



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Institut für
Fertigungstechnik und
Photonische Technologien



Diplomarbeit

Aufbau und Inbetriebnahme eines Split-Hopkinson Pressure Bar Versuchsstandes

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-
Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI) unter der Leitung von

Ass. Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Stephan Krall, MSc

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Christian Baumann, BSc

(Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefan Kaschnitz-Biegl, BSc

Matr.Nr: 01125865

Wien, im Dezember 2022

Vorname, Nachname

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.



Wien, im Dezember 2022

Vorname, Nachname

Danksagung

Ich möchte mich bei meiner gesamten Familie, meinen Eltern und im Speziellen bei meiner Frau für die langjährige Unterstützung während meines Studiums bedanken.

Einen herzlichen Dank möchte ich auch meinen Betreuern Herrn Dr. Stephan Krall und Herrn Dipl.-Ing. Christian Baumann für die Unterstützung während meiner Diplomarbeit aussprechen.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen Versuchsstand für die Untersuchung von Werkstoffeigenschaften unter dynamischen Belastungen, die den Belastungen eines Werkstoffes während der Zerspanung entsprechen, auszulegen und aufzubauen. Anhand einer Literaturrecherche wurden unterschiedliche Verfahren zur dynamischen Werkstoffprüfung betrachtet und anhand dieser der Split-Hopkinson Pressure Bar ausgewählt.

Es standen Komponenten einer alten Anlage zur Verfügung, diese wurden gesichtet und teilweise für den Gebrauch in der neuen Anlage überarbeitet und gewartet. Die Lagerung und die benötigten Bars (Striker, Incident Bar und Transmission Bar) für die Anlage wurden unter Beachtung des Stands der Technik neu gefertigt. Die Anlage wurde anschließend aufgebaut. Es wurde im Besonderen auf die richtige Positionierung und Ausrichtung der Komponenten zueinander geachtet, da dies ein kritischer Punkt für den Erhalt korrekter Versuchsergebnisse ist. Es wird eine Methode zur axialen Ausrichtung der Bars aufgezeigt, die die korrekte axiale Ausrichtung mithilfe der Bars selbst ermöglicht. Es wurde weiters ein Geschwindigkeitsmesssystem zur Detektion der Impact Geschwindigkeit des Striker Bars ausgelegt und aufgebaut.

Ergebnis dieser Arbeit ist ein Split-Hopkinson Pressure Bar Versuchsstand dem Stand der Technik entsprechend, der nach Implementierung eines Messsystems für die Aufzeichnung der Dehnungen in den Bars einsatzbereit für Materialversuche ist. Durch die Wiederverwendung von Komponenten einer alten Anlage konnten zudem die Kosten für die Anlage reduziert werden.

Abstract

The aim of this thesis is to create a test stand for dynamic material characterization under loading conditions like the conditions of machining and high-speed cutting. After researches the chosen system is a Split-Hopkinson Pressure Bar.

Some components of an old system can be reused. Therefore, these components must be refurbished and optimized to fit in the new system. The Bars used in a Split-Hopkinson Pressure Bar (Striker, Incident Bar and Transmission Bar) and the needed support System with air-bearings was designed and manufactured. The result of this work is a fully built-up test stand. One aim during the built process was the correct positioning and alignment of the Bars. The last part was to design and manufacture a new system to detect the correct striker velocity.

The built system is ready to use after the implementation of a measurement system to detect the strain gage signals.

Abkürzungsverzeichnis

SHPB	Split-Hopkinson Pressure Bar
bzw.	beziehungsweise
z.B.	zum Beispiel
FEM	Finite-Elemente-Methode
IFT	Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien
DMS	Dehnmessstreifen
DLK	Druckluftkanone
Al	Aluminium
Mg	Magnesium
TDI	Transverse Displacement Interferometer
NDI	Normal Displacement Interferometer
PDV	Photon Doppler Velocimetry
e. A.	eigene Aufnahme
C	Kohlenstoff
Si	Silizium
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
Co	Kobalt
Ti	Titan
HRC	Härte Rockwell
TiA	Transimpedanzverstärker

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	SI-Einheit
σ_{eq}	Vergleichsspannung	N/m ²
ε_p	akkumulierte plastische Vergleichsdehnung	1
$\dot{\varepsilon}^*$	bezogene plastische Vergleichsdehnrates	1/s
$\dot{\varepsilon}_p$	plastische Vergleichsdehnrates	1/s
$\dot{\varepsilon}_0$	Referenzdehnrates	1/s
T^*	homologe Temperatur	°C
T_{Raum}	Raumtemperatur	°C
$T_{Schmelz}$	Schmelztemperatur	°C
ε_i	Incident wave / pulse	1
ε_r	Reflected wave / pulse	1
ε_t	Transmitted wave / pulse	1
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrates	1/s
ε	Dehnung	1
L_S	Probenlänge	m
D_S	Probendurchmesser	m
C_0	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit	m/s
l_{st}	Länge der Striker Bar	m
l_{DW}	Länge der generierten Druckwelle	m
t_{DW}	Dauer der Impulserzeugung	s
σ	Spannung	N/m ²
E	Elastizitätsmodul	Pa
u	Verschiebung	mm
ρ	Dichte	kg/m ³
t	Zeit	s
Z	Impedanz	kg/s
A	Querschnittsfläche	m ²
v_1	Geschwindigkeit am linken Ende der Probe	m/s
v_2	Geschwindigkeit am rechten Ende der Probe	m/s
C_b	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der Kolsky Bars	m/s
ε_I	Dehnung aufgrund Incident Pulse	1
ε_R	Dehnung aufgrund Reflected Pulse	1
ε_T	Dehnung aufgrund Transmitted Pulse	1
A_b	Querschnittsfläche der Kolsky Bars	m ²
A_s	Querschnittsfläche der Probe	m ²
σ_1	Spannung am linken Rand der Probe	N/m ²
σ_2	Spannung am rechten Rand der Probe	N/m ²

E_b	Elastizitätsmodul der Kolsky Bars	Pa
ΔR	Änderung des Widerstandes	Ω
ρ_R	spezifischer Widerstand	Ω
ΔL	Längenänderung	m
ΔA	Querschnittsänderung	m ²
k	k-Faktor des DMS	1
R	Widerstand	Ω
U_0	Brückenausgangsspannung	V
U_I	Brückenspeisespannung	V
F_1	Kraft am linken Ende der Probe	N
F_2	Kraft am rechten Ende der Probe	N
v_i	Geschwindigkeit der Incident wave	m/s
v_r	Geschwindigkeit der Reflected wave	m/s
v_t	Geschwindigkeit der Transmitted wave	m/s
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
$R_{p0,2}$	Dehngrenze	N/mm ²
v_{st}	Strikergeschwindigkeit	m/s
l_{spec}	Probenlänge	m
l_{in}	Länge der Incident Bar	m
l_{tr}	Länge der Transmission Bar	m
l_{mo}	Länge der Momentum Trap Bar	m
d_B	Bardurchmesser	m
d	Durchmesser	m
U	auskragende Länge	m
n	Lager pro Bar	1
$\hat{\sigma}_{in}$	Amplitude der Incident wave	N/m ²
ε_{in}	Dehnung der Incident Bar	1
F	Kraft	N/m ²
m	Masse	kg
v	Geschwindigkeit	m/s
$P(x)$	Kammerdruck	bar
P_{atm}	Atmosphärischer Druck	bar
f	Reibkraft	N
m_{ges}	Gesamtmasse	kg
p_0	Druck in der Kanone	bar
V_0	Volumen der Druckkammer	l
A_L	Querschnitt Kanonenlauf	m ²
L_L	wirksame Länge des Kanonenlaufs	m
$v_{0,max}$	Maximalgeschwindigkeit	m/s

p	Druck	bar
R_f	Feedbackwiderstand	Ω
I_{pd}	Diodenstrom	A
C_f	Feedbackkondensator	F

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1	Dehnung und Dehnrate bei der Zerspanung	3
2.2	Methoden zur hochdynamischen Werkstoffprüfung	4
2.2.1	Methoden zur hochdynamischen Druck-Werkstoffprüfung	5
2.2.2	Methoden zur hochdynamischen Zug-Werkstoffprüfung	9
2.2.3	Gegenüberstellung der Prüfmethoden	11
2.3	Bestandteile einer SHPB-Anlage	12
2.3.1	Druckluftkanone	13
2.3.2	V_0 -Messung	13
2.3.3	Bars	14
2.3.4	Probe	15
2.3.5	Dehnmessstreifen	15
2.3.6	Messdatenaufzeichnung und Auswertung	16
2.4	Grundlagen des SHPB-Versuchs	17
2.4.1	Impulserzeugung	18
2.4.2	Wellenausbreitung, Reflexion und Probenverformung	20
2.4.3	Messignalauswertung	26
2.5	Abwandlungen des SHPB-Druckversuchstandes	28
3	Zielsetzung	33
4	Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme	34
4.1	Überarbeitung von Bestandskomponenten	36
4.1.1	Druckluftkanone	36
4.1.2	Pneumatikkreislauf	39
4.2	Auslegung und Fertigung der Bar-Komponenten	41
4.2.1	Auslegung der Bars für die SHPB-Anlage	41
4.2.2	Geschosshülse	50
4.2.3	SHPB-Lagerung	51
4.3	Aufbau des SHPB-Versuchstandes	58
4.3.1	Ausrichtung und Nivellierung der Trägerkonstruktion	58

Inhaltsverzeichnis	X
4.3.2 Einbau der Luftlager	60
4.3.3 Zusammenbau der Lagerung	61
4.3.4 Ausrichten des Kanonenlaufs und der Bars	65
4.3.5 Aufbau der Momentum Trap	69
4.4 Messsysteme	72
4.4.1 Geschwindigkeitsmessung des Strikers	72
4.4.2 Dehnungsmessung	84
4.4.3 Datenerfassung / Messsystem	85
4.5 Versuchsablauf	86
5 Zusammenfassung und Ausblick	89
Literaturverzeichnis	90
5.1 References	90
Abbildungsverzeichnis	93
Tabellenverzeichnis	95
Anhang	96

1 Einleitung

In der Forschung zu Zerspanungseigenschaften von unterschiedlichen Werkstoffen spielen numerische Methoden eine wichtige Rolle, etwa bei der Werkzeugoptimierung oder um kostenintensive Versuche an Werkzeugmaschinen zu minimieren. Während der Zerspanung der Werkstoffe treten während des Spanbildungsprozesses in den Scherzonen hohe Dehnungen ε (bis zu 1.000 %), hohen Dehnraten $\dot{\varepsilon}$ (bis zu 10^6 s^{-1}) und Temperaturen bis knapp unter der Schmelztemperatur auf [1, pp. 7-9]. Materialmodelle für die numerische Simulation sollten daher das Verhalten der Werkstoffe bei solchen Belastungen und Belastungsarten möglichst gut abbilden, um etwa die auftretenden Kräfte am Werkzeug und Verschleißmechanismen zu berücksichtigen.

Ein Materialmodell, das für hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten geeignet ist, ist das Johnson-Cook (JC) Fließspannungsmodell. Das JC Modell ist ein konstitutives Modell, und eine von Johnson und Cook vorgeschlagene, viskoplastische Formulierung für die von-Mises-Vergleichsspannung σ_{eq} [2].

$$\sigma_{eq}(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T) = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

σ_{eq} Vergleichsspannung

ε_p akkumulierte plastische Vergleichsdehnung

$\dot{\varepsilon}^*$ bezogene plastische Vergleichsdehnrate, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}_p / \dot{\varepsilon}_0$

$\dot{\varepsilon}_p$ plastische Vergleichsdehnrate

$\dot{\varepsilon}_0$ Referenzdehnrate

T^* homologe Temperatur, $T^* = (T - T_{Raum}) / (T_{Schmelz} - T_{Raum})$

Es wurde gezeigt, dass dieses Materialmodell sowohl Dehnratenverfestigungseinflüsse als auch thermische Entfestigungsmechanismen gut abbilden kann [2]. Dieses Materialmodell benutzt materialspezifische Parameter [A, B, n, C, m in Formel (1)], die über geeignete Prüfmethode bestimmt werden müssen, um die Anforderungen an die hohe Dehnung, Dehnrate und Temperatur widerzuspiegeln.

Ein Beispiel zur Anwendung des JC-Materialmodell haben Ning et al. [3] gezeigt. Um die Werkstoffe AISI 1045 (Stahl) und Al 6082-T6 (Aluminium) zu untersuchen haben sie eine FEM-Simulation verwendet und die Parameter für das JC-Materialmodell aus Versuchen an einer SHPB-Versuchsanlage genützt.

Bleicher et al. betrachten in ihrer Arbeit [4] Temperatureinflüsse und Verfestigungsmechanismen aufgrund von hohen Dehnungen sowie Dehnraten bei der Bearbeitung von AISI 1045. Um zukünftig die materialabhängigen Parameter für Materialmodelle, die in der Simulation benötigt werden, bestimmen zu können, soll ein geeignetes Werkstoffprüfverfahren am IFT umgesetzt werden.

In dieser Arbeit wird ein Überblick über die Möglichkeiten zur Werkstoffcharakterisierung unter dynamischer Beanspruchung gegeben. Anschließend wird auf die theoretischen Grundlagen des SHPB-Versuchs näher eingegangen. Im weiteren Verlauf wird eine SHPB-Anlage ausgelegt, am IFT aufgebaut und in dieser Arbeit dokumentiert.

2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Methoden zu den hochdynamischen Werkstoffprüfungen vorgestellt und deren Eignung für die Bestimmung einer Fließkurve unter Berücksichtigung der in der Zerspanung vorherrschenden Belastungen (Dehnung, Dehnrage) beschrieben und bewertet. Anschließend wird der Aufbau und die Grundlagen des Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB) Versuchs näher betrachtet und beschrieben. Abschließend werden die Abwandlungen des SHPB kurz erläutert.

2.1 Dehnung und Dehnrage bei der Zerspanung

Für Untersuchungen des Werkstoffverhaltens während der Zerspanung soll in diesem Abschnitt ein kurzer Überblick über die Spanentstehung und die dabei auftretenden Dehnungen und Dehnraten gegeben werden.

In der Zerspanung entsteht der Span aufgrund einer Relativbewegung eines keilförmigen Werkzeuges, das in ein Werkstück eindringt. Sobald die Fließgrenze des zu bearbeitenden Werkstoffes erreicht ist, entsteht der Span, der über die Spanfläche des Werkzeuges abfließt [5, p. 3].

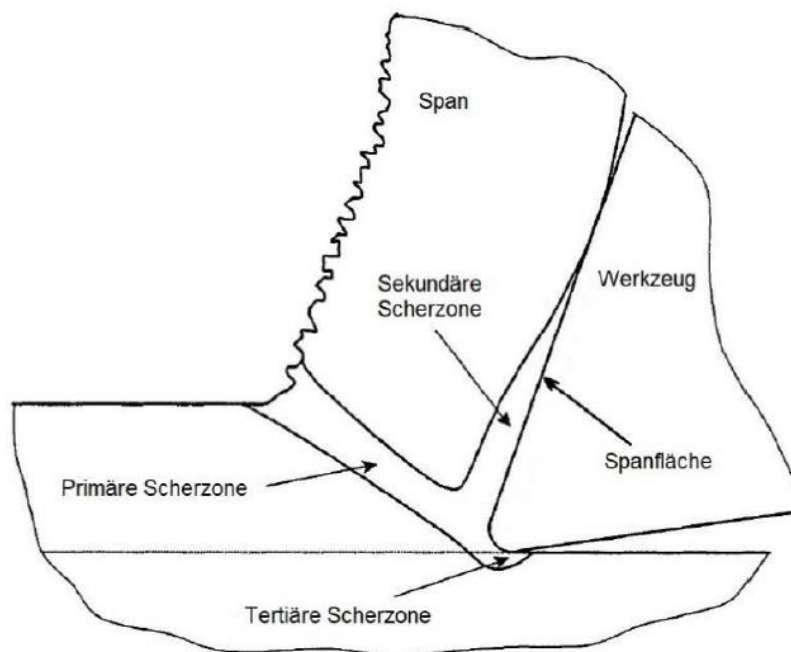


Abbildung 1: Scherzonen in der Zerspanung, in Anlehnung an [1, p. 7]

Die bei der Zerspanung auftretenden plastischen Deformationen können in Zonen unterteilt werden (Abbildung 1). Aufgrund der bei der Spanbildung auftretenden Scherbeanspruchungen werden diese als primäre, sekundäre und tertiäre Scherzonen

bezeichnet [1, p. 7]. In der primären Scherzone treten die für die Spanbildung notwendigen Scherbeanspruchungen auf, der Werkstoff wird lamellenförmig abgeschert und gleitet in der Scherebene ab [1, 6]. Bei diesem, als annähernd rein plastisch zu betrachtenden Vorgang [6], entstehen im Werkstoff Dehnraten $\dot{\varepsilon}$ von 10^3 bis 10^6 s^{-1} und örtliche Dehnungen ε von 100 bis 300 % auf [1, pp. 7-8]. Die Vorgänge in der sekundären und tertiären Scherzone haben keinen direkten Einfluss auf die Spanabnahme, diese haben jedoch wesentlichen Einfluss auf Lebensdauer des Werkzeuges und Werkstückgüte und sind unter anderem von der Werkzeuggeometrie abhängig.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird eine Prüfmethode gesucht, die den Bedingungen bei der Spanabnahme nahekommt, um Werkstoffe bei diesen Belastungen zu testen, und mit den Ergebnissen das Werkstoffverhalten bei der Zerspanung durch numerische Simulation untersuchen zu können.

2.2 Methoden zur hochdynamischen Werkstoffprüfung

Im Buch „Moderne Methoden der Werkstoffprüfung“ geben die Kapitelautoren Ehinger [7] und Krüger im Kapitel „Dynamische Werkstoffprüfung“ einen Überblick über die verschiedenen gängigen Methoden, um dynamische Werkstoffkennwerte zu ermitteln. In Abbildung 2 sind unterschiedliche Belastungsfälle durch verschiedene Herstellungsverfahren in Bezug auf Versuchsdauer, auftretende Dehnraten $\dot{\varepsilon}$ und die Belastungsrate \dot{K}_I des Spannungsintensitätsfaktors angegeben sowie die zugehörigen möglichen Prüfeinrichtungen gegenübergestellt. Wie aus Abbildung 2 ebenfalls ersichtlich, ist ab dem Übergang zu mittleren Dehnraten damit zu rechnen, dass die durch die plastische Verformung entstehende Wärme – aufgrund der kurzen Versuchsdauer und begrenzten Wärmeleitfähigkeit – zu einer adiabatischen Probenerwärmung führt. Das bedeutet, dass es zu einem schnelleren Temperaturanstieg kommt und dadurch oftmals zu einer Materialentfestigung. Außerdem ist laut Ehinger und Krüger zu berücksichtigen, dass die mechanischen Kennwerte bei höheren Dehnraten $\dot{\varepsilon}$ stärker von den Probenabmessungen beeinflusst werden als bei quasistatischer Beanspruchung. So gibt es im SHPB-Versuch etwa Anforderungen bei der geometrischen Auslegung der Probe, die für die Durchführung des Versuchs beachtet werden müssen (2.3 Unterpunkt Probe).

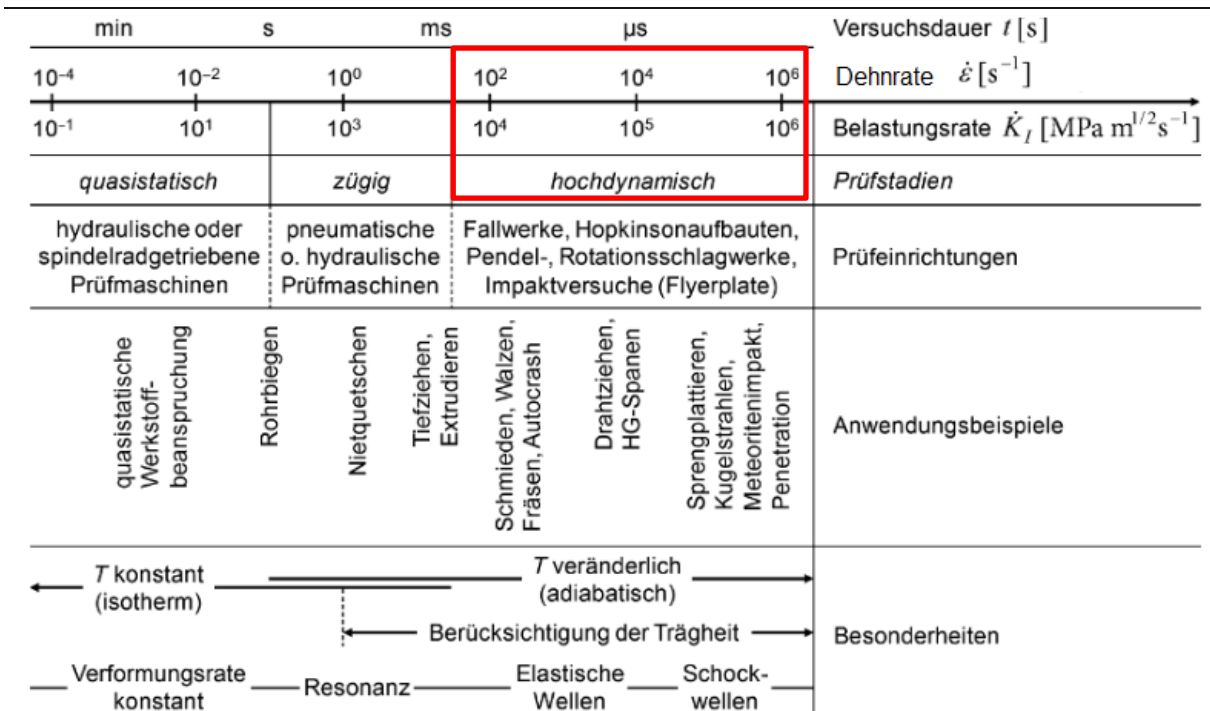


Abbildung 2: Übersicht von Fertigungsverfahren mit verschiedenen Dehn- und Belastungsraten sowie den Prüfvorrichtungen, welche diesen Belastungen entsprechen, [7, p. 182]

2.2.1 Methoden zur hochdynamischen Druck-Werkstoffprüfung

Cam Plastometer Versuch

Beim Cam Plastometer Versuch, der speziell für Druckversuche entwickelt wurde, wird die axiale Belastung über eine Nocke auf einem massiven Schwungrad auf die Probe aufgebracht. Für eine konstante Dehnrates während des Versuches muss auch die Rotationsgeschwindigkeit konstant sein, dies wird über den großen Anteil gespeicherter kinetischer Energie im Schwungrad und die rotierenden Komponenten der Anlage erreicht. Dieser Versuch wird angewendet, um den Widerstand von Materialien gegen Druckbelastung bei Dehnrates $\dot{\epsilon}$ zwischen $0,5$ und $200 s^{-1}$ zu ermitteln. [8] In Abbildung 3 ist ein Cam Plastometer Versuchsstand zu sehen.

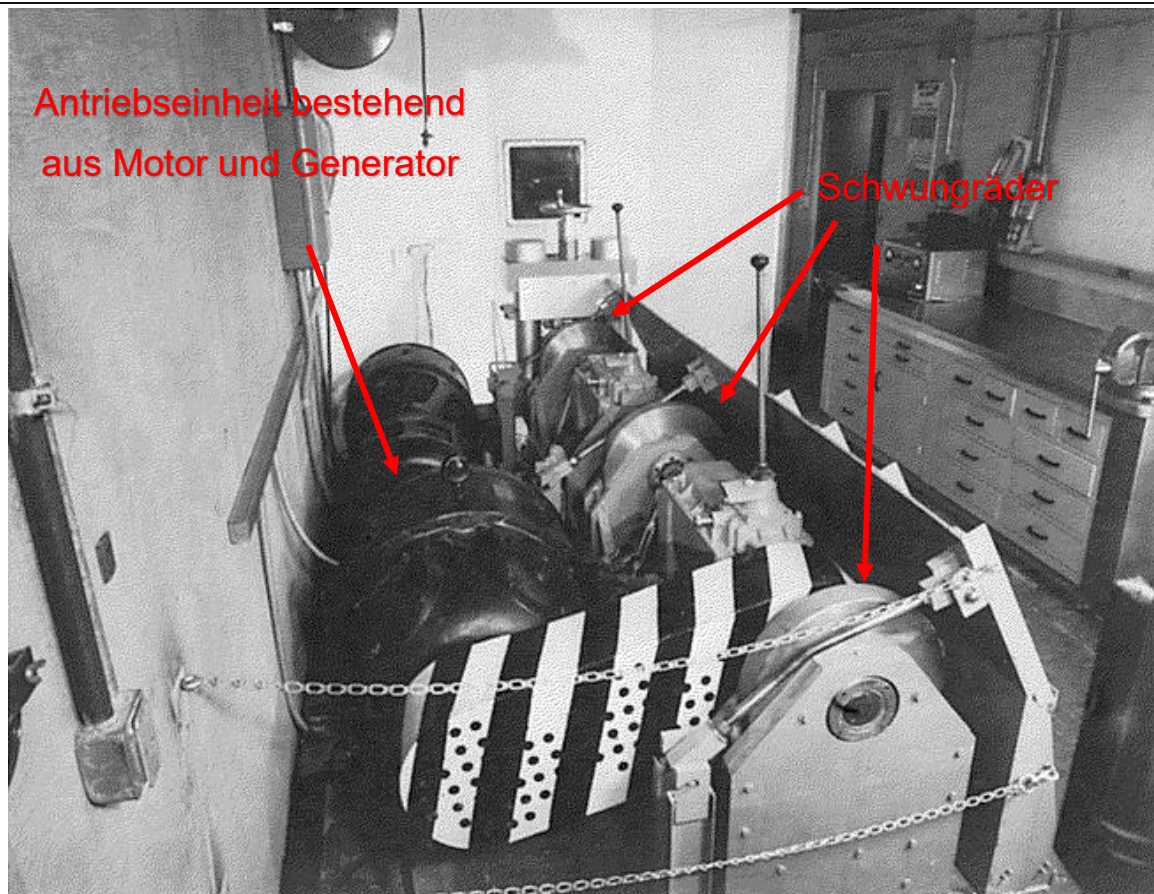


Abbildung 3: Cam Plastometer Versuchsstand, [8]

Drop Tower Compression Test / Fallwerksaufbauten

Bei diesem Versuch wird die Druckbelastung über die potenzielle Energie eines in Gewicht und Fallhöhe veränderbaren Prüfstempels aufgebracht [7, 8]. Der Versuchsaufbau besteht wie in Abbildung 4 zu sehen im Wesentlichen aus einem stabilen Säulengestell, einer Fallmasse mit Prüfstempel, einem Amboss und einem Verformungsbegrenzer [7]. Ein wesentlicher Punkt dieser Prüfmethodik ist die einfache Belastung des Probenkörpers, dazu werden triggergesteuerte, schnell arbeitende Bremssysteme eingesetzt [7].

„Um möglichst eine konstante Dehngeschwindigkeit in einem weiten Verformungsintervall der Probe zu garantieren, sollte die potenzielle Energie des Fallgewichtes mindestens das Dreifache der von der Probe oder dem Prüfaufbau absorbierten Energie betragen [7, p. 184].“

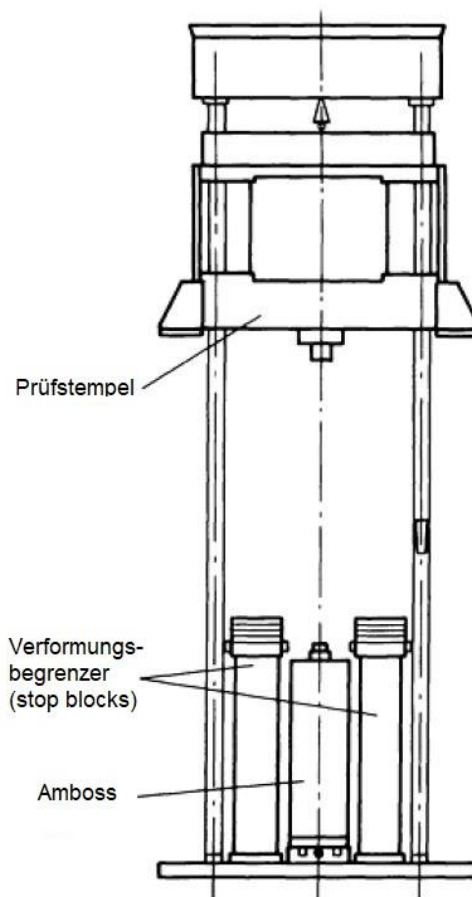


Abbildung 4: Drop Tower Test, in Anlehnung an [8]

Taylor Impact Test / Rod Impact Test

Der Taylor Impact oder auch Rod-Impact Test wurde auf Basis des Taylor Tests zur Messung der dynamischen Streckgrenze entwickelt und so weit verbessert, dass das gesamte Spannungs-Dehnungsdiagramm bei sehr hohen Dehnraten (zw. 10^4 und 10^5 s^{-1}) und hohen plastischen Verformungen abgebildet werden kann [8]. Beim klassischen Taylor Test wird eine zylindrische Probe auf eine feststehende Platte, welche durch z.B. eine Druckluftkanone beschleunigt wird, geschossen. Später wurde die feststehende Platte durch einen identischen zylindrischen Körper wie das Geschoss ersetzt, dadurch konnten unbekannte Einflüsse der Reibung an der Grenzfläche von Probe und Platte eliminiert werden [vgl.8]. Durch den Einsatz von High-Speed-Kameras kann die Deformation der Probe aufgezeichnet und zeitlich dokumentiert werden. In Abbildung 5 sieht man einen typischen Aufbau eines symmetrischen Rod-Impact-Versuches. Die identischen Zylinder müssen exakt planparallel zueinander sein und die Haltevorrichtung, in der der stationäre Zylinder über keramische Stifte eingespannt ist, ermöglicht eine genau axiale und plane Ausrichtung der beiden Zylinder zueinander [vgl.8].

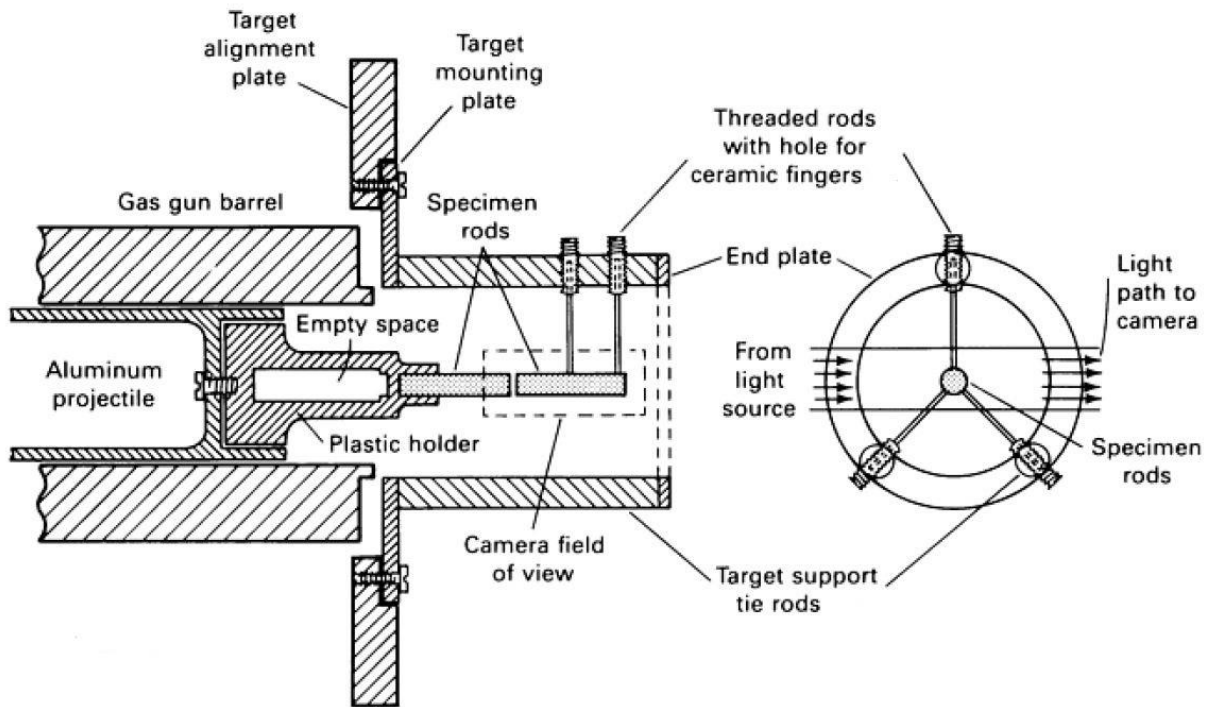


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines symmetrischen Rod Impact Versuches, in Anlehnung an [8]

Split-Hopkinson-Pressure-Bar Versuch für Druckbelastung

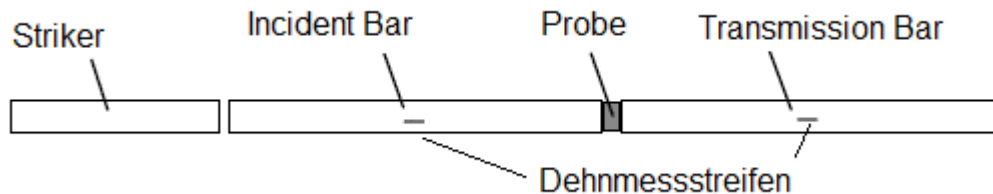


Abbildung 6: Grundlegender SHPB-Aufbau, in Anlehnung an [9]

Eine typische Konfiguration einer Versuchsanordnung der Stäbe, auch Bars genannt, und der zu untersuchenden Werkstoffprobe ist in Abbildung 6 dargestellt. Eine Probe ist zwischen zwei langen elastischen Bars (Incident- und Transmission-Bar) positioniert [10]. Das Auftreffen des Strikers auf das freie Ende der Incident Bar erzeugt eine longitudinale Druckwelle, die sich durch die Incident Bar ausbreitet [9]. Sobald die Druckwelle die Grenzfläche von Bar und Probe erreicht, wird ein Teil der Druckwelle reflektiert und ein Teil breitet sich durch die Probe bis in die Transmission Bar aus. Diese drei Wellen werden als Incident wave ε_i , Reflected wave ε_r und Transmitted wave ε_t bezeichnet. Sie werden über die angebrachten Dehnmessstreifen (DMS) aufgezeichnet, mit denen Spannung und Dehnung während der plastischen

Verformung der Probe bestimmt werden können. Zu erwähnen ist, dass die Stäbe während des Versuchs eine rein elastische Verformung erfahren.

Die genaue Funktionsweise und der technische Aufbau einer solchen Anlage ist Hauptbestandteil dieser Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

2.2.2 Methoden zur hochdynamischen Zug-Werkstoffprüfung

Split-Hopkinson-Bar für Zugversuche

„Das Wirkprinzip einer Split-Hopkinson-Bar für Zugversuche ist ähnlich jenem für Druckversuche. Die wesentlichen Unterschiede sind die Erzeugung der impulsförmigen Zugbelastung, die Probengeometrie und die Methoden, die Zugprobe zwischen Incident und Transmission Bar einzuspannen [8].“

Es gibt verschiedene Methoden, um einen Zugversuch auf einer SHPB-Anlage zu realisieren. Eine spezielle zylinderförmige Probe, die im Wesentlichen aus vier am Umfang gleichmäßig aufgeteilten Zugstäben besteht, wird, aufgesetzt auf den Incident Bar, auf eine hohle Transmission Bar geschossen [vgl.10, p. 29]. Auch wenn die Fertigung der Probe komplex ist, kann dieser Versuch auf einer SHPB-Anlage durchgeführt werden. Die Voraussetzung für die Anwendung eines wie in Abbildung 6 dargestellten Zugversuchs ist, dass die hohle Transmission Bar dieselbe Querschnittsfläche besitzt wie die Incident Bar [vgl.10, p. 29].

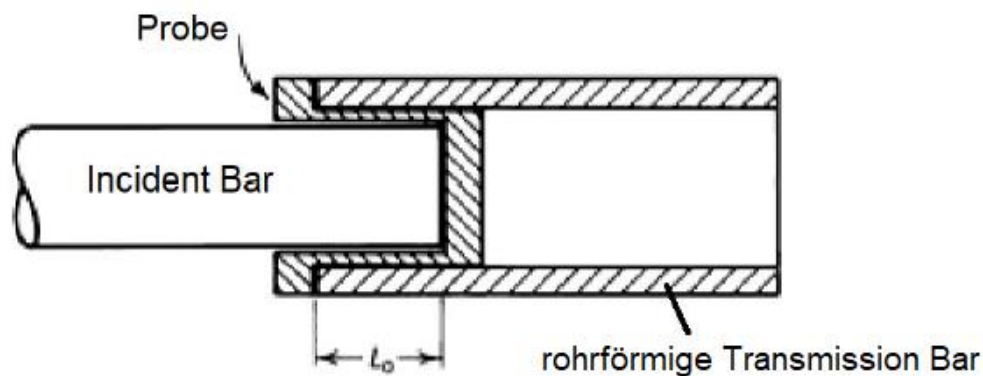


Abbildung 7: Zugversuch mit spezieller Transmission Bar und Probe, in Anlehnung an [10, p. 29]

In [8] werden noch weitere Methoden zur Split-Hopkinson Bar im Zugversuch vorgestellt, diese werden allerdings nicht in dieser Arbeit betrachtet, da diese vom Aufbau her nicht im SHPB-Druckversuch verwendet werden können.

Rotationsschlagwerk

Eine weitere Methode, um Zugversuche mit hohen Dehnraten $\dot{\epsilon}$ abzubilden, ist das Rotationsschlagwerk [8]. Wie in Abbildung 8 wird dabei eine Schlagkralle, die an einem massiven Schwungrad befestigt ist, über einen starken Elektromotor auf eine definierte Geschwindigkeit beschleunigt (bis zu $50 \frac{m}{s}$ entspricht ca. $\dot{\epsilon} = 5000s^{-1}$). Bei Erreichen der Prüfgeschwindigkeit wird die arretierte Schlagkralle entriegelt (elektromagnetische Schaltung) und schlägt auf das am Probenende verschraubte Querjoch. Es kommt zu einer schlagartigen Verformung unter Zugbelastung bis zum Bruch. [vgl.7, pp. 186-187]

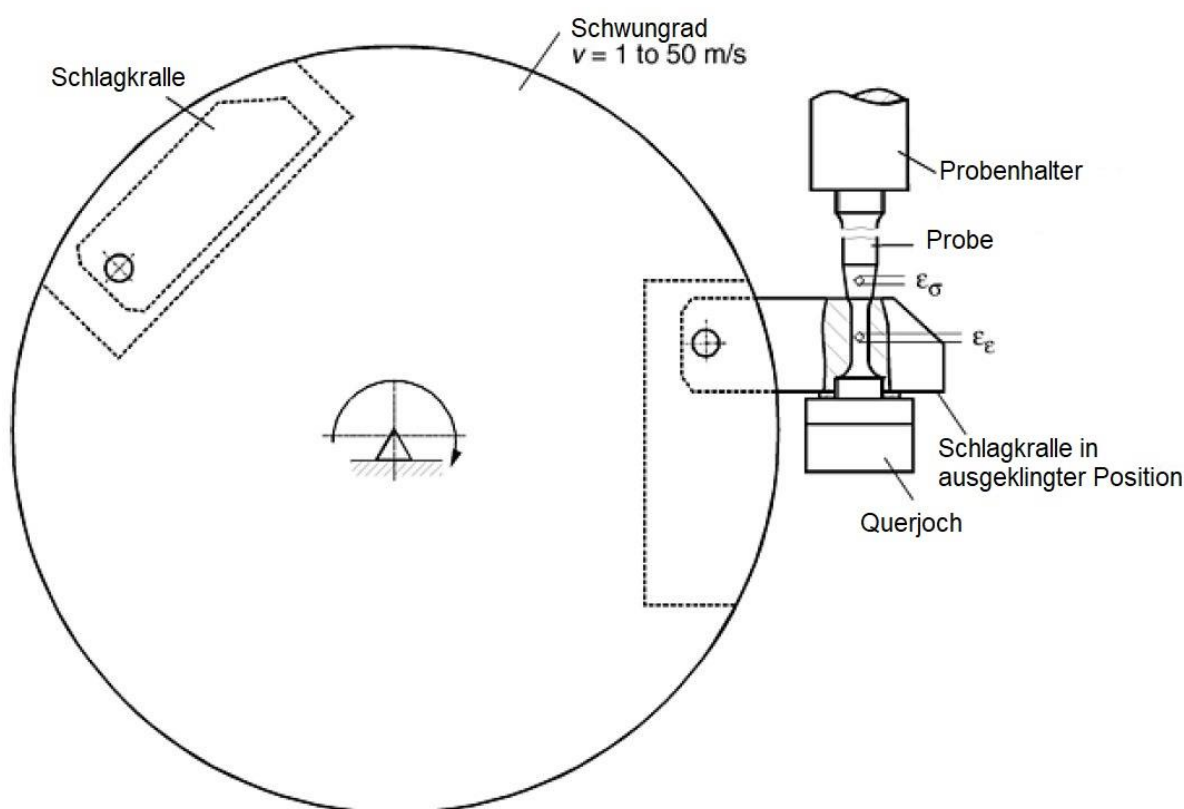


Abbildung 8: Aufbau eines Rotationsschlagwerk, in Anlehnung an [8]

Expanding Ring Test

Der Expanding Ring Test ist eine Methode zur Messung von Dehnraten in Höhe von $10^4 s^{-1}$ unter Zugbeanspruchung. Der Test basiert auf einer plötzlichen radialen Beschleunigung eines aufgrund einer Explosion oder einer elektromagnetischen Entladung beschleunigten dünnen Rings, der zu einem frei fliegenden Körper wird und sich aufgrund seiner inneren Belastungen in radialer Richtung ausdehnt [vgl.8]. Für die Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Daten muss die radiale Verschiebung als eine

Funktion der Zeit berechnet werden, die Dehnung selbst ist proportional mit der Änderung des Radius und gegeben durch [8]:

$$\varepsilon = \ln \frac{R}{R_0} \quad (2)$$

Allerdings gibt es bei diesem Test auch einige Schwierigkeiten, wie etwa das nicht konstante Verhalten der Dehnrates. Daher ist dieser Versuch auch kein Standardversuch und nur einige Labore sind in der Lage, diesen Test durchzuführen [8]. In Abbildung 9 ist ein Expanding Ring Test schematisch dargestellt.

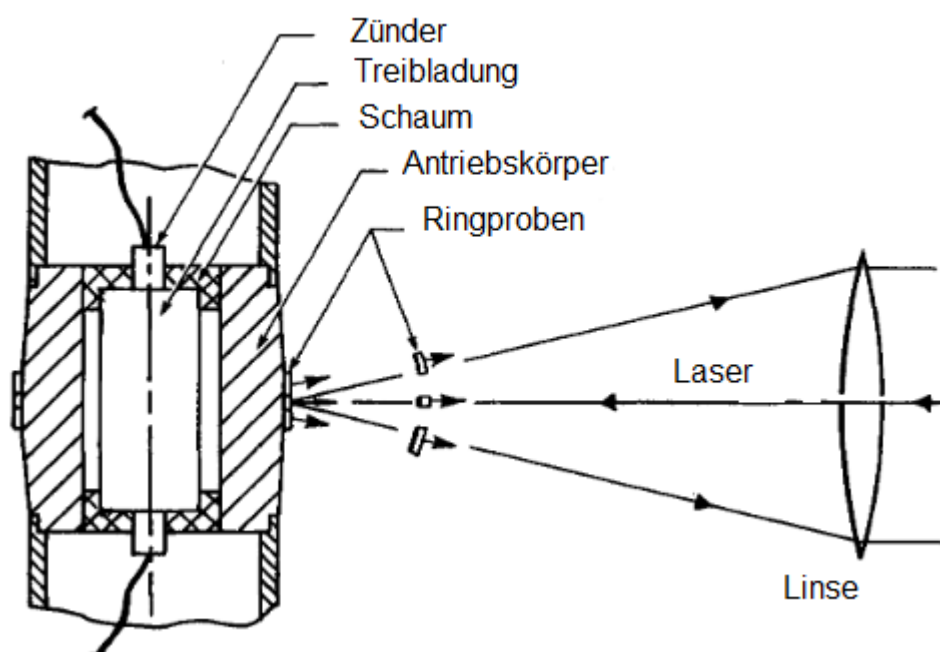


Abbildung 9: Expanding Ring Test, in Anlehnung an [11, C5-585]

2.2.3 Gegenüberstellung der Prüfmethoden

In Tabelle 1 sind die Prüfmethoden, die oben vorgestellt wurden, mit ihren durchschnittlich erreichbaren Dehnraten aufgelistet. Für die in der Zerspanung entstehenden Dehnraten von bis zu 10^6 eignen sich insbesondere folgende Prüfmethoden:

- SHPB
- Taylor Impact Test
- Expanding Ring Test

Aufgrund der Komplexität des Expanding Ring Test wurde die Entscheidung, welcher Versuchsstand am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologie der

Technischen Universität Wien errichtet werden soll, zwischen einem SHPB-Test und einem Taylor Impact Test getroffen. Die Wahl fiel auf den SHPB-Versuch, da dieser mit überschaubaren Modifikationen auch Versuche mit uniaxialer Zugbelastung ermöglicht.

Tabelle 1: Übersicht der erreichbaren Dehnraten der vorgestellten Prüfmethode

Erreichbare Dehnraten	Prüfmethode
[s ⁻¹]	
Druckversuche	
<0,1	Quasistatische Prüfverfahren
0,1–500	Cam plastometer and drop test
200–10 ⁴	Split-Hopkinson Pressur Bar
10 ³ –10 ⁵	Taylor impact test
Zugversuche	
<0,1	Quasistatische Prüfverfahren
100–10 ³	SHPB für Zugbelastung
~10 ³	Rotationsschlagwerk
~10 ⁴	Expanding Ring Test

2.3 Bestandteile einer SHPB-Anlage

In Ergänzung zur schematischen Darstellung zur Anordnung der Bars in Abbildung 6 ist in folgender Abbildung 10 der wesentliche Aufbau einer SHPB-Anlage dargestellt. In diesem Kapitel werden die Bestandteile einer Versuchsanlage einzeln beschrieben.

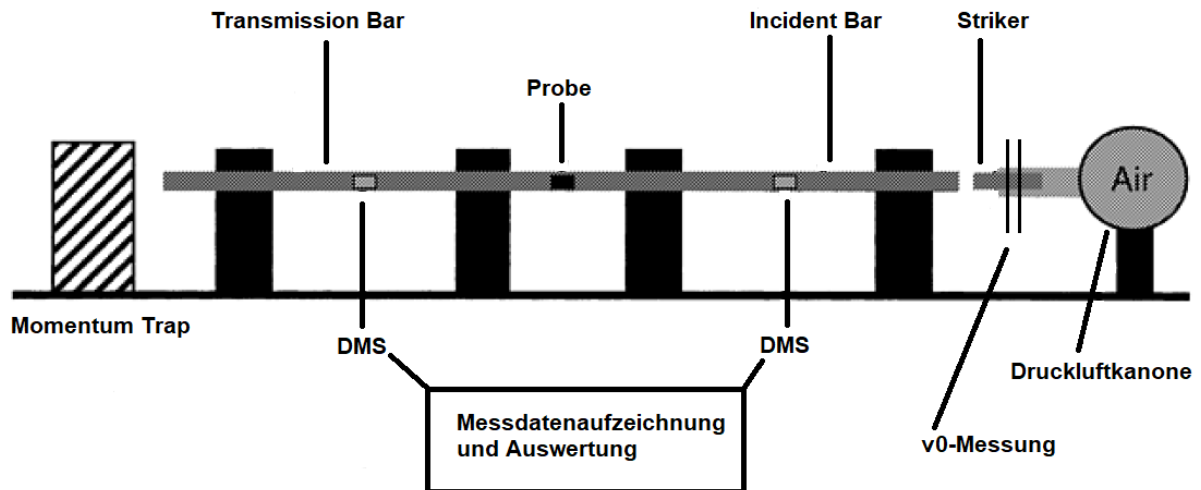


Abbildung 10: Grundlegende Bestandteile einer SHPB-Anlage, in Anlehnung an [10, p. 9]

2.3.1 Druckluftkanone

Die Druckluftkanone beschleunigt ein Projektil (Striker Bar), das auf den Incident Bar aufschlägt, um eine Druckwelle zu erzeugen (Kapitel Impulserzeugung 2.4.1). Obwohl Druckluftkanonen heute Stand der Technik sind, wurden zu Beginn des Verfahrens Treibladungen genutzt, um den erforderlichen Impuls in den Bars zu erzeugen [12, p. 1]. Die Geschwindigkeit, mit der der Striker auf den Incident Bar aufschlägt, wird dabei im Wesentlichen über den Kammerdruck und die Länge des Kanonenlaufes bestimmt, wie Rohrbach et al. in ihrer Arbeit [13] beschreiben. Im Allgemeinen gilt, dass für den SHPB-Versuch die Impulserzeugung kontrollierbar, stabil und wiederholbar sein soll, was durch den Einsatz von Druckluftkanonen gegeben ist [12, p. 8].

2.3.2 V_0 -Messung

Die Aufprallgeschwindigkeit des Strikers ist eine wichtige Eingangsgröße beim SHPB-Versuch, so hängen die Amplitude der Druckspannung und die Dehnung im Incident Bar von der Aufprallgeschwindigkeit ab (Kapitel 4.4.1 Geschwindigkeitsmessung des Strikers). Die Geschwindigkeit wird dabei mit optischen oder magnetischen Sensoren möglichst nahe am Ort des Aufpralls gemessen [12, p. 8]. Eine Möglichkeit der Geschwindigkeitsmessung ist in Abbildung 11 dargestellt. Über zwei Fotodioden/Fototransistor Paare wird detektiert, wie lange der Striker braucht, um die definierte Strecke zurückzulegen [14, p. 20]. In dieser Abbildung sind auch Entlüftungsbohrungen im Kanonenlauf zu erkennen, diese sollen eine konstante Aufprallgeschwindigkeit beim Aufprall auf den Impact-Bar gewährleisten [12, p. 8].

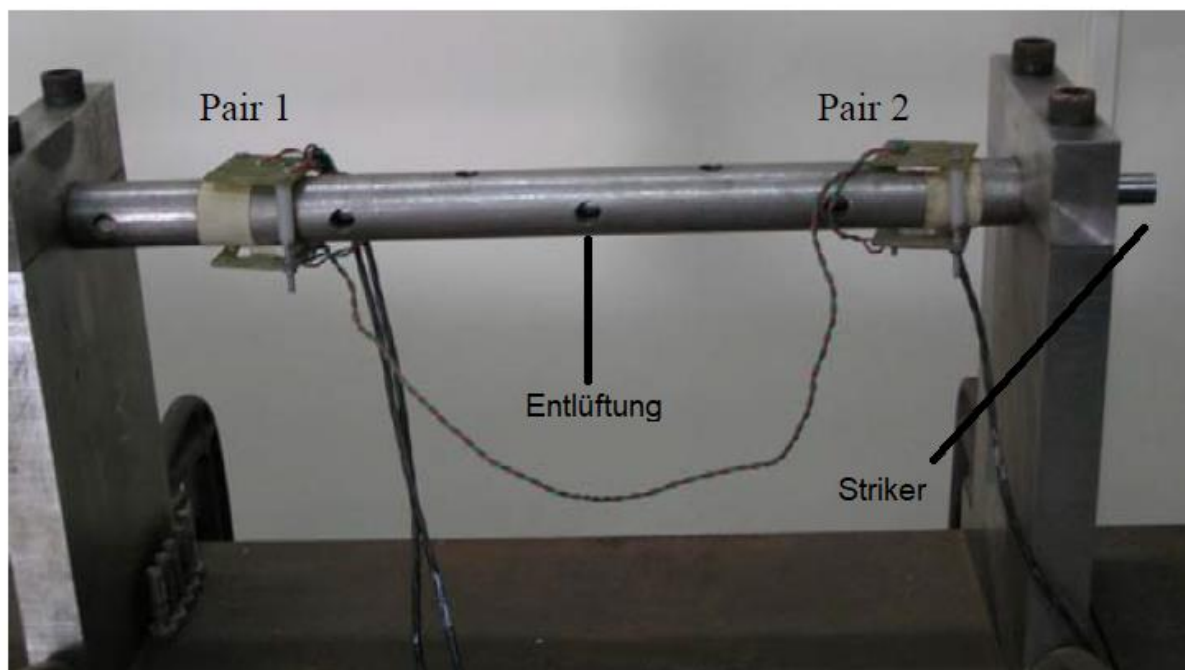


Abbildung 11: optische v_0 -Messung, [14, p. 20]

2.3.3 Bars

Die Herzstücke einer SHPB-Anlage sind die Kolsky Bars. Unter diesem Begriff sind folgende Komponenten aus Abbildung 10 zusammengefasst:

- Incident Bar
- Transmission Bar
- Striker Bar

Typischerweise sind alle Bars aus demselben Werkstoff gefertigt und besitzen denselben Durchmesser [12]. Typische Bar Werkstoffe sind zum Beispiel AISI-SAE-4340, Maraging Stähle oder Nickelbasislegierungen wie Inconel. Die technischen Anforderungen an den Barwerkstoff sind eine hohe Zugfestigkeit, um während der plastischen Verformung des Specimen unter den hohen Spannungen der Impulswelle ein rein elastisches Werkstoffverhalten von Incident und Transmission Bar zu gewährleisten. Bei der Wahl des Barwerkstoffes für einen SHPB-Versuch ist das zu untersuchende Material das Hauptentscheidungskriterium. Materialien mit niedrigerem E-Modulen können ein stärkeres Rauschverhalten der Messsignale aufweisen. Für Materialien mit niedriger Festigkeit, z.B. Polymere oder Schaumwerkstoffe, ist es oft von Vorteil, einen Barwerkstoff zu wählen, der einen niedrigeren E-Modul besitzt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. [10]

Tabelle 2: Typische Barwerkstoffe für SHPB-Versuche, in Anlehnung an [10]

Bar-Werkstoff	E-Modul
Maraging Stähle	210 GPa
Titan	110 GPa
Aluminium	90 GPa
Magnesium	45 GPa
Polymer	< 20 GPa

2.3.4 Probe

Die zu untersuchende Werkstoffprobe muss einigen grundlegenden Annahmen entsprechen. Tekalur et al. geben in ihrer Arbeit [15] drei grundlegende Bedingungen für die geometrische Auslegung der Werkstoffprobe an:

- Der Effekt der Reibung an der Grenzfläche ist vernachlässigbar.
- Der Effekt der axialen Trägheit in der Probe ist vernachlässigbar.
- Der Effekt der radialen Trägheit in der Probe ist vernachlässigbar klein.

Um diesen drei Bedingungen zu genügen und Fehler durch Trägheits- und Reibungseffekte zu minimieren, ist eine Probengröße zu wählen, die den Oberflächenunterschied minimiert und einem Längen- zu Durchmesser Verhältnis von

$$0,5 \leq \frac{L_S}{D_S} \leq 1 \quad (3)$$

entspricht. Bei der Fertigung der Proben ist weiters darauf zu achten, dass die Seiten der Probe flach und parallel sind mit einer Toleranz von 0,01 mm oder besser. [10, p. 41] Um Reibungseffekte zu minimieren, welche zwischen Probe und Incident Bar entstehen, werden Schmiermittel an den Berührflächen aufgebracht. Eingesetzt werden unter anderem Hochvakuumfett und Vaseline. [12, p. 45]

2.3.5 Dehnmessstreifen

Für die Messung der Dehnung an Incident- und Transmission Bar sind, neben Sonderanwendungen (Miniature Kolsky Bar in 2.5), Dehnmessstreifen zum Standard geworden [12, p. 9]. An jeder der beiden Bars werden zwei gegenüberliegende DMS appliziert (Abbildung 12).

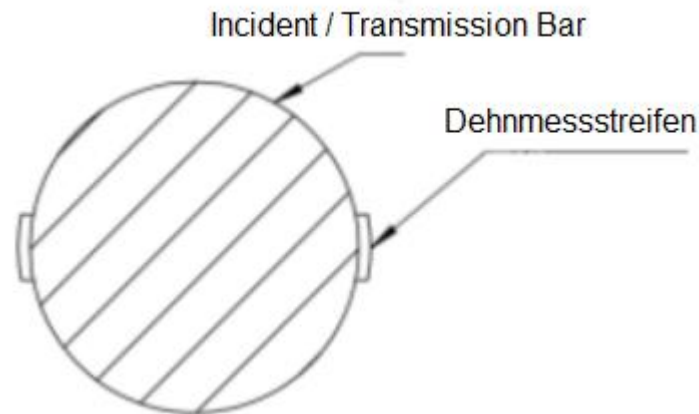


Abbildung 12: Lage der DMS am Umfang der Bars, in Anlehnung an [16, 5]

Chen et al. gehen in ihrem Buch [12, pp. 23-24] näher darauf ein, warum die DMS gegenüber angebracht werden müssen. Kleine Fehler in der Ausrichtung der Bars können zu Biegungen während des Versuchs führen, die dazu führen können, dass die Ergebnisse der Dehnungsmessung verzerrt werden. Wenn die DMS gegenüber angebracht werden, führt das dazu, dass ein DMS eine Widerstandsänderung aufgrund einer zusätzlichen Druckbelastung misst, während der andere die im Betrag gleich große, aber mit anderem Vorzeichen behaftete Zugbelastung misst. Durch die Verschaltung der DMS in einer Wheatstone Brücke heben sich diese Effekte gegenseitig auf.

2.3.6 Messdatenaufzeichnung und Auswertung

Zur Aufzeichnung der Daten während des Versuchs werden hauptsächlich Oszilloskope oder High-Speed analog/digital Messkarten in Verbindung mit Verstärkern eingesetzt. Verstärker und Aufzeichnungsgerät müssen aufgrund der sehr geringen Versuchsdauer von durchschnittlich weniger als einer Millisekunde einen sehr hohen Frequenzgang aufweisen [12, p. 8]. In Abbildung 13 ist gut zu erkennen, dass das Signal bei zu geringen Frequenzen nicht verwendbar ist, da die hochfrequenten Anteile der Wellen nicht erfasst werden können. Chen et al. definieren eine Frequenz von 100 kHz als absolutes Minimum für alle Bestandteile des eingesetzten Datenaufzeichnungssystems [12, p. 9].

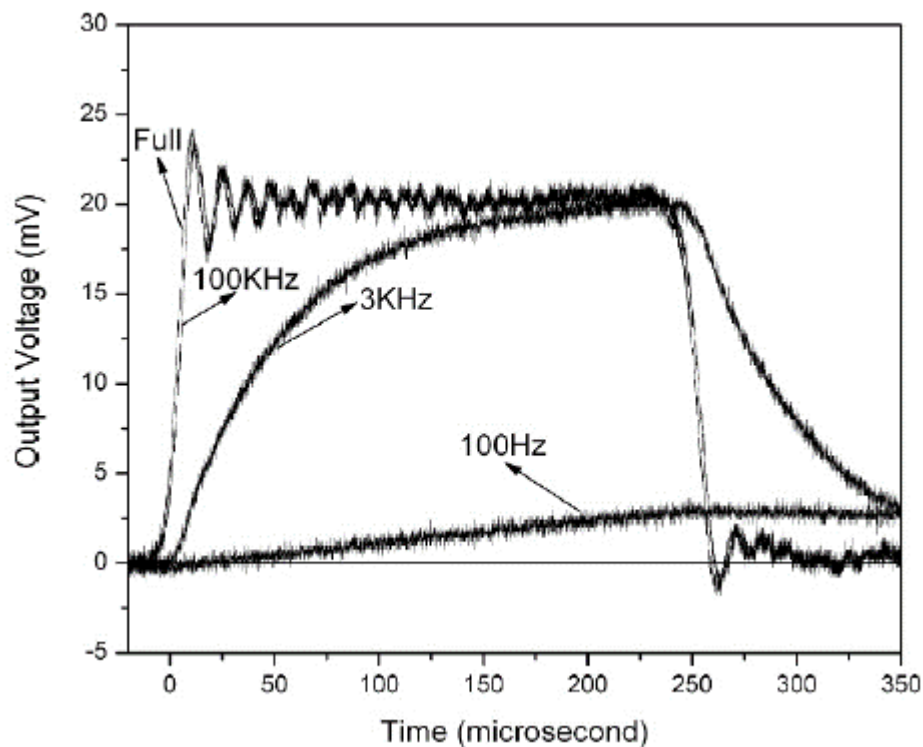


Abbildung 13: Messsignal gefiltert mit unterschiedlichen Frequenzen, [12, p. 10]

2.4 Grundlagen des SHPB-Versuchs

In Abbildung 14 ist eine weitere schematische Darstellung einer SHPB dargestellt. Diese Abbildung zeigt, welche Vorgänge während des Versuches in welchen Bereichen der Anlage passieren. In diesem Kapitel sollen nach dieser Einteilung die technologischen Grundlagen und mathematischen Zusammenhänge aufgezeigt werden.

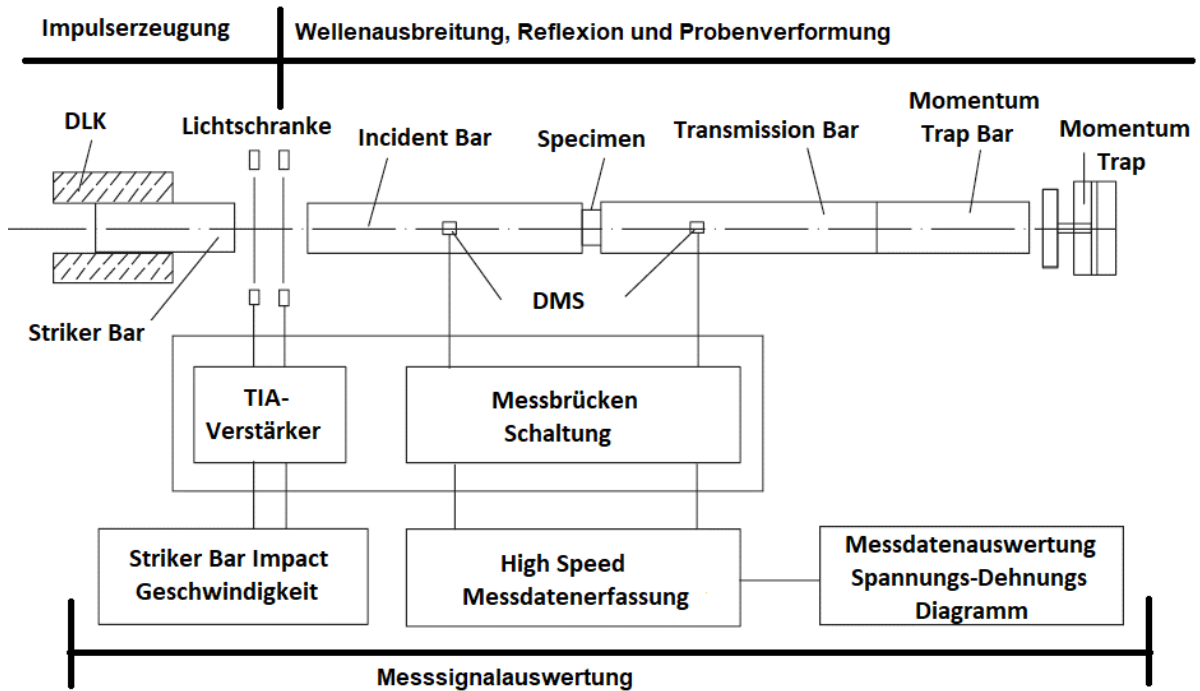


Abbildung 14: Grundlagen des SHPB Versuchs, in Anlehnung an [17, p. 77]

2.4.1 Impulserzeugung

Die wichtigste Voraussetzung für die Impulserzeugung in SHPB-Versuchen ist, dass der erzeugte Impuls kontrollierbar, stabil und vor allem reproduzierbar ist. Im Allgemeinen gibt es zwei grundlegende Ansätze zur Impulserzeugung, statisch und dynamisch. In Abbildung 15 sieht man eine Methode einer statischen Impulserzeugung. Der Incident Bar wird über eine am freien Ende angelegte Druckbeanspruchung statisch vorgespannt. Dabei wird der Incident Bar über eine Klammer fixiert. Wenn die Klammer gelöst wird, erzeugt die gespeicherte Energie eine Druckwelle im entspannten Teil des Incident Bar, die sich dann in Richtung der Probe ausbreitet. [12, p. 8]

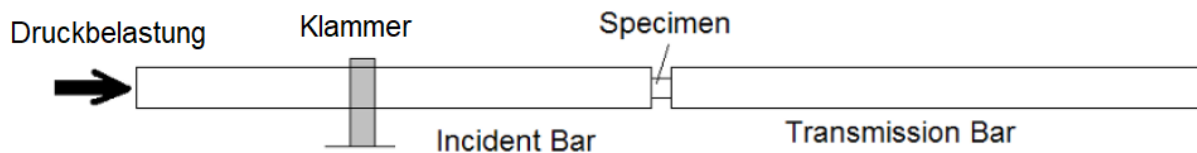


Abbildung 15: Statische Impulserzeugung, in Anlehnung an [12, p. 8]

Die zweite Methode ist die dynamische Impulserzeugung. Wurden in den Anfangsjahren der Kolsky Bars noch teilweise Treibladungen für die dynamische

Impulserzeugung eingesetzt, so haben sich Druckluftkanonen, die einen Striker beschleunigen, welcher durch den Aufprall auf den Incident Bar eine Druckwelle erzeugt, etabliert. Der Striker Bar wird über eine plötzliche Freisetzung der Druckluft in der Druckkammer der DLK in einem langen Kanonenrohr beschleunigt und schlägt dann auf den Incident Bar auf. Diese Art der Impulserzeugung hat den Vorteil einer präzisen Justierung der Aufprallgeschwindigkeit über den voreingestellten Druck der DLK. Entlüftungsbohrungen am Ende des Kanonenrohrs stellen eine konstante Mündungsgeschwindigkeit sicher [12, p. 8].

Entstehung der Druckwelle in der Incident Bar:

Sharma et al. beschreiben in ihrer Arbeit die Entstehung der Druckwelle folgendermaßen (der Ablauf ist in Abbildung 16 graphisch dargestellt) [14]:

Schlägt der von der DLK beschleunigte Striker auf den Incident Bar auf, so entstehen ausgehend von der Kontaktfläche Druckwellen in beiden Stäben (a). Die Druckwellen breiten sich mit der materialabhängigen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit C_0 aus (b), bis die Druckwelle im Striker Bar das linke Ende erreicht (c). Am freien Ende des Striker Bars wird die Druckwelle reflektiert und breitet sich als Zugwelle wieder in Richtung Kontaktfläche aus (d). Währenddessen breitet sich die Druckwelle im Incident Bar weiter aus (e), bis die Zugwelle im Striker die Kontaktfläche erreicht und Striker Bar und Incident Bar voneinander trennt. Ab diesem Zeitpunkt bleibt die Druckwelle im Incident Bar konstant (f).

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass die Länge der Druckwelle im Incident Bar gleich zweimal der Länge des Striker Bars ist [14].

$$l_{DW} = 2 * l_{st} \quad (4)$$

l_{st} Striker Bar Länge [m]

l_{DW} Länge der generierten Druckwelle im Incident Bar [m]

Die Dauer der Druckwellenerzeugung hängt von der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit C_0 des Barwerkstoffes ab und beträgt [14]:

$$t_{DW} = 2 * \frac{l_{st}}{C_0} \quad (5)$$

t_{DW} Dauer der Druckwellenerzeugung [s]

C_0 Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Barmaterials [m/s]

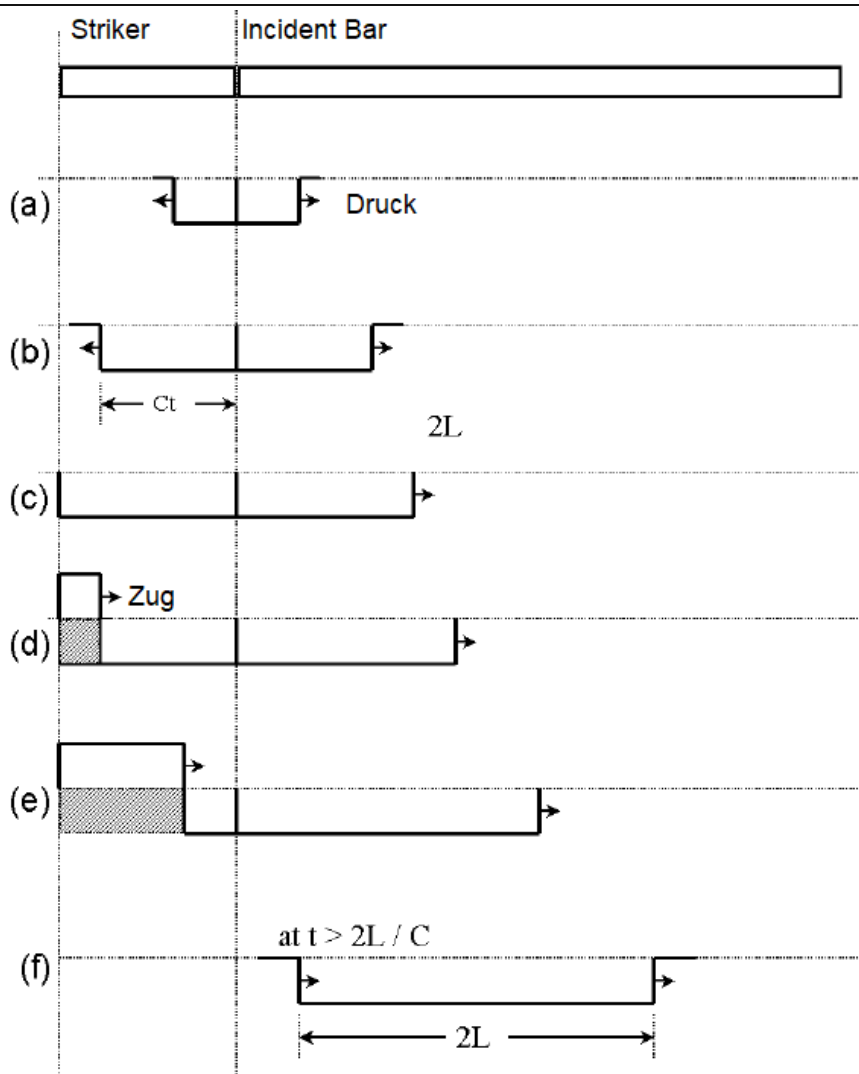


Abbildung 16: Druckwellenentstehung im Incident Bar, in Anlehnung an [14]

2.4.2 Wellenausbreitung, Reflexion und Probenverformung

Wellenausbreitung

Die durch den Aufprall des Striker Bars erzeugte Impulswelle breitet sich zunächst im Incident Bar in Stabrichtung aus. Wie bereits oben erwähnt gilt für den Incident und Transmission Bar die Voraussetzung einer rein elastischen Verformung. Im Folgenden sollen die grundlegenden Annahmen und Zusammenhänge der eindimensionalen Wellenausbreitung erläutert werden.

In seiner Arbeit [17] beschäftigt sich Wang ausführlich mit den Grundlagen der eindimensionalen Wellenausbreitung. Die Theorie der eindimensionalen Wellenausbreitung im SHPB-Versuch ist nur gültig, wenn der Durchmesser der Bars

klein gegenüber der Länge der Bars ist (Länge mindestens 10 mal Durchmesser) [17, p. 79].

Eine grundlegende Annahme für die weitere Betrachtung ist jene, dass die Spannung abhängig von der Dehnung ist [17, p. 12].

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) \quad (6)$$

σ Spannung [N/m²]

ε Dehnung

Da die Geschwindigkeit der Spannungswelle sehr hoch ist, kann der Wärmeaustausch zwischen zwei benachbarten Elementen in der kurzen Zeit, in der sich die Welle zwischen ihnen ausbreitet, vernachlässigt werden. Dadurch kann die Annahme getroffen werden, dass der elastische Deformationsprozess in den Bars adiabatisch abläuft. Deshalb werden auch keine physikalischen Zusammenhänge wie etwa die Energieerhaltung näher betrachtet. [vgl. 17, p. 12]

Der eindimensionale Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung in axialer Stabrichtung (für die Berechnung definiert als Y-Richtung) ist gegeben durch [14]:

$$\sigma = E * \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7)$$

E E-Modul des Barmaterials [Pa]

u Verschiebung eines Elements in Stabrichtung [mm]

Die eindimensionale Bewegungsgleichung in Stabrichtung ist gegeben durch [14].

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = \rho * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (8)$$

ρ Dichte [kg/m³]

t Zeit [s]

Setzt man Gleichung (7) in Gleichung (8) ein erhält man

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (9)$$

Führt man nun die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit C_0 mit

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \tag{10}$$

ein, so ergibt sich die eindimensionale Bewegungsgleichung einer Welle:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - C_0^2 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \tag{11}$$

Die Annahme einer eindimensionalen Wellenausbreitung ist für den SHPB-Versuch essenziell und wird im späteren Verlauf noch weiter vertieft.

In Abbildung 17 sieht man die Ausbreitung der Wellen entlang des SHPB-Aufbaus. Die longitudinale Spannungswelle (auch als Incident wave/pulse ϵ_i bezeichnet) breitet sich entlang dem Incident Bar aus und trifft am Ende dieser auf den zwischen Incident und Transmission Bar eingespannten Specimen. Während des gesamten Versuches dürfen in Striker, Incident und Transmission Bar nur elastische Verformungen auftreten. Ein Teil der Druckwelle wird an der Grenzfläche zwischen Incident Bar und Specimen reflektiert und breitet sich als Zugwelle (auch als Reflected wave/pulse ϵ_r bezeichnet) wieder in Richtung des Strikers aus. Der andere Teil der Incident wave breitet sich durch den Specimen in Richtung der Transmission Bar aus (auch als Transmitted wave/pulse ϵ_t bezeichnet). [vgl.14]

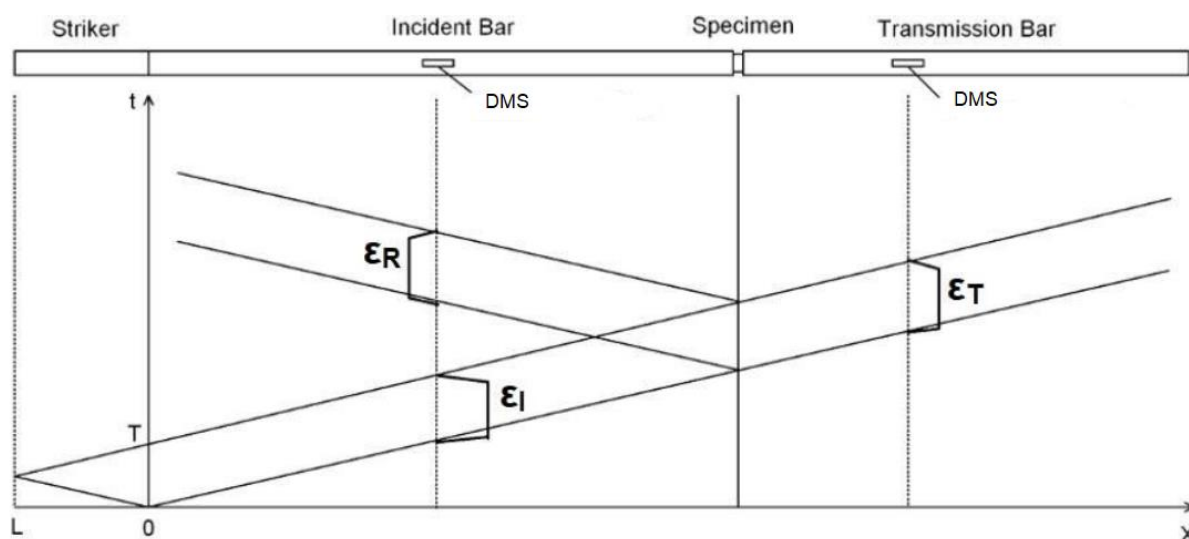


Abbildung 17: Wellenausbreitung entlang der Kolsky Bars, in Anlehnung an [12, p. 11]

Reflexion

In Abbildung 17 ist die Reflexion der Welle gut zu erkennen. Wenn eine Welle auf eine Diskontinuität trifft, wird ein Teil der Welle reflektiert. Im SHPB-Versuch sind diese Reflexionen in erster Linie auf Änderungen der Querschnittsfläche oder auf Impedanzänderungen des Werkstoffes zurückzuführen. Genau diese beiden Fälle sind am Übergang von Incident Bar zu Probe der Fall. [vgl.14, pp. 11-12]

Die Impedanz eines Werkstoffes ist folgendermaßen definiert:

$$Z = A * \rho * C_0 \quad (12)$$

Z Impedanz [kg/s]

A Querschnittsfläche des Bars / der Probe [m^2]

Spannung, Dehnung und Dehnrage während der Probeverformung

Die Voraussetzungen für den SHPB-Versuch sind neben der eindimensionalen Wellenausbreitung ein gleichmäßiger Spannungs- und Dehnungszustand in der Probe [17, p. 77].

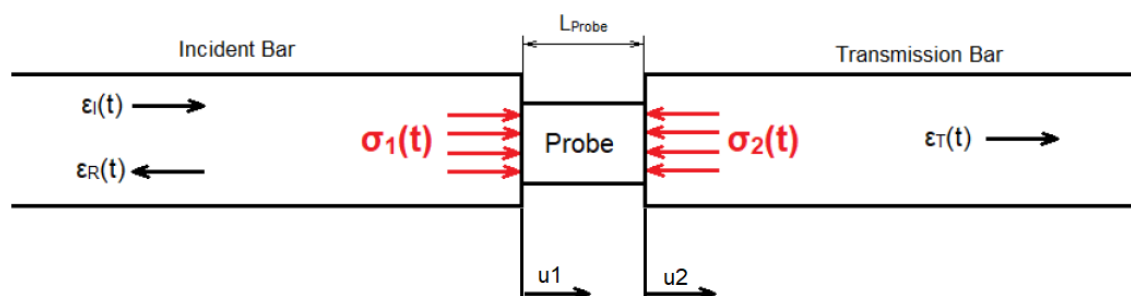


Abbildung 18: Probenbelastung während des Versuchs

In Abbildung 18 ist die Belastung der Probe während des Versuchs dargestellt. Ausgehend von der Verschiebung der Probe am linken (u_1) und rechten (u_2) Ende der Probe sind die Geschwindigkeiten der Probe am linken und rechten Ende der Probe bei eindimensionaler Wellenausbreitung gegeben zu [12, p. 12]

$$v_1 = C_b(\varepsilon_I - \varepsilon_R) \quad (13)$$

$$v_2 = C_b \varepsilon_T \quad (14)$$

C_b Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Barmaterials [m/s]

v_1 Partikelgeschwindigkeit am linken Ende der Probe [m/s]

v_2 Partikelgeschwindigkeit am rechten Ende der Probe [m/s]

$\varepsilon_I, \varepsilon_R, \varepsilon_T$ Dehnungsimpuls am DMS von Incident-, Transmitted- und Reflected Pulse

Die durchschnittliche technische Dehnrate und Dehnung in der Probe ist nach [12, p. 12] definiert.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1 - v_2}{L_s} = \frac{C_b}{L_s} (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) \quad (15)$$

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon} dt = \frac{C_b}{L_s} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \quad (16)$$

L_s Länge der Probe [m]

ε Dehnung der Probe

$\dot{\varepsilon}$ Dehnrate der Probe [s⁻¹]

Durch folgende elastische Beziehungen können die Spannungen am linken und rechten Ende der Probe berechnet werden [12, p. 13]:

$$\sigma_1 = \frac{A_b}{A_s} * E_b (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (17)$$

$$\sigma_2 = \frac{A_b}{A_s} * E_b * \varepsilon_T \quad (18)$$

A_b Querschnittsfläche der Bars [m²]

A_s Querschnittsfläche der Probe [m²]

σ_1 Spannung am linken Rand der Probe [N/m²]

σ_2 Spannung am rechten Rand der Probe [N/m²]

E_b E-Modul des Barmaterials [Pa]

Wie bereits oben erwähnt muss ein gleichmäßiger Spannungszustand der Probe gegeben sein, sodass

$$\sigma_1 = \sigma_2 \quad (19)$$

beziehungsweise

$$\varepsilon_I + \varepsilon_R = \varepsilon_T \quad (20)$$

gilt. Dadurch kann man die Gleichungen zur Bestimmung der in der Probe auftretenden Spannung, Dehnung und Dehnrate vereinfachen zu:

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_b}{L_s} \varepsilon_R \quad (21)$$

$$\varepsilon = -2 \frac{C_b}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (22)$$

$$\sigma = \frac{A_b}{A_s} * E_b * \varepsilon_T \quad (23)$$

σ Spannung in der Probe

Das negative Vorzeichen ist der Richtung der Partikelverschiebung in Abbildung 18 geschuldet und ist im Druckversuch positiv. Diese Methode wird 1-wave-analysis genannt, da sie nur die Reflected wave zur Berechnung der Dehnung benutzt [10, p. 18].

Allerdings ist der Gleichgewichtszustand der Spannung in der Probe in der Realität nicht sofort gegeben. Am Beginn der Belastung der Probe ist ein sogenannter „ringing-up“-Effekt zu beobachten. Daher wurde im Laufe der Zeit eine Verbesserung eingeführt, die zur Berechnung der Spannung alle drei Dehnungsimpulse miteinbezieht [vgl. 10, p. 18]. Diese wird als 3-wave-analysis bezeichnet.

$$\sigma = \frac{A_b}{2A_s} * E_b (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T) \quad (24)$$

2.4.3 Messignalauswertung

Der Incident pulse (gleiches gilt für Transmitted und Incident pulse) verursacht eine elastische Dehnung in den Bars, die von den DMS detektiert wird. Wird der DMS durch die örtliche Dehnung belastet, resultiert das in einer Verlängerung bzw. einer Abnahme des Querschnitts des Messgitters, was wiederum zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes des DMS führt [14, p. 30].

$$\Delta R = \rho_R \frac{\Delta L}{\Delta A} \quad (25)$$

ΔR Änderung des Widerstandes [Ω]

ρ_R spezifischer Widerstand [Ωm]

ΔL Längenänderung des Leiterwerkstoffes [m]

ΔA Querschnittsänderung des Leiterwerkstoffes [m]

Für die Auswertung der Dehnung müssen die aufgezeichneten Spannungen in die tatsächliche Dehnung umgerechnet werden. Der proportionale Faktor für die Umrechnung der Widerstandsänderung auf die Längenänderung und damit die Dehnung wird k-Faktor genannt und ist definiert durch [14, p. 30]

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{\Delta L}{L_0} = k\varepsilon \quad (26)$$

k k-Faktor des DMS

Für die Auswertung der Dehnung wird eine Wheatstone-Brücke verwendet, die die Widerstandsänderung der DMS in eine Spannungsänderung konvertiert, die anschließend ausgewertet werden kann [14, p. 30].

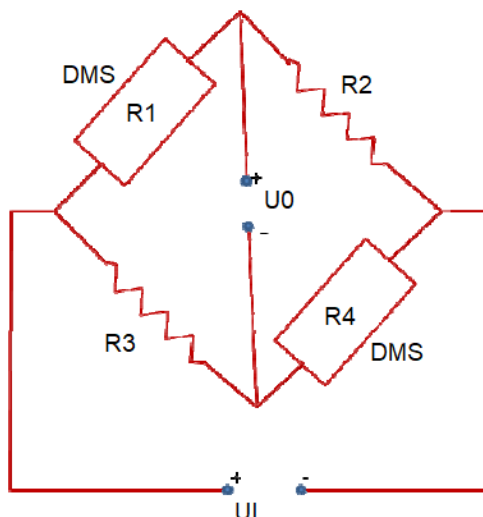


Abbildung 19: Wheatstone Brücke in Halbrückenkonfiguration, in Anlehnung an [12, p. 21]

Die Wheatstone Brückenschaltung in Abbildung 19 ist eine Halbbrücke, bei der die DMS gegenüber angeordnet sind. Die anderen beiden Widerstände sollen den gleichen Widerstand wie der Nennwiderstand der DMS besitzen [12, p. 21]. Wenn der DMS in axialer Richtung deformiert wird (Zug oder Druck), ändert sich der Widerstand der DMS,

$$R_1 = R_4 = R_{DMS} = R + \Delta R \quad (27)$$

wobei R der Nennwiderstand der DMS ist und auch $R=R_2=R_3$ wie oben erwähnt gilt. Die Ausgangsspannung U_0 der Brückenschaltung berechnet sich mit einer bestimmten Speisespannung der Wheatstone Brücke U_I zu [12, p. 22]

$$U_0 = \left(\frac{R_4}{R_2 + R_4} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) U_I \quad (28)$$

Nach Einsetzen ergibt sich für U_0

$$U_0 \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta R}{R} U_I \quad (29)$$

Setzt man nun den Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Dehnung (26) in (29) ein, berechnet sich die Dehnung zu [12, p. 22]

$$\varepsilon = \frac{2 * U_0}{k * U_I} \quad (30)$$

Damit lassen sich die Dehnungen $\varepsilon_I = \varepsilon_R = \varepsilon_T$ in Abhängigkeit der Zeit aufzeichnen, mit denen die Spannungs-Dehnungskurve des Materials nach Elimination der Zeit erstellt werden kann [12, p. 14]. In Abbildung 20 ist dies anhand des Beispiels einer Al-Mg Legierung dargestellt.

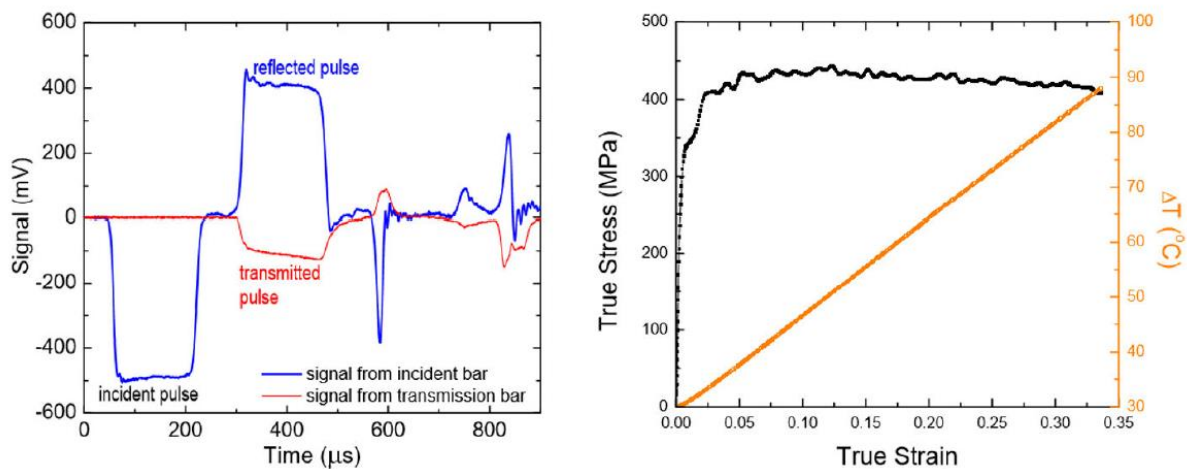


Abbildung 20: Gemessene Dehnungen während eines SHPB-Versuches einer Al-Mg Legierung und das daraus folgende Spannungs-Dehnungs-Diagramm [14]

2.5 Abwandlungen des SHPB-Druckversuchstandes

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über Abwandlungen des einachsigen SHPB-Versuchs gegeben.

SHPB-Versuche für mehrachsige Spannungszustände

Herbert Kolsky entwickelte die Ansätze von Bertram Hopkinson weiter, um die dynamischen Druckbelastungen von Materialien zu untersuchen [18, p. 394]. Humeltenberg und Curbach beschäftigen sich in ihrer Arbeit [18] damit, diesen eindimensionalen Versuch zu erweitern, um Proben auf ein zweiaxiales dynamisches Belastungsverhalten hin untersuchen zu können. Die untersuchten Proben an dieser speziellen Anlage sind aus Beton und in ihrer Form quadratisch, nicht wie in den meisten SHPB-Versuchen zylinderförmig. Bei einer solchen Anlage ist die Synchronisation der Druckluftkanonen ein wichtiger Faktor und der Stoßzeitpunkt der Striker muss über eine programmierbare Steuerung ausgeführt werden [18, p. 399].



Abbildung 21: Zweiaxialer SHPB-Versuchsstand, [zweiaxialer SHPB]

Für einen allgemeinen Spannungszustand der zu untersuchenden Probe gibt es auch Möglichkeiten, die Probe in triaxialen SHPB-Anlagen zu untersuchen. Liu et al. [19] verwenden eine solche Anlage zur Untersuchungen von Zement- und Betonproben.

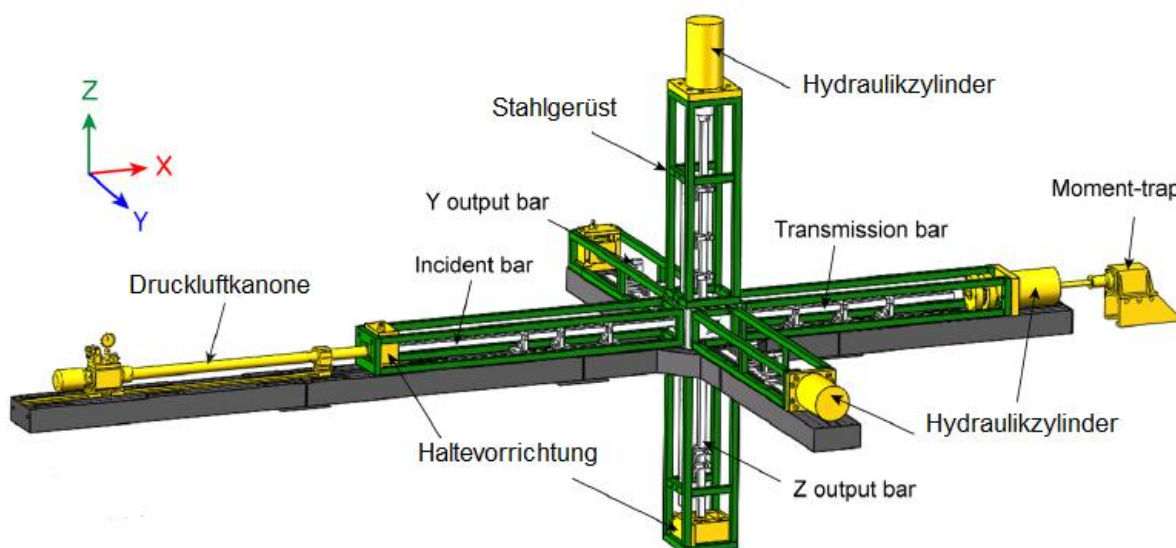


Abbildung 22: Schematische Darstellung einer triaxiale SHPB-Anlage, in Anlehnung an [20]

Die Anlage in Abbildung 22, welche Liu et al. bei ihren Untersuchungen einsetzen, besteht aus sechs Bars (jeweils eine Incident- und Transmission Bar in x-Richtung, sowie je zwei Output Bars in y- und z-Richtung), wobei die quaderförmigen Bars über drei Hydraulikzylinder und die jeweiligen Haltevorrichtungen vorgespannt werden. Anschließend wird ein Impuls über die Druckluftkanone im Incident Bar erzeugt. Beim Auftreffen des Strikers werden die Haltevorrichtungen entspannt und die generierte Druckwelle breitet sich aufgrund der Vorspannung der Probe und des Poission Effekts auch in die Output Bars in y- und z-Richtung aus.

Spannung, Dehnrate und Dehnung in y- bzw. z-Richtung berechnen sich dabei nach [19] zu:

$$\sigma_{y/z}(t) = \frac{E_b A_b [\varepsilon_{y1/z1}(t) + \varepsilon_{y2/z2}(t)]}{2A_S} \quad (31)$$

$$\dot{\varepsilon}_{y/z}(t) = \frac{C_b [\varepsilon_{y1/z1}(t) + \varepsilon_{y2/z2}(t)]}{L_S} \quad (32)$$

$$\varepsilon_{y/z}(t) = \frac{C_b}{L_S} \int_0^t (\varepsilon_{y1/z1}(t) + \varepsilon_{y2/z2}(t)) dt \quad (33)$$

$\sigma_{y/z}(t)$ Spannung in y- bzw. z-Richtung in der Probe [N/m²]

$\dot{\varepsilon}_{y/z}(t)$ Dehnrate in y- bzw. z-Richtung in der Probe [s⁻¹]

$\varepsilon_{y/z}(t)$ Dehnung in y- bzw. z-Richtung in der Probe

E_b E-Modul des Barmaterials [Pa]

C_b Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Barmaterials [m/s]

A_b Fläche des Barquerschnitts [m²]

A_S Fläche der Probe [m²]

L_S Länge der Probe [m]

$\varepsilon_{y1/z1}(t)$ Dehnung in Output Bar 1 in y- bzw. z-Richtung

$\varepsilon_{y2/z2}(t)$ Dehnung in Output Bar 2 in y- bzw. z-Richtung

Für eine alternative Form einer Triaxiale-SHPB-Anlage wird an dieser Stelle auf die Arbeit von Frew et al. [21] verwiesen.

Miniatur SHPB-Anlagen

Beim SHPB-Versuch liegt die Limitation der zu untersuchenden Dehnrate in der Größe der Probe. Daniel Cassem geht in [22] im Speziellen auf noch höhere erreichbare Dehnraten im SHPB-Versuch durch den Einsatz von miniaturisierten SHPB-Anlagen ein. Es wurden schon Anlagen entwickelt, die einen Durchmesser von Incident und Transmission Bar von nur 100µm haben. Durch diese kleinen Bardurchmesser kann der Specimen so klein gewählt werden, dass Dehnraten von bis zu 10⁶s⁻¹ erreicht werden können. [vgl.22, p. 149]

Aufgrund der kleinen Bardurchmesser ist die Bestimmung der Kräfte und Geschwindigkeiten für die Berechnung von Spannung, Dehnrate und Dehnung durch den Einsatz von Dehnmessstreifen schwierig und eine optische Messung wird daher bevorzugt [22, p. 150]. Zur Bestimmung von Spannung und Dehnrate bzw. Dehnung

in der Probe werden bei diesen sehr kleinen Bardurchmessern Interferometer eingesetzt. Zur Bestimmung der Geschwindigkeit der Incident-, Reflected- und Transmittedwellen können sowohl ein Transverse Displacement Interferometer (TDI) als auch ein Normal Displacement Interferometer (NDI) als auch Photon Doppler Velocimetry (PDV) eingesetzt werden [22, p. 150].

In Abbildung 23 sieht man die Positionierungsmöglichkeiten für die optischen Messmittel. Die Geschwindigkeiten der drei Druckwellen können über TDI- oder PDV-Systeme an den Positionen gemessen werden, an denen im normalen SHPB-Versuch die DMS platziert wären. Alternativ kann die Geschwindigkeit v_t der Transmittedwelle auch am freien Ende der Transmission Bar mit einem NDI- oder PDV-System gemessen werden. Allerdings verdoppelt sich die Geschwindigkeit am freien Ende der Bar und das Interferometer misst $2v_t$. [vgl.22, pp. 149-152]

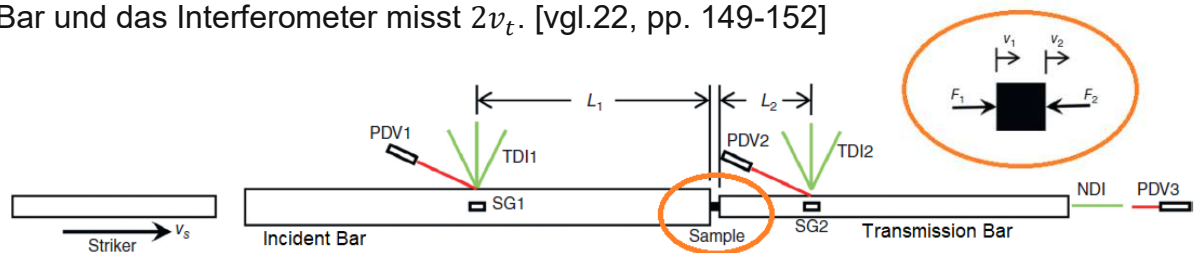


Abbildung 23: Position optischer Messmittel für Miniatur SHPB-Versuch, in Anlehnung an [22, p. 151]

Die Geschwindigkeit eines Volumenelements der Bars ist abhängig von der Dehnung am Ort des Volumenelements und der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Barmaterials ($v = \pm \epsilon c$), sodass die Kräfte und Geschwindigkeiten am Specimen (Abbildung 23 rechts oben) sich durch folgende Gleichungen ausdrücken lassen [22, pp. 150-152]:

$$F_1 = (v_i - v_r)\rho_b C_b A_b \tag{34}$$

$$F_2 = v_t \rho_b C_b A_b \tag{35}$$

$$v_1 = v_i + v_r \tag{36}$$

$$v_2 = v_t \tag{37}$$

F Kraft [N]

v Geschwindigkeit [m/s]

ρ_b Dichte des Barmaterials [kg/m³]

C_b Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des Barmaterials [m/s]

A_b Fläche des Barquerschnitts [m²]

Unter der Annahme eines uniformen und uniaxialen Spannungszustandes während der Verformung, also dem Gleichgewichtszustand $F_1 = F_2$ ergeben sich Dehnrate $\dot{\varepsilon}$ und Spannung σ am Specimen laut [22] zu:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{(v_1 - v_2)}{L_S} \quad (38)$$

$$\sigma = \frac{F_1}{A_S} = \frac{F_2}{A_S} \quad (39)$$

3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, einen neuen SHPB-Versuchstand nach dem Stand der Technik am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien (IFT) der Technischen Universität Wien zu realisieren. Dabei wird teilweise auf Komponenten einer Altanlage zurückgegriffen. Es werden alle Komponenten, die übernommen werden können, überprüft, instandgesetzt und wenn nötig überarbeitet. Soweit möglich sollen alle zu fertigenden Komponenten am Maschinenpark des IFT gefertigt werden. Neben dem mechanischen Aufbau der Anlage wird in dieser Arbeit das benötigte Messsystem ausgelegt, angeschafft und installiert. Die v_0 -Messung, also die Messung der Aufprallgeschwindigkeit des Striker Bars wird über Fotodioden realisiert und mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera kalibriert. Abschließend soll in dieser Arbeit ein Leitfaden für die richtige Bedienung der SHPB-Anlage erstellt werden, um Beschädigungen zu vermeiden.

4 Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme

In diesem Kapitel werden alle durchgeführten Arbeiten an der SHPB-Versuchsanlage aufgezeigt und beschrieben. Für die für die Anlage neu gefertigten Komponenten wird außerdem ein Überblick über den Fertigungsablauf gegeben. Die SHPB-Anlage, die in dieser Arbeit ausgelegt und aufgebaut wird, besteht, wie in Abbildung 24 dargestellt, aus folgenden Hauptkomponenten:

1. **Druckluftkanone:** Zur Generierung der Druckwelle muss eine stoßartige Anregung auf den Incident Bar aufgebracht werden. Im Falle dieser Anlage geschieht das über Geschoße (Striker Bars), die mithilfe einer Druckluftkanone beschleunigt werden.
2. **Hopkinson Bars:** Das Prinzip der SHPB baut auf der eindimensionalen Wellenausbreitung in langen, schlanken Stäben auf, wobei Incident und Transmission Bar für diese Annahme gerade und axial zueinander ausgerichtet sein müssen.
3. **Lagerung:** Die Lagerung der Bars muss so erfolgen, dass sich diese frei in axialer Richtung bewegen können. Die Ausrichtung der Lager darf die Bewegungsfreiheit der Bars nicht beeinträchtigen und auf keinen Fall darf die Lagerung benutzt werden, um etwaige Formfehler der Bars zu kompensieren.
4. **Unterbau:** Der Aufbau der SHPB-Komponenten kann auf unterschiedlichen Unterbauten erfolgen. Gängige Unterbauten sind etwa I-Träger. Nach Gray ist es wichtig, eine starre und gerade Montageplattform für die Lagerung der Bars bereitzustellen, um eine genaue axiale Ausrichtung der Bars zu gewährleisten [10]. Bei der Anlage werden die SHPB-Komponenten auf Betonblöcken aufgebaut, die auf einstellbaren Maschinenfüßen stehen. Dadurch soll die benötigte Geradheit sichergestellt und die Beeinflussung der Einzelkomponenten zueinander vermieden werden.
5. **Momentum Trap:** Die Momentum Trap besteht aus dem Momentum Trap Bar und einer Bremsvorrichtung, die den Transmission Pulse abführt, um eine neuerliche Belastung der Probe zu verhindern.
6. **Geschwindigkeitsmessung:** Misst die Aufschlaggeschwindigkeit des Strikers.
7. **DMS-Messaufbau:** Wichtig beim Applizieren der DMS ist die richtige Positionierung. Die DMS sollten möglichst in der Mitte der Bar und sich gegenüber angebracht werden, um mögliche Biegeeinflüsse zu eliminieren.
8. **Datenerfassung und Aufzeichnung.**



Abbildung 24: SHPB-Versuchsanlage am IFT als Ergebnis der Diplomarbeit

4.1 Überarbeitung von Bestandskomponenten

Die Komponenten der Anlage, die nicht neugefertigt werden, sind in einer vorangegangenen Bachelorarbeit überarbeitet und instandgesetzt worden. In diesem Abschnitt werden die getätigten Arbeiten zusammengefasst, um einen vollständigen Überblick der Anlage zu gewährleisten.

4.1.1 Druckluftkanone

Es standen für den Aufbau der SPHB-Anlage zwei verschiedene Druckluftkanonen zur Auswahl. Zum einen die Druckluftkanone DLK-40 A (Abbildung 25) aus der alten Hopkinson-Bar Anlage und zum anderen die DKL-40 B (Abbildung 26) aus einem alten Taylor-Impact Versuchstand. Beide Anlagen wurden 2011 an der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der TU Wien durch Mitarbeiter des Instituts für Fertigungstechnik und Photonische Technologien abgebaut.



Abbildung 25:DLK-40 A, e. A



Abbildung 26: DLK-40 B, e. A.

Der wesentliche Unterschied der beiden Kanonen liegt in der Art des Auslösemechanismus. Die DLK-40 B benötigt Berstscheiben, die bei einem gewissen Kammerdruck nachgeben und so das Projektil beschleunigen. Bei Versuchen des TVFA, wo die Anlagen früher in Betrieb waren, zeigte sich, dass selbstgefertigte Berstscheiben zu ungenau sind und gekaufte Exemplare sehr teuer. Einer der wichtigsten Aspekte bei der Auslegung einer SHPB ist nach Chen/Song ein kontrollierbarer und wiederholbarer „Impact“ des Striker Bars [12, p. 17]. Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf die DLK-40 A.

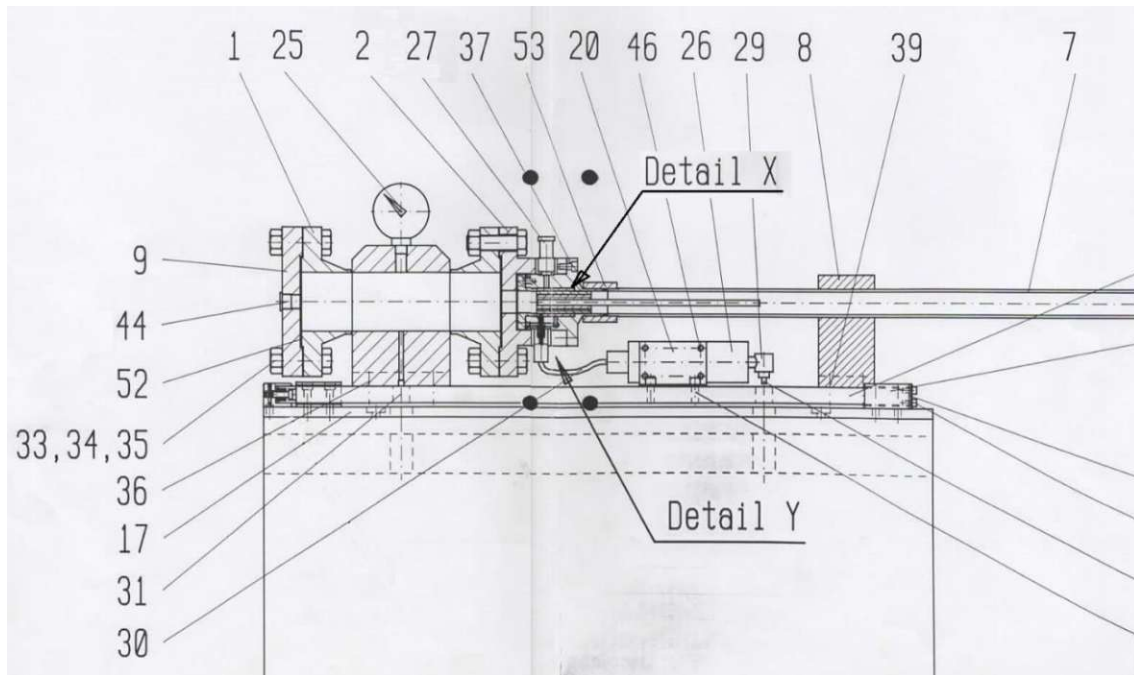


Abbildung 27: Konstruktionszeichnung DLK-40A, in Anlehnung an [23]

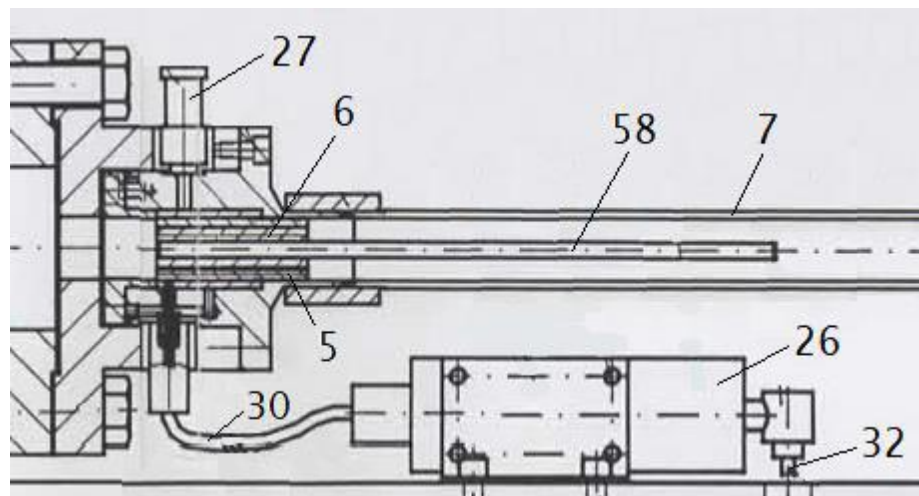


Abbildung 28: Detaildarstellung der Klemmung der Geschosshülse, in Anlehnung an [23]

In Abbildung 27 bzw. Abbildung 28 sieht man den Aufbau der DLK und im Detail die Klemmvorrichtung des Striker Bars. Die wichtigsten Elemente der Klemmvorrichtung sind die Klemmhülse (5) und der Luft-Öldruckübersetzer (26). Als erstes wird das Geschoss (Geschosshülse und Striker) von vorne durch den Kanonenlauf geladen und anschließend die Klemmung aktiviert. Dazu wird der Luft-Öldruckübersetzer mit Druckluft beaufschlagt, was eine hydraulische Klemmung mit einer Übersetzung von 1:34 an der Klemmhülse ergibt. Danach wird der Kompressor eingeschaltet, bis der gewünschte Druck in der Druckkammer erreicht ist. Um die Kanonen auszulösen wird

der Luft-Ölübersetzer über ein Schnellentlüftungsventil entlüftet und das Geschoss wird beschleunigt.

Entscheidend ist, dass die Klemmhülse nie ohne geladener Geschosshülse mit Druck beaufschlagt wird, da es ansonsten zu einer plastischen Verformung kommt und die Klemmhülse unbrauchbar wird. Um dies zu verhindern ist ein Sicherheitsmechanismus verbaut, der das versehentliche Klemmen verhindert. In Abbildung 29 sieht man den Sicherungsstift (10), der bei eingeschobenem Geschoss den Ölfluss aus dem Luft-Ölübersetzer freigibt. Ansonsten blockiert ein gefedertes Rückschlagventil die Ölleitung, damit es zu keiner Druckbeaufschlagung kommen kann. Allerdings funktioniert dieser Mechanismus nur, wenn die Klemmhülse beim Einbau korrekt positioniert ist und der Sicherungsstift in dem in der Klemmhülse eingebrachten Loch einfach hin und her gleiten kann.

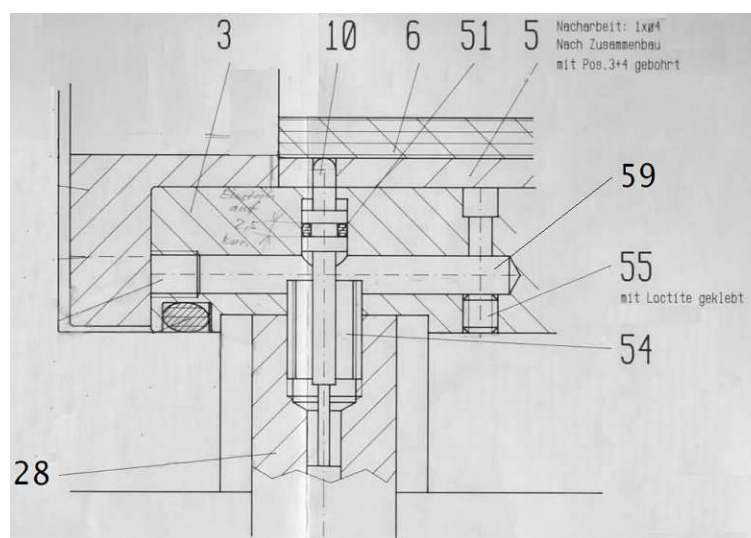


Abbildung 29: Detaildarstellung der Klemmsicherung, in Anlehnung an [23]

Bei der Instandsetzung wurden alle Dichtungen der DLK sowie das Hydrauliköl im Luft-Ölübersetzer erneuert. Außerdem wurden neue Klemmhülsen vom Typ Kostyrka 5350.040.070 bestellt und mit Auszugsgewinden und der Bohrung für den Sicherungsstift versehen.

4.1.2 Pneumatikkreislauf

Am pneumatischen Kreislauf der Beschussanlage sowie an der Steuerung wurden keine Änderungen vorgenommen, sondern nur Wartungsarbeiten durchgeführt. Einzig eine Druckluftaufbereitung in Form von Filtern und Wasserabscheidern wurde in die pneumatische Anlage integriert. Diese wurde genauso wie der Kompressor und der Pneumatik-Kreislauf auf einem neuen Gestell aus Aluprofilen aufgebaut, der unter dem Betonblock der DLK platziert wurde. In Abbildung 30 ist der auf das neue Gestell aufgebaute Pneumatik-Kreislauf zu sehen und in Abbildung 31 dessen Schaltplan.

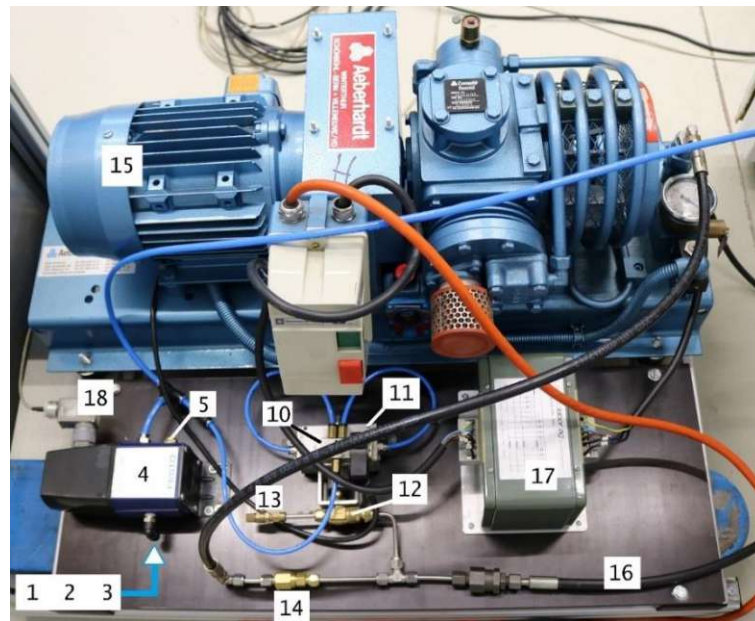


Abbildung 30: Pneumatik-Kreislauf auf Alu-Gestell, e. A.

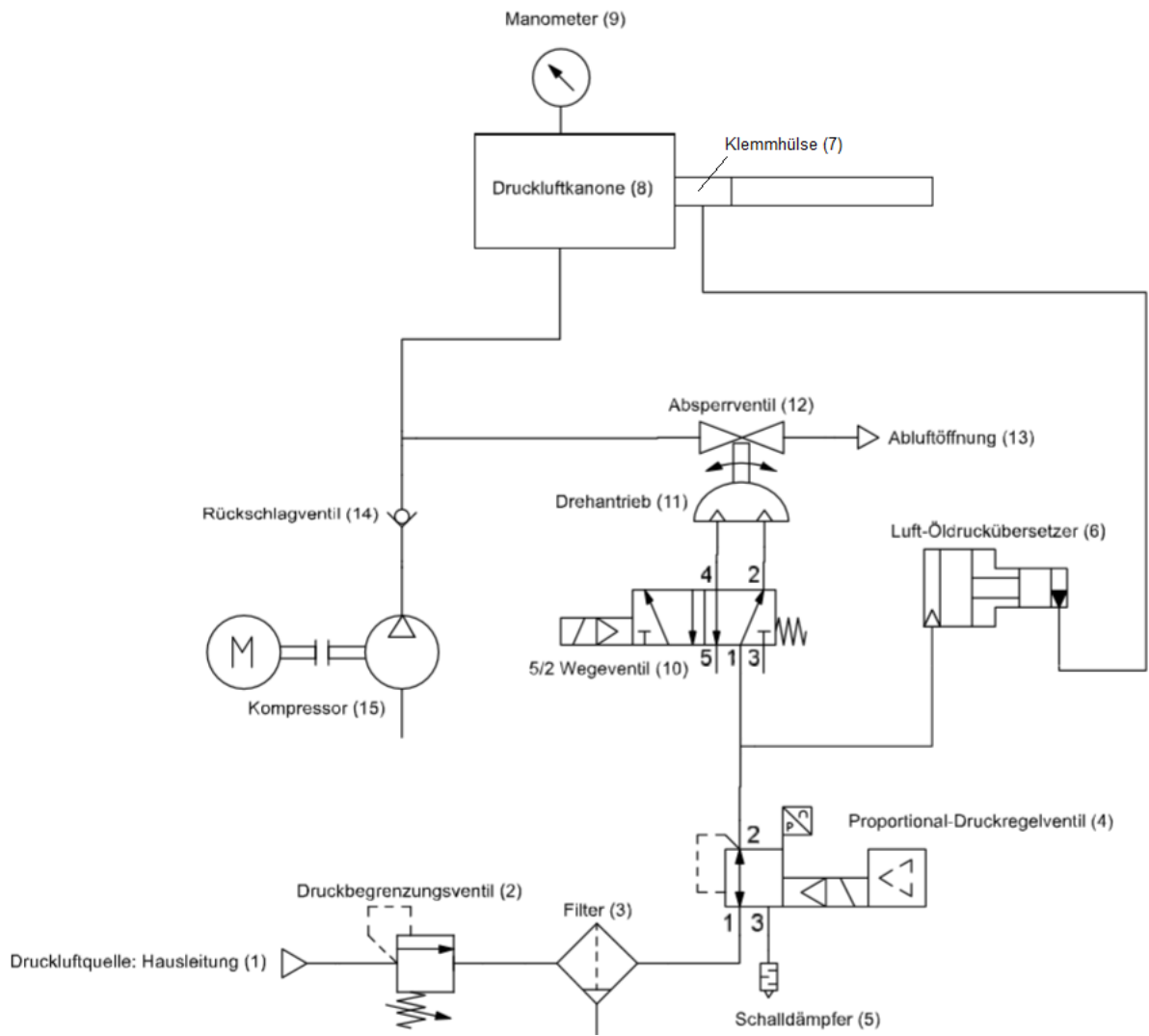


Abbildung 31: Schaltplan Pneumatik-Kreislauf, eigene Darstellung

4.2 Auslegung und Fertigung der Bar-Komponenten

Für die SHPB-Anlage werden folgende Komponenten neu gefertigt:

- Striker Bars
- Incident und Transmission Bar
- Momentum Trap Bar
- Geschosshülsen für Striker Bars
- Lagerung für Incident und Transmission Bar

4.2.1 Auslegung der Bars für die SHPB-Anlage

Das Herzstück der SHPB-Anlage sind die Kolsky Bars, bestehend aus Incident und Transmission Bar, deren Auslegung einigen wichtigen Aspekten unterliegt.

Werkstoffauswahl der Bars

Für diese Anlage wurde als Stabmaterial – ausgehend vom Stand der Technik – der Maraging-Stahl V300 (ehemals W720) der Firma Böhler gewählt.

Tabelle 3: Werkstoffbezeichnungen Böhler V300

1.6354	X3NiCoMoTi18-9-5	Marage 300
--------	------------------	------------

Chemische Zusammensetzung laut Datenblatt:

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %)

C	Si	Mn	Mo	Ni	Co	Ti	Al
max. 0,005	max. 0,05	max. 0,10	5,00	18,50	9,00	0,70	0,10

Mechanische Eigenschaften laut Datenblatt nach Warmauslagern bei 480°C:

$$E = 193 \text{ GPa}$$

$$\rho = 8200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$R_m = 1860 - 2260 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$R_{p0,2} = 1815 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Eigenschaften laut Datenblatt:

Der Werkstoff Böhler V300 (W720) ist ein ultrahochfester martensitaushärtbarer Stahl. Seine Festigkeitseigenschaften werden durch Ausscheiden intermetallischer Phasen aus einer fast kohlenstofffreien Nickelmartensit-Grundmasse erreicht. Die Maßänderung während der Wärmebehandlung ist sehr gering und die Zerspannung ist auch im ausgehärteten Zustand möglich. [24]

Geometrische Auslegung der Bars

Für die geometrische Auslegung der Bars definieren Chen und Song bzw. Gray folgende Bedingungen: [10, 12]

- Die Sicherstellung einer eindimensionalen Wellenausbreitung in den Bars erfordert bei den meisten Werkstoffen ein Längen-zu-Durchmesserverhältnis von mehr als 10.

$$\frac{L}{D} > 10 \quad (40)$$

- Die Entfernung der DMS zu den Enden der Bars soll zumindest zehnmal dem Durchmesser entsprechen.

$$\frac{L}{D} \geq 20 \quad (41)$$

Bei zu geringem Abstand der DMS zum Ende der Bar nimmt die axiale Spannung über den Querschnitt hinweg ab und am Rand werden geringere Dehnungen gemessen als die wirklichen Dehnungen der Bar [vgl.12, pp. 37-38]. Dieser Zusammenhang ist in einem Kolsky Bar Experiment nachgewiesen worden und in Abbildung 33 und Abbildung 32 dargestellt. Die abgebildeten Spannungskurven wurden mit den Abständen $r = 0, 0,5 R$ und R am Querschnitt ermittelt, wobei R dem Radius der Bar entspricht. Die Abstände der Messungen vom Bar Ende aus sind bei Abbildung 33 $0,5$ mal D und bei Abbildung 32 zwei mal D . [vgl.17, pp. 46-47].

Testbedingungen laut [vgl.17, pp. 46-47]:

- Barmaterial: E-Modul 200 GPa, Dichte 7800 kg/m³
- Loading Parameter: Amplitude $\sigma_0 = 800 MPa$, Belastungsdauer 120 μ s

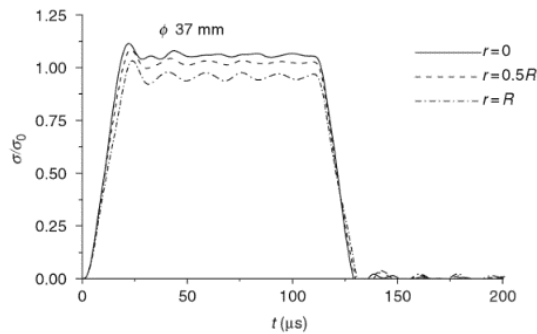


Abbildung 33:
Spannungen 0,5D vom
Bar Ende, [14, p. 47]

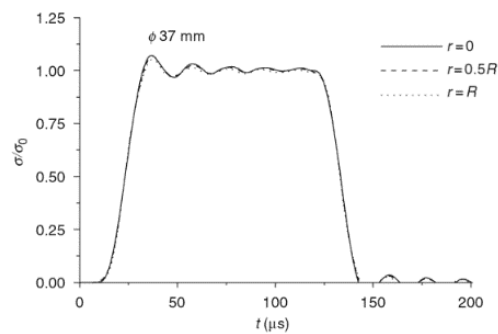


Abbildung 32:
Spannungen 2D vom
Bar Ende, [14, p. 47]

- Um ein Überlappen der Stresswellen am DMS zu verhindern, muss der Incident Bar immer mindestens zweimal so lang wie der Striker sein.

Zwei weitere Kriterien betreffend der Stablängen werden von Hummeltenberg und Curbach folgendermaßen definiert [18, pp. 397-398]:

- Die Eigenfrequenz der Stäbe nimmt mit ihrer Länge ab, daher sind längere Stäbe von Vorteil, um Störeinflüsse durch Eigenschwingungen zu minimieren.
- Für weniger Dispersionseffekte ist eine kleine Stablänge von Vorteil.

Eine Erklärung für die letzte Aussage ist der Poisson Effekt. Wenn sich eine longitudinale Druckwelle durch den Stab ausbreitet, wird das Material sowohl nach vorne (kinetische Energie) als auch in radialer Richtung bewegt. Diese Beschleunigung in radialer Richtung führt zu trägheitsinduzierten Spannungen in axialer Richtung. Diese zweidimensionalen Effekte führen zu Dispersionen der Longitudinalwelle und kumulieren sich über die Stablänge. [vgl.12, p. 38]

Die Auslegung von Durchmesser und Länge für Transmission und Incident Bar ist davon abhängig, welche Untersuchungen und Ergebnisse man mit einer Anlage erreichen will, aber auch vom zur Verfügung stehenden Platz.

Typischerweise liegen die Durchmesser der Kolsky Bars zwischen 10 und 25 mm, wobei gilt, umso kleiner der Durchmesser, desto dynamischer ist im Allgemeinen der Versuch. [vgl.12, p. 24]

Umso kleiner der Bardurchmesser, desto höher die erreichbaren Dehnraten. Casem beschreibt hierbei in seiner Arbeit Miniatur Kolsky Anlagen mit einem Bardurchmesser von $100\mu\text{m}$ und Dehnraten von $\dot{\epsilon} = 1.000.000 \frac{1}{s}$. [22]

Die Bars der Bestandsanlage hatten einen Durchmesser von 10 mm. Die Auswahl der Luftlager (4.2.3 SHPB-Lagerung) bestimmt den Durchmesser der Kolsky Bars und wurde mit 13 mm festgelegt.

Die Längen von Incident und Transmission Bar hängen direkt von der Länge der Striker Bars ab. Demzufolge werden zuerst die erreichbaren Dehnraten und Dehnungen abgeschätzt. Gray stellt in seiner Arbeit Gleichungen zur Abschätzung der Dehnrate und der Dehnung bereit. [vgl.10]

Unter der Annahme der Impulserhaltung zwischen Striker und Incident Bar kann die Dehnrate abgeschätzt werden zu:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_{st}}{l_{spec}} \quad (42)$$

Gleichzeitig ist bei der Annahme einer konstanten Dehnrate in der Werkstoffprobe die Dehnung direkt proportional zur Länge des Strikers:

$$\varepsilon = 2\dot{\varepsilon} \frac{l_{st}}{C_0} \quad (43)$$

Die Geschwindigkeit der Welle, mit der sie sich im Incident Bar ausbreitet, ist eine Materialkonstante, die vom E-Modul und der Dichte des Barwerkstoffes abhängt.

Mit den Werten für E-Modul und Dichte des gewählten Maraging-Stahl V300 ergibt sich für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit:

$$C_0 = 4851.5 \frac{m}{s}$$

Diese Gleichungen stellen eine Schätzung dar, die laut Gray selbst zu hoch ist. Erfahrungsgemäß wurde die Abschätzung für die Dehnrate $\dot{\varepsilon}$ um 50 % verringert, was eher den realen Bedingungen der erreichbaren Dehnrate entspricht. [25]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} * \frac{v_{st}}{l_{spec}} \quad (44)$$

In der folgenden Tabelle sind die erreichbaren Dehnraten für verschiedene Probenlängen in Abhängigkeit verschiedener Striker Geschwindigkeiten aufgeführt.

Tabelle 5: Abschätzung der Dehnrates $\dot{\varepsilon}$ nach (44)

l_{spec}	v_{st}	$\dot{\varepsilon}$
[mm]	[m/s]	[1/s]
10	5	250
10	10	500
10	20	1000
10	30	1500
10	40	2000
10	50	2500
10	60	3000
10	70	3500
8	5	312.5
8	10	625
8	20	1250
8	30	1875
8	40	2500
8	50	3125
8	60	3750
8	70	4375
4	5	625
4	10	1250
4	20	2500
4	30	3750
4	40	5000
4	50	6250
4	60	7500
4	70	8750
2	5	1250
2	10	2500
2	20	5000
2	30	7500
2	40	10000
2	50	12500
2	60	15000
2	70	17500

Analog zur Dehnrates wird auch die Abschätzung der erforderlichen Striker Länge für die erreichbare Dehnung um 50 % erhöht. Dadurch ergibt sich ε zu:

$$\varepsilon = \frac{4}{3} \dot{\varepsilon} \frac{l_{\text{st}}}{C_0} \quad (45)$$

Tabelle 6: Abschätzung der Dehnung ε nach (45)

$\dot{\varepsilon}$	l_{st}	ε
[1/s]	[mm]	
500	100	0.013934
500	200	0.027868
500	300	0.041802
500	400	0.055736
500	500	0.069669
500	600	0.083603
500	700	0.097537
500	800	0.111471
5000	100	0.139339
5000	200	0.278678
5000	300	0.418017
5000	400	0.557355
5000	500	0.696694
5000	600	0.836033
5000	700	0.975372
5000	800	1.114711
10000	100	0.278678
10000	200	0.557355
10000	300	0.836033
10000	400	1.114711
10000	500	1.393388
10000	600	1.672066
10000	700	1.950744
10000	800	2.229421
15000	100	0.418017
15000	200	0.836033
15000	300	1.25405
15000	400	1.672066
15000	500	2.090083
15000	600	2.508099
15000	700	2.926116
15000	800	3.344132

Für eine flexible Versuchsplanung in Abhängigkeit der zu erreichenden Dehnungen und Dehnraten ist es sinnvoll, verschiedene Längen der Striker Bars zu fertigen, um flexibel in der Versuchsdurchführung zu sein.

Ein weiterer limitierender Faktor bei dieser Anlage sind die Betonblöcke, die als Unterlage der Bar Lagerungen dienen. Da bewusst keine durchgehende Auflage (entkoppelte Lagerung) gewählt wurde, sondern jede Bar für sich auf einem Aufstellelement gelagert wird, ist die Länge dieser ein Einflussfaktor. Die Betonblöcke

haben eine Länge von 1.200 mm, daher kann aufgrund der Durchbiegung unter Eigenbelastung der auskragenden Bar Enden die Länge von Incident und Transmission Bar nicht beliebig lange gewählt werden.

Aufgrund der Abschätzungen von Dehnrates und Dehnung in den Werkstoffproben in Abhängigkeit von Probenlänge und Strikerlänge wurden folgende Längen für einen möglichst breit aufgestellten Versuchsraum gewählt:

$$l_{st_1} = 100 \text{ mm}$$

$$l_{st_2} = 200 \text{ mm}$$

$$l_{st_3} = 300 \text{ mm}$$

$$l_{st_4} = 400 \text{ mm}$$

$$l_{st_5} = 500 \text{ mm}$$

$$l_{st_6} = 600 \text{ mm}$$

$$l_{st_7} = 700 \text{ mm}$$

Obwohl es keine allgemein gültigen Auslagekriterien für SHPB-Anlagen gibt, sind Incident und Transmission Bar bei den meisten Anlagen von gleicher Länge.[10] Dies und das oben genannte Kriterium, dass die Incident Bar immer zumindest die doppelte Länge des Strikers haben muss, führen zur folgenden Wahl der Länge von Incident und Transmission Bar:

$$l_{in} = l_{tr} = 1.500 \text{ mm}$$

Abschließend muss noch die Momentum Trap Bar ausgelegt werden. Diese hat ebenfalls denselben Durchmesser wie die Kolsky Bars. Für die Länge der Momentum Trap Bar ist laut Steve Mates das entscheidende Kriterium, dass diese länger sein muss als der längste Striker, um den Transmitted pulse vollständig abführen zu können, sodass die Probe kein zweites Mal belastet wird. Daher wurde folgende Länge für die Momentum Trap Bar festgelegt:

$$l_{mo} = 1.000 \text{ mm}$$

Fertigungsschritte zur Herstellung der Bars:

Die zehn benötigten Bars werden als Halbzeug von der Firma Böhler mit einem Durchmesser von 14 mm und einem Längenaufmaß von jeweils 5 mm geliefert.

Der Fertigungsablauf sowie alle Fertigungs- und Formtoleranzen gelten für Striker, Incident, Transmission und Momentum Trap Bar gleichermaßen. In Abbildung 34 ist stellvertretend für alle Bars ein Auszug auf der Fertigungszeichnung der Transmission Bar zu sehen.

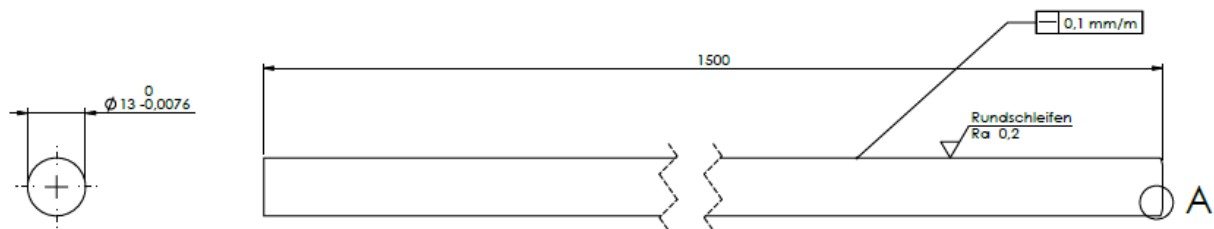


Abbildung 34: Auszug der technischen Zeichnung der Transmission Bar, eigene Darstellung

Die Durchmessertoleranz für Incident und Transmission Bar ist durch das Luftlager vorgegeben. Laut Datenblatt des Lagerhersteller sind die Bars mit einer Toleranz von

$$d_B = 13_{-0,0076}^{+0} \text{ mm}$$

zu fertigen.

Wie oben bereits ausgeführt ist die Geradheit und axiale Ausrichtung von Incident und Transmission Bar einer SHPB entscheidend für gute Messergebnisse. Die Toleranz der Geradheit wurde nach [26] mit

$$0,1 \text{ mm/m}$$

gewählt. Dieser Wert für die Geradheit der Kolsky Bars wurde auch in [18] angewendet und scheint aus technologischer und fertigungstechnischer Sicht praktikabel. Laut [26] ist der Fertigungsablauf der Bars in folgende Teilprozesse unterteilt:

(1) Schälen

Vom Rohdurchmesser auf $d = 13,3 \text{ mm}$

(2) Richten

Auf eine Geradheit von $0,1 \text{ mm/m}$

(3) Runds Schleifen

Auf Centerless-Runds Schleifmaschine, mehrere Durchgänge mit Spantiefen von $0,05 - 0,08 \text{ mm}$

(4) Warmauslagern**(5) Endablängen**

Schleifzugabe: 0,2 mm

Wichtig: sauberes Spannen

(6) Schleifen stirnseitig

Striker beidseitig Profil schleifen

Incident und Transmission Bar auf einer Seite Profil schleifen, auf der anderen Seite planschleifen

Beidseitig in der Länge 0,1 mm wegschleifen

Die Punkte 1-4 konnten nicht am Institut für Fertigungstechnik und Photonische Technologien gefertigt werden und wurden an Fremdfirmen vergeben. Auch wenn Maraging Stahl sich beim Aushärten nur wenig verzieht, wurde das Warmauslagern, in Absprache mit dem für das Rundschleifen zuständigen Unternehmen, im Fertigungsablauf an Position 1 gestellt. Die Härte der Stäbe nach dem Warmauslagern wird in [26] mit einem anzustrebenden Wert von >45 HRC angegeben. Laut Datenblatt des Maraging Stahl Böhler V300VMR (ehemals W720VMR) liegt die maximale Zugfestigkeit im ausgelagerten Bereich, bei einer Auslagerungstemperatur von 480° bei drei Stunden Haltezeit, bei (Abbildung 35)

$$R_m = 2260 \frac{N}{mm^2}$$

Das würde laut Datenblatt einer Härte von 55 HRC entsprechen. Bei dieser Härte ist das Richten der Stäbe schwierig und die maximale Härte wurde mit 53 HRC festgelegt.

Auslagerungsschaubild

Lösungsgeglüht 820°C / 1 Stunde / Luft

Ageing chart

Solution annealed 820°C (1508°F) / 1 hour / air

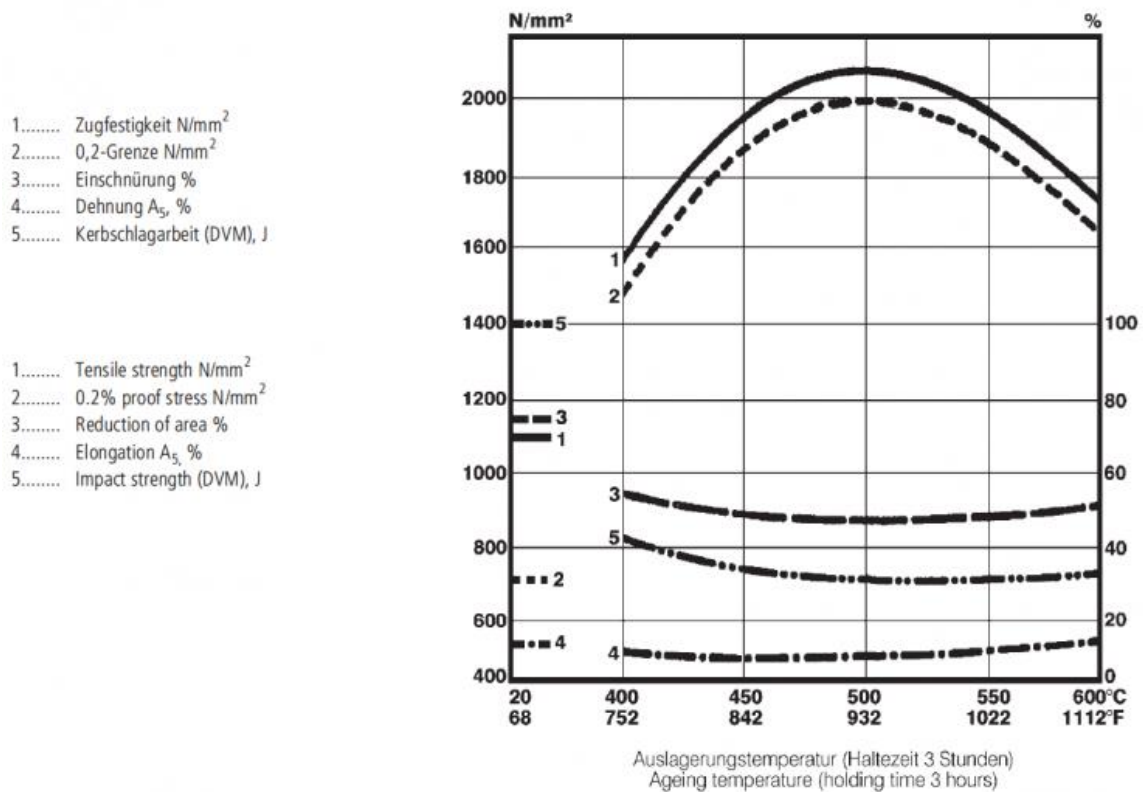


Abbildung 35: Auslagerungsschaubild Böhler V300, laut Datenblatt

Die Arbeitsschritte 5-6 wurden am IFT durchgeführt. Das Endablängen und Profilschleifen wurde an einer Werkzeugschleifmaschine der Firma Schütte durchgeführt. Für die Bearbeitung von Incident, Transmission und Momentum Trap Bar musste aufgrund der Länge der Bars eine Durchführung am Gehäuse der Schleifmaschine eingebracht werden.

4.2.2 Geschosshülse

Für die Beschleunigung der Striker Bars ist eine Geschosshülse nötig, die den Striker zentrisch im Kanonenlauf führt. Dabei sollen während des Beschleunigungsvorganges möglichst wenig Reibungsverluste entstehen. Als Material bieten sich daher Kunststoffe mit guten Gleiteigenschaften an. Des Weiteren muss die Geschosshülse auch den Belastungen, die durch die hydraulische Klemmung entstehen, standhalten. Diesen Anforderungen entsprechend wurde der Kunststoff Polyoxymethylen Copolymer (POM-C) für die Geschosshülse gewählt. In Abbildung 36 ist ein Auszug der technischen Zeichnung der Geschosshülse dargestellt.

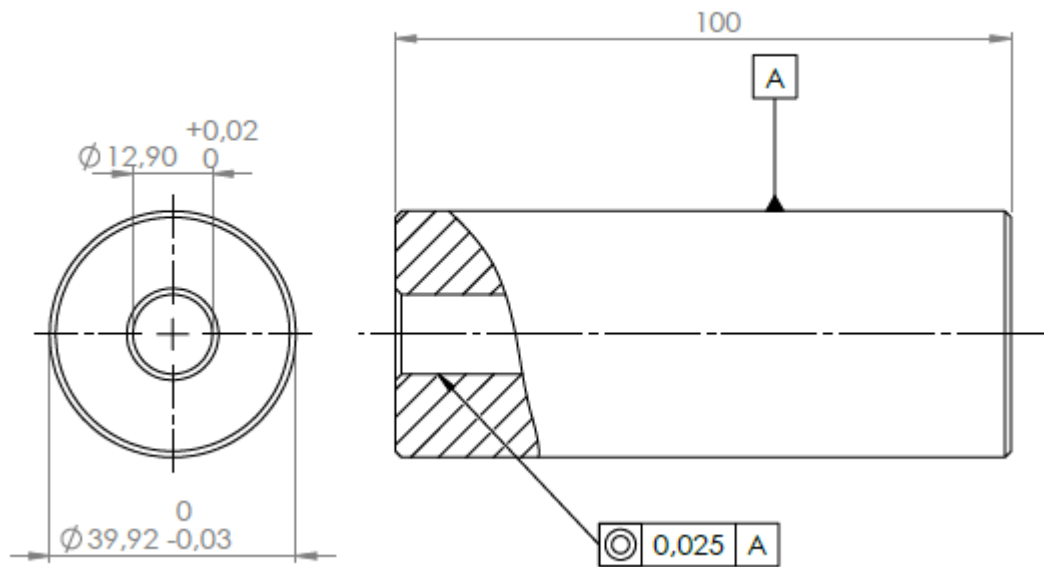


Abbildung 36: Technische Zeichnung Geschoßhülse (Auszug), eigene Darstellung

4.2.3 SHPB-Lagerung

Die Lagerung der Kolsky Bars muss zwei wichtigen Aspekten genügen. Zum einen müssen die Lager eine möglichst reibungsarme axiale Verschiebung der Bars ermöglichen, zum anderen muss die Lagerung konstruktiv so ausgelegt sein, dass eine präzise axiale Ausrichtung realisiert werden kann. In Abbildung 37 sieht man den Lageraufbau der Bestandsanlage. Bei dieser Lösung wurden bereits Luftlager eingesetzt, um die Reibung der Bars zu minimieren. Allerdings waren die Lager aufgrund von Alter und Gebrauchsspuren sowie langer Lagerung nicht mehr für die neue Anlage zu gebrauchen. Auch der Lageraufbau hatte in Punkto Justierbarkeit Defizite. Es fiel daher die Entscheidung, die komplette Lagerung neu auszulegen.

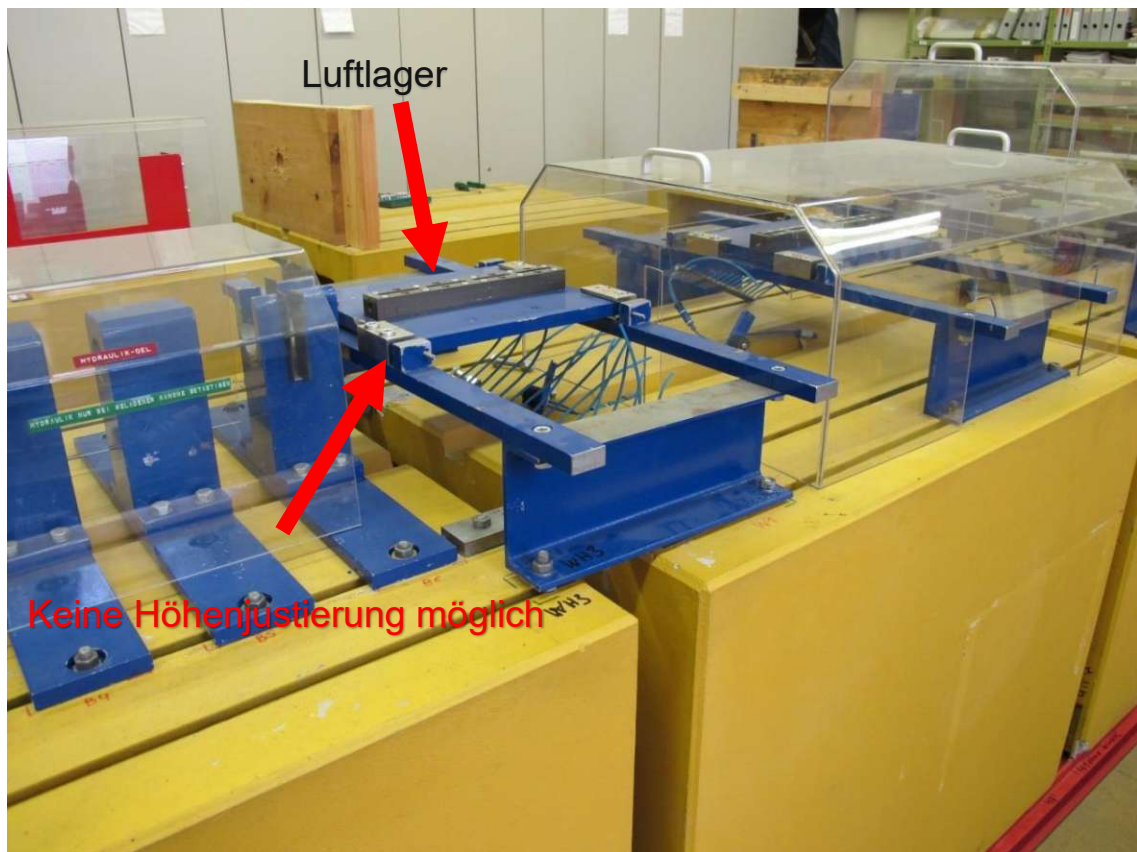


Abbildung 37: Lagerlösung der Bestandsanlage, e.A.

Lagerwerkstoff:

Für die Lagerung der Bars werden in der Praxis verschiedene Arten von Lagerwerkstoffen eingesetzt. So finden sich in der Literatur als Beispiele für Lagerarten Gleitlager mit zusätzlichen Gleitfolien oder auch Frelon®-Gleitlager (Abbildung 38) mit Selbstschmierungseffekt. [12, 18] Bei größeren Bardurchmessern werden meist Luftlager eingesetzt, um die Reibung zwischen den schweren Bars und der Lageroberfläche zu verringern. [12]

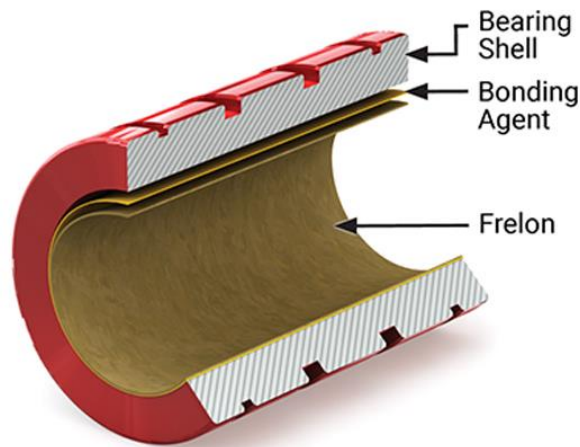


Abbildung 38: Aufbau eines Frelon®-Gleitlager

Die Reibung zwischen Lager und Bar kann durch den Einsatz von Schmiermittel, wie z.B. auf Petroleum basierende Schmierstoffe, noch weiter verringert werden. [12]

Die Lagerung der Bars muss zwangsfrei erfolgen, um Störstellen zu vermeiden, da ansonsten Transversalwellen entstehen würden, die wiederum die Messergebnisse beeinflussen. [18] Das bedeutet aber auch, dass jegliche Reibung (insbesondere die Haftreibung) eine Störstelle darstellt, an der die Wellenausbreitung gestört wird. Technologisch gesehen ist eine Lagerlösung mit Luftlagern in diesem Fall sinnvoll, da diese bei optimalen Betriebsbedingungen fast keinen Reibwiderstand haben. Die Reibung eines Luftlagers entsteht durch die Scherung der Luft während der Bewegung. Außerdem gibt es bei Luftlagern keinen Unterschied zwischen statischem und dynamischem Reibwert, daher kann es auch nicht zu einer „Stick-Slip“-Situation kommen. [27]

Ein Nachteil von Luftlagern ist neben dem höheren Preis der zusätzliche Aufwand für die Druckluftversorgung und -aufbereitung. In [28] werden die Vorteile von Luftlagern gegenüber Gleitlagern thematisiert und eine SHPB-Anlage, mit den in diesem Projekt gewonnen Erkenntnissen, mit Luftlagern der Firma New Way Air ausgestattet.

Die Luftlager der Firma New Way Air haben eine poröse Carbon Lauffläche, die für einen gleichmäßigen verteilten Luftdruck sorgt.

„Bei einem stabilen Luftlager stellt die Steifigkeit in der Regel die wichtigste funktionale Eigenschaft zur Beurteilung des Lagers dar. Unter Steifigkeit ist das Maß zu verstehen, in dem sich die Dicke der Luftschicht als Funktion einer Belastungsänderung ändert. Die Steifigkeit eines Luftlagers hängt stark von der Dicke der Luftschicht ab. Je größer der Luftspalt ist, umso stärker lässt er sich komprimieren. Zur Optimierung der Steifigkeit sind deshalb kleine Luftspalte erforderlich. Poröse Lager sind dabei von Vorteil, da sie sich ohne Festlaufen bei schmaleren Luftspalten bewegen können [29].“

Die gute Steifigkeit, sehr geringe Reibungen und das Vermeiden von Störstellen durch Festlaufen sind alles Eigenschaften, die für die Lagerung einer SHPB-Anlage im Hinblick auf gute Messergebnisse von großem Vorteil sind. Auch wenn die Kosten gegenüber von Gleitlagern wesentlich höher sind, überwiegen die Vorteile der Luftlagerung. Aus diesen Gründen wurde entschieden, für die Lagerung von Incident und Transmission Bar ebenfalls Luftlager der Firma New Way Air zu verwenden. Die Wahl fiel dabei auf die Variante S301301 mit einem Innendurchmesser von $d = 13 \text{ mm}$, was gleichzeitig die kleinste Ausführung im Lieferprogramm ist. Die radiale Kraftaufnahme der Luftlager hängt von der Stärke des Luftspaltes ab (Abbildung 40), die maximale Kraftaufnahme liegt bei 44N pro Lager bei Einhaltung der vorgegebenen Fertigungstoleranzen, das maximale Nickmoment ist mit 0,8 Nm angegeben (Abbildung 39).

SPECIFICATIONS: 13mm #S301301	
Input Pressure	.41 MPa (60psi)
Radial Load Max n (lbs)	44 (10)
Radial Stiffness n/ μm (lbs/ $\mu\text{ in}$)	11 (0.06)
Pitch Moment Max n-m (lbs-in)	0.8 (7.5)
Pitch Stiffness n-m/mil rad (lbs-in/mil rad)	2.1 (19.0)
Flowrate on Shaft NLPM (SCFH)	2.2 - 3.1 (4.75 - 6.60)
Air Gap (at recommended load)	4 microns

Abbildung 39: Lagerspezifikationen S301301, Datenblatt

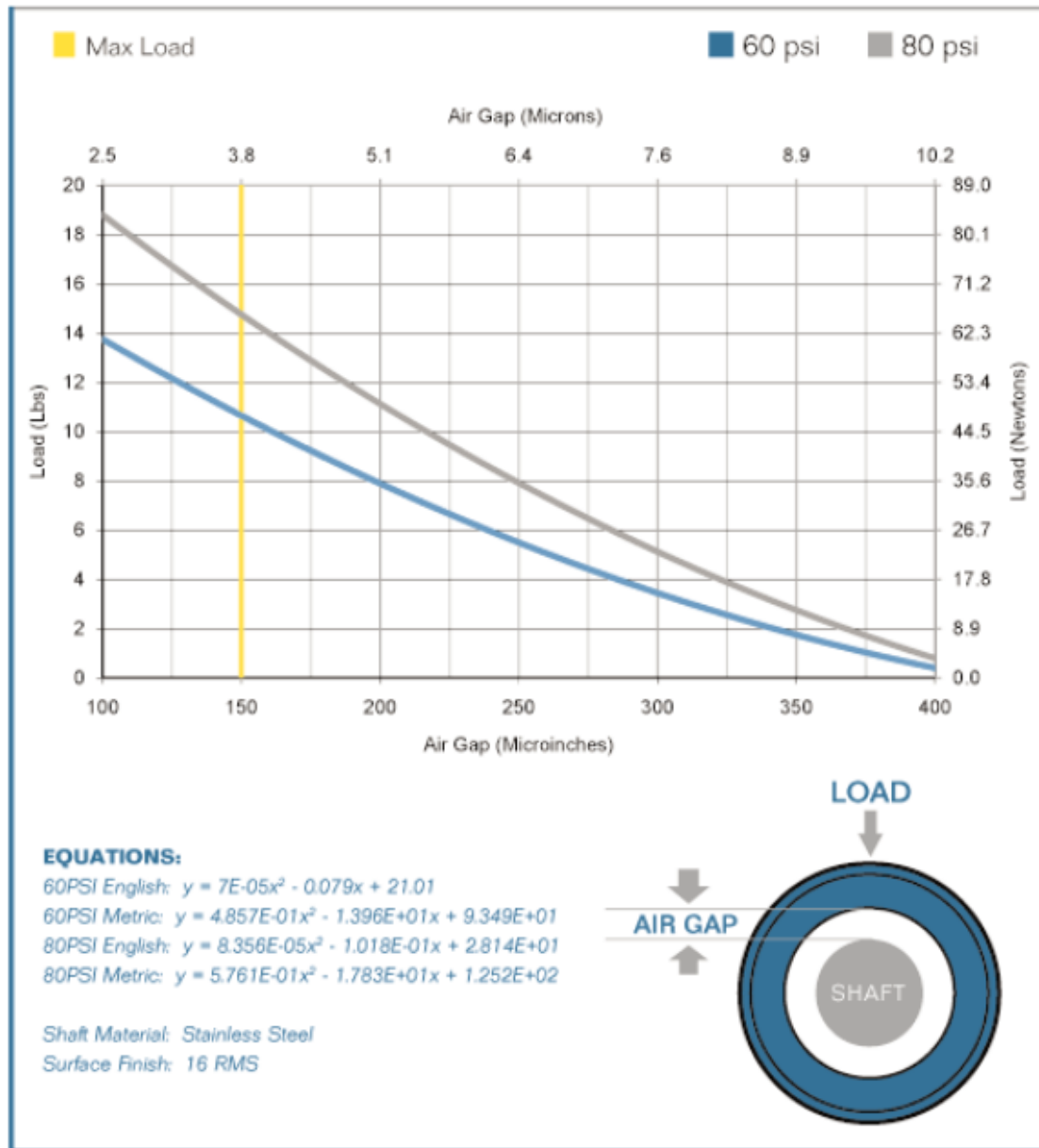


Abbildung 40: Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Luftspaltdicke, Datenblatt New Way Air S301301

Luftlagerhalterung und Feineinstellung

Für die gewählten Luftlager wird eine Halterung gefertigt, die eine genaue Positionierung und Ausrichtung ermöglicht, um die Hopkinson Bars exakt axial ausrichten zu können. Die Lager sollen in vertikaler und horizontaler Richtung einstellbar sein. Außerdem muss in einem gewissen Maße auch die Neigung justierbar sein, um Ungenauigkeiten des Unterbaus ausgleichen und so die Hopkinson Bars in Waage ausrichten zu können. Diese Anforderungen werden über zwei hintereinander liegende 3-Punkt Auflagen realisiert. Die Einstellung erfolgt dabei über abgerundete

Einstellschrauben, die einen punktförmigen Kontakt an den Einstellnuten der Lagerbuchse ermöglichen.

An den Incident und Transmission Stäben werden DMS angebracht, um die Impulse in den Stäben zu bestimmen. Daher ist, nachdem die DMS auf den Stäben aufgeklebt und verkabelt sind, ein Ein- und Ausbauen der Bars durch die Luftlager nicht mehr möglich. Bei der Auslegung der Lageraufhängung sollte das berücksichtigt werden. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, weil vielleicht zu einem späteren Zeitpunkt andere Bars für spezielle Werkstoffversuche gebraucht werden oder auch sonstige Änderungen an Lager oder Bars möglich sein sollen, ohne die DMS entfernen und Klebstoffreste an den Bars für den Ausbau wegpolieren zu müssen.

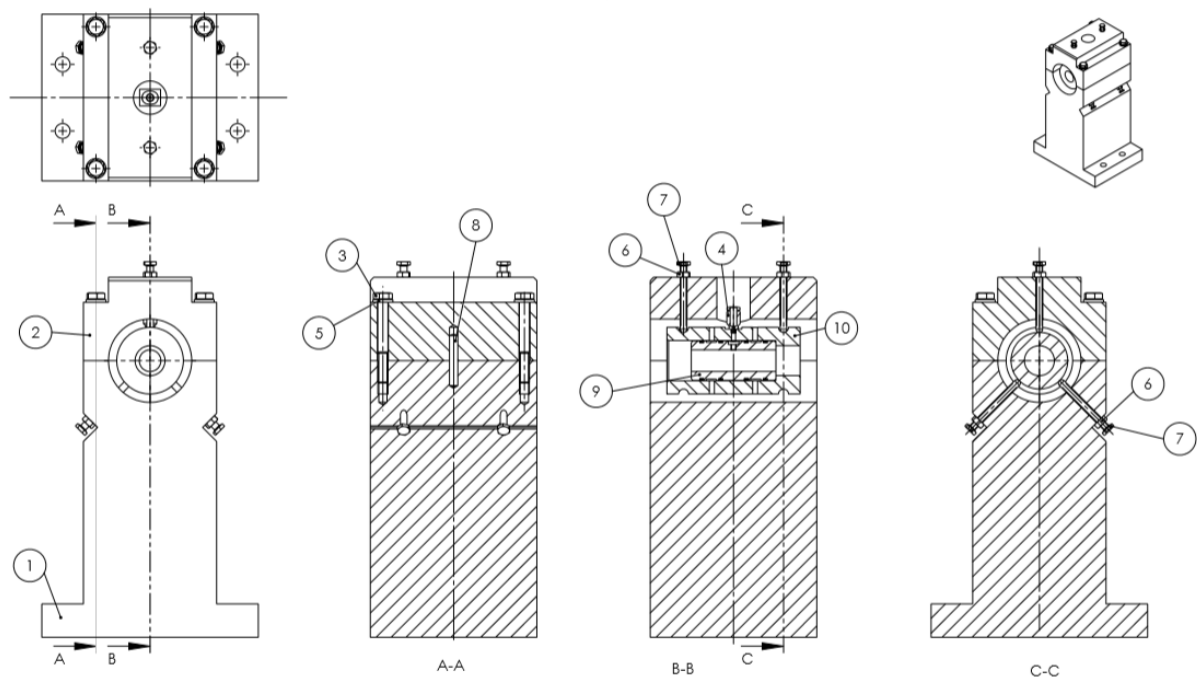


Abbildung 41: Zusammenstellungszeichnung der neuen Lagereinheiten

In Abbildung 41 ist das fertig konstruierte Lager in mehreren Schnittansichten dargestellt. Die Lagereinheit besteht aus dem Lagerbock (1) und dem Lagerdeckel (2), in dem sich die Durchführung für den Pneumatikschlauch befindet. Der Lagerdeckel wird durch Zylinderstifte (8) am Lagerbock positioniert und mit Sechskantschrauben (3) verschraubt. Die Lagerbuchse (10) mit installiertem Luftlager (9) wird durch die Einstellschrauben (7) positioniert und kann über eine Sechskantmutter (6) gekontert werden, um eine versehentliche oder durch Vibrationen verursachte Änderung der Lagerposition zu verhindern. In der Lagerbuchse ist die Steckverschraubung (4) montiert. Die gesamte Lagereinheit wird auf Aluprofilschienen an den Betonaufstellungen montiert.

Durch die abnehmbaren Lagerdeckel können Incident und Transmission Bar mitsamt dem Luftlager und der Luftlagerbuchse ausgebaut werden. Dadurch ist es auch möglich, die Luftlager mit applizierten DMS zu demontieren, da die Luftlager zu jeder Seite abgezogen werden können.

Die gesamte Lagereinheit (excl. Normteile und Luftlager) wurde am IFT hergestellt. Lageraufhängungen und Lagerbuchsen werden aus Aluminium AlCuPbMgMn EN AW 2007 (3.1645) gefertigt.

4.3 Aufbau des SHPB-Versuchstandes

In diesem Kapitel wird auf den Aufbau und die Ausrichtung des SHPB-Versuchstandes eingegangen und ausgeführt, worauf dabei zu achten ist.

4.3.1 Ausrichtung und Nivellierung der Trägerkonstruktion

Der Standort für die Versuchsanlage musste im Laufe dieser Arbeit aus logistischen Gründen gewechselt werden. Die einzelnen Betonblöcke wurden zum neuen Standort transportiert und mithilfe eines fahrbaren Hydrauliktisches an der vorgesehenen Position abgesetzt. Da die einzelnen Betonblöcke über keinen Träger miteinander verbunden sind, wurden die einzelnen Betonblöcke entlang einer Bodenmarkierung – wie in der unteren Abbildung zu sehen – ausgerichtet.

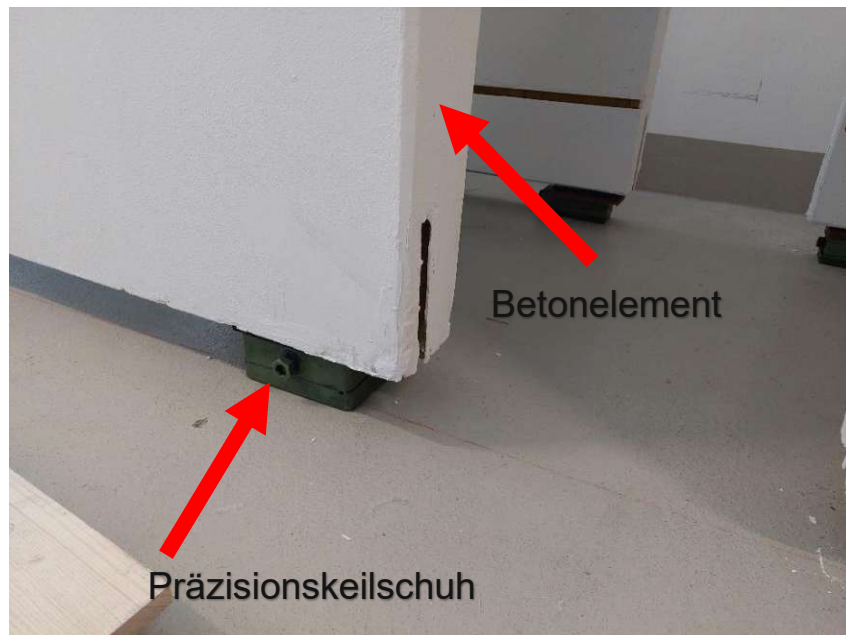


Abbildung 42: Ausrichten der Betonblöcke, e. A.

Wichtig bei diesem Arbeitsschritt war es, die korrekten Abstände der Betonblöcke untereinander möglichst genau einzuhalten. Insbesondere zwischen den Blöcken, auf denen Impact und Incident Bar gelagert sind, muss für eine gleichmäßige Auskrantung der Bars und eine dadurch mittige Positionierung der Probe der Abstand zwischen den Blöcken eingehalten werden.

Für den späteren Aufbau der Luftlager und deren Ausrichtung ist eine grundlegende Ausrichtung des Unterbaus notwendig. Neben der linearen Ausrichtung ist es notwendig, die einzelnen Betonblöcke einzeln in Waage zu bringen und auf die gleiche Höhe einzustellen. Begonnen wurde dabei mit der Ausrichtung des Blockes, auf dem die Druckluftkanone verbaut ist. Über die Präzisionskeilschuhe PK2-D der Firma Bilz

können Höheneinstellung und Nivellierung vorgenommen werden. In Abbildung 43 sind die dafür verwendeten Messwerkzeuge abgebildet. Es handelt sich um eine Präzisionswasserwaage der Firma Kinex Modell 5727.1/150 mit einer Genauigkeit von 0,02 mm/1.000 mm und einen Laser-Entfernungsmesser Bosch Professional GLM 40 mit einer Genauigkeit von 0,1 mm.



Abbildung 43: Maschinenwasserwaage und Abstandslaser, e. A.

Alle Blöcke werden zuerst auf die Höhe des ersten Blockes eingestellt und anschließend in beiden Raumrichtungen in Waage gebracht. In Abbildung 44 ist das Nivellieren dargestellt, dies erfolgt auf den aufgebauten Aluprofilschienen, an denen später die Lagerböcke für die Luftlager montiert werden. Abschließend wird noch einmal die Höhe kontrolliert und bei Bedarf angepasst.



Abbildung 44: Nivellieren der Betonblöcke, e. A.

Aufgrund von Bodenunebenheiten war es an einigen Stellen nötig, zwischen den Präzisionskeilschuhen und den Betonblöcken zusätzliches Unterlegematerial zu verwenden. Um eine Positionsänderung der bereits ausgerichteten Blöcke zu vermeiden, wurden die Blöcke mit vier Maschinenhebern Jung JH 6 G plus angehoben, wie in Abbildung 45 zu sehen.



Abbildung 45: Anheben der Betonblöcke ohne Positionsveränderung, e. A.

4.3.2 Einbau der Luftlager

Die Lagerung für Impact- und Transmission Bar besteht aus jeweils vier Luftlagern, die in Lagerbuchsen eingepresst sind. Bei den verwendeten Luftlagern handelt es sich um das Modell S301301 von New Way Air Bearings. Bei der Montage der Luftlager in die Lagerbuchsen sind laut Hersteller folgende Schritte zu beachten:

- Reinigen des Lager- und Lagersitz (ohne O-Ringe) mit Isopropanol >90 %
- Reinigung immer unter Druckluftbeaufschlagung von 4,1 bar
- Reinigen der O-Ringe mit Isopropanol <90 %
- Alkohol vollständig verdampfen lassen vor Einbau/ Gebrauch des Lagers

Nachdem die Lager gereinigt und mit den O-Ringen bestückt sind, werden diese in die Lagerbuchsen eingepresst. Beim Einpressen ist darauf zu achten, dass das poröse Karbonmaterial des Luftlagers nicht beschädigt wird (Abbildung 47). Dafür wurde eine Einpresshilfe gefertigt, die nur auf das äußere eloxierte Aluminiumgehäuse drückt (Abbildung 46).



Abbildung 46: Einpresshilfe,
e. A.

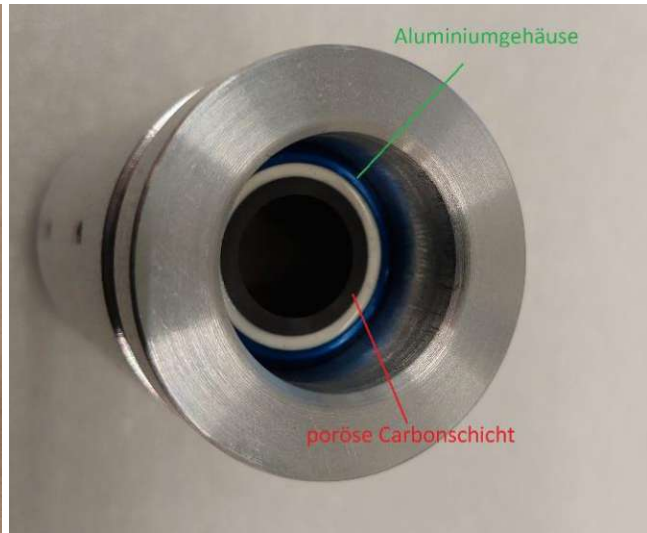


Abbildung 47: Luftlager
im eingepressten
Zustand, e. A.

Es besteht auch die Möglichkeit, nach der Montage und Ausrichtung der Bars die Luftlager in den Lagerbuchsen mit 2-Komponenten Epoxidharzkleber auszugießen. Daher sind in den Lagerbuchsen Bohrungen vorhanden, die das Ausgießen und Entlüften ermöglichen. Es ist daher notwendig, beim Einpressen der Luftlager darauf zu achten, dass die Position der O-Ringe nicht in der Nähe dieser Öffnungen liegt, um eine ordnungsgemäße Funktion der Luftlager zu gewährleisten (Abbildung 48).

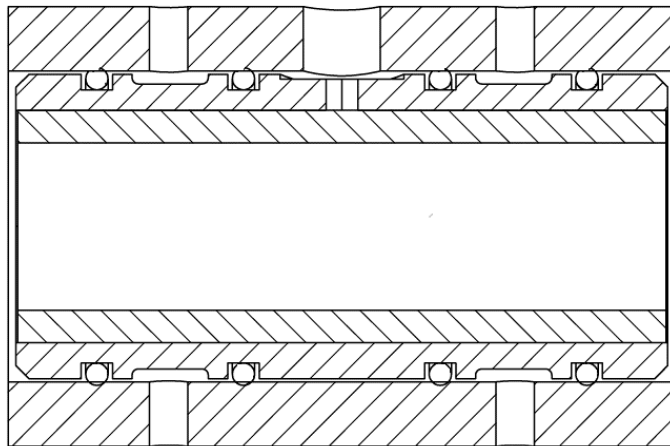


Abbildung 48: Luftlagerposition, schematische Darstellung

4.3.3 Zusammenbau der Lagerung

Die Lagerböcke werden auf Aluprofilschienen Motedis Profile 40x80L I-Typ mit den passenden Nutensteinen montiert. Der Lagerabstand wurde in einer vorangegangenen Bachelorarbeit über folgende Gleichung nach [30] berechnet:

$$A = \frac{L}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (46)$$

A ... Abstand zwischen zwei Lagern [mm]

L ... Gesamtlänge von Incident bzw. Transmission Bar [mm]

n ... Anzahl der Lager pro Bar

Auf den 1.200 mm langen Betonblöcken für die Incident und Transmission Bar sind jeweils vier Lager symmetrisch angeordnet. Die Längen der Incident und Transmission Bar betragen $L=1.500$ mm. Abbildung 49 zeigt eine vereinfachte Skizze der Lagerung.

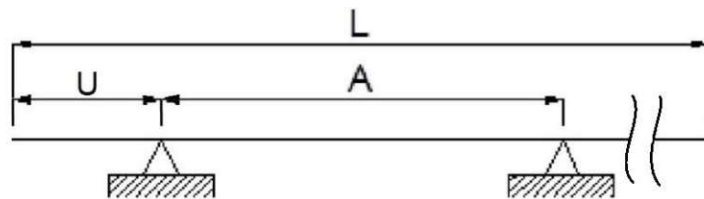


Abbildung 49: Skizze zur Lagerpositionierung, in Anlehnung an [30]

Die Länge der auskragenden Enden der Bars wurde nach folgender Gleichung ermittelt.

$$U = \frac{L - A(n - 1)}{2} \quad (47)$$

U ... auskragende Länge [mm]

Damit ergeben sich folgende Werte:

- A = 387,30 mm
- U = 169,05 mm

Bei der Montage der Aluprofilschienen mit Winkelverbinder GUS 4500 PAC 0080 der Firma Robotunits trat das Problem auf, dass die Aluschienen nicht bis ans Ende der Betonblöcke gerückt werden konnten (Abbildung 50). Jede Schiene ist mit vier Winkel an den Nuten des Blockes befestigt, bei einer einseitigen Montage der Winkel kippt die Aluschiene auf und es ist keine flächige und stabile Auflage möglich.



Abbildung 50: Lage der äußersten Profilschiene, e. A.

Daher ergeben sich folgende neue Maße für die Lagerabstände und Auskraglängen:

- $A_{\text{neu}} = 346,66 \text{ mm}$
- $U_{\text{neu}} = 230 \text{ mm}$

Für die Montage der Lagerböcke auf die Aluprofilschienen werden die zugehörigen Nutensteine mit Steg Typ I für Nutbreite 8 mm verwendet. Nachdem die Lagerböcke auf den Schienen montiert sind, werden die Luftlagerbuchsen mit den eingebauten Luftlagern eingelegt und der Lagerdeckel aufgeschraubt. Die Luftversorgung für die Luftlager muss laut Herstellerangaben für einen problemlosen Betrieb frei von Partikeln und Feuchtigkeit sein. Dazu wird die Luft über mehrere hintereinander geschaltete Filter aufbereitet (Abbildung 51). Über ein Druckregelventil kann der benötigte Arbeitsdruck von 4,1 bar eingestellt werden. Je ein 4-fach Pneumatik-Verteiler verteilt die ankommende Druckluft zu den Luftlagern der Incident und Transmission Bar (Abbildung 52).

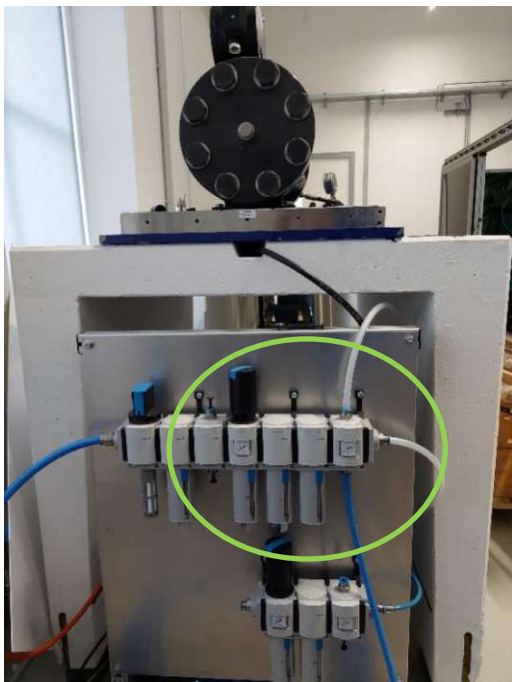


Abbildung 51: Wartungseinheit
Luftlager, e. A.



Abbildung 52: Pneumatik-
Verteiler, e. A.

In Abbildung 53 sieht man die fertig aufgebauten Lagereinheiten samt installierter Pneumatik und die Lage des Pneumatik-Verteilers für die Incident Bar. Die Lager sind betriebsbereit, aber noch nicht ausgerichtet.

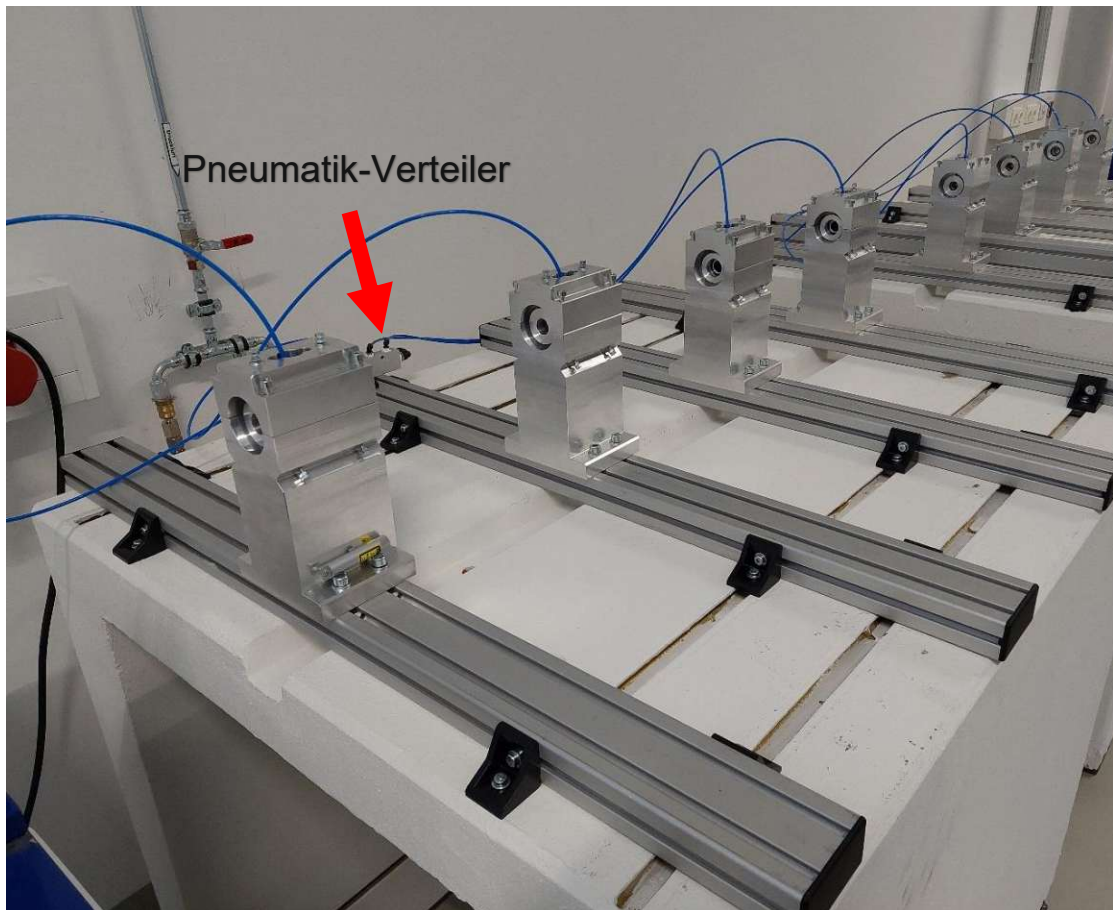


Abbildung 53: Lagerung für Incident und Transmission Bar, e. A.

4.3.4 Ausrichten des Kanonenlaufs und der Bars

Einer der wichtigsten Aspekte einer SHPB-Anlage ist die korrekte Ausrichtung der Bars. Die Bars müssen genau entlang einer Linie ausgerichtet werden und an den Kontaktstellen (Striker/Incident und Incident/Transmission) möglichst planparallel zueinanderstehen.

In Abbildung 54 ist ein Laseraufbau für die korrekte Ausrichtung der Lager dargestellt. Bei dieser Methode wird ein Laser genutzt, wie er z.B. auch für das Einrichten eines Zielfernrohres von Schusswaffen in Verwendung ist. Damit der Laser im Kanonenrohr zentriert wird, muss eine passende Vorrichtung gefertigt werden, die den Laserstrahl genau zentriert. Für die Lager werden Lochscheiben benötigt, die möglichst genau in die Lager eingepasst werden und in der Mitte ein kleines Loch haben. Nun werden die Lager feinjustiert, sodass der Laserstrahl durch alle Lochscheiben geht. Dadurch ist die Achse der Kolsky Bars genau zentrisch zum Kanonenrohr ausgerichtet. [vgl. 12, p. 20]

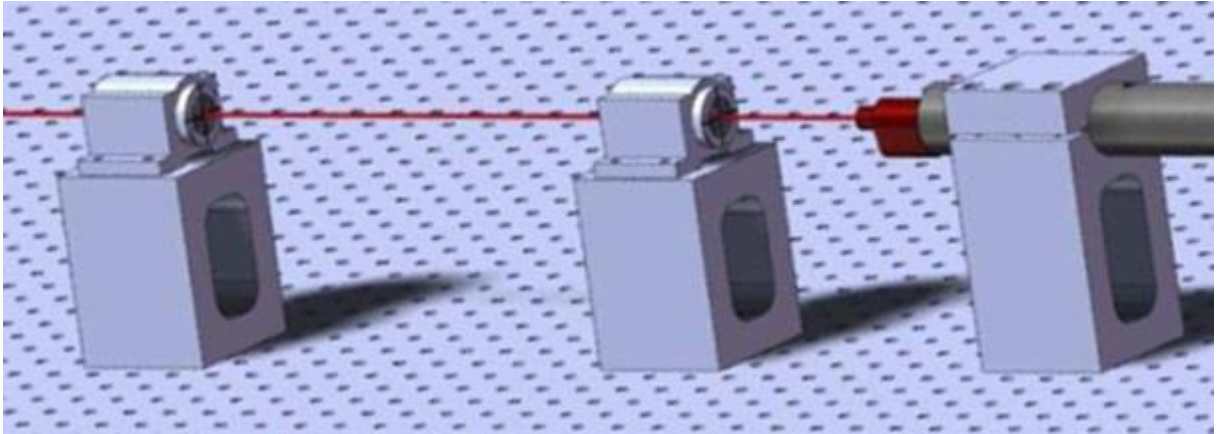


Abbildung 54: Ausrichtung der Lager über einen Laser, in Anlehnung an [12, p. 19]

In dieser Arbeit wurde eine andere Form der axialen Ausrichtung angewendet. Die Lager werden direkt mit der Incident bzw. der Transmission Bar eingerichtet. Der erste Schritt ist das Ausrichten des Kanonenrohrs. Wie in Abbildung 55 zu sehen ist, ist das Kanonenrohr auf den ersten beiden Blöcken der Anlage gelagert. Der Lauf besteht dabei aus zwei Teilen, dem eigentlichen Lauf, in dem der Striker durch die Druckluftkanone beschleunigt wird. Der zweite Teil ist das Entlüftungsrohr, welches sicherstellt, dass nach dem Aufschlagen des Strikers auf die Incident Bar kein weiterer Druck auf den Striker ausgeübt wird.

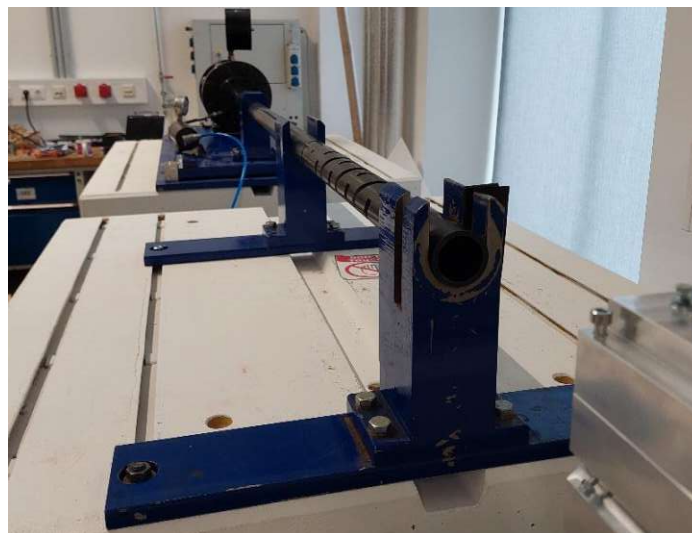


Abbildung 55: Druckluftkanonen mit Kanonenrohr, e. A.

Die Lager, in denen das Kanonenrohr geführt ist bzw. aufliegt, wurden von der Altanlage übernommen und sind nicht verstellbar ausgeführt. Auch nachdem die Betonblöcke wie in Kapitel 4.2.1 ausgerichtet worden sind, war das Kanonenrohr nicht

in Waage. Zur Justierung der Höhe wurden unter den Lagerböcken Fühlerlehren in verschiedenen Stärken verwendet. Abbildung 56 zeigt das Nivellieren des Kanonenrohrs, ein Messstrich auf der Wasserwaage bedeutet dabei eine Abweichung von 0,02 mm auf einer Länge von 1.000 mm.

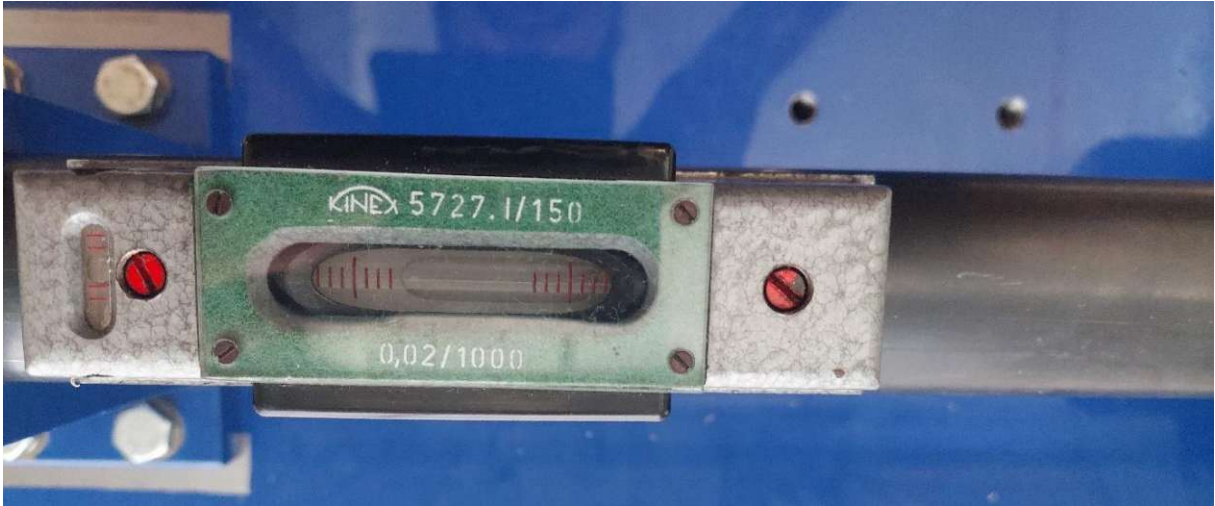


Abbildung 56: Nivellieren des Kanonenrohrs, e. A.

Wie weiter oben schon erwähnt ist es wichtig, dass die Achse der Kolsky Bars deckungsgleich mit der Achse des Kanonenrohrs ist. Um also die Incident Bar entlang der Achse des Kanonenrohrs ausrichten zu können, wurde eine Ausrichtevorrichtung gefertigt (Abbildung 57). Die Vorrichtung ist so gefertigt, dass die innere Bohrung genau im Zentrum des Kanonenrohrs ist.



Abbildung 57: Vorrichtung zur axialen Ausrichtung der Bars am Kanonenlauf, e. A.

Alle Bars (Incident, Transmission, Striker und Momentum) haben eine Durchmesser Genauigkeit von wenigen μm . Dadurch ist es möglich, für das Ausrichten der Lager die verschiedenen Längen zu nutzen. Dies vereinfacht den Prozess maßgeblich, da so ein Lager nach dem anderen über die verschieden langen Bars

ausgerichtet werden kann. In Abbildung 58 sieht man diesen Vorgang beim ersten Lager. Das Lager wurde so justiert, dass der Bar in die Passung der Ausrichtevorrichtung eingeführt werden kann. Nur wenn der Bar sowohl im Lager als auch in der Vorrichtung sich ohne Kraftaufwand verschieben lässt, ist von einer guten axialen Ausrichtung auszugehen.

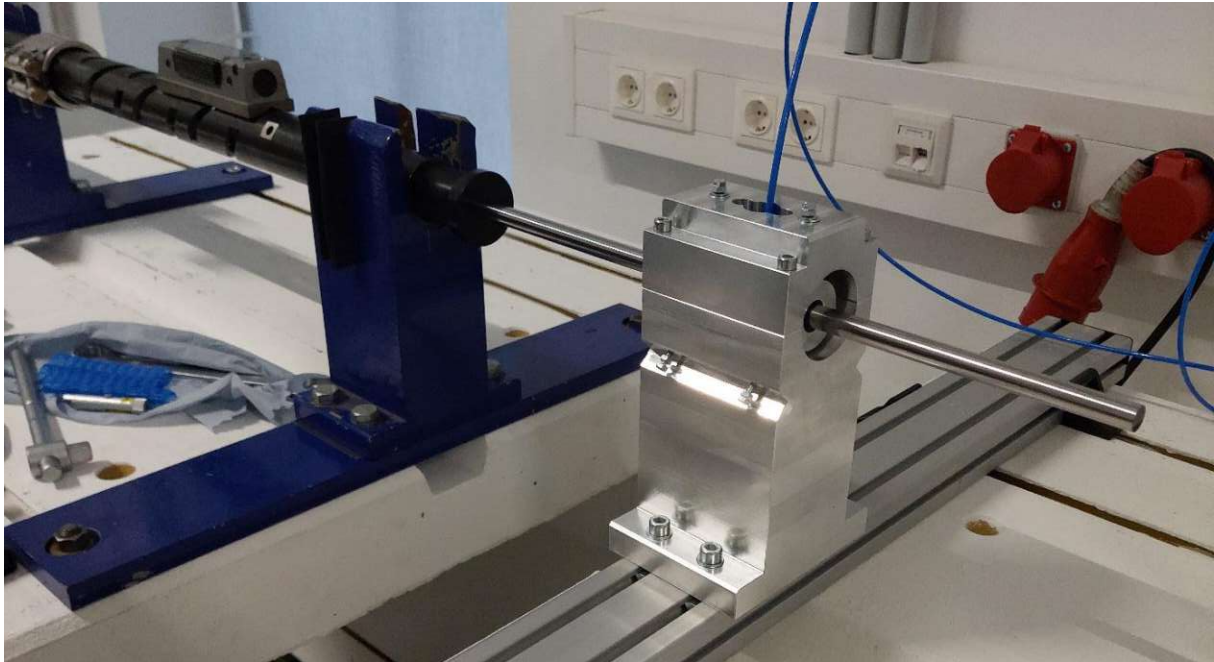


Abbildung 58: Ausrichten des ersten Lagers, e. A.

Da beim Einrichten der Lager die Bars des Öfteren gewechselt und in die Luftlager eingefädelt werden müssen, ist eine sauber Arbeitsweise wichtig. Die Luftlager und Bars werden jedes Mal wie vom Hersteller der Luftlager empfohlen mit Isopropanol gereinigt und erst nach dem vollständigen Verdunsten des Alkohols eingebaut. Außerdem wurden alle Bars mit einem Radiusprofil gefertigt, um die empfindlichen Lager nicht zu beschädigen. Das Ausrichten der Lager ist aufgrund der sehr geringen Toleranz (empfohlener Luftspalt $4\mu\text{m}$) zwischen Lager und Schaft ein zeitaufwändiger Vorgang. Bei einer etwaigen Revision und Änderung der Lagerböcke ist eine Einstellmöglichkeit über Feingewinde zu empfehlen. Es wurden zunächst die vier Lager des Incident Bar auf diese Weise ausgerichtet.

Die abschließende Kontrolle, ob die Lager korrekt ausgerichtet sind, erfolgt durch mehrere Punkte:

- Der Incident Bar muss leichtgängig in die Ausrichtevorrichtung eingeführt werden können.
- Es darf beim Verschieben der Incident Bar keine Reibgeräusche bei einem Lager geben.

- Die Leichtgängigkeit der Incident Bar wird mithilfe der Abstoßkraft eines Neodym-Magneten kontrolliert (ca. 1,57 N).
- Aufgrund der geringen bis kaum vorhandenen Reibung der Lagerung erkennt man sehr gut, ob der Incident Bar in Waage ist. Ist ein Lager nicht korrekt ausgerichtet, bleibt der Bar nicht im Stillstand und beginnt sich in die eine oder andere Richtung zu bewegen.

Das Vorgehen für die Lager der Transmission Bar ist ähnlich, nur dass für die axiale Ausrichtung nicht das Kanonenrohr dient, sondern die bereits fertig ausgerichteten Lager des Incident Bar. Das erste Lager des Transmission Bar wird so ausgerichtet, dass der Incident Bar leicht eingefädelt werden kann. Zur Kontrolle werden alle Punkte der obenstehenden Liste angewendet. So wird ein Lager nach dem anderen eingerichtet, bis der Incident Bar vollständig in der Lagerung des Transmission Bar geführt wird und korrekt ausgerichtet ist. Anschließend wird der Incident Bar wieder in seine Lagerung zurückgeschoben und von der hinteren Seite wird der Transmission Bar eingefädelt. In Abbildung 59 sieht man den fertigen Aufbau der Kolsky Bars. Bei korrekter Ausrichtung der Lager berühren sich Incident und Transmission Bar vollflächig und ohne Spalt zwischen den beiden Kontaktflächen (Abbildung 60).

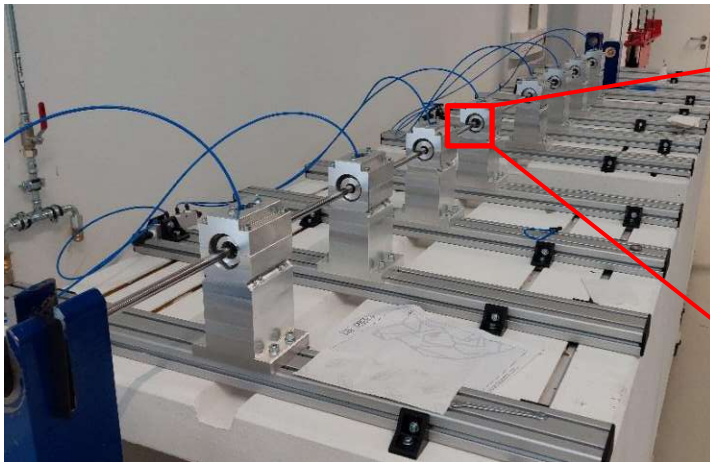


Abbildung 59: Ausgerichtete Kolsky Bars, e. A.

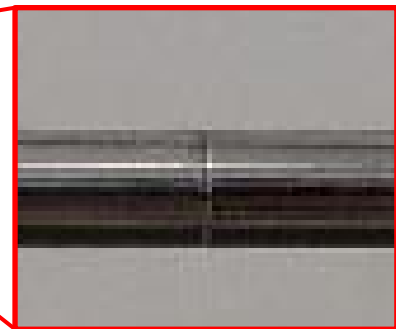


Abbildung 60: korrekte Lage der Bars, e. A.

4.3.5 Aufbau der Momentum Trap

Der abschließende Teil des Aufbaus der Anlage umfasst die Momentum Trap Bar und die Bremsvorrichtung. Die Bremsvorrichtung für die Momentum Trap Bar wird von der ursprünglichen Anlage übernommen. Der Bremsvorgang wird über die Reibung mehrerer Hartholzstäbe, welche von einem U-Profil und vier vorgespannten Federn aneinandergedrückt werden, realisiert. Das blaue Gestell, das in Abbildung 61 zu sehen ist, kann bei der neuen Anlage nicht mehr verwendet werden.



Abbildung 61: Momentum Trap alte Anlage, e.A.

Die Momentum Trap der neuen Anlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Bremsvorrichtung
- Momentum Trap Bar
- Zwei Lagerböcke
- Zwei Lager aus Lagerbronze
- Eine Aluprofilschiene

In der Momentum Trap konnten die meisten Komponenten von der alten Anlage übernommen werden. Die Lagerböcke, die anfänglich für den Umbau auf das neue Lagerbockdesign gedacht waren, konnten ohne Überarbeitung verwendet werden. Die Lager wurden aufgebohrt und mit einer Reibahle auf den passenden Durchmesser für die Momentum Trap Bar gebracht. Die Bremsvorrichtung wurde auf einer Aluprofilschiene befestigt, die über zwei Durchgangslöcher mit dem Betonblock verschraubt ist. Die fertig aufgebaute Momentum Trap ist in Abbildung 62 abgebildet.



Abbildung 62: Momentum Trap neue Anlage, e.A.

4.4 Messsysteme

In diesem Kapitel werden die Themen behandelt, die für die Erfassung der Messungen und Datenverarbeitung des SHPB-Versuches notwendig sind.

4.4.1 Geschwindigkeitsmessung des Strikers

Länge und Geschwindigkeit des Striker Bars sind neben der Probengeometrie die beiden veränderbaren Parameter in einem SHPB-Versuch. Dabei nimmt die Impact Geschwindigkeit einen direkten linearen Einfluss auf die Höhe der Amplitude der longitudinalen Druckwelle und der dadurch indizierten Dehnung in den Bars. [10, 12, p. 11]

$$\hat{\sigma}_{in} = \frac{1}{2} \rho C_0 v_{st} \quad (48)$$

$\hat{\sigma}_{in}$ Amplitude der Druckspannung [N/mm²]

ρ Dichte des Incident Bar [kg/m³]

v_{st} Striker Geschwindigkeit [m/s]

C_0 Schallgeschwindigkeit Barmaterial [m/s]

$$\varepsilon_{in} = \frac{v_{st}}{2 * C_0} \quad (49)$$

ε_{in} Dehnung der Incident Bar

Diese Gleichungen haben Gültigkeit, wenn der Striker Bar aus demselben Material wie der Incident Bar gefertigt ist und sie denselben Durchmesser haben. Eine genaue und akkurate Messung der Striker Geschwindigkeit ist daher ein wichtiges Kriterium. In Verbindung mit der elastischen Dehnung im Incident Bar wird die Geschwindigkeit des Strikers benötigt, um die SHPB-Anlage zu kalibrieren. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Bar Werkstoff z.B. sollte für jede Bar überprüft werden. Aufgrund von Materialzusammensetzung, Mikrostrukturen oder Wärmebehandlung kann es zu messbaren Abweichungen gegenüber den Werten aus Materialdatenblättern kommen. [vgl.10]

Mathematisches Modell der Striker Geschwindigkeit

In einem ersten Schritt soll die erreichbare Geschwindigkeit des Strikers in Abhängigkeit des Kammerdruckes der DLK-40 A modelliert und abgeschätzt werden. Rohrbach et al. beschäftigen sich in [13] ausführlich mit der Modellierung der Mündungsgeschwindigkeit von Druckluftkanonen.

Wie in Abbildung 63 zu sehen definieren Rohrbach et al. neben der allgemeinen Bewegungsgleichung eines Projektils drei Modelle.

- Modell b: adiabatische Expansion der Druckluft (b)
- Modell c: quasistatische, isotherme Expansion der Druckluft (c)
- Modell d: eingeschränkte Expansion der Druckluft aufgrund eines Ventils (d)

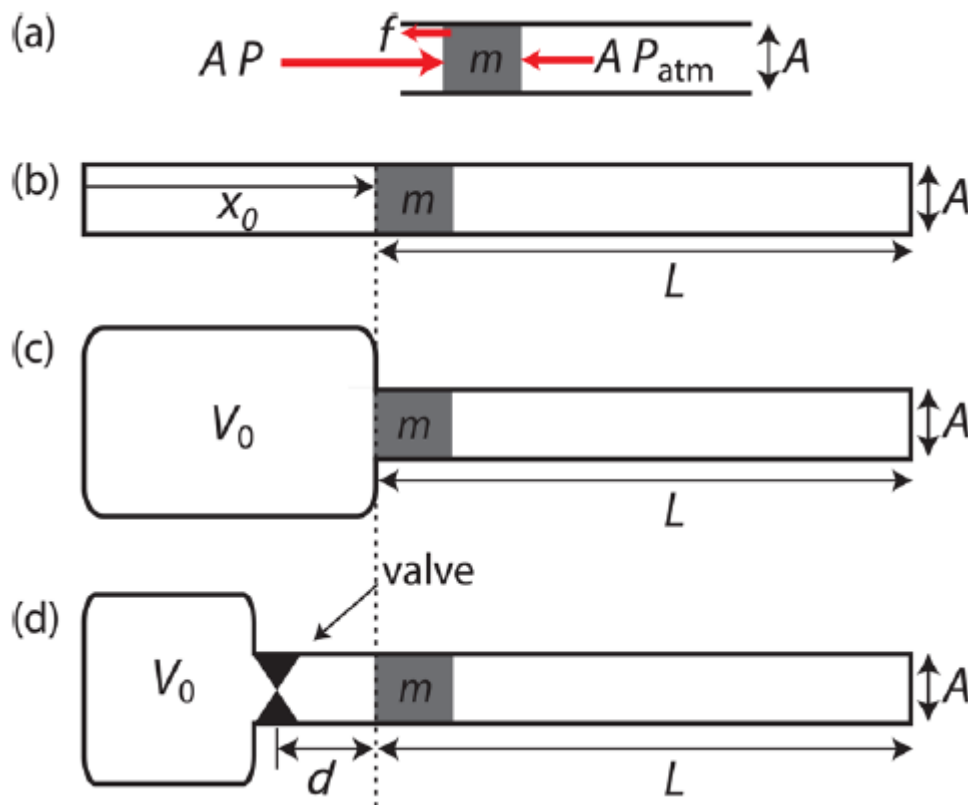


Abbildung 63: (a) angreifende Kräfte auf das Projektil, (b)-(d) Modelle für die Beschleunigung eines Projektils, [13]

Der Aufbau und die Funktionsweise der DLK-40 A entspricht Modell Nr. 2. Durch die Klemmung der Geschosshülse kann der aufgebaute Druck ohne die Einflüsse eines Ventils das Geschoss beschleunigen. Die allgemeine Bewegungsgleichung aufgrund der angreifenden Kräfte während der Expansion der Druckluft ist nach [13] wie folgt definiert:

$$F = mv \frac{dv}{dx} = AP(x) - AP_{atm} - f \quad (50)$$

F Kraft [N]

m Masse des Geschosses [kg]

v Geschwindigkeit des Geschosses [m/s]

A Querschnittsfläche des Geschosses [mm²]

$P(x)$.. Kammerdruck in Abhängigkeit der Geschossposition [bar]

P_{atm} .. Atmosphärischer Druck [bar]

f Kraft aufgrund der Reibung des Geschosses im Kanonenrohr [N]

Mit dem isothermen Zusammenhang des Druckes $P(x)(V_0 + Ax) = P_0V_0$ folgt für die Austrittsgeschwindigkeit des Geschosses [13]:

$$v_{st} = \sqrt{\frac{2}{m_{ges}} (p_0V_0 \ln(1 + \frac{A_L L_L}{V_0}) - A_L L_L p_{atm} - L_L f)} \quad (51)$$

m_{ges} ... beschleunigte Masse bestehend aus Striker und Geschosshülse [kg]

p_0 Druck in der Kanone [N/mm²]

p_{atm} ... Umgebungsdruck [bar]

V_0 Volumen der Druckkammer [m³]

A_L Querschnitt des Kanonenlaufs [mm²]

L_L wirksame Länge des Kanonenlaufs [mm]

f Reibkraft [N]

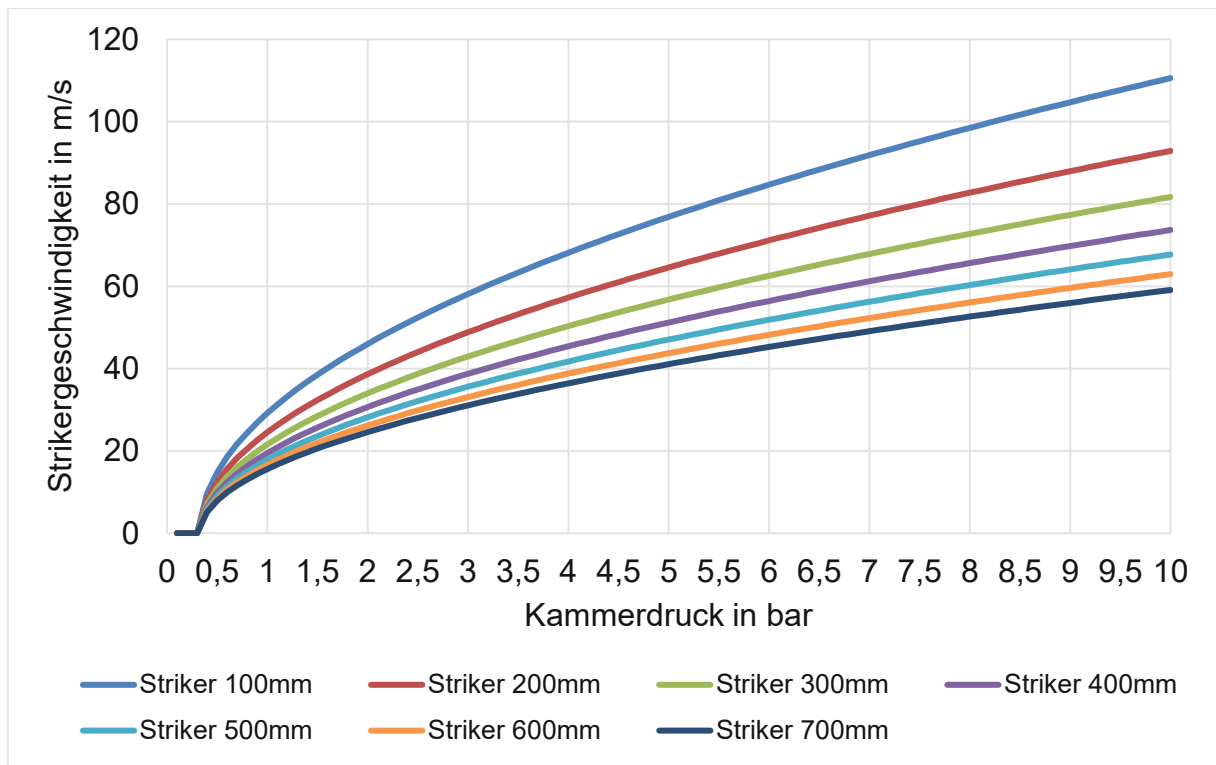


Abbildung 64: Modellierter Druck- / Geschwindigkeitsverlauf der Striker Bars

In dem in Abbildung 64 dargestellten Diagramm sind die Druck- zu Geschwindigkeitsverläufe für die gewählten Strikerlängen, die nach (51) berechnet wurden, graphisch dargestellt. Die erreichbaren Geschwindigkeiten, insbesondere bei geringer Strikerlänge, steigen rasch an. Es gilt daher zu beachten, dass die Voraussetzung einer rein-elastischen Deformation im Incident Bar nicht verletzt wird. Nach Umstellen von Gleichung (48) kann mit den Werkstoffkennwerten der Maraging Bars die maximal zulässige Aufprallgeschwindigkeit bestimmt werden.

$$v_{0_max} = \frac{2R_{p0,2}}{\rho C_0} \quad (52)$$

Mit den Werkstoffkennwerten für den Barwerkstoff Böhler V300, $\rho = 8200 \frac{kg}{m^3}$ und $R_{p0,2} = 1815 MPa$ und der berechneten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit $C_0 = 851.5 \frac{m}{s}$, beträgt die maximale Aufprallgeschwindigkeit der Striker für eine rein-elastische Beanspruchung:

$$v_{0_max} = 91,25 \frac{m}{s}$$

Um Beschädigungen und Deformationen zu vermeiden sollte allerdings dieser Wert nicht erreicht werden, sondern ein gewisser Sicherheitsfaktor miteinbezogen werden.

Überprüfung des mathematischen Modells

Die berechneten Druck- / Geschwindigkeitszusammenhänge werden mit einem Versuch an der SHPB-Anlage verifiziert. Dazu wird eine Geschwindigkeitsmessung mittels High-Speed-Kamera am Rohrende installiert. Die Tests wurden mit dem Striker der Länge 300 mm durchgeführt mit dem Ziel, die Abweichung des mathematischen Modells zu bestimmen.

Messaufbau

Der Messaufbau ist in Abbildung 65 zu sehen, die eingesetzte Kamera ist eine Photon Nova S16 und für die Ausleuchtung wird ein Dedocool Kaltlicht-Beleuchtungssystem von Dedolight verwendet. Zur Bestimmung der zurückgelegten Strecke wird Millimeterpapier verwendet, das hinter dem Kanonenlauf befestigt ist. Die Kamera zeichnet die Bewegung des Strikers mit 50.000 Bildern pro Sekunde auf. Zur Auswertung wird die Software der Kamera (Photron FASTCAM Viewer) verwendet, durch das Millimeterpapier kann die zurückgelegte Strecke identifiziert werden. Die Länge der Messstrecke zur Ermittlung der Geschwindigkeit beträgt 10 mm. Über die Zeitaufzeichnung der Kamera wird die Zeit bestimmt, die der Striker für die Messstrecke benötigt, um die Geschwindigkeit zu bestimmen.

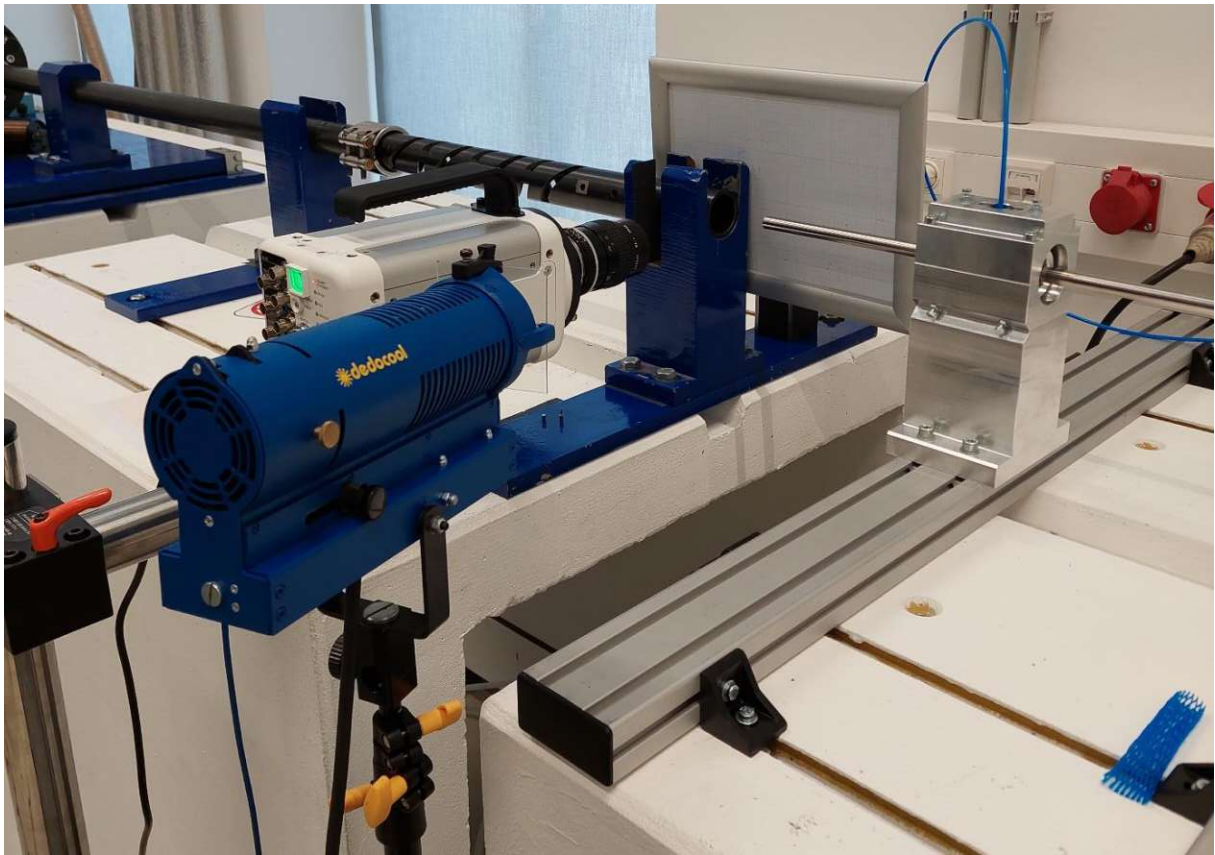


Abbildung 65: Messaufbau v_0 -Messung mit High-Speed-Kamera, e. A.

Zur Bestimmung des tatsächlichen Druck-/Geschwindigkeitsverlaufes wird der Striker mit verschiedenen Kammerdrücken abgefeuert und die Geschwindigkeit über den Messaufbau bestimmt. Um geringfügige Abweichungen bei der Einstellung des Kammerdruckes auszugleichen wird jeder Versuch dreimal wiederholt und zur Auswertung der Durchschnitt herangezogen.

Das mathematische Modell liefert ab einem Druck von $p = 0,4 \text{ bar}$ ein Ergebnis für die Geschwindigkeit, daher wurde als Startdruck $p = 0,3 \text{ bar}$ festgelegt. Wie vom Modell vorhergesagt, verlässt der Striker bei diesem Druck nicht das Kanonenrohr. Der Druck wurde in weiterer Folge bis zu $p = 1 \text{ bar}$ schrittweise um jeweils $0,1 \text{ bar}$ erhöht. Abschließend wurde noch ein Test bei $p = 1,5 \text{ bar}$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Gegenüberstellung der Druck-/Geschwindigkeitsverläufe von Modell und Versuch ist in Abbildung 66 dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung

Kammerdruck	$v_{0_Versuch}$	v_{0_Modell}	Abweichung
[bar]	[m/s]	[m/s]	in %
0,4	7,042	7,108	-0,920
0,5	12,821	10,932	17,280
0,6	15,152	13,729	10,363
0,7	17,241	16,046	7,453
0,8	20,012	18,068	10,761
0,9	22,727	19,885	14,292
1	23,810	21,550	10,485
1,5	31,250	28,448	9,848

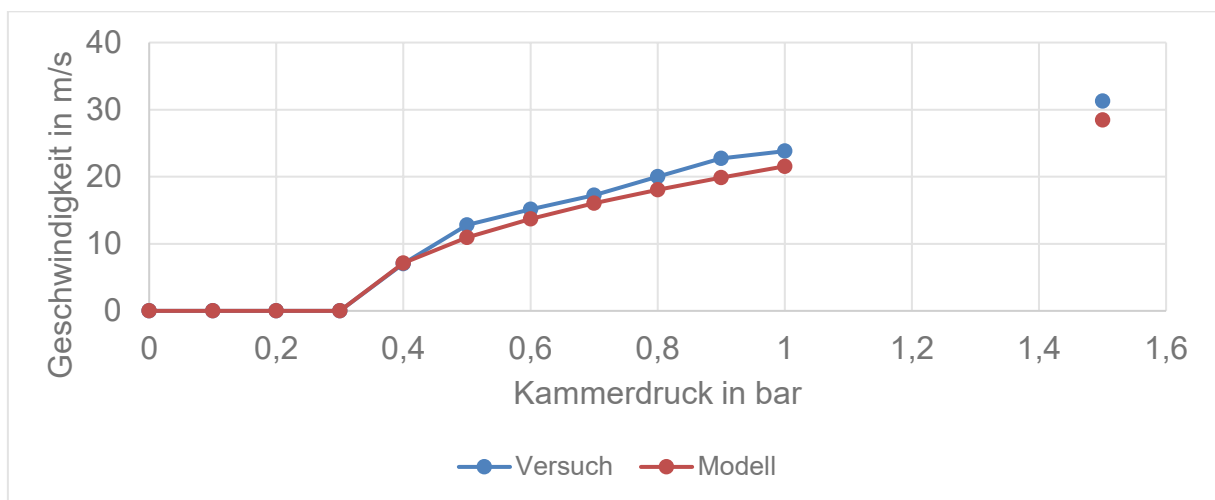


Abbildung 66: Druck-/ Geschwindigkeitsverlauf von Modell und Versuch mit Strikerlänge 300 mm

Die Ergebnisse des Versuches zeigen, dass die berechneten Geschwindigkeiten des Modells im Mittel um 9,945 % geringer sind.

Stationäre Geschwindigkeitsmessung

Für die Messung und Erfassung der Strikergeschwindigkeit wird ein stationäres Geschwindigkeitsmesssystem entwickelt, das die Geschwindigkeit des Strikers am Ende des Kanonenlaufes misst und anzeigt. Des Weiteren soll die Möglichkeit bestehen, die Geschwindigkeit an den Messcomputer zu übertragen, bzw. die Geschwindigkeit direkt an das Messdatenerfassungs-System der Dehnungsmessung zu übermitteln. Die Messung der Geschwindigkeit wird über ein optisches System mittels Fotodioden und Transimpedanzverstärker (TiA) realisiert. Das System ist so gestaltet, dass es direkt am Kanonenlauf montiert und ohne weitere Messtechnik (PC für Auswertung) betrieben werden kann.

Grundlegende Funktion einer Transimpedanzverstärkerschaltung

Der Striker passiert am Ende des Laufes zwei hintereinander liegende Fotodioden. Auf die Fotodiode auftreffendes Licht indiziert in der Diode einen Strom I_{pd} [31]. Der in der Diode erzeugte Strom wird mithilfe eines TiA (wie in Abbildung 67 dargestellt) in eine elektrische Spannung umgewandelt. Die Transimpedanzverstärkerschaltung besteht aus einem breitbandigem Operationsverstärker und einer Feedbackschleife, die aus einem parallel geschaltetem Bauteilpaar, aus einem Widerstand und aus einem Kondensator besteht [32, p. 18]. Der Strom I_{pd} fließt dabei durch den Feedbackwiderstand R_f und nicht durch den hochohmigen Operationsverstärker, dadurch fällt an der Stelle eine Spannung ab und führt dazu, dass sich die Ausgangsspannung des Verstärkers ändert [32, p. 19]. Die Verstärkung der Schaltung hängt dabei im Wesentlichen vom Widerstand und dem Kondensator in der Feedbackschleife ab [31]. Diese einfache Schaltung kann durch parasitäre Effekte in ihrer Stabilität beeinflusst werden, die Stabilität der Schaltung wird durch die richtige Wahl der Kapazität des Feedbackkondensators C_f beeinflusst.

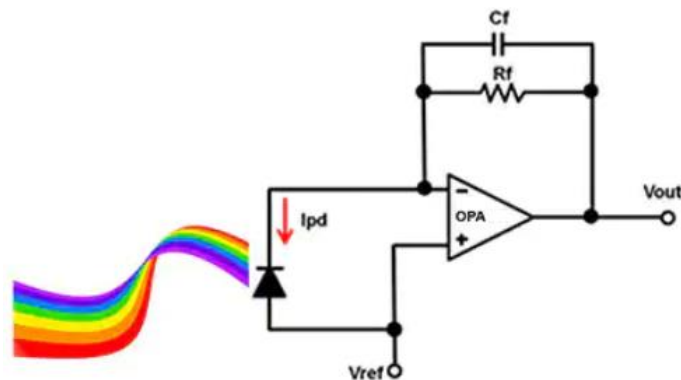


Abbildung 67: Schaltbild eines einfachen TiA-Schaltung, in Anlehnung an [31]

BauteilAuswahl und Schaltung für der TiA

Um den Fehler in der Detektion des Strikers und eine möglichst genaue Bestimmung der Geschwindigkeit zu ermöglichen, müssen die Bauteile für die Schaltung gewissen Anforderungen entsprechen. Die Bauteile sollen eine schnelle Ansprechzeit besitzen, um den Fehler so gering wie möglich zu halten. Außerdem sollen die verwendeten Bauteile besonders rauscharm sein. Als Diode wurde eine PIN-Diode S5972 der Firma Hamamatsu ausgewählt, diese ist aufgrund ihrer sehr schnellen Ansprechzeit und hohen Sensitivität sehr gut geeignet. Für den Operationsverstärker der TiA-Schaltung wird ein OPA858 der Firma Texas Instruments verwendet, der für High-Speed Transimpedanzverstärker sehr gut geeignet ist.

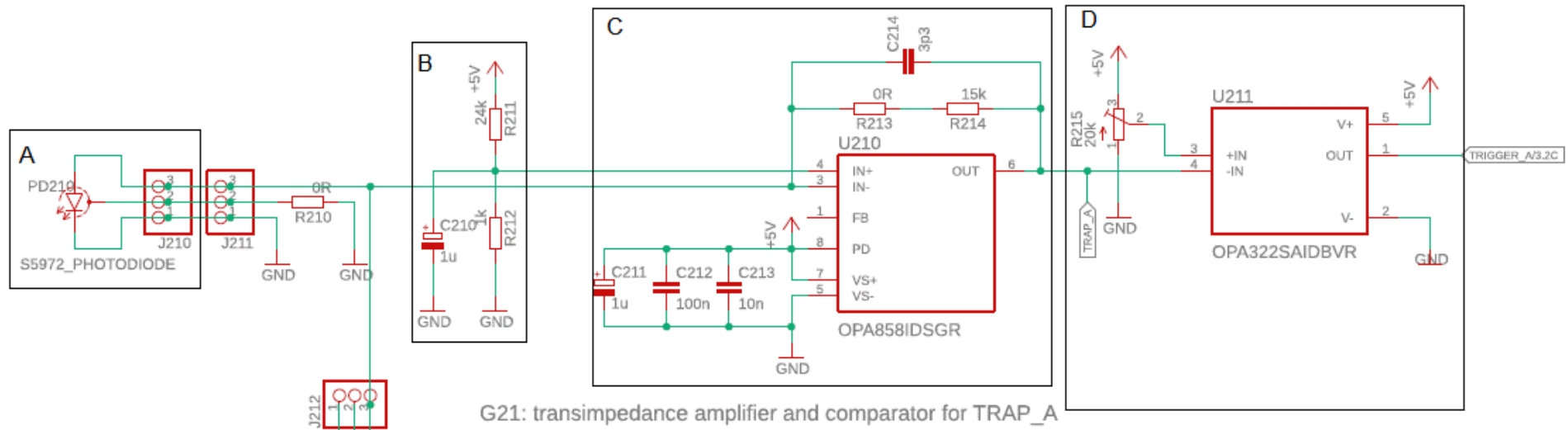


Abbildung 68: Schaltung der Geschwindigkeitsmessung

In Abbildung 68 ist die Schaltung einer der beiden hintereinanderliegenden Speed-Traps dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Bereiche der Schaltung kurz erklärt:

A: Die PIN-Fotodiode befindet sich auf einer Platine, die direkt über den Löchern am Kanonenlauf positioniert ist. Über den Stecker J212 ist diese mit der Hauptplatine verbunden.

B: Die Widerstände R211 und R212 bilden einen Spannungsteiler, der eine Offset-Spannung einstellt, sodass der Operationsverstärker des TiA nicht in die negative Sättigung geht.

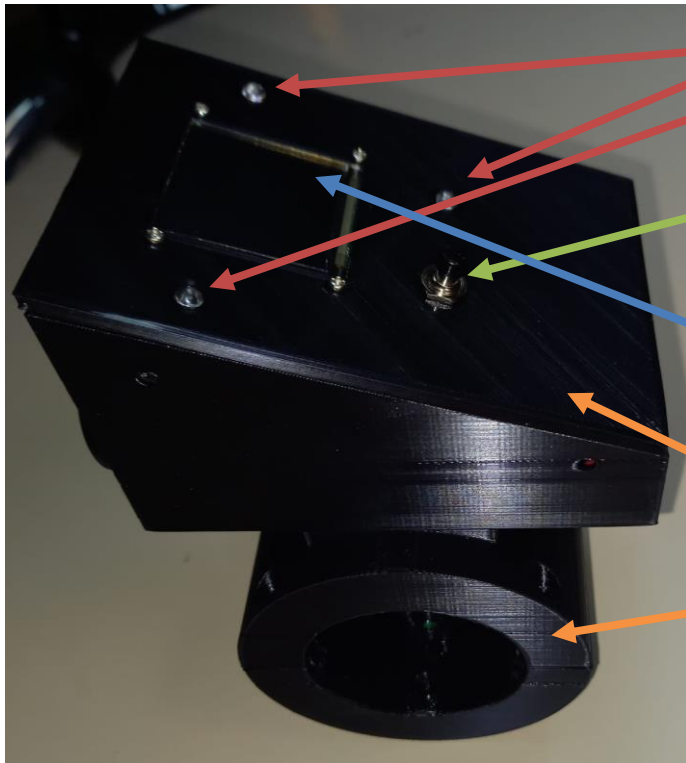
C: Der eigentliche Transimpedanzverstärker mit dem OPA858 und der Feedbackschleife. Die beiden Widerstände in der Feedbackschleife bestimmen den Verstärkungsfaktor der Schaltung. Der Kondensator bestimmt die Grenzfrequenz, bis zu der das Eingangssignal verstärkt wird und dient der Stabilität, um Schwingungen aufgrund der hochfrequenten Anregung zu unterdrücken. Die restlichen drei Kondensatoren sollen Schwankungen in der Versorgungsspannung ausgleichen.

D: Der TiA nachgeschaltet kommt eine Komparatorstufe. Diese fungiert als Schwellwertschalter, um aus dem analogen Signal eine rechteckige Flanke zu erzeugen, die die Zeitmessung triggert. Der Schwellwert ist über ein Potentiometer einstellbar.

Die restlichen Schaltpläne der Geschwindigkeitsmessung befinden sich im Anhang.

Funktionsbeschreibung der stationären Geschwindigkeitsmessung

Das fertige Messsystem (Abbildung 69) besteht aus zwei Baugruppen. Die zweigeteilte Aufnahme zur Montage des Systems ist in Abbildung 70 dargestellt. In jeder Halbschale ist eine Platine integriert. Auf der Platine der unteren Halbschale sind Infrarot-Leds (IR-Leds) verbaut, in der oberen Halbschale ist die Platine für die Fotodioden verbaut. Die Platinen werden mit den beiden Kabeln, die durch die obere Halbschale geführt sind, mit der Hauptplatine im Gehäuse verbunden. Die IR-Leds beleuchten die beiden im Kurzschluss betriebenen Fotodioden. In Abbildung 71 ist die Hauptplatine der v_0 -Messung sowie der Unterteil des Gehäuses abgebildet.



Leds zur Statusanzeige

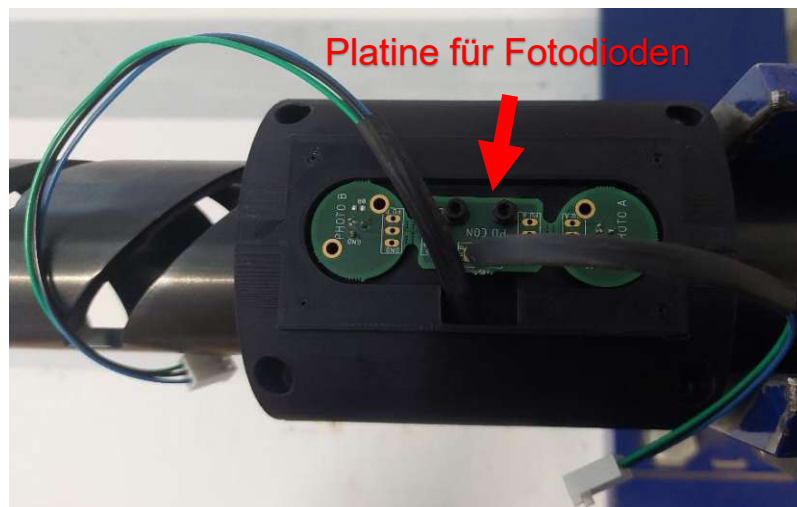
Taster zum Löschen des Displays

Display zur Anzeige von v_0

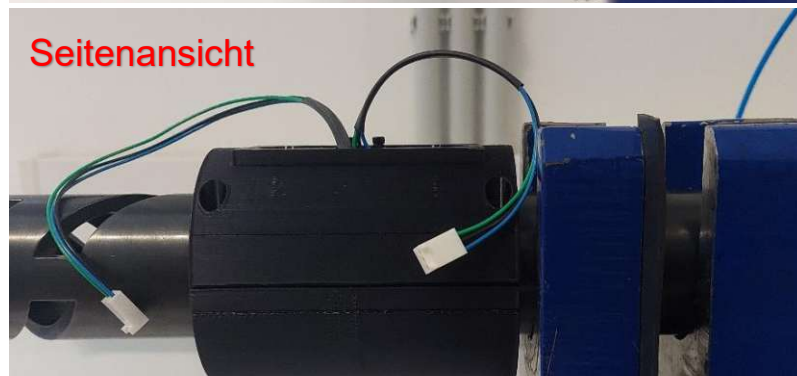
Gehäuse und Bedienfeld der v_0 -Messung

Aufnahme zur Montage am Kanonenlauf mit Fotodioden

Abbildung 69: Messsystem zur v_0 -Messung, e.A.



Platine für Fotodioden



Seitenansicht

Abbildung 70: Montierte Aufnahme mit Diodenplatinen, e.A.

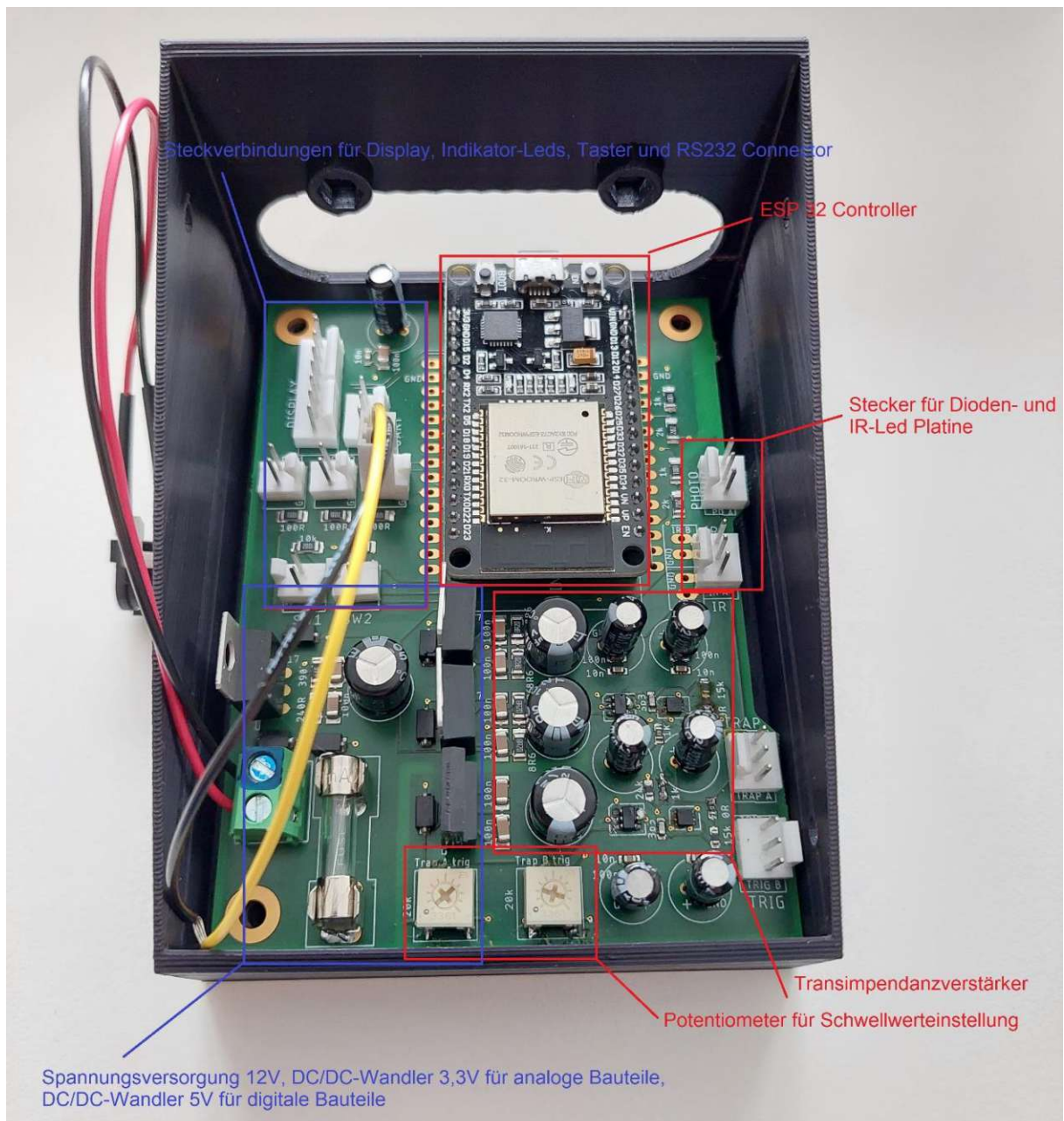


Abbildung 71: Gehäuse mit Hauptplatine, e.A

Wenn der Striker die erste Fotodiode passiert, wird das Licht der IR-Led abgeschwächt, das führt zu einer Abnahme des indizierten Stroms in der Fotodiode. Der Strom der Fotodiode wird im TiA in eine Spannung umgewandelt und gleichzeitig verstärkt, um ein auswertbares Signal zu erhalten. Die dem TiA nachgeschaltete Komparatorstufe erzeugt, ab einem einstellbaren Schwellwert (über Potentiometer), aus dem analogen Signal eine rechteckige Flanke, die die Zeitmessung triggert. Derselbe Ablauf findet auch beim Passieren der zweiten Fotodiodenschranke statt. Die eigentliche Zeitmessung führt dann der ESP32 Controller durch, der die Zeit zwischen

den Rechtecksignalen misst und damit die Geschwindigkeit über den Abstand der beiden Fotodioden berechnet. Außerdem steuert dieser auch das Display an, auf dem die Geschwindigkeit angezeigt wird, liest den Druckknopf zum Zurücksetzen der Messung aus und sendet die Geschwindigkeit per UART an einen optionalen PC.

4.4.2 Dehnungsmessung

In diesem Abschnitt soll ein Überblick über die zur Dehnungsmessung eingesetzten DMS gegeben werden und wie diese an Incident und Transmission Bar appliziert werden.

Bei der Auswahl der DMS wurde auf Nennwiderstand, Messgittergröße und die Einsatzmöglichkeit für dynamische Anwendungen geachtet. Die Messgittergröße sollte minimiert werden, um Einflüsse durch Scher- und Querdehnung auf das Messsignal zu reduzieren [33, p. 14]. Bei der Wahl des richtigen Nennwiderstandes ist neben der Anpassung des nachfolgenden Messgeräts und der Einflüsse der Übertragungswege zwischen DMS und Messgerät [34] laut persönlichen Gesprächen mit Steve Mates auch auf die Temperatureinflüsse durch Eigenerwärmung zu achten.

Die Wahl fiel auf einen linearen DMS der Y-Serie der Firma HBM mit einer Messgitterlänge von 3 mm (Datenblatt im Anhang). Die Trägerfolie besteht aus Polyimid und als Messgitterwerkstoff wird bei diesem Modell Konstantan eingesetzt. Laut Hersteller ist dieser Typ für die dynamische Spannungsanalyse gut geeignet und auch biegsam, was die Montage an den Bars erleichtert. Um den Einfluss des Nennwiderstandes auf die Messergebnisse zu untersuchen, werden sowohl DMS mit 350 Ω (Empfehlung HBM) als auch welche mit 1.000 Ω eingesetzt.

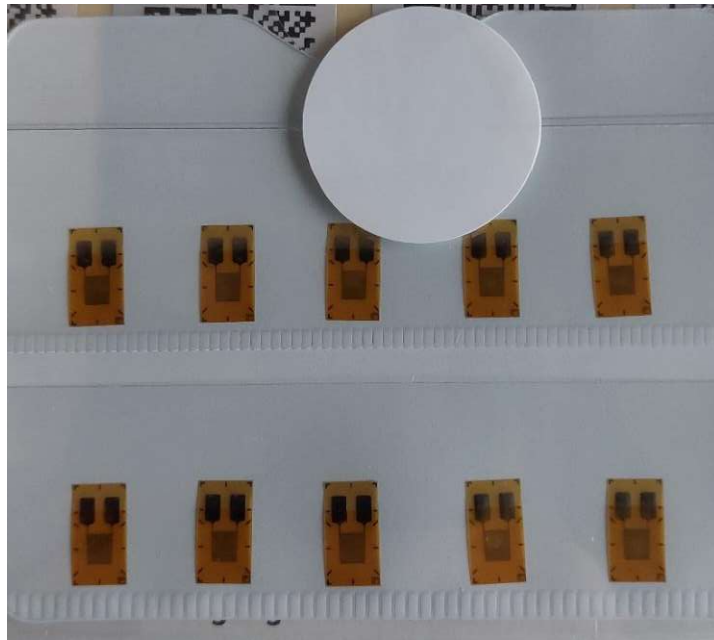


Abbildung 72: Eingesetzte DMS mit Lotflächen, e.A.

Wie im Stand der Technik ausgeführt, ist es bei der Positionierung der DMS wichtig, dass diese gegenüber angebracht werden, um Biegeeinflüsse zu eliminieren. Um die korrekte Position am Umfang zu gewährleisten, wurde eine Positionierungshilfe entworfen. Die zweigeteilte Positionierungshilfe wird auf Incident oder Transmission Bar montiert und mit Zylinderstiften verbunden. Die Ausnehmungen sind exakt auf die Größe der eingesetzten DMS angepasst. Die DMS werden in die Ausnehmung eingelegt und mit einem Streifen Klebeband fixiert. Danach wird die Vorrichtung abgenommen und die DMS können durch den Klebebandstreifen nach hinten geklappt werden. Anschließend wird die Klebestelle gereinigt und die DMS mit einem Cyanacrylat-Schnellklebstoff an die Bars appliziert.

4.4.3 Datenerfassung / Messsystem

Als Messsystem soll ein Komplettsystem der Firma HBM verwendet werden. Das gewählte Messsystem ist speziell für Hochgeschwindigkeitsmessungen ausgelegt und die Komponenten aufeinander abgestimmt.

Das Messsystem „Genesis HighSpeed“ besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Genesis HighSpeed-Grundgerät GEN2tB
- High-Speed-Basiseingangskarte mit 100 Ms/s Abtastrate
- Software zur Erfassung und Auswertung der Messdaten (Perception)

Das Datenerfassungssystem konnte aufgrund terminlicher Probleme nicht rechtzeitig bis zum Abschluss dieser Arbeit angeschafft werden. Die Integration und Inbetriebnahme in den SHPB wird daher in dieser Arbeit nicht behandelt.

4.5 Versuchsablauf

In diesem Abschnitt wird zu Dokumentationszwecken der zeitliche Ablauf eines Versuchs Schritt für Schritt festgehalten.

1. Druckluft und Stromversorgung einschalten
2. Kompressor Hauptschalter einschalten
3. Kontrolle, ob NOT-Aus Schalter nicht betätigt
4. Kontrolle, ob roter Kippschalter (Klemmhülse) in linker Position (Klemmung Aus)
5. Kontrolle, ob grüner „Bereit“-Schalter leuchtet, ansonsten betätigen
6. Verbindungsschelle zwischen Kanonenlauf und Entlüftungsrohr öffnen und Entlüftungsrohr nach oben wegheben (Abbildung 74)
7. Striker in Kanonenlauf einführen und mit Ladehilfe bis zur Klemmhülse schieben (Abbildung 75). Am Ende der Klemmhülse befindet sich der Sicherungstift, dieser muss mit dem Geschoß nach unten gedrückt werden (leichter Kraftaufwand nötig).
8. Roten Kippschalter in rechte Position bringen (Klemmung aktiv)
9. Ladehilfe entfernen, Entlüftungsrohr einsetzen und Verbindungsschelle wieder festziehen
10. Kompressor über Fernbedienung einschalten → warten bis gewünschter Kammerdruck erreicht ist → Kompressor ausschalten
11. Schuss auslösen durch Drücken des grünen Knopfes



Abbildung 73: Steuerungen für den SHPB-Versuchsstand, e. A.

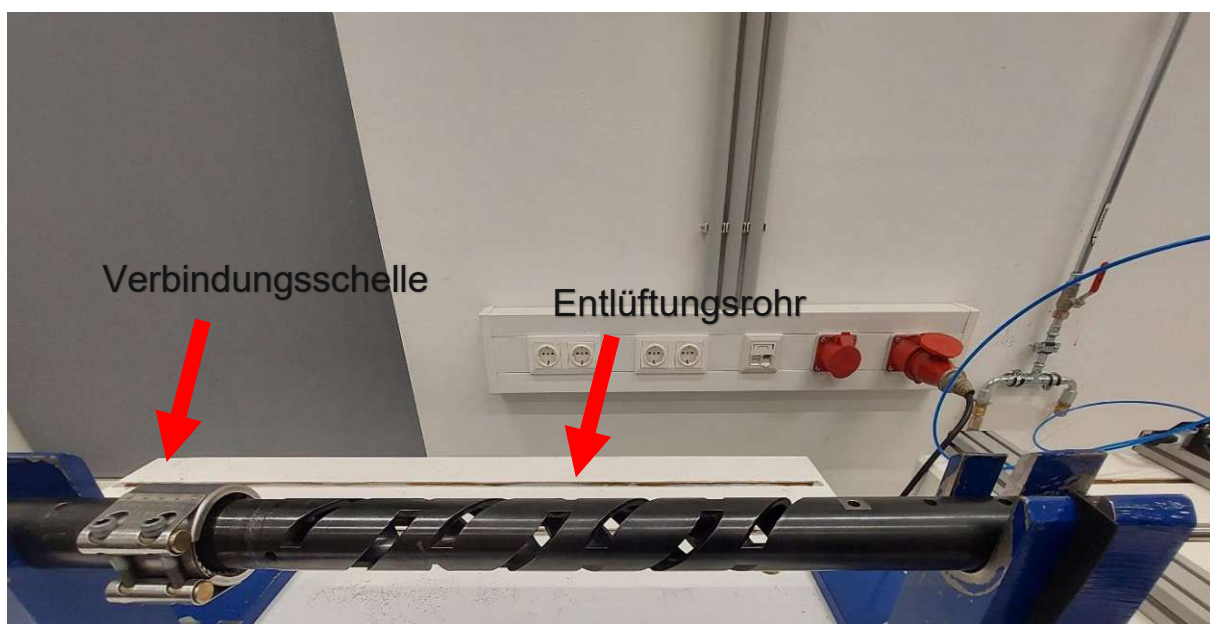


Abbildung 74: Demontage des Entlüftungsrohrs, e. A.

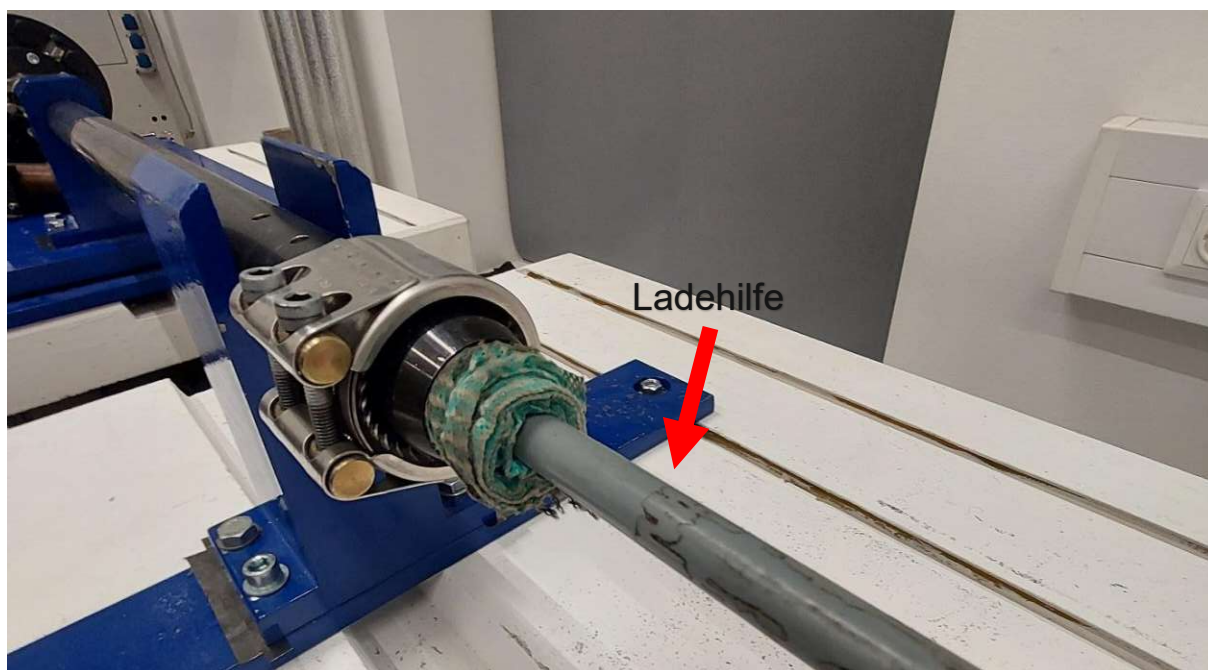


Abbildung 75: Laden des Strikers, e. A.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein Überblick über die Möglichkeiten der dynamischen Werkstoffprüfung gegeben und im Speziellen dabei der Split-Hopkinson Pressure Bar Versuch betrachtet. Weiters wird der Aufbau einer solchen Anlage am IFT vorgenommen und dokumentiert. Wesentliche Inhalte sind dabei die Auslegung und Fertigung von Incident, Transmission und Striker Bar sowie die Lagerung der Kolsky Bars. Für die Bestimmung der Geschwindigkeit des Striker Bars wird ein geeignetes Messsystem ausgelegt und gefertigt. Ein weiterer Kernpunkt dieser Arbeit ist das richtige Ausrichten aller Bestandteile der Anlage, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten. Abschließend werden Versuchsablauf und Handhabung für spätere Bediener dokumentiert.

Da aus terminlichen Gründen die Implementation des Datenerfassungssystems für die Aufzeichnung der Dehnungen nicht mehr in das System integriert werden konnte, wäre das auch ein Ansatzpunkt für eine weitere Arbeit an diesem spannenden Thema. Die Komplexität der Messdatenaufzeichnung und der anschließenden numerischen Auswertung der Versuchsergebnisse ist hoch und gut geeignet für eine wissenschaftliche Arbeit.

Auch die Integration eines Systems zur optischen Auswertung der Deformation der Probe während eines Versuches und ein Heizsystem, um Materialanalysen aufgrund von zusätzlichen Temperatureinflüssen durchführen zu können, sind weitere spannende Themen, die im Rahmen von weiteren Arbeiten behandelt werden könnten.

Literaturverzeichnis

5.1 References

- [1] S. Jaspers, *Metal cutting mechanics and material behaviour*. Eindhoven, Techn. Univ., Diss., 1999, 1999.
- [2] K. Singh *et al.*, “Versagenssimulation dynamisch belasteter Proben mit unterschiedlichen Mehrachsigekeitszuständen unter Verwendung des Johnson-Cook-Versagensmodells für eine Nickelbasislegierung,” *Technische Mechanik*, 2-4, 2003. [Online]. Available: <https://journals.ub.uni-magdeburg.de/index.php/techmech/article/view/995/971>
- [3] J. Ning and S. Liang, “Prediction of Temperature Distribution in Orthogonal Machining Based on the Mechanics of the Cutting Process Using a Constitutive Model,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 2, p. 37, 2018, doi: 10.3390/jmmp2020037.
- [4] F. Bleicher *et al.*, “Considering the influence of heating rate, complex hardening and dynamic strain aging in AISI 1045 machining: experiments and simulations,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 70, 2021, doi: 10.1016/j.cirp.2021.04.083.
- [5] E. Paucksch, S. Holsten, M. Linß, and F. Tikal, “Prinzipien der Spanbildung und Zerspantbarkeit,” in *Zerspantechnik*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008, pp. 3–106.
- [6] W. Degner, H. Lutze, E. Smejkal, U. Heisel, and J. Rothmund, *Spanende Formung: Theorie, Berechnung, Richtwerte*, 18th ed. München: Hanser, 2019.
- [7] H. Biermann and L. Kruger, *Moderne methoden der Werkstoffprüfung*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2015.
- [8] S. Nemat-Nasser, “High Strain Rate Tension and Compression Tests,” in vol. 8, *Mechanical Testing and Evaluation*, H. Kuhn and D. Medlin, Eds.: ASM International, 2000, pp. 429–446.
- [9] H. Zhao, “Material behaviour characterisation using SHPB techniques, tests and simulations,” *Computers & Structures*, vol. 81, no. 12, pp. 1301–1310, 2003, doi: 10.1016/S0045-7949(03)00044-0.
- [10] G. T. Gray, “Classic Split-Hopkinson pressure bar testing,” in vol. 8, *Mechanical Testing and Evaluation*, H. Kuhn and D. Medlin, Eds.: ASM International, 2000, pp. 462–476.

- [11] R. H. Warnes, R. R. Karpp, and P. S. Follansbee, "THE FREELY EXPANDING RING TEST - A TEST TO DETERMINE MATERIAL STRENGTH AT HIGH STRAIN RATES," *J. Phys. Colloques*, C5, C5-583 bis C5-590, 1985, doi: 10.1051/jphyscol:1985575.
- [12] W. Chen and B. Song, *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. Boston, MA: Springer US, 2011.
- [13] Z. J. Rohrbach, T. R. Buresh, and M. J. Madsen, "Modeling the exit velocity of a compressed air cannon," *American Journal of Physics*, vol. 80, no. 1, pp. 24–26, 2012, doi: 10.1119/1.3644253.
- [14] S. Sharma, V. M. Chavan, Agrawal, R.G., Patel, R.J., Kapoor, R., and J. K. Chakravartty, "Split-Hopkinson Pressure Bar: an experimental technique for high strain rate tests," (BARC--2011/E/013), Indien, 2011.
- [15] S. A. Tekalur and O. Sen, "Effect of Specimen Size in the Kolsky Bar," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 2663–2671, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.444.
- [16] W. Huang, J. He, and G. Wen, "A novel strain gauge automatic pasting device for a split Hopkinson pressure bar experimental system," *J. Inst.*, vol. 14, no. 03, P03030-P03030, 2019, doi: 10.1088/1748-0221/14/03/P03030.
- [17] L. Wang, *Foundations of stress waves*. Paises Bajos, Estados Unidos, Reino Unido.: Elsevier, 2007 ;
- [18] A. Hummeltenberg and M. Curbach, "Entwurf und Aufbau eines zweiaxialen Split-Hopkinson-Bars," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 107, no. 6, pp. 394–400, 2012, doi: 10.1002/best.201200013.
- [19] P. Liu, K. Liu, and Q.-B. Zhang, "Experimental characterisation of mechanical behaviour of concrete-like materials under multiaxial confinement and high strain rate," *Construction and Building Materials*, vol. 258, p. 119638, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119638.
- [20] K. Liu, Q. B. Zhang, G. Wu, J. C. Li, and J. Zhao, "Dynamic Mechanical and Fracture Behaviour of Sandstone Under Multiaxial Loads Using a Triaxial Hopkinson Bar," *Rock Mech Rock Eng*, vol. 52, no. 7, pp. 2175–2195, 2019, doi: 10.1007/s00603-018-1691-y.
- [21] D. J. Frew, S. A. Akers, W. Chen, and M. L. Green, "Development of a dynamic triaxial Kolsky bar," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 10, p. 105704, 2010, doi: 10.1088/0957-0233/21/10/105704.
- [22] D. Casem, "Miniature Kolsky bar Methods," in *Advances in experimental impact mechanics*, B. Song, Ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2022, pp. 149–189.
- [23] Technisches Büro, *Konstruktionszeichnung DLK-40A*. Thun, 1990.

- [24] Böhler Edelstahl GmbH, Ed., “Hochfester Martensitaushärtbarer Stahl Böhler W720VMR,” Accessed: Oct. 22 2022. [Online]. Available: <https://www.boehler-edelstahl.com/app/uploads/sites/92/2019/02/W720DE.pdf>
- [25] Stefan Kaschnitz-Biegl, “Gesprächsprotokoll Steve P. Mates (NIST National Institute of Standards and Technology, USA),” 2022.
- [26] U. Müller, *Endherstellung der Teststäbe zur Hopkinson-Testanlage, Fachbereich Werkstoffdynamik*. Thun, 1993.
- [27] New Way Air Bearings, *AIR BEARING APPLICATION AND DESIGN GUIDE*.
- [28] D. Hayes, J. Chason, S. Napier, and Z. Johnson, *Air Bearing Upgrade for Split Hopkinson Pressure Bar Experiment*.
- [29] H. Spaan, *Ein Hauch von Steifigkeit*. [Online]. Available: <https://kem.industrie.de/gleitlager/ein-hauch-von-steifigkeit/> (accessed: Nov. 12 2022).
- [30] Shishay Amare Gebremeskel, Neelanchali Asija, and Aryan Priyanshu, “Design Customization and Development of Split Hopkinson Pressure Bar for Light and Soft Armour Materials,” *GJRE*, vol. 14, no. 7, pp. 62–75, 2014. [Online]. Available: <https://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1168/0>
- [31] B. Baker, “Entwurf von stabilen Transimpedanzverstärkern für Automobilbau und Medizin,” *Nordamerikanische Fachredakteure von Digi-Key*, 28 Jun., 2017. <https://www.digkey.at/de/articles/how-to-design-stable-transimpedance-amplifiers-automotive-medical-systems> (accessed: Dec. 18 2022).
- [32] C. Konray, “Entwicklung einer Transimpedanzverstärkerschaltung zur Detektion des Einschaltzeitpunktes der Laserdiode einer Time-of-Flight Kamer,” Bachelor-Thesis, Fakultät Elektrotechnik, Fachhochschule Dortmund, Dortmund.
- [33] H. Di Donato, J. P. Garbezza, A. Infante, and R. Lopez, “STRIKER MECHANISM UPGRADE FOR THE Striker Mechanism Upgrade for the Split-Hopkinson Pressure Bar Experiment,” Bachelor Thesis, Department of Mechanical and Materials Engineering, Florida International University, 2013. Accessed: Dec. 25 2022. [Online]. Available: <https://mme.fiu.edu/wp-content/uploads/2013/04/R-T6-SplitHopkinsonPressureBar.pdf>
- [34] K. Hoffmann, *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Darmstadt, 1987. Accessed: Dec. 25 2022. [Online]. Available: <https://www.hbm.com/de/0112/fachbuch-eine-einfuehrung-in-die-technik-des-messens-mit-dehnungsmessstreifen/>

Abbildungsverzeichnis

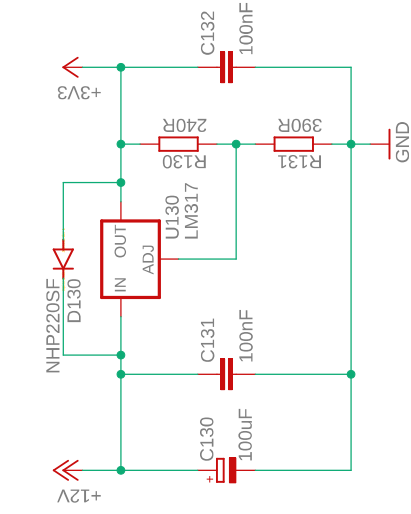
Abbildung 1: Scherzonen in der Zerspanung	3
Abbildung 2: Übersicht von Fertigungsverfahren mit verschiedenen Dehn- und Belastungsraten sowie den Prüfvorrichtungen, welche diesen Belastungen entsprechen	5
Abbildung 3: Cam Plastometer Versuchsstand	6
Abbildung 4: Drop Tower Test	7
Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines symmetrischen Rod Impact Versuches	8
Abbildung 6: Grundlegender SHPB-Aufbau	8
Abbildung 7: Zugversuch mit spezieller Transmission Bar und Probe	9
Abbildung 8: Aufbau eines Rotationsschlagwerk	10
Abbildung 9: Expanding Ring Test	11
Abbildung 10: Grundlegende Bestandteile einer SHPB-Anlage	13
Abbildung 11: optische v_0 -Messung	14
Abbildung 12: Lage der DMS am Umfang der Bars	16
Abbildung 13: Messsignal gefiltert mit unterschiedlichen Frequenzen	17
Abbildung 14: Grundlagen des SHPB Versuchs	18
Abbildung 15: Statische Impulserzeugung	18
Abbildung 16: Druckwellenentstehung im Incident Bar	20
Abbildung 17: Wellenausbreitung entlang der Kolsky Bars	22
Abbildung 18: Probenbelastung während des Versuchs	23
Abbildung 19: Wheatstone Brücke in Halbrückenkonfiguration	27
Abbildung 20: Gemessene Dehnungen während eines SHPB-Versuches einer Al-Mg Legierung und das daraus folgende Spannungs-Dehnungs-Diagramm	28
Abbildung 21: Zweiaxialer SHPB-Versuchsstand	29
Abbildung 22: Schematische Darstellung einer triaxiale SHPB-Anlage	29
Abbildung 23: Position optischer Messmittel für Miniatur SHPB-Versuch	31
Abbildung 24: SHPB-Versuchsanlage am IFT als Ergebnis der Diplomarbeit	35
Abbildung 25: DKL-40 A	36
Abbildung 26: DLK-40 B	36
Abbildung 27: Konstruktionszeichnung DLK-40A	37
Abbildung 28: Detaildarstellung der Klemmung der Geschosshülse	37
Abbildung 29: Detaildarstellung der Klemmsicherung	38
Abbildung 30: Pneumatik-Kreislauf auf Alu-Gestell	39
Abbildung 31: Schaltplan Pneumatik-Kreislauf	40
Abbildung 32: Spannungen 2D vom Bar Ende	43
Abbildung 33: Spannungen 0,5D vom Bar Ende	43
Abbildung 34: Auszug der technischen Zeichnung der Transmission Bar	48
Abbildung 35: Auslagerungsschaubild Böhler V300, laut Datenblatt	50
Abbildung 36: Technische Zeichnung Geschosshülse (Auszug)	51
Abbildung 37: Lagerlösung der Bestandsanlage	52

Abbildung 38: Aufbau eines Frelon®-Gleitlager	53
Abbildung 39: Lagerspezifikationen S301301, Datenblatt.....	54
Abbildung 40: Kraftaufnahme in Abhängigkeit der Luftspaltdicke	55
Abbildung 41: Zusammenstellungszeichnung der neuen Lagereinheiten	56
Abbildung 42: Ausrichten der Betonblöck	58
Abbildung 43: Maschinenwasserwaage und Abstandslaser	59
Abbildung 44: Nivellieren der Betonblöcke.....	59
Abbildung 45: Anheben der Betonblöcke ohne Positionsveränderung	60
Abbildung 46: Luftlager im eingepressten Zustand.	61
Abbildung 47: Einpresshilfe.....	61
Abbildung 48: Luftlagerposition, schematische Darstellung	61
Abbildung 49: Skizze zur Lagerpositionierung	62
Abbildung 50: Lage der äußersten Profilschiene	63
Abbildung 51: Wartungseinheit Luftlager	64
Abbildung 52: Pneumatik-Verteiler.....	64
Abbildung 53: Lagerung für Incident und Transmission Bar.....	65
Abbildung 54: Ausrichtung der Lager über einen Laser	66
Abbildung 55: Druckluftkanonen mit Kanonenrohr	66
Abbildung 56: Nivellieren des Kanonenrohrs	67
Abbildung 57: Vorrichtung zur axialen Ausrichtung der Bars am Kanonenlauf	67
Abbildung 58: Ausrichten des ersten Lagers.....	68
Abbildung 59: Ausgerichtete Kolsky Bars.	69
Abbildung 60: korrekte Lage der Bars.....	69
Abbildung 61: Momentum Trap alte Anlage	70
Abbildung 62: Momentum Trap neue Anlage.....	71
Abbildung 63: (a) angreifende Kräfte auf das Projektil, (b)-(d) Modelle für die Beschleunigung eines Projektil	73
Abbildung 64: Modellierter Druck- / Geschwindigkeitsverlauf der Striker Bars.....	75
Abbildung 65: Messaufbau v_0 -Messung mit High-Speed-Kamera.....	77
Abbildung 66: Druck-/ Geschwindigkeitsverlauf von Modell und Versuch mit Strikerlänge 300 mm	78
Abbildung 67: Schaltbild eines einfachen TiA-Schaltung	79
Abbildung 68: Schaltung der Geschwindigkeitsmessung.....	80
Abbildung 69: Messsystem zur v_0 -Messung.....	82
Abbildung 70: Montierte Aufnahme mit Diodenplatine	82
Abbildung 71: Gehäuse mit Hauptplatine.....	83
Abbildung 72: Eingesetzte DMS mit Lotflächen	85
Abbildung 73: Steuerungen für den SHPB-Versuchsstand	87
Abbildung 74: Demontage des Entlüftungsrohrs.....	87
Abbildung 75: Laden des Strikers	88

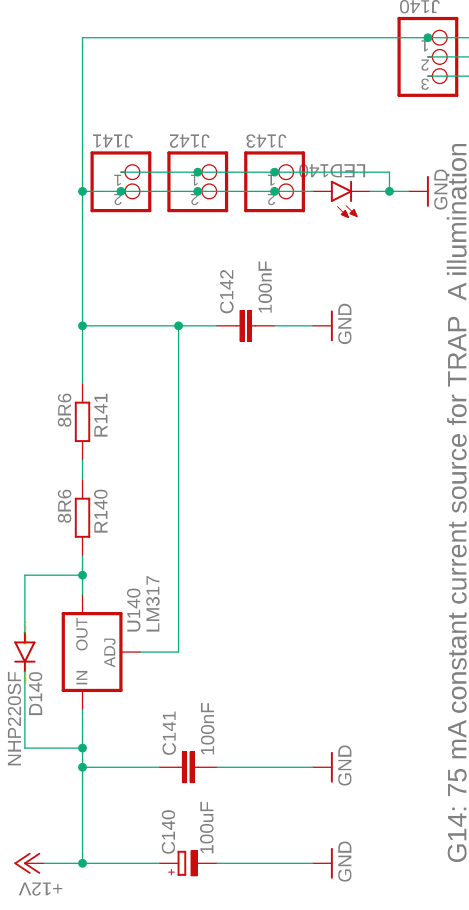
Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der erreichbaren Dehnraten der vorgestellten Prüfmethoden	12
Tabelle 2: Typische Barwerkstoffe für SHPB-Versuche	15
Tabelle 3: Werkstoffbezeichnungen Böhler V300	41
Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %)	41
Tabelle 5: Abschätzung der Dehnrate ε	45
Tabelle 6: Abschätzung der Dehnung ε	46
Tabelle 7: Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung	78

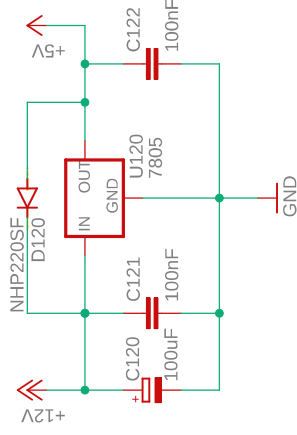
Anhang



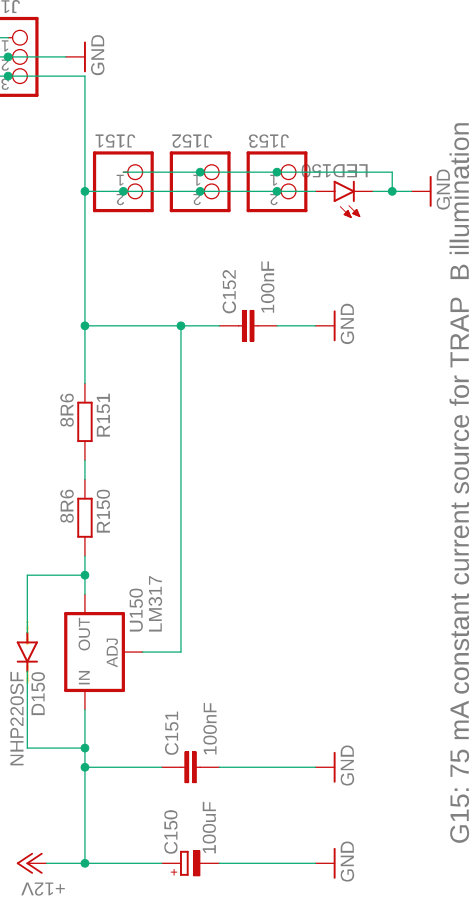
G13: 12V / 3V3 DC/DC regulator for digital supply voltage



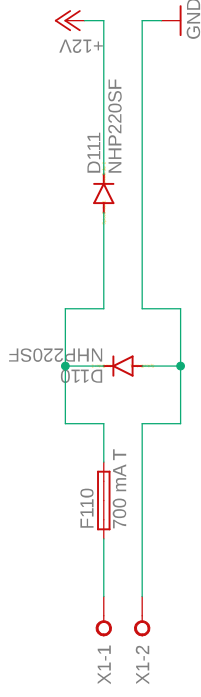
G14: 75 mA constant current source for TRAP_A illumination



G12: 12V / 5V DC/DC regulator for analog supply voltage



G15: 75 mA constant current source for TRAP_B illumination



G11: Power input and protection

Power Supply

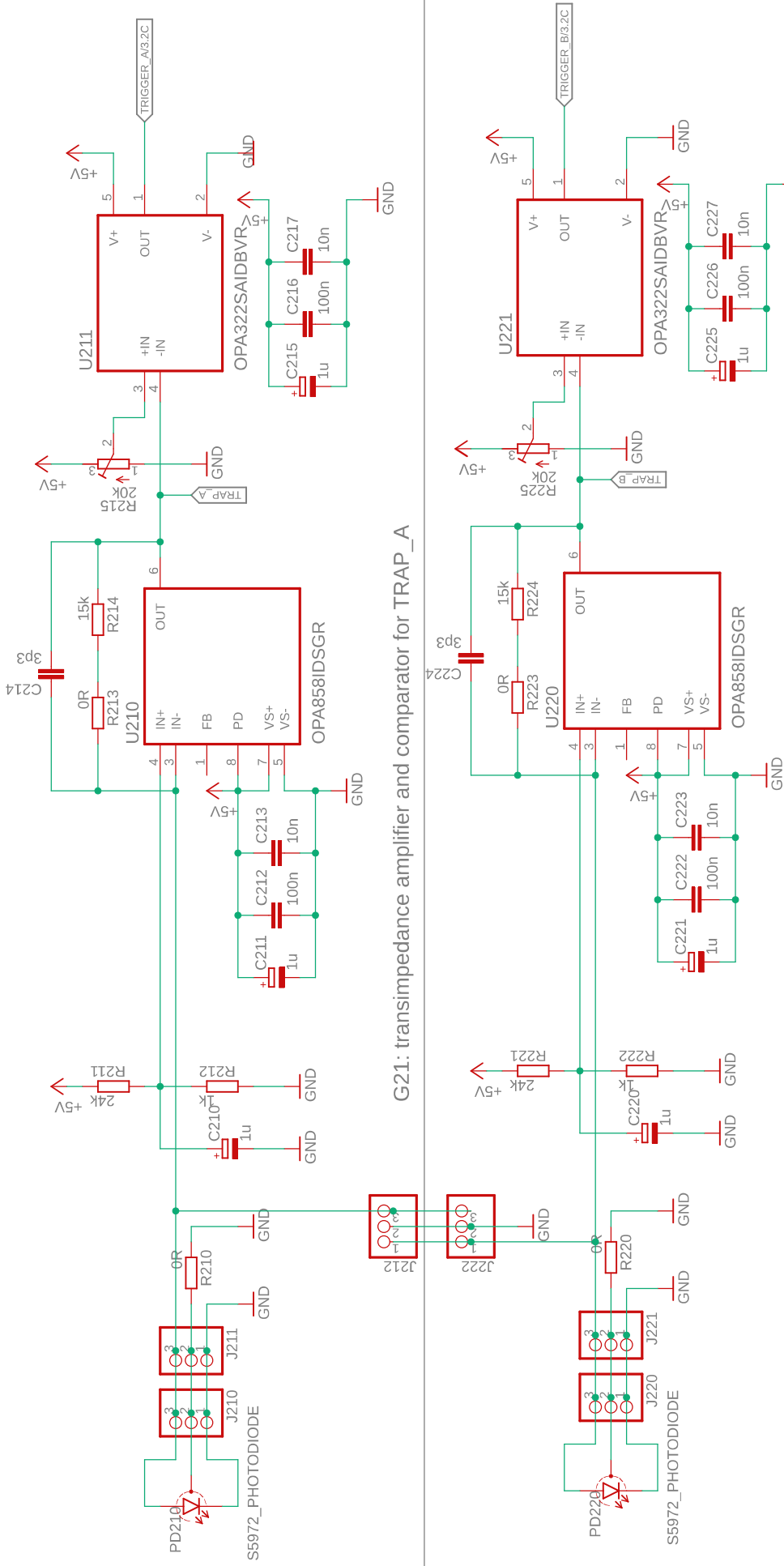
TITLE: Split-Hopkinson_Speed-Trap_V1_4

Document Number:

REV:

Date: 17.10.2022 05:57

Sheet: 1/3



G21: transimpedance amplifier and comparator for TRAP_A

G22: transimpedance amplifier and comparator for TRAP_B

Analogue Circuitry

TITLE: Split-Hopkinson_Speed-Trap_V1_4

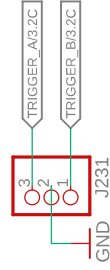
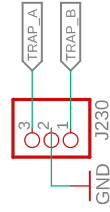
Document Number:

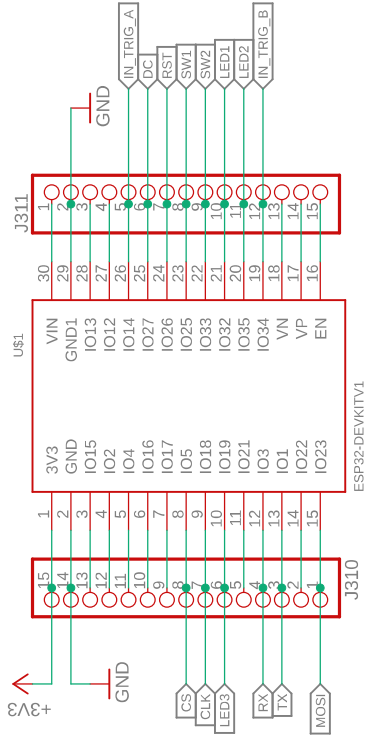
REV:

G23: connectors to external DAQ

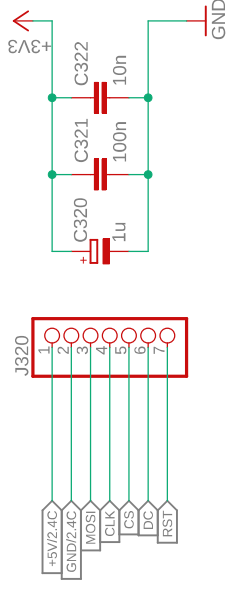
Date: 17.10.2022 05:57

Sheet: 2/3

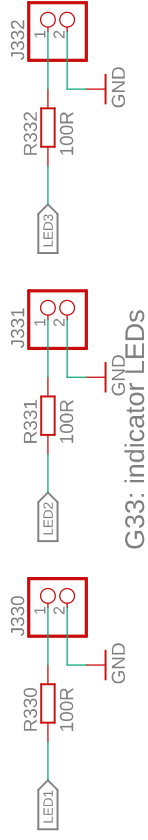




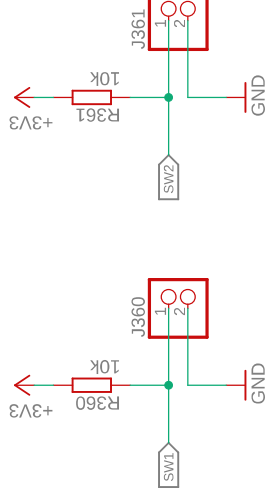
G31: ESP32 Controller



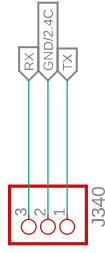
G32: SSD1351 OLED-Display connector



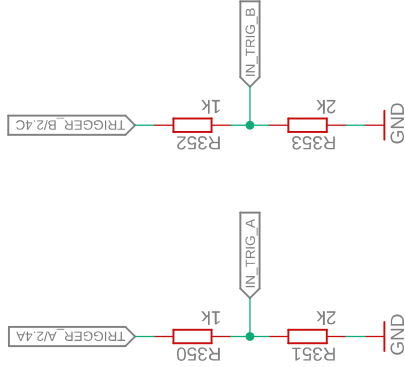
G33: indicator LEDs



G36: Pushbuttons



G34: External RS232 Connector



G35: Level Shifter for TRIGGER Signals

Digital Circuitry

TITLE: Split-Hopkinson_Speed-Trap_V1_4

Document Number:

REV:

Date: 17.10.2022 05:57

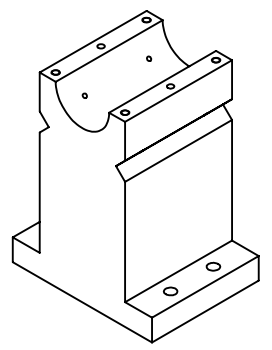
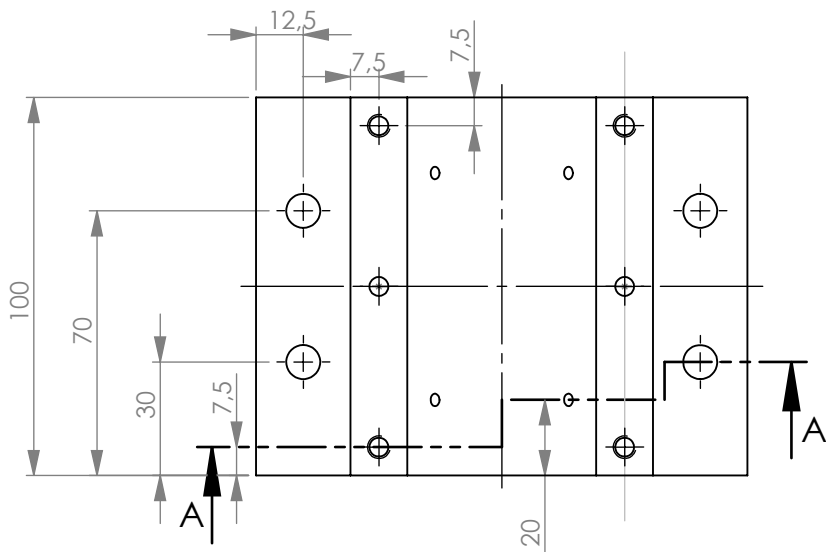
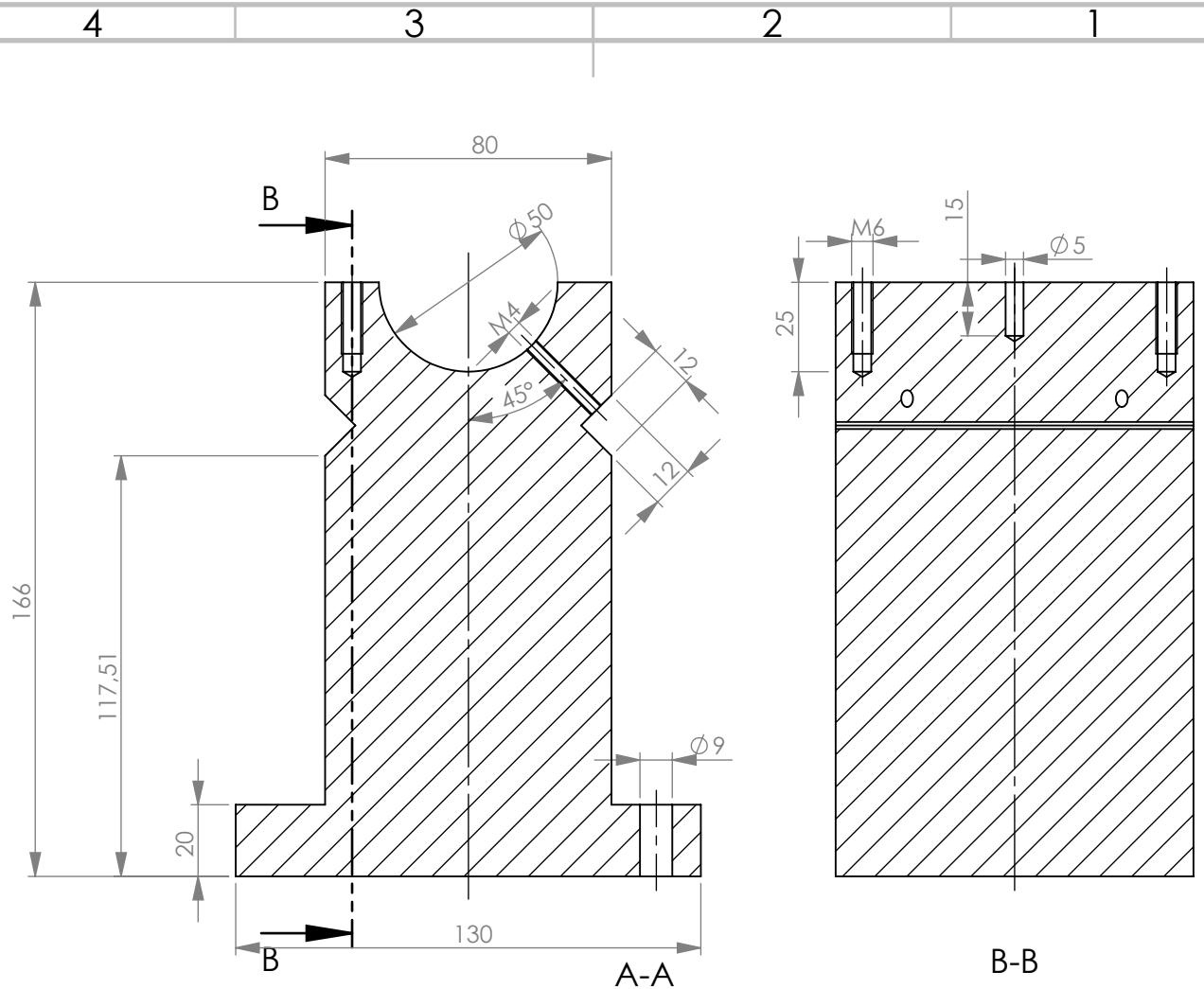
Sheet: 3/3

AIR BUSHING—METRIC

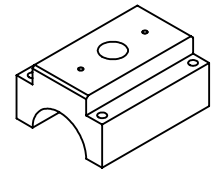
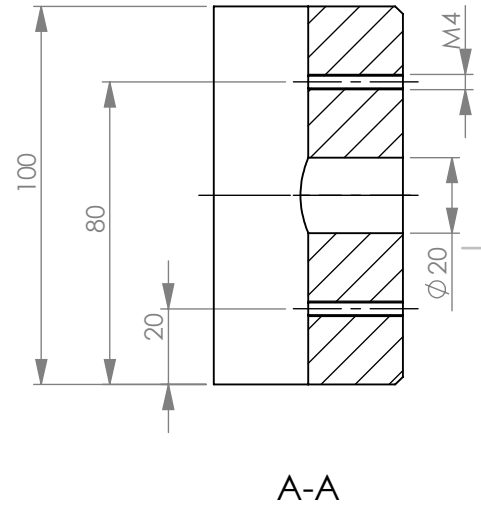
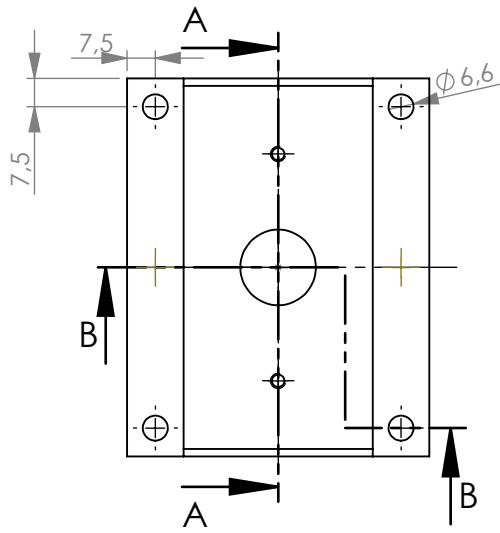
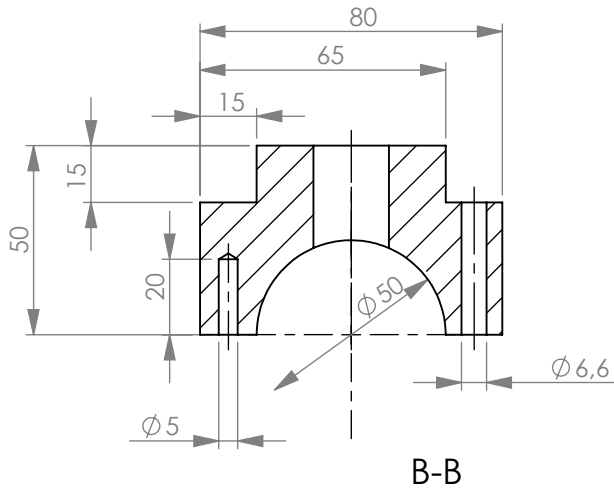
13mm Inside Diameter

SPECIFICATIONS: 13mm #S301301	
Input Pressure	.41 MPa (60psi)
Radial Load Max n (lbs)	44 (10)
Radial Stiffness n/μm (lbs/μ in)	11 (0.06)
Pitch Moment Max n-m (lbs-in)	0.8 (7.5)
Pitch Stiffness n-m/mil rad (lbs-in/mil rad)	2.1 (19.0)
Flowrate on Shaft NLPM (SCFH)	2.2 - 3.1 (4.75 - 6.60)
Air Gap (at recommended load)	4 microns
Bushing Inside Diameter - ID mm	13
Bushing Outside Diameter - OD mm (in)	24 (0.9)
Bushing Length mm (in)	50 (2.0)
Bushing Weight grams (oz.)	33 (1.1)
Housing Material/Finish	Aluminum/Anodized
Porous Media Material	Carbon
Recommended Shaft Outside Diameter - OD mm	13.0000
Recommended Shaft Tolerance	+0.0000mm -0.0076mm
Pressure Port Threads	M3 x 0.5
Viable Pressure Range	.414-.552MPa (60psi - 80psi)
Maximum Allowable Pressure Supply	.689 MPa (100psi)
Resolution	Infinite
Maximum Speed	50m/sec
Common Shaft Materials	Anodized aluminum, stainless steel, nickel plated steel, ceramics, glass

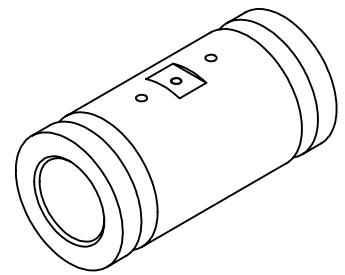
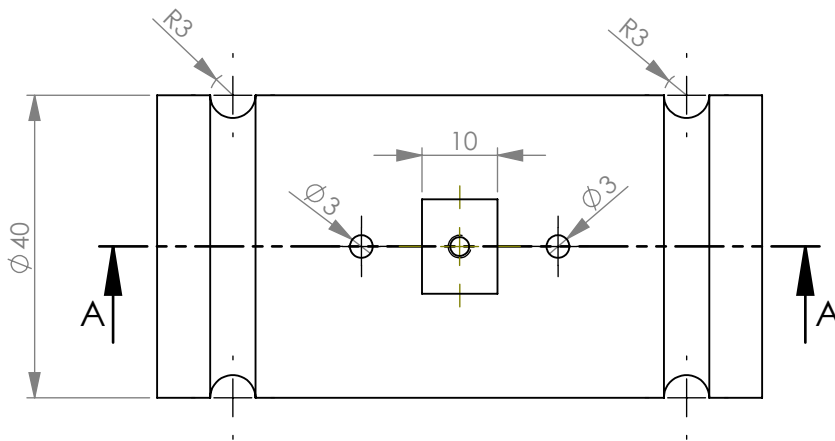
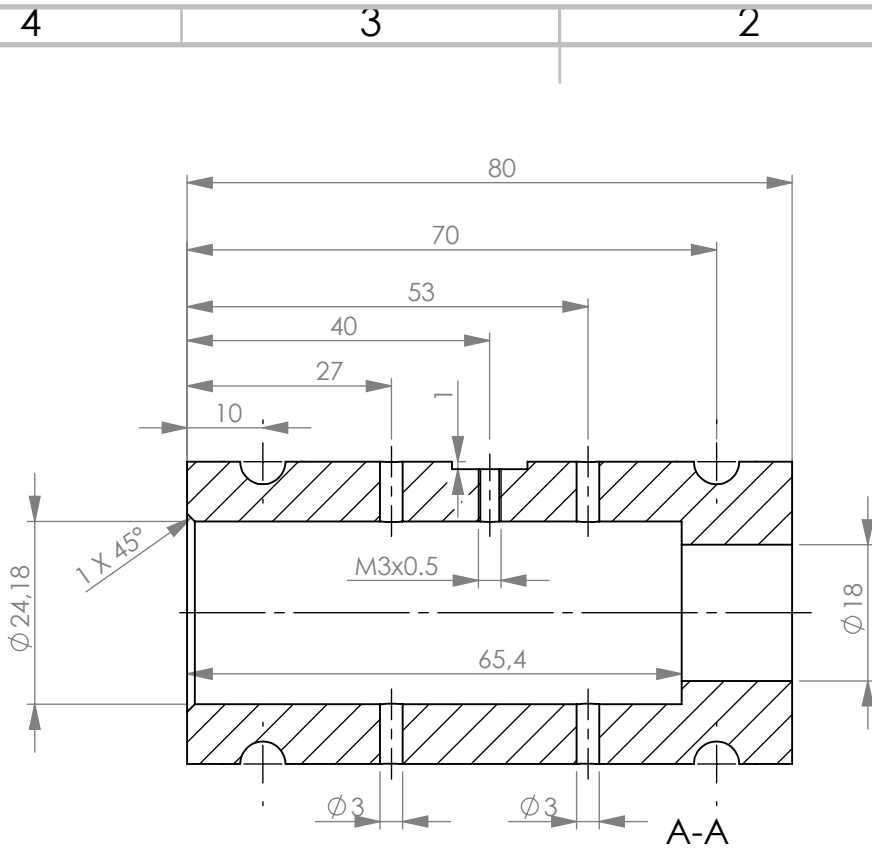
www.newwayairbearings.com • info@newwayairbearings.com



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:			OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG			
NAME SIGNATUR DATUM					BENENNUNG: <h1 style="text-align: center;">Lagerbock unten</h1>							
GEZEICHNET GEPRÜFT GENEHMIGT PRODUKTION QUALITÄT					WERKSTOFF: <h2 style="text-align: center;">St 52-3</h2>			ZEICHNUNGSNR.			A4	
GEWICHT:					MASSSTAB 1:2			BLATT 1 VON 1				



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:			OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NAME</th> <th>SIGNATUR</th> <th>DATUM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>GEZEICHNET</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>GEPRÜFT</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>GENEHMIGT</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PRODUKTION</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>QUALITÄT</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						NAME	SIGNATUR	DATUM	GEZEICHNET			GEPRÜFT			GENEHMIGT			PRODUKTION			QUALITÄT			BENENNUNG: <h1 style="text-align: center;">Lagerbock oben</h1>						ZEICHNUNGSNR.		A4	
NAME	SIGNATUR	DATUM																															
GEZEICHNET																																	
GEPRÜFT																																	
GENEHMIGT																																	
PRODUKTION																																	
QUALITÄT																																	
WERKSTOFF: <h2 style="text-align: center;">St 52-3</h2>						GEWICHT:						MASSSTAB 1:2		BLATT 1 VON 1																			



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN:
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET			
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG: Lagerbuchse	
WERKSTOFF: Aluminium	ZEICHNUNGSNR.
GEWICHT:	MASSSTAB 1:1
	BLATT 1 VON 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

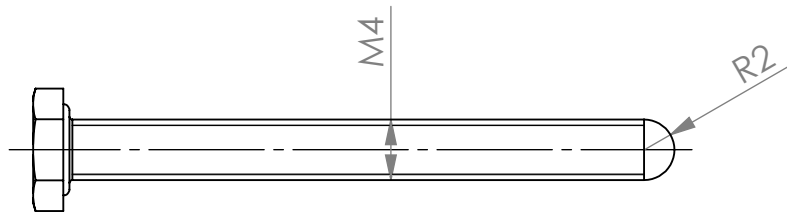
D

C

C

B

B



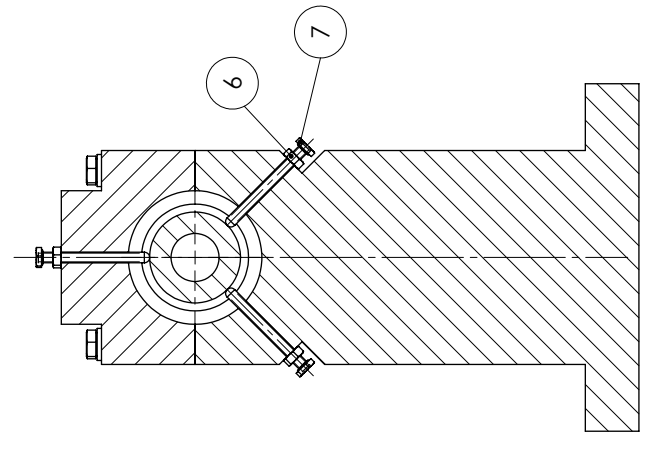
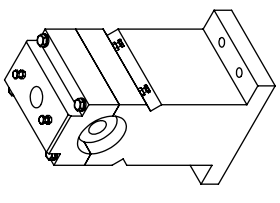
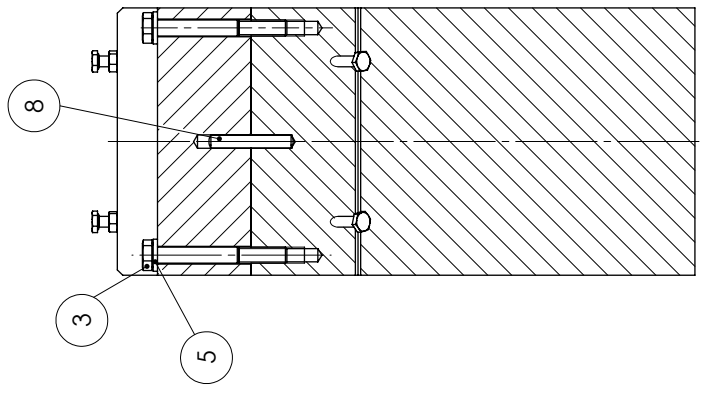
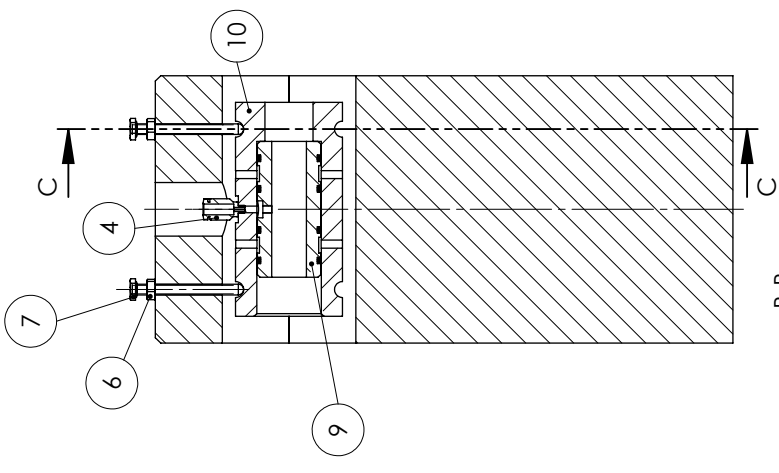
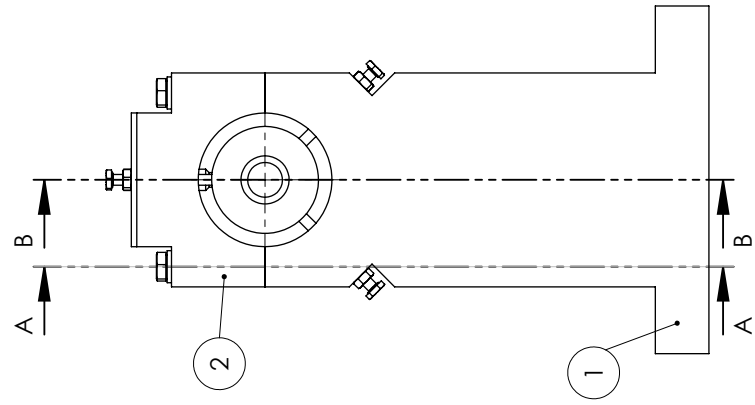
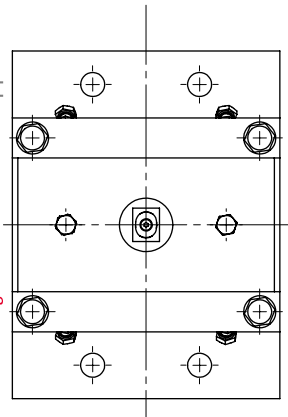
Schraube am Ende abgerundet

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG: Sechskantschraube DIN 4017 M4x40			
GEZEICHNET						ZEICHNUNGSNR.			
GEPRÜFT									
GENEHMIGT						A4			
PRODUKTION									
QUALITÄT				WERKSTOFF:		MASSSTAB:2:1			
				GEWICHT:		BLATT 1 VON 1			

A

A

4 3 2 1



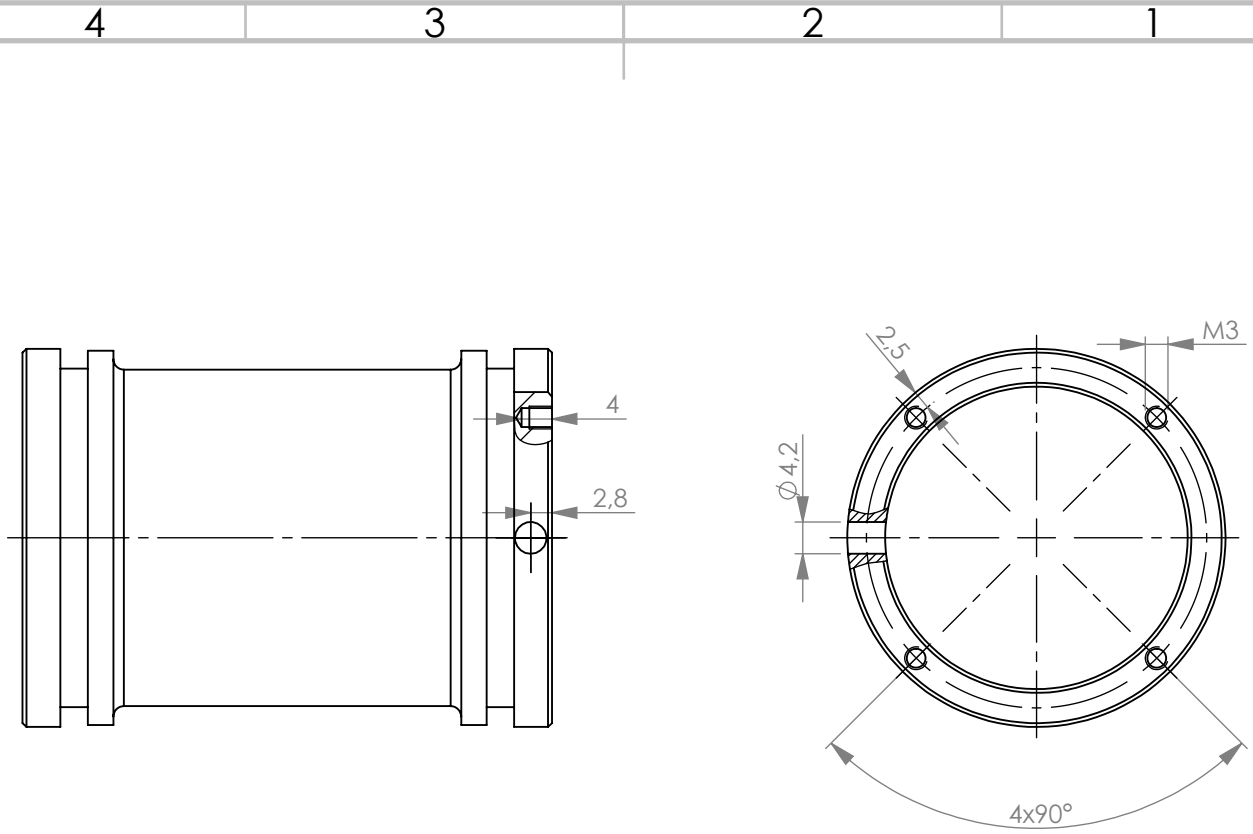
POS-NR.	BENENNUNG	BESCHREIBUNG	MENGE
1	Lagerbock unten		1
2	Lagerbock oben		1
3	Sechskantschraube	DIN 4014 M6x50	4
4	Steckverschraubung	FESTO GSM M3-4-i	1
5	Scheibe	ISO 7089-6	4
6	Sechskantmutter	ISO 4032 M4	6
7	Sechskantschraube	DIN 4017 M4x40	6
8	Passstift	5x30	2
9	Luftlager		1
10	Lagerbuchse		1

A-A

B-B

C-C

WENN NICHT ANDERS BEMERKT: BEWÄSSUNGEN SIND IN MILLIMETER		OBERFLÄCHENGÜTE:		ZEHCHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
TOLERANZEN: UNTER: WINKEL:				BRITGRATEN UND SCHÄRFE KANTEN BRECHEN			
NAME	SIGNATUR	DATUM					
GEGEICHNET							
GEPRÜFT							
GENEHMIGT							
PRODUKTION							
QUALITÄT							
WERKSTOFF:							
BENENNUNG: Zusammenbau Lagereinheit							
ZEICHNUNGSNR. A3							
MASSSTAB: 1:5							
GEWICHT: 3							
BLATT 1 VON 1							



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:		OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME		SIGNATUR		DATUM		BENENNUNG:			
GEZEICHNET									
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION						ZEICHNUNGSNR.			
QUALITÄT				WERKSTOFF:		Nacharbeitung Klemmhülse KOSTYRKA			A4
				GEWICHT:		MASSSTAB 1:1		BLATT 1 VON 1	

Berechnung der Haltekräfte von KOSTYRKA®-Klemmhülsen

Für eine beliebige KOSTYRKA®-Klemmhülse mit einem Klemmdurchmesser von d (mm), einer Länge L (mm) und einem Abstand a (mm), die mit dem Druck p (N/mm²) beaufschlagt wird, gilt:

$$F [N] = d \cdot (L - 2a) \cdot \pi \cdot p \cdot \mu$$

F ist die Haltekraft. Der Reibwert μ ist für zu klemmende Teile aus Stahl mit 0,1 anzusetzen.

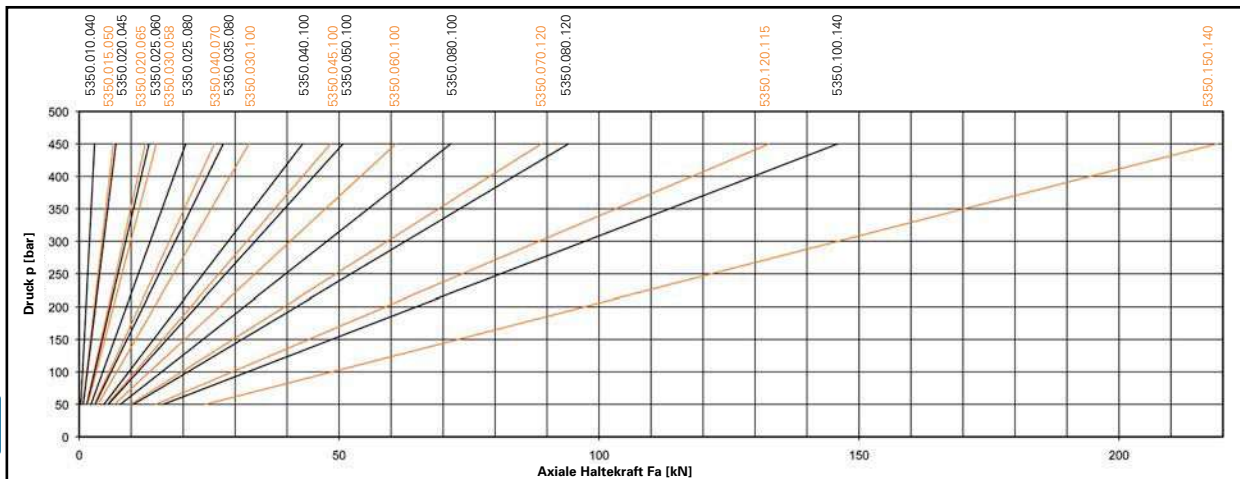
Wichtig: KOSTYRKA®-Klemmhülsen ohne Flanschring können ausschließlich Kräfte in Längsrichtung aufnehmen. Zum Übertragen von Drehmomenten werden Klemmhülsen mit Flanschring benötigt!

Berechnung der Haltekräfte von Standardabmessungen

Im Laufe von über vier Jahrzehnten haben sich einige Größen von KOSTYRKA®-Klemmhülsen ohne Flanschring als optimal für viele Anwendungen herauskristallisiert. Profitieren Sie von umfassender

Erfahrung, von einem wirtschaftlichen Vorteil und von schneller Verfügbarkeit. Die Tabelle gibt die Abmessungen der 20 lieferbaren Standardgrößen an.

Typ	d	D	L	a
5350.010.040	10 mm	20 mm	40 mm	9,5 mm
5350.015.050	15 mm	25 mm	50 mm	9,5 mm
5350.020.045	20 mm	30 mm	45 mm	10,0 mm
5350.020.065	20 mm	30 mm	65 mm	10,0 mm
5350.025.060	25 mm	35 mm	60 mm	11,0 mm
5350.025.080	25 mm	35 mm	80 mm	11,0 mm
5350.030.058	30 mm	40 mm	58 mm	11,5 mm
5350.030.100	30 mm	40 mm	100 mm	11,5 mm
5350.035.080	35 mm	45 mm	80 mm	12,0 mm
5350.040.070	40 mm	50 mm	70 mm	12,0 mm
5350.040.100	40 mm	50 mm	100 mm	12,0 mm
5350.045.100	45 mm	55 mm	100 mm	12,0 mm
5350.050.100	50 mm	65 mm	100 mm	14,0 mm
5350.060.100	60 mm	75 mm	100 mm	14,0 mm
5350.070.120	70 mm	85 mm	120 mm	15,0 mm
5350.080.100	80 mm	100 mm	100 mm	18,5 mm
5350.080.120	80 mm	100 mm	120 mm	18,5 mm
5350.100.140	100 mm	125 mm	140 mm	18,5 mm
5350.120.115	120 mm	140 mm	115 mm	18,5 mm
5350.150.140	150 mm	175 mm	140 mm	18,5 mm



Haltekräfte von Standardhülsen
 Axiale Haltekraft in Abhängigkeit vom Betriebsdruck. Angenommen wurde ein Reibwert von μ 0,1.

Hinweis: Mit Sonderdichtungen können die Hülsen bis 600 bar betrieben werden.



HOCHFESTER MARTENSITAUSHÄRTBARER STAHL
MARAGING HIGH STRENGTH STEEL

BÖHLER W720 VMR®

Qualitativer Vergleich der wichtigsten Eigenschaftsmerkmale

Die Tabelle soll einen Anhalt für die Auswahl von Stählen bieten. Sie kann jedoch die unterschiedlichen Beanspruchungsverhältnisse für verschiedene Einsatzgebiete nicht berücksichtigen. Unser technischer Beratungsdienst steht Ihnen für alle Fragen der Stahlverwendung und -verarbeitung jederzeit zur Verfügung.

Qualitative comparison of the major steel properties

This table is intended to facilitate the steel choice. It does not, however, take into account the various stress conditions imposed by the different types of application. Our technical consultancy staff will be glad to assist you in any questions concerning the use and processing of steels.

BÖHLER Marke / Grade	Warmfestigkeit High temperature strength	Warmzähigkeit High temp. toughness	Warmverschleißwiderstand High temp. wear resistance	Bearbeitbarkeit Machinability
BÖHLER W100	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W300 EDISC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W300 BLOC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W302 EDISC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W302 BLOC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W303 EDISC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W303 BLOC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W320 EDISC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W321 EDISC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W360 BLOC®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W400 VMR®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W403 VMR®	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W500	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W705	██████████	██████████	██████████	██████████
BÖHLER W720 VMR®	Martensitaushärtbare Stähle (Aushärtetemperatur ca. 480°C); in dieser Form nicht mit den vergütbaren Stählen vergleichbar.			
BÖHLER W722 VMR®	Maraging steels (maraging temperature about 480°C); in this form not comparable with the heat treatable steels.			
BÖHLER W750 VMR®	Aushärtbarer Stahl, in dieser Form nicht mit den vergütbaren Stählen vergleichbar. / Precipitation hardening steel; in this form not comparable with the heat treatable steels.			

Die abgebildete gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. This printed original version of this diploma thesis is available at the TU Wien library.

Eigenschaften

Ultrahochfester, martensitaushärtbarer (Maraging) Stahl, der seine hohen Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu vergütbaren Stählen nicht durch ein Härtungsgefüge mit relativ hohem Kohlenstoffgehalt, sondern durch Ausscheidung intermetallischer Phasen aus einer zähen, nahezu kohlenstofffreien Nickelmartensit-Grundmasse erreicht.

Daraus ergeben sich nachstehend angeführte Vorteile:

Hohe Zugfestigkeit und hohes Streckgrenzenverhältnis,

gute Zähigkeit (Einschnürung, Dehnung, Kerbschlagzähigkeit, Rissbruchzähigkeit) auch bei tiefen Temperaturen,

hohe Kerbzugfestigkeit und Brandrissbeständigkeit.

Maßänderung bei der Wärmebehandlung nahezu Null, keine Entkohlung und Rissgefahr, Durchhärtung auch bei großen Abmessungen, gute Zerspanbarkeit in lösungsgeglühtem Zustand, Zerspanung auch in ausgehärtetem Zustand möglich.

Gute Kaltverformbarkeit dank geringer Verfestigungsneigung,

beste Schweißbarkeit und einfache Wärmebehandlung bei niedrigen Temperaturen.

Verwendung

Bestens bewährt für viele Anwendungsgebiete als Werkzeugstahl für Kalt- und Warmarbeit bei Langzeitbeanspruchung bis ca. 450°C.

Werkzeuge für hydrostatische Pressen, Kaltfließpresswerkzeuge, Kaltstauch- und Prägwerkzeuge, Kunststoffformen, Druckgießwerkzeuge für Aluminium- und Zinklegierungen, Warmpresswerkzeuge sowie Kaltpilgerdorne.

Properties

Ultra-high-strength maraging steel.

In contrast to heat treatable steels its outstanding tensile properties are not due to a hardened structure with relatively high carbon content, but to precipitation of intermetallic phases from a ductile nickel bearing matrix containing almost no carbon.

This results in the following advantages:

High tensile strength and excellent yield point ratio, satisfactory toughness (reduction of area, elongation, impact strength, fracture toughness) even at low temperatures, superior notched tensile strength and heat checking resistance, practically no size change in heat treatment, no decarburization, no cracking, full hardening even in sizes above average.

Convenient machinability in the solution annealed condition (machining is also possible in the precipitation-hardened condition).

Good cold forming properties owing to reduced susceptibility to work hardening, eminent weldability, simple heat treatment at low temperatures.

Application

Tool steel that has proved highly satisfactory for hot and cold work and long-time service up to approx. 450°C (842°F) in various fields of application.

Tools for hydrostatic presses, cold extrusion tools, cold heading and embossing tools, molds for the plastics industry, die casting tools for aluminium and zinc alloys, hot pressing tools, cold pilger mandrels.

Chemische Zusammensetzung (Anhaltswerte in %) / Chemical composition (average %)							
C	Si	Mn	Mo	Ni	Co	Ti	Al
max. 0,005	max. 0,05	max. 0,10	5,00	18,50	9,00	0,70	0,10

Normen

Standards

EN / DIN
 < 1.6354 > LW
 ~ 1.2709
 ~ X3NiCoMoTi18-9-5
 (1.6358)
 (X2NiCoMo18-9-5)
 (~1.2706)
 (~X3NiCoMo18-8-5)

ASTM
 Marage 300

AMS
 6521
 6514

UNS
 K93160
 K93120

MIL
 S46850
 ~ 300
 ~ 300A

AIR
 ~ E-Z2NKD18

Warmformgebung

Schmieden:

1150 bis 850°C / Luft

Wärmebehandlung

Lösungsglühen:

820°C / 1 Stunde / Luft, Gas

Warmauslagern:

430°C / 3 Stunden / Luft

1720 bis 1870 N/mm²

480 °C / 3 Stunden / Luft

1860 bis 2260 N/mm²

Oberflächenbehandlung

Nitrieren:

Zur Erhöhung der Oberflächenhärte ist eine Nitrierbehandlung möglich.

Eine Gasnitrierung bei 500°C über 45 Stunden ergibt Oberflächenhärten über 800 HV und eine Tiefe der Nitrierschicht von ca. 0,2 mm.

Die Nitrierbehandlung ersetzt in diesem Fall das Auslagern.

Schweißen

Ein Schweißen nach dem Schutzgasverfahren (WIG und MIG) unter Verwendung artgleicher Schweißzusatzwerkstoffe ist trotz der hohen Festigkeit dieses Stahles möglich.

Es soll jedoch im weichen, lösungsgeglühten Zustand geschweißt werden.

Grundsätzlich ist aber auch ein Schweißen im ausgehärteten Zustand durchführbar.

In beiden Fällen ist nach dem Schweißen ein Warmauslagern bei 430°C bzw. 480°C erforderlich.

Bei besonders hohen Anforderungen an Festigkeit und Zähigkeit muß nach dem Schweißen ein Lösungsglühen und Warmauslagern vorgenommen werden.

Eine Vorwärmung beim Schweißen ist nicht notwendig.

Als Schweißzusatzwerkstoff empfehlen wir den Blankdraht BÖHLER UHF 12-IG.

Hot forming

Forging:

1150 to 850°C (2102 to 1562°F) / Air

Heat treatment

Solution annealing:

820°C (1508°F) / 1 hour / air, gas

Ageing:

430°C (806°F) / 3 hours / air

1720 to 1870 N/mm²

480°C (896°F) / 3 hours / air

1860 to 2260 N/mm²

Surface treatment

Nitriding:

To raise surface hardness, a nitriding treatment may be effected.

Gas nitriding at 500°C (932°F) for 45 hours results in a surface hardness exceeding 800 HV and in a depth of the nitrided case of 0.2 mm approx.

In this instance nitriding replaces the ageing treatment.

Welding

Inert-gas-shielded arc welding (TIG and MIG) with use of filler metals of the same characteristics is possible in spite of the high strength of this steel.

It is to be effected, however, in the soft, solution-annealed condition.

Quite on principle, welding is also possible in the precipitation-hardened condition.

In both cases, workpieces should be held for some time in the temperature range 430 to 480°C (806 to 896°F).

To meet especially exacting strength and toughness demands, solution annealing and an ageing treatment should be carried out after welding.

Preheating is not necessary.

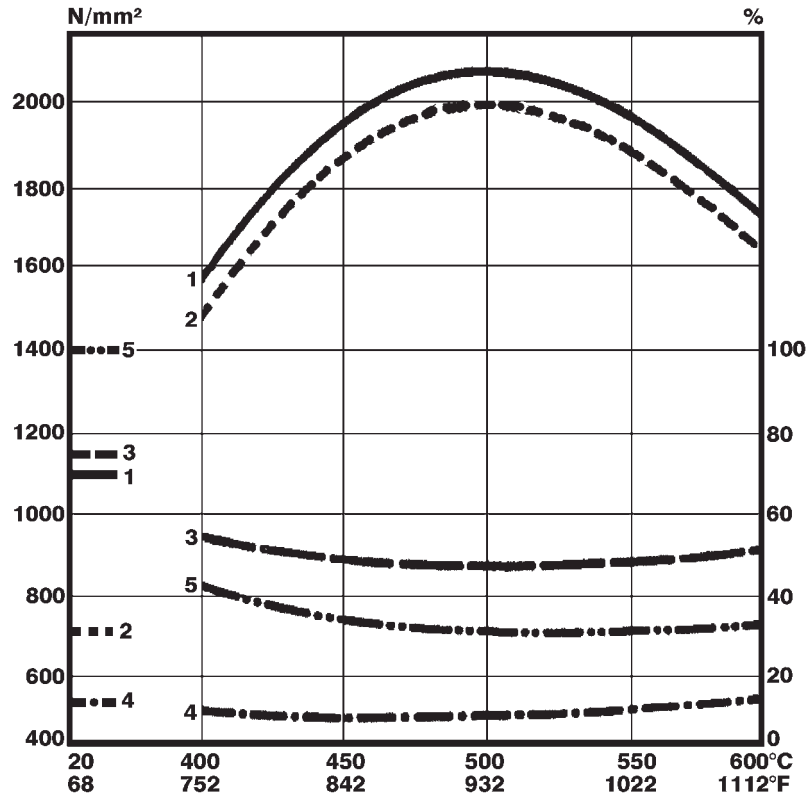
A recommendable filler metal is BÖHLER UHF 12-IG bare wire.

Auslagerungsschaubild

Lösungsgeglüht 820°C / 1 Stunde / Luft

Ageing chart

Solution annealed 820°C (1508°F) / 1 hour / air



Auslagerungstemperatur (Haltezeit 3 Stunden)
Ageing temperature (holding time 3 hours)

Zerspanbarkeit

Dieser Maraging-Stahl ist sowohl in lösungsgeglühtem wie auch in ausgehärtetem Zustand gut zerspanbar. Als Schneidstoff empfehlen wir BÖHLERIT®- Hartmetalle der Zerspanungshauptgruppen P und K.

Es ist aber auch eine Zerspanung mit Schnellarbeitsstahlwerkzeugen möglich.

Zu beachten ist, daß stets mit scharfen Schneiden gearbeitet wird, da beim Zerspanen hohe spezifische Schneidenbelastung auftritt und stärkere Verschleißerscheinungen rasch zum Standzeitende führen.

Beim Drehen in lösungsgeglühtem Zustand sind die anfallenden Späne zäh, können jedoch durch Spanformstufen mit enger Spankrümmung beherrscht werden (siehe "Bearbeitungshinweise").

Machinability

In the solution-annealed as well as in the precipitation-hardened condition this maraging grade is most conveniently machined with BÖHLERIT® sintered carbide (main groups P and K).

High speed steel tools qualify as a suitable alternative.

Attention should be paid to the fact that cutting edges must be kept sharp, as the machining operation causes increased specific stress of the cutting edge and increased wear quickly leads to failure.

Turning in the solution-annealed condition yields tough chips that can be controlled, however, by a chip deflector design minimizing chip bend radius. (see "Recommendations for Machining")

1..... Zugfestigkeit N/mm²
2..... 0,2-Grenze N/mm²
3..... Einschnürung %
4..... Dehnung A₅, %
5..... Kerbschlagarbeit (DVM), J

..... Tensile strength N/mm²
..... 0.2% proof stress N/mm²
..... Reduction of area %
..... Elongation A₅, %
..... Impact strength (DVM), J

Mechanische Eigenschaften

Längsproben für Abmessungen max. 100 mm Ø
(Richtwerte)

Mechanical properties

Longitudinal specimens from size for diameter up to
100 mm (average values)

Zustand / Condition	AH / PH 430°C (806°F) 3h / Luft, Air	AH / PH 480°C (896°F) 3h / Luft, Air	L / SA	
Zugfestigkeit, N/mm ² / Tensile strength, N/mm ²	1720 - 1870	1860 - 2260	980 - 1130	
0,2 Grenze, N/mm ² min. / 0.2% proof stress, N/mm ² min	1620	1815	650	
Dehnung A ₅ , %, min. / Elongation A ₅ , %, min.	8	6	10	
Einschnürung, %, min. / Reduction of area, %, min.	45	40	60	
Kerbzugfestigkeit ($\alpha_k = 5,6$) N/mm ² / Notched tensile strength ($\alpha_k = 5,6$) N/mm ²	2300	2450	--	
Härte HRC / Hardness HRC	51	55	32	
Kerbschlagarbeit (DVM), J, min. / Impact strength (DVM), J, min	24	21	48	
Dauerbiegewechselfestigkeit (N=10 ⁷) N/mm ² / Bendig fatigue strength (N=10 ⁷) N/mm ²	635	735	--	
0,2 Grenze, N/mm ² min bei / 0.2% proof stress, N/mm ² min. at	100°C (212°F) 200°C (392°F) 300°C (572°F) 400°C (752°F) 500°C (932°F)	1520 1420 1325 1180 930	1765 1670 1570 1275 980	-- -- -- -- --

L = Lösungsgeglüht
AH = Ausgehärtet

SA = Solution annealed
PH = Precipitation hardened

Bearbeitungshinweise

(Wärmebehandlungszustand lösungsgeglüht, Richtwerte)

Drehen mit Hartmetall				
Schnitttiefe mm	0,5 bis 1	1 bis 4	4 bis 8	über 8
Vorschub mm/U	0,1 bis 0,3	0,2 bis 0,4	0,3 bis 0,6	0,5 bis 1,5
BOEHLERIT- Hartmetallsorte	SB10, SB20	SB10, SB20, EB10	SB30, EB20	SB30, SB40
ISO - Sorte	P10, P20	P10, P20, M10	P30, M20	P30, P40
Schnittgeschwindigkeit, m/min				
Wendeschneidplatten Standzeit 15 min	210 bis 150	160 bis 110	110 bis 80	70 bis 45
Gelötete Hartmetallwerkzeuge Standzeit 30 min	150 bis 110	135 bis 85	90 bis 60	70 bis 35
Beschichtete Wendeschneidplatten Standzeit 15 min BOEHLERIT ROYAL 121 BOEHLERIT ROYAL 131	bis 210 bis 140	bis 180 bis 140	bis 130 bis 100	bis 80 bis 60
Schneidwinkel für gelötete Hartmetallwerkzeuge Spanwinkel Freiwinkel Neigungswinkel	6 bis 12° 6 bis 8° 0°	6 bis 12° 6 bis 8° - 4°	6 bis 12° 6 bis 8° - 4°	6 bis 12° 6 bis 8° - 4°
Drehen mit Schnellarbeitsstahl				
Schnitttiefe mm	0,5	3	6	
Vorschub mm/U	0,1	0,4	0,8	
BOEHLER/DIN-Sorte	S700 / DIN S10-4-3-10			
Schnittgeschwindigkeit, m/min				
Standzeit 60 min	30 bis 20	20 bis 15	18 bis 10	
Spanwinkel	14°	14°	14°	
Freiwinkel	8°	8°	8°	
Neigungswinkel	-4°	-4°	-4°	
Fräsen mit Messerköpfen				
Vorschub mm/U	bis 0,2		0,2 bis 0,4	
Schnittgeschwindigkeit, m/min				
BOEHLERIT SBF/ ISO P25	150 bis 100		110 bis 60	
BOEHLERIT SB40/ ISO P40	100 bis 60		70 bis 40	
BOEHLERIT ROYAL 131 / ISO P35	130 bis 85		--	
Drehen mit Hartmetall				
Bohrerdurchmesser mm	3 bis 8	8 bis 20	20 bis 40	
Vorschub mm/U	0,02 bis 0,05	0,05 bis 0,12	0,12 bis 0,18	
BOEHLERIT / ISO-Hartmetallsorte	HB10/K10			
Schnittgeschwindigkeit, m/min				
	50 bis 35	50 bis 35	50 bis 35	
Spitzenwinkel	115 bis 120°			
Freiwinkel	5°			

Recommendation for machining

(Condition solution annealed, average values)

Turning with carbide tipped tools				
depth of cut mm	0,5 to 1	1 to 4	4 to 8	over 8
feed, mm/rev.	0,1 to 0,3	0,2 to 0,4	0,3 to 0,6	0,5 to 1,5
BOEHLERIT grade	SB10, SB20	SB10, SB20, EB10	SB30, EB20	SB30, SB40
ISO grade	P10, P20	P10, P20, M10	P30, M20	P30, P40
cutting speed, m/min				
indexable carbide inserts edge life 15 min	210 to 150	160 to 110	110 to 80	70 to 45
brazed carbide tipped tools edge life 30 min	150 to 110	135 to 85	90 to 60	70 to 35
hardfaced indexable carbide inserts edge life 15 min BOEHLERIT ROYAL 121 BOEHLERIT ROYAL 131	up to 210 up to 140	up to 180 up to 140	up to 130 up to 100	up to 80 up to 60
cutting angles for brazed carbide tipped tools rake angle clearance angle angle of inclination	6 to 12° 6 to 8° 0°	6 to 12° 6 to 8° - 4°	6 to 12° 6 to 8° - 4°	6 to 12° 6 to 8° - 4°

Turning with HSS tools			
depth of cut, mm	0,5	3	6
feed, mm/rev.	0,1	0,4	0,8
HSS-grade BÖHLER/DIN	S700 / DIN S10-4-3-10		
cutting speed, m/min			
edge life 60 min	30 to 20	20 to 15	18 to 08
rake angle	14°	14°	14°
clearance angle	8°	8°	8°
angle of inclination	-4°	-4°	-4°

Milling with carbide tipped cutters		
feed, mm/tooth	up to 0,2	0,2 to 0,4
cutting speed, m/min		
BOEHLERIT SBF/ ISO P25	150 to 100	110 to 60
BOEHLERIT SB40/ ISO P40	100 to 60	70 to 40
BOEHLERIT ROYAL 131 / ISO P35	130 to 85	--

Drilling with carbide tipped tools			
drill diameter, mm	3 to 8	8 to 20	20 to 40
feed, mm/rev.	0,02 to 0,05	0,05 to 0,12	0,12 to 0,18
BOEHLERIT / ISO-grade	HB10/K10	HB10/K10	HB10/K10
cutting speed, m/min			
	50 to 35	50 to 35	50 to 35
top angle	115 to 120°	115 to 120°	115 to 120°
clearance angle	5°	5°	5°

Physikalische Eigenschaften

ausgehärtet auf max. Festigkeit
(Richtwerte)

Dichte bei /

Density at 20°C (68°F).....8,20kg/dm³
500°C (932°F).....8,04kg/dm³
600°C (1112°F).....8,00kg/dm³

Wärmeleitfähigkeit bei /

Thermal conductivity at 20°C (68°F).....14,0W/(m.K)
500°C (932°F).....19,0W/(m.K)
600°C (1112°F).....21,0W/(m.K)

Spezifische Wärme bei /

Specific heat at 20°C (68°F).....460J/(kg.K)
500°C (932°F).....550J/(kg.K)
600°C (1112°F).....590J/(kg.K)

Spez. elektr. Widerstand bei /

Electrical resistivity at 20°C (68°F).....0,40Ohm.mm²/m
500°C (932°F).....0,80Ohm.mm²/m
600°C (1112°F).....0,90Ohm.mm²/m

Elastizitätsmodul bei /

Modulus of elasticity at 20°C (68°F).....193 x 10³N/mm²

Schubmodul bei /

Modulus of shear at 20°C (68°F).....72 x 10³N/mm²

Remanenz /

Remanence0,66Vs/m²

Koerzitivfeldstärke /

Coercive field strength40A/cm

Maßänderung beim Auslagern in Längsrichtung /

Size change in ageing (longitudinal) - 0,07%

Für Feldstärke, A/cm / For field strength, A/cm	50	100	300	500
Magn. Induktion, Vs/m ² / Magn. induction, Vs/m ²	0,50	0,97	1,50	1,70

Wärmeausdehnung zwischen 20°C und ...°C, 10 ⁻⁶ m/(m.K) bei Thermal expansion between 20°C (68°F) and ...°C (°F), 10 ⁻⁶ m/(m.K) at					
100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)	400°C (752°F)	500°C (932°F)	600°C (1112°F)
10,2	10,8	11,0	11,4	11,8	11,8

Für Anwendungen und Verarbeitungsschritte, die in der Produktbeschreibung nicht ausdrücklich erwähnt sind, ist in jedem Einzelfall Rücksprache zu halten.

As regards applications and processing steps that are not expressly mentioned in this product description/data sheet, the customer shall in each individual case be required to consult us.

Serie Y

Dehnungsmessstreifen (DMS)

Charakteristische Merkmale

- Flexibel und robust
- Mehr als 2.000 Varianten
- Vorzugstypen sofort lieferbar
- Standard in der experimentellen Spannungsanalyse



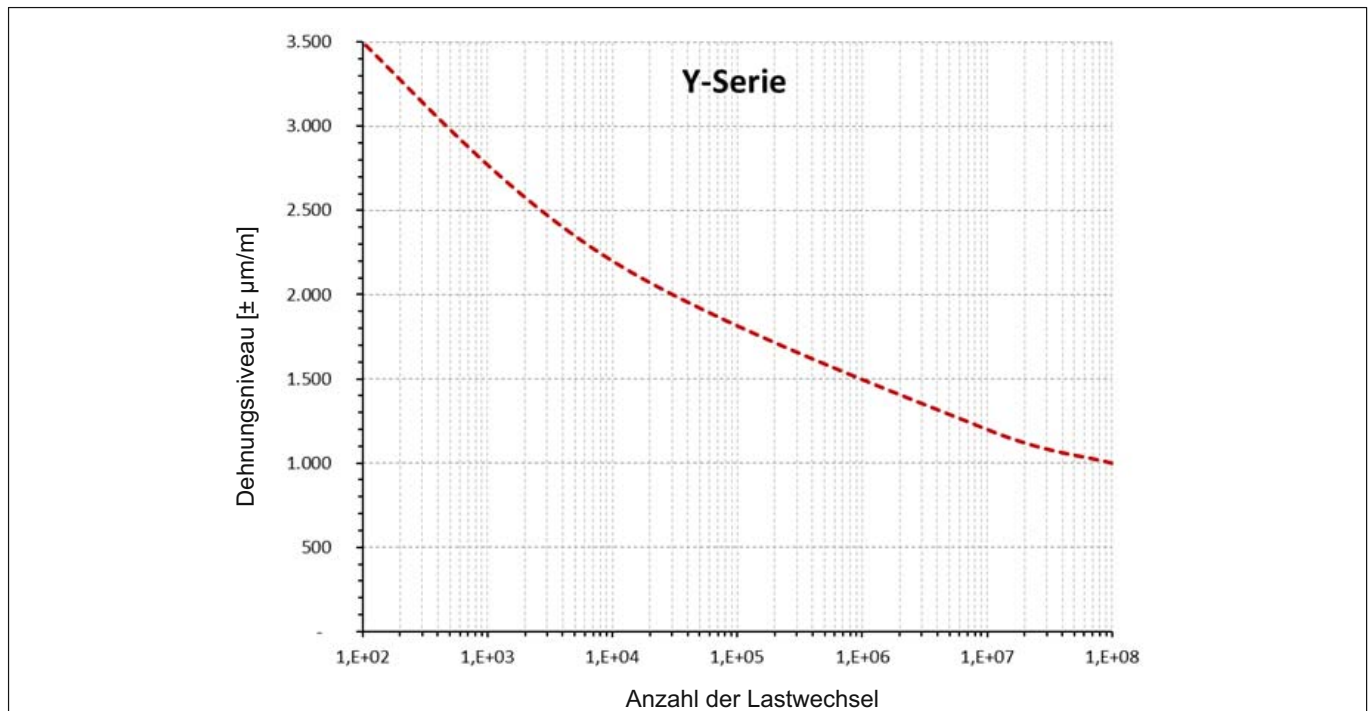
Technische Daten

DMS-Konstruktion		Folien-DMS mit eingebettetem Messgitter
Träger		
Werkstoff		Polyimid
Dicke	µm	50 ±15
Messgitter		
Werkstoff		Konstantan
Dicke	µm	ca. 3,8 or 5 (abhängig vom DMS-Typ)
Abdeckung		
Werkstoff		Polyimid
Dicke	µm	25 ±12
Anschlüsse		
Anschlussbändchen		Vernickelte Kupferbändchen, 30 mm lang
Integrierte Lötflächen		Größe ca. 1,5 mm x 1,6 mm (je nach Typ)
Zugentlastete Lötflächen		Vernickelte Lötflächen aus Kupfer
Nennwiderstand	Ω	120, 350, 700 or 1000 (abhängig vom DMS-Typ)
Widerstandstoleranz¹⁾	%	±0,3 ohne; ±0,35 mit Anschlussbändchen
k-Faktor		ca. 2 (auf jeder Packung angegeben)
k-Faktor-Toleranz	%	±1,5 (bei Messgitterlänge ≤1.5 mm) ±1,0 (bei Messgitterlänge ≥3mm)
Temperaturkoeffizient des k-Faktors		auf jeder Packung angegeben
Querempfindlichkeit	%	auf jeder Packung angegeben
Anwendungstemperaturbereich	°C (°F)	-70 ... +200 (-94 ... +392) für statische Messungen -200 ... +200 (-328... +392) für dynamische Messungen
Temperaturgang	Code:	
α für ferritischen Stahl	(1)	10,8 (6,0)
α für Aluminium	(3)	23 (12,8)
α für austenitischen Stahl	(5)	16 (8,9)
α für Quarzglas/Komposit	(6)	0,5 (0,3)
α für Titan	(7)	9 (5,0)
α für Kunststoff	(8)	65 (36,1)
α für Molybdän	(9)	5,4 (3,0)
Dauerschwingverhalten²⁾		
Bis zu einer maximalen Nullpunktdrift von ±100µm/m		10 ⁸ Lastspiele mit ±1.000 µm/m 10 ⁷ Lastspiele mit ±1.200 µm/m 10 ⁴ Lastspiele mit ±2.200 µm/m 10 ² Lastspiele mit ±3.500 µm/m
Bis zu einer maximalen Nullpunktdrift von +/- 30µm/m		10 ⁷ Lastspiele mit ±1.000 µm/m
Maximale Dehnbarkeit		
Positive Richtung	µm/m	50.000 (5%)
Negative Richtung	µm/m	50.000 (5%)
Kleinster Krümmungsradius		0,3 mm für DMS mit Anschlussbändchen 0,3 mm für DMS mit integrierten Lötflächen im Messgitterbereich 2,0 mm im Lötflächenbereich
Verwendbare Befestigungsmittel		Z70, X60, X280, EP150 und EP310S

¹⁾ Bei Messgitterlängen von 0,3 und 0,6 mm kann der Nennwiderstand um ±1% abweichen. Für die Typen LY51/LY5x beträgt die Abweichung ±0,75%. Bei XY9x, RY9x sowie bei den KY-Typen (pro Kette) ±0,5%

²⁾ Die Daten sind abhängig von den verschiedenen Parametern der Installation und deshalb nur für repräsentative Beispiele angegeben.

Dauerschwingverhalten (Prüfung bis zu einer Nullpunktdrift von $\pm 100\mu\text{m}/\text{m}$)



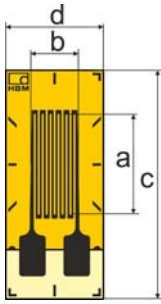
Typen und Abmessungen

Für alle Typen gelten die folgenden Codes (1 ... 9) der Temperaturanpassungen

- 1 = Ferritischer Stahl (10,8 ppm/K)
- 3 = Aluminium (23 ppm/K)
- 5 = Austenitischer Stahl (16 ppm/K)
- 6 = Quarzglas/Komposit (0,5 ppm/K)
- 7 = Titan und Grauguss (9 ppm/K)
- 8 = Kunststoff (65 ppm/K),
- 9 = Molybdän (5,4 ppm/K)

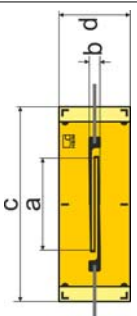
Serie Y: LY4

Linear-DMS mit integrierten Lötflächen unterhalb des Messgitters

	Bestell-Nr. ¹⁾	St. Pack	Nenn-wider-stand Ω	Abmessungen [mm]				V_{max} ³⁾	Vor-zugs-typen ⁴⁾
				Messgitter		Träger			
				a	b	c	d		
	1-LY4□-0.6/120 ²⁾	10	120	0.6	1.1	6	4	1.5	1
	1-LY4□-1.5/120	10	120	1.5	1.2	7	5	2.5	1
	1-LY4□-3/120	10	120	3	1.2	8	5	3.5	1, 3
	1-LY4□-3/120A ⁵⁾	10	120	3	1.2	8	5	3.5	-
	1-LY4□-6/120	10	120	6	2.7	13.9	5.9	8	1, 3
	1-LY4□-6/120A ⁵⁾	10	120	6	2.7	13.9	5.9	8	1
	1-LY4□-10/120	10	120	10	4.9	18	8	14	1
	1-LY4□-10/120A ⁵⁾	10	120	10	4.9	18	8	14	-
	1-LY4□-20/120	10	120	20	0.5	31.8	8.2	6.5	1
	1-LY4□-50/120	10	120	50	0.8	63.6	8.2	12	1
	1-LY4□-100/120	10	120	100	1	114.8	8.2	19	1
	1-LY4□-150/120	10	120	150	1.2	165.6	8.2	25	1
	1-LY4□-1.5/350 ²⁾	10	350	1.5	2.3	9.2	5.9	6.5	1
	1-LY4□-3/350	10	350	3	2.5	10.9	5.9	9	1, 3
	1-LY4□-3/350A ⁵⁾	10	350	3	2.5	10.9	5.9	9	1
	1-LY4□-6/350	10	350	6	2.8	13.9	5.9	15	1, 3, 6
	1-LY4□-6/350A ⁵⁾	10	350	6	2.8	13.9	5.9	15	-
	1-LY4□-10/350	10	350	10	5	18	8	24	1
	1-LY4□-10/350A ⁵⁾	10	350	10	5	18	8	24	-
	1-LY4□-3/700	10	700	3	2.7	10.9	5.9	13	1, 3
1-LY4□-6/700	10	700	6	4.1	13.9	5.9	23	1	
1-LY4□-10/700	10	700	10	5	18	8	33	-	
1-LY4□-3/1000 ²⁾	10	1,000	3	2.7	10.9	5.9	16	-	
1-LY4□-6/1000	10	1,000	6	4.2	13.9	5.9	27	1	
1-LY4□-10/1000	10	1,000	10	5	18	8	40	-	

Serie Y: LY5

Linear-DMS mit mit sehr schmalen Messgitter und Anschlussbändchen oberhalb und unterhalb des Messgitters

	Bestell-Nr. ¹⁾	St. Pack	Nenn-wider-stand Ω	Abmessungen [mm]				V_{max} ³⁾	Lötstütz-punkte	Vor-zugs-typen ⁴⁾
				Messgitter		Träger				
				a	b	c	d			
	1-LY5□-3/120	10	120	3	0.4	9	4.7	2	LS7	-
	1-LY5□-6/120	10	120	6	0.4	13	4.7	3	LS7	-

- 1) Dehnungsmessstreifen sind in verschiedenen Temperaturanpassungen verfügbar (siehe Codes Seite 3).
Durch Einsetzen des Codes anstelle des Platzhalters „□“, erhalten Sie die Bestell-Nr. Ihres gewünschten Dehnungsmessstreifen
- 2) Nur in den Anpassungen für Aluminium, ferritischen und austenitischen Stahl lieferbar
- 3) Maximal zulässige effektive Speisespannung (angegeben für Stahl)
- 4) Vorzugstypen (ab Lager lieferbar), mit den in der Spalte genannten Temperaturanpassungen, lieferbar
- 5) Mit Applikationshilfe (zugeschnittener Polyimid-Klebebandstreifen zum einfachen Positionieren)

OPA858 5.5-GHz Gain Bandwidth Product, Gain of 7 V/V Stable, FET Input Amplifier

1 Features

- High Gain Bandwidth Product: 5.5 GHz
- Decompensated, Gain ≥ 7 V/V (Stable)
- Ultra-Low Bias Current MOSFET Inputs: 10 pA
- Low Input Voltage Noise: $2.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- Slew rate: 2000 V/ μs
- Low Input Capacitance:
 - Common-Mode: 0.6 pF
 - Differential: 0.2 pF
- Wide Input Common-Mode Range:
 - 1.4 V from Positive Supply
 - Includes Negative Supply
- 2.5 V_{PP} Output Swing in TIA Configuration
- Supply Voltage Range: 3.3 V to 5.25 V
- Quiescent Current: 20.5 mA
- Available in 8-Pin WSON Package
- Temperature Range: -40 to $+125^\circ\text{C}$

2 Applications

- High-Speed Transimpedance Amplifier
- Laser Distance Measurement
- Lidar Receivers
- Level Transmitter (Optical)
- Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)
- Distributed Temperature Sensing
- 3D Scanner
- Time-of-Flight (ToF) Systems
- Autonomous Driving Systems

3 Description

The OPA858 is a wideband, low-noise, operational amplifier with CMOS inputs for wideband transimpedance and voltage amplifier applications. When the device is configured as a transimpedance amplifier (TIA), the 5.5-GHz gain bandwidth product (GBWP) enables applications requiring high closed-loop bandwidths at transimpedance gains in the tens to hundreds of k Ω s range.

The graph below demonstrates the bandwidth and noise performance of the OPA858 as a function of the photodiode capacitance when the amplifier is configured as a TIA. The total noise is calculated over a bandwidth range extending from DC to the calculated $f_{-3\text{dB}}$ frequency on the left-hand scale. The OPA858 package features a feedback pin (FB) that simplifies the feedback network connection between the input and the output.

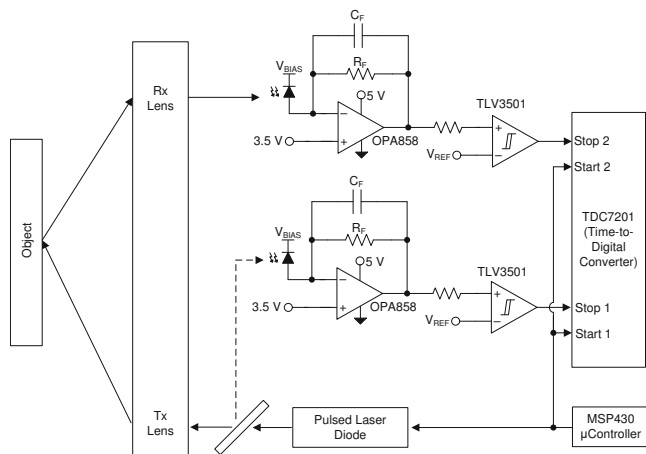
The OPA858 is optimized for use in optical Time-of-Flight (ToF) systems like the one shown in the figure below where the OPA858 is used with the [TDC7201](#) time-to-digital converter. The OPA858 can be used in high-resolution LIDAR systems with a high-speed analog-to-digital converter (ADC) and a differential output amplifier like the [THS4541](#) or [LMH5401](#) to drive the ADC.

Device Information⁽¹⁾

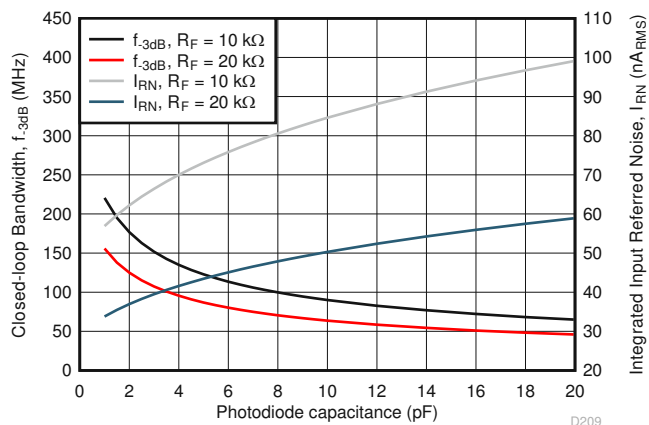
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
OPA858	WSON (8)	2.00 mm \times 2.00 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

High-Speed Time-of-Flight Receiver



Photodiode Capacitance vs. Bandwidth and Noise



GEN-Serie GEN2tB

Transientenrekorder und Datenerfassungssystem



Charakteristische Merkmale

- **Kostengünstige Lösung**
- **Robust und tragbar**
- **Bis zu 16 Analog-, 32 Digital- und vier Timer-/Zähler-Kanäle**
- **Kontinuierliches Streaming mit 100 MB/s**
- **DC- oder AC-Versorgung**
- **PTP-Zeitsynchronisation**
- **Statusanzeige**
- **Master/Sync-Anschluss (Option)**
- **Optisches 1-Gigabit-Ethernet (Option)**
- **SSD mit 200 MB/s (Option)**
- **IRIG/GPS-Zeitsynchronisation (Option)**
- **CAN-/CAN-FD-Ausgabe (Option)**

GEN2tB ist ein mobil einsetzbarer, für die Rack-Montage geeigneter Transientenrekorder und Datenerfassungssystem (DAQ) mit der Software Perception. Durch die mögliche Ausstattung mit bis zu zwei Eingangskarten mit Messraten von 200 kS/s bis 250 MS/s wird GEN2tB zum DAQ für Einsteiger, einem Highend-Transientenrekorder oder auch zu einem gemischten System. Die Basis-Eingangskarten ermöglichen den Einsatz des GEN2tB zum Aufzeichnen von Spannungen oder Schwingungen mit IEPE-Aufnehmern mit bis zu 16 Kanälen gleichzeitig und bis zu 2 MS/s. Die speziellen 1-kV-Eingangskarten mit Echtzeit-Mathematikfunktionen machen das GEN2tB zu einem kostengünstigen, leistungsstarken 12-Kanal-Leistungsanalysator mit Echtzeit-Leistungsberechnung und Analyse von Oberschwingungen. Mit der Universal-Eingangskarte kann das GEN2tB in der Werkstoffprüfung mit physikalischen Aufnehmern wie Dehnungsmessstreifen (DMS), IEPE-Sensoren oder Thermoelementen mit einer Messrate bis 500 kS/s eingesetzt werden.

Die Eingangskarten mit 250 MS/s ermöglichen die Verwendung für ultraschnelle Spannungs- oder DMS-Messungen, z. B. „Split-Hopkinson-Bar“, oder den Einsatz von faseroptisch-isolierten Digitalisierern in einer echten Hochspannungs-/Hochleistungsumgebung. Die Daten werden im integrierten Speicher der Eingangskarten abgelegt und/oder mit insgesamt 100 MB/s an einen PC gestreamt, auf dem die Software Perception läuft. Für eine Datensicherung mit höchster Zuverlässigkeit unterstützt GEN2tB ein (optionales) internes Solid State Drive mit einer Streamingrate von 200 MB/s.

Die optionale EtherCAT®- oder CAN/CAN-FD-Ausgabe ermöglicht einen autarken Echtzeit-Datenaustausch mit geringer Latenzzeit. Kupferkabel oder als Option optisches Ethernet bieten eine schnelle und sichere Verbindung zum PC, während der optionale Master/Sync-Anschluss ohne jede zusätzliche Hardware den Parallelbetrieb von zwei Grundgeräten ermöglicht. Mit dem optionalen Master/Sync-Anschluss können mehrere Grundgeräte gleichzeitig genutzt werden, zudem ermöglichen PTPv2- und IRIG/GPS-Zeitsteuerung die Synchronisation zwischen Grundgeräten und externen Geräten.



GEN series GN8101B GN8102B GN8103B

Basic 250, 100, 25 M/s
Input Card

Special features

- 8 analog channels
- Single-ended inputs
- 1 M Ω or 50 Ω termination
- ± 10 mV to ± 100 V input range
- Analog/digital anti-alias filters
- 14/16 bit resolution
- Real-time formula database
- Digital Event/Timer/Counter
- Multi sweep transient recorder
- Continuous/Dual sample rate
- Differential input using probes

Basic High Speed Input Card

The input card is a general purpose single-ended voltage input card. An external active differential probe supports measuring the differential signal directly at the source and creates the best high frequency common mode suppression possible.

For high frequency measurements, the inputs support a built-in 50 Ω termination option. The use of the 50 Ω termination supports voltage inputs from ± 10 mV to ± 5 V. The alternative 1 M Ω termination provides voltage inputs up to ± 100 V.

In multi sweep transient recorder mode triggers can be recorded without any re-arm time between sweeps, combined with sweep stretch to create variable post-trigger lengths.

Optimum anti-alias protection is achieved by the 6-pole analog anti-alias filter combined with a fixed high speed sampling Analog-to-Digital converter.

For sample rates 100 MS/s and lower, the digital anti-alias filter allows for a large range of high order filter characteristics with precise phase match and noise-free digital output.

The real-time formula database calculators option offers math routines to solve many real-time mathematical challenge like obtaining mechanical power and/or multi-phase (not limited to three) electric power (P, Q, S) or even efficiency calculations.

Every cycle based result from the real-time formula database can be transferred in real-time to the EtherCAT[®] output card.

Using voltage probes a single-ended 600 V RMS CAT III / 1000 V CAT II or a differential 1000 V RMS CAT III (1000 V RMS common mode) measurement range is created. The use of current clamps and external burdens allow for direct current measurements.