

# Untersuchungen zur Beschreibung und zur Definition sowie Möglichkeiten der Beurteilung von Stößereignissen, die auf das menschliche Hand-Arm-System bei der Arbeit einwirken

Abschlussbericht zum Vorhaben FP-0376

Kurztitel: Einzelstöße

Laufzeit: 01.11.2014 bis 31.10.2015

Bericht vom 22.01.2016

Autoren:

Thomas Schenk, KSZ Ingenieurbüro

(Abschnitte 1, 2, 4, 5, 6,)

Uwe Kaulbars, Institut für Arbeitsschutz

(Abschnitt 3)

Fabian Haas, Institut für Arbeitsschutz

(Abschnitt 3)



KSZ Ingenieurbüro GmbH  
Bühningstraße 12  
13086 Berlin



Institut für Arbeitsschutz der  
Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung  
Alte Heerstrasse 111  
53757 Sankt Augustin

## Kurzfassung deutsch

Stöße sind Sonderformen der auf das Hand-Arm-System bei der Arbeit einwirkenden mechanischen Schwingungen, welche bei der Arbeit mit mechanisierten Werkzeugen (z. B. Bolzenschussgeräte und Nagler) oder auch nicht mechanisierten Werkzeugen (z. B. Hämmer und Äxte) auftreten. Die in der internationalen Literatur und der Normung enthaltenen Informationen hierzu zeigen, dass derzeit noch weitestgehende Erkenntnisdefizite über die subjektive Störwirkung, über biologische Wirkungen und über die mögliche gesundheitliche Relevanz dieser Stoßexpositionen bestehen.

In dem hier vorliegenden Bericht werden Untersuchungen zu den messtechnischen Grundlagen zur Ermittlung der Expositionsbedingungen von Stoßeinwirkungen sowie laborexperimentelle Untersuchungen zur subjektiven Abgrenzung von diskreten Stößen gegenüber Stoßfolgen und anderen Arten von mechanischen Schwingungen, die auf das Hand-Arm-System des Menschen bei der Arbeit einwirken, beschrieben.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass mit dem aktuellen Stand der Messtechnik ausreichend repräsentative Parameter zur Beschreibung von Stößen mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden können. Viele dieser Messgrößen weisen deutliche Interkorrelationen auf. Welche dieser Messgrößen zur Beurteilung des Gefährdungspotenzials bzw. der gesundheitlichen Relevanz von Stoßexpositionen verwendet werden sollten, bleibt weiteren Untersuchungen zu medizinisch-biologischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen vorbehalten.

Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass hinsichtlich der subjektiven Wahrnehmung drei Bereiche unterschieden werden können:

- Einzelne, diskrete Impulse
- Impulsfolgen
- Stochastische bzw. diffuse Schwingungswahrnehmung

Diese drei Bereiche sind durch zwei Grenzen, Grenze A bei einer Stoß-Wiederholrate von ca.  $15 \text{ s}^{-1}$  und Grenze B bei einer Stoß-Wiederholrate von ca.  $25 \text{ s}^{-1}$  voneinander unterscheidbar.

Kurzzeitige Bewegungen werden bereits bei sehr geringer Intensität (Beschleunigung) subjektiv als Stoß wahrgenommen. Der Zusammenhang zwischen Stoßdauer und Intensität (Beschleunigung) stellt sich hierbei im doppelt logarithmischen Maßstab als Gerade mit einem Abfall von ca. 10 dB/Dekade dar. Es besteht somit die Vermutung, dass dieser Zusammenhang dem Energieäquivalenzprinzip unterliegt.

## Kurzfassung english

Single shocks are a special type of hand-arm vibration while working with mechanized (e.g. nailers, bolt guns) or non-mechanized (axes, hammers) tools.

Until now there is no confirmed information about subjective and biological or health effects. There are a lot of different terms describing the kind of vibration under investigation (single shocks, repetitive shocks, impulse vibration) and one cannot always be sure, that different researchers mean the same thing when they use the same term.

This report is about investigations on the basics of measurements of the exposure conditions of single shocks as well as laboratory examinations of subjective distinction of single shocks, continuous shock sequences and other types of mechanical vibration affecting the human hand-arm system during work.

The results show, that with the state-of-the-art measurement technique several measurement parameters describing the shock exposure can be determined with the required accuracy. Many of these parameters are correlated to each other. The choice of one or more of these parameters for the judgment of the potential risk or the relevance to human health must be investigated in future studies in medical-biological cause-effect relationship.

The results show furthermore three regions of subjective perception to distinguish regarding shock exposures:

- Repeated single shocks
- Continuous shock sequences
- Stochastic vibrations

Repeated shocks and Continuous shock sequences are separated by Border A with about  $15 \text{ s}^{-1}$ , continuous shock sequences and stochastic vibration are separated by Border B with about  $25 \text{ s}^{-1}$ .

Already relatively low magnitudes of acceleration cause a shock sensation. There is a significant interdependency of magnitude and pulse duration with a slope of 10 dB/decade in a double logarithmic scaling and it seems to be in accordance with the principle of energy equivalence.

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für den Schlosserhammer im Messpunkt 2.....	48
Tabelle 2: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für die Schusswaffe im Messpunkt 1 .....	49
Tabelle 3: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für das Tierbetäubungsgerät .....	50
Tabelle 4: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für den Bolzensetzer im Messpunkt 1 .....	51
Tabelle 5: Statistische Kennwerte Vorversuche (Überblick Gesamtdatensatz) .....	62
Tabelle 6: Statistische Kennwerte für die Einflussfaktoren Versuchswiederholung, linke oder rechte Hand, Impulsdauer, Impulsintensität, Impulsform .....	63
Tabelle 7: Wirkung der Einleitungsstelle auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen .....	64
Tabelle 8: Statistische Kennwerte Einfluss Versuchspersonen .....	65
Tabelle 9: Statistische Kennwerte Hauptversuch 1 (Überblick Gesamtdatensatz) ...	73
Tabelle 10: Grenze A.....	76
Tabelle 11: Grenze B.....	77
Tabelle 12: Statistische Kennwerte für Einfluss der Art der ausgeübten Tätigkeit.....	79
Tabelle 13: Grenze A.....	80
Tabelle 14: Grenze B.....	81
Tabelle 15: Abgrenzung der drei Wahrnehmungsbereiche mit Beispielen praktischer Arbeitstätigkeiten.....	89

## Bildverzeichnis

Bild 1: Theoretisches Beispiel für aufeinanderfolgende Einzelimpulse.....	19
Bild 2: Impulsfolge aus Bild 1 mit veränderter Anstiegssteilheit.....	21
Bild 3: Beispiel des Zeitverlaufs des $Flat_H$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes (Zeitkonstante $\tau = 0,125s$ ) beim Hämmern mit entsprechender Zeitbewertung von 1s bzw. 3s.....	24
Bild 4: Flankenanstiegszeit am Beispiel eines Schlages mit einem Schlosserhammer.....	28
Bild 5: Impulsdauer am Beispiel eines Schlages mit einem Schlosserhammer .....	29
Bild 6: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Schlosserhammer.....	31
Bild 7: Versuchsaufbau für den Schlosserhammer mit Messpunkt 3.....	31
Bild 8: Lage des Beschleunigungsaufnehmers in der anatomischen Mulde am Handgelenk (nach Schäfer [40]) .....	32
Bild 9: Zeitverlauf der $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2).....	33
Bild 10: Zeitverlauf des $W_H$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2).....	33
Bild 11: Aufgespreizter Zeitverlauf der $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2).....	34
Bild 12: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen an der Schusswaffe .....	35
Bild 13: Versuchsdurchführung und Lage des Hand-Arm-Systems mit der Pistole ..	35
Bild 14: Zeitverlauf der $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3).....	36
Bild 15: Zeitverlauf des $W_H$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3) .....	36
Bild 16: Aufgespreizter Zeitverlauf der $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3).....	37
Bild 17: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Tierbetäubungsgerät .....	38
Bild 18: Versuchsdurchführung mit dem Tierbetäubungsgerät.....	38

Bild 19: Zeitverlauf der Flat <sub>H</sub> -bewerteten Beschleunigung vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34).....	39
Bild 20: Zeitverlauf des W <sub>H</sub> -bewerteten gleitenden Effektivwertes vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34).....	39
Bild 21: Aufgespreizter Zeitverlauf der Flat <sub>H</sub> -bewerteten Beschleunigung vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34).....	40
Bild 22: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Bolzensetzer.....	41
Bild 23: Versuchsdurchführung mit dem Bolzensetzer.....	41
Bild 24: Zeitverlauf der Flat <sub>H</sub> -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1 mit dem Bolzensetzer (Messung 0291 3.3).....	42
Bild 25: Zeitverlauf des W <sub>H</sub> -bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 1 mit dem Bolzensetzer (Messung 0291 3.3).....	43
Bild 26: Aufgespreizter Zeitverlauf der Flat <sub>H</sub> -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1 vom Bolzensetzer (Messung 0291 3.3).....	43
Bild 27: Messpunkte und Versuchsdurchführung vom Druckluftnagler.....	44
Bild 28: Flat <sub>H</sub> -bewertete Beschleunigungszeitverläufe für Druckluftnagler (oben) und Referenzmesspunkt auf dem Werkstück (unten).....	45
Bild 29: Flat <sub>H</sub> -bewertete Beschleunigungszeitverläufe für Schlosserhammer (oben) und Referenzmesspunkt auf dem Werkstück (unten).....	46
Bild 30: Vergleich der frequenzbewerteten Intervalleffektivwerte (T=1s) der betrachteten Geräte.....	52
Bild 31: Vergleich der frequenzbewerteten Intervalleffektivwerte (T=3s) der betrachteten Geräte.....	52
Bild 32: Vergleich der Scheitelfaktoren (CF <sub>H</sub> ) und der Stoßhaltigkeitsquotienten (SC <sub>H</sub> ) der betrachteten Geräte.....	53
Bild 33: Vergleiche der Impulsdauern t <sub>i</sub> und Flankenanstiegszeiten t <sub>a</sub> der betrachteten Geräte.....	53
Bild 34: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus.....	55
Bild 35: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Vorversuche.....	56
Bild 36: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Hauptversuche.....	57

Bild 37: Signalverlauf Halbsinus am Generatorausgang und auf dem Schwingtisch im Vergleich zum Signalverlauf an einem Bolzensetzgerät .....	59
Bild 38: Häufigkeitsverteilung der Wiederholrate für die Grenze zwischen Einzelimpulsen und Impulsfolgen .....	62
Bild 39: Wirkung der Einleitungsstelle auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen .....	65
Bild 40: Einfluss der Versuchspersonen auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen .....	66
Bild 41: Häufigkeitsverteilung der Wiederholrate für Grenze A und Grenze B.....	73
Bild 42: Drei zu unterscheidende Wahrnehmungsbereiche mit ihren Abgrenzungen durch Grenze A und Grenze B .....	74
Bild 43: Zusammenhang zwischen Grenze A und Grenze B.....	75
Bild 44: Mittelwerte, Standardabweichungen und Extremwerte der einzelnen Versuchspersonen für Grenze A und Grenze B .....	78
Bild 45: Wirkung der Art der ausgeübten Tätigkeit auf Grenze A und Grenze B .....	79
Bild 46: Mittlere Stoßempfindung in Abhängigkeit von der Impulsdauer.....	83
Bild 47: Mittlere Stoßempfindung als RMQ-Werte mit unterschiedlicher Frequenzbewertung.....	84
Bild 48: Mittlere Stoßempfindung als Zeitmittelwerte mit linearer Frequenzbewertung sowie Frequenzbewertung nach ISO 5349.....	85
Bild 49: Mittlere Stoßempfindung im doppelt logarithmischen Maßstab .....	86

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	<b>10</b>
1.1	Einleitung .....	10
1.2	Bisheriger Erkenntnisstand.....	13
1.3	Defizitanalyse.....	15
<b>2</b>	<b>Forschungsziel</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Teil A: Untersuchungen zur Messung von Stößen an praktischen Arbeitsplätzen</b> .....	<b>22</b>
3.1	Stand der Normen und Regelwerks .....	22
3.2	Methodik.....	23
3.2.1	Auswerteverfahren und Kenngrößen .....	23
3.2.2	Auswahl typischer Geräte und Versuchsdurchführung .....	29
3.2.3	Zusätzliche Referenzmesspunkte .....	44
3.3	Darstellung der Ergebnisse .....	47
3.3.1	Vergleich der Geräte untereinander .....	47
3.3.2	Zusammenfassung des Untersuchungsteils .....	54
<b>4</b>	<b>Teil B: Laborexperimente zur Definition von Stößen</b> .....	<b>55</b>
4.1	Methodik.....	55
4.1.1	Versuchsaufbau .....	55
4.1.2	Versuchspersonen .....	59
4.2	Vorversuche.....	60
4.2.1	Versuchsdurchführung.....	60
4.2.2	Ergebnisse Vorversuche .....	62
4.3	Hauptversuche.....	68
4.3.1	Versuchsdurchführung.....	68
4.3.2	Ergebnisse Hauptversuche .....	71
<b>5</b>	<b>Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse</b> .....	<b>86</b>
5.1	Teil A.....	86
5.2	Teil B.....	87
<b>6</b>	<b>Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>Umsetzung der Ergebnisse</b> .....	<b>91</b>

<b>8</b>	<b>Literaturnachweis .....</b>	<b>93</b>
<b>Anhang A.</b>	<b>Frequenzbewertungen.....</b>	<b>99</b>
<b>Anhang B.</b>	<b>Beschreibung des Messsystems.....</b>	<b>101</b>
<b>Anhang C.</b>	<b>Messwerte .....</b>	<b>105</b>
<b>Anhang D.</b>	<b>Liste der Versuchspersonen.....</b>	<b>116</b>
<b>Anhang E.</b>	<b>Versuchsinstruktion Vorversuche.....</b>	<b>117</b>
<b>Anhang F.</b>	<b>Versuchsinstruktion Hauptversuch 1 .....</b>	<b>118</b>
<b>Anhang G.</b>	<b>Versuchsinstruktion Hauptversuch 2 .....</b>	<b>120</b>
<b>Anhang H.</b>	<b>Einzelergebnisse für die als „Stoß“ bewertete Kombination von Impulsdauer und Intensität (Hauptversuch 2).....</b>	<b>121</b>

# 1 Problemstellung

## 1.1 Einleitung

An vielen Arbeitsplätzen in Industrie, Gewerbe sowie in Land- und Forstwirtschaft werden mechanische Schwingungen (Vibrationen) erzeugt, die über das Hand-Arm-System auf den Bediener von Maschinen und Werkzeugen einwirken und hierbei unter bestimmten Bedingungen auch verschiedene Gesundheitsschäden verursachen können. Die Einleitung der Schwingungen in das Hand-Arm-System erfolgt in den meisten Fällen über Handgriffe bzw. Bedienelemente des Werkzeuges oder der Maschine, in einigen Fällen auch über das in der Hand zu haltende Werkstück. Je nach den konkreten Randbedingungen des Arbeitsplatzes treten unterschiedliche Arten von Schwingungsexpositionen auf. Insbesondere die angewandten Arbeitstechnologien und Arbeitswerkzeuge verursachen hinsichtlich Frequenz- und Amplitudenverteilung, aber auch hinsichtlich Zeitstruktur und mitwirkender Faktoren (z. B. Andruck- und Greifkräfte) eine große Variationsbreite von Hand-Arm-Schwingungsexpositionen, die wiederum auch zu unterschiedlichen Arten von Gesundheitsschäden führen können. So ist z. B. bei den eher hochfrequenten stationären Schwingungsexpositionen bei der Arbeit mit Schleifmaschinen die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Durchblutungsstörungen größer während bei den eher tieffrequenten impulshaltigen Schwingungen von Aufbruchhämmern mit größerer Wahrscheinlichkeit Knochen- und Gelenkschäden auftreten.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde ein erheblicher Forschungsaufwand betrieben, um von ingenieurtechnischer Seite die methodischen Grundlagen für die Erfassung und Beschreibung (einschließlich messtechnische Beschreibung) der Hand-Arm-Schwingungsexpositionen zu schaffen. Gleichzeitig wurden von biologischer bzw. medizinischer Seite die auftretenden gesundheitlichen Wirkungen umfassend untersucht und geeignete Diagnosemethoden für eventuelle Gesundheitsschäden entwickelt. Im Ergebnis wurden Kriterien zur Gefährdungsbeurteilung sowie für präventive Maßnahmen zum Gesundheitsschutz (vibrationsarme Maschinen, Arbeitsplatzgestaltung, organisatorische Maßnahmen, arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen) erarbeitet.

Alle diese Aktivitäten fanden auch weitestgehend in entsprechende Rechtsvorschriften und Richtlinien zum Gesundheitsschutz sowie in die nationale und internationale Normung Eingang.

Trotz des großen wissenschaftlich-technischen Fortschritts bestehen noch einige Lücken im Erkenntnisstand zu Hand-Arm-Schwingungen. Ein noch weitestgehend ungeklärtes Problem betrifft die Exposition gegenüber einzelnen (diskreten) mechanischen

Stößen, die bei der Arbeit mit mechanisierten oder auch nicht mechanisierten Werkzeugen auftreten können. Einzelstöße sind eine Sonderform der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf das Hand-Arm-System, dadurch charakterisiert, dass im Gegensatz zu üblichen stationären Dauerschwingungen nur eine sehr kurzzeitige Einwirkung mechanischer Energie auf das Hand-Arm-System auftritt.

Durch die besonderen physikalischen Charakteristika der Stoßexpositionen ergeben sich viele Probleme bezüglich der Erfassung (vorranging, aber nicht nur der messtechnischen Erfassung) der Expositionsbedingungen, der biologisch-medizinischen Untersuchung der möglichen Wirkungen, sowie auch hinsichtlich der Methodik von Labor- und Felduntersuchungen zu Ursache-Wirkungs-Beziehungen. Hierdurch wurde lange Zeit eine zielgerichtete und systematische Untersuchung der Stoß-Expositionen behindert. Aufgrund der vergleichsweise geringen Zahl von Stoß-Exponierten wurde zu meist auch keine Dringlichkeit für intensive Untersuchungen gesehen.

Seit einigen Jahren berichten Studien darüber, dass durch Werkzeuge, wie Nagler oder Bolzenschussgeräte verursachte Rückstöße bisher in ihrer gesundheitsschädigenden Wirkung unterschätzt werden [1], [2]. Dies betrifft nicht nur die bekannten, vergleichsweise gut untersuchten spezifischen Vibrationswirkungen (Muskel-Skelettschäden, periphere Durchblutungsstörungen) sondern auch Schäden, deren Ursache-Wirkungs-Beziehungen noch nicht so gut bekannt sind (Beeinträchtigung des peripheren Nervensystems, Hypothenar-Hammer-Syndrom, Carpaltunnel-Syndrom). Bisher ist jedoch international keine generell akzeptierte Methodik bekannt, mit der man die Risiken von Einzelstößen bzw. diskreten Stößen bewerten könnte.

Die wissenschaftliche Begründung zur Wie-Berufskrankheit Hypothenar-Hammer-Syndrom wurde vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales in 2012 zusammen mit der Empfehlung des Ärztlichen Sachverständigen-Beirats zur Aufnahme in die BK-Liste zur Berufskrankheiten-Verordnung veröffentlicht.

UVT-intern liegt eine Auswertung von 62 anerkannten Berufskrankheiten-Fällen BK 2114 Hypothenar-Hammer-Syndrom aus den Jahren 1991 bis 2012 vor. Von diesen 62 Fällen ist bei 16 Fällen eine Vibrationsbelastung zumindest beteiligt. Zusätzlich liegen in 9 Fällen Einzelstöße mit Werkzeugen vor.

Als weitere Erkrankungsart ist die BK 2113 Carpaltunnel-Syndrom zu nennen, die u.a. auch durch Vibrationen bzw. stoßartige Einwirkungen verursacht werden kann (siehe auch [1]).

In [3] wird über hohe Prävalenzen für Osteoarthrosis des Handgelenks, Arthrose und Osteophytosis des Ellbogens bei Arbeitern in Kohlebergbau, Straßenbau und Metallindustrie, die gegenüber Stößen und niederfrequenten Vibrationen mit hoher Amplitude durch schlagende, pneumatisch angetriebene Werkzeuge exponiert sind, berichtet.

In internationalen Normungsgremien wird kontrovers diskutiert, ob Hersteller Vibrationsemissionswerte gemäß Maschinenrichtlinie für Eintreibgeräte aufgrund der Einzelstöße angeben müssen. In den vorliegenden nationalen und internationalen Normen und Regelwerken zur Einwirkung von mechanischen Schwingungen auf das menschliche Hand-Arm-System ist bislang keine wissenschaftlich abgesicherte Methodik zur Beurteilung der Lästigkeit und der Gesundheitsgefährdung von einzelnen stoßartigen Einwirkungen enthalten. Gängige Standards erlauben zwar auch die provisorische Anwendung auf periodisch wiederholte stoßhaltige Schwingungen, wie sie z. B. bei der Arbeit mit Druckluftschlämmern auftreten. Im Anwendungsbereich von ISO 5349-1:2001 [4] wird auf die Vorläufigkeit der Anwendung der Norm "im Zusammenhang mit Erregung durch wiederholt auftretende Stöße (Einzelstöße)" hingewiesen. Anmerkung 1 erläutert, dass die Abhängigkeit zwischen der zeitlichen Einwirkung von wiederholt auftretenden einzelnen Stößen und ihren Auswirkungen beim Menschen noch nicht im vollen Umfang bekannt ist.

Unter Fachleuten bestehen Zweifel, ob Einzelstöße bzw. in größeren zeitlichen Abständen wiederholt einwirkende Einzelstöße mittels dieser Methoden korrekt erfasst und beurteilt werden können. In einigen Untersuchungen wurden Diskrepanzen zwischen den aus Beschleunigungs- und Expositionszeitmesswerten errechneten Schädigungshäufigkeiten und der Anzahl der tatsächlich durch impulshaltige Hand-Arm-Schwingungsexposition geschädigten Arbeiter festgestellt [5], [6], was als Hinweis auf die Nicht-Anwendbarkeit der gängigen Beurteilungs- und Bewertungsverfahren für impulshaltige Schwingungen gedeutet werden kann.

Im Rahmen der Arbeit an Sicherheitsnormen für handgehaltene und geführte Maschinen (Maschinen-Richtlinie) beschloss das ISO/TC 118/SC 3 "Druckluftwerkzeuge und Maschinen" 2011, dass Stöße nicht als Schwingungen zu betrachten sind und daher nicht als ein Sicherheitsaspekt im Sinne der Maschinen-Richtlinie behandelt zu werden brauchen (siehe Resolution 83, WG 3 Milano 9 [7]).

Auf seiner Sitzung im Jahr 2011 verabschiedete das ISO/TC 108/SC 4 "Human exposure to mechanical vibration and shock" die Resolution 2/2011, in der der Standpunkt des ISO/TC 118/SC 3 kritisiert wird. Das SC 4 sah keinen Beweis dafür, dass die von

Maschinen mit einer Schlag-/Auslöserate  $< 5$  Hz erzeugten Einzelstöße nicht als Schwingungsproblem anzusehen sind [8].

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass derzeit noch weitest gehende Erkenntnisdefizite über die subjektive Störwirkung und die mögliche gesundheitliche Relevanz von einzelnen, auf das Hand-Arm-System einwirkenden Stößen bestehen. Hierbei bestehen nicht nur Defizite hinsichtlich der Anwendung bzw. praktischen Umsetzung bekannter Methoden und Verfahren bei Hand-Arm-Schwingungsexpositionen, sondern es bestehen auch grundlegende Erkenntnisdefizite hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes "Stoß". Andererseits ist durch die aktuellen Diskussionen im Rahmen des Berufskrankheiten-Geschehens sowie im Rahmen der internationalen Normung ein gewisser Handlungsdruck aufgebaut worden.

Eine umfassende Lösung der bestehenden Probleme ist nur durch eine Vielzahl von einzelnen Untersuchungen in interdisziplinärer Zusammenarbeit von technischen und medizinischen Fachdisziplinen möglich. Es erscheint für alle zukünftig durchzuführende Untersuchungen jedoch als unbedingt notwendig, zuerst eine einheitliche Definition von Stößen zu erarbeiten, die technischen und methodischen Grundlagen für die messtechnische Erfassung von Stoßexpositionen zu schaffen und einen umfassenden Überblick über praktisch in der Arbeitswelt vorkommende Stoßexpositionen zu erlangen.

## **1.2 Bisheriger Erkenntnisstand**

### **Messtechnische Erfassung der Expositionsbedingungen**

Erste Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung von Stoßexpositionen wurden in den 1980er Jahren durchgeführt und basierten auf den Erfahrungen bei der Messung der Schwingungsexposition an schlagenden Maschinen wie z. B. Drucklufthämmern und Schlagbohrmaschinen [9]. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die fehlerfreie und reproduzierbare Messung von Stößen, die auf das Hand-Arm-System des Menschen bei der Arbeit mit mechanisierten und nicht mechanisierten Werkzeugen einwirken sowie die Auswahl geeigneter physikalischer Größen und Messparameter zur Beschreibung der Stoßexposition. Erschwert wurden diese Untersuchungen durch die damals noch weitestgehend analog arbeitende Messtechnik sowie durch die noch unvollkommenen messtechnischen Möglichkeiten der Speicherung, Registrierung und Auswertung transienter Signale. Trotzdem konnten typische Arbeitsplätze mit Stoßexposition dem damaligen Stand der Technik entsprechend bereits messtechnisch beschrieben werden [10], [11].

Durch die Digitalisierung der Messtechnik in den vergangenen Jahren ist die Speicherung, Registrierung und die flexible Auswertung von Messsignalen erheblich vereinfacht worden. Davon kann auch bei der messtechnischen Erfassung von Stoßexpositionen profitiert werden. Grundlegende messtechnische Probleme z. B. zu Sensorwahl und -ankopplung bestehen jedoch weiter. Weiterhin fehlt eine, für eine umfassende messtechnische Erfassung notwendige vereinheitlichte Messmethodik. Ein erster Schritt hierzu ist durch die Vornorm bzw. Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15694 [12] gemacht worden.

### **Ursache-Wirkungs-Beziehungen**

In der arbeitsmedizinischen Praxis existieren keine gesicherten Kenntnisse darüber, ob diskrete Stöße schädigend auf den Organismus wirken können bzw. anders wirken als stoßhaltige Schwingungen z. B. von Drucklufthämmern. Es gibt im nationalen und internationalen Schrifttum nur relativ wenige veröffentlichte Untersuchungsergebnisse zu dieser Problematik, welche außerdem recht widersprüchlich sind. Diese Widersprüche sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch darauf zurückzuführen, dass die Autoren bzw. Untersucher zwar über Untersuchungen zum Thema "Stoßexposition" berichteten, dass es bei ihnen jedoch unterschiedliche Auffassungen und Meinungen darüber gab, was denn nun eigentlich ein "Stoß" ist. Bei einigen Veröffentlichungen zur Stoßproblematik wurden nur mangelhafte Angaben zu den untersuchten Arbeitstätigkeiten bzw. Expositionen gemacht, so dass nicht ersichtlich ist, ob es sich um einzeln auftretende bzw. diskrete Stöße, Stoßfolgen oder stoßhaltige Schwingungen handelt.

Die wenigen Arbeiten, die sich mit der medizinischen Untersuchung von eindeutigen Stoßexpositionen befassen, zeigen, dass hierbei wahrscheinlich unterschiedliche Wirkungsmechanismen gegenüber stationären Hand-Arm-Schwingungen oder auch periodisch wiederholten Stoßfolgen bestehen [13], [14]. In [13] wird z. B. über Untersuchungen an 313 Schmieden und 51 Richtarbeitern mittels Kapillaroskopie, Pallästhesiometrie und Hauttemperaturmessungen berichtet. Es wurden für beide Berufsgruppen Durchblutungsstörungen und Fühlschwellenerhöhungen in Abhängigkeit von den Berufsjahren festgestellt wobei die Richtarbeiter eine höhere Auffälligkeit im Vergleich zu den Schmieden zeigten.

Von STARCK und Mitarbeitern, sowie auch von anderen Autoren, wird vermutet, dass eine höhere Impulshaltigkeit von Hand-Arm-Schwingungen generell, also auch bei stoßhaltigen Schwingungen wie z. B. bei Drucklufthämmern, eine höhere Gesundheitsgefährdung bewirkt [15], [16], [17], [18]. Auch die Untersuchungsergebnisse von

ZURAVLJOV und Mitarbeiter [19], [20] weisen darauf hin, dass bei Stoßexpositionen andere Mechanismen der Wirkung auf den Organismus existieren. Hierbei werden anscheinend insbesondere die höheren Frequenzanteile in ihrer Wirksamkeit bisher unterschätzt [21], [22].

Demgegenüber wird in einer Reihe von Publikationen aus dem Arbeitskreis von DUPUIS [23], [24], [25] geschlussfolgert, dass stoßhaltige Schwingungen im Wesentlichen nach den gleichen Kriterien wie stationäre stochastische Schwingungen zu bewerten sind. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen YING u.a. [26].

Die Einwirkung von Schwingungen, welche aus Stoßfolgen bestehen (stoßhaltige Schwingungen), wird zwar sehr oft als besonders gesundheitsschädlich herausgestellt [27], [28], [29], ihre Messung, epidemiologische Erfassung und arbeitsmedizinische Beurteilung erfolgt jedoch nach den gleichen Kriterien wie bei harmonischen bzw. breitbandigen stationären Hand-Arm-Schwingungen. Es ist jedoch fraglich, ob bei größer werdenden zeitlichen Abständen der Einzelstöße, wie z. B. bei der Arbeit mit Bolzensetzgeräten, Naglern u. ä. mechanisierte oder unmechanisierte Werkzeuge, nach den gleichen Mess- und Beurteilungsmethoden verfahren werden kann.

### **1.3 Defizitanalyse**

In Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse ist festzustellen, dass aus folgenden Gründen die Beurteilung der gesundheitlichen Relevanz von Arbeitsplätzen mit stoßartigen Expositionen bislang nicht möglich ist:

1. Messtechnische Untersuchungen von mechanischen Stößen sind sehr schwierig, nur mit moderner und aufwendiger Gerätetechnik sowie nur mit ausreichender Messerfahrung durchzuführen. Auf diesem Gebiet ist in den vergangenen ca. 20 Jahren mit Einführung der Digitaltechnik ein erheblicher Fortschritt (insbesondere hinsichtlich der Speicherung und Analyse von Stoßsignalen) erzielt worden. Bestimmte grundlegende Probleme im Zusammenhang mit dem Sensor (Aufnehmerauswahl und -ankopplung, mechanisches Filter, Linearität im interessierenden Frequenzbereich u. ä.) und der Messtechnik (Frequenzbereich, Phasengang, Übersteuerungssicherheit, Nullliniensprünge) sind aber nach wie vor wirksam.

Es besteht noch kein umfassender messtechnischer Überblick über praktisch auftretende Stoßexpositionen.

2. Es existiert keine arbeitsschutzrelevante Definition für diskrete Stöße und demzufolge auch keine eindeutige Abgrenzung zu stationären Schwingungen bzw. zu ähnlichen Expositionen (impulshaltige Schwingungen, stoßhaltige Schwingungen, Stoßfolgen ...). Es ist fraglich, dass bei bereits vorgenommenen Untersuchungen zu Stoßexpositionen unterschiedlicher Untersucher Übereinstimmung darüber bestand, was unter einem "Stoß" zu verstehen ist.
3. Es herrscht Unkenntnis darüber, ob diskrete Stöße schädigend auf den Organismus wirken können bzw. anders wirken als stoßhaltige Schwingungen z. B. von Drucklufthämmern. Demzufolge bestehen keine gesicherten Erkenntnisse über möglicherweise auftretende Schäden und ihre medizinische Diagnose. Untersuchungen zum Hypothenar-Hammer-Syndrom (HHS), bei denen ein Zusammenhang zwischen arteriellen Durchblutungsstörungen in der Hand und manuellen Schlägen (Stößen) mit der Hand ermittelt wurde, lassen vermuten, dass auch bei der Arbeit mit mechanisierten oder unmechanisierten Werkzeugen mit Stoßerzeugung Gesundheitsschäden auftreten können.
4. Es bestehen keine Kenntnisse darüber, welche physikalischen Größen (z. B. Beschleunigung, Geschwindigkeit, Kraft) und welche Signalparameter (Effektivwerte root mean square und/oder root mean quad, Spitzenwerte positiv, negativ, Spitze-Spitze, Scheitelfaktor, Stoßdauer, Anstiegszeit ...) biologisch relevant sind. Welche Spektralinformationen (Amplitudenspektrum, Effektivwertspektrum, Leistungsdichte, Energiedichte ...) sind von Relevanz? Sind bisher genutzte Frequenzbewertungsfunktionen anwendbar (z. B. nach ISO 5349-1); sind neue (unbekannte) Bewertungsfunktion erforderlich?  
Es kann derzeit nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass die bisher standardisierten Größen auch für alle Arten von Stößen anwendbar sind. Möglicherweise sind vollkommen neue Beurteilungsgrößen zu definieren. In diesem Zusammenhang stellt sich außerdem die Frage nach eventuell erforderlichen Richt- bzw. Grenzwerten der Exposition.

Die internationale Forschung zur Stoß-Thematik wird durch eine sehr uneinheitliche Terminologie erschwert. Im Zusammenhang mit Stoß-Expositionen werden viele verschiedene Begriffe benutzt:

Stöße, Einzel-Stöße, wiederholte Stöße, Stoßfolgen,  
stoßhaltige Schwingungen, impulshaltige Schwingungen

Im englischen Sprachgebrauch besteht die gleiche Problematik:

single shocks, repetitive shocks, transients, transient vibration,  
impulsive vibration, shock-type vibration

Begriffsbestimmungen angrenzender Fachbereiche (technischen Mechanik, Schwingungstechnik) gehen von der physikalischen Stoßdefinition aus, wonach die Stoßdauer sehr klein gegenüber der Eigenperiode sein muss [30], [31]. In [32] sind mehrere Stoßdefinitionen (Shockdefinitionen) aufgeführt. Alle diese Definitionen sind jedoch für den konkreten Fall der Stoßexposition auf das Hand-Arm-System nicht praktikabel bzw. nicht ausreichend.

Mangels einer einheitlichen Definition für diskrete Stöße wurden in der Vergangenheit des Öfteren Untersuchungen, welche die Wirkung von stoßhaltigen Schwingungen oder von Stoßfolgen (z. B. bei Drucklufthämmern) beinhalteten, unter die Thematik „Stoß“ gestellt. Andererseits besteht der Verdacht, dass bei vielen Untersuchungen keine eindeutige Abgrenzung zwischen Exposition gegenüber diskreten Stößen und sonstigen Hand-Arm-Schwingungen vorgenommen wurden [33], so dass eventuell unterschiedliche Wirkungen von diskreten Stößen bzw. Stoßfolgen nicht erkennbar sind.

Einige Fachleute [34], [5], betrachten eine Stoßfolgefrequenz, welche der unteren Frequenzgrenze der Hand-Arm-Frequenzbewertungskurve der ISO 5349-1 (5,6 Hz) entspricht, als Kriterium für die Abgrenzung von Stößen zu Stoßfolgen. Auch in DIN ISO/TS 15694 [12] wird eine Schlagzahl von 5 Hz zur Abgrenzung des Anwendungsbereiches für die Norm genannt. Es besteht jedoch keine wissenschaftliche Absicherung dieses Kriteriums. Hierzu ist anzumerken, dass alle bisherigen Frequenzbewertungskurven für stationäre Schwingungseinwirkungen entwickelt wurden, um die biologische Wirkung unterschiedlicher Frequenzkomponenten besser zu beschreiben. Sie wurden nicht entwickelt, um die zeitliche Struktur des Auftretens der Schwingungen zu charakterisieren. Das Herausgreifen einer Eckfrequenz aus einem de facto stetigen Filterverlauf (mit einer Genauigkeit von einer Stelle nach dem Komma) erscheint deshalb sehr willkürlich.

## **2 Forschungsziel**

Wesentliches Ziel der hier beschriebenen Forschungstätigkeit war einerseits die Schaffung methodischer Grundlagen für eine einheitliche Messung von Stößen (Teil A) sowie andererseits die Ermittlung von Kriterien zur Abgrenzung von Stößen zu anderen Arten der Hand-Arm-Schwingungsexposition (Teil B).

## **Teil A – bearbeitet durch das Institut für Arbeitsschutz**

Die Messung und Bewertung von Stößen, die auf das Hand-Arm-System des Menschen bei der Arbeit mit Handwerkzeugen und -maschinen einwirken, ist immer noch mit offenen Fragen und Problemen behaftet. Die Messung von Stößen muss unter besonders strenger Beachtung der von der Messung mechanischer Schwingungen an schlagenden Werkzeugen bekannten Grundsätze erfolgen. Zu klären sind Fragen des Einsatzes mechanischer Filter und der Ankopplung der Schwingungsaufnehmer an starren Griffen bzw. an Griffen mit elastischem Überzug.

Da über die biologisch relevanten physikalischen Größen und messtechnischen Parameter noch weitestgehend Unkenntnis herrscht, ist eine Speicherung des Zeitverlaufs der Stöße zwecks späterer Auswertungen mit unterschiedlichen Messparametern erforderlich. Um eine Vergleichbarkeit der Spitzenwerte unterschiedlicher Messungen zu gewährleisten, ist eine Frequenzbegrenzung nach hohen Frequenzen notwendig. Hierzu ist eine geeignete Grenzfrequenz zu ermitteln.

Im Rahmen des hier beantragten Projektes geht es darum, diese Kenntnisse und Erfahrungen an den heutigen Stand der Messtechnik anzupassen und unter Berücksichtigung vorliegender nationaler bzw. internationaler Normen sowie unter Berücksichtigung der Ergebnisse des Aufgabenteils A eine standardisierte Mess- und Auswertemethodik zu erarbeiten. Diese Methodik ist mittels bereits vorhandener gespeicherter Stoßsignale im Labor sowie auch beim Einsatz an praktisch vorkommenden Arbeitsplätzen mit Stoßexposition zu erproben. Im Einzelnen sind folgende Untersuchungen vorgesehen:

1. Schaffung eines messtechnischen Überblickes über praktisch auftretende Stoßexpositionen (eigene Messungen des IFA und KSZ, Literatur und andere Quellen, z.B. WTZ für Arbeitsschutz)
2. Erarbeitung und Anwendungserprobung einer einheitlichen Messmethodik für Stöße am Beispiel von typischen Werkzeugen und Arbeitsgeräten mit Einzelstößen (Aufnehmer, Messtechnik, Frequenzbereiche, Speicherung, Messparameter, Auswertung ...)

## Teil B – bearbeitet durch die KSZ Ingenieurbüro GmbH

Wenn im Zusammenhang mit Hand-Arm-Schwingungen von einzelnen Stößen die Rede ist, so bedeutet hierbei der Begriff „Einzelstoß“ nicht, dass nur ein einziger Stoß im gesamten Arbeitsleben des Arbeiters oder beispielsweise nur ein Stoß pro Arbeitstag auftritt. Eine Exposition gegenüber Einzelstößen (oder besser gesagt gegenüber diskreten Stößen) ist vielmehr dadurch gekennzeichnet, dass die Zeitdauer bis zum Eintreten des nächsten Stoßes im Vergleich zur Dauer der Energieeinwirkung (Stoßdauer) sehr lang ist und üblicherweise vom Arbeiter selbst bestimmt werden kann. Ein typisches Beispiel für solche Stoß-Expositionen ist die Arbeit mit Bolzensetzgeräten.

Die Zielstellung für den Aufgabenteil B soll unter diesen Gesichtspunkten anhand eines theoretischen Beispiels abgeleitet werden. Bild 1 zeigt im oberen Teil eine Anzahl einzelner Ereignisse (Stöße), welche alle die gleiche Intensität und eine Dauer von 10 ms aufweisen. Bei einem Impulsabstand von 200 ms treten 5 Stöße pro Sekunde auf (Wiederholrate  $5 \text{ s}^{-1}$  bzw. Wiederholfrequenz 5 Hz). Im unteren Teil der Grafik treten im gleichen Zeitraum 10 Stöße mit der gleichen Impulsdauer und der gleichen Intensität auf (Impulsabstand 100 ms entsprechend einer Wiederholrate von  $10 \text{ s}^{-1}$ ).

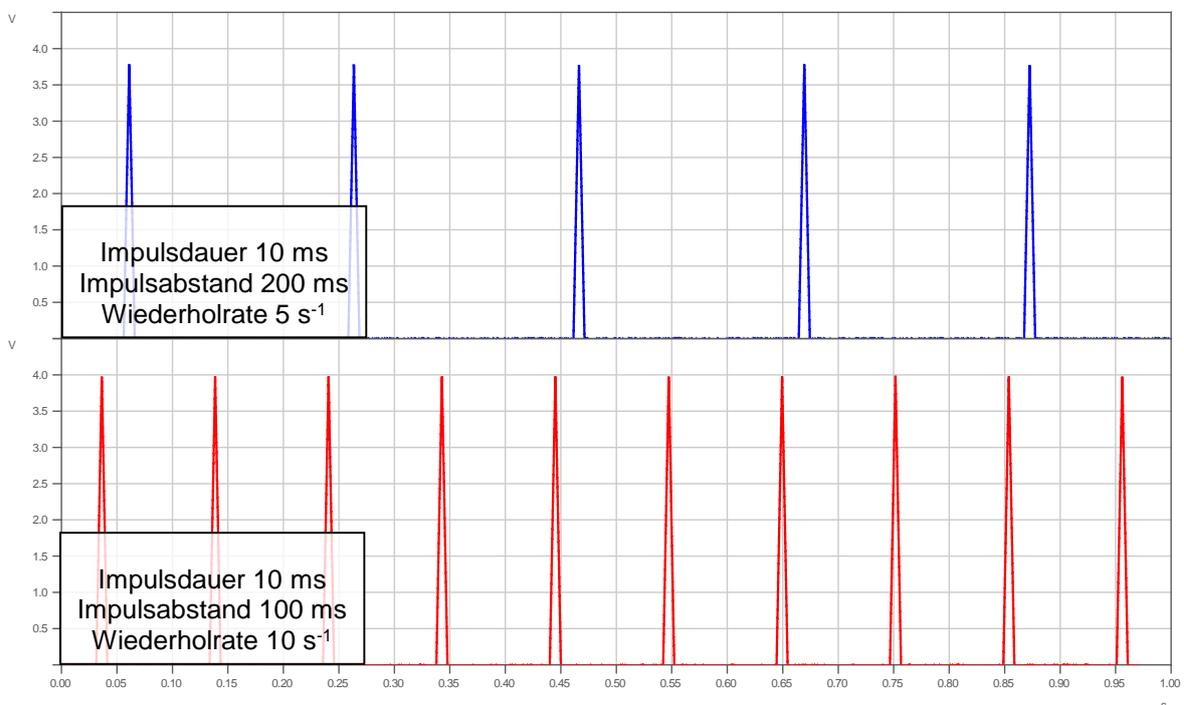


Bild 1: Theoretisches Beispiel für aufeinanderfolgende Einzelimpulse

Abgesehen vom Impulsabstand sehen sich die beiden Grafiken sehr ähnlich. Einige Fachleute [5], [34] sind jedoch der Meinung, dass im Gegensatz zu einer Exposition entsprechend der unteren Grafik in Bild 1 eine Exposition entsprechend der oberen Grafik im Bild 1 nicht mehr mit den Methoden geltender Standards (z. B. ISO 5349-1) zu behandeln ist.

Die ISO 5349-1:2001 gilt für „... periodische, stochastische und nichtperiodische Schwingungen ...“ [4]. Eine Anwendung auf „... wiederholt auftretende Stöße (Einzelstöße) ...“ wird „vorläufig“ zugelassen [4]. Ohne weitere wissenschaftliche Untermauerung wird in [5] bei wiederholt auftretenden Stößen (Stoßfolgen) eine Wiederholrate von  $5 \text{ s}^{-1}$  für die Abgrenzung der Anwendbarkeit der ISO 5349-1 vorgeschlagen. Im Angesicht der doch sehr ähnlichen Zeitverläufe im oberen und unteren Teil von Bild 1 (mit Ausnahme des zeitlichen Abstandes der Einzelereignisse) erscheint diese Abgrenzung recht willkürlich.

Es ergibt sich für die Untersuchungen folgende Fragestellung:

#### **Fragestellung 1:**

**Wie lange muss der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen sein, damit noch von einzelnen Stößen bzw. diskreten Stößen gesprochen werden kann bzw. wie schnell müssen diese Stöße aufeinanderfolgen, damit sie nicht mehr als diskrete Stöße sondern als Stoßfolge gelten?**

Bezüglich der Abgrenzung von Stößen zu anderen Arten der Hand-Arm-Schwingungen sind weitere Details zu betrachten. Wenn die Dauer der 5 Einzelereignisse der oberen Grafik aus Bild 1 von 10 ms auf 200 ms verlängert werden (siehe untere Grafik in Bild 2), so treten immer noch 5 Ereignisse mit der gleichen Intensität auf. Zwischen diesen Ereignissen bestehen jedoch keine schwingungsfreien Lücken mehr. Im Zeitverlauf ist eher eine Sägezahnschwingung zu erkennen anstatt 5 Einzelereignisse. Es gibt keinen plötzlichen Wechsel der Intensität sondern ein eher langsames An- und Abschwellen des Signals. Es erscheint nicht mehr gerechtfertigt, von Stößen zu sprechen. Zwischen der oberen und der unteren Grafik muss im Zusammenhang mit der Veränderung der Anstiegssteilheit ein allmählicher Übergang von Stößen zu Nicht-Stößen stattgefunden haben.

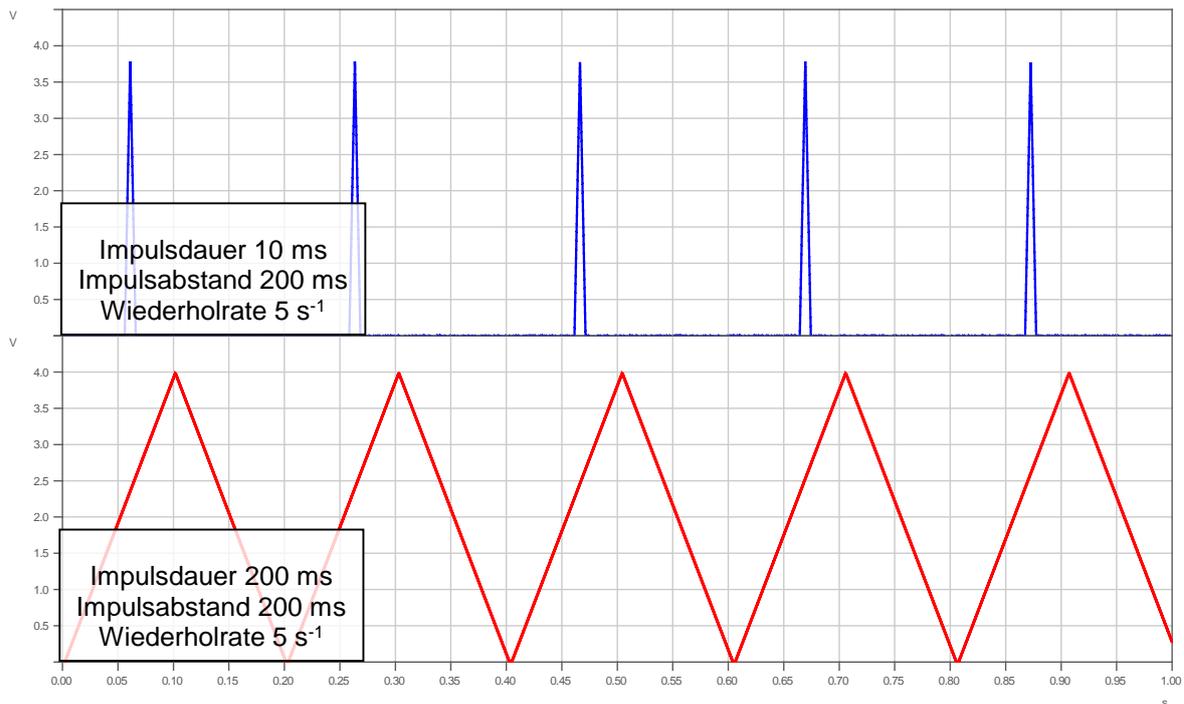


Bild 2: Impulsfolge aus Bild 1 mit veränderter Anstiegssteilheit

Die Untersuchungen haben also auch die folgenden, im Zusammenhang mit der Veränderung der Anstiegssteilheit auftretenden Fragen zu beantworten:

**Fragestellung 2:**

**Gibt es eine untere Intensitätsgrenze für Stöße?**

**Gibt es eine untere und/oder eine obere Grenze für die Dauer eines Ereignisses, um es als Stoß bezeichnen zu können?**

**Gibt es bei Stößen eine Wechselwirkung zwischen Intensität und Dauer?**

Es ergeben sich also zwei wesentliche Zielstellungen zur Untersuchung der Abgrenzung von Stoßexpositionen zu anderen Arten der Hand-Arm-Schwingungsexposition:

1. Abgrenzung hinsichtlich der Wiederholrate der Einzel-Ereignisse (Impulse)
2. Abgrenzung hinsichtlich Intensität und Dauer (Anstiegssteilheit)

Bei den Untersuchungen soll nur die subjektive Wahrnehmung der Versuchspersonen hinsichtlich der an der Hand bzw. an den Fingern gefühlten Ereignisse (Bewegungen, Impulse) bestimmt werden. Die Versuchspersonen entscheiden, welche Ereignisse (Bewegungen, Impulse) sie als Stöße bzw. Stoßfolgen betrachten und welche nicht. Es wurden keine Untersuchungen zu biologischen Effekten oder zu gesundheitlichen

Wirkungen durchgeführt. Deshalb war es auch möglich, die Untersuchungen nur mit knapp über der Fühlschwelle liegenden Intensitäten durchzuführen. Die bei den Versuchen an der Einwirkungsstelle in das Hand-Arm-System wirksamen Beschleunigungen (50 – 100 m/s<sup>2</sup> peak) liegen um Größenordnungen unterhalb der bei praktischen Arbeitstätigkeiten auftretenden Spitzenwerten (mehrere 1000 m/s<sup>2</sup> peak).

### **3 Teil A: Untersuchungen zur Messung von Stößen an praktischen Arbeitsplätzen**

#### **3.1 Stand der Normen und Regelwerks**

Maßgeblich für die Messung und Bewertung sowie Beurteilung der Schwingungseinwirkungen auf das Hand-Arm-System (Vibrationsexposition) ist die DIN EN ISO 5349-1 [4]. Insbesondere auf die dort festgelegten Frequenzbewertungen und Mittelungsverfahren basieren und verweisen die Emissionsmessnormen sowie die Messnormen zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdung am Arbeitsplatz. Für Arbeitsplatzmessungen gibt der Teil 2 der DIN EN ISO 5349 [35] genauere Festlegungen zur Durchführung der Messung.

Zur besseren Beschreibung der Anregungen des Hand-Arm-Systems mit wiederholten Stößen unter 5 Hz, legt die Technische Spezifikation DIN EN/TS 15694 [12] weitere Kenngrößen fest. Darüber hinaus werden auch weitergehende Anforderungen an die Messungsrichtung nach DIN EN ISO 8041 [36] festgelegt. Sie stellt damit eine Grundlage für Messungen und Bewertungen der Emissionen diskreter Stöße von handgeführten und handgehaltenen Maschinen dar, jedoch ohne weitere Beurteilungsverfahren.

Derzeit wird an einer zusätzlichen Frequenzbewertung zur besseren Beurteilung der Gesundheitsgefährdung von vibrationsbedingten Durchblutungsstörungen an den Händen gearbeitet. Diese als Technische Spezifikation geplante Veröffentlichung wird derzeit als ISO/PWI 18570 bezeichnet [37].

Die Anforderungen an die Messeinrichtungen der Schwingungseinwirkungen auf den Menschen sind mit den spezifischen Leitungsmerkmalen und deren rückführbaren Überprüfung in DIN EN ISO 8041 [36] festgelegt. Die im Jahre 2006 überarbeitete Fassung, mit den weiteren Änderungen in der Ergänzung von 2015 [38], enthält auch die für die Messung von Stößen erforderlichen Anforderungen an den Phasengang.

## 3.2 Methodik

### 3.2.1 Auswerteverfahren und Kenngrößen

Für die Auswertung von Hand-Arm-Vibrationsmessungen wird sowohl eine Frequenz- als auch eine Zeitbewertung der gemessenen Beschleunigung durchgeführt. Der Frequenzbewertung liegt zu Grunde, dass Vibrationen mit unterschiedlichen Frequenzen auch ein unterschiedliches Schädigungspotential auf das Hand-Arm-System des Menschen haben. Um diesen Sachverhalt zu erfassen, werden die gemessenen Beschleunigungen über ihren Frequenzbereich mit einem frequenzabhängigen Bewertungsfaktor zwischen 0 und 1 bewertet. Der Verlauf solcher Bewertungsfaktoren wird in Frequenzbewertungskurven dargestellt. In dieser Arbeit werden drei verschiedene Frequenzbewertungsfilter verwendet, dabei entspricht die  $Flat_h$ -bewertung einer Bandbegrenzung zwischen 6,3 Hz und 1250 Hz.

Zunächst erfolgt für alle Messungen die Bandbegrenzung mit dem  $Flat_h$ -Bewertungsfilter. Dieser stellt im Wesentlichen eine Bandbegrenzung zwischen 6,3 Hz und 1250 Hz dar (siehe Anhang A, Bild A 1). Innerhalb dieses Frequenzbandes wird die Beschleunigung mit dem Faktor 1 bewertet.

Nach der Bandbegrenzung erfolgt die Bewertung des gemessenen Signals mit Hilfe der Hand-Arm-Bewertungsfilter  $W_h$  und  $W_p$ . Die DIN EN ISO 5349 spezifiziert dabei den Hand-Arm-Bewertungsfilter  $W_h$  (siehe Anhang A, Bild A 2) [4]. Diese Frequenzbewertung basiert auf Kurven gleicher Wahrnehmung und wird bisher auf periodische, stochastische und nicht periodische Schwingungen angewendet. In der DIN EN ISO 5349 ist weiterhin festgelegt, dass der Frequenzbewertungsfilter  $W_h$  auch zur Bewertung von Einzelstößen herangezogen werden kann, bis es neuere Normenteile zur Behandlung von Einzelstößen gibt.

In der ISO/PWI 18570 wird der Hand-Arm-Bewertungsfilter  $W_p$  definiert (siehe Anhang A, Bild A 3) [37]. Dieser Filter ist für die Bewertung von Durchblutungsstörungen konzipiert.

Zusätzlich zur Frequenzbewertung ist eine Zeitbewertung der gemessenen Beschleunigungen maßgeblich für den Wert der Kenngröße. Das Zeitfenster für die Auswertung der Beschleunigung ist so zu wählen, dass ein Vergleich verschiedener Einzelstoßvorgänge möglich wird. Es werden die in der CEN ISO/TS 15694 vorgeschlagenen Zeitintervalle von 1s bzw. 3s verwendet, die es ermöglichen den Stoßvorgang in der Messdauer zu erfassen (Bild 3) [12].

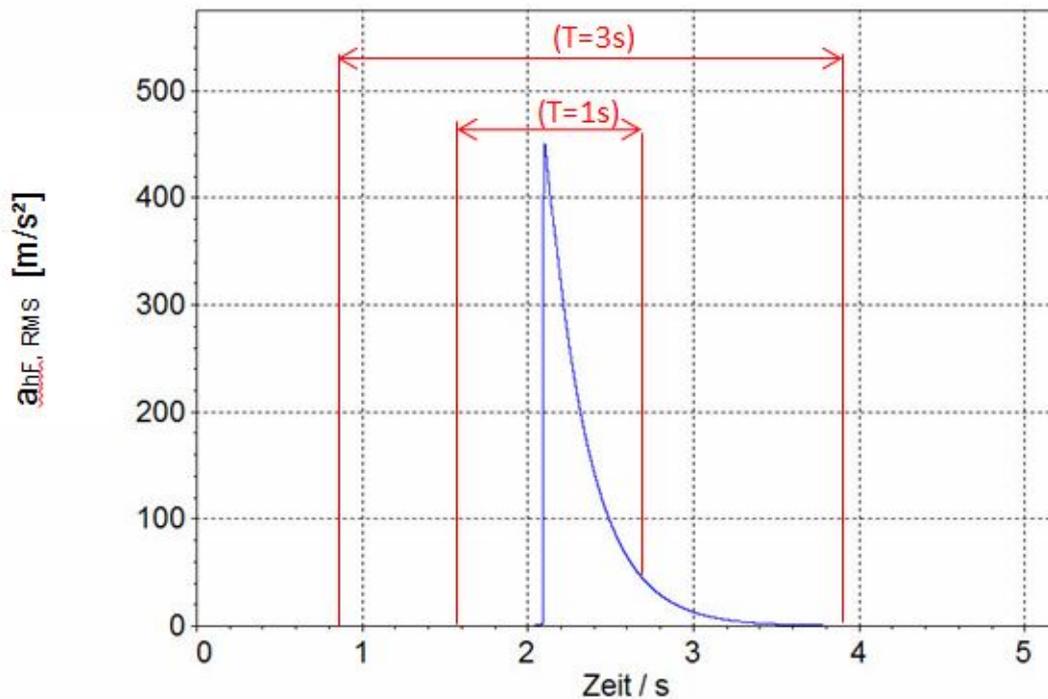


Bild 3: Beispiel des Zeitverlaufs des Flat<sub>h</sub>-bewerteten gleitenden Effektivwertes (Zeitkonstante  $\tau = 0,125s$ ) beim Hämmern mit entsprechender Zeitbewertung von 1s bzw. 3s

Die für dieses Projekt ermittelten Kenngrößen entsprechen den in der Vornorm CEN ISO/TS 15694 festgelegten Kennwerten. Zusätzlich werden noch die Flankenanstiegszeiten und Impulsdauern der Stöße erfasst. Die Messergebnisse werden abschließend sowohl unbewertet, als auch mit den Frequenzbewertungen  $W_h$  und  $W_p$  dargestellt.

Alle Messungen wurden mit der Software MEDA ausgewertet (Beschreibung des Messsystems und der Software siehe Anhang). Die Messungen der Schusswaffe, des Tierbetäubungsgerätes und des Bolzensetzers waren bereits als Daten aus Praxismessungen im IFA vorhanden. Diese Messungen wurden im ASCII-Format in MEDA für eine weitergehende Auswertung eingelesen. Für den Schlosserhammer wurde eine neue Messreihe durchgeführt. Diese wurde direkt mit MEDA aufgezeichnet und ausgewertet.

Bis auf die Auswertung des Rucks und des überenergetischen Mittelwertes wurden alle Kennwerte mit MEDA erzeugt. Die Berechnung der genannten Ausnahmen wurde mit MatLab durchgeführt.

Nachfolgend wird die Bildung der Kenngrößen exemplarisch für die Flat<sub>h</sub>-Bewertung mit den wesentlichen Eigenschaften im Einzelnen dargestellt. Die Bildung der Kenngrößen für die Frequenzbewertungen  $w_h$  und  $w_p$  erfolgt nach dem gleichen Bildungsverfahren.

### Intervall-Effektivwert der Beschleunigung:

Der Intervall-Effektivwert  $a_{hF, RMS, T}$  ist der Effektivwert der Beschleunigung  $a_{hF}$  in einem festgelegten Zeitintervall  $T$ .

$$a_{hF, RMS, T} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{hF}^2(t) dt}$$

mit

$a_{hF}$	Beschleunigung
$t$	Beobachtungszeit
$T$	Zeitkonstante

Durch eine feste Mittelungsdauer werden so Einzelstoßvorgänge mit verschiedenen Messzeiten vergleichbar gemacht. Für die Auswertung wurde jeweils ein 1s- bzw. 3s-Fenster um den entsprechenden Impuls gelegt. Bild 1 zeigt exemplarisch den Verlauf des Flat<sub>h</sub>-bandbegrenzten gleitenden Effektivwertes beim Hämmern und die entsprechenden Zeitintervalle, in denen das Signal ausgewertet wurde.

### Gleitender Effektivwert:

Der gleitende Effektivwert einer Beschleunigung  $a_{hF}$  zum Beobachtungszeitpunkt  $t$  ist:

$$a_{hF, RMS, \tau}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t a_{hF}^2(\xi) e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} d\xi}$$

mit

$a_{hF}$	Beschleunigung
$t$	Beobachtungszeit
$\xi$	Integrationsvariable
$\tau$	Zeitkonstante

Für alle Auswertungen wurde eine Zeitkonstante  $\tau = 0,125s$  gewählt.

### Überenergetischer Mittelwert:

Der überenergetische Mittelwert (auch Root-mean-quad value) einer Beschleunigung  $a_{hF}$  mit einem Zeitintervall  $T$  ist gegeben als:

$$a_{hF, RMQ, T} = \sqrt[4]{\frac{1}{T} \int_0^T a_{hF}^4(t) dt}$$

mit

$a_{hF}$	Beschleunigung
$t$	Beobachtungszeit
$T$	Zeitkonstante

Durch die vierte Potenz in der Berechnung werden Ausreißer bzw. Maxima in dem Beschleunigungszeitverlauf besonders stark gewichtet.

### Höchstwert des gleitenden Effektivwertes:

Der Höchstwert des gleitenden Effektivwertes ist das Maximum des gleitenden Effektivwertes im Zeitintervall  $T$ .

$$a_{hF, MTVV, \tau} = \max_{0 \leq t \leq \tau} \{a_{hF, RMS, \tau}(t)\}$$

mit

$a_{hF, RMS, \tau}$	Gleitender Effektivwert
$t$	Beobachtungszeit

### Spitzenwert der Beschleunigung:

Der Spitzenwert der Beschleunigung ist der größte Absolutwert des Beschleunigungszeitverlaufes.

$$a_{hF, PV} = \max_{0 \leq t \leq T} \{|a_{hF}(t)|\}$$

mit

$a_{hF}$	Beschleunigung
$t$	Beobachtungszeit

### Scheitelfaktor der Beschleunigung:

Der Scheitelfaktor ist der Quotient aus dem Spitzenwert einer Beschleunigung und dem über dasselbe Zeitintervall T gemittelten Intervalleffektivwert.

$$CF_h = \frac{a_{hF,PV}}{a_{hF,RMS,T}}$$

mit

$a_{hF,PV}$	Spitzenwert der Beschleunigung
$a_{hF,RMS,T}$	Intervalleffektivwert der Beschleunigung

### Stoßhaltigkeitsquotient der Beschleunigung:

Der Stoßhaltigkeitsquotient wird mittels Division des überenergetischen Mittelwertes durch den über dasselbe Zeitintervall T gemittelten Intervalleffektivwert gebildet.

$$SC_h = \frac{a_{hF,RMQ,T}}{a_{hF,RMS,T}}$$

mit

$a_{hF,RMQ,T}$	überenergetischer Mittelwert
$a_{hF,RMS,T}$	Intervalleffektivwert der Beschleunigung

### Ruck:

Der Ruck  $j(t)$  ist als die Ableitung der Beschleunigung  $a(t)$  definiert.

$$\vec{j}(t) = \dot{\vec{a}}(t) = \ddot{\vec{v}}(t) = \dim [m/s^3]$$

mit

v	Geschwindigkeit
a	Beschleunigung

Für den Ruck werden ebenfalls die Intervalleffektivwerte (T=1s, T=3s) sowie der Spitze-Spitze-Wert betrachtet. Bisher wird der Ruck vorwiegend in der Fahrdynamik betrachtet.

### Flankenanstiegszeiten der Beschleunigung:

Die Flankenanstiegszeit ( $t_a$ ) einer Beschleunigung ist die Zeitdauer von der Einleitung des Stoßvorganges bis zum Erreichen des Spitzenwertes. Bild 4 zeigt am Beispiel eines Schlosserhammers die Ermittlung der Flankenanstiegszeit.

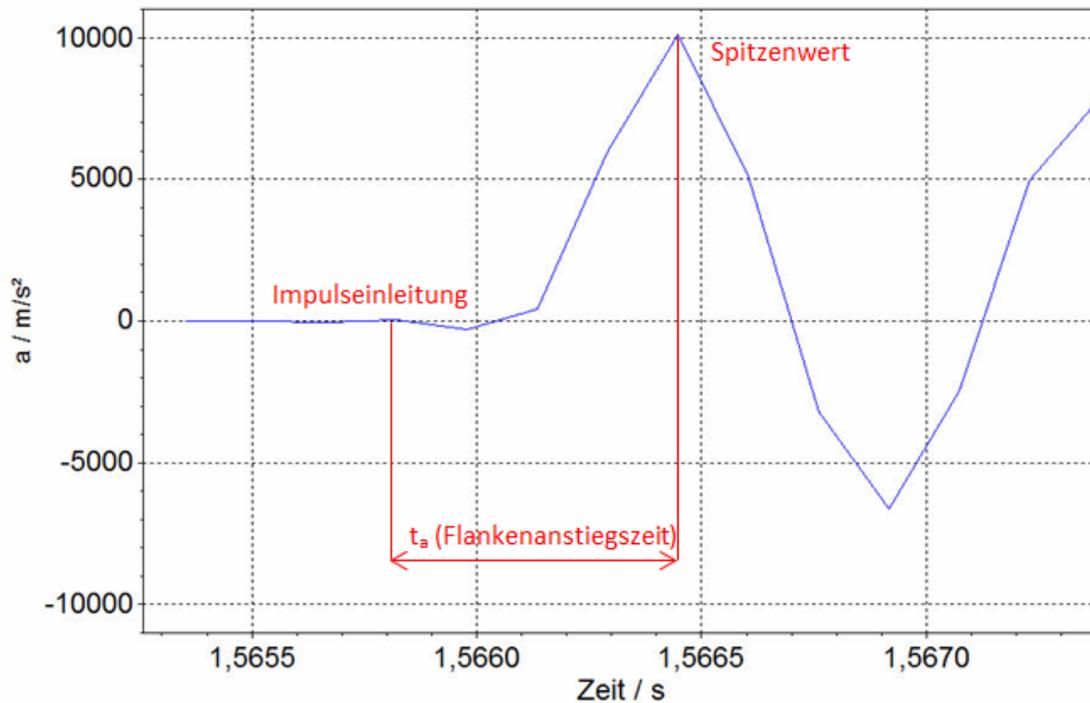


Bild 4: Flankenanstiegszeit am Beispiel eines Schlages mit einem Schlosserhammer

### Impulsdauer des Einzelstoßvorgangs:

Die Impulsdauer  $t_i$  ist die Zeitspanne von der Einleitung eines Stoßvorgangs bis zum Absinken auf und dauerhaften Unterschreiten von 10% des erreichten Spitzenwertes. In Bild 5 ist exemplarisch die Impulsdauer eines Hammerschlages mit einem Schlosserhammer dargestellt.

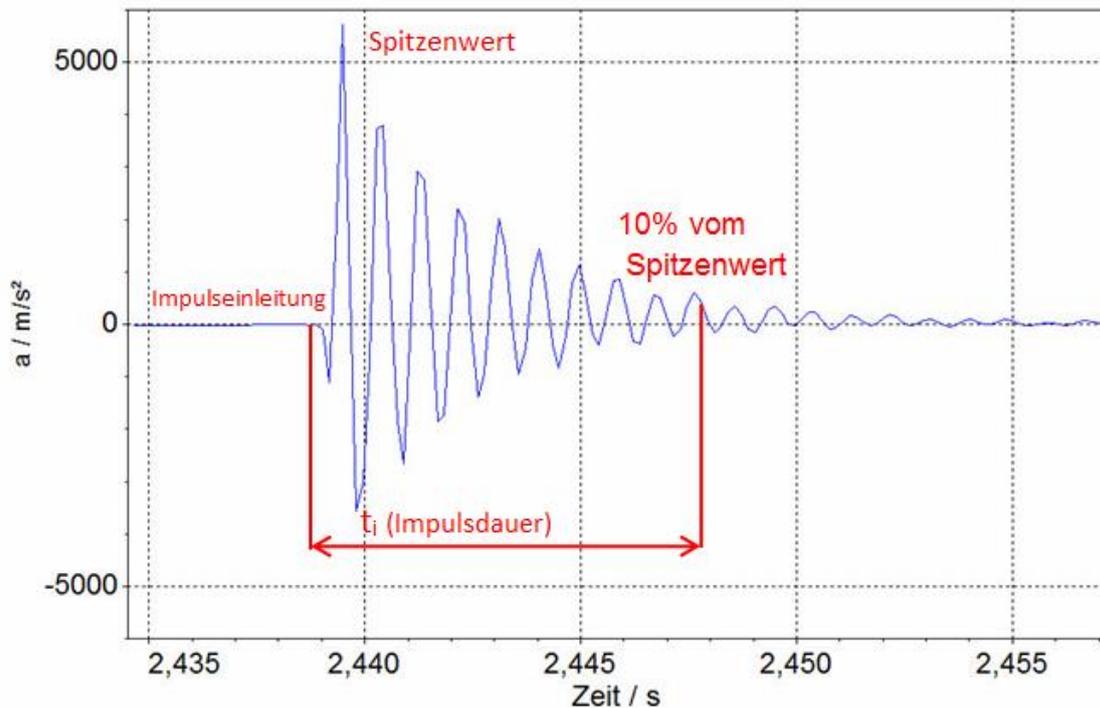


Bild 5: Impulsdauer am Beispiel eines Schlages mit einem Schlosserhammer

### 3.2.2 Auswahl typischer Geräte und Versuchsdurchführung

Die Auswahl der untersuchten Geräte setzt sich aus typischen Maschinen und Werkzeugen zusammen, bei deren Benutzung charakteristische Einzelstöße auftreten. Bei der Zusammenstellung der Geräte bestand das Interesse, eine Bandbreite aus verschiedenen Einsatzgebieten und Funktionsweisen der Geräte herzustellen. Die Einsatzgebiete der behandelten Geräte bilden sowohl Bereiche aus dem Handwerk und der Metallbearbeitung (Schlosserhammer), der Materialerprobung (Schusswaffen), der Bauwirtschaft (Bolzensetzer) und Fleischwirtschaft (Tierbetäubungsgeräte) ab.

Ferner wurde bei der Auswahl der Geräte darauf geachtet, Geräte mit verschiedenen Antriebsarten auszuwählen. Es werden sowohl handbetriebene Geräte (Schlosserhammer), als auch Geräte, die durch das Zünden einer Treibladung ausgelöst werden (z. B. Bolzensetzer), betrachtet.

Ergänzend zu den bisher genannten Geräten wurde ein Teilversuch mit einem pneumatischen Druckluftnagler durchgeführt. Zielsetzung in diesem Teilversuch war es, Störgrößen, die sich aus der Eigenbewegung des Benutzers ergeben, zu erkennen und zu eliminieren (siehe Abschnitt 3.2.3).

Nachfolgend werden die einzelnen Geräte kurz beschrieben und jeweils die Versuchsdurchführung gezeigt.

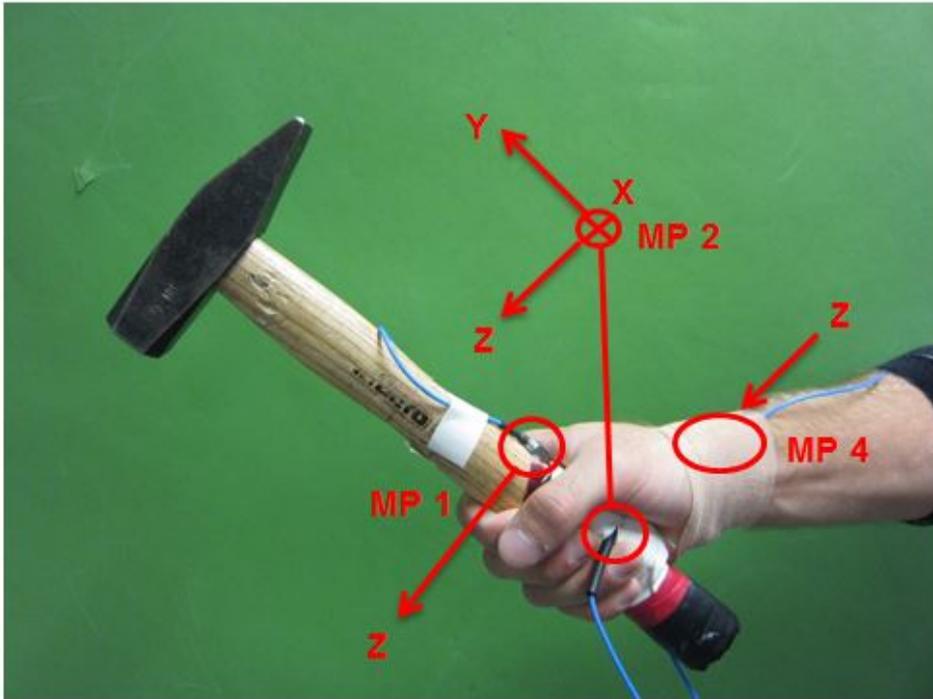
## **Schlosserhammer**

Für dieses Projekt wurden die Messungen mit einem typischen Schlosserhammer (Hammerkopf = 0,5 kg) durchgeführt [39]. Diese Hämmer haben einen sehr weitgefassten Einsatzbereich mit relevanter Nutzung in der Metallindustrie und im Handwerk. Typisch sind Arbeiten, in denen mit Schlosserhämmern direkt auf Metall geschlagen wird. Zum Verformen von Metallen sind z. B. bei Richtarbeiten teilweise sehr starke Schläge erforderlich.

Beim Hämmern ist ein großer Einfluss durch die Versuchsperson auf das Messergebnis zu erwarten. Nicht nur die Stärke und Geschwindigkeit des Hammerschlages, sondern auch der Winkel zwischen Hammerkopf und Werkstück beim Aufprall können das Messergebnis wesentlich beeinflussen. Des Weiteren spielt die festgelegte Arbeitsaufgabe für das Messergebnis eine entscheidende Rolle. Ob z. B. Nägel in Holz eingetrieben werden oder der Hammer eingesetzt wird, um Metall plastisch zu verformen, kann für die gemessenen Werte einen großen Unterschied machen. Da der Einfluss von Benutzer und Arbeitsaufgabe extrem unterschiedlich sein können, wurde bei dem Versuchsaufbau Wert auf eine hohe Reproduzierbarkeit gelegt. Hierfür wird mit dem Hammer auf einer fest verschraubten Stahlplatte (400 x 300 x 20 mm<sup>3</sup>) aus S235JR gehämmert (siehe Bild 6). Für den Probanden gab es hierbei eine Einarbeitungsphase, in der gleichmäßiges Schlagen mit gefühlter „mittlerer Intensität“ geübt wurde.

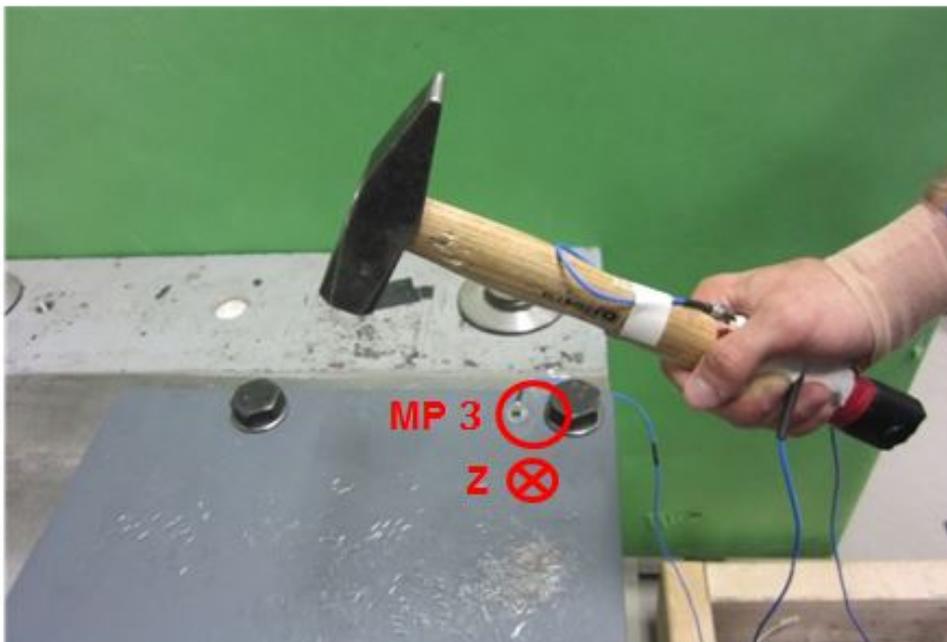
Zunächst bestand die Überlegung, die Hammerschläge über eine festgelegte „Abschlagshöhe“ vergleichbar zu machen. Diese Idee wurde jedoch verworfen, da sich gezeigt hat, dass die „Abschlagshöhe“ als alleiniges Kriterium für die Schlagintensität nicht ausreichend ist – aus geringer Höhe können sehr schnelle feste Schläge ausgeführt werden, und aus großer Höhe kann verhältnismäßig langsam und locker geschlagen werden.

Bild 6 zeigt die Anbringung der Sensoren am Schlosserhammer und die für jeden Messpunkt gemessenen Schwingungsrichtungen. Die Sensoren der Messpunkte 1 und 2 sind jeweils am Hammerstiel angebracht. Messpunkt 1 liegt zwischen Daumen und Zeigefinger des Anwenders und Messpunkt 2 innerhalb eines Griffadapters in der Hand des Probanden. Am Messpunkt 2 wurden alle drei Raumrichtungen gemessen, während für die anderen Messpunkte jeweils nur die Z-Richtung erfasst wurde.



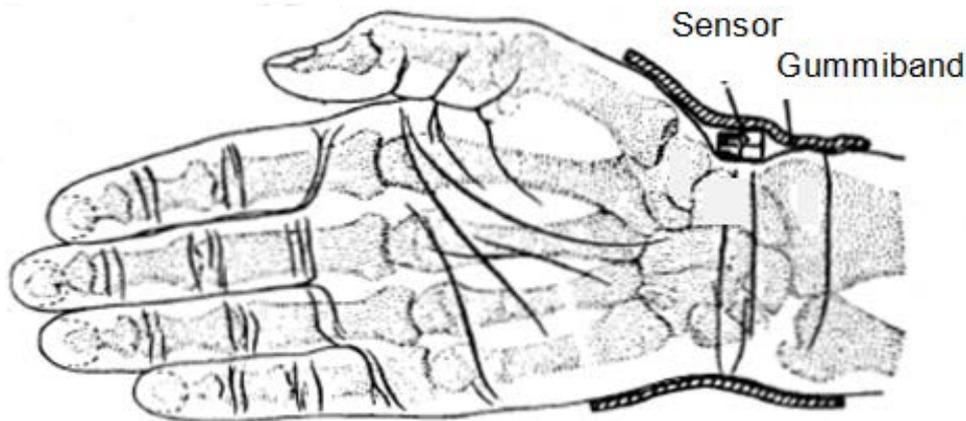
*Bild 6: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Schlosserhammer*

Der Sensor im Messpunkt 3 (siehe Bild 7) sitzt auf der bearbeiteten Metallplatte und dient in diesem Versuchsaufbau als Referenzmesspunkt (siehe Abschnitt 3.2.3). Hierbei war es das Ziel, den exakten Zeitpunkt des Hammerschlages auf der Metallplatte festzustellen.



*Bild 7: Versuchsaufbau für den Schlosserhammer mit Messpunkt 3*

Der Sensor in Messpunkt 4 wird, wie in Bild 8 zu sehen ist, in der anatomischen Mulde am Handgelenk befestigt. Zusätzliche Messpunkte, wie beispielsweise in der anatomischen Mulde am Handgelenk, können Informationen zur Beanspruchung bei unterschiedlicher Handhabung des gleichen Gerätes liefern.



*Bild 8: Lage des Beschleunigungsaufnehmers in der anatomischen Mulde am Handgelenk (nach Schäfer [40])*

Bild 9 und Bild 10 zeigen exemplarisch den Signalverlauf beim Hämmern (Messung 0328 14.2). Hierbei werden zum einen der Zeitverlauf der  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigung (Bild 9) und zum anderen der Zeitverlauf des  $W_h$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes (Bild 10) für den Messpunkt 2 dargestellt. Bild 11 zeigt den aufgespreizten Zeitverlauf der  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigung für dieselbe Messung. In dem aufgespreizten Beschleunigungszeitverlauf ist keine Ausholbewegung durch den Anwender zu erkennen – der Signalverlauf zeigt hier nur den abklingenden Einzelstoß der durch das Auftreffen des Hammerkopfes auf dem Werkstück entsteht. Folglich war es für die Messungen mit dem Schlosserhammer bei dieser Versuchsanordnung nicht notwendig, den Anteil der Vibrationsbelastung, der durch die Ausholbewegung des Anwenders in die Berechnung der Kennwerte miteinfließen würde, herauszufiltern.

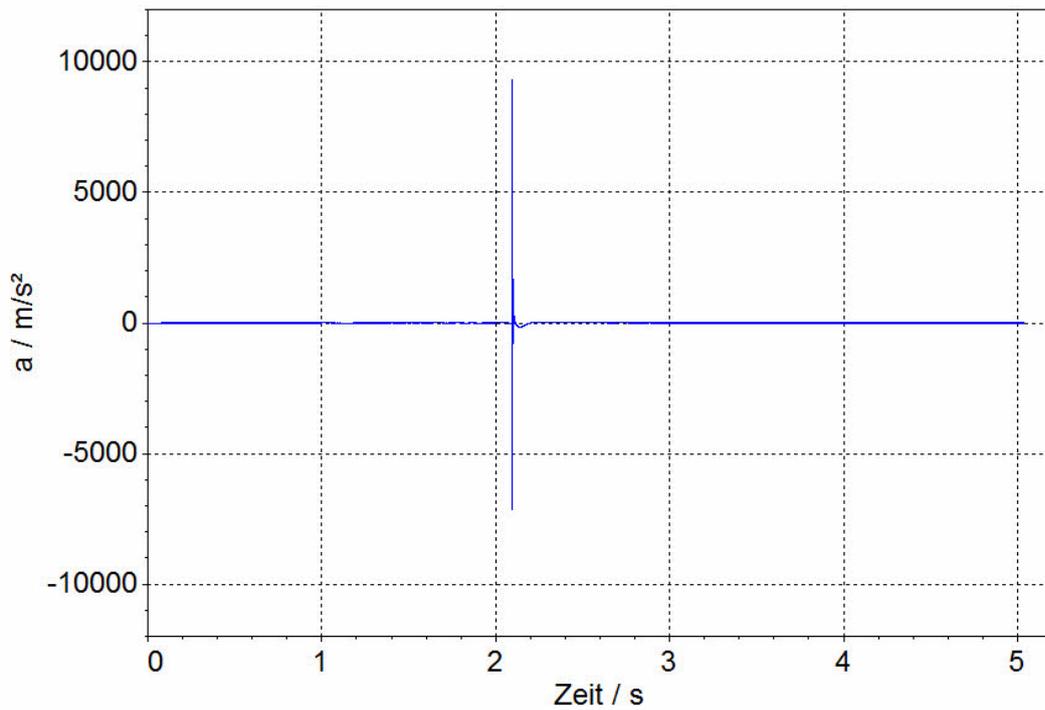


Bild 9: Zeitverlauf der  $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2)

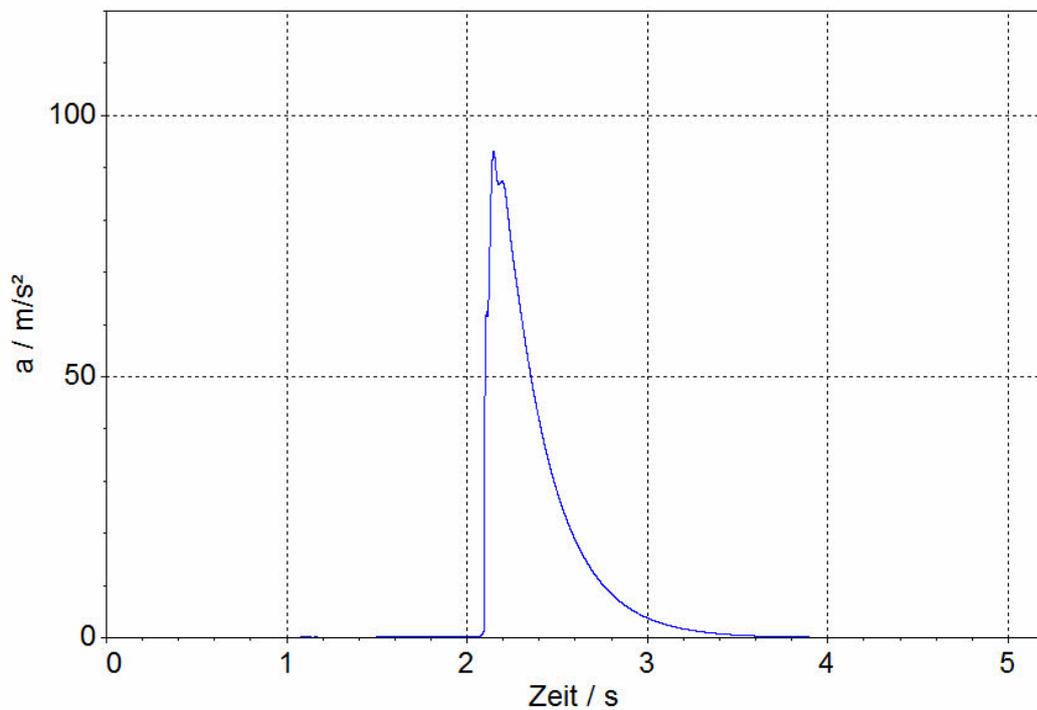


Bild 10: Zeitverlauf des  $W_H$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2)

Keine Ausholbewegung  
durch den Benutzer zu  
erkennen

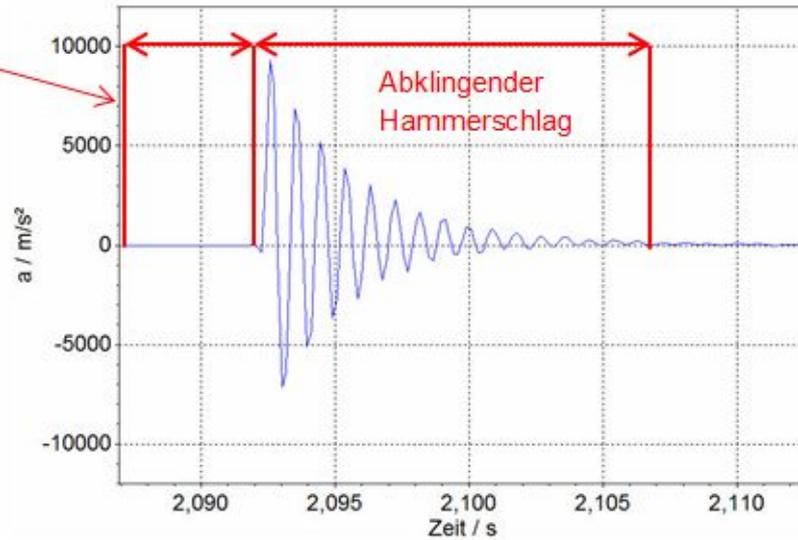


Bild 11: Aufgespreizter Zeitverlauf der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 2 beim Hämmern mit dem Schlosserhammer (Messung 0328 14.2)

## Schusswaffe

In dieser Messung in einem Beschussamt durchgeführt wurden, kam eine Pistole zum Einsatz. Zur Materialerprobung wurden hier Einzelschüsse mit 9mm Munition abgefeuert. In der Waffenerprobung sind bis zu 20000 Schüsse händisch abzufeuern – dies stellt eine Belastung dar, bei der die Entstehung von Berufskrankheiten möglich ist.

Alle Messpunkte wurden jeweils in Schussrichtung (Z-Richtung) gemessen (siehe Bild 12). Hierbei ist Messpunkt 1 am Bügel, Messpunkt 2 in der anatomischen Mulde am Handgelenk (siehe auch Bild 7), Messpunkt 3 an der Innenseite vom Handballen zwischen Magazin und Schale und Messpunkt 4 im Griffadapter. Die Bild 13 zeigt die Lage des Hand-Arm-Systems bei der Versuchsdurchführung mit der Pistole.



Bild 12: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen an der Schusswaffe



Bild 13: Versuchsdurchführung und Lage des Hand-Arm-Systems mit der Pistole

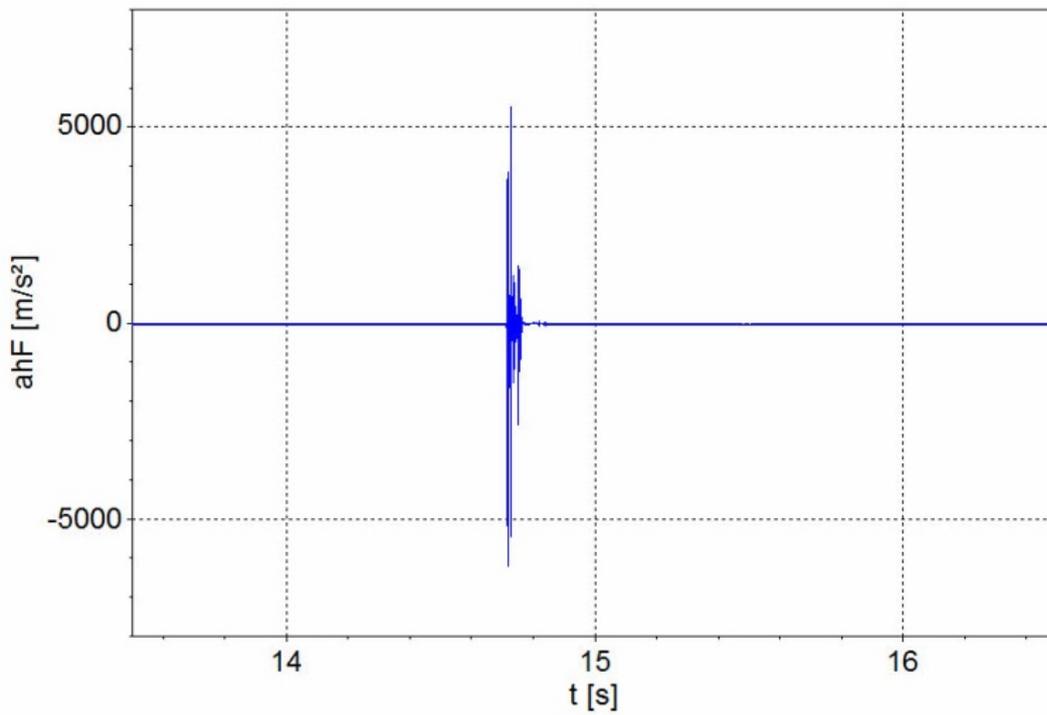


Bild 14: Zeitverlauf der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3)

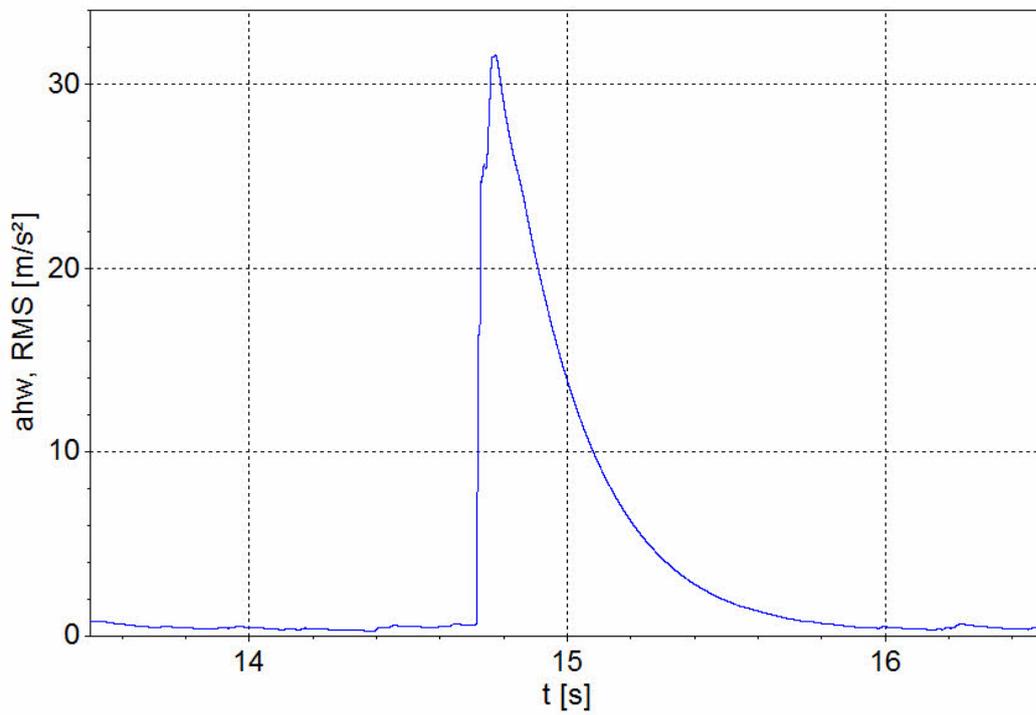


Bild 15: Zeitverlauf des W<sub>H</sub>-bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3)

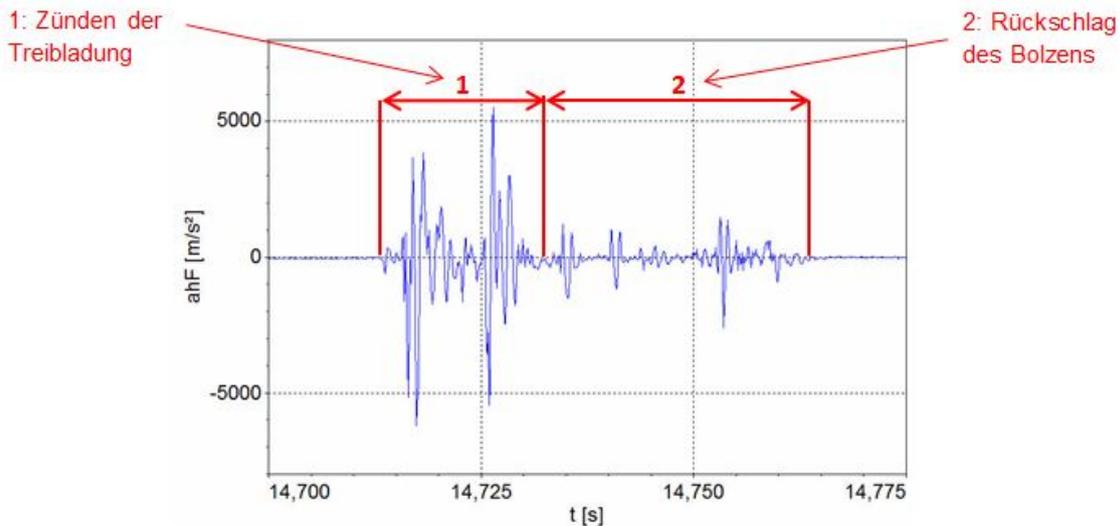


Bild 16: Aufgespreizter Zeitverlauf der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1, Pistole (Messung 0254 5.3)

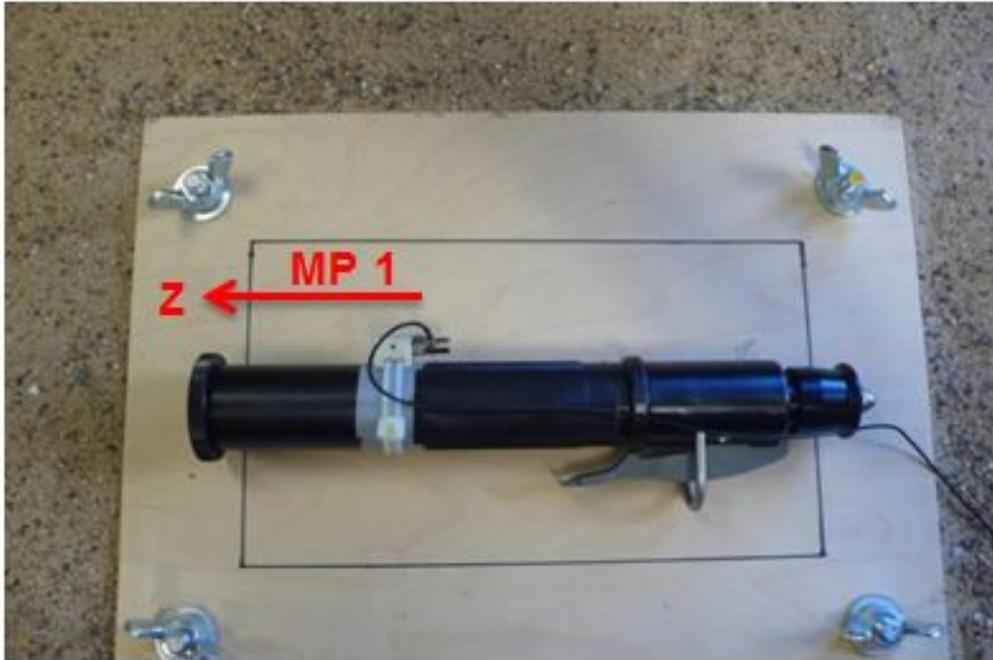
Bei der verwendeten Schusswaffe zeigt sich ein charakteristisches Bild im Beschleunigungszeitverlauf, das sich aus dem Zünden der Treibladung und dem Rückschlag des Bolzens zusammensetzt (siehe Bild 16). Beide genannten Vorgänge wirken auf den Anwender ein. Folglich wurden auch beide Vorgänge bei der Bildung der Kennwerte berücksichtigt.

Für die Betrachtung der Impulsdauern und Flankenanstiegszeiten wurde nur der Zündvorgang der Treibladung ausgewertet.

## Tierbetäubungsgerät

Weitere stark impulshaltige Geräte sind Tierbetäubungsgeräte. Diese Geräte kommen in der Fleischwirtschaft zum Einsatz. Der Einzelstoß entsteht hier durch das Zünden einer Treibladung, die den Bolzen in den Versuchsaufbau (oder Tierschädel) treibt. Die Messungen mit dem Tierbetäubungsgerät wurden dabei nur an einem Messpunkt in Schussrichtung (Z-Richtung) ausgeführt (Bild 17).

Für diese Messung kam ein Ersatzarbeitsverfahren zum Einsatz, in welchem ein Tierschädelknochen durch einen geschichteten Aufbau aus Holz und Polyurethan simuliert wird. Dieser Aufbau befindet sich zur besseren Absorption des Schocks in einem Sandbett. Nach jedem Schussvorgang wird eine neue Treibladung in das Gerät eingebracht – folglich war es notwendig, jeden Schussvorgang als eigene Messung durchzuführen.



*Bild 17: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Tierbetäubungsgerät*



*Bild 18: Versuchsdurchführung mit dem Tierbetäubungsgerät*

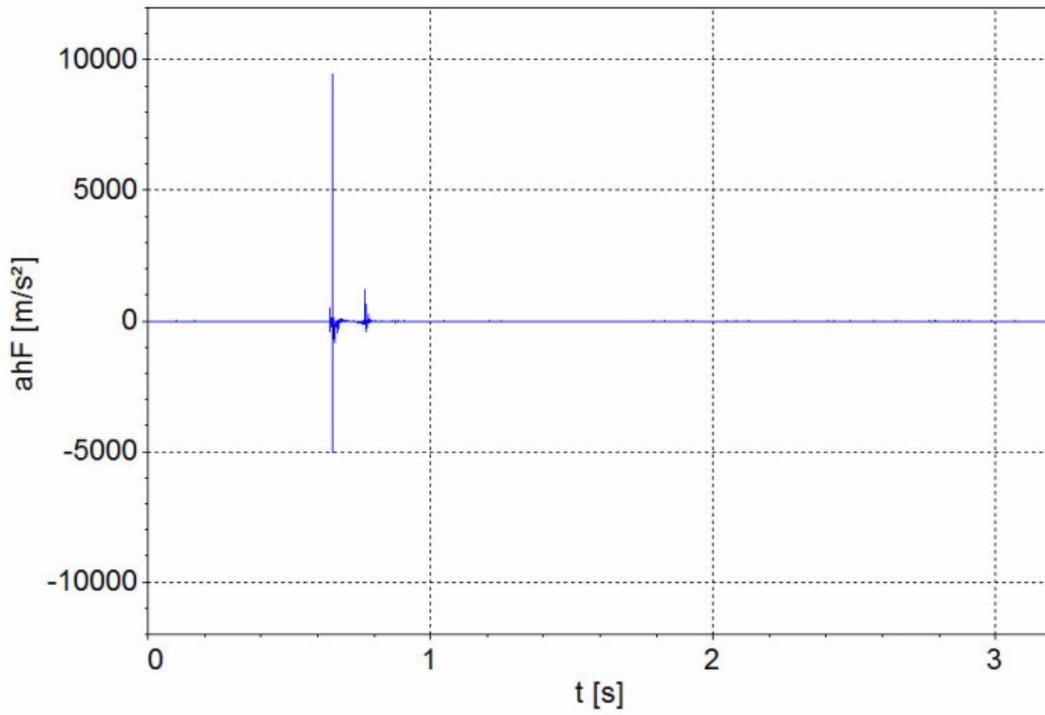


Bild 19: Zeitverlauf der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Beschleunigung vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34)

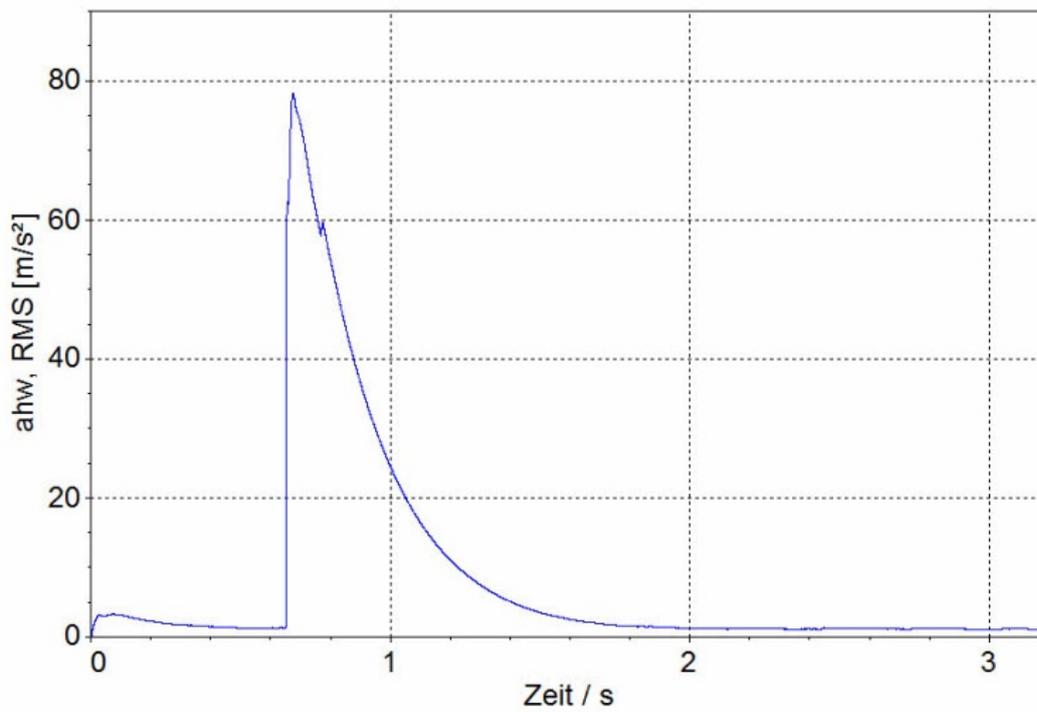


Bild 20: Zeitverlauf des  $W_H$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34)

Bild 21 zeigt den aufgespreizten Verlauf der gemessenen  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigung mit dem Tierbetäubungsgerät. Da bei der Betätigung des Gerätes keine Ausholbewegung erfolgt, ist es nicht notwendig, die Artefakte durch die Eigenbewegung des Anwenders herauszufiltern.

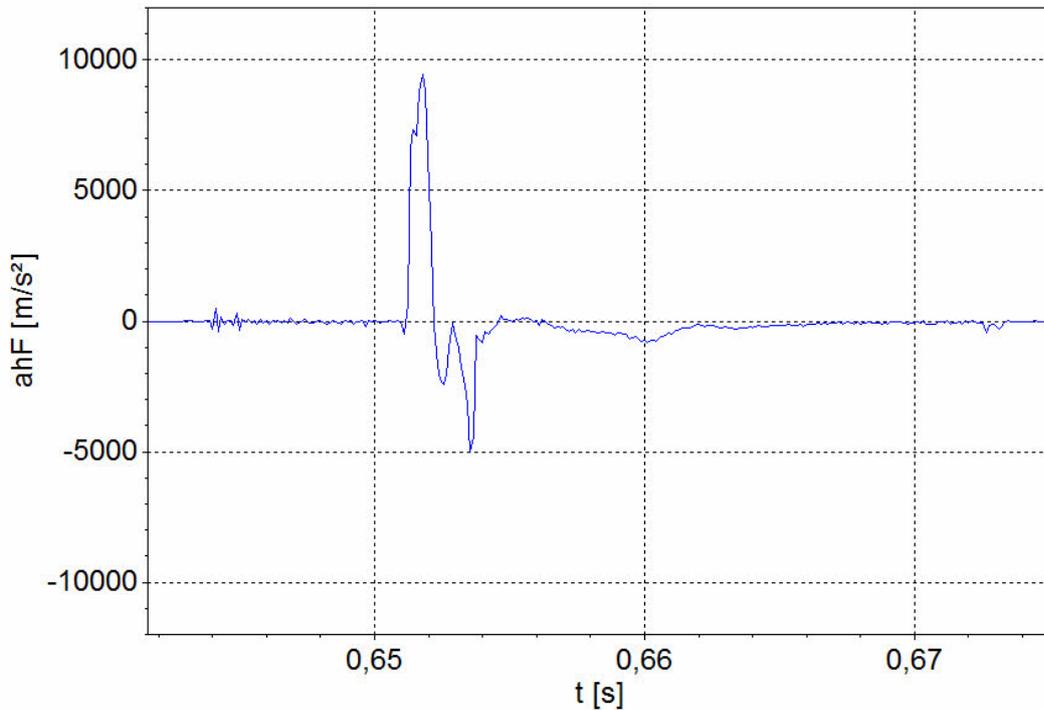


Bild 21: Aufgespreizter Zeitverlauf der  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigung vom Tierbetäubungsgerät (Messung 0310 34)

## Bolzensetzer

Diese Messungen wurden mit einem Bolzensetzer der oberen Leistungsklasse durchgeführt – einem typischen Gerät aus dem Baubereich. Beide Messpunkte wurden jeweils nur in Schussrichtung gemessen (siehe Bild 22). Hierbei liegt Messpunkt 1 an der Gerätefläche über dem Hauptgriff und Messpunkt 2 unten am Hauptgriff.

Laut Herstellerangaben sind mit dem Bolzensetzer je nach eingesetzter Munition 400 – 700 Schüsse möglich, bis die Vibrationsexposition des Anwenders den Auslösewert  $A(8)$  von  $2,5 \text{ m/s}^2$  erreicht. Bis zum Erreichen des Grenzwertes  $A(8)$  von  $5 \text{ m/s}^2$  sind 1600 – 2800 Schüsse möglich.



Bild 22: Anbringung der Sensoren und jeweilige Messrichtungen am Bolzensetzer



Bild 23: Versuchsdurchführung mit dem Bolzensetzer

Für den Versuch wurde ein typischer Arbeitsvorgang mit dem Bolzensetzer durchgeführt. Dabei wurden Nägel in eine Stahlplatte (ST37) eingetrieben. Auch hier befindet sich die Stahlplatte aus Sicherheitsgründen und zur besseren Vergleichbarkeit der Einzelvorgänge in einem Sandbett.

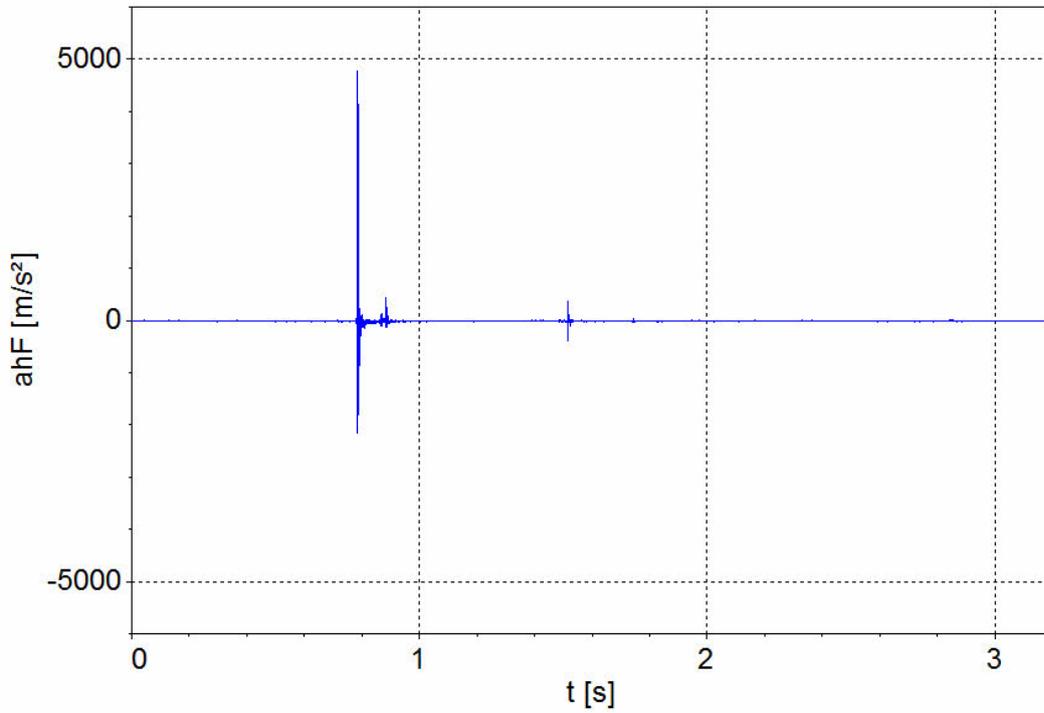


Bild 24: Zeitverlauf der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1 mit dem Bolzensetzer (Messung 0291 3.3)

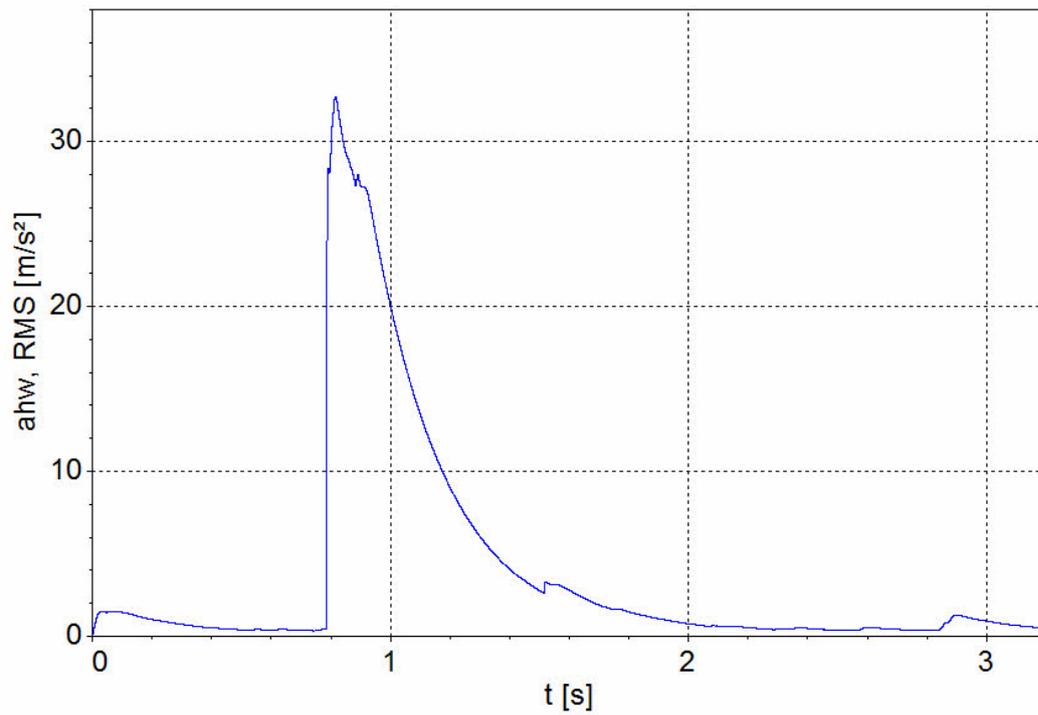


Bild 25: Zeitverlauf des  $W_h$ -bewerteten gleitenden Effektivwertes am Messpunkt 1 mit dem Bolzensetzer (Messung 0291 3.3)

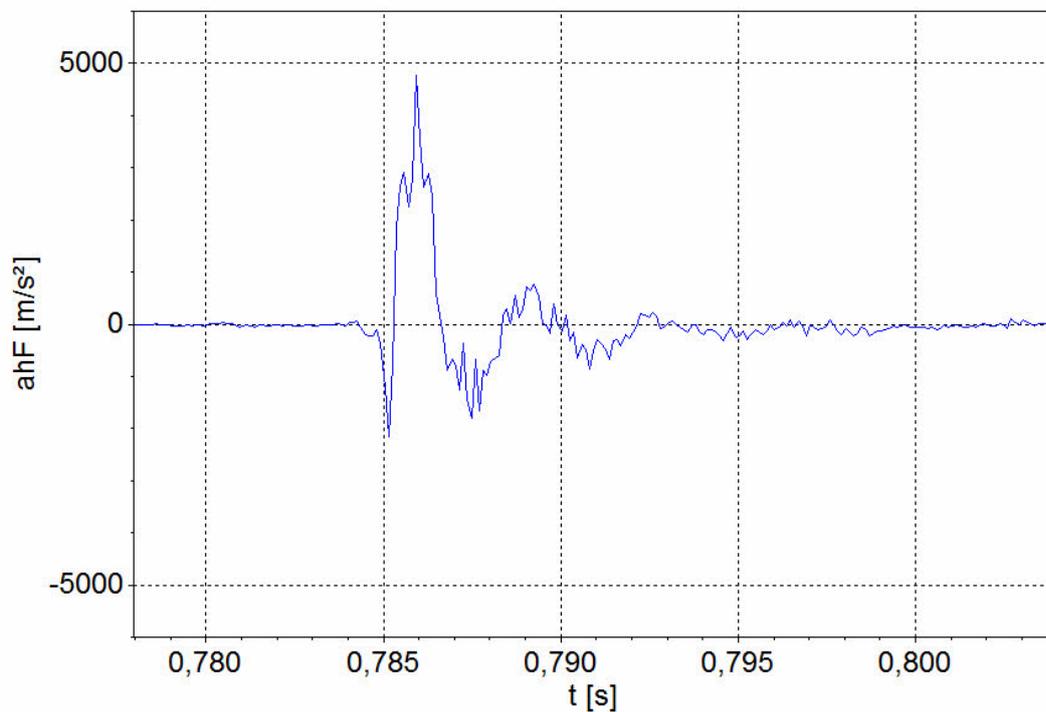


Bild 26: Aufgespreizter Zeitverlauf der  $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung am Messpunkt 1 vom Bolzensetzer (Messung 0291 3.3)

Bild 26 zeigt den aufgespreizten Zeitverlauf der  $Flat_H$ -bewerteten Beschleunigung für den Bolzensetzer. Auch hier zeigen sich keine Artefakte.

## Druckluftnagler

Ergänzend zu den anderen Geräten wurden Messungen mit einem pneumatischen Druckluftnagler durchgeführt (siehe Bild 27). In diesem Teilversuch wurden Nägel in ein Holzbrett eingetrieben, welches zur besseren Absorption des Schocks in einem Sandbett lag. Die Schussvorgänge wurden per Kontaktauslösung ausgeführt, hierbei hält der Anwender den Betätigungsschalter des Gerätes gedrückt und löst die einzelnen Schussvorgänge dadurch aus, dass er den Druckluftnagler dynamisch auf das Werkstück drückt.

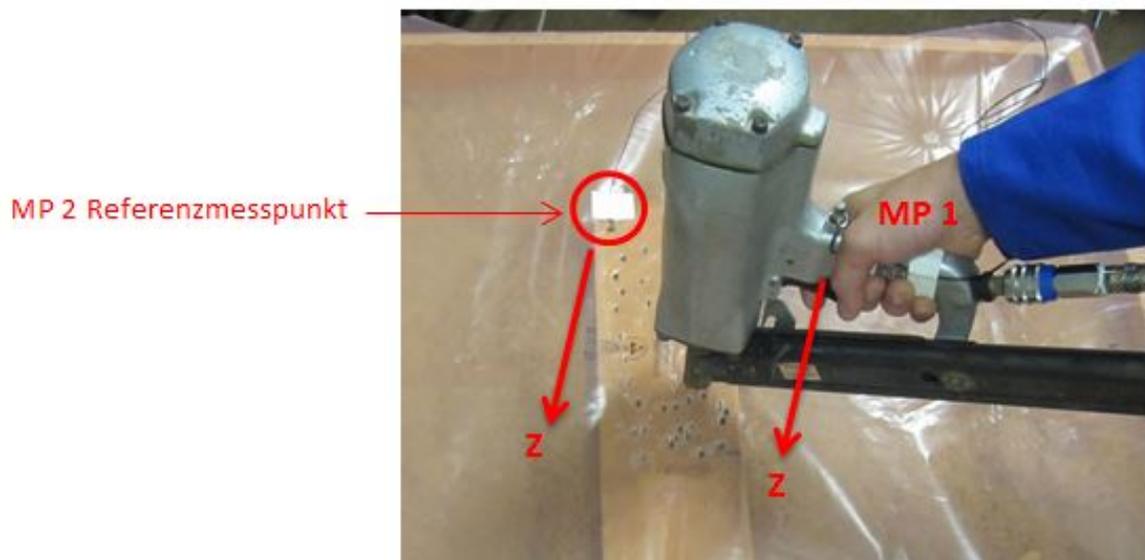


Bild 27: Messpunkte und Versuchsdurchführung vom Druckluftnagler

Die Messungen und Auswertungen Druckluftnagler waren im Vergleich zu den bisher beschriebenen Geräten im Umfang geringer. Ziel dieser Messung war es, die Eigenbewegung des Benutzers unter Zuhilfenahme eines Referenzmesspunktes im Beschleunigungszeitverlauf zu erkennen und zu eliminieren. Das Vorgehen hierzu wird in Abschnitt 3.2.3 beschrieben.

### 3.2.3 Zusätzliche Referenzmesspunkte

Für die Messungen am Schlosserhammer und am Druckluftnagler wurden zusätzliche Referenzmesspunkte auf dem bearbeiteten Werkstück angebracht. Hierbei war es das Ziel, die Eigenbewegung des Benutzers beim Bedienen des Gerätes im Beschleunigungszeitverlauf erkennen und eliminieren zu können. Da die Eigenbewegung des Anwenders von den Beschleunigungsaufnehmern ebenfalls als Beschleunigung regis-

triert wird, und dieser Anteil der Beschleunigung für die Vibrationsbelastung unerheblich ist, ist es notwendig, den entsprechenden Anteil der Eigenbewegung im Beschleunigungszeitverlauf zu erkennen und herauszufiltern. Um dies zu realisieren, wurden sowohl auf dem verwendeten Gerät als auch auf dem bearbeiteten Werkstück Sensoren angebracht. Die dabei auf dem Werkstück befestigten Sensoren dienen als Referenzmesspunkte. Aus dem Beschleunigungszeitverlauf für den Referenzmesspunkt lässt sich dann der exakte Zeitpunkt für den Aufprall des Gerätes auf dem Werkstück erkennen.

Die zeitgleiche Messung der am Gerät angebrachten Sensoren und der Referenzmesspunkte erlaubt einen Vergleich der Beschleunigungszeitverläufe. Bild 28 zeigt die Beschleunigungszeitverläufe einer exemplarischen Messung mit dem Druckluftnagler – sowohl vom Sensor am Gerät selbst (oberer Verlauf), als auch vom Referenzmesspunkt (unterer Verlauf), der auf dem Werkstück angebracht wurde.

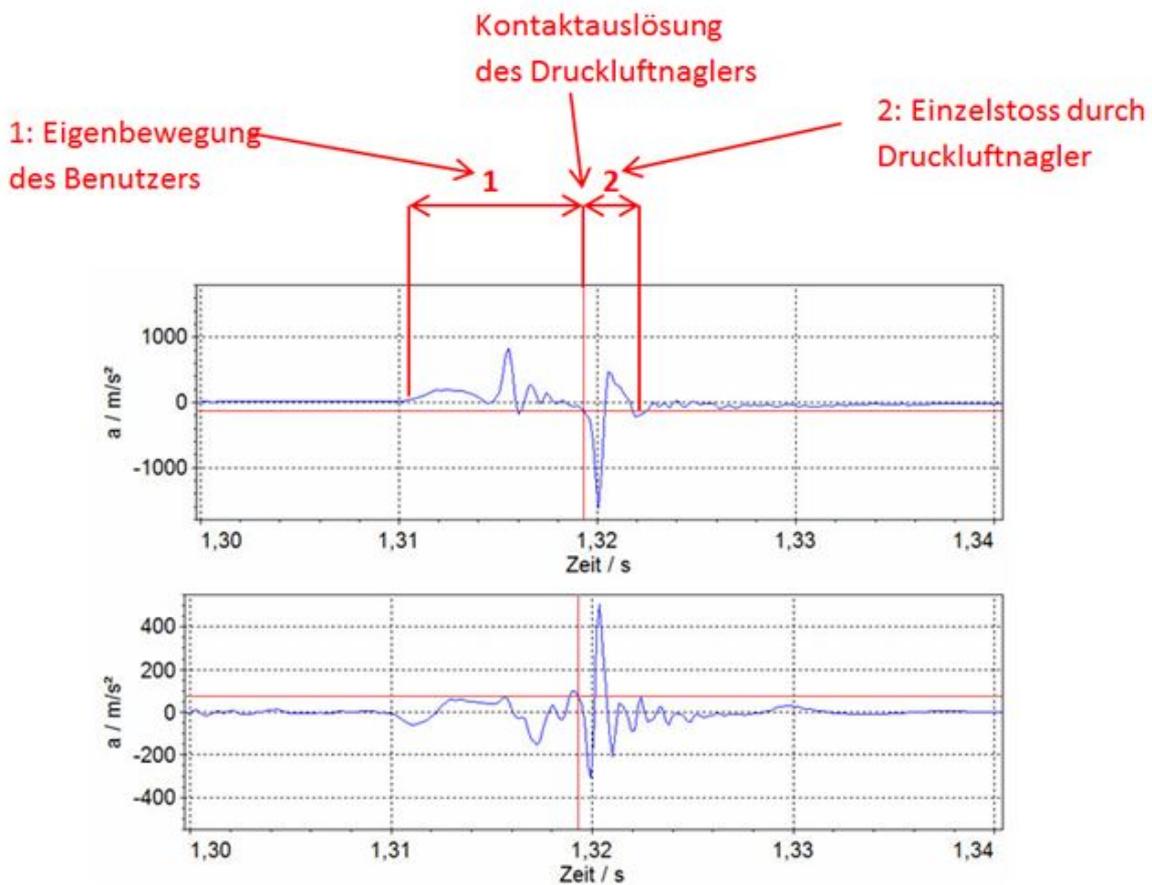


Bild 28: Flat<sub>n</sub>-bewertete Beschleunigungszeitverläufe für Druckluftnagler (oben) und Referenzmesspunkt auf dem Werkstück (unten)

In Bild 28 lässt sich der Zeitpunkt der Kontaktauslösung mit dem Druckluftnagler eindeutig erkennen. Somit ist es möglich, den Anteil der Eigenbewegung durch den Anwender in der Bewertung der Vibrationsbelastung zu eliminieren.

Bild 29 zeigt die  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigungszeitverläufe für den Schlosserhammer und den Referenzmesspunkt auf dem Werkstück (Metallplatte).

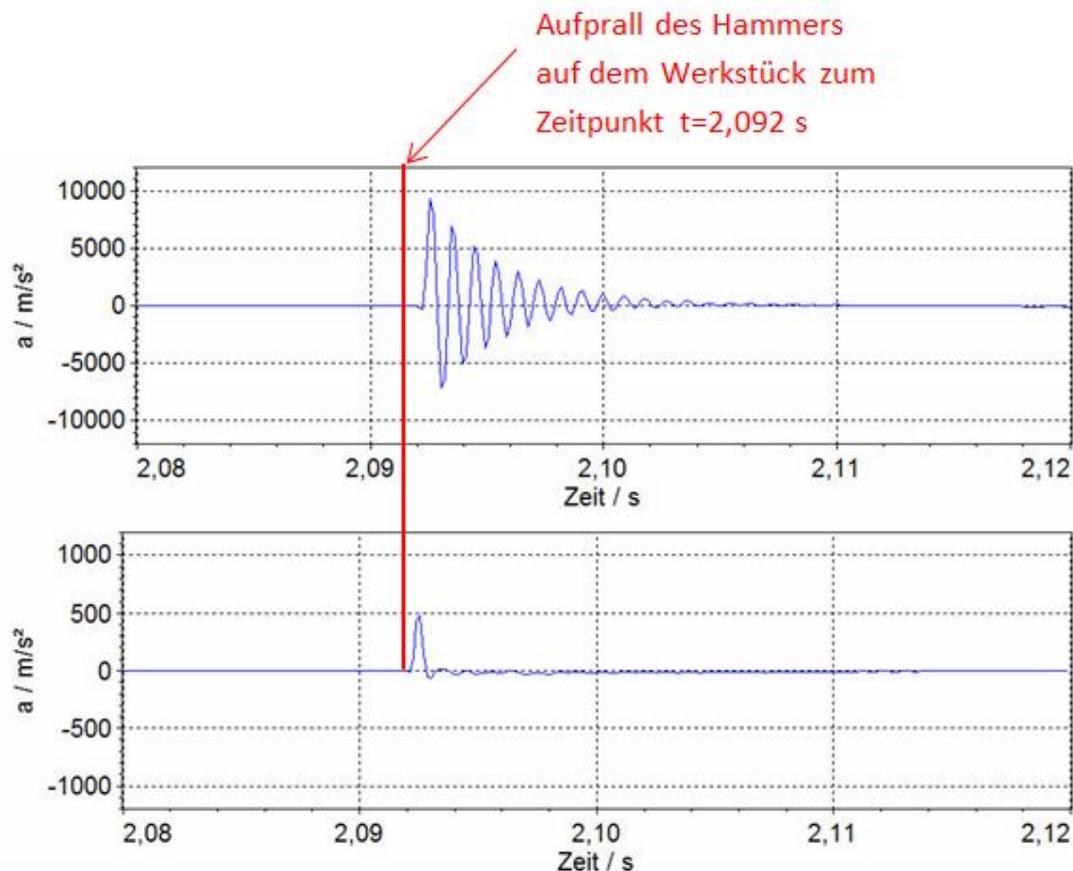


Bild 29:  $Flat_h$ -bewertete Beschleunigungszeitverläufe für Schlosserhammer (oben) und Referenzmesspunkt auf dem Werkstück (unten)

In Bild 29 ist zu erkennen, dass der Impuls am Schlosserhammer und am Referenzmesspunkt in etwa zeitgleich entsteht (beide zum Zeitpunkt  $t = 2,092$  s). Des Weiteren ist im Signalverlauf keine Eigenbewegung durch den Benutzer zu erkennen. Für den Versuch mit dem Schlosserhammer ist eine Eliminierung der Eigenbewegung im Beschleunigungszeitverlauf nicht notwendig gewesen.

### 3.3 Darstellung der Ergebnisse

#### 3.3.1 Vergleich der Geräte untereinander

Die Ergebnisse und Auswertungen der Messungen werden für jedes Gerät kurz dargestellt. Eine ausführliche Auflistung der Versuchsergebnisse erfolgt in den Ergebnistabellen im Anhang. Für jedes Gerät wurde jeweils der Messpunkt betrachtet, der für die Vibrationsbelastung der Versuchsperson maßgeblich ist. Nachstehend sind die Messpunkte aufgeführt, die für die Geräte ausgewertet wurden.

Gerät	ausgewerteter Messpunkt
Schlosserhammer	2
Schusswaffe	1
Tierbetäubungsgerät	1
Bolzensetzer	1

Die nachfolgenden Ergebnistabellen stellen die zusammengefassten Messwerte für die behandelten Geräte dar. Zur besseren Übersicht sind hier nur die wesentlichen Kennwerte aufgeführt. Die hierbei blau markierten Werte sind mit dem in der DIN EN ISO 5349-1 verwendeten Bewertungsverfahren vergleichbar. Eine ausführliche Übersicht aller ausgewerteten Kennwerte liegt im Anhang vor.

#### Schlosserhammer

Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl der zusammengefassten Messwerte für den Schlosserhammer. Mit einem  $Flat_h$ -bewerteten Intervalleffektivwert von  $415 \text{ m/s}^2$  stellen die in diesem Projekt untersuchten Arbeiten mit dem Schlosserhammer im Vergleich der Geräte die höchste Belastung dar. Da jedoch der Anwender sowie die Arbeitsaufgabe einen wesentlichen Einfluss auf das Messergebnis haben, können mit Hämmern deutlich höhere oder auch niedrigere Kennwerte für einen Schlagvorgang entstehen.

Ein weiterer Einfluss für die Übertragung der Stoßeinwirkung und der hiermit verbundenen Belastung ist die Ankopplungskraft, welche messtechnisch nicht erfasst wurde. Der Versuchsaufbau ermöglicht, dass die Ankopplungskräfte hoch und möglichst gleichbleibend waren. Bei Arbeiten mit Handhämmern, die eine geringere Ankopplungskraft erfordern, ist von einer geringeren Vibrationseinwirkung auszugehen [41].

Kennwert	Mittelwert	Stabw.	Einheit
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	184	± 5.4	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=1s)</b>	415	± 35	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=3s)</b>	40	± 15	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=1s)</b>	67	± 21	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=3s)</b>	47	± 6,6	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=1s)</b>	106	± 21	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMQ (T=3s)</b>	1004	± 21	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> MTVV</b>	790	± 14,9	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> MTVV</b>	144	± 54	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> PV</b>	9479	± 552	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> PV</b>	369	± 104	m/s <sup>2</sup>
<b>CF<sub>h</sub></b>	51	± 1,5	/
<b>SC<sub>h</sub></b>	5,6	± 0,12	/
<b>J<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	1 187 383	± 34 736	m/s <sup>3</sup>

Tabelle 1: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für den Schlosserhammer im Messpunkt 2

## Schusswaffe

Tabelle 2 zeigt die zusammengefassten Messwerte für die Schusswaffe. Bezüglich der auftretenden Vibrationsbelastungen liegt die untersuchte Schusswaffe unterhalb des Handhammers. Auffällig ist, dass der Flat<sub>h</sub>-bewertete Effektivwert der zweithöchste nach dem Hammer ist, aber die w<sub>h</sub> und w<sub>p</sub>-bewerteten Beschleunigungen mit 16,4 m/s<sup>2</sup> und 88 m/s<sup>2</sup> die geringsten von allen behandelten Geräten darstellen (siehe Bild 31). Da die Frequenzbewertung mit w<sub>h</sub> und w<sub>p</sub>-Filter die größte Reduktion der Flat<sub>h</sub>-bewerteten Beschleunigungseffektivwerte der untersuchten Geräte zur Folge hat, ist vermutlich davon auszugehen, dass bei der behandelten Schusswaffe ein höherer Frequenzanteil außerhalb der Filtergrenzen als bei den anderen behandelten Geräten liegt.

Kennwert	Mittelwert	Stabw.	Einheit
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	143	± 4	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=1s)</b>	281	± 35	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=3s)</b>	8,2	± 1	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=1s)</b>	16,4	± 3,8	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=3s)</b>	49	± 0,9	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=1s)</b>	88	± 14	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMQ (T=3s)</b>	691	± 123	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> MTVV</b>	559	± 23	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> MTVV</b>	31	± 3,8	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> PV</b>	4 104	± 212	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> PV</b>	89	± 10,7	m/s <sup>2</sup>
<b>CF<sub>h</sub></b>	29	± 1,9	/
<b>SC<sub>h</sub></b>	4,8	± 0,7	/
<b>J<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	1 038 023	± 266 668	m/s <sup>3</sup>

Tabelle 2: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für die Schusswaffe im Messpunkt 1

### Tierbetäubungsgerät

Tabelle 3 stellt die zusammengefassten Messwerte für das Tierbetäubungsgerät dar. Hier kam ein leistungsstarkes Gerät zum Einsatz – dementsprechend sind auch die Kennwerte für ein Tierbetäubungsgerät hoch. Im Vergleich wurde mit dem Tierbetäubungsgerät der höchste  $w_p$ -bewertete Beschleunigungseffektivwert von 187 m/s<sup>2</sup> erreicht. Betrachtet man dazu den  $Flat_h$ -bewerteten Beschleunigungseffektivwert von 250 m/s<sup>2</sup>, lässt sich schlussfolgern, dass bei dem Tierbetäubungsgerät ein großer Anteil der Frequenzen innerhalb der Filterspezifikationen des  $w_p$ -Bewertungsfilters liegt.

Kennwert	Mittelwert	Stabw.	Einheit
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	146	± 3,0	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=1s)</b>	250	± 6,5	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=3s)</b>	18,7	± 0,7	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=1s)</b>	31,5	± 0,4	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=3s)</b>	108,8	± 1,6	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=1s)</b>	187	± 4,6	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMQ (T=3s)</b>	1040	± 8,7	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> MTVV</b>	688	± 16	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> MTVV</b>	71	± 10,6	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> PV</b>	9504	± 241	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> PV</b>	599	± 11	m/s <sup>2</sup>
<b>CF<sub>h</sub></b>	65	± 2,8	/
<b>SC<sub>h</sub></b>	7,1	± 0,1	/
<b>J<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	566 605	± 36 069	m/s <sup>3</sup>

Tabelle 3: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für das Tierbetäubungsgerät

## Bolzensetzer

Die zusammengefassten Messwerte für den Bolzensetzer sind in Tabelle 4 dargestellt. Der untersuchte Bolzensetzer zeigt die niedrigsten Flat<sub>h</sub>-bewerteten Effektivwerte. Auffällig ist hier, dass die w<sub>p</sub>-bewertete Beschleunigung nur wenig geringer als die Flat<sub>h</sub>-bewertete Beschleunigung ist. Es ist möglich, dass nur ein geringer Frequenzanteil der Beschleunigung außerhalb der Filterspezifikationen des w<sub>p</sub>-Bewertungsfilters liegt.

Vergleicht man die indirekten Angaben der Hersteller, so existieren Geräte mit höheren Belastungen. Die Herstellerangaben bis zur Überschreitung des Auslösewertes A(8) von 2,5 m/s<sup>2</sup> variieren zwischen 400 und 3500 Vorgängen pro Tag. Daraus kann ein Belastungsbereich für a<sub>hw, RMS</sub> (T=3s) von 4,1 bis 12,2 m/s<sup>2</sup> abgeleitet werden.

Kennwert	Mittelwert	Stabw.	Einheit
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	79	± 4,2	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMS (T=1s)</b>	176	± 9,8	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=3s)</b>	9,2	± 0,2	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> RMS (T=1s)</b>	21	± 0,6	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=3s)</b>	71	± 7,5	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hwp</sub> RMS (T=1s)</b>	134	± 7,8	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> RMQ (T=3s)</b>	461	± 15,1	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> MTVV</b>	336	± 19	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> MTVV</b>	33	± 0,4	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hF</sub> PV</b>	4 417	± 356	m/s <sup>2</sup>
<b>a<sub>hw</sub> PV</b>	233	± 13	m/s <sup>2</sup>
<b>CF<sub>h</sub></b>	57	± 7,1	/
<b>SC<sub>h</sub></b>	5,9	± 0,18	/
<b>J<sub>hF</sub> RMS (T=3s)</b>	354 733	± 7 031	m/s <sup>3</sup>

Tabelle 4: Zusammengefasste Darstellung der Versuchsergebnisse für den Bolzensetzer im Messpunkt 1

Die nachfolgenden Diagramme stellen die verschiedenen Kennwerte für die betrachteten Geräte für jeweils einen Messpunkt gegenüber.

Die Säulendiagramme zeigen jeweils den Mittelwert und die Standardabweichung, aus drei Wiederholungsmessungen mit einer Versuchsperson. Die Standardabweichung wurde dabei nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{a}_{hv} - a_{hi})^2}{(n-1)}}$$

In Bild 30 und Bild 31 sind jeweils die Intervalleffektivwerte für Intervalldauern von einer bzw. drei Sekunden dargestellt. Hierbei werden die Intervalleffektivwerte für jedes Gerät sowohl mit der Flat<sub>h</sub>-Bewertung, als auch mit den Frequenzbewertungen w<sub>h</sub> und w<sub>p</sub> aufgeführt.

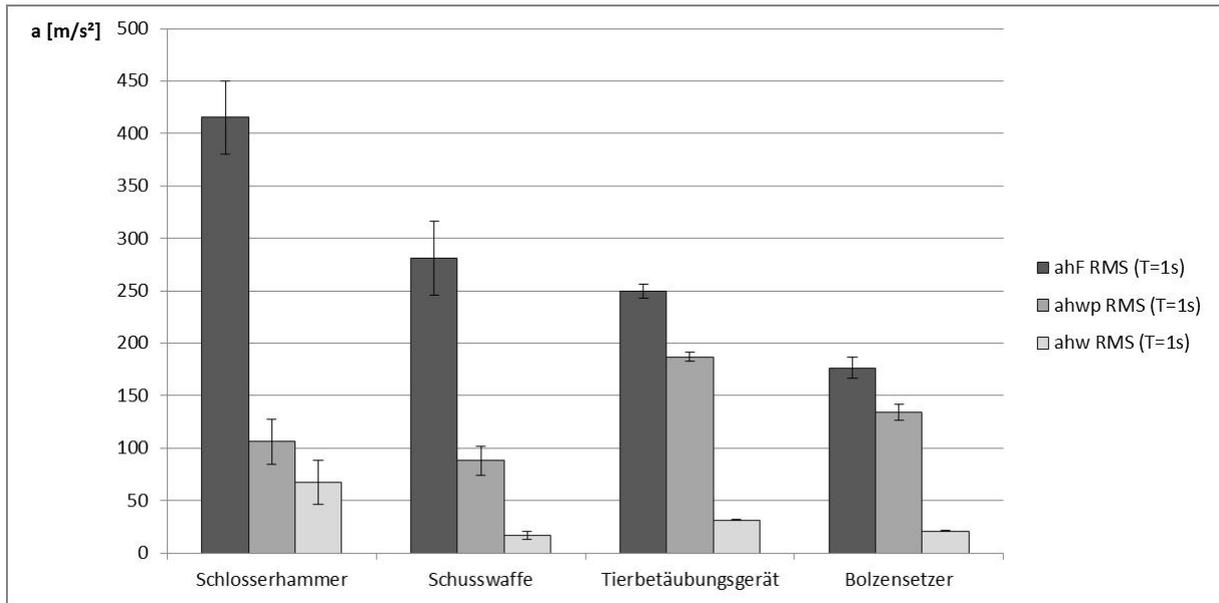


Bild 30: Vergleich der frequenzbewerteten Intervalleffektivwerte ( $T=1s$ ) der betrachteten Geräte

Die höchsten Flath-bewerteten Intervalleffektivwerte zeigen sich für den Schlosserhammer. Es ist zu bedenken, dass der Einfluss des Probanden auf das Messergebnis beim Hämmern sehr groß ist. Somit wäre es möglich, auch deutlich höhere oder geringere Werte für den Schlosserhammer zu erzeugen. Da bei den anderen behandelten Geräten die Funktion durch den Einfluss der gleichbleibenden Fremdenergie und gleichen Arbeitsprozesse gegeben ist, ist hier der Einfluss durch die Versuchsperson auf das Messergebnis deutlich geringer.

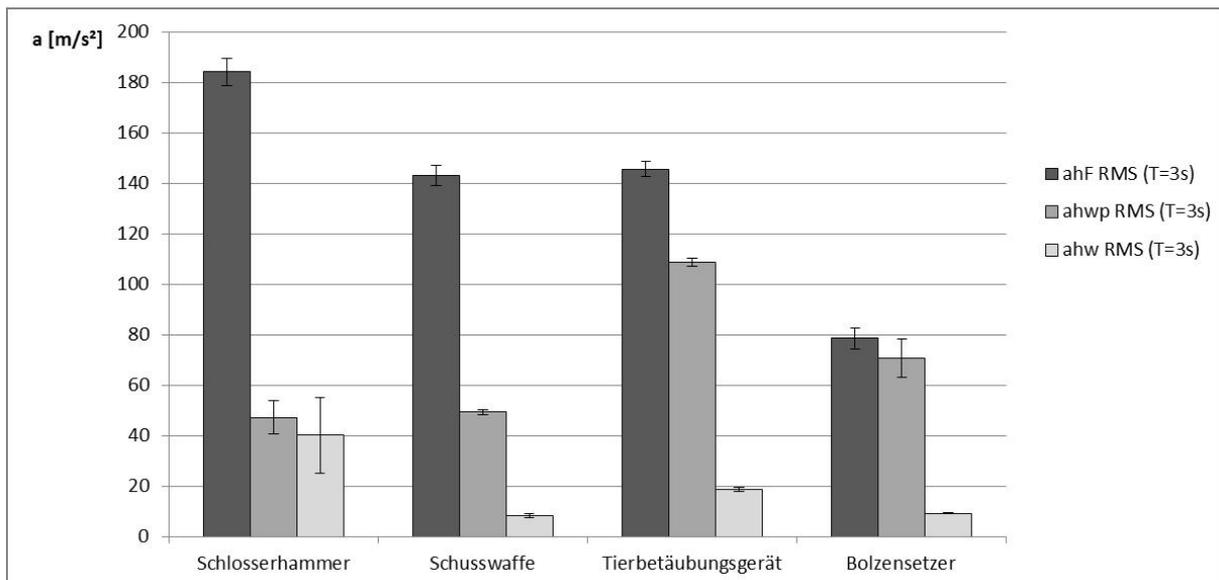


Bild 31: Vergleich der frequenzbewerteten Intervalleffektivwerte ( $T=3s$ ) der betrachteten Geräte

Bild 32 zeigt die Scheitelfaktoren  $CF_h$  und Stoßhaltigkeitsquotienten  $SC_h$  der behandelten Geräte.

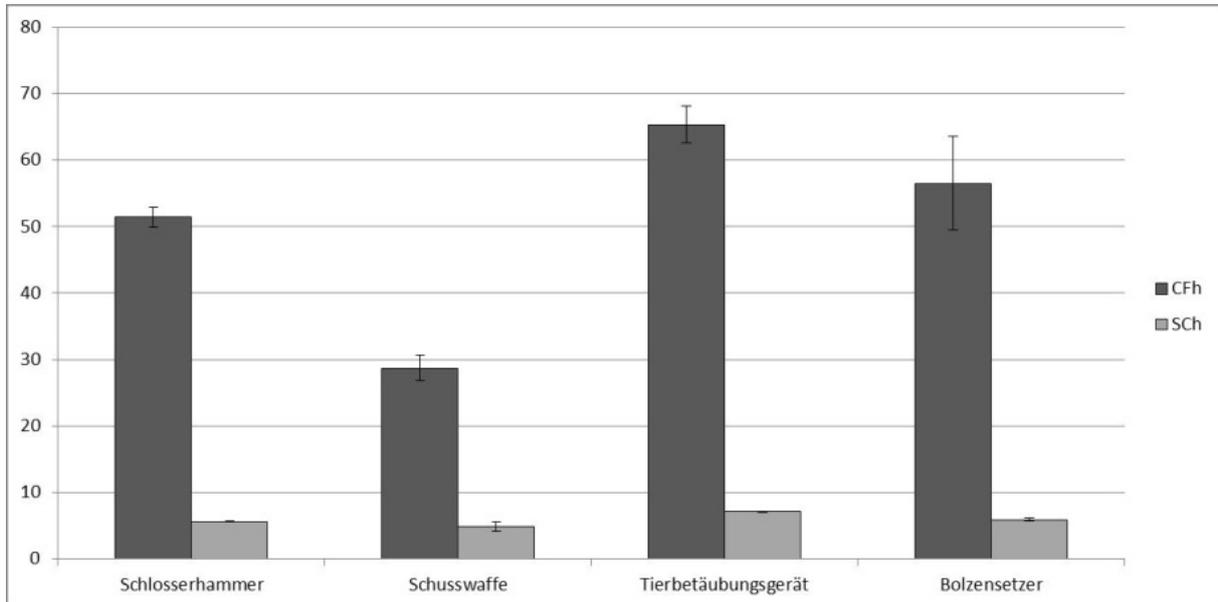


Bild 32: Vergleich der Scheitelfaktoren ( $CF_h$ ) und der Stoßhaltigkeitsquotienten ( $SC_h$ ) der betrachteten Geräte

In Bild 33 sind die Impulsdauern  $t_i$  und die Flankenanstiegszeiten  $t_a$  der betrachteten Geräte dargestellt.

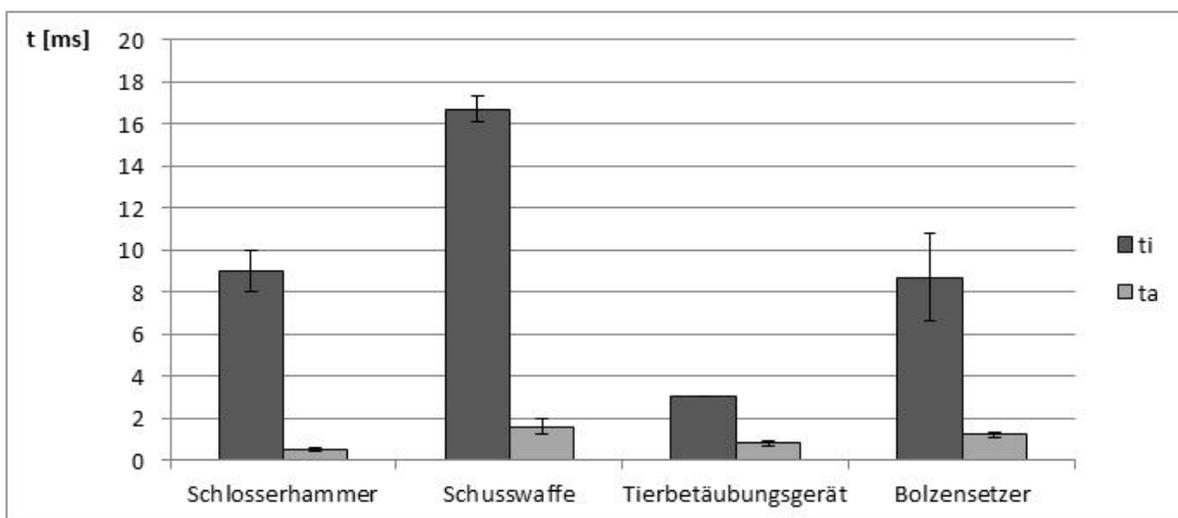


Bild 33: Vergleiche der Impulsdauern  $t_i$  und Flankenanstiegszeiten  $t_a$  der betrachteten Geräte

Die höchste Impulsdauer zeigt sich für die Schusswaffe, während Impulse mit dem Tierbetäubungsgerät die kürzeste Dauer aufweisen. Die gemessenen Impulsdauern sowie die Flankenanstiegszeiten entsprechen in etwa den bereits zum Thema Einzelstöße publizierten Daten [10].

### **3.3.2 Zusammenfassung des Untersuchungsteils**

In diesem Projektteil wurden typische Geräte, bei deren Bedienung Einzelstöße auftreten, untersucht. Hierbei kamen sowohl Geräte, bei denen eine Eigenbewegung des Anwenders vor dem betrachteten Einzelstoß erforderlich ist (Schlosserhammer und Druckluftnagler), als auch Geräte bei denen keine Eigenbewegung erforderlich ist (Pistole, Tierbetäubungsgerät und Bolzensetzer), zum Einsatz. Für Geräte, bei deren Bedienung eine Eigenbewegung notwendig ist, die jedoch keine Vibrationsbelastung darstellt, wurde exemplarisch anhand des Druckluftnaglers gezeigt, wie eine solche „Verfälschung“ der Messergebnisse vermieden werden kann.

Für das Tierbetäubungsgerät und den Schlosserhammer wurden für eine bessere Reproduzierbarkeit Ersatzarbeitsverfahren eingesetzt. Dies war für die anderen untersuchten Geräte nicht notwendig.

Auf der Basis der existierenden Normen konnten verschiedenen Verfahren der Kenngrößenermittlung für die unterschiedlichen Arten von Stößen angewendet und erprobt werden. Diese zur Verfügung stehenden Parameter können nun hinsichtlich ihrer Eignung zur Risikobewertung von Einzelstößen herangezogen werden.

Die erzeugten Kenngrößen der Geräte können im Zuge zukünftiger Arbeiten verwendet werden und erweitern das bestehende Datenmaterial zum Thema Einzelstöße.

Mit der derzeit zur Verfügung stehenden Messtechnik können unter Berücksichtigung von Randbedingungen Einzelstöße gemessen und Kennwerte für die Schwingungseinwirkung ermittelt werden.

Die in DIN EN ISO 8041 festgelegte Messeinrichtung für die Schwingungseinwirkungen auf den Menschen (Stand 2005 mit Ergänzungen 2016) berücksichtigt zwar noch die analoge Messtechnik, jedoch basieren die aktuellen Messeinrichtungen auf der Digital-Technik. Diese Messeinrichtungen ermöglichen nicht nur eine Vielzahl der Berechnungen von Kennwerten, sondern auch eine Analysemöglichkeit im Zeitbereich sowie eine Kombination verschiedener zusätzlicher Messpunkte.

Den größten Unsicherheitsbeitrag liefert jedoch weiterhin der Messsensor. Trotz Überprüfungsmöglichkeit des Phasengangs und dessen Vereinheitlichung ist es bei hohen Stoßeinwirkungen erforderlich, die Messungen auf eine Messrichtung zu beschränken. Wenn die Messrichtung parallel zur Wirkrichtung gehalten werden kann, wird damit die relevante Schwingungseinwirkung erfasst.

## 4 Teil B: Laborexperimente zur Definition von Stößen

### 4.1 Methodik

#### 4.1.1 Versuchsaufbau

Für die Laboruntersuchungen wurde ein üblicher Versuchsaufbau, bestehend aus Funktionsgenerator G, Leistungsverstärker LV und elektrodynamischen Schwingererger ESE (Shaker) genutzt. Bild 34 zeigt das Blockschaltbild des Versuchsaufbaus.

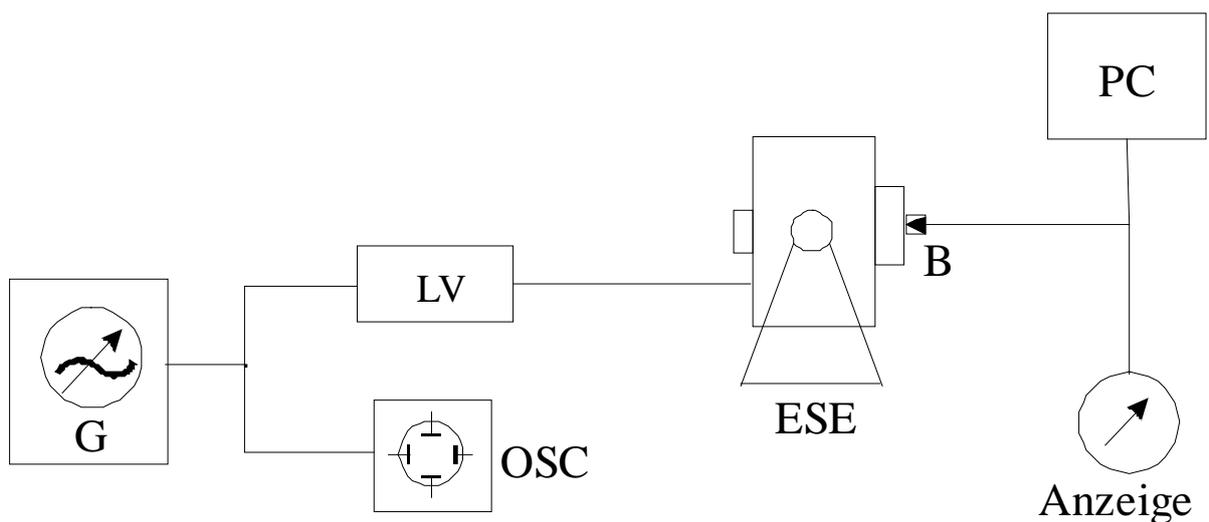


Bild 34: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus

Auf der Schwingplatte des elektrodynamischen Schwingererger wurde ein Handgriff montiert, welcher mit Kraftsensoren für Greifkraft und Andruckkraft versehen ist. Mittels zweier Beschleunigungsaufnehmer B wurden die Schwingungssignale auf der Schwingplatte des elektrodynamischen Schwingererger und am Handgriff aufgezeichnet. Alle Messsignale wurden mittels einem acht-kanaligem PC-gesteuerten Messsystem registriert und ausgewertet. Die Messsignale wurden während der Versuchsdurchführung an geeigneter Stelle auf dem Bildschirm bzw. auf dem Oszilloskop überwacht.

Voruntersuchungen und Hauptuntersuchungen wurden mit dem prinzipiell gleichen, oben beschriebenen Versuchsaufbau, jedoch mit unterschiedlichen Typen des elektrodynamischen Schwingerregers durchgeführt. Die Hauptuntersuchungen sollten unter möglichst praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden. Es war also ein relativ leistungsstarker Schwingerreger erforderlich, um einen Handgriff mit seiner Masse und der dabei applizierten Andruckkraft möglichst rückwirkungsfrei ansteuern zu können. Die Vorversuche wurden durchgeführt, um nähere Informationen für die Gestaltung der Randbedingungen der Hauptversuche (Signalform, Signalparameter, Einfluss der Einleitungsstelle ...) zu erlangen. Der Einsatz eines Handgriffes war hierbei nicht erforderlich und es waren keine Andruckkräfte zu kompensieren. Es konnte ein leistungsschwächerer Schwingerreger verwendet werden. Für die Vorversuche hatte der verwendete Schwingerreger den Vorteil, über eine kleinere Erregerplatte zu verfügen. Die Versuchspersonen hatten deshalb die Möglichkeit, den Unterarm bzw. die Hand auf einer schwingungsfreien Unterlage abstützen zu können und nur den jeweiligen Finger bzw. das Handgelenk auf die Schwingplatte zu legen.

Bild 35 zeigt den Versuchsaufbau für die Voruntersuchungen, Bild 36 den Versuchsaufbau für die Hauptuntersuchungen.

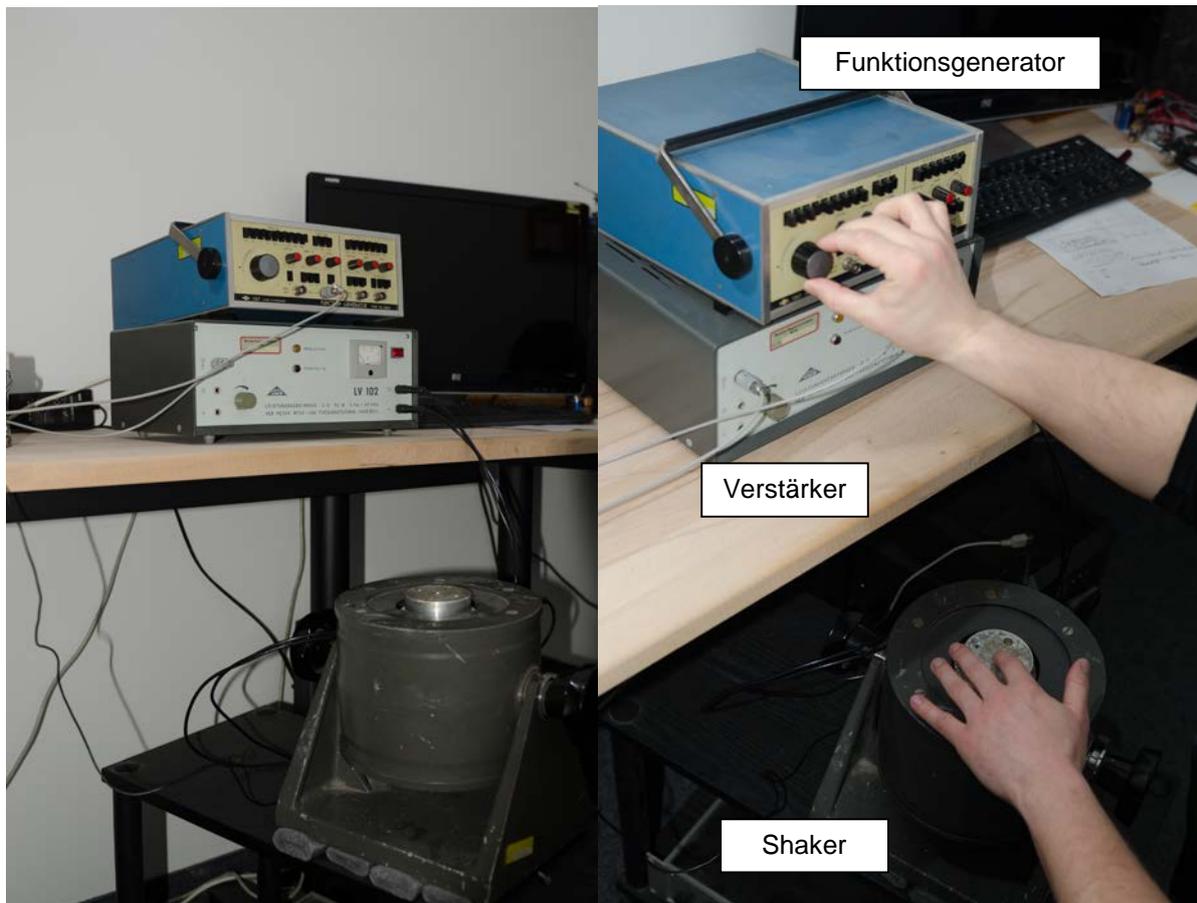


Bild 35: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Vorversuche

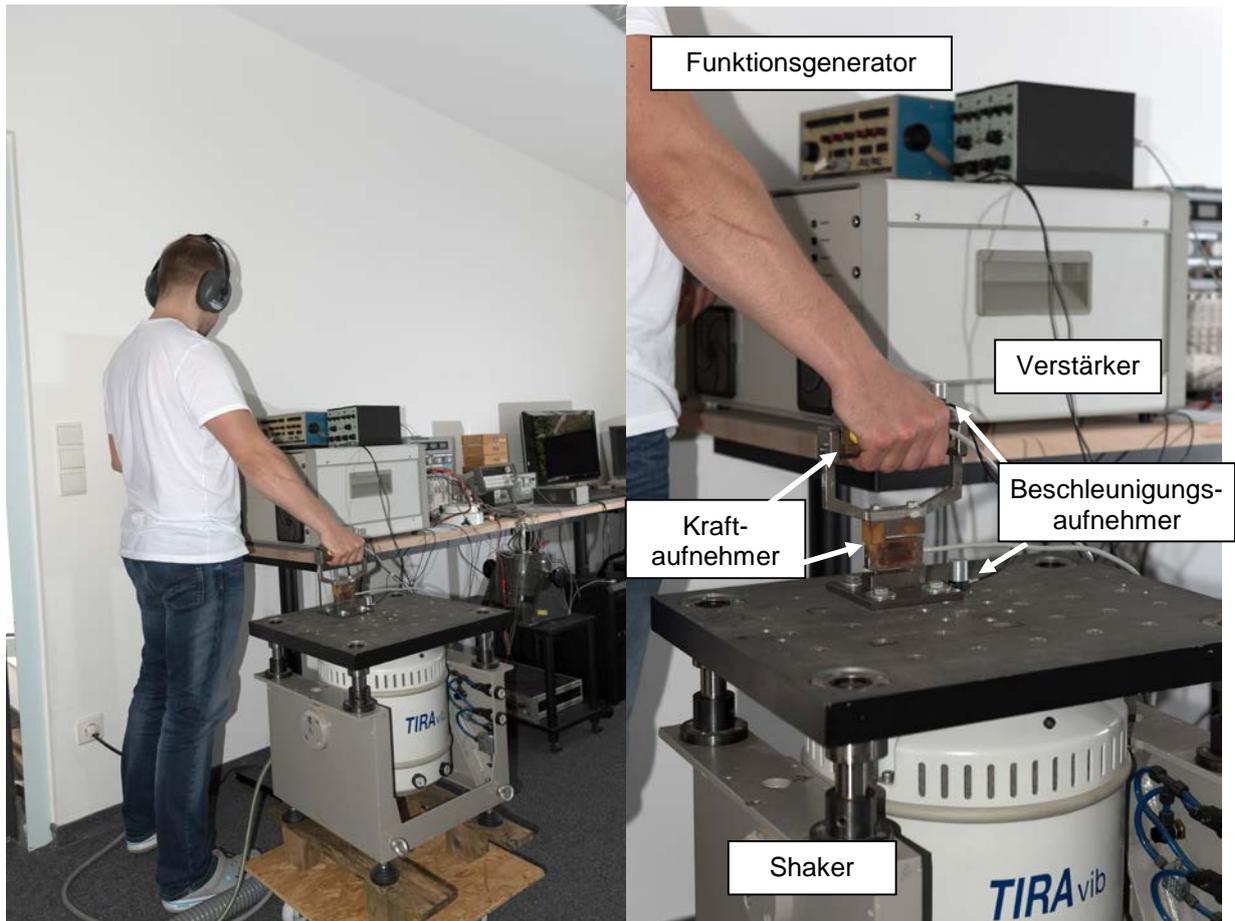


Bild 36: Ansicht des Versuchsaufbaus für die Hauptversuche

Schwingerregersysteme mit elektrodynamischen Wirkprinzip weisen hinsichtlich Aufbau, Flexibilität und Einsatzbreite viele Vorteile auf und werden deshalb für Schwingungsuntersuchungen sehr oft verwendet. Die Nutzung eines elektrodynamischen Schwingerregers für Stoßexpositionen ist jedoch prinzipiell nur sehr eingeschränkt möglich [42]. Die durch die elektronische Ansteuerung bedingte Begrenzung niedriger Frequenzen (Hochpasswirkung) führt dazu, dass quasistatische Signalanteile zu einer abklingenden, niederfrequenten Schwingung umgeformt werden. Hierdurch werden z. B. Rechteckimpulse mit zunehmender Impulsdauer zunehmend in ihrer Signalförmigkeit verfälscht. Die durch Masse und Federsteifigkeit der Bauteile des Shakers verursachte Begrenzung nach höheren Frequenzen (Tiefpasswirkung) verursacht außerdem eine frequenzabhängige Phasenverschiebung. Diese beträgt bei der Grenzfrequenz  $180^\circ$ . Je nach ihrer Dauer können Impulse durchaus Frequenzanteile nahe oder über der oberen Grenzfrequenz enthalten. Durch die Phasenverschiebung des Tiefpasses entstehen dabei veränderte zeitliche Signalverläufe u. a. auch mit veränderten Spitzenwerten. Hiervon sind insbesondere sehr kurze Signale (Impulse, Stöße) betroffen.

Die Nutzbarkeit elektrodynamischer Schwingerreger hängt also nicht nur von den elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Schwingerregersystems sondern auch von den Eigenschaften (Dauer, Signalform, Intensität) des Versuchssignals ab. Im konkreten Fall sind in erster Linie Stöße mit praxisnahen Intensitäten sowie sehr kurze und sehr lange Impulse den o. g. Beschränkungen unterworfen.

Für die hier zu untersuchenden Problemstellungen sind jedoch keine praktischen Stoßintensitäten erforderlich. Im Hinblick auf die erforderliche Mitwirkung der Probanden und die hierbei benötigte Konzentration wären Expositionen mit praktischen Intensitäten sogar eher hinderlich.

Im Bild 37 ist ein Beispiel Halbsinus-Signale mit 2 ms Dauer dargestellt. Die oberste Grafik zeigt den durch den Funktionsgenerator erzeugten Signalverlauf. In der mittleren Grafik ist die auf dem Tisch des Shakers gemessene Signalform als Beschleunigung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die durch den Funktionsgenerator erzeugte Signalform bei einem Spitzenwert von  $30 \text{ m/s}^2$  auf dem Schwingtisch noch relativ gut reproduziert wird, dass es jedoch infolge der Masseträgheit des Tisches zu einem deutlichen Unterschwingen kommt. Für die vorzunehmenden Untersuchungen wird dieses Unterschwingen jedoch nicht als nachteilig betrachtet, da ein Vergleich mit dem gemessenen Zeitverlauf eines Bolzensetzgerätes (unterste Grafik) zeigt, dass bei Stoßsignalen an realen Maschinen ein ähnliches Schwingverhalten durchaus üblich ist.

Es kann also eingeschätzt werden, dass unter den beschriebenen Randbedingungen die Nutzung des elektrodynamischen Schwingerregersystems für die hier geplanten Untersuchungen möglich ist. In den Vorversuchen wurden detaillierte Untersuchungen zu den in den Hauptversuchen anzuwendenden Signalformen, Signaldauern u.ä. durchgeführt.

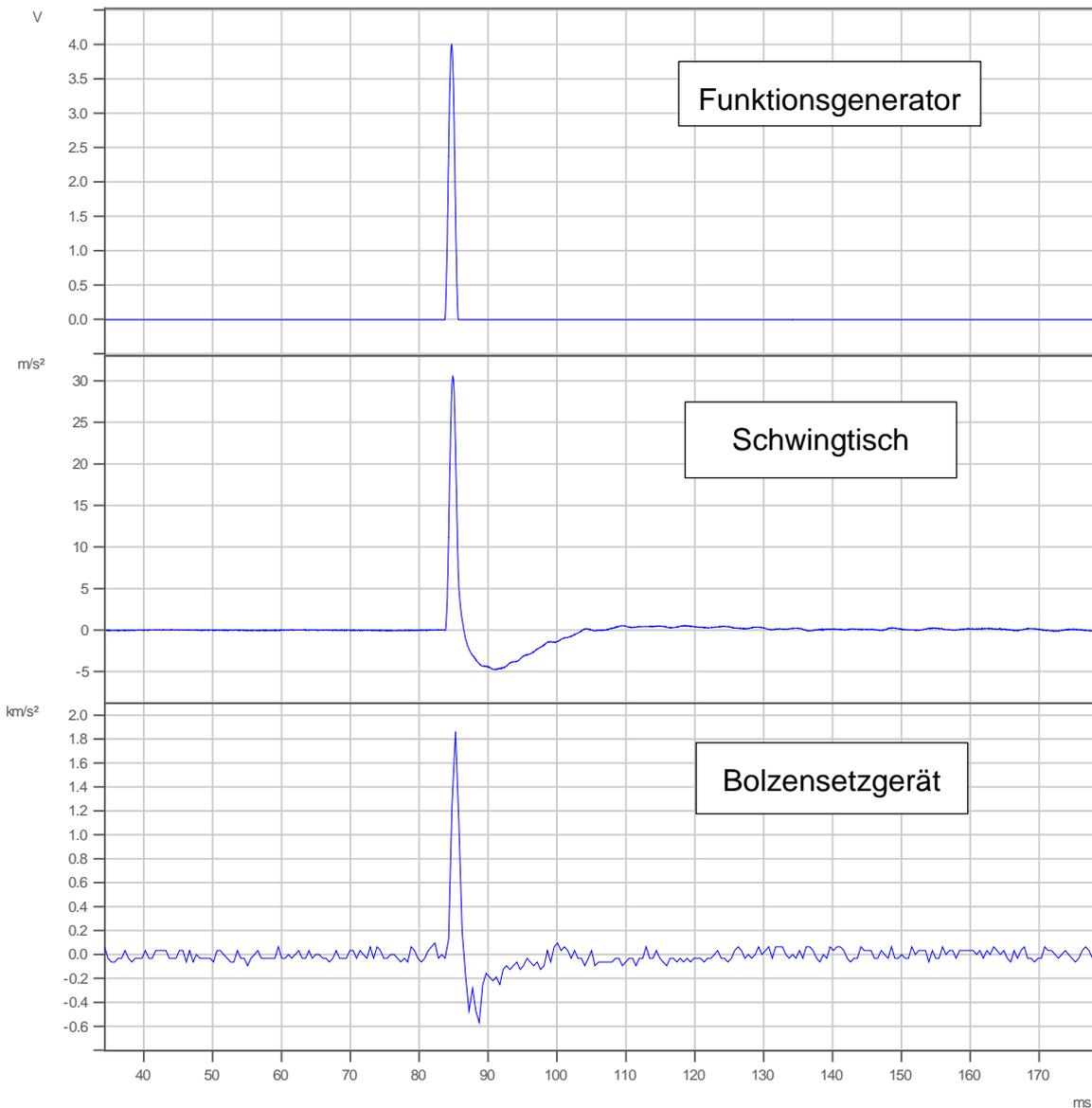


Bild 37: Signalverlauf Halbsinus am Generatorausgang und auf dem Schwingtisch im Vergleich zum Signalverlauf an einem Bolzensetzgerät

#### 4.1.2 Versuchspersonen

Die Versuche wurden mit insgesamt 24 männlichen Versuchspersonen im Alter zwischen 26 und 76 Jahren (Mittelwert 51,2 Jahre) durchgeführt. 9 Versuchspersonen haben Berufe mit manuellen Tätigkeiten, 15 Versuchspersonen sind eher im Büro tätig.

Die Körpergröße der Versuchspersonen liegt zwischen 174 und 193 cm (Mittelwert 182 cm), die Körpermasse zwischen 73 und 120 kg (Mittelwert 87,5 kg).

Im Anhang D ist eine Tabelle mit den individuellen Eigenschaften der Versuchspersonen enthalten. Die Vorversuche wurden nur mit den ersten 7 der in der Tabelle aufgeführten Versuchspersonen durchgeführt. Bei den Hauptversuchen waren alle Versuchspersonen beteiligt.

## **4.2 Vorversuche**

### **4.2.1 Versuchsdurchführung**

Die Vorversuche wurden durchgeführt, um grundlegende Informationen für die Gestaltung der Randbedingungen und für die Parametrisierung der Hauptversuche zu gewinnen. Hierzu wurden Untersuchungen gemäß Fragestellung 1 aus Abschnitt 2 durchgeführt, d.h. die Versuchspersonen hatten die subjektive Grenze zwischen Einzelimpulsen und Impulsfolgen zu bestimmen. Diese Untersuchungen wurden mit unterschiedlichen Einstellungen von Intensität und Dauer der Impulse, mit unterschiedlichen Impuls-Formen sowie mit unterschiedlichen Einleitungsstellen wiederholt.

Folgende Fragen waren zu beantworten:

- Welche Signalform ist für die subjektive Beurteilung von Stoßexpositionen am geeignetsten?
- Gibt es Unterschiede der subjektiven Beurteilung bei unterschiedlichen Intensitäten und unterschiedlichen Impulsdauern?
- Gibt es Unterschiede bei der Einleitung in unterschiedliche Bereiche der Hand (Finger, Handballen)
- Treten Reihenfolgeneffekte (Wiederholungseffekte) auf?

In den Voruntersuchungen wurden Impulse mit Dreieck- und mit Halbsinus-Form verwendet. Diese Dreieck- bzw. Halbsinus-Impulse wurden mit verschiedenen Impulsdauern von 2 ms, 10 ms, und 30 ms sowie mit einer vorgegebenen Intensität von ca. 20 m/s<sup>2</sup> Spitzenwert auf dem elektrodynamischen Schwingerreger (Bild 34, kleiner Shaker) erzeugt. Die gewählte Intensität von 20 m/s<sup>2</sup> liegt relativ dicht über der Fühlschwelle. Da bei dieser geringen Intensität für die subjektive Wahrnehmung eine hohe Konzentration der Versuchspersonen erforderlich ist, wurden eine zusätzliche Versuchsreihe mit Halbsinus-Impulsen mit einer Intensität von 100 m/s<sup>2</sup> Spitzenwert durchgeführt.

Anfangs wurde als zusätzliche Impuls-Form auch die Verwendung von Rechteck-Impulsen in Erwägung gezogen. Erste Ergebnisse zeigten jedoch sehr inkonsistente Reaktionen der Versuchspersonen. In Anbetracht der ohnehin schwierigen Reproduktion

von Rechtecksignalen mit elektrodynamischen Schwingerregern (siehe Abschnitt 4.1.1) sowie in Anbetracht der Tatsache, dass bei praktischen Stoßexposition kaum Rechteck-Impulse auftreten können, wurde in den weiteren Untersuchungen auf Rechteck-Impulse verzichtet.

Um die Exposition der jeweiligen Versuchsimpulse möglichst unbeeinflusst zu gestalten, wurde bei den Vorversuchen auf die Verwendung eines Handgriffes (Masse des Griffes, Eigenresonanzen ...) verzichtet. Die Einleitung der Versuchsimpulse erfolgte über die 4 Fingerkuppen sowie über den äußeren Handgelenksknochen (Erbsenbein, os pisiforme) der rechten und der linken Hand. Die Versuchspersonen hatten Finger bzw. Handgelenk ohne zusätzlichen Andruck locker auf die Platte des Schwingerregers zu legen.

Der Versuchsaufbau ermöglichte es, dass die Versuchspersonen am Funktionsgenerator die Wiederholrate der Impulsfolge, d.h. den zeitlichen Abstand zwischen den aufeinanderfolgenden Impulsen einstellen konnten. Bei relativ großen zeitlichen Abständen zwischen den Einzelereignissen (Impulsen) sind die zeitlichen Zwischenräume zwischen den Einzelimpulsen deutlich spürbar. Hier liegt der Bereich der wiederholten diskreten Impulse (Einzel-Stöße). Wenn die zeitlichen Zwischenräume zwischen den Einzelereignissen kürzer werden (d. h. die Wiederholrate wird größer), so können nach Überschreiten einer bestimmten Grenze die einzelnen Impulse nicht mehr voneinander differenziert werden. Diese Grenze hatten die Versuchspersonen einzustellen.

Für eine einheitliche Vorbereitung der Versuchspersonen auf die Versuche wurde ihnen vor Beginn der Versuche eine schriftliche Versuchsinstruktion (siehe Anhang E) übergeben. Anschließend wurden durch den Versuchsleiter eventuelle Fragen beantwortet. Zum besseren Verständnis und zum Vertraut machen mit der Versuchsausrüstung wurden drei nicht gewertete Probeeinstellungen vorgenommen.

Alle Messungen wurden zweimal wiederholt (3 Messungen pro Versuchsbedingung). Ausgewertet wurde die Wiederholrate in  $s^{-1}$ , die von den Versuchspersonen als Grenze für die Unterscheidung von diskreten Impulsen (Einzel-Stöße) und Impulsfolgen eingestellt wurde. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Statistik-Software STATISTICA, Version 6 der Fa. StatSoft. Zur Anwendung kamen ein- und mehrfaktorielle Varianzanalysen.

## 4.2.2 Ergebnisse Vorversuche

Für einen ersten Überblick über die Daten wurden die statistischen Kennwerte Mittelwert, Standardabweichung, Minimum und Maximum ermittelt (siehe Tabelle 5) sowie die Häufigkeitsverteilung dargestellt (Bild 38).

	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Grenze zwischen Einzelimpulsen und Impulsfolgen	18,30	9,75	30,05	4,81

Tabelle 5: Statistische Kennwerte Vorversuche (Überblick Gesamtdatensatz)

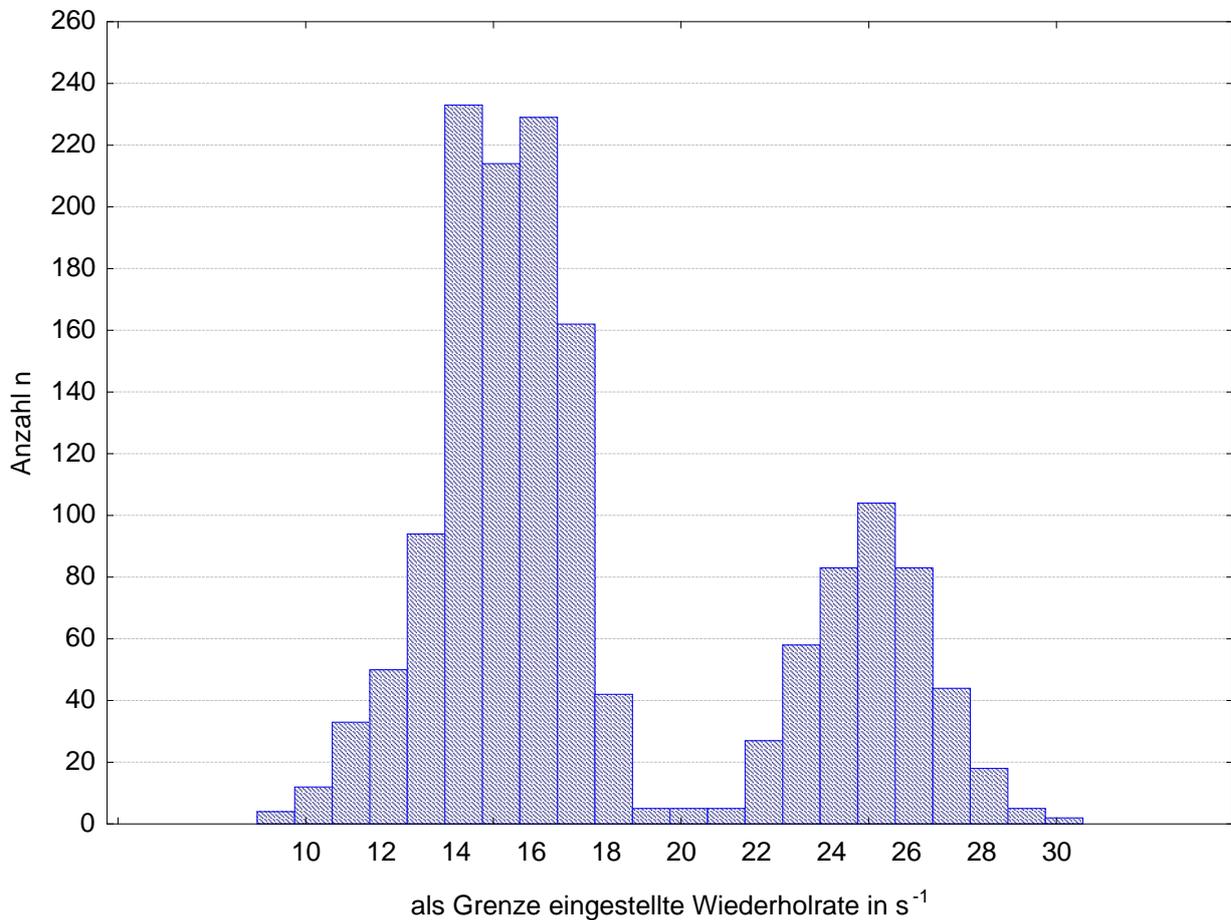


Bild 38: Häufigkeitsverteilung der Wiederholrate für die Grenze zwischen Einzelimpulsen und Impulsfolgen

Die von den Versuchspersonen als Grenze zur Unterscheidung von Einzelimpulsen und Impulsfolgen eingestellte Wiederholrate betrug im Mittel 18,3 Impulse pro Sekunde. Es waren relativ große, so nicht erwartete Streuungen mit einer Standardabweichung von fast  $5 \text{ s}^{-1}$  festzustellen. Minimum und Maximum liegen jeweils etwa  $10 \text{ s}^{-1}$  über bzw. unter dem Mittelwert. Aus der Häufigkeitsanalyse (Bild 38) ist als deutlicher Hinweis auf nicht-zufällige Streuungen eine zweigipflige Verteilung mit lokalen Maxima bei ca.  $14 \text{ s}^{-1}$  und  $25 \text{ s}^{-1}$  erkennbar.

In der weiteren statistischen Auswertung wurden die Einflussfaktoren Versuchswiederholung (1. bis 3. Messung), linke oder rechte Hand, Impulsdauer (2 ms, 10 ms oder 30 ms) und -intensität ( $20 \text{ m/s}^2$  oder  $100 \text{ m/s}^2$ ) sowie Impulsform (Dreieck oder Halbsinus) untersucht (Tabelle 6). Es wurden keine signifikanten Unterschiede der als Grenze eingestellten Wiederholrate in Abhängigkeit von den genannten Einflussfaktoren festgestellt.

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
1. Messung	17,88	4,83	9,01	30,03
2. Messung	18,18	4,86	9,80	30,05
3. Messung	18,03	4,82	10,05	29,71
Rechte Hand	18,03	4,88	9,01	29,76
Linke Hand	18,03	4,78	9,80	30,05
2 ms	18,05	4,74	9,80	30,03
10 ms	17,94	5,03	9,83	30,05
30 ms	18,10	4,74	9,01	29,12
$20 \text{ m/s}^2$	17,86	4,97	9,01	30,05
$100 \text{ m/s}^2$	18,37	4,54	10,26	28,45
Halbsinus	17,78	4,92	9,80	29,12
Dreieck	18,16	4,79	9,01	30,05

Tabelle 6: Statistische Kennwerte für die Einflussfaktoren Versuchswiederholung, linke oder rechte Hand, Impulsdauer, Impulsintensität, Impulsform

Eine signifikante Abhängigkeit der eingestellten Grenze wurde jedoch in Abhängigkeit von der Einleitungsstelle festgestellt (Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha \leq 0,005$ ). Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Tabelle 7 und in Bild 39 dargestellt. Bei der grafischen Darstellung in Bild 39 (sowie in weiteren Darstellungen weiter unten im

Text) werden Mittelwerte mit dazugehörigen Streuungsmaßen für die einzelnen Untersuchungsbedingungen verglichen. Der jeweilige Mittelwert wird durch einen Punkt bzw. durch ein kleines Quadrat dargestellt. Der Bereich für  $\pm 1$  Standardabweichung wird durch das geschlossene Rechteck um diesen Punkt sowie der gesamte Wertebereich zwischen Minimum und Maximum durch T-förmige Balken dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen etwas geringere mittlere Werte bei der Einleitungsstelle direkt auf der dünnen Hautschicht über dem Knochen des Erbsenbeins im Vergleich zu der Einleitung über die Fingerkuppe. Die Streuungen liegen jedoch bei allen Einleitungsstellen in gleicher Größenordnung wie beim Gesamtdatensatz.

Anhand der Mittelwerte ist außerdem die Schlussfolgerung zu ziehen, dass die, trotz statistischer Signifikanz, relativ geringen Unterschiede zwischen den Werten der Finger und des Erbsenbeins nicht die Ursache für die Zweigipfligkeit der Untersuchungsergebnisse sein kann.

Werden die Messwerte für die Einleitungsstelle über dem Erbsenbein aus der statistischen Analyse ausgeklammert, so ergeben sich für die verbleibenden Messwerte der Einleitungsstelle über die Fingerkuppen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Fingern rechts und links.

Einleitungsstelle		Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Rechts 2. Finger	R2	18,15	4,96	10,05	29,76
Rechts 3. Finger	R3	18,44	4,94	9,79	29,71
Rechts 4. Finger	R4	18,26	4,78	9,83	28,43
Rechts 5. Finger	R5	18,32	4,87	10,79	28,16
Rechts Erbsenbein	RE	17,00	4,78	9,01	26,88
Links 2. Finger	L2	18,20	4,74	10,71	29,24
Links 3. Finger	L3	18,51	4,80	9,80	30,05
Links 4. Finger	L4	18,28	4,70	9,80	28,38
Links 5. Finger	L5	18,22	4,74	10,88	30,03
Links Erbsenbein	LE	16,93	4,83	9,95	27,73

*Tabelle 7: Wirkung der Einleitungsstelle auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen*

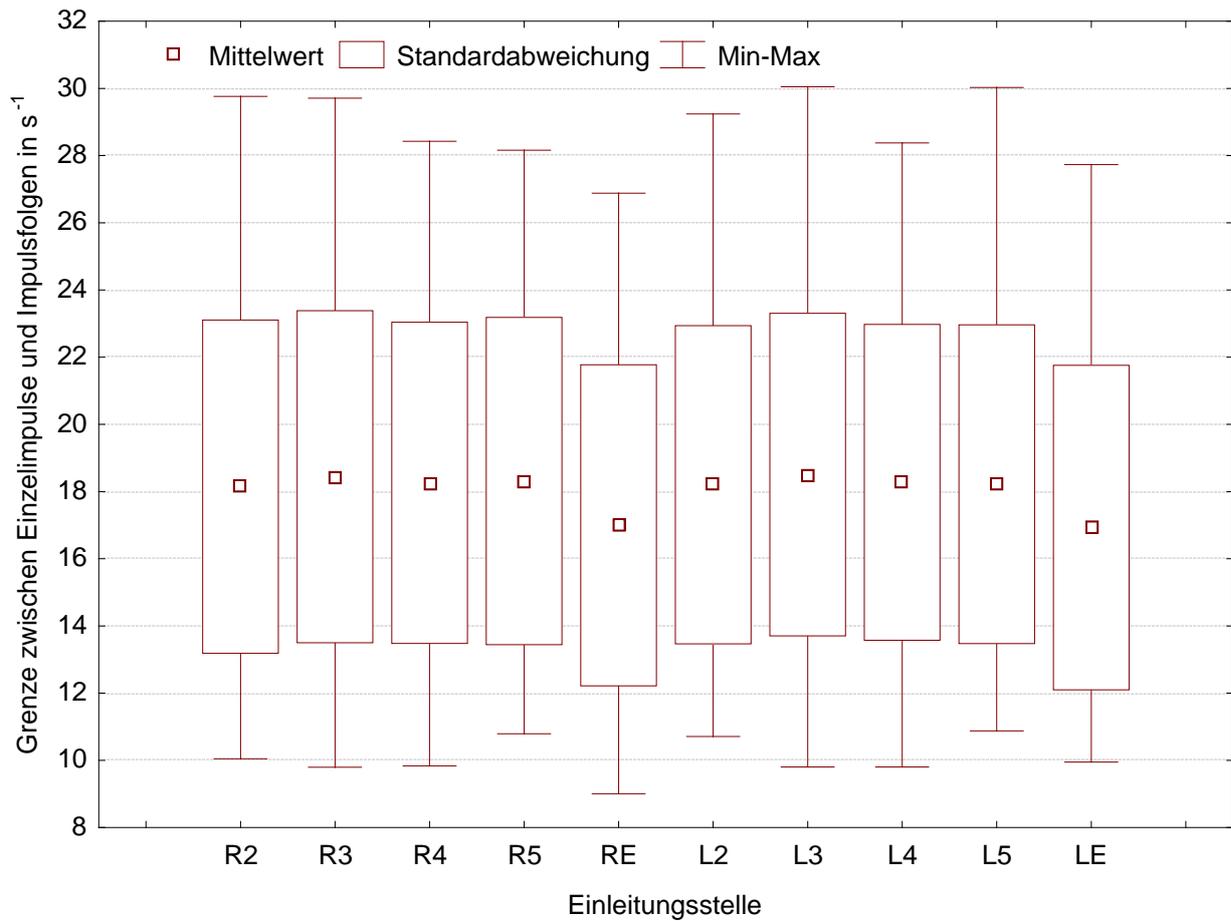


Bild 39: Wirkung der Einleitungsstelle auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen

Als letzter Einflussfaktor wurden die statistischen Kennwerte der einzelnen Versuchspersonen untersucht (Tabelle 8 und Bild 40).

Versuchsperson- Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
1	24,34	1,52	18,36	28,79
2	13,45	1,73	9,01	17,68
3	16,47	1,69	10,88	20,52
4	15,20	1,42	11,47	19,77
5	15,74	1,42	11,56	19,11
6	15,14	1,45	10,03	18,48
7	25,88	1,68	20,79	30,05

Tabelle 8: Statistische Kennwerte Einfluss Versuchspersonen

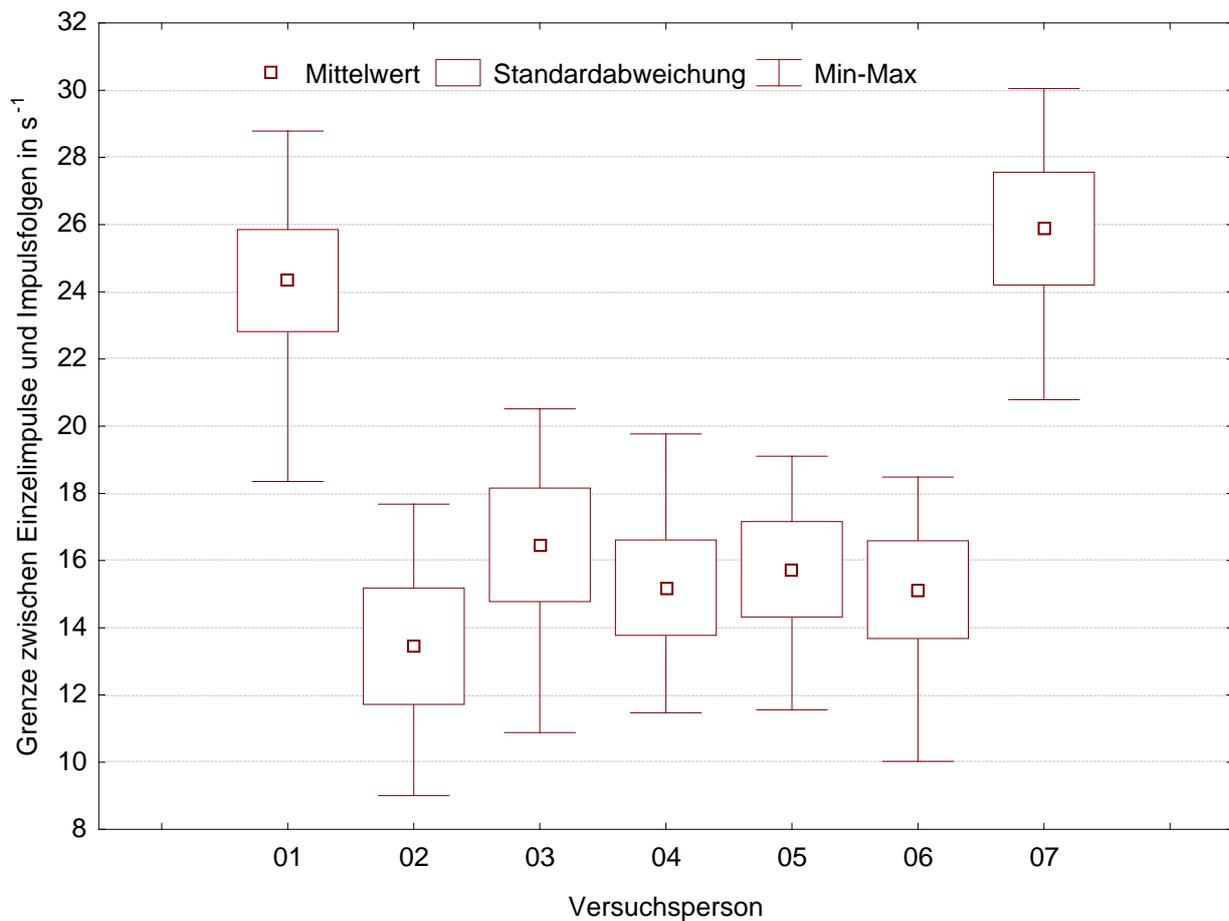


Bild 40: Einfluss der Versuchspersonen auf die eingestellte Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen

Hier ist zu erkennen, dass die Versuchspersonen 01 und 07 deutlich höhere Impuls-Wiederholraten eingestellt hatten, als die anderen Versuchspersonen. Die hohen Streuungen des Gesamtdatensatzes werden also durch die großen Unterschiede zwischen den Versuchspersonen verursacht. Die Streuung der Werte der einzelnen Versuchspersonen ist deutlich geringer als die des Gesamtdatensatzes. Die beiden Gipfel in der Häufigkeitsverteilung des Gesamtdatensatzes werden durch die Versuchspersonen 02 bis 06 mit Mittelwerten im Bereich 13 s<sup>-1</sup> bis 16 s<sup>-1</sup> einerseits sowie die Versuchspersonen 01 und 07 mit Mittelwerten im Bereich 24 s<sup>-1</sup> bis 26 s<sup>-1</sup> andererseits verursacht. Die Unterschiede sind bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha \leq 0,001$  hoch signifikant.

Diese festgestellten Unterschiede sind anhand der Randbedingungen des Versuchsaufbaus und der Versuchsdurchführung nicht erklärlich. Deshalb wurden intensivere

Gespräche mit den Versuchspersonen geführt, um die jeweilige kognitive Vorgehensweise zur Entscheidungsfindung für die einzustellende Grenze zu erkennen. Hierbei zeigte sich, dass die Versuchspersonen 02 bis 06 sich auf die einzelnen Impulse und die dazwischen liegenden Pausen konzentrierten. Entscheidungskriterium für das Einstellen der Grenze war der Punkt, an dem die Pausen zwischen den Impulsen nicht mehr wahrzunehmen waren. Die Versuchspersonen 01 und 07 verfolgten demgegenüber eine andere Strategie zur Entscheidungsfindung. Von ihnen wurde alles noch als Einzelimpulse angesehen, was eine Empfindung kurzzeitiger Änderungen (Impulse) der Wahrnehmung produzierte. Erst wenn diese kurzzeitigen Änderungen in eine mehr oder weniger diffuse Schwingungswahrnehmung, ein „Kribbeln“, übergingen, wurde dies als Impulsfolge angesehen.

Es gibt also offensichtlich drei Bereiche der subjektiven Wahrnehmung von mehr oder weniger schnell aufeinander folgenden Impulsen:

- Einzelne, diskrete Impulse
- Impulsfolgen
- Stochastische bzw. diffuse Schwingungswahrnehmung

In der schriftlichen Versuchsinstruktion wurde mangels dieser Erkenntnis nur nach einer Grenze, welche die zwei unterschiedlichen Bereiche der diskreten Impulse und der Impulsfolgen von einander abgrenzt, gefragt. Aufgrund der diesbezüglich unscharfen Formulierung in der Versuchsinstruktion kamen die Versuchspersonen zu unterschiedlichen Entscheidungsfindungen.

Es ist also zu schlussfolgern, dass die schriftliche Versuchsinstruktion mit der Forderung nach Abgrenzung zweier Bereiche der subjektiven Wahrnehmung missverständlich war. Für die Hauptversuche war eine neue Versuchsinstruktion mit eindeutigen Formulierungen zu erarbeiten.

Aus den Befragungen der Versuchspersonen ergab sich weiterhin, dass die Festlegung für eine bestimmte Wiederholrate als Grenze zwischen Einzel-Impulsen und Impulsfolgen offensichtlich weniger eine Frage der peripheren Sinneswahrnehmung sondern vorrangig eine bewusste Entscheidung unter Verwendung des Gehirns ist. Deshalb sind neben anderen Einflussfaktoren (Interesse, Neugierde, Intelligenz ...) auch alle Einflussfaktoren, die sich auf die Konzentration der Versuchspersonen auswirken (Ermüdung, Geräuscheinflüsse u. ä.), bedeutsam. Die Versuchsdauer sollte deshalb auf höchstens 30 min begrenzt werden. Die Versuchspersonen dürfen nicht durch zu

vielen Variationen (z. B. unterschiedliche Impulsformen) und Teilung der Aufmerksamkeit auf sonstige Randbedingungen (z. B. zusätzliche Beobachtung einer Andruckkraft-Anzeige) überfordert werden.

Für die Hauptversuche war weiterhin bedeutsam, dass offensichtlich die Einleitungsstelle in den menschlichen Körper bzw. in das Hand-Arm-System Einfluss auf die Entscheidung für die Abgrenzung von Impulsen und Impulsfolgen hat. Für die Hauptversuche wurde deshalb nur eine einzige Einleitungsstelle, und zwar die der realen Stoßexposition am nächsten kommende Einleitung über einen Handgriff gewählt.

Da die Einleitung über die rechte oder die linke Hand offensichtlich keine Auswirkung auf die Versuchsergebnisse hat, konnte für die Hauptversuche eine Beschränkung auf die rechte Hand erfolgen. Impulsdauer und Impulsform haben im gewählten Wertebereich ebenfalls keinen Einfluss. Unter Berücksichtigung der bei realen Expositionen auftretenden Stoßparameter wurden für die Hauptversuche Dreieckssignale mit 3 ms als Versuchsimpulse gewählt.

Die Versuchspersonen konnten auch bei sehr geringen Impulsintensitäten relativ sichere Aussagen treffen. Insofern ist bei den weiteren Versuchen eine Variation der Intensität oder die Wahl von höheren Intensitäten nicht erforderlich.

## **4.3 Hauptversuche**

### **4.3.1 Versuchsdurchführung**

Es wurden zwei Hauptversuche durchgeführt:

Hauptversuch 1:

Untersuchung des Einflusses der Wiederholrate auf die Stoßempfindung

Hauptversuch 2:

Untersuchung von Ereignisdauer und -intensität auf die Stoßempfindung

#### **Hauptversuch 1**

Für die Gestaltung der Hauptversuche wurden die im vorigen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse der Vorversuche herangezogen.

Im Hauptversuch 1 wurden den Versuchspersonen über den Handgriff des Shakers Impulsfolgen mit einstellbaren Abständen zwischen den Einzelimpulsen angeboten. Es handelte sich in jedem Fall um Dreiecksimpulse mit einer Impulsdauer von 3 ms.

Die Versuchspersonen hatten die Intensität der Impulse vor Beginn der Versuche so einzustellen, dass die Impulse leicht über der Wahrnehmungsschwelle lagen, jedoch gut spürbar waren. Während der Versuche blieb die Intensität aller Einzelimpulse gleich.

Am Funktionsgenerator konnten die Versuchspersonen die Wiederholrate der Impulsfolge, d.h. den zeitlichen Abstand zwischen den aufeinanderfolgenden Impulsen einzustellen. Bei relativ großen zeitlichen Abständen zwischen den Einzelereignissen (Impulsen) sind die zeitlichen Zwischenräume zwischen den Einzelimpulsen deutlich spürbar. Hier liegt der Bereich der wiederholten diskreten Impulse (Einzel-Stöße). Wenn die zeitlichen Zwischenräume zwischen den Einzelereignisse kürzer werden (d. h. die Wiederholrate wird größer), so wird nach Überschreiten einer so genannten Grenze A der Bereich der Impulsfolgen erreicht, bei dem zwar noch die einzelnen Ereignisse als Impulse, nicht aber mehr die zeitlichen Zwischenräume zwischen den Einzelereignissen wahrnehmbar sind. Bei einer weiteren Verkürzung der zeitlichen Zwischenräume, nach Überschreiten der so genannten Grenze B, können auch die Einzelimpulse nicht mehr als diskrete Ereignisse wahrgenommen werden. Die Impulsfolgen werden nur noch als diffuse Vibrationen bzw. als „Kribbeln“ wahrgenommen.

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, die zwei verschiedenen Grenzen der Wiederholrate, Grenze A und Grenze B, anhand ihrer subjektiven Wahrnehmung einzustellen. Hierbei unterscheidet Grenze A zwischen dem Bereich der wiederholten diskreten Impulse (Stöße) und dem Bereich der Impulsfolgen (Stoßfolgen). Die Grenze B unterscheidet zwischen dem Bereich der Impulsfolgen und dem Bereich der diffusen (stochastischen) Schwingungswahrnehmung. Es sind also insgesamt drei Bereiche unterschiedlicher Wahrnehmung abzugrenzen.

Die Untersuchungen wurden bei drei verschiedenen Andruckkräften vorgenommen:

- Nahezu ohne Andruck (nur lockerer Kontakt der Hand um den Griff)
- Leichte Andruckkraft
- Mittlere Andruckkraft

Die Andruckkraft wurde von den Versuchspersonen in diesen drei Bereichen nach Instruktion und einigen Vorversuchen nach Gefühl ausgeübt. Da die Konzentration der Versuchspersonen von der eigentlichen Versuchsaufgabe, der Einstellung von Grenze A bzw. Grenze B, nicht abgelenkt werden sollte, wurde auf das bei solchen Versuchen übliche Einregeln der Andruckkraft mit Hilfe einer Kraftanzeige verzichtet. Unabhängig davon wurde die konkret bei den einzelnen Versuchen ausgeübte Andruckkraft registriert.

Alle Versuchspersonen wurden mittels schriftlicher, im Ergebnis der Voruntersuchung modifizierter Versuchsinstruktion (siehe Anhang F) auf die Versuchsaufgabe vorbereitet. Anschließend wurden durch den Versuchsleiter eventuelle Fragen beantwortet. Zum besseren Verständnis und zum Vertraut machen mit der Versuchsapparatur wurden drei nicht gewertete Probeeinstellungen vorgenommen. Alle Versuche wurden von jeder Versuchsperson insgesamt dreimal durchgeführt (2 Wiederholungen).

Ausgewertet wurden die von den Versuchspersonen jeweils als Grenze A bzw. Grenze B eingestellten Wiederholraten in  $s^{-1}$ . Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Statistik-Software STATISTICA, Version 6 der Fa. StatSoft. Zur Anwendung kamen ein- und mehrfaktorielle Varianzanalysen.

## **Hauptversuch 2**

Im zweiten Hauptversuch wurden dreieckförmige Impulse mit unterschiedlicher Impulsdauer über den Handgriff des Shakers in das Hand-Arm-System der Versuchspersonen eingeleitet.

Impulsdauer: 1 ms, 2 ms, 5 ms, 10 ms, 20 ms, 30 ms, 50 ms, 80 ms, 100 ms

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, die Intensität des Impulses so lange zu variieren, bis gerade die Grenze der Stoßempfindung erreicht ist. Bei sehr geringen Bewegungen war also die Intensität zu erhöhen, so lange, bis die Bewegung als Stoß empfunden wird. Bei einer deutlichen Stoßempfindung war die Intensität wieder zu verringern, bis der Übergang zu einem Nicht-Stoß, d.h. zu einer simplen Bewegung des Handgriffes erreicht wurde. Die Versuche wurden mit zwei unterschiedlichen Andruckkräften durchgeführt:

- Nahezu ohne Andruck (nur lockerer Kontakt der Hand um den Griff)
- Leichte Abdruckkraft

Die jeweilige Andruckkraft wurde von den Versuchspersonen nach Instruktion und einigen Vorversuchen nach Gefühl ausgeübt. Da die Konzentration der Versuchspersonen von der eigentlichen Versuchsaufgabe, der Entscheidung „Stoß“ oder „Nicht-Stoß“, nicht abgelenkt werden sollte, wurde auf das bei solchen Versuchen übliche Einregeln der Andruckkraft mit Hilfe einer Kraftanzeige verzichtet. Unabhängig davon wurde die konkret bei den einzelnen Versuchen ausgeübte Andruckkraft registriert.

Alle Versuchspersonen wurden mittels schriftlicher Versuchsinstruktion (siehe Anhang G) auf die Versuchsaufgabe vorbereitet. Anschließend wurden durch den Versuchslei-

ter eventuelle Fragen beantwortet. Zum besseren Verständnis und zum Vertrauen machen mit der Versuchsanordnung wurden drei nicht gewertete Probereinstellungen vorgenommen. Alle Versuche wurden von jeder Versuchsperson insgesamt dreimal durchgeführt (2 Wiederholungen). Die Darbietung der unterschiedlichen Impulsdauern erfolgte nach einer Zufallsreihenfolge, die in den einzelnen Versuchsdurchgängen unterschiedlich, jedoch für alle Versuchspersonen gleich war.

Ausgewertet wurde für jede Kombination von Impulsdauer und -intensität, welche die Versuchspersonen als „Stoß“ deklarierten, die am Handgriff gemessene Beschleunigung als Effektivwerte und als positive Spitzenwerte. Die Effektivwerte (Root Mean Square – RMS) wurden mit einer Integrationszeit von 1 s entsprechend DIN 45661-A1 [43] sowie mit einer Integrationszeit von 3 s entsprechend DIN ISO/TS 15694 [12] gemessen. Außerdem wurde der überenergetische Mittelwert (Root Mean Quad – RMQ) mit einer Integrationszeit von 3 s entsprechend DIN ISO/TS 15694 gemessen. Alle RMS- und RMQ-Werte wurden mit unterschiedlichen Frequenzbewertungsfunktionen gemessen:

- Linear entsprechend des verfügbaren Frequenzbereiches der verwendeten Messtechnik (Bandpass 2 Hz – 20 kHz)
- Frequenzbewertung Flat<sub>h</sub> entsprechend DIN ISO/TS 15694 (Bandpass 6,3 Hz – 1,25 kHz)
- w<sub>p</sub> – Bewertung entsprechend ISO/PWI 18570 (Bandpass 20 Hz – 400 Hz) [36]
- w<sub>h</sub> – Bewertung entsprechend ISO 5349-1 [4]

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit der Statistik-Software STATISTICA, Version 6 der Fa. StatSoft. Zur Anwendung kamen ein- und mehrfaktorielle Varianzanalysen.

### **4.3.2 Ergebnisse Hauptversuche**

#### **Ergebnisse Hauptversuch 1**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Hauptversuches 1 beschrieben, in dem untersucht wurde, welchen Einfluss die Wiederholungsrate einer Impulsfolge (Folge von Einzel-Impulsen bzw. Einzel-Stößen), d.h. der zeitliche Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen, auf die subjektive Unterscheidung als wiederholte Einzel-Impulse, als Impulsfolge bzw. als diffuse Schwingungswahrnehmung hat.

Als erstes erfolgte eine beschreibende Analyse aller erhobenen Rohdaten. Hierbei zeigte sich, dass die Daten der Versuchsperson 14 völlig inkonsistent waren und deswegen von der Auswertung ausgeschlossen werden mussten. Die Messdaten für Grenze A und Grenze B wurden für jede Versuchsperson insgesamt drei Mal erhoben (Versuchswiederholung). Die Unterschiede der in den drei Wiederholungen gemessenen Werte waren bei sonst gleichen Randbedingungen nicht signifikant. Ein Einfluss der Reihenfolge dieser Versuchswiederholung konnte also nicht festgestellt werden. Deshalb wurden für die einzelnen Versuchspersonen und die einzelnen Versuchsbedingungen die Messwerte der drei Wiederholungen gemittelt. Für die weiteren Auswertungen wurden nur die gemittelten Daten heran gezogen.

Die Häufigkeitsverteilung aller gemittelten Daten für die Grenze A (Abgrenzung von Einzel-Impulsen und Impulsfolgen) und für die Grenze B (Abgrenzung von Impulsfolgen und diffuser Schwingungswahrnehmung ist in Bild 41 dargestellt. Die Verteilungsformen für die Werte der Grenze A und der Grenze B entsprechen näherungsweise einer Normalverteilung. Es ist zu erkennen, dass sich die beiden Verteilungen zwar in einem Teilbereich überlappen, ansonsten aber deutlich voneinander abgrenzbar sind. Die Streuung für die Werte der Grenze B ist etwas größer als bei Grenze A.

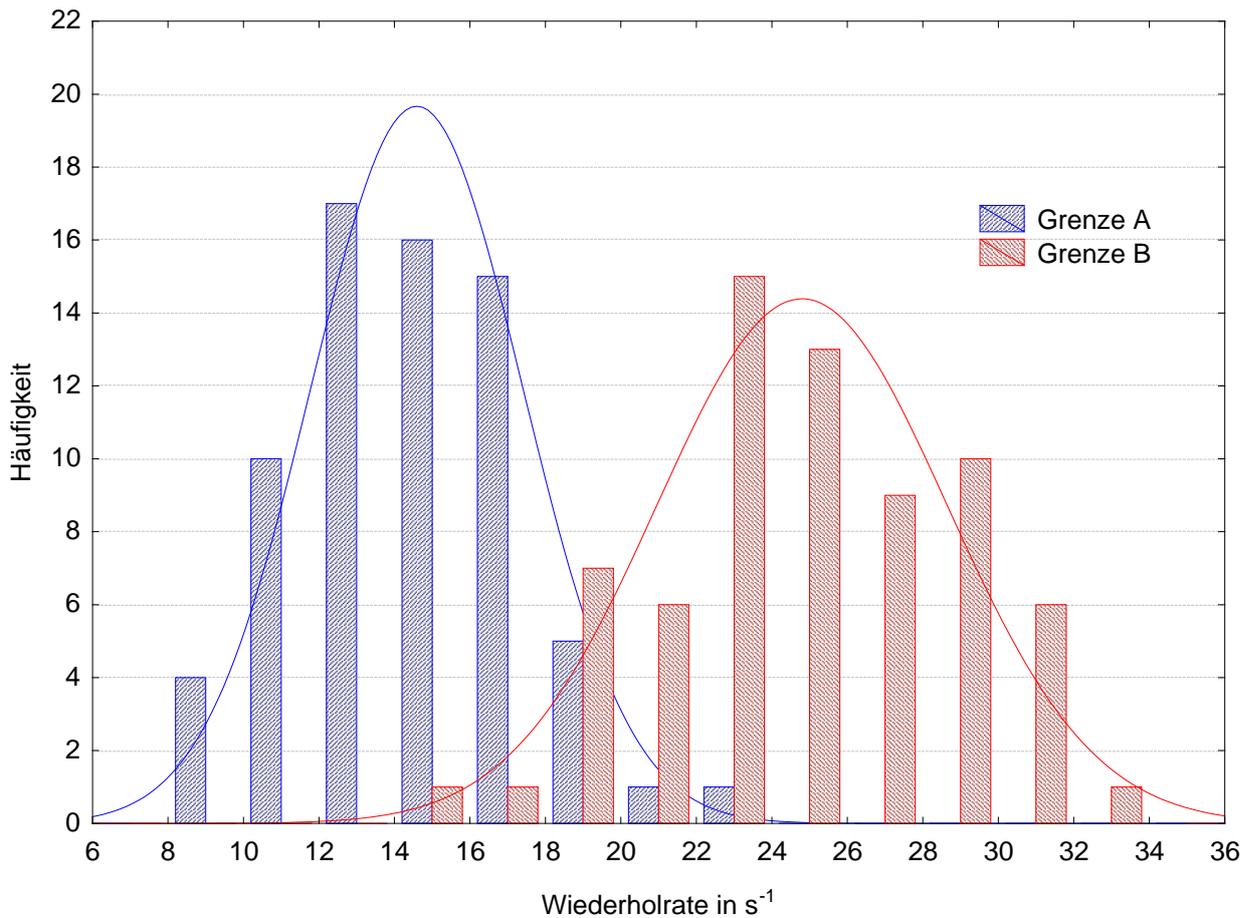


Bild 41: Häufigkeitsverteilung der Wiederholrate für Grenze A und Grenze B

Folgende statistische Kennwerte wurden ermittelt (Tabelle 9):

	Mittelwert	Minimum	Maximum	Standardabweichung
Grenze A	14,55	9,82	23,29	2,78
Grenze B	24,71	14,61	32,07	3,83

Tabelle 9: Statistische Kennwerte Hauptversuch 1 (Überblick Gesamtdatensatz)

Die Wiederholrate, welche von den Versuchspersonen als Grenze zwischen Einzel-Impulsen und Impulsfolgen eingestellt wurde (Grenze A), liegt durchschnittlich bei etwa 15 s<sup>-1</sup> mit einem Minimum von etwa 9,8 s<sup>-1</sup>. Es ist also festzustellen, dass die Versuchspersonen wiederholte Einzel-Impulse auch noch eindeutig voneinander unterscheiden können, wenn ihre Wiederholrate deutlich über 5 bzw. 5,6 s<sup>-1</sup> liegt.

Die Wiederholrate, welche von den Versuchspersonen als Grenze zwischen Impulsfolgen und einer diffusen Schwingungswahrnehmung eingestellt wurde (Grenze B), liegt durchschnittlich bei etwa  $25 \text{ s}^{-1}$ .

Der Unterschied zwischen den Wiederholraten für Grenze A und Grenze B ist bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha \leq 0,001$  statistisch hoch signifikant.

Bild 42 zeigt die drei unterschiedlichen Wahrnehmungsbereiche mit den beiden Grenzen A und B im Zusammenhang mit den erhobenen Messwerten.

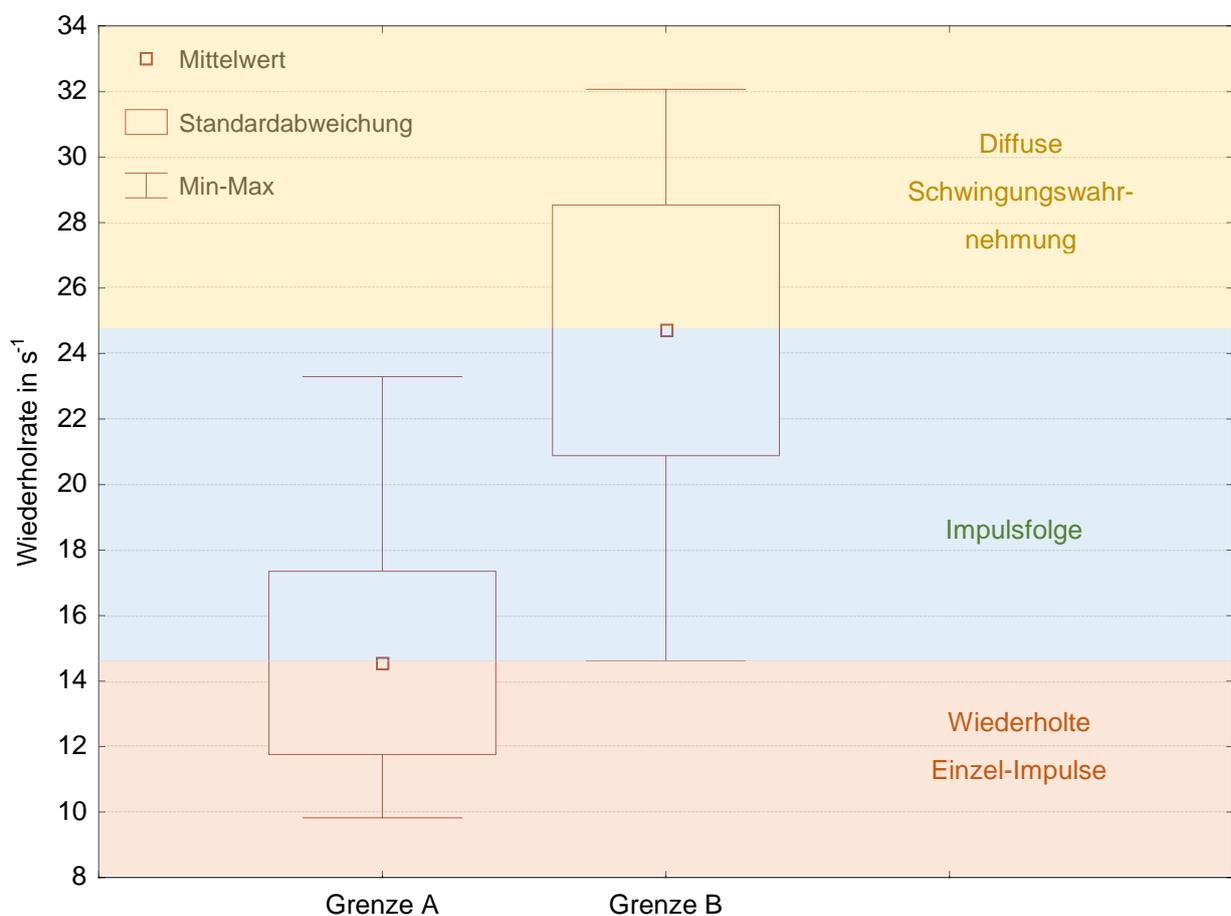


Bild 42: Drei zu unterscheidende Wahrnehmungsbereiche mit ihren Abgrenzungen durch Grenze A und Grenze B

Zwischen den Werten für Grenze A und Grenze B besteht ein signifikanter statistischer Zusammenhang (Korrelationskoeffizient  $r = 0,65$ ,  $\alpha \leq 0,05$ ). Bild 43 zeigt die von jeder Versuchsperson eingestellten Werte für Grenze A und Grenze B als Scatterplot mit der sich aus den Werten ergebenden Regressionsgeraden (durchgezogene rote Linie) und

dem 95%-Vertrauensbereich (gestrichelte rote Linien). Die Regressionsgleichung ergibt sich zu

$$\text{Grenze A} = 0,47392 * \text{Grenze B} + 2,8421$$

Grenze A wird von den einzelnen Versuchspersonen also bei einem off-set von ca. 3 s<sup>-1</sup> auf etwa die Hälfte von Grenze B eingestellt.

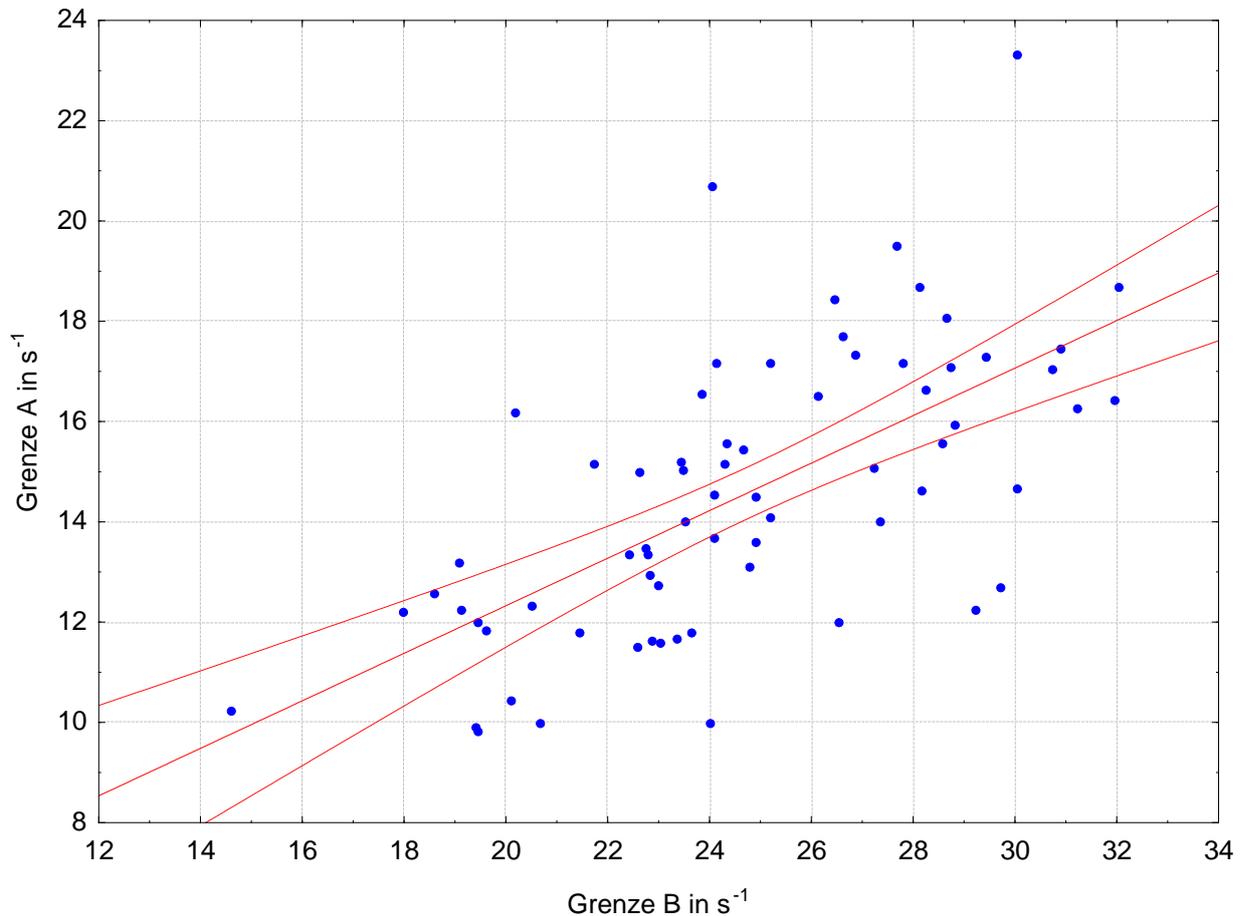


Bild 43: Zusammenhang zwischen Grenze A und Grenze B

Zur weiteren Abklärung der relativ großen Streuungen wurde der Einfluss der einzelnen Versuchspersonen untersucht. Tabelle 10 und Tabelle 11 sowie Bild 44 zeigen die Mittelwerte, Standardabweichungen und Extremwerte der einzelnen Versuchspersonen getrennt für Grenze A und Grenze B.

Versuchsperson- Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
1	14,83	1,53	13,17	16,16
2	10,05	0,34	9,82	10,44
3	11,65	0,11	11,57	11,78
4	15,66	1,47	14,61	17,34
5	14,52	1,41	12,92	15,57
6	13,28	0,50	12,72	13,67
7	16,46	1,13	15,15	17,16
8	17,20	1,08	16,54	18,44
9	12,41	2,50	9,97	14,97
10	11,26	0,92	10,20	11,80
11	12,33	0,20	12,18	12,56
12	16,14	2,66	13,10	18,05
13	14,26	0,84	13,58	15,20
15	16,05	1,37	14,51	17,14
16	13,18	1,30	12,22	14,65
17	11,21	1,07	9,99	12,00
18	15,68	1,49	14,08	17,03
19	15,33	2,89	13,35	18,65
20	19,39	3,39	17,17	23,29
21	12,26	0,96	11,47	13,33
22	16,71	0,65	16,25	17,46
23	19,62	1,01	18,69	20,69
24	15,17	0,54	14,55	15,54

Tabelle 10: Grenze A

Versuchsperson- Nr.	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
1	20,33	1,33	19,07	21,73
2	19,65	0,40	19,40	20,12
3	23,20	0,41	22,90	23,67
4	26,19	2,41	23,50	28,18
5	26,21	3,02	22,82	28,59
6	23,29	0,73	22,77	24,12
7	25,73	2,62	24,13	28,75
8	26,19	2,22	23,85	28,25
9	21,27	1,18	20,50	22,63
10	18,57	3,55	14,61	21,47
11	18,57	0,59	17,97	19,15
12	27,63	2,50	24,78	29,43
13	23,96	0,83	23,43	24,92
15	26,29	1,46	24,92	27,82
16	29,67	0,41	29,23	30,05
17	24,64	1,67	23,36	26,54
18	28,26	2,81	25,21	30,75
19	27,41	4,63	22,80	32,07
20	27,29	2,48	25,22	30,04
21	21,49	1,76	19,46	22,58
22	31,37	0,53	30,91	31,95
23	26,63	2,23	24,07	28,14
24	24,38	0,29	24,11	24,69

Tabelle 11: Grenze B

Es ist zu erkennen, dass die einzelnen Versuchspersonen teilweise deutlich unterschiedliche mittlere Werte für Grenze A und Grenze B einstellen ( $\alpha \leq 0,001$ ) und auch deutlich unterschiedliche Streuungen in ihren Einzelwerten aufweisen. Deutlich erkennbar ist jedoch auch der oben erläuterte Zusammenhang zwischen Grenze A und

Grenze B. Es ist zu schlussfolgern, dass die eingestellten Werte für Grenze A und Grenze B durchaus als persönlichkeitspezifische Kennwerte gelten können. Die bei den oben beschriebenen Gesamt-Mittelwerten aufgetretenen Streuungen werden vorrangig durch die Streuungen zwischen den Versuchspersonen, weniger durch die Streuungen der einzelnen Versuchspersonen selbst (mit einigen Ausnahmen, z. B. Versuchsperson 19) verursacht.

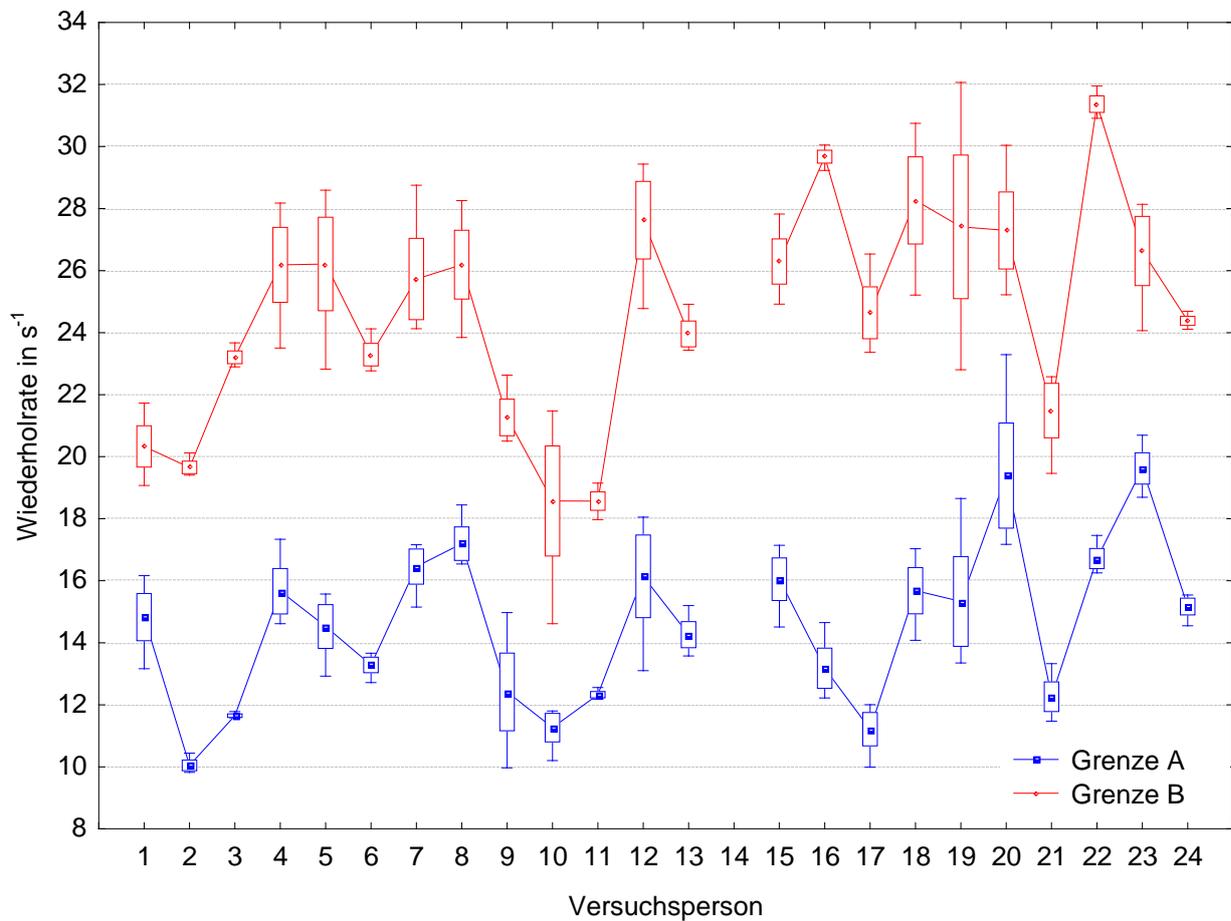


Bild 44: Mittelwerte, Standardabweichungen und Extremwerte der einzelnen Versuchspersonen für Grenze A und Grenze B

Die Einstellung von Grenze A und Grenze B war jedoch bei den Versuchsgruppen je nach ihrer Zugehörigkeit zu den beiden Gruppen der eher im Büro Tätigen und der eher manuell Tätigen signifikant ( $\alpha \leq 0,001$ ) unterschiedlich. Büroarbeiter stellen für die Grenze A und die Grenze B niedrigere Werte ein. Die Streuungen bei den handwerklich Tätigen sind deutlich geringer und zwar derartig, dass sich die Verteilungen für Grenze A und Grenze B nicht mehr überlappen (siehe Tabelle 12 und Bild 45).

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Grenze A				
Büroarbeiter	13,84	3,06	9,82	23,29
manuell Tätige	15,88	1,55	12,92	18,44
Grenze B				
Büroarbeiter	23,64	3,94	14,61	32,07
manuell Tätige	26,70	2,70	22,82	31,95

Tabelle 12: Statistische Kennwerte für Einfluss der Art der ausgeübten Tätigkeit

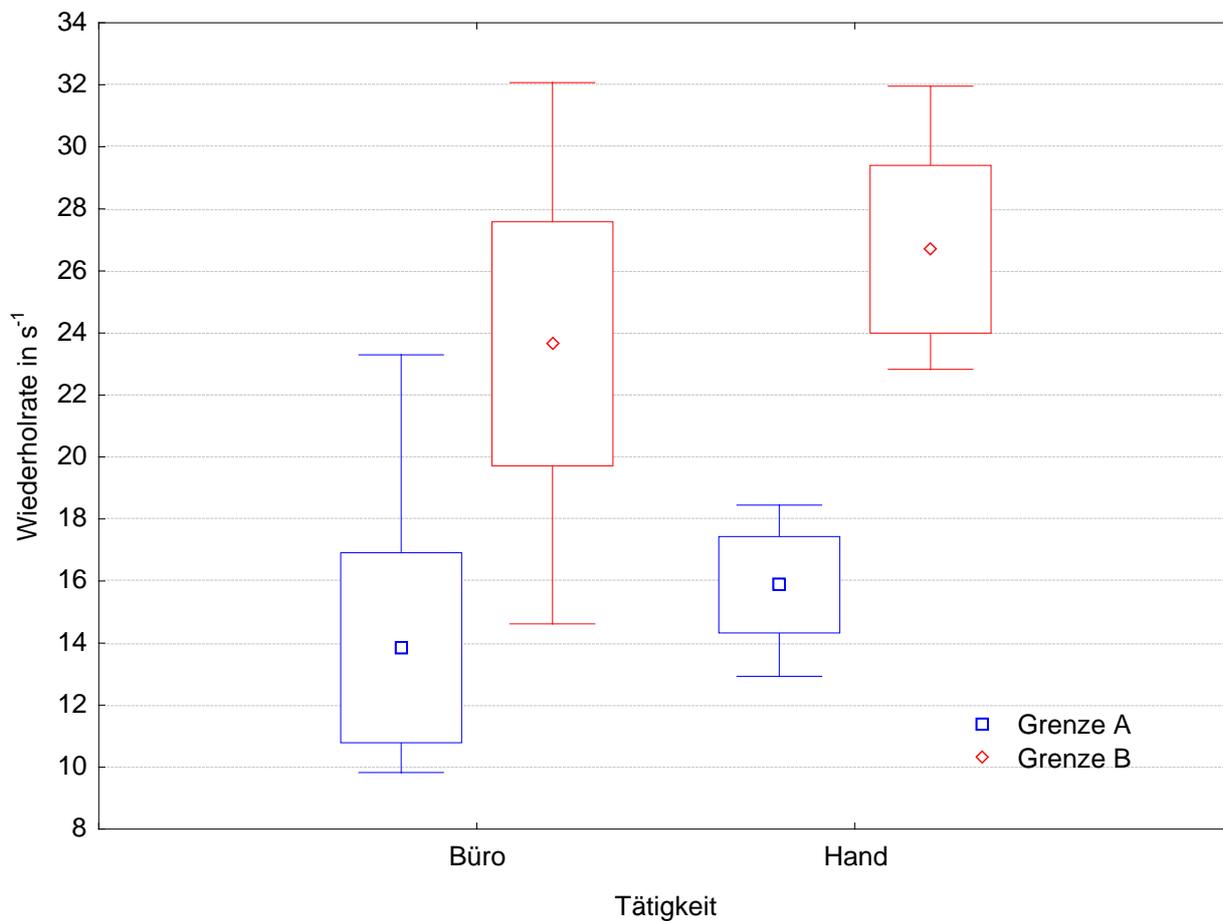


Bild 45: Wirkung der Art der ausgeübten Tätigkeit auf Grenze A und Grenze B

Die weitere Auswertung der persönlichkeitspezifischen Einflussfaktoren (Tabelle 13 und Tabelle 14) zeigten einen signifikanten Einfluss von Körpermasse ( $\alpha \leq 0,01$ ) und Lebensalter ( $\alpha \leq 0,01$ ) auf die Werte für Grenze A, nicht jedoch auf die Werte für Grenze B. Der Einfluss der Körpergröße sowie auch der Einfluss der Andruckkraft war in jedem Fall nicht signifikant.

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Körpergröße				
klein	15,15	2,62	9,99	23,29
mittel	14,10	2,97	9,82	20,69
groß	14,04	2,56	9,97	17,34
Körpermasse				
leicht	15,43	1,96	12,72	18,65
mittel	14,47	3,13	9,82	23,29
schwer	12,86	2,28	10,20	17,34
Lebensalter				
leicht	13,08	2,39	9,82	18,65
mittel	14,35	2,82	10,20	20,69
schwer	16,04	2,44	11,47	23,29
Andruck				
ohne	13,71	2,46	9,88	19,48
leicht	14,61	2,83	9,82	20,69
kräftig	15,34	2,96	10,20	23,29

Tabelle 13: Grenze A

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Körpergröße				
klein	25,28	2,97	19,07	32,07
mittel	24,36	4,57	14,61	31,95
groß	23,73	3,19	20,50	28,18
Körpermasse				
leicht	26,06	3,92	19,07	32,07
mittel	24,45	3,57	17,97	30,75
schwer	22,65	3,96	14,61	28,18
Lebensalter				
jung	24,17	4,12	19,07	32,07
mittel	23,97	4,32	14,61	31,95
alt	25,91	2,74	19,46	30,75
Andruck				
ohne	24,52	3,26	19,07	31,24
leicht	24,21	3,54	17,97	30,91
kräftig	25,39	4,62	14,61	32,07

*Tabelle 14: Grenze B*

## Ergebnisse Hauptversuch 2

Die Auswertung der Ergebnisse des Hauptversuches 2 erfolgte mit dem Ziel, anhand der jeweiligen Kombinationen von Impulsdauer und Impulsintensität, die von den Versuchspersonen als „Stoß“ empfunden wurden, Kurven gleicher Stoßempfindung zu ermitteln. Diese Kurven sind separat für die unterschiedlichen Messparameter mit den jeweils unterschiedlichen Frequenzbewertungskurven zu ermitteln.

Da sich in den statistischen Auswertungen zeigte, dass der Einfluss der Andruckkraft und der Einfluss der Messwiederholung nicht signifikant waren, konnten die Messwerte über die einzelnen Versuchsbedingungen gemittelt werden. Bei den ersten Auswertungen zeigte sich weiterhin, dass bei einigen Versuchspersonen deutliche Ausreißer in Richtung sehr hoher Intensitäten zu verzeichnen waren. Diese Werte wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

Alle Einzelergebnisse sind im Anhang grafisch als Mittelwerte über Versuchspersonen, Andruckkraft-Bedingungen und Wiederholungen mit den dazu gehörigen 95%-Vertrauensbereichen dargestellt. In allen Grafiken wird jeweils die Intensität dargestellt, die bei einer bestimmten Impulsdauer von den Versuchspersonen gerade als „Stoß“ empfunden wurden.

Bei der Darstellung und Interpretation der Ergebnisse ergab sich das Problem, dass bei den vier Messparametern (drei unterschiedliche Zeitmittelwerte sowie Spitzenwert) in Kombination mit den vier unterschiedlichen Frequenzbewertungsfunktionen eine relativ unübersichtliche Vielzahl von grafischen Darstellungen erforderlich war. Hierbei sind einerseits Grafiken mit dem Einfluss des Messparameters bei gleicher Frequenzbewertung, andererseits auch Grafiken mit dem Einfluss der Frequenzbewertung bei gleichem Messparameter sinnvoll. Darüber hinaus zeigte sich, dass die unterschiedliche grafische Darstellung der Daten einerseits im linearen Maßstab, andererseits im doppelt logarithmischen Maßstab zusätzlichen Informationsgewinn erzeugte. Um dennoch die Übersicht zu behalten, wurden in diesem Abschnitt stellvertretend für viele, ähnliche Daten einzelne Parameter ausgewählt, dargestellt und interpretiert. Der Vollständigkeit halber sind jedoch alle Einzelergebnisse im Anhang H dargestellt.

Im Bild 46 ist der mittlere Verlauf der Stoßempfindung bei Verwendung der linearen Frequenzbewertung (Bandpass 2 Hz – 20 kHz) für die unterschiedlichen Messparameter Spitzenwert, RMS-Werte mit 1 s- und 3 s- Zeitkonstante sowie für den RMQ-Wert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass bereits sehr geringe Intensitäten (ca. 5 m/s<sup>2</sup> Spitze-Spitze) ausreichend sind, damit bei den längeren Impulsdauern eine Bewegung des Griffes auf dem Shaker als „Stoß“ empfunden wird. Wenn die Bewegungen (die Impulse) kürzer werden, sind höhere Intensitäten für eine Stoßempfindung erforderlich. Aber selbst bei sehr kurzen Impulsdauern reichen Spitzenwerte von ca. 100 m/s<sup>2</sup> aus, damit die Versuchspersonen den Impuls (die Bewegung) als „Stoß“ empfinden.

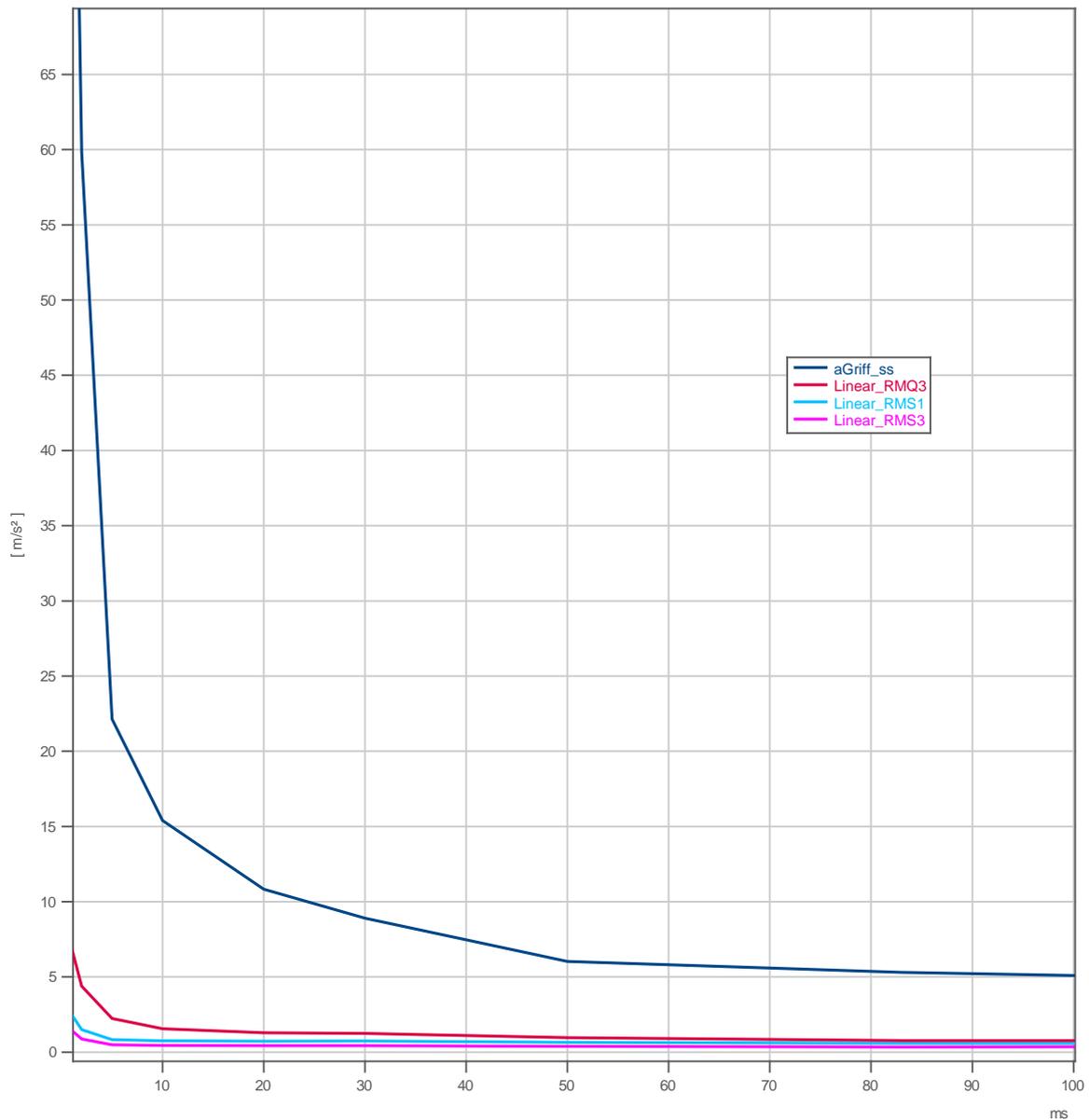


Bild 46: Mittlere Stoßempfindung in Abhängigkeit von der Impulsdauer

Der Kurvenverlauf der Stoßempfindung zeigt einen näherungsweise exponentiellen Abfall bei höheren Impulsdauern. Die Ausprägung der Zahlenwerte für die Stoß-Intensität ist naturgemäß bei den Spitzenwerten am größten. Die nächst höheren Zahlenwerte werden bei Verwendung der RMQ-Werte infolge der Verwendung der 4. Potenz bei der Mittelung erreicht. Infolge der zeitlichen Mittelung eines zeitlich begrenzten, sehr kurzen Ereignisses über einen kürzeren Zeitraum sind die Zahlenwerte bei den RMS-Werten mit 1 s Mittelungsdauer die nächst höheren, während die RMS-Werte mit 3 s Mittelungsdauer die niedrigsten Werte aufweisen.

Dieser prinzipielle Kurvenverlauf ist für alle Messparameter (Spitzenwerte und Zeitmittelungswerte) in etwa gleich. Auch die unterschiedlichen Frequenzbewertungsfunktionen bewirken größtenteils keinen veränderten Kurvenverlauf. Eine Ausnahme bildet jedoch die Frequenzbewertung nach ISO 5349-1. Bild 47 zeigt dies am Beispiel der RMQ-Werte sowie Bild 48 im direkten Vergleich mit den Zeitmittelwerten mit linearem Frequenzverlauf. Im Gegensatz zu den anderen Frequenzbewertungsfunktionen werden die Messwerte bei kurzen Impulsdauern bis zu etwa 30 ms durch die Frequenzbewertung nach ISO 5349-1 deutlich stärker abgeschwächt.

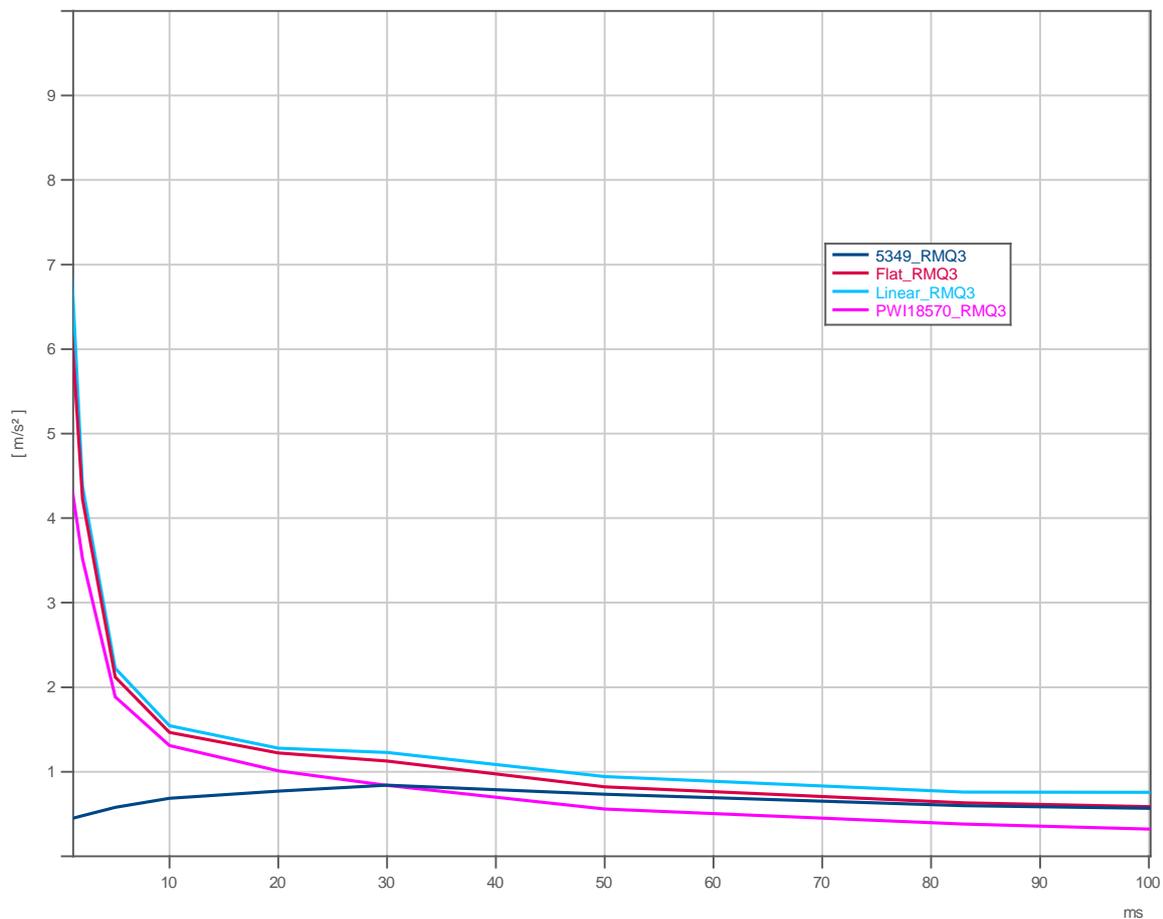


Bild 47: Mittlere Stoßempfindung als RMQ-Werte mit unterschiedlicher Frequenzbewertung

Da die anderen Frequenzbewertungsfunktionen dem Prinzip nach alles Bandpassfilter mit unterschiedlichen Eckfrequenzen darstellen, sind die dazu gehörigen Stoßempfindungskurven lediglich parallel verschoben. Die höchsten Zahlenwerte werden durch die Kurven mit den breitesten Bandpassfiltern (Linear bzw. Flat<sub>n</sub>) repräsentiert. Das speziell für die alternative Beurteilung von Hand-Arm-Schwingungen im Hinblick auf mögliche vibrationsbedingte Durchblutungsstörungen entwickelte Bandpassfilter nach ISO/PWI 18570 zeigt die geringsten Zahlenwerte.

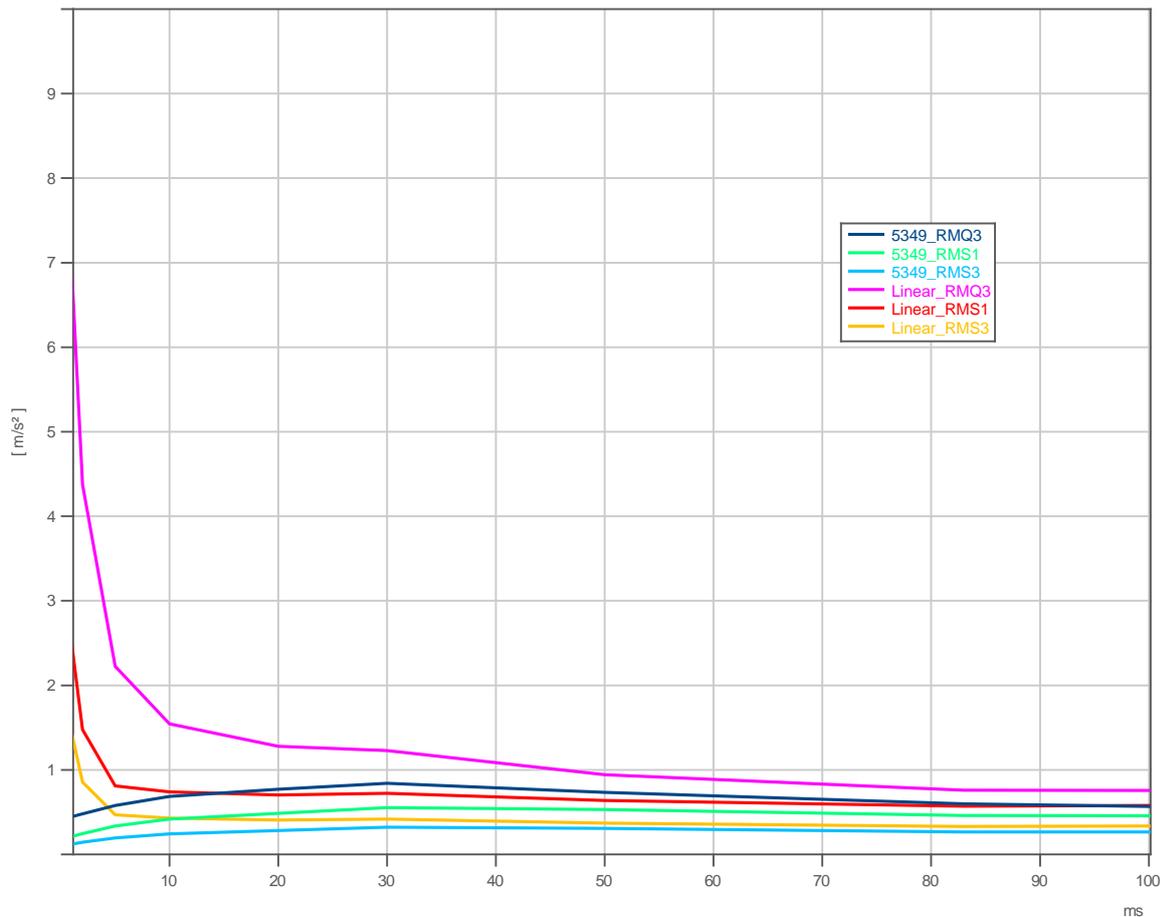


Bild 48: Mittlere Stoßempfindung als Zeitmittelwerte mit linearer Frequenzbewertung sowie Frequenzbewertung nach ISO 5349

Im Bild 49 sind die Messergebnisse am Beispiel für die RMS-Werte mit 1 s Mittelungszeit sowie für die Spitze-Spitze-Werte im doppelt logarithmischen Maßstab angezeigt. Es ist zu erkennen, dass sich die Messwertkurven zu mehr oder weniger geknickten Geraden verändern. Die Steigung der Geraden, hier wiederum mit Ausnahme für die Frequenzbewertungskurve nach ISO 5349, beträgt etwa 10 dB/Dekade und widerspiegelt somit näherungsweise dem Energieäquivalenzprinzip (dargestellt durch die dicke rote Linie in der Mitte der Grafik).

Alle Messwerte, d. h. alle Messparameter mit allen unterschiedlichen Frequenzbewertungsfunktionen (auch die Frequenzbewertungsfunktion nach ISO 5349) sind miteinander korreliert. Die Korrelationskoeffizienten für alle Kombinationen sind signifikant, d. h. alle Messparameter reagieren näherungsweise gleich. Insofern ergibt sich keine Präferenz für einen bestimmten Messparameter oder eine bestimmte Frequenzbewertungskurve.

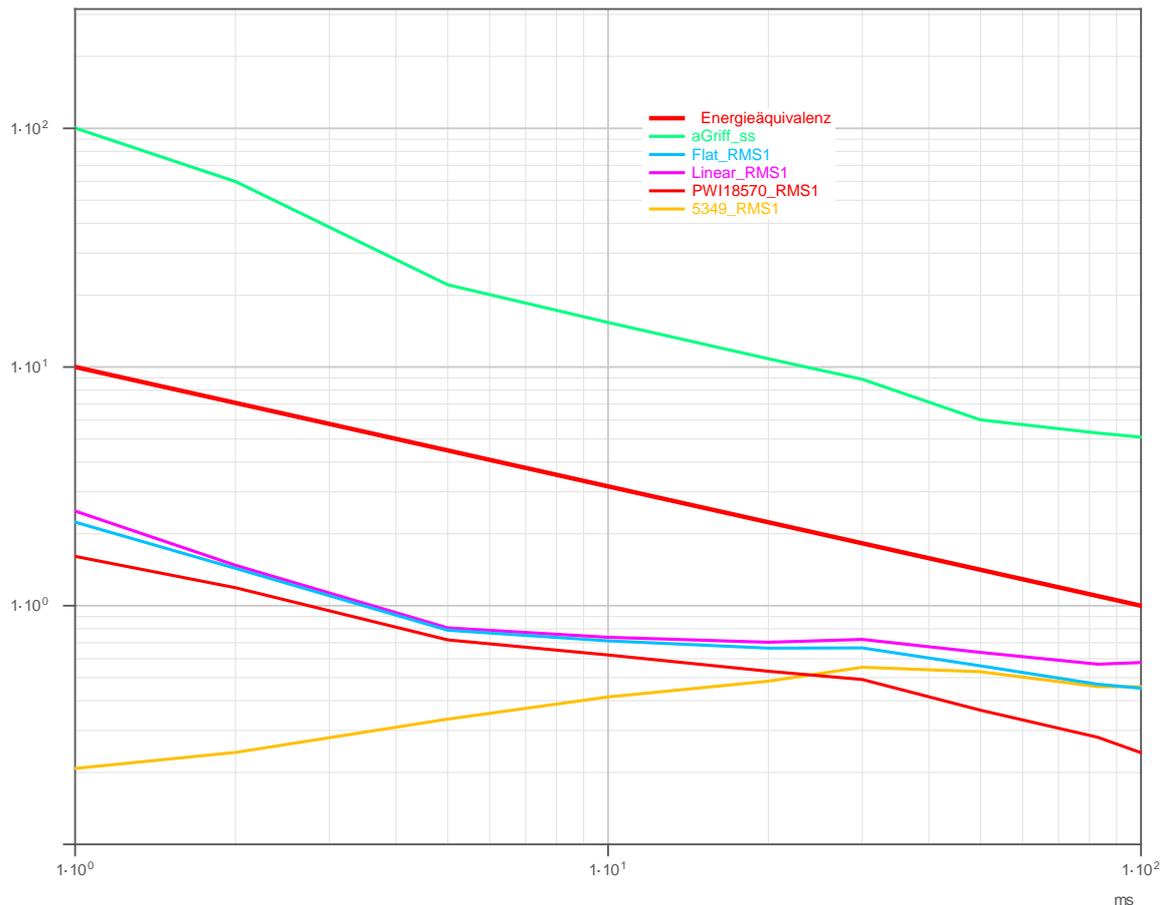


Bild 49: Mittlere Stoßempfindung im doppelt logarithmischen Maßstab

Die statistische Auswertung der Daten ergab, dass sich die als „Stoß“ bezeichneten Kombinationen von Impulsdauer und Intensität der einzelnen Versuchspersonen signifikant voneinander unterscheiden. Somit muss davon ausgegangen werden, dass der Entscheidungsprozess zur Klassifikation einer Bewegung bzw. eines Impulses als „Stoß“ ein personenspezifischer Vorgang ist. Der Einfluss der personenspezifischen Kovariablen (Körpermasse, Körpergröße, Lebensalter) war jedoch in jedem Fall nicht signifikant.

## 5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

### 5.1 Teil A

Im Projektteil A wurden grundlegende Fragestellungen der Messung von einzelnen (diskreten) Stößen an typischen Geräte, bei deren Bedienung Einzelstöße auftreten, untersucht. Hierbei kamen sowohl Geräte, bei denen eine Eigenbewegung des Anwenders vor dem betrachteten Einzelstoß erforderlich ist (Schlosserhammer und

Druckluftnagler), als auch Geräte bei denen keine Eigenbewegung erforderlich ist (Pistole, Tierbetäubungsgerät und Bolzensetzer), zum Einsatz. Für Geräte, bei deren Bedienung eine Eigenbewegung notwendig ist, die jedoch keine Vibrationsbelastung darstellt, wurde exemplarisch anhand des Druckluftnaglers gezeigt, wie eine solche „Verfälschung“ der Messergebnisse vermieden werden kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass auf der Basis der existierenden Normen bei Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen mit der verfügbaren modernen Messtechnik ausreichend repräsentative Kenngrößen zur Beschreibung von unterschiedlichen Arten von Stößen mit der erforderlichen Genauigkeit ermittelt werden können. Welche dieser Messgrößen zur Beurteilung des Gefährdungspotenzials bzw. der gesundheitlichen Relevanz von Stoßexpositionen verwendet werden sollten, bleibt weiteren Untersuchungen zu medizinisch-biologischen Ursache-Wirkungs-Beziehungen vorbehalten.

Die aktuell verfügbare digitale Messtechnik ermöglicht nicht nur die Ermittlung einer Vielzahl von Kennwerten, sondern auch eine Analysemöglichkeit im Zeitbereich sowie eine Kombination verschiedener zusätzlicher Messpunkte.

Den größten Unsicherheitsbeitrag liefert jedoch weiterhin der Messsensor und seine ANKopplung. Trotz Überprüfungsmöglichkeit des Phasengangs und dessen Vereinheitlichung ist es bei hohen Stoßeinwirkungen erforderlich, die Messungen auf eine Messrichtung zu beschränken. Wenn die Messrichtung parallel zur Wirkrichtung gehalten werden kann, wird damit die relevante Schwingungseinwirkung erfasst.

## **5.2 Teil B**

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur subjektiven Stoßempfindung lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Es gibt offensichtlich drei Bereiche der subjektiven Wahrnehmung von mehr oder weniger schnell aufeinander folgenden, auf das Hand-Arm-System einwirkenden Impulsen:

- Einzelne, diskrete Impulse
- Impulsfolgen
- Stochastische bzw. diffuse Schwingungswahrnehmung

Diese drei Bereiche sind durch zwei Grenzen, Grenze A und Grenze B, voneinander unterscheidbar. Die Entscheidung für die konkreten Werte dieser Grenzen streut in

Abhängigkeit von der konkret exponierten Person über einen gewissen Bereich (Standardabweichung ca.  $3\text{-}4\text{ s}^{-1}$ ). Die Werte für die beiden Grenzen sind jedoch statistisch signifikant voneinander unterschiedlich. Grenze B liegt in etwa beim doppelten Wert für Grenze A.

Die Ursachen für die Streuungen der Werte sind nicht völlig klar. Neben den kognitiven Eigenschaften der jeweiligen Person sind sicherlich auch situative Randbedingungen, die sich auf die Konzentrationsfähigkeit auswirken, wirksam. Nachgewiesen wurde darüber hinaus, dass die Grenzen unterschiedlich eingestellt wurden je nachdem, ob die Person beruflich eher manuell tätig war oder ob sie eher einen Büroarbeitsplatz hat. Möglicherweise haben auch Lebensalter und konstitutionelle Eigenschaften der Person Auswirkungen auf die Abgrenzung der drei Bereiche.

Die Werte für die Grenze A liegen sehr deutlich über  $5\text{ s}^{-1}$  (bzw.  $5,6\text{ s}^{-1}$ ). Der niedrigste Messwert betrug  $9,8\text{ s}^{-1}$ , der Mittelwert  $14,6\text{ s}^{-1}$  und der höchste Messwert  $23,3\text{ s}^{-1}$ .

Ob eine Person eine bestimmte mechanische Auslenkung, eine Bewegung, als Stoß empfindet oder nicht, ist abhängig vom Zusammenwirken von Impulsdauer und Intensität. Bei eher längerer Einwirkungsdauer der Bewegung (des Impulses) im Bereich 50 bis 100 ms sind bereits sehr geringe Beschleunigungen (ca.  $5\text{ m/s}^2$  Spitzenwert) ausreichend, um eine Stoßempfindung zu verursachen. Bei kürzerer Einwirkungsdauer, d.h. bei den in der Praxis häufiger auftretenden Bewegungsdauern von 10 bis 30 ms liegt die für eine Stoßempfindung erforderliche Intensität im Bereich 10 bis  $15\text{ m/s}^2$  (Spitzenwert). Selbst bei einer sehr kurzen Einwirkungszeit von 2 ms (in der Praxis z. B. bei Bolzensetzgeräten) ist ein Spitzenwert der Beschleunigung von ca. 80 bis  $100\text{ m/s}^2$  für eine Stoßempfindung ausreichend. Auch dies ist im Vergleich zu den in der Realität bei Bolzensetzgeräten auftretenden Spitzenwerten in der Größenordnung von  $10.000\text{ m/s}^2$  (siehe Abschnitt 3) als sehr gering anzusehen.

Der Zusammenhang zwischen Einwirkungsdauer (Impulsdauer) und Beschleunigung ergibt im Diagramm mit linearer Achsenskalierung eine etwa exponentiell abklingende Kurve. Diese Kurvenform ist für fast alle untersuchten Messparameter sehr ähnlich. Eine Ausnahme stellt der Kurvenverlauf mit der  $w_h$ -Frequenzbewertung nach ISO 5349 dar. Hier bestehen Differenzen zu den Kurvenverläufen der anderen Messparameter im Bereich kürzerer Einwirkungsdauer. Die Ergebnisse für alle Messparameter (auch für die Messwerte mit  $w_h$ -Bewertung) sind statistisch signifikant miteinander korreliert.

Wird der Zusammenhang der für eine Stoßwahrnehmung erforderlichen Beschleunigungen und Einwirkungszeiten im doppelt logarithmischen Maßstab dargestellt, so ergeben sich angenäherte Geraden. Ausnahme ist hier wiederum der Zusammenhang

auf der Basis der  $w_h$ -Frequenzbewertung nach ISO 5349. Der Abfall der Geraden mit zunehmender Einwirkungsdauer beträgt etwa 10 dB pro Dekade und entspricht somit dem Energieäquivalenzprinzip.

## 6 Bewertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungsergebnisse zu den grundlegenden messtechnischen Problemen zeigten, dass mit der vorhandenen Messtechnik sowie auf der Basis bestehender Normen bereits eine Vielzahl unterschiedlicher Messgrößen bzw. Messparameter mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden können. Für die beispielhaft untersuchten Maschinen können die entsprechenden Kennwerte weiter verwendet werden. Für eine Reihe weiterer Maschinen liegen bereits veröffentlichte Messwerte vor [10], [11]. Für die zukünftige Forschungsarbeit auf dem Gebiet Einzelstoßexposition ist diese Messdatenbasis zu erweitern.

Die Untersuchungsergebnisse zur Abgrenzung von Stoßexpositionen zu anderen Arten der Hand-Arm-Schwingungen zeigen, dass hinsichtlich der Wiederholrate von Stößen drei Bereiche der Wahrnehmung zu unterscheiden sind. Diesen drei Bereichen können entsprechend nachfolgender Tabelle 15 praktische Arbeitsplätze mit Stoß- bzw. Schwingungsexposition zugeordnet werden.

	Bereich	Beispiele
I	wiederholte (diskrete) Stöße	Bolzensetzgeräte, Nagler, Druckluft- und Elektrohämmer
II	kontinuierliche Stoßfolgen	Schlagschrauber, Druckluft- und Elektrohämmer, Schlagbohrmaschinen
III	stochastische Schwingungen	Schleifmaschinen, Kettensägen

*Tabelle 15: Abgrenzung der drei Wahrnehmungsbereiche mit Beispielen praktischer Arbeitstätigkeiten*

Die in der letzten Spalte aufgeführten Maschinen sind nur als Beispiele für die jeweilige Exposition zu verstehen. Druckluft- und Elektrohämmer können je nach konkreter Kon-

struktion für einen bestimmten Einsatzzweck sowohl dem Bereich diskreter Stöße (Einzelstöße) als auch dem Bereich der Stoßfolgen zugeordnet werden. Hierbei besteht die Tendenz, dass kleinere Hämmer eher schnell schlagend arbeiten (Bereich II, z. B. Meißelhämmer), größere bzw. schwerere Hämmer eher langsam schlagen (Bereich I, z. B. Abbauhämmer).

Die hier beschriebenen Untersuchungsergebnisse auf der Basis der subjektiven Wahrnehmung weisen die Grenze zwischen dem Bereich der Einzelstöße (diskrete Stöße) und dem Bereich der Stoßfolgen bei etwa 15 Stößen pro Sekunde aus. Insofern kann die von einigen Experten vorgeschlagene Abgrenzung zwischen Einzelstößen und Stoßfolgen bei einer Wiederholrate von  $5 \text{ s}^{-1}$  nicht bestätigt werden.

Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass der Grenzwert von  $15 \text{ s}^{-1}$  anhand von Untersuchungen der subjektiven Wahrnehmung bestimmt wurde. Es fanden keine Untersuchungen zur biologischen bzw. gesundheitlichen Auswirkung von Stoßexpositionen mit unterschiedlicher Wiederholrate statt. Demgegenüber ist jedoch festzustellen, dass die als Grenzwert vorgeschlagene Wiederholrate von  $5 \text{ s}^{-1}$  auf keinerlei bekannten wissenschaftlichen Untersuchungsergebnissen basiert.

Wenn man nun davon ausgeht, dass Stoßfolgen mit einer Wiederholrate von weniger als 15 pro Sekunde als Einzel-Stöße zu betrachten sind, so muss auch die Arbeit mit einigen schweren Abbauhämmern, Aufbruchhämmern, Aufreißhämmern sowie mit Stampfern als Exposition gegenüber Einzel-Stößen angesehen werden. Diese Expositionen sind bislang ohne grundlegende Kritik auf der Basis der methodischen Regelungen für „normale“ Hand-Arm-Schwingungen (z. B. ISO 5349-2) erfasst, bewertet und beurteilt worden. Wird diese Vorgehensweise akzeptiert, so ist auf der Basis der hier vorgestellten Untersuchungsergebnisse die gleiche Vorgehensweise auch für Expositionen gegenüber Naglern, Bolzensetzgeräten u. ä. zu akzeptieren. Unterstützt wird diese Argumentation dadurch, dass auch die subjektive Beurteilung von Stößen offensichtlich dem Energieäquivalenzprinzip folgt.

Wenn umgekehrt die Meinung als richtig erachtet wird, dass die bisherigen Beurteilungsmethoden für Einzelstöße nicht bzw. nicht ausreichend geeignet sind, so muss auch geschlussfolgert werden, dass bestimmte Typen von Druckluft- bzw. Elektrohämmer und Stampfern bislang ebenfalls nicht adäquat beurteilt werden.

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass je nach Einwirkungsdauer (Stoßdauer) bereits sehr geringe Intensitäten ausreichen, um eine simple Bewegung als Stoß zu empfinden. Insofern erscheint es nicht angebracht, eine untere Intensitätsgrenze fest-

zulegen, ab der von einem Stoß gesprochen werden kann. Hierbei ist es relativ unwesentlich, mit welcher Messgröße die Intensität beschrieben wird. Da die hier untersuchten Messparameter alle miteinander korreliert sind, besteht ohne weitere Informationen kein Anlass, einem bestimmten Parameter den Vorzug zu geben. Eine Ausnahme stellt die Frequenzbewertung  $w_h$  nach ISO 5349 dar. Diese Aussage gilt ohne weitere Untersuchungen vorerst jedoch nur für Kennwerte auf der Basis der Beschleunigung als physikalische Messgröße. Andere physikalische Größen sind in vorliegender Untersuchung nicht gemessen worden, so dass hierzu keine Aussage getroffen werden kann.

Auf der Basis der hier vorgestellten Ergebnisse zu den messtechnischen Grundlagen sowie zur subjektiven Abgrenzung verschiedener Stoßexpositionen gegenüber anderen Arten von Hand-Arm-Schwingungen können nun von medizinischer Seite gezielte Untersuchungen zu Ursache-Wirkungs-Beziehungen bei verschiedenen Stoßexpositionen vorgenommen werden.

## **7 Umsetzung der Ergebnisse**

Expositionen gegenüber Hand-Arm-Schwingungen am Arbeitsplatz sind nach wie vor mit erheblichen Gefahren für Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit verbunden. Hierbei stellen Stoß-Expositionen einen Sonderfall dar, der im Gegensatz zu den weit verbreiteten "üblichen" Vibrations-Expositionen in den vergangenen Jahrzehnten nur wenig und unsystematisch erforscht wurde.

Mit den hier vorgelegten Ergebnissen sind die Grundlagen für eine systematische messtechnische Erfassung von praktischen Stoßexpositionen gegeben. Hierbei ist es anhand der in diesem Bericht beschriebenen Kriterien möglich, die Exposition gegenüber diskreten Stößen von den Expositionen mit kontinuierlichen Stoßfolgen abzugrenzen. Somit können auch zukünftige medizinisch-biologische Untersuchungen zu Stoßexpositionen die Expositionswirkungen besser den unterschiedlichen Expositionsbedingungen zuordnen und auf dieser Grundlage langfristig Dosis-Wirkungs-Modelle in Abhängigkeit von der Wiederholrate der Stoßexposition erarbeiten. Auf dieser Basis können dann wirksame Präventionsmaßnahmen zur Reduzierung der Gesundheitsgefährdung an Arbeitsplätzen mit Stoßbelastung erarbeitet werden.

Mittelfristig ist zu erwarten, dass sich so eine Verbesserung des Erkenntnisstandes über eventuelle Gesundheitsgefährdungen bei Arbeitsplätzen mit Stoßexposition und eine größere Rechtssicherheit bei der Beurteilung von Stoßbelastungen ergibt.

Die hier beschriebenen Untersuchungsergebnisse werden kurzfristig auf entsprechenden wissenschaftlichen Veranstaltungen sowie in der Fachliteratur vorgestellt. Eine erste Vorstellung erfolgte bereits auf der International Conference on Hand-Arm Vibration im Oktober 2015 in Beijing, China,

Die Untersuchungsergebnisse werden kontinuierlich in die Arbeit in nationalen und internationalen Normungsgremien einfließen.

## 8 Literaturnachweis

- [1] LOUDA, L.; ROUSKOVA, H.; SVOBODA, L.; MUFF, V.  
Disease and Disorders Resulting from Hand-Arm Shocks. In: DUPUIS, H.; CHRIST, E.; SANDOVER, J.; TAYLOR, W.; OKADA, A. (Hrsg.)  
Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Hand-Arm Vibration, Bonn, May 19.-22., 1992, S. 271-277
  
- [2] SCHENK, Th.; HEINE, G.  
Effects of shocks on the peripheral nervous system. In: DUPUIS, H.; CHRIST, E.; SANDOVER, J.; TAYLOR, W.; OKADA, A. (Hrsg.)  
Proceedings 6<sup>th</sup> International Conference on Hand-Arm Vibration, Bonn, May 19.-22., 1992, S. 319-325
  
- [3] BOVENZI, M.  
Health effects of mechanical vibration. G Ital Med Lav Erg 2005
  
- [4] DIN EN ISO 5349-1  
Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen. 2001
  
- [5] BRUBAKER, R.L.; MACKENZIE, C.J.G.; HUTTON, S.G.  
Vibration-induced white finger among selected underground rock drillers in British Columbia.  
Scand. J. Work Environ. Health 12(1986), S. 296-300
  
- [6] ENGSTRÖM, K.; DANDANELL, R.  
Exposure conditions and Raynaud's phenomenon among riveters in the aircraft industry.  
Scand. J. Work Environ. Health. 12(1986), S. 293-295
  
- [7] ISO/TC 118/SC 3 "Druckluftwerkzeuge und Maschinen", Resolution 83 (WG 3 Milano 9), 2011.
  
- [8] ISO/TC 108/SC 4 "Human exposure to mechanical vibration and shock", Resolution 2/2011, 2011.
  
- [9] SCHENK Th.; KUMMER W.; KÖCKRITZ S.  
Besonderheiten bei arbeitshygienischen Schwingungsmessungen an schlagenden handgeführten Maschinen.  
Z. ges. Hyg. (1991), 37, S. 22-26

- [10] SCHENK, Th.  
Measurement of single shocks, effecting the hand-arm system. In:  
DUPUIS, H.; CHRIST, E.; SANDOVER, J.; TAYLOR, W.; OKADA, A.  
(Hrsg.) Proceedings 6th International Conference on Hand-Arm  
Vibration, Bonn, May 19.-22., 1992, S. 607-612
- [11] Kaulbars, U.  
Determination of vibration emission values for fastener driving tools  
(nailers). Central European Journal of public Health 3 (1995), S. 126-  
128,
- [12] DIN ISO/TS 15694 „Mechanische Schwingungen und Stöße – Messung  
und Bewertung diskreter Stöße, die von handgehaltenen und  
handgeführten Maschinen auf das Hand-Arm-System übertragen  
werden“, Juli 2004
- [13] GRIDIN, N.M.; GORODNOVA, N.W.  
Klinisch-hygienische Bewertung von Impulsvibration und Lärm beim  
freien Schmieden und manuellem Richten von Metall. Thesen der  
wissenschaftlich-praktischen Konferenz zu Fragen der Prophylaxe der  
Vibrationskrankheit. Leningrad 23.-25.12.1970 (in. russ.)
- [14] ZURAVJOV, A.B.; KOMLEVA, L.M.; NIORADSE, D.P.  
Klinisch-physiologische Effekte der Einwirkung lokaler Impulsvibration.  
Gig. trud. i prof. zabol. (1987), 9, S.17-20 (in russ.)
- [15] STARCK, J.  
High impulse acceleration levels in hand-held vibratory tools. Scand. J.  
Work Environ. Health 10(1984), S. 171-178
- [16] STARCK, J.  
Characteristics of vibration, hand grip force and hearing loss in vibration  
syndrome. Diss. der Universität Kuopio, Finland 1984
- [17] STARCK J. PYYKKÖ I.  
Impulsiveness of vibration as an additional factor in the hazards  
associated with hand-arm vibration.  
Scand. J. Work Environ. Health 12(1986) S. 323-326
- [18] LÖSCH R.  
Expositionsfolgen der Teilkörpervibration unter Berücksichtigung der

Berufstätigkeiten in der Natursteinbearbeitung.  
Diss. A, Humboldt-Universität Berlin 1982

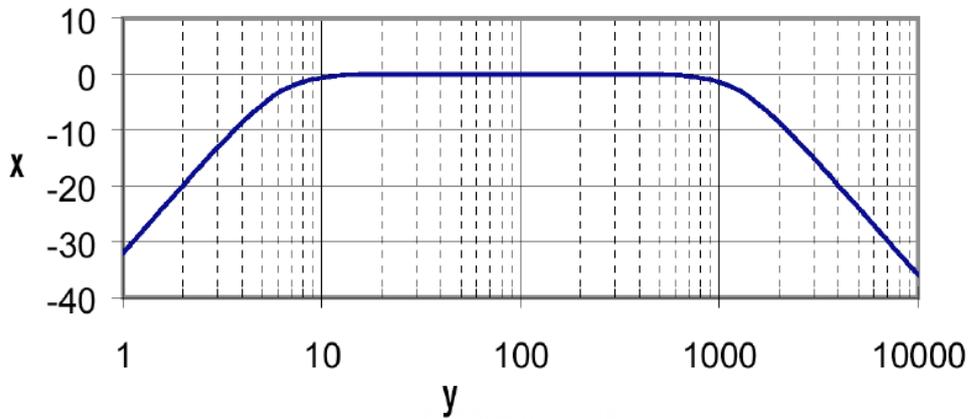
- [19] ZURAVLJOV, A.B.; SINEV V.G.  
Zur Frage des Einflusses lokaler Impulsvibration auf den Organismus bei unterschiedlicher zeitlicher Verteilung der Impulse.  
Gig. trud. i prof. zabol. (1985),7 S. 28-31 (in russ.)
- [20] ZURAVLJOV A.B.; SINEV, V.G.  
Hygienische Bewertung lokaler Impulsvibration unter Produktions- und Versuchsbedingungen. Gig. trud. i prof. zabol. (1987),1, S. 30-34 (in russ.)
- [21] LINDELL, H.; LÖNNROTH, I.; OTTERTUN, H.  
Transient vibrations from impact wrenches: Vibration negative effect on blood cells and standards for measurement. Proceedings 8th International Conference on Hand-Arm Vibration, Umea 1998, S. 113-117
- [22] SCHENK, Th.; KRUSE, P.; WENDT, G.  
Effects of combined exposure to shock-type hand-arm vibration and impulse noise. 8th International Conference on Hand-Arm Vibration. 9-12 June 1998, Umea, Sweden Proceedings p. 463-469
- [23] SCHÄFER, N.; DUPUIS, H.; HARTUNG, E.  
Acute effects of shock-type vibration transmitted to the hand-arm-system.  
Int. Arch. Occup. Environ. Health 55(1984), S. 49-59
- [24] DUPUIS, H.; SCHÄFER N.  
Effects of impulse vibration on the hand-arm-system.  
Scand. J. Work Environ. Health 12(1986), S. 320-322
- [25] RIEDEL, S.; MÜNCH, H.  
Measurement and assessment of hand-arm vibration caused by fastener driving tools. 8th International Conference on Hand-Arm Vibration. 9-12 June 1998, Umea, Sweden Proceedings p. 455-461
- [26] YING, Y.; MAURO, M.; BOVENZI, M.; GRIFFIN, M. J.  
Acute effects of mechanical shocks on finger blood flow: influence of shock repetition rate and shock magnitude. Int. Arch. Occup. Environ. Health 85(2012), S. 605-614

- [27] BOVENZI, M.; PETRONIO, L.; DiMARINO, F.  
Epidemiological survey of shipyard workers exposed to hand-arm vibration.  
Int. Arch. Occup. Environ. Health. 46(1980), S.251-266
- [28] KORADECKA, D.  
Periphere Kreislaufreaktionen durch Arbeiten mit vibrierenden Werkzeugen.  
Schriftenreihe Arbeitsschutz Nr. 32. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Dortmund 1982
- [29] MICKSCH, W.  
Eine Methode zur mathematisch-statistischen Analyse der Ursache-Wirkung-Beziehung bei Berufskrankheiten mit physikalischer Ursache – dargestellt am Beispiel der Berufskrankheit durch Teilkörpervibration im Bauwesen der DDR.  
Dissertation A, TU Dresden, Sektion Arbeitswissenschaften, 1985
- [30] ISO 2041  
Vibration and shock – Vocabulary.  
1990
- [31] ISO 9688  
Mechanical vibration and shock – Analytical methods of assessing shock resistance of mechanical systems – Information exchange between suppliers und users of analyses.  
1990
- [32] ...  
Handbuch der Schock- und Vibrationsmeßtechnik.  
ENDEVCO Eigenverlag, Heidelberg 1992
- [33] SCHENK, Th.  
Zum Stand der arbeitshygienischen Bewertung der Einwirkung von mechanischen Stößen auf das Hand-Arm-System des Menschen.  
Arbeitshygienische Information Bauwesen, Berlin (Ost) 24 (1988), 6, S.159-163
- [34] ZURAVLJOV, A.B.  
Die Besonderheiten der Einwirkung von lokaler Impulsvibration auf den Organismus. Gig. truda i prof. zabol. (1988), 4 S. 32-35 (in russ.)

- [35] DIN EN ISO 5349-2  
Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen das Hand-Arm-System des Menschen. 2001
  
- [36] DIN EN ISO 8041  
Schwingungseinwirkung auf den Menschen - Messeinrichtung. 2006
  
- [37] ISO/PWI 18570 Mechanical Vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Supplementary method for assessing risk of vascular injury. In Vorbereitung
  
- [38] DIN EN ISO 8041/A1:2015-05  
Schwingungseinwirkung auf den Menschen - Messeinrichtung - Änderung 1 (ISO 8041:2005/DAM 1:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 1:2005/prA1:2015
  
- [39] Riedel, S.; Gillmeister F.; Louagie J.  
Untersuchung eines schwingungsgeminderten Handhammers. ASU Protect: Das Magazin für Arbeitsschutzmanagement. Deutschland: Gentner Verlag 2009-01
  
- [40] Schäfer, N.  
Akute Wirkungen stoßhaltiger Schwingungen auf das Hand-Arm-System.  
Forschungsbericht HA 85-020 Humanisierung des Arbeitslebens. Fachinformationszentrum Karlsruhe. 1985
  
- [41] Kaulbars, U.; Raffler, N.  
Study of Vibration Transmission on a Paver's Hand Hammer 12. Internationale Konferenz Hand-Arm Vibration, 13.-17. Juni 2011, Ottawa - Vortrag. In: Canadian Acoustics 39 (2011) Nr. 2, S. 52-53
  
- [42] SCHENK, Th.  
Untersuchungen zu Möglichkeiten der Simulation von Stoßereignissen auf das menschliche Hand-Arm-System mit Hilfe von elektrodynamischen Schwingerregern (Shakern). Unveröffentlichter Untersuchungsbericht im Auftrage der HILTI AG, Liechtenstein, April 1999
  
- [43] DIN 45661-A1  
Schwingungsmesseinrichtungen – Begriffe; Änderung A1 Entwurf 2015-04

- [44] Mechanical Vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration – Supplementary method for assessing risk of vascular injury. Preliminary work item ISO/PWI 18570, ISO/TC 108/SC 4/ WG 3 N 266; 2014-06-20

## Anhang A. Frequenzbewertungen



**Key**  
x amplitude, dB  
y frequency, Hz

Bild A 1: Flat<sub>h</sub>-Bewertungsfilter nach CEN ISO/TS 15694

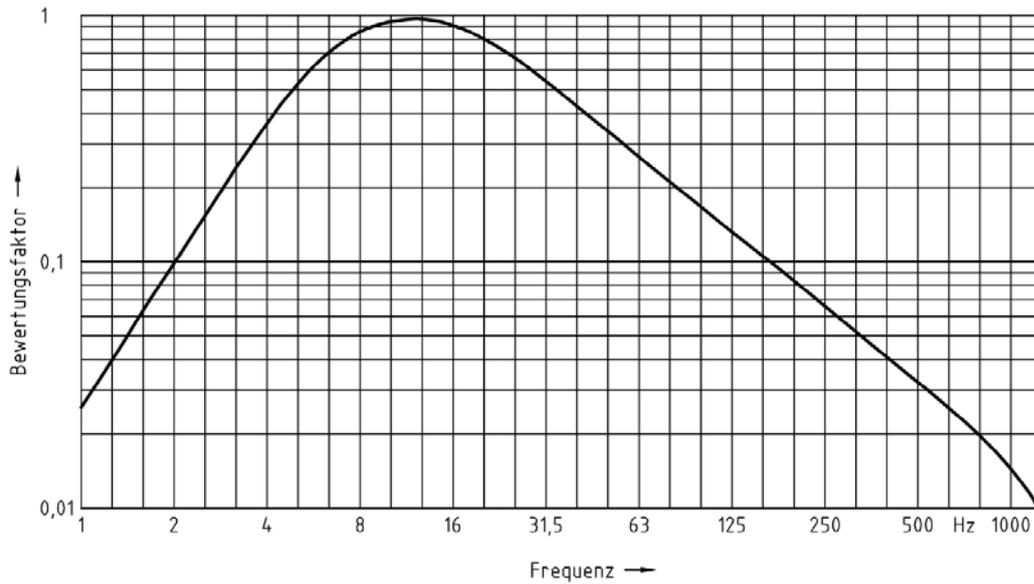


Bild A 2: Verlauf des Bewertungsfaktors  $W_h$  für Hand-Arm-Vibrationen über die Frequenz  $f$  gemäß DIN EN ISO 5349-1

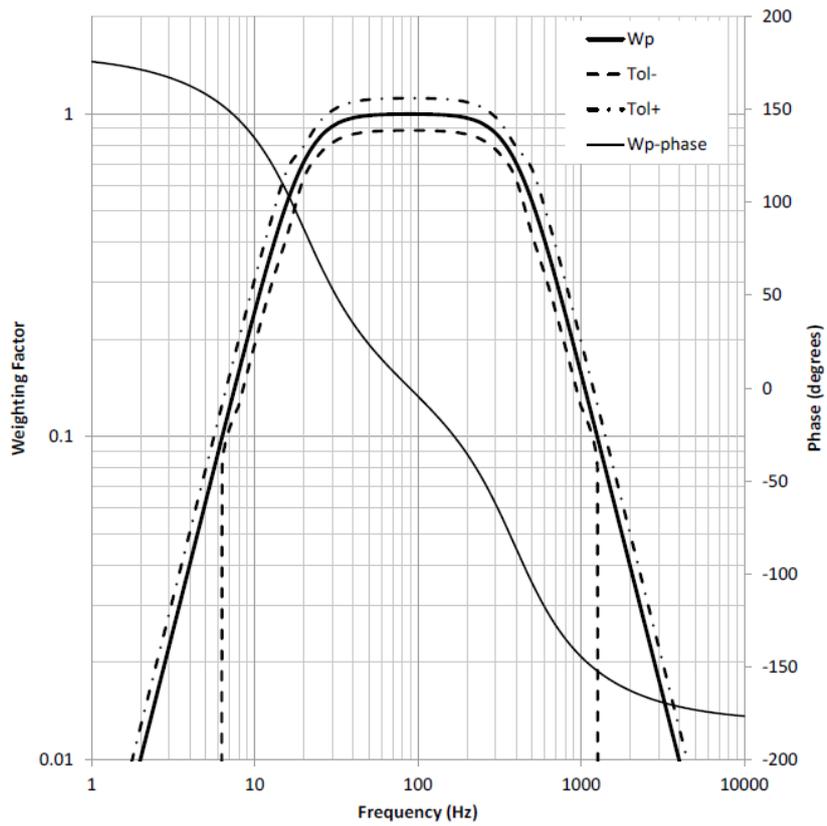


Bild A 3: Verlauf des Bewertungsfaktors  $W_p$  für Hand-Arm-Vibrationen über die Frequenz  $f$  gemäß ISO/PWI 18570

## Anhang B. Beschreibung des Messsystems

Für dieses Projekt kam das Messsystem „MEDA RedSens“ der Firma Wölfel zum Einsatz. Das Datenblatt ist in Bild B 1 dargestellt. Ergänzend zu diesem Messsystem wurde die Software „MatLab“ für die Berechnung des Rucks und des überenergetischen Mittelwertes eingesetzt.



**Synchrone drahtlose Messung mit externen Sensoren**

**RedSens extern**

Kanalzahl je Knoten, Eingang für externe Sensoren	3
Signaleingang kanalweise wählbar	Spannung oder IEPE
Signalkopplung kanalweise wählbar	AC oder DC
Frequenzbereich	DC - 4 kHz
Offset	1 mV
Rauschen breitbandig	20 $\mu\text{V}@ \pm 1$   40 $\mu\text{V}@ \pm 10$ V
Auflösung	24 bit
Dynamik	110 dB
Abtastung über alle Kanäle	simultan
Synchronitätsabweichung max.	1 $\mu\text{s}$
Datenübertragungsrate	1 Mbit/s
Sensorknoten je System	1 - 10
Reichweite Freifeld 802.11g	140 m
Energieversorgung	Interner Akku oder Netzteil
Messzeit mit Akku	8 h
Akku - Ladedauer	3 h
Abmessungen ohne Antenne	(114 x 64 x 30) mm <sup>3</sup>
Gewicht	220 g
Temperaturbereich	0°C - 60° C
Schutzart	IP64

Bild B1: Datenblatt von dem Messsystem „MEDA RedSens“

MEDA RedSens besteht im Wesentlichen aus der Software MEDA, einem geeigneten PC mit angeschlossener Antenne (hier Toughbook CF-31) und zwei RedSens-Knoten. Das Messsystem stellt eine Funkverbindung zwischen den RedSens-Knoten und dem Toughbook her. Hierbei werden die gemessenen Signale in Echtzeit per WLAN übermittelt.

Die einzelnen Komponenten des Systems werden im Folgenden näher beschrieben.

### **MEDA (Version 2014-3)**

Die Software MEDA ist ein mehrkanaliges, rechnergestütztes System zur Messung, Bewertung und Dokumentation von Erschütterungen und Lärm. Hiermit ist es möglich bis zu 6 Kanäle zeitgleich zu messen.

Für die Auswertungen von importierten oder mit MEDA gemessenen Beschleunigungszeitverläufen bietet die Software eine Vielzahl von Optionen an. Hierbei sind die verschiedenen Frequenzbewertungsfilter  $Flat_h$ ,  $W_h$  und  $W_p$  bereits in MEDA hinterlegt und können in der Nachbearbeitung auf alle durchgeführten Messungen angewendet werden. Des Weiteren bietet MEDA die Möglichkeit Intervallberechnungen für ein vorher definiertes Zeitintervall durchzuführen. Mit dieser Funktion lassen sich die für dieses Projekt erforderlichen Kennwerte (z. B. Intervalleffektivwert) erzeugen.

### **Toughbook CF-31**

Die Messungen wurden mit einem Toughbook CF-31 der Firma Panasonic durchgeführt. Bild B 2 zeigt das verwendete Toughbook mit angeschlossener Antenne.



Antenne

Bild B 2: Toughbook CF-31 mit angeschlossener Antenne

### **RedSens-Knoten**

Die RedSens-Knoten bilden die Schnittstelle zwischen den angeschlossenen Sensoren und dem PC. Jeder RedSens-Knoten hat dabei 3 Signaleingänge, einen integrierten AD-Wandler und eine Antenne (siehe Bild B 3). Hierbei ist es möglich für einzelne Kanäle eine IEPE-Sensorspeisung zu- oder abzuschalten. Somit kann sowohl mit Ladungsaufnehmern als auch mit ICP-Sensoren zeitgleich gemessen werden.

Der integrierte AD-Wandler digitalisiert die eingehenden Spannungssignale und überträgt sie per WLAN an den PC.



Abb. 36 RedSens-Knoten der Firma Wölfel

Bild B 3: RedSens-Knoten der Firma Wölfel

### **MatLab R2014a (ergänzende Anwendung)**

Ergänzend zu der Anwendung von MEDA wurde MatLab (Version R2014a) für die Auswertung der gemessenen Beschleunigungen eingesetzt. Hierfür wurden die Messungen im ASCII-Format in MatLab importiert.

## Anhang C. Messwerte

Schlosserhammer													
Flat <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte													
Mess-Nr.	MP	a <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hf</sub> , RMQ, (T=3s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	j <sub>hf</sub> , peak to peak	a <sub>hf</sub> MTVV	a <sub>hf</sub> , PV	CF <sub>h</sub>	SC <sub>h</sub>	t <sub>a</sub> [ms]	t <sub>i</sub> [ms]
<b>0328 14.2</b>	1	229,5	106,9	606,7	1231668	711141	33977526	450,8	6083,0	56,9	5,7	0,5	9
	2	398,7	182,1	1039,4	2100405	1212733	72438449	791,7	9291,7	51,0	5,7	0,5	8
	3	12,1	6,3	47,0	53034	30627	4939445	25,3	479,1	76,0	7,5	0,5	/
	4	9,1	4,4	20,8	19336	11164	1382503	17,1	188,8	42,6	4,7	0,6	/
<b>0328 14.3</b>	1	245,4	102,6	554,0	1244951	718811	50387800	437,8	4811,3	46,9	5,4	0,6	10
	2	455,4	190,3	1041,6	1987925	1147789	74428068	803,6	10100,8	53,1	5,5	0,4	10
	3	5,1	2,1	10,8	16128	9332	1042507	8,6	104,8	49,2	5,1	0,5	/
	4	6,5	2,7	11,2	11221	6479	726460	10,3	108,0	39,5	4,1	0,6	/
<b>0328 14.4</b>	1	218,1	99,9	567,0	1190380	687320	38088516	431,3	5479,6	54,8	5,7	0,6	9
	2	391,6	180,1	1004,3	2081119	1201629	69174059	774,0	9044,1	50,2	5,6	0,6	9
	3	11,3	5,9	43,8	37978	21936	3085586	23,4	444,3	75,8	7,5	0,5	/
	4	4,6	2,7	11,2	10454	6036	719215	9,8	106,6	39,8	4,2	0,6	/
<b>Mittelwert</b>	1	231,0	103,1	575,9	1222333	705757	40817947	440,0	5458,0	52,9	5,6	0,6	9,3
	2	415,2	184,2	1028,4	2056483	1187384	72013525	789,8	9478,9	51,4	5,6	0,5	9,0
	3	9,5	4,8	33,9	35713	20632	3022513	19,1	342,7	67,0	6,7	0,5	/
	4	6,7	3,3	14,4	13671	7893	942726	12,4	134,4	40,6	4,3	0,6	/
<b>Stabw.</b>	1	13,7	3,5	27,4	28458	16421	8538830	9,9	636,1	5,3	0,2	0,1	0,6
	2	35,0	5,4	20,9	60151	34736	2652654	14,9	552,7	1,5	0,1	0,1	1,0
	3	3,9	2,3	20,0	18557	10707	1949234	9,1	206,8	15,4	1,4	0,0	/
	4	2,3	1,0	5,5	4922	2842	380875	4,1	47,1	1,7	0,3	0,0	/

Tabelle C 1: Ergebnistabelle der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für den Schlosserhammer

Schlosserhammer						
W <sub>h</sub> -bewertete Kennwerte						
Mess-Nr.	MP	a <sub>hw</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hw</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hw</sub> MTVV	a <sub>hw</sub> , PV	CF <sub>w</sub>
0328 14.2	1	63,2	32,0	114,3	280,3	8,8
	2	50,0	26,2	93,2	277,3	10,6
	3	1,8	1,1	4,3	17,2	16,2
	4	3,2	1,7	5,4	15,0	9,0
0328 14.3	1	40,8	26,2	90,3	230,8	8,8
	2	90,7	56,0	201,1	482,7	8,6
	3	0,5	0,3	1,2	4,7	15,2
	4	2,1	1,3	4,5	15,1	11,6
0328 14.4	1	29,1	18,0	64,4	177,8	9,9
	2	61,7	38,1	136,8	346,9	9,1
	3	1,7	1,0	4,2	16,0	15,6
	4	2,1	1,3	4,5	14,1	10,6
Mittelwert	1	44,4	25,4	89,7	229,6	9,2
	2	67,5	40,1	143,7	369,0	9,4
	3	1,3	0,8	3,2	12,6	15,6
	4	2,5	1,4	4,8	14,7	10,4
Stabw.	1	17,4	7,0	25,0	51,3	0,6
	2	21,0	15,0	54,2	104,4	1,0
	3	0,7	0,4	1,8	6,9	0,5
	4	0,6	0,2	0,5	0,6	1,3

Tabelle C 2: Ergebnistabelle der w<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für den Schlosserhammer

Schlosserhammer			
W <sub>p</sub> -bewertete Kennwerte			
Mess-Nr.	MP	a <sub>hwp</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hwp</sub> RMS (T=3s)
0328 14.2	1	57,6	27,5
	2	89,7	41,3
	3	7,1	4,1
	4	7,4	3,5
0328 14.3	1	55,1	23,0
	2	130,1	54,4
	3	3,7	1,5
	4	4,6	1,9
0328 14.4	1	40,5	19,1
	2	98,3	45,9
	3	6,6	3,7
	4	3,3	1,8
Mittelwert	1	51,1	23,2
	2	106,0	47,2
	3	5,8	3,1
	4	5,1	2,4
Stabw.	1	9,3	4,2
	2	21,3	6,6
	3	1,9	1,4
	4	2,1	1,0

Tabelle C 3: Ergebnistabelle der w<sub>p</sub>-bewerteten Kennwerte für den Schlosserhammer

Pistole											
Flat <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte											
Mess-Nr.	MP	a <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hF</sub> , RMQ (T=3s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hf</sub> MTVV	a <sub>hf</sub> , PV	CF <sub>h</sub>	SC <sub>h</sub>	t <sub>a</sub> [ms]	t [ms]
<b>0254 5.2</b>	1	241,4	147,3	833,5	1345749	584	3929	26,7	5,7	1,3	17
	2	13,5	8,5	45,7	17492	34	87	10,3	5,4	4,5	17
	3	734,7	372,7	2445,1	5585229	1587	27562	74,0	6,6	1,4	3
	4	399,7	221,3	1331,2	2467820	930	13012	58,8	6,0	1,3	12
<b>0254 5.3</b>	1	309,4	139,4	618,3	874656	537	4045	29,0	4,4	2	17
	2	18,1	8,0	34,5	14193	32	66	8,3	4,3	4,1	19
	3	766,0	335,7	2023,4	3595898	1417	25575	76,2	6,0	1,5	5
	4	490,2	216,7	977,9	1519889	896	13508	62,3	4,5	1,6	14
<b>0254 5.4</b>	1	292,3	142,2	622,0	893663	556	4340	30,5	4,4	1,5	16
	2	20,4	9,7	33,5	12823	39	102	10,5	3,5	4,1	27
	3	726,5	334,3	1776,4	3113804	1406	19778	59,2	5,3	1,6	5
	4	431,4	201,0	1072,0	1552850	839	15521	77,2	5,3	1,6	4
<b>Mittelwert</b>	1	281,0	143,0	691,3	1038023	559	4104	28,7	4,8	1,6	16,7
	2	17,4	8,7	37,9	14836	35	85	9,7	4,4	4,2	21,0
	3	742,4	347,6	2081,7	4098310	1470,2	24305	69,8	6,0	1,5	4,3
	4	440,5	213,0	1127,0	1846853	888,2	14014	66,1	5,3	1,5	10,0
<b>Stabw.</b>	1	35,4	4,0	123,2	266668	23,6	212	1,9	0,7	0,4	0,6
	2	3,5	0,9	6,8	2400	3,6	18	1,2	1,0	0,2	5,3
	3	20,8	21,8	338,1	1310076	101,6	4045	9,3	0,6	0,1	1,2
	4	45,9	10,7	182,9	538025	46,2	1329	9,8	0,8	0,2	5,3

Tabelle C 4: Ergebnistabelle der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für die Schusswaffe

Pistole						
W <sub>h</sub> -bewertete Kennwerte						
Mess-Nr.	MP	a <sub>hw</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hw</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hw</sub> MTVV	a <sub>hw</sub> , PV	CF <sub>w</sub>
0254 5.2	1	19,8	9,4	35,1	92	9,78
	2	6,6	3,2	12,1	27	8,33
	3	12,9	7,1	27,9	174	24,60
	4	9,3	5,8	21,9	238	41,32
0254 5.3	1	17,3	7,6	28,1	78	10,29
	2	7,1	3,1	11,8	26	8,37
	3	22,2	9,7	37,3	166	17,18
	4	28,7	12,6	45,5	225	17,88
0254 5.4	1	12,3	7,7	29,2	99	12,82
	2	5,5	3,2	12,3	27	8,41
	3	15,4	7,9	29,7	112	14,24
	4	27,3	16,3	60,2	328	20,13
Mittelwert	1	16,4	8,2	31	89	10,96
	2	6,4	3,2	12	27	8,37
	3	16,8	8,2	31,6	151,0	18,67
	4	21,8	11,5	42,5	263,4	26,44
Stabw.	1	3,8	1,0	3,8	10,7	1,63
	2	0,8	0,1	0,3	0,5	0,04
	3	4,8	1,3	5,0	33,9	5,34
	4	10,8	5,3	19,3	56,4	12,93

Tabelle C 5: Ergebnistabelle der w<sub>h</sub>-bewerteten Kennwerte für die Schusswaffe

Pistole					
W <sub>p</sub> -bewertete Kennwerte					
Mess-Nr.	MP	a <sub>hwp</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hwp</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hwp</sub> , PV	CF <sub>wp</sub>
0254 5.2	1	81,5	50,5	1589	31,5
	2	13,6	7,5	138	18,3
	3	110,8	55,4	2746	49,6
	4	88,2	49,3	1784	36,2
0254 5.3	1	78,0	48,9	1697	34,7
	2	11,2	7,0	126	17,9
	3	89,0	55,8	1916	34,3
	4	76,1	47,8	1609	33,7
0254 5.4	1	104,1	48,8	1442	29,5
	2	18,4	8,8	153	17,4
	3	121,9	55,4	2512	45,4
	4	95,7	44,1	1733	39,3
Mittelwert	1	87,9	49,4	1576	31,9
	2	14,4	7,8	139	17,9
	3	107,2	55,5	2391,4	43,1
	4	86,7	47,1	1708,5	36,4
Stabw.	1	14,2	0,9	128,4	2,6
	2	3,7	0,9	13,5	0,5
	3	16,7	0,3	428,0	7,9
	4	9,9	2,7	90,0	2,8

Tabelle C 6: Ergebnistabelle der w<sub>p</sub>-bewerteten Kennwerte für die Schusswaffe

Tierbetäubungsgerät													
Flat <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte													
Mess-Nr.	MP	a <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hf, RMQ</sub> (T=3s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	j <sub>hf</sub> peak to peak	a <sub>hf</sub> MTVV	a <sub>hf, PV</sub>	CF <sub>h</sub>	SC <sub>h</sub>	t <sub>a</sub> [ms]	t <sub>i</sub> [ms]
310 3.3	1	244,1	143,5	1046,2	918354	536801	84947025	677,4	9771	68,1	7,3	0,8	3
310 3.4	1	248,4	144,1	1029,3	1049041	606701	94208537	680,2	9439	65,5	7,1	0,9	3
310 3.5	1	256,9	149,0	1041,4	961379	556312	71330007	707,0	9302	62,4	7,0	0,8	3
Mittelwert	1	249,8	145,5	1039,0	976258	566605	83495190	688,2	9504	65,3	7,1	0,8	3,0
Stabw.	1	6,5	3,0	8,7	66602	36069	11508156	16,3	241	2,8	0,1	0,1	0,0

Tabelle C 7: Ergebnistabelle der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für das Tierbetäubungsgerät

Tierbetäubungsgerät								
W <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte								
Mess-Nr.	MP	a <sub>hw</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hw</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hw, RMQ</sub> (T=3s)	a <sub>hw</sub> MTVV	a <sub>hw, PV</sub>	CF <sub>w</sub>	SC <sub>w</sub>
310 3.3	1	31,3	19,4	80,3	77,6	606	31,2	4,1
310 3.4	1	32,0	18,5	80,0	58,8	600	32,4	4,3
310 3.5	1	31,3	18,1	77,7	76,4	584	32,2	4,3
Mittelwert	1	31,5	18,7	79,3	70,9	597	32,0	4,2
Stabw.	1	0,4	0,7	1,4	10,6	11	0,7	0,1

Tabelle C 8: Ergebnistabelle der w<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für das Tierbetäubungsgerät

Tierbetäubungsgerät								
W <sub>p</sub> -bewertete Kennwerte								
Mess-Nr.	MP	a <sub>hwp</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hwp</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hwp, RMQ</sub> (T=3s)	a <sub>hwp</sub> MTVV	a <sub>hwp, PV</sub>	CF <sub>wp</sub>	SC <sub>wp</sub>
310 3.3	1	182,3	107,7	656,9	502,1	5567	51,7	6,1
310 3.4	1	187,3	108,2	653,1	505,7	5439	50,3	6,0
310 3.5	1	191,5	110,6	665,5	522,2	5376	48,6	6,0
Mittelwert	1	187,0	108,8	658,5	510,0	5461	50,2	6,1
Stabw.	1	4,6	1,6	6,3	10,7	97	1,6	0,0

Tabelle C 9: Ergebnistabelle der w<sub>p</sub>-bewerteten Kennwerte für das Tierbetäubungsgerät

Bolzensetzer														
Flat <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte														
Mess-Nr.	M P	a <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hf</sub> RMS	a <sub>hf</sub> , RMQ (T=3s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=1s)	j <sub>hf</sub> RMS (T=3s)	j <sub>hf</sub> , peak to peak	a <sub>hf</sub> MTVV	a <sub>hf</sub> , PV	CF <sub>h</sub>	SC <sub>h</sub>	t <sub>a</sub> [ms]	t <sub>i</sub> [ms]
<b>0291 03.2</b>	1	186,8	82,2	73,8	478,4	611360	358230	43604000	354	4434	53, 9	5,8	1,3	7
	2	274,1	125,1	113,4	978,5	201390	117480	18809000 0	514	1085 4	86, 8	7,8	0,5	6
<b>0291 03.3</b>	1	167,3	73,9	66,4	449,6	582280	346640	44531000	315	4766	64, 5	6,1	1,1	8
	2	276,7	126,2	114,4	965,2	1707700	1000300	13477000 0	525	1059 1	83, 9	7,6	0,4	5
<b>0291 03.4</b>	1	175,1	79,4	71,2	456,2	614790	359330	58984000	339	4053	51, 1	5,7	1,3	11
	2	268,0	126,0	114,2	914,7	2065100	1203900	18018000 0	515	1059 1	84, 0	7,3	0,3	5
<b>Mittel- wert</b>	1	176,4	78,5	70,4	461,4	602810	354733	49039667	336	4417	56, 5	5,9	1,2	8,7
	2	272,9	125,8	114,0	952,8	1324730	773893	16768000 0	518	1067 9	84, 9	7,6	0,4	5,3
<b>Stabw.</b>	1	9,8	4,2	3,8	15,1	17862	7031	8624509	19,4	356,7	7,1	0,2	0,1	2,1
	2	4,5	0,6	0,5	33,7	989117	577514	28774000	6,0	152,2	1,6	0,3	0,1	0,6

Tabelle C 10: Ergebnistabelle der Flat<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für den Bolzensetzer

Bolzensetzer												
W <sub>H</sub> -bewertete Kennwerte												
Mess-Nr.	MP	a <sub>hw</sub> RMS (T=1s)	a <sub>hw</sub> RMS (T=3s)	a <sub>hw</sub> RMS	a <sub>hw</sub> , RMQ (T=3s)	j <sub>hw</sub> RMS (T=1s)	j <sub>hw</sub> RMS (T=3s)	j <sub>hw</sub> , peak to peak	a <sub>hw</sub> MTVV	a <sub>hw</sub> , PV	CF <sub>w</sub>	SC <sub>w</sub>
0291 03.2	1	21,4	9,4	8,4	336,1	13188	7624	631985	33,5	283,8	30,3	35,9
	2	21,3	9,6	8,6	277,8	13654	7909	885798	32,1	239,2	24,9	28,9
0291 03.3	1	20,8	9,1	8,2	303,4	11441	6626	561525	32,7	256,9	28,2	33,3
	2	19,0	8,6	7,7	275,5	11201	6501	844882	29,9	233,7	27,2	32,1
0291 03.4	1	20,2	9,1	8,2	319,4	12331	7128	601921	33,3	269,2	29,6	35,1
	2	20,6	9,3	8,4	270,9	12213	7074	895519	32,3	227,5	24,4	29,1
Mittelwert	1	20,8	9,2	8,2	319,6	12320	7126	598477	33,2	270,0	29,3	34,7
	2	20,3	9,2	8,2	274,7	12356	7161	875400	31,4	233,4	25,5	30,0
Stabw.	1	0,6	0,2	0,1	16,3	873,6	499,0	35356,0	0,4	13,5	1,1	1,3
	2	1,2	0,5	0,5	3,5	1233	708	26872	1,3	5,9	1,5	1,8

Tabelle C 11: Ergebnistabelle der w<sub>H</sub>-bewerteten Kennwerte für den Bolzensetzer

Bolzensetzer							
Frequenzbewertete Größen (Neue Frequenzbewertung)							
Mess-Nr.	MP	$a_{hwp\ RMS} (T=1s)$	$a_{hwp\ RMS} (T=3s)$	$a_{hwp\ RMS}$	$a_{hwp\ MTVV}$	$a_{hwp, PV}$	$CF_{wp}$
0291 032	1	142,7	62,5	55,9	271	2676	42,8
	2	107,3	47,1	42,2	202	2489	52,9
0291 033	1	127,5	72,2	50,0	241	2476	34,3
	2	104,5	59,3	41,1	198	2451	41,3
0291 034	1	132,2	77,1	53,3	257	2574	33,4
	2	103,7	60,5	41,9	201	2373	39,2
Mittelwert	1	134,2	70,6	53,1	256	2575	36,8
	2	105,2	55,6	41,7	200	2437	44,5
Stabw.	1	7,8	7,5	3,0	15,1	99,8	5,2
	2	1,9	7,4	0,5	2,3	58,9	7,4

Tabelle C 12: Ergebnistabelle der  $w_p$ -bewerteten Kennwerte für den Bolzensetzer

## Anhang D. Liste der Versuchspersonen

	Alter	Größe	Gewicht	Beruf
1	38	175	78	Ing
2	30	193	85	Ing
3	50	185	105	Ing
4	41	189	82	Ing
5	76	182	82	Ing
6	38	174	74	Ing
7	62	189	84	Ing
8	38	176	73	Maschinenbau
9	45	178	76	Ing
10	66	175	95	Gießerei
11	62	184	80	Bau
12	70	178	74	Elektriker
13	59	175	86	Kraftfahrer
14	59	182	81	Ing
15	68	174	83	Bau
16	26	183	95	Student
17	28	178	95	Ing
18	61	179	92	Ing
19	56	180	78	Elektriker
20	60	188	92	Hausmeister
21	28	189	90	Student
22	51	185	115	Ing
23	55	193	120	Elektriker
24	62	186	85	Ing

## Anhang E. Versuchsinstruktion Vorversuche

Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen dem besseren Verständnis der Verarbeitung bestimmter mechanischer Einwirkungen auf den Tastsinn des Menschen.

Während des Versuches werden mit der Versuchsvorrichtung geringe aufeinander folgende impulsförmige Bewegungen erzeugt. Diese Bewegungen können von Ihnen durch Auflegen der Finger bzw. der Hand wahrgenommen werden. Die Bewegung ist so gering bemessen, dass sie auf keinen Fall einer Schmerzempfindung nahe kommt.

Der zeitliche Abstand der Einzelimpulse kann von Ihnen mittels Drehknopf eingestellt werden. Bei sehr niedrigen Einstellungen des Drehknopfes können Sie einzelne Bewegungsimpulse wahrnehmen. Wird der Knopf nach links gedreht, so werden die Abstände zwischen den Impulsen kürzer. Die Impulse folgen schneller aufeinander und gehen schließlich ineinander über.

Ihre Aufgabe besteht darin, die Grenze zu bestimmen, bei der Ihrer Meinung nach der Übergang von aufeinander folgenden einzelnen Impulsen zu einer kontinuierlichen Impulsfolge erfolgt.

Sie verändern die Einstellung des Drehknopfes durch Hin- und Her-Drehen so lange, bis Sie der Meinung sind, dass diese Grenze eingestellt ist und teilen dies dem Versuchsleiter mit.

Die Untersuchungen werden für die Finger der rechten und der linken Hand sowie für eine bestimmte Stelle am Handgelenk (Erbsenbein) durchgeführt. Jede Messung wird zweimal wiederholt (insgesamt also drei Messungen pro Einleitungsstelle).

**Legen Sie die Fingerkuppen und das Handgelenk locker auf den Schwingerreger. Konzentrieren Sie sich auf die gefühlte Wahrnehmung, nicht auf das Geräusch der Versuchsvorrichtung.**

Vor dem eigentlichen Versuch werden einige Proben vorgenommen, damit Sie mit den Versuchsbewegungen, den hierdurch hervorgerufenen Empfindungen und mit der Steuerung durch den Drehknopf vertraut werden.

## Anhang F. Versuchsinstruktion Hauptversuch 1

Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen dem besseren Verständnis der Verarbeitung bestimmter mechanischer Einwirkungen auf den Tastsinn des Menschen.

Während des Versuches werden mit der Versuchsvorrichtung geringe aufeinander folgende impulsförmige Bewegungen erzeugt, die von Ihnen über den Handgriff wahrgenommen werden können. Diese Bewegungen sind so gering bemessen, dass sie auf keinen Fall einer Schmerzempfindung nahe kommen.

Der zeitliche Abstand der Einzelimpulse kann von Ihnen mittels Drehknopf eingestellt werden. Bei sehr niedrigen Einstellungen des Drehknopfes können Sie deutlich die einzelnen Bewegungsimpulse und die dazwischen liegenden Pausen wahrnehmen. Wird der Knopf nach links gedreht, so werden die Abstände zwischen den Impulsen kürzer. Die Impulse folgen schneller aufeinander, so dass Sie die Pausen zwischen den Impulsen nicht mehr richtig wahrnehmen können. Bei weiterer Drehung des Knopfes werden die Impulsabstände schließlich so kurz, dass Sie nur noch ein diffuses Kribbeln empfinden.

Es gibt also drei Wahrnehmungsbereiche:

1. Bereich einzeln wahrnehmbarer Impulse mit wahrnehmbaren Zwischenräumen
2. Bereich schneller Impulsfolgen (Zwischenräume sind nicht mehr deutlich wahrnehmbar aber man merkt noch, dass es Impulse sind)
3. Bereich einer diffusen Vibrationswahrnehmung (Kribbeln)

Ihre Aufgabe besteht darin, die Grenzen zwischen diesen drei Wahrnehmungsbereichen zu bestimmen:

Grenze A: Grenze zwischen Einzelimpulse und Impulsfolgen

Grenze B: Grenze zwischen Impulsfolgen und diffuser Vibration

Sie verändern die Einstellung des Drehknopfes durch Hin- und Her-Drehen so lange, bis Sie der Meinung sind, dass die Grenze A bzw. die Grenze B eingestellt ist und teilen dies dem Versuchsleiter mit.

Die Untersuchungen werden nur für rechte Hand durchgeführt.

Je nach Aufforderung durch den Versuchsleiter wird der Handgriff von Ihnen nur ganz locker (so dass Sie die Bewegung noch sicher spüren) oder etwas fester umfasst. Außerdem werden die Versuche ohne Andruck und mit leichtem Andruck durchgeführt. Auf keinen Fall sind von Ihnen starke Kräfte auszuüben. Konzentrieren Sie sich nicht auf die Greif- oder Andruckkräfte, sondern auf die Empfindung.

In einem ersten Versuchsdurchgang wird die Grenze A mehrmals bestimmt. Nach einer Pause wird im zweiten Versuchsdurchgang die Grenze B mehrmals bestimmt.

Vor dem eigentlichen Versuch werden einige Proben vorgenommen, damit Sie mit den Versuchsbewegungen, den hierdurch hervorgerufenen Empfindungen und mit der Steuerung durch den Drehknopf vertraut werden.

## **Anhang G. Versuchsinstruktion Hauptversuch 2**

Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen dem besseren Verständnis der Verarbeitung bestimmter mechanischer Einwirkungen auf die Empfindung des Menschen. Es soll herausgefunden werden, wie stark oder wie schwach eine auf den Menschen einwirkende Bewegung sein muss, um als Stoß empfunden zu werden.

Während des Versuches wird mit der Versuchsanordnung eine geringe Bewegung erzeugt, die von Ihnen über den Handgriff wahrgenommen werden kann. Die Bewegung ist so gering bemessen, dass sie auf keinen Fall einer Schmerzempfindung nahe kommt.

Je nach Intensität wird diese Bewegung von Ihnen als Stoß oder nicht als Stoß (nur eine Bewegung) wahrgenommen.

Die Intensität kann von Ihnen mittels Drehknopf eingestellt werden. Sie verändern die Einstellung des Drehknopfes durch Hin- und Her-Drehen so lange, bis Sie der Meinung sind, dass gerade so die Grenze eingestellt ist, ab der eine Bewegung in einen Stoß übergeht.

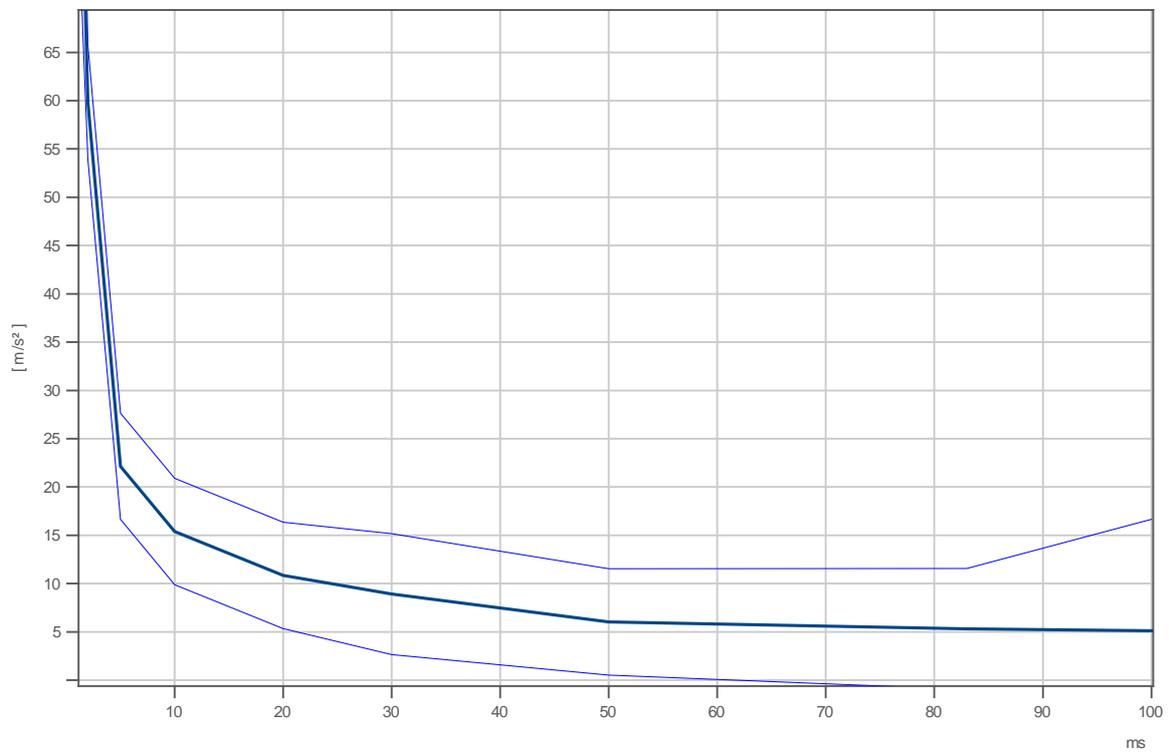
Die Untersuchungen werden nur für rechte Hand durchgeführt.

Je nach Aufforderung durch den Versuchsleiter wird der Handgriff von Ihnen nur ganz locker (so dass Sie die Bewegung noch sicher spüren) oder etwas fester umfasst. Außerdem werden die Versuche ohne Andruck und mit leichtem Andruck durchgeführt. Auf keinen Fall sind von Ihnen starke Kräfte auszuüben. Konzentrieren Sie sich nicht auf die Greif- oder Andruckkräfte, sondern auf die Empfindung.

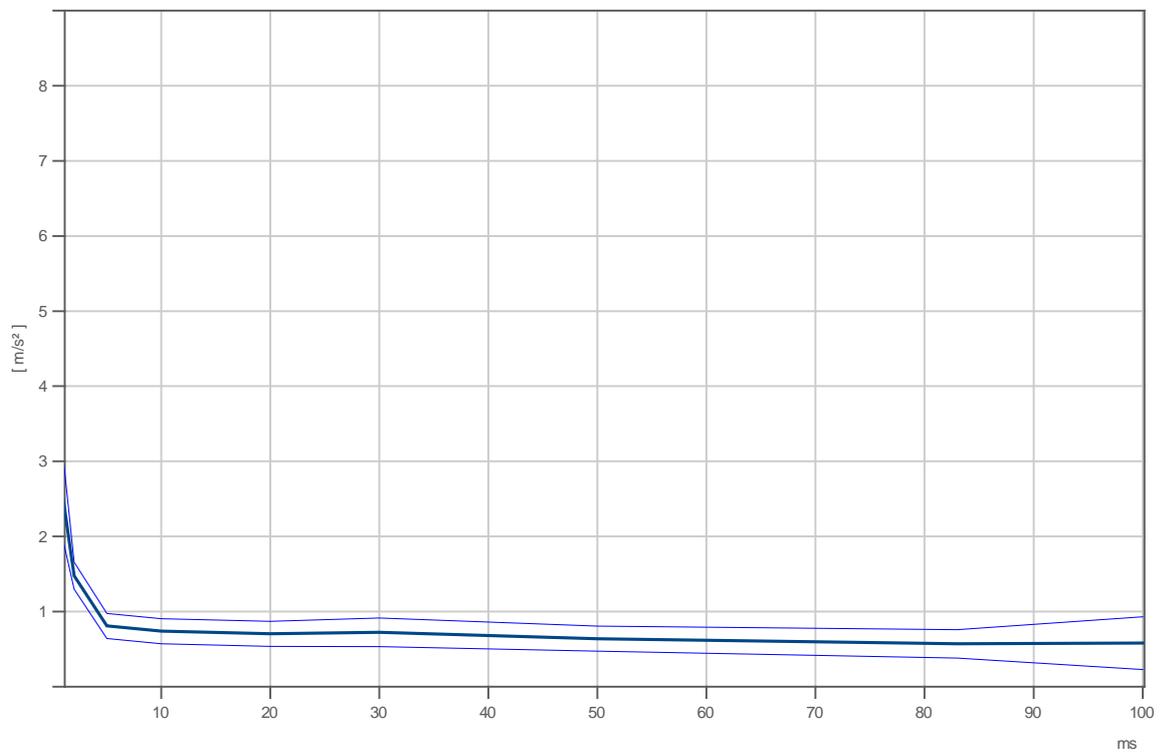
Durch den Versuchsleiter wird die Form der Bewegung vorgegeben. Diese Bewegung wiederholt sich nach kurzer Zeit immer wieder, so dass Sie sich in Ruhe auf Ihre Empfindung konzentrieren können und in Ruhe die Einstellungen verändern können. Wenn Sie der Meinung sind, die Grenze zur Stoßempfindung ist richtig eingestellt, geben Sie dem Versuchsleiter bitte Bescheid.

Vor dem eigentlichen Versuch werden einige Proben vorgenommen, damit Sie mit den Versuchsbewegungen, den hierdurch hervorgerufenen Empfindungen und mit der Steuerung durch den Drehknopf vertraut werden.

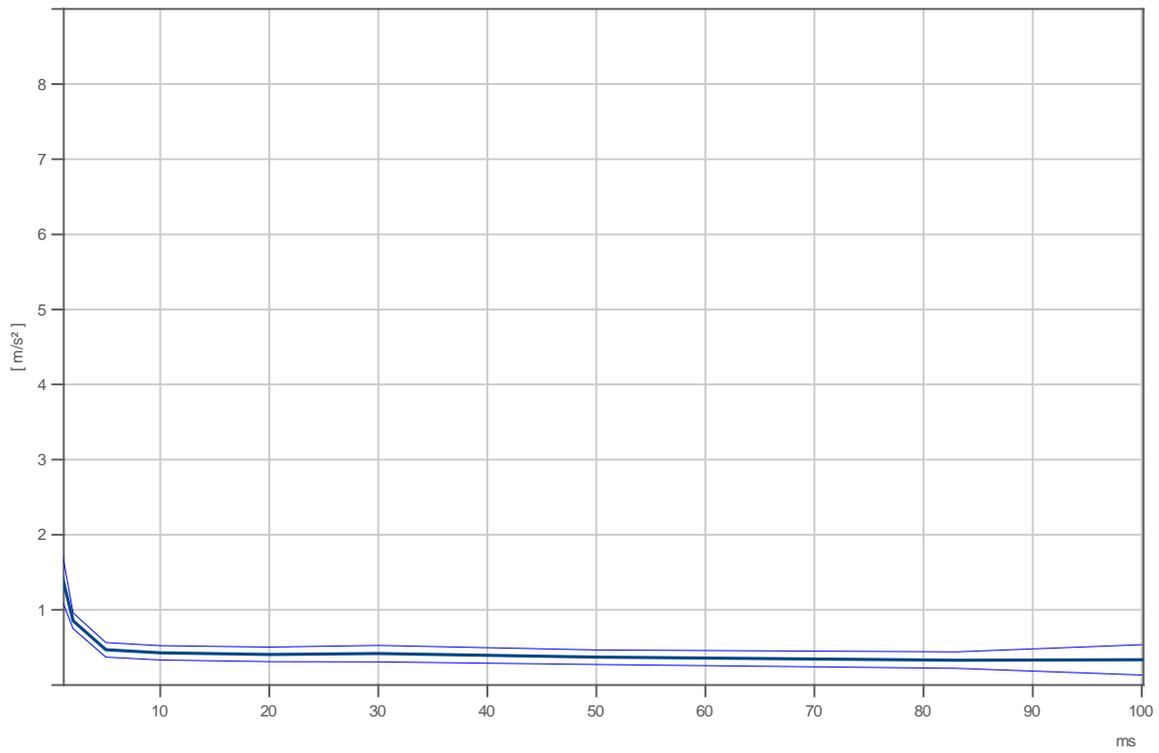
**Anhang H. Einzelergebnisse für die als „Stoß“ bewertete  
Kombination von Impulsdauer und Intensität (Hauptversuch 2)**  
(dicke Linie: Mittelwerte; dünne Linien: 95%-Vertrauensbereich)



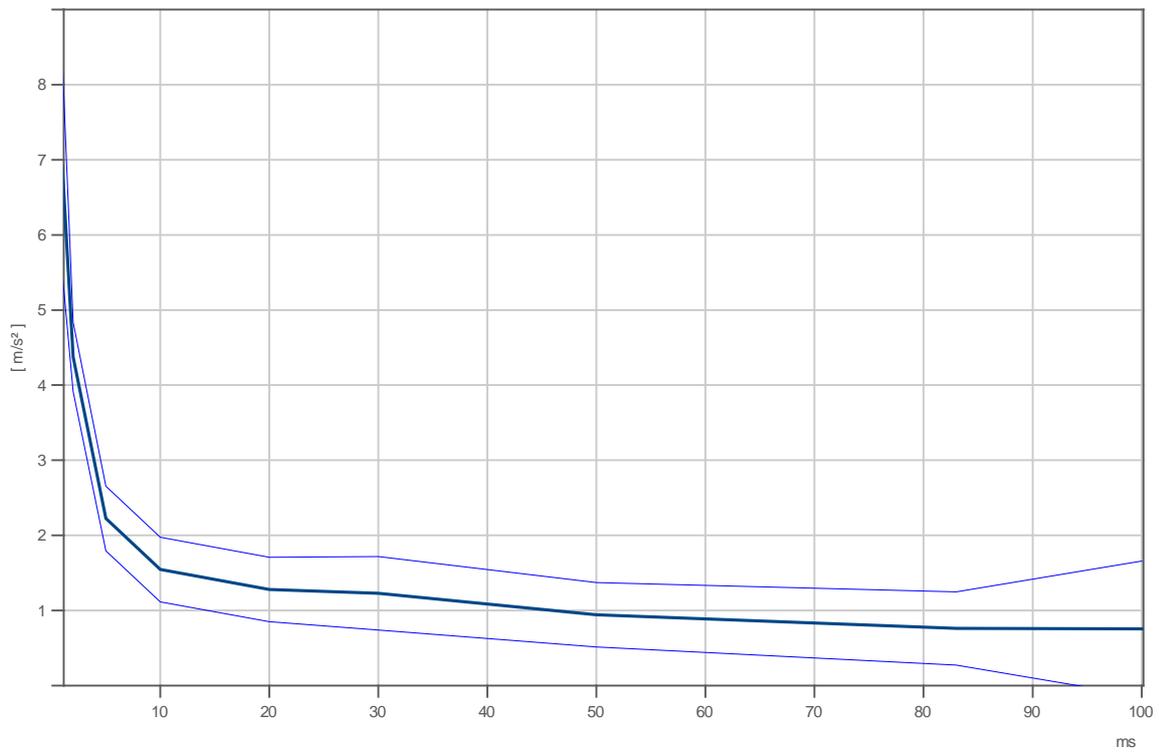
**Griff\_Spitze-Spitze**



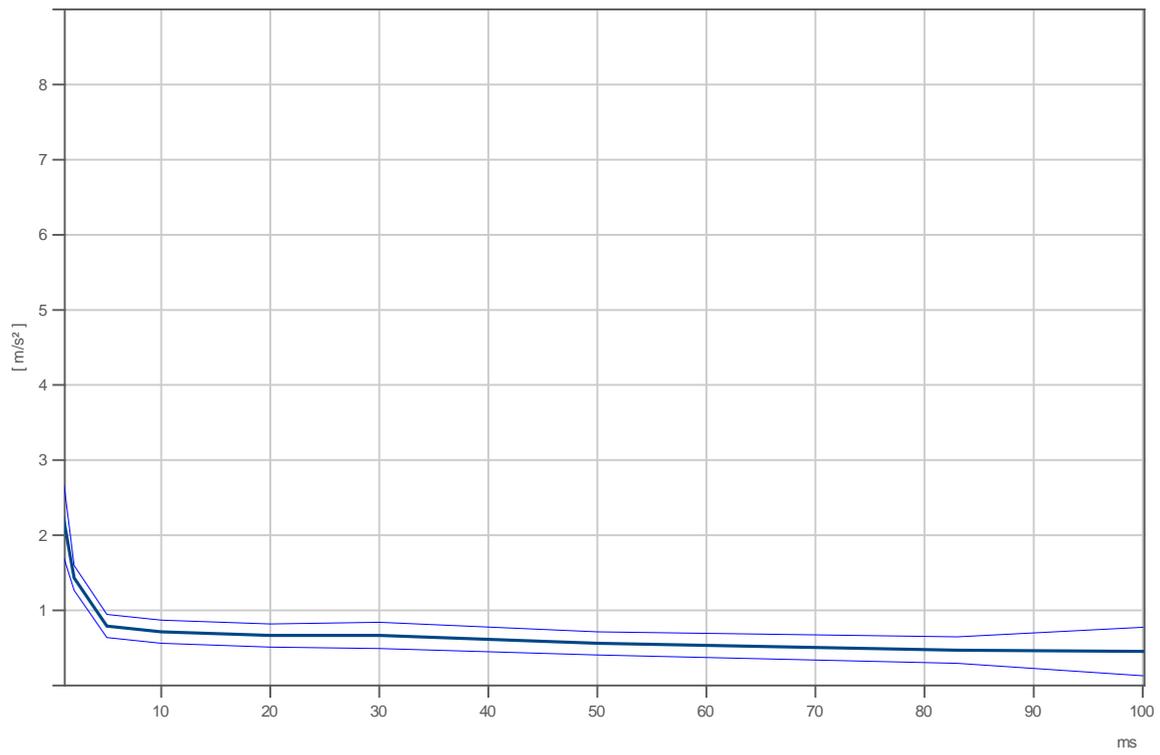
**Linear RMS1**



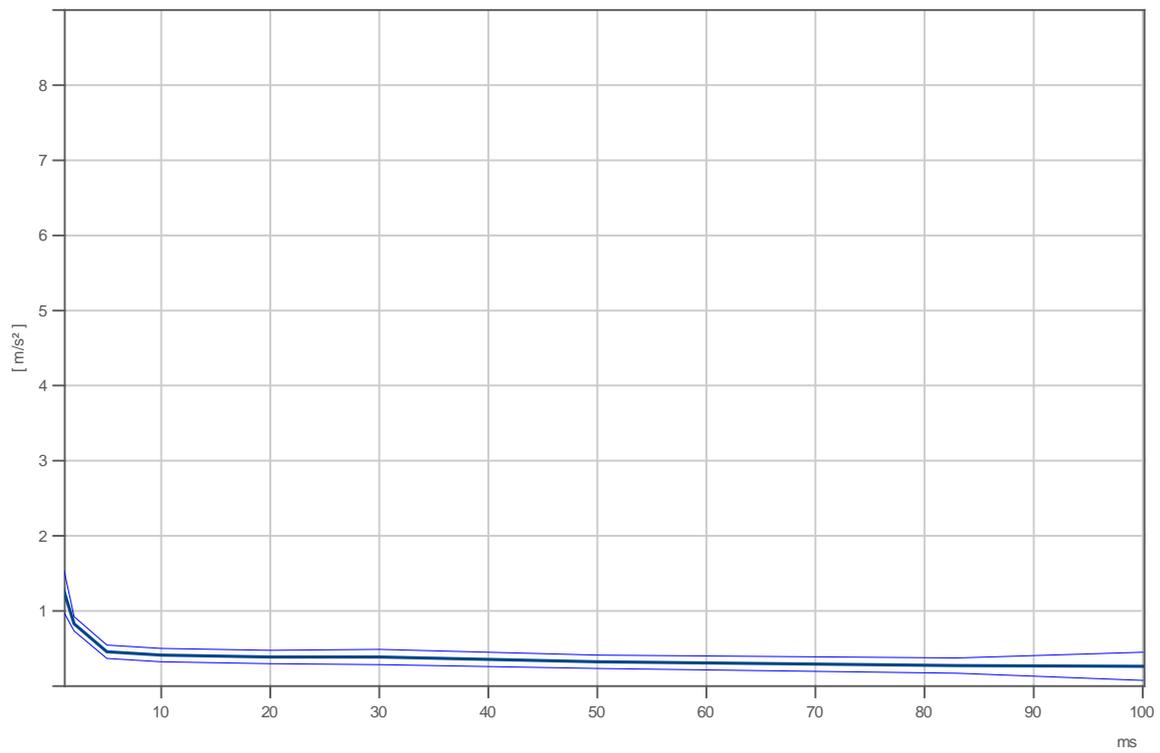
Linear RMS3



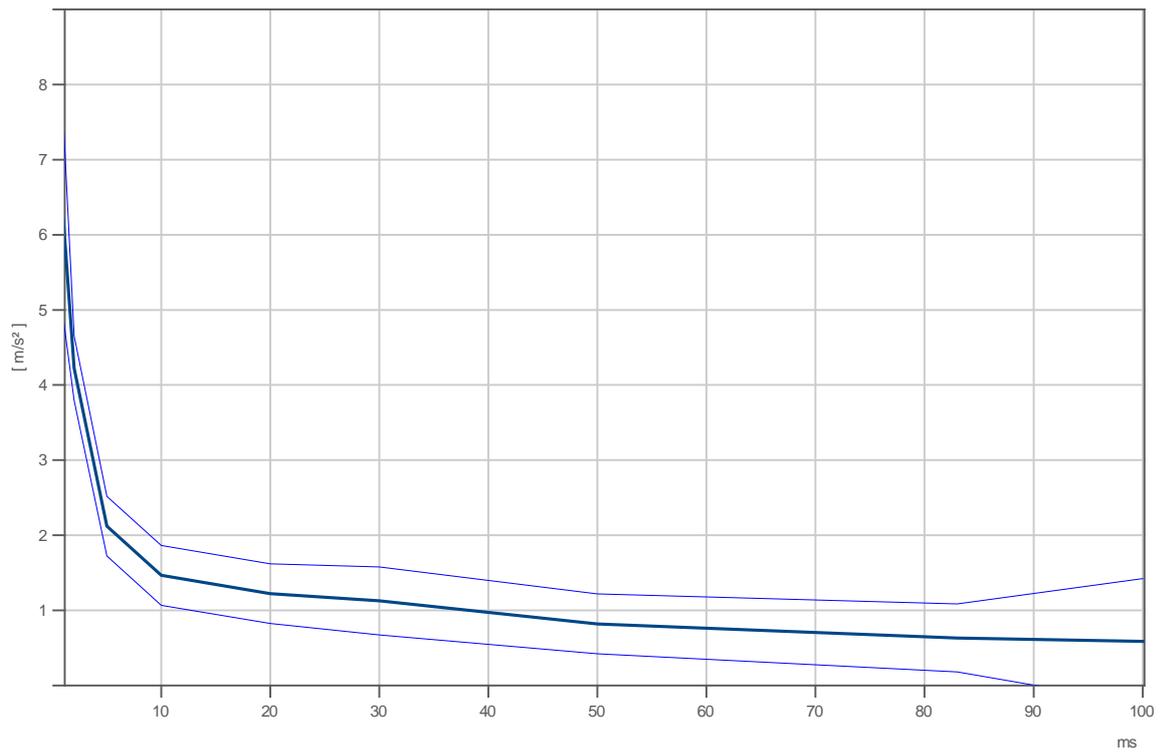
Linear RMQ3



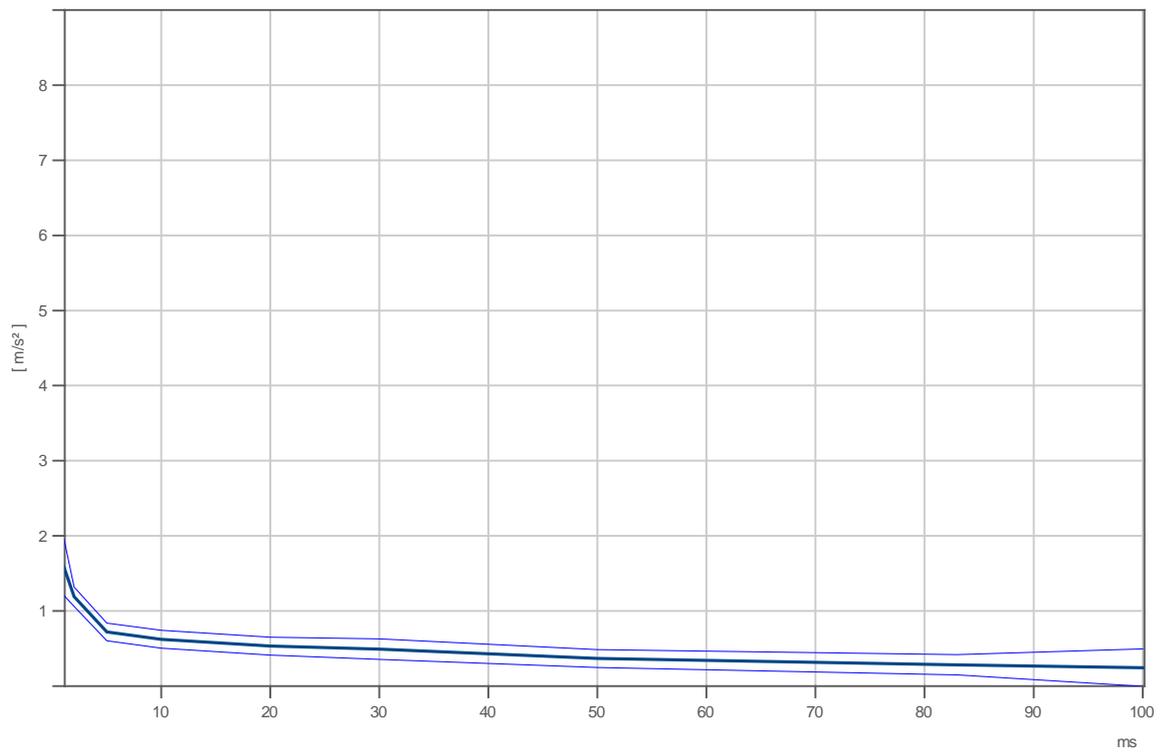
Flat<sub>h</sub> RMS1



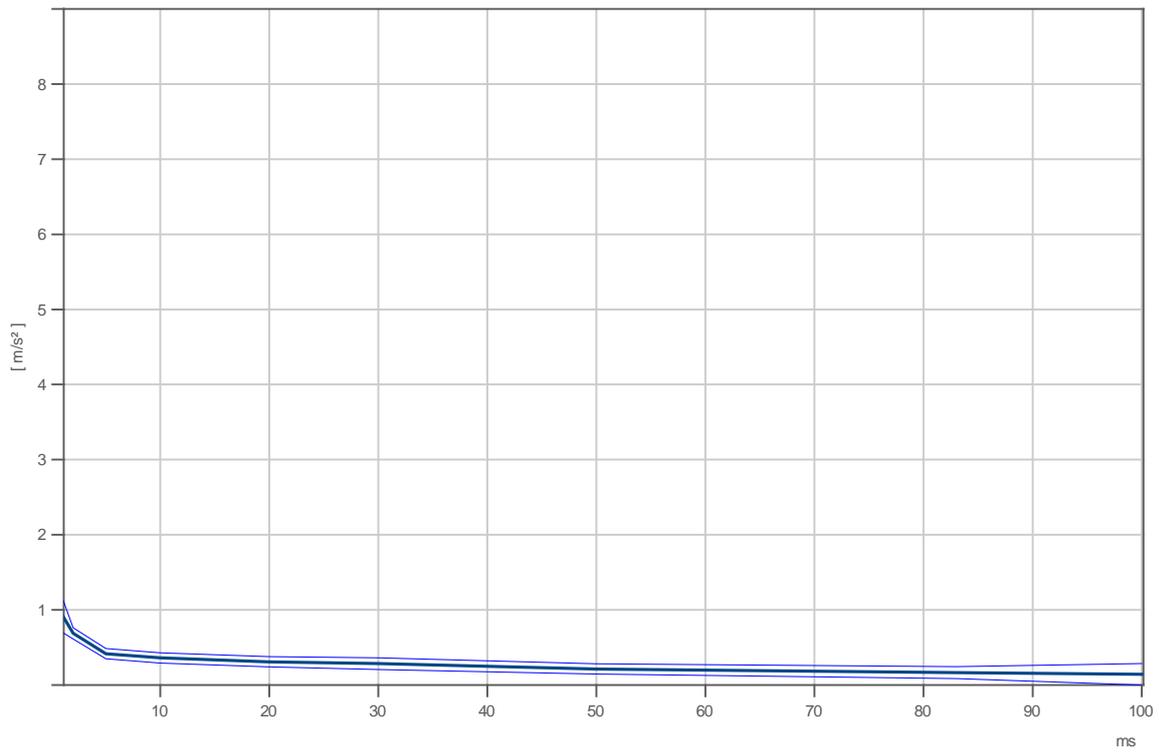
Flat<sub>h</sub> RMS3



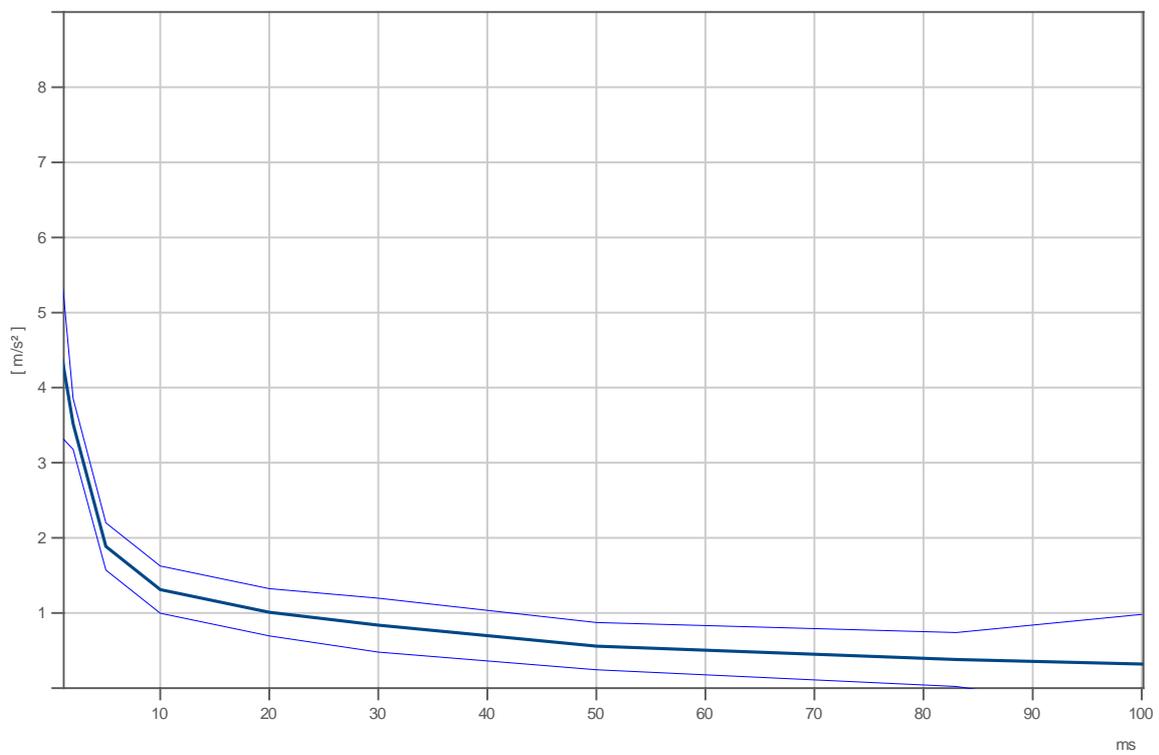
Flat<sub>h</sub> RMQ3



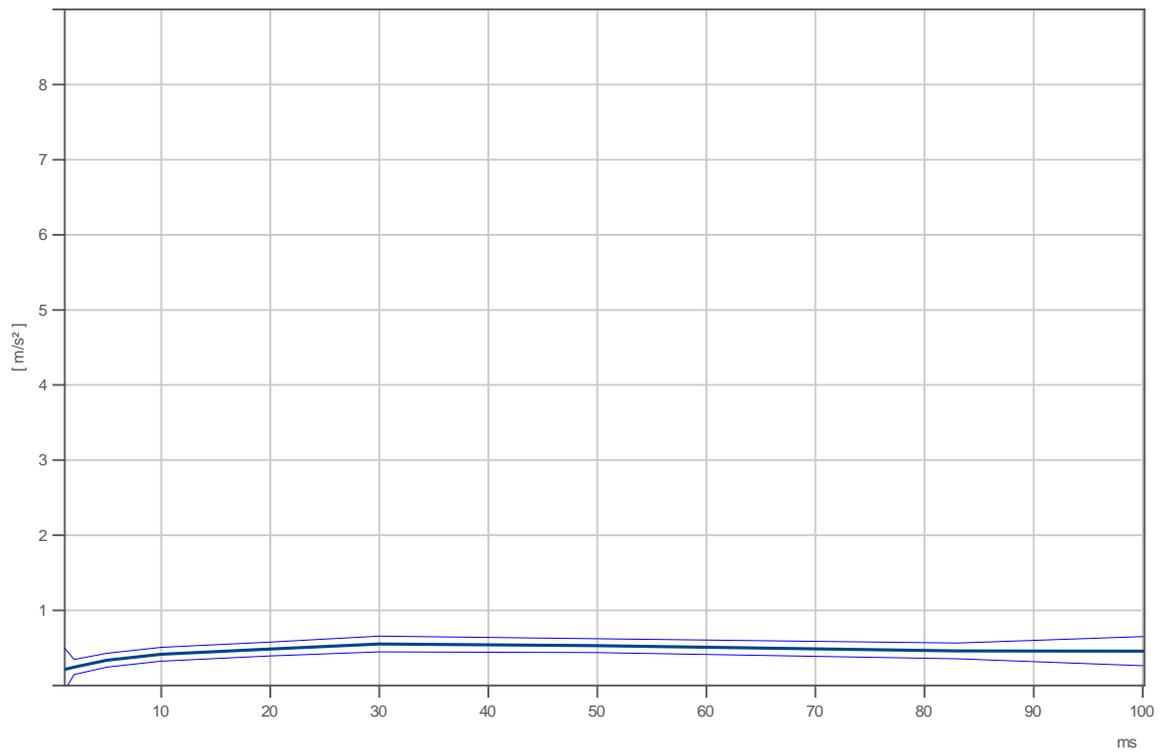
PWI18570 RMS1



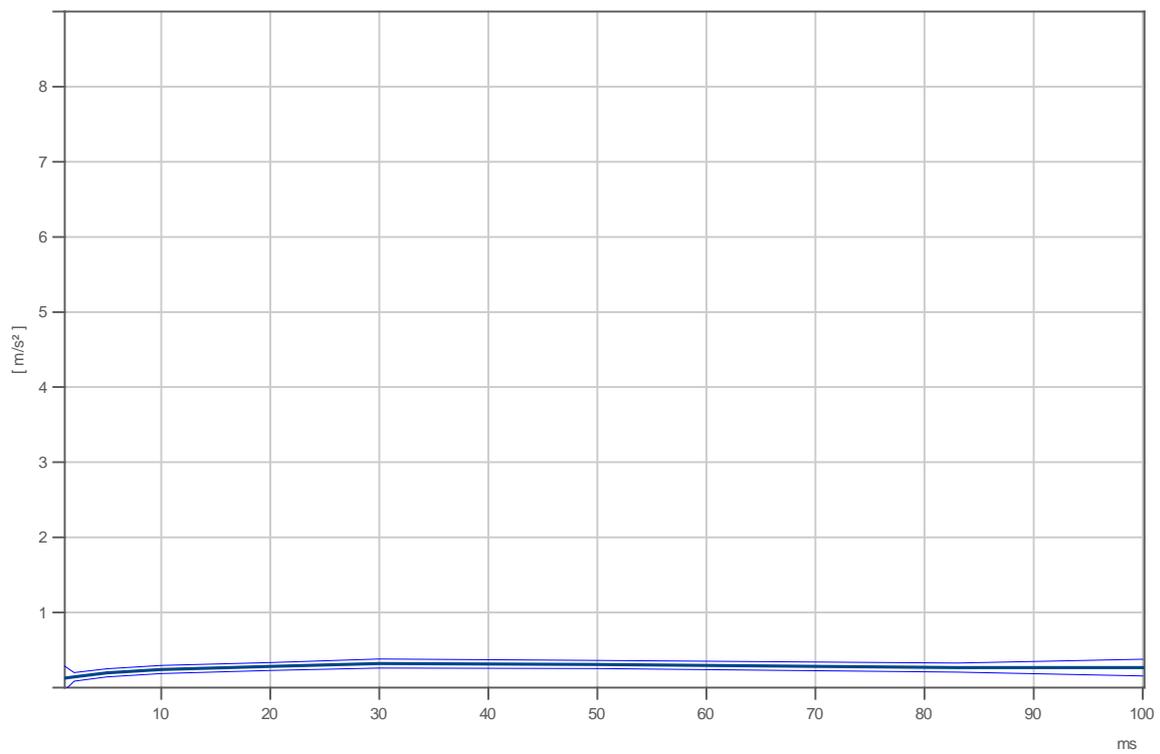
PWI18570 RMS3



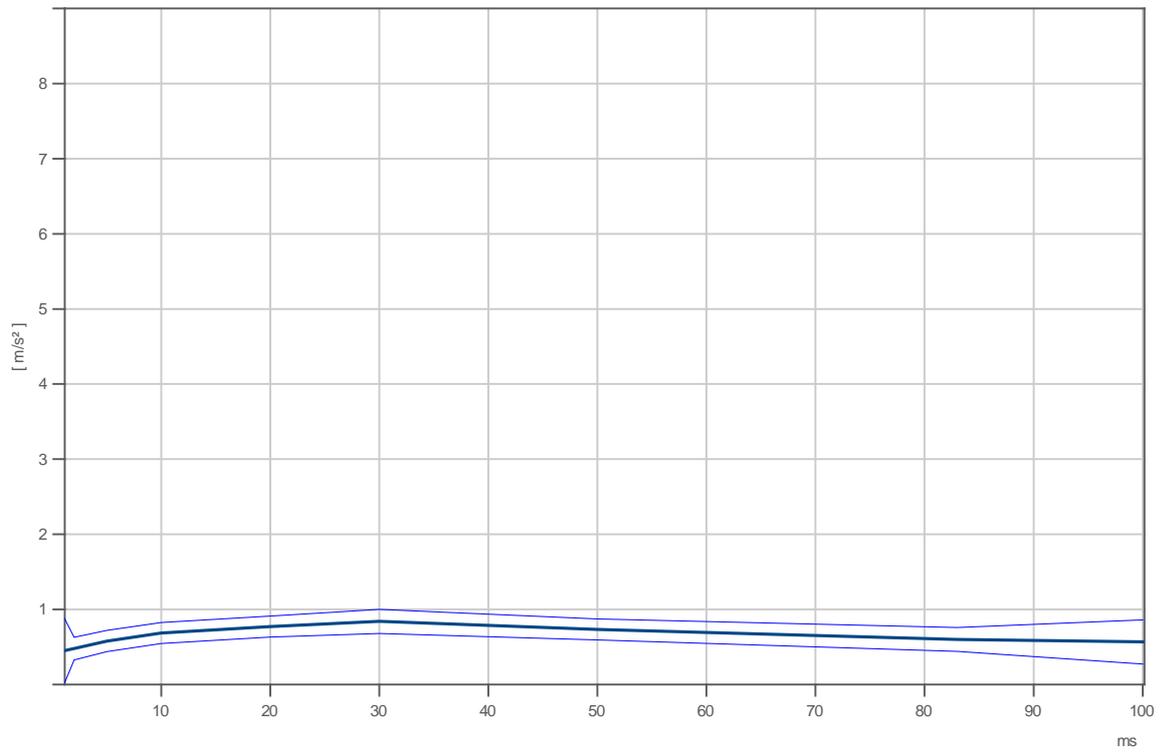
PWI18570 RMQ3



ISO 5349 RMS1



ISO 5349 RMS3



ISO 5349 RMQ3