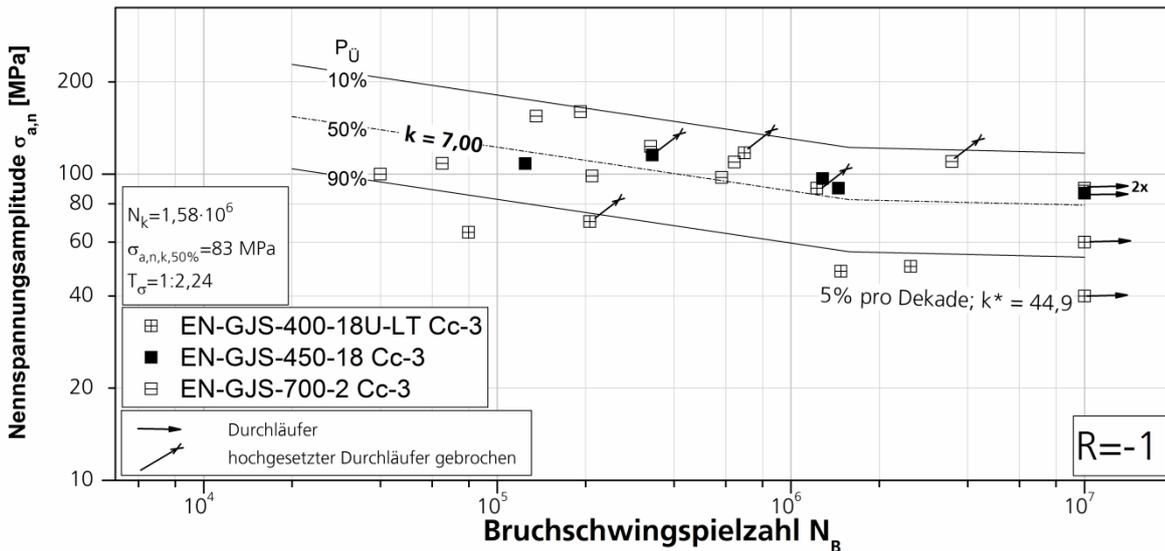


Bild 69 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunkerklasse Cc-3

5.2.4.3 Einfluss der Röntgenfilmbewertung

Aktuell findet die Einteilung der Lunkerlassen visuell unter Berücksichtigung der flächenmäßigen Ausdehnung des Lunkers auf die zu prüfende Gesamfläche über Fehlervergleichsbilder nach beispielsweise /VDG01, AST10, AST84/ statt. Eine Berücksichtigung der Lage des Lunkers im Hinblick auf die Hauptbelastungsrichtung oder die neutrale Faser findet dabei nicht statt. Dabei spielt für die Berücksichtigung der Wirkung von Ungängen auf die Schwingfestigkeit etwa die den Prüfquerschnitt verringernde Wirkung eine wichtige Rolle. Hierzu zeigt Bild 70 beispielhaft das digitalisierte Röntgenbild zweier Rundproben „1“ und „2“, die nach /AST10/ mit einer Lunkerklasse Cc-2 und Cc-5 belegt sind, wenn der komplette Prüfbereich der Schwingproben (roter Kasten) Berücksichtigung findet. Der vom Lunker der Schwingprobe „1“ tatsächlich geschwächte Bereich (grüner Kasten) besitzt zwar eine kleinere Ausdehnung, zieht sich jedoch über die gesamte Schwingprobenbreite und schwächt den Querschnitt damit maximal. Aus dem Blickwinkel der Schwingfestigkeit ist also Schwingprobe „1“ mit der gleichen hohen Lunkerklasse zu bewerten, wie Schwingprobe „2“, auch wenn dort auf Grund der gleichmäßigen Verteilung des Lunkers ein Schwingbruch an mehreren Stellen des Prüfvolumens als möglich erscheint.

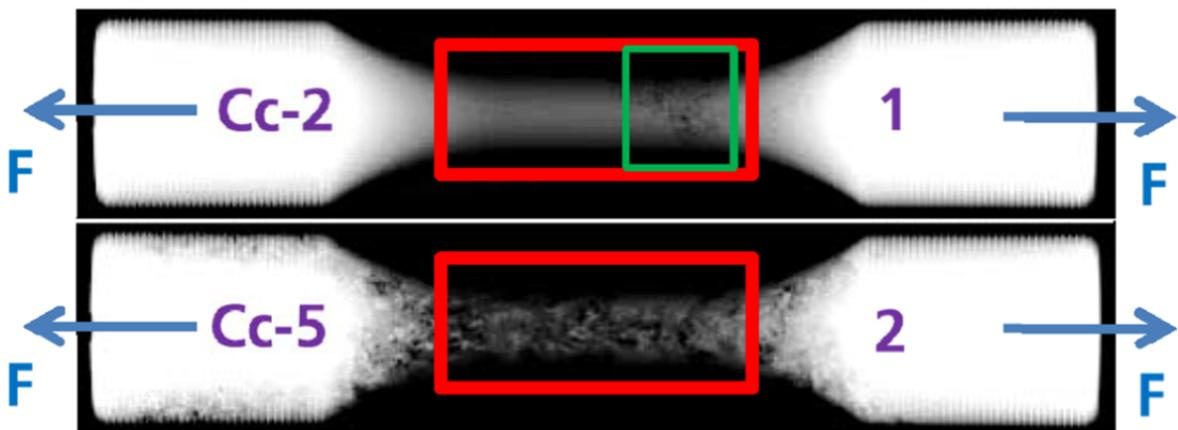


Bild 70 Beispiel für zwei Schwingproben mit Lunkern unterschiedlicher Lunkerklassen

Für eine Neueinteilung der Schwingproben mit Lunkern werden alle Röntgenbilder erneut betrachtet und jeder Schwingprobe eine neue Klasse unter Berücksichtigung der Lage des Lunkers zugewiesen. Dies findet statt, ohne das Schwingfestigkeitsergebnis in die Bewertung mit einfließen zu lassen. Um ein Vermischen mit den durch die Durchstrahlungsnorm /DIN81/ bereits für die Kennzeichnung von Ungängen vergebenen Buchstaben zu vermeiden, wird hier für die neue Lunkerklasse der Buchstabe „H“ eingeführt. Die Neuordnung der Schwingproben aus der C-Klassierung in die neue H-Klassierung zeigt schematisch Bild 71 sowie praktisch Bild 72 anhand der neu entstandenen Lunkerklasse H-3. Diese wird aus Schwingproben der Lunkerklassen Cc-2, Cc-3 und Cc-4 gebildet. Durch die Neubewertung ergibt sich kein Beitrag an Schwingproben zu H-3 aus Lunkerklasse Cc-1 und Cc-5.

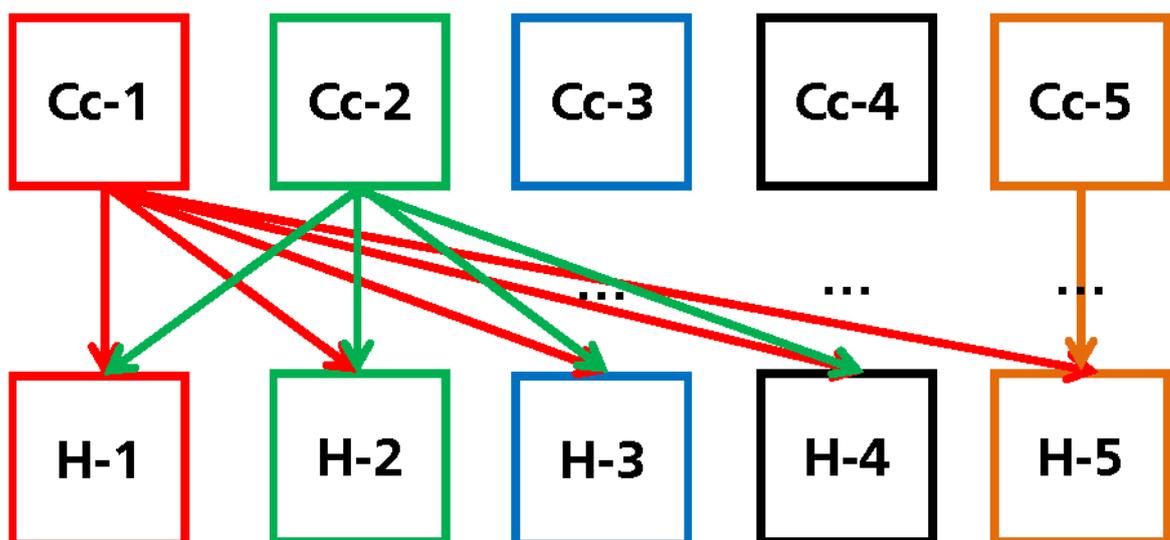


Bild 71 Neuklassifizierung der Röntgenbilder

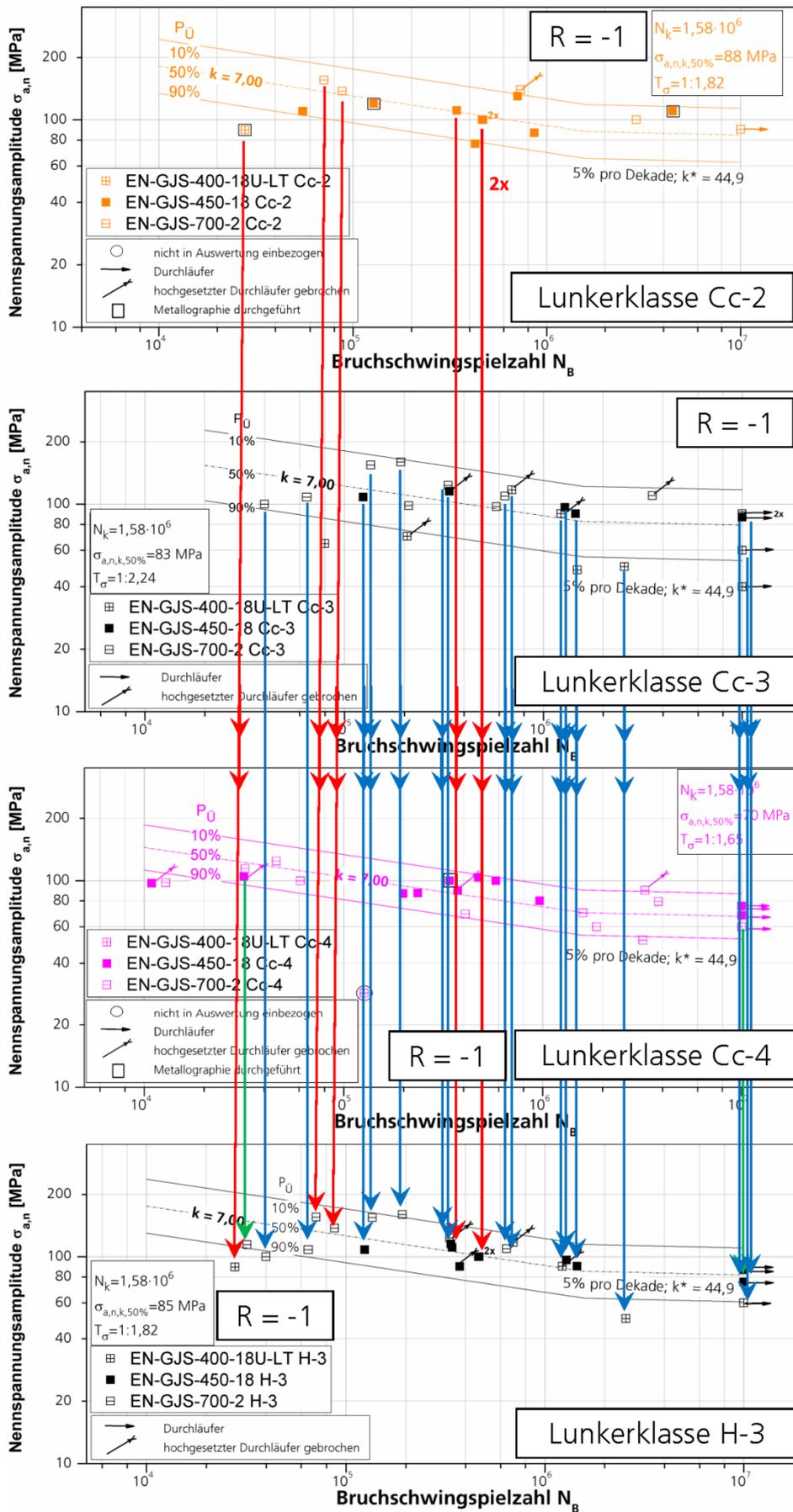


Bild 72 Beispiel zur Neueinteilung der Einzelversuche aus Lunkerklasse Cc-2, Cc-3 und Cc-4 zur Ermittlung der Lunkerklasse H-3

Bild 73 zeigt nochmals beispielhaft die Wöhlerlinie der Lunkerklasse H-3 nach der Neueinteilung. Verglichen mit der Wöhlerlinie auf Basis der Lunkereinteilung ohne die Berücksichtigung der Lage des Lunkers relativ zur Belastungsrichtung hat sich das Streumaß von $T_\sigma = 1:2,24$ auf $T_\sigma = 1:1,82$ reduziert (Tabelle 8) und sich die Nennspannungsamplitude bei der Grenzschwingspielzahl N_G von $\sigma_{a,n,N_G,50\%,R=-1} = 79$ MPa auf $\sigma_{a,n,N_G,50\%,R=-1} = 82$ MPa erhöht. Die gezielte Berücksichtigung der Lunker-geometrie und Lunkerausrichtung in Zusammenhang mit der Belastungsrichtung lässt so eine bessere Abschätzung der Schwingfestigkeit zu. Eine alleinige visuelle Abschätzung der Lunkergröße reicht somit nicht aus, um eine präzise Aussage zur Schwingfestigkeit von mit Lunkern behafteten Bauteilen zu erhalten. Die Diagramme für die werkstoffübergreifenden Spannungswöhlerlinien unter Berücksichtigung der Neuauswertung der Röntgenbilder befinden sich im **Anhang B** in **Bild B 78** bis **Bild B 82**.

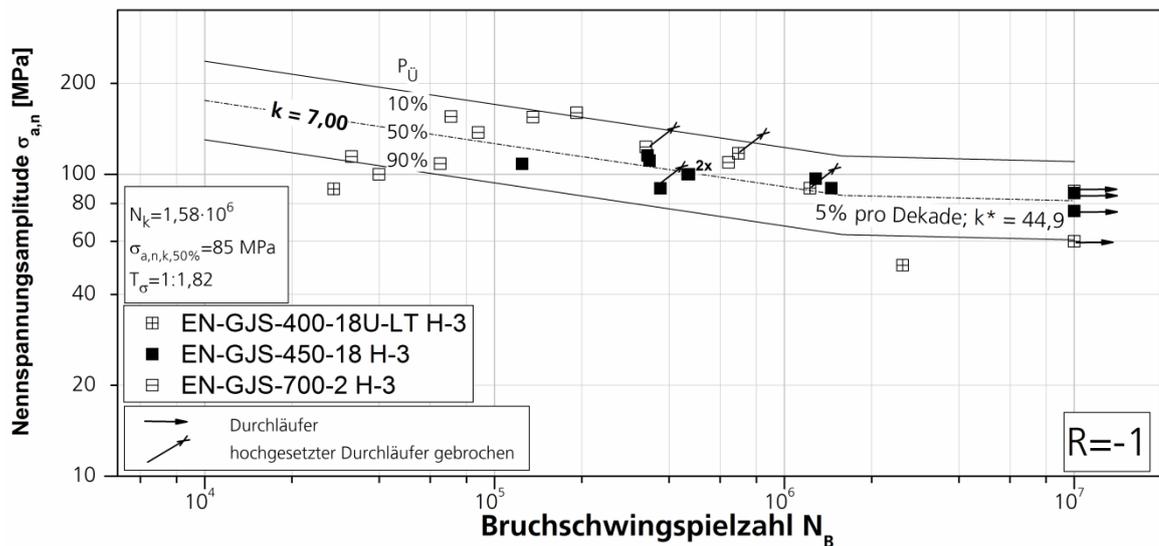


Bild 73 Wöhlerlinie für die Lunkerklasse H-3

5.2.4.4 Berücksichtigung von Ergebnissen aus der CT

Für die Schwingproben, die bei den Schwingfestigkeitsversuchen im Prüfquerschnitt gebrochen sind, liegen Informationen aus der Röntgen-Computertomographie über die Verteilung und Geometrie der Lunker vor. Eine Auswertung der Einzelröntgenschnitt je Schwingprobe, die der Bruchposition an der Schwingprobe nach dem Schwingfestigkeitsversuch entspricht, ermöglicht z.B. die Ermittlung der um die Lunkerfläche A_{Lunker} reduzierten, tatsächlichen Bruchfläche A_{tat} . Da die Bruchfläche auf Grund der inhomogenen Lunkerstruktur häufig nicht normal zur Belastungsrichtung, sondern unter einem Winkel vorliegt, wird für die Bestimmung der aus dem Röntgen-CT korrespondierenden Schicht der Mittelwert zwischen dem unteren und dem oberen Punkt der Bruchfläche verwendet, Bild 74.

Eine so aus den Schichtmodellen der Röntgen-CT ermittelte Einzelschicht zeigt Bild 63 links. Auf diese Weise lässt sich für jede Bruchposition die tatsächliche Querschnittsfläche ermitteln, die teilweise nur 49 % der Nennquerschnittsfläche von $A_{Nenn} = 176,7$ mm² entspricht. Für alle Schwingproben, deren Bruchfläche im Prüfquerschnitt und damit auch im durch die Röntgen-CT gescannten Bereich liegen, sind die ermittelten Lunkerflächen A_{Lunker} sowie die resultierenden, tatsächlichen Spannungen $\sigma_{a,tat}$ im **Anhang T** in den Tabellen der Einzelversuchsergebnisse enthalten. Unter Berücksichtigung dieser Ergebnisse ergeben sich für jede Wöhlerlinie die Parameter gemäß Tabelle 8.

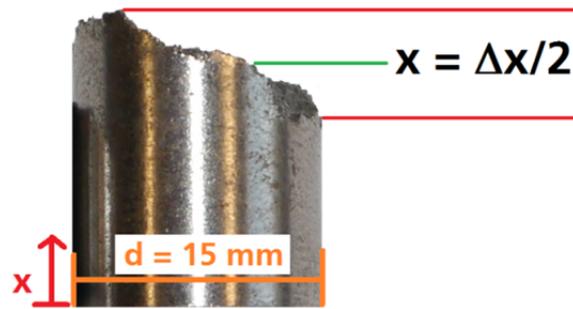


Bild 74 Bestimmung der Bruchposition

Tabelle 8 Parameter der werkstoffübergreifenden Wöhlerlinien nach Lunkerklassen

Lunkerklasse	Berücksichtigung der Lunkerfläche	Lastverhältnis	Schwingspielzahl am Abknickpunkt [-]	Neigung [-]	Nennspannungsamplitude bei N_k für $P_{\dot{U}} = 50\%$ [MPa]	Nennspannungsamplitude bei $N_G = 1 \cdot 10^7$ Schwingspielen für $P_{\dot{U}} = 50\%$ [MPa]	Streuung [-]
		R_σ	N_k		k	$\sigma_{a,n,k,50\%}$	
Cc-1	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	123	118	1,73
Cc-2	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	88	84	1,82
Cc-3	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	83	79	2,24
Cc-4	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	70	68	1,65
Cc-5	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	69	66	1,54
H-1	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	127	122	1,58
H-2	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	95	91	1,65
H-3	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	85	82	1,82
H-4	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	70	68	1,71
H-5	nein	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	65	63	1,62
H-1	ja	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	130	125	1,61
H-2	ja	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	98	94	1,75
H-3	ja	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	86	83	1,72
H-4	ja	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	77	74	1,84
H-5	ja	-1	$1,58 \cdot 10^6$	7,00	70	67	1,70

Für die beispielhaft in Bild 75 gezeigte Wöhlerlinie für die Lunckerklasse H-3 verringert sich die Streuung nochmals weiter auf $T_\sigma = 1:1,72$ (Vgl. Bild 73). Dies ist bei den übrigen Versuchsreihen zwar nicht der Fall, dennoch erbringt bei diesen die Berücksichtigung des tatsächlichen Bruchquerschnitts eine Anhebung des Schwingfestigkeitskennwerts am Abknickpunkt $\sigma_{a,n,k,50\%}$. Dies hängt damit zusammen, dass für Schwingproben mit Bruchposition im Übergangsradius der Schwingproben keine Röntgen-CT-Ergebnisse vorliegen und dementsprechend keine Lunckerflächen bestimmbar sind. Lägen auch hierfür die tatsächlichen Bruchflächen vor, wäre mit einer weiteren Verringerung der Streuung zu rechnen.

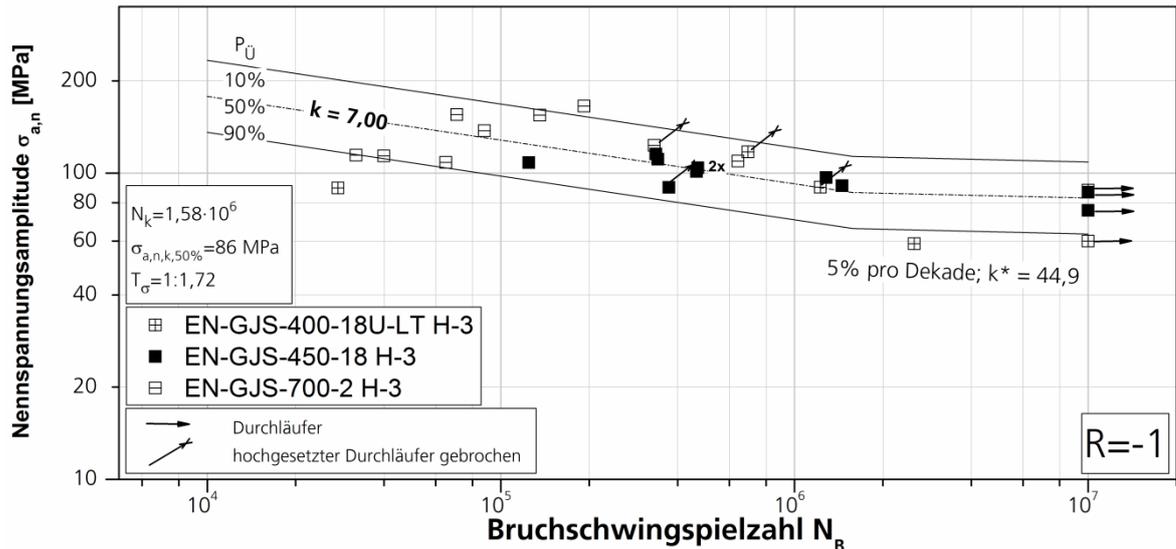


Bild 75 Wöhlerlinie für die Lunckerklasse H-3 unter Berücksichtigung der tatsächlichen Bruchflächen

Alternativ besteht die Möglichkeit, über die hier gezeigten Auswertungen hinaus, anhand der schichtweise extrahierten Bruchflächen aus dem Röntgen-CT, für jede Schwingprobe in Anlehnung an /Mu94b, Sig03, Har04, Bla05, Har09/ auch eine Kerbwirkungszahl für jeden Luncker auf Basis eines Ersatzradius zu ermitteln. Da jedoch im Allgemeinen für Großgussbauteile keine Röntgen-CT-Aufnahmen vorliegen, sei an dieser Stelle lediglich auf eine solche Möglichkeit für kleinere Gussbauteile hingewiesen. Auch die hier gezeigte Berücksichtigung von A_{Luncker} bei der Ermittlung der tatsächlichen Bruchfläche lässt sich auf Grund fehlender Auflösung der Luncker und Aufnahmemöglichkeiten für Großgussbauteile mit bis zu 320 t nur theoretisch darstellen. Somit bleibt die Bewertung der zulässigen Beanspruchbarkeit auf Basis einer radiographischen Aufnahme auf die Ermittlung der Lunckerklassen H-1 bis H-5 beschränkt.

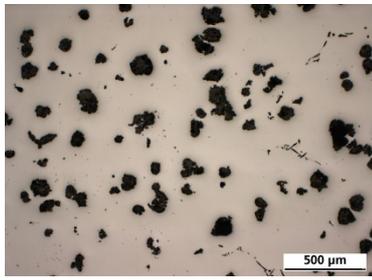
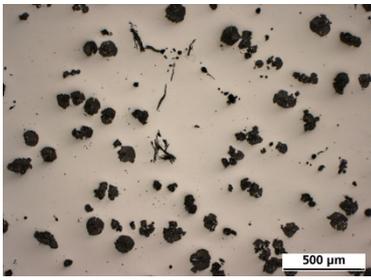
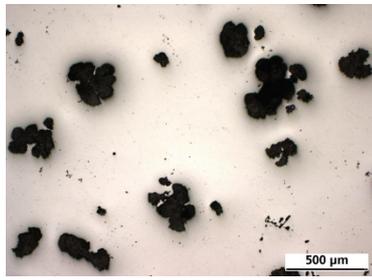
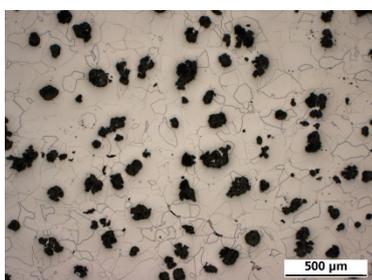
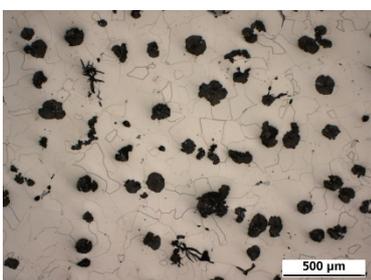
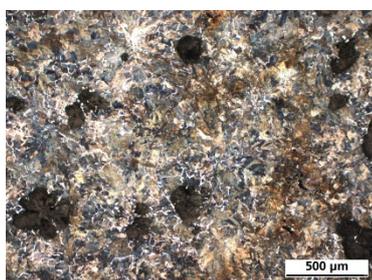
5.3 Metallographie

Begleitend zu den Schwingfestigkeitsuntersuchungen finden sowohl fraktographische als auch metallographische Untersuchungen statt. Dabei werden Schwingproben ohne Ungängen sowie auch Schwingproben aus Plattenbereichen untersucht, in denen mittels der Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung Luncker detektiert werden.

5.3.1 Ergebnisse für Schwingproben aus Bereichen ohne Lunker

Die metallographische Untersuchung der Schwingproben zeigt für den untersuchten EN-GJS-400-18U-LT im Mittel einen Phasenanteil an Ferrit von 83 % sowie 4 % Perlit und 13 % Graphit. Für den EN-GJS-450-18 unterteilen sich die vorliegenden Phasen in 86 % Ferrit, 3 % Perlit und 11 % Graphit. Der EN-GJS-700-2 besteht aus 83 % Perlit, 4 % Ferrit und 13 % Graphit. Im Mittel weisen die Ergebnisse aus Makrohärtemessungen nach Brinell bzw. /DIN06/ für den EN-GJS-400-18U-LT eine Härte von 139,3 HBW_{2,5/187,5} auf. Mit 159,2 HBW_{2,5/187,5} liegt für den mischkristallverfestigten EN-GJS-450-18 gegenüber dem EN-GJS-400-18U-LT eine erhöhte Härte vor. Auf Grund des perlitischen Grundgefüges ergibt sich beim untersuchten EN-GJS-700-2 eine mittlere Brinellhärte von 268,4 HBW_{2,5/187,5}. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Gefügeausbildung in Form von je einem mit 3%-igem Nital geätzten und einem ungeätzten Schlibfbild je untersuchtem Werkstoff sowie Ergebnisse zu Graphitform, Graphitgröße und Nodularität. Für die Auswertung der Graphitformen und der Graphitgrößen wird die DIN EN ISO 945-1 /DIN45/ herangezogen und nur Teilchen oberhalb eines maximalen feretschen Durchmessers von 10 µm ausgewertet. Besonders beim EN-GJS-700-2 fallen die Graphitkugeln mit bis zu 200 µm Durchmesser gegenüber den beiden anderen ferritischen Werkstoffen groß aus.

Tabelle 9 Schlibfbilder

EN-GJS-400-18U-LT	EN-GJS-450-18	EN-GJS-700-2
ungeätzt	ungeätzt	ungeätzt
		
geätzt mit 3%-igem Nital	geätzt mit 3%-igem Nital	geätzt mit 3%-igem Nital
		
<i>Graphitform nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
V + VI (88 %)	V + VI (97 %)	V (94 %)
<i>Graphitgröße nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>		
4 + 5 + 6 (92 %)	4 + 5 + 6 (95 %)	3 + 4 (89 %)
<i>Nodularitätskennzahl</i>		
51 %	67 %	58 %
Den Ergebnissen liegen Untersuchungen an 10 Schwingproben des EN-GJS-400-18U-LT, 10 Schwingproben des EN-GJS-450-18 sowie 6 Schwingproben des EN-GJS-700-2 zu Grunde.		

Bei der fraktographischen Untersuchung der Schwingproben aus dem Plattenbereich, den die zerstörungsfreie Prüfung mittels Ultraschall und Durchstrahlungsprüfung als ungänzenfrei erkannt hat, lassen sich dennoch kleinere Lunker finden. Diese sind entweder über den Probenprüfquerschnitt verteilt oder als einzelne Lunker in der Bruchfläche vorhanden und wirken teilweise anrissauslösend. Eine Vermessung der Lunker ergibt maximale feretsche Durchmesser im Bereich von wenigen 100 μm bis knapp 1,5 mm. Da sich solche Lunker in allen 26 fraktographisch untersuchten Schwingproben der drei Werkstoffe aus dem ungänzenfreien Bereich finden, ist anzunehmen, dass solche Lunker in allen zyklisch untersuchten Schwingproben enthalten sind und somit als fester Bestandteil des Grundgefüges anzusehen sind. Zudem zeigt die zyklische Prüfung der in der Durchstrahlungsprüfung und dem Ultraschall als ungänzenfrei deklarierten Schwingproben weder für die beiden ferritischen Legierungen noch den EN-GJS-700-2 hohe Streuungen, die auf nur hin und wieder auftretende Lunker hinweisen könnten. Bild 76 zeigt beispielhaft einen Lunker in einer Schwingprobe des EN-GJS-400-18U-LT aus dem Plattenrandbereich. Auf Grund der Ergebnisse werden Lunker bis 1,5 mm feretschem Durchmesser als Mikrolunker für den Eisengroßguss definiert. Lunker bzw. Makrolunker sind nachfolgend als diejenigen Lunker oberhalb der Grenze von 1,5 mm maximaler Ausdehnung definiert. Obwohl häufig die Begriffe Mikro- und Makrolunker z.B. in /Kai11, Eng79/ verwendet werden, findet eine numerische Abgrenzung der Begriffe zumindest für den Kugelgraphitgroßguss nicht statt.

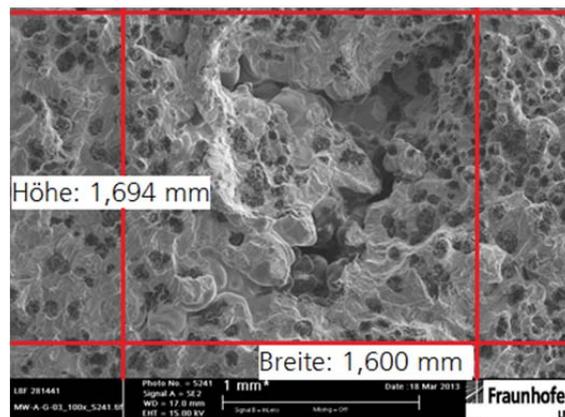


Bild 76 Lunker in einer Schwingprobe

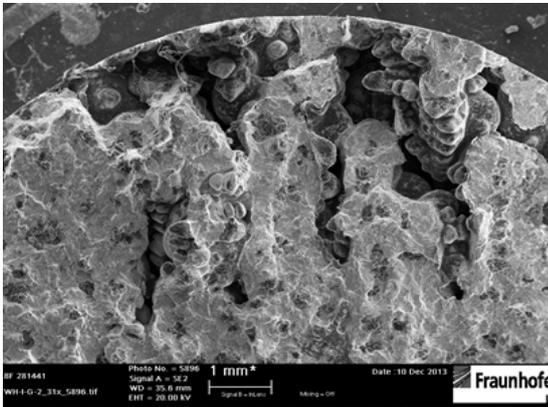
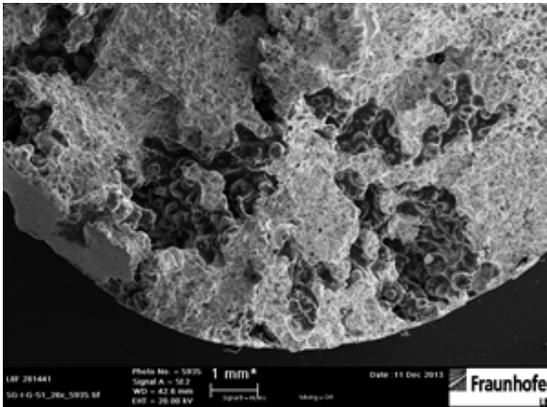
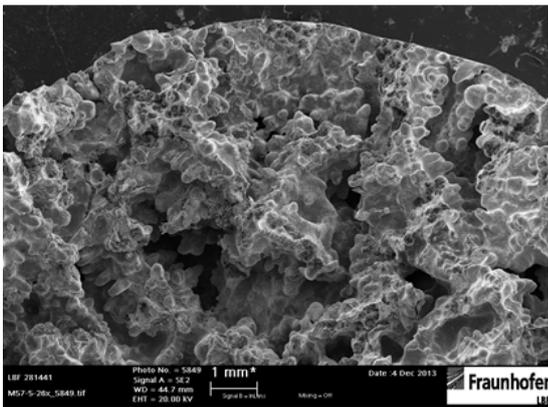
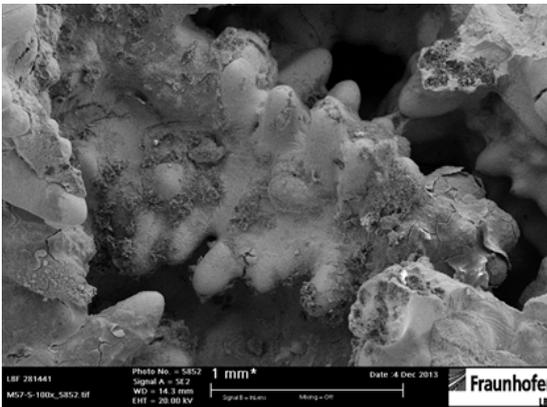
5.3.2 Ergebnisse für Schwingproben aus Bereichen mit Lunkern

Auch für die Schwingproben mit Lunkeranzeigen im Ultraschall und der Durchstrahlungsprüfung werden sowohl Schiffe als auch Bruchflächenanalysen durchgeführt. Ebenfalls wird die Härte nach Brinell bzw. /DIN06/ im Bereich der Lunker bestimmt. Beim EN-GJS-400-18U-LT ergibt sich eine mittlere Härte von 114,7 HBW_{2,5/187,5}, die sich auf Grund der umfangreichen Lunker nur an einer Schwingprobe messen lässt. Für den mischkristallverfestigten EN-GJS-450-18 wird ein Mittelwert der Härte von 158 HBW_{2,5/187,5} berechnet; der EN-GJS-700-2 weist Härten im Mittel von 273,9 HBW_{2,5/187} im Bereich um die Lunker auf. Bei beiden Werkstoffen liegen diese Werte damit im Bereich der Schwingproben ohne Makrolunker.

Tabelle 10 stellt neben Informationen zu Graphitform /DIN45/, Graphitgröße /DIN45/ und Nodularität auch Makro- und Mikroaufnahmen von Lunkern im Rasterelektronenmikroskop zusammen. Besonders gut zu erkennen sind in den Mikroaufnahmen die auf Grund fehlender Schmelze frei erstarrten Dend-

riten. In zu den Lunkern benachbarten Bereichen befinden sich keine Graphitentartungen, die über das Maß der mit Mikrolunkern behafteten Schwingproben hinausgehen. Jedoch finden sich Änderungen in Bezug auf Graphitgröße und -form beim EN-GJS-400-18U-LT. Dort wechselt die Graphitformklasse von V und VI auf IV und V sowie die Graphitgrößenklasse von 4, 5 und 6 auf 2, 3 und 4. Dagegen bleiben die hauptsächlich auftretenden Graphitgrößenklassen mit V sowie die Graphitformklasse 3 und 4 beim EN-GJS-700-2 im ungängenfreien und im mit Lunkern behafteten Bereichen gleich. Für den EN-GJS-450-18 treten hauptsächlich die Graphitformklassen V und VI auf. Bei den Schwingproben aus ungängenfreien Bereichen liegen die Graphitkugeln im Wesentlichen in Formklasse 4, 5 und 6 vor. Für die Schwingproben mit Makrolunkern liegt dagegen der größte Teil der Graphitkugeln in der Formklasse 4 und 5 vor. Die Nodularitätskennzahl nimmt im Bereich der Makrolunker beim EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 leicht, beim EN-GJS-400-18U-LT von 51 % auf 39 % deutlich ab.

Tabelle 10 Bruchflächen sowie Detailaufnahmen der Lunker

							
EN-GJS-400-18U-LT		EN-GJS-450-18		EN-GJS-700-2			
<i>Graphitform nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>							
IV + V (96 %)		V + VI (91 %)		V (89 %)			
<i>Graphitgröße nach DIN EN ISO 945-1 /DIN45/</i>							
2 + 3 + 4 (83 %)		4 + 5 (86 %)		3 + 4 (82 %)			
<i>Nodularitätskennzahl</i>							
39 %		62 %		54 %			
Den Ergebnissen liegen Untersuchungen an 2 Schwingproben des EN-GJS-400-18U-LT, 6 Schwingproben des EN-GJS-450-18 sowie 5 Schwingproben des EN-GJS-700-2 zu Grunde.							

5.4 Zusammenfassung

Für die zutreffende Bemessung von Großgussbauteilen ist es notwendig, das zyklische Werkstoffverhalten des verwendeten Werkstoffs hinreichend genau zu charakterisieren. Dazu werden Ergebnisse an Schwingproben ohne Lunker unter Spannungs- und Dehnungsregelung in Form von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven, Dehnungswöhlerlinien und Spannungswöhlerlinien vorgestellt. Es zeigt sich, dass die Verwendung einer trilinearen Beschreibung der elastischen Dehnungswöhlerlinie und die über die Kompatibilität abgeleitete zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve das transiente Werkstoffverhalten deutlich besser beschreibt als einfach-lineare Ansätze. Ein Vergleich der nach dem synthetischen Auslegungskonzept ermittelten Mittelspannungsempfindlichkeiten für die drei Werkstoffe mit experimentell ermittelten Mittelspannungsempfindlichkeiten ergibt, dass die synthetischen die experimentellen Mittelspannungsempfindlichkeiten teilweise um ein vielfaches unterschreiten und eine synthetische Auslegung für Bauteile unter Zugschwellbelastung auf der unsicheren Seite liegt. Gleichzeitig unterschätzen synthetische Wöhlerlinien die experimentell ermittelten Schwingfestigkeiten für Wechselbelastung.

Vor der zerstörenden Prüfung werden die Schwingproben mit Lunkern durch Messungen des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f im Bereich des Prüfvolumens mechanisch-zerstörungsfrei charakterisiert. Dazu werden die Schwingproben über eine vorgegebene Kraft-Rampenfunktion belastet und aus der an vier Positionen gemessenen Dehnung der fiktive Elastizitätsmoduls E_f der Schwingprobe als Mittelwert aus den vier Einzelmessungen errechnet. Die Mittelung aus vier Einzelmessungen kompensiert dabei die unterschiedlichen Werte für den fiktiven Elastizitätsmodul E_f je Messposition, die auf Grund der Inhomogenität der Lunker in der Schwingprobe zustande kommen. Zum Vergleich werden entsprechende Messungen an Schwingproben ohne Lunker aus den ungespannten Bereichen der Gussplatten und Bauteile durchgeführt.

Zusätzlich werden radiographische Untersuchungen an den Schwingproben durchgeführt und anschließend für jede Lunkerklasse Wöhlerlinien ermittelt. Es zeigt sich, dass auf Grund der Einzelergebnisse und der anzunehmend hohen Kerbformzahlen durch die Lunker eine werkstoffübergreifende Auswertung der Wöhlerlinien je Lunkerklasse möglich ist. Durch eine Neubewertung der Röntgenbilder unter Einbeziehung der Lage des Lunkers relativ zur Belastungsrichtung sowie die Berücksichtigung des tatsächlichen Bruchquerschnitts können die Streumaße der Wöhlerlinien reduziert und höhere Schwingfestigkeiten ermittelt werden. Für die zerstörungsfreie Prüfung steht damit eine erste Möglichkeit bereit, die Schwingfestigkeit in Abhängigkeit einer radiographischen Untersuchung für drei Guss-eisenwerkstoffe mit Kugelgraphit überschlägig und werkstoffinvariant abzuschätzen. Es ist anzunehmen, dass die anhand der drei Legierungen ermittelten, werkstoffinvarianten Lunkerklassenwöhlerlinien auch auf andere Legierungen mit Kugelgraphit übertragbar sind.

Metallographische und fraktographische Untersuchungen an den drei Werkstoffen schließen die zerstörenden Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Schwingproben mit und ohne Lunker ab.

6 Abhängigkeit zerstörungsfreier und zerstörender Prüfergebnisse

Bisher ließ sich zeigen, dass sich über die visuelle Auswertung von Röntgenbildern, die auch die Lage des Lunkers relativ zur Belastungsrichtung berücksichtigt, ein Zusammenhang zwischen der Schwingfestigkeit und der zerstörungsfreien Durchstrahlungsprüfung herstellen lässt. Jedoch setzt dies voraus, dass der Werkstoffprüfer Kenntnis über den Belastungszustand des Bauteiles hat und eine Durchstrahlungsprüfung logistisch, technisch und wirtschaftlich überhaupt umsetzbar ist. Des Weiteren ist die rein visuelle Auswertung stark durch subjektive Einflüsse durch den bewertenden Prüfer geprägt. Um dies zu vermeiden, ist es notwendig, reproduzierbare Messgrößen zu finden, die die gesuchte Abhängigkeit zwischen Schwingfestigkeit der Lunkerbereiche und dem Ergebnis einer zerstörungsfreien Prüfung der gleichen Volumina herstellt. Diese Messgrößen müssen dann entweder die zerstörungsfreie und die zerstörende Prüfung gemeinsam haben oder die zerstörungsfreie Prüfung einen solchen Kennwert liefern, der durch eine Funktion in einen Kennwert der Schwingfestigkeit überführbar ist.

6.1 Dichte und Schwingfestigkeit

/Lun14/ zeigt, dass die Ultraschalltechnik über Korrelationszusammenhänge in der Lage ist die Dichte aus der Rückwandabschattung zu bestimmen. Damit liefert die zerstörungsfreie Prüfung einen Kennwert, der sich an den geprüften Schwingproben wiederfinden muss. Um dies zu verifizieren, werden nach der Prüfung der Schwingproben mit Lunkern, bei denen der Bruch im Prüfquerschnitt vorliegt, sowie bei einer Reihe von Schwingproben ohne Lunker das Prüfvolumen ($l = 25 \text{ mm}$ und $d = 15 \text{ mm}$) CNC-gestützt herausgetrennt und die Masse der beiden Teilstücke, Bild 77, mit einer kalibrierten Feinwaage bestimmt /Lun14, B14b/. Unter Berücksichtigung des Probenprüfvolumens ($V_{\text{prüf}} = 4417,86 \text{ mm}^3$) ergeben sich die Dichten der Schwingproben im herausgetrennten Bereich.



Bild 77 Schwingprobe mit herausgetrenntem Prüfvolumen für Wägung

Es lassen sich Werte für die Dichten über alle drei Werkstoffe von $5,76 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 7,21 \text{ g/cm}^3$ ermitteln. Zum Vergleich zeigen die an ungänzenfreien Werkstoffbereichen ermittelten Nenndichten ρ_{nenn} für den EN-GJS-400-18U-LT einen Wert von $\rho_{\text{nenn}} = 7,10 \text{ g/cm}^3$. Für den EN-GJS-450-18 und den EN-GJS-700-2 ergeben sich $\rho_{\text{nenn}} = 7,07 \text{ g/cm}^3$ bzw. $\rho_{\text{nenn}} = 7,16 \text{ g/cm}^3$. Diese Werte werden je Werkstoff durch einen Wiegeprozess an einem Quader, entnommen aus den ungänzenfreien Werkstoffbereichen der Gussplatten, bestimmt. Jeder Quader wird dazu allseitig planparallel gefräst. Alle an den

herausgetrennten Prüfvolumina ermittelten Dichten der Schwingproben sind im **Anhang T** in **Tabelle T 73**, **Tabelle T 74** sowie **Tabelle T 75** zusammengefasst und den fiktiven Elastizitätsmoduli gegenübergestellt. Die gemessenen Dichten werden darüber hinaus im Rahmen der Arbeiten in /Lun14/ mit den Ergebnissen aus Röntgen-CT-Aufnahmen korreliert.

In Bild 78 sind die erzielten Wechselschwingfestigkeiten für jede einzelne Schwingprobe aus dem Wöhlerversuch für alle drei Werkstoffe in Abhängigkeit der Dichte zusammengestellt. Als Schwingfestigkeit werden für die untersuchten Werkstoffe die Nennspannungsamplituden am Abknickpunkt $\sigma_{a,n,k}$ herangezogen. Es zeigt sich für alle drei Werkstoffe, dass ein exponentieller Zusammenhang zwischen Schwingfestigkeit und Dichte ρ_w besteht. Dennoch streuen die Versuchspunkte stark. Dies ist zum einen auf die Streuung der Schwingfestigkeitsversuche per se sowie zum anderen auf Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Dichte beim Heraustrennen und Wiegen der kleinen Werkstoffvolumina zurückzuführen. Da sowohl das Wiegen als auch das Vermessen der herausgetrennten Prüfvolumina und Quader Streuungen unterliegt, zeigt Bild 78 zudem Einzelwerte der Dichte, die die Nenndichte ρ_{nenn} der drei untersuchten Werkstoffe leicht überschreiten. Die Darstellung in Bild 78 zeigt, dass die Dichte durchaus mit der Schwingfestigkeit zumindest für die Axialbelastung korreliert. Der Verlauf gleicht damit dem Zusammenhang den Bild 27 für die Korrelation der lokalen Bauteildichte mit der Summe der Amplituden der Rückwandabschattung darstellt.

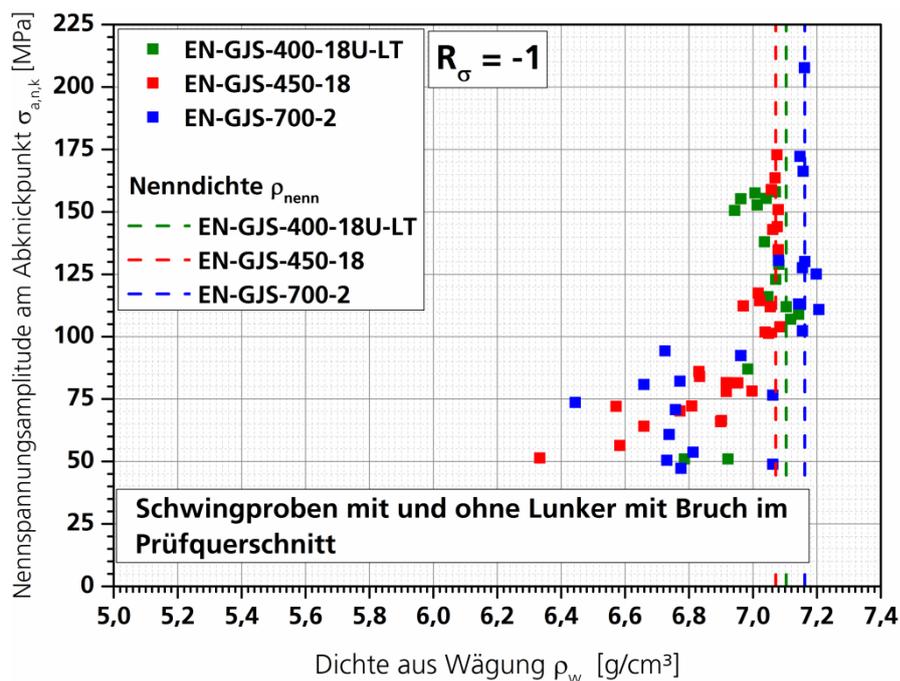


Bild 78 Schwingfestigkeit der untersuchten Werkstoffe am Abknickpunkt $\sigma_{a,n,k}$ der unglänzfreien Spannungswöhlerlinie gegenüber der Dichte ρ_w

6.2 Informationen aus Röntgenbildern

6.2.1 Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild mit komplettem Prüfvolumen

Während die Werte für die Dichte bisher erst nach den Schwingfestigkeitsversuchen und durch das mechanische Heraustrennen der relevanten Werkstoffbereiche bestimmt werden können, wäre eine

Abschätzung der Dichte bereits vor der Bauteilbetriebnahme und einer damit verbundenen Abschätzung der Schwingfestigkeit aus dem Röntgenbild hilfreich. Für Bauteile mit Abmessungen, die eine Durchstrahlungsprüfung ermöglichen, und für einfache Belastungsfälle besteht dann die Möglichkeit, die Schwingfestigkeit in Abhängigkeit der vorliegenden Lunker direkt und bereits im Qualitätssicherungsprozess abzuschätzen. Eine solche Abschätzung der Schwingfestigkeit setzt jedoch voraus, dass eine einheitliche Vorgehensweise existiert, die stets die gleiche Schwingfestigkeit ergibt, ohne dabei auf die praktische Erfahrung bei der Röntgenfilmbetrachtung und somit die subjektiven Beurteilungen angewiesen zu sein. Um dies zu erreichen, werden die digitalisierten Röntgenbilder näher betrachtet. Die Digitalisierung hat nicht nur den Vorteil, Röntgenbilder einfacher speichern, sondern auch die Informationen des Röntgenbildes weiterverarbeiten zu können. Nach der Digitalisierung stehen zweidimensionale Matrizen mit numerischen Einträgen der Grauwertdaten mit einer 16-bit Auflösung der Grauwerte und einer Ortsauflösung von 50 µm zur Verfügung, die die lokale Dichteinformation des Röntgenbildes beinhalten. Dabei entspricht ein niedriger Matrixeintrag einem hohen Grauwert und damit sinngemäß einer niedrigen Dichte oder einer verringerten lokalen Materialstärke. Die digitalisierte Dichteinformation lässt sich nun auf zwei Wegen nutzen. Zunächst auf die schon diskutierte rein visuelle Einteilung in Lunckerklassen H-1 bis H-5 und für die Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild. Ansätze dazu diskutiert beispielsweise /Har04/, auch wenn hier die Ermittlung der Porosität im Probenprüfquerschnitt der Schwingproben im Vordergrund steht und nicht die Ermittlung der Dichte im Prüfvolumen.

Zur Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild wird ein Algorithmus erarbeitet, der die Matrixeinträge dahingehend verarbeitet, dass jede einzelne Schwingprobe soweit beschnitten wird, dass lediglich das Prüfvolumen der Schwingproben ($l = 25 \text{ mm}$, $d = 15 \text{ mm}$) als Einträge in der Matrix verbleibt, Bild 79. Dies ist für einen zutreffenden Vergleich zwischen Dichtewert aus der Wägung und dem Röntgenbild notwendig, da auch nur für diesen Bereich experimentelle Werte für die Dichte vorliegen.

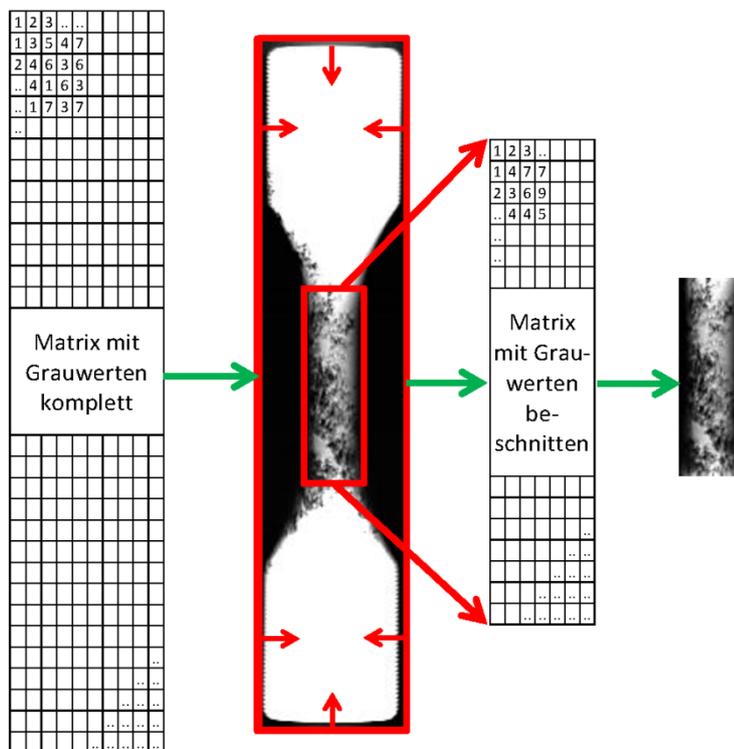


Bild 79 Verarbeitung der Matrix mit Schwärzungsinformation

In einem nächsten Schritt ermittelt der Algorithmus zu jedem einzelnen Matrixeintrag ausgehend von der an den Quadern je Werkstoff ermittelten Nenndichte ρ_{nen} einen Dichtewert. Dazu findet der Algorithmus zu jeder Spalte der Matrix den niedrigsten und den höchsten Grauwert und setzt diesen der Nenndichte bzw. dem Wert „0“ gleich. Alle dazwischenliegenden Grauwerte werden linear interpoliert. Das Vorgehen berücksichtigt, dass durch die Verrundung der Schwingproben links und rechts der Mitte der Schwingproben kürzere Strahlenwege und damit geringere Schwächungen der Strahlungsintensität sowie höhere Schwärzungen auf dem Röntgenfilm bzw. als Matrixeinträge vorliegen. Dennoch können Fehlinterpretationen auftreten, wenn in einer Spalte kein Grauwert auf Grund einer umfangreichen Durchlunkerung die tatsächliche Nenndichte repräsentiert. Ebenso setzt der Vergleich des höchsten Grauwertes mit dem Wert „0“ voraus, dass an dieser Stelle ein Loch im Material vorliegt, was in der Regel nicht der Fall sein wird. Für jedes Matrixelement der Schwingprobe lässt sich auf Basis der Schwingprobengeometrie und der bekannten Ortsauflösung der Grauwertdaten von $50 \mu\text{m}$ das Volumen ermitteln. Zusammen mit der bereits bestimmten Dichte für jedes Matrixelement errechnet der Algorithmus zunächst die Masse für jeden Matrixeintrag und danach durch Mittelwertbildung die Masse des Volumens der Schwingprobe, das durch eine Matrixspalte repräsentiert wird. Eine weitere Mittelwertbildung der Massen je Spalte über alle Spalten ergibt eine gemittelte Masse für das komplette Prüfvolumen der Schwingprobe. Bezogen auf das mittlere Volumen aller Spalten ergibt dies eine gemittelte Dichte ρ_R für das Prüfvolumen der Schwingprobe. Bild 80 stellt die Dichte ρ_R , die der Algorithmus aus dem Röntgenbild ermittelt, der tatsächlich vorliegenden Dichte im Prüfvolumen der Schwingprobe ρ_W gegenüber. Es fällt auf, dass die aus dem Röntgenbild bestimmte Dichte ρ_R nicht genau mit der tatsächlichen Dichte ρ_W übereinstimmt und geringere Werte liefert. Die Gründe hierfür liegen in Nichtlinearitäten der Filmschwärzung, der Verrundung der Schwingprobe, die Beugungs- und damit Streueffekte zur Folge haben und die im Algorithmus nicht korrigiert werden, sowie in der unterschiedlichen Strahlaufhärtung beim Durchgang der Strahlung durch Lunkerbereiche. Auch dies kann der Algorithmus nicht korrigieren, da Informationen über die Strahlaufhärtung nach jedem einzelnen Werkstoffelement fehlen. Bild 80 zeigt die Regression der Dichte ρ_R ermittelt aus dem Röntgenbild sowie der Dichte ρ_W ermittelt aus der Wiegung. Bei der Regression wird ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Parametern unterstellt, der im Bereich von $3,2 \text{ [g/cm}^3] \leq \rho_R \leq 6,4 \text{ [g/cm}^3]$ gültig ist.

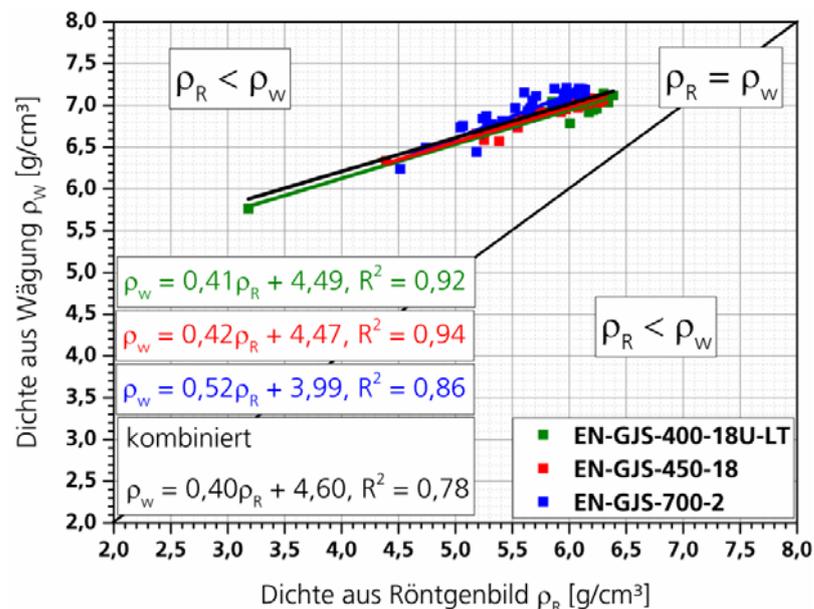


Bild 80 Umrechnung der Dichte aus dem Röntgenbild zur gemessenen Dichte

Auf diese Weise kann für jede Schwingprobe die Dichte im Prüfvolumen der Schwingprobe bestimmt und der Schwingfestigkeit bei einer beliebigen Lebensdauer gegenübergestellt werden. Bild 81 zeigt dies anhand einer Gegenüberstellung der Schwingfestigkeit am Abknickpunkt $\sigma_{a,n,k}$ für Wechselbelastung und der aus dem Röntgenbild ermittelten Dichte ρ_R .

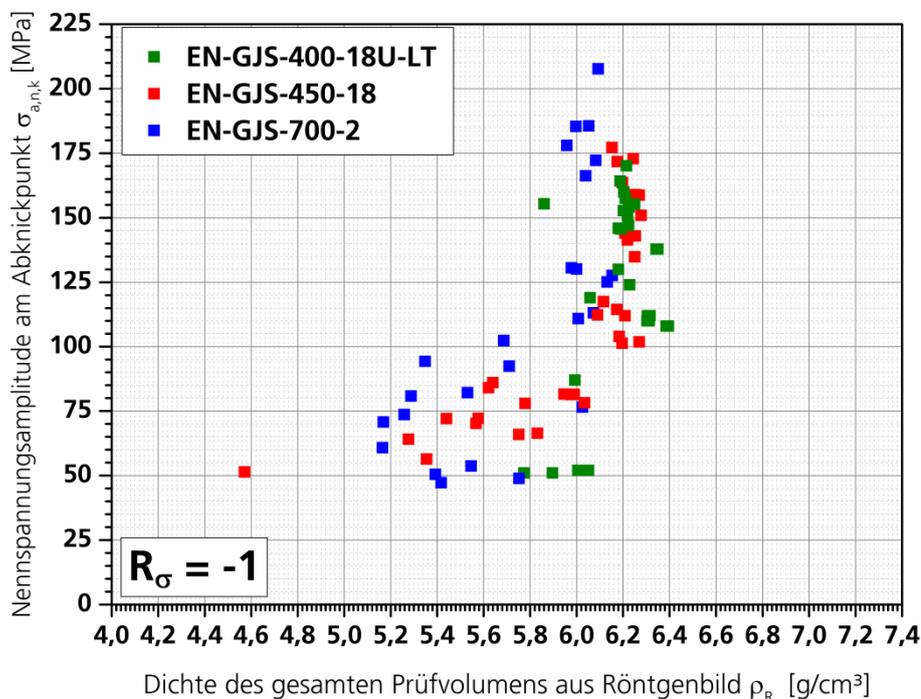


Bild 81 Schwingfestigkeit am Abknickpunkt in Abhängigkeit der Dichte aus Röntgenbildern für das gesamte Prüfvolumen der Schwingproben

Bild 81 zeigt tendenziell den gleichen Zusammenhang zwischen Schwingfestigkeit und Dichte, der auch für die gemessene Dichte in Bild 78 erkennbar ist. Jedoch zeigen beide Darstellungen auch, dass die Streuung vor allem für den EN-GJS-700-2 hoch ist. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass der Schwingfestigkeit eine Dichte gegenübergestellt ist, die für das gesamte Prüfvolumen der Schwingproben ermittelt wird und nicht nur für den lokalen Bereich des Versagens, also den Bereich in dem ein Lunker tatsächlich vorliegt. Liegt beispielsweise lediglich im Bereich des Versagens ein Lunker von 4 mm Ausdehnung vor, ist der ungenutzte Bereich bei Mittelung der Dichte ρ über das gesamte Prüfvolumen mit $l = 25$ mm natürlich verhältnismäßig überrepräsentiert. Als eine Konsequenz hieraus ist die Dichteauswertung auf ein kleines Volumen um die Bruchfläche herum einzuengen, um den Zusammenhang zwischen Dichte und Schwingfestigkeit zu präzisieren.

6.2.2 Bestimmung des Versagensortes aus dem Röntgenbild

Zur Bestimmung des Versagensortes aus dem Röntgenbild wird der Auswertalgorithmus um die Bestimmung der Bruchposition erweitert. Hierzu wird durch Mittelwertbildung der Schwärzung für jede Zeile der Matrix ein Wert des Röntgenfilms an dieser Stelle ähnlich zu den Untersuchungen in /Har04/ ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass der Bereich um die Matrixzeile mit der höchsten mittleren Schwärzung bzw. der geringsten Dichte auch derjenige Bereich ist, an der das Versagen der Schwing-

probe mit hoher Wahrscheinlichkeit eintritt, wenn diese axial belastet wird. Da sich die Bestimmung des Grauwertmaximums für eine Schwingprobe anhand zweier vorliegender Röntgenbilder, die um 90° gedreht aufgenommen werden, durchführen lässt, mittelt der Algorithmus anschließend beide Positionen der Grauwertmaxima. Als Vergleich dient die tatsächliche Bruchposition, gemäß Bild 74.

Für die Schwingproben die im Prüfquerschnitt gebrochen sind, stellt Bild 82 die tatsächlichen Bruchpositionen denjenigen gegenüber, die aus den Röntgenbildern ermittelt werden. Zusätzlich sind Streubänder für eine Abweichung von der tatsächlichen Bruchposition von ± 2 mm und ± 6 mm eingetragen. Während in den äußeren Streubändern knapp 80 % aller Schwingproben enthalten sind, liegen gut 52 % aller Ergebnisse sogar innerhalb einer Abweichung von ± 2 mm, Bild 82. Diese Abweichungen sind unter Berücksichtigung der Ungenauigkeit bei der Bestimmung der tatsächlichen Bruchposition auf Grund der starken Topologieunterschiede der Schwingbruchfläche von teilweise mehreren Millimetern, Bild 74, sowie der Annahme einer direkten Korrelation zwischen minimaler Schwärzung im Röntgenbild und Bruchposition vertretbar. In Bild 82 sind teilweise auch ungänzenfreie Schwingproben berücksichtigt, die bei der Durchstrahlungsprüfung keine Lunker zeigen.

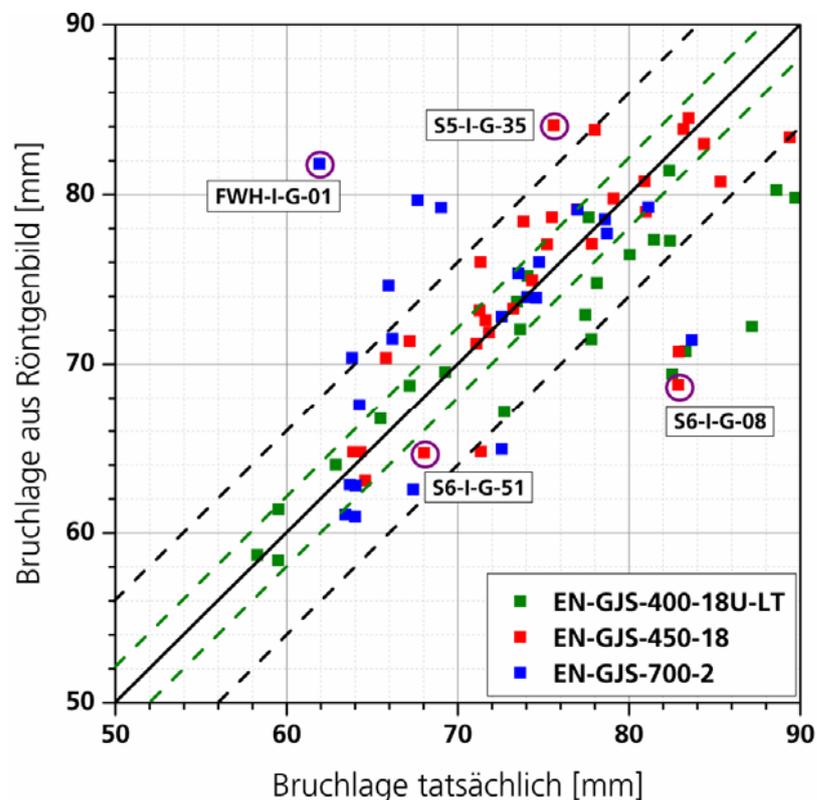


Bild 82 Ermittlung der Bruchposition anhand der Röntgenbilder

Bild 82 zeigt jedoch auch Ausreißer. So liegen einige Proben deutlich außerhalb des Streubandes einer Abweichung von ± 6 mm. Dies hängt mit zwei Herausforderungen bei der Auswertung der Bruchflächenposition zusammen. Zum einen liegt die Bruchfläche, wie bereits erläutert, vor allem bei Vorhandensein von großen Lunkerbereichen (vgl. Bild 74) nicht als ebene Fläche vor, sodass vom Mittelwert aus betrachtet, die obere und untere Kante des Bruchs mehrere Millimeter entfernt liegen kann. Durch die Mittelwertbildung geht somit Genauigkeit verloren. Auch eine Fraktographie kann dies nicht kompensieren, da auf der Bruchfläche Anhaltspunkte für einen Bruchausgang fehlen, wenn großvolumige

Lunker vorliegen. Zum anderen kann das Vorhandensein von zwei oder mehr, in ihrem Wert dicht beieinander liegender Grauwertmaxima, die Auswertung der Bruchposition im Röntgenbild verfälschen. Zur Erläuterung dieses Sachverhalts zeigt Bild 83 exemplarisch für die vier in Bild 82 eingekreisten und benannten Schwingproben den gemittelten Grauwertverlauf über das gesamte Prüfvolumen der Schwingproben mit Markierungen zur Soll- und Ist-Bruchposition.

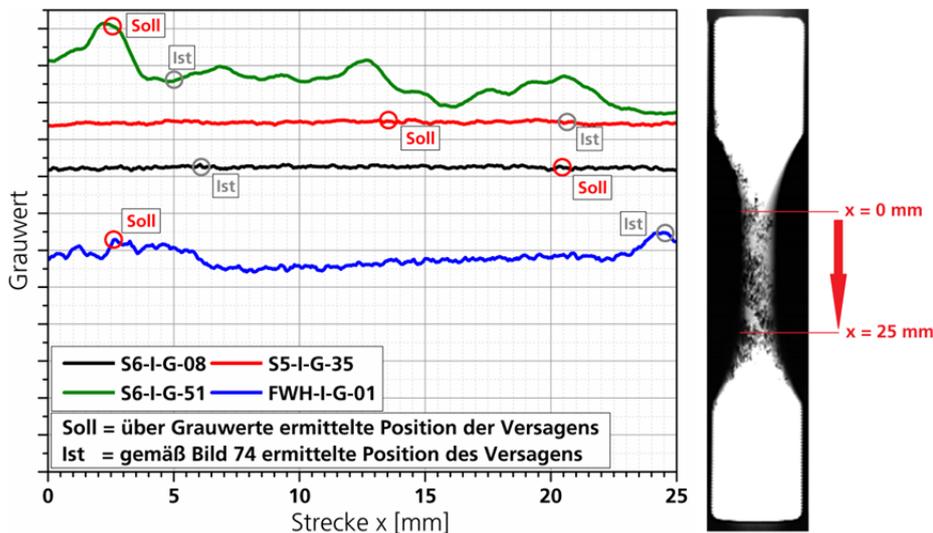


Bild 83 Grauwertkurven für ausgewählte Schwingproben im Vergleich

Es treten bei der Auswertung der Bruchposition drei Fälle auf, die zu berücksichtigen sind. So kann der Grauwertverlauf im Bereich des Prüfvolumens wie bei den Schwingproben S5-I-G-35 und S6-I-G-08 lediglich geringfügig schwanken. Auf Grund der geringen Schwankungen des Grauwertes und Ungenauigkeiten bei der Grauwertbestimmung, die sich beim Durchstrahlen und Scannen der Röntgenfilme ergeben, treten nun Fehlinterpretationen durch den Algorithmus bei der Bestimmung der Bruchposition auf. Eine visuelle Betrachtung der Röntgenfilme zeigt bei Schwingprobe S5-I-G-35 lediglich kleinste, bei Schwingprobe S6-I-G-08 keine Lunker. Der Anriss und letztendlich der Bruch der Schwingprobe hängen dann von kleinsten Einschlüssen ab und haben mehr oder weniger zufälligen Charakter. Für Schwingproben, die bei der Filmbetrachtung keine Lunker zeigen und demnach als ungenau einzustufen sind, ist eine Auswertung bzw. ein Erkennen der Bruchposition somit nicht möglich und auch nicht relevant. Eng damit verbunden ist der Fall, dass eine Schwingprobe mehrere deutliche Grauwertmaxima aufweisen kann, wie es bei der Schwingprobe FWH-I-G-01 der Fall ist. Die Grauwerte beider Maxima liegen jedoch so nahe beieinander, dass Fehlinterpretationen auftreten, wenn die Genauigkeit der Durchstrahlung bzw. die Auflösung des Scanners eine weitere Differenzierung unterbinden. Es ist für beide Fälle zu erwarten, dass eine Erhöhung der Genauigkeit bei der Durchstrahlung und dem Scannen der Röntgenfilme die Korrelation deutlich verbessern. Im letzten Fall ist das Grauwertmaximum einwandfrei zu bestimmen, wie beispielsweise bei der Schwingprobe S6-I-G-51. Es treten lediglich Abweichungen durch die bereits beschriebenen Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der tatsächlichen Bruchfläche auf, Bild 74.

Es zeigt sich somit, dass sich durch die einfache Bestimmung einer minimalen, gemittelten Schwärzung im digitalisierten Röntgenbild die ungefähre Bruchpositionen gut, effizient und vor allem reproduzierbar abschätzen lässt. Dies hat mehrere Vorteile. Neben der Bestimmung der eigentlichen Bruchposition

für das zu prüfende Bauteil unter Berücksichtigung der Belastungsrichtung ist eine zerstörungsfreie Prüfung deutlich fokussierter einsetzbar. Nachdem eine preiswerte und schnelle radiographische Durchstrahlungsaufnahme mit der Ermittlung der Bruchposition den zu prüfenden Bereich deutlich einschränkt, kann eine anschließende Röntgen-CT- oder auch Ultraschall Sampling Phased Array Prüfung zur genaueren Bestimmung der Lage des Lunkers wesentlich präziser vorgenommen werden. Eine Aufnahme der kompletten Schwingprobe oder des Bauteils kann zugunsten kürzerer und damit preisgünstigerer Scanzeiten oder gegebenenfalls höherer Auflösungen der lokalen Bereiche entfallen.

6.2.3 Bestimmung der Dichte aus dem Röntgenbild mit verkleinertem Prüfvolumen

Auf Basis der Bestimmung der Bruchposition lässt sich nun die Korrelation von Dichte und Schwingfestigkeit präzisieren, die bisher nur am kompletten Prüfvolumen durchführbar war. Hierfür wird der Auswertalgorithmus nochmals erweitert, indem dieser nun die Dichte ρ_R für ein variabel wählbares Volumen um die identifizierte Bruchposition ermittelt. Bild 84 zeigt dazu die Schwingfestigkeit am Abknickpunkt in Abhängigkeit der Dichte für einen Bereich von ± 1 mm um die experimentell bestimmte Bruchposition. Liegt die Bruchposition zu nahe am Ende des Probenprüfvolumens zum Übergangsradius, so wird auf Grund des endlichen Bereiches die Dichte nur bis zum Beginn des Übergangsradius ausgewertet. Hierdurch ergeben sich im Vergleich zu der Korrelation der Schwingfestigkeit mit der Dichte des kompletten Prüfvolumens der Schwingproben, Bild 81, deutlich geringere Streuungen, da Bereiche im Prüfvolumen ohne Lunker unberücksichtigt bleiben. Der dreidimensionalen Ausprägung der Lunker wird durch die Auswertung einer Dichte in einem Bereich von 2 mm um die Bruchposition aber dennoch Rechnung getragen.

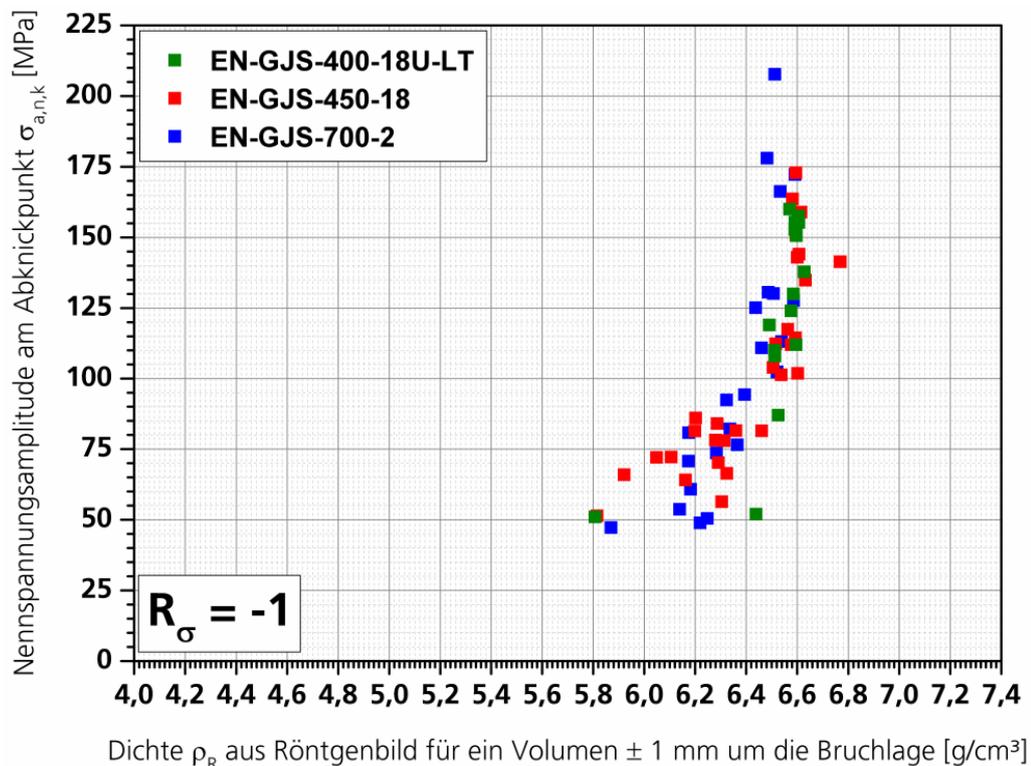


Bild 84 Schwingfestigkeit am Abknickpunkt in Abhängigkeit der Dichte aus Röntgenbildern für das auf 2 mm eingegrenzte Prüfvolumen um die Bruchposition der Schwingproben

Mit der Bestimmung der Bruchposition und der Dichte ρ in einem frei wählbaren Bereich um die Bruchposition kann nun in Zusammenhang mit Bild 84 aus dem digitalisierten Röntgenbild reproduzierbar eine Abschätzung der Schwingfestigkeit bei fest vorgegebener Lebensdauer für die drei Werkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 erfolgen. Während Bild 84 für die Schwingfestigkeit am Abknickpunkt des jeweiligen Werkstoffs für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 % unter Wechselbelastung Gültigkeit hat, besteht ohne Weiteres die Möglichkeit die Korrelation ebenfalls für andere Überlebenswahrscheinlichkeiten P_0 aufzustellen oder durch Versuche auf weitere Werkstoffe auszuweiten. Nennspannungen für weitere Lebensdauern lassen sich aus Bild 84 über die Parameter der Spannungswöhlerlinien für den ungespannten Werkstoff bestimmen.

Um Fehler bei der Auswertung der Lunkerklasse, der Bruchposition sowie der Dichte klein zu halten, sollten bei der Durchstrahlung nach Möglichkeit immer die gleichen Aufnahmeparameter und Röntgenquellen bei gleicher Schwingprobegeometrie verwendet werden, sofern dies die anzuwendenden Prüfnormen zulassen. Dies ermöglicht zusammen mit den hier dargestellten Auswertungen die weitgehende Standardisierung der Röntgenbildauswertung, wenn aus Kosten- und Zeitgründen oder der Bauteilbeschaffenheit kein anderes, detailliertes Prüfverfahren einsetzbar ist.

6.3 Dichte, fiktiver Elastizitätsmodul und Schwingfestigkeit

Die bisherigen Auswertungen der Schwingfestigkeitsuntersuchungen von Schwingproben mit Lunkern bezogen sich zunächst auf die Ermittlung von Lunkerlassen und der Dichte aus Röntgenbildern. Dabei steht der Dichte ρ eine exponentiell ansteigende Schwingfestigkeit für eine feste Lebensdauer gegenüber, mit der Möglichkeit, auf Nennspannungen bei anderen Lebensdauern über die Parameter der ungespannten Spannungswöhlerlinie zu extrapolieren. Für höhere Dichten fällt jedoch eine Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Schwingfestigkeiten immer schwerer. Es ist daher wünschenswert, die Dichteinformation in bekannte Zusammenhänge zwischen Schwingfestigkeit und Lebensdauer, wie etwa einer Wöhlerlinie, zu überführen und Kenngrößen aus der Dichte abzuleiten, die in der Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit Berücksichtigung finden können. Die hierfür benötigte Verbindung lässt sich mit Hilfe des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f herstellen.

Für metallische Werkstoffe gilt im Allgemeinen, dass die Werkstoffsteifigkeit, also der Elastizitätsmodul, abnimmt, sobald sich auch die Werkstoffdichte verringert. Aus dieser Beobachtung heraus lohnt ein Vergleich der gemessenen Dichten der Prüfvolumina der Schwingproben mit den am gleichen Volumen über alle vier Messpositionen gemittelten fiktiven Elastizitätsmodul E_f . Diese Gegenüberstellung zeigt Bild 85 für alle Schwingproben mit und ohne Lunker, an denen Ergebnisse für den fiktiven Elastizitätsmodul E_f vorliegen. Dabei gilt für die Schwingproben ohne Lunker, dass der fiktive Elastizitätsmodul E_f dem tatsächlichen Elastizitätsmodul E entspricht. Die Darstellung zeigt, dass die Dichte ρ_w der einzelnen Schwingproben sehr gut mit den für die gleiche Schwingprobe und im gleichen Bereich ermittelten fiktiven Elastizitätsmoduli E_f korreliert. Für die Regression zwischen Dichte ρ_w und fiktivem Elastizitätsmodul E_f ein linearer Zusammenhang unterstellt, wobei das Bestimmtheitsmaß R^2 nahe bei 1 liegt. Einem höheren fiktiven Elastizitätsmodul E_f der Schwingproben aus GJS ist demzufolge auch eine höhere Dichte ρ_w zugeordnet. Weiterhin lässt sich feststellen, dass diese Regression auch übergreifend über alle drei untersuchten Werkstoffe Gültigkeit besitzt; d.h. es ist anzunehmen, dass diese Regression für Gusseisen mit Kugelgraphit werkstoffinvariant ist. Im Gegensatz zu Untersuchungen an Stahlguss, die den gemessenen Elastizitätsmodul einmal der maximalen Ausdehnung des Lunkers im Probenprüfquerschnitt ermittelt aus Röntgenbildern /Har04/ oder dem Lunkervolumen in der mit Lunkern

behafteten Zugprobe inklusive Einspannbereich gegenüberstellen /Olk15/, lässt sich mit der gezeigten Gegenüberstellung von gemessenem, fiktivem Elastizitätsmodul E_f und der im gleichen Bereich bestimmten Dichte ρ_w für die drei Kugelgraphitgusswerkstoffe auch der Elastizitätsmodul E für den ungeschnittenen Werkstoffzustand sicher ermitteln. Darüber hinaus berücksichtigt die Regression sowohl innenliegende als auch angeschnittene Lunker und es ergeben sich geringere Streuungen. Der Vorteil der Verknüpfung zwischen Dichte ρ_w und fiktivem Elastizitätsmodul E_f liegt darin, dass sich nun eine Messgröße der zerstörungsfreien Prüfung durch einen linearen Zusammenhang in eine mechanische Größe überführen lässt, die in Form des Elastizitätsmoduls E bereits als Proportionalitätsfaktor zwischen Dehnung ϵ und Spannung σ bekannt ist. Es ist davon auszugehen, dass der fiktive Elastizitätsmodul E_f umso exakter und damit lokaler aufgelöst werden kann, je höher die Auflösung der gemessenen Dichte ρ im Ultraschall oder der Durchstrahlungsprüfung ist.

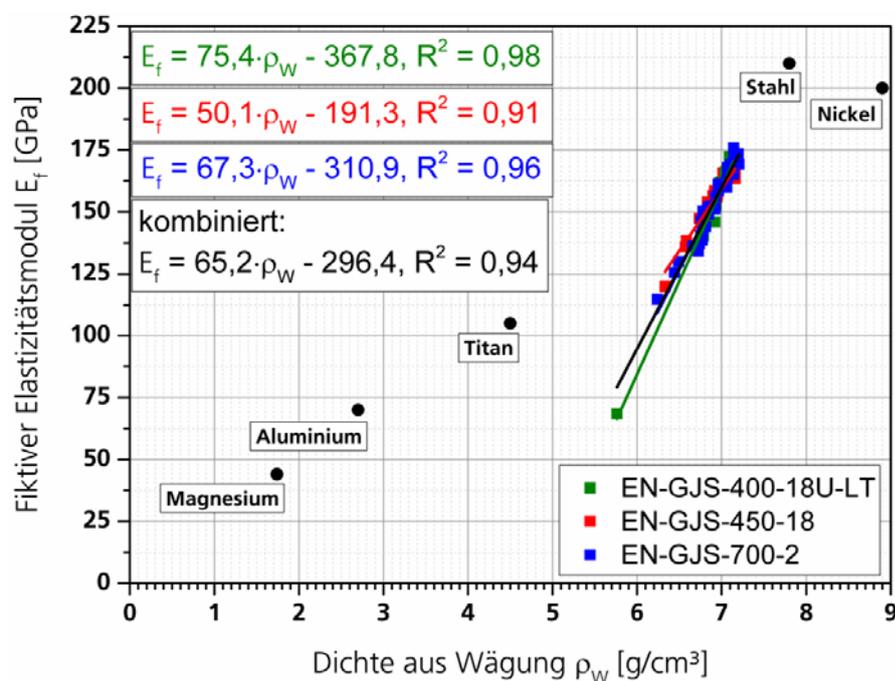


Bild 85 Regression zwischen gemessener Dichte ρ_w und fiktivem Elastizitätsmodul E_f

Stellt die in Bild 85 gezeigte Regression die Abhängigkeit der z.B. aus dem Ultraschall Sampling Phased Array ermittelten Dichte mit einem mechanischer Parameter der Schwingproben im Bereich von $5,8 \leq \rho_w \leq 7,2 \text{ g/cm}^3$ her, fehlt nach wie vor eine Verbindung zur Schwingfestigkeit.

Dazu sei nochmals die Spannungswöhlerlinie für den ungeschnittenen Werkstoffzustand – im Folgenden Spannungsreferenzwöhlerlinie genannt – und die Einzelversuchsergebnisse an den Schwingproben mit Lunkern für den EN-GJS-450-18 betrachtet, Bild 86. Wie durch die metallographischen Analysen in Kapitel 5.3.2 ermittelt, berücksichtigt die Spannungsreferenzwöhlerlinie bereits Mikrolunker mit einer maximalen Ausdehnung $d \leq 1,5 \text{ mm}$ und den durch sie hervorgerufenen Schwingfestigkeitsabfall, da diese generell im Grundwerkstoff der untersuchten Schwingproben vorliegen und zudem nach dem Stand der Technik vom Ultraschall Sampling Phased Array in der Regel nicht aufgelöst werden können /Lun14/. Da die im Wöhlerdiagramm aufgetragenen Schwingfestigkeiten der Schwingproben mit Lunkern auf dem Nennprüfquerschnitt der Schwingproben basieren, liegen keine örtlichen Spannungen, sondern Nennspannungen vor. Für jede Schwingprobe mit Lunkern lässt sich somit eine Kerbwirkungs-

zahl K_{fs} als Verhältnis aus der Schwingfestigkeit des ungespannten Werkstoffzustandes zur Schwingfestigkeit der jeweiligen Schwingprobe mit Lunkern bestimmen. Die Kerbwirkungszahl K_f wird im Folgenden nicht mehr mit K_f ($f = \text{„fatigue“}$), sondern mit K_{fs} ($fs = \text{„fatigue shrinkage“}$) bezeichnet, da die Kerbwirkung nicht mehr eine Funktion der Kerbformzahl, sondern vielmehr des Lunkers selbst ist. In Bild 86 sind dazu alle Nennspannungsamplituden $\sigma_{a,n,Lunker}$ der Schwingproben mit Lunkern über die Neigungen k und k^* im Zeit- bzw. Langzeitschwingfestigkeitsbereich der Spannungsreferenzwöhlerlinie auf deren Abknickpunkt N_k verschoben (schwarze Punkte). Die roten Pfeile in Bild 86 verweisen beispielhaft auf die Verschiebung der Schwingproben mit Lunkern nach der Umrechnung hin. Für die Umrechnung sind nur Schwingproben berücksichtigt, die im Prüfquerschnitt der Schwingproben gebrochen sind und denen somit ein fiktiver Elastizitätsmodul E_f eindeutig zuzuordnen ist.

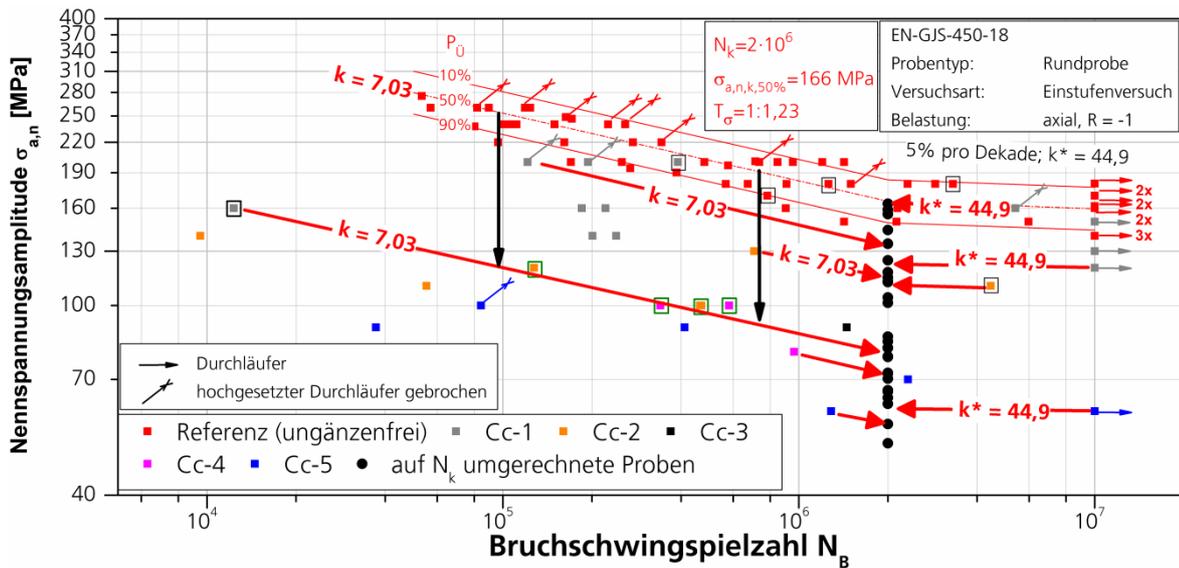


Bild 86 Umrechnung der Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunker auf den Abknickpunkt N_k der Spannungsreferenzwöhlerlinie

Dabei zeigt sich nochmals die Schwierigkeit einer eindeutigen Unterteilung der Lunker in Klassen. So erfasst etwa die Umrechnung der Schwingfestigkeitsamplitude für die Schwingprobe S6-I-G-14 (Cc-1, mit schwarzem Kasten), von einer Lebensdauer von 12.310 Schwingspielen bei $\sigma_{a,n} = 160$ MPa ausgehend, über die Neigung der Zeitschwingfestigkeitsgeraden k der Spannungsreferenzwöhlerlinie ebenso Schwingproben von zwei anderen Lunkerklassen (grüner Kasten), Bild 86. Für die Ableitung einer Schwingfestigkeit für die lokalen, mit Lunkern behafteten Werkstoffbereiche ist es notwendig, jede Schwingprobe gesondert zu betrachten. Es ist zu entscheiden, welcher Überlebenswahrscheinlichkeit P_U die Schwingfestigkeit, die die Schwingprobe mit Lunkern beim Schwingfestigkeitsversuch erreicht hat, zuzuordnen ist. Eine Abschätzung der Überlebenswahrscheinlichkeit P_U der einzelnen Schwingproben mit Lunkern mit den Parametern der Lunkerklassenwöhlerlinien würde in zu großen Streuungen resultieren. Zudem wäre eine spätere singuläre Bewertung der Schwingfestigkeit im Rahmen der Bauteilbeurteilung wiederum an die Lunkerklassenwöhlerlinien und damit auch an eine Lunkerklasseneinteilung der zu beurteilenden Bereiche gekoppelt, was natürlich zu vermeiden ist. Aus diesem Grund sei zunächst angenommen, dass die ermittelte Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 50\%$ entspricht. Die Kerbwirkungszahl K_{fs} wird nun aus den Nennspannungsamplituden $\sigma_{a,n}$ der ungespannten Spannungsreferenzwöhlerlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit

lichkeit $P_U = 50\%$ für alle Schwingproben mit Lunkern bei gleicher Überlebenswahrscheinlichkeit ermittelt. Um einen allgemeingültigen Zusammenhang zu finden und sich nicht an die Kennwerte der Lunkerlassenwöhlerlinien zu binden, sind die Neigung k und k^* an diejenigen der Spannungsreferenzwöhlerlinie des ungänzenfreien Werkstoffzustandes zu koppeln. Diesem Vorgehen liegt die Annahme zu Grunde, dass für den ungänzenfreien sowie den mit Lunkern behafteten Werkstoff das Schwingfestigkeitsverhalten bezüglich der Neigungen k und k^* sowie der Lage des Abknickpunktes der Wöhlerlinie gleich ist.

Als Referenz für die Umrechnung dient in Bild 86 die Spannungswöhlerlinie in **Bild B 38** für den EN-GJS-450-18, die Spannungswöhlerlinie in **Bild B 17** für den EN-GJS-400-18U-LT und die Spannungswöhlerlinie in **Bild B 59** für den EN-GJS-700-2 jeweils für Wechselbelastung, $R_\sigma = -1$, im **Anhang B**. Anschließend wird für jede Schwingprobe mit Lunkern die Kerbwirkungszahl K_{fs} am Abknickpunkt gemäß Gleichung (8) ermittelt. Die Kerbwirkungszahl K_{fs} für jede Schwingprobe mit Lunkern ist dann als Verhältnis der Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n,k}$ der Spannungsreferenzwöhlerlinie am Abknickpunkt zu den umgerechneten Nennspannungsamplituden $\sigma_{a,n,k,Lunker}$ bei gleicher Lebensdauer nach Gleichung (37) zu bestimmen.

$$K_{fs} = \frac{\sigma_{a,n,k}(\text{ungänzenfrei})}{\sigma_{a,n,k,Lunker}(k \text{ und } k^* \text{ ungänzenfrei})} \quad (37)$$

Um die gesuchte Abhängigkeit von Schwingfestigkeit und einem Messwert der zerstörungsfreien Prüfung herzustellen, zeigt Bild 87 die Gegenüberstellung der Kerbwirkungszahl K_{fs} und dem für die jeweilige Schwingprobe mit Lunkern ermittelten, fiktiven Elastizitätsmodul E_f für den EN-GJS-400-18U-LT, den EN-GJS-450-18 und den EN-GJS-700-2.

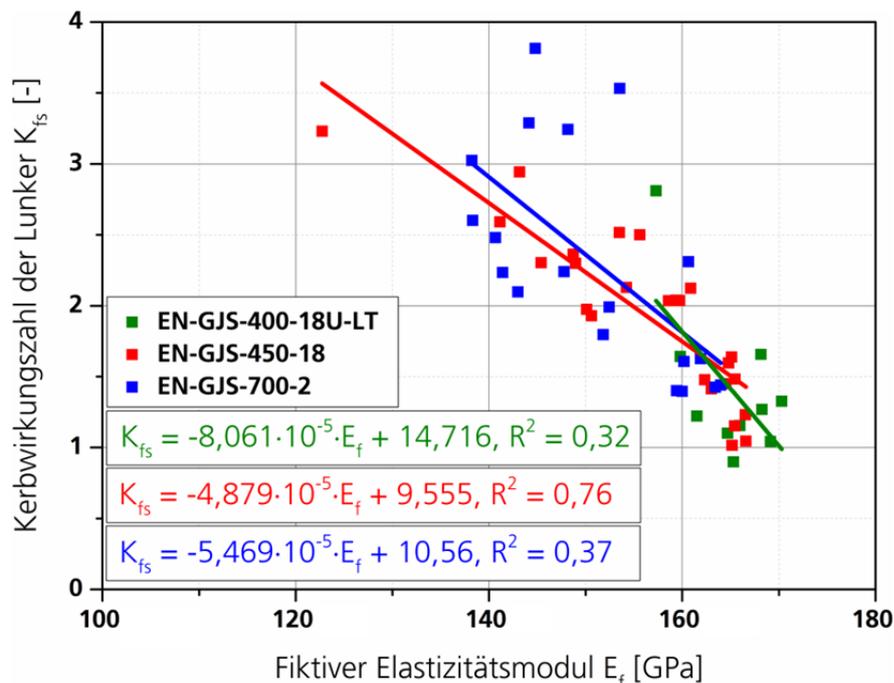


Bild 87 Kerbwirkungszahl K_{fs} in Abhängigkeit des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f für das gesamte Prüfvolumen der Schwingprobe

Die Darstellung zeigt, dass für die drei untersuchten Werkstoffe nur eine ungenügende Regression zwischen fiktivem Elastizitätsmodul E_f und der Kerbwirkung K_{fs} besteht. Allerdings steht der im Prüfvolumen als lokal zu betrachtenden Kerbwirkungszahl K_{fs} in Bild 87 der fiktive Elastizitätsmodul E_f für das komplette Prüfvolumen der Schwingprobe gegenüber. Aus diesem Grund kann eine Auftragung der Kerbwirkung K_{fs} über einem lokal, für den Bereich des Versagens bzw. des kritischen Lunkers ermittelten, fiktiven Elastizitätsmodul E_f hilfreich sein. Wie schon in Kapitel 6.2 gezeigt, berücksichtigt dieses Vorgehen, dass bei der experimentellen Bestimmung der Dichte ρ_w ungenügende Probenbereiche durch das Heraustrennen des kompletten Probenprüfvolumens überrepräsentiert sein können. Der Wert für den fiktiven Elastizitätsmodul E_f liegt jedoch aus tatsächlichen Messungen nicht vor. Er lässt sich dennoch für jede Schwingprobe über die Regressionsgleichung zwischen gemessener Dichte ρ_w und der Dichte aus dem Röntgenbild ρ_R , Bild 80, Gleichung (38), sowie derer zwischen der gemessenen Dichte ρ_w und dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f , Bild 85, Gleichung (39), für ein beliebiges Volumen im Bereich der Bruchposition bestimmen.

$$\rho_w = 0,40 \cdot \rho_R + 4,60 \quad (38)$$

$$E_f = 65,2 \cdot \rho_w - 296,4 \quad (39)$$

Für ein Volumen von ± 3 mm um die experimentell bestimmte Bruchposition der Schwingproben mit Lunkern ergibt sich somit der in Bild 88 gezeigte Zusammenhang zwischen dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f und der Kerbwirkungszahl K_{fs} . Liegt die Bruchposition wiederum zu nahe am Ende des Probenprüfvolumens zum Übergangsradius, so wird auf Grund des endlichen Bereiches die Dichte nur bis zum Beginn des Übergangsradius ausgewertet. Dies ist jedoch nur bei 7 Proben der Fall. Es wird, wie bei der Regression zwischen Dichte ρ_w und fiktivem Elastizitätsmodul E_f , ein linearer Zusammenhang unterstellt und angenommen, dass bei einer geringeren Dichte ρ_w eine höhere Kerbwirkungszahl K_{fs} vorliegt. Durch diese Darstellung verbessern sich sowohl Streuung als auch das Bestimmtheitsmaß deutlich. Auch hierbei wird der fiktive Elastizitätsmodul nur bis zum Erreichen des Übergangsradius ausgewertet. Für den Zusammenhang zwischen fiktivem Elastizitätsmodul E_f und der Kerbwirkung K_{fs} besteht damit der werkstoffinvariante Zusammenhang nach Gleichung (40). Dabei liegt die Größe des Volumens von ± 3 mm um die Bruchposition herum im Auflösungsbereich des Ultraschall Sampling Phased Array, also im tatsächlich an Großgussbauteilen nachweisbaren Bereich. Entgegen Untersuchungen am Stahlguss /Har04, Har09/ ergibt die Ableitung der Kerbwirkungszahl K_{fs} für ein kleineres Volumen, z.B. $\pm 0,5$ mm um die tatsächliche Bruchposition, auf Grund der komplexen Bruchgeometrie und Bruchtopographie der Schwingproben mit Lunkern beim Gusseisen mit Kugelgraphit, Bild 74, wieder eine deutliche Verschlechterung der Regression. Zudem ist ein entsprechend kleiner Bereich von 1 mm und weniger am Großgussbauteil zerstörungsfrei schwer nachweisbar.

$$K_{fs} = -6,894 \cdot 10^{-5} \cdot E_f + 13,126 \quad (40)$$

Mit der gezeigten Regression besteht nun ein Zusammenhang zwischen der Spannungsreferenzwöhlerlinie für den ungenügenden Werkstoffzustand und einer Messgröße der zerstörungsfreien Prüfung in Form der Dichte ρ bzw. dem daraus bestimmten fiktiven Elastizitätsmodul E_f . Es ist somit nun möglich bei Kenntnis des lokalen, fiktiven Elastizitätsmoduls E_f bei einer Auflösung von wenigen Millime-

tern (± 3 mm) die Schwingfestigkeit aus einer bekannten Spannungsreferenzwöhlerlinie unter Berücksichtigung einer geforderten Bauteillebensdauer abzuleiten. Die Regression ist dabei im Bereich von fiktiven Elastizitätsmoduli zwischen 135 GPa und 174 GPa gültig, deckt jedoch keine Risse in Bauteilen ab, da diese definitionsgemäß an der Risspitze eine unendlich hohe Spannung erzeugen.

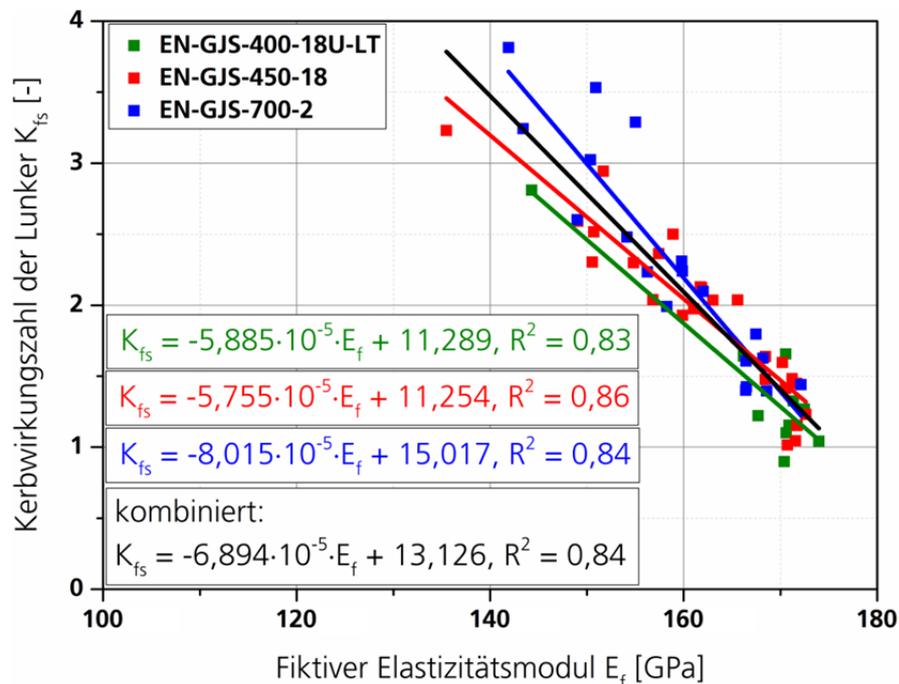


Bild 88 Kerbwirkungszahl K_{fs} in Abhängigkeit des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f für ein Volumen ± 3 mm um die Bruchposition

6.4 Zusammenfassung

Um die Schwingfestigkeit mit Kennwerten der zerstörungsfreien Prüfung zu verbinden, eignet sich die Gegenüberstellung von Dichte und Schwingfestigkeit für eine geforderte Lebensdauer. Für alle drei Werkstoffe ergibt sich ein exponentieller Zusammenhang, wenn die Schwingfestigkeit bei festgelegter Lebensdauer über der Dichte, ermittelt durch Heraustrennen und Wiegen für den gesamten Prüfquerschnitt der Schwingproben, abgebildet wird. Auch aus dem Röntgenbild selbst lässt sich die Dichte ermitteln. Diese ist jedoch auf Grund der Krümmung der Schwingproben sowie der Nichtlinearität des Röntgenfilms über eine lineare Regression auf die tatsächliche Dichte umzurechnen.

Weitere Untersuchungen zeigen, dass auch die ungefähre Position der Schwingbruchfläche über eine Grauwertbetrachtung aus dem digitalisierten Röntgenbild ermittelt werden kann. Ist die spätere Bruchposition in etwa bekannt, lässt sich im Vorhinein zum eigentlichen Schwingfestigkeitsversuch die Dichte aus dem Röntgenbild für ein eingeschränktes Volumen um die spätere Bruchposition deutlich exakter bestimmen. Die Folge ist eine Reduktion von Streuungen bei der Regression zwischen Schwingfestigkeit und Dichte. Gegenüber der mit Herausforderungen an den Prüfer verbundenen visuellen Einteilung der Schwingproben in Lunckerklassen ist nunmehr eine genauere Abschätzung der Schwingfestigkeit von Bauteilbereichen mit Lunkern über die Durchstrahlungsprüfung bei festgelegter Lebensdauer möglich. Dies bietet sich besonders für diejenigen Bauteile aus Gusseisen mit Kugelgraphit an, die zu kleine Oberflächen für den Aufsatz eines Ultraschallprüfkopfes der Sampling Phased

Array Technik besitzen, jedoch zu groß sind, um schnell und kostengünstig eine Röntgen-Computertomographie durchführen zu können. Dabei liegt ein Faktor von 100 für die Kosten sowie ein Faktor von 1000 für die Zeit zur Erstellung einer Röntgen-CT-Aufnahme im Vergleich zu einer einfachen Durchstrahlung im Rahmen des Üblichen. Die Grenzen der Anwendbarkeit der Durchstrahlungsprüfung zur Detektion von Lunkern liegen dabei generell in den zur Verfügung stehenden Prüf- und Schutzeinrichtungen in Gießereien für Bauteile mit Wanddicken ab 100 mm und Massen bis 320 t. Weitere Grenzen ergeben sich durch die Auflösung der gefundenen Werkstoffungängen. Abhängig von Bauteilwerkstoff und -wanddicke sowie Prüfeinrichtung sind Lunker mit Abmessungen unter 1,5 mm (Mikrolunker) nicht detektierbar.

Um eine allgemeingültige Beziehung zwischen der Lebensdauer der Schwingproben und der Schwingfestigkeit herstellen zu können, wird anschließend eine Methode vorgestellt, die die Dichteinformation z.B. aus dem Ultraschall Sampling Phased Array, den lokal an einer Schwingprobe gemessenen fiktiven Elastizitätsmodul sowie die Spannungswöhlerlinie für den ungängenfreien Werkstoffzustand miteinander verbindet. Dazu lässt sich zunächst zeigen, dass die Dichte ρ und der an einer Schwingprobe gemessene fiktive Elastizitätsmodul E_f linear miteinander korrelieren und somit eine Abhängigkeit zwischen einer Messgröße der zerstörungsfreien Prüfung mit einer mechanischen Messgröße der Schwingprobe besteht. Weiterhin lässt sich zeigen, dass der aus einer Umrechnung der lokal gemessenen Dichte in einem kleinen Volumen (± 3 mm) um die Bruchposition der Schwingprobe herum bestimmte, fiktive Elastizitätsmodul E_f von der Kerbwirkung K_{fs} der dazugehörigen Schwingprobe ebenfalls linear abhängig ist. Dies verbindet somit nicht nur die Spannungswöhlerlinie des ungängenfreien Werkstoffzustandes mit der Bauteillebensdauer von Bauteilbereichen mit Lunkern, sondern auch die Schwingfestigkeit dieser lokalen Bauteilbereiche mit einer Messgröße der zerstörungsfreien Prüfung, die an Großgussbauteilen tatsächlich mit Ultraschall Sampling Phased Array messbar ist. Die Grenzen des Ultraschall Sampling Phased Array liegen dabei auf zwei Seiten. Zum einen lässt sich die Messtechnik noch nicht auf allen Bauteilgeometrien anwenden. Zum anderen ist die Auflösung begrenzt. Diese liegt in Abhängigkeit der Prüffrequenz und des Werkstoffes bei mindestens 6 mm /Lun14/. Kleinere Lunker werden dennoch berücksichtigt, da die lokal aufgelöste Dichteinformation des Ultraschall Sampling Phased Array diese in einem integralen Wert mit abbildet.

7 Schwingfestigkeitsbeurteilung auf Basis der zerstörungsfreien Prüfung

7.1 Beurteilungskonzept

Die Abhängigkeit zwischen Kerbwirkung K_{fs} und dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f der bereits untersuchten Schwingproben mit Lunkern hat gezeigt, dass sich aus einer ungänzenfreien Spannungsreferenzwöhlerlinie die Schwingfestigkeit von Schwingproben mit Lunkern ableiten lässt, wenn Messergebnisse für die Dichte an der Stelle der Lunker vorliegen. Damit besteht nun die Möglichkeit, Großgussbauteile der hier vorgestellten Werkstoffe zutreffend zu beurteilen. Wie bereits beschrieben, berücksichtigt die Spannungsreferenzwöhlerlinie bereits Mikrolunker mit maximalem Feret $\leq 1,5$ mm und den durch sie hervorgerufenen Schwingfestigkeitsabfall, da diese generell im Grundwerkstoff der untersuchten Schwingproben vorliegen und vom Ultraschall Sampling Phased Array nicht aufgelöst werden können /Lun14/.

Ausgangspunkt für das Beurteilungskonzept ist die Dichtebestimmung durch zerstörungsfreie Prüfmethoden wie dem Ultraschall Sampling Phased Array. Liegen lokale Werte für die Dichte ρ im Bauteil vor, ist im nächsten Schritt der lokale, fiktive Elastizitätsmodul E_f aus dem linearen Zusammenhang zur gemessenen Dichte ρ zu ermitteln. Wie groß dabei die Bauteilvolumina sind, für die sich die Dichte bestimmen lässt, ist abhängig von der Auflösung des Ultraschall Sampling Phased Array. Die Auflösung hängt wiederum mit der Prüffrequenz des Ultraschallprüfkopfes ab, dessen Wahl an die lokale Bauteildicke gekoppelt ist. Es ist mit Auflösungen der Dichte in Volumenelementen mit 6 mm Kantenlänge und weniger zu rechnen /Lun14/. Verglichen mit den durch Lunker durchsetzten Volumina, die in Großgussbauteilen mehrere 1.000 mm³ annehmen können, ist die Auflösung somit als ausreichend zu bezeichnen. Auch die im zu beurteilenden Bauteilvolumen auftretende Spannungsgradienten sind bei den zu beurteilenden Bauteilgrößen im Vergleich zur möglichen Auflösung der lokalen Dichte so klein, dass innerhalb der aufgelösten Bereiche eine Änderung der Spannung als sehr klein anzunehmen ist. In Abhängigkeit der lokalen, fiktiven Elastizitätsmoduli lassen sich nun Spannungs-Dehnungs-Diagramme aufstellen bzw. Kerbwirkungszahlen K_{fs} für jedes lokale Bauteilvolumen bestimmen.

Daraus ergeben sich für die Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit auf Basis des Ultraschall Sampling Phased Array zwei Möglichkeiten. Zum einen wird der Konstrukteur mit den Informationen über die Dichteverteilung aus dem Ultraschall Sampling Phased Array in die Lage versetzt, die lokal mit Lunkern behafteten Bauteilbereiche direkt und präziser über die Finite-Element-Methode (FEM) zu modellieren und diesen jeweils einen fiktiven Elastizitätsmodul E_f anhand der linearen Regression zur Dichte ρ_w zuzuweisen. Liegen Informationen zur örtlichen Lunkerklasse vor, sind für die Beurteilung der lokal auftretenden Spannungen σ die Beanspruchbarkeiten aus den für die drei untersuchten Werkstoffe werkstoffübergreifend ermittelten Lunkerklassenwöhlerlinien H-1 bis H-5 der lokalen Beanspruchung gegenüberzustellen. Zu berücksichtigen sind dann auch die Streuungen in Abhängigkeit der Lunkerklasse. Gegebenenfalls sind, auf Grund der Struktur der Lunkerbereiche, im angrenzenden Grundwerkstoff auftretende Spannungsüberhöhungen mit der Schwingfestigkeit des ungänzenfreien Grundwerkstoffes zu vergleichen. Diese Möglichkeit setzt jedoch voraus, dass eine Durchstrahlungsprüfung am Bauteil durchführbar ist. Die zweite Möglichkeit besteht darin, das zu beurteilende Bauteil mit Hilfe der FEM hinsichtlich der lokal vorliegenden Spannungen zu analysieren, indem zunächst nur der Elastizitätsmodul E des ungänzenfreien Werkstoffs berücksichtigt wird. Weichen die tatsächlichen

Elastizitätsmoduli z.B. an Spannungs-Hot-Spots auf Grund vorliegender Lunker vom Elastizitätsmodul jedoch ab, kann nun ausgehend von der Spannungsreferenzwöhlerlinie, der aus der FE-Analyse lokal ermittelten Spannung im ungeschnittenen Modell und der Zuordnung von Kerbwirkung K_{fs} zum fiktiven Elastizitätsmodul E_f eine lokal ertragbare Schwingfestigkeit bzw. Spannungswöhlerlinie ermittelt werden. Für die Auslegung wird dementsprechend neben den Dichteinformationen aus dem Ultraschall Sampling Phased Array lediglich eine Spannungswöhlerlinie für den ungeschnittenen Werkstoffzustand benötigt. Eine Anwendbarkeit für übliche Auslegungsprozesse sowie für Schädigungsrechnungen im Bereich der Zeit- und Langzeitschwingfestigkeit ist damit gegeben. Da die Ermittlung der Regression zwischen Kerbwirkung K_{fs} und fiktivem Elastizitätsmodul E_f der Lunkerbereiche (Bild 88) von der Spannungsreferenzwöhlerlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 50\%$ ausgeht, wird unterstellt, dass auch der experimentell ermittelten Schwingfestigkeit für die Schwingproben mit Lunkern eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 50\%$ zu Grunde liegt. Für die Schwingfestigkeitsabschätzung der lokalen Lunkerbereiche aus der 50 %-Spannungsreferenzwöhlerlinie steht damit nur ein 50 %-Wert dieser ab-geschätzten Schwingfestigkeit zur Verfügung. Auf Grund dessen und den durch die Umrechnungen vorhandenen Streuungen ergibt sich teilweise eine Überschätzung der Schwingfestigkeit des Lunkers, was Sicherheitsbetrachtungen notwendig macht. Dies zeigt Bild 89 beispielhaft für zwei Schwingproben des EN-GJS-450-18.

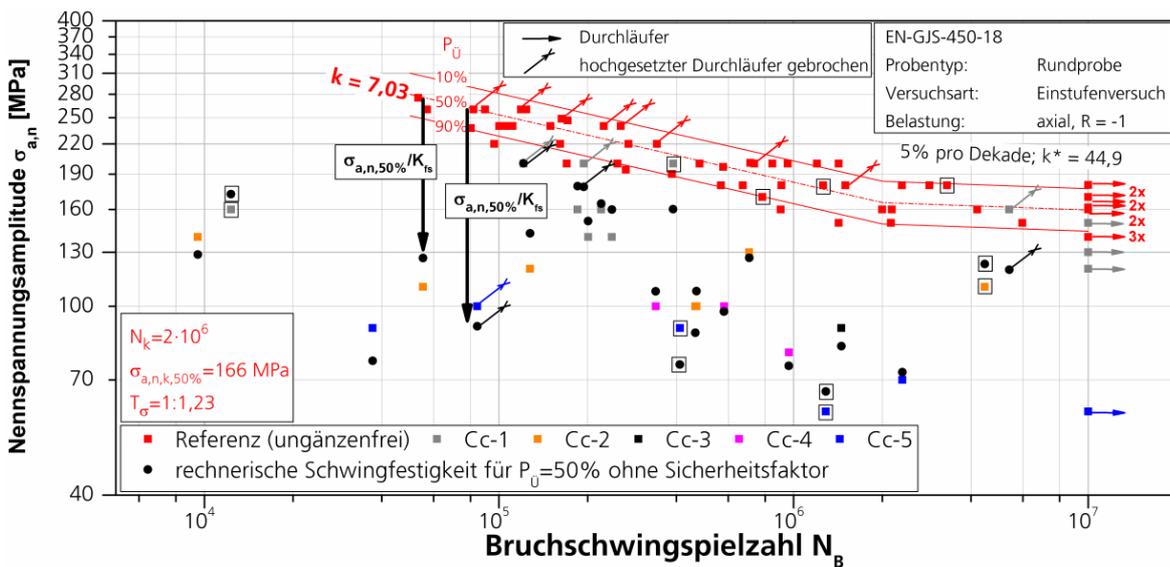


Bild 89 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern

Die Berücksichtigung von Sicherheiten soll in zwei Schritten beispielhaft für den EN-GJS-450-18 geschehen. Diese ist später aber auch für die beiden anderen untersuchten Werkstoffe gültig. Die Auslegung z.B. von Windenergieanlagen nach /GL10/ geht von einer Bemessungswöhlerlinie für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 97,7\%$ aus. Daher sind zur Abschätzung eines Sicherheitsfaktors zunächst alle Nennspannungsamplituden $\sigma_{a,n,Lunker}$ der Schwingproben mit Lunkern auf $P_U = 97,7\%$ umzurechnen, Bild 90. Dazu wird davon ausgegangen, dass die im Versuch ermittelte Schwingfestigkeit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 50\%$ entspricht. Bild 90 zeigt dazu die Nennspannungsamplituden der Schwingproben mit Lunkern $\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}$, die mit $T_\sigma = 1:1,30$ gemäß Gleichung (41) von einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 50\%$ auf $P_U = 97,7\%$ umgerechnet sind (grüne Dreiecke, Bild 90) /Hai06/. Dabei entspricht $T_\sigma = 1:1,30$ dem in /Kau98/ für ungeschnittenen

GGG-40 und dem bei den hier vorliegenden Schwingfestigkeitsuntersuchungen maximal ermittelten Streumaß T_σ für den ungänzenfreien Werkstoffzustand. Es wird angenommen, dass dieses Streumaß auch für die Schwingproben mit Lunkern gültig ist. Dies ist im Vergleich zu den Streumaßen der Lunkerlassenwöhlerlinien H-1 bis H-5 (Tabelle 8) als ausreichend anzunehmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass je Lunkerlassenwöhlerlinie Lunker gleicher Lunkerlassen jedoch unterschiedlicher Geometrien vorliegen. Bei der Ermittlung einer Lunkerwöhlerlinie für Schwingproben mit vergleichbarer Lunker-geometrie sinkt das Streumaß T_σ dementsprechend ab, da in diesem Fall keine Änderung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens innerhalb der zu prüfenden Schwingproben auftritt. Diese Annahme bestätigen Untersuchungen von /Kau98/, bei denen bei den Schwingfestigkeitsuntersuchungen für gleiche Werkstoffqualitäten zum ungänzenfreien Werkstoffzustand vergleichbare Streumaße ermittelt werden. Dies bezieht gezielt auch Werkstoffqualitäten mit Ungänzen mit ein /Kau98/.

$$\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%} = 10^{lg} \sigma_{a,n,Lunker,50\%}^{-2,0,39 \cdot lg\left(\frac{1}{T_\sigma}\right)} \quad (41)$$

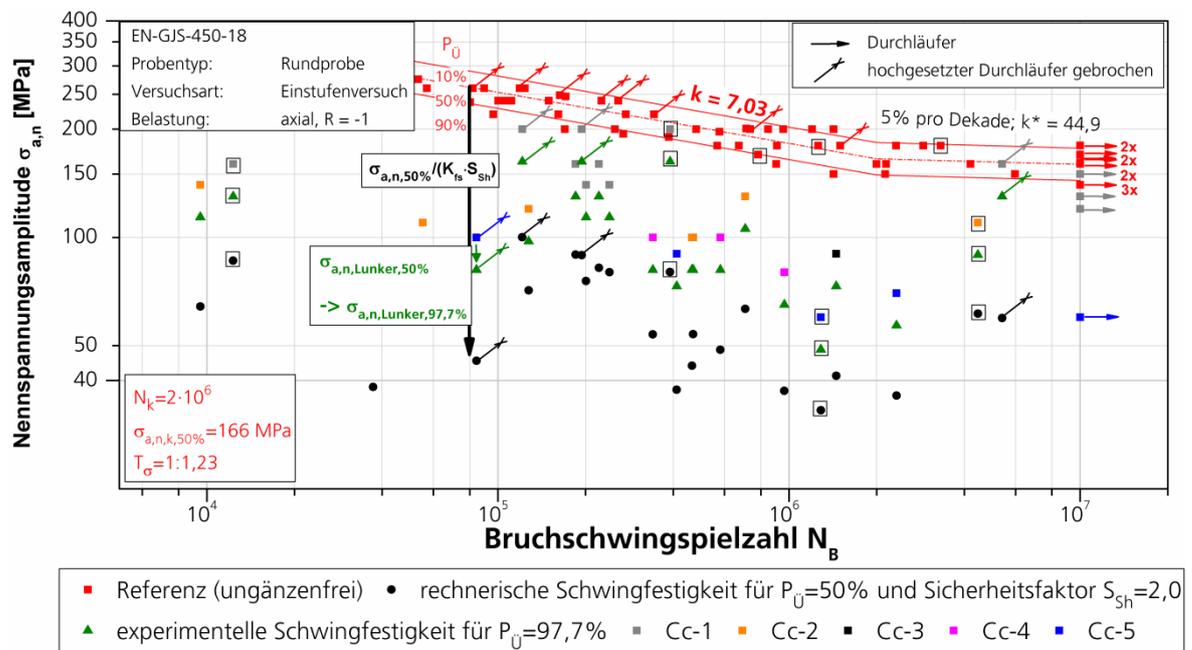


Bild 90 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern mit Sicherheitsfaktor S_{Sh}

Um eine Abschätzung der Schwingfestigkeit für $P_U = 97,7\%$ über die Spannungsreferenzwöhlerlinie und die Beziehung zwischen der Kerbwirkung K_{fs} und dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f herzustellen, wird ein Sicherheitsfaktor S_{Sh} (Sicherheitsfaktor Lunker (engl.: shrinkage)) für die drei Werkstoffe in Höhe von $S_{Sh} = 2,0$ eingeführt. Dieser Wert ergibt sich, wenn alle über K_{fs} abgeminderten Nennspannungsamplituden der Spannungsreferenzwöhlerlinie für $P_U = 50\%$ so weit reduziert werden, dass diese mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90% mindestens eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 97,7\%$ aufweisen. Dazu sind alle über das Streumaß $T_\sigma = 1:1,30$ auf $P_U = 97,7\%$ umgerechneten Nennspannungsamplituden der Schwingproben mit Lunkern $\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}$ über eine zusätzliche Sicherheitszahl j_σ weiter abzumindern, die bei $T_\sigma = 1:1,30$ einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von

90 % entspricht ($j_\sigma = 1,14$), Bild 90. Tabelle 11 zeigt zum Vergleich verschiedene Sicherheitszahlen j_σ in Abhängigkeit des Streumaßes T_σ sowie der Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}}$.

Alle über K_{fs} und S_{sh} bestimmten Nennspannungsamplituden aus der Spannungsreferenzwöhlerlinie für $P_{\bar{0}} = 50\%$ dürfen dann maximal gleich, sollten besser aber kleiner der über die Sicherheitszahl j_σ abgeminderten Nennspannungsamplituden der Schwingproben mit Lunkern $\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}$ für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ sein, Gleichung (42). Damit ist sichergestellt, dass die über S_{sh} und K_{fs} bestimmten Spannungsamplituden bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90 % mindestens einer Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{0}} = 97,7\%$ entsprechen.

Tabelle 11 Sicherheitszahlen, Streumaße und Überlebenswahrscheinlichkeiten $P_{\bar{0}}$ aus /Hai06/

Streumaß T_σ [-]	1:1,50	1:1,30	1:1,30	1:1,30
Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}}$ [%]	97,7	90,0	97,7	99,996
Sicherheitszahl j_σ [-]	1,37	1,14	1,23	1,50

$$\frac{\sigma_{a,n,50\%}}{K_{fs} \cdot S_{sh}} \leq \frac{\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}}{j_\sigma} \quad (42)$$

Unter Berücksichtigung des Sicherheitsfaktors S_{sh} ergeben sich somit die Schwingfestigkeiten der einzelnen Versuchspunkte gemäß Bild 90 (schwarze Punkte). Die entsprechenden Diagramme für die Schwingproben mit Lunkern des EN-GJS-400-18U-LT und des EN-GJS-700-2 finden sich im **Anhang B** in **Bild B 88** und **Bild B 89**. Die Sicherheit S_{sh} ist natürlich entsprechend anzupassen, wenn andere Überlebens- bzw. Vertrauenswahrscheinlichkeiten abzudecken sind. Weitere spannungsbasierte Sicherheitsfaktoren sind seitens der Beanspruchung in Form einer erhöhten Spannung in der Spannungsreferenzwöhlerlinie zu berücksichtigen.

Den vollständigen Ablauf der Schwingfestigkeitsbeurteilung fassen Bild 92 und Bild 93 zusammen. Es bietet sich damit die Möglichkeit, aus der Dichte als Messgröße der Ultraschallprüfung sowie einer Spannungsreferenzwöhlerlinie für den ungesicherten Werkstoffzustand die Schwingfestigkeit des mit Lunkern behafteten Bauteilbereiches bei geringen Streuungen abzuleiten. Die Bestimmung der lokalen Schwingfestigkeit ist somit automatisch auch an die Neigungen der Spannungsreferenzwöhlerlinie gekoppelt und ermöglicht die Bestimmung der Schwingfestigkeit eines Lunkerbereichs für verschiedene Lebensdauern anhand einer zu geringeren Spannungsamplituden hin verschobenen Spannungsreferenzwöhlerlinie. Dazu bietet die Methode weitere Vorteile. So kann nun gegenüber dem heutigen Auslegungsstand von der Bestimmung einer Gütestufe aus einem Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung und der pauschalen und wissenschaftlich nicht belegten Herabstufung der Bemessungswöhlerlinie, etwa im synthetischen Auslegungskonzept, abgesehen werden. Eine Herabstufung der Beanspruchbarkeit bzw. der Lebensdauer eines kompletten Bauteils ist zugunsten der Möglichkeit einer lokalen Bewertung der Lebensdauer zu verwerfen. Ein Bauteil ist damit nicht zwingend zu verwerfen, wenn das neue Beurteilungskonzept die geforderte Lebensdauer an einer mit Lunkern behafteten Stelle rechnerisch nachweist, die bisher zu einer globalen Herabstufung der Bauteilbeanspruchbarkeit geführt hat. Im gleichen Zug ist die Lunkerklasseneinteilung zu verwerfen, wenn die Möglichkeit besteht, die Dichte lokal und zerstörungsfrei beispielweise mittels Ultraschall zu bestimmen. Zudem ist im Vergleich zur bisherigen Bestimmung der Lebensdauer über mehrere Lunkerklassenwöhlerlinien ledig-

lich die Bestimmung einer Spannungsreferenzwöhlerlinie sowie der lokalen Dichte notwendig, um die Lebensdauer abzuschätzen. Bei gleichem Werkstoffzustand dient dann eine Spannungsreferenzwöhlerlinie als Grundlage für die Schwingfestigkeitsbeurteilung eines kompletten Bauteils, sofern diese den ungeschnittenen Werkstoffzustand des kompletten Bauteils hinreichend beschreibt und damit ein technologischer Größeneinfluss auf die Beanspruchbarkeit auszuschließen ist. Dies konnte im Rahmen der Schwingfestigkeitsuntersuchungen nicht abgebildet werden und ist individuell durch den Anwender sicherzustellen.

Die Übertragbarkeit der an den Schwingproben ermittelten Schwingfestigkeiten auf das Bauteil kann dann erfolgen, wenn eine Übereinstimmung des Werkstoffes, des Beanspruchungszustandes, des Versagenskriteriums sowie des Belastungsablaufs und der Umgebungsbedingungen zwischen Schwingprobe und Bauteil vorliegt /So88a, So88b/. Die Vergleichbarkeit des Werkstoffes zwischen den untersuchten Schwingproben und dem späteren Bauteil ist auf Grund der dickwandigen Halbzeuge sowie eines Bauteils einer Windenergieanlage, aus denen die Schwingproben entnommen werden, als gegeben anzunehmen. Mit den ermittelten Schwingfestigkeiten liegen Ergebnisse für Raumtemperatur und Axialbelastung vor. Als Beanspruchungszustand wird eine Nennspannung bei den Schwingproben zu Grunde gelegt. Diese ist der numerisch ermittelten 1. Hauptspannung auf Basis der Normalspannungshypothese /Gr79b, Mu94a, Neu86, Son85/ für Gusseisen mit Kugelgraphit gegenüberzustellen. Örtliche Spannungsgradienten werden in der Beurteilungsmethode nicht berücksichtigt, da diese im Vergleich zum untersuchten höchstbeanspruchten Volumen $HBV_{90\%}$ der Schwingproben und zur Auflösung der Dichte durch die Ultraschalltechnik bei Großgussbauteilen als vergleichsweise klein anzunehmen sind. Die Methode lässt also die lokale Beurteilung von Werkstoffbereichen in solchen flachen Spannungsgradienten ohne weiteres zu. Auf Grund aufwendiger Schutzmaßnahmen gegen Korrosion am Bauteil ist für die Übertragbarkeit der schwingfestigkeitsmindernde Einfluss einer korrosiven Beanspruchung als klein anzunehmen. Die Untersuchung der Schwingproben unterscheidet zudem nicht zwischen angeschnittenen und eingebetteten Lunkern, sodass die Beurteilungsmethode eine Allgemeingültigkeit für Lunker im Bereich von Gussbauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit besitzt. Als Versagenskriterium ist der Bruch der Schwingproben definiert. Gleichzeitig liegt jedoch zwischen dem Anriss und dem Bruch der Schwingprobe lediglich eine kurze Rissfortschrittslebensdauer, die etwa 10 bis 30 % der Gesamtlebensdauer ausmacht. Untersuchungen an Stahlwerkstoffen aus /Lie68, Son86/ (Bild 91) bestätigen dies.

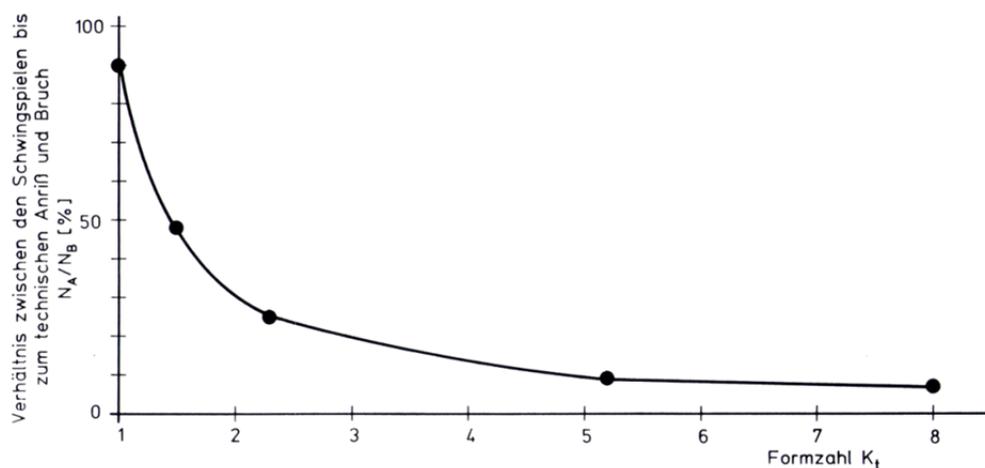


Bild 91 Verhältnis zwischen Anriss- und Bruchschwingspielzahl in Abhängigkeit der Kerbformzahl K_t an Stahlwerkstoffen nach /Lie68/ aus /Son86/

Auf Grund des weniger duktilen Werkstoffverhaltens und der höheren Kerbunempfindlichkeit des Gusseisens mit Kugelgraphit gegenüber Stahl ist vielmehr zu erwarten, dass das Verhältnis von Anriss- zu Bruchschwingspielzahl auch bei höheren Formzahlen K_t noch nahe 100 % liegt. Aus diesem Grund ist in den Untersuchungen zur Lebensdauer der Schwingproben mit Lunkern die Anrisslebensdauer gleich der Bruchlebensdauer zu setzen. Am Bauteil wird später in der Regel der Anriss oder der Verlust der Steifigkeit als versagenskritisch bewertet und kann somit der hier ermittelten Lebensdauer an Schwingproben gegenübergestellt werden.

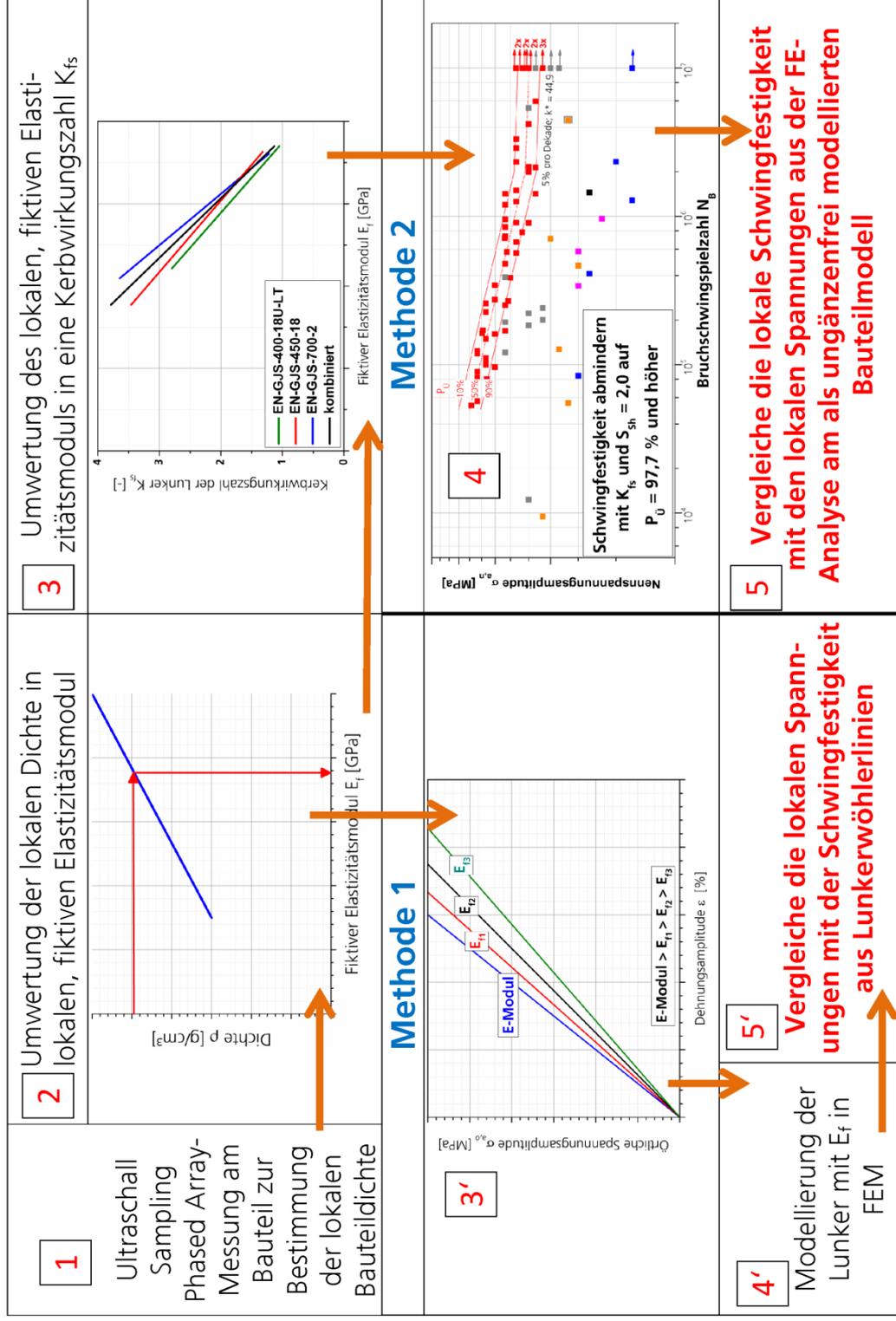


Bild 92 Ablaufdiagramm der Schwingfestigkeitsbeurteilung von Großschraubteilen mit Lunkern

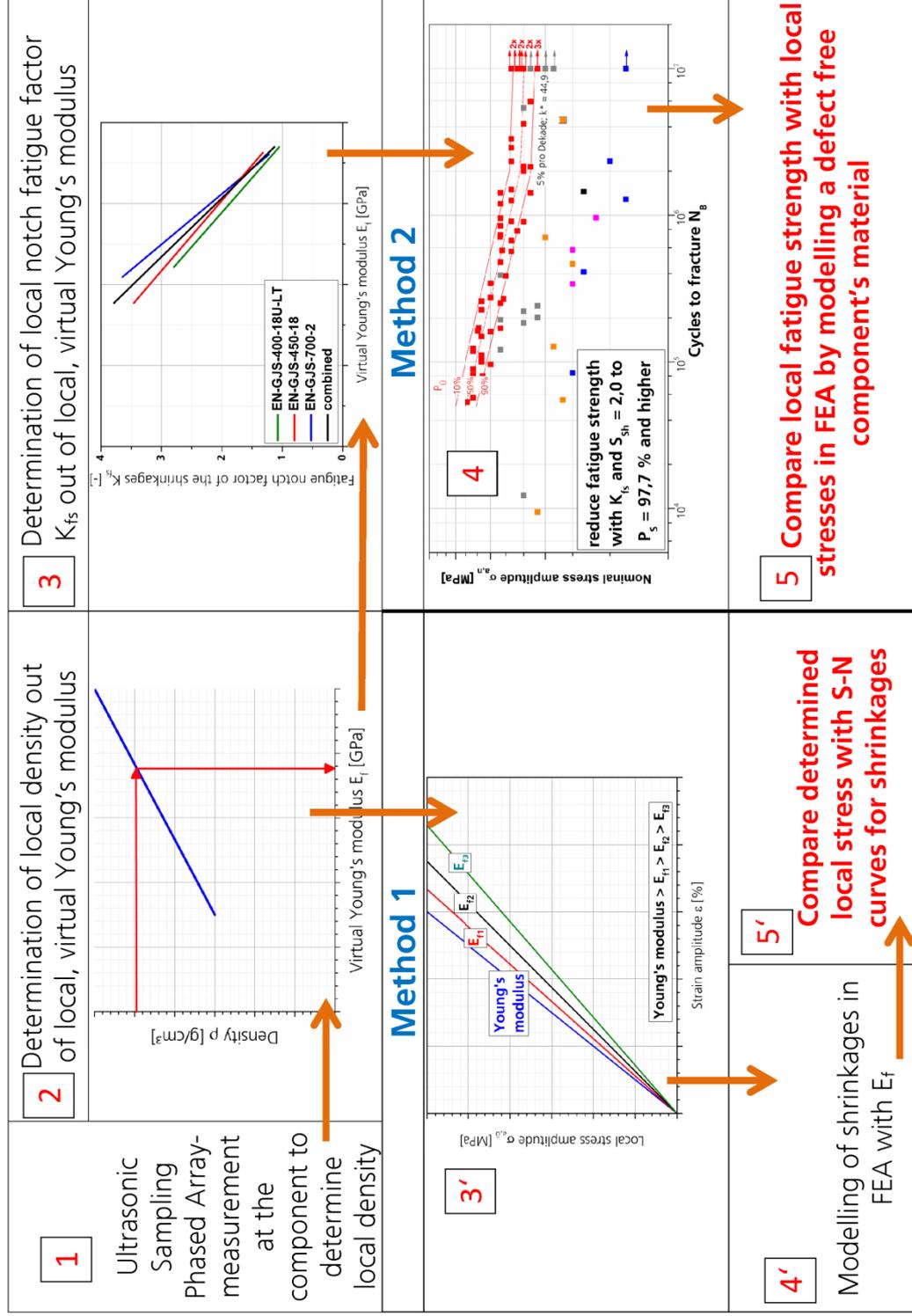


Bild 93 Flowchart of fatigue assessment of thick-walled cast components with shrinkages

7.2 Verifikation

Um die Ergebnisse des Beurteilungskonzeptes zu bewerten, wird eine Gegenüberstellung zur Auslegung nach dem Stand der Technik nach /GL10/ sowie zu den ermittelten Lunkerlassenwöhlerlinien durchgeführt. Hierzu dienen die Nennspannungsamplituden der zyklisch geprüften Schwingproben mit Lunkern der drei Werkstoffe als Vergleich, die mit $T_\sigma = 1:1,30$ auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 97,7\%$ und zusätzlich durch die Sicherheitszahl $j_\sigma = 1,14$ für eine Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90% abgemindert sind. Für die Abschätzung der Beanspruchbarkeit der Schwingproben mit Lunkern wird neben dem vorgestellten Beurteilungskonzept auch das Vorgehen über die für die Lunkerlassen ermittelten Wöhlerlinien und unter der Annahme, dass die Schwingproben Bauteilen für den Bereich der Windenergie entsprechen, über die Gütestufeneinteilung nach /GL10/ dargestellt. Dies findet bei den drei Herangehensweisen für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 97,7\%$ statt.

Zunächst sei das Vorgehen auf Basis der werkstoffübergreifend für die einzelnen Lunkerlassen ermittelten Wöhlerlinien betrachtet. In Abhängigkeit der Lunkereinteilung nach den Cc-Klassen aus der Durchstrahlungsprüfung nach dem Stand der Technik wird für jede geprüfte Schwingprobe mit Lunkern und deren zugehörige Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n,Lunker}$ (Ergebnistabellen mit Einzelergebnissen im **Anhang T**), die Nennspannungsamplitude für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 97,7\%$ $\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}$, wie beispielhaft in Bild 94 dargestellt, ermittelt. Dazu wird zuerst über das spezifische Streumaß jeder Lunkerwöhlerlinie die Wöhlerlinie für $P_U = 97,7\%$ mit Hilfe von Gleichung (41) bestimmt. In Abhängigkeit der experimentellen Lebensdauer N der jeweiligen Schwingproben mit Lunkern wird dann die Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n,Lunker,97,7\%}$ aus dieser Wöhlerlinie für $P_U = 97,7\%$ berechnet. Dies entspricht einer gedachten Verschiebung der Schwingfestigkeit in Spannungsrichtung, wie es die senkrechten roten Pfeile in Bild 94 zeigen.

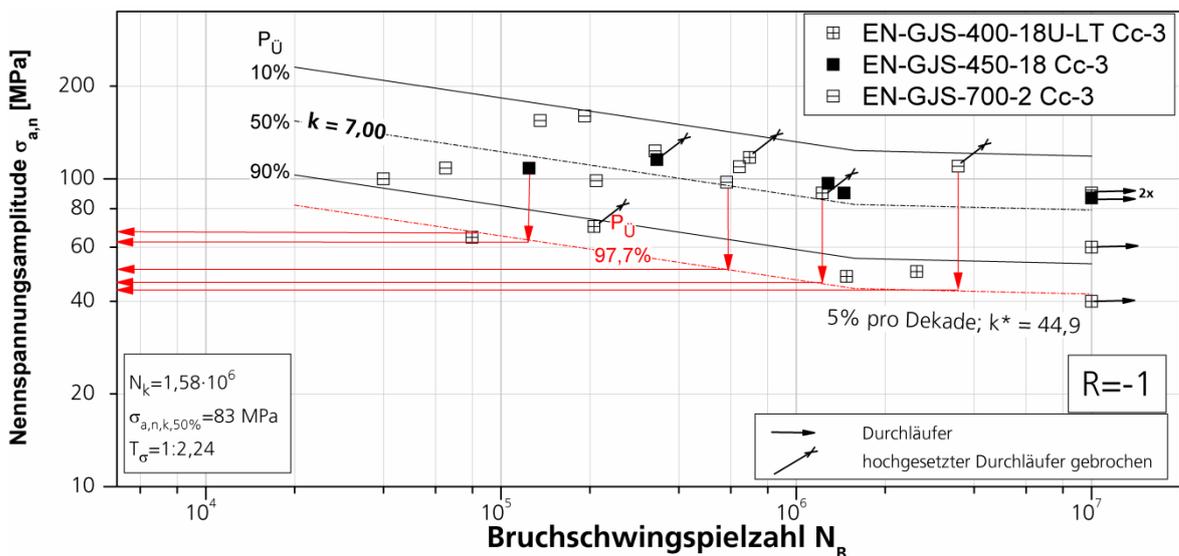


Bild 94 Bestimmung der Schwingfestigkeit jeder Schwingprobe mit Lunkern für $P_U = 97,7\%$ aus der Lunkerwöhlerlinie

Findet eine Abschätzung der Lebensdauer nach /GL10/ statt, ist zunächst in Abhängigkeit der Lunkerklasse bzw. der daraus resultierenden Gütestufe eine Wöhlerlinie für diese Gütestufe zu ermitteln. Das

Vorgehen orientiert sich an den Berechnungen im Kapitel 5.1.3.3. Als Grundlage zur Bestimmung der Wöhlerlinienparameter dienen nun die quasistatischen Kennwerte aus dem Bereich um die Lunker (innen) nach Tabelle 4. Somit bleibt auch jetzt der Wanddickenfaktor S_t unberücksichtigt, wohingegen die Gütestufe in die Berechnung eingeht. Nach /DIN90/ gilt für schwammartige Lunker in Wand-dicken bis 50 mm und Buchstabe „Cc“ die gleiche Gütestufennummer wie die dem Lunker zugewiesene Lunkerklassennummer. Somit entspricht beispielsweise ein Lunker Cc-2 in der Schwingprobe mit Prüfdurchmesser $d = 15$ mm einer Gütestufe 2. Diese probenabhängige Gütestufe ist gemäß /GL10/ nun im geänderten Sicherheitsfaktor S_d nach Gleichung (43) im Exponenten j zu berücksichtigen. Auf Grund der Durchstrahlungsprüfung als zerstörungsfreie Nachweisemethode wird j_0 gleich 0 gesetzt /GL10/. Da der Gegenüberstellung der Schwingfestigkeiten eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 97,7\%$ zu Grunde liegt, ist im Sicherheitsfaktor S_{ges} der Faktor $S_{P_U} = \frac{2}{3}$ zu berücksichtigen /GL10/. Es ergeben sich damit die in Tabelle 12 zusammengestellten Sicherheitsfaktoren und die in Tabelle 13 gezeigten synthetischen Wöhlerlinienparameter.

$$S_{ges} = S_d \cdot S_{P_U} \cdot S_t = 0,85^{(j-j_0)} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 = 0,85^{(j-0)} \cdot \frac{2}{3} \cdot 1 \tag{43}$$

Tabelle 12 Sicherheitsfaktoren S_{ges} nach Gütestufen

	Gütestufe j				
	1	2	3	4	5
Sicherheitsfaktor S_{ges}	0,57	0,48	0,41	0,35	0,30

Tabelle 13 Synthetische Wöhlerlinienparameter nach Gütestufen

			Örtliche Spannungsamplitude $\sigma_{a,\delta,k,97,7\%}$ bei N_k und $P_U = 97,7\%$ für $R = -1$ [MPa]				
Werkstoff	Abknickpunkt N_k	Neigung k	Gütestufe j				
			1	2	3	4	5
EN-GJS-400-18U-LT	$3,00 \cdot 10^6$	11,13	107	90	77	65	56
EN-GJS-450-18	$2,97 \cdot 10^6$	11,01	117	100	85	72	61
EN-GJS-700-2	$2,92 \cdot 10^6$	10,74	135	115	97	83	70

Auch wenn dies /GL10/ nicht vorsieht, macht ein Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen nur dann Sinn, wenn auch für die synthetischen Wöhlerlinien von einer nicht vorhandenen Dauerfestigkeit ausgegangen wird. Um dies zu erreichen wird die Schwingfestigkeit nach dem Abknickpunkt mit einer Neigung $k^* = 44,9$ nach /So05b, Son07/ weiter abgemindert. Abhängig von der Gütestufe der Schwingprobe, dem Werkstoff und den zugehörigen Parametern der Gütestufenwöhlerlinie wird nun eine Schwingfestigkeit analog zum Vorgehen bei den Lunkerklassenwöhlerlinien ermittelt, Bild 94.

Die Gegenüberstellung der experimentellen und der mit dem erarbeiteten Beurteilungskonzept, nach /GL10/ sowie anhand der Lunkerklassenwöhlerlinien abgeschätzten Schwingfestigkeit für jede Schwingprobe mit Lunkern zeigt Bild 95. Die nach dem Beurteilungskonzept ermittelten Schwingfestigkeiten zeigen geringere Streuungen und eine gewisse Konservativität gegenüber den experimentellen Ergebnissen. Auf Grund des Sicherheitsfaktors $S_{Sh} = 2,0$ zur Abminderung der Schwingfestigkeit der Spannungsreferenzwöhlerlinie auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_{\bar{U}} = 97,7\%$ bei einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von mindestens 90 % liegen alle Ergebnisse rechnerisch auf der sicheren Seite, wenn ein Streumaß von $T_{\sigma} = 1:1,30$ für die experimentellen Schwingfestigkeiten zu Grunde liegt. Gleichzeitig überschätzt die auf Basis der Gütestufenwöhlerlinie ermittelte Schwingfestigkeit die experimentelle teilweise deutlich. Es treten zudem höhere Streuungen auf. Die aus den Parametern der Lunkerklassenwöhlerlinien ermittelte Schwingfestigkeit unterschätzt die tatsächliche Lebensdauer tendenziell. Die Streuungen sind jedoch ebenfalls höher als für die Abschätzung nach der neuen Beurteilungsmethode. Zudem setzt sowohl das Vorgehen nach /GL10/ als auch über die Lunkerklassenwöhlerlinien voraus, dass eine Lunkerklasse durch eine Durchstrahlungsprüfung am Bauteil überhaupt bestimmt werden kann. Die neue Beurteilungsmethode kann dagegen ohne Definition einer Lunkerklasse eine Schwingfestigkeit anhand eines physikalischen Messwertes in Form der lokalen Bauteildichte bestimmen.

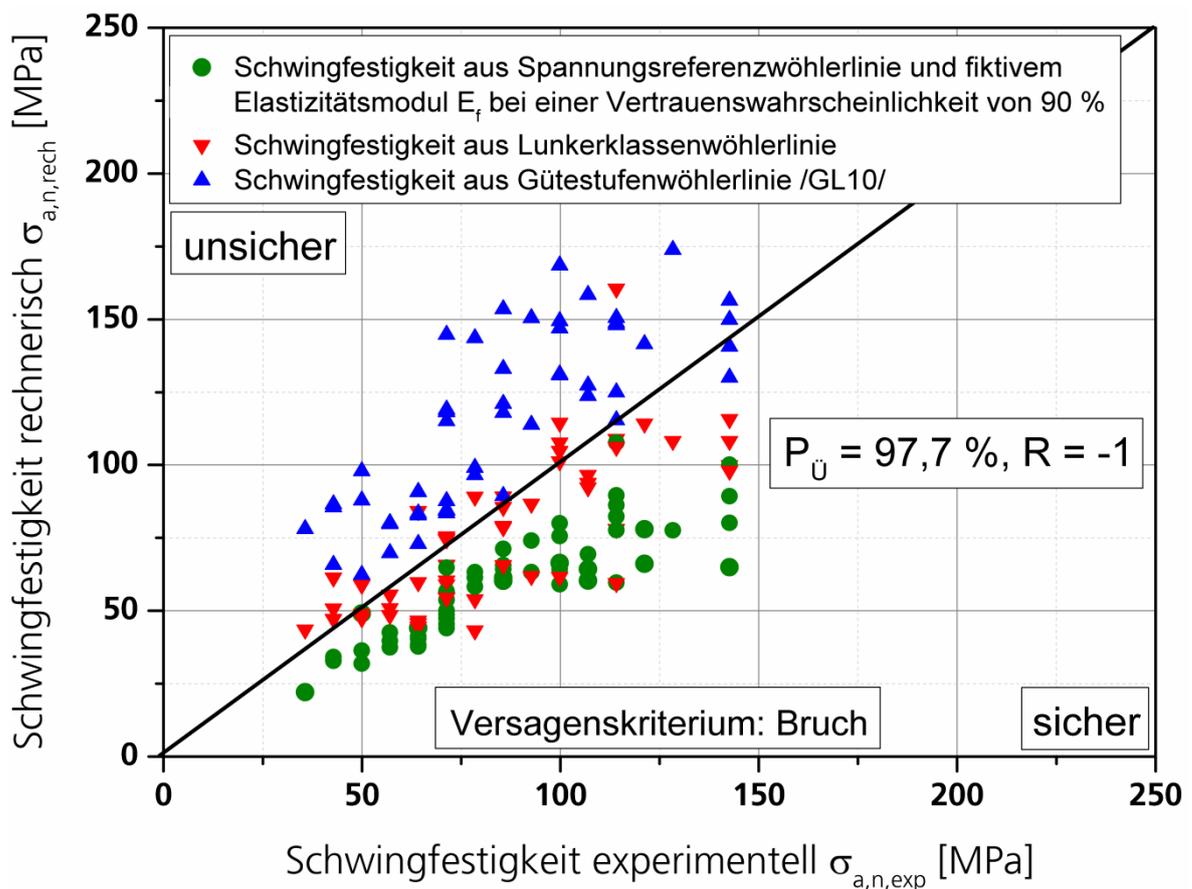


Bild 95 Gegenüberstellung von experimenteller und rechnerischer Schwingfestigkeit aller untersuchter Werkstoffe

8 Zusammenfassung und Ausblick

Für die zuverlässige und sichere Bewertung von Gusseisenbauteilen im Großguss mit Stückmassen teilweise weit über 200 t ist die Kenntnis des Werkstoffzustandes hinsichtlich der Schwingfestigkeit von entscheidender Bedeutung. Dabei sind störende Einflüsse in Form von Ungängen wie Lunker bei Wanddicken von bis zu 1 m oft nicht vermeidbar und bei der Freigabe des Bauteils nach dem Abguss zu berücksichtigen. Die meisten Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung, wie Ultraschall oder die Durchstrahlungsprüfung, können Lunker zwar detektieren, stellen aktuell aber nur unzureichende Informationen zur Verfügung, die sich in die Schwingfestigkeitsbeurteilung des Bauteils einbinden lassen. Neuere Methoden der Ultraschalltechnik wie das Sampling Phased Array bieten nun die Möglichkeit, lokale Dichteinformationen sowie dreidimensionale Ansichten der Lunkerbereiche am Bauteil bereitzustellen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Schwingproben aus einem Rotorlagerdeckel einer Windenergieanlage aus EN-GJS-400-18U-LT und dickwandigen Gussplatten mit Dicken $d = 120$ bis 230 mm der Werkstoffe EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 und EN-GJS-700-2 entnommen, in die durch eine gezielte Wärmeführung bei der Erstarrung große Bereiche mit schwammartigen Lunkern eingebracht werden. Durch Untersuchung der Gussplatten mittels Durchstrahlung und der dreidimensionalen Darstellung der Lunkerbereiche durch die Ultraschalltechnik Sampling Phased Array lässt sich bei der Schwingprobenentnahme zwischen den ungängenfreien und den Bereichen mit Lunkern unterscheiden.

Zur Charakterisierung des ungängenfreien Werkstoffzustandes in Form von zyklischer Spannungs-Dehnungs-Kurve, Spannungs- und Dehnungswöhlerlinie sowie der Mittelspannungsempfindlichkeit erfolgen zunächst Schwingfestigkeitsuntersuchungen durch spannungs- und dehnungsgeregelte Versuche bei den Lastverhältnissen $R_\sigma = -1$, $R_\sigma = 0$ sowie $R_\epsilon = -1$. Die Schwingfestigkeitsversuche finden unter Spannungsregelung bis zum Bruch und unter Dehnungsregelung bis zum Anriss der Schwingproben statt. Um die Wirkung des spannungsmechanischen und des statistischen Größeneinflusses bestimmen zu können, werden für zwei ungekerbte sowie zwei gekerbte Schwingprobegeometrien mit den Kerbformzahlen $K_t = 1,19$ und $K_t = 4,14$ in einem Bereich des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ von $0,03$ bis 6122 mm³ Wöhlerversuche unter Axialbelastung durchgeführt.

Ausgehend von den dehnungsgeregelten Versuchen an ungekerbten Schwingproben lässt sich für die drei untersuchten Werkstoffe ein zyklisch verfestigendes Verhalten nachweisen, das jedoch für den EN-GJS-700-2 deutlich weniger stark ausgeprägt ist als für die beiden ferritischen Gusseisenlegierungen. Im Bereich von $0,2\% \leq \epsilon_{a,t} \leq 0,4\%$ zeigt der EN-GJS-700-2 sogar eine leichte Entfestigung.

Die Betrachtung der Treffsicherheit der mittels der konventionellen Kompatibilitätsbedingung abgeleiteten Spannungs-Dehnungs-Kurven für die drei untersuchten Werkstoffe ergibt, dass diese die experimentell bestimmten Versuchspunkte nur sehr unzureichend repräsentiert. Da dies auch für andere zyklisch verfestigende Werkstoffe, wie etwa Aluminiumknetlegierungen, zutrifft, werden die Erkenntnisse der dafür bereits eingesetzten Beschreibung einer trilinearen Dehnungswöhlerlinie auf die untersuchten Gusseisenwerkstoffe übertragen. Dazu wird die elastische Dehnungswöhlerlinie in drei Abschnitte unterteilt und für jeden Abschnitt die Werte für den Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_f und den Schwingfestigkeitsexponenten b neu ermittelt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der trilinearen Dehnungswöhlerlinie zur konventionellen Darstellung nach Coffin, Manson, Basquin und Morrow /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/ zeigt eine verbesserte Beschreibung der Versuchspunkte für die Deh-

nungswöhlerlinie sowie der mit der Kompatibilitätsbedingung abgeleiteten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve nach /Ram43/.

Basierend auf den spannungsgeregelten Versuchen an den ungekerbten ($K_t = 1,04$ bzw. $K_t = 1,05$) sowie mild gekerbten Schwingproben ($K_t = 1,19$) zeigt der EN-GJS-700-2 die höchste Schwingfestigkeit, gefolgt vom mischkristallverfestigten EN-GJS-450-18 und dem EN-GJS-400-18U-LT. Es zeigt sich, dass diese Gusseisenlegierungen Mittelspannungsempfindlichkeiten im Bereich von $0,37 \leq M \leq 0,55$ aufweisen, die deutlich über bisherige Ergebnisse zur Mittelspannungsempfindlichkeit hinausgehen. Die Mittelspannungsempfindlichkeit wird somit anhand von Regelwerken /Hue81, FKM12, GL10, Ber13/ für den Dickwandguss deutlich unterschätzt. Eine Bauteilauslegung basierend auf Ergebnissen für Wechselbelastung und synthetischen Kennwerten für die Mittelspannungsempfindlichkeit liegt daher auf der nicht konservativen Seite. Gänzlich unterschiedlich verhalten sich die drei untersuchten Werkstoffe für scharfe Kerben ($K_t = 4,14$). Entgegen dem Stand der Technik für Gusseisenwerkstoffe fallen für Wechselbelastung, $R_\sigma = -1$, und Zugschwellbelastung, $R_\sigma = 0$, die Schwingfestigkeiten im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit auf ein gemeinsames Schwingfestigkeitsniveau. Mit zunehmender geometrischer Kerbschärfe nimmt die Mittelspannungsempfindlichkeit scheinbar ab. Auf Grund der dabei auftretenden lokalen plastischen Beanspruchung des Werkstoffs in der Kerbe treten Mittelspannungsrelaxationen auf, die die untersuchten Werkstoffe für hohe Kerbschärfen mittelspannungsunempfindlich machen. Auf Grund der Kerbwirkung fallen außerdem die Schwingfestigkeiten der drei untersuchten Werkstoffe für Wechselbelastung, $R_\sigma = -1$, und Zugschwellbelastung, $R_\sigma = 0$, auf ein gemeinsames Niveau.

Auf Basis der Schwingfestigkeitsuntersuchungen an den vier unterschiedlichen Schwingprobengeometrien werden Diagramme für das höchstbeanspruchte Werkstoffvolumen $HBV_{90\%}$ abgeleitet, die eine Interpolation innerhalb unterschiedlich großer Bauteilvolumina zulässt. Dabei lässt sich zeigen, dass diese Interpolation lediglich für konstante Lebensdauern Gültigkeit hat, da unterschiedliche Neigungen der Wöhlerlinien im Zeitschwingfestigkeitsbereich bei unterschiedlichen Schwingprobengeometrien und Kerbformzahlen eine Extrapolation auf andere Lebensdauern verhindern. Eine dreidimensionale Darstellung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ in Abhängigkeit der Nennspannungsamplitude und der Lebensdauer wird dahingehend vorgeschlagen.

Für die Ermittlung der Schwingfestigkeit der Lunkerbereiche der Gussplatten werden an diesen Stellen Schwingproben mit einem Prüfdurchmesser $d = 15$ mm entnommen und zunächst mittels Radiographie und Röntgen-Computertomographie im Probenprüfvolumen der Schwingproben hinsichtlich der Ausprägung der Lunker untersucht. Um die Auswirkungen der Lunker auch mechanisch zu erfassen, wird jede Schwingprobe im Prüfvolumen mit einem Dehnungsaufnehmer versehen und die Steifigkeit der Schwingproben analog zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls an vier Messpositionen sequentiell ermittelt. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird diese Steifigkeit als fiktiver Elastizitätsmodul E_f bezeichnet.

Auf Basis der Einteilung der Lunker in Lunkerklassen werden bei einem Lastverhältnis von $R_\sigma = -1$ für jeden Werkstoff und jede Lunkerklasse spannungsgeregelte Wöhlerlinien bestimmt. Auf Grund der werkstoffinvarianten Schwingfestigkeit für scharf gekerbte Schwingprobengeometrien werden werkstoffübergreifende Wöhlerlinien für jede Lunkerklasse abgeleitet, da basierend auf früheren Untersuchungen /Mu94b/ bei Lunkern mit Kerbformzahlen bis $K_t = 15$ zu rechnen ist.

Die Streumaße der so ermittelten Spannungswöhlerlinien nehmen teilweise sehr hohe Werte bis $T_\sigma = 1:2,24$ an. Durch die erneute visuelle Beurteilung der Röntgenfilme unter Berücksichtigung der Lage des Lunkers in der Schwingprobe in Bezug auf die Belastungsrichtung lassen sich die Streumaße

verringern. Eine weitere Verbesserung stellt sich ein, wenn für die im Prüfquerschnitt gebrochenen Schwingproben zusätzlich die Lunckerfläche aus der Röntgen-CT-Prüfung zur Bestimmung der Nennspannungsamplitude mit einbezogen wird. Um die Einteilung der Lunckerklassen unter Berücksichtigung der Lunckerorientierung und der Bruchflächenschwächung von der Lunkereinteilung nach internationalen Normen zu unterscheiden, wird der Kennbuchstabe H für die neu eingeteilten Luncker vergeben. Damit stehen fünf Wöhlerlinien für eine überschlägige Bestimmung der Schwingfestigkeit für $R_\sigma = -1$ zur Verfügung, wenn unter Berücksichtigung der Norm, der Belastungsrichtung sowie der Lage des Lunkers eine Lunckerklasse aus dem Röntgenbild visuell bestimmt wird. Da die rein visuelle Einteilung der Schwingproben in Lunckerklassen jedoch mit Unsicherheiten behaftet ist und nur zertifiziertes Personal diese durchführen kann, wird gezeigt, wie sich die Dichte aus dem Röntgenbild abschätzen lässt. Die Dichte und die Schwingfestigkeit stehen dabei in einem exponentiellen Zusammenhang, sodass bei bekannter Dichte die Schwingfestigkeit bei einer konstanten Lebensdauer abschätzbar ist. Im Rahmen der Dichtebestimmung lässt sich zudem zeigen, dass sich durch eine einfache Minimalwertbetrachtung der Grauwerte über den Prüfquerschnitt der Schwingproben hinweg die Bruchposition teilweise bis auf einige 100 μm genau ermitteln lässt. Eine Auswertung der Dichte in einem kleineren Bereich ($\pm 1 \text{ mm}$) um diese Bruchposition sowie deren Gegenüberstellung gegen die Schwingfestigkeit zeigt dann deutlich reduzierte Streuungen. Damit kann aus einer kostengünstigen und schnellen Durchstrahlungsaufnahme unter Berücksichtigung der Belastungsrichtung die versagenskritische Position bestimmt und anschließend die Schwingfestigkeit abgeschätzt werden. Für wiederkehrende Anwendungen dieser Methode sind zur Vereinheitlichung des Vorgehens bei gleichen Bauteilen stets die gleichen Parameter der Röntgenbildaufnahme wie Filmtyp, Strahlenquelle und Film-Fokus-Abstand einzuhalten, um die Aufnahme und damit auch die Abschätzung der Schwingfestigkeit zu standardisieren.

Bei der Auswertung der Dichte aus Röntgenfilmen ρ_R lässt sich keine Abhängigkeit zur Lebensdauer feststellen. Es lässt sich jedoch zeigen, dass die für das Prüfvolumen bestimmte Dichte ρ_W und ein am gleichen Prüfvolumen gemessener, gemittelter fiktiver Elastizitätsmodul E_f aus vier Einzelmessungen für die drei Gusseisenwerkstoffe linear korrelieren und somit eine Abhängigkeit zwischen einem Messwert der zerstörungsfreien Prüfung und einem mechanischen Kennwert besteht. Auch die für die Schwingproben mit Lunkern ermittelte Kerbwirkung K_{fs} und der fiktive Elastizitätsmodul E_f korrelieren linear miteinander. Darauf aufbauend wird eine Transformation der Nennspannungsamplituden der Schwingproben mit Lunkern für $R_\sigma = -1$ mit Hilfe der Spannungsreferenzwöhlerlinie für den ungespannten Werkstoffzustand und dem gemessenen, fiktiven Elastizitätsmodul E_f der Schwingproben derart abgeleitet, dass eine Abschätzung der Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern möglich ist. Dazu wird für eine gewünschte Lebensdauer N aus der Spannungsreferenzwöhlerlinie für $P_0 = 50 \%$ eine Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ bestimmt und diese über die lunckerabhängige Kerbwirkung K_{fs} und einen Sicherheitsfaktor S_{Sh} abgemindert.

Diese Erkenntnisse lassen sich für ein Konzept nutzen, das die lokale Schwingfestigkeit bei Vorhandensein von Lunkern beurteilen kann. Zunächst wird durch die Bestimmung der lokalen Dichte ρ aus dem Ultraschall Sampling Phased Array ein lokaler, fiktiver Elastizitätsmodul E_f sowie weiterhin eine lokale Kerbwirkung K_{fs} bestimmt. Gibt die Finite-Element-Analyse für die zu beurteilenden, als ungespannt modellierten Bauteilbereiche eine Spannung σ aus, lässt sich diese über die Kerbwirkungszahl K_{fs} und den Sicherheitsfaktor S_{Sh} entsprechend abgeminderten Spannungsreferenzwöhlerlinie gegenüberstellen und bewerten. Es wird gezeigt, dass ein Sicherheitsfaktor von $S_{Sh} = 2,0$ alle auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 97,7 \%$ umgerechneten Einzelschwingversuche mit Lunkern mit einer Vertrauenswahrscheinlichkeit von 90 % abdeckt, wenn der im Versuch ermittelten Schwingfestigkeit

eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_0 = 50\%$ zugeordnet sowie eine Streuung von $T_\sigma = 1:1,30$ angenommen wird. Das Vorgehen vom Abguss bis zur Bauteilbeurteilung über die Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfung zeigt Bild 96. Darin enthalten ist auch eine Abwandlung des Beurteilungskonzeptes, das Informationen aus Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfung kombiniert. So lassen sich in der FEM die lokal mit Lunkern behafteten Bauteilbereiche mit dem ermittelten fiktiven Elastizitätsmodul direkt modellieren. Die Beurteilung der Schwingfestigkeit erfolgt dann durch den Vergleich lokal auftretender Beanspruchungen mit der Beanspruchbarkeit des Lunkers in Form der Lunkerlassenwöhlerlinien H-1 bis H-5. Hierzu sind jedoch zuverlässig ausgewertete Lunkerlassen sowie ein erhöhter Aufwand in der FEM im Rahmen der Bauteilmodellierung notwendig, Bild 96.

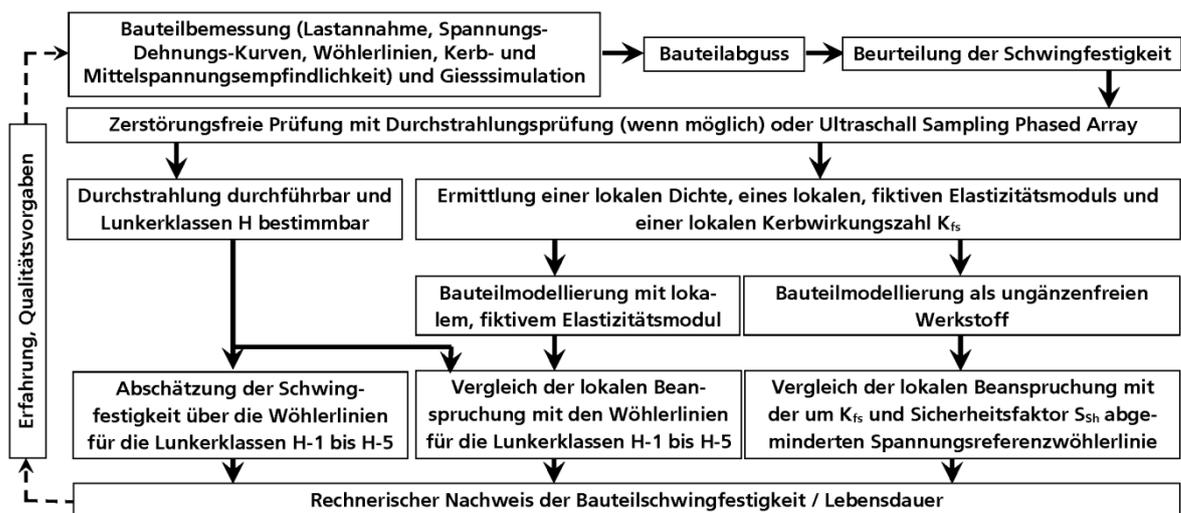


Bild 96 Ablaufdiagramm der Bauteilbeurteilung

Die Vorteile der neuen, lokalen Beurteilungsmethode für Lunker auf Basis der Referenzwöhlerlinie liegen zum einen im überschaubaren Aufwand der Umsetzung. So muss werkstoffseitig lediglich eine Spannungsreferenzwöhlerlinie für den ungenäzenfreien Werkstoffzustand bekannt sein, während die ohnehin beim Bauteilabnahmeprozess durchgeführte Ultraschallprüfung die lokale Dichteinformation bereitstellt, wenn die Sampling Phased Array Technik eingesetzt wird. Zum anderen ist für die Bauteilauslegung auf synthetische Konzepte und die Vergabe von Gütestufen zu verzichten. Dabei ist nun eine lokale Schwingfestigkeitsbeurteilung durchführbar, auf Basis derer eine fallspezifische und rechnerisch nachweisbare Entscheidung gefällt werden kann, ob das Bauteil der Nutzung oder der Verschrottung zuzuführen ist. Mit der Methode besteht nun ein rechnerischer Zusammenhang zwischen der lokalen Beanspruchung aus der Finite-Element-Berechnung und der lokalen Beanspruchbarkeit am Bauteil. Damit ergibt sich eine im Gegensatz zum bisherigen Gütestufenkonzept präzise und wissenschaftlich überprüfte Bauteilbeurteilung. Das Konzept bietet darüber hinaus die Möglichkeit, auf eine aufwendige Durchstrahlungsprüfung mit der Gefahr einer nicht korrekten Bewertung der Lunkerlassen zu verzichten. Die im Rahmen der Schwingfestigkeitsbeurteilung von Ungäzen im Großguss gesteckten Ziele in Form

- der Bestimmung des zyklischen Werkstoffverhaltens wichtiger Kugelgraphitgusswerkstoffe,
- der Erarbeitung einer Möglichkeit, die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung bei der Beurteilung der Bauteilschwingfestigkeit zu berücksichtigen sowie

- der Erarbeitung einer Beurteilungsmethode bei Vorhandensein von Lunkern

konnten durch

- die Analyse der spannungs- und dehnungsbasierten Schwingfestigkeit des EN-GJS-400-18U-LT, des EN-GJS-450-18 sowie des EN-GJS-700-2 hinsichtlich des transienten Werkstoffverhaltens, der Mittelspannungsempfindlichkeit M sowie des spannungsmechanischen und statistischen Größeneinflusses,
- die Neuauswertung von Durchstrahlungsaufnahmen und die Ermittlung von werkstoffübergreifenden Lunckerklassenwöhlerlinien,
- die Erarbeitung eines Zusammenhangs zwischen der im Ultraschall- sowie der Durchstrahlungsprüfung ermittelten Dichte ρ , dem fiktiven Elastizitätsmodul E_f und der Kerbwirkung durch die Luncker K_{fs} sowie
- den Vorschlag einer Beurteilungsmethode für mit Lunkern behaftete Bauteile auf Basis der Dichtemessung mittels Ultraschall und der Abschätzung der lokalen Beanspruchbarkeit über die Kerbwirkung der Luncker K_{fs} sowie einer ungänzenfreien Spannungsreferenzwöhlerlinie

erfüllt werden.

Für die Schwingfestigkeitsbeurteilung von Großgussbauteilen eröffnen sowohl die an ungänzenfreien Werkstoffproben als auch an den Schwingproben mit Lunkern ermittelten Ergebnisse die Möglichkeit, Großgussbauteile mit Hilfe aktueller Erkenntnisse bezüglich der Mittelspannungsempfindlichkeit, des Größeneinflusses sowie spannungs- und dehnungsbasierter Wöhlerlinien bereits in der Entwurfsphase der Bauteile zutreffender zu bemessen und damit eine höhere Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Darüber hinaus können die Erkenntnisse in Gieß- und Erstarrungssimulationen einfließen, um Luncker gezielt in weniger beanspruchte und gut zerstörungsfrei prüfbare Bereiche zu verschieben. Die Beurteilungsmethode kann somit sowohl eine zutreffende Vorbemessung als auch einen schnellen Nachweis der ausreichenden Beanspruchbarkeit nach dem Abguss führen.

In weiterführenden Untersuchungen ist die Anwendung der Beurteilungsmethode auf andere Belastungsfälle sowie auch auf den Bereich von Betriebslasten auszuweiten. Dabei ist zu prüfen, inwieweit sich die Beurteilungsmethode auf Betriebslasten mit Sonderereignissen, wie Extrem- und Überlasten, sowie unter zeitlich veränderlichen Belastungen unter Berücksichtigung charakteristischer Schadenssummen übertragen lässt. Weiterhin sind die gezeigten Schwingfestigkeitsergebnisse und die Beurteilungsmethoden für andere Legierungen aus Gusseisen mit Kugelgraphit nachzuweisen. Dabei sind auch die Ergebnisse einer spannungsgeregelten Beanspruchung von Schwingproben mit Lunkern bei Zugschwellbelastung und unter Dehnungsregelung zu untersuchen und in die Beurteilungsmethode einzubinden. Die Arbeit berücksichtigt keinen Temperatur- sowie Korrosionseinfluss. Für weitere Forschungsaktivitäten sollten beide Faktoren für den Einsatz von Großgussbauteilen untersucht werden, da eine Überlagerung von Kerbwirkung, Temperatur und Korrosion nicht immer auszuschließen ist. Dabei ist es von besonderem Interesse, ob sich eventuelle Einflüsse additiv überlagern oder auch eine gegenseitige Beeinflussung stattfindet.

9 Summary and Outlook

For a reliable and safe component design of thick-walled cast components with weights far beyond 200 t sufficient knowledge about the material's cyclic behaviour is of high importance. In thick-walled components with thicknesses up to 1 m material imperfections like shrinkages cannot be avoided and need to be evaluated after the components are casted as well as in design process. Even when shrinkages can be detected by many different techniques of non-destructive testing like ultrasonic testing and X-ray analysis, these methods provide currently only insufficient information for evaluating the fatigue strength of these shrinkages. Nevertheless, recently developed methods like the ultrasonic technique Sampling Phased Array are presently able to determine local density information and three-dimensional views of the shrinkage volume and enable an aimed structural evaluation.

During the present work specimens of EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 and EN-GJS-700-2 are taken from thick-walled cast blocks with thicknesses of 120 to 230 mm, which contain large volumes with shrinkages. The shrinkages are induced by means of a special heat management during solidification. By X-ray analysis and a three-dimensional depiction of the shrinkages inside the cast blocks by the ultrasonic technique Sampling Phased Array, a clear distinction between volumes with and without shrinkages can be conducted for the specimen removal.

For the characterisation of the cyclic behaviour of the sound material by cyclic stress-strain curves, strain- and stress-life curves as well as mean-stress sensitivities and size effects, strain and stress controlled fatigue tests are carried out at stress ratios of $R_\sigma = -1$, $R_\sigma = 0$ and a strain ratio of $R_\epsilon = -1$. The failure criterion for the stress controlled tests is total rupture of the specimens. For the strain controlled tests the failure criterion is the technically detectable crack. To examine the influence of size effect on fatigue, two different unnotched and two different notched specimens with stress concentration factors of $K_t = 1.19$ and $K_t = 4.14$ with highly-stressed volumes ($HBV_{90\%}$) between 0.03 and 6122.33 mm³ are cyclically tested under axial loading. For all three tested materials a cyclic hardening effect can be shown by the strain-controlled tests on unnotched specimens. Nevertheless the hardening effect develops much lesser for EN-GJS-700-2 than for both tested ferritic cast iron grades. In the total strain amplitude range of $0.2\% \leq \epsilon_{a,t} \leq 0.4\%$ EN-GJS-700-2 shows even a slight cyclic softening.

Regarding the accuracy of the conventional compatibility conditions for the three tested materials, investigations show that it represents the test results only insufficiently. Since this phenomena was examined earlier also for other cyclically hardening materials like aluminium, the experiences of describing the cyclic stress-strain and the strain-life curve much more accurately by a trilinear strain-life curve are adopted for application on nodular cast iron materials as well. For this purpose the elastic strain-life curve is divided into three different parts and for each part new values for the fatigue strength coefficient σ'_f and fatigue strength exponent b are calculated. A comparison of the trilinear strain-life curve with the conventional presentation according to Basquin, Coffin, Manson and Morrow /Cof54, Man65, Bas10, Mor65/ shows a much better description of the test results for the cyclic stress-strain curve and the strain-life curve.

Based on the results of the stress controlled fatigue tests on unnotched ($K_t = 1.04$ and $K_t = 1.05$) and mild notched specimens ($K_t = 1.19$) EN-GJS-700-2 shows the highest fatigue strength, followed by the solid solution strengthened EN-GJS-450-18 and EN-GJS-400-18U-LT. It is shown that the tested materials reach mean-stress sensitivities between $0.37 \leq M \leq 0.55$ and thus much higher values than suggested by design recommendations and standards. The mean-stress sensitivities of thick-walled cast

iron are therefore highly underestimated by present recommendations. A design for pulsating loaded components based on results for fully reversed loading and synthetic values for the mean-stress sensitivity thus yields in a non-conservative component evaluation as well as dimensioning. The material behaviour of the three investigated materials concerning mean-stress sensitivity changes completely when looking at sharp notched specimens ($K_t = 4.14$). Contrariwise towards state-of-the-art for cast iron materials the results for fully reversed loading, $R_\sigma = -1$, and pulsating loading, $R_\sigma = 0$, reach similar values in the cycle regime of long-finite life time. The materials' dependency on the mean-stresses seems to vanish nearly completely. Due to local plastic deformations in the sharp notch mean-stress relaxations occur, leading to apparently vanishing mean-stress sensitivities.

By fatigue results gained for the four different specimen sizes, diagrams for the highly-stressed volume are determined, which allow an interpolation between different component volumes to be assessed. It is shown, that this interpolation is only valid for given life times. Due to different slopes in the medium cycle regime of the stress-life curves an extrapolation towards different life times is not possible, depending on material, specimen geometry and thus the size effect. Thus, for a correct representation of the highly-stress volume, a three-dimensional diagram in dependency on nominal stress amplitude and cycles to failure is suggested.

To determine the fatigue strength of the shrinkage volumes of the cast blocks, fatigue specimens with a test diameter of $d = 15$ mm are removed from these volumes and investigated by X-ray and X-ray computer tomography in their test volume. Additionally, for a non-destructive but mechanical characterization of the shrinkages in the fatigue specimens, an extensometer is mounted on four different points circumferential the specimen's test diameter to register the specimen's stiffness according to the determination of the Young's modulus. To avoid mistakes this stiffness is called virtual Young's modulus E_f .

Based on the shrinkage classification, each specimen with shrinkages is cyclically tested under fully reversed loading, $R_\sigma = -1$. For each material and for each shrinkage classification a stress-life curve is determined. Keeping in mind the materials' invariant fatigue strength shown for the sharp notched specimens and the stress concentration factors for shrinkages of up to $K_t = 15$ determined in former investigations, material related stress-life curves were established for each shrinkage classification.

The scatter bands for the material related stress-life curves reach high values. To reduce these results, again visual inspections of the radiographic films are performed taking into account the position of the shrinkages in the specimens' test volume in correlation to the load direction. A further restriction of the scatter bands is achieved by evaluating the correct nominal stress amplitude for each specimen in dependency on the area of the shrinkages reducing the specimen's cross section. The information about the shrinkage area in the fracture surface is taken from the X-ray computer tomography. To distinguish between the shrinkage classification determined with regard to shrinkage orientation and the conventional shrinkage classification according to international recommendations, a new code letter H is given to the newly grouped shrinkages. Finally, five material invariant stress-life curves – one for each shrinkage classification – are now available to estimate the fatigue strength for fully reversed loading, $R_\sigma = -1$, if a shrinkage classification for a component is visually determined from the radiographic films considering position of the shrinkages and the corresponding standards for X-ray investigation. Nevertheless, since a visual inspection of radiographic films is susceptible to errors and can only be performed by certified staff, it is shown, that the density can approximately be determined from the radiographic film as well. Density and fatigue strength show an exponential correlation. Furthermore, it is shown that also the position of fracture can be determined from the film with a precision of partly

only some 100 μm , by evaluating the minimum value of optical density. Hence, it is possible to estimate from a low-cost and quick X-ray analysis under consideration of the load direction the position of fracture and also the fatigue strength. For serial and recurrent investigations, it is advisable always to take the same parameters for the X-ray to standardise the process.

While evaluating the density ρ_R from the radiographic films, a direct dependency on fatigue life cannot be determined. But it is shown that a linear correlation exists between the density measured in the fatigue critical material volume and the virtual Young's modulus E_f determined for each fatigue specimen for all three tested nodular cast iron grades. Thus, a connection between data obtained by non-destructive testing and a mechanical value is given. Furthermore, a second linear correlation between the fatigue notch factor K_{f_s} due to the shrinkages and the virtual Young's modulus E_f is determined. Based on that, a transformation of the nominal stress amplitudes of the fatigue specimens with shrinkages for $R_\sigma = -1$ by a reference stress-life curve for the sound material and the virtual Young's modulus is developed enabling an estimation of the fatigue strength of the fatigue specimens with shrinkages. For this purpose, a fatigue strength related to a required fatigue life is determined from the reference stress-life curve for a probability of survival $P_S = 50\%$. Depending on the shrinkage related fatigue notch factor K_{f_s} and an additional safety factor S_{Sh} this fatigue strength is reduced.

For an evaluation of the component's fatigue strength it is now possible to determine a local virtual Young's modulus by evaluating the local density by means of applying e.g. the ultrasonic technique Sampling Phased Array. From the local density a local fatigue notch factor K_{f_s} is determined afterwards. If a Finite-Element-Analysis (FEA) modelled without shrinkages, determines a local stress for a component to be assessed, this stress can be compared to the reference stress-life curve attenuated by the fatigue notch factor K_{f_s} and a safety factor S_{Sh} . It is shown, that a safety factor $S_{Sh} = 2.0$ covers all test results of specimens with shrinkages, whose stress amplitudes were converted to a probability of survival of $P_S = 97.7\%$ by a confidence of 90%, if each stress amplitude is related to a probability of survival of $P_S = 50\%$ and a scatter band of $T_\sigma = 1:1.30$ is assumed. The approach starting with the casting of a component until the assessment of the component's fatigue strength with help of ultrasonic and X-ray testing is given in Bild 97.

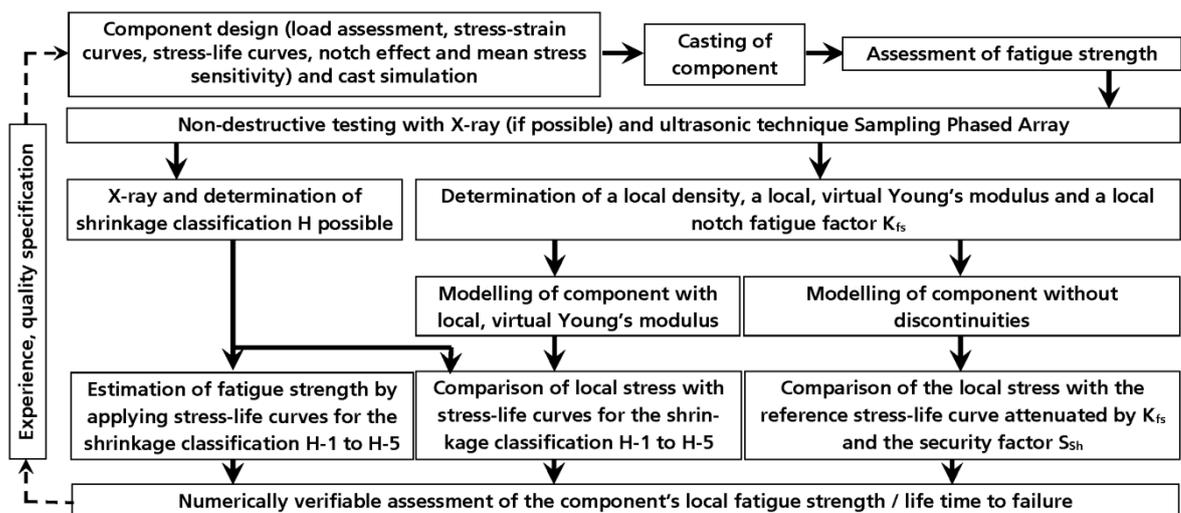


Bild 97 Flowchart of component assessment

The flowchart also covers a modification of the component assessment, which uses information of both X-ray and ultrasonic testing. By this modification it is possible to model the local shrinkages in FEA by using the information about the local virtual Young's moduli. The assessment then needs to be carried out by comparing the local stresses with the stress-life curves for the shrinkage classification H-1 until H-5. Nevertheless, this needs a reliable evaluation of the shrinkages' classification present at the component to be assessed.

The main advantage of the new, local method is the manageable effort for implementation. Only a reference stress-life curve for the sound material condition needs to be on hand, while an investigation of the cast component's critical parts needs to be done with the ultrasonic technique Sampling Phased Array. Nevertheless, ultrasonic testing is a main part of a cast component's quality control in every foundry. For a component's fatigue assessment, a usage of synthetic concepts and a determination of quality classes by non-destructive testing become unnecessary in favour of a local fatigue assessment. A local assessment of the component's fatigue strength is now possible, on which a specific and numerically derived decision can be drawn, whether or not a component needs to be rejected. The new method shows a proven connection between local stress and local fatigue strength. In comparison to the conventional quality class concept, the new method is much more precise and numerically verified. Additionally it offers the possibility of omitting X-ray testing.

The for the evaluation of the fatigue strength of shrinkages in thick-walled cast iron following aims set by

- evaluating the cyclic material behaviour of the mostly used nodular cast iron materials,
- determining a possibility to consider results of non-destructive testing during the assessment of the component's fatigue strength as well as
- determining a method for assessing components with shrinkages

are fulfilled by

- analysing the stress and strain based fatigue strengths of EN-GJS-400-18U-LT, EN-GJS-450-18 and EN-GJS-700-2 regarding their mean-stress sensitivity, their transient material behaviour as well as their geometrical and statistical size effect,
- reevaluation of X-ray films and the determination of five material related stress-life curves for shrinkages,
- determining a connection between density, measured by means of ultrasonic and X-ray testing, the virtual Young's modulus and the shrinkage related notch fatigue factor as well as by
- proposing a method to assess the local fatigue strength of components with shrinkages based on a density measurement by ultrasonic testing as well as an estimation of the local fatigue strength by the fatigue notch factor and a stress-life curve for sound material.

The determined fatigue results both for sound material and for specimens with shrinkages concerning size effect, mean-stress sensitivity and the consideration of shrinkages establish a possibility for a much easier, more precise and safe assessment of thick-walled nodular cast iron components during the design stage. Coming from an estimation of the local fatigue strength by a visual evaluation of shrinkages and the component's quality classification, it is now easily possible to assess the local component's fatigue life by determining the local material's density. Moreover, the determined knowledge can be used during cast and solidification analysis to move possible shrinkages in low stressed areas, where

also non-destructive testing can easily be done. The assessment method provides not only experiences and data useful for the design process, but also a fast proof of the local fatigue strength after casting.

For further investigations the developed method needs to be proven also for other load ratios and also for variable amplitude loading. In this case it needs to be verified, in which way the method can also assess operational loads with overloads with regard to cumulative and characteristic damage sums. Furthermore, the determined fatigue results and the assessment method need to be extended to other nodular cast iron grades. In this case also results for tensile loads and under strain control need to be discussed and included in the method. In this work the influences by temperature and corrosion on fatigue strength of the three investigated nodular cast irons is not discussed. For further research work both influences on thick-walled nodular cast iron and on component's fatigue assessment should be investigated. Particularly, it is to discuss whether or not the fatigue notch effect, temperature and corrosion influence each other when occurring simultaneously. It is of special interest, whether these influences act additively or if they only influence each other.

10 Literatur

- /Alb37/ Albert, W. A. J.: Ueber Treibseile am Harz. Archiv für Mineralogie. Geognosie, Bergbau und Hüttenkunde, Band 10, 1837, S. 215 – 234
- /AST10/ Adjunct to E446 Reference Radiographs for Steel Castings Up to 2 in. (51 mm) in Thickness. ASTM International, 2010
- /AST82/ Standard Reference Radiographs for Gray Iron Castings up to 4½ in. in Thickness. ASTM Designation E 802-82, Philadelphia, 1982
- /AST84/ Adjunct to E280 Reference Radiographs for Heavy-Walled (4 ½ to 12-in. (114 to 305-mm)) Steel Castings. ASTM International, 1984
- /Bar81/ Barton, R.: Überblick über die Gefügedefekte in Gusseisen mit Kugelgraphit, ihre Ursachen und Vermeidung. 4. Internationale Tagung der Lizenznehmer für das +GF+ Konverterverfahren, Vortrag Nr. 2, 30. September bis 2. Oktober, 1981
- /Bar99/ Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Unkorrigierter Nachdruck der 6., überarbeiteten Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-65456-9, 1999
- /Bas10/ Basquin, O. H.: The exponential law of endurance tests. American Society Test, Materials Proceedings, Nr. 10, 1910, S. 625 – 630
- /Bat05/ Bathias, C.; Paris, P. C.: Gigacycle Fatigue in MEACHNICAL PRACTICE. Marcel Dekker, New York, ISBN 0-8247-2313-9, 2005
- /Bau01/ Bauer, W.: Einfluß der Gußhaut auf das Biegewechselverhalten von Werkstücken aus Gußeisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + Gießen, 26, Nr. 4, 2001, S. 4 – 15
- /Bau06/ Bauer, W.: Biegewechselverhalte von Gusseisen mit Kugelgraphit, Auswirkung der Gusshaut, Gefüge- und Güteermkmale. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 3, 2006, S. 47 – 60
- /Ber83/ Bergmann, J. W.: Zur Betriebsfestigkeit gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchung. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1983
- /Ber13/ Bergmann, J. W.; Thumser, R.: Synthetische Wöhlerlinien für Eisenwerkstoffe – Synthetische Wöhlerlinien 1999. Aktualisierte Fassung vom 31.07.2013, (überarbeitet durch Dr. T. Richter), Materialforschungs- und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar, F-45/044/99, Weimar, 2013
- /Bee52/ Beer, A.: Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. Annalen der Physik und Chemie. Band 86, Erstes Stück, 1852, S. 78 – 88
- /Bes02/ Best, K. J.; Reifferscheid, K. J.: Dross – warum? – Gußfehler bei der Herstellung von Gußeisen mit Kugelgraphit. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 5, 2002, S. 181 – 188
- /Bl14a/ Bleicher, C.; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Melz, T.: SiWind – neuer Werkstoff für Off-shore-Windenergieanlagen – Teil 2: Zyklische Werkstoffprüfung. GIESSEREI, 101, Nr. 9, 2014, S. 70 – 79
- /Bl14b/ Bleicher, C.; Kaufmann, H.; Wagener, R.; Melz, T.: Shrinkages in heavy-sized cast components of nodular cast iron – NDT and fatigue. Kongressbeitrag, The 2nd International

- Symposium on Fatigue Design & Material Defects FDMD2, Société Française de Métallurgie et de Matériaux, Paris, 11. bis 13. Juni, 2014
- /Bl14c/ Bleicher, C.; Wagener, R.: Schwingfestigkeitsbewertung von Makrolunkern im Gusseisen mit Kugelgraphit. Tagungsband DVM Werkstoffprüfung 2014 Berlin, Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis – Werkstoffeinsatz, Qualitätssicherung und Schadensanalyse, Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung DVM e.V., Stahlinstitut VDEh, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde DGM e.V., Herausgeber: Grellmann, W.; Frenz, H.; ISBN 978-3-9814516-8-9, 4. und 5. Dezember, 2014, S. 67 – 72
- /Bl14d/ Bleicher, C.; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Melz, T.: Die Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit bei Tieftemperaturen – Festigkeitspotentiale für die Windenergie?. GIESSEREI, 101, Nr. 10, 2014, S. 38 – 47
- /Bl15a/ Bleicher, C.; Wagener, R.; Kaufmann, H.; Melz, T.: Fatigue strength of nodular cast iron with regard to heavy-wall application. Materials Testing, Carl Hanser Verlag, Nr. 9, 2015, S. 723 – 731
- /Bl15b/ Bleicher, C.; Melz, T.: Korrelation zwischen zyklischem und monotonem Werkstoffverhalten zur Bewertung der Schwingfestigkeit von Lunkern in Gusseisen mit Kugelgraphit. Tagungsband VDEh Werkstoffprüfung 2015 Bad Neuenahr, Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis, Stahlinstitut VDEh, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde DGM e.V., Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung DVM e.V., Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Herausgeber: Borsutzki, M.; Moninger, G.; ISBN 978-3-514-00816-8, 3. und 4. Dezember, 2015, S. 75 – 80
- /Bla05/ Blair, M.; Monroe, R.; Beckermann, Ch.; Hardin, R.; Carlson, K.; Monroe, Ch.: Predicting the Occurrence and Effects of Defects in Castings. JOM, Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, Mai 2005, S. 29 – 34
- /Bis14/ Bisping, J. R.: Entwicklung einer Bemessungsmethode für Mahlanlagen in der Zementindustrie am Beispiel von Vertikalrollenmühlen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-242, 2014
- /Boo13/ Boonmee, S.: Ductile and Compacted Graphite Iron Casting Skin – Evaluation, Effect on Fatigue Strength and Elimination. Dissertation, Ohio State University, 2013
- /Bou12/ Bouvet, P.; Monat, T.: Influence of oxide skins on the SG cast iron parts fatigue strength. Fonderie magazine, Nr. 24, April 2012, S. 17 – 27
- /Bou29/ Bouguer, P.: Essai d'optique, Sur la gradation de la lumière. Claude Jombert, Paris, 1729, S. 164 ff.
- /Bu12a/ Bublies, G.; Schöber, B.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Gusseisenplatte – Bericht-Nr.: 120033. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 05.01.2012
- /Bu12b/ Bublies, G.; Hansen, H.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Gusseisenplatte – Bericht-Nr.: 120095. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 12.01.2012
- /Bu12c/ Bublies, G.; Hansen, H.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Gusseisenplatte – Bericht-Nr.: 120096. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 12.01.2012

- /Bu12d/ Bublies, G.; Schöber, B.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Platte – Bericht-Nr.: 120683. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 29.02.2012
- /Bu12e/ Bublies, G.; Nagel, S.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 123527. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 27.09.2012
- /Bu12f/ Bublies, G.; Nagel, S.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 123923. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 30.10.2012
- /Bu13a/ Bublies, G.; Nagel, S.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 130314. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 04.02.2013
- /Bu13b/ Bublies, G.; Nagel, S.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 130315. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 04.02.2013
- /Bu13c/ Bublies, G.; Nagel, S.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 131248. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 06.05.2013
- /Bul05/ Bulavinov A.: Der getaktete Gruppenstrahler. Dissertation. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2005
- /Bul08/ Bulavinov, A.; Kosov, S.; Kröning, M.; Pinchuk, R.; Pudovikov, S.; Ramanan, S. V.; Reddy, K. M.; Yastrebova, O.; Zhantlessov, Y.; Joneit, D.: Die getaktete Gruppenstrahlertechnik und ihre Anwendungen. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. –DGZfP–, Berlin, Moderne Systemtechnik bei Prüfungen mit Ultraschall, Seminar der FA Ultraschall, Wuppertal, 12. bis 13. November, ISBN 978-3-940283-05-4, 2007, S. 59 – 74
- /Bul14/ Bulavinov, A.; Pinchuk, R.; Petrova, E.; Bevetkiy, A.: LUNKERFEST – Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf Basis zerstörungsfreier Prüfungen an dickwandigen Eisengussbauteilen in der Windenergie. Schlussbericht zum Vorhaben Nr. 0325239B, Saarbrücken, 2014
- /Bux92/ Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit – Sichere und wirtschaftliche Bemessung schwingbruchgefährdeter Bauteile. 2., erweiterte Auflage, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 1992
- /Buz08/ Buzug, T. M.: Computed Tomography – From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-540-39407-5, 2008
- /Chr85/ Christianus, D.; Herfurth, K.: Europäische Normen zur Rißprüfung: Magnetpulverprüfung und Eindringprüfung. Konstruieren + Gießen, 26, Nr. 3, 2001, S. 27 – 35
- /Cof54/ Coffin, L. A.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Trans. ASME, Nr. 76, 1954, S. 931 – 950
- /Die85/ Dietmann, H.: Zur Berechnung von Kerbwirkungszahlen. Konstruktion, 37, Nr. 2, 1985, S. 67 – 71
- /DIN00/ DIN 50100 Schwingfestigkeitsversuch — Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile. Entwurf, 2015
- /DIN06/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6506-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell – Teil 1: Prüf-

- verfahren (ISO 6506-1:2005). Deutsche Fassung EN ISO 6506-1:2005, ICS 77.040.10, Beuth Verlag, Berlin, März 2006
- /DIN13/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12513: Gießereiwesen – Verschleißbeständige Gusseisen. Deutsche Fassung EN 12513:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2011
- /DIN21/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 462-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen – Teil 1: Bildgüteprüfkörper (Drahtsteg), Ermittlung der Bildgütezahl. Deutsche Fassung EN 462-1:1994, ICS 19.100, Beuth Verlag, Berlin, März 1994
- /DIN22/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 462-2: Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen – Teil 2: Bildgüteprüfkörper (Stufe/Loch Typ), Ermittlung der Bildgütezahl. Deutsche Fassung EN 462-2:1994, ICS 19.100, Beuth Verlag, Berlin, Juni 1994
- /DIN23/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 462-3: Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen – Teil 3: Bildgüteklassen für Eisenwerkstoffe. Deutsche Fassung EN 462-3:1996, ICS 19.100, Beuth Verlag, Berlin, November 1996
- /DIN25/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 462-5: Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen – Teil 5: Bildgüteprüfkörper (Doppel-Drahtsteg) Ermittlung der Bildunschärfe. Deutsche Fassung EN 462-5:1996, ICS 19.100, Beuth Verlag, Berlin, Mai 1996
- /DIN35/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13835: Gießereiwesen – Austenitische Gusseisen. Deutsche Fassung EN 13835:2012, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, April 2012
- /DIN41/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 584-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Industrielle Filme für die Durchstrahlungsprüfung – Teil 1: Klassifizierung von Filmsystemen für die industrielle Durchstrahlungsprüfung. Deutsche Fassung EN 584-1:1994, ICS 19.100, Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1994
- /DIN44/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 444: Zerstörungsfreie Prüfung – Grundlagen für die Durchstrahlung von metallischen Werkstoffen mit Röntgen- und Gammastrahlen. Deutsche Fassung EN 444:1994, ICS 19.100, 77.040.20, Beuth Verlag, Berlin, April 1994
- /DIN45/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 945-1: Mikrostruktur von Gusseisen – Teil 1: Graphitklassifizierung durch visuelle Auswertung (ISO 945-1:2008 + Cor. 1:2010). Deutsche Fassung EN ISO 945-1:2008 + AC:2010, Beuth Verlag, Berlin, September 2010
- /DIN48/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 148-1: Metallische Werkstoffe – Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 148-1:2009). Deutsche Fassung EN ISO 148-1:2010, ICS 77.040.10, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2011

- /DIN61/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1561: Gießereiwesen – Gusseisen mit Lamellengraphit. Deutsche Fassung EN 1561:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2012
- /DIN62/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1562: Gießereiwesen – Temperguss. Deutsche Fassung EN 1562:2012, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Mai 2012
- /DIN63/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1563: Gießereiwesen – Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 1563:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, März 2012
- /DIN64/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1564: Gießereiwesen – Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 1564:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Januar 2012
- /DIN69/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1369: Gießereiwesen – Magnetpulverprüfung. Deutsche Fassung EN 1369:1996, ICS 19.100, 77.180, Beuth Verlag, Berlin, Februar 1997
- /DIN71/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Normenausschuss Nichteisenmetalle (FNNE) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 1371-1: Gießereiwesen – Eindringprüfung. Deutsche Fassung EN 1371-1:1997, ICS 77.140.80, 77.150.99, Beuth Verlag, Berlin, Oktober 1997
- /DIN79/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 16079: Gießereiwesen – Gusseisen mit Vermiculargraphit. Deutsche Fassung EN 16079:2011, ICS 77.080.10, Beuth Verlag, Berlin, Februar 2012
- /DIN80/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12680-3: Gießereiwesen – Ultraschallprüfung – Teil 3: Gussstücke aus Gusseisen mit Kugelgraphit. Deutsche Fassung EN 12680-3:2003, ICS 77.040.20, Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- /DIN81/ Normenausschuss Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 12681: Gießereiwesen – Durchstrahlungsprüfung. Deutsche Fassung EN 12681:2003, ICS 77.040.20, Beuth Verlag, Berlin, Juni 2003
- /DIN90/ Normenausschuß Eisen und Stahl (FES) und Normenausschuß Gießereiwesen (GINA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1690 Teil 2: Technische Lieferbedingungen für Gußstücke aus metallischen Werkstoffen – Stahlguß; Einteilung nach Gütestufen aufgrund zerstörungsfreier Prüfungen. Beuth Verlag, Berlin, Juni 1985
- /DIN92/ Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2009). Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2009, ICS 77.040.20, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2009
- /Dix48/ Dixon, W. J.; Mood, A. M.: A Method for obtaining and analyzing sensitivity data. Journal of the American Statistical Association, Nr. 43, 1948, S. 109 – 126

- /Edw72/ Edwards, A. W. F.: Likelihood. Cambridge University Press, 1972
- /End69/ Endo, T.; Morrow, J.: Cyclic stress-strain and fatigue behavior of representative aircraft metals. Journal of Materials, 1969, S. 159-175
- /Eng79/ Engler, S.; Wojtas, H.-J.: Lunkerverhalten von Gußeisen mit Lamellengraphit und Kugelgraphit sowie die Beeinflussbarkeit der Volumendefizite. Teil 1. GIESSEREI-FORSCHUNG, 31, Nr. 1, 1979, S. 37 – 44
- /Erh90/ Erhard A., Khan M.H., Rana L.A.: Application of ultrasonic phased array techniques for inservice inspection. Proceedings Symposium on Maintenance planning and Operation, Riyadh, Saudi Arabia, 17. bis 19. März, 1990
- /Euf13/ Eufinger, J.: Beitrag zur Bewertung der Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8440-1655-0, 2013
- /Fag05/ Fagschlunger, C.: Schwingfestigkeit von Al-Druckgusslegierungen unter Berücksichtigung fertigungsprozessbedingter Werkstoffinhomogenitäten. Dissertation, Institut für Allgemeinen Maschinenbau, Montanuniversität Leoben, 2005
- /Fan95/ Fang, L.-Y.; Metzloff, K. E.; Voigt, R. C.; Loper jr., C. R.: Factors Affecting Measurement of Modulus of Elasticity of Ductile Irons. American Foundry Society Transactions, Nr. 12, 1995, S. 31 – 39
- /Fas14/ Fast, A.: Energiemesskoffer mit mobilfunkbasierter Steuerungstechnik. Smart energy, Nr. 2, 2014, S. 30; Bildrechte bei: G. Siempelkamp GmbH & Co. KG
- /Fat05/ Fatemi, A.; Plaseied, A.; Khosrovaneh, A. K.; Tanner, D.: Application of bi-linear log-log S-N model to strain-controlled fatigue data of aluminum alloys and its effect on life predictions. International Journal of Fatigue, 27, 2005, S. 1040 – 1050
- /Fis12/ Fisher, R. A.: On an absolute criterion for fitting frequency curves. Messenger of Mathematics, Nr. 41, 1912, S. 155 – 160
- /FKM01/ FKM-Richtlinie – Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 1. Ausgabe, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt am Main, 2001
- /FKM12/ FKM-Richtlinie – Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6., überarbeitete Ausgabe, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM), Frankfurt am Main, 2012
- /Fis88/ Fischer, E.; Mahnig, F., Walter, H.: Betriebsfestigkeit von Gußeisen mit Kugelgraphit (Sphäroguß) unter Korrosionseinfluß. Konstruieren + Gießen, 13, Nr. 2, 1988
- /Fuc11/ Fuchs, T.; Kasperl, S.: Grundlagen und Anwendungen der Röntgen-Computertomographie in Industrie und Technik. 1. Auflage, Fraunhofer IIS und Fraunhofer EZRT, 27. April, 2011
- /Gaß39/ Festigkeitsversuche mit wiederholter Beanspruchung im Flugzeugbau, Luftwissen, 6, 1939, S. 61 – 64
- /Gaß41/ Gaßner, E.; Pries, H.: Zeit- und Dauerfestigkeitsschaubilder für stabartige Bauteile aus Cr-Mo-Stahl, Duraluminium, Hydroaluminium und Elektron. Deutsche Luftwacht, Aus-

- gabe Luftwissen, Band 8, Nr. 3, 1941, S. 1 – 4
- /Gag09/ Gagné, M.; Paquin, M.-P.; Cabanne, P.-M.: Dross in ductile iron: source, formation and explanation. *Foundry Trade Journal International*, 2009
- /Gag10/ Gagné, M.; Labrecque, C.: Gefügefehler in dickwandigem Gusseisen mit Kugelgraphit – Bildung und Auswirkung auf die Gussteileigenschaften. Nachdruck aus *American Foundry Society Transactions*, 209, Paper 01-101, Deutsche Bearbeitung: Georg Geier, *GIESSEREI-PRAXIS*, Nr. 5, 2010, S. 135 – 140
- /Gal38/ Galilei, G.: *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, Intorno à Due Nuove Scienze, Attenanti alla Mecanica & i Movimenti Locali*. Elsevier, Leiden, 1638
- /Ger74/ Gerber, W.: Bestimmung der zulässigen Spannungen in Eisenkonstruktionen. *Zeitschrift des Bayerischen Architekten- und Ingenieur-Vereins*, Band 6, Nr. 6, 1874, S. 101 – 110
- /GL10/ Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH: Richtlinie für die Zertifizierung von Windenergieanlagen. Hamburg, 1. Juli, 2010
- /Goo54/ Goodman, J.: *Mechanics Applied to Engineering*. Longmans, Green & Co, London, New York, Bombay, Calcutta, Madras, 1914, S. 634 – 635
- /Gr79a/ Grubišić, V.; Sonsino, C. M.: Festigkeit von Hochdruckbehältern für neuartige Fertigungsverfahren. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-148, 1979
- /Gr79b/ Grubišić, V.; Neugebauer, J.: Festigkeitsverhalten von Sphäroguß bei kombinierter statischer und dynamischer mehrachsiger Beanspruchung. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-149, 1979
- /Gra96/ Graf, T.: Berücksichtigung des statistischen Größeneinflusses durch Berechnung von Spannungintegralen zur Verbesserung der rechnerischen Abschätzung der Schwingfestigkeit. DFG-Bericht Zc 248/7-1, DFG, 1996
- /Gro11/ Gross, D.; Seelig, T.: *Bruchmechanik – Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. 5., erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, ISBN 978-3-642-10195-3, 2011
- /Gro12/ Gross, D.; Hauger, W.; Schröder, J.; Wall, W.: *Technische Mechanik 2 – Elastostatik*. 11., bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, S. 83 – 85, ISBN 978-3-642-19983-7, 2012
- /Gru70/ Grubišić, V.: Verfahren zur optimalen Bemessung von Fahrzeugrädern. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Laboratorium für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-86, 1970
- /Gru82/ Grubišić, V., Sonsino, C. M.: Influence of Local Strain Distribution on Low-Cycle Fatigue Behaviour of Thick-Walled Structures. *ASTM STP 770*, 1982, S. 612 – 629
- /Gud99/ Gudehus, H.; Zenner, H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsberechnung – Empfehlungen zur Lebensdauerabschätzung von Maschinenbauteilen. 4. Auflage aktualisiert und erweitert von H. Gudehus und H. Zenner, Verein zur Förderung der Forschung und der Anwendung von Betriebsfestigkeits-Kenntnissen in der Eisenhüttenindustrie (VBFeh) im Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh), Verlag Stahleisen, Düsseldorf,

- ISBN 3-514-00584-2, 1999
- /Ha13a/ Hansen, W.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 133679. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 19.11.2013
- /Ha13b/ Hansen, W.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 133782. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 25.11.2013
- /Han99/ Hansen, W.: Prüfbericht für Durchstrahlungsprüfung an Rundproben – Bericht-Nr.: 133678. Gesellschaft für Radiographie mbH, Hattingen, 30.12.1899
- /Hai06/ Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3., korrigierte und ergänzte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN-10 3-540-29363-9, 2006
- /Hai15/ Haigh, B. P.: Report on Alternating Stress Tests of a Sample of Mild Steel Received from the British Association Stress Committee. BASC Report 85, British Association Stress Committee, Manchester, 1915, S. 163 – 170
- /Har04/ Hardin, R. A.; Beckermann, Ch.: Effect of Porosity on Mechanical Properties of 8630 Cast Steel. Proceedings of the 58th SFGA Technical and Operating Conference, Paper Nr. 4.4, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2004, S. 1 - 41
- /Har09/ Hardin, R. A.; Beckermann, Ch.: Prediction of the Fatigue Life of Cast Steel Containing Shrinkage Porosity. Metallurgical and Materials Transactions A, Nr. 40A, März 2009, S. 581 – 597
- /Has08/ Hasse, S.: Gefüge der Gusseisenlegierungen – Structure of Cast Iron Alloys. Schiele & Schön Verlag, Berlin, ISBN 978-3-7949-0753-3, 2008
- /Has99/ Hasse, S.: Guß- und Gefügefehler – Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guß- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten. Schiele & Schön Verlag, Berlin, ISBN 3-7949-0639-X, 1999
- /Hei13/ Heinrietz, A.; Tijani, Y.: Erhöhung der lokalen Werkstoffausnutzung an Aluminiumgussbauteilen durch schwingfestigkeitsbezogene Kriterien in der Qualitätssicherung. Tagungsbeitrag zur 40. Tagung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit des Deutschen Verbands für Materialforschung, Berlin, 9. und 10. Oktober, 2013
- /Hob06/ Hobbacher, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-1965-03 / XV-1127-03, International Institute of Welding, 2006
- /Hue81/ Hück, M.; Thrainer, L.; Schütz, W.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguß und Grauguß – Synthetische Wöhlerlinien. Bericht Nr. ABF 11, 2., überarbeitete Fassung, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1981
- /Hue83/ Hück, M.: Ein verbessertes Verfahren für die Auswertung von Treppenstufenversuchen. Zeitschrift für Werkstofftechnik, 14, Nr. 12, 1983, S. 406 – 417
- /Hue85/ Hück, M.; Schütz, W.; Walter, H.-P.: Moderne Schwingfestigkeitsdaten zur Bemessung von Bauteilen aus Sphäroguss und Temperguss. Konstruieren + Gießen, 10, Nr. 3, 1985, S. 4 – 19
- /IfG14/ IfG-Forschungsprojekt: Charakterisierung der Porositätsverteilung in Gusseisen mit Kugelgraphit und ihr Einfluss auf die zyklischen mechanischen Eigenschaften. Schluss-

- bericht, AiF-Nr. 17316 N, IfG – Institut für Gießereitechnik gGmbH, 2014
- /Kai11/ Kainzinger, P.; Wohlfahrt, M.; Eichelseder, W.: Makrolunker in Gusseisen mit Kugelgraphit – Vorhersage durch Simulation und deren Einfluss auf die Schwingfestigkeit. Giesserei-Rundschau 58, Nr. 5/6, 2011, S. 106 – 110
- /Kai12/ Kainzinger, P.; Guster, Ch.; Severing, M.; Wolf, A.: Zum Einfluss überlagerter Mittelspannung und Temperatur auf das zyklische Materialverhalten von Gusseisen mit Kugelgraphit; Giesserei-Rundschau 59, Nr. 11/12, 2012, S. 288 – 292
- /Kai13/ Kaizinger, P.; Guster, Ch.; Severing, M.; Ballmes, H.: Bewertung des Einflusses von Defekten auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen mit Kugelgraphit. 40. Tagung des DVM Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Herzogenaurach, 9. und 10. Oktober, 2013
- /Kau02/ Kaufmann, H.; Wolter, D. B.: Zyklische Beanspruchbarkeit dickwandiger Bauteile aus ferritischem Gußeisen mit Kugelgraphit. Konstruieren + Gießen, Nr. 27, 2002, S. 4 – 27
- /Kau94/ Kaufmann, H.; Sonsino, C. M.: Übertragbarkeit von an ungekerbten und gekerbten bauteilähnlichen Proben ermittelten Schwingfestigkeitskennwerten am Beispiel von geschmiedeten LKW-Pleueln und LKW-Achsschenkeln. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht TB-200, 1994
- /Kau98/ Kaufmann, H.: Zur schwingfesten Bemessung dickwandiger Bauteile aus GGG-40 unter Berücksichtigung gießtechnisch bedingter Gefügeengänzen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-214, 1998
- /Kau99/ Kaufmann, H.: Schwingfestigkeit von Schmiedestahl und höherfesten Gußeisenwerkstoffen in gekerbtem Zustand. Konstruieren + Gießen, 24, Nr. 2, 1999, S. 37 – 40
- /Kle07/ Kleemann, U.: Bauteilrandschicht und Schwingfestigkeit. Dissertation, TU Clausthal, 1. Auflage, PAPIERFLIEGER, Clausthal-Zellerfeld, ISBN 3-89720-898-9, 2007
- /Kle73/ Klee, S.: Das zyklische Spannungs-Dehnungs- und Bruchverhalten verschiedener Stähle. Dissertation, Institut für Statik und Stahlbau, Technische Hochschule Darmstadt, 1973
- /Klo76/ Kloos, K.-H.: Einfluß des Oberflächenzustandes und der Probengröße auf die Schwingfestigkeit. VDI-Berichte, Nr. 268, 1976
- /Klu01/ Klubberg, F.; Schäfer, H. J.; Hempen, M.; Beiss, P.: Mittelspannungsempfindlichkeit metallischer Werkstoffe bei schwingender Beanspruchung. Roell Amsler Symposium, 2001, S. 111 – 134
- /Koe12/ Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H.: Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit. Springer-Verlag, Berlin, 2012
- /Kur14/ Kurz, J. et al.: Untersuchungen von Schwindungsporositäten mittels mechanisierter Ultraschallprüfung mit Sampling Phased Array Technik an Sphäroguss von Windkraftanlagenkomponenten zur Abschätzung ihrer Schwingfestigkeit. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Potsdam, 26. bis 28. Mai, 2014
- /Kug61/ Kuguel, R.: A Relation between theoretical stress concentration factor and fatigue notch factor deduced from the concept of highly stressed volume. ASTM Proceedings,

- 1961
- /Kra86/ Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5., völlig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN-Nr. 978-3-662-10910-6, 1986
- /Kro06/ Kröning, M.; Hentschel, D.; von Bernus, L.; Bulavinov, A.; Reddy, K. M.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall. Deutsches Patent, Nr. DE10 2004 059 856 B4, 14. September, 2006
- /Kro07/ Kröning, M.; Bulavinov, A.; Reddy, K. M.; von Bernus, L.: Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung eines Prüfkörpers mittels Ultraschall. Deutsches Patent, Nr. DE 10 2005 051781 A1, 3. Mai, 2007
- /Lam60/ Lambert, J. H.: Photometria, sive de Mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae. Sumptibus Vidae Eberhardi Klett, Augsburg, 1760
- /Lam14/ Lampic, M.; Walz, M.: Gusseisen mit Vermiculargrafit – Teil 1: Definition, Geschichte, Herstellung, GJV als „grüner“ Werkstoff. GIESSEREI, 101, Nr. 1, 2014
- /Lan69/ Landgraf, R. W.; Morrow, J.; Endo, T.: Determination of the cyclic stress-strain curve. Journal of Materials, JMLSA, Nr. 4, 1969, S. 176 – 188
- /Lar09/ Larranaga, P.; Asenjo, I.; Sertucha, J.; Suarez, R.; Ferrer, I.; Lacaze, J.: Effect of Antimony and Cerium on the Formation of Chunky Graphite during Solidification of Heavy-Section Castings of Near-Eutectic Spheroidal Graphite Irons. The Minerals, Metals and Materials Society and ASM International, 2009
- /Lie68/ Liebrich, M.: Kerbempfindlichkeit von Stählen im Gebiet der Zeitfestigkeit. Dissertation, Universität Stuttgart, 1968
- /Lin98/ Lin, C.; Lee, W.: Effects of highly stressed volume on fatigue strength of austempered ductile irons. International Journal of Fatigue, 20, Nr. 4, 1998, S. 301 – 307
- /Lun14/ Heinrietz, A.; Bleicher, C.; Kurz, J.; Rabe, J.: Lunkerfest – Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf Basis zerstörungsfreier Prüfungen an dickwandigen Eisengussbauteilen in der Windenergie. Abschlussbericht, Vorhabenummer 0325239A, 2014
- /Man65/ Manson, S. S.: Fatigue: A complex subject – some simple approximations. Experimental Mechanics, 5, Nr. 7, 1965, S. 45 – 87
- /Mau99/ Mauch, H.: Statistische Methoden zu Beurteilung von Bauteillebensdauer und Zuverlässigkeit und ihre beispielhafte Anwendung auf Zahnräder. Abschlußbericht. Forschungsvorhaben AiF-Nr. 11154 / N, "Lebensdauerstatistik", Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit IMAB, TU Clausthal, 1999
- /Ma15a/ Masendorf, R.; Müller, C.; Henkel, C.; Klingelhöffer, H.; Klubberg, F.; Scholz, A.; Wagne-ner, R.: DIN 50100 Schwingfestigkeitsversuch – Aktueller Stand der Überarbeitung. Tagungsband VDEh Werkstoffprüfung 2015 Bad Neuenahr, Fortschritte in der Werkstoffprüfung für Forschung und Praxis, Stahlinstitut VDEh, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde DGM e.V., Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung DVM e.V., Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Herausgeber: Borsutzki, M.; Moninger, G.; ISBN 978-3-514-00816-8, 3. und 4. Dezember, 2015, S. 175 – 180
- /Ma15b/ Maschke, W.: Chunkygrafit – sein Auftreten und seine Vermeidung. GIESSEREI, 102,

- Nr. 12, 2015, S. 36 – 41
- /Mik14/ Mikoleizik, P.; Geier, G.: SiWind – Werkstoffentwicklung für Offshore-Windenergieanlagen im Multi-Megawatt-Bereich. GIESSEREI, 101, Nr. 9, 2014, S. 64 – 69
- /Moo27/ Moore, H. F.; Kommers, J. B.: The Fatigue of Metals – With Chapters on the Fatigue of Wood and of Concrete. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, London, 1927
- /Mor65/ Morrow, J. D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals, ASTM STP 378, American Society for Testing and Materials, 1965, S. 45 – 87
- /Mu94a/ Müller, A.: Zum Festigkeitsverhalten von mehrachsig stochastisch beanspruchten Gusseisen mit Kugelgraphit und Temperguß. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-203, 1994
- /Mu94b/ Müller, F.: Bewertung des Einflusses von Fehlern auf die Schwingfestigkeit von gegossenen und geschweißten Eisenwerkstoffen. Dissertation, Technische Universität München, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-205, 1994
- /Mue15/ Müller, C.: Zur statistischen Auswertung experimenteller Wöhlerlinien. Dissertation, Fakultät für Mathematik/Informatik und Maschinenbau der Technischen Universität Clausthal, 2015
- /Mul16/ Mullins, J. D.: Chunky-Graphit in Gusseisen mit Kugelgraphit. Sorelmetal, Vorschläge zur Herstellung von Gußeisen mit Kugelgraphit, RIO TINTO IRON & TITANIUM INC. http://www.sorelmetal.com/de/publi/PDF/093_DE.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2016
- /Mur94/ Murakami, Y.; Endo M.: Effects of defects, inclusions and inhomogenities on fatigue strength. International Journal of Fatigue, 16, Nr. 3, 1994, S. 163 – 182
- /Neu68/ Neuber, H.: Über die Berücksichtigung der Spannungskonzentration bei Festigkeitsberechnungen. Konstruktion, 20, Nr. 7, 1968, S. 245 – 251
- /Neu85/ Neuber, H.: Kerbspannungslehre. 1., 2. und 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1937, 1958 und 1985
- /Neu86/ Neugebauer, J.: Zum Schwingfestigkeitsverhalten von Gußwerkstoffen unter mehrachsiger frequenzverschiedener Beanspruchung. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-175, 1986
- /Nie08/ Nieslony, A.; el Dsoki, C.; Kaufmann, H.; Krug, P.: New method for evaluation of the Manson-Coffin-Basquin and Ramberg-Osgood equations with respect to compatibility. International Journal of Fatigue, Nr. 30, 2008, S. 1967 – 1977
- /Olk15/ Ol'khovik, E.: Study of the Effect of Shrinkage Porosity on Strength Low Carbon Cast Steel. Materials Science and Engineering, 91, 2015, S. 1 – 9
- /Pet74/ Peterson, R. E.: Stress concentration design factors. John Wiley Verlag, 1974
- /Pow10/ Powazka, D.; Leitner, H.; Brune, M.; Eichseder, W.; Oppermann, H.: Fertigungsbedingte Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Al-Gussbauteilen – Neue Erkenntnisse für Druckgusslegierungen. GIESSEREI, 97, Nr. 7, 2010, S. 34 – 42
- /Pri91/ Prinz, B.; Reifferscheid, K. J.; Schulze, T.; Döpp, R.; Schürmann, E.: Untersuchungen

- von Ursachen von Graphitentartungen bei Gußeisen mit Kugelgraphit in Form von Chunky-Graphit. GIESSEREI-FORSCHUNG, 43, Nr. 3, 1991
- /Pud12/ Pudovikov, S.: Prüfprotokoll – Ultraschall-Voruntersuchungen zu Projekt Lunkerfest Sampling-Phased-Array-Verfahren. Projektnummer 169102, Fraunhofer-Institut IZFP, Saarbrücken, 23. Juli, 2012
- /Pud13/ Pudovikov, S.: Optimierung und Nachweis der Ultraschallprüfbarkeit von akustisch anisotropen Werkstoffen an austenitischen Schweiß- und Mischverbindungen. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 2013
- /Rad00/ Radaj, D.; Sonsino, C. M.: Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten, Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 142, DVS Media, ISBN 978-2-87155-191-8, 2000
- /Rad06/ Radaj, D.; Sonsino, C. M.; Fricke, W.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. 2. Auflage, Woodhead Publishing, Ltd., Abington Hall, Abington, Cambridge, ISBN 978-1-85573-948-2, 2006
- /Rad07/ Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Ingenieure. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage mit 453 Abbildungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 978-3-540-71458-3, 2007
- /Rad09/ Radaj, D.; Sonsino, C. M.; Fricke, W.: Recent developments in local concepts of fatigue assessment of welded joints. International Journal of Fatigue, 31, Nr. 1, 2009, S. 2 – 11
- /Rai78/ Rainer, G.: Errechnung von Spannungen in Schweißverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1978
- /Ram43/ Ramberg, W.; Osgood, W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. NACA Techn. Rep. 902, NACA, 1943
- /Ran58/ Rankine, W. J. M.: A manual of applied mechanics. Richard Griffin and Company, London, Glasgow, 1858
- /Rim04/ Rimmer, A.: ADI ermöglicht neue Lösungen für den Automobilbau. Konstruieren + Gießen, 29, Nr. 3, 2004, S. 21 – 24
- /Rip08/ Riposan, I.; Chisamera, M.; Stand, S.; Skaland, T.: Surface Graphite Degeneration in Ductile Iron Castings for Resin Molds. Tsinghua Science and Technology, 13, Nr. 2, ISSN 1007-0214, 2008, S. 157 – 163
- /Ro12a/ Röhrig, K.: Legiertes Gusseisen Teil 3. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 6, 2012, S. 225 – 235
- /Ro12b/ Röhrig, K.: Legiertes Gusseisen Teil 4. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 9, 2012, S. 359 – 366
- /Roe01/ Rötder, H.: Dross in Gusseisen mit Kugelgraphit. RIO TINTO IRON & TITANIUM INC. http://www.sorelmetal.com/de/publi/PDF/098_DE.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2016
- /Roe04/ Röhrig, K.: Austenitische Gusseisen. Konstruieren + Gießen, 29, Nr. 2, 2004, S. 2 – 33
- /Roe13/ Röhrig, K.: Legiertes Gusseisen Teil 10 – Wirkung der Elemente in der Schmelze und bei der Erstarrung. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 11, 2013, S. 482 – 496
- /Roe15/ Röhrig, K.: Schriftenreihe: Legiertes Gusseisen Teil 1 bis Teil 19. GIESSEREI-PRAXIS, Nr. 1/2, 2012, bis Nr.10, 2015

- /Roe87/ Röhrig, K.: Niedriglegierte graphitische Gußeisenwerkstoffe – GG, GGV und GGG – Eigenschaften und Anwendung. *Konstruieren + Gießen*, 12, Nr. 1, 1987, S. 29 – 47
- /Roe95/ Röntgen, W. C.: Über eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft zu Würzburg*, Neudruck, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1985
- /San77/ Sanders, T. H. Jr.; Mauney, D. A.; Staley, J. T.: In: Jaffee, R. I.; Wilcox, B. A., editors: *Strain control fatigue as a tool to interpret fatigue initiation of aluminum alloy*, Fundamental aspects of structural alloy design. New York, USA, Plenum publishing, 1977
- /Sch11/ Schönborn, S.: Innendruck Sphäroguss, Drucksteigerung bei zyklisch innendruckbeanspruchten Bauteilen durch Verwendung von neu entwickelten höherfesten Gusswerkstoffen. Abschlussbericht, Vorhabenummer 941, Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt, 2011
- /Sch67/ Schütz, W.: Über eine Beziehung zwischen der Lebensdauer bei konstanter und veränderlicher Beanspruchungsamplitude und ihre Anwendbarkeit auf die Bemessung von Flugzeugbauteilen. *Dissertation*, Technische Hochschule München, 1965 und *Zeitung für Flugwissenschaften*, 15, Nr. 11, 1967, S. 407 – 419
- /Sch68/ Schmitt-Thomas, K. G.: *Zerstörungsfreie Prüfung in der Schadensverhütung*. Allianz Versicherungs-AG, München, Berlin, 1968, S. 47 – 55
- /Sch88/ Schütz, W.: Vom Werkstoff zum Bauteil – Wunsch und Wirklichkeit. Aus Vorträge der Tagung „Werkstoffprüfung 1988“, 1. und 2. Dezember in Bad Nauheim, DVM Deutscher Verband für Materialprüfung e.V., 1988, S. 9 – 51
- /Shi11/ Shirani, M.: Probabilistic and defect tolerant fatigue assessment of wind turbine casting, *Dissertation*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU Trondheim, 2011
- /See96/ Seeger, T.: *Stahlbau Handbuch – Für Studium und Praxis*. Band 1, neu bearbeitete Auflage, Stahlbau Verlagsgesellschaft, Köln, 1996
- /SEP06/ Stahlinstitut VDEh: Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feinblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung. *Stahl-Eisen-Prüfblatt SEP 1240*, 1. Ausgabe, Düsseldorf, 2006
- /Sie13/ Siempelkamp Giesserei: Gesenkschmiedepressen für die Nanshan-Gruppe: Weltrekordabguss mit 320 t Flüssigisen. Siempelkamp Giesserei, http://www.siempelkamp.com/fileadmin/media/Deutsch/gusstechnik/unternehmen/Weltrekordabguss_mit_320_Fluessigisen_DE.pdf, zuletzt geprüft am 10.01.2016
- /Sie49/ Siebel, E.; Meuth, H.: Die Wirkung von Kerben bei schwingender Beanspruchung. *VDI-Zeitschrift*, 91, Nr. 13, 1949, S. 319 – 323
- /Sie55/ Siebel, E.; Stieler, M.: Ungleichförmige Spannungsverteilung bei schwingender Beanspruchung. *VDI-Zeitschrift*, 97, 1955, S. 121 – 152
- /Sim75/ Simbürger, A.: Festigkeitsverhalten zäher Werkstoffe bei einer mehrachsigen, phasenverschobenen Schwingbeanspruchung mit koerperfesten und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen. *Dissertation*, Technische Hochschule Darmstadt, Fraun-

- hofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-121, 1975
- /Sig03/ Sigl, K. M.; Hardin, R. A.; Stephens, R. I.; Beckermann, Ch.: Fatigue of 8630 Cast Steel in the Presence of Shrinkage Porosity. Proceedings of the 57th SFSA Technical and Operating Conference, Paper Nr. 3.5, Steel Founders' Society of America, Chicago, IL, 2003, S. 1 - 37
- /Sjo07/ Sjögren, T.: Influences of the Graphite Phase on Elastic and Plastic Deformation Behaviour of Cast Irons. Dissertation, School of Engineering, Jönköping University, 2007
- /Smi10/ Smith, J. H.: Some experiments on fatigue of metals. The Journal of the Iron and Steel Institute, Nr. 82, E. & F. Spon, Ltd., New York, London, 1910
- /Smi70/ Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: A stress-strain function for the fatigue of metals. Journal of Materials, 5, Nr. 4, 1970, S. 767 – 778
- /So05a/ Sonsino, C. M.: Principles of Variable Amplitude Fatigue Design and Testing. Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions, ASTM STP 1439, P.C. McKeighan and N. Ranganathan, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005, S. 3 – 23
- /So05b/ Sonsino, C. M.: „Dauerfestigkeit“ – Eine Fiktion. Konstruktion, 57, Nr. 4, 2005, S. 87 – 92
- /So88a/ Sonsino, C. M.; Lipp, K.: Übertragbarkeit des an Winkelproben ermittelten Betriebsfestigkeitsverhaltens auf große Rohrknoten für die Offshore-Technik. Vorträge des fünften LBF-Kolloquiums am 8. und 9. März 1988 in Darmstadt, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht TB-180, 1988
- /So88b/ Sonsino, C. M.; Umbach, R.: Gegenüberstellung verschiedener Fertigungs- und Konstruktionsmöglichkeiten von schwingbeanspruchten Rohrknoten bei Offshore-Bauwerken. Deutscher Verband für Materialprüfung, Arbeitskreis Betriebsfestigkeit, Vorträge des DVM-Tages 1988, Berlin, 1988, S. 129 – 150
- /So90a/ Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Engels, A.: Schwingfestigkeit von festgewalzten, induktionsgehärteten sowie kombiniert behandelten Eisen-Graphit-Gußwerkstoffen unter konstanten und zufallsartigen Belastungen. Sonderdruck aus „Giessereiforschung“, 42, Nr. 3, 1990, S. 110 – 121
- /So90b/ Sonsino, C. M.; Dieterich, K.: Einfluß der Porosität auf das Schwingfestigkeitsverhalten von Aluminium-Gußwerkstoffen. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-188, 1990
- /So95a/ Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Grubišić, V.: Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten am Beispiel eines betriebsfest auszulegenden geschmiedeten Nutzfahrzeug-Achsschenkels. Konstruktion, 47, 1995, S. 222 – 232
- /So95b/ Sonsino, C. M.; Grubišić, V.: Hochwertige Gußbauteile – Forderungen zur Betriebsfestigkeit. Fortdruck aus VDI BERICHTE Nr. 1173, 1995, S. 159 – 190
- /Soc00/ Socie, D.; Marquis, G., B.: Multiaxial Fatigue. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, U.S.A, ISBN 0-7680-0453-5, 2000
- /Son00/ Sonsino, C. M.: Werkstoffauswahl für schlagartig und zyklisch belastete metallische

- Bauteile, DVM-Bericht 127 „Mit Kerben leben?“, Deutscher Verband für Materialforschung- und prüfung e.V., Koblenz, 2000, S. 21 – 38
- /Son07/ Sonsino, C. M.: Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *International Journal of Fatigue*, Nr. 29, 2007, S. 2246 – 2258
- /Son08/ Sonsino, C. M.: Betriebsfestigkeit – Eine Einführung in die Begriffe und ausgewählte Bemessungsgrundlagen. *MP Materials Testing*, Hanser Verlag, 50, Nr. 1/2, 2008, S. 77 – 90
- /Son09/ Sonsino, C. M.; Streicher, M.: Optimierung von Nutzfahrzeugsicherheitskomponenten aus Eisengraphitguss – Werkstoffauswahl und Formgebung unter Berücksichtigung der Betriebsbelastung. *MP Materials Testing*, Hanser Verlag, 51, Nr. 7/8, 2009
- /Son10/ Sonsino, C. M.: Vorlesungs-Skript Betriebsfestigkeit – Bauteilauslegung unter Schwingbeanspruchung mit konstanten und variablen Amplituden. Technische Universität Darmstadt, Sommersemester, 2010
- /Son11/ Sonsino, C. M.: Influence of material's ductility and local deformation mode on multi-axial fatigue response. *International Journal of Fatigue*, 33, 2011, S. 930 – 947
- /Son79/ Sonsino, C. M.: Bedeutung von Aufnahmeverfahren zur Ermittlung von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven. Sonderdruck aus dem Berichtsband „Kurzzeit-Schwingfestigkeit und elasto-plastisches Werkstoffverhalten“, 5. Sitzung des Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, 8. und 9. Oktober 1979, Stuttgart, Herausgeber: Rie, K.-T.; Haibach, E., Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin, 1979, S. 221 – 229
- /Son82/ Sonsino, C. M.: Einfluß von Kaltverformungen bis 5 % auf das Kurzzeitschwingfestigkeitsverhalten metallischer Werkstoffe. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-161, 1982
- /Son85/ Sonsino, C. M.; Grubišić, V.: Mechanik von Schwingbrüchen an gegossenen und gesinterten Konstruktionswerkstoffen unter mehrachsiger Beanspruchung. *Konstruktion*, 37, Nr. 7, 1985, S. 261 – 269
- /Son86/ Sonsino, C. M.; Kulka, C.; Huth, H.: Breitere Verwendung hochwertiger Stahlqualitäten für schwingbeanspruchte Bauteile durch Bereitstellen verlässlicher Kennwerte. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl, Vertrag Nr. 7210 – KD / 113, 1. Juli 1981 bis 30. April 1986
- /Son89/ Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.: Schwingfestigkeit von reinigungs- und verfestigungsgestrahlten duktilen Eisen-Graphit-Gußwerkstoffen unter konstanter und zufallsartiger Belastung. Sonderdruck aus „Giessereiforschung“, 41, Nr. 3, 1989, S. 99 – 106
- /Son92/ Sonsino, C. M.: Schwingfestigkeit von Al₂O₃- und Si₃Ni₄-Keramiken. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-195, 1992
- /Son93/ Sonsino, C. M.: Zur Bewertung des Schwingfestigkeitsverhalten von Bauteilen mit Hilfe örtlicher Beanspruchungen. *Konstruktion*, 45, 1993, S. 25 – 33
- /Son97/ Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Foth, J.; Jauch, F.: Fatigue Strength of Driving Shafts of Automatic Transmission Gearboxes Under Operational Torques. SAE International,

- International Congress & Exposition, Detroit, Michigan, 24. bis 27. Februar, 1997
- /Spi78/ Spindel, J. E.; Haibach, E.: The method of maximum likelihood applied to the statistical analysis of fatigue data including run-outs. S.E.E. International Conference, University of Warwick, Coventry, 3. bis 6. April, 1979, S. 7.1 – 7.23
- /Sta01/ Stanzl-Tschegg, S. E.; Mayer, H.: Fatigue and fatigue crack growth of aluminium alloys at very high numbers of cycles. International Journal of Fatigue, 23, 2001, S. 231 – 237
- /Sta82/ Starkey, M. S.; Irving, P. E.: A comparison of the fatigue strength of machined and as-cast surfaces of SG iron. International Journal of Fatigue, 1982, S. 129 – 136
- /Ste95/ Stegemann, D.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren: Radiographie und Radioskopie. B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, ISBN 3-519-06355-7, 1995
- /Ste13/ Stets, W.; Löblich, H.: Werkstoff- und fertigungstechnische Grundlagen der Herstellung und Anwendung von hoch siliciumhaltigem Gusseisen mit Kugelgraphit – Teil 1: Einfluss von Silicium auf die mechanischen Eigenschaften, Versprödungseffekte, Seigerungen, Graphitformabweichungen, Wirkung von höheren Gehalten an Mn, Cr und V. GIESSEREI, 100, Nr. 7, 2013, S. 30 – 47
- /Ste14/ Stets, W.; Petzschmann, U.; Hentsch, R.; Lötschert, A.: Entstehung und Vermeidung von Chunkygraphit in Gusseisen mit Kugelgraphit. GIESSEREI, 101, Nr. 11, 2014, S. 36 – 47
- /Thu32/ Thum, A.; Buchmann, A.: Dauerfestigkeit und Konstruktion. VDI Verlag, Berlin, 1932
- /Thu60/ Thum, A.; Petersen, C.; Svenson, O.: Verformung, Spannung und Kerbwirkung – Eine Einführung. VDI Verlag, Düsseldorf, 1960
- /Tip07/ Tipler, P. A.; Mosca, G.: Physik – Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2., deutsche Auflage, herausgegeben von D. Pelte, ISBN 978-3-8274-1164-8, 2007
- /Tre64/ Tresca, H.: Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, Nr. 59, S. 754 – 758, 1864
- /Tro14/ Trömer, M.: Dross im Großgussbereich – Bisherige Arbeiten und eine Charakterisierung von Dross anhand von Materialuntersuchungen. Masterarbeit, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, 2014
- /Udr13/ Udriou, A.: Die Keil-Theorie – Ein neuer Ansatz zur Erklärung der Bildung von Chunky-Graphit in Gusseisen mit Kugelgraphit. Giesserei-Rundschau, 60, Nr. 11/12, 2013
- /VDG01/ Institut für Gießereitechnik GmbH (IfG), Gesellschaft für Radiographie (GfR) GmbH: VDG-Merkblatt P-541, Fehlervergleichskatalog für die Bewertung von Durchstrahlungsprüfungen an dickwandigen Gußstücken aus unlegierten EN-GJS-Werkstoffen. Verein Deutscher Gießereifachleute e.V. VDG, 2001
- /vMi13/ von Mises, R.: Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse, 1913, S. 582 – 592
- /Wag07/ Wagener, R. W.: Zyklisches Werkstoffverhalten bei konstanter und variabler Beanspruchungsamplitude, Dissertation, Clausthal-Zellerfeld, Papierflieger, 2007

- /Wan13/ Wang, Z.; Zhao, W.; Zhou, Z.; Jiang, S.; Yu, X.; Wangm Q.: Effect of shrinkage porosity on mechanical properties of ferritic ductile iron. *China Foundry*, 10, Nr. 3, 2013, S. 141 – 147
- /Wei39/ Weibull, W.: A statistical theory of the strength of materials. Ingeniörsvetenskapsakademins Handlingar Nr. 151, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm, 1939
- /Whi12/ White, D.: Avoiding Shrinkage Defects and Maximizing Yield in Ductile Iron. *Transactions of American Foundry Society* 120, Paper 12-081, 2012, S. 389 – 398
- /Woh11/ Wohlfahrt, M.; Oberwinkler, C.; Tunzini, S.; Rauscher, A.; de la Prida Caballero, R.; Eichelseder, W.: Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Gusseisen und deren Einbindung in die Berechnung der Bauteillebensdauer. VDI-Bericht 2122, Gießtechnik im Motorenbau – Anforderungen an die Automobilindustrie, VDI Verlag, 2011
- /Wie12/ Wiebesiek, J.; Festigkeitshypothesen zum Schwingfestigkeitsverhalten von dünnwandigen Laserstrahlschweißverbindungen aus Aluminium unter mehrachsigen Beanspruchungen mit konstanter und veränderlichen Hauptspannungsrichtungen. Dissertation, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8440-1278-1, 2012
- /Woe70/ Wöhler, A.: Ueber die Festigkeits-Versuche mit Eisen und Stahl. *Zeitschrift für Bauwesen*, Band 20, 1870, S. 73 - 106
- /Zen00/ Zenner, H.; Esderts, A.; Pötter, K.; Hübner, K.; Traupe, M.: Betriebsfestigkeit I – Skript zur Vorlesung, Institut für Maschinelle Anlagentechnik und Betriebsfestigkeit, Technische Universität Clausthal, 2000
- /Zen80/ Zenner, H.; Heidenreich, R.; Richter, I.: Schubspannungsintensitätshypothese – Erweiterung und experimentelle Abstützung einer neuen Festigkeitshypothese für schwingende Beanspruchung. *Konstruktion*, 32, 1980, S. 143 – 152
- /ZGV07/ Bartels, Ch.; Gerhards, R.; Hanselka, H.; Herfurth, K.; Kaufmann, H.; Kleinkröger, W.; Löblich, H.; Menk, W.; Pusch, G.; Schmidt T.; Schütt, K.-H.; Tölke, P.; Warnke, E. P.: Gusseisen mit Kugelgraphit – Herstellung – Eigenschaften – Anwendung. *Konstruieren + Gießen*, 32, Nr. 2, ZGV-Zentrale für Gussverwendung im Deutschen Geißereiverband, 2007
- /Zha04/ Zhang, G.; Sonsino, C.M.: Einfluss der Porosität auf die Schwingfestigkeit von Proben und Bauteilen aus Aluminiumguss. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, 35, Nr. 3, 2004, S. 125 – 134
- /Zim07/ Zimmer A.: Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen. Dissertation, Universität Kassel, 2007
- /Zin06/ Zinke, R.; Heinrietz, A.; Kaufmann, H.; Heim, R.; Sonsino, C. M.; Hanselka, H.: Betriebsfestigkeit von Gussbauteilen aus EN-GJS-400-15 und EN-GJS-800-8 (ADI) unter quasi-statischer, schlagartiger und zyklischer Belastung ohne und mit Vorverformung. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, LBF-Bericht Nr. FB-229, 2006

Bildverzeichnis

Bild 1 Rotornabe einer Windenergieanlage /Mik14/	1
Bild 2 Gussbauteile einer Großpresse /Fas14/	3
Bild 3 Systematik der Gusseisenwerkstoffe nach /Bar99/	5
Bild 4 Graphitstruktur des GJL (a), des GJV (b) und des GJS (c) /ZGV07/	6
Bild 5 Chunky-Graphit /Has99/	10
Bild 6 Lunker in einer Schwingprobe aus EN-GJS-700-2	11
Bild 7 Einteilung der Betriebsfestigkeit nach /Son08/	13
Bild 8 Kennzeichnung von Schwingspielen	14
Bild 9 Kenngrößen der Spannungs-Dehnungs-Hysterese in Anlehnung an /Hai06/	15
Bild 10 Haigh-Diagramm mit der Definition der Mittelspannungsempfindlichkeit nach Schütz sowie für den Verlauf der Mittelspannungsempfindlichkeit von $R = -\infty$ bis $R > 0,5$ nach /FKM12/ nach /Hai06/	16
Bild 11 Abhängigkeit der Mittelspannungsempfindlichkeit von Werkstoff und Zugfestigkeit /Sch67, So95a/	17
Bild 12 Kerbempfindlichkeit für Gusseisenwerkstoffe /Hue85/	19
Bild 13 Spannungsgradient /Sie49, Sie55/	20
Bild 14 Darstellung der volumenbezogenen Stützwirkung	22
Bild 15 Einfluss des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens auf die örtliche Beanspruchbarkeit in Abhängigkeit von Belastungsart und Bauteilgeometrie /Son10/	24
Bild 16 Darstellung des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens /So95a/	25
Bild 17 Kennwerte der Wöhlerlinie in Anlehnung an /Hai06/	26
Bild 18 Bestimmung von K' und n'	30
Bild 19 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und Erstbelastungskurve für einen EN-GJS-400	30
Bild 20 Darstellung der elastischen, plastischen und der summierten Dehnungswöhlerlinie	31
Bild 21 Belastungsverlauf beim Incremental Step Test /Lan69/	32
Bild 22 Kollektivformen und Formparameter (bezogene Kollektive) nach /Bux92, Zen00/	33
Bild 23 Einfluss der Kollektivform auf die Lebensdauer nach /Son08/	34
Bild 24 Bemessungskonzepte /Son08/	36
Bild 25 Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre nach /Fuc11/	41
Bild 26 Rekonstruktion der Aufnahme einer Messung mit Sampling Phased Array nach /Kur14/	44
Bild 27 Amplitudenwerte des Rückwandechos in Abhängigkeit der lokalen Dichte /Kur14/	45
Bild 28 Schwingfestigkeit und Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Ungängen nach /Kau98/	46

Bild 29 Abschätzung der Kerbwirkung K_f der Lunker für AISI 8630 nach /Bla05/.....	47
Bild 30 Ablaufdiagramm der Entnahme von Schwingproben aus Gussplatten und Bauteilen.....	50
Bild 31 Gussplatte aus EN-GJS-400-18-U-LT, Dicke: 230 mm	51
Bild 32 Einer von drei Abschnitten des Rotorlagerdeckels mit Maßen	51
Bild 33 Röntgenbild sowie SPA-Summen-B-, -C- und -D-Bild eines Abschnitts der Gussplatte aus EN-GJS-700-2 mit der Markierung der Lage des Schwerpunktes (grüner Punkt) und der Längsausdehnung der Schwingproben (grüner Strich) basierend auf /Pud12/	53
Bild 34 Gussplatte aus EN-GJS-700-2 mit Lage der Schwingproben mit Lunkern (grau) und der ungänzenfreien Schwingproben (grün und violett) sowie Markierung des in Bild 33 gezeigten Bereiches.....	54
Bild 35 Runde Schwingprobe für Lunker und Referenzversuche, $d = 15$ mm, ungekerbt, $K_t = 1,05$	55
Bild 36 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, ungekerbt, $K_t = 1,04$	55
Bild 37 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, mild gekerbt, $K_t = 1,19$	55
Bild 38 Runde Schwingprobe für Referenzversuche, $d = 6$ mm, scharf gekerbt, $K_t = 4,14$	55
Bild 39 FEA der mild gekerbten Schwingprobe mit Spannungskonzentration im Kerbgrund.....	56
Bild 40 Ablaufplan der zerstörungsfreien und zerstörenden Untersuchungen an Rundproben.....	58
Bild 41 Schwingproben mit Prüfdurchmesser $d = 6$ mm und Lunkern.....	59
Bild 42 Messaufbau für die Bestimmung des fiktiven Elastizitätsmoduls der Schwingproben mit den Messpositionen /Bl15b/	60
Bild 43 Servo-hydraulische Prüfmaschine (160 kN Maximallast), Schwingprobe und Dehnungsaufnehmer.....	61
Bild 44 Zyklische Spannungs-Dehnungs- und Erstbelastungskurven, Schwingprobenlage außen	64
Bild 45 Dehnungswöhlerlinien der untersuchten Werkstoffe für die Entnahmeposition außen ($d = 15$ mm).....	65
Bild 46 Vergleich n' und K' aus Kompatibilität und Ausgleichsrechnung (MWR01).....	66
Bild 47 Regression über elastische Dehnungsanteile aus 179 Einzelversuchen	67
Bild 48 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve und trilineare Dehnungswöhlerlinie (MWR01).....	69
Bild 49 Mittelspannungskorrektur im Haigh-Diagramm	71
Bild 50 Vergleich der Neigung k mit der 0,2 %-Dehngrenze und der Langzeitschwingfestigkeit.....	73
Bild 51 Zusammenfassung der spannungsgeregelten Schwingfestigkeitsergebnisse	73
Bild 52 Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ für den EN-GJS-400-18U-LT, den EN-GJS-450-18 sowie den EN-GJS-700-2.....	75
Bild 53 Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ für den EN-GJS-400-18U-LT im Vergleich zu Ergebnissen aus /Kau98/.....	76
Bild 54 Vergleich experimentelle und synthetische Schwingfestigkeit	79
Bild 55 Haigh-Diagramm für die untersuchten Werkstoffe	80

Bild 56 Örtlicher Dehnungsverlauf am Beispiel der scharf gekerbten Schwingproben ($K_t = 4,14$) des EN-GJS-450-18 mit Kompensation der Verformungsüberschätzung nach /Son82, Son93/.....	81
Bild 57 Mittelspannungsempfindlichkeit der scharf gekerbten Proben ($K_t = 4,14$) für den EN-GJS-450-18	82
Bild 58 Vergleich der Mittelspannungsempfindlichkeit mit Ergebnissen von /Klu01/	83
Bild 59 Vergleich der Neigungen $k_{R=-1}$ und $k_{R=0}$ mit /Klu01/	84
Bild 60 Mittelspannungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Lebensdauer	85
Bild 61 Einfluss einer als konstant angenommenen Mittelspannungsempfindlichkeit auf die Schwingfestigkeit.....	85
Bild 62 Beispiel für zwei durchstrahlte Rundproben; oben: ohne Lunker; unten: Lunkerklasse Cc-5 /Bu13a/	86
Bild 63 Beispiel für ein Ergebnis der CT-Untersuchungen (links: Querschnitt durch die Schwingprobe; rechts: komplettes Prüfvolumen einer Schwingprobe mit Lunkern).....	87
Bild 64 Ermittlung des hyperbolischen Elastizitätsmoduls nach /Sjo07/	88
Bild 65 Auswertung des fiktiven Elastizitätsmoduls für die vier Messpositionen für eine ungänzenfreie Schwingprobe und eine Schwingprobe der Lunkerklasse Cc-5	89
Bild 66 Gemittelte fiktive Elastizitätsmoduli je Werkstoff und Lunkerklasse	89
Bild 67 Ablauf der Auswertung der Schwingproben mit Lunkern	90
Bild 68 Wöhlerlinie für die Schwingproben der Lunkerklasse Cc-4 und den ungänzenfreien Werkstoffzustand (EN-GJS-450-18).....	91
Bild 69 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunkerklasse Cc-3	92
Bild 70 Beispiel für zwei Schwingproben mit Lunkern unterschiedlicher Lunkerklassen.....	93
Bild 71 Neuklassifizierung der Röntgenbilder	93
Bild 72 Beispiel zur Neueinteilung der Einzelversuche aus Lunkerklasse Cc-2, Cc-3 und Cc-4 zur Ermittlung der Lunkerklasse H-3.....	94
Bild 73 Wöhlerlinie für die Lunkerklasse H-3	95
Bild 74 Bestimmung der Bruchposition	96
Bild 75 Wöhlerlinie für die Lunkerklasse H-3 unter Berücksichtigung der tatsächlichen Bruchflächen .	97
Bild 76 Lunker in einer Schwingprobe.....	99
Bild 77 Schwingprobe mit herausgetrenntem Prüfvolumen für Wägung.....	102
Bild 78 Schwingfestigkeit der untersuchten Werkstoffe am Abknickpunkt $\sigma_{a,n,k}$ der ungänzenfreien Spannungswöhlerlinie gegenüber der Dichte ρ_w	103
Bild 79 Verarbeitung der Matrix mit Schwärzungsinformation	104
Bild 80 Umrechnung der Dichte aus dem Röntgenbild zur gemessenen Dichte	105
Bild 81 Schwingfestigkeit am Abknickpunkt in Abhängigkeit der Dichte aus Röntgenbildern für das gesamte Prüfvolumen der Schwingproben	106

Bild 82 Ermittlung der Bruchposition anhand der Röntgenbilder.....	107
Bild 83 Grauwertkurven für ausgewählte Schwingproben im Vergleich.....	108
Bild 84 Schwingfestigkeit am Abknickpunkt in Abhängigkeit der Dichte aus Röntgenbildern für das auf 2 mm eingegrenzte Prüfvolumen um die Bruchposition der Schwingproben.....	109
Bild 85 Regression zwischen gemessener Dichte ρ_w und fiktivem Elastizitätsmodul E_f	111
Bild 86 Umrechnung der Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunker auf den Abknickpunkt N_k der Spannungsreferenzwöhlerlinie.....	112
Bild 87 Kerbwirkungszahl K_{fs} in Abhängigkeit des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f für das gesamte Prüfvolumen der Schwingprobe.....	113
Bild 88 Kerbwirkungszahl K_{fs} in Abhängigkeit des fiktiven Elastizitätsmoduls E_f für ein Volumen ± 3 mm um die Bruchposition	115
Bild 89 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern	118
Bild 90 Experimentelle und rechnerische Schwingfestigkeit der Schwingproben mit Lunkern mit Sicherheitsfaktor S_{Sh}	119
Bild 91 Verhältnis zwischen Anriss- und Bruchschwingspielzahl in Abhängigkeit der Kerbformzahl K_t an Stahlwerkstoffen nach /Lie68/ aus /Son86/	121
Bild 92 Ablaufdiagramm der Schwingfestigkeitsbeurteilung von Großgussbauteilen mit Lunkern.....	123
Bild 93 Flowchart of fatigue assessment of thick-walled cast components with shrinkages	124
Bild 94 Bestimmung der Schwingfestigkeit jeder Schwingprobe mit Lunkern für $P_U = 97,7$ % aus der Lunkerwöhlerlinie.....	125
Bild 95 Gegenüberstellung von experimenteller und rechnerischer Schwingfestigkeit aller untersuchter Werkstoffe	127
Bild 96 Ablaufdiagramm der Bauteilbeurteilung	131
Bild 97 Flowchart of component assessment.....	135

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Konstanten für die Berechnung von n_x nach Gleichung (10) /Die85/	21
Tabelle 2 Chemische Zusammensetzungen der untersuchten Werkstoffe /BI14d/.....	52
Tabelle 3 Kennwerte der Schwingfestigkeitsproben	56
Tabelle 4 Quasistatische Materialkennwerte der untersuchten Werkstoffe ohne Lunker.....	57
Tabelle 5 Wöhlerlinienparameter der untersuchten Werkstoffe.....	74
Tabelle 6 Gegenüberstellung experimenteller und synthetischer Wöhlerlinienparameter	78
Tabelle 7 Ergebnisse der Lunkerklassifizierung nach Lunkerklasse, Werkstoff und Schwingproben.....	86
Tabelle 8 Parameter der werkstoffübergreifenden Wöhlerlinien nach Lunkerklassen	96
Tabelle 9 Schliffbilder.....	98
Tabelle 10 Bruchflächen sowie Detailaufnahmen der Lunker.....	100
Tabelle 11 Sicherheitszahlen, Streumaße und Überlebenswahrscheinlichkeiten P_0 aus /Hai06/	120
Tabelle 12 Sicherheitsfaktoren S_{ges} nach Gütestufen	126
Tabelle 13 Synthetische Wöhlerlinienparameter nach Gütestufen	126

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ADI	Austempered Ductile Iron (Ausferritisches Gusseisen mit Kugelgraphit)
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
C	Kohlenstoff
CT	Computertomographie
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
FEA	Finite-Element-Analyse
Fe ₃ C	Eisencarbid, Zementit
FEM	Finite-Element-Methode
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
HBV	höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
GGG	Gusseisen mit Kugelgraphit (alte Bezeichnung)
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJMB	Schwarzer Temperguss
GJMW	Weißer Temperguss
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit (neue Bezeichnung)
GJV	Gusseisen mit Vermiculargraphit
GL	Germanischer Lloyd
HCF	High-Cycle Fatigue
ISO	International Organization for Standardization
IST	Incremental Step Test
K	Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit
L	Bereich der Langzeitschwingfestigkeit
LCF	Low-Cycle Fatigue
MCF	Medium-Cycle Fatigue
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
NH	Normalspannungshypothese

P	Phosphor
S	Schwefel
SH	Schubspannungshypothese
Si	Silizium
SPA	Sampling Phased Array
UT	Ultraschall
VDG	Verein Deutscher Gießereifachleute
VHCF	Very High-Cycle Fatigue
X-ray	englisch: Röntgen
Z	Bereich der Zeitschwingfestigkeit
ZfP	Zerstörungsfreie Prüftechnik
®	Eingetragene Waren- oder Dienstleistungsmarke

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a_m, b_m, m, q, A, B, C, C_1, C_2, K, K_a,$	-	(Werkstoff-)Konstanten
b, b_1, b_2, b_3	-	Zyklischer Spannungsexponent
c	-	Zyklischer Dehnungsexponent
d	mm, m	Prüfdurchmesser
f	Hz, 1/s	(Prüf-)frequenz
j	-	Gütestufe
j_σ	-	Sicherheitszahl
k	-	Wöhlerlinienneigung im Bereich der Zeitschwingfestigkeit
\bar{k}	-	Gaßnerlinienneigung im Bereich der Zeitschwingfestigkeit
k^*	-	Wöhlerlinienneigung im Bereich der Langzeitschwingfestigkeit
$k(R = -1), k(R = 0)$	-	Wöhlerlinienneigung im Bereich der Zeitschwingfestigkeit
l	mm, m	Länge
m	kg, t	Masse
$n, n_{400-18}, n_{500-7}, n_{Sibodur}, n_{MADI}, n_{400-18U-LT}, n_{450-18}, n_{700-2}$	-	Kerbwirkungszahl
n_x	-	Stützziffer
n'	-	zyklischer Verfestigungsexponent
r	mm, m	(Kerb-)Radius
s	mm, m	Weg
s_N	-	Standardabweichung in Lebensdauerrichtung
s_σ	-	Standardabweichung in Spannungsrichtung
t	mm, m	Kerbtiefe, Wanddicke
x	mm, m	Strahlenweg, Materialdicke
A, A_5	%	Bruchdehnung
A_{Bruch}	mm ²	Bruchfläche
A_{Lunker}	mm ²	Lunkerfläche
A_{Nenn}	mm ²	Nennquerschnittsfläche
$A_{prüf}$	mm ²	Prüfquerschnitt der Schwingproben
A_{tat}	mm ²	tatsächliche Bruchfläche
B	mm	Breite

E	GPa	Elastizitätsmodul
E_f	GPa	fiktiver Elastizitätsmodul
E_{kin}	J	kinetische Energie
F	N	Kraft
F_a	N	Kraftamplitude
F_0	-	Rauheitsfaktor
H	-	Summenhäufigkeit
H_0	-	Kollektivumfang
$HBV_{90\%}$, $HBV_{90\%,gro\beta}$, $HBV_{90\%,klein}$	mm ³	höchstbeanspruchtes Werkstoffvolumen für 90% der maximalen Spannung
I_s	-	Strahlungsintensität
K'	GPa	zyklischer Verfestigungskoeffizient
K_f , $K_{f,400-18}$, $K_{f,500-7}$, $K_{f,Sibodur}$, $K_{f,MADI}$	-	Kerbwirkungszahl
K_{fs}	-	Kerbwirkungszahl für Lunker
K_t	-	Kerbformzahl
$K_{R,\sigma}$	-	Rauheitsfaktor
N , N_B , N_i , N_1 , N_2	-	Schwingspielzahl
N_k	-	Schwingspielzahl am Abknickpunkt
N_G	-	Grenzschwingspielzahl
M , M_σ , $M_{GJS-400}$, $M_{GJS-450}$, $M_{GJS-700}$, M_{d15mm} , M_{d6mm} , $M_{d6mm1,19}$, $M_{d6mm4,14}$	-	Mittelspannungsempfindlichkeit
M_a	Nm	Momentenamplitude
M_B	Nm	Biegemoment
M_T	Nm	Torsionsmoment
N_G	-	Grenzschwingspielzahl
P_i , P_{ges}	-	Wahrscheinlichkeit
P_{SWT}	%	Schädigungsparameter nach Smith, Watson und Topper
$P_{\bar{U}}$, P_S	-	Überlebenswahrscheinlichkeit
R , \bar{R} , R_F , R_E , R_G	-	Lastverhältnis
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
$R'_{p0,2}$	MPa	zyklische 0,2 %-Dehngrenze

R_z	μm	mittlere Rauheit
S, S_a, \bar{S}_a	MPa	Spannung
S_d	-	Gütestufenfaktor
S_{ges}	-	Gesamtsicherheit
$S_{P\ddot{u}}$	-	Sicherheitsfaktor zur Abminderung des Bemessungskennwertes auf eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\ddot{u}} = 97,7\%$
S_{Sh}	-	Sicherheitsfaktor
S_t	-	Wanddickenfaktor
T	s	Periode / Schwingspiel
T_N	-	Streuung in Lebensdauerrichtung
T_{Um}	$^{\circ}\text{C}$	Umgebungstemperatur
T_{σ}	-	Streuung in Spannungsrichtung
U_e	V	Beschleunigungsspannung
α	rad, $^{\circ}$	Winkel
$\Delta\sigma$	MPa	Schwingbreite
ε	%	Dehnung
$\varepsilon_a, \varepsilon_{a,\text{max}}$	%	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,\text{tr}}, \varepsilon_t$	%	Totaldehnung
$\varepsilon_{a,e}$	%	elastische Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{a,p}$	%	plastische Dehnungsamplitude
ε_e	%	elastische Dehnung
ε'_f	%	zyklischer Dehnungskoeffizient
ε_{lin}	%	örtliche Dehnung bei linear-elastischer Maximalspannung
ε_m	%	Mitteldehnung
$\varepsilon_{\text{Neuber}}$	%	örtliche Dehnung am Schnitt zwischen Neuber-Hyperbel und Spannungs-Dehnungs-Kurve
$\varepsilon_{\text{örtlich}}$	%	örtliche Dehnung
ε_p	%	plastische Dehnung
η_k	-	Kerbempfindlichkeitsziffer
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
μ	1/m	Schwächungskoeffizient

v	-	Kollektivformparameter, Neigung im Diagramm des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens (Volumenexponent)
ρ	g/cm ³	Dichte
ρ_{nenn}	g/cm ³	Nennichte des ungespannten Werkstoffzustandes
ρ_R	g/cm ³	aus Röntgenbild ermittelte Dichte
ρ_W	g/cm ³	durch Wägung ermittelte Dichte
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	1., 2. und 3. Hauptspannung
$\sigma_{1,\text{max}}$	MPa	maximale Hauptspannung
$\sigma_a, \overline{\sigma_a}, \sigma_{ai}, \sigma_i$	MPa	Spannungsamplitude
$\sigma_{a,k}$	MPa	Spannungsamplitude am Abknickpunkt
$\sigma_{a,n}$	MPa	Nennspannungsamplitude
$\sigma_{a,n,\text{exp}}$	MPa	Experimentelle Nennspannungsamplitude
$\sigma_{a,n,50\%}$	MPa	Nennspannungsamplitude für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 50 \%$
$\sigma_{a,n,k}$	MPa	Nennspannungsamplitude am Abknickpunkt
$\sigma_{a,n,k,50\%}$	MPa	Nennspannungsamplitude am Abknickpunkt für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 50 \%$
$\sigma_{a,n,\text{gekerbt}}$	MPa	Nennspannungsamplitude der gekerbten Schwingprobe
$\sigma_{a,n,k}$	MPa	Nennspannungsamplitude am Abknickpunkt
$\sigma_{a,n,\text{Lunker}}$	MPa	Nennspannungsamplitude der Schwingprobe mit Lunkern
$\sigma_{a,n,\text{Lunker},97,7\%}$	MPa	Nennspannungsamplitude der Schwingprobe mit Lunkern für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 97,7 \%$
$\sigma_{a,n,\text{ungekerbt}}$	MPa	Nennspannungsamplitude der ungekerbten Schwingprobe
$\sigma_{a,n,\text{NG}}$	MPa	Nennspannungsamplitude bei der Grenzschwingspielzahl
$\sigma_{a,n,\text{NG},50\%}$	MPa	Nennspannungsamplitude bei der Grenzschwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 50 \%$
$\sigma_{a,n,\text{NG},50\%,\text{außen},R=-1}$ $\sigma_{a,n,\text{NG},50\%,\text{außen},R=0}$	MPa	Nennspannungsamplitude bei der Grenzschwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 50 \%$ für die Schwingprobenlage außen
$\sigma_{a,n,\text{NG},50\%,\text{innen},R=-1}$ $\sigma_{a,n,\text{NG},50\%,\text{innen},R=0}$	MPa	Nennspannungsamplitude bei der Grenzschwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 50 \%$ für die Schwingprobenlage innen
$\sigma_{a,n,\text{rech}}$	MPa	Rechnerische Nennspannungsamplitude
$\sigma_{a,\delta,k,97,7\%}$	MPa	Örtliche Spannungsamplitude am Abknickpunkt für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_{\bar{0}} = 97,7 \%$

$\sigma_{a,\delta,NG,50\%}$, $\sigma_{a,\delta,NG,50\%,R=-1}$, $\sigma_{a,\delta,NG,50\%,R=0}$	MPa	Örtliche Spannungsamplitude bei Grenzschwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 50 \%$
$\sigma_{a,\delta,NG,97,7\%}$, $\sigma_{a,\delta,NG,97,7\%,R=-1}$, $\sigma_{a,\delta,NG,97,7\%,R=0}$	MPa	Örtliche Spannungsamplitude bei Grenzschwingspielzahl für eine Überlebenswahrscheinlichkeit $P_U = 97,7 \%$
$\sigma_{a,tat}$	MPa	Tatsächliche Spannungsamplitude
$\sigma_{a,zul}$	MPa	Zulässige Spannungsamplitude
σ'_{f1} , σ'_{f2} , σ'_{f3}	MPa	Zyklischer Spannungskoeffizient
σ_m	MPa	Mittelspannung, Mittelspannungsamplitude
σ_{max}	MPa	Spannungsüberhöhung
σ_n	MPa	Nennspannung
σ_o	MPa	Oberspannung
$\sigma_{\delta,m}$	MPa	örtliche Mittelspannung
$\sigma_{\delta,max}$	MPa	örtliche Maximalspannung
$\sigma_{\delta,min}$	MPa	örtliche Minimalspannung
$\sigma_{\delta,o}$	MPa	örtliche Oberspannung
σ_u	MPa	Unterspannung
σ_v , $\sigma_{v,GEH}$, $\sigma_{v,NH}$, $\sigma_{v,SH}$	MPa	Vergleichsspannung
σ_x , σ_y , σ_z	MPa	Komponenten des Spannungstensors in Richtung der x-, y- und z-Koordinate
τ , τ_{xy}	MPa	Schubspannung
τ_{max}	MPa	Maximale Schubspannung
φ	rad, °	Winkel
χ , χ_{klein} , $\chi_{groß}$	-	Spannungsgradient
χ^*	1/MPa	bezogener Spannungsgradient

Anhang T

Tabellenverzeichnis

Inhalt	Tabelle	Seite
Parameter der radiographischen Untersuchungen	Tabelle T 1	T 3
<i>Zyklische Materialkennwerte des EN-GJS-400-18U-LT</i>		
Zusammenfassung der Wöhlerlinienparameter	Tabelle T 2; Tabelle T 3	T 4 - T 5
Einzelergebnisse unter Dehnungsregelung	Tabelle T 4; Tabelle T 5; Tabelle T 6; Tabelle T 7	T 6 – T 9
Einzelergebnisse unter Spannungsregelung	Tabelle T 8; Tabelle T 9; Tabelle T 10; Tabelle T 11; Tabelle T 12; Tabelle T 13; Tabelle T 14; Tabelle T 15; Tabelle T 16; Tabelle T 17; Tabelle T 18; Tabelle T 19; Tabelle T 20; Tabelle T 21; Tabelle T 22	T 10 – T 17
<i>Zyklische Materialkennwerte des EN-GJS-450-18</i>		
Zusammenfassung der Wöhlerlinienparameter	Tabelle T 23; Tabelle T 24	T 18 – T 19
Einzelergebnisse unter Dehnungsregelung	Tabelle T 25; Tabelle T 26; Tabelle T 27; Tabelle T 28	T 20 – T 23
Einzelergebnisse unter Spannungsregelung	Tabelle T 29; Tabelle T 30; Tabelle T 31; Tabelle T 32; Tabelle T 33; Tabelle T 34; Tabelle T 35; Tabelle T 36; Tabelle T 37; Tabelle T 38; Tabelle T 39; Tabelle T 40; Tabelle T 41; Tabelle T 42; Tabelle T 43; Tabelle T 44; Tabelle T 45	T 24 – T 33
<i>Zyklische Materialkennwerte des EN-GJS-700-2</i>		
Zusammenfassung der Wöhlerlinienparameter	Tabelle T 46; Tabelle T 47	T 34 – T 35
Einzelergebnisse unter Dehnungsregelung	Tabelle T 48; Tabelle T 49; Tabelle T 50; Tabelle T 51	T 36 – T 39
Einzelergebnisse unter Spannungsregelung	Tabelle T 52; Tabelle T 53; Tabelle T 54; Tabelle T 55; Tabelle T 56; Tabelle T 57; Tabelle T 58; Tabelle T 59; Tabelle T 60; Tabelle T 61; Tabelle T 62; Tabelle T 63; Tabelle T 64; Tabelle T 65; Tabelle T 66; Tabelle T 67; Tabelle T 68	T 40 – T 49
Einzelergebnisse aus dehnungsgeregelten Versuchen nach Mittelspannungskorrektur	Tabelle T 69; Tabelle T 70; Tabelle T 71	T 50 – T 52
Übersicht der ermittelten Kerbwirkungszahlen K_f und der Stützziffern n_x für die scharf gekerbten Schwingproben ($K_f = 4, 14$)	Tabelle T 72	T 52
Ergebnisse des fiktiven Elastizitätsmoduls sowie Neueinteilung der Schwingproben mit Lunkern in Lunckerklassen H-1 bis H-5	Tabelle T 73; Tabelle T 74; Tabelle T 75	T 53 - T 58

Tabelle T 1 Parameter der radiographischen Untersuchungen an Schwingproben nach /Bu12e, Bu12f, Bu13a, Bu13b, Bu13c, Ha13a, Ha13b, Han99/

Aufnahmeparameter gemäß DIN EN 12681 /DIN81/	Schwingprobegeometrie	
	15 mm	6 mm
Aufnahmeanordnung	1	1
Durchstrahlte Wanddicke / [mm]	15 – 30	15 – 30
Strahlenquelle	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)
Röhrenspannung / [kV]	300	200
Röhrenstrom / [mA]	10	10
Brennfleckabmessungen / [mm x mm]	4, 4	4, 4
Belichtungszeit / [s]	15	30
Bildgüteprüfkörper (Drahtsteg) gemäß DIN EN 462-1 /DIN21/ und DIN EN 462-3 /DIN23/	10 FE EN	10 FE EN
Geforderte Bildgüte gemäß DIN EN 462-3 /DIN23/	W12	W14 / W12
Filmformat [mm x mm]	300, 400	300, 400
Filmsystem-Klassifizierung gemäß DIN EN 584-1 /DIN41/	C3 / C4	C3 / C4
Aufnahmefolien	Pb 0,1	Pb 0,1
Abstand Objekt / Film / [mm]	30	12
Abstand Objekt / Fokus / [mm]	970	988
Geometrische Unterschärfe / [mm]	0,14	0,05
Einstrahlwinkel	90°	90°

Tabelle T 2 Parameter der Dehnungswöhlerlinien für die ungespannten Werkstoffproben aus EN-GJS-400-18U-LT

Reihe	Anzahl Einzelversuche	zyklische Kennwerte nach Coffin, Manson und Basquin				zyklische Kennwerte nach Ramberg, Osgood		
		Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_t / [MPa]	Schwingfestigkeitsexponent b	Duktilitätskoeffizient ϵ'_t / [m/m]	Duktilitätsexponent c	Dehngrenze $R'_{p0,2}$ / [MPa]	Verfestigungskoeffizient K' / [MPa]	Verfestigungsexponent n'
MWR01	14	640,7	-0,09687	0,1423	-0,6562	341,0	854,4	0,1476
MWR02	15	683,0	-0,09719	0,9775	-0,8754	343,0	694,8	0,1110
MWR05	18	582,7	-0,08205	0,2463	-0,6974	331,0	687,1	0,1177
MWR06	15	562,2	-0,07619	0,08877	-0,5734	340,0	775,7	0,1330

Tabelle T 3 Parameter der Spannungswöhlerlinien für die ungespannten Werkstoffproben aus EN-GJS-400-18U-LT

Versuchsreihe	Lage der Schwingproben	Durchmesser der Schwingproben	Lunkerklasse	Belastungsart	Lastverhältnis R	Temperatur [°C]	Formzahl K_t	Anzahl Einzelversuche	Parameter der Spannungswöhlerlinien				
									Abknickpunkt	Neigung	Nennspannungsschwelligkeit bei N_k und $P_u = 50\%$	Nennspannungsschwelligkeit bei $N = 1 \cdot 10^7$ und $P_u = 50\%$	Streuung
MWR03	außen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	17	$1,58 \cdot 10^6$	6,65	143	137	1,19
MWR04	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,04	19	$1,58 \cdot 10^6$	9,22	163	156	1,29
MWR07	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,04	15	$1,58 \cdot 10^6$	8,99	102	98	1,21
MWR08	außen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	14	$1,58 \cdot 10^6$	9,46	96	92	1,09
MWR09	innen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	15	$1,58 \cdot 10^6$	7,73	92	88	1,22
MWR10	innen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	20	$1,58 \cdot 10^6$	6,86	142	137	1,18
MWR11	innen	15 mm	Cc-1	axial	-1	RT	-	14	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	116	112	1,71
MWR12	innen	15 mm	Cc-2	axial	-1	RT	-	1	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	48	46	-
MWR13	innen	15 mm	Cc-3	axial	-1	RT	-	9	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	69	66	2,68
MWR14	innen	15 mm	Cc-4	axial	-1	RT	-	1	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	20	19	-
MWR15	innen	15 mm	Cc-5	axial	-1	RT	-	2	$1,58 \cdot 10^6$	6,52	22	21	-
MWR16	innen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,19	20	$1,58 \cdot 10^6$	10,64	102	98	1,12
MWR17	innen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,19	19	$1,58 \cdot 10^6$	6,94	140	134	1,26
MWR18	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	4,14	12	$1,58 \cdot 10^6$	4,17	75	72	1,30
MWR19	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	4,14	12	$1,58 \cdot 10^6$	5,86	67	64	1,09

Tabelle T 4 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie MWR01 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			R _e = ε _{0,1} /ε ₀	Umgebungstemperatur	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz	Spannung		Spannungsverhältnis	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p}	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2)	σ _a ^{max} (n = N/2)		N(+)	N(-)	
			[%]		T _{Um}		[Hz]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
MWR01	MW-I-G-28_0_40%	0,400	0,215	0,185	RT	innen	0,1	310,96	302,70	-1,05	192	204	B	
MWR01	MW-I-G-07_0_35%	0,350	0,164	0,186	RT	innen	0,1	312,71	303,88	-1,06	606	630	B	
MWR01	MW-I-G-22_0_35%	0,350	0,161	0,189	RT	innen	0,1	317,72	308,88	-1,06	618	706	B	
MWR01	MW-I-G-16_0_30%	0,300	0,118	0,182	RT	innen	0,1	306,19	296,90	-1,06	1.056	1.210	B	
MWR01	MW-I-G-29_0_25%	0,250	0,073	0,177	RT	innen	0,5	297,60	290,14	-1,05	1.210	1.360	B	
MWR01	MW-I-G-21_0_25%	0,250	0,065	0,185	RT	innen	0,5	309,93	300,25	-1,06	2.350	3.152	B	
MWR01	MW-I-G-14_0_20%	0,200	0,030	0,170	RT	innen	1,0	284,99	275,49	-1,07	3.616	3.836	B	
MWR01	MW-I-G-02_0_15%	0,150	0,008	0,142	RT	innen	4,0	238,54	225,66	-1,11	36.488	37.216	B	
MWR01	MW-I-G-20_0_15%	0,150	0,004	0,146	RT	innen	4,0	245,44	232,02	-1,12	34.384	55.290	B	
MWR01	MW-I-G-12_0_10%	0,100	0,000	0,100	RT	innen	8,0	168,39	153,83	-1,19	478.512	528.314	B	
MWR01	MW-I-G-01_0_09%	0,090	0,000	0,090	RT	innen	6,0	150,63	142,87	-1,11	816.752	833.088	C	
MWR01	MW-I-G-25_0_09%	0,090	0,000	0,090	RT	innen	8,0	154,42	146,60	-1,11	10.000.000	10.000.000	Durchläufer	
MWR01	MW-I-G-17_0_08%	0,080	0,000	0,080	RT	innen	8,0	135,34	128,34	-1,11	1.839.110	1.854.814	B	
MWR01	MW-I-G-06_0_08%	0,081	0,000	0,081	RT	innen	8,0	137,07	118,94	-1,30	10.000.000	10.000.000	Durchläufer	

Schwingprobe: d = 15 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,017 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unterhalb der Schneiden; E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 5 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie MWR02 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungespanntfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			R _e = ε _u /ε _o	Umgebungstemperatur T _{Um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p} [%]	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _a ^{max} (n = N/2) [MPa]			ε _{a,t} [-]	
MWR02	MW-A-G-35_0,40%	0,400	0,208	0,192	-1	RT	außen	0,1	324,22	316,48	-1,05	530	540	B
MWR02	MW-A-G-29_0,40%	0,400	0,206	0,193	-1	RT	außen	0,1	326,68	319,11	-1,05	606	618	B
MWR02	MW-A-G-28_0,30%	0,300	0,114	0,185	-1	RT	außen	0,1	313,16	305,99	-1,05	942	960	B
MWR02	MW-A-G-25_0,30%	0,300	0,111	0,189	-1	RT	außen	0,1	318,63	310,76	-1,05	1.470	1.588	B
MWR02	MW-A-G-23_0,25%	0,250	0,064	0,186	-1	RT	außen	0,5	313,25	305,88	-1,05	2.214	2.800	B
MWR02	MW-A-G-01_0,20%	0,200	0,027	0,173	-1	RT	außen	1,0	292,44	282,67	-1,07	6.282	7.236	B
MWR02	MW-A-G-21_0,20%	0,200	0,028	0,172	-1	RT	außen	1,0	290,65	281,71	-1,06	4.764	7.320	B
MWR02	MW-A-G-04_0,15%	0,150	0,004	0,146	-1	RT	außen	3,0	245,78	233,25	-1,11	42.746	59.844	B
MWR02	MW-A-G-24_0,15%	0,150	0,006	0,145	-1	RT	außen	3,0	244,01	232,08	-1,10	68.738	70.112	C
MWR02	MW-A-G-20_0,10%	0,099	0,001	0,099	-1	RT	außen	6,0	166,28	153,82	-1,16	800.738	1.000.004	B
MWR02	MW-A-G-31_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	RT	außen	6,0	170,05	154,34	-1,20	2.582.330	2.590.528	B
MWR02	MW-A-G-09_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	RT	außen	8,0	151,49	140,57	-1,16	517.956	528.314	C
MWR02	MW-A-G-17_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	RT	außen	8,0	152,16	139,09	-1,19	769.646	785.038	C
MWR02	MW-A-G-33_0,09%	0,090	0,001	0,089	-1	RT	außen	8,0	150,27	137,55	-1,18	10.000.000	10.000.000	Durchläufer
MWR02	MW-A-G-08_0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	RT	außen	8,0	135,27	114,07	-1,37	10.000.000	10.000.000	Durchläufer

Schwingprobe: d = 15 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168.888 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 6 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie MWR05 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _e = ε _v /ε ₀ [-]	Umgebungstemperatur T _{Um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _v /σ ₀ [-]	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p}	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2) [MPa]		N(+)	N _b [-]	
MWR05	MW-I-K-04_0,50%	0,499	0,307	0,192	-1	RT	innen	0,1	324,85	321,58	-1,02	232	240	C
MWR05	MW-I-K-13_0,40%	0,400	0,209	0,191	-1	RT	innen	0,1	322,75	311,37	-1,07	561	719	B
MWR05	MW-I-K-08_0,40%	0,400	0,213	0,187	-1	RT	innen	0,1	315,94	307,21	-1,06	439	854	E
MWR05	MW-I-K-07_0,35%	0,349	0,158	0,192	-1	RT	innen	0,1	323,73	313,64	-1,06	941	1.056	B
MWR05	MW-I-K-02_0,35%	0,350	0,163	0,187	-1	RT	innen	0,1	316,35	306,43	-1,06	905	1.413	B
MWR05	MW-I-K-17_0,30%	0,300	0,118	0,181	-1	RT	innen	0,1	305,91	304,89	-1,01	733	747	C
MWR05	MW-I-K-14_0,30%	0,300	0,115	0,185	-1	RT	innen	0,3	312,49	310,46	-1,01	1.056	1.359	D
MWR05	MW-I-K-10_0,25%	0,250	0,066	0,184	-1	RT	innen	0,5	310,13	307,48	-1,02	2.443	3.151	B
MWR05	MW-I-K-09_0,25%	0,250	0,064	0,186	-1	RT	innen	0,5	313,25	309,88	-1,02	2.540	4.580	B
MWR05	MW-I-K-06_0,20%	0,200	0,027	0,173	-1	RT	innen	0,5	291,56	279,11	-1,09	8.282	14.687	B
MWR05	MW-I-K-11_0,15%	0,150	0,004	0,146	-1	RT	innen	3,0	246,04	241,70	-1,04	11.359	12.539	C
MWR05	MW-I-K-15_0,15%	0,150	0,006	0,144	-1	RT	innen	1,0	242,90	239,04	-1,03	45.361	46.268	C
MWR05	MW-I-K-16_0,12%	0,120	0,002	0,118	-1	RT	innen	10,0	199,53	189,00	-1,11	122.051	124.492	B
MWR05	MW-I-K-12_0,12%	0,120	0,003	0,117	-1	RT	innen	5,0	197,99	187,37	-1,11	253.922	280.349	B
MWR05	MW-I-K-03_0,10%	0,100	0,002	0,098	-1	RT	innen	10,0	166,15	150,08	-1,21	995.610	999.999	B
MWR05	MW-I-K-18_0,10%	0,100	0,001	0,099	-1	RT	innen	12,0	166,91	145,67	-1,29	3.884.999	3.898.999	B
MWR05	MW-I-K-01_0,09%	0,090	0,000	0,090	-1	RT	innen	10,0	152,29	136,84	-1,23	3.883.999	4.131.999	B
MWR05	MW-I-K-05_0,08%	0,080	0,000	0,080	-1	RT	innen	12,0	135,73	120,71	-1,25	10.000.001	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: d = 6 mm; l = 11 mm; Elastizitätsmodul: E = 168,888 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,04

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 7 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie MWR06 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, ungänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _ε = ε _v /ε ₀ [-]	Umgebungstemperatur T _{um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _v /σ ₀ [-]	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p} [%]	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _{a,max} (n = N/2) [MPa]		N(+)	N _b [-]	
MWR06	MW-A-K-06_0,50%	0,500	0,305	0,195	-1	RT	außen	0,1	321,35	314,47	-1,04	96	130	B
MWR06	MW-A-K-18_0,40%	0,400	0,200	0,199	-1	RT	außen	0,1	327,79	319,94	-1,05	584	642	B
MWR06	MW-A-K-01_0,40%	0,400	0,199	0,200	-1	RT	außen	0,1	329,72	321,94	-1,05	806	942	B
MWR06	MW-A-K-21_0,30%	0,300	0,105	0,194	-1	RT	außen	0,1	319,68	311,05	-1,06	2.172	2.396	B
MWR06	MW-A-K-25_0,30%	0,299	0,111	0,189	-1	RT	außen	0,1	310,35	302,86	-1,05	1.164	2.492	B
MWR06	MW-A-K-28_0,25%	0,250	0,066	0,184	-1	RT	außen	0,5	301,98	294,01	-1,05	1.558	1.894	B
MWR06	MW-A-K-29_0,25%	0,250	0,060	0,190	-1	RT	außen	0,2	312,72	306,06	-1,04	2.444	2.694	B
MWR06	MW-A-K-11_0,20%	0,201	0,027	0,173	-1	RT	außen	0,3	285,09	277,01	-1,06	6.534	6.664	B
MWR06	MW-A-K-16_0,15%	0,150	0,004	0,146	-1	RT	außen	3,0	240,02	230,19	-1,09	75.890	87.170	B
MWR06	MW-A-K-30_0,15%	0,150	0,002	0,148	-1	RT	außen	3,0	243,88	236,59	-1,06	112.758	122.052	B
MWR06	MW-A-K-23_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	RT	außen	10,0	197,68	189,89	-1,08	291.676	297.508	C
MWR06	MW-A-K-42_0,12%	0,120	0,002	0,118	-1	RT	außen	10,0	193,55	187,32	-1,07	459.932	469.130	B
MWR06	MW-A-K-04_0,11%	0,110	0,001	0,109	-1	RT	außen	10,0	179,65	172,56	-1,08	1.283.900	1.296.900	B
MWR06	MW-A-K-10_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	RT	außen	12,0	164,57	157,94	-1,08	995.610	1.015.522	B
MWR06	MW-A-K-20_0,10%	0,100	0,006	0,094	-1	RT	außen	12,0	154,37	138,23	-1,23	10.000.001	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: d = 6 mm; l = 11 mm; Elastizitätsmodul: E = 164,539 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kriatbfali; Formzahl K_t = 1,04

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 8 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR03 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, $K_t = 1,05$, unglänzenfrei, $R_o = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur unregelt T_{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_b	Bemerkung, Versagensort
MWR03	MW-A-G-11	-1	RT	Luft	184,12	160	348.352	Bruch
MWR03	MW-A-G-05	-1	RT	Luft	184,63	140	10.000.000	Durchläufer
MWR03	MW-A-G-05'	-1	RT	Luft	184,71	160	799.429	hochgesetzter Durchläufer; Bruch
MWR03	MW-A-G-02	-1	RT	Luft	184,40	150	727.874	Bruch
MWR03	MW-A-G-26	-1	RT	Luft	183,30	140	10.000.000	Durchläufer
MWR03	MW-A-G-26'	-1	RT	Luft	183,91	150	1.067.947	hochgesetzter Durchläufer; Bruch
MWR03	MW-A-G-36	-1	RT	Luft	183,69	150	572.439	Bruch
MWR03	MW-A-G-22	-1	RT	Luft	184,60	145	1.165.147	Bruch
MWR03	MW-A-G-14	-1	RT	Luft	184,65	180	791.266	Bruch
MWR03	MW-A-G-07	-1	RT	Luft	184,70	180	275.326	Bruch
MWR03	MW-A-G-30	-1	RT	Luft	183,80	180	389.863	Bruch
MWR03	MW-A-G-34	-1	RT	Luft	183,93	200	101.656	Bruch
MWR03	MW-A-G-42	-1	RT	Luft	183,60	200	266.942	Bruch
MWR03	MW-A-G-43	-1	RT	Luft	183,53	145	2.175.396	Bruch
MWR03	MW-A-G-40	-1	RT	Luft	182,00	240	6.443	Bruch im LCF-Bereich, nicht in Diagramm eingetragen
MWR03	MW-A-G-41	-1	RT	Luft	183,04	200	163.841	Bruch
MWR03	MW-A-G-38	-1	RT	Luft	183,90	145	4.141.624	Bruch

Tabelle T 9 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR04 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, unglänzenfrei, $R_o = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur unregelt T_{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_b	Bemerkung, Versagensort
MWR04	MW-A-K-15	-1	RT	Luft	179,42	160	640.284	Bruch
MWR04	MW-A-K-32	-1	RT	Luft	179,36	140	10.000.000	Durchläufer
MWR04	MW-A-K-32'	-1	RT	Luft	179,34	160	241.315	hochgesetzter Durchläufer; Bruch
MWR04	MW-A-K-12	-1	RT	Luft	178,95	150	10.000.000	Durchläufer
MWR04	MW-A-K-12'	-1	RT	Luft	179,14	160	10.000.000	hochgesetzter Durchläufer; Durchläufer
MWR04	MW-A-K-12''	-1	RT	Luft	179,12	170	2.718.026	hochgesetzter Durchläufer; Bruch
MWR04	MW-A-K-03	-1	RT	Luft	178,69	160	1.107.777	Bruch
MWR04	MW-A-K-27	-1	RT	Luft	--	--	--	Schwingprobe bei Einbau stark auf Druck belastet
MWR04	MW-A-K-05	-1	RT	Luft	179,16	150	10.000.000	Durchläufer
MWR04	MW-A-K-05'	-1	RT	Luft	179,48	170	2.548.457	hochgesetzter Durchläufer; Bruch
MWR04	MW-A-K-08	-1	RT	Luft	179,74	180	3.990.126	Bruch
MWR04	MW-A-K-19	-1	RT	Luft	179,00	180	294.522	Bruch
MWR04	MW-A-K-26	-1	RT	Luft	179,03	180	498.130	Bruch
MWR04	MW-A-K-24	-1	RT	Luft	177,01	170	750.750	Bruch
MWR04	MW-A-K-36	-1	RT	Luft	177,91	220	10.208	Bruch im LCF-Bereich, nicht in Diagramm eingetragen
MWR04	MW-A-K-39	-1	RT	Luft	178,28	200	731.628	Bruch
MWR04	MW-A-K-40	-1	RT	Luft	177,44	200	61.483	Bruch
MWR04	MW-A-K-41	-1	RT	Luft	178,54	200	315.888	Bruch
MWR04	MW-A-K-43	-1	RT	Luft	177,83	220	171.595	Bruch

Tabelle T 10 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR07 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR07	MW-A-K-02	0	RT	Luft	100,00	110	816.990	Bruch
MWR07	MW-A-K-09	0	RT	Luft	100,00	110	2.249.292	Bruch
MWR07	MW-A-K-07	0	RT	Luft	105,00	105	422.781	Bruch
MWR07	MW-A-K-13	0	RT	Luft	100,00	100	10.000.000	Durchläufer
MWR07	MW-A-K-13'	0	RT	Luft	100,00	125	545.127	hochgesetzter Durchläufer,
MWR07	MW-A-K-14	0	RT	Luft	100,00	125	279.510	Bruch
MWR07	MW-A-K-17	0	RT	Luft	--	--	--	Schwingprobe bei Einbau gebrochen
MWR07	MW-A-K-22	0	RT	Luft	100,00	115	1.114.105	Bruch
MWR07	MW-A-K-31	0	RT	Luft	100,00	100	10.000.000	Durchläufer
MWR07	MW-A-K-31'	0	RT	Luft	100,00	125	255.578	hochgesetzter Durchläufer,
MWR07	MW-A-K-33	0	RT	Luft	100,00	135	66.616	Bruch
MWR07	MW-A-K-34	0	RT	Luft	100,00	105	339.246	Bruch
MWR07	MW-A-K-36	0	RT	Luft	100,00	135	136.318	Bruch
MWR07	MW-A-K-37	0	RT	Luft	100,00	135	152.270	Bruch
MWR07	MW-A-K-38	0	RT	Luft	100,00	115	339.692	Bruch

Tabelle T 11 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR08 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unglänzenfrei, R_e = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR08	MW-A-G-03	0	RT	Luft	184,27	100	1.027.137	Bruch
MWR08	MW-A-G-15	0	RT	Luft	184,92	100	2.288.653	Bruch
MWR08	MW-A-G-19	0	RT	Luft	184,76	90	1.570.813	Bruch
MWR08	MW-A-G-27	0	RT	Luft	183,50	125	141.710	Bruch
MWR08	MW-A-G-32	0	RT	Luft	183,23	125	169.598	Bruch
MWR08	MW-A-G-12	0	RT	Luft	184,37	90	10.000.000	Durchläufer
MWR08	MW-A-G-12'	0	RT	Luft	182,75	125	98.575	hochgesetzter Durchläufer;
MWR08	MW-A-G-18	0	RT	Luft	184,30	105	541.397	Bruch
MWR08	MW-A-G-13	0	RT	Luft	185,38	90	10.000.000	Durchläufer
MWR08	MW-A-G-16	0	RT	Luft	124,00	95	10.000.000	Durchläufer
MWR08	MW-A-G-13'	0	RT	Luft	185,35	105	770.712	hochgesetzter Durchläufer;
MWR08	MW-A-G-16'	0	RT	Luft	124,23	105	496.177	hochgesetzter Durchläufer;
MWR08	MW-A-G-37	0	RT	Luft	182,16	125	114.868	Bruch
MWR08	MW-A-G-39	0	RT	Luft	-	95	-	Schwingprobe bei Einbau verbogen

Tabelle T 12 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR09 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_e = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR09	MW-I-G-03	0	RT	Luft	123,06	100	665.604	Bruch
MWR09	MW-I-G-26	0	RT	Luft	123,26	100	10.000.000	Durchläufer
MWR09	MW-I-G-26'	0	RT	Luft	122,26	125	170.406	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR09	MW-I-G-09	0	RT	Luft	122,71	125	111.114	Bruch
MWR09	MW-I-G-18	0	RT	Luft	122,05	125	129.085	Bruch
MWR09	MW-I-G-04	0	RT	Luft	123,79	105	944.484	Bruch
MWR09	MW-I-G-23	0	RT	Luft	123,77	105	826.417	Bruch
MWR09	MW-I-G-32	0	RT	Luft	182,33	105	427.995	Bruch
MWR09	MW-I-G-34	0	RT	Luft	184,05	100	372.810	Bruch
MWR09	MW-I-G-37	0	RT	Luft	184,17	100	936.856	Bruch
MWR09	MW-I-G-45	0	RT	Luft	181,92	95	277.212	Bruch
MWR09	MW-I-G-43	0	RT	Luft	182,89	90	3.613.352	Bruch
MWR09	MW-I-G-13	0	RT	Luft	25,00	90	10.000.000	Durchläufer
MWR09	MW-I-G-13'	0	RT	Luft	30,00	140	56.157	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR09	MW-I-G-08	0	RT	Luft	5,00	140	57.253	Bruch

Tabelle T 13 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR10 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR10	MW-I-G-19	-1	RT	Luft	20,00	160	897.847	Bruch
MWR10	MW-I-G-05	-1	RT	Luft	20,00	180	424.588	Bruch
MWR10	MW-I-G-15	-1	RT	Luft	15,00	150	2.021.525	Bruch
MWR10	MW-I-G-11	-1	RT	Luft	15,00	180	661.868	Bruch
MWR10	MW-I-G-24	-1	RT	Luft	15,00	180	271.704	Bruch
MWR10	MW-I-G-27	-1	RT	Luft	20,00	140	10.000.000	Durchläufer
MWR10	MW-I-G-27'	-1	RT	Luft	15,00	180	375.378	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR10	MW-I-G-38	-1	RT	Luft	183,50	220	51.789	Bruch
MWR10	MW-I-G-39	-1	RT	Luft	184,50	220	54.669	Bruch
MWR10	MW-I-G-35	-1	RT	Luft	183,00	220	56.767	Bruch
MWR10	MW-I-G-36	-1	RT	Luft	183,10	160	769.786	Bruch
MWR10	MW-I-G-31	-1	RT	Luft	182,02	160	889.288	Bruch
MWR10	MW-I-G-33	-1	RT	Luft	182,97	150	1.327.599	Bruch
MWR10	MW-I-G-41	-1	RT	Luft	182,92	140	1.124.927	Bruch
MWR10	MW-I-G-42	-1	RT	Luft	182,97	130	2.255.869	Bruch
MWR10	MW-I-G-40	-1	RT	Luft	183,61	130	1.414.114	Bruch
MWR10	MW-I-G-46	-1	RT	Luft	183,62	130	2.751.134	Bruch
MWR10	MW-I-G-44	-1	RT	Luft	183,15	120	10.000.000	Durchläufer
MWR10	MW-I-G-44'	-1	RT	Luft	182,96	150	1.032.590	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR10	MW-I-G-30	-1	RT	Luft	25,00	160	1.927.005	Bruch

Tabelle T 14 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR11 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-1, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR11	MS6-4	-1	RT	Luft	183,64	140	3	174	142	310.134	Bruch
MWR11	MS7-4	-1	RT	Luft	186,10	120	8	169	126	754.122	Bruch
MWR11	MS8-3	-1	RT	Luft	184,71	90	-	182	87	806.000	Bruch, im Übergangsradius
MWR11	MS9-1	-1	RT	Luft	186,60	70	63	113	109	10.000.000	Durchläufer
MWR11	MS9-1'	-1	RT	Luft	186,12	120	63	113	187	1.005.966	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR11	AV-O1-G-16	-1	RT	Luft	181,67	150	-	Nenn*	150	591.198	Bruch
MWR11	AV-O1-G-17	-1	RT	Luft	182,20	140	-	Nenn*	140	10.000.000	Durchläufer
MWR11	AV-O1-G-17'	-1	RT	Luft	181,08	200	-	Nenn*	200	-	hochgesetzter Durchläufer, Schwingprobe verbogen
MWR11	AV-O1-G-19	-1	RT	Luft	181,27	200	-	Nenn*	200	340.318	Bruch
MWR11	AV-O1-G-21	-1	RT	Luft	182,22	150	-	Nenn*	150	431.551	Bruch
MWR11	AV-O2-G-03	-1	RT	Luft	25,00	200	-	191	185	18.782	Bruch, im Übergangsradius
MWR11	AV-O3-G-03	-1	RT	Luft	25,00	170	-	Nenn*	170	133.179	Bruch
MWR11	MS9-4	-1	RT	Luft	184,98	140	-	188	131	4.853.412	Bruch, im Übergangsradius
MWR11	MS9-3	-1	RT	Luft	184,24	170	-	Nenn*	170	373.466	Bruch

Nenn* = Nennquerschnitt A_{Nenn} = 176,7 mm²Tabelle T 15 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR12 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-2, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR12	MS9-2	-1	RT	Luft	181,88	100	-	197	89	27.840	Bruch, im Übergangsradius

Tabelle T 16 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR13 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunckerklasse Cc-3, $R_o = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur ungeregelt T_{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Lunckerfläche $A_{Luncker}$ [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A_{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude $\sigma_{a,tat}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_B	Bemerkung, Versagensort
MWR13	MS7-3	-1	RT	Luft	177,24	70	-	190	65	79.776	Bruch; im Übergangsradius
MWR13	MS7-6	-1	RT	Luft	182,40	50	26	151	59	2.558.091	Bruch
MWR13	MS7-7	-1	RT	Luft	181,70	40	86	91	78	10.000.000	Durchläufer
MWR13	MS7-7'	-1	RT	Luft	180,90	70	86	91	136	206.608	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR13	MS8-1	-1	RT	Luft	179,71	50	-	183	48	1.480.076	Bruch; im Übergangsradius
MWR13	AV-03-G-01	-1	RT	Luft	182,58	60	-	Nenn*	60	10.000.000	Durchläufer
MWR13	AV-03-G-01'	-1	RT	Luft	183,85	90	-	Nenn*	90	1.224.168	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR13	AV-03-G-04	-1	RT	Luft	183,12	90	-	180	88	10.000.000	Durchläufer
MWR13	AV-03-G-04'	-1	RT	Luft	182,95	120	-	180	117	694.558	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius

Nenn* = Nennquerschnitt $A_{Nenn} = 176,7 \text{ mm}^2$

Tabelle T 17 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR14 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunckerklasse Cc-4, $R_o = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur ungeregelt T_{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Lunckerfläche $A_{Luncker}$ [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A_{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude $\sigma_{a,tat}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_B	Bemerkung, Versagensort
MWR14	MS8-4	-1	RT	Luft	8,00	30	-	184	29	126.774	Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 18 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR15 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-5, $R_e = -1$

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_e	Umgebungstemperatur unreguliert T_{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Lunkerfläche A_{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A_{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude $\sigma_{a,tat}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_b	Bemerkung, Versagensort
MWR15	M57-2	-1	RT	Luft	0,00	80	83	94	80	0	Bereits beim Anfahren der Maximallast gerissen
MWR15	M57-5	-1	RT	Luft	129,26	30	-	185	29	2.350	Bruch; im Übergangsradius; nicht in Auswertung einbezogen
MWR15	M57-1	-1	RT	Luft	8,00	15	-	182	15	10.000.000	Durchläufer
MWR15	M57-1'	-1	RT	Luft	8,00	25	-	182	24	866.254	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 19 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR16 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,19, ungenügendfrei, R_σ = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR16	MW-H-K-19	0	RT	Luft	100,00	150	37.094	Bruch
MWR16	MW-H-K-21	0	RT	Luft	100,00	130	76.342	Bruch
MWR16	MW-H-K-23	0	RT	Luft	100,00	110	326.924	Bruch
MWR16	MW-H-K-25	0	RT	Luft	100,00	100	1.064.877	Bruch
MWR16	MW-H-K-27	0	RT	Luft	100,00	90	10.000.000	Durchläufer
MWR16	MW-H-K-27'	0	RT	Luft	100,00	130	115.718	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR16	MW-H-K-29	0	RT	Luft	100,00	100	10.000.000	Durchläufer
MWR16	MW-H-K-29'	0	RT	Luft	100,00	130	112.016	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR16	MW-H-K-31	0	RT	Luft	100,00	110	1.563.981	Bruch
MWR16	MW-H-K-33	0	RT	Luft	100,00	140	62.328	Bruch
MWR16	MW-H-K-35	0	RT	Luft	100,00	140	50.515	Bruch
MWR16	MW-H-K-37	0	RT	Luft	100,00	110	2.427.025	Bruch
MWR16	MW-H-K-39	0	RT	Luft	100,00	140	72.534	Bruch
MWR16	MW-H-K-41	0	RT	Luft	100,00	130	94.627	Bruch
MWR16	MW-H-K-43	0	RT	Luft	120,00	100	3.971.232	Bruch
MWR16	MW-H-K-45	0	RT	Luft	100,00	110	528.659	Bruch
MWR16	MW-H-K-47	0	RT	Luft	120,00	90	10.000.000	Durchläufer
MWR16	MW-H-K-47'	0	RT	Luft	100,00	120	282.158	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR16	MW-H-K-49	0	RT	Luft	120,00	90	10.000.000	Durchläufer
MWR16	MW-H-K-49'	0	RT	Luft	100,00	120	167.551	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

Tabelle T 20 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR17 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,19, ungenügendfrei, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR17	MW-H-K-20	-1	RT	Luft	100,00	180	458.715	Bruch
MWR17	MW-H-K-22	-1	RT	Luft	100,00	170	103.896	Bruch
MWR17	MW-H-K-24	-1	RT	Luft	100,00	180	666.575	Bruch
MWR17	MW-H-K-26	-1	RT	Luft	110,00	170	1.212.933	Bruch
MWR17	MW-H-K-28	-1	RT	Luft	100,00	200	64.769	Bruch
MWR17	MW-H-K-30	-1	RT	Luft	100,00	200	166.279	Bruch
MWR17	MW-H-K-32	-1	RT	Luft	120,00	160	626.018	Bruch
MWR17	MW-H-K-34	-1	RT	Luft	100,00	150	3.680.096	Bruch
MWR17	MW-H-K-36	-1	RT	Luft	100,00	200	204.151	Bruch
MWR17	MW-H-K-38	-1	RT	Luft	100,00	140	2.224.783	Bruch
MWR17	MW-H-K-40	-1	RT	Luft	120,00	130	2.981.654	Bruch
MWR17	MW-H-K-42	-1	RT	Luft	120,00	120	2.798.740	Bruch
MWR17	MW-H-K-44	-1	RT	Luft	120,00	110	10.000.000	Durchläufer
MWR17	MW-H-K-44'	-1	RT	Luft	80,00	220	56.004	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR17	MW-H-K-46	-1	RT	Luft	120,00	120	10.000.000	Durchläufer
MWR17	MW-H-K-46'	-1	RT	Luft	80,00	220	54.508	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR17	MW-H-K-48	-1	RT	Luft	120,00	130	4.881.168	Bruch
MWR17	MW-H-K-50	-1	RT	Luft	120,00	120	10.000.000	Durchläufer
MWR17	MW-H-K-50'	-1	RT	Luft	100,00	220	62.155	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

Tabelle T 21 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR18 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 4,14, ungenügendfrei, R₀ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR18	MW-A-K-75	-1	RT	Luft	120,00	60	10.000.000	Durchläufer
MWR18	MW-A-K-75'	-1	RT	Luft	100,00	100	419.896	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR18	MW-A-K-76	-1	RT	Luft	150,97	150	136.379	Bruch
MWR18	MW-A-K-77	-1	RT	Luft	151,32	180	44.891	Bruch
MWR18	MW-A-K-78	-1	RT	Luft	151,17	180	36.998	Bruch
MWR18	MW-A-K-79	-1	RT	Luft	150,96	100	865.826	Bruch
MWR18	MW-A-K-80	-1	RT	Luft	140,00	70	3.038.893	Bruch
MWR18	MW-A-K-74	-1	RT	Luft	140,00	65	10.000.000	Durchläufer
MWR18	MW-A-K-74'	-1	RT	Luft	110,00	150	30.366	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR18	MW-A-K-66	-1	RT	Luft	140,00	75	1.520.800	Bruch
MWR18	MW-A-K-67	-1	RT	Luft	100,00	150	98.516	Bruch
MWR18	MW-A-K-64	-1	RT	Luft	140,00	65	3.394.558	Bruch
MWR18	MW-A-K-84	-1	RT	Luft	150,00	70	10.000.000	Durchläufer

Tabelle T 22 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie MWR19 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 4,14, ungenügendfrei, R₀ = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
MWR19	MW-A-K-71	0	RT	Luft	150,52	100	161.699	Bruch
MWR19	MW-A-K-72	0	RT	Luft	152,34	120	46.193	Bruch
MWR19	MW-A-K-73	0	RT	Luft	152,17	55	10.000.000	Durchläufer
MWR19	MW-A-K-73'	0	RT	Luft	152,14	100	137.166	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR19	MW-A-K-70	0	RT	Luft	151,63	60	5.108.610	Bruch
MWR19	MW-A-K-68	0	RT	Luft	151,83	120	58.588	Bruch
MWR19	MW-A-K-69	0	RT	Luft	151,97	65	3.074.224	Bruch
MWR19	MW-A-K-82	0	RT	Luft	151,77	60	10.000.000	Durchläufer
MWR19	MW-A-K-82'	0	RT	Luft	151,76	100	155.421	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
MWR19	MW-A-K-81	0	RT	Luft	152,21	70	1.685.704	Bruch
MWR19	MW-A-K-63	0	RT	Luft	152,59	65	4.316.969	Bruch
MWR19	MW-A-K-65	0	RT	Luft	151,61	120	41.283	Bruch
MWR19	MW-A-K-83	0	RT	Luft	150,00	65	10.000.000	Durchläufer

Tabelle T 23 Parameter der Dehnungswöhlerlinien für die ungespannten Werkstoffproben aus EN-GJS-450-18

Reihe	Anzahl Einzelversuche	zyklische Kennwerte nach Coffin, Manson, Basquin und Morrow			zyklische Kennwerte nach Ramberg, Osgood			
		Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_t / [MPa]	Schwingfestigkeitsexponent b	Duktilitätskoeffizient ϵ'_t / [m/m]	Duktilitätsexponent c	Dehngrenze $R'_{p0,2}$ / [MPa]	Verfestigungskoeffizient K' / [MPa]	Verfestigungsexponent n'
SR01	16	821,9	-0,1033	0,4980	-0,8153	409,0	897,8	0,1267
SR02	15	754,4	-0,08816	1,190	-0,9161	408,0	741,8	0,09623
SR05	14	806,9	-0,1036	0,5212	-0,8347	405,0	874,9	0,1241
SR06	14	765,7	-0,08791	0,6090	-0,8102	412,0	808,0	0,1085

Tabelle T 24 Parameter der Spannungswöhlerlinien für die ungespannten und die mit Lunkern behafteten Werkstoffproben aus EN-GJS-450-18

Versuchsreihe	Lage der Schwingproben	Durchmesser der Schwingproben	Lunkerklasse	Belastungsart	Lastverhältnis R	Temperatur [°C]	Formzahl K_{τ}	Anzahl Einzelversuche	Parameter der Spannungswöhlerlinien				Streuung
									Abknickpunkt	Neigung	Nennspannungsspannweite bei N_k und	Nennspannungsspannweite bei $N = 1 \cdot 10^7$ und	
											$P_0 = 50\%$	$P_0 = 50\%$	
N_k	k	$\sigma_{n,k,50\%}$	$\sigma_{n,NG,50\%}$	$1/T_{\sigma}$									
SR03	außen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	23	$2 \cdot 10^6$	7,68	175	168	1,16
SR04	außen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	17	$2 \cdot 10^6$	14,02	123	119	1,12
SR07	innen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,04	11	$2 \cdot 10^6$	12,95	121	117	1,13
SR08	innen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,04	16	$2 \cdot 10^6$	7,39	169	162	1,17
SR09	innen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	17	$2 \cdot 10^6$	10,94	109	105	1,12
SR10	innen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	25	$2 \cdot 10^6$	7,11	158	153	1,19
SR11	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,04	21	$2 \cdot 10^6$	7,52	179	172	1,27
SR12	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,04	19	$2 \cdot 10^6$	14,21	127	123	1,10
SR13	innen	15 mm	Cc-1	axial	-1	RT	-	19	$2 \cdot 10^6$	7,03	123	119	1,95
SR14	innen	15 mm	Cc-2	axial	-1	RT	-	10	$2 \cdot 10^6$	7,03	81	78	1,65
SR15	innen	15 mm	Cc-3	axial	-1	RT	-	5	$2 \cdot 10^6$	7,03	87	84	1,28
SR16	innen	15 mm	Cc-4	axial	-1	RT	-	12	$2 \cdot 10^6$	7,03	72	70	1,67
SR17	innen	15 mm	Cc-5	axial	-1	RT	-	8	$2 \cdot 10^6$	7,03	63	61	1,36
SR18	innen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,19	16	$2 \cdot 10^6$	8,38	113	109	1,22
SR19	innen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,19	15	$2 \cdot 10^6$	8,08	156	151	1,22
SR20	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	4,14	9	$2 \cdot 10^6$	3,76	67	65	1,11
SR21	außen	6 mm	CC-0	axial	0	RT	4,14	11	$2 \cdot 10^6$	5,99	66	64	1,15

Tabelle T 25 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie SR01 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _e = ε _f /ε ₀	Umgebungstemperatur T _{um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _f /σ ₀	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,l}	ε _{a,p}	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2) [MPa]		N(+)	N(-)	
SR01	56-I-G-04_0,60%	0,600	0,352	0,247	-1	RT	innen	0,1	410,47	399,20	-1,06	260	280	B
SR01	55-I-G-12_0,50%	0,500	0,263	0,236	-1	RT	innen	0,1	392,24	381,58	-1,06	295	317	B
SR01	55-I-G-25_0,40%	0,400	0,168	0,232	-1	RT	innen	0,1	384,90	374,27	-1,06	495	534	B
SR01	55-I-G-16_0,40%	0,400	0,168	0,232	-1	RT	innen	0,1	385,47	374,82	-1,06	512	562	B
SR01	56-I-G-16_0,35%	0,350	0,120	0,230	-1	RT	innen	0,1	382,18	370,53	-1,06	881	936	B
SR01	55-I-G-41_0,35%	0,350	0,120	0,229	-1	RT	innen	0,1	380,66	369,58	-1,06	845	987	B
SR01	55-I-G-42_0,30%	0,300	0,073	0,227	-1	RT	innen	0,1	376,92	365,18	-1,06	1.356	1.592	B
SR01	55-I-G-30_0,30%	0,300	0,075	0,225	-1	RT	innen	0,2	373,01	361,84	-1,06	1.320	1.658	B
SR01	56-I-G-17_0,25%	0,250	0,030	0,220	-1	RT	innen	0,5	364,38	352,57	-1,07	4.957	5.410	B
SR01	55-I-G-02_0,20%	0,200	0,011	0,189	-1	RT	innen	2,0	313,30	300,14	-1,09	12.275	13.679	B
SR01	55-I-G-07_0,20%	0,200	0,012	0,188	-1	RT	innen	2,0	311,66	295,53	-1,11	15.763	17.580	B
SR01	55-I-G-10_0,15%	0,150	0,004	0,146	-1	RT	innen	2,0	242,45	232,53	-1,09	72.091	80.232	B
SR01	55-I-G-06_0,12%	0,120	0,001	0,119	-1	RT	innen	8,0	196,76	191,27	-1,06	256.148	269.556	B
SR01	55-I-G-14_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	RT	innen	8,0	199,03	194,61	-1,05	530.158	576.910	B
SR01	56-I-G-08_0,11%	0,110	0,000	0,111	-1	RT	innen	8,0	183,79	197,51	-0,86	345.698	386.208	B
SR01	55-I-G-01_0,10%	0,099	0,000	0,099	-1	RT	innen	8,0	168,01	154,15	-1,18	10.000.000	10.000.000	Durchläufer

Schwingprobe: d = 15 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 165.949 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 26 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie SR02 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _e = ε _f /ε ₀ [-]	Umgebungstemperatur T _{Um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _v = σ _f /σ ₀ [-]	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p}	ε _{a,e}					σ _s (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2) [MPa]		N(+) [-]	N _b [-]	
SR02	S6-A-G-01_1,00%	1,000	0,738	0,263	-1	RT	außen	0,1	443,47	429,31	-1,07	90	99	B
SR02	S5-A-G-24_0,80%	0,800	0,539	0,261	-1	RT	außen	0,1	440,46	428,69	-1,05	201	212	B
SR02	S5-A-G-06_0,70%	0,700	0,444	0,256	-1	RT	außen	0,1	432,14	420,85	-1,05	211	234	B
SR02	S5-A-G-02_0,60%	0,600	0,347	0,253	-1	RT	außen	0,1	426,82	415,76	-1,05	325	357	E
SR02	S5-A-G-10_0,50%	0,500	0,249	0,250	-1	RT	außen	0,1	422,36	412,74	-1,05	581	601	B
SR02	S5-A-G-19_0,30%	0,300	0,072	0,228	-1	RT	außen	0,1	384,93	377,09	-1,04	1.862	2.060	B
SR02	S6-A-G-09_0,20%	0,200	0,011	0,189	-1	RT	außen	2,0	319,35	304,90	-1,09	10.362	11.723	C
SR02	S5-A-G-09_0,20%	0,200	0,006	0,194	-1	RT	außen	2,0	327,91	315,49	-1,08	25.061	27.009	C
SR02	S6-A-G-21_0,17%	0,170	0,007	0,163	-1	RT	außen	1,0	275,59	283,13	-0,95	20.857	22.996	C
SR02	S6-A-G-16_0,17%	0,170	0,005	0,165	-1	RT	außen	1,0	278,09	270,79	-1,05	47.652	53.188	B
SR02	S5-A-G-14_0,15%	0,151	0,001	0,150	-1	RT	außen	2,0	252,51	242,92	-1,08	147.562	163.253	B
SR02	S5-A-G-22_0,15%	0,150	0,002	0,149	-1	RT	außen	2,0	250,49	240,68	-1,08	156.975	171.036	B
SR02	S6-A-G-15_0,12%	0,120	0,001	0,119	-1	RT	außen	8,0	200,79	200,77	-1,00	645.231	713.242	B
SR02	S5-A-G-01_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	RT	außen	8,0	203,57	194,76	-1,09	1.265.843	1.422.625	B
SR02	S6-A-G-03_0,11%	0,110	0,000	0,110	-1	RT	außen	8,0	185,62	173,02	-1,15	10.000.000	10.000.000	Durchläufer

Schwingprobe: d = 15 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 168.703 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unterhalb der Schneiden; E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 27 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie SR05 (EN-GJS-450-18). Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _e = ε _f /ε ₀	Umgebungstemperatur T _{0m} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _f /σ ₀	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{0,t}	ε _{0,p}	ε _{0,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2) [MPa]		N(+)	N ₀	
SR05	S5-I-K-06_0,80%	0,800	0,538	0,262	-1	RT	innen	0,1	427,54	412,52	-1,07	98	104	B
SR05	S6-I-K-08_0,60%	0,600	0,349	0,251	-1	RT	innen	0,1	410,05	398,12	-1,06	220	244	B
SR05	S6-I-K-02_0,50%	0,500	0,254	0,246	-1	RT	innen	0,1	401,42	389,84	-1,06	364	454	B
SR05	S6-I-K-12_0,40%	0,400	0,169	0,231	-1	RT	innen	0,1	377,05	365,66	-1,06	412	414	D
SR05	S6-I-K-20_0,35%	0,359	0,122	0,237	-1	RT	innen	0,1	386,15	363,35	-1,13	838	1.164	B
SR05	S6-I-K-04_0,30%	0,300	0,072	0,228	-1	RT	innen	0,2	371,91	360,96	-1,06	1.307	2.540	B
SR05	S6-I-K-18_0,25%	0,250	0,035	0,216	-1	RT	innen	0,5	351,86	339,89	-1,07	3.152	4.881	B
SR05	S5-I-K-10_0,25%	0,250	0,036	0,214	-1	RT	innen	0,5	349,38	336,33	-1,08	3.160	5.156	B
SR05	S6-I-K-06_0,20%	0,199	0,011	0,188	-1	RT	innen	3,0	306,48	291,08	-1,11	11.360	14.688	C
SR05	S5-I-K-04_0,17%	0,170	0,003	0,167	-1	RT	innen	3,0	272,18	261,42	-1,08	55.290	56.394	B
SR05	S6-I-K-14_0,15%	0,148	0,000	0,147	-1	RT	innen	5,0	240,26	233,34	-1,06	98.165	100.128	C
SR05	S5-I-K-09_0,11%	0,109	0,002	0,107	-1	RT	innen	10,0	174,87	165,66	-1,11	225.480	528.314	B
SR05	S6-I-K-15_0,10%	0,101	0,000	0,101	-1	RT	innen	10,0	165,71	165,63	-1,00	1.263.400	1.272.300	B
SR05	S6-I-K-10_0,09%	0,089	0,000	0,089	-1	RT	innen	10,0	144,83	145,59	-0,99	10.000.000	10.000.001	Durchläufer

Schwingprobe: d = 6 mm; l = 11 mm; Elastizitätsmodul: E = 163,174 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,04

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 28 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie SR06 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis $R_{\epsilon} = \epsilon_f / \epsilon_0$	Umgebungstemperatur T _{um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis $R_{\sigma} = \sigma_f / \sigma_0$	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		$\epsilon_{a,t}$	$\epsilon_{a,p}$	$\epsilon_{a,e}$					σ_a (n = N/2) [MPa]	σ_{max} (n = N/2) [MPa]		N(+)	N _b	
SR06	S6-A-K-13_1,00%	1,000	0,725	0,275	-1	RT	außen	0,1	448,93	434,62	-1,07	78	80	C
SR06	S5-A-K-08_0,80%	0,800	0,529	0,271	-1	RT	außen	0,1	441,95	430,54	-1,05	208	228	B
SR06	S5-A-K-15_0,60%	0,600	0,336	0,263	-1	RT	außen	0,1	430,14	418,72	-1,05	415	439	B
SR06	S5-A-K-01_0,50%	0,500	0,251	0,249	-1	RT	außen	0,1	406,75	396,69	-1,05	416	584	B
SR06	S5-A-K-14_0,40%	0,400	0,154	0,246	-1	RT	außen	0,1	402,20	390,37	-1,06	1,098	1,164	B
SR06	S5-A-K-17_0,30%	0,300	0,065	0,235	-1	RT	außen	0,2	384,00	372,98	-1,06	2,540	2,800	B
SR06	S6-A-K-07_0,25%	0,250	0,024	0,227	-1	RT	außen	0,5	370,59	358,00	-1,07	5,471	5,691	B
SR06	S6-A-K-16_0,20%	0,201	0,009	0,192	-1	RT	außen	1,0	313,77	297,95	-1,11	21,812	22,248	E
SR06	S6-A-K-10_0,17%	0,169	0,000	0,169	-1	RT	außen	3,0	276,86	269,40	-1,06	85,462	87,170	B
SR06	S5-A-K-09_0,15%	0,148	0,000	0,148	-1	RT	außen	5,0	240,94	238,62	-1,02	115,012	117,312	C
SR06	S5-A-K-12_0,13%	0,130	0,000	0,130	-1	RT	außen	5,0	217,67	205,20	-1,12	1,479,980	1,492,700	C
SR06	S5-A-K-03_0,12%	0,123	0,000	0,123	-1	RT	außen	10,0	204,19	205,80	-0,98	956,950	976,090	C
SR06	S5-A-K-19_0,11%	0,110	0,000	0,110	-1	RT	außen	10,0	181,24	180,77	-1,01	5,885,000	5,885,000	C
SR06	S6-A-K-05_0,11%	0,108	0,000	0,108	-1	RT	außen	10,0	177,20	171,39	-1,07	7,883,999	7,900,000	C

Schwingprobe: d = 6 mm; l = 11 mm; Elastizitätsmodul: E = 163,385 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,04

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

**Tabelle T 29 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR03 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR03	S6-A-G-05	-1	RT	Luft	179,28	150	10.000.000	Durchläufer
SR03	S6-A-G-05'	-1	RT	Luft	176,68	240	259.187	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR03	S6-A-G-06	-1	RT	Luft	174,01	240	149.450	Bruch
SR03	S6-A-G-10	-1	RT	Luft	172,20	260	118.743	Bruch
SR03	S6-A-G-13	-1	RT	Luft	169,32	260	56.970	Bruch
SR03	S6-A-G-17	-1	RT	Luft	179,48	200	1.200.209	Bruch
SR03	S6-A-G-14	-1	RT	Luft	179,04	200	479.815	Bruch
SR03	S5-A-G-03	-1	RT	Luft	173,20	200	954.804	Bruch
SR03	S5-A-G-07	-1	RT	Luft	179,00	180	2.891.520	Bruch
SR03	S5-A-G-11	-1	RT	Luft	174,90	180	672.677	Bruch
SR03	S5-A-G-12	-1	RT	Luft	180,40	170	10.000.000	Durchläufer
SR03	S5-A-G-12'	-1	RT	Luft	178,66	240	226.946	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR03	S5-A-G-16	-1	RT	Luft	179,65	180	3.321.798	Bruch
SR03	S5-A-G-20	-1	RT	Luft	177,83	170	783.075	Bruch
SR03	S5-A-G-21	-1	RT	Luft	178,06	260	89.701	Bruch
SR03	S6-A-G-18	-1	RT	Luft	176,75	240	111.156	Bruch
SR03	S6-A-G-19	-1	RT	Luft	171,95	170	10.000.000	Durchläufer
SR03	S6-A-G-19'	-1	RT	Luft	171,72	260	81.885	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR03	S6-A-G-20	-1	RT	Luft	171,80	160	10.000.000	Durchläufer
SR03	S6-A-G-20'	-1	RT	Luft	171,08	200	735.234	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR03	S6-A-G-02	-1	RT	Luft	183,14	180	1.260.375	Bruch
SR03	S5-A-G-15	-1	RT	Luft	183,74	160	10.000.000	Durchläufer
SR03	S5-A-G-15'	-1	RT	Luft	182,83	260	123.824	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 30 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR04 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage außen d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR04	S5-A-G-04	0	RT	Luft	182,93	140	453.786	Bruch
SR04	S5-A-G-05	0	RT	Luft	182,65	150	78.580	Bruch
SR04	S5-A-G-08	0	RT	Luft	182,19	150	110.820	Bruch
SR04	S5-A-G-13	0	RT	Luft	184,12	125	1.176.912	Bruch
SR04	S5-A-G-17	0	RT	Luft	183,32	120	1.167.318	Bruch
SR04	S5-A-G-18	0	RT	Luft	183,74	120	3.986.389	Bruch
SR04	S5-A-G-23	0	RT	Luft	182,83	140	258.600	Bruch
SR04	S6-A-G-08	0	RT	Luft	183,92	115	10.000.000	Durchläufer
SR04	S6-A-G-08'	0	RT	Luft	183,10	150	150.640	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR04	S6-A-G-11	0	RT	Luft	183,77	115	2.938.819	Bruch
SR04	S6-A-G-12	0	RT	Luft	183,22	110	10.000.000	Durchläufer
SR04	S6-A-G-12'	0	RT	Luft	182,77	140	243.823	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR04	S6-A-G-07	0	RT	Luft	183,34	110	10.000.000	Durchläufer
SR04	S6-A-G-07'	0	RT	Luft	183,17	125	10.000.000	hochgesetzter Durchläufer, durchgelaufen
SR04	S6-A-G-07''	0	RT	Luft	182,87	140	804.682	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR04	S6-A-G-04	0	RT	Luft	10,00	125	10.000.000	Durchläufer
SR04	S6-A-G-04'	0	RT	Luft	15,00	160	33.211	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 31 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR07 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_o = 0$**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur ungeregelt T_{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_b	Bemerkung, Versagensort
SR07	55-I-K-02	0	RT	Luft	100,00	180	22.663	Bruch
SR07	55-I-K-08	0	RT	Luft	120,00	130	350.225	Bruch
SR07	55-I-K-12	0	RT	Luft	100,00	120	17.403.000	Durchläufer
SR07	55-I-K-12'	0	RT	Luft	90,00	160	30.867	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR07	56-I-K-13	0	RT	Luft	80,00	150	145.019	Bruch
SR07	56-I-K-17	0	RT	Luft	80,00	150	61.044	Bruch
SR07	56-I-K-19	0	RT	Luft	100,00	125	799.275	Bruch
SR07	56-I-K-23	0	RT	Luft	100,00	120	16.756.808	Durchläufer
SR07	56-I-K-23'	0	RT	Luft	100,00	130	1.065.410	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR07	55-I-K-25	0	RT	Luft	100,00	160	53.108	Bruch
SR07	55-I-K-29	0	RT	Luft	100,00	125	1.063.436	Bruch

**Tabelle T 32 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR08 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_o = -1$**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R_o	Umgebungstemperatur ungeregelt T_{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N_b	Bemerkung, Versagensort
SR08	56-I-K-09	-1	RT	Luft	100,00	240	99.853	Bruch
SR08	56-I-K-16	-1	RT	Luft	100,00	200	661.791	Bruch
SR08	55-I-K-07	-1	RT	Luft	100,00	180	1.584.721	Bruch
SR08	55-I-K-11	-1	RT	Luft	100,00	170	335.950	Bruch
SR08	56-I-K-05	-1	RT	Luft	100,00	170	10.000.000	Durchläufer
SR08	56-I-K-05'	-1	RT	Luft	100,00	260	140.270	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR08	56-I-K-22	-1	RT	Luft	100,00	260	91.990	Bruch
SR08	56-I-K-24	-1	RT	Luft	100,00	180	155.839	Bruch
SR08	55-I-K-28	-1	RT	Luft	100,00	170	2.022.415	Bruch
SR08	55-I-K-26	-1	RT	Luft	100,00	180	387.997	Bruch
SR08	56-I-K-07	-1	RT	Luft	100,00	240	111.365	Bruch
SR08	55-I-K-47	-1	RT	Luft	100,00	160	4.736.891	Bruch
SR08	55-I-K-45	-1	RT	Luft	100,00	150	10.000.000	Durchläufer
SR08	55-I-K-45'	-1	RT	Luft	60,00	260	94.619	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR08	55-I-K-33	-1	RT	Luft	110,00	160	10.000.000	Durchläufer
SR08	55-I-K-33'	-1	RT	Luft	60,00	240	125.439	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 33 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR09 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungesenkenfrei, R_σ = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR09	S6-I-G-29	0	RT	Luft	180,20	150	52.175	Bruch
SR09	S6-I-G-34	0	RT	Luft	182,53	130	178.166	Bruch
SR09	S6-I-G-36	0	RT	Luft	178,77	115	909.648	Bruch
SR09	S6-I-G-39	0	RT	Luft	180,86	110	4.406.782	Bruch
SR09	S6-I-G-18	0	RT	Luft	177,23	110	697.255	Bruch
SR09	S6-I-G-18	0	RT	Luft	177,08	105	1.241.888	Bruch
SR09	S5-I-G-43	0	RT	Luft	40,00	130	596.779	Bruch
SR09	S6-I-G-01	0	RT	Luft	182,96	115	1.460.447	Bruch
SR09	S6-I-G-06	0	RT	Luft	183,20	105	10.000.000	Durchläufer
SR09	S6-I-G-06'	0	RT	Luft	182,53	140	209.006	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR09	S5-I-G-26	0	RT	Luft	182,83	140	124.451	Bruch
SR09	S5-I-G-03	0	RT	Luft	183,01	100	10.000.000	Durchläufer
SR09	S5-I-G-03'	0	RT	Luft	182,52	130	274.836	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR09	S5-I-G-04	0	RT	Luft	180,90	150	38.045	Bruch
SR09	S5-I-G-13	0	RT	Luft	183,19	105	10.000.000	Durchläufer
SR09	S5-I-G-13'	0	RT	Luft	183,10	115	1.446.780	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR09	S5-I-G-09	0	RT	Luft	8,00	140	112.344	Bruch

**Tabelle T 34 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR10 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungesenkenfrei, R_σ = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR10	S6-I-G-20	-1	RT	Luft	182,78	150	2.139.918	Bruch
SR10	S6-I-G-31	-1	RT	Luft	182,32	140	10.000.000	Durchläufer
SR10	S6-I-G-31'	-1	RT	Luft	181,44	220	343.768	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR10	S6-I-G-19	-1	RT	Luft	181,37	140	10.000.000	Durchläufer
SR10	S6-I-G-19'	-1	RT	Luft	179,60	220	161.328	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR10	S6-I-G-40	-1	RT	Luft	180,50	220	274.950	Bruch
SR10	S6-I-G-41	-1	RT	Luft	180,24	150	5.974.107	Bruch
SR10	S6-I-G-35	-1	RT	Luft	181,97	200	252.343	Bruch
SR10	S6-I-G-37	-1	RT	Luft	177,30	150	10.000.000	Durchläufer
SR10	S6-I-G-37'	-1	RT	Luft	174,70	240	111.149	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR10	S6-I-G-38	-1	RT	Luft	177,70	240	100.196	Bruch
SR10	S6-I-G-42	-1	RT	Luft	178,60	150	1.421.504	Bruch
SR10	S6-I-G-43	-1	RT	Luft	179,22	200	169.825	Bruch
SR10	S6-I-G-44	-1	RT	Luft	180,76	140	10.000.000	Durchläufer
SR10	S6-I-G-44'	-1	RT	Luft	179,90	180	1.499.184	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR10	S6-I-G-02	-1	RT	Luft	181,21	180	908.727	Bruch
SR10	S6-I-G-03	-1	RT	Luft	180,19	160	2.155.668	Bruch
SR10	S6-I-G-05	-1	RT	Luft	176,07	240	105.890	Bruch
SR10	S6-I-G-15	-1	RT	Luft	174,77	160	1.998.283	Bruch
SR10	S5-I-G-05	-1	RT	Luft	179,59	180	2.334.651	Bruch
SR10	S5-I-G-08	-1	RT	Luft	176,81	160	903.798	Bruch
SR10	S5-I-G-11	-1	RT	Luft	178,11	180	566.940	Bruch
SR10	S5-I-G-15	-1	RT	Luft	178,73	160	4.200.188	Bruch
SR10	S5-I-G-29	-1	RT	Luft	175,60	200	846.910	Bruch
SR10	S5-I-G-44	-1	RT	Luft	10,00	220	96.344	Bruch

**Tabelle T 35 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR11 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, ungänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR11	S5-A-K-04	-1	RT	Luft	100,00	220	80.695	Bruch
SR11	S5-A-K-06	-1	RT	Luft	100,00	220	907.411	Bruch
SR11	S5-A-K-13	-1	RT	Luft	100,00	180	2.227.369	Bruch
SR11	S5-A-K-10	-1	RT	Luft	100,00	180	10.000.000	Durchläufer
SR11	S5-A-K-10'	-1	RT	Luft	100,00	220	317.920	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR11	S6-A-K-06	-1	RT	Luft	100,00	200	26.000.000	Durchläufer
SR11	S6-A-K-06'	-1	RT	Luft	100,00	240	388.980	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR11	S6-A-K-08	-1	RT	Luft	100,00	240	143.509	Bruch
SR11	S6-A-K-12	-1	RT	Luft	100,00	210	856.385	Bruch
SR11	S5-A-K-32	-1	RT	Luft	80,00	300	39.880	Bruch
SR11	S6-A-K-01	-1	RT	Luft	100,00	240	214.615	Bruch
SR11	S6-A-K-02	-1	RT	Luft	100,00	200	1.002.065	Bruch
SR11	S5-A-K-20	-1	RT	Luft	80,00	300	36.348	Bruch
SR11	S5-A-K-21	-1	RT	Luft	80,00	280	87.042	Bruch
SR11	S5-A-K-24	-1	RT	Luft	80,00	280	62.440	Bruch
SR11	S5-A-K-26	-1	RT	Luft	100,00	190	1.226.018	Bruch
SR11	S5-A-K-29	-1	RT	Luft	90,00	200	375.246	Bruch
SR11	S5-A-K-30	-1	RT	Luft	100,00	190	486.169	Bruch
SR11	S6-A-K-14	-1	RT	Luft	100,00	180	715.740	Bruch
SR11	S6-A-K-15	-1	RT	Luft	100,00	170	50.060.970	Durchläufer
SR11	S6-A-K-15'	-1	RT	Luft	80,00	300	40.284	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 36 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR12 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, ungänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR12	S5-A-K-02	0	RT	Luft	100,00	120	40.070.000	Durchläufer
SR12	S5-A-K-02'	0	RT	Luft	100,00	140	448.806	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR12	S5-A-K-05	0	RT	Luft	100,00	160	78.613	Bruch
SR12	S5-A-K-07	0	RT	Luft	100,00	160	30.981	Bruch
SR12	S5-A-K-16	0	RT	Luft	100,00	140	730.120	Bruch
SR12	S5-A-K-18	0	RT	Luft	100,00	130	783.787	Bruch
SR12	S5-A-K-22	0	RT	Luft	100,00	150	236.925	Bruch
SR12	S5-A-K-23	0	RT	Luft	100,00	150	285.033	Bruch
SR12	S5-A-K-25	0	RT	Luft	100,00	130	1.077.989	Bruch
SR12	S5-A-K-27	0	RT	Luft	100,00	125	1.815.904	Bruch
SR12	S5-A-K-28	0	RT	Luft	100,00	125	42.072.087	Durchläufer
SR12	S5-A-K-28'	0	RT	Luft	100,00	150	167.874	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR12	S5-A-K-31	0	RT	Luft	100,00	140	570.715	Bruch
SR12	S6-A-K-03	0	RT	Luft	100,00	130	909.264	Bruch
SR12	S6-A-K-04	0	RT	Luft	100,00	125	15.200.000	Durchläufer
SR12	S6-A-K-04'	0	RT	Luft	100,00	160	115.773	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR12	S6-A-K-11	0	RT	Luft	100,00	160	75.830	Bruch
SR12	S6-A-K-09	0	RT	Luft	100,00	120	25.000.000	Durchläufer
SR12	S6-A-K-09'	0	RT	Luft	100,00	130	660.247	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

Tabelle T 37 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR13 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-1, R₀ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur unreguliert T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N ₀	Bemerkung, Versagensort
SR13	S6-I-G-10	-1	RT	Luft	181,73	140	7	170	146	200.746	Bruch
SR13	S6-I-G-28	-1	RT	Luft	182,36	150	2	174	152	10.000.000	Durchläufer
SR13	S6-I-G-28'	-1	RT	Luft	183,32	200	2	174	203	193.985	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR13	S6-I-G-32	-1	RT	Luft	180,71	160	-	180	157	6.485.487	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S6-I-G-14	-1	RT	Luft	184,00	160	7	170	167	12.310	Bruch
SR13	S6-I-G-45	-1	RT	Luft	183,90	160	-	221	128	876.379	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S6-I-G-46	-1	RT	Luft	183,80	200	4	173	204	390.015	Bruch
SR13	S6-I-G-30	-1	RT	Luft	183,00	140	-	216	114	426.275	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S6-I-G-53	-1	RT	Luft	185,40	130	1	176	131	10.000.000	Durchläufer
SR13	S6-I-G-53'	-1	RT	Luft	184,60	200	1	176	201	121.217	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR13	S6-I-G-54	-1	RT	Luft	183,00	160	5	172	165	184.874	Bruch
SR13	S5-I-G-24	-1	RT	Luft	184,10	120	-	218	97	2.861.322	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S5-I-G-40	-1	RT	Luft	184,60	160	2	175	162	222.277	Bruch
SR13	S5-I-G-18	-1	RT	Luft	184,00	200	-	180	195	76.593	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S5-I-G-27	-1	RT	Luft	184,40	140	3	174	142	241.647	Bruch
SR13	S5-I-G-33	-1	RT	Luft	184,30	120	-	181	117	83.369	Bruch; im Übergangsradius
SR13	S5-I-G-35	-1	RT	Luft	183,75	120	1	176	121	10.000.000	Durchläufer
SR13	S5-I-G-35'	-1	RT	Luft	183,70	160	1	176	161	5.395.346	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR13	S5-I-G-37	-1	RT	Luft	183,06	200	-	181	195	267.528	Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 38 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR14 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-2, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unreguliert T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR14	S6-I-G-27	-1	RT	Luft	185,00	110	4	173	112	55.231	Bruch
SR14	S6-I-G-48	-1	RT	Luft	181,46	120	-	191	111	342.562	Bruch; im Übergangsradius
SR14	S6-I-G-12	-1	RT	Luft	184,15	110	2	174	111	4.457.101	Bruch
SR14	S6-I-G-26	-1	RT	Luft	182,26	120	1	176	121	127.526	Bruch
SR14	S6-I-G-07	-1	RT	Luft	182,54	130	5	171	134	707.173	Bruch
SR14	S6-I-G-49	-1	RT	Luft	181,19	100	2	174	101	463.839	Bruch
SR14	S6-I-G-50	-1	RT	Luft	181,78	100	7	170	104	468.522	Bruch
SR14	S5-I-G-32	-1	RT	Luft	181,70	140	30	146	169	9.495	Bruch
SR14	S5-I-G-28	-1	RT	Luft	184,00	90	-	183	87	860.884	Bruch; im Übergangsradius
SR14	S5-I-G-23	-1	RT	Luft	182,50	80	-	183	77	426.129	Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 39 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR15 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-3, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unreguliert T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR15	S6-I-G-21	-1	RT	Luft	181,68	100	-	182	97	1.282.310	Bruch; im Übergangsradius
SR15	S6-I-G-24	-1	RT	Luft	180,89	90	2	175	91	1.452.005	Bruch
SR15	S6-I-G-47	-1	RT	Luft	182,90	90	-	183	87	10.000.000	Durchläufer
SR15	S6-I-G-47'	-1	RT	Luft	182,50	120	-	183	115	337.056	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius
SR15	S5-I-G-34	-1	RT	Luft	181,18	140	-	228	108	124.438	Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 40 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR16 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-4, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR16	S6-I-G-23	-1	RT	Luft	179,92	70	-	181	68	10.000.000	Durchläufer
SR16	S6-I-G-23'	-1	RT	Luft	174,79	100	-	181	97	10.912	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius
SR16	S6-I-G-25	-1	RT	Luft	179,35	90	-	183	87	198.410	Bruch; im Übergangsradius
SR16	S6-I-G-22	-1	RT	Luft	177,95	90	-	182	87	235.236	Bruch; im Übergangsradius
SR16	S6-I-G-52	-1	RT	Luft	180,57	80	-	186	76	10.000.000	Durchläufer
SR16	S6-I-G-52'	-1	RT	Luft	180,30	95	-	186	90	373.526	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius
SR16	S5-I-G-17	-1	RT	Luft	176,10	110	-	185	105	31.729	Bruch; im Übergangsradius
SR16	S5-I-G-20	-1	RT	Luft	182,40	100	5	171	103	340.564	Bruch
SR16	S5-I-G-22	-1	RT	Luft	179,80	100	9	168	105	580.746	Bruch
SR16	S5-I-G-36	-1	RT	Luft	178,91	80	8	169	84	963.549	Bruch
SR16	S5-I-G-38	-1	RT	Luft	178,80	80	-	186	76	10.000.000	Durchläufer
SR16	S5-I-G-38'	-1	RT	Luft	178,40	110	-	186	104	474.760	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 41 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR17 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunckerklasse Cc-5, R₀ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur ungerregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunckerfläche A _{Luncker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR17	S6-I-G-11	-1	RT	Luft	176,00	70	-	180	68	3.531.260	Bruch; im Übergangsradius
SR17	S6-I-G-09	-1	RT	Luft	176,30	90	-	Nenn*	90	411.043	Bruch
SR17	S6-I-G-13	-1	RT	Luft	180,51	70	17	160	77	2.340.902	Bruch
SR17	S6-I-G-51	-1	RT	Luft	174,50	60	9	168	63	1.286.163	Bruch
SR17	S5-I-G-31	-1	RT	Luft	176,17	60	17	160	66	10.000.000	Durchläufer
SR17	S5-I-G-31'	-1	RT	Luft	175,30	100	17	160	111	84.411	hochgesetzter Durchläufer, Bruch; im Übergangsradius
SR17	S5-I-G-21	-1	RT	Luft	170,80	100	-	181	97	49.793	Bruch; im Übergangsradius
SR17	S5-I-G-19	-1	RT	Luft	167,70	90	27	150	106	37.228	Bruch

Nenn* = Nennquerschnitt A_{Nenn} = 176,7 mm²

**Tabelle T 42 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR18 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,19, ungänzenfrei, R_σ = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR18	55-I-K-56	-1	RT	Luft	130,00	120	1.070.984	Bruch
SR18	56-I-K-32	-1	RT	Luft	120,00	110	10.000.000	Durchläufer
SR18	56-I-K-32'	-1	RT	Luft	90,00	150	199.799	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR18	55-I-K-54	-1	RT	Luft	110,00	120	435.869	Bruch
SR18	56-I-K-31	-1	RT	Luft	120,00	110	578.172	Bruch
SR18	56-I-K-29	-1	RT	Luft	120,00	100	10.000.000	Durchläufer
SR18	56-I-K-29''	-1	RT	Luft	120,00	120	10.000.000	Durchläufer
SR18	56-I-K-29'''	-1	RT	Luft	90,00	150	166.327	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR18	55-I-K-61	-1	RT	Luft	120,00	110	10.000.000	Durchläufer
SR18	55-I-K-61'	-1	RT	Luft	100,00	140	198.972	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR18	55-I-K-58	-1	RT	Luft	80,00	140	487.375	Bruch
SR18	56-I-K-27	-1	RT	Luft	100,00	140	427.009	Bruch
SR18	55-I-K-60	-1	RT	Luft	120,00	120	2.298.920	Bruch
SR18	56-I-K-34	-1	RT	Luft	80,00	160	110.846	Bruch
SR18	56-I-K-26	-1	RT	Luft	80,00	160	98.930	Bruch
SR18	56-I-K-30	-1	RT	Luft	100,00	130	358.123	Bruch

**Tabelle T 43 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR19 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,19, ungänzenfrei, R_σ = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
SR19	56-I-K-33	-1	RT	Luft	100,00	200	171.000	Bruch
SR19	55-I-K-50	-1	RT	Luft	100,00	200	498.104	Bruch
SR19	55-I-K-51	-1	RT	Luft	100,00	180	243.327	Bruch
SR19	55-I-K-59	-1	RT	Luft	120,00	170	379.204	Bruch
SR19	56-I-K-36	-1	RT	Luft	120,00	150	10.000.000	Durchläufer
SR19	56-I-K-36'	-1	RT	Luft	80,00	220	150.763	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR19	55-I-K-52	-1	RT	Luft	80,00	220	188.658	Bruch
SR19	55-I-K-53	-1	RT	Luft	120,00	160	10.000.000	Durchläufer
SR19	55-I-K-53'	-1	RT	Luft	100,00	180	676.959	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR19	56-I-K-35	-1	RT	Luft	120,00	160	1.501.230	Bruch
SR19	55-I-K-55	-1	RT	Luft	120,00	160	644.949	Bruch
SR19	56-I-K-28	-1	RT	Luft	120,00	150	10.000.000	Durchläufer
SR19	56-I-K-28'	-1	RT	Luft	90,00	200	183.720	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR19	56-I-K-37	-1	RT	Luft	100,00	170	3.016.364	Bruch
SR19	55-I-K-57	-1	RT	Luft	80,00	220	143.563	Bruch

**Tabelle T 44 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR20 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 4, 14, ungänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur ungeregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _b	Bemerkung, Versagensort
SR20	S5-A-K-37	-1	RT	Luft	100,00	150	84.250	Bruch
SR20	S6-A-K-26	-1	RT	Luft	100,00	150	101.522	Bruch
SR20	S5-A-K-38	-1	RT	Luft	120,00	100	445.815	Bruch
SR20	S6-A-K-21	-1	RT	Luft	120,00	100	473.370	Bruch
SR20	S5-A-K-36	-1	RT	Luft	140,00	80	1.288.574	Bruch
SR20	S6-A-K-23	-1	RT	Luft	140,00	75	1.274.807	Bruch
SR20	S5-A-K-33	-1	RT	Luft	140,00	70	3.263.134	Bruch
SR20	S6-A-K-22	-1	RT	Luft	140,00	65	3.858.194	Bruch
SR20	S5-A-K-35	-1	RT	Luft	100,00	150	411.981	Bruch
SR20	S6-A-K-18	-1	RT	Luft	140,00	60	8.861.592	Bruch

**Tabelle T 45 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie SR21 (EN-GJS-450-18),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 4, 14, ungänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur ungeregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _b	Bemerkung, Versagensort
SR21	S6-A-K-17	0	RT	Luft	150,98	120	65.351	Bruch
SR21	S5-A-K-39	0	RT	Luft	150,96	120	67.507	Bruch
SR21	S6-A-K-19	0	RT	Luft	151,11	100	199.426	Bruch
SR21	S5-A-K-34	0	RT	Luft	150,92	100	207.351	Bruch
SR21	S5-A-K-40	0	RT	Luft	152,01	70	1.817.793	Bruch
SR21	S6-A-K-20	0	RT	Luft	151,18	65	10.000.000	Durchläufer
SR21	S6-A-K-20'	0	RT	Luft	150,17	120	27.192	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
SR21	S5-A-K-32	0	RT	Luft	153,26	70	1.246.663	Bruch
SR21	S6-A-K-24	0	RT	Luft	151,00	120	61.952	Bruch
SR21	S5-A-K-41	0	RT	Luft	151,52	65	3.379.661	Bruch
SR21	S6-A-K-25	0	RT	Luft	152,59	60	3.447.726	Bruch

Tabelle T 46 Parameter der Dehnungswöhlerlinien für die ungespannten Werkstoffproben aus EN-GJS-700-2

Reihe	Anzahl Einzelversuche	zyklische Kennwerte nach Coffin, Manson, Basquin und Morrow			zyklische Kennwerte nach Ramberg, Osgood			
		Schwingfestigkeitskoeffizient σ'_r / [MPa]	Schwingfestigkeitsexponent b	Duktilitätskoeffizient ϵ'_r / [m/m]	Duktilitätsexponent c	Dehngrenze $R'_{p0,2}$ / [MPa]	Verfestigungskoeffizient K' / [MPa]	Verfestigungsexponent n'
FWHR01	15	1207	-0,1257	0,07782	-0,5974	558,0	2065	0,2105
FWHR02	13	1334	-0,1347	0,6853	-0,8774	544,0	1414	0,1535
FWHR05	15	1063	-0,1117	0,04288	-0,5047	539,0	2135	0,2214
FWHR06	15	1284	-0,1253	0,2792	-0,7260	547,0	1600	0,1726

Tabelle T 47 Parameter der Spannungswöhlerlinien für die ungespannten Werkstoffproben aus EN-GJS-700-2

Versuchsreihe	Lage der Schwingproben	Durchmesser der Schwingproben	Lunkerklasse	Belastungsart	Lastverhältnis R	Temperatur [°C]	Formzahl K_r	Anzahl Einzelversuche	Parameter der Spannungswöhlerlinien				
									Abknickpunkt	Neigung	Nennspannungsschwelligkeit bei N_k und $P_u = 50\%$	Nennspannungsschwelligkeit bei $N = 1 \cdot 10^7$ und $P_u = 50\%$	Streuung
									N_k	k	$\sigma_{n,k,50\%}$	$\sigma_{n,N,50\%}$	$1/T_\sigma$
FWHR03	außen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	22	$1 \cdot 10^6$	5,55	190	181	1,23
FWHR04	außen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	17	$1 \cdot 10^6$	4,78	123	117	1,25
FWHR07	innen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,04	15	$1 \cdot 10^6$	8,63	137	131	1,22
FWHR08	innen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,04	17	$1 \cdot 10^6$	7,53	211	201	1,25
FWHR09	innen	15 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,05	16	$1 \cdot 10^6$	6,55	122	116	1,21
FWHR10	innen	15 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,05	17	$1 \cdot 10^6$	4,50	184	175	1,22
FWHR11	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,04	12	$1 \cdot 10^6$	8,89	146	139	1,20
FWHR12	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,04	14	$1 \cdot 10^6$	4,81	190	181	1,29
FWHR13	innen	15 mm	Cc-1	axial	-1	RT	-	6	$1 \cdot 10^6$	4,94	124	118	1,23
FWHR14	innen	15 mm	Cc-2	axial	-1	RT	-	6	$1 \cdot 10^6$	4,94	98	93	1,57
FWHR15	innen	15 mm	Cc-3	axial	-1	RT	-	11	$1 \cdot 10^6$	4,94	86	81	2,05
FWHR16	innen	15 mm	Cc-4	axial	-1	RT	-	12	$1 \cdot 10^6$	4,94	63	59	1,73
FWHR17	innen	15 mm	Cc-5	axial	-1	RT	-	9	$1 \cdot 10^6$	4,94	74	70	1,69
FWHR18	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	1,19	18	$1 \cdot 10^6$	5,59	129	122	1,15
FWHR19	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	1,19	16	$1 \cdot 10^6$	6,40	192	182	1,10
FWHR20	außen	6 mm	Cc-0	axial	0	RT	4,14	13	$1 \cdot 10^6$	3,00	71	68	1,24
FWHR21	außen	6 mm	Cc-0	axial	-1	RT	4,14	11	$1 \cdot 10^6$	4,00	69	65	1,17

Tabelle T 49 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie FWHR02 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_r = 1,05, ungänzenfrei, R_ε = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _ε = ε _f /ε ₀	Umgebungstemperatur T _{um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _p /σ ₀	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{a,t}	ε _{a,p}	ε _{a,e}					σ _a (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2)		N(+) [-]	N _b [-]	
FWHR02	FWH-A-G-40_0,80%	0,800	0,445	0,355	-1	RT	außen	0,1	578,38	562,28	-1,06	100	107	B
FWHR02	FWH-A-G-03_0,60%	0,600	0,257	0,342	-1	RT	außen	0,1	557,49	540,71	-1,06	422	432	B
FWHR02	FWH-A-G-02_0,50%	0,500	0,181	0,319	-1	RT	außen	0,1	519,43	503,58	-1,06	550	609	B
FWHR02	FWH-A-G-11_0,40%	0,400	0,109	0,290	-1	RT	außen	0,1	472,71	471,80	-1,00	1.000	1.068	B
FWHR02	FWH-A-G-08_0,30%	0,300	0,033	0,267	-1	RT	außen	0,1	435,13	413,94	-1,10	2.315	2.642	C
FWHR02	FWH-A-G-12_0,25%	0,250	0,010	0,240	-1	RT	außen	0,5	390,06	377,66	-1,07	9.800	10.488	C
FWHR02	FWH-A-G-05_0,20%	0,201	0,000	0,201	-1	RT	außen	2,0	331,05	301,33	-1,20	48.536	53.418	B
FWHR02	FWH-A-G-06_0,20%	0,200	0,000	0,200	-1	RT	außen	2,0	329,32	319,64	-1,06	78.005	81.800	C
FWHR02	FWH-A-G-07_0,15%	0,150	0,000	0,150	-1	RT	außen	3,0	249,19	245,65	-1,03	198.000	203.278	B
FWHR02	FWH-A-G-38_0,15%	0,150	0,000	0,150	-1	RT	außen	3,0	250,16	212,80	-1,35	221.584	254.839	B
FWHR02	FWH-A-G-09_0,12%	0,120	0,000	0,120	-1	RT	außen	6,0	198,23	194,85	-1,03	198.457	214.560	C
FWHR02	FWH-A-G-41_0,11%	0,110	0,000	0,110	-1	RT	außen	8,0	182,30	275,60	-0,32	215.489	237.923	B
FWHR02	FWH-A-G-01_0,10%	0,100	0,000	0,100	-1	RT	außen	8,0	166,83	164,04	-1,03	10.000.000	10.000.000	Durchläufer

Schwingprobe: d = 15 mm; l = 25 mm; Elastizitätsmodul: E = 162,801 GPa; Umgebung: Luft, T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_r = 1,05

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

Tabelle T 51 Einzelergebnisse der Dehnungswöhlerlinie FWHR06 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Dehnung bei N/2			Dehnungsverhältnis R _t = ε _t /ε ₀	Umgebungstemperatur T _{um} [°C]	Entnahmeposition Gussplatte	Versuchsfrequenz [Hz]	Spannung		Spannungsverhältnis R _σ = σ _t /σ ₀	Schwingspielzahl		Bemerkung, Risslage
		ε _{0,t}	ε _{0,p}	ε _{0,e}					σ ₀ (n = N/2) [MPa]	σ _{max} (n = N/2) [MPa]		N+	N ₀	
FWHR06	FWH-A-K-08_0,60%	0,600	0,274	0,325	-1	RT	außen	0,1	538,53	522,03	-1,06	174	176	B
FWHR06	FWH-A-K-05_0,50%	0,497	0,188	0,309	-1	RT	außen	0,1	511,05	497,31	-1,06	692	792	B
FWHR06	FWH-A-K-09_0,40%	0,400	0,107	0,293	-1	RT	außen	0,2	484,04	466,34	-1,08	1.234	1.308	B
FWHR06	FWH-A-K-01_0,40%	0,400	0,100	0,300	-1	RT	außen	0,2	496,11	476,68	-1,08	1.786	2.172	B
FWHR06	FWH-A-K-10_0,35%	0,350	0,073	0,277	-1	RT	außen	0,2	458,30	450,69	-1,03	2.396	2.444	B
FWHR06	FWH-A-K-15_0,35%	0,350	0,070	0,280	-1	RT	außen	0,2	463,70	449,61	-1,06	2.444	2.492	B
FWHR06	FWH-A-K-12_0,25%	0,250	0,016	0,234	-1	RT	außen	0,5	387,36	376,38	-1,06	12.540	13.044	B
FWHR06	FWH-A-K-14_0,20%	0,199	0,004	0,195	-1	RT	außen	1,0	323,32	309,25	-1,09	74.402	77.408	B
FWHR06	FWH-A-K-02_0,17%	0,170	0,001	0,169	-1	RT	außen	3,0	278,80	278,15	-1,00	63.506	64.776	B
FWHR06	FWH-A-K-07_0,17%	0,171	0,002	0,169	-1	RT	außen	3,0	280,29	279,55	-1,01	98.166	100.128	B
FWHR06	FWH-A-K-13_0,15%	0,150	0,003	0,147	-1	RT	außen	5,0	243,36	241,52	-1,02	442.074	450.914	B
FWHR06	FWH-A-K-06_0,12%	0,120	0,002	0,119	-1	RT	außen	10,0	196,09	190,38	-1,06	392.550	400.400	B
FWHR06	FWH-A-K-04_0,12%	0,119	0,000	0,118	-1	RT	außen	10,0	195,86	187,33	-1,09	10.000.001	10.000.001	Durchläufer
FWHR06	FWH-A-K-11_0,12%	0,118	0,003	0,115	-1	RT	außen	6,0	190,29	188,14	-1,02	10.000.002	10.000.002	Durchläufer
FWHR06	FWH-A-K-03_0,11%	0,112	0,003	0,109	-1	RT	außen	10,0	180,57	180,11	-1,01	10.000.003	10.000.003	Durchläufer

Schwingprobe: d = 6 mm; l = 11 mm; Elastizitätsmodul: E = 162,801 GPa; Umgebung: Luft; T = 296 K; +) 10% Kraftabfall; Formzahl K_t = 1,04

Risslage: A = von der Walzoberfläche; B = zwischen den Schneiden; C = außerhalb der Schneiden; D = unter den Schneiden (oben); E = unter den Schneiden (unten)

**Tabelle T 52 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR03 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unglänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR03	FWH-A-G-22	-1	RT	Luft	20,00	250	539.848	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-23	-1	RT	Luft	123,74	250	308.854	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-15	-1	RT	Luft	123,96	220	411.063	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-17	-1	RT	Luft	123,47	210	386.862	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-16	-1	RT	Luft	123,30	200	1.186.248	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-26	-1	RT	Luft	183,23	220	557.435	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-20	-1	RT	Luft	180,25	200	514.479	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-21	-1	RT	Luft	180,00	180	10.000.000	Durchläufer
FWHR03	FWH-A-G-21'	-1	RT	Luft	179,00	250	180.134	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR03	FWH-A-G-25	-1	RT	Luft	182,79	190	1.806.165	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-32	-1	RT	Luft	183,66	200	889.336	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-34	-1	RT	Luft	183,71	190	349.000	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-30	-1	RT	Luft	183,94	180	10.000.000	Durchläufer
FWHR03	FWH-A-G-30'	-1	RT	Luft	184,00	220	369.776	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR03	FWH-A-G-35	-1	RT	Luft	15,00	300	51.747	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-36	-1	RT	Luft	25,00	300	80.246	Bruch
FWHR03	FWH-I-G-43	-1	RT	Luft	183,26	170	10.000.000	Durchläufer
FWHR03	FWH-I-G-43'	-1	RT	Luft	183,33	200	313.053	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR03	FWH-I-G-42	-1	RT	Luft	183,78	170	107.375	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-44	-1	RT	Luft	25,00	300	70.025	Bruch
FWHR03	FWH-A-G-42	-1	RT	Luft	40,00	170	10.000.000	Durchläufer
FWHR03	FWH-A-G-42'	-1	RT	Luft	30,00	250	299.668	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 53 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR04 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unglänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR04	FWH-A-G-18	0	RT	Luft	122,98	150	311.338	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-13	0	RT	Luft	123,62	150	225.430	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-14	0	RT	Luft	181,30	140	387.909	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-19	0	RT	Luft	180,10	130	429.871	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-27	0	RT	Luft	183,00	115	10.000.000	Durchläufer
FWHR04	FWH-A-G-27'	0	RT	Luft	180,68	170	206.315	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR04	FWH-A-G-24	0	RT	Luft	180,10	120	10.000.000	Durchläufer → Spannung reduziert auf 149 MPa wegen Bruchfläche (d = 16mm)
FWHR04	FWH-A-G-24'	0	RT	Luft	179,21	170	304.546	hochgesetzter Durchläufer, Bruch, s.o.
FWHR04	FWH-A-G-29	0	RT	Luft	182,44	170	326.640	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-31	0	RT	Luft	183,75	130	529.103	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-35	0	RT	Luft	182,49	120	10.000.000	Durchläufer
FWHR04	FWH-A-G-35'	0	RT	Luft	181,12	170	136.499	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR04	FWH-A-G-37	0	RT	Luft	183,48	125	925.404	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-33	0	RT	Luft	177,75	125	1.785.135	Bruch
FWHR04	FWH-I-G-41	0	RT	Luft	180,93	120	881.088	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-43	0	RT	Luft	30,00	140	466.835	Bruch
FWHR04	FWH-A-G-39	0	RT	Luft	30,00	150	939.442	Bruch

Tabelle T 54 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR07 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_σ = 0

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR07	FWH-I-K-02	0	RT	Luft	85,00	150	225.838	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-08	0	RT	Luft	85,00	150	150.128	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-12	0	RT	Luft	100,00	120	10.000.000	Durchläufer
FWHR07	FWH-I-K-12'	0	RT	Luft	80,00	150	450.408	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR07	FWH-I-K-29	0	RT	Luft	100,00	130	1.213.489	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-23	0	RT	Luft	100,00	125	5.849.307	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-15	0	RT	Luft	90,00	140	6.192.773	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-17	0	RT	Luft	90,00	140	755.048	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-25	0	RT	Luft	80,00	165	829.388	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-31	0	RT	Luft	100,00	140	28.967.450	Durchläufer
FWHR07	FWH-I-K-38	0	RT	Luft	90,00	180	74.460	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-39	0	RT	Luft	90,00	180	136.784	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-35	0	RT	Luft	110,00	150	283.645	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-41	0	RT	Luft	110,00	140	5.403.344	Bruch
FWHR07	FWH-I-K-43	0	RT	Luft	110,00	130	2.276.879	Bruch

Tabelle T 55 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR08 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_σ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR08	FWH-I-K-19	-1	RT	Luft	20,00	300	89.325	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-33	-1	RT	Luft	15,00	250	198.083	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-24	-1	RT	Luft	100,00	220	185.863	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-28	-1	RT	Luft	100,00	220	789.797	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-21	-1	RT	Luft	100,00	200	4.358.600	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-11	-1	RT	Luft	100,00	190	10.000.000	Durchläufer
FWHR08	FWH-I-K-11'	-1	RT	Luft	100,00	220	371.111	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR08	FWH-I-K-07	-1	RT	Luft	100,00	250	520.531	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-05	-1	RT	Luft	100,00	200	10.000.000	Durchläufer
FWHR08	FWH-I-K-05'	-1	RT	Luft	100,00	300	98.100	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR08	FWH-I-K-13	-1	RT	Luft	100,00	210	10.000.000	Durchläufer
FWHR08	FWH-I-K-13'	-1	RT	Luft	90,00	250	382.609	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR08	FWH-I-K-36	-1	RT	Luft	90,00	300	43.183	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-37	-1	RT	Luft	100,00	250	193.541	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-34	-1	RT	Luft	100,00	210	95.479.686	Bruch, Durchläufer
FWHR08	FWH-I-K-40	-1	RT	Luft	100,00	220	1.097.399	Bruch
FWHR08	FWH-I-K-42	-1	RT	Luft	100,00	210	350.042	Bruch

**Tabelle T 56 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR09 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_σ = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR09	FWH-I-G-16	0	RT	Luft	182,74	150	204.748	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-17	0	RT	Luft	182,42	130	257.063	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-26	0	RT	Luft	184,11	110	10.000.000	Durchläufer
FWHR09	FWH-I-G-26'	0	RT	Luft	184,13	130	456.366	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR09	FWH-I-G-45	0	RT	Luft	180,00	115	1.595.747	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-21	0	RT	Luft	183,30	115	10.000.000	Durchläufer
FWHR09	FWH-I-G-21'	0	RT	Luft	183,14	130	952.244	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR09	FWH-I-G-11	0	RT	Luft	183,76	120	6.275.101	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-64	0	RT	Luft	180,16	160	100.281	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-68	0	RT	Luft	179,83	115	10.000.000	Durchläufer
FWHR09	FWH-I-G-68'	0	RT	Luft	177,56	160	409.843	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR09	FWH-I-G-72	0	RT	Luft	180,00	130	579.858	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-81	0	RT	Luft	179,06	120	566.081	Bruch
FWHR09	FWH-I-G-12	0	RT	Luft	5,00	150	256.959	Bruch, DMS-Messung
FWHR09	FWH-I-G-31	0	RT	Luft	5,00	120	10.000.000	Durchläufer, DMS-Messung
FWHR09	FWH-I-G-31'	0	RT	Luft	35,00	160	200.766	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 57 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR10 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_σ = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _σ	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR10	FWH-I-G-13	-1	RT	Luft	183,00	180	1.800.893	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-23	-1	RT	Luft	180,23	170	10.000.000	Durchläufer
FWHR10	FWH-I-G-23'	-1	RT	Luft	180,00	200	3.930.044	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR10	FWH-I-G-19	-1	RT	Luft	183,48	230	255.005	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-27	-1	RT	Luft	182,90	230	483.057	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-32	-1	RT	Luft	183,82	180	613.232	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-46	-1	RT	Luft	183,70	200	1.088.567	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-49	-1	RT	Luft	182,14	230	346.836	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-35	-1	RT	Luft	184,85	200	591.901	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-59	-1	RT	Luft	185,10	170	1.764.189	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-40	-1	RT	Luft	185,51	160	10.000.000	Durchläufer
FWHR10	FWH-I-G-40'	-1	RT	Luft	184,62	260	364.081	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR10	FWH-I-G-66	-1	RT	Luft	181,86	170	902.107	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-70	-1	RT	Luft	30,00	300	72.204	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-79	-1	RT	Luft	30,00	300	114.751	Bruch
FWHR10	FWH-I-G-83	-1	RT	Luft	180,49	180	10.000.000	Durchläufer
FWHR10	FWH-I-G-83'	-1	RT	Luft	179,51	260	219.540	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 58 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR11 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR11	FWH-A-K-18	0	RT	Luft	70,00	180	131.734	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-20	0	RT	Luft	80,00	160	135.097	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-29	0	RT	Luft	100,00	140	11.398.442	Durchläufer
FWHR11	FWH-A-K-27	0	RT	Luft	70,00	180	193.015	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-50	0	RT	Luft	80,00	160	531.953	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-51	0	RT	Luft	100,00	140	40.105.756	Durchläufer
FWHR11	FWH-A-K-54	0	RT	Luft	100,00	150	263.861	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-68	0	RT	Luft	100,00	150	3.397.509	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-63	0	RT	Luft	60,00	200	100.326	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-67	0	RT	Luft	100,00	145	695.696	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-58	0	RT	Luft	60,00	200	55.949	Bruch
FWHR11	FWH-A-K-69	0	RT	Luft	100,00	145	9.460.476	Bruch

**Tabelle T 59 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR12 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,04, unglänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR12	FWH-A-K-21	-1	RT	Luft	70,00	300	121.501	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-22	-1	RT	Luft	80,00	260	40.493	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-23	-1	RT	Luft	100,00	220	303.625	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-24	-1	RT	Luft	70,00	300	143.772	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-25	-1	RT	Luft	80,00	260	160.747	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-26	-1	RT	Luft	100,00	190	1.405.295	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-65	-1	RT	Luft	110,00	180	10.000.000	Durchläufer
FWHR12	FWH-A-K-65'	-1	RT	Luft	70,00	260	138.002	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR12	FWH-A-K-66	-1	RT	Luft	90,00	200	10.000.000	Durchläufer
FWHR12	FWH-A-K-66'	-1	RT	Luft	70,00	260	323.248	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR12	FWH-A-K-64	-1	RT	Luft	80,00	220	931.520	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-62	-1	RT	Luft	100,00	200	374.888	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-55	-1	RT	Luft	100,00	200	533.106	Bruch
FWHR12	FWH-A-K-28	-1	RT	Luft	110,00	190	221.429	Bruch

Tabelle T 60 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR13 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-1, R₀ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur unreguliert T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR13	FWH-I-G-07	-1	RT	Luft	183,90	200	-	185	191	83.573	Bruch; im Übergangsradius
FWHR13	FWH-I-G-33	-1	RT	Luft	185,10	180	8	169	188	193.994	Bruch
FWHR13	FWH-I-G-51	-1	RT	Luft	183,00	160	-	207	136	1.059.083	Bruch; im Übergangsradius
FWHR13	FWH-I-G-57	-1	RT	Luft	185,40	150	4	172	154	527.589	Bruch
FWHR13	FWH-I-G-58	-1	RT	Luft	183,30	140	-	231	107	1.493.423	Bruch; im Übergangsradius
FWHR13	FWH-I-G-62	-1	RT	Luft	185,20	130	7	170	135	918.894	Bruch

Tabelle T 61 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR14 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-2, R₀ = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R ₀	Umgebungstemperatur unreguliert T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR14	FWH-I-G-38	-1	RT	Luft	179,30	160	-	181	155	70.831	Bruch; im Übergangsradius
FWHR14	FWH-I-G-39	-1	RT	Luft	174,50	140	-	179	138	87.836	Bruch; im Übergangsradius
FWHR14	FWH-I-G-50	-1	RT	Luft	182,80	120	18	159	134	131.973	Bruch
FWHR14	FWH-I-G-55	-1	RT	Luft	181,20	100	11	165	107	2.893.960	Bruch
FWHR14	FWH-I-G-84	-1	RT	Luft	185,10	90	8	169	94	10.000.000	Durchläufer
FWHR14	FWH-I-G-84'	-1	RT	Luft	184,50	140	8	169	146	730.888	hochgesetzter Durchläufer, Bruch;

Tabelle T 62 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR15 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-3, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR15	FWH-I-G-56	-1	RT	Luft	181,99	160	6	171	165	191.992	Bruch
FWHR15	FWH-I-G-60	-1	RT	Luft	179,22	180	-	178	178	4.524	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-06	-1	RT	Luft	180,99	160	-	182	155	135.702	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-69	-1	RT	Luft	181,53	130	-	235	98	580.695	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-61	-1	RT	Luft	182,08	130	-	211	108	64.908	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-75	-1	RT	Luft	182,72	110	-	177	109	641.606	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-01	-1	RT	Luft	183,59	90	9	167	95	10.000.000	Durchläufer
FWHR15	FWH-I-G-01'	-1	RT	Luft	183,54	110	9	167	116	3.536.060	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR15	FWH-I-G-05	-1	RT	Luft	180,30	100	21	155	114	39.911	Bruch
FWHR15	FWH-I-G-08	-1	RT	Luft	181,30	130	-	186	123	332.677	Bruch; im Übergangsradius
FWHR15	FWH-I-G-77	-1	RT	Luft	177,80	100	-	178	99	210.245	Bruch; im Übergangsradius

Tabelle T 63 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR16 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-4, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude σ _{a,tat} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR16	FWH-I-G-02	-1	RT	Luft	178,00	160	23	154	184	5.565	Bruch
FWHR16	FWH-I-G-03	-1	RT	Luft	178,46	125	-	177	125	46.138	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-34	-1	RT	Luft	174,51	115	-	177	115	32.085	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-36	-1	RT	Luft	176,42	100	-	180	98	12.836	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-37	-1	RT	Luft	179,51	70	-	178	69	407.815	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-52	-1	RT	Luft	177,22	60	26	151	70	1.865.456	Bruch
FWHR16	FWH-I-G-78	-1	RT	Luft	179,19	80	-	177	80	3.815.969	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-71	-1	RT	Luft	177,11	100	57	120	148	60.851	Bruch
FWHR16	FWH-I-G-54	-1	RT	Luft	178,20	60	-	205	52	3.187.396	Bruch; im Übergangsradius
FWHR16	FWH-I-G-80	-1	RT	Luft	176,20	70	27	150	82	1.589.301	Bruch
FWHR16	FWH-I-G-82	-1	RT	Luft	182,00	60	17	159	67	10.000.000	Durchläufer
FWHR16	FWH-I-G-82'	-1	RT	Luft	181,00	90	17	159	100	3.270.801	hochgesetzter Durchläufer, Bruch

Tabelle T 64 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR17 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 15 mm, Lunkerklasse Cc-5, R_e = -1

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Lunkerfläche A _{Lunker} [mm ²]	Tatsächlicher Bruchquerschnitt A _{Bruch} [mm ²]	Tatsächliche Spannungsamplitude $\sigma_{a,tat}$ [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR17	FWH-I-G-65	-1	RT	Luft	176,56	80	-	179	79	988.675	Bruch; im Übergangsradius
FWHR17	FWH-I-G-67	-1	RT	Luft	182,19	100	-	185	95	764.350	Bruch; im Übergangsradius
FWHR17	FWH-I-G-04	-1	RT	Luft	171,49	120	11	166	128	212.742	Bruch
FWHR17	FWH-I-G-74	-1	RT	Luft	177,47	80	26	151	94	3.229.792	Bruch
FWHR17	FWH-I-G-63	-1	RT	Luft	174,44	60	32	145	73	340.467	Bruch
FWHR17	FWH-I-G-53	-1	RT	Luft	175,10	100	22	154	115	383.323	Bruch
FWHR17	FWH-I-G-73	-1	RT	Luft	159,50	120	-	182	116	29.798	Bruch; im Übergangsradius
FWHR17	FWH-I-G-76	-1	RT	Luft	169,40	50	28	149	60	10.000.000	Durchläufer
FWHR17	FWH-I-G-76'	-1	RT	Luft	168,90	80	28	149	95	689.458	Hochgesetzter Durchläufer, Bruch

**Tabelle T 65 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR18 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,19, unglänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR18	FWH-A-K-38	0	RT	Luft	50,00	200	122.169	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-49	0	RT	Luft	50,00	200	97.736	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-60	0	RT	Luft	100,00	150	463.402	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-35	0	RT	Luft	100,00	150	623.660	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-37	0	RT	Luft	100,00	140	817.482	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-39	0	RT	Luft	70,00	180	94.766	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-17	0	RT	Luft	120,00	130	919.018	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-16	0	RT	Luft	120,00	120	978.968	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-19	0	RT	Luft	120,00	110	10.000.000	Durchläufer
FWHR18	FWH-A-K-19'	0	RT	Luft	50,00	200	83.653	höchgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR18	FWH-A-K-34	0	RT	Luft	100,00	120	2.244.415	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-33	0	RT	Luft	120,00	110	10.000.000	Durchläufer
FWHR18	FWH-A-K-33'	0	RT	Luft	50,00	180	86.477	höchgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR18	FWH-A-K-41	0	RT	Luft	70,00	160	318.675	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-30	0	RT	Luft	70,00	160	426.093	Bruch
FWHR18	FWH-A-K-57	0	RT	Luft	120,00	120	10.000.000	Durchläufer
FWHR18	FWH-A-K-57'	0	RT	Luft	50,00	180	132.557	höchgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR18	FWH-A-K-48	0	RT	Luft	120,00	130	1.549.881	Bruch

**Tabelle T 66 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR19 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 1,19, unglänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR19	FWH-A-K-41	-1	RT	Luft	50,00	300	57.002	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-42	-1	RT	Luft	50,00	300	70.525	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-52	-1	RT	Luft	80,00	200	827.349	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-56	-1	RT	Luft	50,00	300	45.943	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-44	-1	RT	Luft	60,00	260	180.094	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-43	-1	RT	Luft	80,00	190	965.373	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-53	-1	RT	Luft	50,00	260	90.200	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-45	-1	RT	Luft	80,00	180	1.818.316	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-61	-1	RT	Luft	60,00	260	166.815	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-46	-1	RT	Luft	110,00	170	10.000.000	Durchläufer
FWHR19	FWH-A-K-46'	-1	RT	Luft	60,00	260	102.244	höchgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR19	FWH-A-K-31	-1	RT	Luft	110,00	180	10.000.000	Durchläufer
FWHR19	FWH-A-K-31'	-1	RT	Luft	50,00	300	73.107	höchgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR19	FWH-A-K-47	-1	RT	Luft	80,00	190	1.512.717	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-36	-1	RT	Luft	80,00	200	1.475.403	Bruch
FWHR19	FWH-A-K-32	-1	RT	Luft	80,00	190	1.059.460	Bruch

**Tabelle T 67 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR20 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 4, 14, ungänzenfrei, R_e = -1**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR20	FWH-A-K-70	-1	RT	Luft	50,00	320	3.774	Bruch; nicht in Auswertung einbezogen
FWHR20	FWH-A-K-71	-1	RT	Luft	80,00	180	58.509	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-72	-1	RT	Luft	90,00	150	118.144	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-73	-1	RT	Luft	100,00	130	159.108	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-74	-1	RT	Luft	140,00	100	502.675	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-75	-1	RT	Luft	140,00	85	638.352	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-76	-1	RT	Luft	140,00	70	1.918.198	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-78	-1	RT	Luft	100,00	150	162.251	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-80	-1	RT	Luft	140,00	65	1.628.578	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-81	-1	RT	Luft	140,00	60	1.887.251	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-83	-1	RT	Luft	140,00	60	1.597.279	Bruch
FWHR20	FWH-A-K-90	-1	RT	Luft	140,00	60	10.000.000	Durchläufer
FWHR20	FWH-A-K-92	-1	RT	Luft	140,00	65	10.000.000	Durchläufer

**Tabelle T 68 Einzelergebnisse der Spannungswöhlerlinie FWHR20 (EN-GJS-700-2),
Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 4, 14, ungänzenfrei, R_e = 0**

Versuchsreihe Nr.	Schwingproben Nr.	Spannungsverhältnis R _e	Umgebungstemperatur unregelt T _{Um} [° C]	Umgebungsmedium	Versuchsfrequenz f [Hz]	Nennspannungsamplitude σ _{a,n} [MPa]	Bruchschwingspielzahl N _B	Bemerkung, Versagensort
FWHR21	FWH-A-K-84	0	RT	Luft	151,36	120	96.787	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-85	0	RT	Luft	150,96	120	67.507	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-88	0	RT	Luft	153,27	100	255.434	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-86	0	RT	Luft	152,78	100	326.304	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-79	0	RT	Luft	153,50	60	10.000.000	Durchläufer
FWHR21	FWH-A-K-79'	0	RT	Luft	153,18	120	118.693	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR21	FWH-A-K-89	0	RT	Luft	154,03	65	1.744.043	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-82	0	RT	Luft	153,85	60	10.000.000	Durchläufer
FWHR21	FWH-A-K-82'	0	RT	Luft	153,66	100	225.445	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR21	FWH-A-K-87	0	RT	Luft	153,60	70	1.723.071	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-77	0	RT	Luft	153,79	65	10.000.000	Durchläufer
FWHR21	FWH-A-K-77'	0	RT	Luft	153,71	100	313.356	hochgesetzter Durchläufer, Bruch
FWHR21	FWH-A-K-91	0	RT	Luft	150,00	60	8.035.272	Bruch
FWHR21	FWH-A-K-93	0	RT	Luft	150,00	65	2.342.599	Bruch

Tabelle T 69 Einzelergebnisse für Mittelspannungskorrektur (EN-GJS-400-18U-LT)

Schwingprobe	Aus Versuchsreihe	Spannungsverhältnis R_e ohne Mittelspannungskorrektur	Spannungsverhältnis R_e mit Mittelspannungskorrektur	Nennspannungsamplitude ohne Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Nennspannungsamplitude mit Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]
MW-I-G-20_0,15%	MWR01	-1,12	-1	245,4	238,2
MW-I-G-12_0,10%	MWR01	-1,19	-1	168,4	160,8
MW-I-G-01_0,09%	MWR01	-1,11	-1	150,6	146,5
MW-I-G-25_0,09%	MWR01	-1,11	-1	154,4	150,2
MW-I-G-17_0,08%	MWR01	-1,11	-1	135,3	131,7
MW-I-G-06_0,08%	MWR01	-1,30	-1	137,1	127,8
MW-A-G-04_0,15%	MWR02	-1,11	-1	245,8	239,1
MW-A-G-24_0,15%	MWR02	-1,10	-1	244,0	238,0
MW-A-G-20_0,10%	MWR02	-1,16	-1	166,3	159,9
MW-A-G-31_0,10%	MWR02	-1,20	-1	170,1	162,0
MW-A-G-09_0,09%	MWR02	-1,16	-1	151,5	145,7
MW-A-G-17_0,09%	MWR02	-1,19	-1	152,2	145,3
MW-A-G-33_0,09%	MWR02	-1,18	-1	150,3	143,8
MW-A-G-08_0,08%	MWR02	-1,37	-1	135,3	124,3
MW-I-K-15_0,15%	MWR05	-1,03	-1	242,9	240,8
MW-I-K-16_0,12%	MWR05	-1,11	-1	199,5	193,4
MW-I-K-12_0,12%	MWR05	-1,11	-1	198,0	191,9
MW-I-K-03_0,10%	MWR05	-1,21	-1	166,2	156,8
MW-I-K-18_0,10%	MWR05	-1,29	-1	166,9	154,4
MW-I-K-01_0,09%	MWR05	-1,23	-1	152,3	143,0
MW-I-K-05_0,08%	MWR05	-1,25	-1	135,7	126,8
MW-A-K-16_0,15%	MWR06	-1,09	-1	240,0	233,9
MW-A-K-30_0,15%	MWR06	-1,06	-1	243,9	239,7
MW-A-K-23_0,12%	MWR06	-1,08	-1	197,7	193,2
MW-A-K-42_0,12%	MWR06	-1,07	-1	193,6	189,7
MW-A-K-04_0,11%	MWR06	-1,08	-1	179,7	175,6
MW-A-K-10_0,10%	MWR06	-1,08	-1	164,6	160,8
MW-A-K-20_0,10%	MWR06	-1,23	-1	154,4	145,0

Tabelle T 70 Einzelergebnisse für Mittelspannungskorrektur (EN-GJS-450-18)

Schwingprobe	Aus Versuchsreihe	Spannungsverhältnis R_e ohne Mittelspannungskorrektur	Spannungsverhältnis R_e mit Mittelspannungskorrektur	Nennspannungsamplitude ohne Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Nennspannungsamplitude mit Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]
S5-I-G-10_0,15%	SR01	-1,09	-1	242,5	237,9
S5-I-G-06_0,12%	SR01	-1,06	-1	196,8	194,2
S5-I-G-14_0,12%	SR01	-1,05	-1	199,0	196,9
S6-I-G-08_0,11%	SR01	-0,86	-1	183,8	189,9
S5-I-G-01_0,10%	SR01	-1,18	-1	168,0	161,9
S6-A-G-16_0,17%	SR02	-1,05	-1	278,1	275,1
S5-A-G-14_0,15%	SR02	-1,08	-1	252,5	248,2
S5-A-G-22_0,15%	SR02	-1,08	-1	250,5	246,3
S6-A-G-15_0,12%	SR02	-1,00	-1	200,8	200,8
S5-A-G-01_0,12%	SR02	-1,09	-1	203,6	199,7
S6-A-G-03_0,11%	SR02	-1,15	-1	185,6	179,9
S5-I-K-04_0,17%	SR05	-1,08	-1	272,2	268,2
S6-I-K-14_0,15%	SR05	-1,06	-1	240,3	237,6
S5-I-K-09_0,11%	SR05	-1,11	-1	174,9	171,4
S6-I-K-15_0,10%	SR05	-1,00	-1	165,7	165,7
S6-I-K-10_0,09%	SR05	-0,99	-1	144,8	145,1
S6-A-K-10_0,17%	SR06	-1,06	-1	276,9	273,8
S5-A-K-09_0,15%	SR06	-1,02	-1	240,9	240,0
S5-A-K-12_0,13%	SR06	-1,12	-1	217,7	212,9
S5-A-K-03_0,12%	SR06	-0,98	-1	204,2	205,0
S5-A-K-19_0,11%	SR06	-1,01	-1	181,2	180,9
S6-A-K-05_0,11%	SR06	-1,07	-1	177,2	174,9

Tabelle T 71 Einzelergebnisse für Mittelspannungskorrektur (EN-GJS-700-2)

Schwingprobe	Aus Versuchsreihe	Spannungsverhältnis R_e ohne Mittelspannungskorrektur	Spannungsverhältnis R_e mit Mittelspannungskorrektur	Nennspannungsamplitude ohne Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]	Nennspannungsamplitude mit Mittelspannungskorrektur $\sigma_{a,n}$ [MPa]
FWH-I-G-20_0,20%	FWHR01	-1,77	-1	328,0	280,6
FWH-I-G-29_0,15%	FWHR01	-1,06	-1	251,7	247,8
FWH-I-G-25_0,15%	FWHR01	-1,00	-1	244,8	244,8
FWH-I-G-30_0,11%	FWHR01	-1,10	-1	182,7	178,2
FWH-I-G-47_0,10%	FWHR01	-1,04	-1	167,6	165,9
FWH-I-G-44_0,09%	FWHR01	-0,97	-1	151,1	152,3
FWH-I-G-48_0,08%	FWHR01	-1,04	-1	135,3	133,9
FWH-A-G-05_0,20%	FWHR02	-1,20	-1	331,1	315,4
FWH-A-G-06_0,20%	FWHR02	-1,06	-1	329,3	324,3
FWH-A-G-07_0,15%	FWHR02	-1,03	-1	249,2	247,3
FWH-A-G-38_0,15%	FWHR02	-1,35	-1	250,2	230,8
FWH-A-G-09_0,12%	FWHR02	-1,03	-1	198,2	196,7
FWH-A-G-41_0,11%	FWHR02	-0,32	-1	182,3	231,1
FWH-A-G-01_0,10%	FWHR02	-1,03	-1	166,8	165,5
FWH-I-K-27_0,17%	FWHR05	-1,02	-1	281,4	280,1
FWH-I-K-18_0,15%	FWHR05	-1,00	-1	248,0	248,0
FWH-I-K-14_0,12%	FWHR05	-1,00	-1	197,2	197,2
FWH-I-K-30_0,11%	FWHR05	-1,03	-1	182,8	181,5
FWH-I-K-22_0,10%	FWHR05	-1,01	-1	167,1	166,7
FWH-A-K-14_0,20%	FWHR06	-1,09	-1	323,3	316,6
FWH-A-K-02_0,17%	FWHR06	-1,00	-1	278,8	278,8
FWH-A-K-07_0,17%	FWHR06	-1,01	-1	280,3	279,6
FWH-A-K-13_0,15%	FWHR06	-1,02	-1	243,4	242,2
FWH-A-K-06_0,12%	FWHR06	-1,06	-1	196,1	193,3
FWH-A-K-04_0,12%	FWHR06	-1,09	-1	195,9	191,8
FWH-A-K-11_0,12%	FWHR06	-1,02	-1	190,3	189,4
FWH-A-K-03_0,11%	FWHR06	-1,01	-1	180,6	180,1

Tabelle T 72 Stützziffern und Kerbwirkungszahlen der untersuchten Gusseisenwerkstoffe

Werkstoff	Spannungs- verhältnis [-]	Nennspannungsamplitude am Abknickpunkt für $P_U = 50\%$ ungekerbt, $d = 6\text{ mm}$ und $K_t = 1,05$ [MPa]	Nennspannungsamplitude am Abknickpunkt für $P_U = 50\%$ ungekerbt, $d = 6\text{ mm}$ und $K_t = 4,14$ [MPa]	Kerbwirkungs- zahl [-]	Stützziffer [-]
	R	$\sigma_{a,n,k,50\%}$	$\sigma_{a,n,k,50\%}$	K_f	n_x
EN-GJS-400-18U-LT	-1	158	75	2,11	1,97
	0	102	67	1,52	2,72
EN-GJS-450-18	-1	173	67	2,58	1,60
	0	125	66	1,89	2,19
EN-GJS-700-2	-1	201	71	2,83	1,46
	0	140	69	2,03	2,04

Tabelle T 73 Einzelergebnisse des fiktiven Elastizitätsmoduls nach Messposition sowie die Neueinteilung der Lunkerlassen und die ermittelte Dichte je Schwingprobe für den EN-GJS-400-18U-LT

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_f je Messposition [GPa]				Mittelwert aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
MW-I-G-03	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	170,7	167,8	167,3	168,1
MW-I-G-04	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,5	171,6	168,5	167,4	168,3
MW-I-G-05	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,8	167,8	177,4	167,1	169,3
MW-I-G-09	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	160,5	169,5	167,3	171,2	167,1
MW-I-G-11	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,9	172,0	166,3	167,6	167,7
MW-I-G-15	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,1	171,0	168,0	167,2	168,6
MW-I-G-18	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,9	169,4	168,3	165,0	166,6
MW-I-G-23	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,0	169,6	168,2	167,1	167,7
MW-I-G-24	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,5	172,9	169,6	168,0	169,5
MW-I-G-26	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,4	173,3	166,2	162,3	166,5
MW-I-G-27	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,6	171,3	169,4	168,8	168,8
AW-O2-G-02	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,0	166,7	166,3	162,7	165,7
AW-O3-G-02	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,2	169,4	164,3	166,4	166,3
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								166,7
MW-A-G-03	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,3	172,4	169,4	166,7	169,0
MW-A-G-07	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	152,9	167,7	170,3	167,3	164,5
MW-A-G-12	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	171,4	167,8	165,9	167,9
MW-A-G-13	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,6	171,4	169,0	166,9	168,7
MW-A-G-14	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	169,4	171,4	177,3	175,8	173,5
MW-A-G-15	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,2	172,8	169,1	169,5	169,7
MW-A-G-16	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,6	172,1	169,9	168,4	169,2
MW-A-G-18	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,2	171,0	169,1	168,4	168,7
MW-A-G-19	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,6	171,0	168,4	172,5	170,1
MW-A-G-20	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	161,6	168,0	168,0	170,5	167,0
MW-A-G-27	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,5	172,1	168,7	166,1	168,1
MW-A-G-30	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,1	170,2	171,1	166,6	168,8
MW-A-G-32	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	172,7	169,8	169,1	169,2	170,2
MW-A-G-34	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,4	169,8	169,7	168,3	169,1
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								168,9
MW-A-K-35	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,0	157,4	164,9	165,7	163,5
MW-A-K-36	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,3	160,1	161,7	158,5	162,1
MW-A-K-37	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,4	161,1	166,9	170,1	166,6
MW-A-K-38	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,8	161,6	168,5	164,9	165,4
MW-A-K-39	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	175,4	169,7	162,7	165,1	168,2
MW-A-K-40	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,8	162,7	167,8	160,7	164,5
MW-A-K-41	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	158,3	162,0	165,6	162,6	162,1
MW-A-K-43	7,10	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,5	160,2	168,1	163,4	163,8
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								164,5

Fortsetzung Tabelle T 73

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_r je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_r aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
MS7-4	7,12	H-1	Cc-1	166,9	165,8	167,1	168,4	167,0
MS8-3	nicht ermittelt	H-1	Cc-1	166,2	166,2	165,2	157,6	163,8
MS9-1	7,10	H-1	Cc-1	166,6	166,7	168,2	169,1	167,6
AV-01-G-16	7,08	H-1	Cc-1	164,0	169,8	166,6	163,7	166,0
AV-01-G-17	nicht ermittelt	H-1	Cc-1	165,0	169,5	165,1	163,3	165,7
AV-01-G-19	7,07	H-1	Cc-1	166,1	168,5	163,5	165,0	165,8
AV-01-G-21	7,07	H-1	Cc-1	166,1	167,9	164,7	163,2	165,5
AV-03-G-03	7,05	H-1	Cc-1	165,7	168,1	165,9	164,3	166,0
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								165,9
MS6-4	7,14	H-2	Cc-1	162,4	169,3	163,9	166,7	165,6
AV-02-G-03	nicht ermittelt	H-2	Cc-1	159,3	161,9	164,4	161,4	161,7
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								166,0
MS7-6	6,92	H-3	Cc-3	134,6	141,7	151,6	156,0	146,0
MS9-2	7,09	H-3	Cc-2	158,0	158,5	174,2	198,7	172,4
AV-03-G-01	6,98	H-3	Cc-3	159,3	161,9	164,4	161,4	161,7
AV-03-G-04	7,05	H-3	Cc-3	160,7	164,2	165,3	163,9	163,5
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								160,9
MS7-7	6,79	H-4	Cc-3	137,6	129,1	135,4	158,6	140,2
MS8-1	nicht ermittelt	H-4	Cc-3	140,9	140,1	126,0	134,6	135,4
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								137,9
MS7-1	nicht ermittelt	H-5	Cc-5	98,3	116,0	79,6	91,7	96,4
MS7-2	5,76	H-5	Cc-5	60,5	61,1	65,2	86,9	68,5
MS7-3	6,93	H-5	Cc-3	169,3	139,7	143,0	158,3	152,5
MS7-5	nicht ermittelt	H-5	Cc-5	46,5	66,0	61,0	45,7	54,8
MS8-4	nicht ermittelt	H-5	Cc-4	73,9	117,2	121,2	79,4	97,9
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								94,0

Tabelle T 74 Einzelergebnisse des fiktiven Elastizitätsmoduls nach Messposition sowie die Neueinteilung der Lunkerlassen und die ermittelte Dichte je Schwingprobe für den EN-GJS-450-18

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_f je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_f aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
S5-I-G-03	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,5	166,1	163,5	165,4	164,6
S5-I-G-04	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,7	165,2	165,4	163,7	165,0
S5-I-G-05	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,8	165,3	162,0	165,5	164,1
S5-I-G-08	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	162,9	166,7	164,3	163,9	164,5
S5-I-G-09	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,4	168,1	164,5	165,5	165,6
S5-I-G-11	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,9	171,1	164,3	163,4	165,9
S5-I-G-13	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,5	168,2	166,3	166,2	166,3
S5-I-G-15	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,9	168,5	164,7	164,1	165,8
S5-I-G-26	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,9	168,5	165,7	165,1	166,0
S5-I-G-29	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,6	170,4	165,2	165,9	166,8
S5-I-G-43	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,4	170,2	166,3	163,1	166,2
S5-I-G-44	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	162,9	170,8	166,2	162,8	165,7
S6-I-G-01	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,5	168,2	167,0	165,5	166,1
S6-I-G-02	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,5	166,8	165,8	166,8	166,7
S6-I-G-03	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,8	167,0	166,4	165,3	166,1
S6-I-G-05	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,5	169,9	165,8	163,4	166,9
S6-I-G-06	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,1	171,0	163,1	164,1	166,6
S6-I-G-15	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,2	169,0	166,9	168,6	167,9
S6-I-G-18	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	162,9	168,5	165,7	164,8	165,5
S6-I-G-19	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,9	168,9	167,0	164,5	166,6
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								165,9
S5-A-G-03	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,9	170,8	168,8	169,8	169,3
S5-A-G-04	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,6	170,9	168,1	169,1	169,2
S5-A-G-05	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,8	172,2	167,1	165,4	167,9
S5-A-G-07	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,7	172,8	166,3	165,8	168,2
S5-A-G-08	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,2	170,2	167,8	166,3	168,1
S5-A-G-11	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,8	171,5	169,4	167,2	169,2
S5-A-G-12	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,0	172,4	169,4	168,0	168,2
S5-A-G-13	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	169,7	177,0	169,0	168,4	171,0
S5-A-G-15	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,5	173,1	171,1	168,4	169,3
S5-A-G-16	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,6	171,4	167,9	166,7	168,1
S5-A-G-17	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	170,0	170,1	166,4	166,6	168,3
S5-A-G-18	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,7	172,4	168,1	167,8	168,7
S5-A-G-20	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	170,4	169,6	167,8	168,6
S5-A-G-21	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,8	172,2	168,9	169,3	169,8
S5-A-G-23	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	161,8	169,6	168,1	167,1	166,7
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								168,7

Fortsetzung Tabelle T 74

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_f je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_f aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
S5-I-K-07	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	160,3	166,1	169,9	165,7
S5-I-K-11	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	161,3	169,0	162,9	164,6
S6-I-K-05	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,0	161,6	163,7	162,7	163,8
S6-I-K-07	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	159,9	165,9	161,5	163,1
S6-I-K-09	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,1	158,3	167,8	162,4	163,2
S6-I-K-16	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,9	157,1	165,7	162,8	162,9
S6-I-K-22	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	161,1	157,0	163,4	156,0	159,4
S6-I-K-24	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,3	160,6	164,7	161,7	162,8
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								163,2
S5-A-K-20	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	169,3	160,4	167,2	164,3	165,3
S5-A-K-21	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,7	157,6	168,3	163,7	163,3
S5-A-K-24	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,7	159,6	163,5	163,7	163,4
S5-A-K-26	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,5	161,5	166,5	162,1	163,7
S5-A-K-29	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,4	160,2	162,5	162,6	162,4
S5-A-K-30	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	162,0	161,2	163,6	163,7	162,6
S5-A-K-32	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,6	160,8	165,6	159,9	162,7
S6-A-K-01	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,8	162,4	167,1	159,7	163,2
S6-A-K-02	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	162,8	165,7	162,9	164,1
S6-A-K-06	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,9	163,9	167,5	163,1	165,6
S6-A-K-08	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,1	157,5	166,7	159,9	162,0
S6-A-K-12	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,0	159,7	166,4	162,3	162,9
S6-A-K-14	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,0	161,3	165,6	159,2	163,0
S6-A-K-15	7,07	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	157,7	168,0	161,7	163,1
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								163,4
S5-I-G-18	7,05	H-1	Cc-1	165,0	167,8	168,6	163,3	166,2
S5-I-G-24	7,04	H-1	Cc-1	163,0	164,7	164,6	167,8	165,0
S5-I-G-27	7,08	H-1	Cc-1	159,8	169,5	165,5	162,6	164,3
S5-I-G-35	7,07	H-1	Cc-1	166,1	171,5	168,3	163,1	167,3
S5-I-G-37	7,07	H-1	Cc-1	168,1	170,9	163,8	161,7	166,1
S5-I-G-40	7,02	H-1	Cc-1	164,9	167,2	165,8	165,2	165,8
S6-I-G-10	7,05	H-1	Cc-1	134,8	137,7	138,6	133,2	136,0
S6-I-G-12	7,05	H-1	Cc-2	164,2	167,1	163,7	164,1	164,8
S6-I-G-28	7,08	H-1	Cc-1	163,2	169,1	166,2	161,8	165,1
S6-I-G-30	nicht ermittelt	H-1	Cc-1	167,0	169,5	166,7	162,2	166,4
S6-I-G-32	nicht ermittelt	H-1	Cc-1	164,9	167,8	165,0	165,6	165,8
S6-I-G-45	nicht ermittelt	H-1	Cc-1	166,9	169,2	163,0	165,3	166,1
S6-I-G-46	7,06	H-1	Cc-1	162,5	169,0	167,2	164,6	165,8
S6-I-G-53	7,08	H-1	Cc-1	166,3	167,2	168,9	164,8	166,8
S6-I-G-54	7,02	H-1	Cc-1	165,7	166,8	164,2	161,3	164,5
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								163,7

Fortsetzung Tabelle T 74

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_f je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_f aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
S5-I-G-23	nicht ermittelt	H-2	Cc-2	163,4	172,1	171,7	155,4	165,7
S5-I-G-28	nicht ermittelt	H-2	Cc-2	160,8	165,7	163,3	150,5	160,1
S5-I-G-33	nicht ermittelt	H-2	Cc-1	159,4	166,9	163,9	161,5	162,9
S6-I-G-07	6,97	H-2	Cc-2	158,9	168,2	160,1	152,4	159,9
S6-I-G-14	7,00	H-2	Cc-1	153,1	167,1	170,3	157,5	162,0
S6-I-G-26	6,95	H-2	Cc-2	148,2	159,7	163,2	157,2	157,1
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								161,3
S5-I-G-32	6,90	H-3	Cc-2	152,3	166,7	155,9	151,3	156,5
S5-I-G-34	7,04	H-3	Cc-3	167,6	160,3	159,2	170,0	164,3
S6-I-G-21	nicht ermittelt	H-3	Cc-3	164,5	177,9	160,8	152,5	163,9
S6-I-G-24	6,83	H-3	Cc-3	145,4	154,7	147,9	145,0	148,2
S6-I-G-47	nicht ermittelt	H-3	Cc-3	160,3	163,3	168,7	168,2	165,1
S6-I-G-48	nicht ermittelt	H-3	Cc-2	163,0	170,6	164,2	162,1	165,0
S6-I-G-49	6,95	H-3	Cc-2	153,2	160,5	159,6	150,8	156,0
S6-I-G-50	6,92	H-3	Cc-2	151,7	161,5	159,6	142,9	153,9
S6-I-G-52	nicht ermittelt	H-3	Cc-4	152,5	155,0	151,4	154,7	153,4
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								158,5
S5-I-G-20	6,92	H-4	Cc-4	158,7	158,5	160,1	156,9	158,5
S5-I-G-22	6,83	H-4	Cc-4	159,1	152,5	154,1	150,2	154,0
S5-I-G-36	6,81	H-4	Cc-4	160,5	152,4	138,4	148,4	149,9
S5-I-G-38	6,74	H-4	Cc-4	139,0	145,5	155,1	149,4	147,3
S6-I-G-22	nicht ermittelt	H-4	Cc-4	142,7	142,0	149,4	149,7	145,9
S6-I-G-23	nicht ermittelt	H-4	Cc-4	164,7	163,0	147,3	146,3	155,3
S6-I-G-25	nicht ermittelt	H-4	Cc-4	139,6	167,2	152,3	135,9	148,7
S6-I-G-27	6,90	H-4	Cc-2	143,6	159,4	165,7	147,2	154,0
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								151,7
S5-I-G-17	nicht ermittelt	H-5	Cc-4	130,8	143,9	154,3	129,3	139,6
S5-I-G-19	6,33	H-5	Cc-5	109,4	134,0	114,2	121,9	119,9
S5-I-G-21	nicht ermittelt	H-5	Cc-5	139,5	143,4	139,6	140,3	140,7
S5-I-G-31	6,66	H-5	Cc-5	118,6	133,6	139,8	123,5	128,9
S6-I-G-09	6,57	H-5	Cc-5	142,7	137,0	129,9	133,7	135,8
S6-I-G-11	nicht ermittelt	H-5	Cc-5	137,6	135,6	149,0	137,0	139,8
S6-I-G-13	6,77	H-5	Cc-5	138,3	150,6	154,6	140,4	146,0
S6-I-G-51	6,58	H-5	Cc-5	124,6	155,7	148,0	125,3	138,4
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								136,1

Tabelle T 75 Einzelergebnisse des fiktiven Elastizitätsmoduls nach Messposition sowie die Neueinteilung der Lunckerklassen und die ermittelte Dichte je Schwingprobe für den EN-GJS-700-2

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunckerklasse neu	Lunckerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_r je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_r aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
FWH-I-G-11	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	167,8	168,4	171,5	168,5
FWH-I-G-13	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,8	169,5	166,0	168,4	167,9
FWH-I-G-16	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,3	165,8	167,0	166,8	167,7
FWH-I-G-19	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,0	165,9	167,2	167,7	166,2
FWH-I-G-21	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,9	165,6	167,0	169,4	167,7
FWH-I-G-23	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,6	171,2	163,8	167,8	166,9
FWH-I-G-26	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	171,7	163,0	164,2	166,2	166,3
FWH-I-G-27	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,2	167,8	173,8	161,3	167,0
FWH-I-G-32	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,2	158,1	159,0	158,3	160,2
FWH-I-G-43	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	174,0	165,6	169,2	169,3	169,5
FWH-I-G-45	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	158,7	162,2	161,4	179,7	165,5
FWH-I-G-46	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	148,5	159,6	165,5	157,5	157,8
FWH-I-G-49	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	159,7	164,1	162,6	164,9	162,8
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								165,7
FWH-A-G-13	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,6	171,1	168,5	168,9	168,3
FWH-A-G-14	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	171,0	168,8	172,9	169,8
FWH-A-G-16	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,4	160,3	166,3	162,8	163,2
FWH-A-G-17	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	160,7	160,7	160,8		160,7
FWH-A-G-18	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	157,3	160,3	166,4	157,2	160,3
FWH-A-G-19	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	159,9	168,3	163,8	171,3	165,8
FWH-A-G-20	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	152,0	160,9	156,2	160,3	157,4
FWH-A-G-21	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,5	158,6	163,8	162,4	162,6
FWH-A-G-22	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	160,6	157,3	165,1	161,9	161,2
FWH-A-G-23	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	163,1	162,6	157,0	158,2	160,2
FWH-A-G-24	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	158,8	156,9	163,0	159,2	159,5
FWH-A-G-25	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	157,9	162,0	164,7	167,5	163,0
FWH-A-G-26	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	153,9	160,1	171,7	158,6	161,1
FWH-A-G-27	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	169,9	167,3	162,9	164,3	166,1
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								163,0

Fortsetzung Tabelle T 75

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_r je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_r aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
FWH-I-K-2	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,1	160,2	167,2	166,5	165,0
FWH-I-K-5	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,5	160,6	165,5	165,4	164,0
FWH-I-K-7	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,7	164,2	165,0	163,5	165,4
FWH-I-K-8	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,0	163,0	168,0	161,9	164,7
FWH-I-K-11	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	162,9	166,3	166,5	162,8	164,6
FWH-I-K-12	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,4	163,9	167,4	164,2	165,5
FWH-I-K-13	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	162,2	170,6	165,0	165,7
FWH-I-K-15	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,4	163,2	170,7	166,0	166,6
FWH-I-K-17	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,8	163,0	169,3	165,5	166,4
FWH-I-K-21	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	167,7	164,7	167,6	165,9	166,5
FWH-I-K-23	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	168,6	161,8	166,3	165,5	165,5
FWH-I-K-24	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,5	162,4	169,4	162,4	164,7
FWH-I-K-25	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	165,0	163,1	164,8	167,1	165,0
FWH-I-K-28	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,8	165,4	165,2	161,6	164,7
FWH-I-K-29	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	166,5	160,8	169,7	162,8	164,9
FWH-I-K-31	7,16	ungänzenfrei	ungänzenfrei	164,1	162,9	165,2	166,3	164,6
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								165,2
FWH-I-G-7	7,14	H-1	Cc-1	167,0	176,7	167,8	168,6	170,0
FWH-I-G-33	7,20	H-1	Cc-1	169,9	176,0	174,6	173,3	173,5
FWH-I-G-51	7,14	H-1	Cc-1	175,5	180,9	173,1	174,2	175,9
FWH-I-G-57	7,16	H-1	Cc-1	168,6	171,9	172,7	174,9	172,0
FWH-I-G-58	7,15	H-1	Cc-1	178,2	178,5	170,7	167,0	173,6
FWH-I-G-62	7,16	H-1	Cc-1	167,8	179,2	168,7	172,7	172,1
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								172,8
FWH-I-G-1	7,14	H-2	Cc-3	163,1	167,7	165,7	163,8	165,1
FWH-I-G-50	7,06	H-2	Cc-2	168,7	161,6	153,8	166,0	162,5
FWH-I-G-55	7,16	H-2	Cc-2	166,5	172,6	174,2	172,0	171,3
FWH-I-G-84	7,08	H-2	Cc-2	161,5	161,7	174,2	169,3	166,6
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								166,4
FWH-I-G-5	7,06	H-3	Cc-3	165,2	163,8	156,3	154,8	160,0
FWH-I-G-6	7,12	H-3	Cc-3	168,4	169,4	174,1	169,6	170,4
FWH-I-G-8	6,97	H-3	Cc-3	154,0	163,7	162,8	153,2	158,4
FWH-I-G-34	6,49	H-3	Cc-4	135,0	141,0	124,7	119,2	130,0
FWH-I-G-38	7,11	H-3	Cc-2	163,2	166,5	177,0	168,7	168,9
FWH-I-G-39	7,11	H-3	Cc-2	166,7	164,4	178,4	167,4	169,2
FWH-I-G-56	7,21	H-3	Cc-3	170,8	169,0	168,5	169,1	169,3
FWH-I-G-61	7,11	H-3	Cc-3	176,4	167,7	159,0	166,7	167,4
FWH-I-G-75	nicht ermittelt	H-3	Cc-3	162,4	159,2	175,6	169,8	166,7
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								162,3

Fortsetzung Tabelle T 75

Schwingprobe	Dichte des Prüfvolumens ρ_w [g/cm ³]	Lunkerklasse neu	Lunkerklasse alt	fiktiver Elastizitätsmodul E_f je Messposition [GPa]				arithmetischer Mittelwert für E_f aus 4 Messpositionen [GPa]
				vorne	links	hinten	rechts	
FWH-I-G-2	6,73	H-4	Cc-4	140,8	125,9	144,1	138,6	137,3
FWH-I-G-3	6,92	H-4	Cc-4	148,1	155,6	154,4	147,2	151,3
FWH-I-G-36	6,75	H-4	Cc-4	133,2	139,8	155,2	133,9	140,5
FWH-I-G-37	6,84	H-4	Cc-4	144,9	147,6	143,0	172,0	151,9
FWH-I-G-52	6,74	H-4	Cc-4	139,6	125,5	136,3	146,8	137,1
FWH-I-G-60	6,96	H-4	Cc-3	178,9	157,8	153,5	154,9	161,3
FWH-I-G-69	7,14	H-4	Cc-3	173,8	182,4	165,7	156,2	169,5
FWH-I-G-74	6,77	H-4	Cc-5	135,1	140,0	139,6	140,0	138,7
FWH-I-G-77	6,93	H-4	Cc-3	162,7	148,4	153,9	159,2	156,0
FWH-I-G-78	6,78	H-4	Cc-4	155,3	153,5	145,9	147,5	150,5
FWH-I-G-80	6,76	H-4	Cc-4	144,7	146,0	150,9	143,6	146,3
FWH-I-G-82	6,96	H-4	Cc-4	157,8	166,1	162,1	149,1	158,8
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								149,9
FWH-I-G-4	6,73	H-5	Cc-5	132,6	133,1	138,6	132,6	134,2
FWH-I-G-53	6,66	H-5	Cc-5	131,3	135,7	140,0	138,5	136,4
FWH-I-G-54	6,87	H-5	Cc-4	145,5	150,7	155,8	158,1	152,5
FWH-I-G-63	6,78	H-5	Cc-5	150,2	151,9	127,7	138,3	142,0
FWH-I-G-65	6,85	H-5	Cc-5	148,6	160,2	155,5	132,5	149,2
FWH-I-G-67	7,02	H-5	Cc-5	157,6	155,0	168,3	160,2	160,3
FWH-I-G-71	6,83	H-5	Cc-4	149,4	142,2	143,9	140,8	144,1
FWH-I-G-73	6,24	H-5	Cc-5	115,6	121,9	101,2	120,2	114,7
FWH-I-G-76	6,78	H-5	Cc-5	126,0	129,1	120,3	126,3	125,4
arithmetischer Mittelwert aus allen Messungen über alle Schwingproben								139,9

Anhang B

Bilderverzeichnis

Inhalt	Bild	Seite
Probenlageplan Gussplatte EN-GJS-400-18U-LT	Bild B 1	B 3
Probenlageplan Gussplatte S005 EN-GJS-450-18	Bild B 2	B 4
Probenlageplan Gussplatte S006 EN-GJS-450-18	Bild B 3	B 5
Probenlageplan Bauteil Windenergieanlage	Bild B 4	B 6
<i>Diagramme für den Werkstoff EN-GJS-400-18U-LT</i>		
Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Dehnungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 5; Bild B 6; Bild B 7; Bild B 8; Bild B 9; Bild B 10; Bild B 11; Bild B 12	B 7 - B 10
Spannungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 13; Bild B 14; Bild B 15; Bild B 16; Bild B 17; Bild B 18; Bild B 19	B 11 - B 14
Spannungswöhlerlinien nach Lunkerlassen	Bild B 20; Bild B 21; Bild B 22; Bild B 23; Bild B 24	B 14 - B 16
<i>Diagramme für den Werkstoff EN-GJS-450-18</i>		
Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Dehnungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 25; Bild B 26; Bild B 27; Bild B 28; Bild B 29; Bild B 30; Bild B 31; Bild B 32	B 17 - B 20
Spannungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 33; Bild B 34; Bild B 35; Bild B 36; Bild B 37; Bild B 38; Bild B 39; Bild B 40	B 21 - B 24
Spannungswöhlerlinien nach Lunkerlassen	Bild B 41; Bild B 42; Bild B 43; Bild B 44; Bild B 45	B 25 - B 27
<i>Diagramme für den Werkstoff EN-GJS-700-2</i>		
Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurven und Dehnungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 46; Bild B 47; Bild B 48; Bild B 49; Bild B 50; Bild B 51; Bild B 52; Bild B 53	B 28 - B 31
Spannungswöhlerlinien ungänzenfrei	Bild B 54; Bild B 55; Bild B 56; Bild B 57; Bild B 58; Bild B 59; Bild B 60; Bild B 61	B 32 - B 35
Spannungswöhlerlinien nach Lunkerlassen	Bild B 62; Bild B 63; Bild B 64; Bild B 65; Bild B 66	B 36 - B 38
Werkstoffübergreifende Spannungswöhlerlinien für scharf gekerbte Schwingproben ($K_t = 4, 14$)	Bild B 67	B 38
Vergleich Kompatibilität und Regression (SR01 und FWHR01)	Bild B 68; Bild B 69	B 39
Dreidimensionale Diagramme des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$	Bild B 70; Bild B 71; Bild B 72	B 40 - B 42
Werkstoffübergreifende Spannungswöhlerlinien für die Lunkerlassen Cc-1 bis Cc-5	Bild B 73; Bild B 74; Bild B 75; Bild B 76; Bild B 77	B 43 - B 45
Werkstoffübergreifende Spannungswöhlerlinien für die Lunkerlassen H-1 bis H-5	Bild B 78; Bild B 79; Bild B 80; Bild B 81; Bild B 82	B 46 - B 48
Werkstoffübergreifende Spannungswöhlerlinien für die Lunkerlassen H-1 bis H-5 mit Berücksichtigung der tatsächlichen Bruchfläche anhand von CT-Analysen	Bild B 83; Bild B 84; Bild B 85; Bild B 86; Bild B 87	B 49 - B 51
Gegenüberstellung der von experimenteller und rechnerischer Schwingfestigkeit der mit Lunkern behafteten Schwingproben für den EN-GJS-400-18U-LT und den EN-GJS-700-2	Bild B 88; Bild B 89	B 52

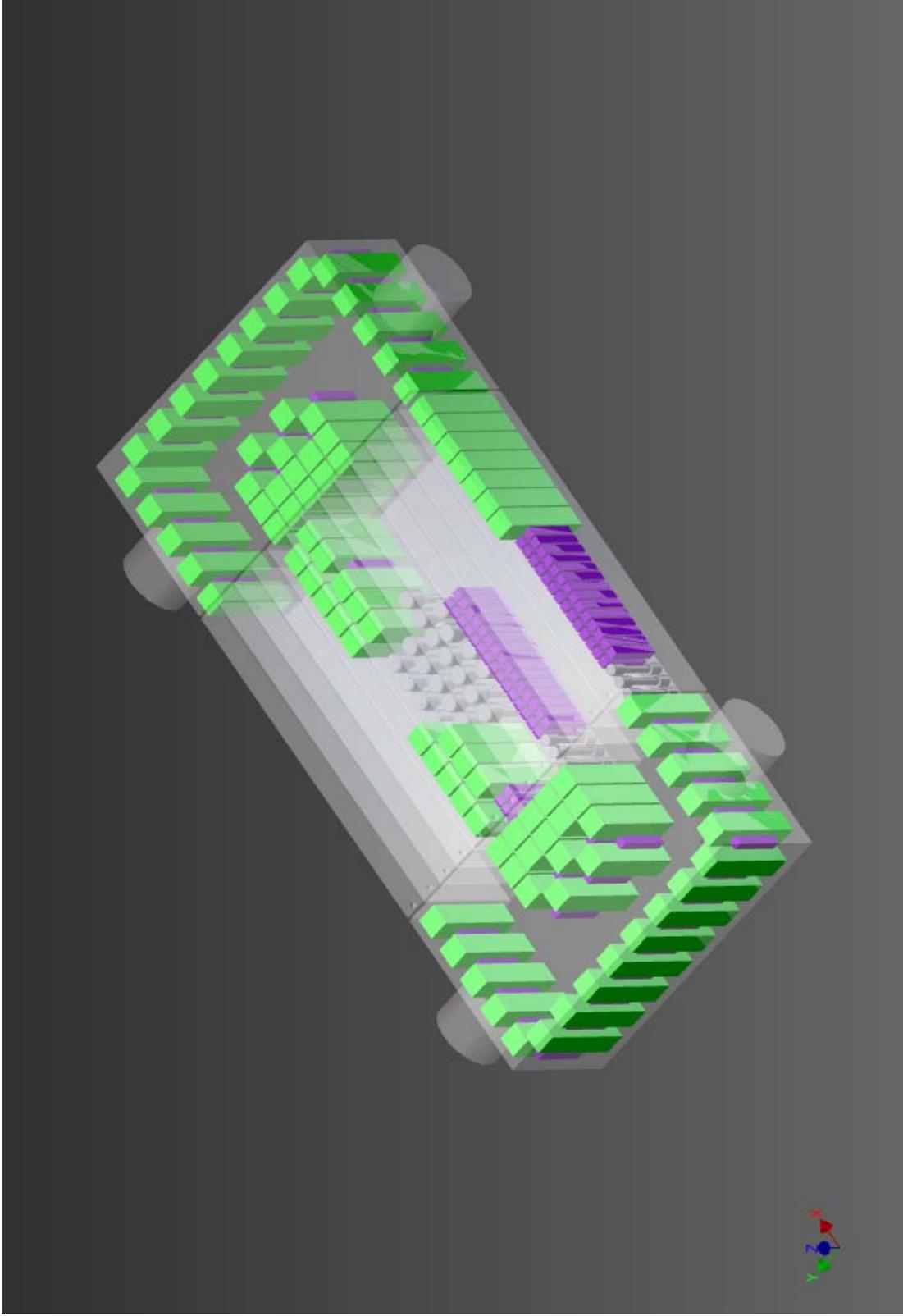


Bild B 1 Probenlageplan für die Gussplatte aus EN-GJS-400-18U-LT

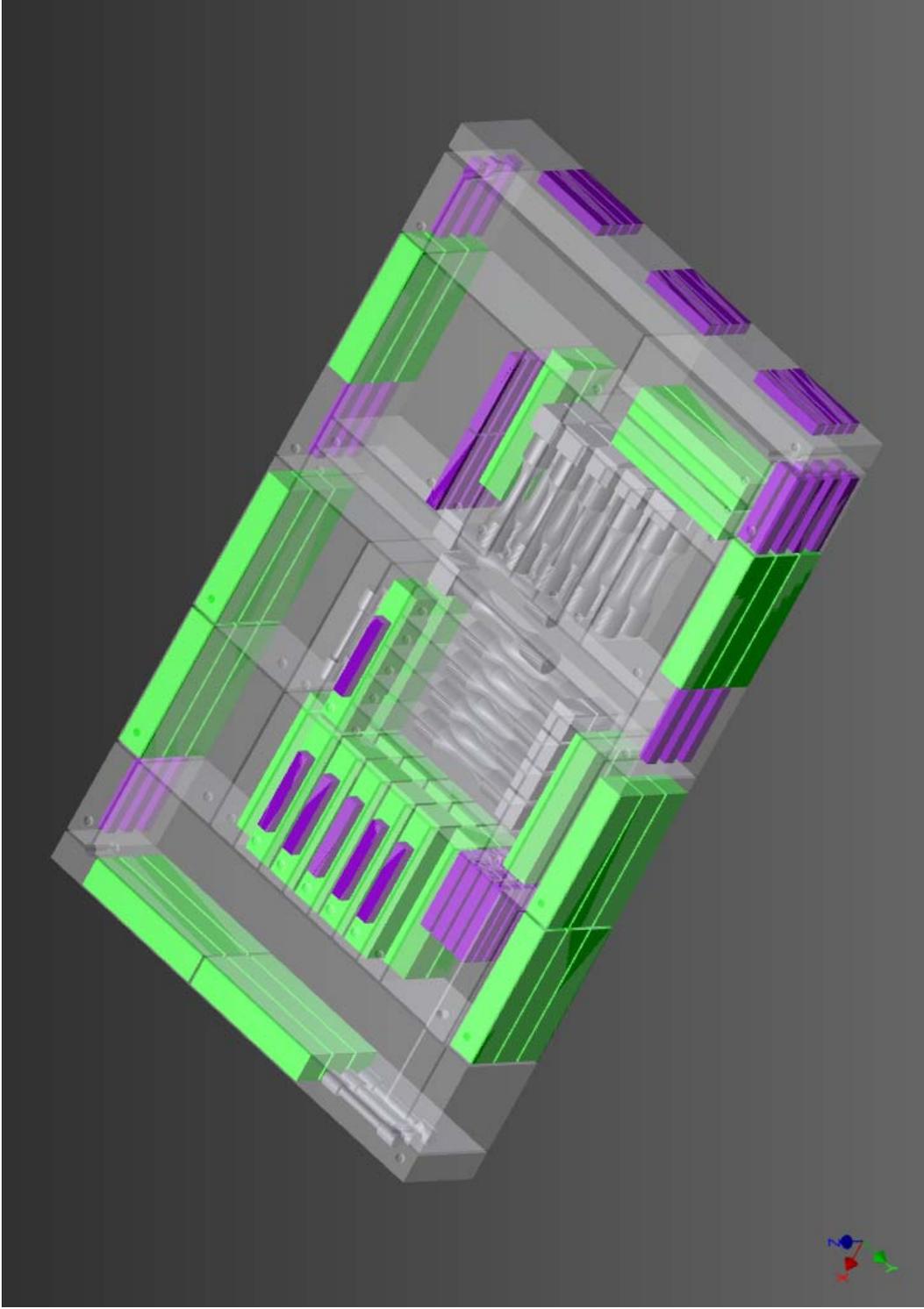


Bild B 2 Probenlageplan für die Gussplatte 005 aus EN-GJS-450-18

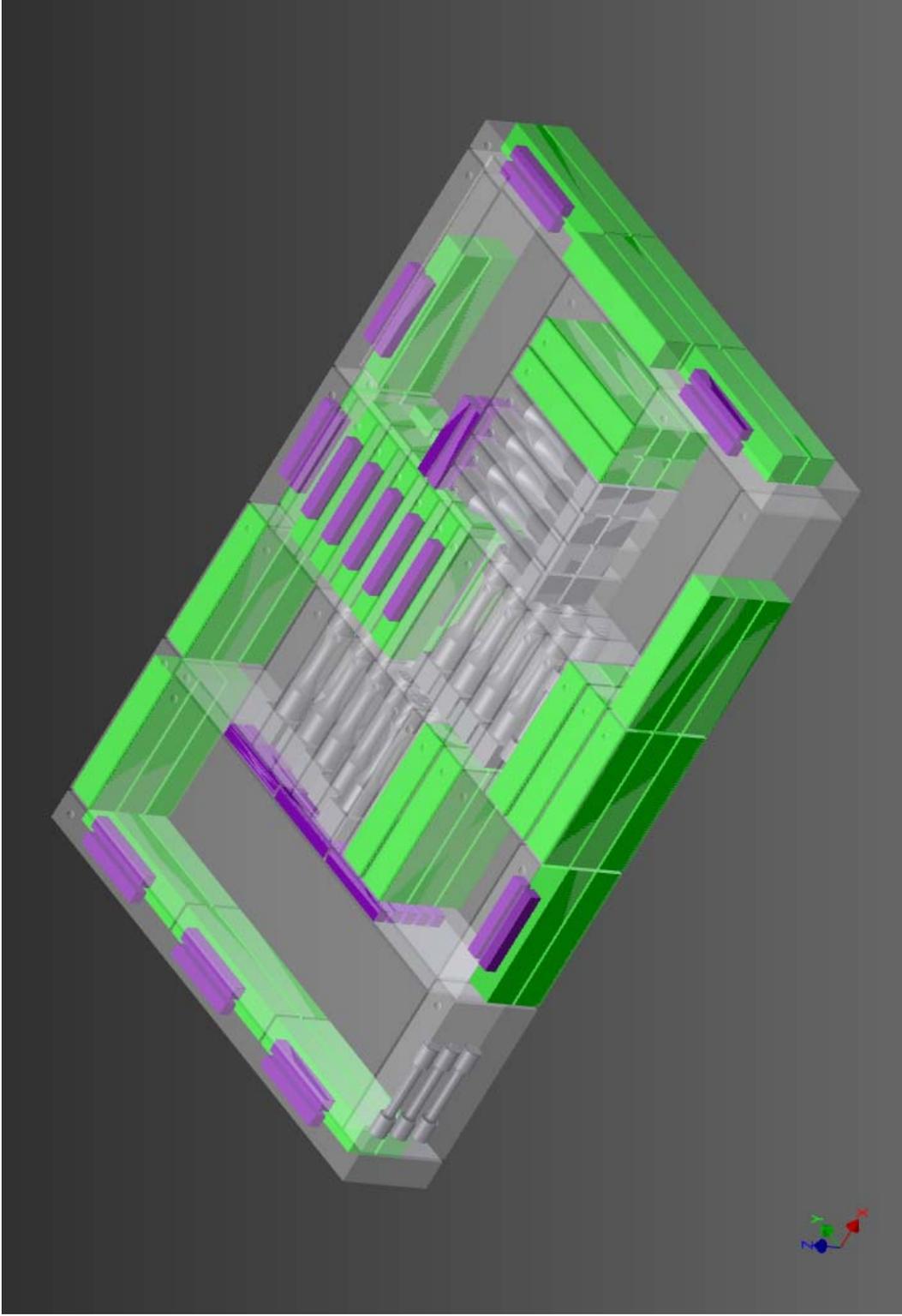


Bild B 3 Probenlageplan für die Gussplatte 006 aus EN-GJS-450-18

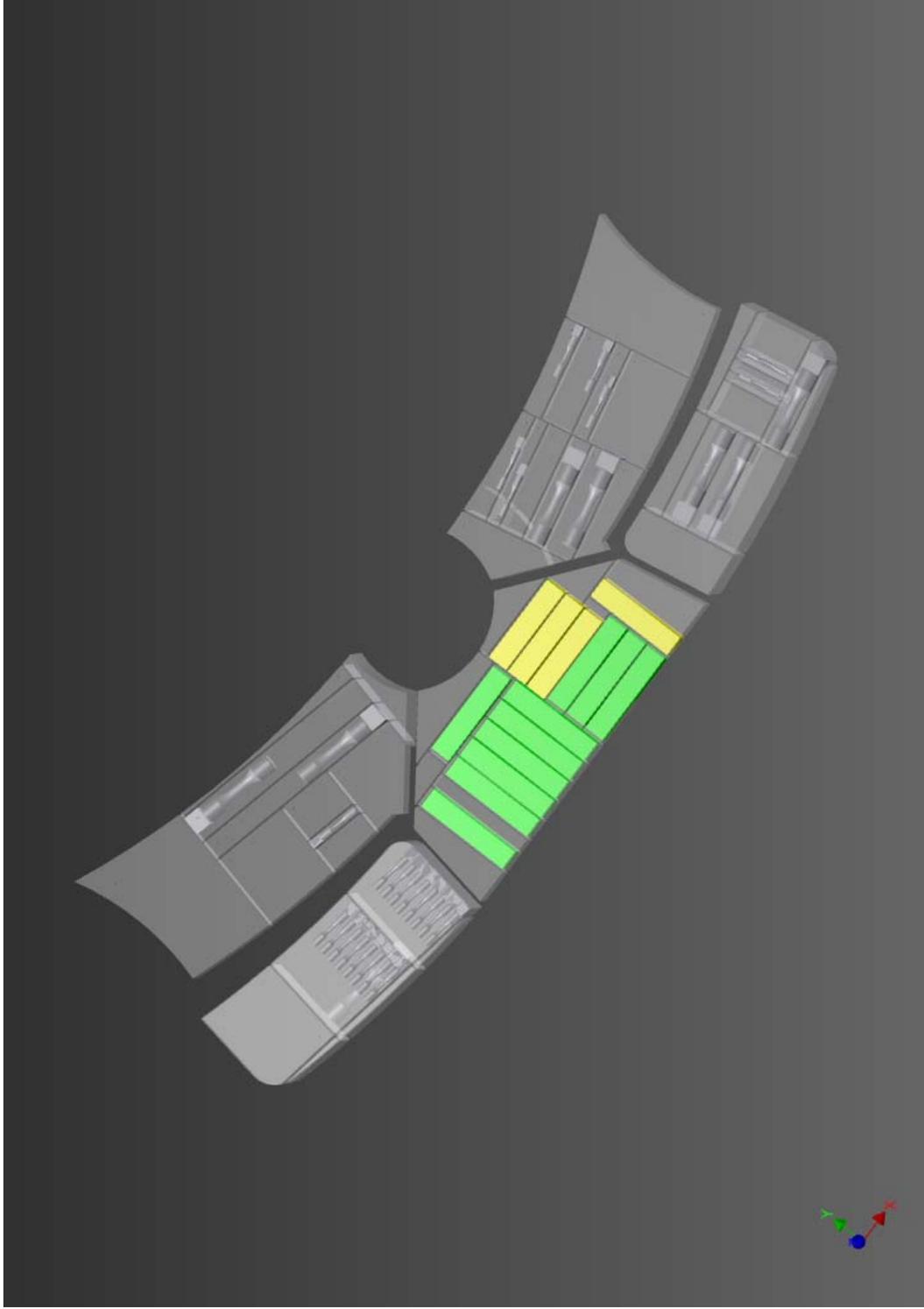


Bild B 4 Probenlageplan für einen Teilabschnitt des Bauteils einer Windenergieanlage aus EN-GJS-400-18U-LT

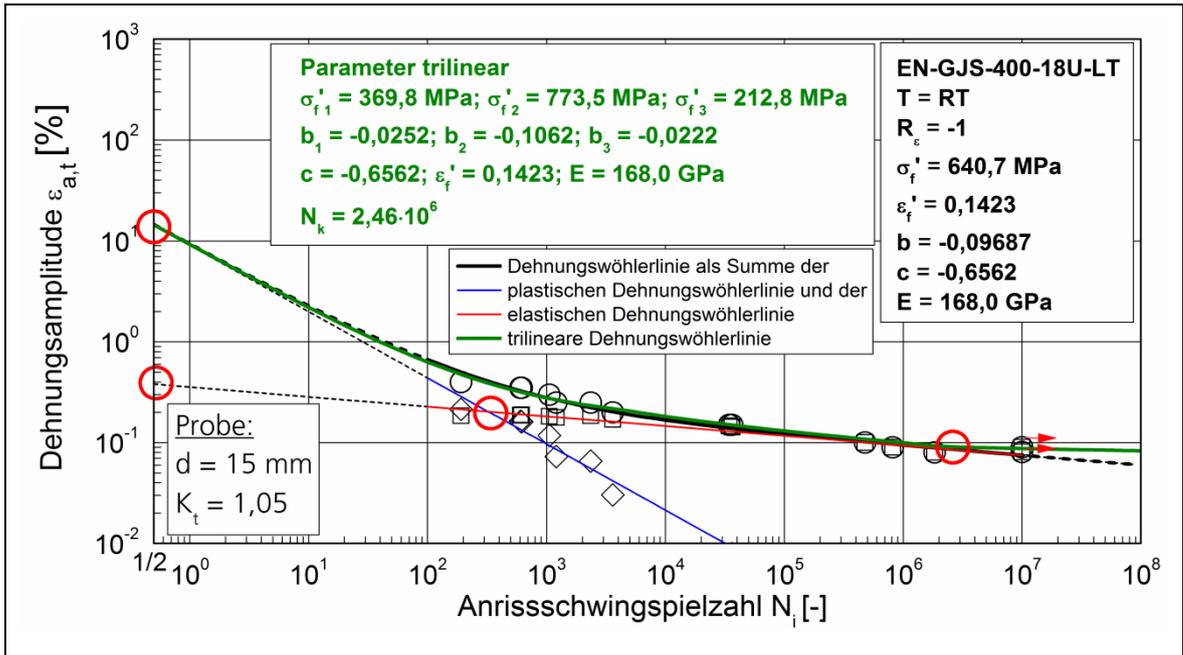


Bild B 5 Dehnungswöhlerlinie MWR01 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

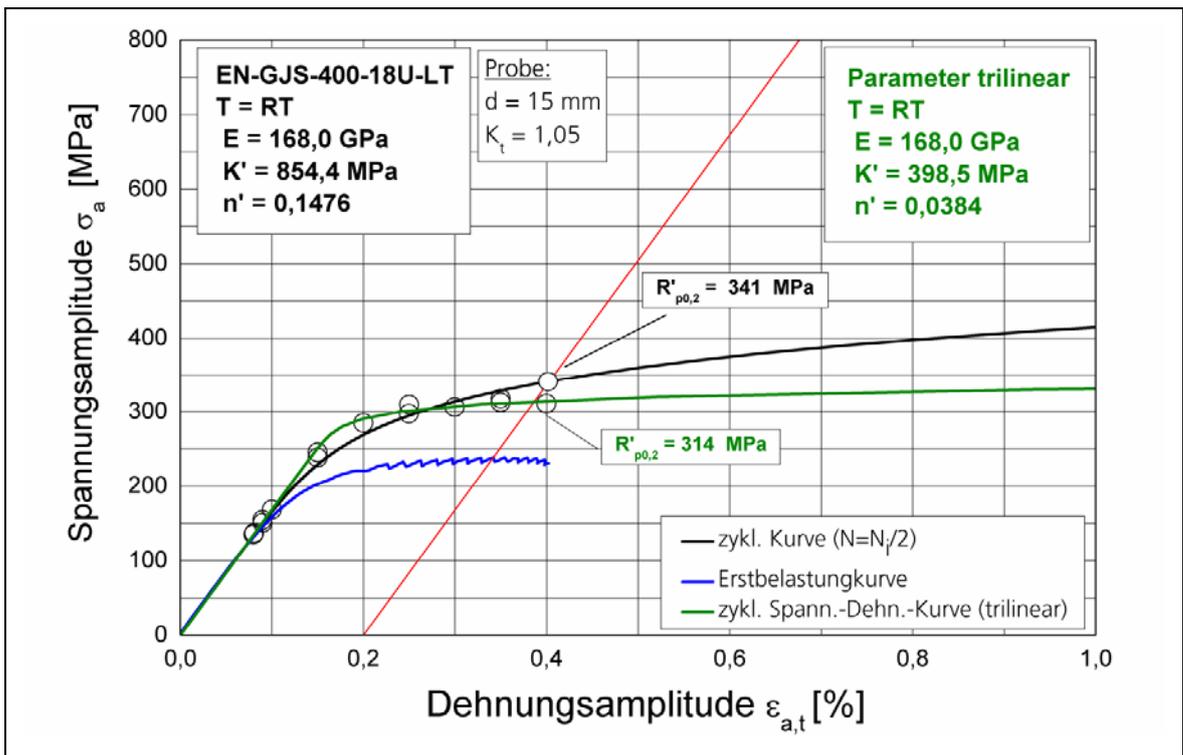


Bild B 6 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve MWR01 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

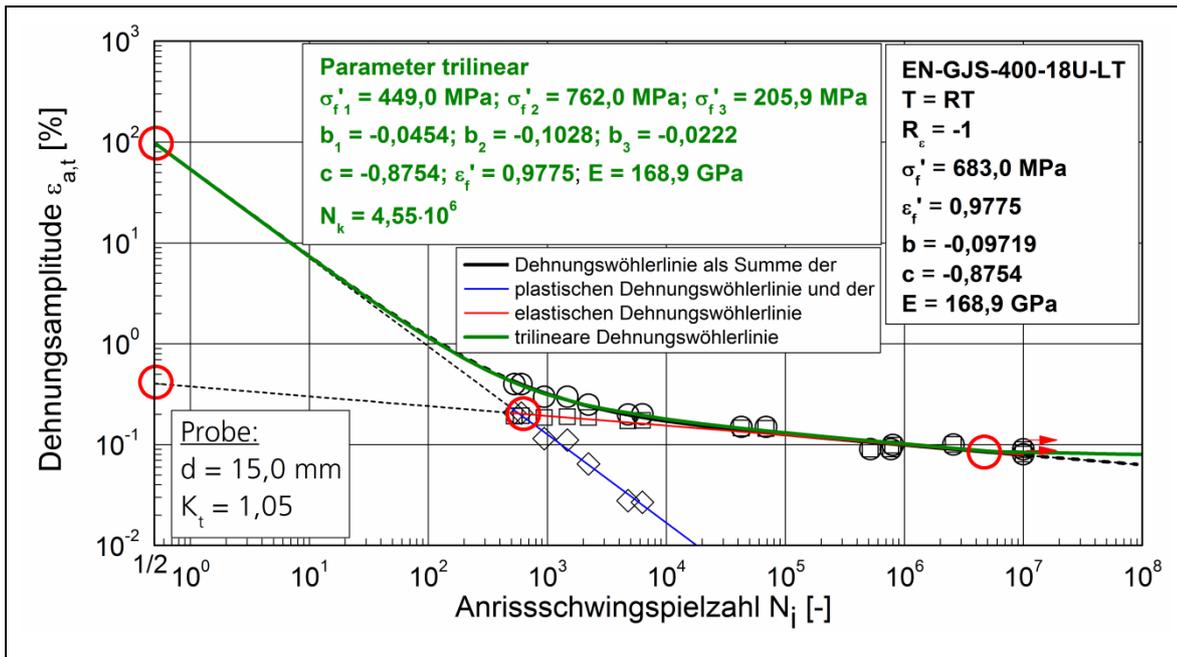


Bild B 7 Dehnungswöhlerlinie MWR02 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unгүйзэнгүй, R_ε = -1

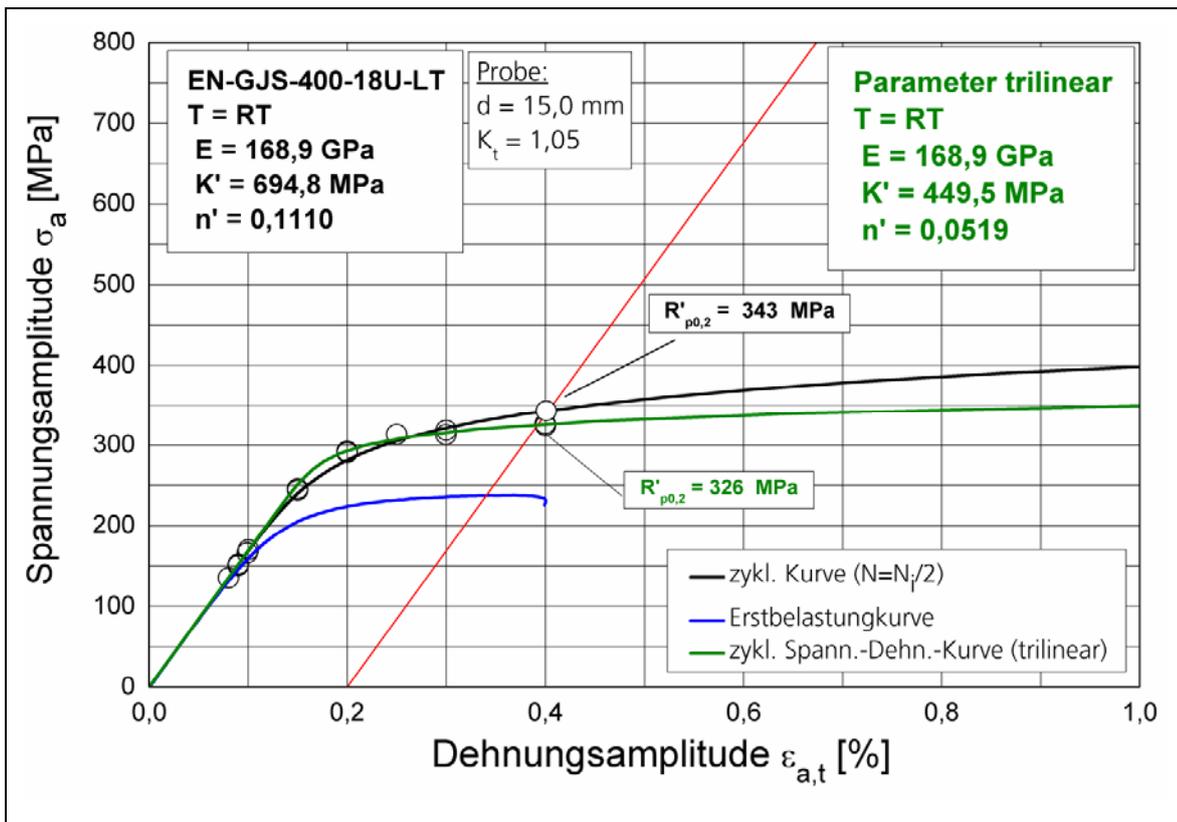


Bild B 8 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve MWR02 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, unгүйзэнгүй, R_ε = -1

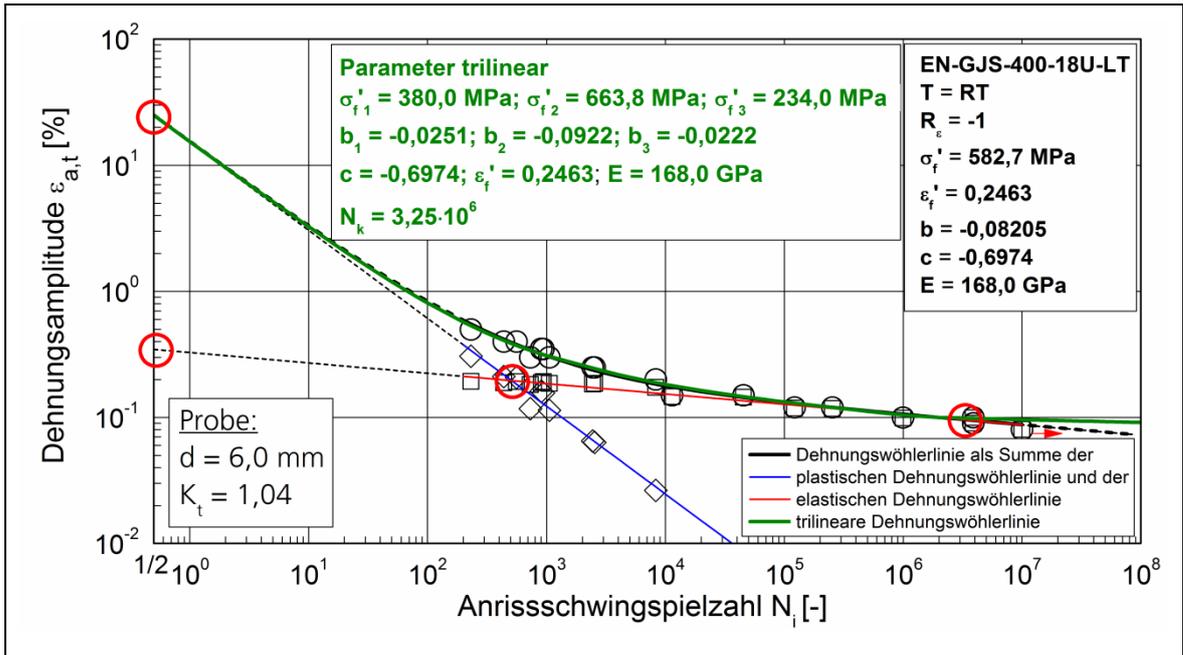


Bild B 9 Dehnungswöhlerlinie MWR05 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_e = -1$

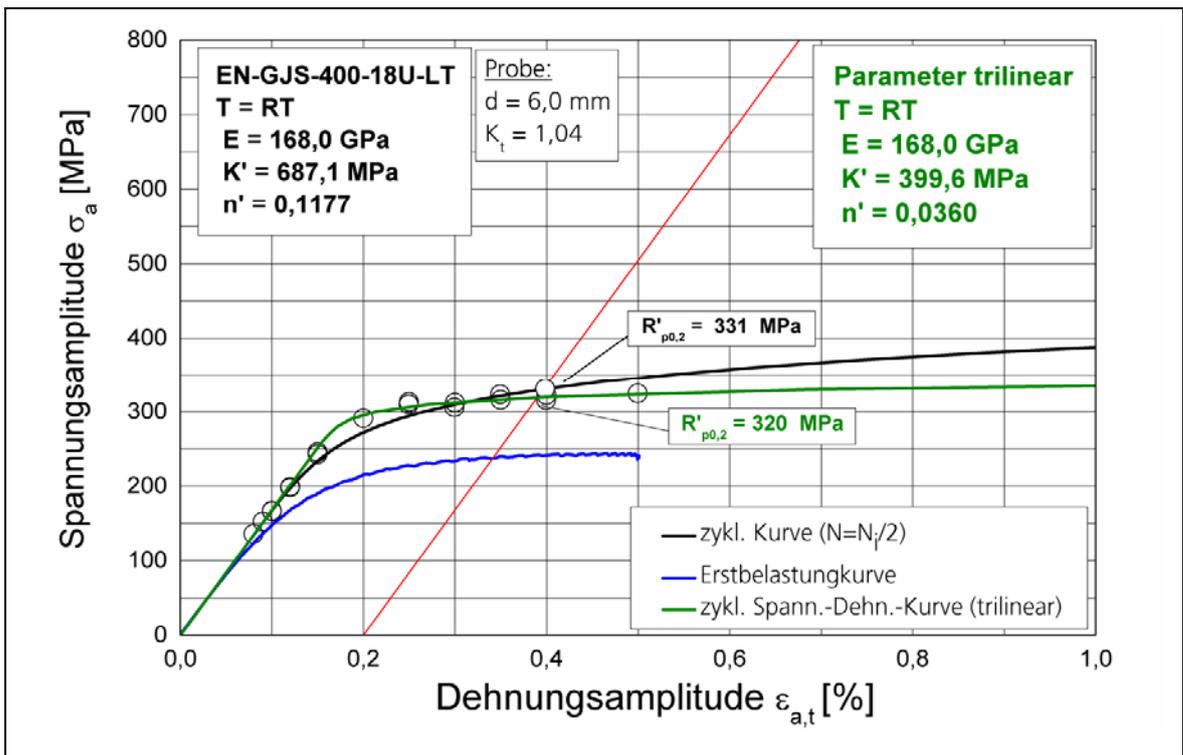


Bild B 10 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve MWR05 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_e = -1$

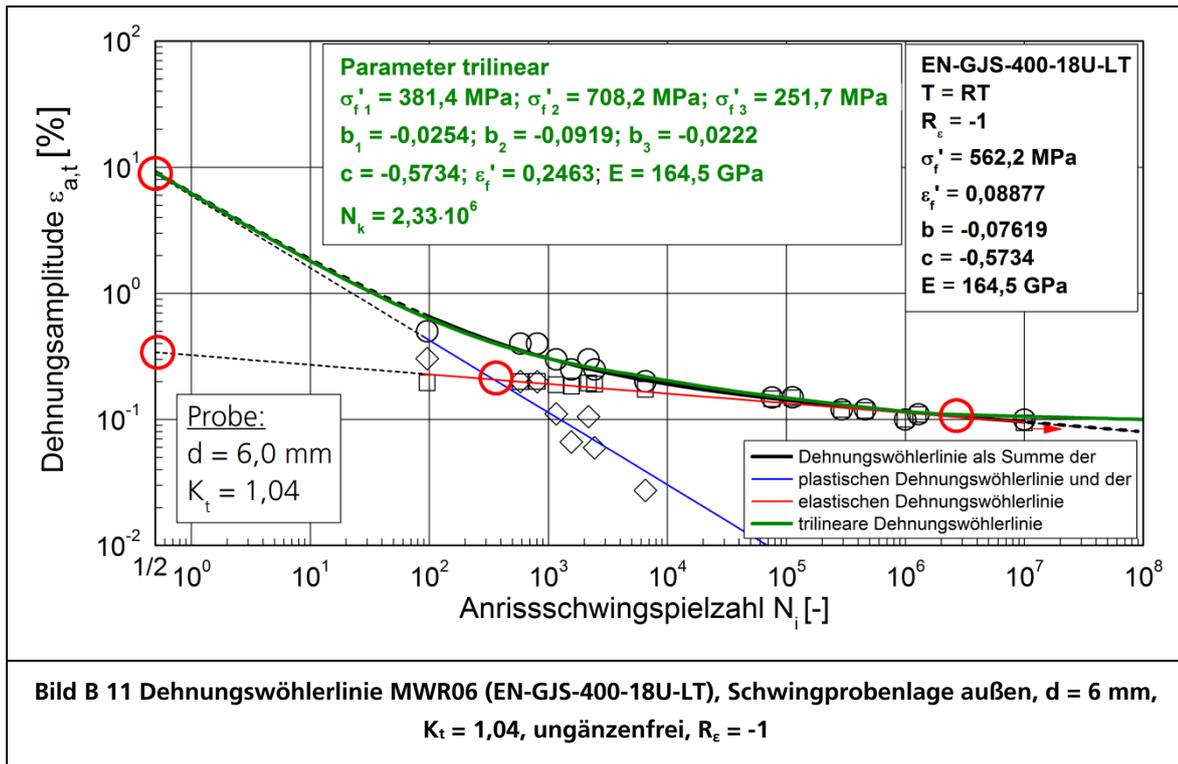


Bild B 11 Dehnungswöhlerlinie MWR06 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

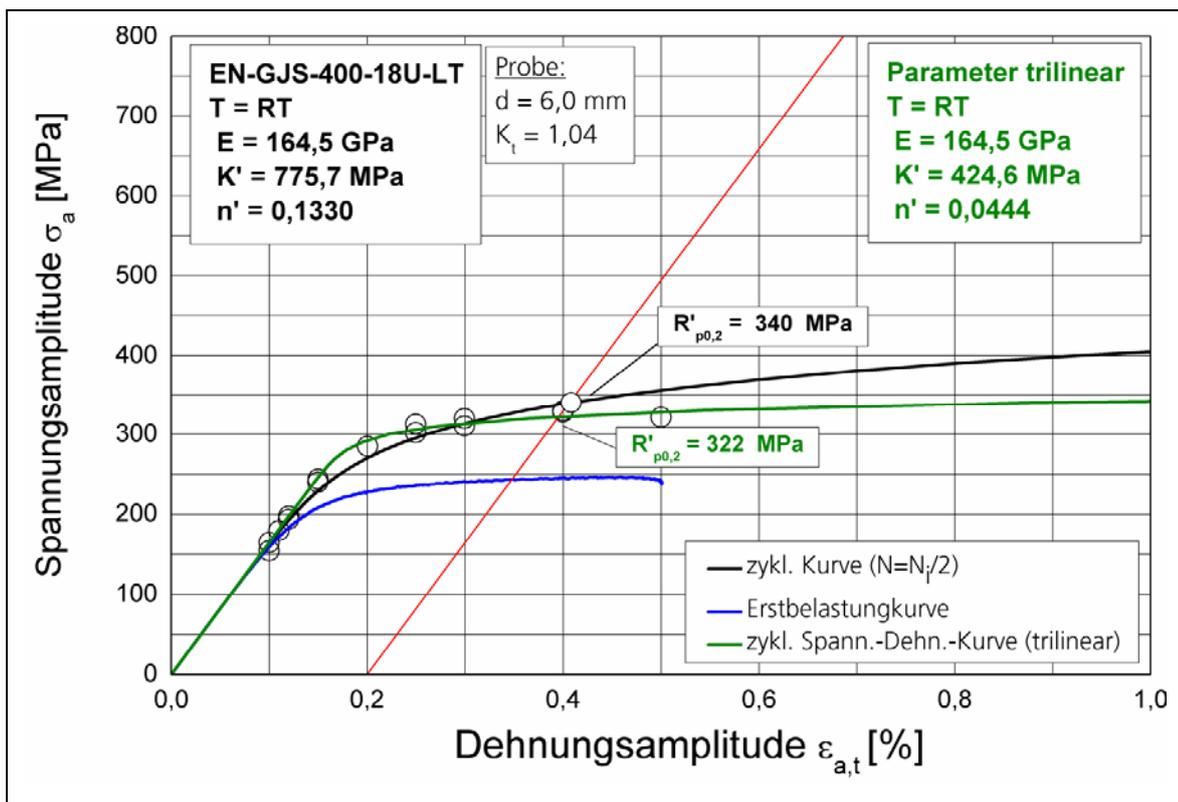


Bild B 12 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve MWR06 (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

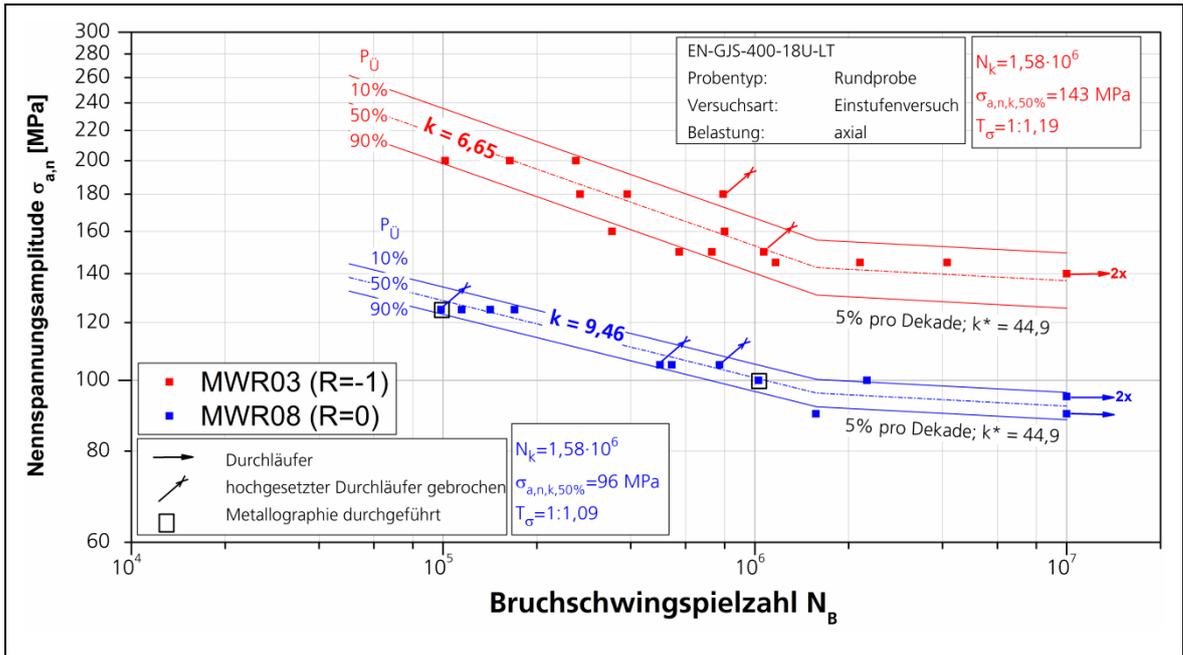


Bild B 13 Spannungswöhlerlinien MWR03 ($R_\sigma = -1$) und MWR08 ($R_\sigma = 0$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, $d = 15$ mm, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei

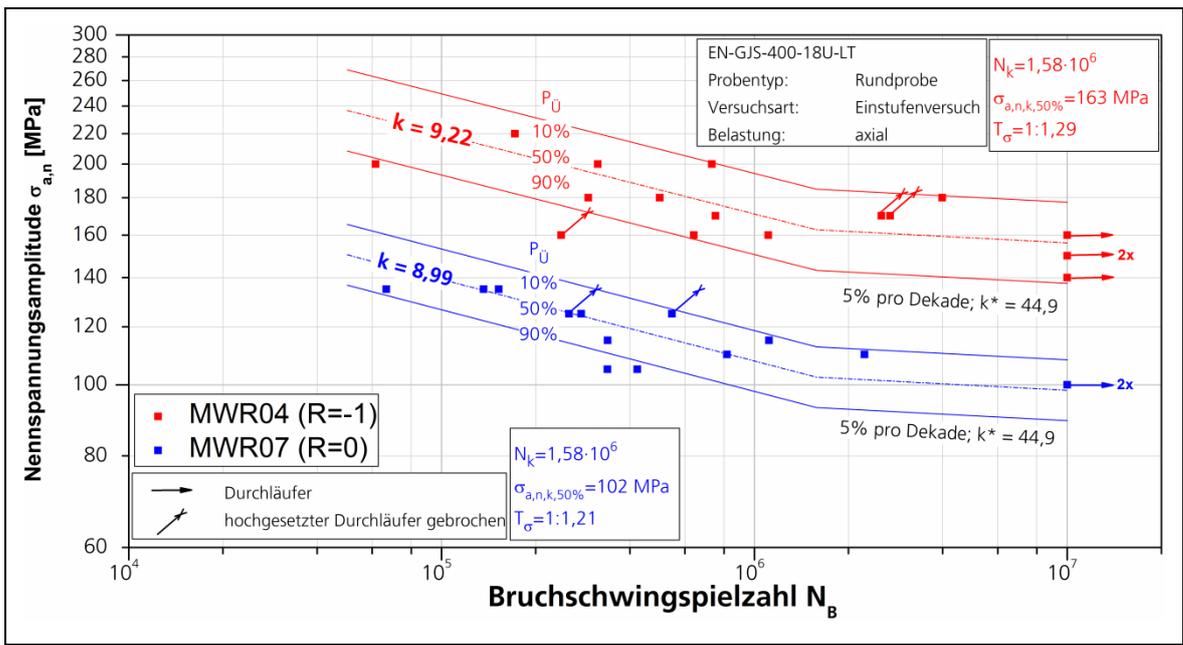


Bild B 14 Spannungswöhlerlinien MWR04 ($R_\sigma = -1$) und MWR07 ($R_\sigma = 0$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, $d = 6$ mm, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei

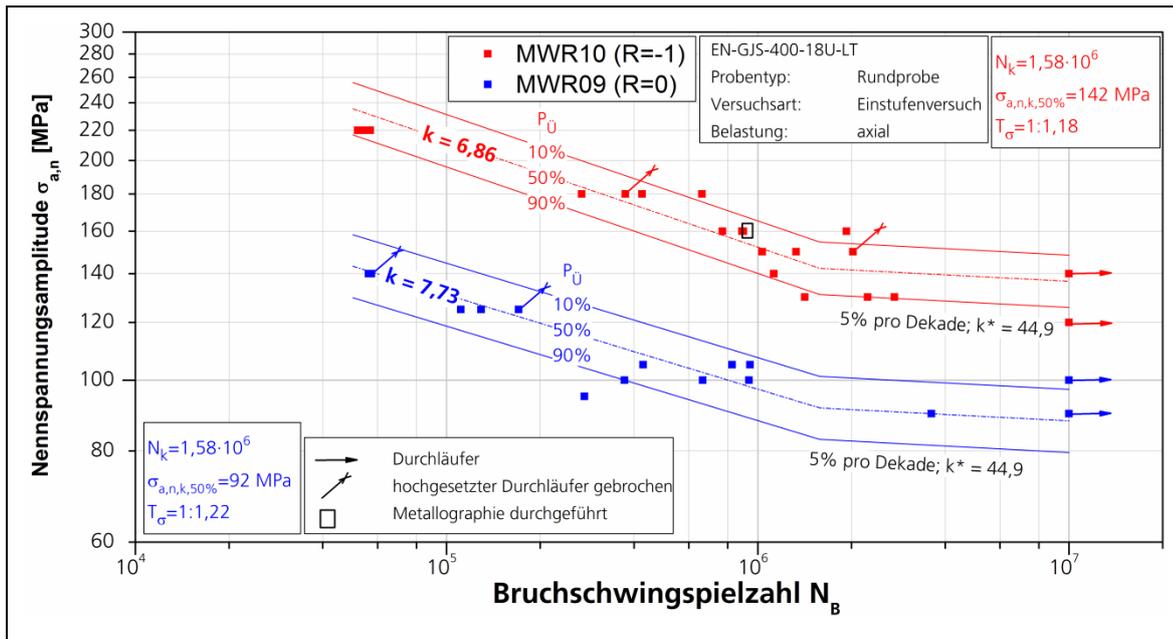


Bild B 15 Spannungswöhlerlinien MWR09 ($R_\sigma = 0$) und MWR10 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungespannt

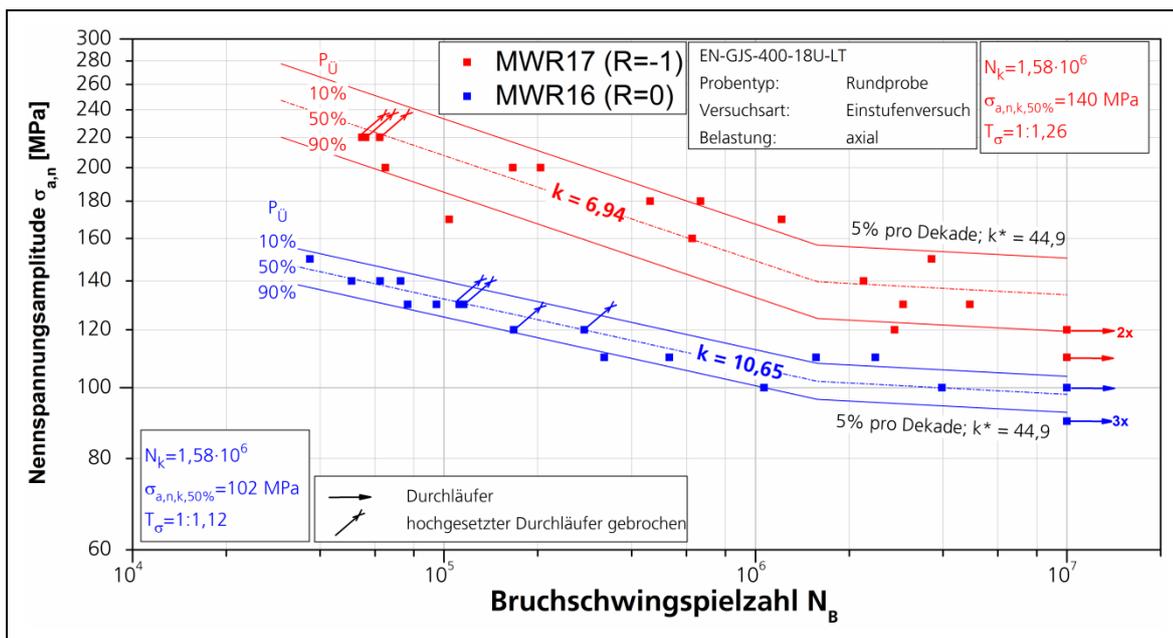


Bild B 16 Spannungswöhlerlinien MWR16 ($R_\sigma = 0$) und MWR17 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,19$, ungespannt

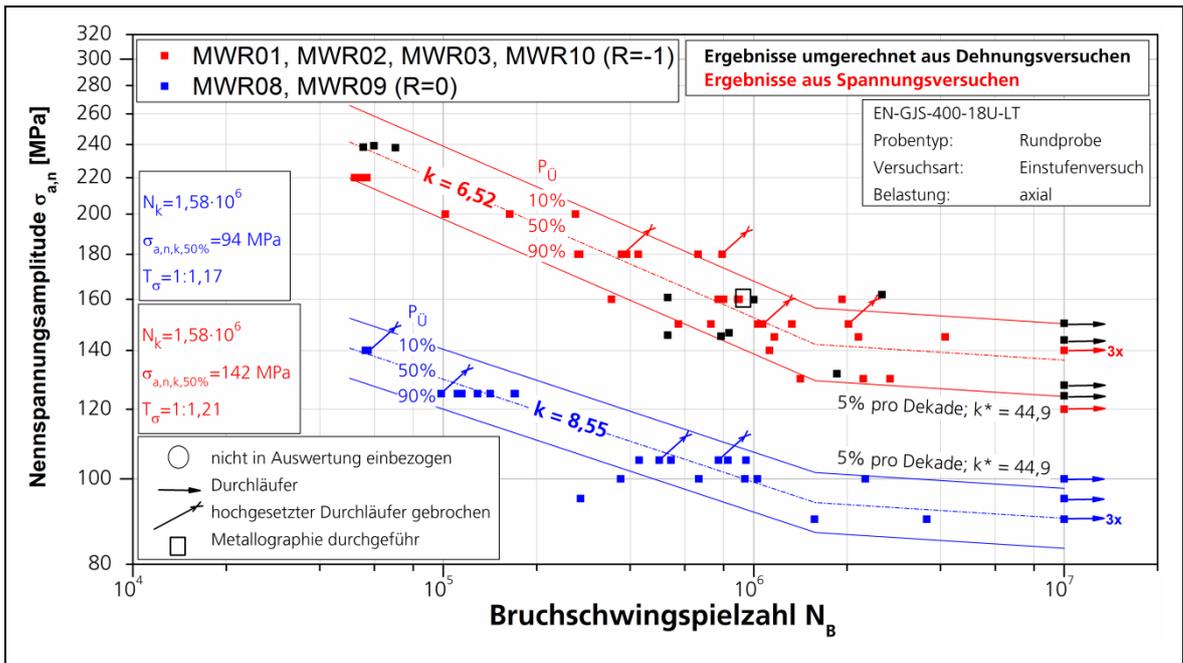


Bild B 17 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-400-18U-LT, d = 15 mm, $K_t = 1,05$, unglänzenfrei

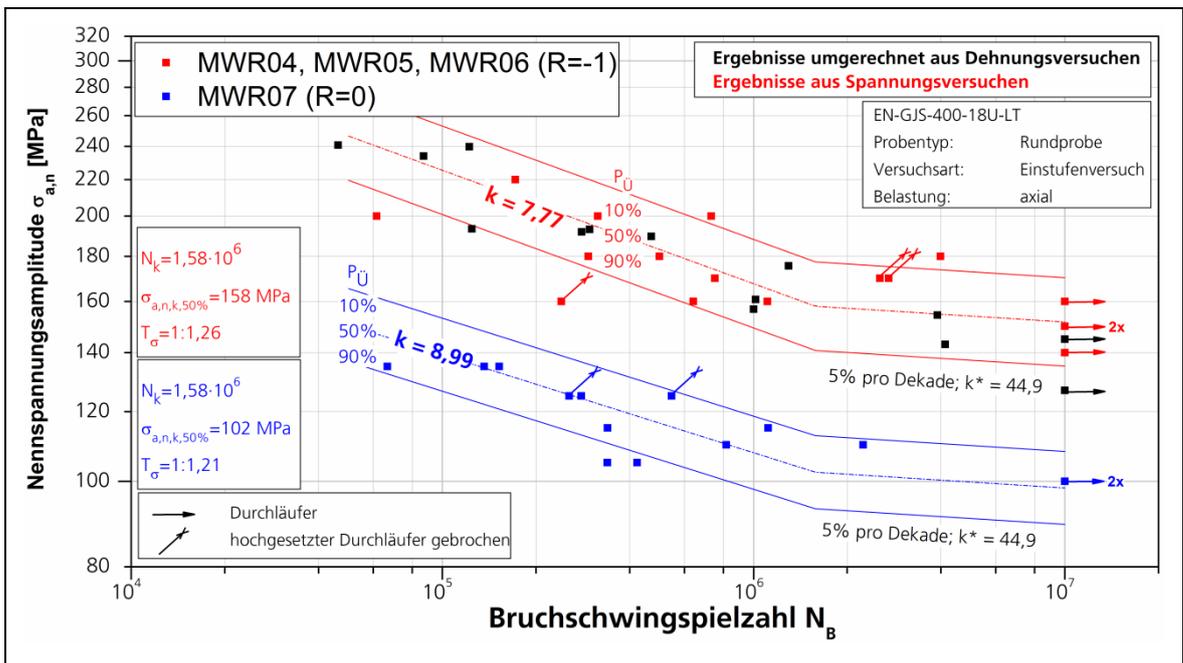


Bild B 18 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-400-18U-LT, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, unglänzenfrei

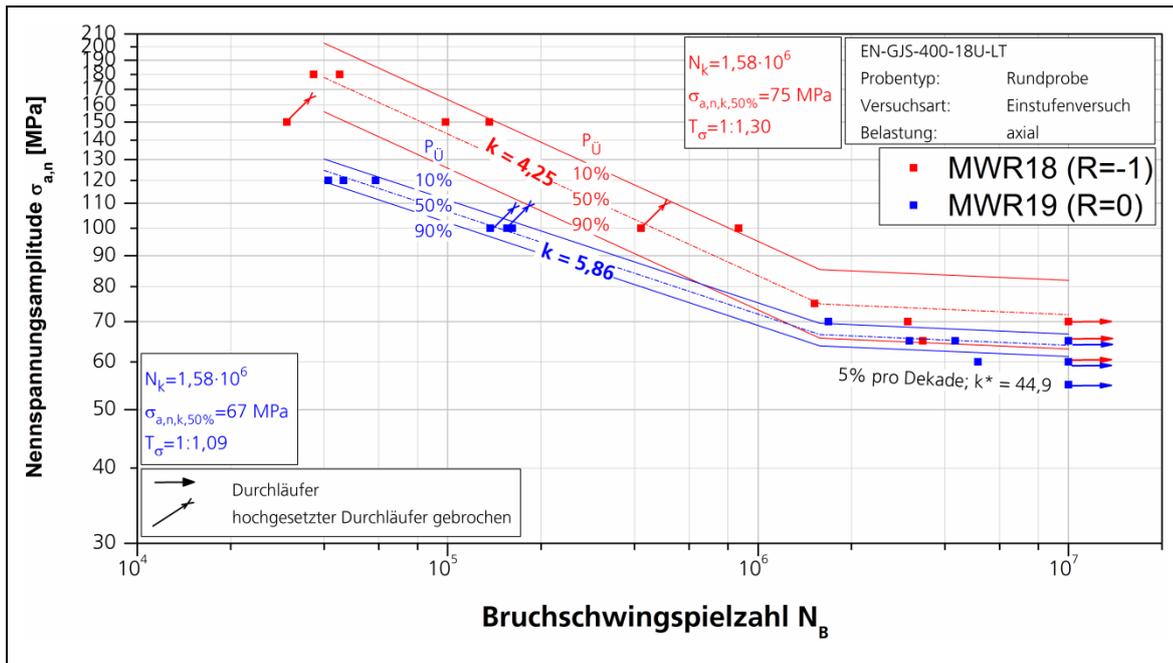


Bild B 19 Spannungswöhlerlinien MWR18 (R_σ = -1) und MWR19 (R_σ = 0) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, K_t = 4,14, ungänzenfrei

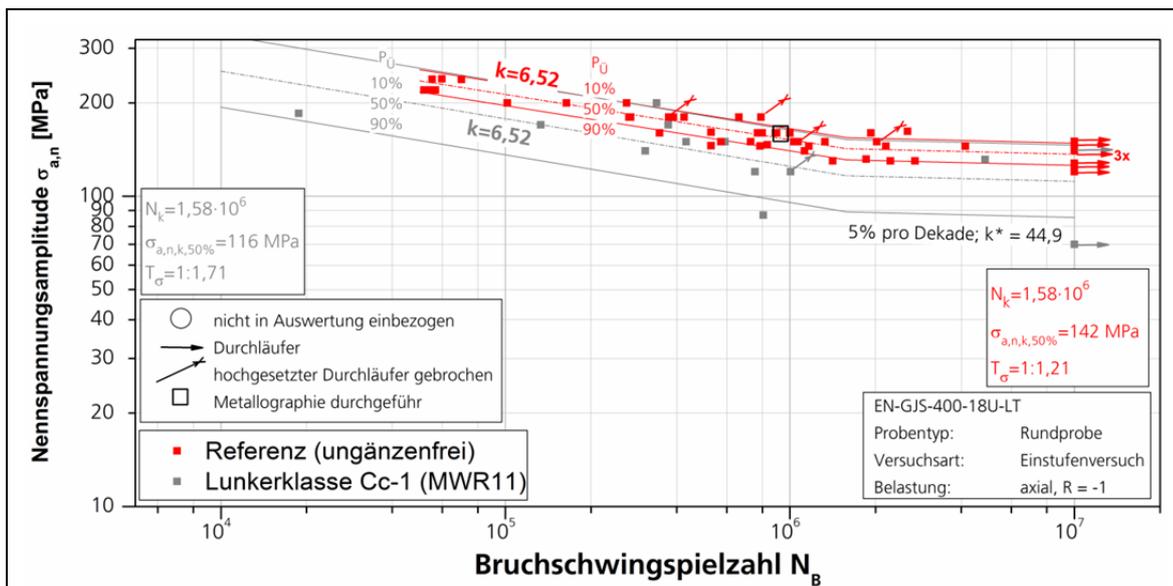


Bild B 20 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, (R_σ = -1) und MWR11 (R_σ = -1) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-1

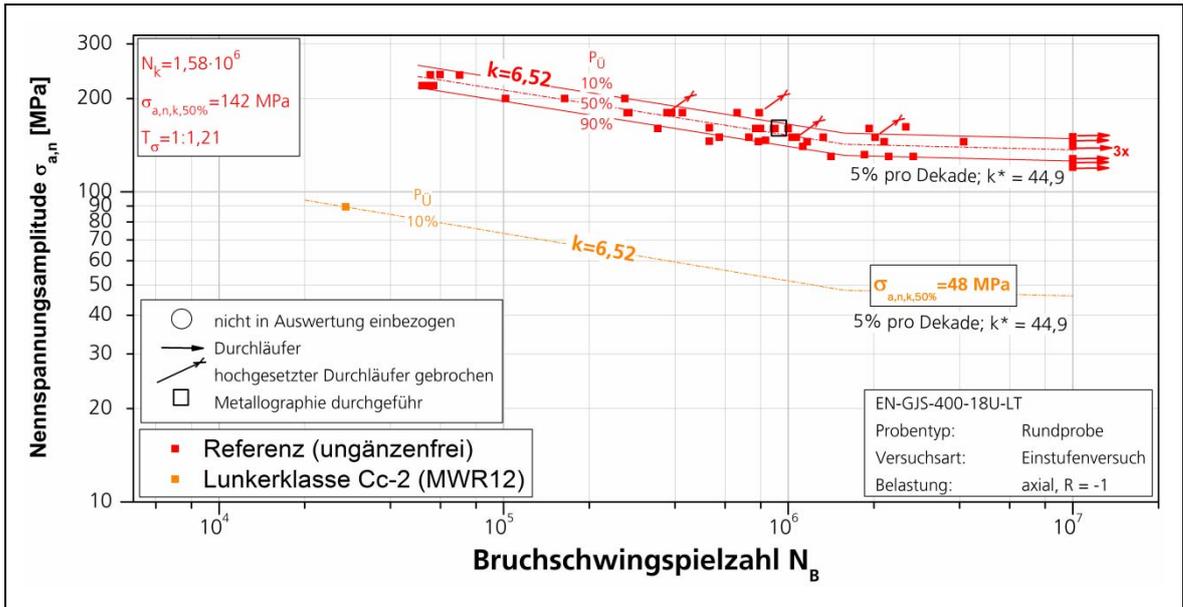


Bild B 21 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, (R_σ = -1) und MWR12 (R_σ = -1) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-2

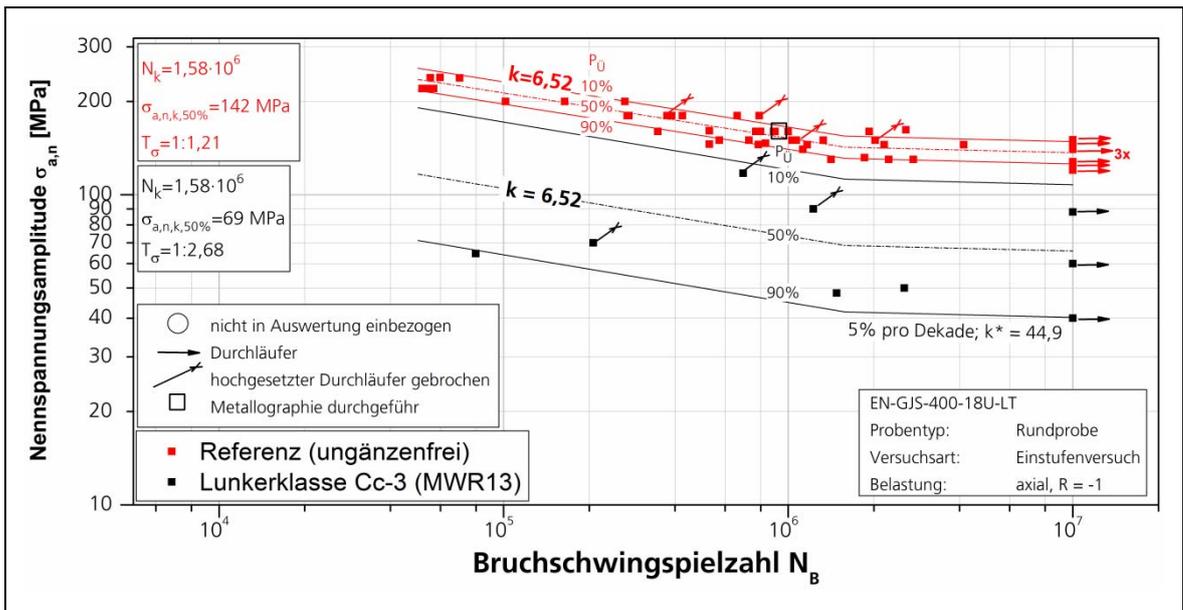


Bild B 22 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, (R_σ = -1) und MWR13 (R_σ = -1) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-3

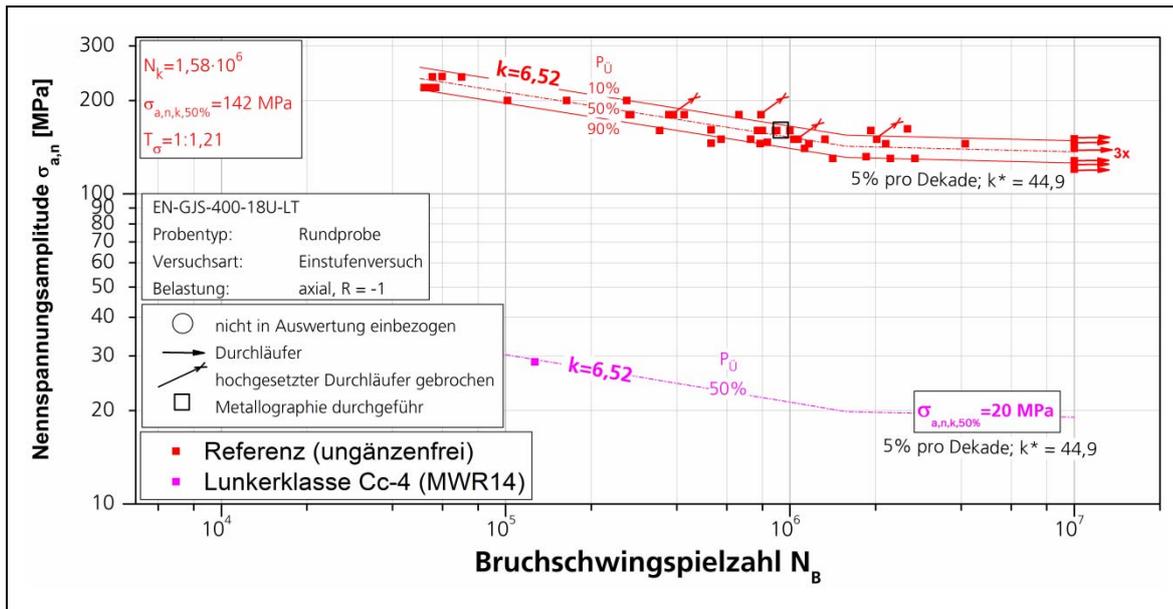


Bild B 23 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und MWR14 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-4

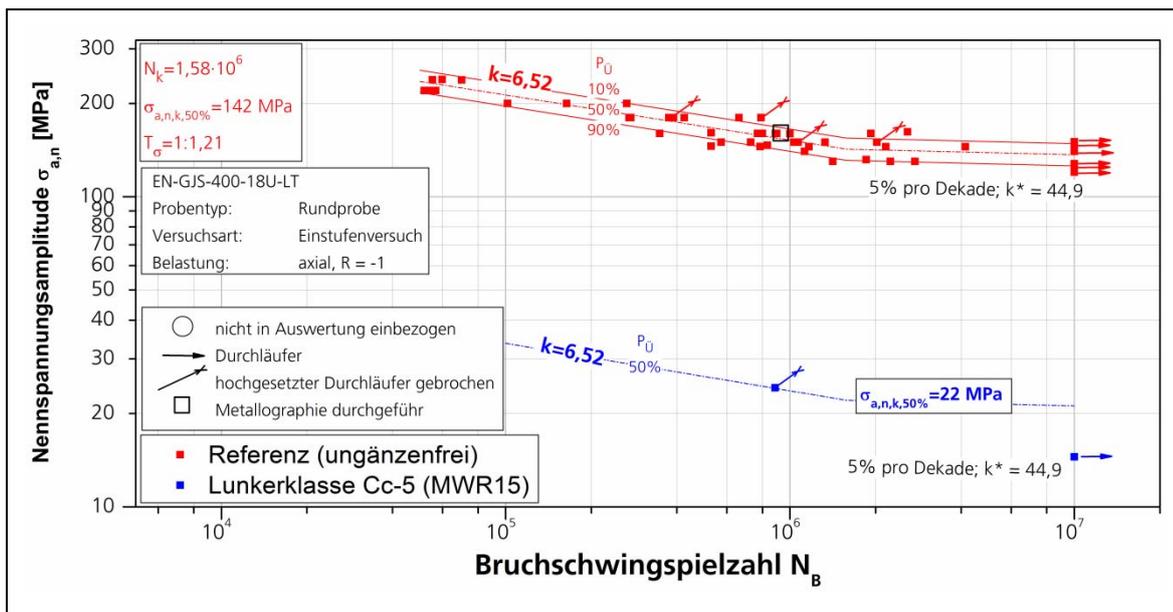
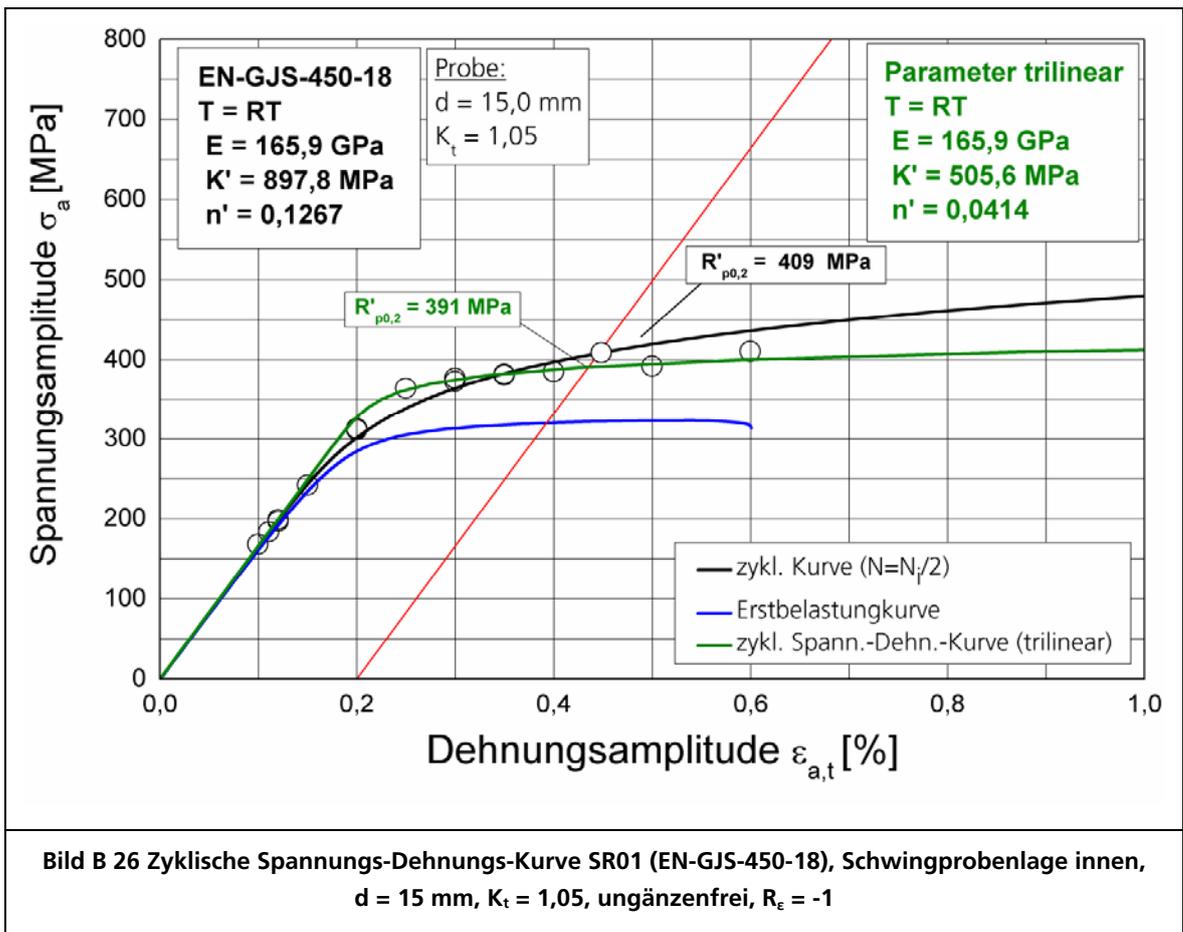
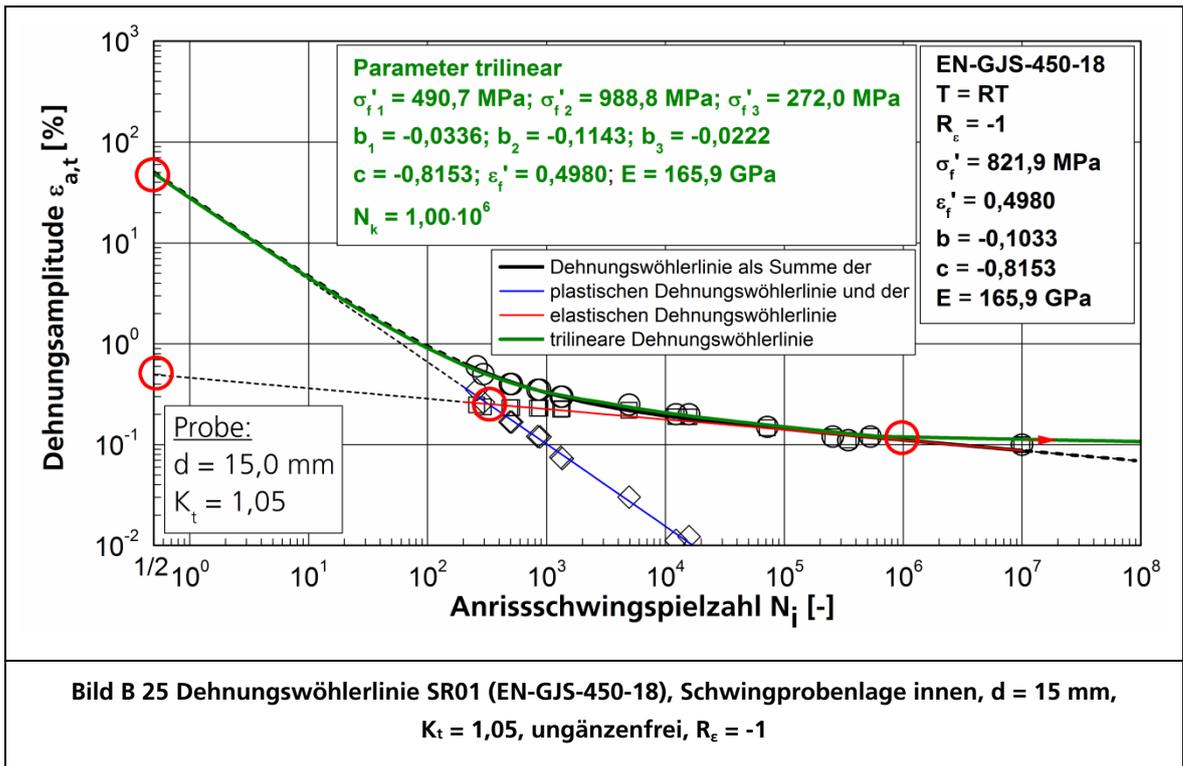


Bild B 24 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und MWR15 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-400-18U-LT), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-5



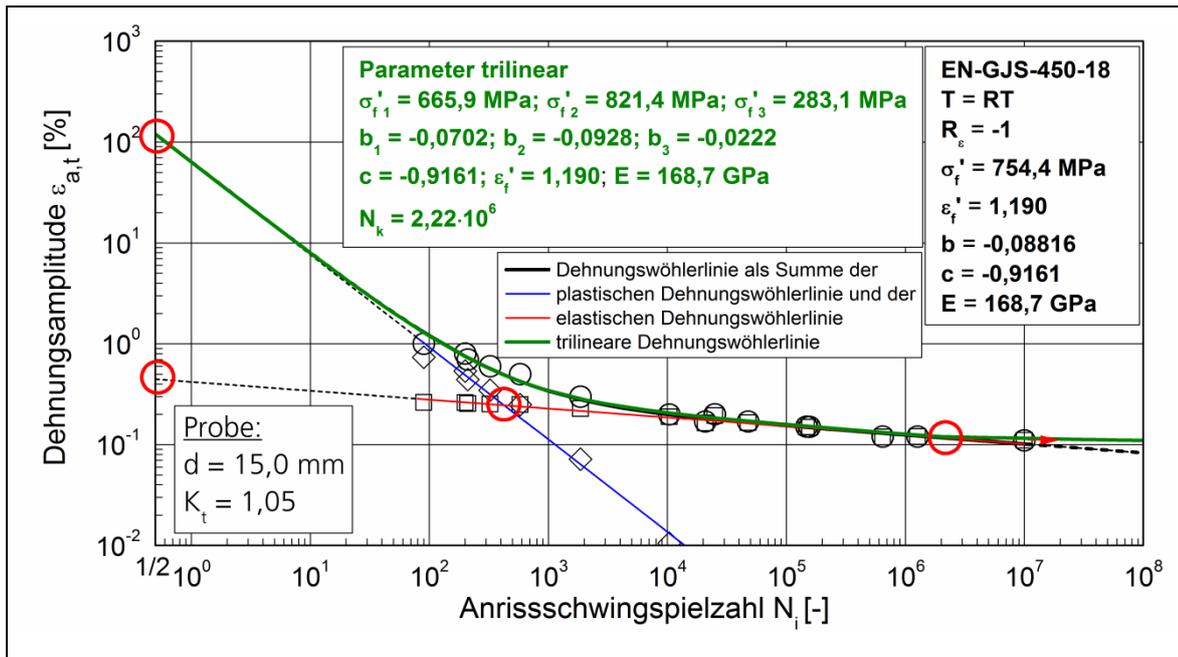


Bild B 27 Dehnungswöhlerlinie SR02 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

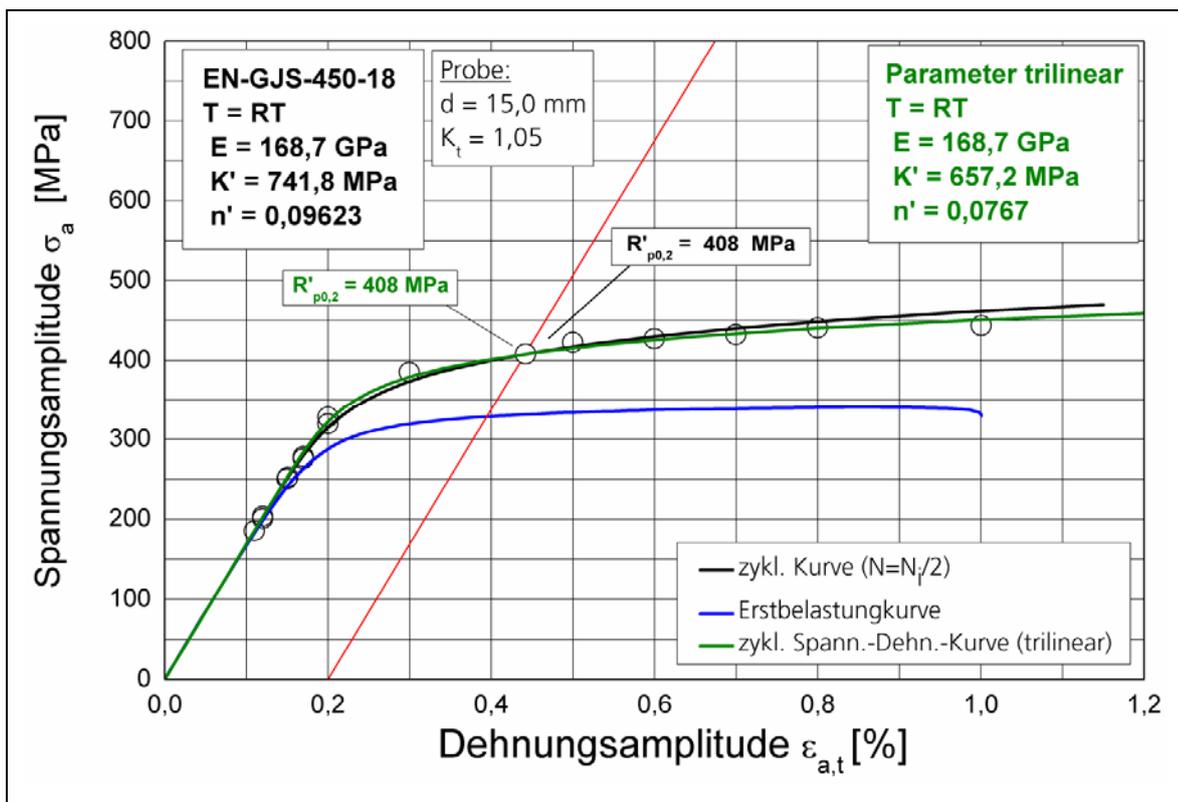


Bild B 28 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve SR02 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

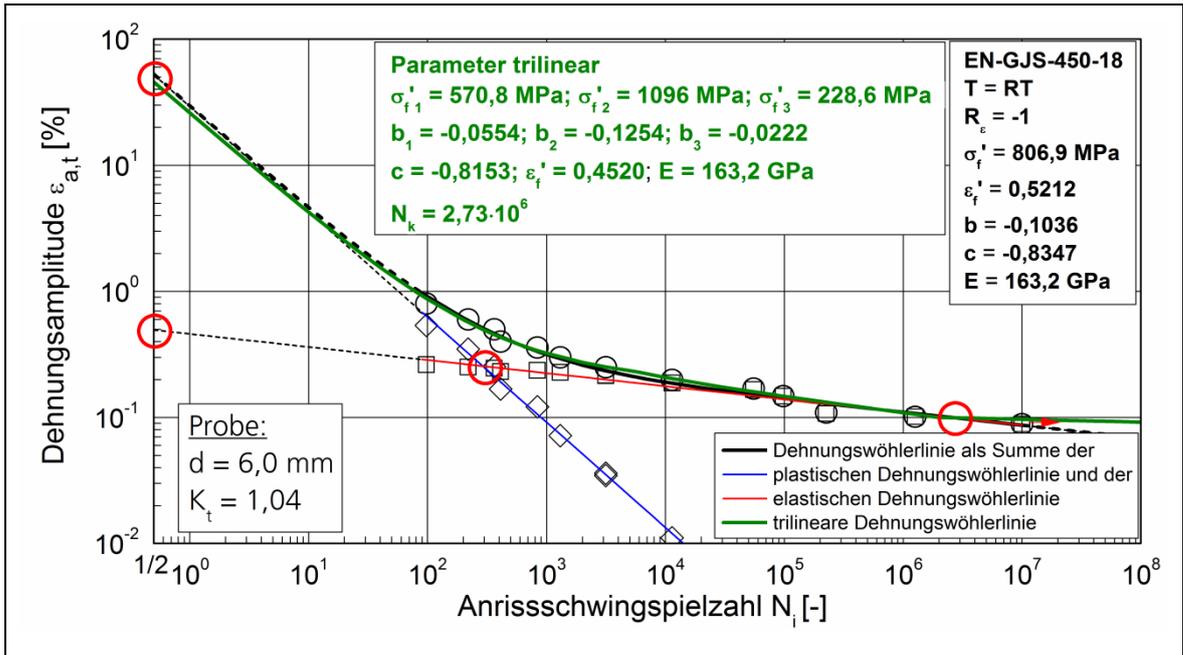


Bild B 29 Dehnungswöhlerlinie SR05 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, unгүйнзэнгүй, $R_\epsilon = -1$

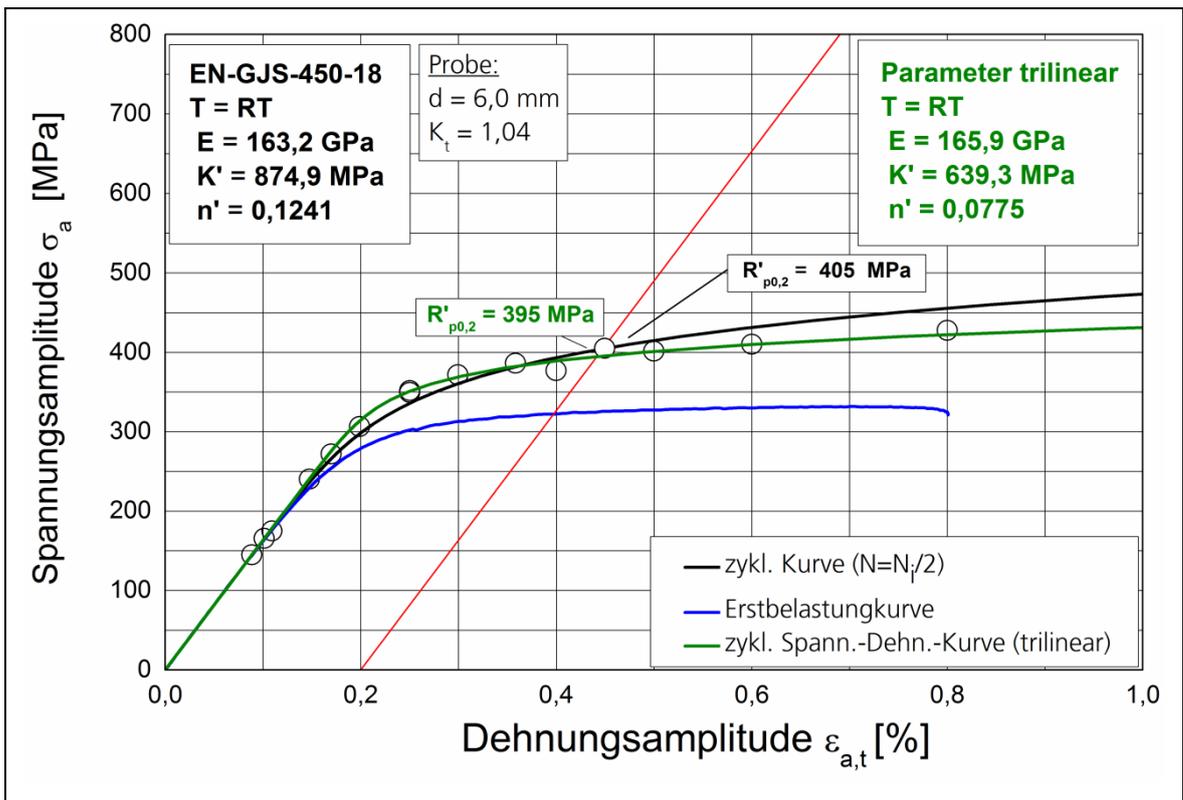


Bild B 30 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve SR05 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, unгүйнзэнгүй, $R_\epsilon = -1$

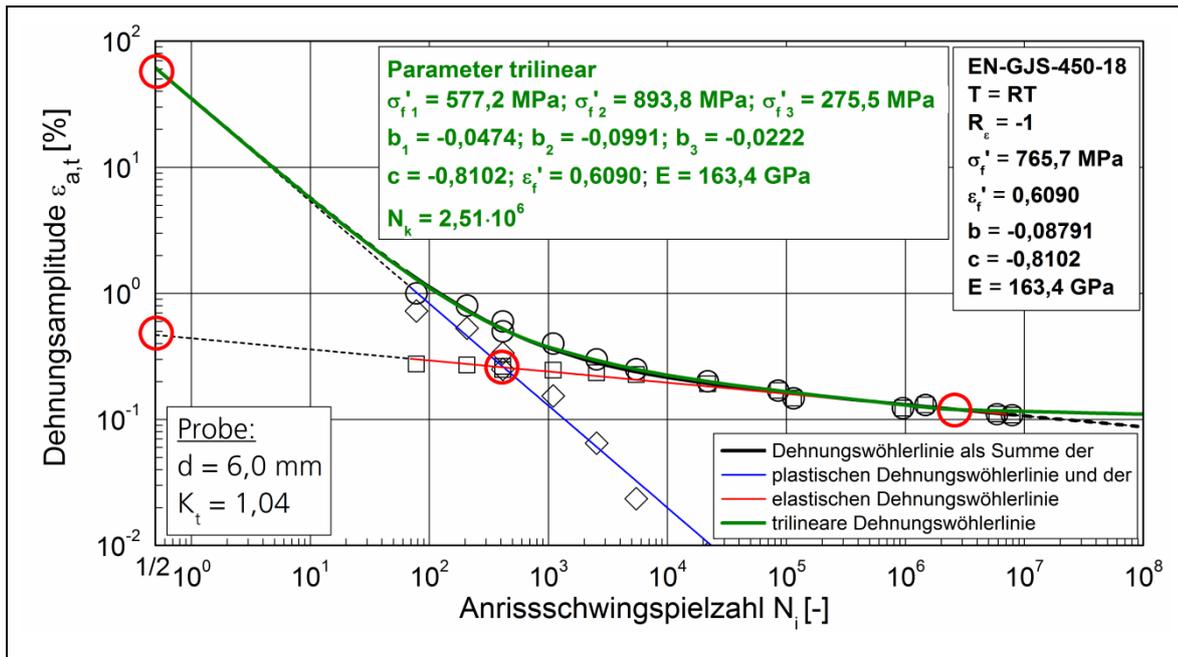


Bild B 31 Dehnungswöhlerlinie SR06 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

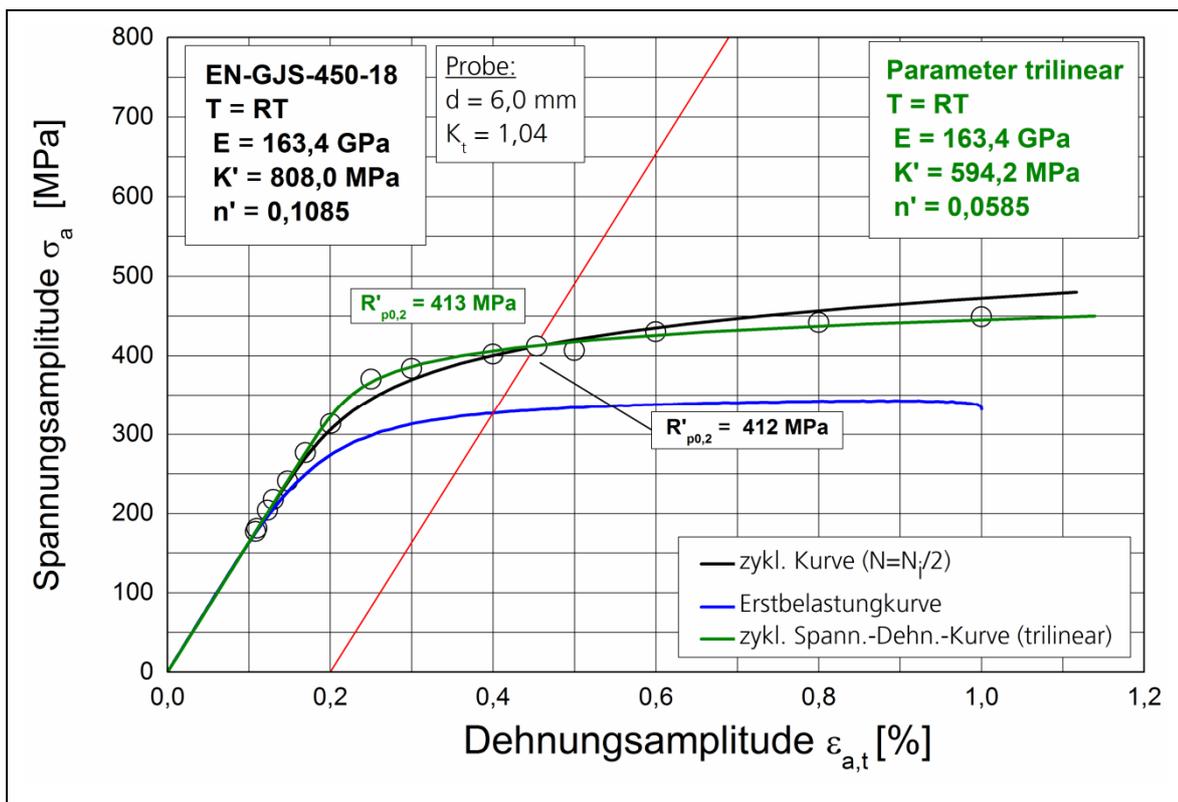


Bild B 32 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve SR06 (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

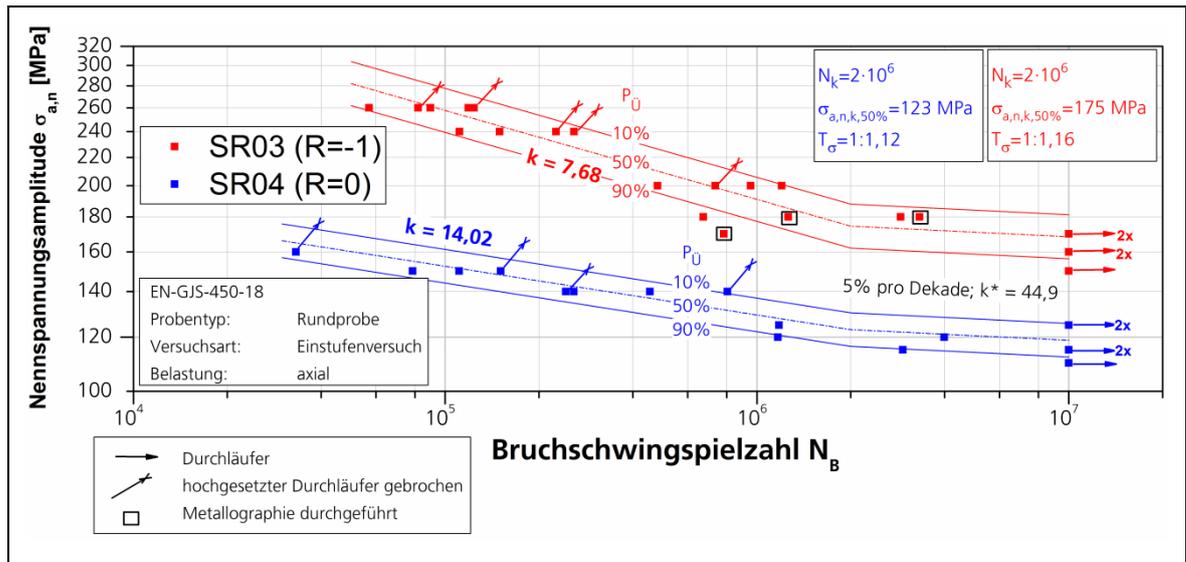


Bild B 33 Spannungswöhlerlinien SR03 ($R_{\sigma} = -1$) und SR04 ($R_{\sigma} = 0$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei

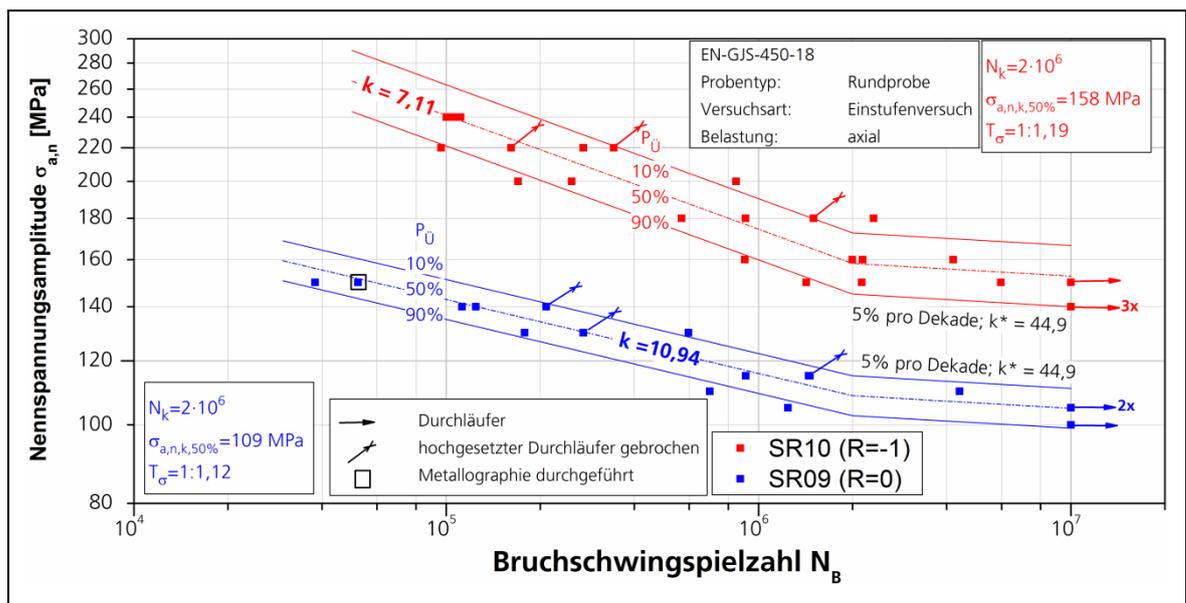
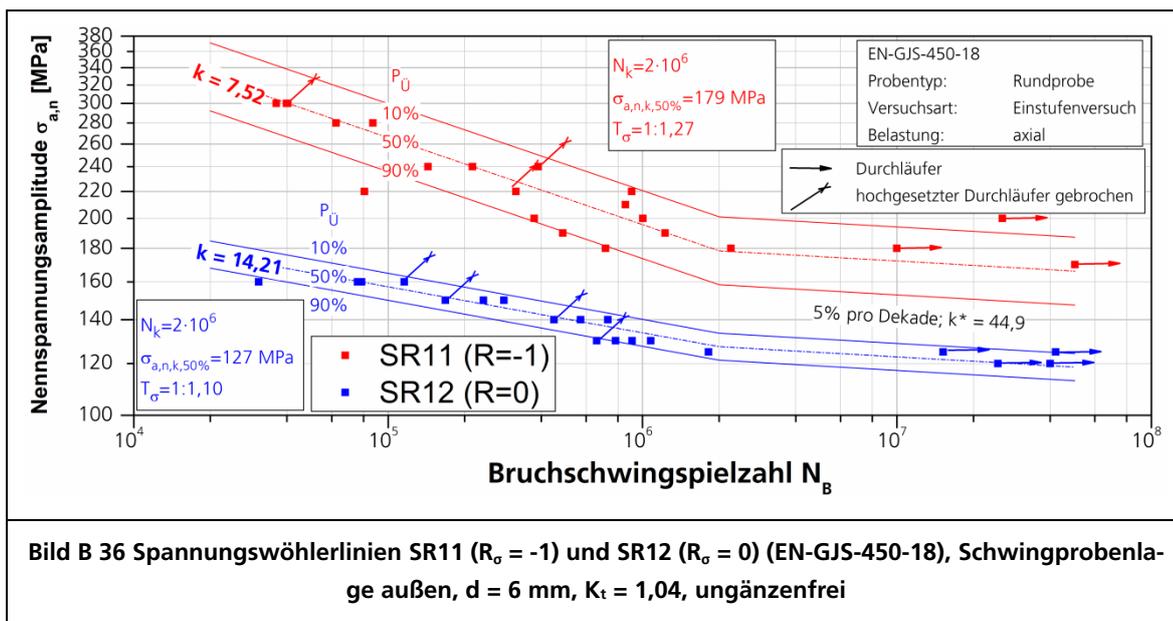
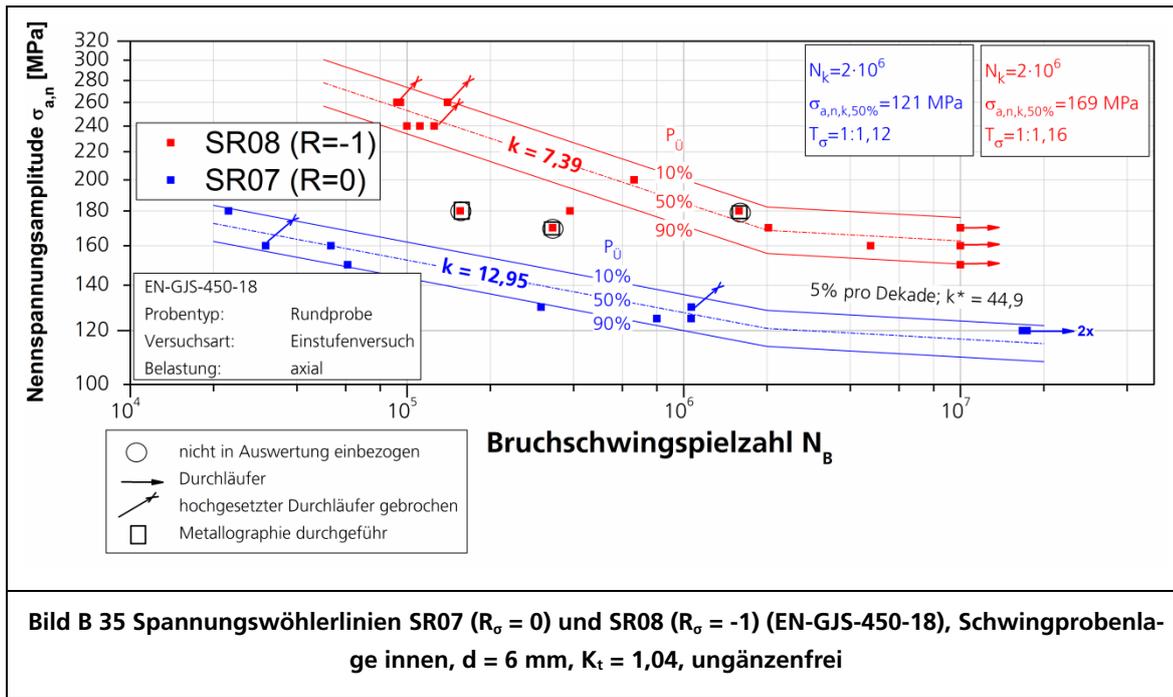


Bild B 34 Spannungswöhlerlinien SR09 ($R_{\sigma} = 0$) und SR10 ($R_{\sigma} = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei



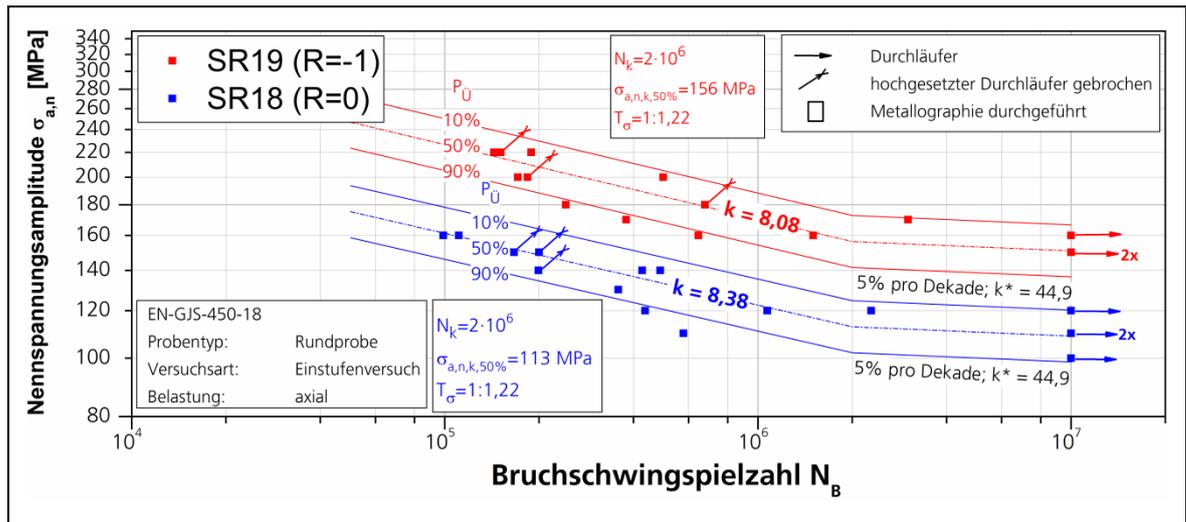


Bild B 37 Spannungswöhlerlinien SR18 ($R_\sigma = 0$) und SR19 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, $d = 6$ mm, $K_t = 1,19$, ungänzenfrei

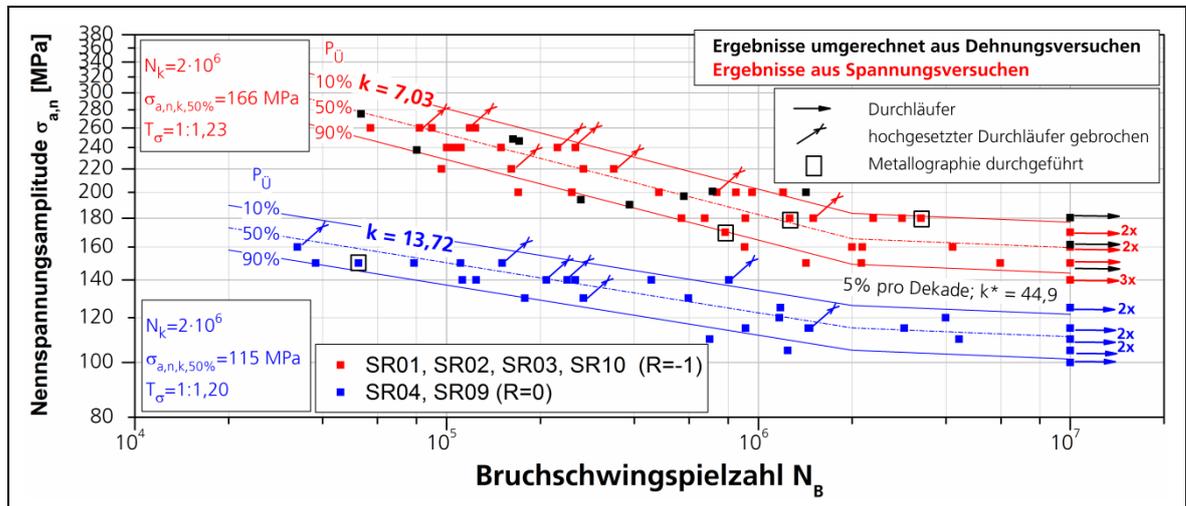


Bild B 38 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-450-18, $d = 15$ mm, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei

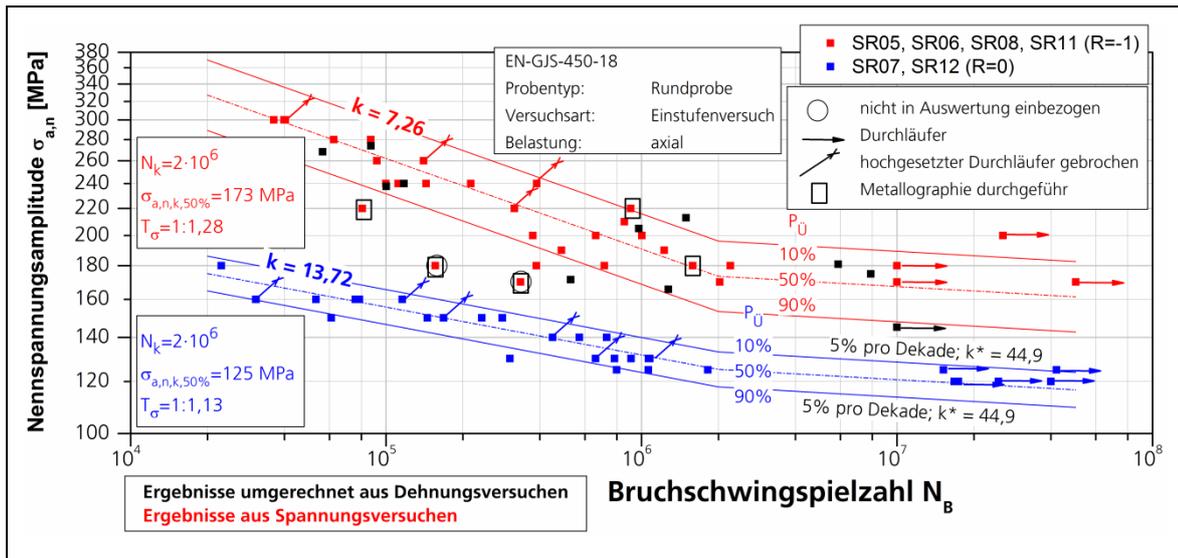


Bild B 39 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-450-18, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungesenzt

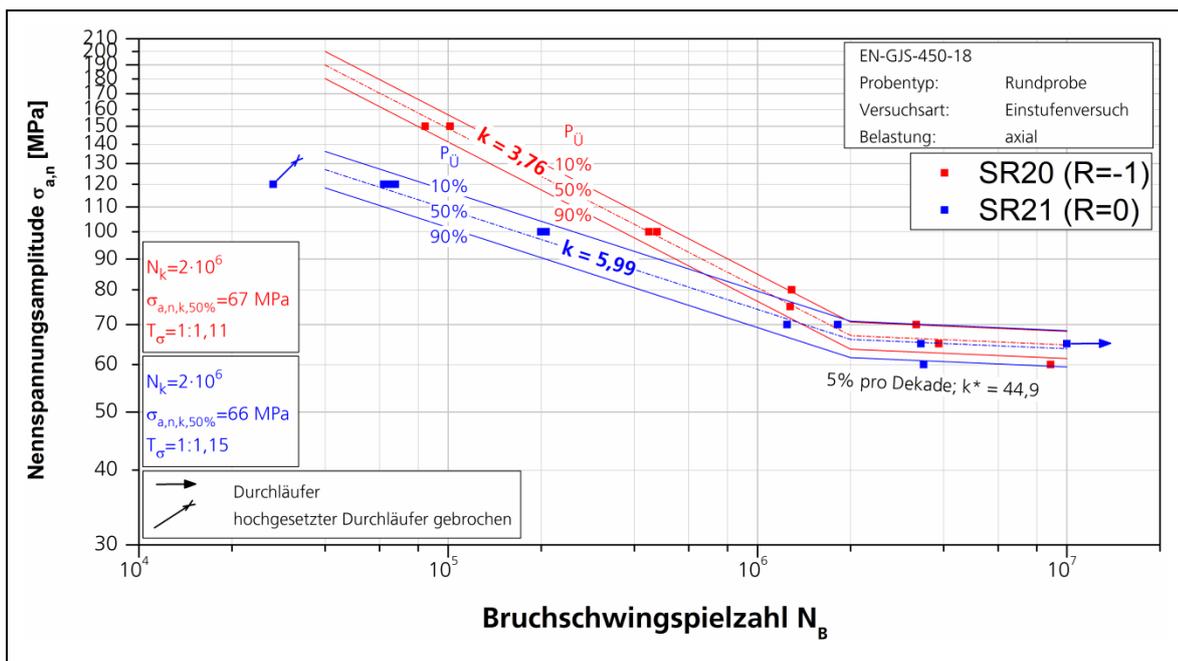


Bild B 40 Spannungswöhlerlinien SR20 ($R_{\sigma} = -1$) und SR21 ($R_{\sigma} = 0$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 4,14$, ungesenzt

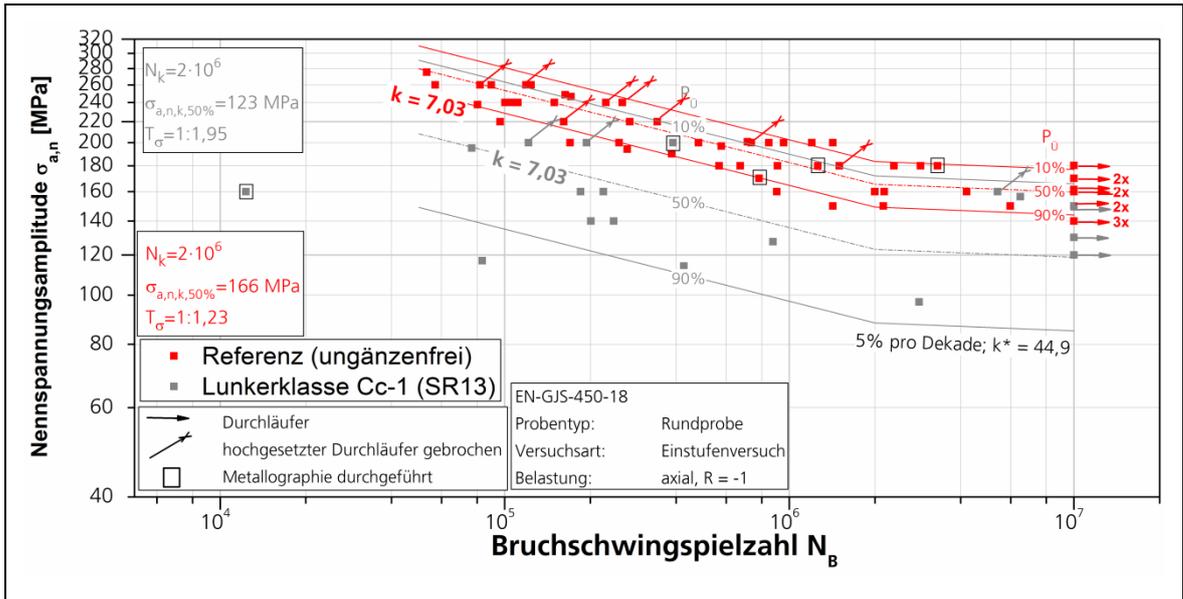


Bild B 41 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und SR13 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-1

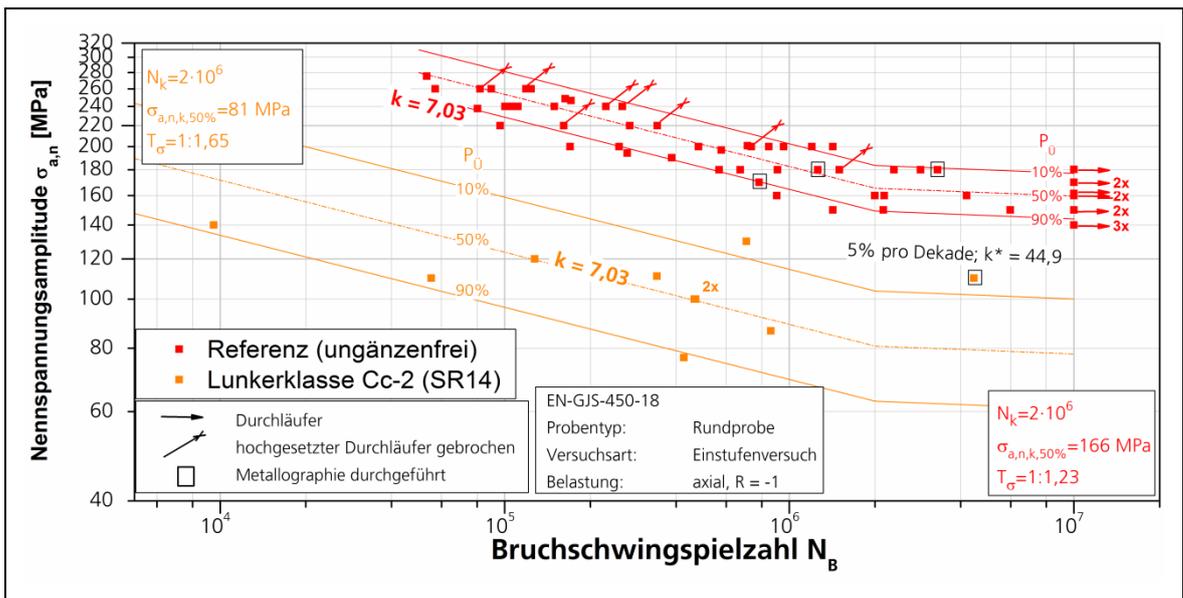


Bild B 42 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und SR14 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-2

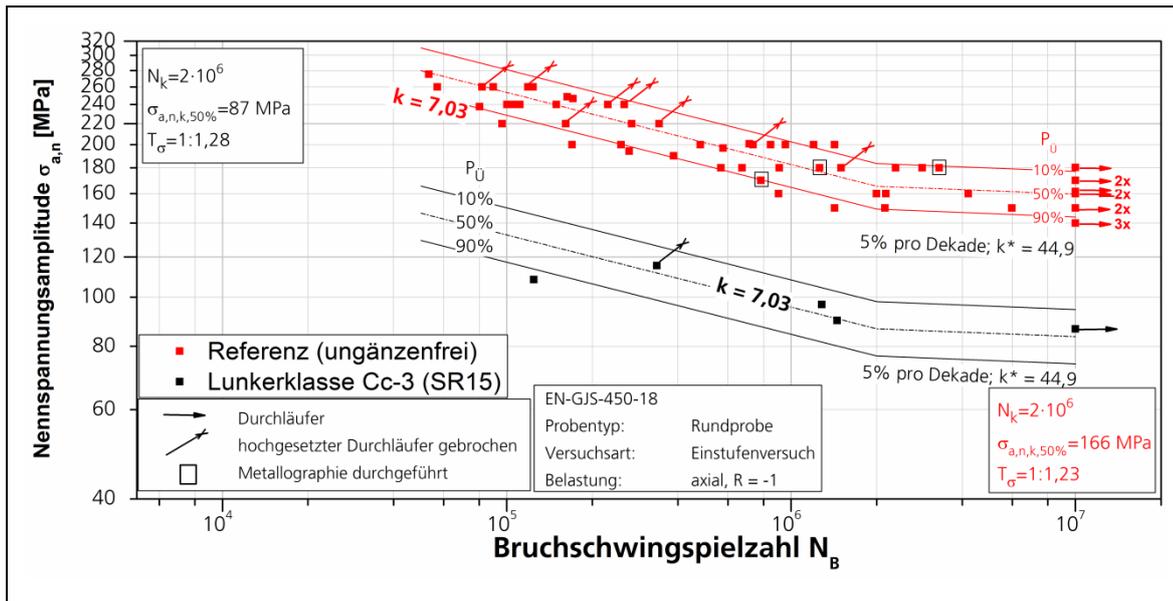


Bild B 43 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und SR15 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-3

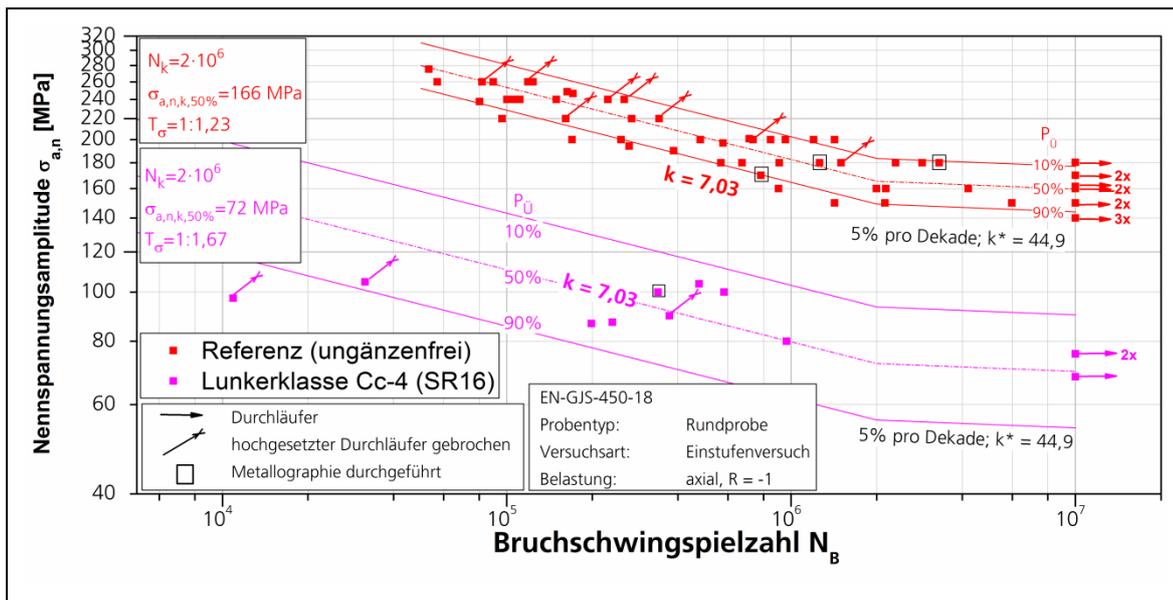


Bild B 44 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und SR16 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-4

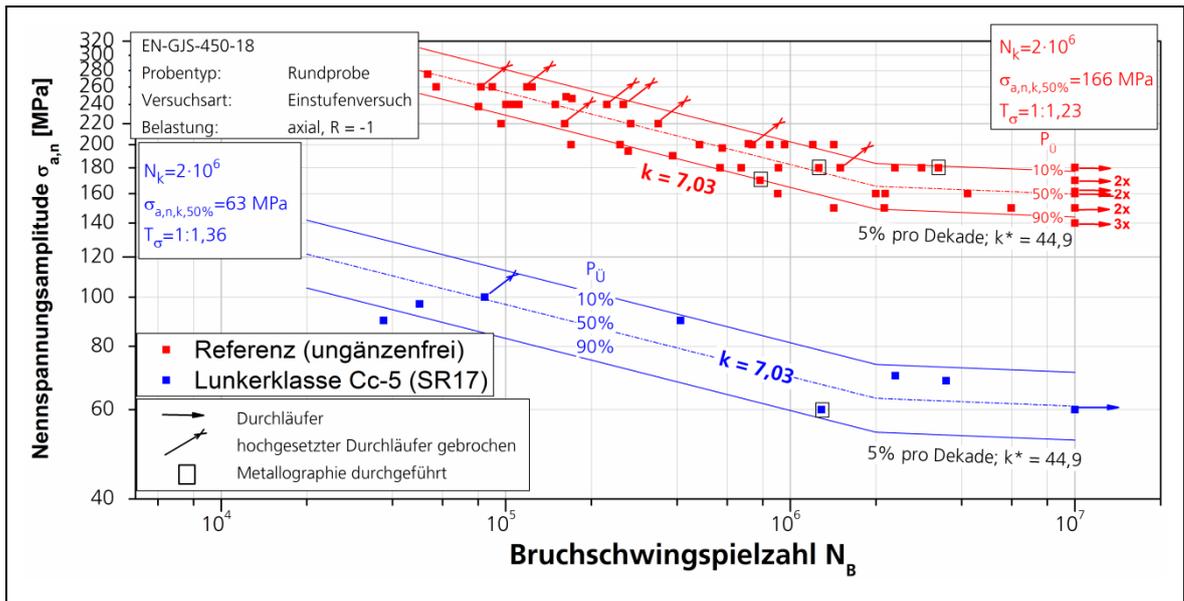
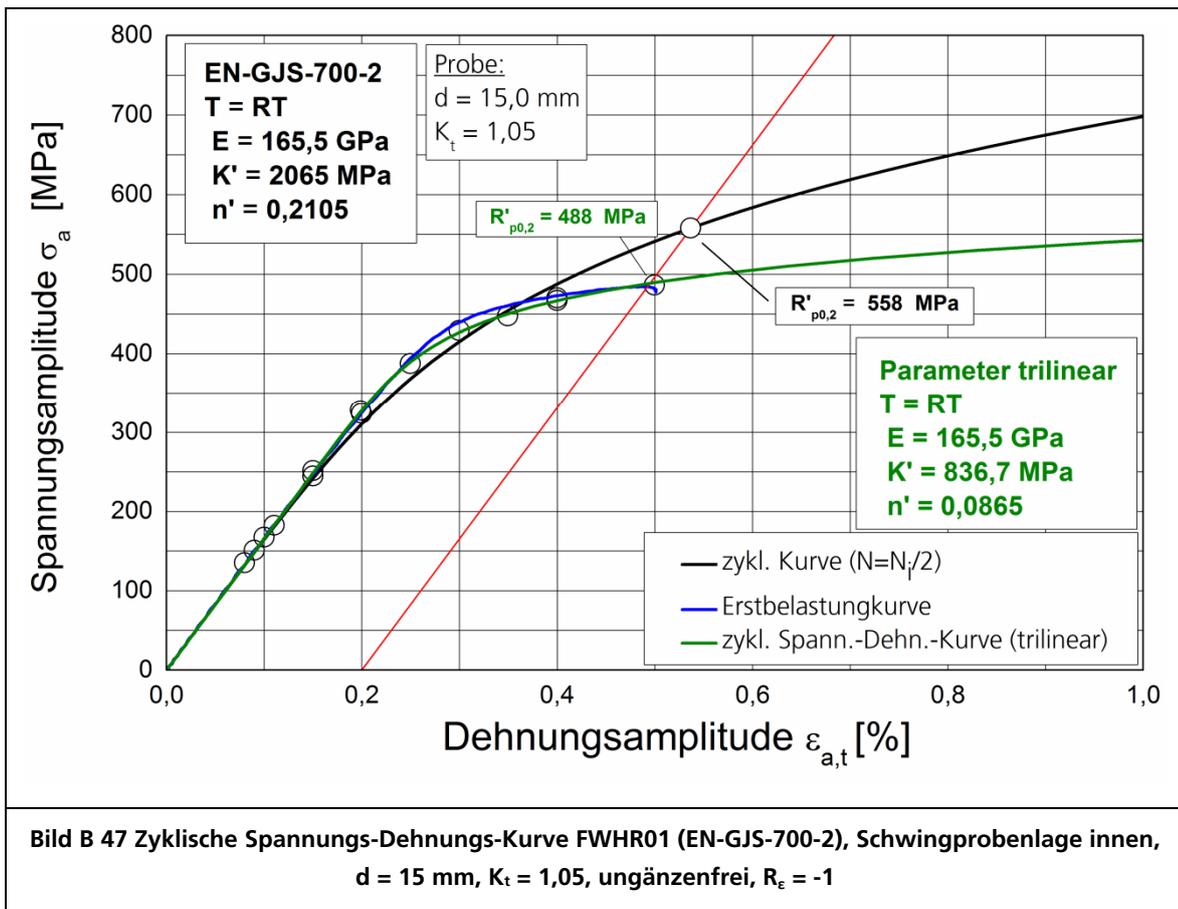
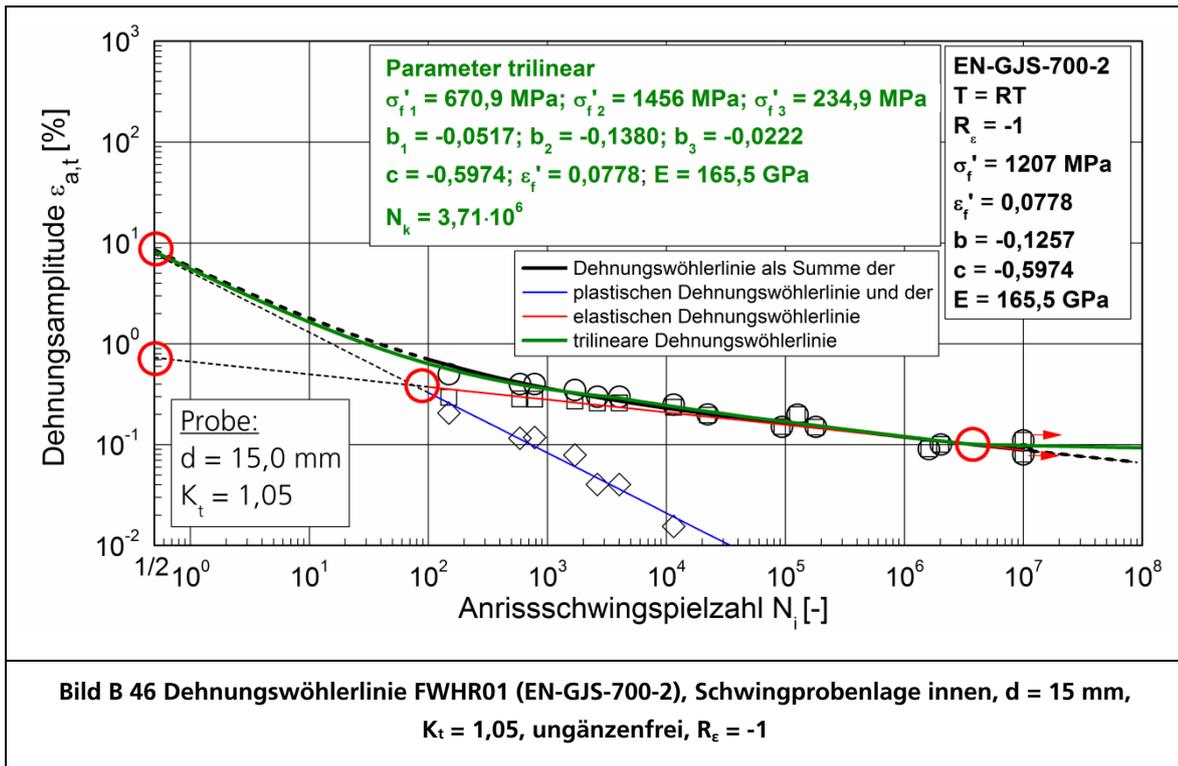


Bild B 45 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und SR17 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-450-18), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-5



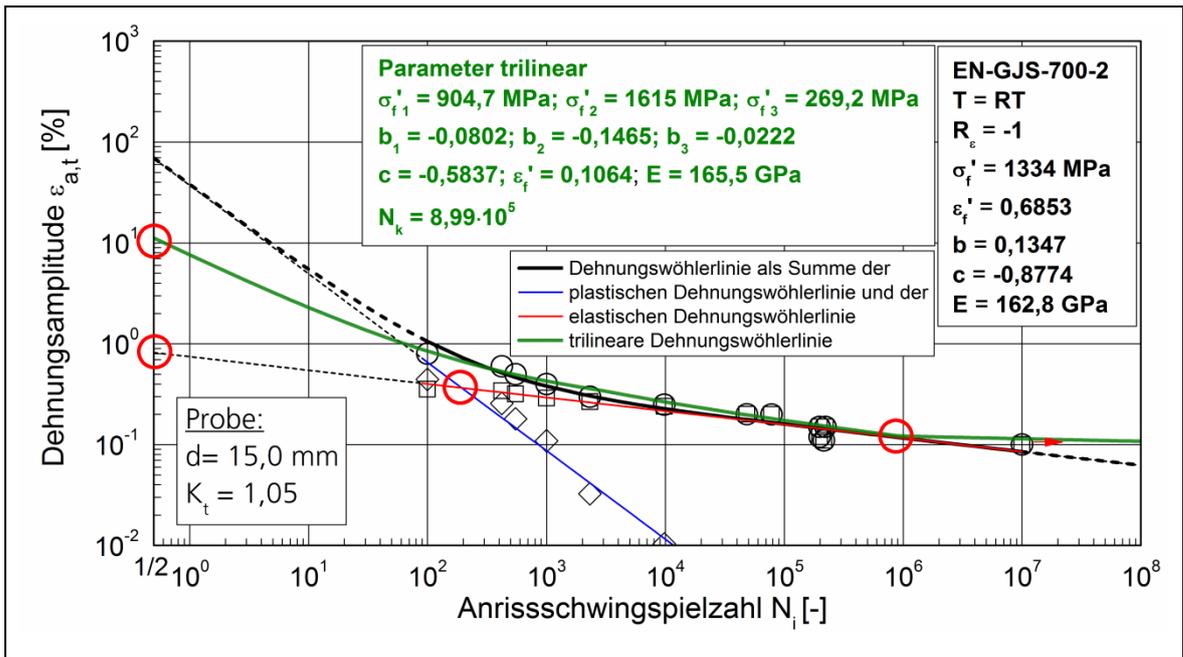


Bild B 48 Dehnungswöhlerlinie FWHR02 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_ε = -1

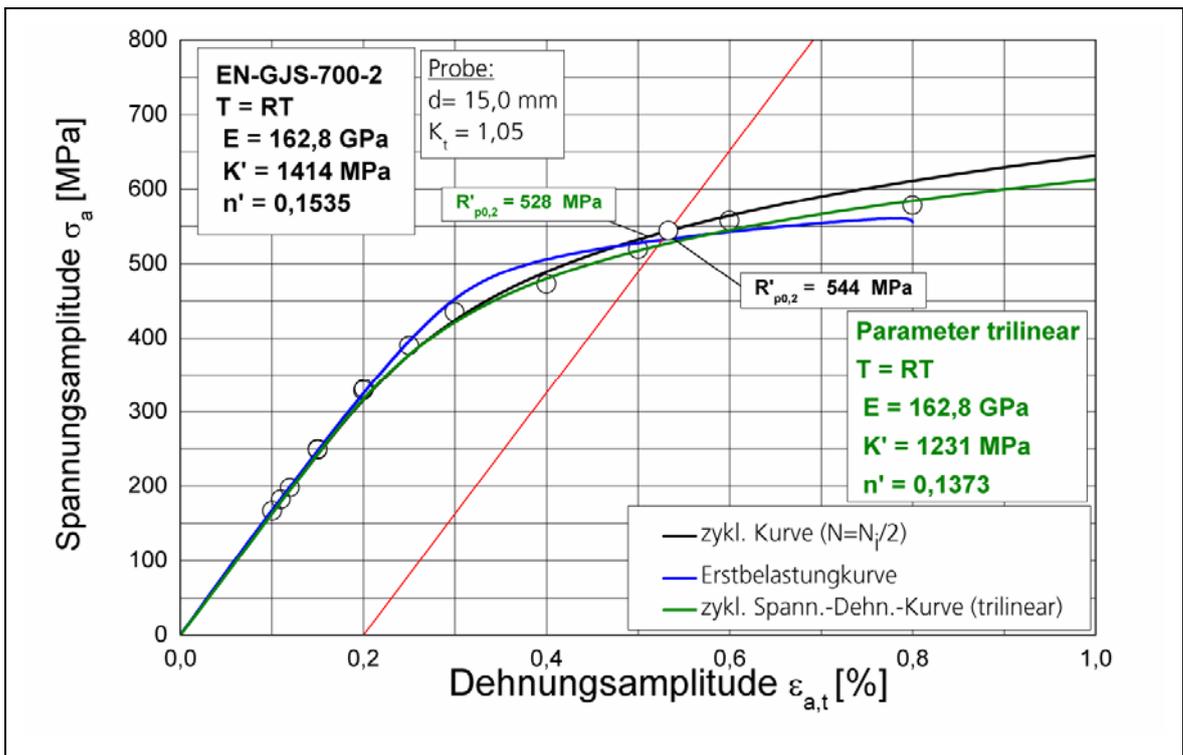


Bild B 49 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve FWHR02 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei, R_ε = -1

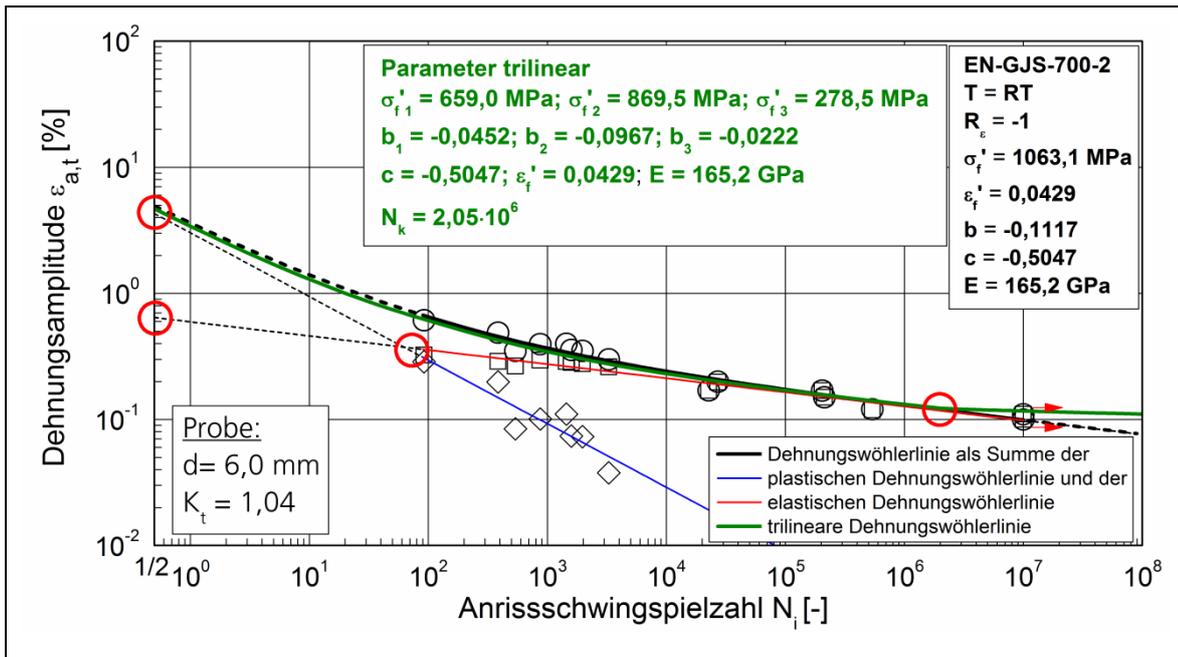


Bild B 50 Dehnungswöhlerlinie FWHR05 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

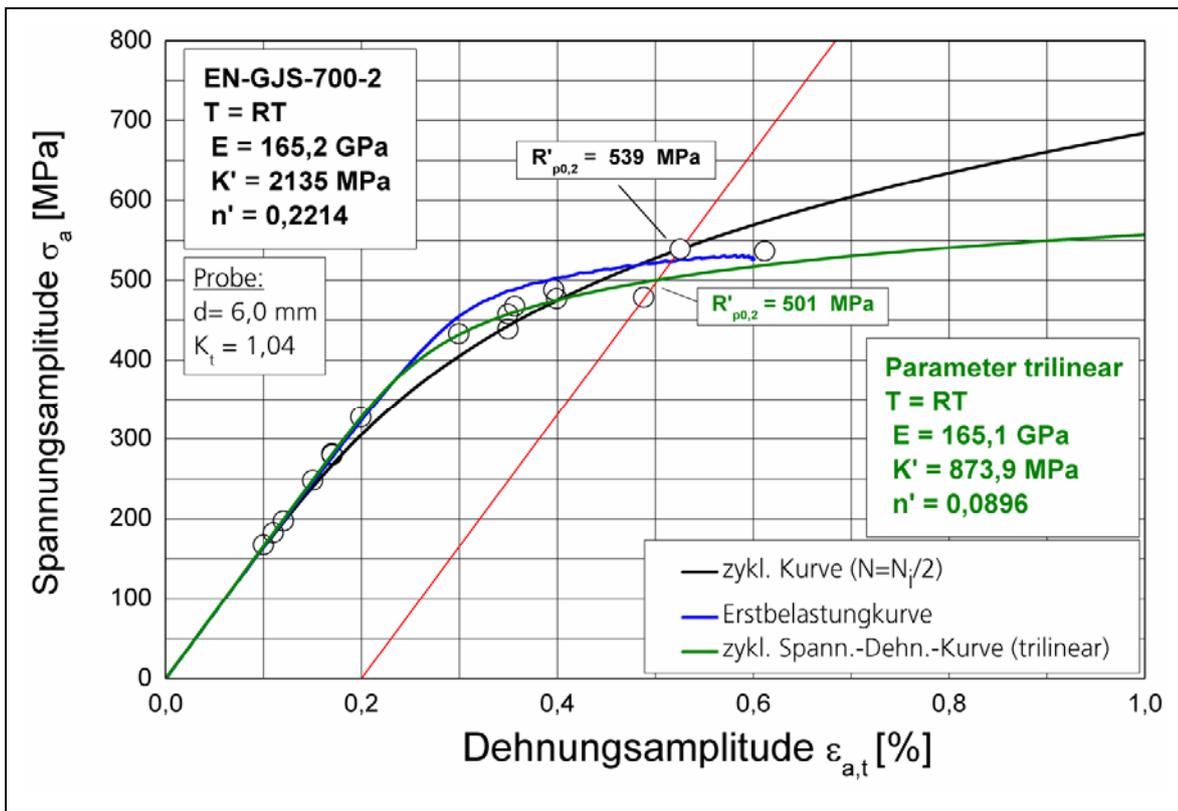


Bild B 51 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve FWHR05 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\epsilon = -1$

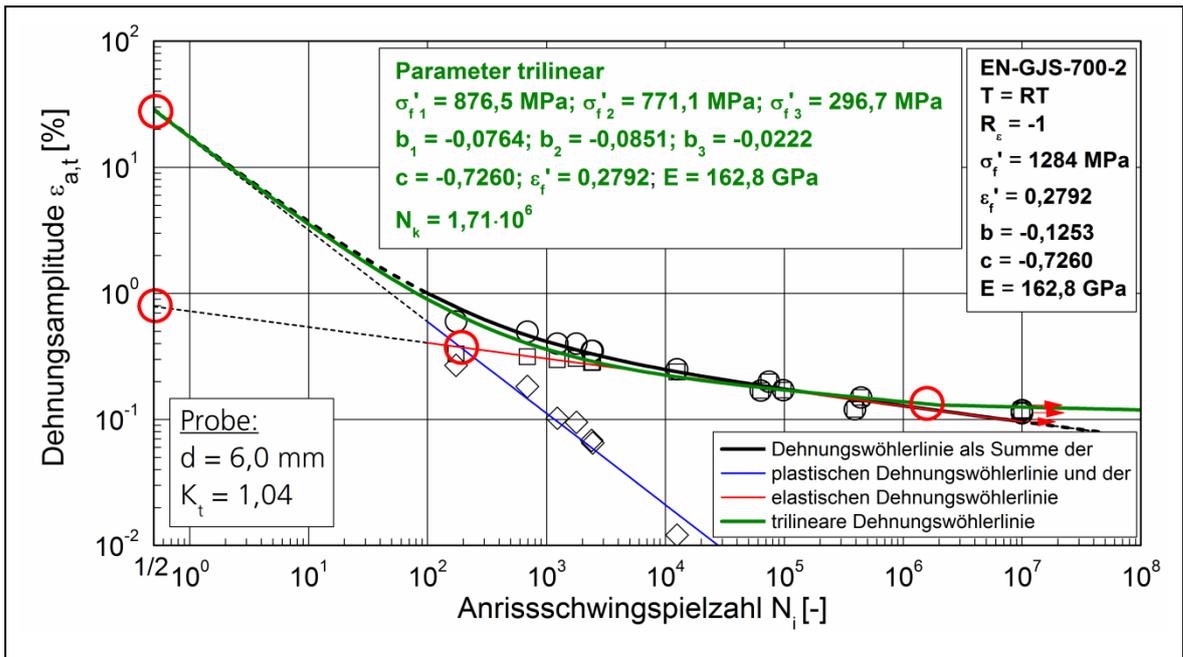


Bild B 52 Dehnungswöhlerlinie FWHR06 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\varepsilon = -1$

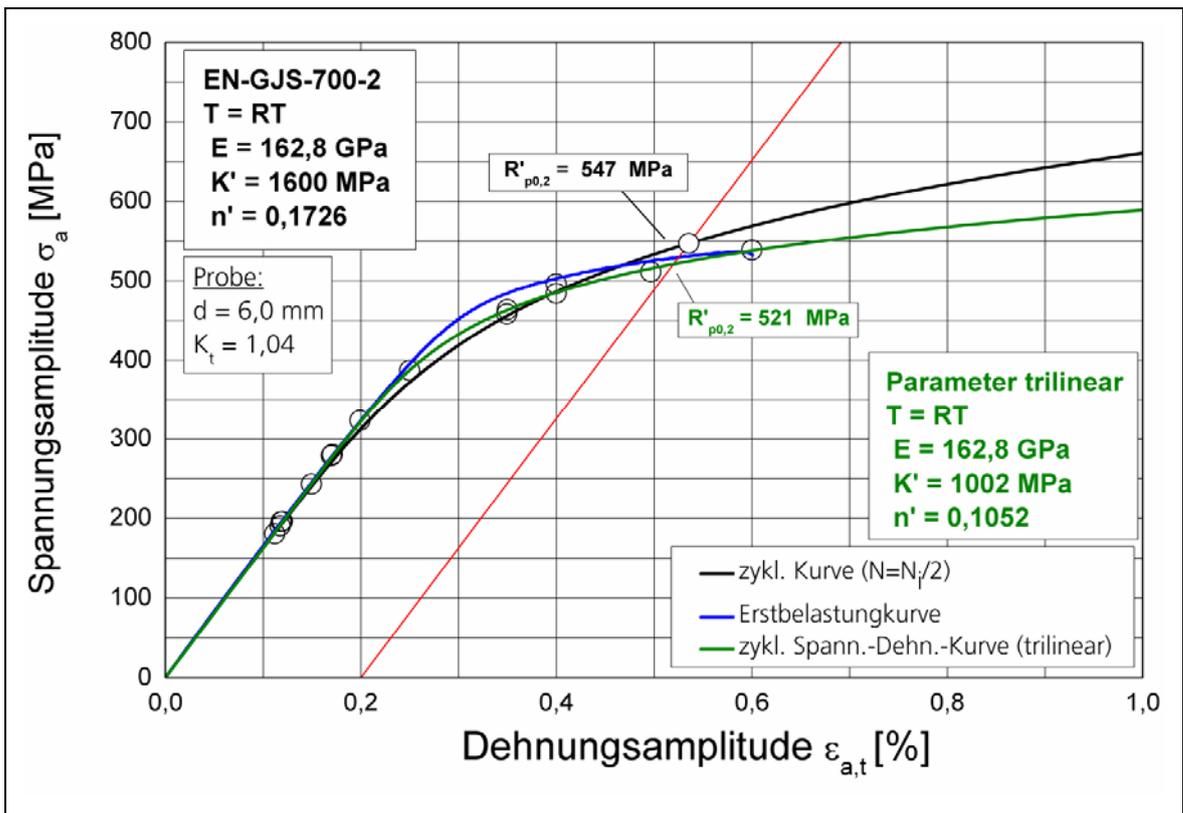


Bild B 53 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve FWHR06 (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei, $R_\varepsilon = -1$

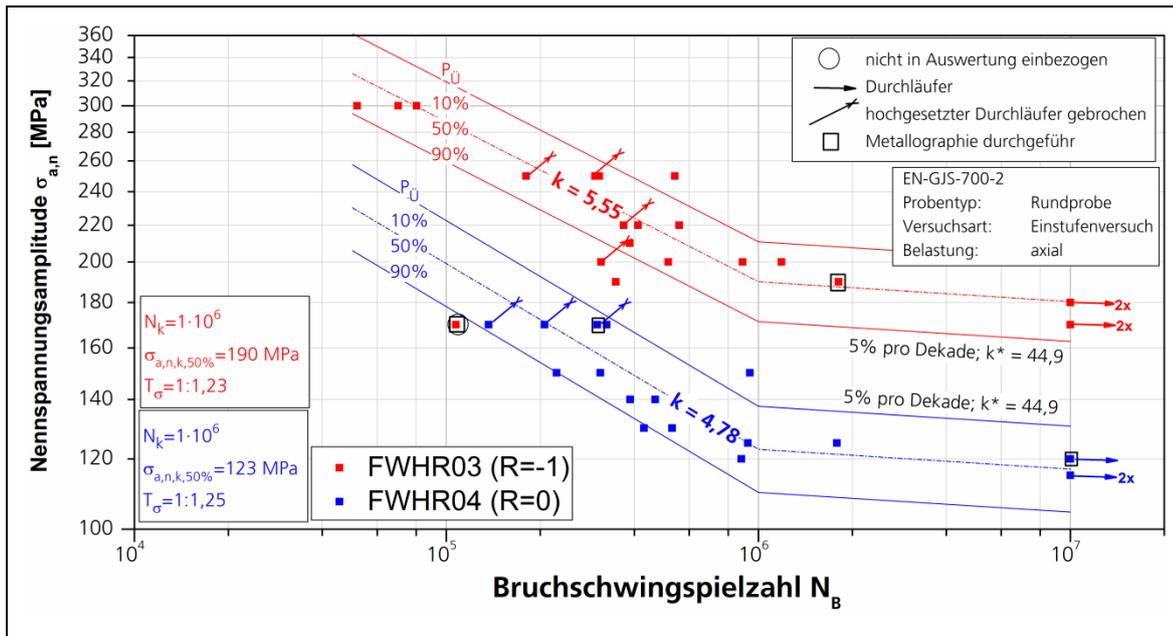


Bild B 54 Spannungswöhlerlinien FWHR03 (R_σ = -1) und FWHR04 (R_σ = 0) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 15 mm, K_t = 1,05, ungänzenfrei

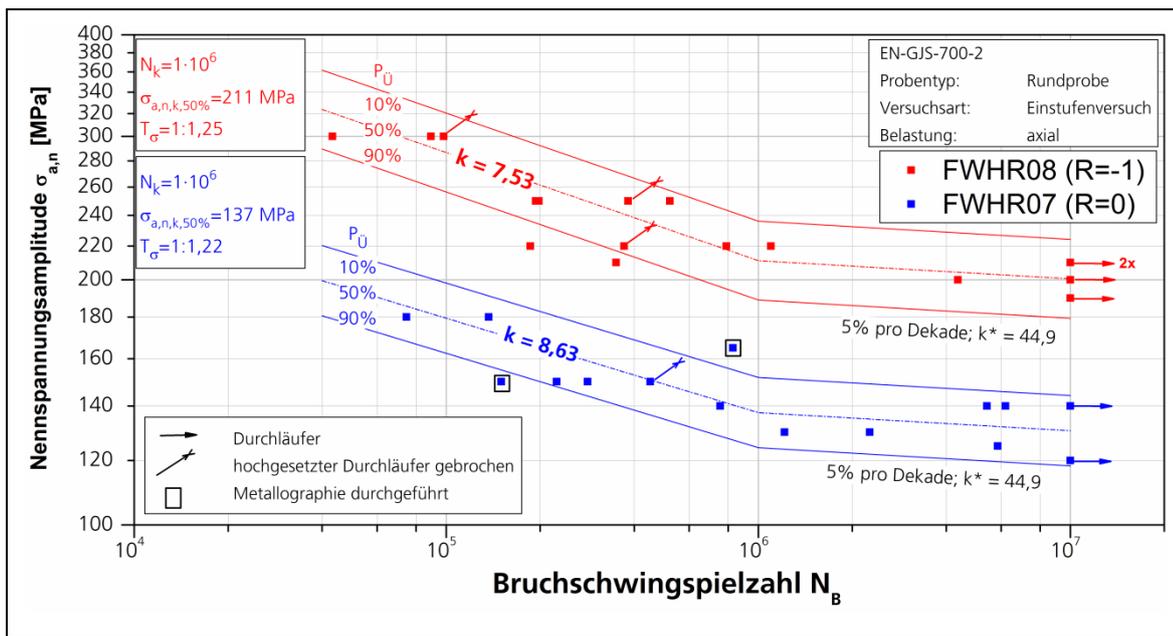


Bild B 55 Spannungswöhlerlinien FWHR08 (R_σ = -1) und FWHR07 (R_σ = 0) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, d = 6 mm, K_t = 1,04, ungänzenfrei

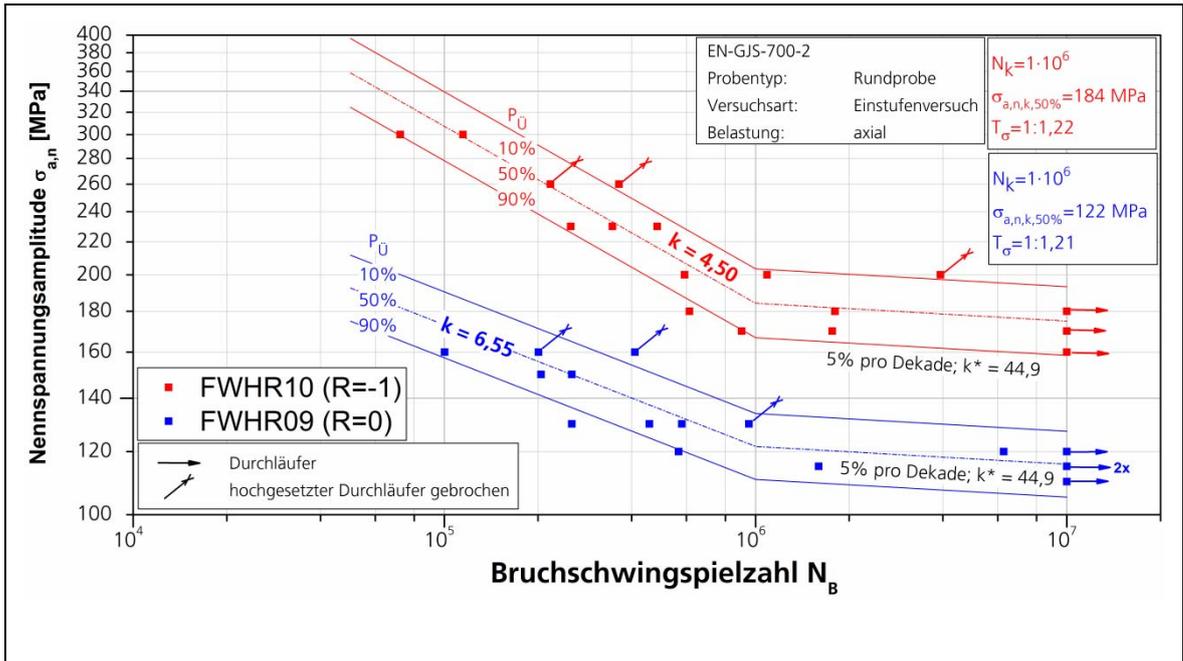


Bild B 56 Spannungswöhlerlinien FWHR09 ($R_0 = 0$) und FWHR10 ($R_0 = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, ungänzenfrei

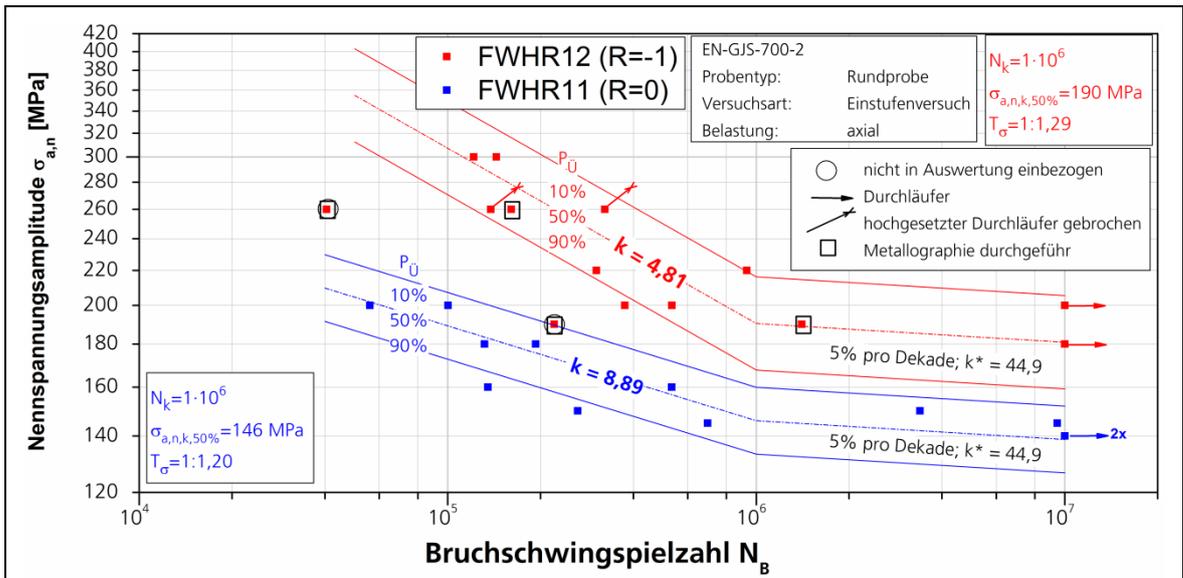


Bild B 57 Spannungswöhlerlinien FWHR11 ($R_0 = 0$) und FWHR12 ($R_0 = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,04$, ungänzenfrei

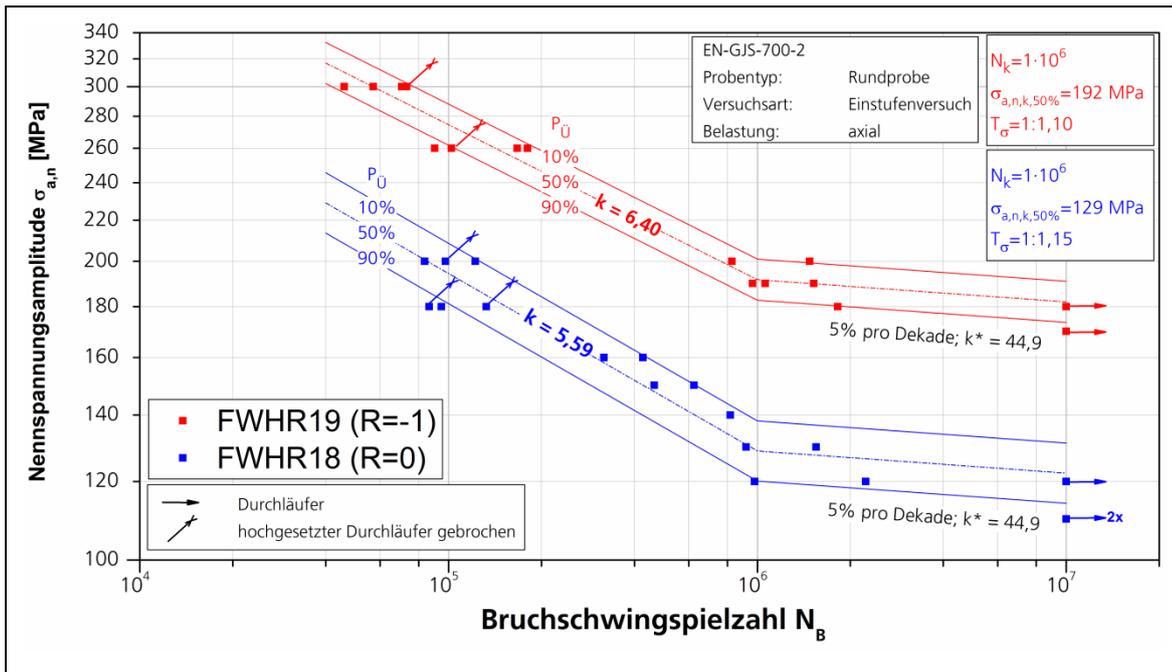


Bild B 58 Spannungswöhlerlinien FWHR18 ($R_\sigma = 0$) und FWHR19 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, $d = 6 \text{ mm}$, $K_t = 1,19$, unglänzenfrei

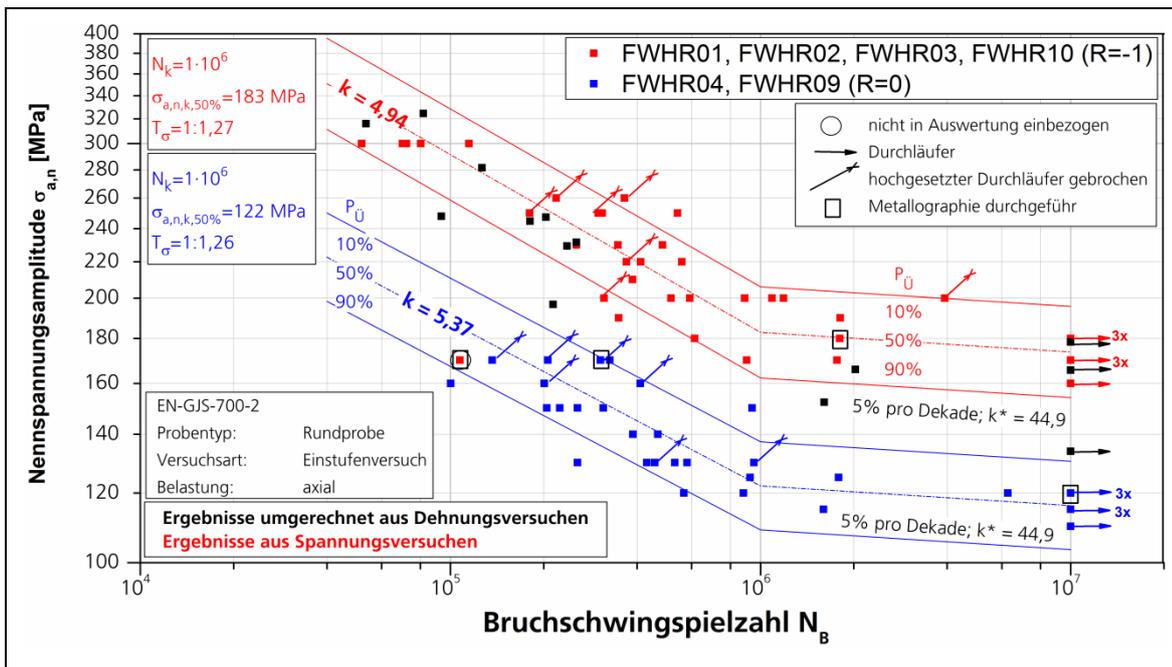


Bild B 59 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-700-2, $d = 15 \text{ mm}$, $K_t = 1,05$, unglänzenfrei

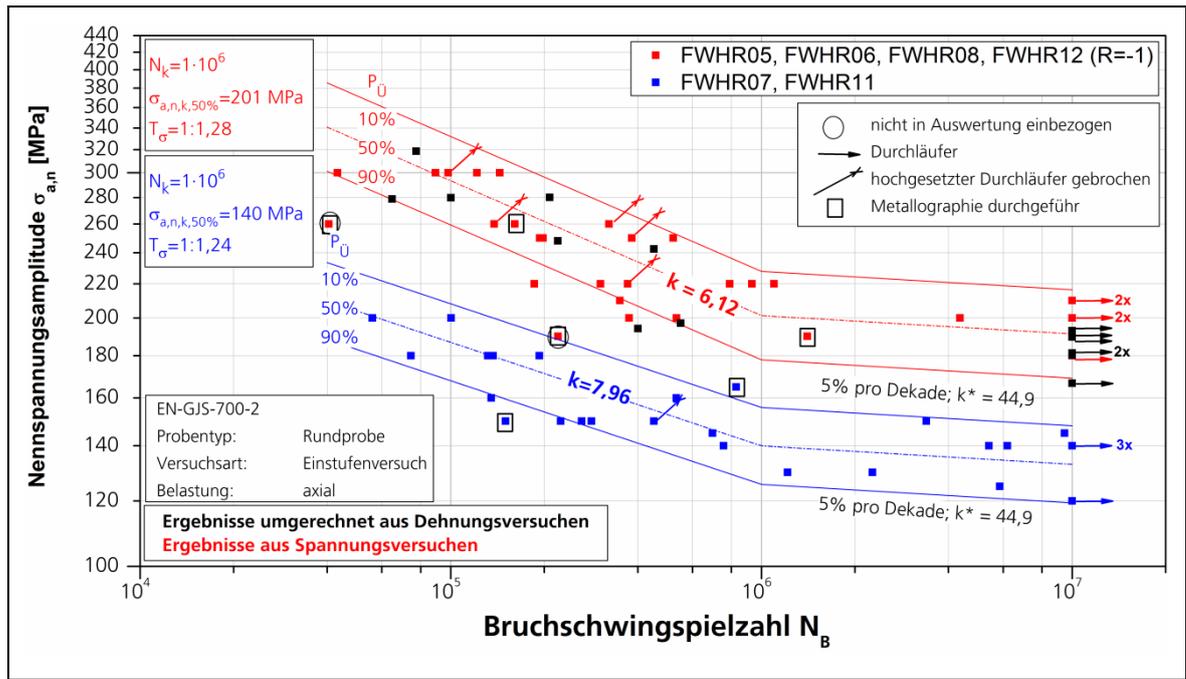


Bild B 60 Spannungswöhlerlinie aus den zusammengefassten Einzelversuchsreihen für Schwingprobenlage innen und außen und den aus den dehnungsgeregelten Versuchen umgerechneten Einzelversuchspunkten für den EN-GJS-700-2, d = 6 mm, $K_t = 1,04$, unguenzenfrei

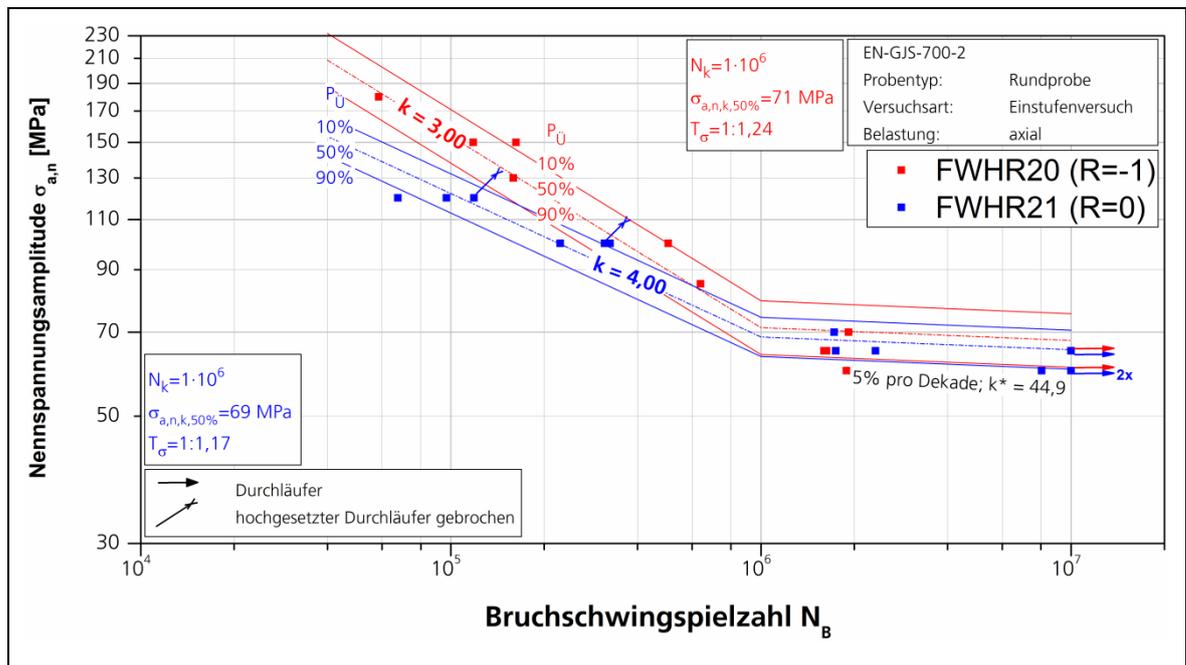


Bild B 61 Spannungswöhlerlinien FWHR20 ($R_o = -1$) und FWHR21 ($R_o = 0$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage außen, d = 6 mm, $K_t = 4,14$, unguenzenfrei

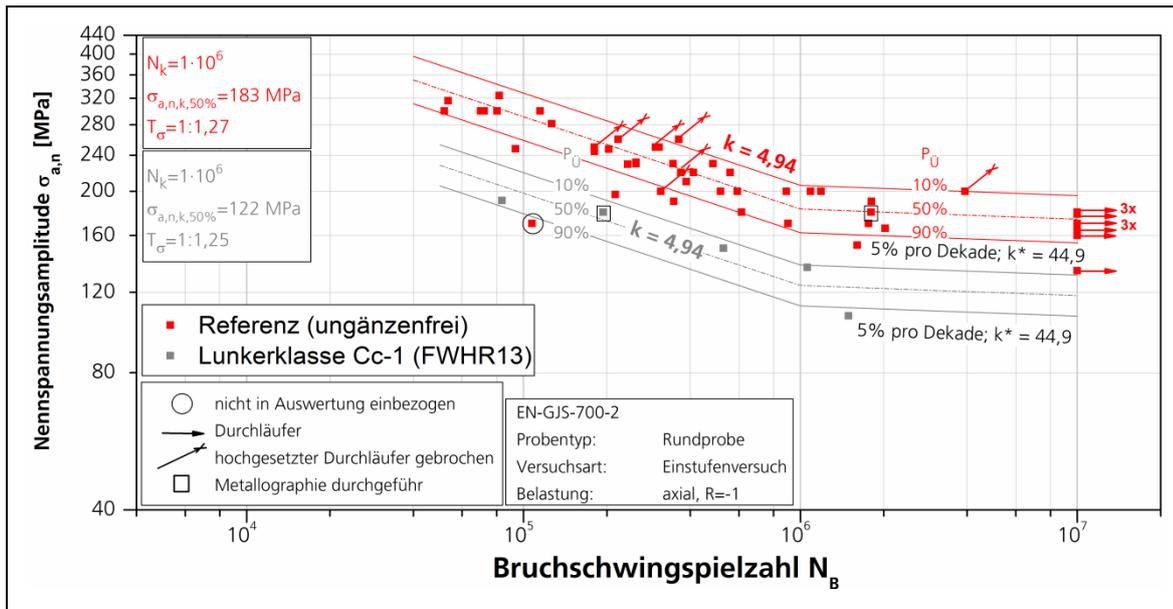


Bild B 62 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und FWHR13 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-1

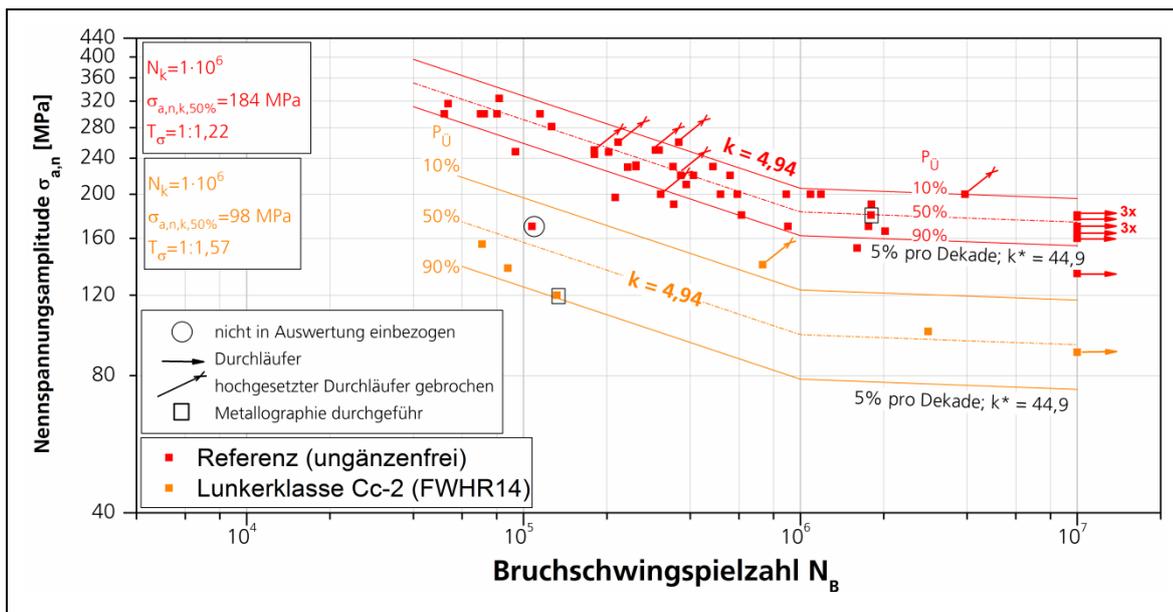


Bild B 63 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_\sigma = -1$) und FWHR14 ($R_\sigma = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, Lunckerklasse Cc-2

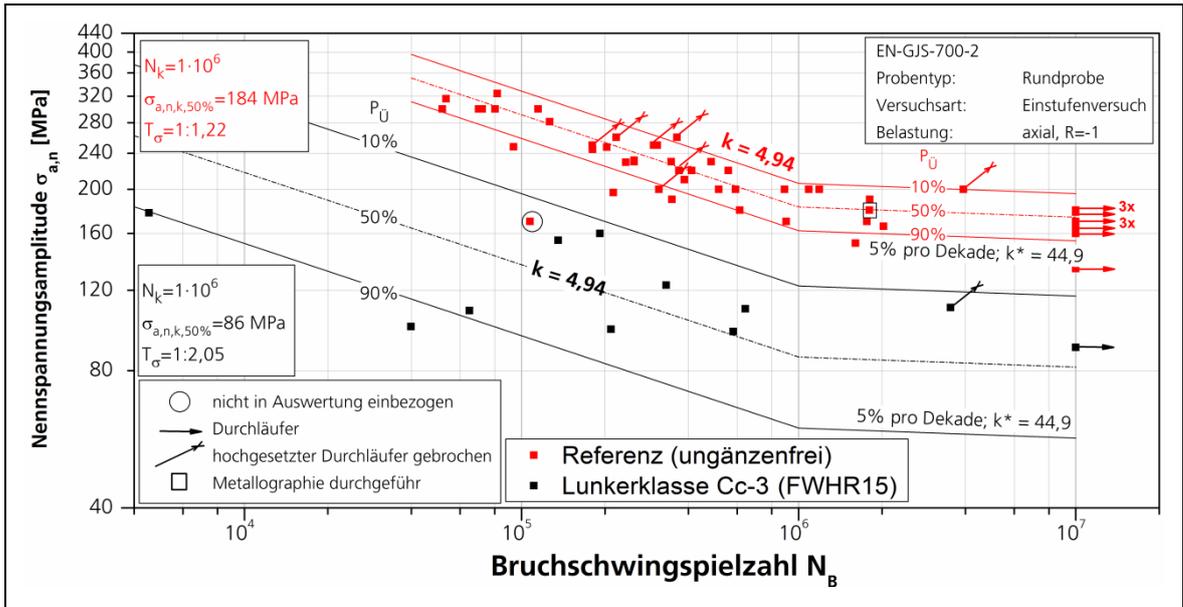


Bild B 64 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, (R_σ = -1) und FWHR15 (R_σ = -1) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-3

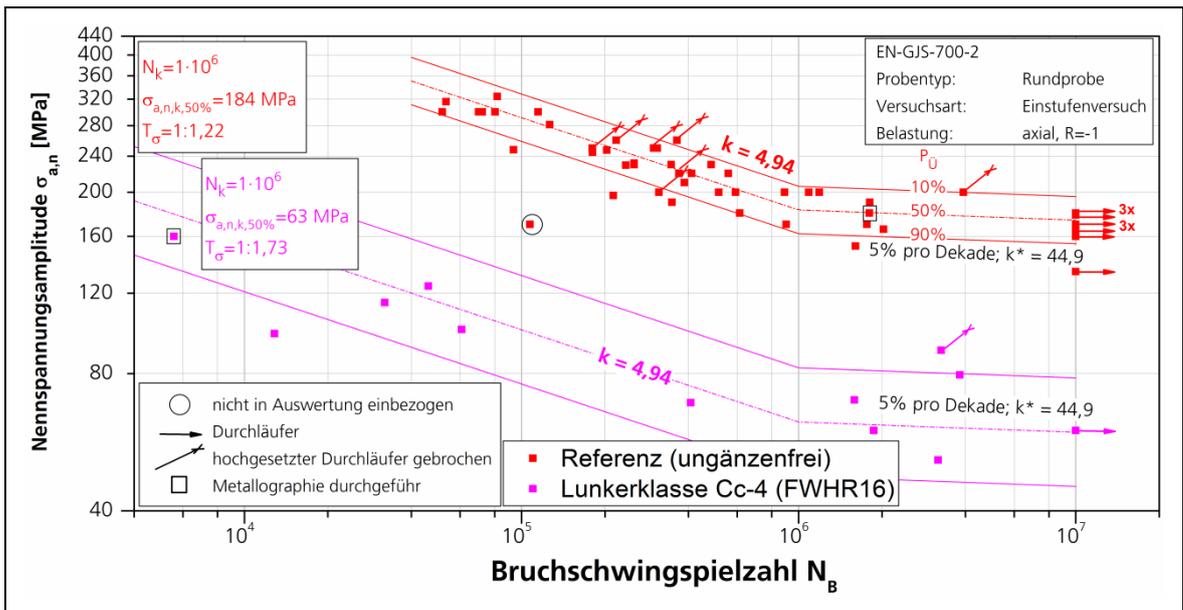


Bild B 65 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, (R_σ = -1) und FWHR16 (R_σ = -1) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-4

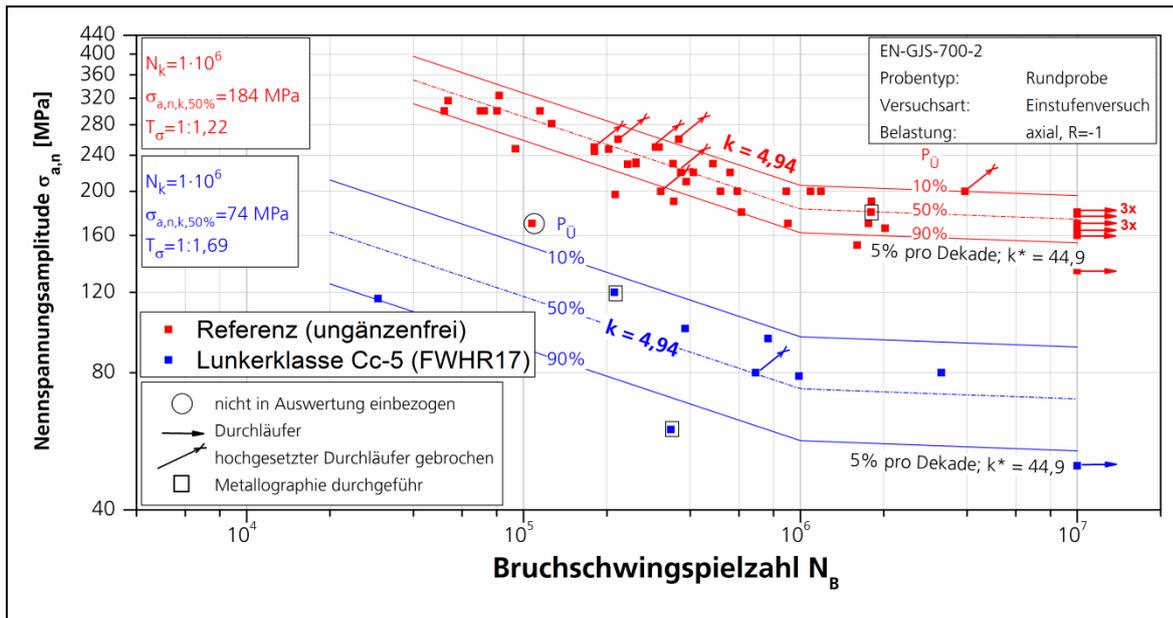


Bild B 66 Spannungswöhlerlinien, d = 15 mm, ungänzenfrei, ($R_{\sigma} = -1$) und FWHR17 ($R_{\sigma} = -1$) (EN-GJS-700-2), Schwingprobenlage innen, Lunkerklasse Cc-5

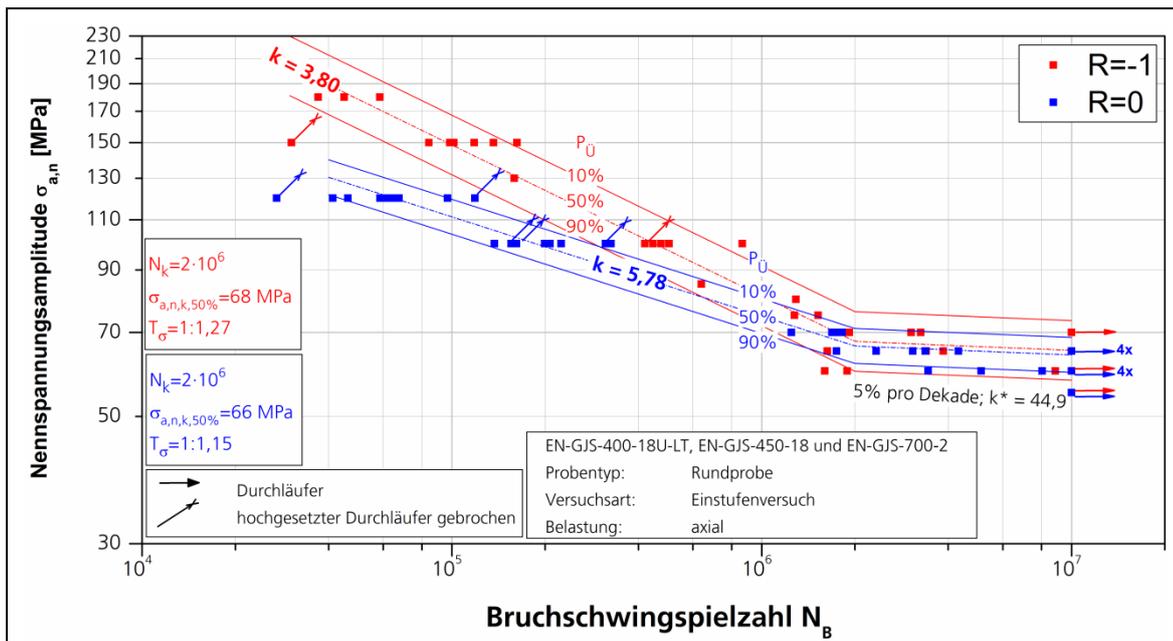
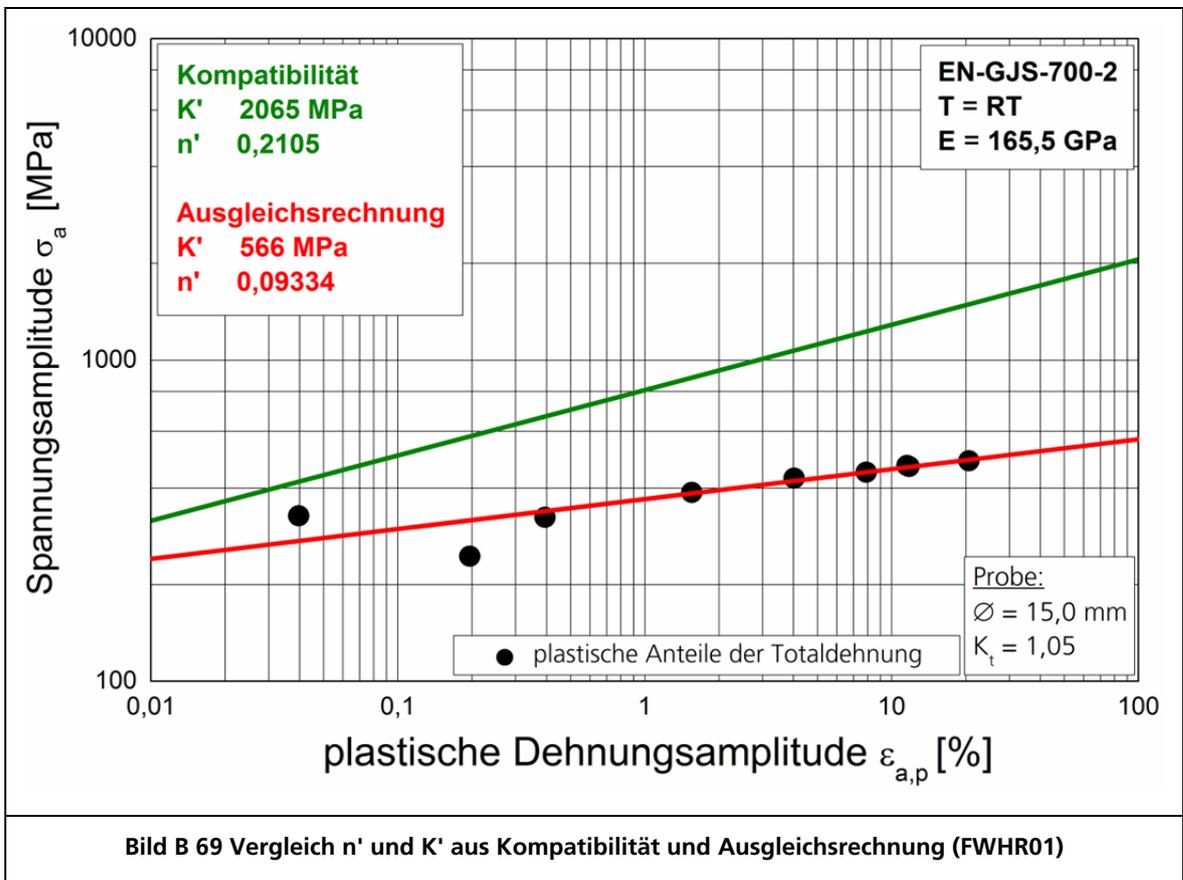
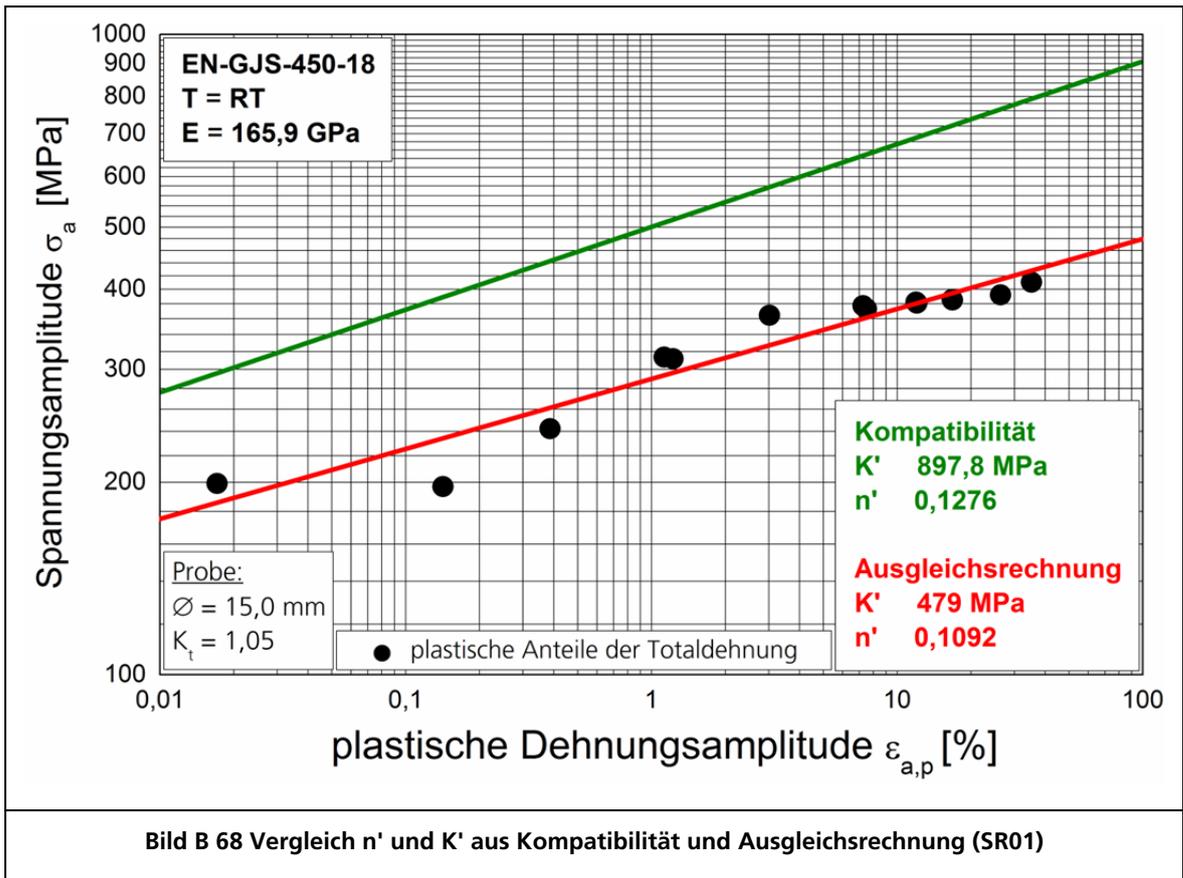
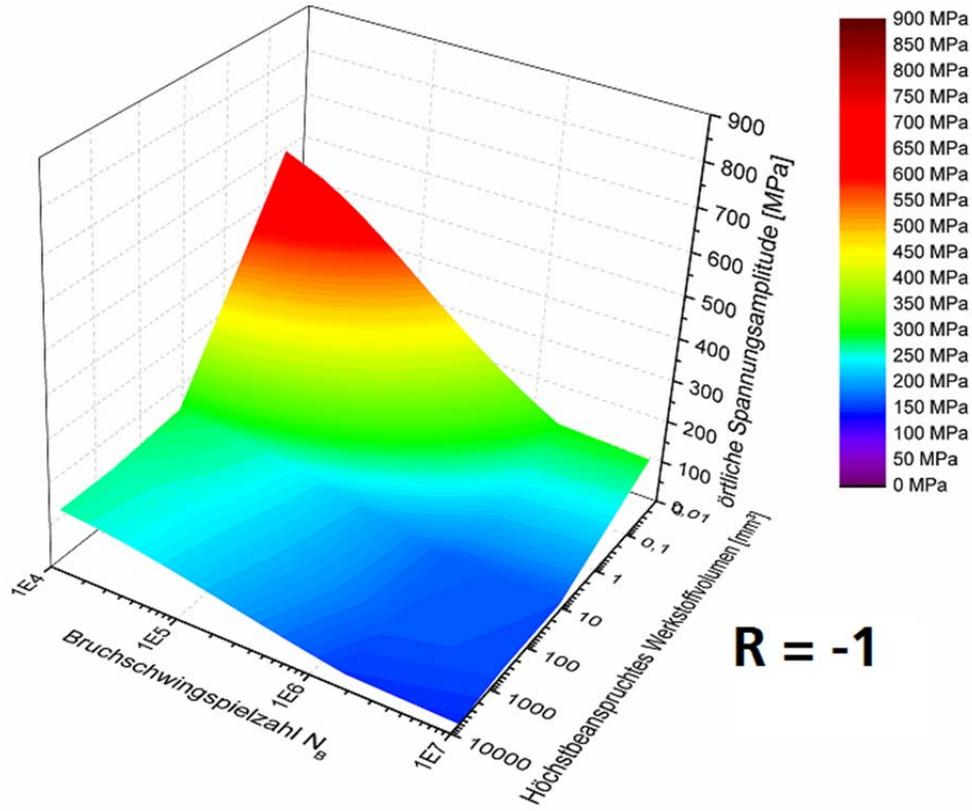
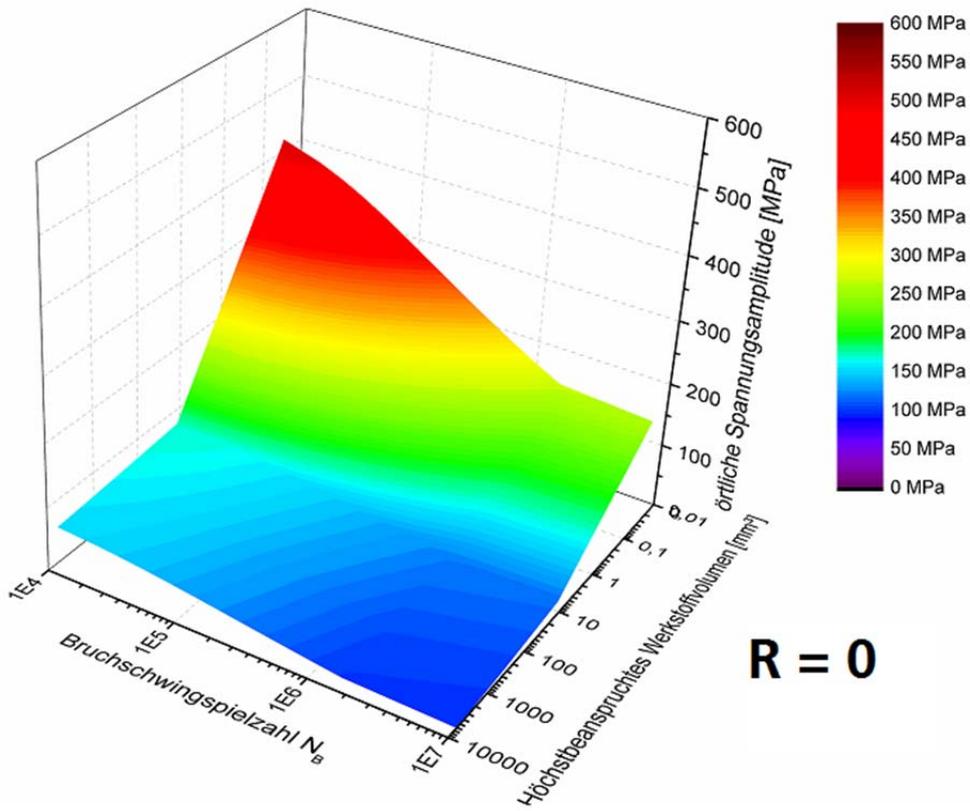


Bild B 67 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für scharf gekerbte Schwingproben $K_t = 4,14$





R = -1



R = 0

Bild B 70 Schwingfestigkeit in Abhängigkeit des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ und der Lebensdauer N für den EN-GJS-400-18U-LT

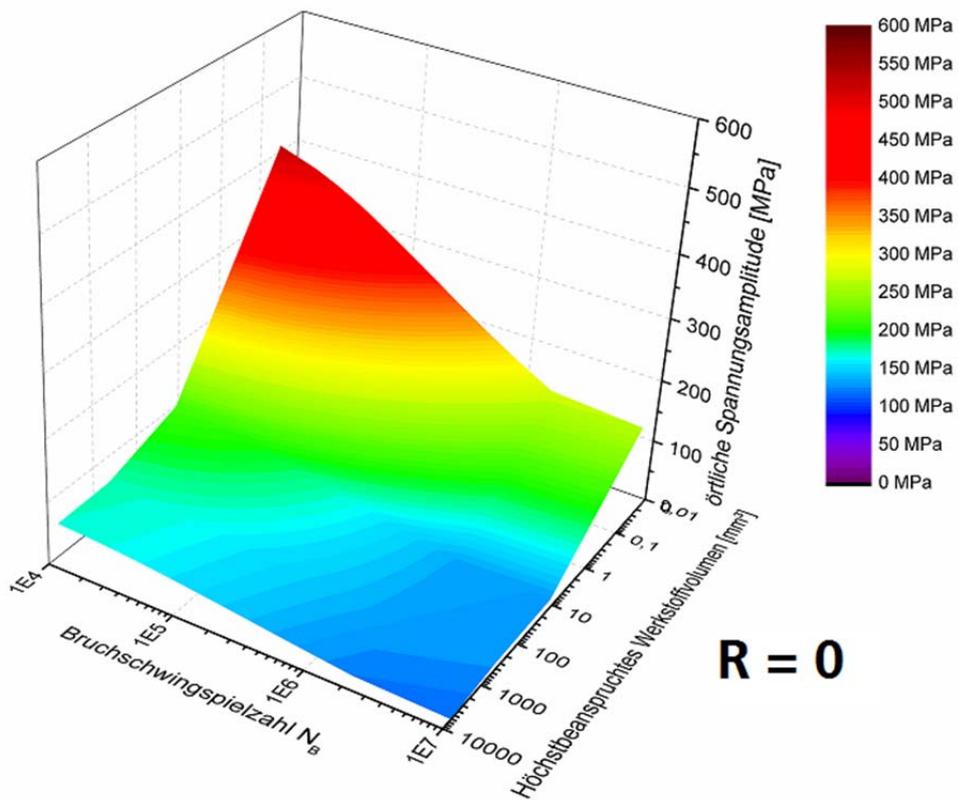
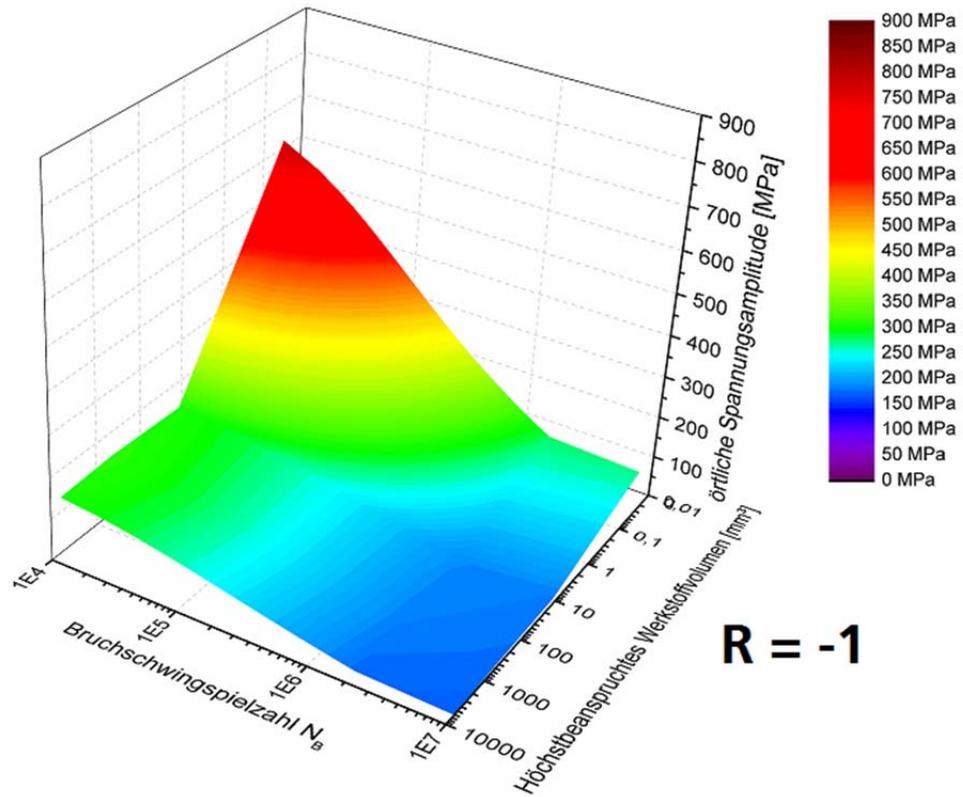


Bild B 71 Schwingfestigkeit in Abhängigkeit des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ und der Lebensdauer N für den EN-GJS-450-18

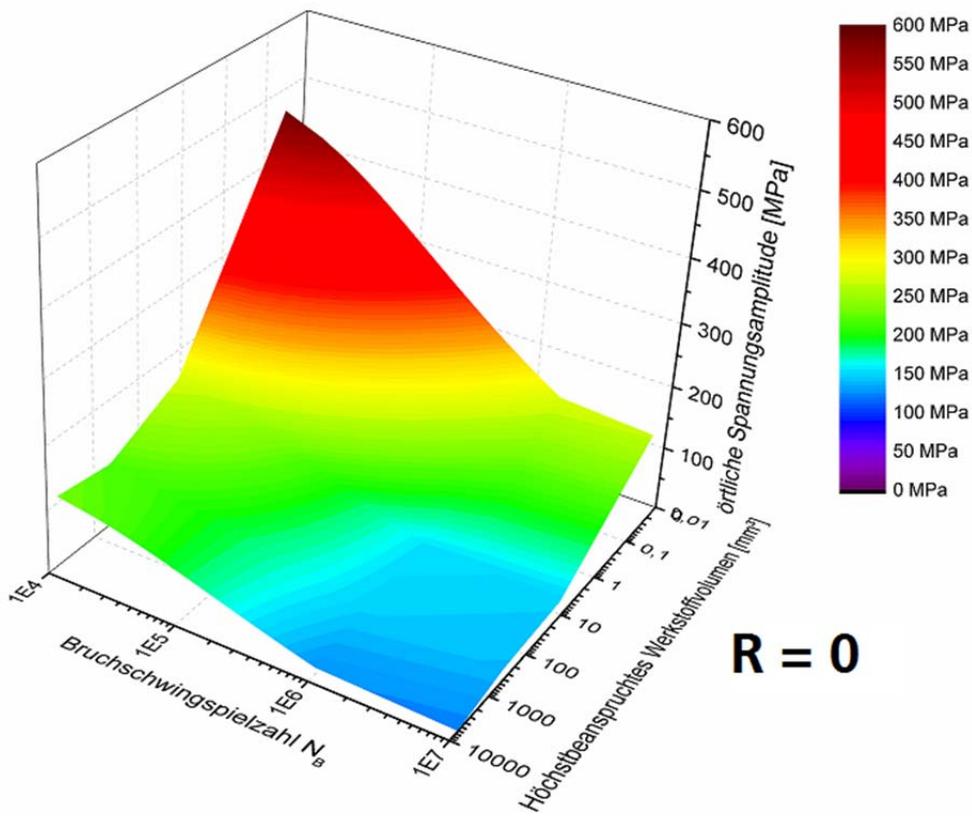
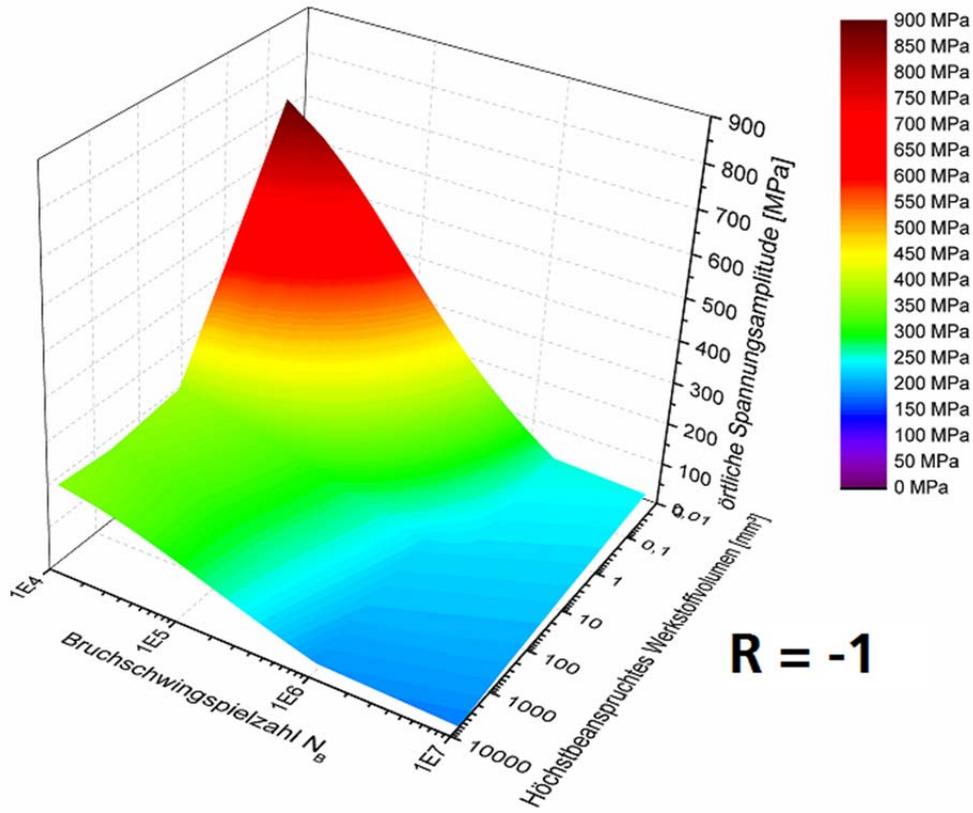


Bild B 72 Schwingfestigkeit in Abhängigkeit des höchstbeanspruchten Werkstoffvolumens $HBV_{90\%}$ und der Lebensdauer N für den EN-GJS-700-2

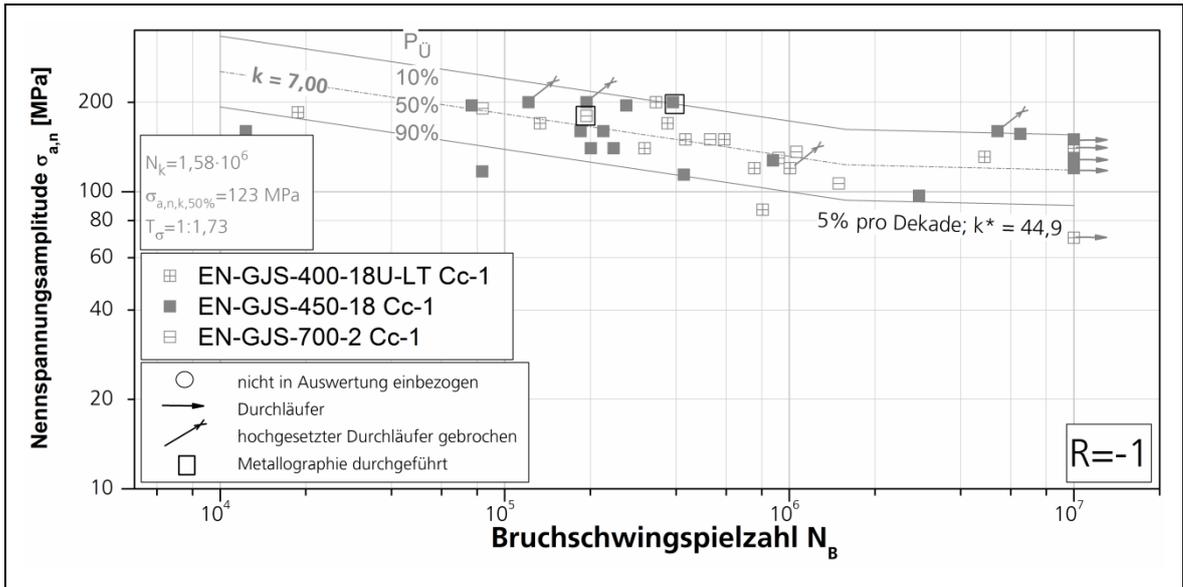


Bild B 73 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunkerklasse Cc-1

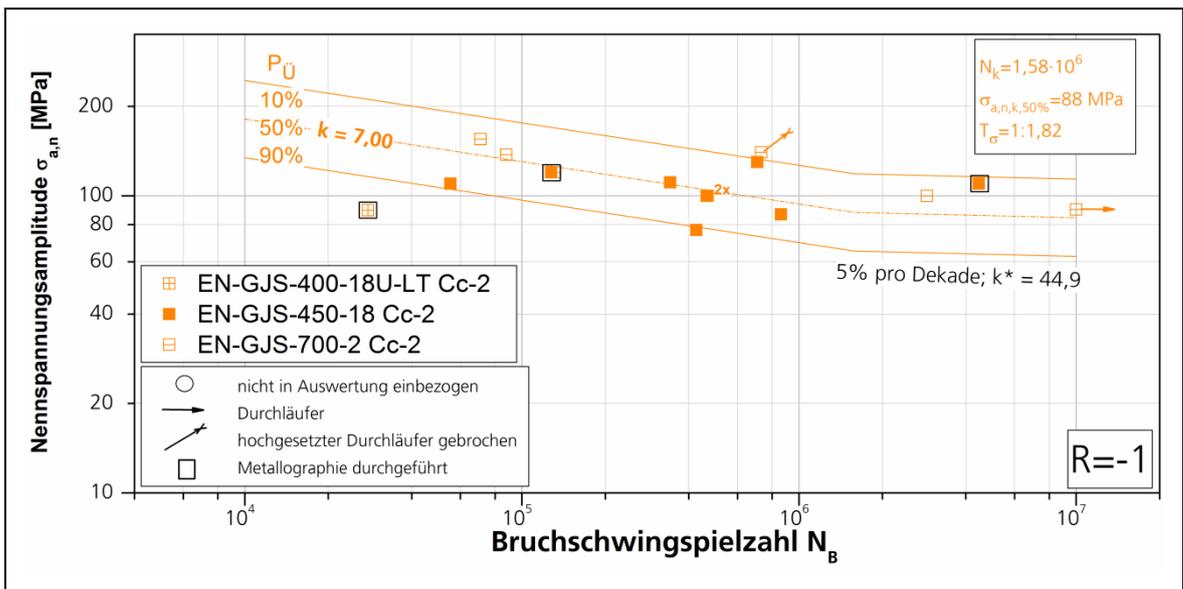
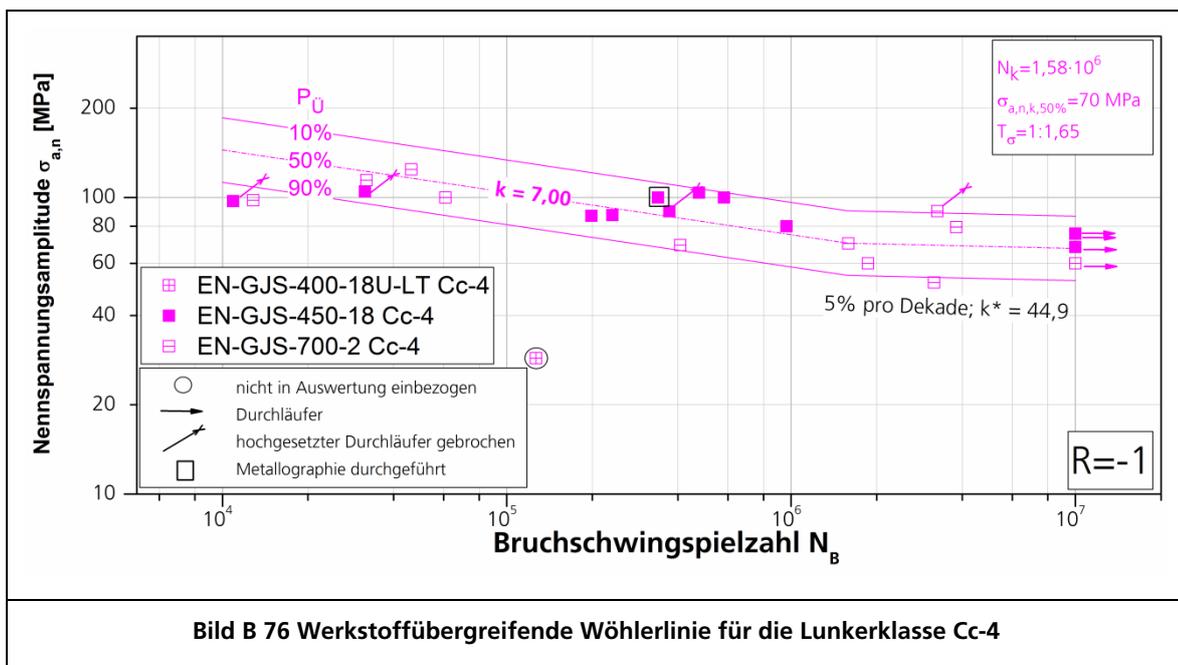
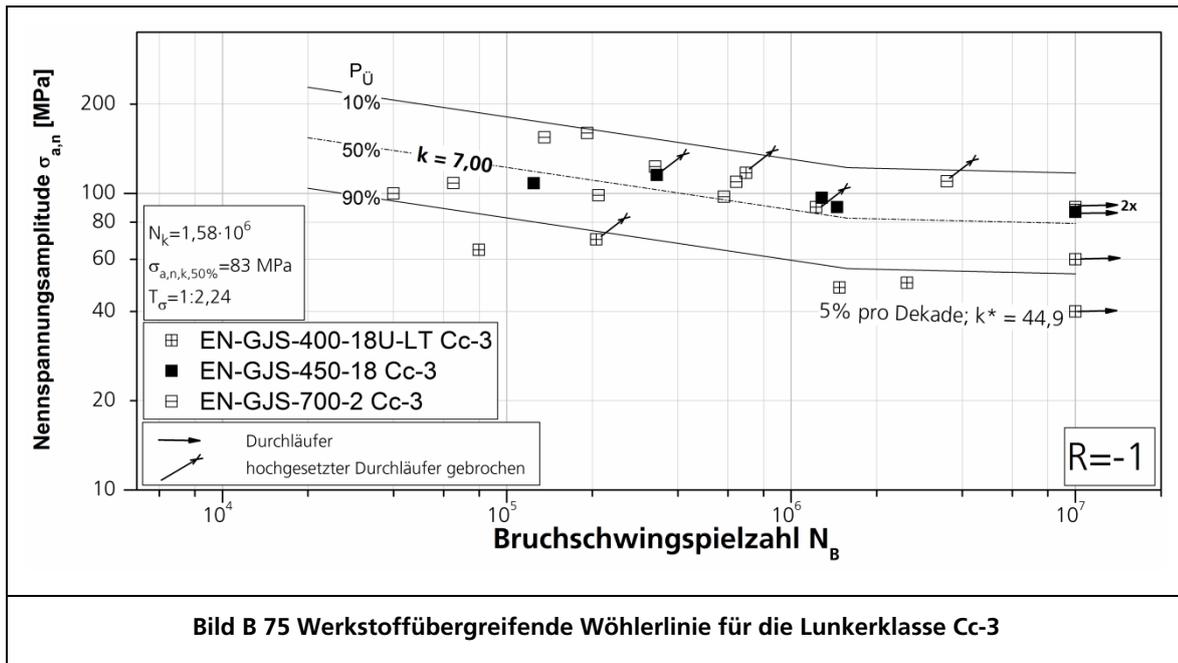
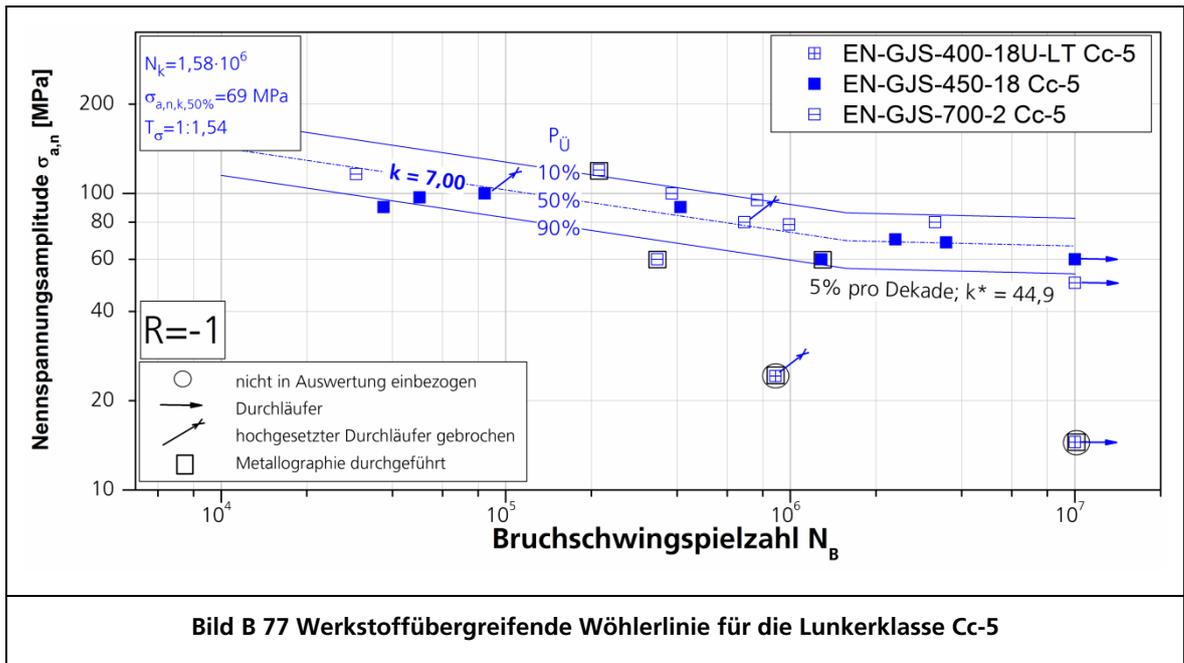
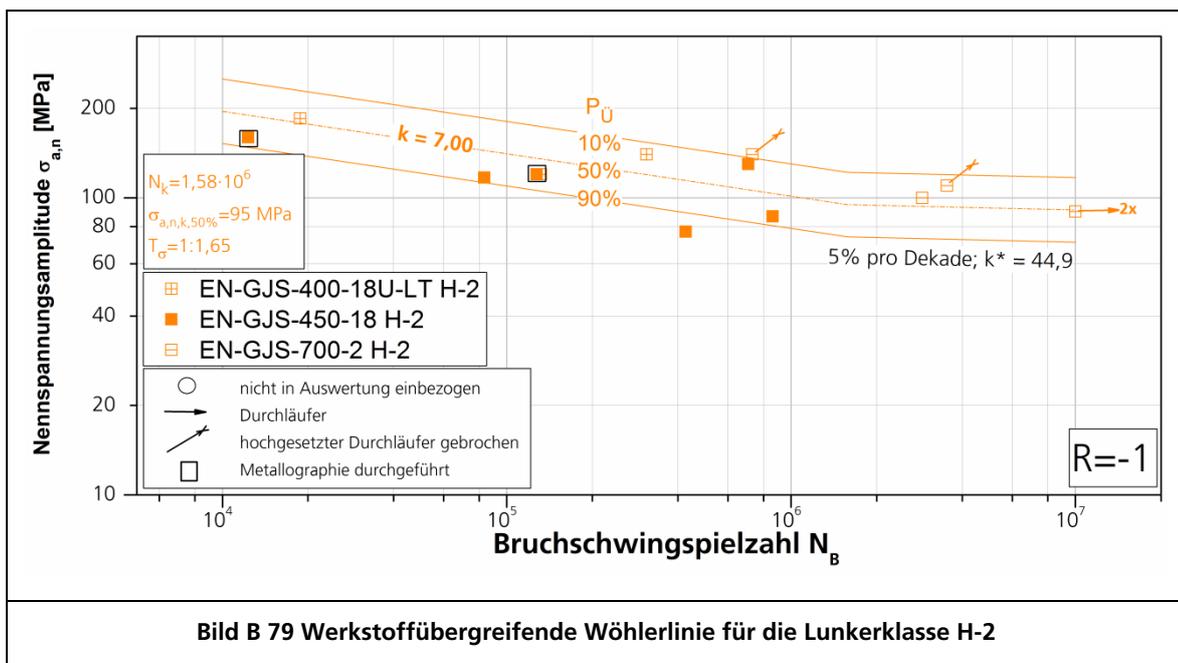
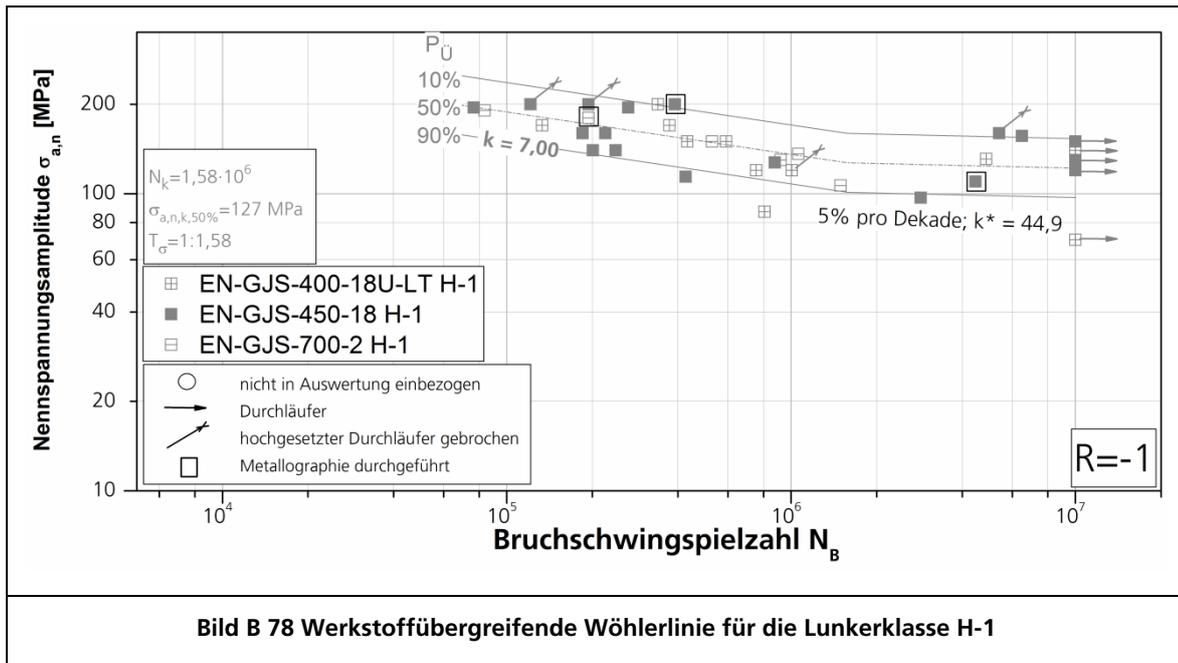
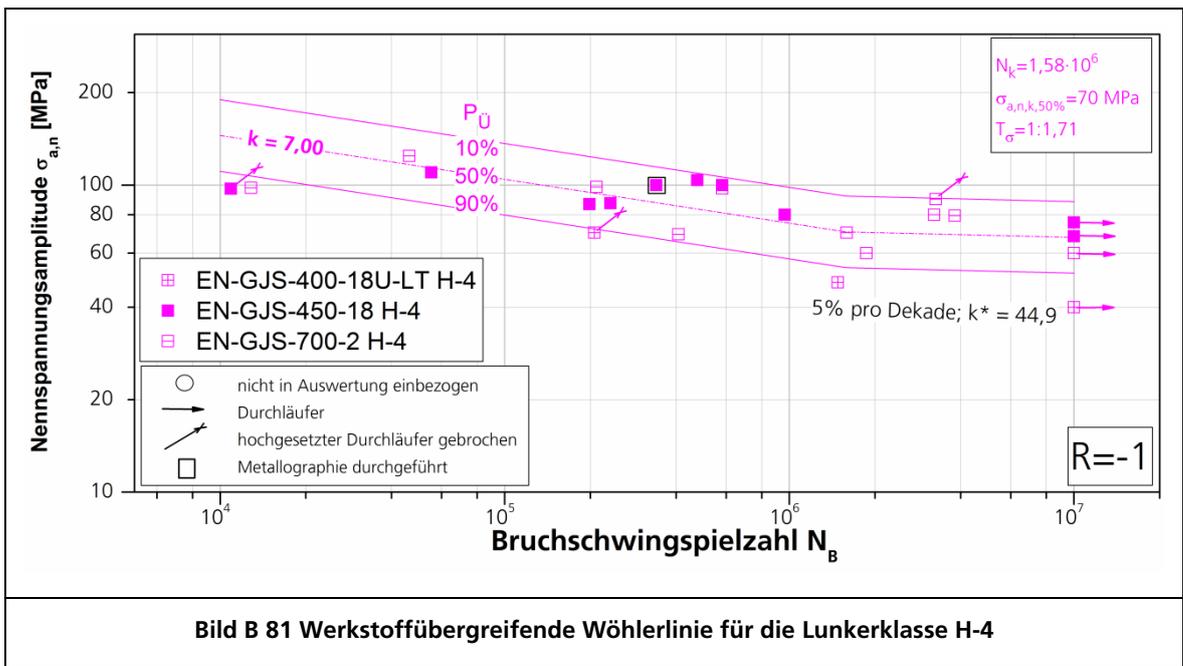
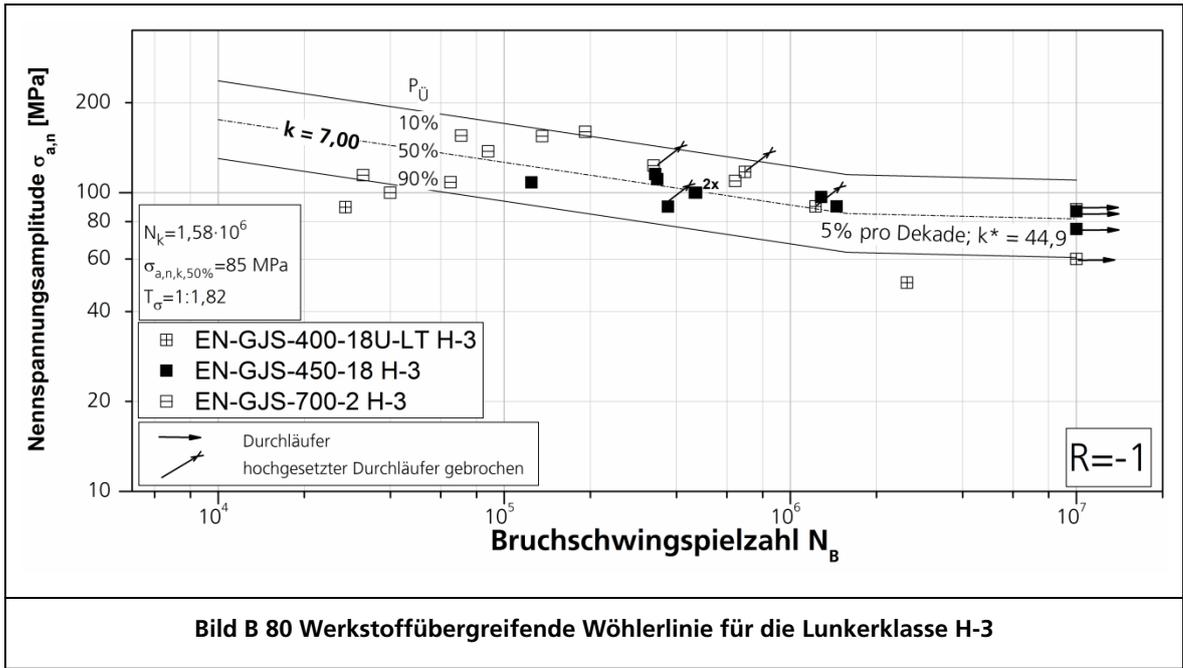


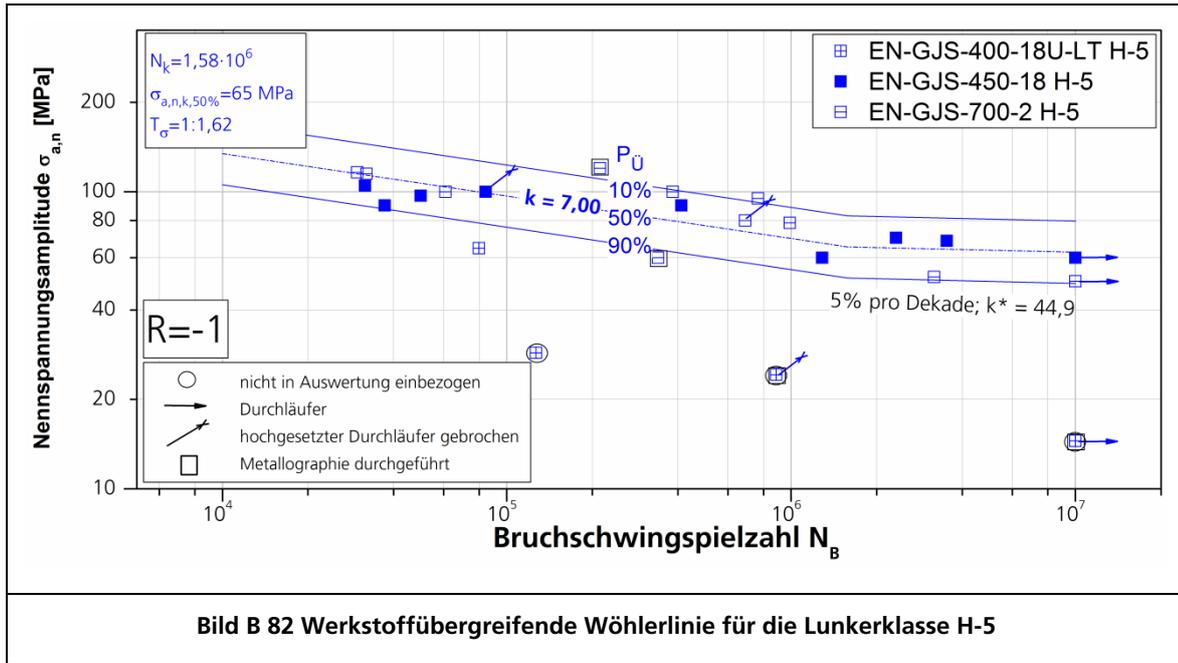
Bild B 74 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunkerklasse Cc-2











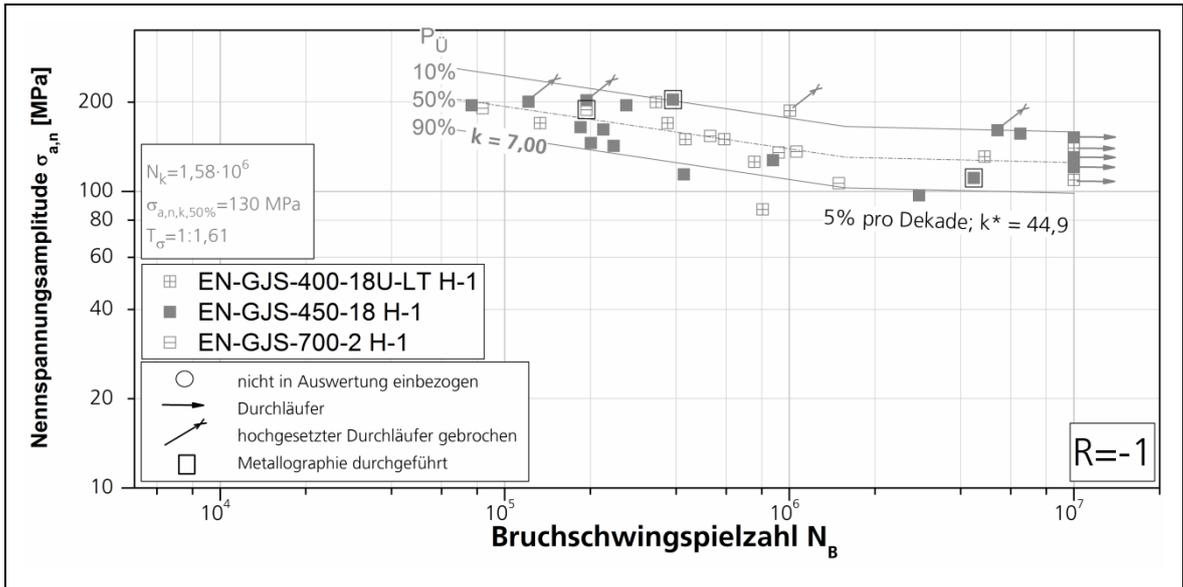


Bild B 83 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunckerklasse H-1 mit Berücksichtigung der tatsächlichen Bruchfläche anhand von CT-Analysen

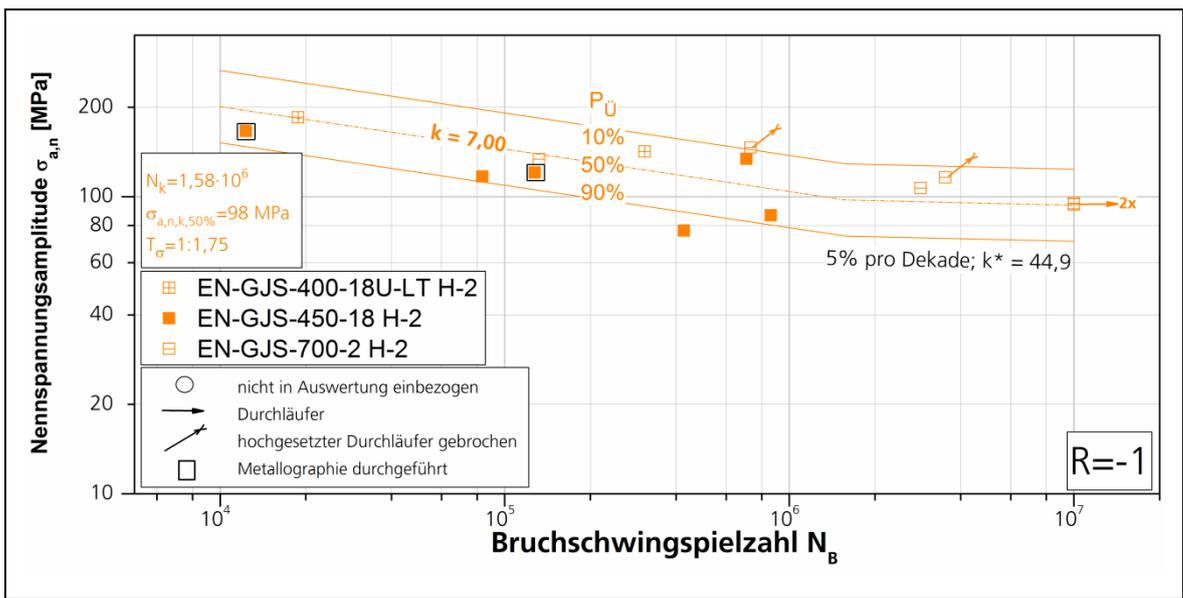
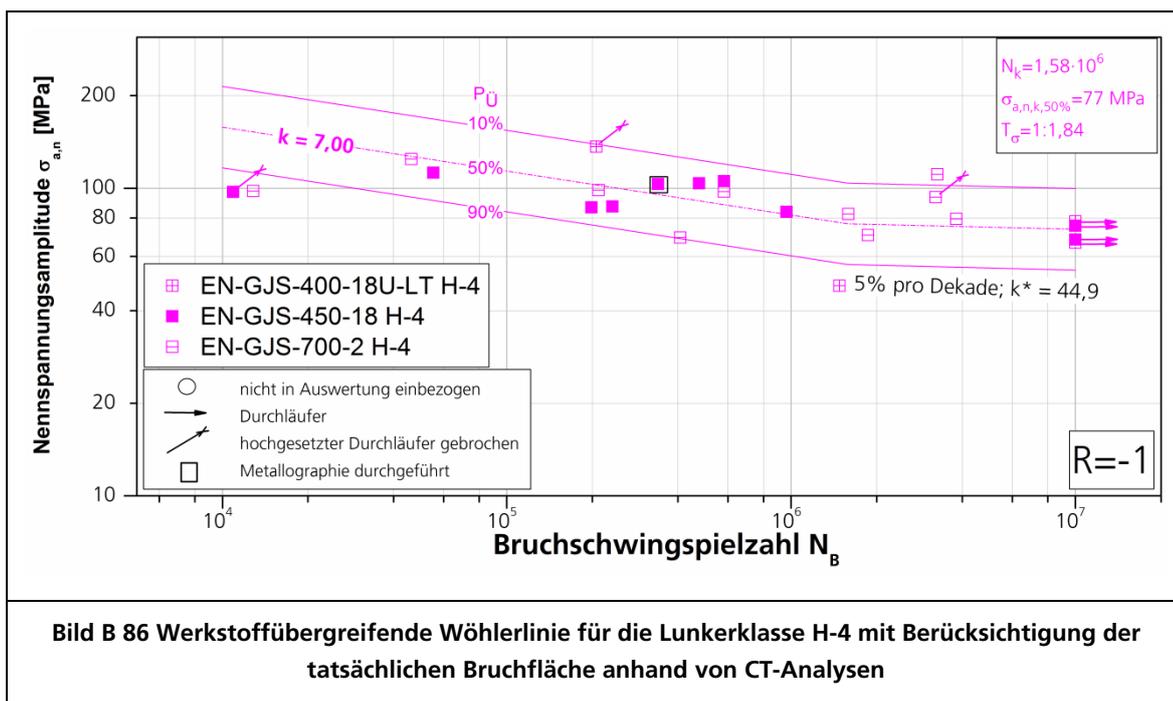
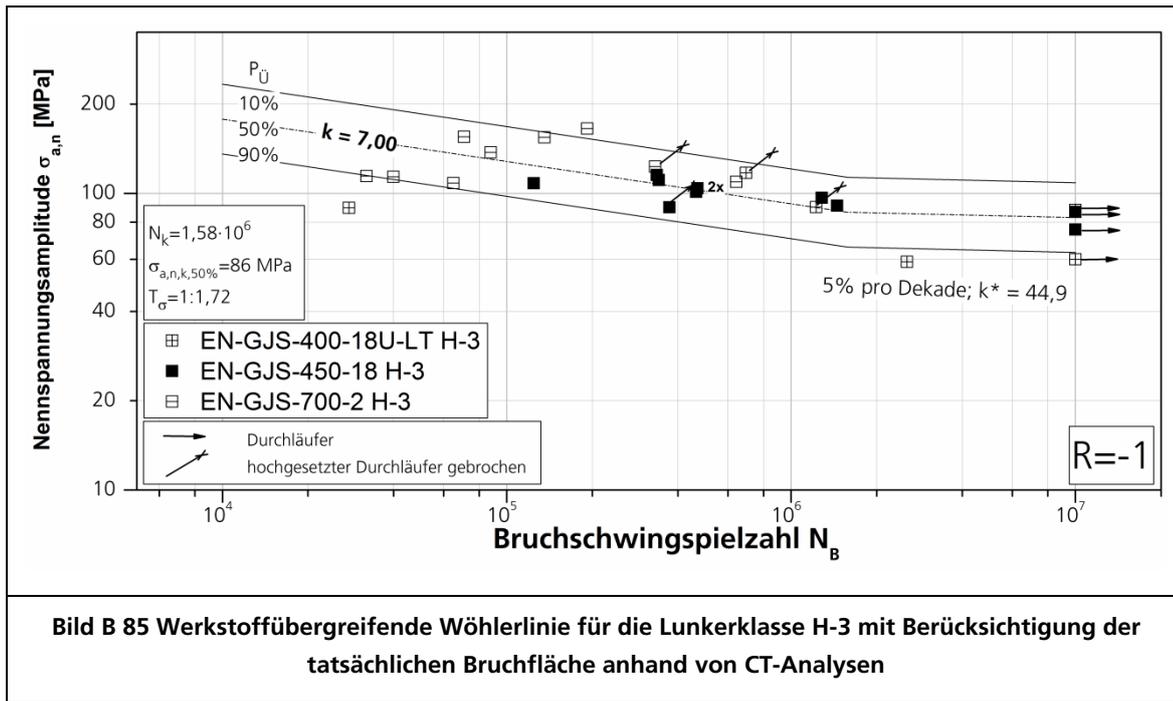
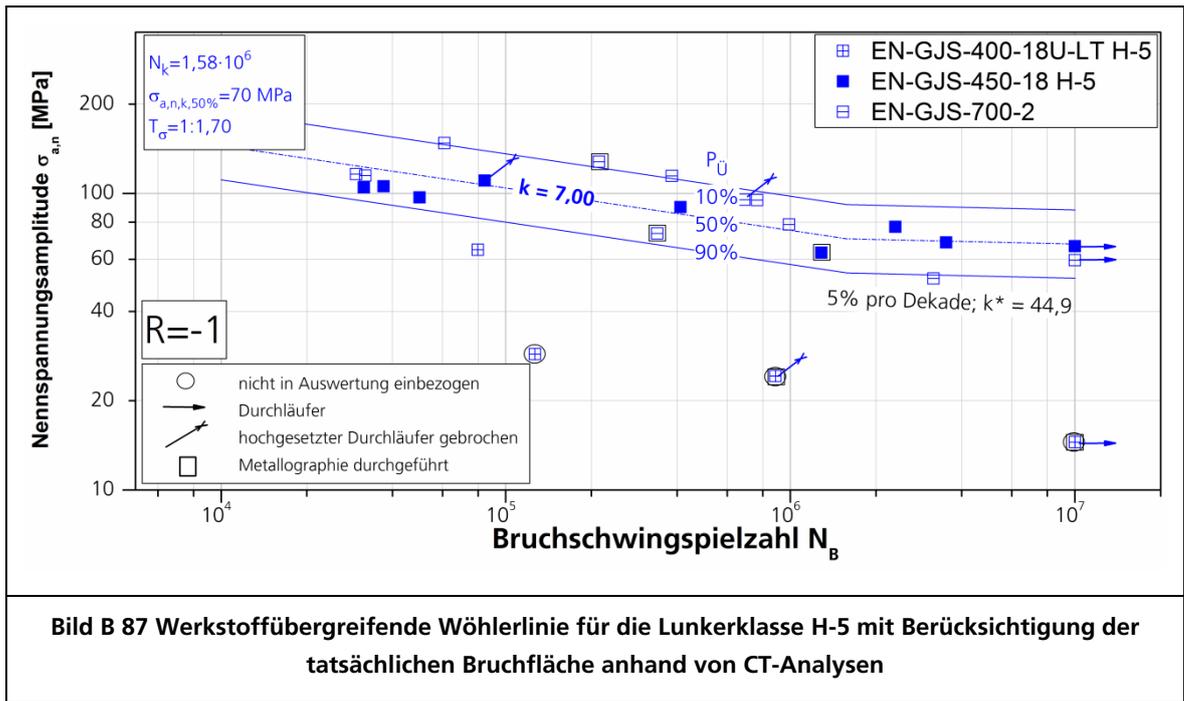


Bild B 84 Werkstoffübergreifende Wöhlerlinie für die Lunckerklasse H-2 mit Berücksichtigung der tatsächlichen Bruchfläche anhand von CT-Analysen





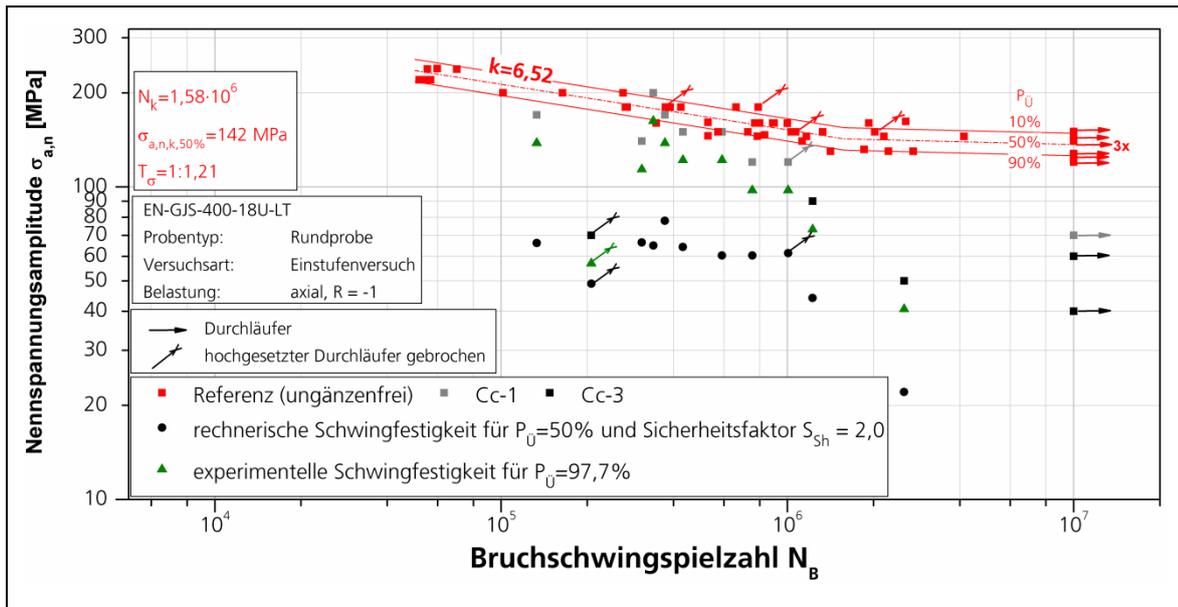


Bild B 88 Gegenüberstellung von experimenteller und rechnerischer Schwingfestigkeit der mit Lun- kern behafteten Schwingproben für den EN-GJS-400-18U-LT

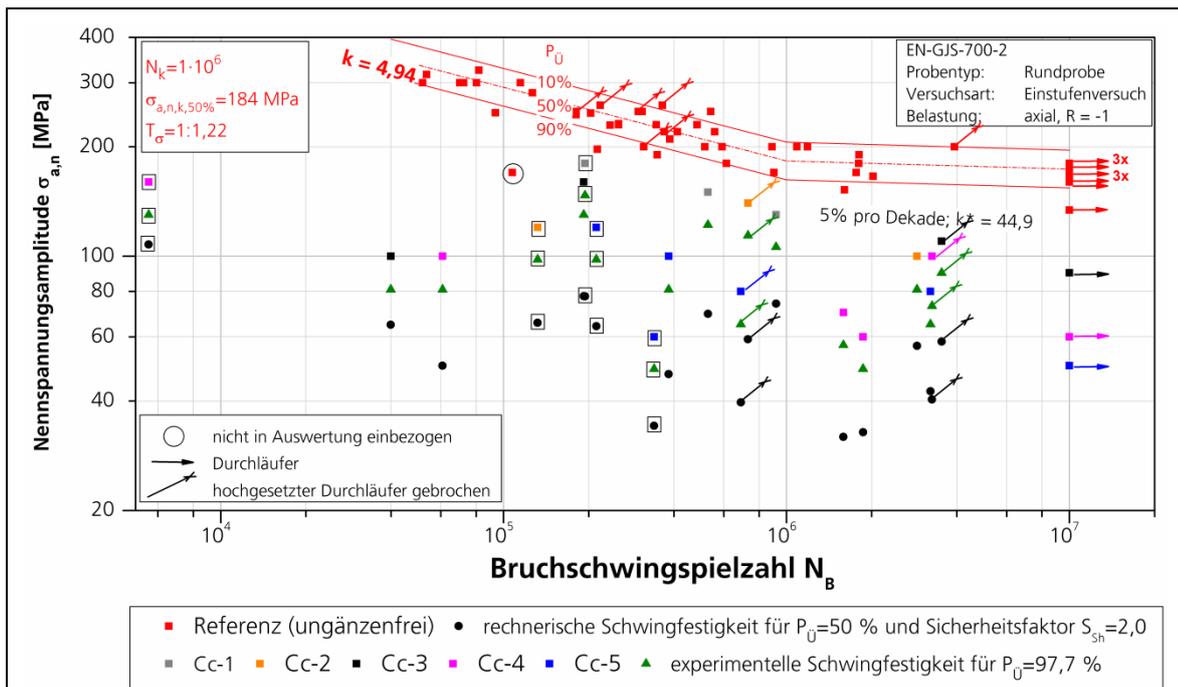


Bild B 89 Gegenüberstellung von experimenteller und rechnerischer Schwingfestigkeit der mit Lun- kern behafteten Schwingproben für den EN-GJS-700-2

Anhang D

Dokumentverzeichnis

Inhalt	Seite D
Beispiel für Röntgenprüfbericht für Rundproben	D 3 – D 9

Beispiel für Röntgenprüfbericht für Rundproben

 Gesellschaft für Radiographie mbH 45527 Hattingen - Am Walzwerk 41		
Auftraggeber: customer: <i>Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. und Systemzuverlässigkeit LBF</i>		Durchstrahlungsprüfung radiographic testing (Guss / cast)
		Prüfbericht Nr.: 130314 Blatt 1 von 7 test report no.:
Prüfobjekt: Rundproben object: 15x32x160 (58 Stk)		Teil-Nr.: siehe Bauteil object no.:
Kommission: order no.:		Zeichnung-Nr.: rund_uk_32_160_15 drawing no.:
Werkstoff: material:		Modell-Nr.: pattern no.:
Prüfvorschrift: EN 12681 -A- specification:		Prüfanweisung: - test instruction:
Beurteilung nach: ASTM E-446 interpretation acc. to:		Prüfumfang: zylindrischer Querschnitt test extent:
Gütestufe: - quality level:		Wärmebehandlung: heat treatment:
		Oberfläche: bearbeitet/machined condition of surface
<i>Filme und Verarbeitung/films and developing:</i>		
Hersteller /manufacturer: Agfa		Entwicklungsautomat /developing machine: Structurix NDT S Eco
Entwickler/ developer: Agfa EcoDev		Entwicklungszeit /developing time: 62,5 sec.
		Entwicklungstemperatur/ developer temperature: 29° C
Weitere Angaben / additional information:		
Ort, Datum /place, date: Hattingen, den 04.02.2013		
Prüfung durchgeführt von: test performed by: S. Nagel Stufe 1	Für Prüfergebnis verantwortlich: responsible for the test results: G. Bublies Stufe 3	Prüfaufsicht: supervisor: G. Bublies Stufe 3 
Certificate no.: Z-SC-24255/RT1	Certificate no.: Z-SC-00001/RT3	Certificate no.: Z-SC-00001/RT3

	Gesellschaft für Radiographie mbH Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen		Prüfbericht Nr: test report no.: 130314		Blatt 2 von 7 sheet of	
			Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. customer: und Systemzuverlässigkeit LBF		Komm-Nr.: order-no.:	
Prüfobjekt: Rundproben object: 15x32x160 (58 Stk)			Teil-Nr.: siehe Bauteil object-no.:			
Regelwerk: EN 12681 -A- specification			Prüfanweisung: test instruction: -			
Aufnahmeprotokoll/exposure technique						
Position: position:	S5 IG 17-24	S5 IG 27-33	S5 IG 34-40	S6 IG 4-14	S6 IG 21-32	S6 IG 42-48
Film -Nr.: film - no.:	A + B	A + B	A + B	A + B	A + B	A + B
Aufnahmeanordnung exposure technicque	1	1	1	1	1	1
Durchstr. Wanddicke: [mm] wall thickness: [mm]	15 - 30	15 - 30	15 - 30	15 - 30	15 - 30	15 - 30
Strahlenquelle: source:	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)	MG 450 (ROE 15)
Röhrenspannung: [KV] tube voltage: [KV]	300 keV	300 keV	300 keV	300 keV	300 keV	300 keV
Strom/Aktivität : [mA/GBq] current/activity: [mA/GBq]	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA	10 mA
Brennfleckabm.: [mm x mm] source size: [mm x mm]	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4	4,4
Bel.-zeit/Dosis: [min/Gy] exposure time: [min/Gy]	15''	15''	15''	15''	15''	15''
I.Q.I. Typ/Nr.: I.Q.I. type/no.:	10 FE EN	10 FE EN	10 FE EN	10 FE EN	10 FE EN	10 FE EN
Geforderte Bildgüte: quality Level:	W12	W 12	W 12	W 12	W 12	W 12
Filmformat: [cm x cm] film dimensions: [cm x cm]	30x40	30x40	30x40	30x40	30x40	30x40
System-Klasse EN 584-1 system-class EN 584-1	C3/C4	C3/C4	C3/C4	C3/C4	C3/C4	C3/C4
Filmtyp: film type:	D4 / D5	D4 / D5	D4 / D5	D4 / D5	D4 / D5	D4 / D5
Aufnahme- folien: screens	F	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10
	B	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10
	I	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10	Pb 0.10
Filter: filter:	-	-	-	-	-	-
Abst. Objekt /Film : [mm] ^{*a)} object to filmdistance: [mm]	30	30	30	30	30	30
Abst. Objekt/Fokus: [mm] ^{*a)} source to object distance:	970	970	970	970	970	970
Geometr. Unschärfe [mm] Geometr. Unsharpness: [mm]	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
Einstrahlwinkel: exposure angle:	90°	90°	90°	90°	90°	90°
Anzahl der Filme je Kassette: no. of films in each film holder:	2	2	2	2	2	2
^{*a)} Quellenseite des Objekts / source side of object						
Ort, Datum: place, date:	Hattingen, den 04.02.2013			Prüfaufsicht: supervisor: G. Bublies Stufe 3 		

	Gesellschaft für Radiographie mbH Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen		Prüfbericht Nr: 130314		
			test report no.:		
		Blatt	3	von	7
		sheet	of		
Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. <i>customer:</i> und Systemzuverlässigkeit LBF		Komm-Nr.: <i>order-no.:</i>			
Prüfobjekt: Rundproben <i>object:</i> 15x32x160 (58 Stk)		Teil-Nr.: siehe Bauteil <i>object-no.:</i>			
Regelwerk: EN 12681 -A- <i>specification</i>		Prüfanweisung: - <i>test instruction:</i>			
Aufnahmeprotokoll/exposure technique					
Position: <i>position:</i>	S6 IG 49-54				
Film -Nr.: <i>film - no.:</i>	A + B				
Aufnahmeanordnung <i>exposure technicque</i>	1				
Durchstr. Wanddicke: [mm] <i>wall thickness: [mm]</i>	15 - 30				
Strahlenquelle: <i>source:</i>	MG 450 (ROE 15)				
Röhrenspannung: [KV] <i>tube voltage: [KV]</i>	300 keV				
Strom/Aktivität : [mA/GBq] <i>current/activity: [mA/GBq]</i>	10 mA				
Brennfleckabm.: [mm x mm] <i>source size: [mm x mm]</i>	4,4				
Bel.-zeit/Dosis: [min/Gy] <i>exposure time: [min/Gy]</i>	15''				
I.Q.I. Typ/Nr.: <i>I.Q.I. type/no.:</i>	10 FE EN				
Geforderte Bildgüte: <i>quality Level:</i>	W 12				
Filmformat: [cm x cm] <i>film dimensions: [cm x cm]</i>	30x40				
System-Klasse EN 584-1 <i>system-class EN 584-1</i>	C3/C4				
Filmtyp: <i>film type:</i>	D4 / D5				
Aufnahme- folien: <i>screens</i>	F B I	Pb 0.10 Pb 0.10 Pb 0.10			
Filter: <i>filter:</i>	-				
Abst. Objekt /Film : [mm] ^{*a)} <i>object to film distance: [mm]</i>	30				
Abst. Objekt/Fokus: [mm] ^{*a)} <i>source to object distance:</i>	970				
Geomtr. Unschärfe [mm] <i>Geomtr. Unsharpness: [mm]</i>	0.14				
Einstrahlwinkel: <i>exposure angle:</i>	90°				
Anzahl der Filme je Kassette: <i>no. of films in each film holder:</i>	2				
^{*a)} Quellenseite des Objekts / source side of object					
Ort, Datum: <i>place, date:</i>	Hattingen, den	04.02.2013	Prüfaufsicht: G. Bublies Stufe 3 <i>supervisor:</i>		
					

		Gesellschaft für Radiographie mbH Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen				Prüfbericht Nr.: 130314 test report no.:				
						Blatt 4 von 7 Sheet of				
Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. customer: und Systemzuverlässigkeit LBF			Komm-Nr.: order no.:							
Prüfobjekt: Rundproben Object: 15x32x160 (58 Stk)			Teil-Nr.: siehe Bauteil object no.:							
Regelwerk: EN 12681 -A- specification:			Prüfanweisung: - test instruction:							
Prüfergebnisse / test results										
Teil-Nr.:/Pos.: object-no./pos.:	Film-Nr.: film no.:	Wanddicke wall thickness	Bildgüte image quality	Opt. Dichte density	EFB / SV *1) DFB / DV *2)	Befund classification	Bewertung evaluation		Bemerkungen remarks	
							a	na		
S5 IG 17	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-4				
S5 IG 17	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-4				
S5 IG 18	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 18	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 19	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-5				
S5 IG 19	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-5				
S5 IG 20	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-3				
S5 IG 20	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-4				
S5 IG 21	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-5				
S5 IG 21	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-5				
S5 IG 22	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-4				
S5 IG 22	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-4				
S5 IG 23	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-2				
S5 IG 23	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-2				
S5 IG 24	A	15 - 30	12	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 24	B	15 - 30	12	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 27	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 27	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-1				
S5 IG 28	A	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-2				
S5 IG 28	B	15 - 30	-	> 1,5	X	CC-2				
S5 IG 29	A	15 - 30	-	> 1,5	X	-				
Erläuterungen / Legend										
A= Gasblasen/gas bubbles B= Nichtmetall. Einschlüsse Sands spots and inclusions		C1= Lunker/Shrinkage Type 1 (E186/E280) C2= Lunker/Shrinkage Type 2 (E186/E280) C3= Lunker/Shrinkage Type 3 (E186/E280)		D= Risse/crack E= Warmrisse/hot tears F= Kernstützen/unfused chaplets G= Kühleisen/internal chills			a= akzeptiert / accepted na= nicht akzeptiert / not accepte			
CA= Lunker/Shrinkage Type A (E446) CB= Lunker/Shrinkage Type B (E446) CC= Lunker/Shrinkage Type C (E446) CD= Lunker/Shrinkage Type D (E446)				FF= Filmfehler /film fault OF= Oberfläche / surface marks						
1*) Einzelfilmbetrachtung/single viewing			2*) Doppelfilmbetrachtung/double viewing							
Ort, Datum: Hattingen, den 04.02.2013 place, date:			Prüfaufsicht: G. Bublies Stufe 3 supervisor:							

Teil-Nr.: object-no.:		Film-Nr.: film no.:		Wanddicke wall thickness	Bildgüte image quality	Opt. Dichte density	EFB / SV ¹⁾	DFB / DV ²⁾	Befund classification	Bewertung a na evaluation	Bemerkungen remarks
S5 IG 29	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S5 IG 30	A	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S5 IG 30	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S5 IG 31	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-5		
S5 IG 31	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-5		
S5 IG 32	A	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-2		
S5 IG 32	B	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-2		
S5 IG 33	A	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 33	B	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 34	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-3		
S5 IG 34	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-3		
S5 IG 35	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 35	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 36	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-4		
S5 IG 36	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-4		
S5 IG 37	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 37	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 38	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-4		
S5 IG 38	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-4		
S5 IG 39	A	15 - 30	12	> 1,5	X				-		
S5 IG 39	B	15 - 30	12	> 1,5	X				-		
S5 IG 40	A	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-1		
S5 IG 40	B	15 - 30	12	> 1,5	X				CC-1		
S6 IG 4	A	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 4	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 5	A	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 5	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 6	A	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 6	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 7	A	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-2		
S6 IG 7	B	15 - 30	-	> 1,5	X				CC-2		
S6 IG 8	A	15 - 30	-	> 1,5	X				-		
S6 IG 8	B	15 - 30	-	> 1,5	X				-		

Ort, Datum: Hattingen, den 04.02.2013
place, date:

Prüfaufsicht: G. Bublies Stufe 3
supervisor:




Gesellschaft für Radiographie mbH

Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen

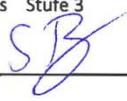
Prüfbericht Nr.: 130314
test report no.:

Scheet 5 von 7
of

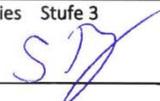
Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk.
customer: und Systemzuverlässigkeit LBF

Komm-Nr.:
order no.:

Prüfergebnisse / test results

		Gesellschaft für Radiographie mbH Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen				Prüfbericht Nr.: 130314 test report no.:			
		Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. und Systemzuverlässigkeit LBF customer:		Komm-Nr.: order no.:		Scheet 6 von 7 of			
Prüfergebnisse / test results									
Teil-Nr.: object-no.:	Film-Nr.: film no.:	Wanddicke wall thickness	Bildgüte image quality	Opt. Dichte density	EFB / SV ¹⁾	DFB / DV ²⁾	Befund classification	Bewertung evaluation	Bemerkungen remarks
S6 IG 9	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 9	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 10	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 10	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 11	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 11	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 12	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 12	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 13	A	15 - 30	12	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 13	B	15 - 30	12	> 1,5	X		CC-5		
S6 IG 14	A	15 - 30	12	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 14	B	15 - 30	12	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 21	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-3		
S6 IG 21	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-3		
S6 IG 22	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-4		
S6 IG 22	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-4		
S6 IG 23	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-4		
S6 IG 23	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-4		
S6 IG 24	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-3		
S6 IG 24	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-3		
S6 IG 25	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-3		
S6 IG 25	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-4		
S6 IG 26	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 26	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 27	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 27	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-2		
S6 IG 28	A	15 - 30	-	> 1,5	X		-		
S6 IG 28	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 29	A	15 - 30	-	> 1,5	X		-		
S6 IG 29	B	15 - 30	-	> 1,5	X		-		
S6 IG 30	A	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 30	B	15 - 30	-	> 1,5	X		CC-1		
S6 IG 31	A	15 - 30	12	> 1,5	X		-		
S6 IG 31	B	15 - 30	12	> 1,5	X		-		
Ort, Datum: Hattingen, den 04.02.2013 place, date:					Prüfaufsicht: G. Bublies Stufe 3 supervisor:				

		Gesellschaft für Radiographie mbH Am Walzwerk 41 - 45527 Hattingen				Prüfbericht Nr.: 130314 test report no.:											
		Scheet 7 von of 7															
Auftraggeb.: Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigk. customer: und Systemzuverlässigkeit LBF			Komm-Nr.: order no.:														
Prüfergebnisse / test results																	
Teil-Nr.:	object-no.:	Film-Nr.:	film no.:	Wanddicke	wall thickness	Bildgüte	image quality	Opt. Dichte	density	EFB / SV ¹⁾	DFB / DV ²⁾	Befund	classification	Bewertung	evaluation	Bemerkungen	remarks
S6 IG 32		A		15 - 30		12		> 1,5		X		A1					
S6 IG 32		B		15 - 30		12		> 1,5		X		A1					
S6 IG 42		A		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 42		B		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 43		A		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 43		B		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 44		A		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 44		B		15 - 30		-		> 1,5		X		-					
S6 IG 45		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 45		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 46		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 46		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 47		A		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-3					
S6 IG 47		B		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-3					
S6 IG 48		A		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 48		B		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 49		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 49		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 50		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 50		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-2					
S6 IG 51		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-5					
S6 IG 51		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-5					
S6 IG 52		A		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-4					
S6 IG 52		B		15 - 30		-		> 1,5		X		CC-4					
S6 IG 53		A		15 - 30		12		> 1,5		X		-					
S6 IG 53		B		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 54		A		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-1					
S6 IG 54		B		15 - 30		12		> 1,5		X		CC-1					
Ort, Datum: Hattingen, den 04.02.2013 place, date:			Prüfaufsicht: G. Bublies Stufe 3 supervisor:														



Für die Bemessung von Großgussbauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit ist die Kenntnis des zyklischen Werkstoffverhaltens insbesondere bei Vorhandensein von Lunkern von großer Wichtigkeit. Diese Arbeit beschreibt sowohl das zyklische Werkstoffverhalten dreier dickwandiger Kugelgraphitgusswerkstoffe als auch Wege Informationen der zerstörungsfreien Prüfung und insbesondere der Ultraschalltechnik für die Bemessung solcher Bauteile bei Vorhandensein von Lunkern zu nutzen.

ISBN 978-3-8396-1048-0



9 783839 610480