

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Florian Erb

Entwicklung und Validierung eines Prüfstandkonzeptes zur Erfassung von stoßartigen und wiederholenden Lastkomponenten

Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and Production Management

Florian Erb

Entwicklung und Validierung eines Prüfstandkonzeptes zur Erfassung von stoßartigen und wiederholenden Lastkomponenten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion B.Sc.
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Rheinmetall Landsysteme GmbH
EVS4 - Simulation Turmsysteme
Harburger Schloßstraße 18
21079 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Andreas Meyer-Eschenbach
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Sven Hargens

Industrieller Betreuer: David Schöbel

Abgabedatum: 08.08.2025

Kurzreferat

Florian Erb

Thema der Arbeit

Entwicklung und Validierung eines Prüfstandkonzeptes zur Erfassung von stoßartigen und wiederholenden Lastkomponenten

Stichworte

Prüfstand, Rückstoßkraft, Kraftmessung, Maschinengewehr, Belastungsanalyse

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein universell einsetzbarer Prüfstand zur Erfassung der Interface-Kräfte von lafettierbaren Maschinengewehren – exemplarisch am Modell MAG58 – entwickelt. Ziel war es, sämtliche Schnittlasten an den Kontaktpunkten zwischen Waffe und Lafette mit geringem Aufwand und hoher Reproduzierbarkeit zu messen. Der Entwicklungsprozess orientierte sich am Allgemeinen Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221. Nach zwei Iterationen in der Konzeptphase wurde ein CAD-basiertes Feinkonzept mithilfe der Bewertungsmethodik nach VDI 2225 Blatt 3 ausgewählt und anschließend durch eine D-FMEA sowie eine analytische Belastungsanalyse validiert. Das Ergebnis ist ein modularer Prüfrahmen aus Aluminiumprofilen, der sich über Adapter an unterschiedliche Waffenmodelle anpassen lässt. Die Kraftmessung erfolgt über ein Festlager mit dreiachsigem Kraftsensor sowie mehrere Pendelstützen mit einachsigen Sensoren.

Florian Erb

Title of Thesis

Development and Validation of a Test Stand Concept for Recording Shock-like and Repetitive Load Components

Keywords

Test stand, Recoil force, Force measurement, Machine gun, Load analysis

Abstract

As part of this project, a universally applicable test stand was developed to record the interface forces of mountable machine guns, using the MAG58 model as an example. The goal was to measure all mechanical loads at the contact points between weapon and mount with minimal effort and high reproducibility. The development process followed the general product development model according to VDI 2221. After two concept iterations, a CAD-based detailed design was selected using the evaluation method of VDI 2225, Sheet 3, and subsequently validated through a design FMEA and analytical stress analysis. The result is a modular aluminum profile-based test frame that can be adapted to different weapon models using interchangeable adapters. Force measurement is conducted via a fixed bearing with a three-axis force sensor and several pendulum supports with single-axis sensors.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **V**

Tabellenverzeichnis **VII**

Abkürzungen **VIII**

Nomenklatur **VIII**

1 Einleitung und Zielsetzung **1**

2 Grundlagen und Literaturrecherche **3**

2.1 Funktionsweise des MAG58 3

2.2 Kraftsensoren zur Erfassung hochdynamischer Lastfälle 5

2.3 Literaturrecherche 6

2.3.1 The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand *(Titel übernommen aus der Originalquelle)* 8

2.3.2 Piezoelectric Force Sensor-based Measurement System for Recoil Force Analysis *(Titel übernommen aus der Originalquelle)* 11

2.3.3 Measuring felt recoil of sporting arms *(Titel übernommen aus der Originalquelle)* 13

2.3.4 3D-printed sensing element based on fiber Bragg grating technology for grasping force measurement in surgical forceps *(Titel übernommen aus der Originalquelle)* 15

2.3.5 Gewonnene Erkenntnisse 16

3 Definition und Diskussion der Anforderungen **17**

3.1 Anforderungen des Auftraggebers 17

3.2 Anforderungen der Stakeholder 18

3.3 Rahmenbedingungen 19

3.4 Anforderungsliste 21

4 Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten **25**

4.1 Lastfall des MG-Schusses 25

4.2 Messkonzept „6-Komponenten Kraft-/Momentensensor“ 26

4.3 Messkonzept „Greybox“ 29

4.4 Messkonzept „Isolierte Belastungsermittlung“ 30

4.5 Messkonzept Beschleunigungsmessung 31

5 Umsetzung der Messkonzepte in mechanische Konzepte und Diskussion der mechanischen Machbarkeit 33

5.1 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen 33

5.2 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen 34

5.3 Auswählen und Bewerten von Lösungskonzepten 35

5.3.1 Konzept 1: Beschleunigungsmessung senkrecht 35

5.3.2 Konzept 2: Weiterentwicklung 37

5.3.3 Konzept 3: Schnittlasten 38

5.3.4 Konzept 4: Greybox 40

5.4 Vergleich der Grobkonzepte 41

5.5 Gestaltung der Feinkonzepte 43

5.5.1 Greybox 44

5.5.2 Weiterentwicklung 48

5.6 Auswahl eines Feinkonzepts 54

6 Validierung des Feinkonzepts „Greybox“ 57

6.1 Design-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (D-FMEA) 57

6.1.1 Kräfte- und Momentenmessung 57

6.1.2 Kräfte- und Momente leiten 57

6.1.3 Waffe aufnehmen 58

6.1.4 Abzug betätigen 58

6.1.5 Leiten und Auffangen der Kettenglieder 58

6.2 Belastungsanalyse 63

6.2.1 Normierung der Belastungen 65

6.2.2 Sicherheitsbedingung 1: Kombinierte Belastung 65

6.2.3 Sicherheitsbedingung 2: Biegemoment am Arbeitspunkt 66

6.3 Anforderungsabgleich 66

6.4 Experimentelle Bestimmung der Messgenauigkeit 69

6.4.1 Statische Belastung 69

6.4.2 Dynamische Belastung 69

6.4.3 Lasteinleitung 70

7 Diskussion der Ergebnisse 73

7.1 Zusammenfassung anhand der Schwerpunkte 73

7.1.1 Literaturrechere und Einarbeitung in die Themen Methodisches Konstruieren, Prüfstandsauslegung und Messkonzepte 73

7.1.2 Definition und Diskussion der Anforderungen 74

7.1.3 Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten 74
7.1.4 Umsetzen der Messkonzepte in mechanische Konstruktionen und Diskussion der mechanischen Realisierbarkeit 75
7.1.5 Vergleich der entwickelten Konzepte und Auswahl eines Konzepts . . 76
7.1.6 Validierung des ausgewählen Konzepts 76
7.2 Fazit und Ausblick 77

Literaturverzeichnis **81**

Anhang **85**

Abbildungsverzeichnis

2.1 Funktionsablauf eines Gasdruckladers 3
2.2 Seitenansicht des MAG58 4
2.3 Perspektivische Ansicht des MAG58 5
2.4 Das piezoelektrische Prinzip 6
2.5 Definition des Linearitätsfehlers 6
2.6 Konfiguration zur Kraft und Translationsmessung 8
2.7 Konfiguration zur Messung des Hochschlages 9
2.8 Rückstoßkraft F über die Zeit t 9
2.9 Prüfstand mit Schrotflinte 11
2.10 Jeteffekt einer Schrotflinte 12
2.11 Detailansicht des Kolbenhalters mit integriertem Kraftsensor 12
2.12 Schematische Darstellung des Rückstoßprüfstands 14
2.13 CAD-Zusammenbau mit FBG-Sensoreinheit 15
2.14 Frontansicht der FBG-Sensoreinheit 15
3.1 Definition der Messgenauigkeit 18
3.2 Aufbau der TVA 21
3.3 Aufbau des MG-Schießstands 21
4.1 Querschnitt durch ein gezogenes Rohr 25
4.2 Darstellung der Kräfte am Geschoss 26
4.3 Lastfall des MG-Schusses und potenzielle Bewegung bei freier Lagerung . . 26
4.4 Messkonzept - 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor 27
4.5 Freikörperbild des Messkonzepts „6-Komponenten Kraft-/Momentensensor“ 27
4.6 Punkte $A(x_1|y_1)$ für $M_A = 0$ 28
4.7 Belastung des Sensors in Abhängigkeit der Rückstoßkraft F_x und der Position $A(x_1|y_1)$ 28
4.8 2D Darstellung des Konzepts „Greybox“ 29
4.9 2D Darstellung des Konzepts „Isolierte Belastungsermittlung“ 30
4.10 Momentenmessung im Konzept „Isolierte Belastungsermittlung“ 30
4.11 Idealsituation „Isolierte Belastungsermittlung“ 31
4.12 Mögliche, zu betrachtende Situation „Isolierte Belastungsermittlung“ 31
4.13 Sensoranordnung für das Nine-accelerometer package 32
4.14 Sensoranordnung für das Compact cube scheme 32
5.1 Vergleich „Allgemeines Modell der Produktentwicklung“ und in diesem Kapitel verwendetes Modell 33

5.2 Transformatorische Funktionsstruktur des Prüfstandes 34
5.3 Morphologischer Kasten 35
5.4 Skizze des Grobkonzepts „Beschleunigungsmessung senkrecht“ 36
5.5 Detail A der Abb. 5.4 36
5.6 Translationsmessung beim Konzept „Weiterentwicklung“ 37
5.7 Kraftmessung beim Konzept „Weiterentwicklung“ 38
5.8 Gesamtansicht des Grobkonzepts „Schnittlasten“ 38
5.9 Detail A – Sensoranbindung 39
5.10 Detail B – Draufsicht Abzugsbetätigung 39
5.11 Adapterplatte des Grobkonzepts „Schnittlasten“ 39
5.12 Vorder- und Seitenansicht des waffenunabhängigen Prüfstands „Greybox“ . . 40
5.13 Adapterplatte der „Greybox“ für verschiedene Waffen 41
5.14 Gesamtansicht der Greybox 44
5.15 Details der Greybox 45
5.16 Freikörperbild des Feinkonzepts „Greybox“ 45
5.17 Pendelstütze des Prüfrahmens 46
5.18 Festlager des Prüfrahmens 47
5.19 Schraubverbindung Adapterplatten/Waffe 48
5.20 Hubmagnet zur Abzugsbetätigung 48
5.21 Gesamtansicht des Feinkonzepts „Weiterentwicklung“ 49
5.22 Konfiguration „Translation“ des Konzepts Weiterentwicklung 50
5.23 Freikörperbild des Konzepts „Weiterentwicklung“ 51
5.24 Anbindung des dreiachsigen Kraftsensors 52
5.25 Anbindung des 6-Komponenten Kraft-/Momentensensors 52
5.26 Detail D des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Abzugsbetätigung 53
5.27 Detail E des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Aufnahme Rohr links 53
5.28 Detail H des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Aufnahme Rohr rechts 53
5.29 Detail F des Konzepts „Weiterentwicklung - Zentrierung der Lagerung“ . . . 54
5.30 Detail F des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Kraftübertragung 54
6.1 Freikörperbild des Feinkonzepts „Greybox“ 63
6.2 Freikörperbild des Sensors 64
6.3 Pendel zur Führung des Modalhammers 71

Tabellenverzeichnis

2.1 Anzahl der Suchergebnisse der Literaturrecherche 7
3.1 Anforderungsliste 22
4.1 Zulässige Belastung des Kraft-/Momentensensors 9306A 29
5.1 Paarweiser Vergleich der Messgenauigkeit 42
5.2 Paarweiser Vergleich der Sicherheit 42
5.3 Paarweiser Vergleich der Anpassbarkeit 43
5.4 Bewertung der Feinkonzepte 55
6.1 D-FMEA zur Teilfunktion „Kräfte-/Momente messen“ 59
6.2 D-FMEA zur Teilfunktion „Kräfte-/Momente leiten“ 60
6.3 D-FMEA zur Teilfunktion „Waffe aufnehmen“ 61
6.4 D-FMEA zur Teilfunktion „Abzug betätigen“ 61
6.5 D-FMEA zur Teilfunktion „Leiten und Auffangen der Kettenglieder und Hülsen“ 62
6.6 Werte der Formelzeichen aus Gleichung 6.1 und Gleichung 6.2 63
6.7 Sensorbelastungen im Feinkonzept „Greybox“ 63
6.8 Sensorbelastungen im Feinkonzept „Greybox“ nach Anpassung 64
6.9 Erfüllungsgrad der Anforderungsliste 68
7.1 Zuordnung der Schwerpunkte zu den Kapiteln 73

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CAD	Computer Aided Design (Computerunterstütztes Konstruieren)
CCS	Compact Cube Scheme
D-FMEA	Design-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
EZU	Erprobungszentrum Unterlüß
F	Forderung
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FKB	Freikörperbild
FS	Fullscale (Vollbereichswert)
Fz	Formelzeichen
MG	Maschinengewehr
NAP	Nine-Accelerometer Package
NF	Nichtforderung
RLS	Rheinmetall Landsysteme GmbH
TVA	Temperierversuchsanlage
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Wunsch

Nomenklatur

Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	[N]	Reaktionskraft am Punkt A
a	$\left[\mathrm{s}/(\mathrm{m}^2)\right]$	Beschleunigung
B	[N]	Reaktionskraft am Punkt B
d	[m]	Geschossdurchmesser
E	[N]	Reaktionskraft am Punkt E
F	[N]	Kraft
f	[Hz]	Frequenz
G	[N]	Reaktionskraft am Punkt G
I	$\left[\mathrm{kg\ m}^2\right]$	Trägheitstensor
J	$\left[\mathrm{kg\ m}^2\right]$	Massenträgheitsmoment
k	[−]	Anzahl der Körper
M	[N m]	Drehmoment

Symbol	Einheit	Bedeutung
m	$[\mathrm{kg}]$	Masse
N	[−]	Messpunkte
n	[−]	Anzahl der Bewertungskriterien
p	[−]	Punktzahl für Bewertungskriterium
R	[N]	Leistenkraft
T	[s]	Periodendauer
v	$[\mathrm{m/s}]$	Geschwindigkeit
x	[m]	X-Achsenabschnitt
y	[m]	Y-Achsenabschnitt
z	[m]	Z-Achsenabschnitt

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[rad]	Drallwinkel
ω	$[1/\mathrm{s}]$	Winkelgeschwindigkeit

Indizierungen

Symbol	Einheit	Bedeutung
$()_{1...n}$	[−]	Laufender Index
$()_{a}$	[−]	größte von Interesse bestehende
$()_{A\ ...\ Z}$	[−]	Am Punkt A ... Z wirkend
$()_{B}$	[−]	Biege-
$()_{G}$	[−]	Gewichts-
$()_{Gas}$	[−]	Gas
$()_{Gs}$	[−]	Geschoss
$()_{max}$	[−]	Maximal-
$()_{S}$	[−]	Scher-
$()_{s}$	[−]	Abtast-
$()_{W}$	[−]	Waffe
$()_{x}$	[−]	um / in X-Achse wirkend
$()_{y}$	[−]	um / in Y-Achse wirkend
$()_{Zp}$	[−]	Prozesskraft in z-Richtung
$()_{Zv}$	[−]	Vorspannkraft in z-Richtung

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Rheinmetall Landsysteme GmbH (RLS) integriert im Rahmen ihrer Entwicklungsprojekte eine Vielzahl automatischer Schusswaffen in militärische Plattformen. Diese reichen bis zum Kaliber 35×228 mm, wie es beispielsweise im Flugabwehrsystem „Gepard“ verwendet wird [1]. Für die Anbindung dieser Waffen an das Trägersystem müssen im Entwicklungsprozess umfassende Festigkeitsnachweise erbracht werden. Diese reichen von einfachen, statischen Handrechnungen unter Annahme maximaler Lasten bis hin zu Crashtests mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Methoden (FEM).

Insbesondere für dynamische Nachweise sind Kraft-Zeit-Verläufe der auftretenden Lasten essenziell. Während für unternehmenseigene Mittelkaliberwaffen detaillierte Kenntnisse zur Innenballistik und zum Rückstoßverhalten vorliegen, fehlen entsprechende Informationen häufig bei zugekauften Maschinengewehren. Je nach Hersteller werden lediglich Maximalwerte der Rückstoßkraft in Rohrrichtung angegeben, wodurch andere relevante Belastungskomponenten nicht berücksichtigt werden können. Zudem sind solche Angaben für dynamische Nachweise nicht ausreichend, da beim Abfeuern hochfrequente, stoßartige und wiederholte Belastungen auftreten. Werden diese Effekte nicht im Rahmen einer Betriebsfestigkeitsanalyse berücksichtigt, besteht das Risiko eines Funktionsausfalls oder im schlimmsten Fall eines lebensbedrohlichen Versagens.

Ein aktuelles Entwicklungsprojekt der RLS ist das modulare Mittelkaliberturmsystem „Lance 2“, das auf verschiedenen Trägerplattformen eingesetzt werden kann. Neben der Hauptwaffe ist standardmäßig eine koaxiale Sekundärbewaffnung im Kaliber $7{,}62 \times 51$ mm vorgesehen. In der Regel kommt dabei das Maschinengewehr MAG58 zum Einsatz [2].

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines Prüfstandkonzepts zur Bestimmung der Rückstoßkräfte an den Schnittstellen des MAG58 in Form von Kraft-Zeit-Verläufen. Die Arbeit orientiert sich methodisch am Allgemeinen Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221 und gliedert sich nach der Aufgabenstellung (Anhang A) in sechs Schwerpunkte:

- Literaturrecherche und Einarbeitung in die Themen Methodisches Konstruieren, Prüfstandauslegung und Messkonzepte
- Definition und Diskussion der Anforderungen
- Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten
- Umsetzung der Messkonzepte in mechanische Konstruktionen und Diskussion der mechanischen Realisierbarkeit
- Vergleich der entwickelten Konzepte und Auswahl eines Konzepts
- Validierung des ausgewählten Konzepts

Mit Ausnahme der mechanischen Konzeptionierung und des Konzeptvergleichs, die gemeinsam in einem Kapitel behandelt werden, entspricht jeder Schwerpunkt einem eigenen Kapitel. Die einzelnen Schwerpunkte wurden in spezifische Arbeitspakete unterteilt und die durchschnittliche Bearbeitungsdauer beträgt etwa zwei Wochen pro Kapitel. Im Folgenden wird der Inhalt der einzelnen Kapitel kurz dargelegt.

Der erste Schwerpunkt wird in Kapitel 2 behandelt und umfasst eine Einführung zum MAG58, zu Kraftsensoren zur Erfassung hochdynamischer Lastfälle, sowie die Literaturrecherche. Hier werden drei unterschiedliche bestehende Konzepte zur Erfassung von Rückstoßlasten untersucht, die sich sowohl in Zielsetzung als auch in Herangehensweise unterscheiden, um einen möglichst umfassenden Überblick über den Stand der Technik zu ermöglichen. Zudem wird

ein alternativer, innovativer Lösungsansatz evaluiert, um über konventionelle Messmethoden hinausgehende Konzepte zur Rückstoßermittlung zu identifizieren.

Im dritten Kapitel werden die Anforderungen definiert und diskutiert. Grundlage ist ein Interview mit dem Auftraggeber, ergänzt durch perspektivenbasiertes Denken sowie die systematische Berücksichtigung bestehender Rahmenbedingungen.

Kapitel 4 behandelt die Entwicklung von Messkonzepten. Es werden vier Varianten vorgestellt, die sich hinsichtlich eingesetzter Sensortypen, Sensoranzahl und der Art der Messergebnisse unterscheiden und jeweils unterschiedliche Wege zur Umsetzung der Messaufgabe aufzeigen.

Die mechanische Konzeptbildung sowie der anschließende Vergleich und die Auswahl eines geeigneten Konzepts erfolgen gemeinsam in Kapitel 5. Vier Grobkonzepte werden zunächst grafisch skizziert und im Anschluss einer Grobbewertung unterzogen. Zwei ausgewählte Konzepte werden im CAD weiterentwickelt und anschließend einem quantitativer Vergleich unterzogen. Dieser bildet die Grundlage für die Auswahl des Konzepts, das anschließend validiert wird.

Kapitel 6 behandelt die Validierung des ausgewählten Konzepts. In einem mehrstufigen Verfahren wird zunächst die Betriebssicherheit durch eine D-FMEA sowie eine Belastungsanalyse überprüft. Anschließend erfolgt ein Abgleich mit der Anforderungsliste, bevor im letzten Schritt ein Konzept zur experimentellen Bestimmung der Messgenauigkeit ausgearbeitet wird.

Kapitel 7 bildet den Abschluss der Arbeit. Es werden die zentralen Ergebnisse zusammengefasst, kritisch bewertet und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen sowie auf den künftigen Einsatz des Prüfstandes gegeben.

2 Grundlagen und Literaturrecherche

Dieses Kapitel vermittelt die notwendigen Grundlagen, damit die weiteren Ausführungen auch ohne spezielle Vorkenntnisse nachvollziehbar sind. Zunächst wird erläutert, wie automatische Schusswaffen klassifiziert werden und welcher Kategorie das zu untersuchende Maschinengewehr MAG58 zuzuordnen ist. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung seiner Funktionsweise sowie der relevanten konstruktiven Besonderheiten.

Zur Ermittlung der Rückstoßlasten des MAG58 kommen verschiedene Verfahren der Kraft- und Beschleunigungsmessung in Frage. Im Rahmen der Recherche zeigte sich, dass piezoelektrische Kraftsensoren anderen Verfahren in Hinblick auf Dynamik, Messbereich und Robustheit überlegen sind. Daher werden diese Sensoren im Anschluss näher betrachtet.

Abschließend wird eine Literaturrecherche anhand ausgewählter, relevanter Quellen durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik zu ermitteln und fundierte Erkenntnisse für die Konzeption und Entwicklung des eigenen Prüfstands zu gewinnen.

2.1 Funktionsweise des MAG58

Das MAG58 (Abb. 2.2) ist ein lafettierbares Maschinengewehr des Herstellers FN Herstal und gehört zur Kategorie der Gasdrucklader. Es verschießt gegurtete Munition im Kaliber 7,62 x 51 mm NATO. Der Begriff „Gasdrucklader“ bezeichnet das Wirkprinzip, mit dem das automatische Nachladen der Waffe erfolgt. Der Funktionsablauf ist in Abb. 2.1 schematisch dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

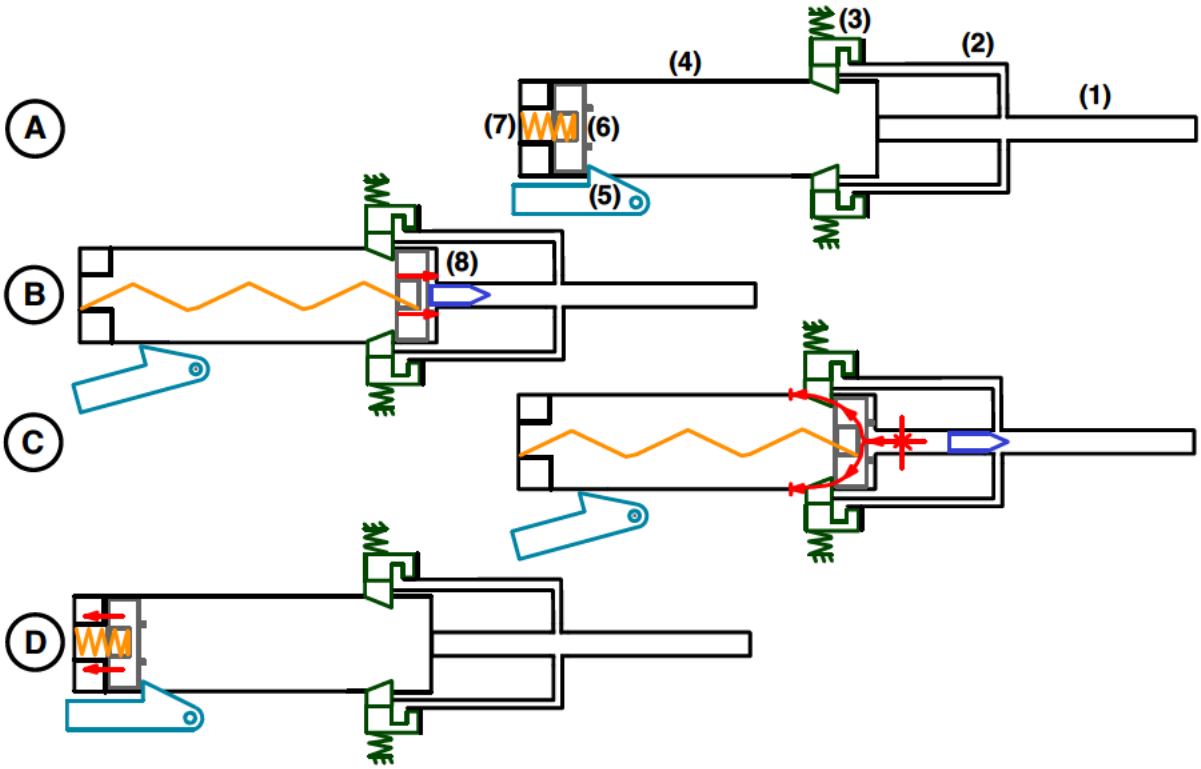


Abbildung 2.1: Funktionsablauf eines Gasdrucklader; 1 - Rohr, 2 - Gaskanal, 3 - Verriegelung, 4 - Waffengehäuse, 5 - Abzug, 6 - Verschluss, 7 - Schließfeder, 8 - Patrone

(A) Die Waffe ist entsichert und schussbereit. Mit Betätigung des Abzugs schnellt der Verschluss (6) nach vorne und führt eine Patrone (8) in den Lauf (1). In der vorderen Position wird der Verschluss von der Verriegelung (3) arretiert.
(B) Der Verschluss schlägt auf das Rohr auf, wodurch der rot markierte Impuls in das Waffengehäuse (4) übertragen wird. Anschließend wird die Patrone gezündet.
(C) Das Treibladungspulver entzündet sich und beschleunigt das Geschoss (Gs) im Lauf. Durch den Impuls ($m_{Gs} \cdot v_{Gs} = m_W \cdot v_W$) wirkt eine rückläufige Kraft auf das Waffengehäuse (W).
(D) Nachdem das Geschoss die Bohrung des Gaskanals (2) passiert hat, wird die Verriegelung gelöst und der Verschluss durch den weiterhin im Rohr wirkenden Gasdruck rückläufig beschleunigt. Durch den Stoß gegen das Gehäuse wird ein weiterer Impuls in die Waffe übertragen. Wird der Abzug weiterhin betätigt, wird der Verschluss durch die Schließfeder (7) nach vorne beschleunigt und der Ablauf beginnt erneut bei Schritt (B). Andernfalls verbleibt der Verschluss in der hinteren Position (A).

Da sich zu Beginn der Schussfolge keine Patrone im Lauf befindet und der Verschluss durch den Abzug in der hinteren Position gehalten wird, wird das MAG58 als zuschießende Waffe klassifiziert. Befände sich bereits eine Patrone im Lauf, würde es sich um eine aufschießende Waffe handeln.

Zum Laden des Gewehrs wird der Deckel der Zuführmulde (14) um den Drehpunkt (15) geschwenkt, um die Munition in die Zuführmulde (11) einzuführen. Um die Schussbereitschaft herzustellen, wird der Spannhebel (16, siehe Abb. 2.3) zurückgezogen und der Verschluss in den hinteren Anschlag gebracht. Anschließend wird die Waffe durch Betätigung des Sicherungsknopfs (10) entsichert.

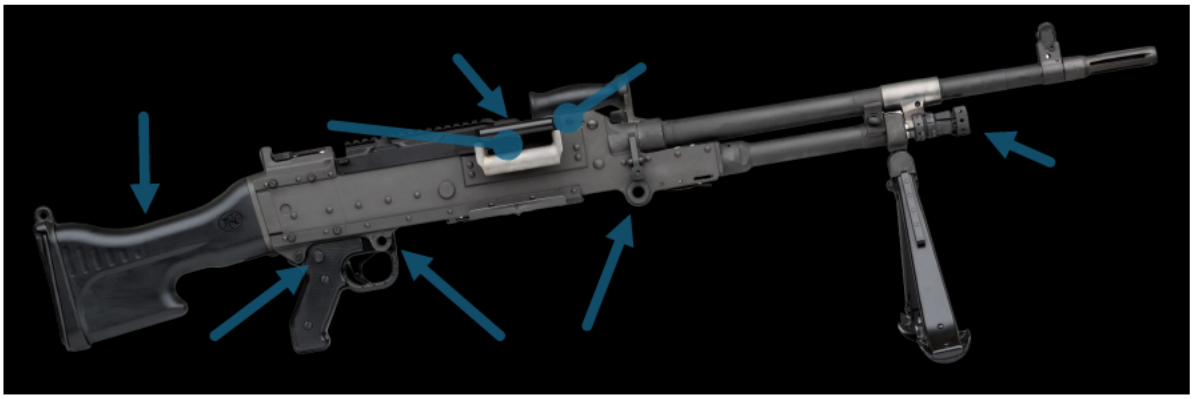


Abbildung 2.2: Seitenansicht des MAG58; 9 - Kolben, 10 - Sicherungsknopf, 11 - Zuführmulde, 12 - Lafettierbohrungen, 13 - Gasdruckregler, 14 - Deckel der Zuführmulde, 15 - Drehpunkt des Deckels (in Anlehnung an [3])

Über den Gasdruckregler (13) lässt sich die Feuerrate des Gewehrs in drei Stufen zwischen 650 und 1000 Schuss pro Minute variieren [3]. Nach dem Abfeuern einer Patrone wird deren Hülse auf der Unterseite des Maschinengewehrs (17, siehe Abb. 2.3) ausgeworfen, während die Kettenglieder seitlich (18) aus dem Gehäuse geführt werden.

Zur Lafettierung wird der Kolben (9) des MAG58 durch einen Puffer ersetzt, und die Waffe wird über die dafür vorgesehenen Bohrungen (12) befestigt [3].



Abbildung 2.3: Perspektivische Ansicht des MAG58; 16 - Spannhebel, 17 - Hülsenauswurft, 18 - Kettengliederauswurft (in Anlehnung an [3])

Ergänzend zur beschriebenen Funktionsweise des MAG58 und den dabei auftretenden Impulsen, wird im folgenden Abschnitt die für die Kraftmessung eingesetzte Sensorik detailliert beschrieben.

2.2 Kraftsensoren zur Erfassung hochdynamischer Lastfälle

Für die Messung von Kräften und Momenten wurden neben der klassischen Dehnungsmessstreifen- und Piezomesstechnik viele Verfahren entwickelt. Für hochdynamische Lastfälle reduziert sich deren Auswahl jedoch deutlich. Beispielsweise werden bei Dehnungsmessstreifen hohe Verformungen angestrebt, um eine bessere Signalerfassung zu ermöglichen. Um solche Verformungen zu realisieren, werden die Messaufnehmer mit geringer Steifigkeit ausgelegt, was jedoch die Eigenfrequenz verringert. Liegt die Eigenfrequenz des Sensors unter der höchsten auftretenden Frequenz, wird diese angeregt, was zu einer Verfälschung der Messergebnisse führt.

Hersteller von Kraftaufnehmern empfehlen für hochdynamische Kraftmessungen daher piezoelektrische Kraftsensoren. Dies liegt an der hohen Steifigkeit und der daraus resultierenden hohen Eigenfrequenz des Kristalls, der dem Messprinzip zugrunde liegt [4].

Ein Beispiel für einen piezoelektrischen Kristall ist der in Abb. 2.4 dargestellte Quarz. Durch die kovalente Bindung von Silizium- und Sauerstoffatomen entstehen bei atomarer Verschiebung Ladungsüberschüsse bzw. -mängel an den beiden Seiten des Quarzes. Dadurch erzeugt der Kristall eine Ladung, die proportional zur einwirkenden Kraft ist. Diese Ladung wird über entsprechende Elektronik verstärkt und ausgewertet.

Die aufgebaute Ladung baut sich aufgrund von Isolationsverlusten mit der Zeit ab, was zu einem prinzipbedingten Drift von etwa 1 N/min führt. Da der Drift unabhängig von der Kraftamplitude ist, verringert sich sein Einfluss bei höheren Kräften. Bei Stoßbelastungen mit hohen Amplituden und kurzen Belastungsdauern von unter einer Sekunde ist der Drift vernachlässigbar.

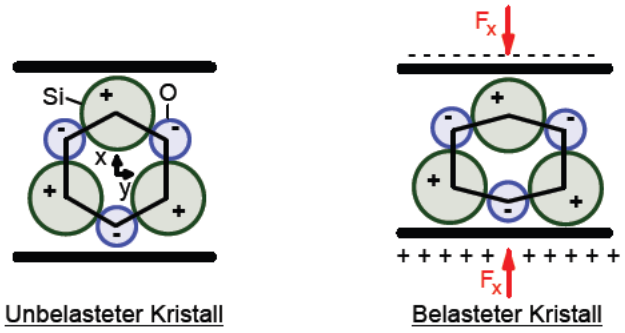


Abbildung 2.4: Das piezoelektrische Prinzip (in Anlehnung an [5])

Eine deutlichere Beeinflussung der Messergebnisse ergibt sich durch den Linearitätsfehler a von typischerweise etwa 0,5 %, welcher im Vergleich zu Dehnungsmessstreifen-basierten Kraftsensoren etwa 25-mal höher ausfällt [4]. Der Linearitätsfehler beschreibt die maximale Abweichung der Kennlinie eines Sensors von der Best-Fit-Geraden des Kraftsignals, wobei diese Abweichung als prozentualer Anteil des Vollbereichswerts (Full Scale, FS) angegeben wird (vgl. Abb. 2.5). Ursächlich für diese Nichtlinearität sind unter anderem elastische Verformungen im Sensorgehäuse rund um den piezoelektrischen Kristall sowie komplexe, mehraxiale Spannungszustände innerhalb des Kristalls selbst [6].

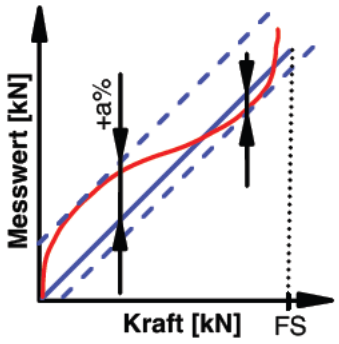


Abbildung 2.5: Definition des Linearitätsfehlers

Da ein hoher Linearitätsfehler die erreichbare Messgenauigkeit erheblich beeinträchtigen kann, wird im Rahmen der folgenden Literaturrecherche unter anderem analysiert, welche Sensortypen in bestehenden Rückstoß-Prüfständen zur Anwendung gelangen.

2.3 Literaturrecherche

Ziel dieser Literaturrecherche ist es, bestehende Systeme zur Kraft-Zeit-Messung, insbesondere im Kontext automatischer Schusswaffen, systematisch zu erfassen, zu vergleichen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zu bewerten. Aufgrund des zeitlichen Rahmens wurde die Auswahl auf vier repräsentative Quellen beschränkt. Dabei konzentriert sich die Recherche auf drei Arbeiten, die gängige Messsysteme für Rückstoßlasten analysieren, sowie auf eine Quelle, die einen wenig verbreiteten Kraftsensortypen vorstellt.

Die Recherche erfolgte unter Verwendung ausgewählter Suchbegriffe, die in den Datenbanken Google Scholar, BASE und ScienceDirect verwendet wurden. Die Ergebnisse der Suche sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Die Suchmaschine BASE verfügt neben diversen Filteroptionen über drei unterschiedliche Suchalgorithmen. Die exakte Suche identifiziert Dokumente, welche die exakten Begriffe der Suchanfrage enthalten. Die Suche nach Wortformvariationen berücksichtigt darüber hinaus verschiedene grammatikalische Flexionen, wie Genitiv- oder Pluralformen. Beide Algorithmen lieferten im Rahmen der Recherche keine relevanten Treffer. Hervorzuheben ist die mehrsprachige Suche von BASE, welche zusätzlich Synonyme sowie Übersetzungen der Suchbegriffe unter Nutzung des Eurovoc- und Agrovoc-Thesaurus berücksichtigt [7]. Aufgrund des fehlenden Ausschlusses von Mehrfachnennungen führt dies zu einer hohen Anzahl an Treffern.

ScienceDirect bietet als führende Plattform für wissenschaftliche Fachliteratur in den Bereichen Technik, Gesundheit und Naturwissenschaften eine überwiegend peer-reviewed Auswahl, liefert jedoch aufgrund dessen vergleichsweise geringe Trefferzahlen.

Google Scholar überzeugt durch eine ausgewogene Kombination aus Trefferanzahl und Relevanz der Suchergebnisse und stellt somit eine zentrale Quelle der Recherche dar.

Tabelle 2.1: Anzahl der Suchergebnisse der Literaturrecherche

Suchbegriffe	Datenbank	Treffer
weapon recoil „test stand“	Google Scholar	208
	BASE	(14.281.719)
	ScienceDirect	8
„recoil measurement“ firearm	Google Scholar	112
	BASE	(7.297.007)
	ScienceDirect	1
waffen rückstoß prüfstand	Google Scholar	43
	BASE	0
	ScienceDirect	0
rückstoß messung feuerwaffen	Google Scholar	170
	BASE	0
	ScienceDirect	0
„test stand“ force time measurement	Google Scholar	38.000
	BASE	13
	ScienceDirect	3.665
prüfstand kraft zeit messung	Google Scholar	17.400
	BASE	(29.418.897)
	ScienceDirect	9

Abgerufen am 30.05.2025; Eingeklammerte Ergebnisse erforderten Funktion „Mehrsprachige Suche“

Die Auswahl der analysierten Arbeiten basiert auf deren Relevanz für die Messung dynamischer Rückstoßlasten sowie dem Ziel eine Vielfalt von verschiedenen Vorgehensweise zu untersuchen. Die folgenden vier Publikationen wurden im Rahmen der Arbeit eingehender betrachtet:

1. The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand [8]
2. Piezoelectric Force Sensor-based Measurement System for Recoil Force Analysis [9]
3. Measuring felt recoil of sporting arms [10]
4. A 3D-printed sensing element based on fiber Bragg grating technology for grasping force measurement in surgical forceps [11]

Im Rahmen der Vorbereitung für die Erstellung des Morphologischen Kastens wurden die zentralen Funktionen der Prüfstände systematisch identifiziert und analysiert. Zu den erfassten Hauptfunktionen zählen dabei die Befestigung des Prüfstandes, die Aufnahme der Waffe, die Betätigung des Abzugs sowie die Durchführung der Rückstoßmessung.

2.3.1 The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand *(Titel übernommen aus der Originalquelle)*

Die Quelle „The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand" beschreibt ein fortschrittliches Prüfstandskonzept zur Messung von Rückstoßkräften. Der Prüfstand ermöglicht die Erfassung folgender Kenngrößen des Schussvorgangs:

- Rückstoßweg - mehr als 100 mm
- Beschleunigung der Waffe - Zwischen ±3000 g
- Rückstoßkraft - bis zu 3 kN
- Hochschlag - bis 35°

Der Prüfstand kann in zwei unterschiedlichen Konfigurationen betrieben werden, die entweder die Translations- (Abb. 2.6) oder die Rotationsmessung (Abb. 2.7) ermöglichen. Zur Kraftmessung kann zudem ein Kraftsensor zwischen dem Sensorhalter (9) und dem hinteren Schlitten (2) montiert werden. Eine detaillierte Funktionsanalyse des Prüfstandes erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

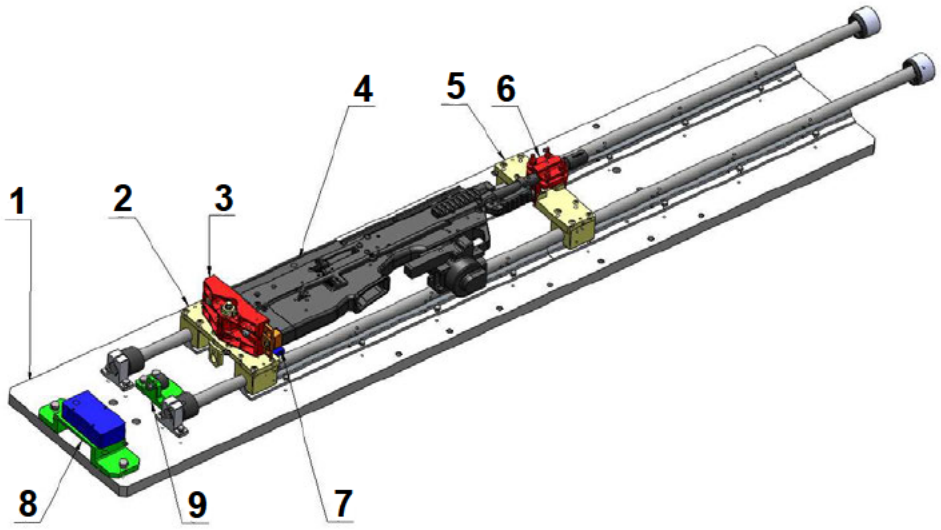


Abbildung 2.6: Konfiguration zur Kraft und Translationsmessung; 1 - Grundplatte, 2 - Schlitten, 3 - Kolbenhalter, 4 - Untersuchte Waffe, 5 - Schlitten, 6 - Rohrhalter, 7 - Beschleunigungssensor, 8 - Positionssensor, 9 - Kraftsensorhalter (in Anlehnung an [8, S. 31])

Im Rahmen der Quelle wurden Messergebnisse der Waffe „MSBS-5,56", einem polnischen Sturmgewehr des Kalibers 5,56 × 45 mm, ermittelt. In Abb. 2.8 wird der ermittelte Kraft-Zeit-Verlauf des aufschießenden Gasdruckladers dargestellt. Die drei markanten Punkte des

Feuervorgangs, die bereits in Abschnitt „Funktionsweise des MAG58“ erläutert wurden, sind deutlich erkennbar. Im Unterschied zu zuschießenden Waffen befindet sich der Verschluss der hier untersuchten Waffe bei Abzugsbetätigung bereits in der vorderen Position und wird bei Schussunterbrechung in dieser gehalten, was sich in einem vorwärts gerichteten Impuls am Ende der Schussfrequenz niederschlägt.

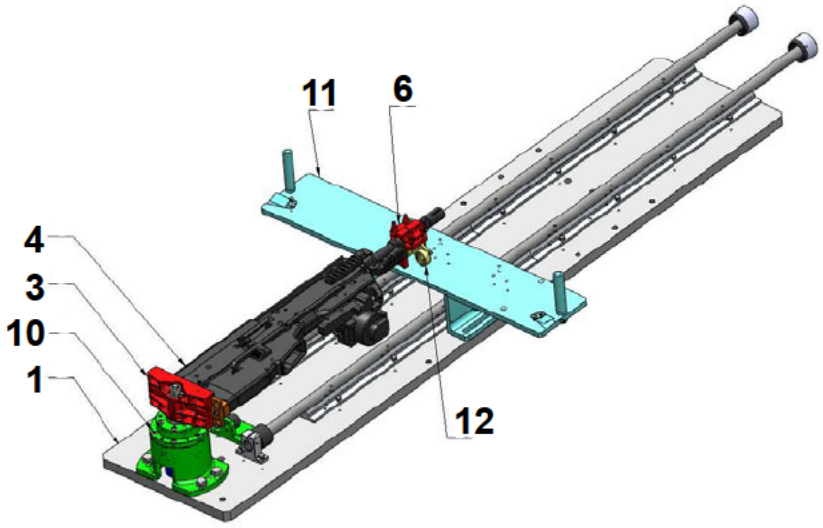


Abbildung 2.7: Konfiguration zur Messung des Hochschlages; 1 - Grundplatte, 3 - Kolbenhalter, 4 - Untersuchte Waffe, 6 - Rohrhalter, 10 - Drehachse mit Encoder, 11 - Tisch, 12 - Rollen (in Anlehnung an [8, S. 34])

Der dargestellte Einzelschuss dauert etwa 0,08 Sekunden, was einer Schussfrequenz von circa 750 Schuss pro Minute entspricht. Dieser Wert entspricht der mittleren Stufe des Gasdruckreglers des MAG58 und dient als Grundlage für die Definition der Mindestabtastfrequenz der Elektronik.

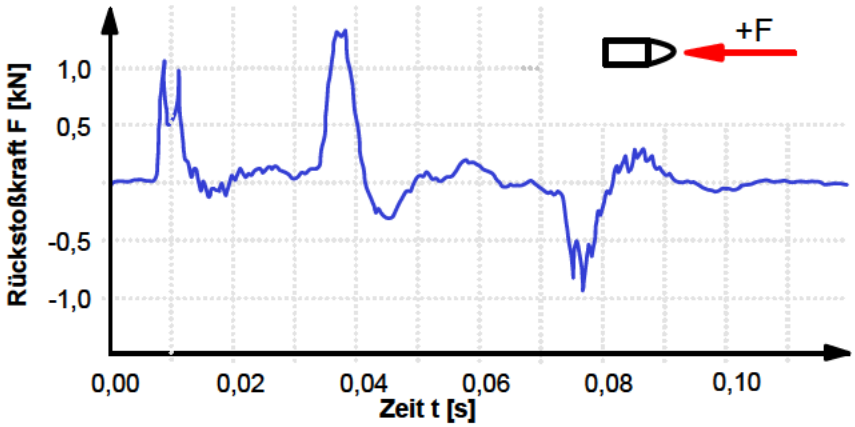


Abbildung 2.8: Rückstoßkraft F über die Zeit t (in Anlehnung an [8, S. 43])

Im Folgenden wird auf die Umsetzung der verschiedenen Funktionen eingegangen.

Funktion: Prüfstand befestigen

Die Grundplatte (1) des Prüfstandes ist beidseitig mit mehreren Bohrungen versehen, um eine sichere Fixierung zu ermöglichen. Das Bohrbild ist kompatibel mit dem universellen Schieß-

bock „STZA 13 gun mount“, welcher bis zum Kaliber 12,7 mm einsetzbar ist und einen Elevations-/Azimuthbereich von $\pm 5°$ bietet [12]. Für spezielle Maschinengewehre wie MIN/MAG und das M2 Browning sind Adapter erhältlich, die jedoch keine Kraftsensorik integrieren [13].

Funktion: Waffe aufnehmen

Zur Erfassung translatorischer Kräfte und Bewegungen wird die Waffe (4) waagerecht auf zwei Schlitten (2, 5) montiert. Der Kolben ist über den Kolbenhalter (3) an den hinteren Schlitten (2) angebunden. Zur Unterbindung des Hochschlags wird das Rohr mittels einer Klemmverbindung (6) am vorderen Schlitten (5) fixiert. Die Schlitten werden über zwei Schienen mit Gummidämpfern an den Endanschlägen geführt. Während der Kraftmessung wird der hintere Schlitten mit einem Kraftsensor am Kraftsensorhalter (9) verschraubt.

Zur Messung des Hochschlags wird der Positionssensor durch eine Drehachse mit Encoder (10) ersetzt. Der Rohrhalter wird mit zwei Rollen (12) über den Tisch (11) geführt, der variabel positioniert und mit Anschlägen zur Begrenzung des Hochschlags ausgestattet ist. Die Funktion der vor den Anschlägen montierten Bleche bleibt unklar, könnte jedoch dem Abbremsen der Waffe dienen.

Funktion: Abzug betätigen

Der Abzug wird über einen am Gewehr montierten elektrischen Auslöser betätigt; nähere technische Details hierzu sind nicht verfügbar.

Funktion: Rückstoßkenngrößen messen

In der Konfiguration zur Translationsmessung erfassen ein am hinteren Schlitten montierter Beschleunigungssensor und ein Laserentfernungsmesser die dynamischen Bewegungen der Waffe. Die Kraftmessung beschränkt sich auf die Achse des Laufs, wobei der Kraftsensor zwischen Sensorhalter und hinterem Schlitten installiert wird. Für die Drehwinkelmessung ist die Drehachse mit einem Encoder ausgestattet.

Fazit:

Das beschriebene System zeichnet sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und einen steifen, einfachen Aufbau aus. Die feste Positionierung der Waffe gewährleistet eine konsistente Versuchsanordnung. Freiheitsgrade wurden gezielt reduziert; verbleibende Freiheitsgrade sind lediglich durch Lagerreibung beeinflusst. Die modulare Bauweise ermöglicht einen schnellen Wechsel zwischen unterschiedlichen Waffentypen. Die Validierung der Messergebnisse wird durch die Möglichkeit unterstützt, Sensorsignale verschiedener Messgrößen miteinander zu korrelieren.

Es ist jedoch zu beachten, dass durch die zusätzlichen bewegten Massen der Einspannung bei der Beschleunigungsmessung ein trägeres dynamisches Verhalten aufgezeichnet wird als bei der freien Waffe. Gemäß der Formel $F = m \cdot a$ führt eine erhöhte Masse zu einer Verringerung der gemessenen Beschleunigung bei konstanter Kraft, was die Anfälligkeit für Messfehler erhöht. Die horizontale Messung des Hochschlags vereinfacht die Konstruktion und vermeidet den winkelabhängigen Einfluss der Gewichtskraft auf das Momentengleichgewicht, wie er bei senkrechter Messung auftreten würde.

Abschließend ist anzumerken, dass die Befestigung des Kolbens mittels Verschraubung nur bei Waffen mit entsprechenden Bohrungen möglich ist, was die Adaptierbarkeit des Prüfstandes

einschränkt. Bei Waffen ohne Kolben oder ohne geeignete Bohrungen ist eine tiefgreifen
Modifikation des Prüfstandes erforderlich.

2.3.2 Piezoelectric Force Sensor-based Measurement System for Recoil Force Analy
(Titel übernommen aus der Originalquelle)

Ziel der in dieser Quelle dargestellten Untersuchung ist die Analyse dynamischer Rückst
kräfte bei Schrotflinten mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien. Dabei werden Kenngröß
wie die maximale Rückstoßkraft, die Rückstoßkraft zum Zeitpunkt des Geschossaustritts, d
Impuls sowie der Anteil des sogenannten Jeteffekts vergleichend betrachtet. Zum Einsatz ko
men dabei je ein massenverregeltes System, ein Gasdrucklader und ein Hybridkonzept.

In Abb. 2.9 und Abb. 2.11 ist die Prüfvorrichtung dargestellt, die sich durch eine geringe Bau-
teilanzahl und eine einfache Einspanntechnik auszeichnet. Aufgrund dieser Merkmale stellt die
Konstruk ufbau dar.
Die spezi k werden
in den fol



Abbildung 2.9: Prüfstand mit Schrotflinte [9, S. 599]

Der Jet-Effekt beschreibt den Anteil der Rückstoßkraft, der durch den Impuls der aus der Mün-
dung austretenden Verbrennungsgase verursacht wird. Die sich daraus ergebende Kraftkom-
ponente in x-Richtung (F_x), welche in die Lagerung eingeleitet wird, lässt sich gemäß dem
Impulserhaltungssatz in Abhängigkeit der Massen m_{Gas} (Gas) und m_W (Waffe) sowie deren
Geschwindigkeiten v_{Gas} bzw. v_W nach Austritt des Geschosses wie folgt beschreiben:

$$F_x = \frac{d}{dt}(m_{Gas} \cdot v_{Gas}) + \frac{d}{dt}(m_W \cdot v_W) \tag{2.1}$$

Unter der Annahme einer festen Waffenlagerung ($v_W = 0$) und unter Anwendung der Produkt-
regel ergibt sich:

$$F_x = \dot{m}_{Gas} \cdot v_{Gas} + m_{Gas} \cdot a_{Gas} \tag{2.2}$$

Im Kraft-Zeit-Verlauf der Rückstoßmessung ist der Jeteffekt in Abb. 2.10 orange hervorge-
hoben. Im Gegensatz zur vorhergehenden Studie (vgl. Abschnitt 2.3.1) wird in dieser Arbeit
lediglich das erste Kraftmaximum dargestellt. Eine präzise Abbildung des Jeteffekts erfordert
eine signifikant höhere Abtastrate als die Schussfrequenz.

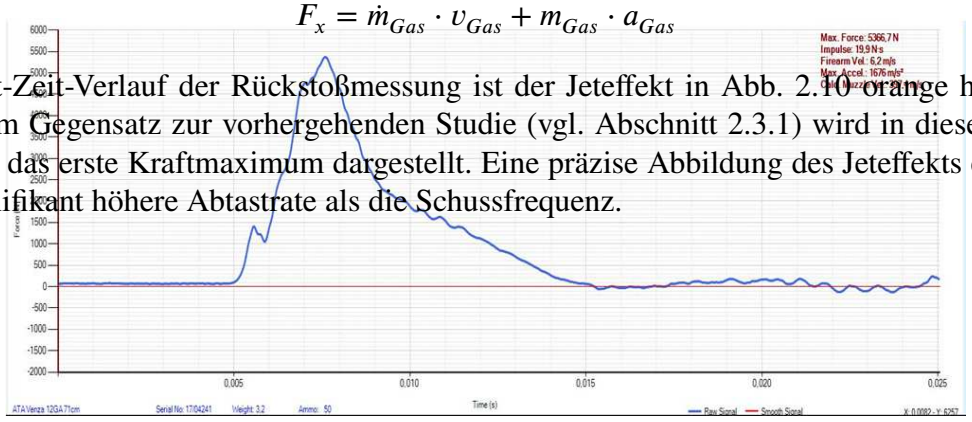


Fig. 10. A sample recoil force-time graph

III. Experimental Infrastructure Preparation

All designed and manufactured parts were brought together and assembled and the shooting table was made ready with the shooting apparatus. All electronic equipment is prepared as shown in Fig. 3. The table and shooting apparatus can be seen in Fig. 9, with an example rifle in place.

Fig. 9. Shooting apparatus with a rifle in experiment

The data received from the sensor were converted into force values through software in accordance with the voltage-force conversions specified in the sensor catalog. These converted values are placed in the force-time graph together with the measurement frequency information. An example of a force-time graph obtained is shown in Fig. 10.

Fig. 10. A sample recoil force-time graph

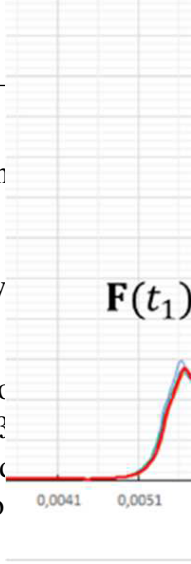


Fig.

The area
can be appro

This ap
minimizing t
as shown in
achieved.

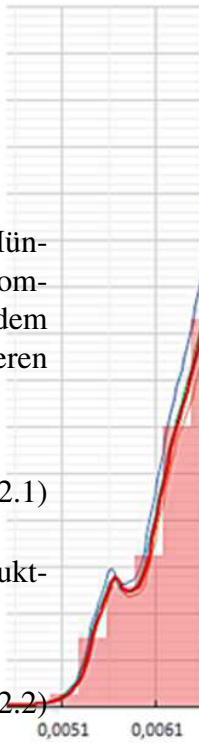


Fig.

In order
expressed by
software an
accurately as

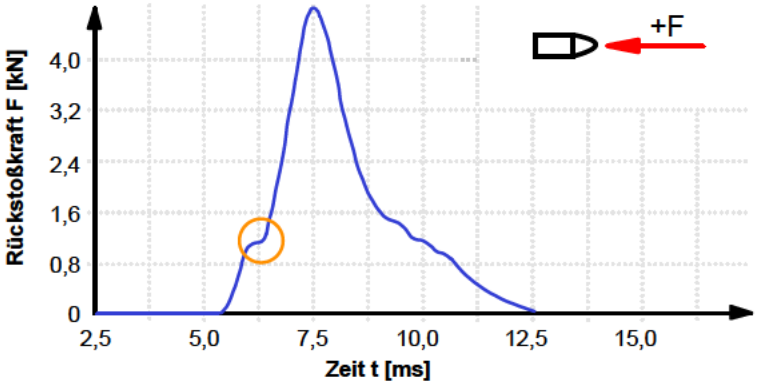


Abbildung 2.10: Jeteffekt einer Schrotflinte (in Anlehnung an [9])

Funktion: Prüfstand befestigen

Die Prüfvorrichtung ist auf einer Grundplatte montiert, die über einen formschlüssigen Anschlag mit dem darunterliegenden Tisch verbunden wird. Das Hochschlagen der Vorrichtung wird durch das Eigengewicht des Systems sowie zusätzliche Sandsäcke verhindert

Funktion: Waffe aufnehmen

Die Waffe wird auf Sandsäcken positioniert und in den Kolbenhalter (Abb. 2.11) eingelegt.

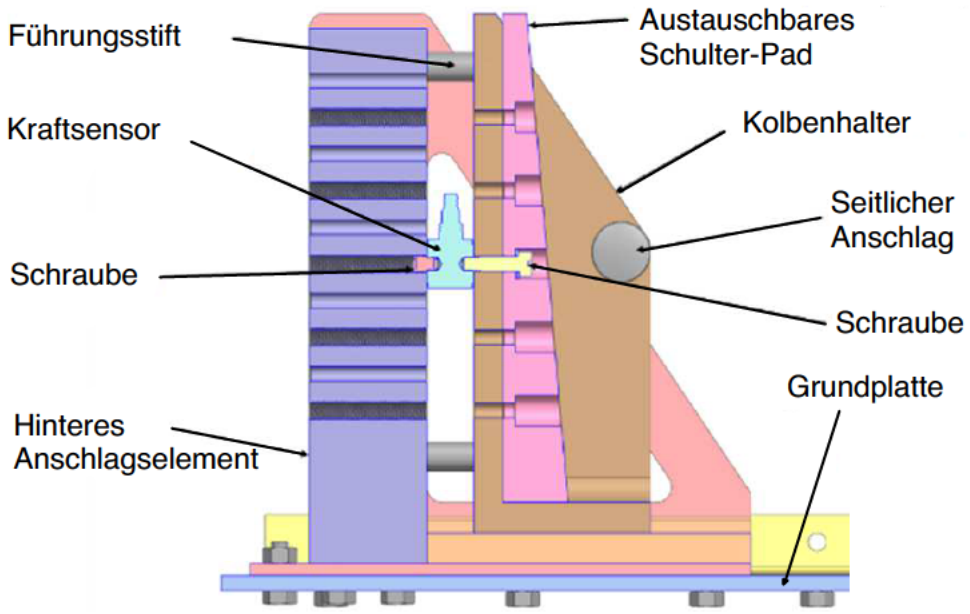


Abbildung 2.11: Detailansicht des Kolbenhalters mit integriertem Kraftsensor (in Anlehnung an [9, S. 598])

Zwei seitliche Anschläge verhindern ein laterales Verschieben. Entlang der Rohrachse können ausschließlich Druckkräfte auf den Kolbenhalter übertragen werden, da kein Form- oder Kraftschluss besteht, der ein Abheben der Waffe vom Halter verhindern würde. Der Kolbenhalter wird mittels mehrerer Führungsstifte parallel zur Schussachse gegen einen piezoelektrischen Kraftsensor ausgerichtet, über den die Rückstoßkraft zunächst in das hintere Anschlagelement und anschließend in die Grundplatte eingeleitet wird. Die Bewegung der Waffe in Schussrich-

tung wird durch zwei Gurte begrenzt, mit denen sie gegen zwei Sandsäcke fixiert ist. Zur Ausrichtung der Waffe relativ zum Sensor kommt ein individuell gefertigtes Justierwerkzeug mit integrierter Wasserwaage zum Einsatz.

Funktion: Abzug betätigen

Die Schussauslösung erfolgt manuell durch eine neben dem Prüfstand positionierte Person. Dies stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar und kann darüber hinaus die Ausrichtung der Waffe während der Messung verfälschen. Eine Schrägstellung der Waffe führt dazu, dass ausschließlich die Kraftkomponenten erfasst werden, die orthogonal zur Sensorachse wirken, wodurch die gemessene Amplitude geringer ausfällt als die tatsächlich eingebrachte Kraft.

Funktion: Rückstoßkenngrößen messen

Zur Messung der Rückstoßkräfte wird ein piezoelektrischer Sensor eingesetzt, der konstruktionsbedingt ausschließlich Druckkräfte entlang seiner Längsachse erfassen kann. Zusätzlich sind zwei Beschleunigungssensoren an der Waffe angebracht, auf deren Messdaten jedoch nicht näher eingegangen wird. Da keine Rückhaltung der Waffe vorgesehen ist, ist das System für Zugkräfte nicht anwendbar. Darüber hinaus kann eine Verschiebung der Waffenlage nach jedem Schuss infolge der Verwendung von Gurten und Sandsäcken nicht ausgeschlossen werden. Ohne Rejustierung beeinträchtigt dies die Reproduzierbarkeit der Messung.

Fazit:

Der vorgestellte Prüfstand ist durch seinen einfachen Aufbau leicht realisierbar, weist jedoch deutliche Schwächen hinsichtlich Sicherheit, Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit auf. Die Fixierung mittels Sandsäcken und Gurten erzeugt statisch unbestimmte Lagerbedingungen, wodurch undefinierte Kraftübertragungen auftreten können. Die manuelle Auslösung des Abzugs birgt sicherheitstechnische Risiken und kann zusätzlich zu Fehlbelastungen des Sensors führen. Die alleinige Rückhaltung durch das Systemgewicht sowie einen Anschlag ist für eine präzise und sichere Rückstoßmessung als unzureichend zu bewerten.

2.3.3 Measuring felt recoil of sporting arms *(Titel übernommen aus der Originalquelle)*

Ziel der in dieser Quelle beschriebenen Untersuchung ist die Erfassung der Rückstoßkräfte, die auf die Schulter und die Wange eines Schützen beim Abfeuern einer Schrotflinte einwirken. Zur realitätsnahen Nachbildung der menschlichen Haltung wurde ein auf Rollen gelagerter Prüfstand entwickelt (Abb. 2.12). Zwischen den Kraftsensoren und der Waffe wurden zusätzlich dämpfende Elemente eingesetzt. Die Besonderheit dieses Konzepts liegt in der Einspannung der Waffe über ein Gerüst, wodurch sich diese Arbeit von anderen untersuchten Systemen abhebt.

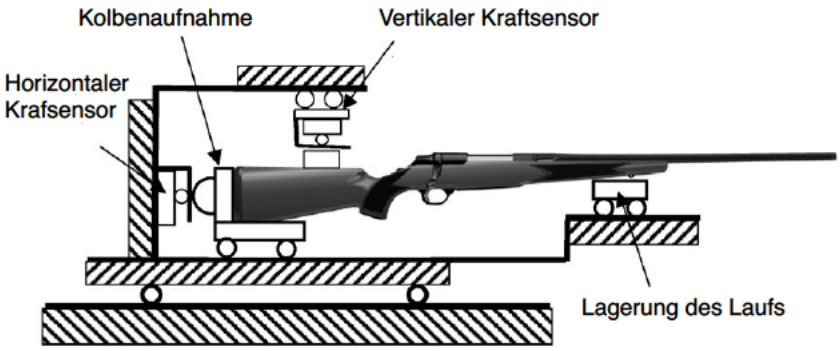


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung des Rückstoßprüfstands (in Anlehnung an [10, S. 542])

Zur Validierung des Prüfstandes wurde der Weg-Zeit-Verlauf der Waffe bei der Betätigung durch einen Schützen mit dem Verlauf beim Abfeuern in der Vorrichtung verglichen. Die Bewegung wurde mit einer Videokamera (30 fps) aufgezeichnet und bildweise ausgewertet.

Funktion: Prüfstand befestigen

Um die auf den menschlichen Körper wirkenden Rückstoßlasten realistisch abzubilden, wurde der gesamte Prüfstand auf einem Rollensystem mit starrer Achse gelagert. Dies ermöglicht ausschließlich Translationen entlang der Rohrachse. Ein Abheben oder seitliches Verschieben der Vorrichtung wird durch das Eigengewicht sowie durch Reibkräfte zwischen den Rollen und dem Untergrund verhindert. Die Gesamtmasse des Prüfstandes dient dabei als Ersatzmasse für den Oberkörper des Schützen.

Funktion: Waffe aufnehmen

Die Lagerung der Waffe erfolgt gemäß Abb. 2.12 an drei Punkten. Der Kolben liegt an einem vertikal ausgerichteten Kraftsensor an, wobei der Kolbenhalter sowohl Druck- als auch Seitenkräfte aufnehmen kann. Eine kraft- oder formschlüssige Fixierung in Schussrichtung erfolgt nicht, sodass sich die Waffe potenziell vom Sensor lösen kann. Bei den untersuchten Waffen trat dieses Verhalten nicht auf, da es sich ausschließlich um aufschießende Systeme handelte und der Ladevorgang nicht berücksichtigt wurde.

Zur Schonung der Waffe wurden dünne Neoprenpads zwischen den Lagerpunkten und der Waffe angebracht. Zusätzlich wurde ein 1 cm starkes Neoprenpolster zwischen Kolben und Kraftsensor eingesetzt, um die Dämpfung möglichst realistisch zu simulieren.

Die Einrichtung der Waffe erfordert den temporären Ausbau des vertikal angeordneten Sensors über zwei Klemmen. Aufgrund der gewählten Lagerungsstrategie sind Anpassungen für verschiedene Waffenmodelle in der Regel nicht erforderlich.

Funktion: Abzug betätigen

Die Art der Abzugsbetätigung wird in der Originalquelle nicht näher erläutert. Sollte – wie in Abschnitt 2.3.2 – eine manuelle Betätigung erfolgen, bestünde die Gefahr, dass sich der Finger bei einer Relativbewegung der Waffe abschert. Zudem könnte die manuelle Auslösung die Verschiebung der Waffe beeinflussen und somit zu fehlerhaften Kraftmesswerten führen.

Funktion: Rückstoßkenngrößen messen

Zur Messung der horizontalen und vertikalen Rückstoßkräfte wurden die Kraftsensorenmodelle 870 und 871 des Herstellers Loadstar Sensors Inc. eingesetzt. Diese Sensoren basieren auf einer Kraftübertragung mittels Kugel, wie sie in Abb. 2.12 dargestellt ist. Die Einleitung der Rückstoßkräfte erfolgt dabei indirekt über Scharniere und Hebelarme, wodurch bei der Auswertung die jeweiligen Hebelverhältnisse berücksichtigt werden müssen.

Da die Kraftübertragung über die Kugel ausschließlich Druckkräfte zulässt, können Kräfte in Schussrichtung nicht vollständig erfasst werden. Sobald sich die Waffe vom Sensor abhebt, wird der Kontakt unterbrochen, was zu Messausfällen führt.

Fazit:

Der vorgestellte Prüfstand bietet aufgrund seiner verstellbaren Konstruktion eine hohe Flexibilität bei der Aufnahme unterschiedlicher Waffen. Trotz des einfachen und kostengünstigen Aufbaus ist ein schneller Umbau möglich. Das Besondere an diesem Prüfstand liegt im Fokus auf die Erfassung der vom Schützen subjektiv empfundenen Rückstoßkräfte, anstelle der in starrer Einspannung auftretenden Reaktionskräfte.

Die Kombination aus beweglicher Lagerung, dämpfenden Elementen (z. B. Neoprenpolstern) und reduzierter Steifigkeit erlaubt die Simulation des menschlichen Rückstoßverhaltens. Einschränkungen ergeben sich jedoch durch die indirekte Krafteinleitung über Hebel, da diese zusätzliche Rechenoperationen zur korrekten Interpretation der Messwerte erforderlich macht. Obwohl die Zielsetzung der in diesem Abschnitt betrachteten Arbeit deutlich von der in Anhang A formulierten Aufgabenstellung abweicht, liefert die Quelle dennoch relevante Hinweise zur möglichen Ausgestaltung der Waffenlagerung.

2.3.4 3D-printed sensing element based on fiber Bragg grating technology for grasping force measurement in surgical forceps *(Titel übernommen aus der Originalquelle)*

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Arbeiten, in denen Kraftmessungen im Zusammenhang mit Schusswaffen im Fokus standen, widmet sich die hier betrachtete Studie einer Anwendung aus der Medizintechnik. Sie demonstriert die Integration eines Fiber Bragg Grating (FBG)-Sensors in eine minimalinvasive Pinzette zur Messung der Klemmkraft (vgl. Abb. 2.13 und Abb. 2.14).



Abbildung 2.13: CAD-Zusammenbau mit FBG-Sensoreinheit [11, S. 7]

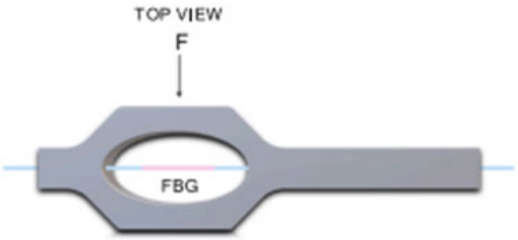


Abbildung 2.14: Frontansicht der FBG-Sensoreinheit [11, S. 3]

Der Sensor basiert auf einem optischen Leiter, in den ein periodisches Gitter eingebracht ist, das bestimmte Wellenlängen reflektiert. Interrogatoren senden ein breitbandiges Lichtspektrum

durch die Faser und messen die reflektierten Frequenzen. Wird der Leiter gedehnt, verändert sich die reflektierte Wellenlänge, sodass Rückschlüsse auf die aufgebrachte Kraft gezogen werden können.

Aufgrund des optischen Messverfahrens eignet sich das FBG-Messprinzip insbesondere für den Einsatz in explosionsgefährdeter Umgebung – beispielsweise bei Versuchen mit oder nahe Sprengstoffen. Allerdings begrenzt die geringe maximale Abtastfrequenz von wenigen Kilohertz [14] die Eignung für hochdynamische Messungen, wie sie bei Schockereignissen auftreten. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

2.3.5 Gewonnene Erkenntnisse

Durch die Literaturrecherche wurde der Stand der Technik anhand von vier Quellen bestimmt, um deren Stärken zu übernehmen und ermittelte Schwächen zu beseitigen. Die gewählten Quellen unterscheiden sich in deren Zielsetzung und Lösungsansätzen, damit ein breiter Erkenntnisgewinn erfolgen kann.

Der Prüfstand „The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand“ minimiert durch dessen gezielte, zum Kraftsensor parallele Führung der Waffe, auftretende Störgrößen. Zusätzlich werden Messfehler weiter reduziert, indem die Signale der verschiedenen Messgrößen der Translation und Rotation zu einem Kraft-Zeit-Verlauf zusammengeführt werden können. Ebenso wie alle weiteren ermittelten Quellen, wird auf eine ganzheitliche Betrachtung des Rückstoßlastfalles verzichtet und ausschließlich auf die koaxial zum Rohr wirkende Kraftkomponente abgezielt. Die Schwäche des Systems ist der hohe erforderliche Aufwand, um weitere Waffensysteme zu untersuchen.

Im Rahmen der Quelle „Piezoelectric Force Sensor-based Measurement System for Recoil Force Analysis“ wurde eine Befestigung des Prüfstandes aufgezeigt, welche ausschließlich über einen Anschlag und das Eigengewicht des Prüfstandes umgesetzt wurde. Dadurch kann das System flexibel eingesetzt werden und der Einrichtungsaufwand reduziert sich. Wird der Anschlag mit einer Führung kombiniert, ließen sich weitere Freiheitsgrade einschränken und die Betriebssicherheit erhöhen, ohne dass eine Verschraubung notwendig würde.

Das Konzept der Arbeit „Measuring felt recoil of sporting arms“ ermöglicht durch eine universelle Rahmenstruktur die Untersuchung einer Vielzahl von Waffe, ohne einen Umbau oder weitere Komponenten zu erfordern. Neue Produkte oder verschiedene Produktvarianten können damit ohne Vorlaufzeit analysiert werden. Zudem wird die Notwendigkeit von neuen Konstruktionen im Betrieb minimiert.

Die zuletzt betrachtete Quelle befasste sich mit einem medizinischen Anwendungsfall, in dem das bislang wenig verbreitete Messverfahren des „Fiber-Bragg-Grating“ vorgestellt wurde. Die Analyse zeigte jedoch, dass die geringe maximale Abtastfrequenz den Sensor für die Schockmessung ungeeignet macht.

Im nächsten Kapitel wird mit der „Definition und Diskussion der Anforderungen“ der erste Schritt einer Produktentwicklung behandelt.

3 Definition und Diskussion der Anforderungen

Gemäß dem ersten Schritt im Produktentwicklungsprozess nach VDI 2221 – dem „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ [15] – erfolgt in diesem Kapitel die systematische Ermittlung und Strukturierung der Anforderungen an den zu entwickelnden Prüfstand.

Zunächst werden die vom Auftraggeber formulierten Anforderungen durch ein strukturiertes Interview erfasst. Aufbauend auf den dort gewonnenen Erkenntnissen erfolgt eine weiterführende Anforderungsanalyse unter Einbezug perspektivenbasierten Denkens sowie der Untersuchung technischer und organisatorischer Rahmenbedingungen. Als methodische Grundlage dient dabei die Hauptmerkmalliste nach Pahl/Beitz [16].

Zur Berücksichtigung standortspezifischer Randbedingungen wurde zusätzlich eine Begehung des vorgesehenen Einsatzortes durchgeführt. Die dabei durch das technische Personal vermittelten Informationen fließen ebenfalls in die Anforderungsdefinition ein.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine strukturierte Anforderungsliste, in der sämtliche Anforderungen systematisch zusammengefasst und entsprechend ihrer Verbindlichkeit klassifiziert sind.

3.1 Anforderungen des Auftraggebers

Da die Aufgabenstellung dieser Thesis keine konkreten Angaben zum Ursprung der „stoßartigen und wiederholenden Lastkomponenten“ sowie zu den Anforderungen an den Prüfstand enthält, wurden diese Aspekte im Rahmen eines Interviews mit dem Auftraggeber präzisiert. Die Hauptfunktion des Prüfstandes wurde dabei wie folgt definiert:

„Als Hauptfunktion gilt die Bestimmung der Kraft-Zeit-Verläufe an den Interfaces des MAG58.“

Unter „Interface-Lasten“ sind die Kräfte und Momente zu verstehen, die an den Befestigungspunkten des lafettierten MAG58 wirken. Zusätzlich äußerte der Auftraggeber den Wunsch, auch dynamische Kenngrößen wie die Translation entlang der Rohrachse oder den Hochschlag messtechnisch erfassen zu können. Zur Gewährleistung einer möglichst breiten Anwendbarkeit und um den Entwicklungsaufwand für zukünftige Prüfstände zu reduzieren, soll das System durch einfache Parameteranpassungen im CAD-Modell für unterschiedliche Waffensysteme nutzbar sein. Als Mindestanforderung gilt die Verwendbarkeit für das MG5 (Heckler & Koch) sowie das Browning M2. Aus sicherheitstechnischen Gründen dürfen an den eingesetzten Waffen keinerlei Veränderungen vorgenommen werden.

Das für dieses Projekt festgelegte Budget ist in zwei Teilbereiche untergliedert: 15.000 € für Material- und Fertigungskosten sowie 15.000 € für die Sensortechnik. Diese Aufteilung begründet sich dadurch, dass die für den Prüfstand beschafften Sensoren demontierbar und für weitere Versuchsaufbauten wiederverwendbar sein sollen. Komponenten der Sensortechnik, die sich bereits im Lagerbestand des Standorts Unterlüß befinden, werden nicht auf das Budget angerechnet.

Als vorgesehene Einsatzorte nannte der Auftraggeber die Temperierversuchsanlage (TVA) sowie den MG-Prüfstand des Erprobungszentrums Unterlüß (EZU). Für die externe Energieversorgung ist ausschließlich ein Netzanschluss mit 230 V bei 50 Hz zulässig. Das Ziel der vorliegenden Arbeit wurde durch den Auftraggeber wie folgt formuliert:

„Das Ziel der Arbeit ist ein vollständiges mechanisches Modell der Prüfvorrichtung.“

Das Konzept muss unter Einhaltung der Budgetgrenzen realisierbar und montagegerecht umsetzbar sein. Die Optimierung des Entwurfs sowie dessen vollständige Auslegung sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Ebenfalls nicht vorgesehen ist eine Untersuchung des Einflusses der Lafette auf den Kraft-Zeit-Verlauf sowie der Einbau von Bedienelementen.

3.2 Anforderungen der Stakeholder

Neben dem Auftraggeber sind bei der Entwicklung des Prüfstandes weitere Stakeholder zu berücksichtigen. Als primäre Nutzer der Messergebnisse wurden Berechnungs- und Konstruktionsingenieure identifiziert, welche die ermittelten Daten im Rahmen ihrer Entwicklungsarbeit verwenden. Die Datenbereitstellung erfolgt durch den Bediener des Prüfstandes, dessen Tätigkeit mit der getrennten Anlieferung von Prüfstand, Waffe, Munition und Laptop am Versuchsort beginnt. Nach Abschluss der Versuche ist der Bediener zudem für die Sicherung der Waffe sowie die Demontage verantwortlich. Das Servicepersonal übernimmt bei Bedarf die Kalibrierung und Wartung der Prüfvorrichtung.

Berechnungs- und Konstruktionsingenieure

Um bei der Auslegung des Prüfstandes hohe Sicherheitsfaktoren infolge unsicherer Randbedingungen zu vermeiden, ist eine möglichst geringe Messunsicherheit anzustreben. Die Genauigkeit des zu entwickelnden Systems wird dabei über die Abweichungen von Amplitude, Phase und Frequenz des gemessenen gegenüber dem tatsächlichen Signal definiert. In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde zur quantitativen Bewertung eine Toleranzhülle von $\pm 13\,\%$ um das reale Signal eingeführt (siehe Abb. 3.1). Dieser Wert ergibt sich aus einer anzustrebenden Linearität von $10\,\%$ – in Anlehnung an typische Kennwerte von Beschleunigungssensoren [17, Kapitel 5.2] – sowie einem Zuschlag von $3\,\%$ zur Berücksichtigung konstruktionsbedingter Einflüsse wie Zusatzmassen und Systemsteifigkeiten.

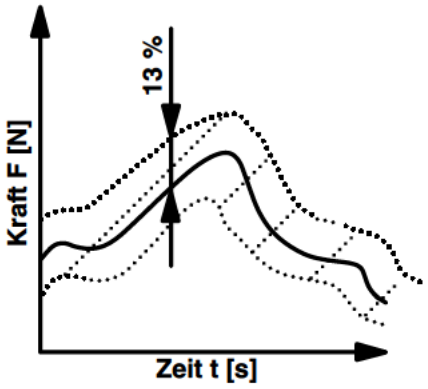


Abbildung 3.1: Definition der Messgenauigkeit

Bediener

Der Bediener befindet sich während des Betriebs des Prüfstandes in dessen unmittelbarer Nähe. Um die Verletzungsgefahr bei potenziellen Defekten des Prüfstandes oder der eingesetzten Waffe zu minimieren, ist eine Fernbetätigung des Abzugs vorzusehen. Darüber hinaus muss die Auslöseeinrichtung jederzeit durch den Bediener energielos geschaltet werden können. Die

Bedienfunktionen – Laden und Entladen der Waffe, Sichern und Entsichern sowie Auslösen des Abzugs – sollen ausgeführt werden können, ohne den Kraftfluss innerhalb der Waffenaufnahme zu unterbrechen.

Gemäß DIN EN 1005-2 („Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung“) dürfen Frauen unter günstigen Bedingungen maximal 15 kg tragen [18]. Wird dieser Wert überschritten, sind geeignete Handhabungshilfen – mindestens jedoch Ösen mit einem Mindestdurchmesser von 10 cm – vorzusehen.

Um Ausfälle aufgrund fehlender Werkzeuge zu vermeiden, darf der Betrieb der Prüfvorrichtung ausschließlich mit einem definierten Werkzeugsatz erfolgen. Dieser umfasst Innensechskantschlüssel (Größen 2,5 mm bis 12 mm), Schraubenschlüssel (Größen 6 mm bis 22 mm) sowie einen Drehmomentschlüssel mit passenden Steckschlüssel- und Bit-Einsätzen. Angesichts der hohen Mietkosten für den Schießplatz ist es darüber hinaus wünschenswert, die Wechselzeit zwischen verschiedenen Waffentypen auf maximal 15 Minuten zu begrenzen. Idealerweise sollte hierfür nur ein einzelnes Werkzeug erforderlich sein.

Servicepersonal

Die Anforderungen an die Genauigkeit erfordern eine präzise Montage, sowie eine Kalibrierung des Prüfstandes. Damit die Kalibrierung kostengünstig durchgeführt werden kann, müssen die verwendeten Sensoren zerstörungsfrei demontierbar sein. Des weiteren muss ein Verfahren entwickelt werden, um die Messgenauigkeit des Prüfstandes zu bestimmen. Ein Austausch der Verschleißteile darf frühstens nach 10.000 Schuss erforderlich sein. Um eine kurze Lieferzeit sicherzustellen, müssen alle Verschleißteile in Katalogen von mindestens drei europäischen Lieferanten verfügbar sein.

3.3 Rahmenbedingungen

Aus dem Interview mit dem Auftraggeber geht hervor, dass der Prüfstand für eine Vielzahl von Waffensystemen eingesetzt werden soll. Für das MAG58 und das MG5 liegen jedoch keine Kraft-Zeit-Verläufe der Rückstoßlasten vor. Die Quelle „The Weapon’s Jump and Recoil Laboratory Test Stand“ liefert einen graphischen Datensatz für eine Waffe des Kalibers 5.56×45 mm, und interne Berichte enthalten grafische Informationen zum Lastfall des M2 Browning. Auf dieser Grundlage werden im Folgenden Anforderungen an die Festigkeit sowie an die minimale Abtastfrequenz abgeleitet.

Weiterhin ergeben sich Anforderungen aus den Einsatzbedingungen des Prüfstandes. Die Ergebnisse der Begehungen des MG-Schießstandes und der Temperierversuchsanlage werden im Folgenden zusammengefasst.

Abtastfrequenz

Um die größte von Interesse bestehende Frequenz f_a eines Systems erfassen zu können, muss gemäß dem Nyquist-Kriterium mit einer mindestens doppelt so hohen Abtastfrequenz f_s gemessen werden (Gleichung (3.1)).

$$f_s > 2 \cdot f_a = 2 \cdot \frac{1}{T_a} \tag{3.1}$$

In der messtechnischen Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass zur präzisen Erfassung stoßartiger Vorgänge typischerweise 50 bis 200 Messpunkte N pro Periodendauer T_a empfohlen werden.

Daraus ergibt sich eine deutlich höhere praxisgerechte Abtastrate gemäß Gleichung (3.2) und Gleichung (3.3):

$$T_s > \frac{T_a}{N} \tag{3.2}$$

$$f_s > \frac{1}{T_s} \tag{3.3}$$

Zur Bestimmung der niedrigsten zu erwartenden Periodendauer im Betrieb des Prüfstandes wurden der Kraft-Zeit-Verlauf des Browning M2 und der Datensatz aus Abb. 2.8 analysiert. Für beide Signale ergab sich eine minimale Periodendauer von 2 ms. Daraus ergibt sich gemäß dem Nyquist-Kriterium eine theoretische Mindestabtastfrequenz von:

$$f_s > 2 \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{s}} = 1000\,\mathrm{Hz} \tag{3.4}$$

Bei der Annahme von 100 Messpunkten pro Periode ergibt sich eine praxisgerechte Mindestabtastrate von:

$$T_s > \frac{2 \cdot 10^{-3}}{100} = 2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{s} \tag{3.5}$$

$$f_s > \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{s}} = 50000\,\mathrm{Hz} \tag{3.6}$$

Die resultierende Mindestanforderung an die Abtastfrequenz beträgt somit 50000 Hz.

Festigkeit

Da das Browning M2 als Rückstoßlader des Kalibers 12,7 × 99 mm NATO den maximal zu erwartenden Lastfall für den Prüfstand darstellt, wird es als Referenz für die Ableitung der erforderlichen Mindestfestigkeit herangezogen. Einem internen Bericht zufolge ergibt sich ein halbsinusförmiger Kraftverlauf mit einer Amplitude von 6,5 kN und einer Dauer von 5 ms. Aufgrund der wiederholten stoßartigen Beanspruchung besteht die Gefahr eines Versagens durch Dauerbruch. Da die vorliegende Datenlage eine belastbare Dauerfestigkeitsanalyse nicht zulässt, ist vorgesehen, diese Untersuchung anhand der Messdaten aus den ersten Versuchsreihen durchzuführen.

Einsatzort

Der vom Auftraggeber spezifizierte Einsatzort „MG-Prüfstand“ ermöglicht die Durchführung von Versuchen sowohl im Freien als auch in überdachten Bereichen. Um den Einsatzort nicht auf Innenräume zu beschränken und den Prüfstand gegenüber Witterungseinflüssen abzusichern, müssen sämtliche Komponenten mindestens die Schutzart IP65 erfüllen.

Die Begehung der TVA ergab, dass diese – wie in Abb. 3.2 dargestellt – über eine großzügige, ebene Versuchsfläche aus einem massiven Schienenprofil (B) verfügt. Ein baugleiches, mobiles Schienenprofil kann auf dem MG-Schießstand (Abb. 3.3) auf einer gepflasterten Fläche von 1,5 m × 10 m installiert werden. Aufgrund der hohen Eigenmasse von über 1,000 kg kann eine Verschiebung des Schienenprofil durch Rückstoßlasten ausgeschlossen werden. Im

Versuchsraum der TVA ist das Waffenrohr in einer Mindesthöhe von 25 cm über dem Boden zu montieren, um über den in Abb. 3.2 dargestellten Absatz (C) hinweg feuern zu können. Die Steuerung des Prüfstandes erfolgt von außerhalb der Prüfkammer, wofür der Kabelkanal (A) mit 10 cm Durchmesser verwendet werden kann. Zudem ist beim Betrieb in der TVA ein System zum Auffangen von Hülsen und Kettengliedern vorzusehen.

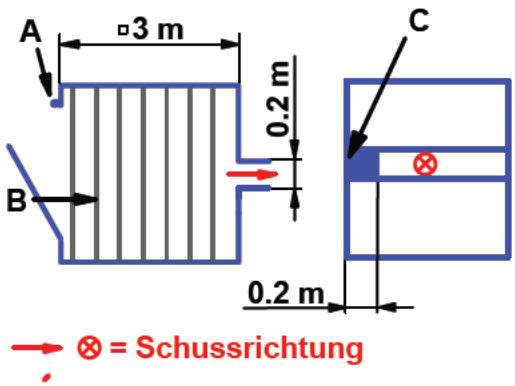


Abbildung 3.2: Aufbau der TVA ; A – Kabeldurchführung, B – Schienen, C – Schießschlitz

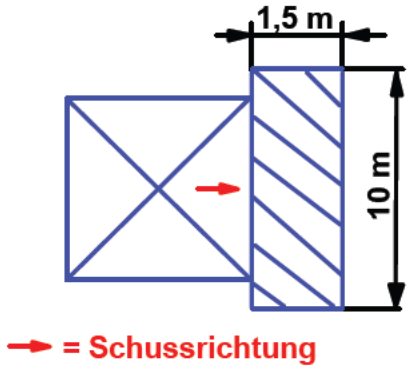


Abbildung 3.3: Aufbau des MG-Schießstands

3.4 Anforderungsliste

Zur systematischen Erfassung und Überprüfung der identifizierten Anforderungen werden diese mit eindeutigen Identifikationsnummern in der Anforderungsliste (Tabelle 3.1) zusammengeführt. In Anlehnung an Pahl/Beitz erfolgt eine Einteilung nach Verbindlichkeit in Forderungen (F) und Wünsche (W). Zusätzlich wurden Nichtforderungen (NF) definiert, um den inhaltlichen Rahmen dieser Bachelorarbeit klar abzugrenzen.

Eine Einteilung in funktionale und nicht-funktionale Anforderungen – wie sie in der Literatur empfohlen wird [16, S. 186] – wurde aufgrund der in diesem Fall zu breiten Gruppierungen bewusst nicht übernommen. Stattdessen erfolgt die Gliederung nach anwendungsnahen Kategorien wie allgemeinen und spezifischen Prüfstandsanforderungen, Anforderungen an die Sensorik sowie betriebs- und montagebezogenen Aspekten.

Die Anforderungsliste stellt im Entwicklungsprozess eine verbindliche Grundlage dar und dient der systematischen Validierung der entwickelten Konzepte. So wurde beispielsweise die Genauigkeit des Prüfstandes zwar nicht explizit vom Auftraggeber spezifiziert, jedoch im Rahmen des perspektivenbasierten Denkens und in Rücksprache mit diesem als zentrales Bewertungskriterium identifiziert. Als Zielwert wurde eine Toleranzhülle von $\pm$ 13 % definiert, um eine ausreichende Aussagekraft der Messergebnisse sicherzustellen. Um die Erfüllung dieser Anforderung zu überprüfen wird im Rahmen der Validierung ein Verfahren zur experimentellen Ermittlung der Messgenauigkeit entwickelt.

Bereits im folgenden Kapitel werden die Anforderungen an die Messergebnisse genutzt, um verschiedene Messkonzepte zu entwickeln. Diese fließen anschließend in den morphologischen Kasten der Konzeptphase ein.

Tabelle 3.1: Anforderungsliste

F/ W/ NF	Anforderungen an den Prüfstand	
	Nr.	Bezeichnung / Beschreibung
1. Ziel der Arbeit und Messergebnisse		
F	1.1	Das Ziel der Arbeit ist ein vollständiges mechanisches Modell der Prüfvorrichtung.
F	1.2	Es müssen Zeitverlaufsdaten der Interface-Kräfte ermittelt werden.
W	1.3	Zeitverlaufsdaten der Translation der Waffe entlang deren Längsachse werden gewünscht.
W	1.4	Zeitverlaufsdaten des Hochschlags werden gewünscht.
2. Spezifische Prüfstandsanforderungen		
F	2.1	Das MAG58 muss untersucht werden können.
F	2.2	Die Konstruktion muss durch Parameteranpassungen in der Konstruktion ebenfalls für die Waffensysteme M2 Browning und MG5 verwendbar sein.
F	2.3	Es müssen Waffen untersucht werden können, die nicht modifiziert wurden.
F	2.4	Das Laden und Entladen, sowie das Sichern und Entsichern, müssen ohne Veränderungen am Prüfstand durchführbar sein.
F	2.5	Der Abzug der Waffen muss aus mindestens 5 m Abstand und ohne Sichtkontakt ausgelöst werden können.
F	2.6	Der Prüfstand muss im MG-Prüfstand und der Temperierversuchsanlage des EZU der Rheinmetall Waffe Munition GmbH in Unterlüß eingesetzt werden können.
F	2.7	Die Vorrichtung muss einer 0,005 s andauernden halbsinusförmigen Belastung der Waffe mit einer Amplitude von 6,5 kN ohne plastische Verformung standhalten.
F	2.8	Das Rohr des MAG58 muss mindestens 0.25 m über dem Boden montiert sein.
3. Anforderungen an den Betrieb und die Montage		
F	3.1	Alle Zeitverlaufsdaten müssen an einen Laptop übertragen werden können.
F	3.2	Es muss ein Verfahren zur Bestimmung der Messgenauigkeit entwickelt werden.
F	3.3	Hülsen und Kettenglieder müssen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % aufgefangen und gesammelt werden.
F	3.4	Die Auslösevorrichtung muss zu jedem Zeitpunkt energielos gestellt werden können.
F	3.5	Der erforderliche Werkzeugsatz zum Betrieb und Montage muss auf Innensechskantschlüssel der Größen 2,5 mm bis 12 mm, Schraubenschlüssel der Größen 6 mm bis 22 mm, sowie einen Drehmomentschlüssel mit entsprechenden Steckschlüssel- und Bit-Einsätzen begrenzt werden.

Fortsetzung Tabelle 3.1: Anforderungsliste

F/ W/ NF	Anforderungen an den Prüfstand Nr.	Bezeichnung / Beschreibung
	3. Anforderungen an den Betrieb und die Montage	
W	3.6	Für den Wechsel der Waffe und des Waffentypens soll maximal ein Werkzeug erforderlich sein.
W	3.7	Der Wechsel der Waffe und des Waffentypens soll maximal 15 Minuten beanspruchen.
	4. Anforderungen an die Sensorik	
F	4.1	Das gemessene Signal darf betragsmäßig maximal um 13 % in Amplitude und Phase vom realen Wert abweichen.
F	4.2	Das Budget für die Sensortechnik beträgt 15.000 €. Sensortechnik, welche sich bereits im Firmenbestand befindet und für Versuche verfügbar ist fällt nicht darunter.
F	4.3	Die Sensorik muss zerstörungsfrei demontiert werden können.
F	4.4	Die Abtastrate der Kraftsensorik muss mindestens 50 kHz betragen.
	5. Allgemeine Prüfstandsanforderungen	
F	5.1	Das Budget für den Prüfstand, ausschließlich Sensortechnik, beträgt 15.000 €.
F	5.2	Alle Verschleißteile müssen in Katalogen von mindestens drei europäischen Lieferanten verfügbar sein.
F	5.3	Das Wartungsintervall muss mindestens 10.000 Schuss betragen.
F	5.4	Alle Komponenten müssen mindestens der Schutzart IP65 entsprechen.
F	5.5	Jede zu tragende Teilkomponente darf maximal 15 kg wiegen oder muss mit Ösen mit einem Mindestdurchmesser von 10 cm ausgestattet sein.
F	5.6	Als externe Energieversorgung darf ausschließlich eine Stromversorgung von 230 V bei 50 Hz verwendet werden.
	6. Nichtforderungen	
NF	6.1	Es soll keine Optimierung oder vollständige Auslegung des Konzepts erfolgen.
NF	6.2	Die Prüfvorrichtung soll über keine eigenen Eingabegeräte verfügen.
NF	6.3	Der Prüfstand soll nicht den Einfluss der Waffenlafette untersuchen können.

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

4 Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten

Wie in den Grundlagen dargelegt, sind piezoelektrische Kraftsensoren besonders gut zur Messung hochdynamischer Lastfälle geeignet. Sie stehen als einachsige, dreiachsige sowie sechskomponenten Kraft-/Momentensensoren zur Verfügung [5]. In diesem Kapitel werden daher verschiedene Messkonzepte betrachtet, die sich insbesondere in der Anzahl und Anordnung der verwendeten Sensoren unterscheiden.

Die Literaturrecherche zeigt, dass bisher vor allem die koaxial zum Rohr wirkende Rückstoßkraft verschiedener Waffensysteme gemessen wurde. Der tatsächliche Lastfall eines Schusses umfasst jedoch weitere Komponenten. Um den Einfluss unterschiedlicher Messkonzepte auf die Erfassung des vollständigen Lastfalls nachvollziehen zu können, wird im folgenden Abschnitt der Rückstoßlastfall detailliert beschrieben.

4.1 Lastfall des MG-Schusses

Unabhängig vom Wirkprinzip des Maschinengewehres wird mit der Zündung der Patrone im Lauf schlagartig chemische Energie freigesetzt, die überwiegend in kinetische Energie des Geschosses übergeht. Aufgrund des Prinzips der Impulserhaltung wirkt in entgegengesetzter Richtung eine Rückstoßkraft auf die Waffe.

Zur Stabilisierung des Geschosses wird dieses durch das gezogene Rohr in Rotation versetzt. Da der Außendurchmesser des Geschosses größer ist als der Durchmesser der Felder (Abb. 4.1)

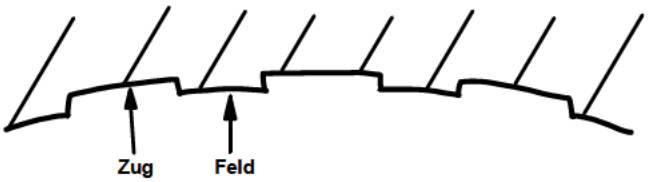


Abbildung 4.1: Querschnitt durch ein gezogenes Rohr (Ausschnitt, in Anlehnung an [19, S. 524])

Durch den beim Abfeuern der Patrone entstehenden Gasdruck wirkt eine resultierende Kraft $F_x(x)$ auf das Geschoss. Die Leistenkraft $R(x)$ lässt sich - wie in Abb. 4.2 dargestellt – in Abhängigkeit des Drallwinkels α in eine axiale und eine tangentiale Komponente zerlegen. Die axial wirkende Komponente verringert die lineare Beschleunigung des Geschosses, während die tangentiale Komponente dessen Rotation induziert.

Wird die Reibung vernachlässigt, so lässt sich die Bewegung des Geschosses unter Berücksichtigung seiner Masse m_{GS} und seines Massenträgheitsmoments J_{GS} durch das Kräftegleichgewicht in x-Richtung sowie das Momentengleichgewicht um die x-Achse wie folgt beschreiben:

$$\sum F = 0 = F_X(x) - sin(\alpha)R(x) - m_{GS} \cdot \frac{dv}{dt} \tag{4.1}$$

$$\sum M = 0 = \frac{d}{2}cos(\alpha)R(x) - J_{GS}\frac{d\omega}{dt} \tag{4.2}$$

Gemäß dem Impulserhaltungssatz erfährt die Waffe als Reaktion auf die Beschleunigung des Geschosses eine entgegengesetzt gerichtete Rückstoßbewegung. Die dabei auftretende translatorische Bewegung ist proportional zur wirkenden Rückstoßkraft und hängt invers von der

Masse der Waffe ab. Darüber hinaus führt der exzentrische Angriff der Kraft F_x - also der Angriff außerhalb des Massenschwerpunkts - zu einer zusätzlichen Rotation der Waffe um die Querachse, dem sogenannten Hochschlag. Die resultierende translatorisch-rotatorische Bewegung einer frei beweglich gelagerten Waffe ist in Abb. 4.2 vereinfacht

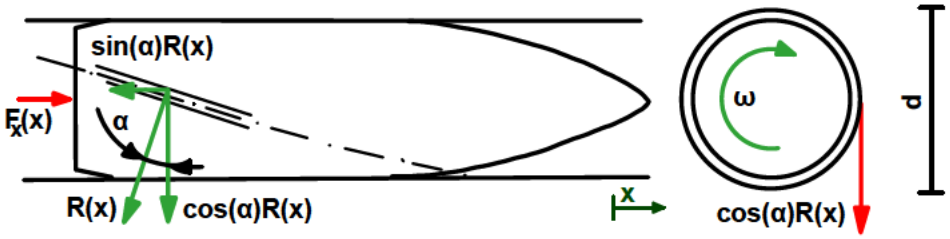


Abbildung 4.2: Darstellung der Kräfte am Geschoss (in Anlehnung an [19, S. 528])

Laut dem Waffentechnischen Handbuch wird der überwiegende Teil der Energie wird zur Translation des Geschosses sowie zur Erwärmung des Systems verwendet [19, S. 75]. Weniger als 1 % der Gesamtenergie wird auf die Rotation des Geschosses übertragen. Daraus ergibt sich, dass die axiale Rückstoßkraft F_x die Hauptbelastung für Kraftsensoren darstellt. Geringere Belastungen ergeben sich aus dem um die Rohrachse wirkenden Moment, das durch die tangentiale Komponente der Leistenkraft entsteht, sowie aus dynamischen Vorgängen im Verschluss, deren genaue Krafteinflüsse nicht bekannt sind.

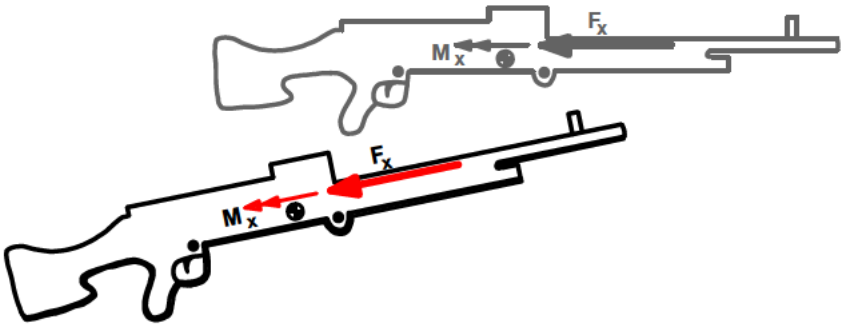


Abbildung 4.3: Lastfall des MG-Schusses und potenzielle Bewegung bei freier Lagerung

Die gewonnenen Erkenntnisse zu Art und Richtung der auftretenden Belastungen bilden die Grundlage für die Entwicklung der im weiteren Verlauf beschriebenen Messkonzepte.

4.2 Messkonzept „6-Komponenten Kraft-/Momentensensor“

Als erstes Messkonzept wird die starre Verbindung des Maschinengewehrs MAG58 mit einem 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor untersucht. Dieses Prinzip ermöglicht es, sämtliche auftretenden Kräfte und Momente direkt in den Sensor einzuleiten – ohne die Einflussnahme von Gelenk- oder Loslagern. Im Gegensatz dazu würden bei einer Kombination aus dreiachsigen Kraftsensoren und Gelenklagern Reibmomente im Lager auftreten, die messtechnisch nicht erfassbar wären. Der Sensor wird einseitig fest eingespannt und über die Bohrungen der Waffe – wie in Abb. 4.4 dargestellt – befestigt.

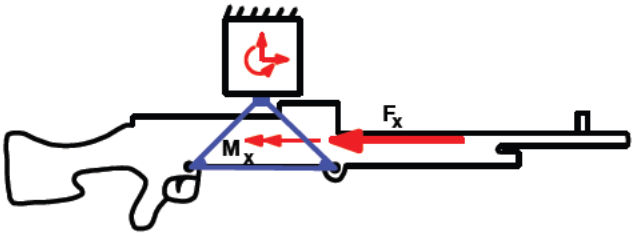


Abbildung 4.4: Messkonzept - 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor

Die Realisierbarkeit dieses Konzepts hängt maßgeblich davon ab, ob die im Betrieb auftretenden Belastungen innerhalb des zulässigen Messbereichs des Sensors liegen. Zur ersten Abschätzung wird ein Freikörperbild erstellt (Abb. 4.5). Es wird angenommen, dass ausschließlich die Rückstoßkraft F_x infolge der Schussabgabe sowie die Gewichtskraft F_G der Waffe wirken. Beide Kräfte liegen in der XY-Ebene, wodurch eine zweidimensionale Betrachtung möglich ist. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich an der hinteren Bohrung der Waffe. Die Reaktionskräfte A_x und A_y sowie das Reaktionsmoment M_A ergeben sich an der Position des Sensors A.

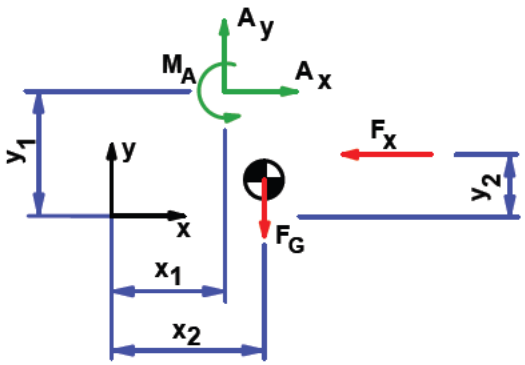


Abbildung 4.5: Freikörperbild des Messkonzepts „6-Komponenten Kraft-/Momentensensor“

Unter Vernachlässigung weiterer Einflussgrößen - wie z. B. Reibung, Querkräfte, Stoßbelastungen - ergeben sich die statischen Gleichgewichtsbedingungen gemäß der Rechnung in Anhang B wie folgt:

$$\sum F = 0 = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -F_x \\ -F_G \end{pmatrix} \tag{4.3}$$

$$\sum M = 0 = M_A + x_1 A_y - y_1 A_x - x_2 F_G + y_2 F_x \tag{4.4}$$

Mit den anhand von Gleichung (4.3) identifizierten Beziehungen $A_x = F_x$ und $A_y = F_G$ ergibt sich das auf den Sensor wirkende Moment zu:

$$M_A = (x_2 - x_1)F_G + (y_1 - y_2)F_x \tag{4.5}$$

Die resultierenden Kräfte sind unabhängig von der Sensorposition, das Biegemoment hingegen variiert mit den Koordinaten x_1 und y_1. Um die Belastung des Sensors zu minimieren, wird dessen Position so gewählt, dass das resultierende Moment M_A verschwindet. Neben der

Triviallösung ($x_1 = x_2$, $y_1 = y_2$) – dem Schnittpunkt der Gewichtskraft F_G und der Rückstoßkraft F_x – sind die berechneten Koordinaten in Abb. 4.6 dargestellt. Für die Rückstoßkraft wird der Maximalwert von 6,500 N gemäß Anforderungsliste angesetzt. Die Gewichtskraft ($F_G = 102{,}62\,\text{N}$) sowie ihr Angriffspunkt ($x_1 = 0.282\,\text{m}$) und der Abstand ($y_2 = 0{,}063\,\text{m}$) werden dem CAD-Modell entnommen.

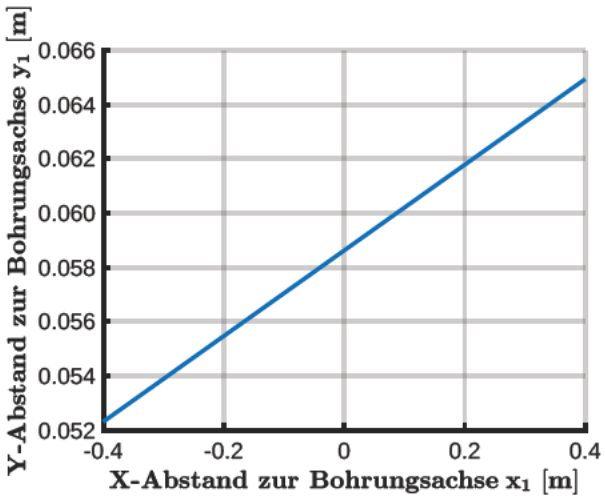


Abbildung 4.6: Punkte $A(x_1|y_1)$ für $M_A = 0$

Da F_x in der Realität nicht konstant ist, wird die Sensorbelastung im nächsten Schritt in Abhängigkeit vom Punkt $A(x_1|y_1)$ und der Rückstoßkraft F_x (0–6.500 N) analysiert. Abb. 4.7 ist zu entnehmen, dass die Momentenbelastung linear mit dem Abstand x_1 variiert und mit sinkender Rückstoßkraft steigt. Da sich der Sensor nicht innerhalb des Waffenbauraums platzieren lässt, kommen nur Positionen mit $x_1 \leq -0{,}2\,\text{m}$ oder $x_1 \geq 0{,}4\,\text{m}$ infrage. In beiden Fällen bleibt bei Teillast stets ein Moment erhalten.

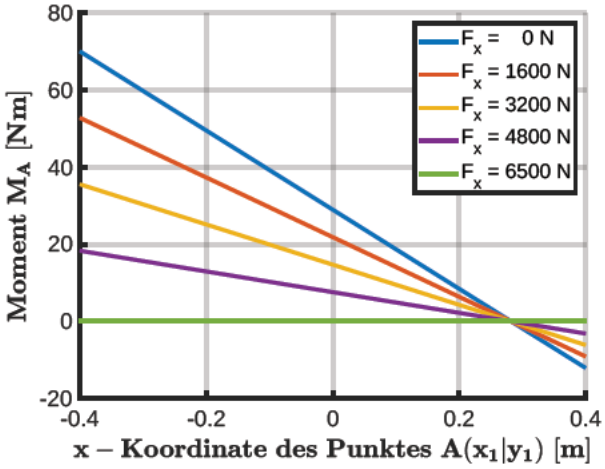


Abbildung 4.7: Belastung des Sensors in Abhängigkeit der Rückstoßkraft F_x und der Position A$(x_1|y_1)$

Die geringste Momentenbelastung tritt am Punkt A(0,4 m|0,065 m) auf und beträgt maximal - 12,2 Nm. An diesem Punkt wirken zusätzlich die Kräfte $A_x = 6.500\,\text{N}$ und $A_y = 102{,}62\,\text{N}$. Anhand der Spezifikationen des exemplarisch gewählten Sensors 9306A (siehe Tabelle 4.1) wird geprüft, ob diese Belastungen innerhalb der zulässigen Grenzwerte liegen. Erfolgt die Kraft-/Momenteneinleitung in Höhe von etwa 6,5 kN, bzw. - 12,2 Nm auf der Unterseite des

Sensors (a_z = 45 mm), so ist dies bei den drei markierten Belastungsprofilen für den Punkt A(0,4 m | 0,065 m) gegeben.

Tabelle 4.1: Zulässige Belastung des Kraft-/Momentensensors 9306A (in Anlehnung an [20])

$F_s = F_x, F_y$ [kN]	Kraftangriffspunkt (bezogen auf Deck-plattenober-fläche)	Hohe Schubkräfte (F_x, F_y)	Hohe Axialkräfte (F_z)	Hohe Biegemo-mente (M_x, M_y)	Hohes Moment (M_z)
	(az = 45 mm)	**±20**	±14	±12	±3
	(az = 0 mm)	**±9**	±2,5	±1	±1,5
	(az = –40 mm)	**±4,5**	±1	±0,5	±1
F_z [kN]		±5	**±40**	±5	±5
Mb [N·m]		±50	±50	**±400**	±50
M_z [N·m]		±50	±100	±100	**±400**

In den folgenden Abschnitten werden die Erkenntnisse zum Lastfall in vier verschiedenen Messkonzepten umgesetzt.

4.3 Messkonzept „Greybox“

Als Alternative zum Einsatz eines Kraft-/Momentensensors wurde das Konzept „Greybox“ entwickelt. Es basiert auf einer Kombination aus einachsigen und dreiachsigen Kraftsensoren, wodurch der Prüfrahmen statisch bestimmt gelagert ist. Die Waffe wird dabei starr mit dem Rahmen verbunden. Ein dreiachsiger Sensor übernimmt die Funktion des Festlagers und ist fest im Raum fixiert, während drei einachsige Sensoren gelenkig angebunden werden und ausschließlich Kräfte entlang ihrer jeweiligen Messachse aufnehmen können. Die Lagerung ist so ausgelegt, dass die statische Bestimmtheit des Systems gewährleistet ist – gemäß der notwendigen Bedingung, dass sechs unabhängige Lagerreaktionen zur vollständigen Fixierung eines starren Körpers erforderlich sind. Die resultierende Konstruktion ist schematisch in Abb. 4.8 dargestellt.

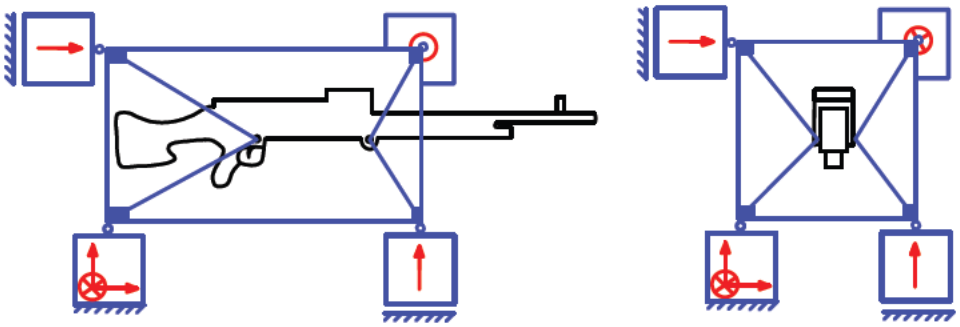


Abbildung 4.8: 2D Darstellung des Konzepts „Greybox“

Ein wesentlicher Vorteil dieses Ansatzes liegt in seiner analytischen Flexibilität: Solange der Krafteinleitungspunkt bekannt ist, können mithilfe der Gleichgewichtsbedingungen die einwir-

kenden Schnittkräfte bestimmt werden. Dadurch ist es möglich, eine Vielzahl unterschiedlicher Belastungszustände rechnerisch auszuwerten. Die Rahmenstruktur lässt sich bei geringem Eigengewicht durch eine geeignete Profilwahl und Geometrie ausreichend biegesteif und schwingungsarm gestalten. Die Verwendung modularer Aluminiumprofile ermöglicht dabei nicht nur eine einfache Anpassung an verschiedene Versuchsszenarien, sondern trägt auch zu einer wirtschaftlichen Umsetzung bei.

4.4 Messkonzept „Isolierte Belastungsermittlung“

In den bisherigen Konzepten lag der Fokus auf der vollständigen Erfassung aller Schnittlasten durch den Einsatz mehrachsiger Kraftsensoren oder eines 6-Komponenten Kraft-/Momentensensors. Diese Lösungen sind jedoch mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden. Das Konzept „Isolierte Belastungsermittlung“ bietet eine einfachere und kostengünstigere Alternative, bei der lediglich die Hauptbelastungen F_x und M_x (siehe Abb. 4.3) erfasst werden. Dies ermöglicht den Einsatz weniger kostengünstiger, einachsiger Kraftsensoren.

In Anlehnung an die Quelle „The Weapon’s Jump and Recoil Laboratory Test Stand“ wird die Waffe in einer Schlittenkonstruktion geführt, die eine lineare Bewegung entlang der Rohrachse erlaubt. Wie in Abb. 4.9 dargestellt, trifft der Schlitten auf einen einachsigen Kraftsensor, der ausschließlich Kräfte in Schussrichtung (F_x) erfasst. Auf diese Weise wird eine gezielte Messung der Rückstoßkraft ermöglicht, während andere Belastungskomponenten gezielt ausgeblendet

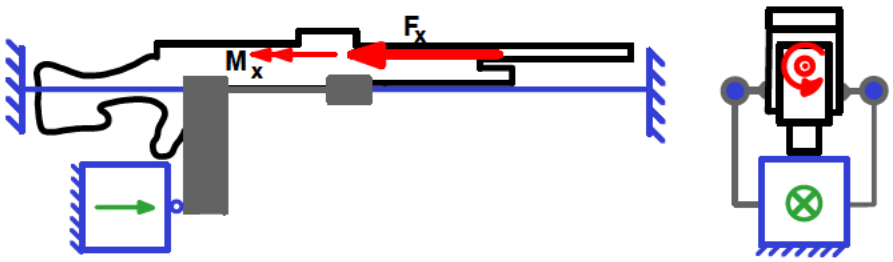


Abbildung 4.9: 2D Darstellung des Konzepts „Isolierte Belastungsermittlung“

Für die Bestimmung des Moments M_x werden zwei mechanische Varianten betrachtet. In der ersten Variante wird die Waffe drehbar um eine Schiene gelagert und ein zusätzlicher Kraftsensor im horizontalen Abstand z auf der gegenüberliegenden Schiene montiert (siehe Abb. 4.10). Mit dem gemessenen Kraftwert A_y lässt sich das Moment über die einfache Beziehung $M_x = z \cdot A_y$ berechnen, wenn vor der Versuchsdurchführung ein Nullpunktabgleich zur Kompensation der Gewichtskraft durchgeführt wurde.

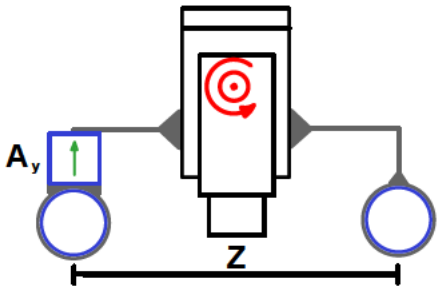


Abbildung 4.10: Momentenmessung im Konzept „Isolierte Belastungsermittlung“

Ein Nachteil dieser Variante besteht darin, dass bereits geringe Abweichungen vom idealisierten Lastfall (Abb. 4.11) zu fehlerhaften Momentenwerten führen können. Zusätzlich wirkende, unbekannte Kräfte fließen in die Momentenberechnung ein und verfälschen diese (vgl. Abb. 4.12). Zur Reduzierung solcher Messfehler wird in einer zweiten Variante die Momentenbestimmung über zwei horizontal versetzte Kraftsensoren realisiert. Durch das Freikörperbild aus Abb. 4.12 ergibt sich das Moment M_x über die Gleichgewichtsbedingung:

$$M_x = z_1 B_y - z_2 A_y \tag{4.6}$$

Dabei ist zu beachten, dass der Berechnung die Annahme zugrunde liegt, dass die Kraft F_y exakt im Punkt z_1 angreift. Diese Annahme kann jedoch aufgrund unzureichender Systemkenntnis weder verifiziert noch falsifiziert werden. Darüber hinaus würden auch horizontal angreifende Kräfte weiterhin einen Einfluss auf das Momentengleichgewicht haben. Somit würde das Hinzufügen eines weiteren Sensors lediglich zu höheren Kosten führen, ohne die Messgenauigkeit signifikant zu verbessern.

Zusammengefasst bleibt die Aussagekraft des Messkonzepts daher auf die beiden Hauptbelastungen F_x und M_x beschränkt, welche zudem maßgeblich dominieren müssen. Eine vollständige Erfassung aller Kraft- und Momentenkomponenten ist mit diesem Ansatz nicht realisierbar. Die wesentlichen Vorteile des Konzepts liegen in seiner konstruktiven Einfachheit, der einfachen Bauweise sowie den vergleichsweise geringen Kosten.

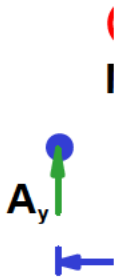


Abbildung 4.11: Ideal
tung

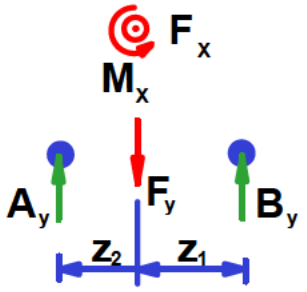


Abbildung 4.12: Mögliche, zu betrachtende Situation „Isolierte Belastungsermittlung“

4.5 Messkonzept Beschleunigungsmessung

Als Alternative zur direkten Kraftmessung kann die Beschleunigung der Waffe erfasst werden, um daraus über das zweite Newtonsche Axiom $\underline{F} = m \cdot \underline{a}$, bzw. $\underline{M} = \underline{\underline{I}} \cdot \underline{\dot{\omega}}$ auf die wirkenden Kräfte und Momente zu schließen.

Im Idealfall wird die Waffe so gelagert, dass sie sich frei in alle Raumrichtungen bewegen kann. Dadurch können sämtliche Trägheitskräfte über Beschleunigungssensoren erfasst und zur Bestimmung der resultierenden Belastungen genutzt werden. Während $\underline{F} = m \cdot \underline{a}$ nur exakt im Schwerpunkt der Waffe gültig ist, lässt sich $\underline{M} = \underline{\underline{I}} \cdot \underline{\dot{\omega}}$ durch entsprechende Transformationen des Trägheitstensors $\underline{\underline{I}}$ auch an beliebigen Punkten auswerten [21].

Da eine Platzierung der Sensorik exakt im Schwerpunkt häufig nicht möglich ist, wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um von außerhalb des Schwerpunkts auf dessen Beschleunigungen zu schließen. Bei Crashtests hat sich das sogenannte „Nine-Accelerometer Package“

(NAP) als besonders zuverlässig erwiesen [22]. Während dieses Verfahren neun Sensoren erfordert, bietet das sogenannte „Compact Cube Scheme“ (CCS) eine vereinfachte und ökonomische Alternative mit nur sechs Sensoren.

Beim NAP werden ein dreiachsiger Beschleunigungssensor und drei zweiachsige Sensoren zu einer räumlichen Struktur kombiniert (Abb. 4.13). Durch diese Anordnung können sowohl translatorische als auch rotatorische Beschleunigungen mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einem Sensorabstand unter 5 cm signifikante Messfehler auftreten können. Das CCS hingegen erfasst an einem einzigen Punkt sowohl die drei translatorischen Beschleunigungen als auch die drei Winkelgeschwindigkeiten (Abb. 4.14). Da letztere zur Bestimmung der Winkelbeschleunigungen numerisch differenziert werden müssen, ist die Messgenauigkeit des CCS gegenüber dem NAP jedoch reduziert – insbesondere bei hohem Messrauschen.

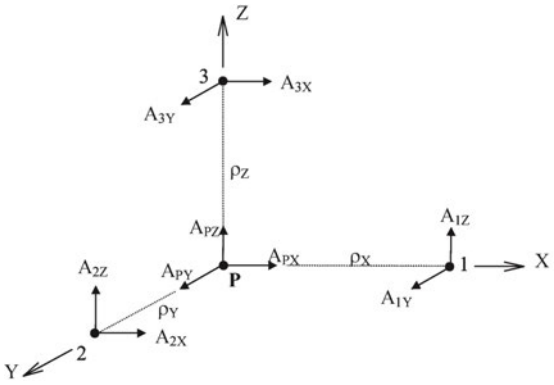


Abbildung 4.13: Sensoranordnung für das Nine-accelerometer package [22]

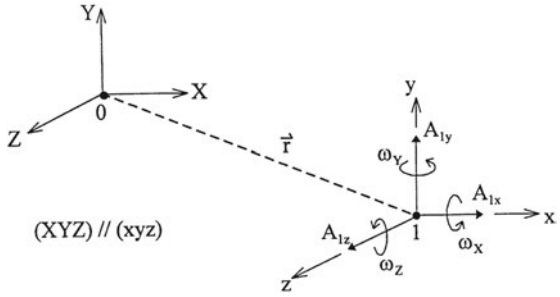


Abbildung 4.14: Sensoranordnung für das Compact cube scheme [22]

Zusammenfassend ermöglicht das Konzept der Beschleunigungsmessung eine Bestimmung aller wirkenden Kräfte und Momente, sofern eine weitgehend freie Bewegung der Waffe sichergestellt und die Sensorik präzise integriert wird. Dabei stellen NAP und CCS etablierte Verfahren dar, die sich hinsichtlich Komplexität, Genauigkeit und Kosten unterscheiden.

Im folgenden Kapitel werden – angelehnt an den VDI-Richtlinien zur Produktentwicklung – vier Grobkonzepte skizziert, analysiert und vergleichend bewertet.

5 Umsetzung der Messkonzepte in mechanische Konzepte und Diskussion der mechanischen Machbarkeit

In diesem Kapitel wird auf Basis der zuvor entwickelten Messkonzepte das vom Auftraggeber geforderte mechanische Feinkonzept konstruiert. Die Konzeptentwicklung orientiert sich am Allgemeinen Modell der Produktentwicklung nach VDI 2221, welches in Abb. 5.1 dargestellt ist. Die Arbeit erfolgt als Einzelprojekt, weshalb die Schritte „Gliedern in Module“ und „Gestalten der Module“ entfallen. Schnittstellenkonflikte sind dadurch ausgeschlossen, und eine ganzheitliche Betrachtung ist möglich.

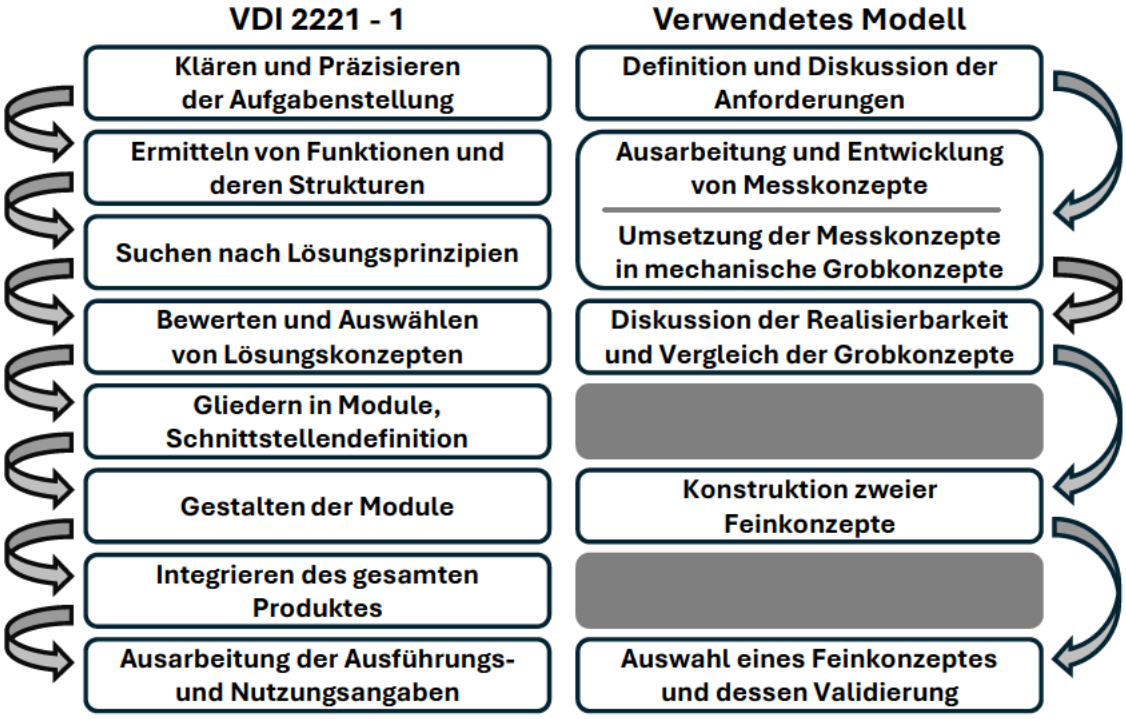


Abbildung 5.1: Vergleich „Allgemeines Modell der Produktentwicklung“ und in diesem Kapitel verwendetes Modell (in Anlehnung an [15])

Ausgehend von den definierten Anforderungen erfolgt zunächst die Bestimmung der Teilfunktionen, gefolgt von der systematischen Suche nach Lösungsprinzipien. Diese werden in einem Morphologischen Kasten strukturiert dargestellt. Auf Basis der vielversprechendsten Kombinationen werden - analog zum Schritt „Suchen von Lösungsprinzipien“ der VDI 2221 - vier Grobkonzepte entwickelt. Diese Konzepte werden im Rahmen eines paarweisen Vergleichs bewertet, um zwei Varianten für die weiterführende Ausarbeitung im CAD auszuwählen. Im Anschluss werden die erarbeiteten Feinkonzepte einem quantitativen Vergleich unterzogen, um das für den Auftraggeber geeignetste Konzept zu identifizieren und im nächsten Kapitel zu validieren.

5.1 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen

Neben der in der Anforderungsklärung identifizierten Hauptfunktion der Kraftmessung, ergeben sich weitere Teilfunktionen. Diese betreffen insbesondere das gezielte Leiten der ausgeworfenen Komponenten sowie die mechanische Aufnahme der beim Schuss auftretenden Kräfte und Drehmomente.

Zur systematischen Erfassung und Strukturierung aller Teilfunktionen wurde die transformatorische Funktionsstruktur gemäß Abb. 5.2 erstellt. Diese Darstellungsform ermöglicht es, die Funktionen in chronologischer Abfolge darzustellen und aufeinanderfolgende Transformationen übersichtlich zu analysieren.

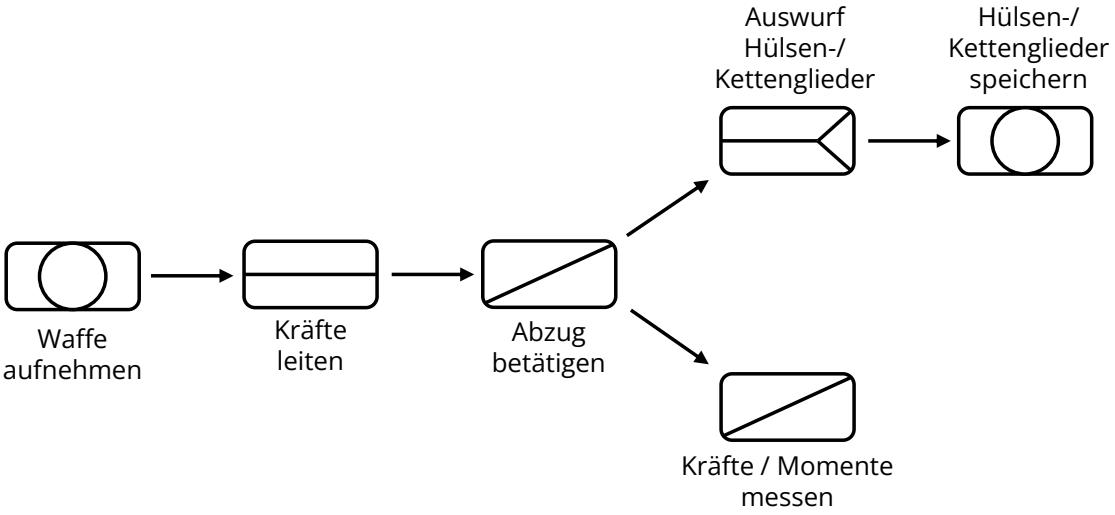


Abbildung 5.2: Transformatorische Funktionsstruktur des Prüfstandes

Die ermittelten Teilfunktionen bilden die Grundlage für den im nächsten Abschnitt erstellten Morphologischen Kasten, aus dem vier verschiedene Grobkonzepte abgeleitet werden.

5.2 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen

Als Grundlage für die Erstellung des Morphologischen Kastens (siehe Abb. 5.3) dienen die in der Literaturrecherche analysierten Prüfstände. Die dort identifizierten Lösungsansätze wurden übernommen, angepasst und systematisch erweitert. Zur Förderung kreativer Konzeptvariationen kam die SCAMPER-Methode zum Einsatz. SCAMPER steht für Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to other uses, Eliminate und Rearrange und dient dazu, bestehende Lösungsprinzipien gezielt zu hinterfragen und zu modifizieren [16, S. 269].

Die Lösungsansätze zur Teilfunktion „Kräfte-/Momentenmessung“ basieren auf den zuvor entwickelten Messkonzepten und wurden direkt in den Morphologischen Kasten überführt. Das Messkonzept „Isolierte Belastungsermittlung“ wurde bereits im vorherigen Kapitel als unzureichend bewertet und wird daher nicht aufgeführt. Die Optionen zur Aufnahme der mechanischen Belastungen umfassen sowohl Massivkonstruktionen als auch modulare Aluminiumprofile. Letztere wurden durch Substitution der geschweißten Konstruktion aus der Quelle „Measuring felt recoil of sporting arms“ [10] abgeleitet.

Die Schnittstelle zur Waffenaufnahme wurde ebenfalls analysiert. Alle vom Auftraggeber genannten Waffenmodelle verfügen über zwei Bohrungen zur Lafettierung, wodurch die Verwendung von Bolzen als Standardanbindung möglich ist. Zusätzlich bieten moderne Waffen genormte Montageschienen (z.B. Picatinny-Schienen), über die eine kraftschlüssige Verbindung auch bei nicht-lafettierbaren Waffen realisiert werden kann. Ein alternatives Konzept, das die Nachbildung der menschlichen Halteposition vorsieht, ist für schwere Maschinengewehre wie das M2 Browning nicht umsetzbar, da diese ausschließlich lafettiert betrieben werden.

Für die Abzugsbetätigung wurden Lösungsprinzipien mit unterschiedlichen Energiequellen identifiziert. Der elektromagnetische Hubmagnet wird bereits bei Rheinmetall erfolgreich ein-

gesetzt und wurde daher als erprobte Lösung übernommen. Weitere Konzepte umfassen pneumatische Auslöser mit pyrotechnischen Gasgeneratoren sowie mechanische Betätigungen über Federzug oder Bowdenzug. Das Leiten und Auffangen von Hülsen und Kettengliedern kann durch eine Kombination aus Netzen, Führungen und Behältern erfolgen.

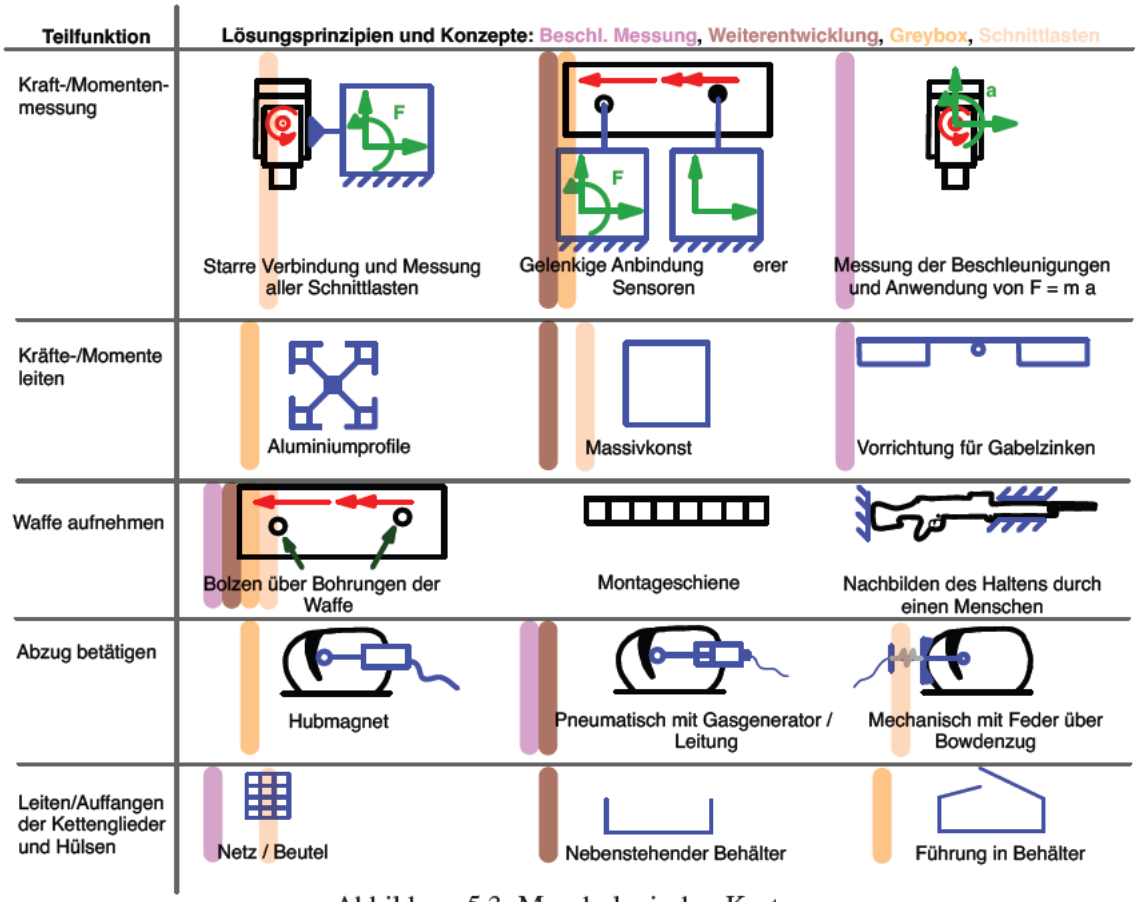


Abbildung 5.3: Morphologischer Kasten

Im nächsten Schritt wurden die Lösungsprinzipien der einzelnen Teilfunktionen zu vier verschiedenen Grobkonzepten zusammengefasst. Die Lösungsprinzipien der einzelnen Konzepte wurden in Abb. 5.3 farblich markiert, um eine grafische Darstellung zu erhalten.

5.3 Auswählen und Bewerten von Lösungskonzepten

Dieses Kapitel gliedert sich in vier Abschnitte, die jeweils eine konkrete Problemstellung sowie das Ziel des jeweiligen Grobkonzepts beschreiben. Darauf aufbauend werden geeignete Lösungsprinzipien aus dem Morphologischen Kasten ausgewählt und zu vollständigen Konzepten kombiniert.

Zur Identifikation potenzieller Konflikte oder funktionaler Schwächen erfolgt im Anschluss eine technische Analyse und erste Bewertung jedes Konzepts. Die Anzahl der untersuchten Konzepte wurde bewusst auf vier begrenzt, um eine vertiefte Ausarbeitung und gezielte Problemerkennung im Rahmen des verfügbaren Projektumfangs zu ermöglichen.

5.3.1 Konzept 1: Beschleunigungsmessung senkrecht

Die Integration mehrerer unterschiedlicher Waffensysteme stellt eine der zentralen Herausforderungen dieser Arbeit dar. Da sich sowohl die Geometrie der Anbindungspunkte als auch

die bei der Schussabgabe auftretenden Belastungen waffenspezifisch unterscheiden, steigt die Komplexität der mechanischen Aufnahme deutlich.

Das vorliegende Konzept verfolgt daher das Ziel, die mechanische Schnittstelle zur Waffe zu vereinfachen, indem auf eine feste Lagerung verzichtet und stattdessen eine freie Bewegung der Waffe während der Schussabgabe zugelassen wird. Durch diese Entkopplung kann der Aufbau der Halterung vereinheitlicht und mechanisch simpler ausgeführt werden. Gleichzeitig wird die Messung der Belastungen indirekt über die aufgezeichneten Beschleunigungen realisiert.

Wie in Abb. 5.4 dargestellt, wird die freie Bewegung der Waffe über eine Seilaufhängung ermöglicht. Das Seil (5) ist an einer Öse befestigt, die sich auf einer Stahlplatte (2) befindet. Diese kann mithilfe von Gabelzinken bewegt werden. Das Seil wird auf beiden Seiten der Waffe an Adapterbleche (6) angebunden, die über die Lafettierbohrungen miteinander verschraubt sind (siehe Abb. 5.5). Der horizontale Abstand zwischen dem Seilanschlusspunkt und dem Schwerpunkt der Waffe bestimmt die Ruheneigung. Auf diese Weise lässt sich der Winkel der Waffe g

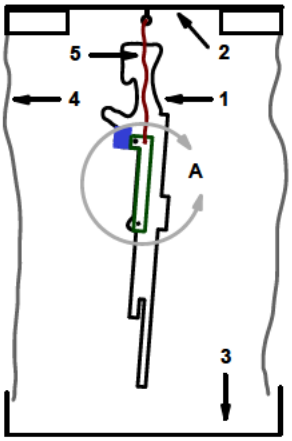


Abbildung 5.4: Skizze des Grobkonzepts „Beschleunigungsmessung senkrecht“; 1 - Waffe, 2 - Stahlplatte, 3 - Kugelfang, 4 - Netz, 5 - Seil

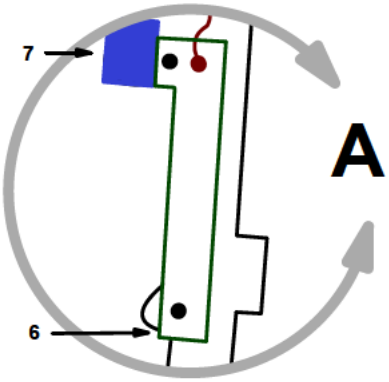


Abbildung 5.5: Detail A der Abb. 5.4; 6 - Adapterblech, 7 - Abzugsbetätigung

Um das zusätzliche Gewicht an der Waffe möglichst gering zu halten, wird der Abzug pneumatisch betätigt. Hierzu wird ein pyrotechnischer Gasgenerator (7) eingesetzt, der lediglich wenige Gramm wiegt und über eine flexible Drahtleitung ferngezündet werden kann. Der Gasgenerator erzeugt dabei einen kurzen Druckimpuls, der einen Kolben antreibt und so die mechanische Auslösung des Abzugs ermöglicht. Diese Bauweise vermeidet schwere Bauteile an der Waffe und reduziert Störeinflüsse auf das Beschleunigungsverhalten. Alle beim Schuss ausgeworfenen Hülsen und Kettenglieder werden durch ein umlaufendes Netz (4) aufgefangen und in den darunterliegenden Kugelfang (3) geleitet. Dieser absorbiert die verschossenen Geschosse, um eine Gefährdung durch Querschläger zu verhindern.

Die zur Verfügung stehenden Beschleunigungssensoren können flexibel am Adapterblech montiert werden. Die konkrete Wahl einer der im Kapitel „Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten“ vorgestellten Sensoranordnungen erfolgt im Rahmen der Skripterstellung zur Datenauswertung. Dabei werden aus den gemessenen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten die Rückstoßkräfte im waffenfesten Koordinatensystem berechnet.

Das Konzept zeichnet sich durch eine kostengünstige und flexibel anpassbare Konstruktion aus. Der mechanische Entwicklungsaufwand bleibt gering, jedoch erfordert die Auswertung

der Messdaten eine aufwändige Skripterstellung. Die potenzielle Gefährdung für Umstehende ergibt sich primär aus der freien Translation und Rotation der Waffe während des Schusses. Für aufschießende Waffen des Kalibers 5,56 x 45 mm kann die Größenordnung der Bewegung anhand der Ergebnisse aus „The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand" abgeschätzt werden. Dort wurden eine maximale Translation von 60 mm sowie ein Hochschlag von 2,75° gemessen [8]. Zwar lag das untersuchte Kaliber mit 5,56 × 45 mm unterhalb des Kalibers 7,62 × 51 mm vom MAG58, jedoch wurden die Messungen ohne den Einfluss der Gewichtskraft durchgeführt.

5.3.2 Konzept 2: Weiterentwicklung

Die Literaturrecherche zeigt, dass bereits zahlreiche Konzepte zur direkten Messung der Rückstoßkraft entwickelt wurden. Diese konzentrieren sich jedoch überwiegend auf die Messung der Kraft entlang der Rohrachse. Die im Kapitel „Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten" dargestellte Analyse hat hingegen ergeben, dass bei der Schussabgabe mindestens ein zusätzliches Moment auftritt. Ziel dieses Konzepts ist es daher, auf bewährten Entwicklungen aufzubauen und bestehende Schwächen – insbesondere die ausschließliche Krafterfassung – gezielt zu beheben.

Dieses Konzept orientiert sich im Wesentlichen an der Entwicklung aus „The Weapon's Jump and Recoil Laboratory Test Stand". Wie in Abb. 5.6 dargestellt, erfolgt die Führung der Waffe über eine Schienen-Schlitten-Konstruktion, wodurch ihre Translation gezielt erfasst werden kann. Zur Messung kommen ebenfalls ein Laserentfernungsmesser sowie ein Beschleunigungssensor zu in diesem Konzept

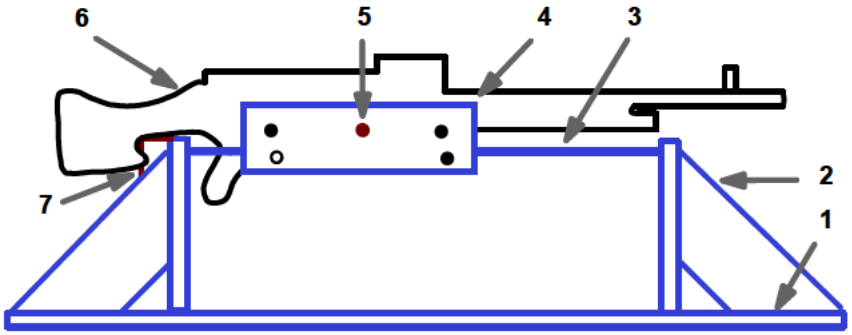


Abbildung 5.6: Translationsmessung beim Konzept „Weiterentwicklung"; 1 - Grundplatte, 2 - Lagerbock, 3 - Schiene, 4 - Adapterplatte, 5 - Beschleunigungssensor, 6 - Waffe, 7 - Laserentfernungsmesser

Im Gegensatz zur Referenzentwicklung wird hier nicht der Kolben der Waffe als Befestigungspunkt genutzt. Stattdessen erfolgt die Anbindung über Adapterplatten, die an den Lafettierbohrungen der Waffe verschraubt werden. So lässt sich eine stabile und reproduzierbare Verbindung realisieren – unabhängig von der konkreten Waffengeometrie.

Die bislang ausschließliche Krafterfassung wird in diesem Konzept erweitert: Ein 6-Komponenten-Kraft-/Momentensensor sowie ein dreiachsiger Kraftsensor sind statisch bestimmt mit der Waffe verbunden (vgl. Abb. 5.7). Der Momentensensor ist über ein Scharnier angebunden, das sowohl Kräfte entlang der x-Achse als auch Momente um die z-Achse entkoppelt. Der zusätzlich eingesetzte Kraftsensor nimmt die Querkräfte in der XY-Ebene auf, sodass alle sechs Freiheitsgrade vollständig erfasst werden können.

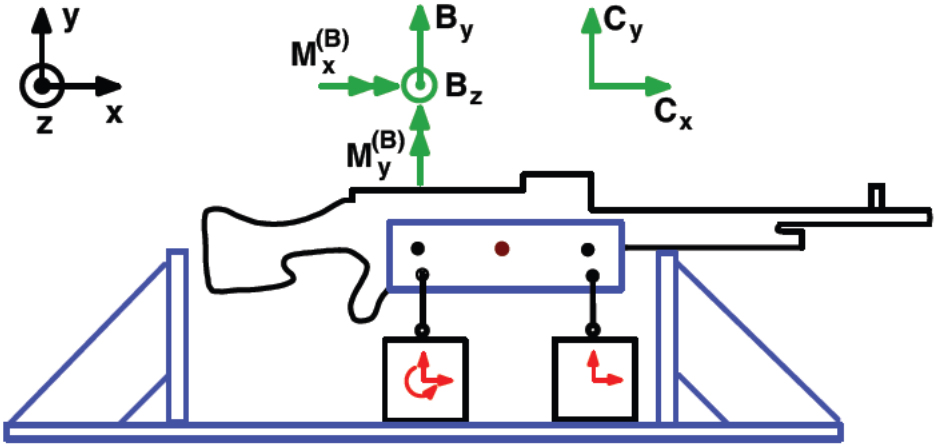


Abbildung 5.7: Kraftmessung beim Konzept „Weiterentwicklung“

Das entwickelte Konzept adressiert mehrere Schwächen bestehender Prüfstandsentwürfe. Die bisherige einseitige Kraftmessung wurde durch eine vollständige Erfassung aller Kräfte und Momente im Raum erweitert. Gleichzeitig bleibt die Translation der Waffe weiterhin messbar, sodass Korrelationen zwischen dynamischer Bewegung und auftretenden Rückstoßlasten analysiert werden können. Auf diese Weise lassen sich potenzielle Messfehler deutlich reduzieren. Die Konstruktion ist flexibel auf verschiedene lafettierbare Waffensysteme anwendbar – nach aktuellem Stand insbesondere auf das Browning M2 und das MG5.

Da zur Betätigung des Abzugs ein Pneumatikzylinder vorgesehen ist, dessen sicherer Einsatz nicht dokumentiert ist, ist vor dem Einsatz eine sicherheitstechnische Bewertung erforderlich. Bereits in der Konstruktionsphase muss gewährleistet werden, dass der Pneumatikzylinder jederzeit drucklos geschaltet werden kann und die Betätigung des Abzugs im Fehlerfall sicher unterbrochen wird.

5.3.3 Konzept 3: Schnittlasten

Die gelenkige Anbindung von Sensoren führt zu Reibungsmomenten, die schwer quantifizierbar und stark von der Belastung abhängig sind. Diese Reibung kann die Messergebnisse verfälschen und insbesondere die Erfassung von Schwingungen geringer Amplitude verhindern. Ziel des folgenden Prüfstandskonzepts ist es daher, Messfehler durch Lagerreibung zu vermeiden, indem de

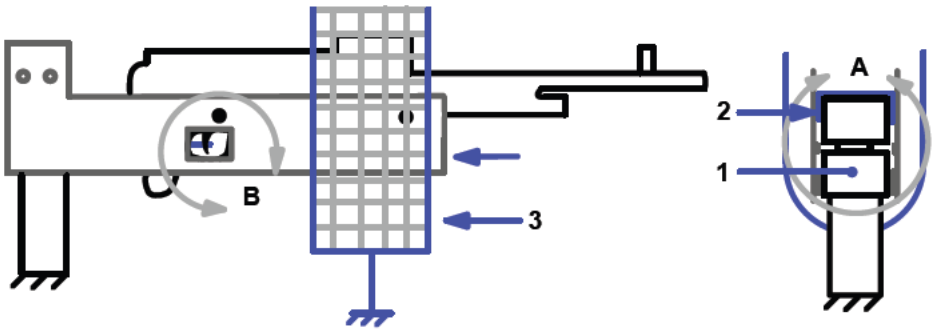


Abbildung 5.8: Gesamtansicht Grobkonzept „Schnittlasten“; 1 - 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor, 2 - Sensoradapter, 3 - Auffangnetz, 4 - Adapterplatte

Das Konzept basiert auf dem Messkonzept „6-Komponenten Kraft-/Momentensensor“. Der Sensor (1) wird an der berechneten Position montiert, an der sich eine möglichst geringe Belastung ergibt. Die Kraftübertragung zwischen der Waffe und dem Sensor erfolgt über eine Adapterplatte (4 in Abb. 5.8). Zur Sicherstellung der korrekten Krafteinleitungshöhe wird ein zusätzlicl argestellt.

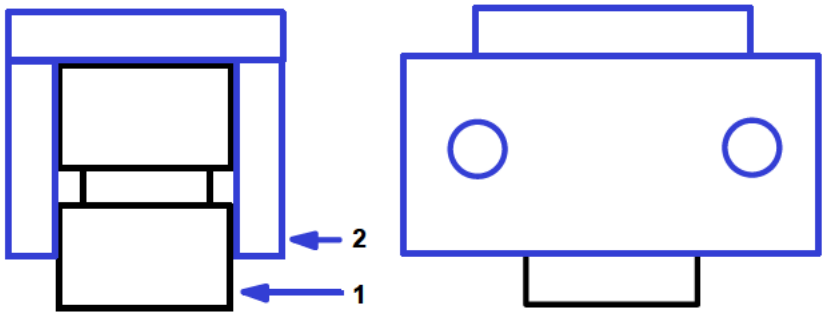


Abbildung 5.9: Detail A – Sensoranbindung; 1 - 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor, 2 - Sensoradapter

Die bei der Schussabgabe ausgeworfenen Hülsen und Kettenglieder werden durch ein u-förmig gespanntes Netz aufgefangen und gesammelt. Die Abzugsbetätigung erfolgt manuell über einen federrückgestellten Winkel (vgl. Abb. 5.10). Dieser ist an einer der Adapterplatten montiert und wird über ein Seil aus sicherer Entfernung betätigt. Der Winkel greift durch eine Aussparung in der Adapte

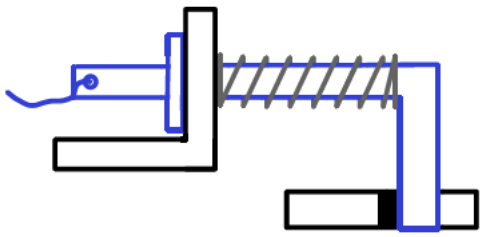


Abbildung 5.10: Detail B – Draufsicht Abzugsbetätigung

Die Adapterplatten dienen zur Verbindung von Waffe und Sensorstruktur. Die beidseitig montierten Platten werden über die Lafettierbohrungen mit der Waffe verschraubt. Eine detaillierte Darstellung der Adapterplatte zeigt Abb. 5.11. Zur Krafteinleitung in den Adapter des Sensors werden sie über die auf gleicher Höhe dargestellten Bohrungen verschraubt. Um konstruktive Unterschiede in der Waffenbreite auszugleichen, sind auf der Innenseite Absätze vorgesehen.

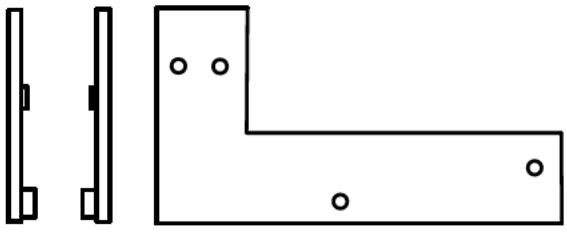


Abbildung 5.11: Adapterplatte des Grobkonzepts „Schnittlasten“

Das entwickelte Konzept zeichnet sich durch eine hohe Messgenauigkeit und definierte Kraftübertragung aus. Durch die starre Anbindung des Sensors werden Messfehler aufgrund von

Reibung weitgehend ausgeschlossen. Das Konzept ist daher besonders für die präzise Bestimmung von Rückstoßkräften und -momenten geeignet. Da keine Bewegung der Waffe ermöglicht wird, kann das resultierende Bewegungsverhalten nur über die aufgestellten Bewegungsgleichungen berechnet werden.

5.3.4 Konzept 4: Greybox

Die bisher betrachteten Konzepte setzen voraus, dass das zu untersuchende Waffensystem über zwei definierte Bohrungen zur Lafettierung verfügt. Diese Annahme schränkt die Einsatzmöglichkeiten des Prüfstands jedoch auf Systeme mit entsprechender Schnittstelle ein. Das vorliegende Konzept verfolgt daher einen allgemeineren Ansatz: Es wird ein mechanischer Rahmen entwickelt, der als Schnittstelle zwischen individuellen Adapterlösungen und der Messeinrichtung fungiert. Die auftretenden Kräfte werden über den Rahmen in Kraftsensoren eingeleitet. Durch die bekannte Geometrie des Rahmens sowie der Krafteinleitungspunkte können die resultierenden Lasten rechnerisch bestimmt und auf verschiedene Lagerungsarten übertragen werden.

Die Umsetzung erfolgt durch eine modular aufgebaute Rahmenstruktur aus Aluminiumprofilen. Diese wird statisch bestimmt gelagert, um die resultierenden Kräfte eindeutig erfassen zu können. Im Festlager ist ein dreiachsiger Kraftsensor integriert, während in den drei Loslagern jeweils einachsige Kraftsensoren verbaut sind. Alle Sensoren sind mechanisch mit einer genuteten Grundplatte verbunden, die über Spannpratzen am Einsatzort fixiert wird (vgl. Abb. 5.12)

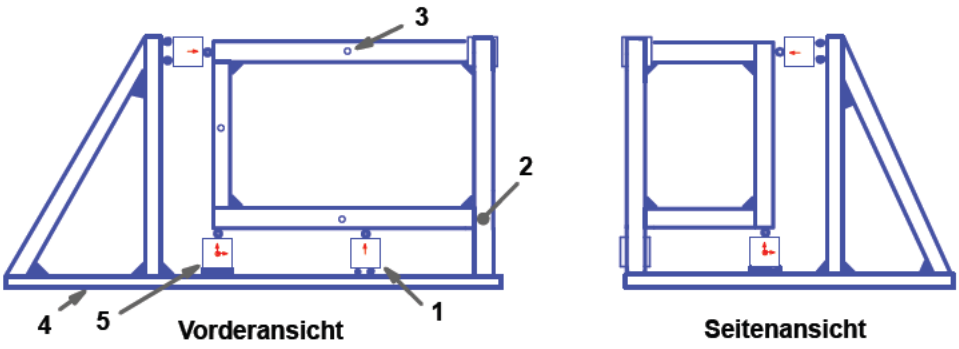


Abbildung 5.12: Vorder- und Seitenansicht des waffenunabhängigen Prüfstands „Greybox“; 1 - Einachsiger Kraftsensor, 2 - Aluminiumprofil, 3 - Verschraubungspunkte Adapterplatte, 4 - Grundplatte, 5 - Dreiachsiger Kraftsensor

Innerhalb dieses Rahmens können verschiedene Waffensysteme über individuell angepasste Adapterplatten montiert und untersucht werden. Für das MAG58 ist eine entsprechende Adapterplatte gemäß Abb. 5.13 vorgesehen. Die Platten werden beidseitig an der Waffe angebracht und über die vorhandenen Lafettierbohrungen formschlüssig verschraubt. Abstandshülsen verhindern dabei eine Kollision mit hervorstehenden Bauteilen der Waffe.

Zur Befestigung im Prüfrahmen werden die Adapterplatten über die seitlichen Bohrungen mit Nutensteinen in den Aluminiumprofilen fixiert. Ein angeschlossenes Leitblech führt die ausgeworfenen Hülsen und Kettenglieder gezielt in eine darunterliegende Auffangbox. Zur Betätigung des Abzugs ist der bei Rheinmetall bewährte Hubmagnet vorgesehen, der an einer der beiden Adapterplatten verschraubt wird.

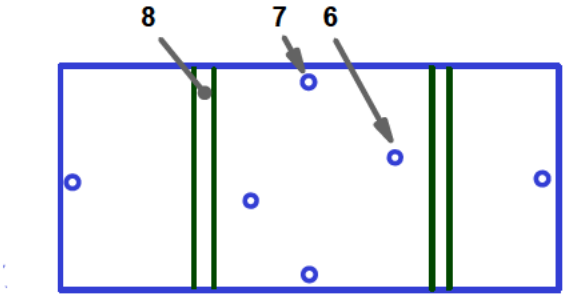


Abbildung 5.13: Adapterplatte der „Greybox“ für verschiedene Waffen; 6 - Lochbild der Waffe, 7 - Bohrung zur Verschraubung mit der Rahmenstruktur, 8 - Leitbleche für Hülsen

Das entwickelte Konzept zeichnet sich durch eine hohe universelle Einsetzbarkeit aus. Die Herausforderung der Sensoranbindung ist gelöst, da künftig lediglich ein angepasster Adapter zur Krafteinleitung in die Rahmenstruktur erforderlich ist. Für verschiedene lafettierbare Waffen genügt die Anpassung des Bohrbilds auf den bestehenden Adapterplatten, wodurch sich sowohl der Konstruktionsaufwand als auch die Fertigungskosten erheblich reduzieren. Adapterlösungen für Systeme ohne Lafettierbohrungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, können jedoch bei Bedarf im weiteren Verlauf entwickelt werden. Obwohl das Konzept keine direkte Messung von Translation oder Rotation ermöglicht, lassen sich die resultierenden Bewegungen über dynamische Bewegungsgleichungen rechnerisch bestimmen.

5.4 Vergleich der Grobkonzepte

Die im vorherigen Kapitel entwickelten Grobkonzepte werden im nächsten Schritt systematisch miteinander verglichen, um zwei Konzepte für die vertiefte Ausarbeitung auszuwählen. Hierzu wird ein paarweiser Vergleich anhand definierter Bewertungskriterien durchgeführt. Die Anzahl der erzielten Präferenzen wird für jedes Konzept summiert; die beiden Varianten mit den höchsten Gesamtwerten werden anschließend weiterverfolgt. Die Grobauswahl erfolgt auf Basis der folgenden Kriterien:

- Zu erwartende Messgenauigkeit
- Sicherheit beim Betrieb des Prüfstandes
- Anpassbarkeit der Prüfvorrichtung an unterschiedliche Waffensysteme

Die Bewertungsergebnisse sind aufgrund der groben Einschätzung nicht als absolut zu verstehen, sondern dienen lediglich als Orientierung. Ein Konzept kann zwar eine hohe Gesamtbewertung erreichen, jedoch dennoch aus sicherheits- oder prinzipbedingten Gründen ausscheiden, falls sich zentrale Schwächen nicht beheben lassen. Umgekehrt kann ein vielversprechendes Konzept durch geringfügige, jedoch behebbare Schwächen eine niedrigere Bewertung erhalten.

Zudem besteht das Risiko, dass ein innovativer Ansatz durch eine konservative Bewertung unterbewertet wird, obwohl er im Falle einer erfolgreichen Umsetzung einer Ideallösung nahekäme. Aus diesen Gründen stellt der paarweise Vergleich ein sinnvolles Hilfsmittel zur Konzeptauswahl dar, dessen Ergebnis jedoch einer weiteren qualitativen Überprüfung und kritischen Reflexion bedarf.

Im Fokus der ersten Bewertung steht die Messgenauigkeit. Laut Anforderung ist eine maximale Abweichung zwischen eingeleiteter und gemessener Kraft von 13% zulässig. Der entsprechende Vergleich ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Das Konzept D – Schnittlasten schneidet in diesem

Kriterium am besten ab. Aufgrund der steifen Anbindung an den Kraft-/Momentensensor treten keine Reibungsverluste auf, wodurch ein sehr präzises Messergebnis zu erwarten ist. Auf Rang zwei folgt Konzept B – Weiterentwicklung, bei dem die Anzahl der Gelenkstellen minimiert wurde, was ebenfalls zur Reduktion potenzieller Messfehler beiträgt. Konzept C – Greybox ist in stärkerem Maße von der Steifigkeit des Rahmens sowie Reibungseinflüssen an den Lagerpunkten abhängig. Beim Konzept A – Beschleunigungsmessung ist durch die indirekte Erfassung über translatorische Beschleunigungen und mehrere Rechenschritte mit einem deutlich verrauschten Signal zu rechnen.

Tabelle 5.1: Paarweiser Vergleich der Messgenauigkeit

Lösungsvarianten		**A**	**B**	**C**	**D**	**N Präferenzen**	**∑N**
Beschleunigungsmessung	**A**		B	C	D	0	0
Weiterentwicklung	**B**			B	D	1	2
Greybox	**C**				D	0	1
Schnittlasten	**D**					0	3
	N Präferenzen	0	1	1	3		

Im nächsten Schritt wird die Sicherheit der Konzepte anhand von Tabelle 5.2 bewertet. Als sicherstes Konzept erweist sich die Variante Schnittlasten, da sie mit einer minimalen Anzahl an Komponenten, Gelenken und Schraubverbindungen konstruiert ist. Dadurch werden potenzielle Fehlerquellen erheblich reduziert. Das Konzept Weiterentwicklung schneidet etwas schlechter ab, da es aufgrund der zusätzlich geführten Translation sowie einer höheren Anzahl beweglicher Teile eine komplexere Struktur aufweist und somit anfälliger für Fehlfunktionen ist. Das Konzept Greybox erhält nur einen Punkt, da die Vielzahl an Schraubverbindungen zahlreiche potenzielle Schwachstellen schafft. Dennoch kann das Sicherheitsniveau durch geeignete Maßnahmen wie Schraubensicherungen technisch abgesichert werden. Das Konzept Beschleunigungsmessung wird am schlechtesten bewertet, da die unkontrollierte Bewegung der Waffe während der Schussabgabe ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellt. Eine ausreichende Reduktion dieses Risikos wäre nur mit erheblichem technischen Aufwand möglich.

Tabelle 5.2: Paarweiser Vergleich der Sicherheit

Lösungsvarianten		**A**	**B**	**C**	**D**	**N Präferenzen**	**∑N**
Beschleunigungsmessung	**A**		B	C	D	0	0
Weiterentwicklung	**B**			B	D	1	2
Greybox	**C**				D	0	1
Schnittlasten	**D**					0	3
	N Präferenzen	0	1	1	3		

Aus Tabelle 5.3 geht hervor, dass das Konzept Beschleunigungsmessung den geringsten Umrüstaufwand bei wechselnden Waffensystemen erfordert. Dies ist auf die einfache Seilaufhängung zurückzuführen, die sich flexibel an nahezu jedem Waffentyp befestigen lässt. An zweiter Stelle folgt das Konzept Greybox, bei dem für die Adaption lediglich eine flache Adapterplatte notwendig ist. Darüber hinaus erlaubt die offene Rahmenstruktur auch die Integration großformatiger oder unkonventionell geformter Waffensysteme. Deutlich aufwendiger gestalten sich hingegen die Konzepte Schnittlasten und Weiterentwicklung. Beide erfordern komplexe, min-

destens dreiachsige Frästeile zur exakten Krafteinleitung. Für jeden neuen Waffentyp entsteht dadurch ein hoher konstruktiver und fertigungstechnischer Aufwand.

Tabelle 5.3: Paarweiser Vergleich der Anpassbarkeit

Lösungsvarianten		**A**	**B**	**C**	**D**	**N Präferenzen**	**∑N**
Beschleunigungsmessung	**A**		A	A	A	3	3
Weiterentwicklung	**B**			C	B	1	1
Greybox	**C**				C	1	2
Schnittlasten	**D**					0	0
	N Präferenzen	0	0	1	0		

Werden die Bewertungen der einzelnen Vergleiche summiert, so ergibt sich die folgende Ordnung:

1. Schnittlasten; 6 Punkte
2. Weiterentwicklung; 5 Punkte
3. Greybox; 4 Punkte
4. Beschleunigungsmessung; 3 Punkte

Auf den ersten Blick erscheint das Konzept „Schnittlasten“ mit der höchsten Gesamtpunktzahl als klarer Favorit. Diese Bewertung resultiert primär aus der exzellenten Messgenauigkeit und der hohen Betriebssicherheit, die durch den einfachen, starren Aufbau ermöglicht werden. Allerdings genügt es für die Auswahl nicht, in einzelnen Kategorien Bestwerte zu erzielen – vielmehr muss das Gesamtkonzept die Anforderungen möglichst umfassend erfüllen. Der entscheidende Nachteil des Konzepts „Schnittlasten“ liegt in seiner geringen Anpassbarkeit. Da es im Vergleich zu den übrigen Varianten keine flexible Integration verschiedener Waffensysteme erlaubt, wurde es in dieser Kategorie mit null Punkten bewertet. Dieser strukturelle Mangel limitiert die Einsatzbreite des Prüfstands erheblich und macht eine weiterführende Betrachtung im Rahmen der Detailkonstruktion wenig sinnvoll.

Stattdessen werden die Konzepte „Greybox“ und „Weiterentwicklung“ für die weitere Ausarbeitung ausgewählt. Sie erreichen in der Bewertung die nächstbesten Punktzahlen und zeichnen sich durch eine bessere Balance zwischen Messqualität, Sicherheit und Anpassungsfähigkeit aus. In den folgenden Kapiteln werden diese Konzepte mittels CAD-Modellen konkretisiert und hinsichtlich der Erfüllung der technischen Anforderungen detailliert analysiert.

5.5 Gestaltung der Feinkonzepte

Dieses Kapitel beschreibt die konstruktive Ausarbeitung der Feinkonzepte „Greybox“ und „Weiterentwicklung“ auf Grundlage von CAD-basierten Zeichnungen. Dabei werden sowohl die wesentlichen konstruktiven Details als auch deren funktionale Umsetzung erläutert. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung der zugehörigen Kraftflüsse und Freikörperbilder zur Bewertung der statischen Bestimmtheit der jeweiligen Systeme.

Ziel beider Konzepte ist es, eine präzise und reproduzierbare Erfassung aller Rückstoßlasten beim Abfeuern unterschiedlicher Waffensysteme zu gewährleisten, wobei die Konzepte unterschiedliche Ansätze zur Kraftaufnahme verfolgen.

5.5.1 Greybox

Das Grobkonzept „Greybox“ wurde – wie in Abbildung Abb. 5.14 dargestellt – als Feinkonzept ausgearbeitet. Der Prüfrahmen (7), bestehend aus Aluminiumprofilen und Winkeln, dient als Schnittstelle zur Einleitung beliebiger Kräfte in die vier Lagerpunkte. Das Festlager (3) ist gelenkig mit dem Prüfrahmen verbunden, nimmt Kräfte in allen Raumrichtungen auf und erfasst diese mittels eines dreiachsigen Kraftsensors. Die verbleibenden Freiheitsgrade des Systems werden durch die Pendelstützen (6 und A in Abb. 5.15) eingeschränkt. Die entlang der Pendelachsen wirkenden Kräfte werden über einachsige Kraftsensoren gemessen.

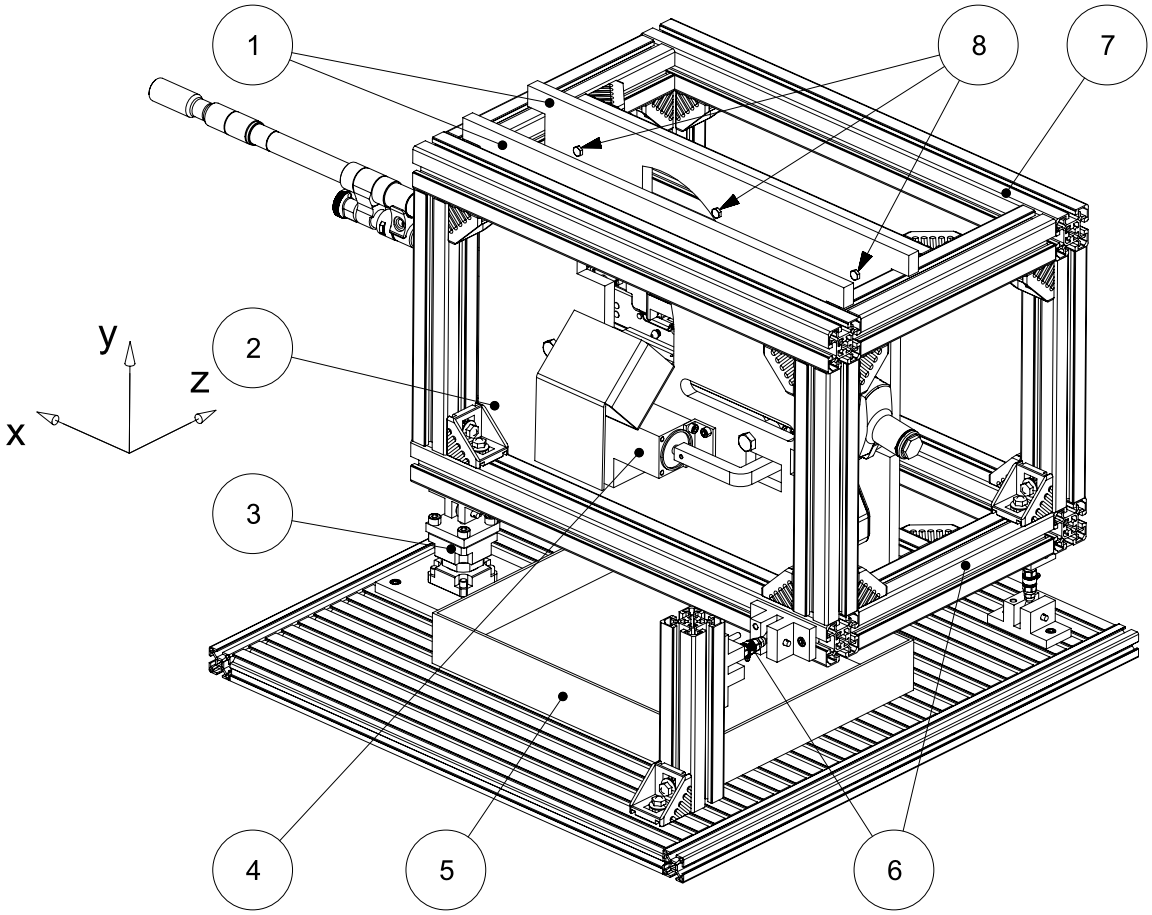


Abbildung 5.14: Gesamtansicht der Greybox; 1 - Adapterplatten, 2 - Leitblech, 3 - Dreiachsiger Kraftsensor, 4 - Hubmagnet, 5 - Auffangbox, 6 - Einachsige Kraftsensoren, 7 - Prüfrahmen, 8 - Verschraubung Adapterplatten

Die Rückstoßkräfte des MAG58 werden über die Adapterplatten (1) und die Schraubverbindungen (8) in den Prüfrahmen eingeleitet. Die Kraftübertragung zwischen Waffe und Adapterplatten erfolgt über eine Schraubverbindung und wird im Detailabschnitt C näher erläutert. Um die Waffe laden, sichern und auslösen zu können, sind entsprechende Ausschnitte in den Adapterplatten vorgesehen. Der Abzug wird mithilfe eines federrückgestellten Hubmagneten (4) elektrisch betätigt. Das beim Schuss ausgeworfene Kettenglied wird durch ein Leitblech (2) in die Auffangbox (5) geleitet, da sie mit hoher kinetischer Energie parallel zur Grundplatte ausgestoßen wird.

Im nächsten Abschnitt wird das beschriebene Konzept als Freikörperbild dargestellt, um die statische Bestimmtheit des Systems zu analysieren. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der in Abb. 5.15 markierten Details.

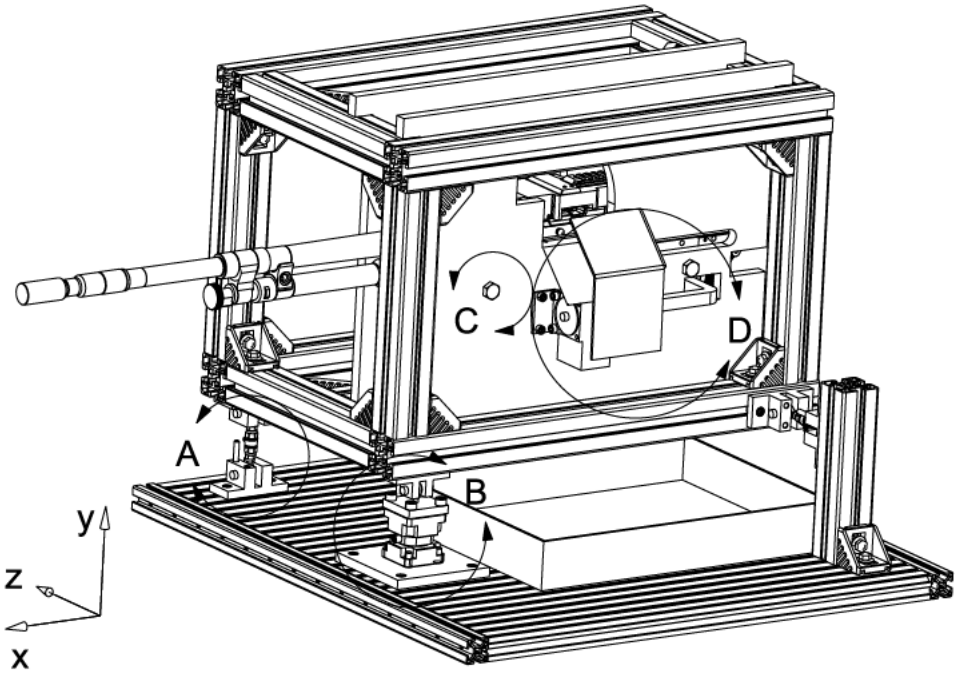


Abbildung 5.15: Details der Greybox; A - Festlager, B - Hubmagnet, C - Verschraubung Waffe/Adapterplatte, D - Pendelstützen

Freikörperbild und statische Bestimmtheit

Das Freikörperbild des Feinkonzepts „Greybox“ ist in Abb. 5.16 dargestellt. Die roten Pfeile kennzeichnen die angreifende Kräfte F_x, F_G sowie das Moment M_x. Die grünen Pfeile zeigen die Reaktionskräfte an den Lagerstellen.

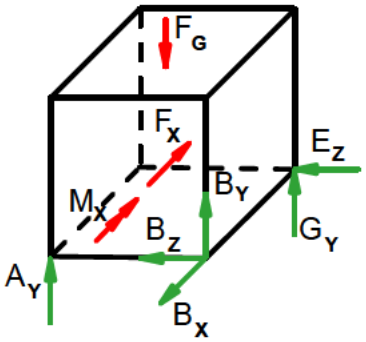


Abbildung 5.16: Freikörperbild des Feinkonzepts „Greybox“; B_{X-Z} – Lagerreaktionen Festlager, A_y / E_y und G_y – Lagerreaktionen Pendelstützen, F_X & M_X – Angreifende Kräfte und Momente

Zur Bestimmung der statischen Bestimmtheit wird das System mithilfe der allgemeinen Formel aus Gleichung (5.1) analysiert. Für ein statisch bestimmtes System ergibt sich ein Freiheitsgrad $f = 0$. Bei der Berechnung werden die Anzahl der starren Körper k sowie die Wertigkeiten aller Lager a und Gelenke v berücksichtigt:

$$f = 6 \cdot \sum_{k=1}^{n} k - \left[\sum_{i=1}^{n} a + \sum_{j=1}^{n} v \right] \tag{5.1}$$

Das System „Greybox“ besteht aus einem starren Körper – dem Prüfrahmen mit der fest verbundenen Waffe –, sodass $k = 1$ gilt. Die vier Pendelstützen übertragen jeweils nur eine Kraft entlang ihrer Achse, was je einer Wertigkeit $a = 1$ entspricht. Das Festlager nimmt Kräfte entlang aller drei Raumachsen auf, womit seine Wertigkeit $a = 3$ beträgt. Gelenkverbindungen innerhalb des Systems sind aufgrund der starren Kopplung nicht zu berücksichtigen, daher gilt $v = 0$. Damit ergibt sich die statische Bestimmtheit des Systems:

$$f = 6 \cdot 1 - [3 + 1 + 1 + 1 + 0] = 0 \tag{5.2}$$

Detail A - Pendelstütze des Prüfrahmens

Den zentralen Bestandteil der Pendelstütze bildet der einachsige Kraftsensor vom Typen 9311C der Firma „Kistler Instrumente AG“ (Position 12 in Abb. 5.17). Beidseitig sind Gelenkkopflager (14) in den Sensor eingeschraubt und mit Klemmmutter (13) vorgespannt. Die Kraftübertragung erfolgt beidseitig über Bolzen (10), welche die Gelenkköpfe mit den Gabelaufnahmen (15) verbinden.

Kräfte die in der Ebene senkrecht zur Längsachse des Bolzens angreifen werden über den radialen Formschluss zwischen Bolzen und Gabelaufnahme übertragen. Axiale Kräfte entlang der Bolzenachse werden über die spielfreie Passung zwischen Gelenkkopf und Gabelkopf aufgenommen. Der zugehörige Kraftfluss ist in der Zeichnung rot dargestellt.

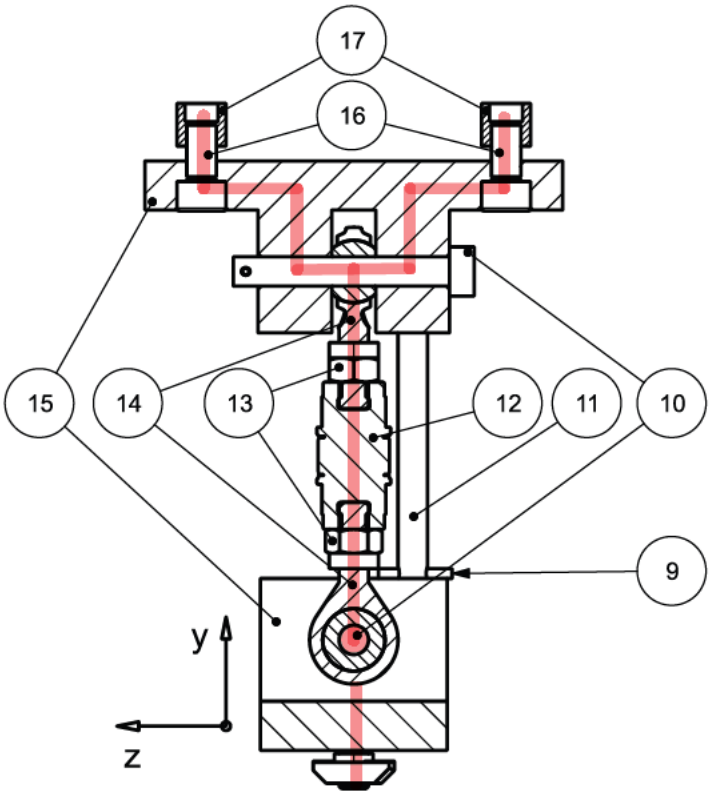


Abbildung 5.17: Pendelstütze des Prüfrahmens; 9 - Haltestift, 10 - Bolzen, 11 - Montagebolzen, 12 - Einachsiger Kraftsensor, 13 - Klemmmuttern, 14 - Gelenkkopflager, 15 - Gabelaufnahmen, 16 - Zylinderschrauben, 17 - Hammermuttern

Zur Justage während der Montage verfügt jede Pendelstütze über einen Montagebolzen (11), der durch koaxiale Bohrungen in den Gabelaufnahmen geführt wird. Nach der finalen Positio-

nierung wird dieser durch Entfernen des Haltestiftes (9) abgesenkt, um den Betrieb nicht zu behindern.

Detail B - Festlager des Prüfrahmens

Die Kraftübertragung im Festlager (siehe Abb. 5.18) erfolgt auf zwei Wegen: Auf der einen Seite des dreiachsigen Kraftsensors (18, Typ 9347C) wird die Verbindung zum Prüfrahmen analog zur Pendelstütze über ein Gelenkkopflager (20) und eine Gabelaufnahme (15) realisiert. Auf der gegenüberliegenden Seite wird der Sensor über eine Flanschverbindung an der Grundplatte befestigt.

Da der Kraftsensor ausschließlich über Gewindebohrungen verfügt, die Montage an der genuteten Grundplatte jedoch mittels Hammermuttern erfolgt, wird eine Adapterplatte (21) eingesetzt. Diese verfügt über Passbohrungen, zur präzisen und kraftschlüssigen Montage. Die auftretenden Kräfte entlang aller Raumachsen werden über den Sensor erfasst und über die Flanschverbindung sicher in die Grundplatte eingeleitet.

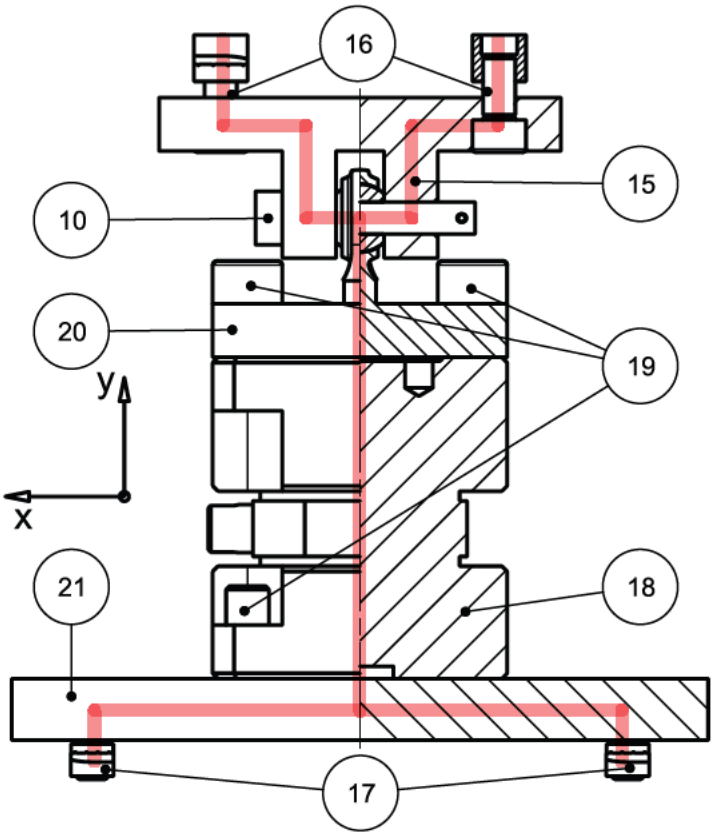


Abbildung 5.18: Festlager des Prüfrahmens; 10 - Bolzen, 15 - Gabelaufnahme, 16 - Zylinderschrauben, 17 - Hammermuttern, 18 - Dreiachsiger Kraftsensor, 19 - Zylinderschrauben, 20 - Gelenklagerbock, 21 - Adapterplatte

Detail C – Schraubverbindung zwischen Adapterplatten und Waffe

Um eine kosteneffiziente Anpassung des Prüfstandes an verschiedene Waffensysteme zu ermöglichen, wurde die Befestigung der Waffe gemäß Abb. 5.19 mittels Adapterplatten realisiert. Neben der waffenspezifischen 2D-Geometrie der Adapterplatten sind pro Schraubverbindung lediglich zwei Passschrauben (22) sowie vier Zentrierhülsen (24) erforderlich. Die Hülsen ge-

währleisten eine präzise Positionierung und zentrierte Lagerung der Waffe in der Adapteraufnahme. Durch diese Maßnahme wird sichergestellt, dass ausschließlich an den vorgesehenen Kontaktstellen Kräfte übertragen werden und Kollisionen mit den Platten vermieden werden.

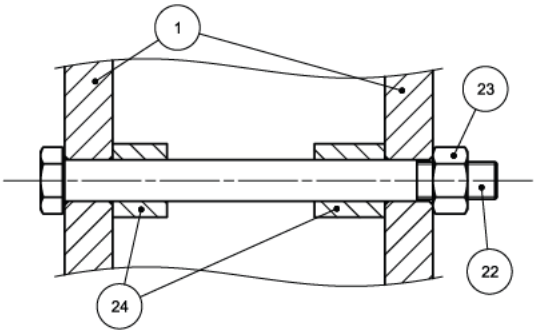


Abbildung 5.19: Schraubverbindung Adapterplatten/Waffe; 1 - Adapterplatten, 22 - Passschraube, 23 - Mutter, 24 - Hülsen

Detail D – Hubmagnet zur Abzugsbetätigung

Zur ferngesteuerten Auslösung des Schusses wird ein federrückgestellter Hubmagnet verwendet, wie in Abb. 5.20 dargestellt. Der Magnet ist von außen an der Adapterplatte befestigt und betätigt den Abzug über ein zwischengeschaltetes Winkelstück, das den Versatz zwischen der Achse des Hubkolbens und dem Abzug kompensiert.

Der resultierende Kraftfluss verläuft vom Hubkolben über das Winkelstück direkt auf den Abzug der Waffe. Da die Waffe kraftschlüssig mit der Adapterplatte verbunden ist, welche gleichzeitig die Aufnahme des Hubmagneten darstellt, erfolgt die Krafteinleitung vollständig außerhalb des Messpfads der Kraftsensoren. Eine Erfassung des Abzugsgewichts ist in dieser Ausführung daher nicht vorgesehen.

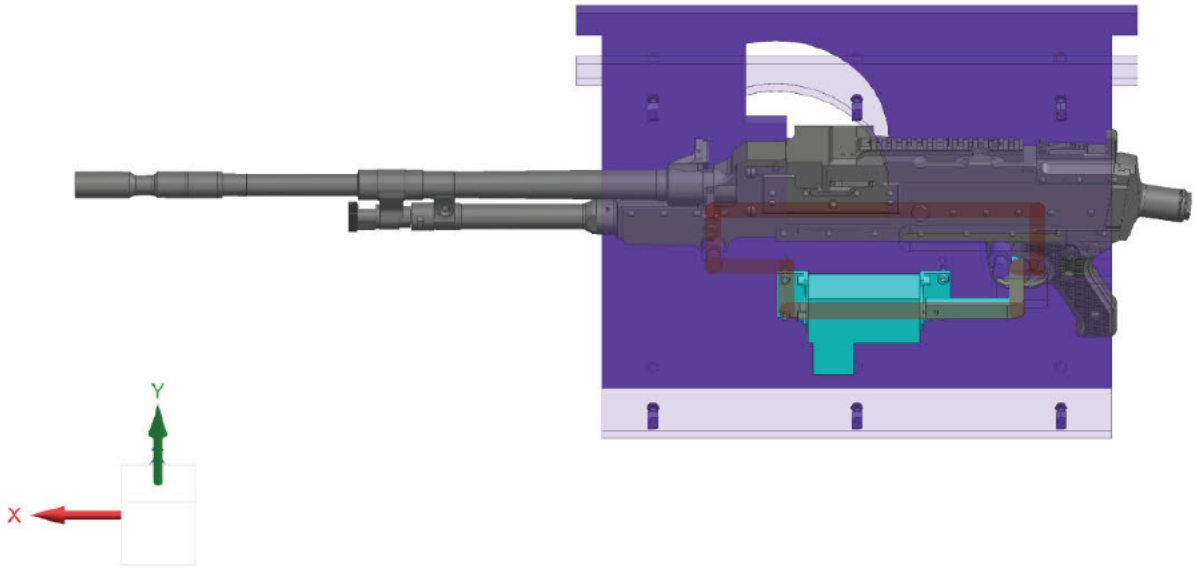


Abbildung 5.20: Hubmagnet zur Abzugsbetätigung

5.5.2 Weiterentwicklung

Das Feinkonzept „Weiterentwicklung“ umfasst zwei Konfigurationen: eine direkte Kraftmessung (Abb. 5.21) sowie eine indirekte Kraftmessung über die Translation entlang der Rohrachse

(Abb. 5.22). Zur Reduzierung des Fertigungsaufwands für verschiedene Waffensysteme erfolgt die Anbindung an die Kraftsensoren beziehungsweise die Schlitten universell über die Adapterplatten (3). Für die direkte Kraftmessung sind ein dreiachsiger Kraftsensor (2) sowie ein 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor (4) mit den Adapterplatten verbunden. Die in Abb. 5.21 und Abb. 5.22 dargestellten Details werden im Anschluss an das Freikörperbild näher erläutert.

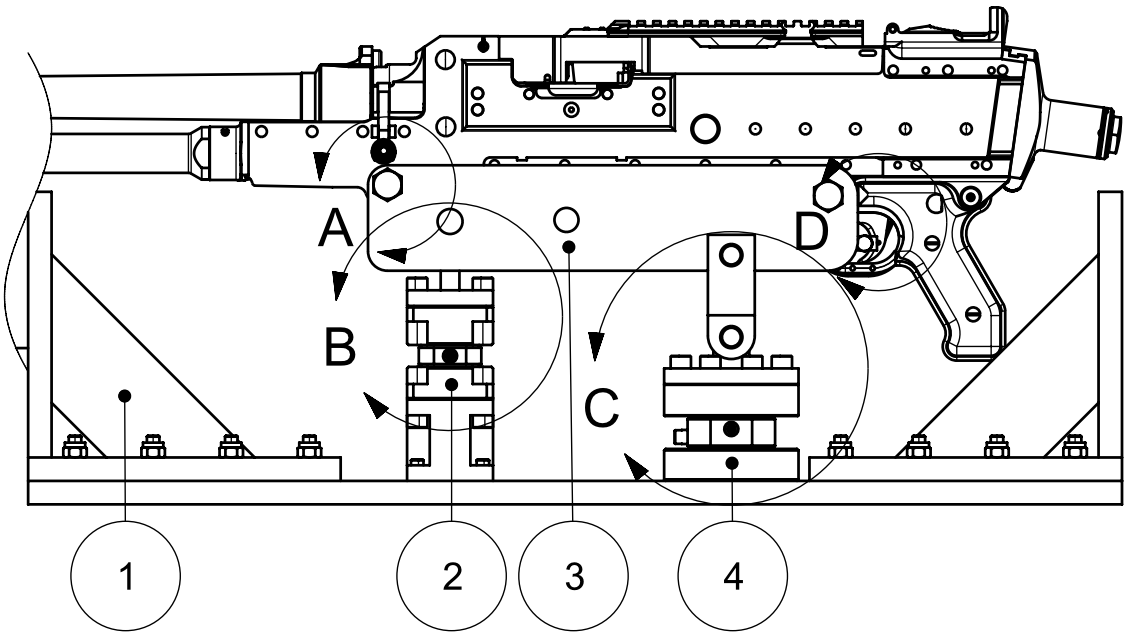


Abbildung 5.21: Gesamtansicht des Feinkonzepts „Weiterentwicklung“; A - Detail Schraubenverbindung, B - Detail Dreiachsiger Kraftsensor, C - Detaill 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor, D - Detail Abzugsbetätigung, 1 - Lagerböcke Translation, 2 - Festlager, 3 - Adapterplatte, 4 - 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor

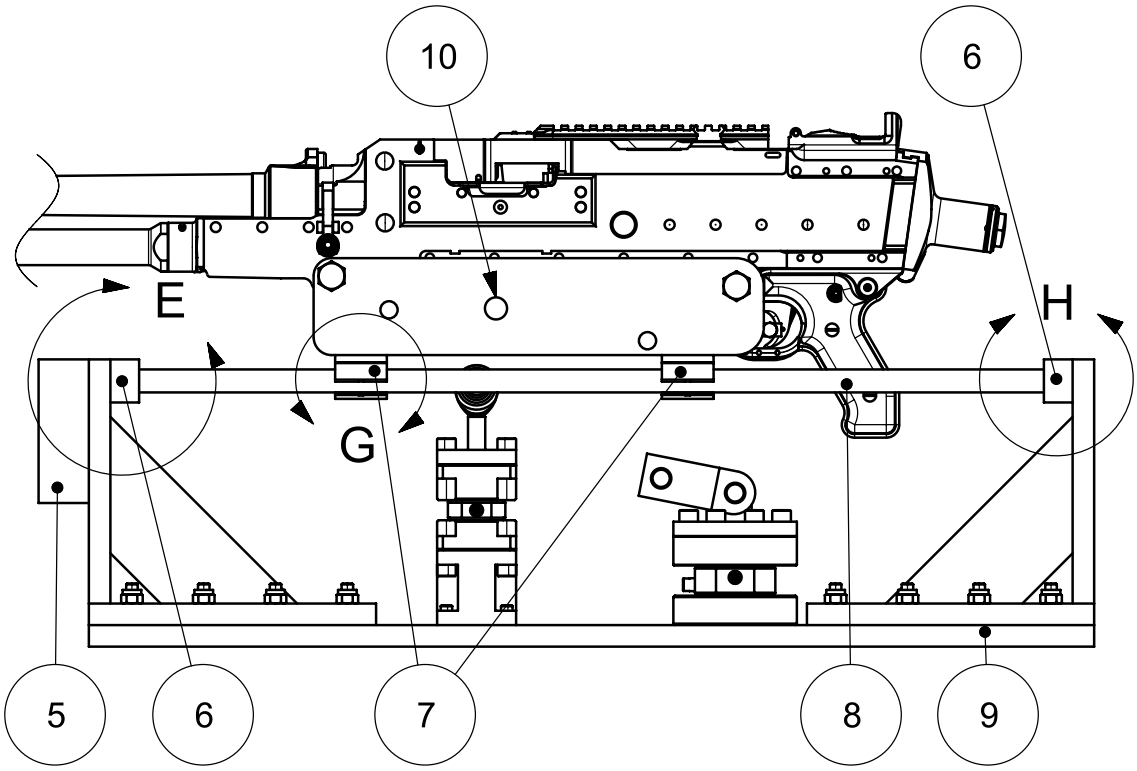


Abbildung 5.22: Konfiguration „Translation“ des Konzepts Weiterentwicklung; E - Aufnahme links der Stäbe, G - Schlitten, H - Aufnahme der Stäbe rechts, 5 - Laserentfernungsmesser, 6 - Gummidämpfer, 7 - Gleitlager, 8 - Stäbe, 9 - Grundplatte, 10 - Beschleunigungssensor

Wie in Abb. 5.22 dargestellt, sind zur Messung der Translation der Waffe zwei Rohre (8) an den Lagerböcken für die Translation (1) montiert. Die Endanschläge der Rohre sind mit Gummidämpfern (6) ausgestattet, welche auftretende Stöße beim Erreichen der Anschläge wirkungsvoll dämpfen. Um ein Verkanten der Gleitlager (7) zu verhindern, sind diese paarweise zu Schlitten (G) verbunden. Aufgrund der Steifigkeit der für die Hubmagnetsteuerung erforderlichen Kabel, welche das Messergebnis verfälschen würden, wurde anstelle des Hubmagneten ein federrückgestellter, einseitig wirkender Pneumatikzylinder (D) eingesetzt. Die Erfassung der dynamischen Kennwerte erfolgt über einen Laserentfernungsmesser (5), sowie einen an der Adapterplatte moniterten Beschleunigungssensor (10).

Freikörperbild und statische Bestimmtheit

Die gewählte Lageranordnung für das Konzept „Weiterentwicklung“ wird als FKB in Abb. 5.23 dargestellt. Der dreiachsige Kraftsensor ist gelenkig an die Adapterplatte angebunden, sodass er keine Momente aufnimmt. Zudem ist das Lager entlang der Bohrungsachse verschieblich, weshalb es lediglich Kräfte in der XY-Ebene aufnehmen kann. Die Verbindung des Kraft-/Momentensensors erfolgt über ein Scharnier, das keine Kräfte entlang der X-Achse und keine Momente um die Z-Achse überträgt. Die statische Bestimmtheit wird analog zum Konzept „Greybox“ mit folgender Gleichung ermittelt:

$$f = 6 \cdot \sum_{k=1}^{n} k - \left[\sum_{i=1}^{n} a + \sum_{j=1}^{n} v \right] \tag{5.3}$$

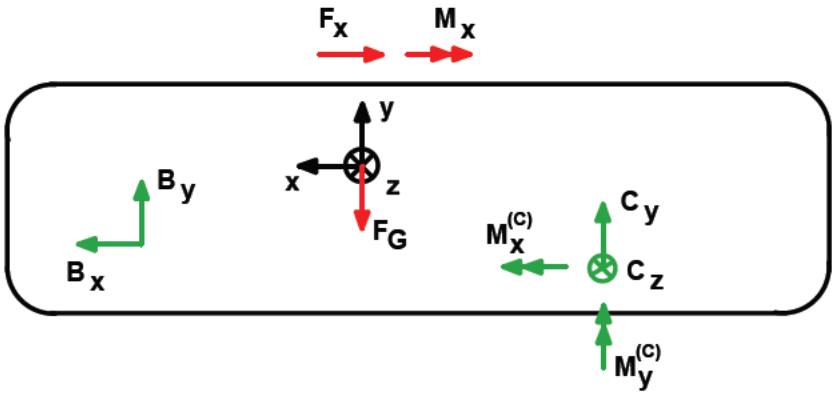


Abbildung 5.23: Freikörperbild des Konzepts „Weiterentwicklung“

Das untersuchte System besteht aus zwei Körpern: der Waffe mit starr verbundener Adapterplatte sowie dem Scharnier. Daraus resultiert eine Körperanzahl k = 2. Das Festlager nimmt Kräfte in der XY-Ebene auf, daher beträgt seine Wertigkeit a =2. Die Verbindungen zwischen Scharnier und Momentensensor sowie zwischen Adapterplatte und Scharnier lassen jeweils ein Moment um die Z-Achse zu und weisen daher eine Wertigkeit von a = 5, bzw. v = 5 auf. Somit ergibt sich:

$$f = 6 \cdot 2 - (2 + 5 + 5) = 0 \tag{5.4}$$

Das untersuche System wurde hiermit als statisch bestimmt identifiziert.

Detail A - Schraubverbindung Adapterplatten/Waffe

Anders die Adapterplatten des Konzepts „Greybox“ werden die Adapterplatten in diesem Konzept direkt mit der Waffe verspannt und auf die Hülsen verzichtet. Durch die Passschraube wird die Position der Waffe relativ zu den Adapterplatten festgelegt. Dargestellt ist die Schraubverbindung in Abb. 5.24 über dem Bolzen (12).

Detail B - Anbindung dreiachsiger Kraftsensor

Zur Umsetzung der im Freikörperbild dargestellten Lagerung wird der dreiachsige Kraftsensor auf seiner Unterseite mit der Grundplatte verschraubt. Die Anbindung an die Adapterplatten erfolgt über ein Gelenklager, das mittels eines Bolzens (12) mit Übergangspassung montiert ist. Diese Passung reduziert die unerwünschte Kraftübertragung entlang der Bolzenachse auf ein Minimum. Sollte es infolge von Reibung dennoch zu einer Kraftübertragung entlang der Bohrungsachse kommen, werden diese zusätzlichen Komponenten durch den dreiachsigen Kraftsensor detektiert.

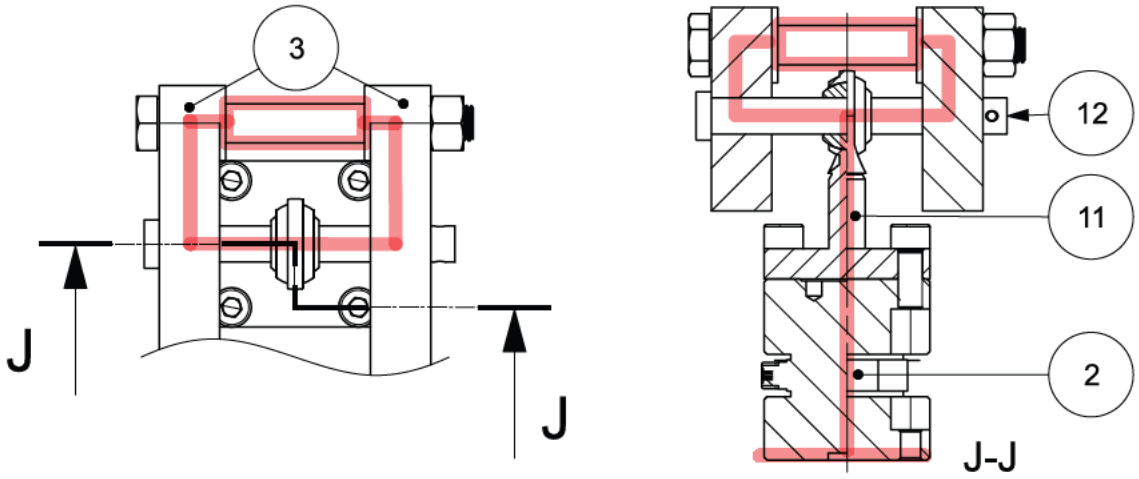


Abbildung 5.24: Anbindung des dreiachsigen Kraftsensors; 2 - Dreiachsiger Kraftsensor, 3 - Adapterplatten, 11 - Gelenklagerbock, 12 - Bolzen

Detail C - Anbindung 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor

Der 6-Komponenten-Kraft-/Momentensensor ist, wie in Abb. 5.25 dargestellt, über ein Scharnier (15) mit den Adapterplatten verbunden. Die gewählte Anbindung schützt den Sensor vor einer Überlastung durch Scherkräfte oder Biegemomente und ermöglicht eine gezielte, belastungsgerechte Messung der verbleibenden Kräfte und Momente.

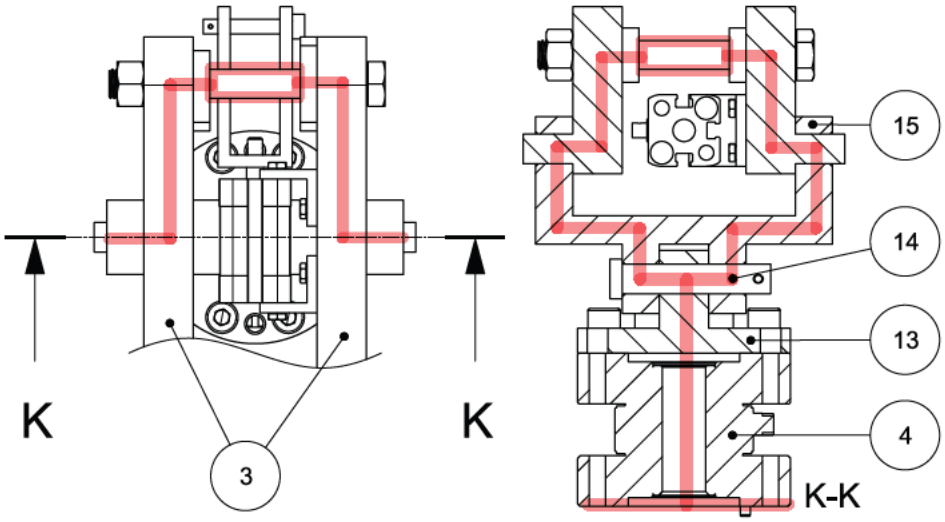


Abbildung 5.25: Anbindung des 6-Komponenten Kraft-/Momentensensors

Detail D - Auslöserbetätigung

Der in Abb. 5.26 dargestellte Pneumatikzylinder (18) wird über die Winkelhalterung (19) zwischen den beiden Adapterplatten montiert und dient zur ferngesteuerten Betätigung des Abzugs. An der verdrehgesicherten Kolbenstange ist eine Gabel (17) befestigt, die um den Abzug greift. Die Betätigung wird durch einen Bolzen (16) ermöglicht, der bei Demontage als Sicherheitselement dient, indem er die Auslösung mechanisch unmöglich macht.

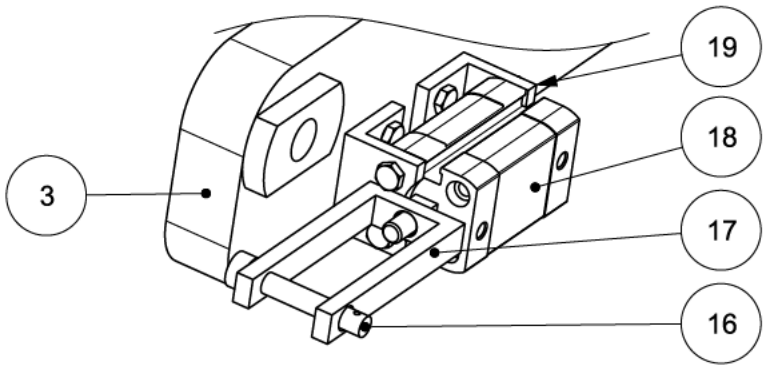


Abbildung 5.26: Detail D des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Abzugsbetätigung

Details E & G - Montage der Stäbe

Die Stäbe, auf denen die Gleitlager geführt werden, werden zur Montage zunächst durch die Passbohrungen des linken Lagerbocks gesteckt (Abb. 5.27) und anschließend mit dem rechten Lagerbock verschraubt (Abb. 5.28). Zur werkzeuggerechten Verschraubung sind die Stäbe vor dem Gewinde mit zwei gegenüberliegenden Schlüsselflächen versehen.

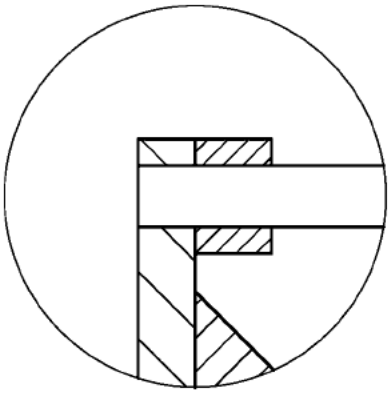


Abbildung 5.27: Detail E des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Aufnahme Rohr links

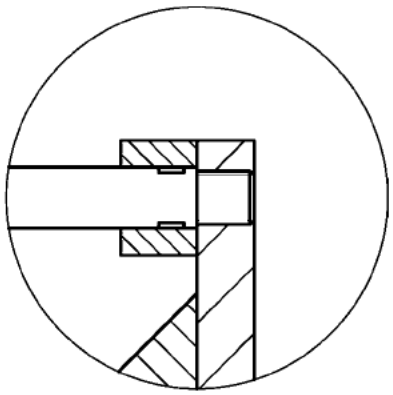


Abbildung 5.28: Detail H des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Aufnahme Rohr rechts

Detail F - Schlittenkonstruktion

Zur Realisierung der translatorischen Bewegungsfreiheit der Waffe werden zwei identische Schlitteneinheiten an den Adapterplatten befestigt. Jeder Schlitten besteht aus zwei Gleitlagereinheiten, einem Abstandshalter (20) sowie einen Passstift (21). Um ein Verkanten der Gleitlager zu vermeiden, werden diese präzise am Absatz des Abstandshalters ausgerichtet. Die relative Positionierung zur Adapterplatte erfolgt formschlüssig über einen Stift (21), wobei leichte Verdrehungen durch die Wahl einer Fest-/Loslagerkombination ausgeglichen werden können. Die auftretenden Kräfte werden über die in Abb. 5.30 dargestellte Schraubverbindung zuverlässig übertragen.

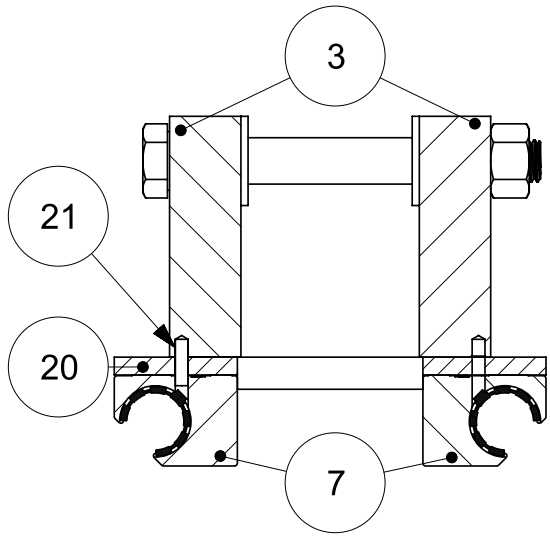


Abbildung 5.29: Detail F des Konzepts „Weiterentwicklung - Zentrierung der Lagerung“

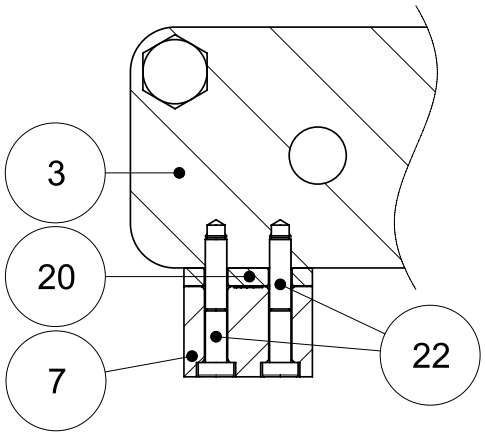


Abbildung 5.30: Detail F des Konzepts „Weiterentwicklung“ - Kraftübertragung

3 - Adapterplatten, 7 - Gleitlagereinheiten, 20 - Abstandshalter, 21 - Passstift, 22 - Zylinderschrauben

Im folgenden Kapitel werden die beiden Feinkonzepte mithilfe der in VDI 2225 Blatt 3 beschriebenen Punktebewertungsmethode systematisch bewertet. Ziel ist es, auf Basis der quantitativen Bewertung ein Konzept für die abschließende Konstruktion und Validierung auszuwählen.

5.6 Auswahl eines Feinkonzepts

Zur Bewertung der Feinkonzepte „Weiterentwicklung“ und „Greybox“ wird die Punktebewertung nach VDI 2225 Blatt 3 herangezogen. Die Auswahl der Bewertungskriterien basiert sowohl auf den Anforderungen als auch auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Grobauswahl. Die Auswertung der Bewertung erfolgt anhand der in Tabelle 5.4 dargestellten Kriterien.

Zur Erzielung eines ausgewogenen Prüfstandes, der eine Balance aller relevanten Bewertungskriterien gewährleistet, wurde die einfache Punktebewertung ausgewählt. Dabei werden die einzelnen Kriterien p_i für jedes betrachtete Konzept mit einer Punktzahl zwischen 0 - unbefriedigend und 4 - ideal bewertet. Signifikante Schwächen einzelner Kriterien sollten durch geeignete Maßnahmen adressiert werden. Die Berechnung der technischen Wertigkeit x erfolgt gemäß der Formel aus der VDI 2225 [23]:

$$x = \frac{p_1 + p_2 + p_3 + ... + p_n}{n \cdot p_{max}} = \frac{\overline{p}}{p_{max}} \tag{5.5}$$

Die Bewertungsskala definiert folgende Einteilungen:

- $x > 0{,}8$: sehr gut
- $0{,}7 < x \leq 0{,}8$: gut
- $x < 0{,}6$: unbefriedigend

Die Bewertung der Ursprungsvarianten der Feinkonzepte erfolgte durch eine interdisziplinäre Gruppe von sechs Experten aus den Bereichen Berechnung, Konstruktion und Testing. Ziel war

es, differenzierte und kritische Rückmeldungen sicherzustellen. Die detaillierten Ergebnisse der Befragung sind in Tabelle 5.4 dargestellt.

Tabelle 5.4: Bewertung der Feinkonzepte

Technische Eigenschaft	Greybox	Weiterentwicklung	Idealausführung
Messgenauigkeit	3	4	4
Sicherheit	3	4	4
Anwendbarkeit von Alternativmessungen	0	1	4
Reproduzierbarkeit	4	3	4
Validierbarkeit	4	2	4
Anzahl der Toleranzketten	3	1	4
Einrichtungsaufwand	3	4	4
Kosten der Sensortechnik	3	0	4
Punktsumme	23	19	32
Technische Wertigkeit = Punktsumme/32	0,72	0,59	1

Die Ergebnisse zeigen, dass beide Konzepte hinsichtlich der Messgenauigkeit und Sicherheit ein vergleichbares Niveau erreichen. Dies ist auf eine steife Konstruktion und einen definierten Kraftfluss durch die Kraftsensoren zurückzuführen. Im Bereich der Anwendbarkeit alternativer Messmethoden schneidet das Konzept „Greybox“ mit null Punkten ab, da keine solchen Messungen vorgesehen sind. Die „Weiterentwicklung“ ermöglicht zumindest eine Messung der Translation und erhält daher einen Punkt, was jedoch nur eine eingeschränkte Erfüllung darstellt. Die Reproduzierbarkeit ist bei der „Greybox“ aufgrund der Verwendung von Passschrauben und einer statischen Adapterplatte besonders hoch, da die Positionierung der Waffe nur bei einem Systemwechsel verändert werden muss. Das Konzept „Weiterentwicklung“ weist innerhalb des Passungsspiels eine ebenfalls reproduzierbare Untersuchung auf, erzielt jedoch eine geringere Bewertung.

Die Validierung des Konzepts „Greybox“ ist aufgrund der flexibel gestalteten Rahmenstruktur vielseitig und anpassbar, wodurch verschiedene Validierungsansätze möglich sind. Im Gegensatz dazu ist das Konzept „Weiterentwicklung“ durch seine kompakte Bauweise in Bezug auf die Validierungsmöglichkeiten eingeschränkt. Zwar könnten zusätzliche Anbindungselemente die Validierung in gewissem Maße erleichtern, jedoch ist der Grad der Flexibilität und Erweiterbarkeit nicht mit dem der Greybox vergleichbar. Die Anzahl der Toleranzketten ist beim Konzept „Weiterentwicklung“ aufgrund der Passmaße der Bohrungs- und Bolzenabstände sowie der Formschlüsse am Scharnier erhöht, was zu deutlich höheren Fertigungskosten führt. Zwar weist auch die „Greybox“ mehrere Toleranzketten auf, jedoch gleichen die in der Konstruktion verwendeten Aluminiumprofile durch ihr gewisses Spiel diese aus. Der Einrichtungsaufwand

ist beim Konzept „Greybox“ durch die Vielzahl der Schraubverbindungen, die bei einem Systemwechsel gelöst und mit definiertem Drehmoment wieder angezogen werden müssen, höher als bei der „Weiterentwicklung“.

Bezüglich der Kosten der Sensortechnik zeichnet sich eine deutliche Differenz ab: Die „Greybox“ nutzt die Sensoren effizient aus und verursacht somit minimale Zusatzkosten. Im Gegensatz dazu überschreiten die für die „Weiterentwicklung“ erforderlichen Sensoren mit geschätzten Anschaffungskosten von ca. 20.000 € das verfügbare Budget von 15.000 € deutlich. Unter der Annahme, dass die Sensorik bereits vorhanden wäre, würde sich die Kostenbewertung für das Konzept „Weiterentwicklung“ auf den Maximalwert verbessern, was zu einer Erhöhung der technischen Wertigkeit auf einen Wert von 0,72 (entsprechend 23 Punkten) führen würde. Dadurch reduziert sich der Abstand zum Konzept „Greybox“ auf null, was eine eindeutige Entscheidung erschwert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Konzept „Greybox“ bereits ohne gezielte Optimierung konstruktiv eine hohe technische Wertigkeit erzielt. Dies ist im Wesentlichen auf den modularen Aufbau mit Aluminiumprofilen zurückzuführen, welche eine kostengünstige Beschaffung, hohe geometrische Steifigkeit, geringe Toleranzketten im Betrieb sowie eine einfache Integration von Adapterlösungen ermöglichen. Die daraus resultierende Flexibilität erlaubt zudem eine effiziente Anpassung an unterschiedliche Prüfszenarien. Dem gegenüber steht das Konzept „Weiterentwicklung“, das aufgrund seiner komplexeren Bauweise mehrere signifikante Nachteile aufweist. Hierzu zählen unter anderem hohe Sensorkosten, ein erhöhter Validierungsaufwand infolge notwendiger Demontagen bei Systemwechseln sowie zusätzliche Toleranzketten. Zwar könnte der Kostenfaktor durch die bereits vorhandene Sensorik theoretisch entfallen, dennoch bleiben weitere Schwächen bestehen, die sich nicht durch einfache konstruktive Maßnahmen beheben lassen.

In der Gesamtschau erfüllt das Konzept „Weiterentwicklung“ damit nicht die Anforderungen an ein ausgewogenes und anpassbares Gesamtsystem. Insbesondere die mehrfach mit niedrigen Punktwerten bewerteten Kriterien stehen dem Ziel eines balancierten Prüfstandes entgegen. Aus diesen Gründen wird das Konzept „Greybox“ zur weiteren Ausarbeitung und Validierung ausgewählt.

6 Validierung des Feinkonzepts „Greybox“

Die Validierung des Feinkonzepts „Greybox“ erfolgt in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten. Zunächst wird die Betriebssicherheit durch eine D-FMEA sowie eine Belastungsanalyse der Sensoren überprüft. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden gegebenenfalls konstruktive Anpassungen vorgenommen. Anschließend erfolgt eine systematische Überprüfung der Anforderungserfüllung anhand der zu Beginn erstellten Anforderungsliste. Abschließend wird ein Konzept zur experimentellen Verifikation der geforderten Messgenauigkeit erarbeitet.

6.1 Design-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (D-FMEA)

Da die Kosten zur Fehlerbehebung mit fortschreitendem Entwicklungsstand exponentiell steigen, wird die Design-FMEA (D-FMEA) bereits in einer frühen Phase der Konstruktion durchgeführt. Ziel dieser Methode ist es, potenzielle Konstruktionsfehler systematisch zu identifizieren und durch gezielte Maßnahmen zu vermeiden, bevor kostenintensive Fertigungen starten oder Retouren erfolgen. Die Analyse konzentriert sich ausschließlich auf konstruktive Fehlerquellen und basiert auf den zuvor ermittelten Systemfunktionen der hierarchischen Funktionsstruktur. Für jede Teilfunktion werden mögliche Fehlerarten, deren Ursachen sowie die Auswirkungen auf das Gesamtsystem betrachtet [24].

Im Unterschied zur klassischen FMEA wird in der vorliegenden Arbeit auf die Verwendung der Risikoprioritätszahl verzichtet. Stattdessen kommt ein modifiziertes Bewertungsschema zum Einsatz, das auf dem sogenannten TOP-Prinzip basiert. Dabei werden empfohlene Maßnahmen den Kategorien technisch (T), organisatorisch (O) oder personenbezogen (P) zugeordnet. Diese Einteilung folgt dem in sicherheitsgerichteten Anwendungen etablierten Grundsatz, dem zufolge technische Maßnahmen stets gegenüber organisatorischen oder personenbezogenen Schutzmaßnahmen zu bevorzugen sind. Durch diese Kategorisierung wird eine strukturierte Ableitung von Handlungsempfehlungen ermöglicht und zugleich eine Einschätzung des Verhältnisses technischer zu organisatorischen und personenbezogenen Maßnahmen gegeben.

Die FMEA-Tabellen werden im Querformat dargestellt, um die Übersichtlichkeit der umfangreichen Inhalte sicherzustellen. Vorab erfolgt jeweils eine inhaltliche Zusammenfassung der identifizierten Risiken und empfohlenen Maßnahmen.

6.1.1 Kräfte- und Momentenmessung

Die Analyse aus Tabelle 6.1 zeigt, dass unkontrollierte Krafteinleitungen das Risiko einer Überlastung der Sensorik bergen. Um teure Beschädigungen zu vermeiden, wird empfohlen, gezielt Sollbruchstellen vorzusehen. Stoßartige, wiederholte Belastungen können darüber hinaus zum Lösen von Schraubverbindungen führen. Dem kann durch den Einsatz stoffschlüssiger Schraubensicherungen sowie geeigneter Nachziehintervalle entgegengewirkt werden. Zudem ist eine exakte Positionierung der Kraftsensoren erforderlich, um die gewünschte Messgenauigkeit sicherzustellen. Hierfür sollten formschlüssige Anschläge vorgesehen werden, welche eine definierte Montageposition gewährleisten.

6.1.2 Kräfte- und Momente leiten

Wie bei der vorherigen Funktion besteht auch hier das Risiko, dass sich durch wiederholte Belastungen Schraubverbindungen des Prüfrahmens lösen (vgl. Tabelle 6.2). Daher sind auch in diesem Fall stoffschlüssige Schraubensicherungen vorzusehen. Ein Bruch der Aluminiumprofile ist bei Überlastungen ebenfalls möglich. Um dies zu vermeiden, sollten die zulässigen

Maximallasten ausgewiesen und durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden, dass die Rahmenstruktur erst nach den Sollbruchstellen versagt. Zudem beeinflusst die Positioniergenauigkeit der Bauteile die Messgenauigkeit wesentlich. Zur Optimierung sind entweder präzisere Profile oder nachträglich integrierte Messsysteme zu verwenden.

6.1.3 Waffe aufnehmen

Bei der Aufnahme der Waffe führt die Verwendung zweier Passbohrungen dazu, dass bereits geringe Toleranzabweichungen im Bohrungsabstand der Waffenaufnahme zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Montage führen können. Dies kann im ungünstigsten Fall die Versuchsdurchführung verhindern. Da der Kraftschluss den wesentlichen Beitrag zur Kraftübertragung leistet, wird empfohlen, die weniger beanspruchte Bohrung durch ein horizontales Langloch zu ersetzen. Hierdurch bleibt die horizontale Ausrichtung der Waffe gewährleistet, während zugleich Fertigungs- und Montagetoleranzen effektiv kompensiert werden können (vgl. Tabelle 6.3).

6.1.4 Abzug betätigen

Während eine ausbleibende Betätigung des Abzugs zu Verzögerungen im Versuchsablauf und erhöhten Kosten führen kann, birgt eine unbeabsichtigte fortlaufende Betätigung erhebliche sicherheitstechnische Risiken – insbesondere bei bestehenden Gefährdungspotenzialen. Um diesen Szenarien vorzubeugen, wird die Integration eines Not-Aus-Schalters in der Tabelle 6.4 empfohlen. Zusätzlich sollte die Aktorik durch ein Schutzblech gegen mechanisches Verklemmen, beispielsweise durch ausgeworfene Kettenglieder, abgesichert werden.

6.1.5 Leiten und Auffangen der Kettenglieder

Fehler innerhalb der Funktion „Leiten und Auffangen der Kettenglieder“ stellen im Gegensatz zu den bisher betrachteten Funktionen kein direktes Sicherheitsrisiko dar. Dennoch kann es durch fehlerhafte Ausführung zur Nichterfüllung der Anforderung hinsichtlich der Auffangrate kommen. Aus diesem Grund wird in der D-FMEA aus Tabelle 6.5 empfohlen das ursprüngliche Leitblech durch ein an der Grundplatte befestigtes Netz zu ersetzen. Dadurch wird verhindert, dass das Einschlagen der Kettenglieder fälschlicherweise im Kraft-Zeit-Verlauf erfasst wird.

Tabelle 6.1: D-FMEA zur Teilfunktion „Kräfte-/Momente messen“

Unterfunktion	Fehlerart	Fehlerauswirkung	ID	Fehlerursache	Schutzmaßnahme T	Schutzmaßnahme O	Schutzmaßnahme P	Empfohlene Maßnahme
Kraftaufnahme durch den Kraftsensor	Sensor beschädigt	Finanzieller Schaden durch Reparatur und den Ausfall des Versuches	1.1	Unzulässige Belastung	✗			Sensoren im FEM-Modell berücksichtigen
						✗		Auslastung des Sensors im Auswerteskript anzeigen
Kräfte-/Momente leiten	Gelenklager verklemmen	Nicht messbare Momentenübertragung	1.2	Kollision des Gelenklagers mit Gabel	✗			Verformung anhand einer FEM untersuchen
	Lösen der Schraubverbindungen	Unkontrollierte Bewegung der Waffe	1.3	Vorspannkraftverlust durch wiederholende und stoßartige Belastung	✗			Stoffschlüssige Schraubensicherung für dauerhafte Schraubverbindungen
Belastungen messen	Messabweichung bei Berechnung der resultierenden Kräfte-/Momente	Nichterfüllung der Anforderung zur Messgenauigkeit	1.4	Reibmomente im Gelenklager	✗			Belastung konstruktiv maximieren um Einfluss des Losbrechmomentes zu verringern
					✗			Verspannung der Lagerung durch Einbau verhindern, indem die Sensoren an drei, statt vier Punkten angebunden werden
	Lösen der Schraubverbindungen	Unkontrollierte Bewegung der Waffe	1.5	Vorspannkraftverlust durch wiederholende und stoßartige Belastung	✗			Stoffschlüssige Schraubensicherung für dauerhafte Schraubverbindungen

Tabelle 6.2: D-FMEA zur Teilfunktion „Kräfte-/Momente leiten“

Unterfunktion	Fehlerart	Fehlerauswirkung	ID	Fehlerursache	Schutzmaßnahme T	Schutzmaßnahme O	Schutzmaßnahme P	Empfohlene Maßnahme
Kräfte-/Momente leiten	Qualitative und quantitative Abweichung des Kraft-Zeitverlaufes	Nichterfüllung der Anforderung zur Messgenauigkeit	2.1	Unzureichende Steifigkeit der verwendeten Profile	✗			Kraftübertragungsverhalten mit FEM untersuchen und ggf. Querschnitt anpassen
	Lösen der Schraubverbindungen	Unkontrollierte Bewegung der Waffe	2.2	Vorspannkraftverlust durch wiederholende und stoßartige Belastung	✗			Stoffschlüssige Schraubensicherung für dauerhafte Schraubverbindungen
Kräften-/Momenten standhalten	Bruch der Aluminiumprofile	Unkontrollierte Bewegung der Waffe	2.3	Ermüdungsbruch der Profile		✗		Maximale Schusszahl abschätzen und angeben
					✗			Mit Messergebnissen Betriebssicherheit nachweisen
Position der Waffe definieren	Positionsabweichung vom CAD	Nichterfüllung der Anforderung zur Messgenauigkeit	2.4	Unpräzise Fertigung-/Montage	✗			Genutete Grundplatte durch gebohrte Stahlplatte ersetzen und Montagelehren konstruieren, um eine Zentrierung zu erreichen

Tabelle 6.3: D-FMEA zur Teilfunktion „Waffe aufnehmen“

Unterfunktion	Fehlerart	Fehlerauswirkung	ID	Fehlerursache	Schutzmaßnahme T	O	P	Empfohlene Maßnahme
Waffe aufnehmen	Montage der Passschrauben nicht möglich	Versuchsdurchführung unmöglich	3.1	Kein Toleranzausgleich vorgesehen	✗			Bohrung der geringer belasteten Passschraube durch horizontales Langloch ersetzten

Tabelle 6.4: D-FMEA zur Teilfunktion „Abzug betätigen“

Unterfunktion	Fehlerart	Fehlerauswirkung	ID	Fehlerursache	Schutzmaßnahme T	O	P	Empfohlene Maßnahme
Hubmagnet ein-/ausfahren	Kolbenstange fährt nicht ein/aus	Unkontrolliertes Feuern der Waffe	4.1	Fehlerhaftes Steuersignal	✗			Not-Aus-Schalter
			4.2	Kettenglied verklemmt Kolbenstange	✗			Aktorik mit Schutzblech von Kettengliedern abschirmen

Tabelle 6.5: D-FMEA zur Teilfunktion „Leiten und Auffangen der Kettenglieder und Hülsen“

Unterfunktion	Fehlerart	Fehlerauswirkung	ID	Fehlerursache	Schutzmaßnahme T	Schutzmaßnahme O	Schutzmaßnahme P	Empfohlene Maßnahme
Kettenglieder leiten	Kettenglieder erreichen nicht die Auffangbox	Nichterfüllung der Anforderung zur Auffangrate	5.1	Hohe kinetische Energie löst Formschluss des Leitblechs	✗			Eine optionale Verschraubung vorsehen
	Ungewollte Messung des Kontaktes Leitblech/Kettenglieder	Verfälschung des Messergebnisses	5.2	Leitblech an Prüfrahmen befestigt	✗			Leitblech an Grundplatte befestigen
Hülsen sammeln	Hülsen springen aus Auffangbox	Nichterfüllung der Anforderung zur Auffangrate	5.3	Hohe Restenergie beim Eintritt	✗			Hülsen über Labyrinth am Herausspringen hindern

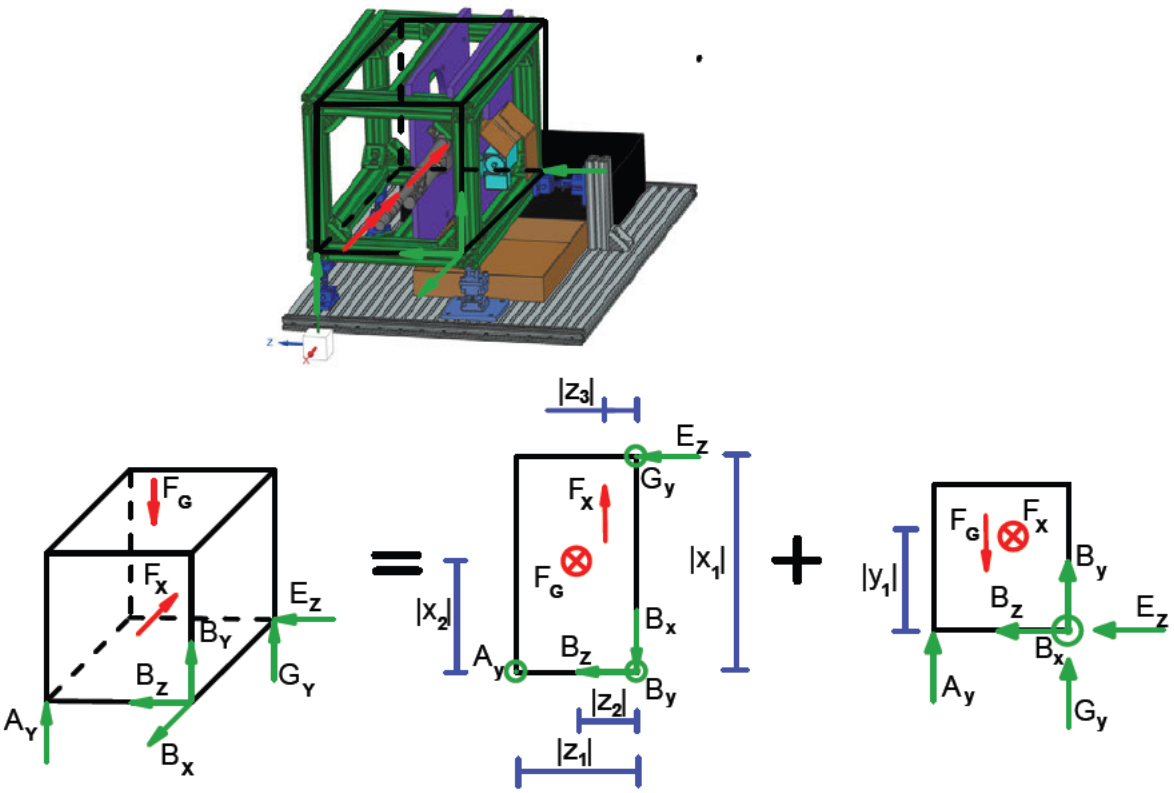


Abbildung 6.1: Freikörperbild des Feinkonzepts „Greybox“

Ausgehend vom dargestellten Freikörperbild lassen sich die Sensorbelastungen durch das Lösen des vektoriellen Momenten- und Kräftegleichgewichts bestimmen:

$$\sum \vec{M}^{(B)} = 0 = \vec{x}_1 \times (\vec{G}_y + \vec{E}_z) + \vec{z}_1 \times \vec{A}_y + (\vec{y}_1 + \vec{z}_3) \times \vec{F}_x + (\vec{x}_2 + \vec{z}_2) \times \vec{F}_G \tag{6.1}$$

$$\sum \vec{F} = 0 = \vec{A}_y + \vec{B} + \vec{E}_z + \vec{G}_y + \vec{F}_x + \vec{F}_G \tag{6.2}$$

Aus dem CAD, sowie den Anforderungen ergeben sich die folgenden Werte für die entsprechenden Formelzeichen (Fz):

Tabelle 6.6: Werte der Formelzeichen aus Gleichung (6.1) und Gleichung (6.2)

Fz	$\lvert\vec{F}_x\rvert$	$\lvert\vec{F}_G\rvert$	$\lvert\vec{x}_1\rvert$	$\lvert\vec{x}_2\rvert$	$\lvert\vec{y}_1\rvert$	$\lvert\vec{z}_1\rvert$	$\lvert\vec{z}_2\rvert$	$\lvert\vec{z}_3\rvert$
Wert	6500 N	303 N	600 mm	160 mm	279 mm	300 mm	140 mm	80 mm

Durch das Einsetzen dieser Werte in die Gleichungen (6.1) und (6.2) ergeben sich die resultierenden Reaktionskräfte der Sensoren zu:

Tabelle 6.7: Sensorbelastungen im Feinkonzept „Greybox“

Sensorbelastung	$\vec{A}_y$	$\vec{B}_x$	$\vec{B}_y$	$\vec{B}_z$	$\vec{E}_z$	$\vec{G}_y$
Kraft [N]	141	6500	-2942	-867	867	3103

Der dreiachsige Kraftsensor an Position B erfährt in dieser Konfiguration die höchsten Reaktionskräfte. Zur Reduzierung der Belastung wird eine Umpositionierung der Sensoren B und C zum Punkt $P(x_1|z_1)$ sowie eine Ausrichtung des Sensors E entlang der globalen x-Achse vorgenommen. Dadurch ergeben sich die folgenden Gleichgewichtsbedingungen mit E_x anstelle von E_z:

$$\sum \vec{M}^{(B)} = 0 = \vec{x}_1 \times (\vec{G}_y + \vec{E}_x) + \vec{z}_1 \times \vec{A}_y + (\vec{y}_1 + \vec{z}_2) \times \vec{F}_x + (\vec{x}_2 + \vec{z}_3) \times \vec{F}_G \tag{6.3}$$

$$\sum \vec{F} = 0 = \vec{A}_y + \vec{B} + \vec{E}_x + \vec{G}_y + \vec{F}_x + \vec{F}_G \tag{6.4}$$

Die entsprechenden Reaktionskräfte sind in Tabelle 6.8 dargestellt:

Tabelle 6.8: Sensorbelastungen im Feinkonzept „Greybox“ nach Anpassung

Sensorbelastung	$\vec{A}_y$	$\vec{B}_x$	$\vec{B}_y$	$\vec{B}_z$	$\vec{E}_x$	$\vec{G}_y$
Kraft [N]	-2962	4767	161	0	1733	3103

Da die resultierende Kraft nicht im Koordinatenursprung des Sensors angreift, ist zur Beurteilung der tatsächlichen Belastung eine Umrechnung auf den Sensorursprung erforderlich. Grundlage hierfür bildet das Freikörperbild aus Abb. 6.2.

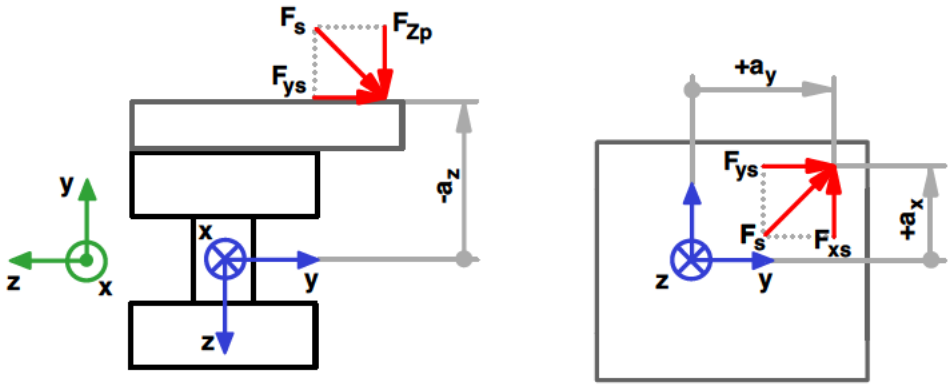


Abbildung 6.2: Freikörperbild des Sensors; Angelehnt an [25]

Die Belastung des Sensors werden gemäß Datenblatt [25, S. 12 ff.] wie folgt berechnet:

$$\begin{pmatrix} M_{xs} \\ M_{ys} \\ M_{zs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{xs} \\ F_{ys} \\ F_{Zp} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \tag{6.5}$$

$$M_{Bs} = \sqrt{M_{xs}^2 + M_{ys}^2} \tag{6.6}$$

$$F_{Ss} = \sqrt{F_{xs}^2 + F_{ys}^2} \tag{6.7}$$

Zur Bestimmung der Belastung werden die lokalen Sensorachsen mit dem in grün dargestellten globalen Koordinatensystem überlagert (vgl. Abb. 6.2). Unter Berücksichtigung des negativen Schnittufers ergibt sich folgende Transformation:

$$\begin{pmatrix} F_{xs} \\ F_{ys} \\ F_{Zp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_z \\ B_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4767 \\ 0 \\ 161 \end{pmatrix} \text{N} \tag{6.8}$$

Der Hebelarmvektor wurde aus dem CAD-Modell extrahiert:

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0{,}058 \end{pmatrix} \text{m} \tag{6.9}$$

Einsetzen ergibt:

$$M_{Bs} = 276\,\text{Nm}, \quad F_{Ss} = 4767\,\text{N} \tag{6.10}$$

Da das Biegemoment den Grenzwert des Sensors (Typ 9347C, 250 Nm) überschreitet, sind konstruktive Maßnahmen zur Entlastung erforderlich. Mögliche Lösungsansätze sind:

- Ausrichtung des Sensors koaxial zur globalen x-Achse,
- Reduktion der Kraft A_x durch Optimierung der Sensorposition, z. B. durch Halbierung des Abstands z_1,
- Reduktion des Hebelarms a_z.

Die effektivste Maßnahme stellt die koaxiale Ausrichtung des Sensors zur Rückstoßrichtung dar, da dadurch die Kraft B_x keine Biegebelastung mehr erzeugt. In der weiteren Berechnung wird diese Ausrichtung berücksichtigt. Es ergeben sich:

$$M_{Bs} = 9{,}4\,\text{Nm}, \quad F_{Ss} = 161\,\text{N} \tag{6.11}$$

6.2.1 Normierung der Belastungen

Zur Beurteilung der Belastung im Verhältnis zur Sensorgrenze werden die Werte anschließend auf die maximal zulässigen Belastungen normiert:

$$\begin{pmatrix} F_{Ss\%} \\ F_{Zp\%} \\ M_{B\%} \\ M_{z\%} \\ F_{Zv\%} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{22\,\text{kN}} & \frac{1}{100\,\text{kN}} & \frac{1}{250\,\text{Nm}} & \frac{1}{250\,\text{Nm}} & \frac{1}{100\,\text{kN}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{Ss} \\ F_{Zp} \\ M_{Bs} \\ M_{zs} \\ F_{Zv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}7 \\ 4{,}8 \\ 3{,}7 \\ 0 \\ 70 \end{pmatrix} \% \tag{6.12}$$

Im Folgenden werden die zwei im Datenblatt genannten Sicherheitsbedingungen überprüft.

6.2.2 Sicherheitsbedingung 1: Kombinierte Belastung

Die erste Bedingung stellt sicher, dass die kombinierte Wirkung aus Querkräften und Momenten die zulässige Vertikalkraft nicht übersteigt:

$$F_{S\%} + M_{z\%} + \frac{1}{2} M_{B\%} \leq F_{Zv\%} + F_{Zp\%} \quad \Rightarrow \quad 2{,}6\,\% < 74{,}3\,\% \quad \checkmark \tag{6.13}$$

6.2.3 Sicherheitsbedingung 2: Biegemoment am Arbeitspunkt

Zusätzlich muss das Biegemoment gemäß Spezifikation in Abhängigkeit vom Arbeitspunkt ($F_{Z\%}$) kleiner als ein variabler Grenzwert sein:

$$M_{Bs\%} \leq 100\% - 2 \cdot |50\% - (F_{Zv\%} + F_{Zp\%})| \quad \Rightarrow \quad 3{,}7\,\% \leq 50{,}5\,\% \qquad ✓ \tag{6.14}$$

Die Analyse zeigt, dass beide Sicherheitsbedingungen mit großem Abstand eingehalten werden. Aufgrund der hohen Axialkraft, die beim nächstkleineren Sensormodell (zulässig: 4 kN) zu einer Überlast führen würde [26], ist dennoch kein kleinerer Sensor einsetzbar.

Auch bei den einachsigen Sensoren erscheint ein Modellwechsel nicht sinnvoll: Obwohl die maximale Belastung (+3,1 kN) durch geometrische Anpassungen gesenkt und innerhalb der Toleranz des nächstkleineren Sensors (±3 kN) liegen kann, wäre dieser teurer [27] [28]. Zudem würde durch die geringere Reserve die Robustheit des Prüfstands gegenüber Lastspitzen reduziert werden.

6.3 Anforderungsabgleich

Abschließend erfolgt die systematische Überprüfung, ob die in Kapitel 3 definierten Anforderungen durch das entwickelte System erfüllt werden. Hierzu wird die Anforderungsliste chronologisch durchgearbeitet. Der jeweilige Erfüllungsgrad wird dabei wie folgt gekennzeichnet:

- ✓ für vollständig erfüllte Anforderungen,
- ✗ für nicht erfüllte Anforderungen,
- **O** für Anforderungen, die mit der finalen Konstruktion umgesetzt werden,
- **?** für Anforderungen, deren Erfüllung durch praktische Versuche zu validieren ist.

Im folgenden Abschnitt werden die erfüllten Anforderungen individuell belegt. Die Anforderungen, deren Erfüllung zum aktuellen Stand nicht vollständig nachgewiesen werden kann, sind anschließend in Tabelle 6.9 zusammengefasst.

Erfüllte Anforderungen

Im Folgenden wird die Erfüllung der einzelnen Anforderungen detailliert dargestellt.

1. Ziel der Arbeit und Messergebnisse:
   - 1.1 Das vollständige, mechanische Modell des Konzepts „Greybox“ wird im Kapitel 5.5: Gestaltung der Feinkonzepte vorgestellt. ✓
   - 1.2 Die Schnittlasten werden über die Kraftsensoren in jedem Lager erfasst. ✓
   - 1.3 Über die Integration der Beziehung $F = m \cdot a$ lassen sich zeitliche Verlaufsdaten der Translation ermitteln. ✓
   - 1.4 Über die Integration der Beziehung $M = I \cdot \alpha$ lassen sich zeitliche Verlaufsdaten der Rotation ermitteln. ✓

2. Spezifische Prüfstandsanforderungen:
   - 2.1 Das CAD-Modell basiert auf dem MAG58. ✓
   - 2.2 Es müssen ausschließlich die Koordinaten der Bohrungen in der Adapterplatte, sowie die Durchmesser und Längen der Hülsen/Passschrauben angepasst werden. ✓
   - 2.3 Die Einspannung erfolgt ohne Änderung an der Waffe über zwei Bohrungen. ✓

2.4 In der Adapterplatte wurden Aussparungen vorgesehen, um alle Funktionen der Waffe im eingespannten Zustand bedienen zu können. ✓
2.5 Die Auslösung des Abzugs ist mit dem Hubmagneten aus beliebiger Entfernung und ohne direkten Sichtkontakt möglich. ✓
2.6 Die entsprechenden Anforderungen bezüglich IP-Schutzart, Mindesthöhe des Rohres und zu verwendenden Energiequellen wurden ermittelt und erfüllt ✓
2.8 Der Abstand des Rohres zum Boden beträgt 40 cm. ✓

3. Anforderungen an den Betrieb und die Montage:

3.2 Im folgenden Kapitel 6.4: Experimentelle Bestimmung der Messgenauigkeit wird ein entsprechendes Konzept entwickelt. ✓
3.5 Dem CAD ist zu entnehmen, dass ausschließlich zulässige Werkzeuge zur Montage und zum Betrieb des Prüfstandes notwendig sind. ✓

4. Anforderungen an die Sensorik

4.2 Es liegt ein Angebot für die verwendeten Sensoren in Höhe von 13.020 € vor (Anhang D). ✓
4.3 Die Sensoren sind durch Schraubverbindungen zerstörungsfrei demontierbar. ✓

5. Allgemeine Prüfstandsanforderungen:

5.1 Vorläufige Angebote führen zu Materialkosten für den Prüfstand von 1.847,15 €. Die entsprechenden Angebote sind im Anhang E dokumentiert. ✓
5.2 Verschleiß unterliegen ausschließlich die Gelenklager, welche der Norm DIN ISO 12240-4 entsprechen. Sie sind bei SKF [29], Norelem [30] und Mädler [31] verfügbar. ✓
5.3 Die eingesetzten Gelenklager sind wartungsfrei. ✓
5.4 Ein Mindestschutzgrad von IP65 für die Kraftsensoren sowie die Verwendung von Spaltdichtungen bei den Gelenkkopflagern gewährleisten die erforderliche Schutzklasse [32] [26]. ✓

6. Nichtforderungen:

6.1 Es wurde im vorherigen Kapitel 6.2: Belastungsanalyse ausschließlich eine Abschätzung der Sensorbelastung durchgeführt. ✓
6.2 Das mechanische Modell wurde ohne Eingabegeräte umgesetzt. ✓
6.3 Die Waffe wird unabhängig von der vorgesehenen Lafette starr eingespannt und untersucht. ✓

Ausstehende Anforderungserfüllungen

Mehrere Anforderungen konnten im Rahmen des entwickelten Feinkonzepts nicht abschließend geprüft werden und sind daher derzeit nicht als erfüllt (✓) zu bewerten (vgl. Tabelle 6.9). Dies liegt darin begründet, dass die Anforderungsliste für den finalen Prüfstand formuliert wurde, während der Rahmen dieser Arbeit auf die mechanische Konzeptentwicklung begrenzt ist.

Eine explizite Nichterfüllung liegt nur in einem Fall vor: Die ursprünglich gewünschte Begrenzung auf lediglich ein Werkzeug für den Waffenwechsel erwies sich in der praktischen Umsetzung als nicht realisierbar. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurde dieser Wunsch dahingehend angepasst, dass der Einsatz von bis zu drei Werkzeugen zulässig ist.

Im Rahmen der finalen Konstruktion und Integration der elektrischen Komponenten können die Anforderungen an die energie-los Stellung, die Übertragung der Zeitverlaufsdaten sowie an Abtastrate und Stromversorgung überprüft und nachgewiesen werden. Um die Anforderungen an die energie-los Stellung zu erfüllen, ist sicherzustellen, dass der Notausschalter direkt in die Steuerleitung des Hubmagneten integriert wird. So wird gewährleistet, dass mögliche Restkapazitäten der Steuerung die Unterbrechung der Stromversorgung nicht verzögern. Die Anforderungen an die Befestigungsösen müssen nach einer Optimierung der Struktur erneut evaluiert werden, da durch die Massenreduktion die Grenze von 15 kg/Teilkomponente erfüllt werden könnte. Anschließend ist eine Simulation durchzuführen, die bestätigt, dass keine plastische Verformung auftritt.

Tabelle 6.9: Erfüllungsgrad der Anforderungsliste

F/ W/ NF	Anforderungen an den Prüfstand		Erfüllung
	Nr.	Bezeichnung / Beschreibung	
2. Spezifische Prüfstandsanforderungen			
F	2.7	Die Vorrichtung muss einer 0,005 s andauernden halbsinusförmigen Belastung der Waffe mit einer Amplitude von 6,5 kN ohne plastische Verformung standhalten.	**O**
3. Anforderungen an den Betrieb und die Montage			
F	3.1	Alle Zeitverlaufsdaten müssen an einen Laptop übertragen werden können.	**O**
F	3.3	Hülsen und Kettenglieder müssen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % aufgefangen und gesammelt werden.	**?**
F	3.4	Die Auslösevorrichtung muss zu jedem Zeitpunkt energielos gestellt werden können.	**O**
W	3.6	Für den Wechsel der Waffe und des Waffentypens soll maximal ein Werkzeug erforderlich sein.	**✗**
W	3.7	Der Wechsel der Waffe und des Waffentypens soll maximal 15 Minuten beanspruchen.	**?**
4. Anforderungen an die Sensorik			
F	4.1	Das gemessene Signal darf betragsmäßig maximal um 13 % in Amplitude und Phase vom realen Wert abweichen.	**?**
F	4.4	Die Abtastrate der Kraftsensorik muss mindestens 50 kHz betragen.	**O**
5. Allgemeine Prüfstandsanforderungen			
F	5.5	Jede zu tragende Teilkomponente darf maximal 15 kg wiegen oder muss mit Ösen mit einem Mindestdurchmesser von 10 cm ausgestattet sein.	**O**
F	5.6	Als externe Energieversorgung darf ausschließlich eine Stromversorgung von 230 V bei 50 Hz verwendet werden.	**O**

Neben den ausstehenden konstruktiven Aspekten sind weitere Versuche zur Ermittlung der Auffangrate von Patronenhülsen, der Wechselzeit und der Messgenauigkeit erforderlich. Für eine präzise Bestimmung der Montagezeit ist praktische Erfahrung notwendig; daher wird neben der rechnerischen Abschätzung ein experimenteller Versuch empfohlen. Die Montage eines

neuen Waffentyps umfasst die Befestigung von insgesamt 18 Schrauben. Unter der Annahme von jeweils 15 Sekunden pro Schraube (Montage und Demontage) ergibt sich eine Dauer von etwa neun Minuten. Hinzu kommen jeweils eine Minute für das Ein- und Ausheben der Waffe sowie drei Minuten für die Bereitlegung der Werkzeuge, sodass sich insgesamt eine geschätzte Montagezeit von 14 Minuten ergibt. Aufgrund von Unsicherheiten im praktischen Ablauf kann die Anforderung derzeit nicht als erfüllt (✓) eingestuft werden.

Obwohl die im Rahmen der durchgeführten D-FMEA vorgeschlagene Maßnahme, der Wechsel zu einem Auffangnetz, die Auffangwahrscheinlichkeit von Patronenhülsen und Kettengliedern signifikant verbessert hat, ist eine quantitative Bewertung aktuell nicht möglich. Es wird daher empfohlen, die Auffangrate im Zuge erster Versuchsreihen zu dokumentieren, um die Einhaltung dieser Anforderung zu verifizieren. Der Nachweis der geforderten Messgenauigkeit erfolgt gemäß der im folgenden Abschnitt erläuterten Methodik.

6.4 Experimentelle Bestimmung der Messgenauigkeit

Vor der Übergabe des entwickelten Prüfstandes ist eine experimentelle Bestimmung der Messgenauigkeit erforderlich. Voraussetzung hierfür ist die Entwicklung eines Auswertungsprogramms, das in der Lage ist, die gemessenen Lagerreaktionen in resultierende Kräfte und Momente an einem frei wählbaren Punkt im Raum zu transformieren. Auf diese Weise können die Messergebnisse für unterschiedliche Lafettierungen vergleichend herangezogen werden.

Neben verschiedenen mechanischen und elektrischen Störeinflüssen, die potenziell die Messgenauigkeit beeinträchtigen, muss zunächst die Korrektheit der Programmausgabe verifiziert werden. Zu diesem Zweck sollten in einem ersten Schritt statische Messungen durchgeführt werden, um dynamische Fehlerquellen zu eliminieren. Sobald etwaige systematische Fehler ausgeschlossen sind, ist in einem weiteren Schritt die dynamische Messabweichung zu quantifizieren.

6.4.1 Statische Belastung

Im Rahmen der statischen Validierung des Prüfstandes werden folgende Aspekte untersucht:

- Belastung der Kraftsensoren bei der zu erwartenden Maximallast von 6,5 kN
- Abgleich des eingeleiteten Lastfalls mit dem durch das Auswerteskript berechneten Lastfall

Ziel der Versuche zur statischen Messabweichung ist es, potenzielle Fehlerquellen im Auswerteprogramm zu identifizieren sowie mechanische Kollisionen im Bereich der Lagerung auszuschließen. Hierzu sollen sowohl Kräfte als auch Momente aus unterschiedlichen Richtungen in das System eingeleitet werden. Dafür wird der Offset zwischen den aufgebrachten und den gemessenen Lasten prozentual berechnet. Neben den reinen Kräften sind auch statisch aufgebrachte Momente zu untersuchen. Dies erfolgt durch die Erzeugung eines Kräftepaares, bei dem zwei gleich große, jedoch entgegengesetzt gerichtete und nicht kollinear wirkende Kräfte auf das System wirken.

6.4.2 Dynamische Belastung

Zur weiterführenden Validierung der Messgenauigkeit wird das dynamische Verhalten des Prüfstandes untersucht. Im Fokus stehen dabei zwei zentrale Aspekte:

- Analyse der Eigenfrequenz und des Dämpfungsverhaltens der Gesamtkonstruktion
- Bestimmung der betragsmäßigen Messabweichung im Vergleich zum eingeleiteten Lastfall

Die experimentelle Umsetzung erfolgt unter Einsatz eines modalanalytischen Impulshammers, welcher dem Stand der Technik zur Anregung definierter mechanischer Impulse entspricht. Der wesentliche Vorteil dieser Methode liegt in der direkten Integration eines piezoelektrischen Kraftsensors in den Hammerkopf. Dadurch kann die eingeleitete Kraft exakt erfasst und mit den Messergebnissen des Prüfstandes verglichen werden.

Für die Anregung unterschiedlicher Frequenzbereiche stehen austauschbare Schlagspitzen aus Materialien wie Stahl, Kunststoff oder Gummi mit variierender Härte zur Verfügung. Aufgrund des verwendeten Aluminiumprofils der Prüfbox ist jedoch auf die Verwendung von Stahlspitzen zu verzichten, um eine Beschädigung der Konstruktion zu vermeiden. Die Auswertung erfolgt sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich und ermöglicht die Identifikation der Resonanzfrequenz des Prüfstandes sowie die Berechnung der dynamischen Toleranzhülle von 13 %.

6.4.3 Lasteinleitung

Sowohl für die statische als auch für die dynamische Krafteinleitung ist eine präzise Definition der Richtung des Kraftvektors unerlässlich, um eine eindeutige Zuordnung zu den gemessenen Werten zu ermöglichen. Aus diesem Grund ist eine Vorrichtung zu konstruieren, die die Einleitung definierter Kraftvektoren aus unterschiedlichen Richtungen erlaubt. Da diese Anforderung für beide Belastungsarten gilt, kann dieselbe Vorrichtung für statische und dynamische Untersuchungen verwendet werden. Für die Krafteinleitung werden folgende Optionen in Betracht gezogen:

- Manuelle Krafteinleitung
- Krafteinleitung über Seile mit Umlenkrollen und Gewichten
- Eigenkonstruktion mit geführtem Pendel
- Verwendung eines automatisierten Modalhammers

Um zusätzliche Kosten im Rahmen der Validierung zu vermeiden, wird die manuelle Krafteinleitung bevorzugt. Diese verzichtet auf den Einsatz eines klassischen Aktuators. Stattdessen wird der Impulshammer zur Simulation statischer Belastungen manuell gegen den Prüfstand gedrückt und für dynamische Untersuchungen gezielt gegen die Prüfbox geschlagen. Der Zielpunkt der Krafteinleitung ist entweder mit einem markierten Toleranzradius auf der Prüfbox zu kennzeichnen oder nachträglich relativ zur Sensorik zu vermessen. Eine definierte Zielzone erhöht die Reproduzierbarkeit der Krafteinleitung, sodass resultierende Abweichungen bei der Auswertung berücksichtigt werden können.

Auch die Ausrichtung des Impulshammers hat maßgeblichen Einfluss auf das Messergebnis. Ist die Mittelachse der Schlagspitze bei der Krafteinleitung nicht parallel zu einer der Achsen des globalen Koordinatensystems ausgerichtet, entstehen schwer quantifizierbare Kraftkomponenten, welche das Messergebnis verfälschen können. Eine Akkumulation derartiger Toleranzen kann zu einer scheinbaren Nichterfüllung der Anforderungen an die Messgenauigkeit führen, ohne dass diese tatsächlich durch den Prüfstand selbst verursacht wird. In solchen Fällen sollte eine Investition in verbesserte Vorrichtungen zur Validierung in Betracht gezogen werden, um die Anforderungserfüllung eindeutig nachweisen zu können.

Die Krafteinleitung mittels Seilen und Umlenkrollen ist hingegen ausschließlich für statische Belastungsfälle geeignet, da eine Führung des Impulshammers über derartige Mechanismen

nicht praktikabel ist. Wird jedoch eine zusätzliche Vorrichtung zur dynamischen Krafteinleitung notwendig, die für beide Belastungsarten geeignet ist, verliert die seilbasierte Methode ihre Relevanz.

Ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig moderaten Kosten lässt sich durch die Verwendung eines geführten Pendels erzielen. In diesem Fall wird der Modalhammer (ggf. mit Zusatzmassen für statische Belastungen) über das Pendel geführt. Das Pendel kann unabhängig vom Prüfstand montiert und präzise auf den gewünschten Angriffspunkt ausgerichtet werden. Dadurch können definierte Kraftkomponenten parallel zur Y-Achse des globalen Koordinatensystems erzeugt werden. Wird der Drehpunkt des Pendels – wie in Abb. 6.3 dargestellt – entsprechend positioniert, lassen sich zusätzlich Lastanteile in Richtung der Z-Achse einleiten.

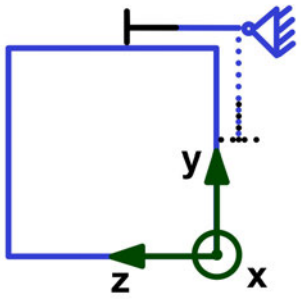


Abbildung 6.3: Pendel zur Führung des Modalhammers

Automatisierte Modalhämmer verfügen über integrierte Pendel- oder Linearantriebe zur definierten Schlagauslösung. Zwar entfällt damit die Notwendigkeit einer eigenen Konstruktion, jedoch ist der finanzielle Aufwand erheblich. Für die ausschließliche Verwendung im Rahmen dieser Arbeit erscheint ein solcher Einsatz wirtschaftlich nicht sinnvoll. Ist jedoch bereits ein entsprechendes System vorhanden, sollte dessen Nutzung aus Gründen der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bevorzugt werden.

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

7 Diskussion der Ergebnisse

In diesem abschließenden Kapitel werden die Schwerpunkte den entsprechenden Kapiteln zugeordnet (Tabelle 7.1) und die Ergebnisse der sechs bearbeiteten Schwerpunkte systematisch zusammengefasst. Anschließend wird das Gesamtergebnis im Fazit bewertet und eingeordnet. Der Ausblick am Ende benennt die noch erforderlichen Schritte und zeigt potenzielle Einsatzmöglichkeiten des Prüfstandes auf.

Ziel ist es, dem Leser einen prägnanten Überblick über die wesentlichen Inhalte der Arbeit zu geben und deren Bedeutung im übergeordneten Kontext zu verdeutlichen.

Tabelle 7.1: Zuordnung der Schwerpunkte zu den Kapiteln

Schwerpunkt	**Kapitel**
Literaturrecherche und Einarbeitung in die Themen Methodisches Konstruieren, Prüfstandsauslegung und Messkonzepte	Kapitel 2
Definition und Diskussion der Anforderungen	Kapitel 3
Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten	Kapitel 4
Umsetzung der Messkonzepte in mechanische Konstruktionen und Diskussion der mechanischen Realisierbarkeit	Kapitel 5
Vergleich der entwickelten Konzepte und Auswahl eines Konzepts	Abschnitt 5.4 Abschnitt 5.6
Validierung des ausgewählten Konzepts	Kapitel 6

7.1 Zusammenfassung anhand der Schwerpunkte

Die Zusammenfassung der einzelnen Schwerpunkte folgt einem einheitlichen Schema: Zunächst wird die jeweilige Zielsetzung des Kapitels dargestellt. Anschließend wird das angewandte Vorgehen skizziert, bevor die zentralen Ergebnisse zusammengefasst werden.

7.1.1 Literaturrechere und Einarbeitung in die Themen Methodisches Konstruieren, Prüfstandsauslegung und Messkonzepte

Ziel dieses Schwerpunktes war es, den Stand der Technik zu ermitteln, um darauf aufbauend die eigene Konstruktion entwickeln zu können. Im ersten Schritt wurde hierzu die Funktionsweise des Maschinengewehrs MAG58 analysiert und die zu erwartenden Rückstoßlasten identifiziert. Es zeigte sich, dass beim MAG58 als zuschießendem Gasdrucklader drei ausgeprägte Maxima im Kraft-Zeit-Verlauf zu erwarten sind. Diese entstehen durch die Umsetzung des Treibladungspulvers sowie durch den Anschlag des Verschlusses gegen das Rohr in der vorderen und gegen den Puffer in der hinteren Position. Diese Annahme konnte im Rahmen der Literaturrecherche durch einen dokumentierten Kraft-Zeit-Verlauf einer realen Messung bestätigt werden. Zusätzliche Effekte wie der sogenannte Jet-Effekt, die deutlich geringere Amplituden

bei höheren Frequenzen aufweisen, verdeutlichen, dass eine Messfrequenz erforderlich ist, die signifikant über der Schussfrequenz der Waffe liegt.

Im Zuge der Recherche wurden drei verschiedene Quellen zur Ermittlung der Rückstoßlasten untersucht. Bewährte Konzepte wie die Schlittenführung zur Messung der Kraft entlang der Rohrachse sowie ein universell einsetzbarer Prüfrahmen zur Einspannung unterschiedlicher Waffensysteme wurden identifiziert und in den weiteren Entwicklungsprozess einbezogen.

Die Analyse ergab jedoch, dass keines der betrachteten Systeme den vollständigen Lastfall erfasst, sondern sich im Wesentlichen auf die Rückstoßkraft entlang der Rohrachse beschränkt. Darauf wurde im Kapitel „Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten“ aufgebaut, indem der Fokus auf Prüfstände zur Ermittlung des vollständigen Lastfalls gelegt wurde.

7.1.2 Definition und Diskussion der Anforderungen

Das Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung stellt gemäß VDI 2221 den ersten Schritt in der Produktentwicklung dar. Ziel ist es, eine belastbare Anforderungsbasis in Form einer Anforderungsliste zu erstellen, die im weiteren Entwicklungsprozess zur Überprüfung der Zielerreichung dient.

Die Ermittlung der Anforderungen basiert auf einem Interview mit dem Auftraggeber, in dem explizite Anforderungen systematisch erfasst und dokumentiert wurden. Ergänzend wurden mithilfe des ermittelten Entwicklungsziels, durch perspektivenbasiertes Denken sowie unter Berücksichtigung der bestehenden Rahmenbedingungen, weitere implizite Anforderungen identifiziert. Die Ergebnisse wurden in einer Anforderungsliste strukturiert zusammengefasst, die im späteren Verlauf zur Überprüfung der Anforderungserfüllung herangezogen wird.

Als Hauptfunktion des zu entwickelnden Prüfstandes wurde die Bestimmung der Kraft-Zeit-Verläufe an den Schnittstellen (Interfaces) des MAG58 festgelegt. Das übergeordnete Entwicklungsziel wurde vom Auftraggeber als vollständiges mechanisches Modell der Prüfvorrichtung definiert.

7.1.3 Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten

Die Entwicklung geeigneter Messkonzepte wurde noch vor der eigentlichen Konzeptionierung vorgenommen, da die Erfassung der Kraft-Zeit-Verläufe an den Interface-Stellen die zentrale Hauptfunktion des zu entwickelnden Prüfstandes darstellt. Diese Messaufgabe wurde im morphologischen Kasten als Teilfunktion „Kraft-/Momentenmessung“ berücksichtigt. Aufgrund ihrer zentralen Bedeutung werden die zugehörigen Messkonzepte in diesem Kapitel detailliert behandelt.

Im ersten Schritt wurde der Hauptlastfall identifiziert: eine Rückstoßkraft F_x, die koaxial zur Rohrachse wirkt, sowie ein Moment M_x, welches durch das gezogene Rohr induziert wird. Die gewonnene Kenntnis zum Lastfall war die Grundlage zur Entwicklung folgender vier Varianten:

- Ein Messkonzept, das mit einem einzigen 6-Komponenten-Kraft-/Momentensensor alle Schnittgrößen erfasst
- Ein Konzept zur Minimierung der Momentenbelastung auf die Sensoren durch gelenkige Anbindungen
- Ein Konzept zur isolierten Erfassung der dominanten Belastungen F_x und M_x mittels schienengeführter Waffe
- Ein Konzept zur indirekten Kraftbestimmung über Beschleunigungssensorik

Das Konzept „Schnittlasten“ sieht eine starre Verbindung zwischen einem 6-Komponenten-Kraft-/Momentensensor und der Waffe vor, wodurch sämtliche Kräfte und Momente direkt durch den Sensor erfasst werden können. Aufgrund der Abhängigkeit der Momentenbelastung von der Sensorposition wurde eine Analyse durchgeführt, um geeignete Einbaupositionen zu ermitteln.

Das Konzept „Greybox“ vermeidet Momentenbelastungen der Sensoren durch gelenkige Anbindung. Die Waffe wird über einen quaderförmigen Prüfrahmen fixiert, der die Untersuchung unterschiedlicher Systeme durch Adapterplatten ermöglicht.

Im Konzept „Isolierte Belastungsermittlung“ wird die Waffe über eine Schiene geführt, sodass ausschließlich die Kraft F_x und das Moment M_x erfasst werden. Durch die Erfassung der dynamischen Kenngrößen der translatorischen Bewegung kann die Rückstoßkraft zusätzlich indirekt über $F = m \cdot a$ bestimmt werden.

Das letzte Konzept setzt auf indirekte Kraftmessung: Die Waffe ist an einem Seil aufgehängt, und ihre Beschleunigungen werden wahlweise durch die Verfahren NAP oder CCS mittels einem bis neun Beschleunigungssensoren gemessen. Die gemessenen Beschleunigungen werden transformiert und zur Berechnung der wirkenden Kräfte und Momente herangezogen.

7.1.4 Umsetzen der Messkonzepte in mechanische Konstruktionen und Diskussion der mechanischen Realisierbarkeit

Das Ziel dieses Schwerpunktes ist die Entwicklung eines Feinkonzepts, das im Kapitel „Validierung des ausgewählten Konzepts“ weiter ausgearbeitet wird.

Der Entwicklungsprozess orientierte sich an dem „Allgemeinen Modell der Produktentwicklung“ der VDI 2221, welches auf die Schwerpunkte dieser Arbeit angepasst wurde. Nachdem im Schwerpunkt „Definition und Diskussion der Anforderungen“ bereits der Schritt „Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung“ bearbeitet wurde, wird in diesem Kapitel mit der Ermittlung der Teilfunktionen durch die Aufstellung einer transformatorischen Funktionsstruktur des Prüfstandes gestartet. Für die folgenden Teilfunktionen wurde der morphologische Kasten als nächstes mit Lösungsprinzipien gefüllt:

- Kraft-/Momentenmessung
- Kräfte/Momente aufnehmen
- Abzug betätigen
- Waffe aufnehmen
- Auffangen / Leiten von Kettengliedern und Hülsen

Aus dem morphologischen Kasten wurden vier Grobkonzepte abgeleitet, die auf den Messkonzepten „Schnittlasten“, „Greybox“ und „Beschleunigungsmessung“ basieren. Die jeweiligen Konzepte wurden durch Handskizzen veranschaulicht. Das Messkonzept „Isolierte Belastungsermittlung“ wurde nicht weiterverfolgt, da es, wie im entsprechenden Kapitel dargelegt, gegenüber bestehenden Systemen keine signifikanten Vorteile bietet.

Aus den entwickelten Grobkonzepten wurden zwei Kandidaten durch einen qualitativen Vergleich ausgewählt und in CAD-Modelle überführt. Aus den beiden Feinkonzepten wurde im Rahmen einer quantitativen Bewertung eines zur weiteren Validierung ausgewählt: das Konzept „Greybox“, das im Folgenden näher beschrieben wird.

Das Grobkonzept „Greybox“ ist eine direkte Umsetzung des gleichnamigen Messkonzepts. Die Waffe wird innerhalb eines Prüfrahmens aus Aluminiumprofilen zwischen zwei Adapterplatten eingespannt. Die resultierenden Kräfte werden über ein Festlager mit einem dreiachsigen

Kraftsensor sowie über drei Pendelstützen mit jeweils einem einachsigen Kraftsensor aufgenommen. Die Umsetzung der Gelenklager erfolgt durch Kombinationen aus Gelenkkopflagern und Gabelaufnahmen. Die Betätigung der Waffe erfolgt über einen bei Rheinmetall erprobten Hubmagneten. Ausgeworfene Hülsen und Kettenglieder werden über ein Leitblech in eine Auffangbox geleitet.

Im nächsten Abschnitt werden die Vergleiche dargestellt, die zur Auswahl dieses Konzepts geführt haben.

7.1.5 Vergleich der entwickelten Konzepte und Auswahl eines Konzepts

Der Schwerpunkt dieses Abschnitts unterteilt sich in zwei Phasen: Zunächst erfolgt der Vergleich und die Auswahl zweier Grobkonzepte zur Weiterentwicklung als Feinkonzepte. Anschließend wird aus den Feinkonzepten ein Konzept für die detaillierte Validierung ausgewählt. Das Vorgehen in beiden Phasen wird im Folgenden erläutert.

Die Bewertung der Grobkonzepte erfolgte mittels eines paarweisen Vergleichs. Dabei wurden die Konzepte hinsichtlich der Kriterien „zu erwartende Messgenauigkeit“, „Betriebssicherheit des Prüfstandes“ sowie „Anpassbarkeit der Prüfvorrichtung an verschiedene Waffensysteme“ gegenübergestellt. Die Anzahl der Präferenzen pro Konzept wurde über alle Kriterien aufsummiert. Zwar erzielte ein Konzept in Summe die höchste Punktzahl, wurde jedoch aufgrund gravierender Mängel von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Das Konzept der Beschleunigungsmessung schied insbesondere wegen erheblicher Sicherheitsdefizite aus.

Die im CAD ausgearbeiteten Feinkonzepte wurden anschließend mithilfe eines 4-Punkte-Vergleichs nach VDI 2225 detaillierter bewertet. Hierfür wurden die Bewertungskriterien aus der Grobbewertung übernommen und durch zusätzliche Aspekte ergänzt, die in der Feinkonzeptphase als relevant eingestuft wurden.

Im Vergleich erreichte das Feinkonzept „Greybox“ mit 23 von 32 möglichen Punkten eine technische Wertigkeit von 0,72. Das konkurrierende Konzept erreichte lediglich 19 Punkte, weist mehrere Bewertungen unter drei Punkten und wurde daher nicht weiter betrachtet. Die Hauptschwäche des „Greybox“-Konzepts liegt in der fehlenden Möglichkeit, alternative Messmethoden einzusetzen. Dieser Nachteil wurde jedoch relativiert, da die Validierbarkeit der Messergebnisse mit vier Punkten bewertet wurde. Somit konnte auf zusätzliche Messverfahren verzichtet werden, ohne die Aussagekraft wesentlich zu beeinträchtigen. Unter dieser Annahme ergibt sich eine bereinigte Gesamtpunktzahl von 23 von 28 Punkten, was nach VDI 2225-3 einer sehr guten Bewertung entspricht.

Aufgrund der bereits hohen technischen Wertigkeit wurde das Feinkonzept „Greybox“ ohne weitere Optimierung in der Konzeptphase validiert. Im Rahmen der finalen Konstruktion kann die technische Wertigkeit weiter gesteigert werden. Eine Zusammenfassung der Validierung folgt im nächsten Abschnitt.

7.1.6 Validierung des ausgewählen Konzepts

Ziel der Validierung des Konzepts „Greybox“ ist es, potenzielle Fehlerquellen, die Sensorbelastung sowie die Erfüllung der gestellten Anforderungen systematisch zu untersuchen. Darüber hinaus wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem die Messgenauigkeit experimentell überprüft werden kann.

Zur Identifikation potenzieller Fehlerquellen und Ableitung geeigneter Maßnahmen wurde eine D-FMEA durchgeführt. Die Belastungsanalyse erfolgte gemäß den Angaben im Sensorhand-

buch und hatte das Ziel, die resultierenden Kräfte und Momente im Sensorzentrum zu ermitteln. Die Anforderungserfüllung wurde anhand der zuvor erstellten Anforderungsliste überprüft und durch entsprechende Nachweise belegt. Zur Bewertung der Messgenauigkeit wurde zwischen statischer und dynamischer Kalibrierung unterschieden und jeweils ein geeignetes Validierungsverfahren vorgeschlagen.

Im Rahmen der D-FMEA ergaben sich nur wenige, jedoch relevante Maßnahmen: Zur Vermeidung von Lockerungen infolge stoßartiger Lasten wird der Einsatz einer stoffschlüssigen Schraubensicherung empfohlen. Das ursprünglich vorgesehene Leitblech sollte durch ein engmaschiges Netz ersetzt werden, um die kinetische Energie von Hülsen und Kettengliedern besser aufzunehmen. Darüber hinaus vereinfachen Montageanschläge die Handhabung, während das Zusammenfassen zweier Pendelstützen Eigenspannungen im Prüfrahmen reduziert.

Die Belastungsanalyse zeigte, dass in der ursprünglichen Konfiguration eine Überlastung einzelner Sensoren zu erwarten ist. Dieses Problem lässt sich jedoch durch eine Anpassung der Sensorausrichtung beheben.

Im Rahmen der Überprüfung der Anforderungserfüllung ergab sich, dass es lediglich zu einer Nichterfüllung kam. Durch das perspektivenbasierte Denken aus Sicht des Bedieners wurde ermittelt, dass es wünschenswert sei, wenn lediglich ein Werkzeug zum Betrieb des Prüfstandes nötig sei. Dieser Wunsch konnte nicht ohne unverhältnismäßigen Aufwand umgesetzt werden. Weitere Nachweise zur Anforderungserfüllung stehen aus. Dazu zählt ein umfassender Festigkeitsnachweis, sowie Versuche zur Auffangrate von Hülsen und Kettengliedern oder der Messgenauigkeit.

Für die experimentelle Validierung der Messgenauigkeit wird der Einsatz eines Impulshammers in Kombination mit einem Pendel vorgeschlagen. Durch einen definierten Schlag auf den Prüfrahmen lässt sich das Sensorsignal mit dem bekannten Impuls des Hammers vergleichen und die Messgenauigkeit des Systems reproduzierbar beurteilen.

7.2 Fazit und Ausblick

Abschließend werden in diesem Abschnitt die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und kritisch reflektiert. Darüber hinaus werden die zentralen Herausforderungen im Projektverlauf benannt sowie ein Ausblick auf die zukünftige Verwendung und Weiterentwicklung des Prüfstandes gegeben.

Das vom Auftraggeber formulierte Ziel – die Entwicklung eines vollständigen mechanischen Modells einer Prüfvorrichtung zur Bestimmung der Kraft-Zeit-Verläufe an den Schnittstellen des MAG58 – wurde im Rahmen dieser Arbeit vollumfänglich erreicht. Gestützt auf die Literaturrecherche wurde ein innovatives Prüfstandskonzept methodisch entwickelt. Der Entwicklungsprozess orientiert an einer adaptierten Version des Allgemeinen Modells der Produktentwicklung nach VDI 2221. Die zu Beginn erstellte Anforderungsliste diente während des gesamten Entwicklungsprozesses als verbindlicher Maßstab zur Überprüfung der Zielerfüllung. Aus vier Grobkonzepten wurden zwei Feinkonzepte CAD-basiert detailliert ausgearbeitet und verglichen. Das daraus ausgewählte Konzept „Greybox“ basiert auf einem statisch bestimmt gelagertem Prüfrahmen, der sich durch seine Modularität zur Untersuchung verschiedenster Waffensysteme eignet. Im Rahmen der Validation wurde ergänzend ein Konzept zur experimentellen Bestimmung der Messgenauigkeit erarbeitet.

Die größte Herausforderung dieser Arbeit bestand in der Entwicklung einer geeigneten und zugleich universellen Anbindung der Waffe an die Prüfvorrichtung. Ziel war es, sämtliche zu

messende Kräfte entlang definierter Messachsen zuverlässig über die Sensorik erfassen zu können. Hierzu wurden verschiedene Konzepte untersucht – von einer vollständig gelenklosen Anbindung über gelenkig geführte Varianten bis hin zu einem freibeweglichen Aufbau mit Beschleunigungssensoren.

Die Anforderungen an die Kraftmessung ließen zunächst Interpretationsspielraum hinsichtlich des Umfangs der zu erfassenden Belastungen. Im Verlauf der Arbeit wurde entschieden, alle Rückstoßkomponenten zu erfassen und nicht nur die dominanten Kräfte. Diese Auslegung führte zu einer erhöhten Komplexität in der Konstruktion, insbesondere durch den Einsatz mehrerer Sensoren (bis zu sechs anstelle eines einzelnen), was sowohl die Kosten als auch den konstruktiven Aufwand erhöhte. Darüber hinaus konnte nicht auf bewährte Lösungen wie die Schlittenführung zurückgegriffen werden. Diese Entscheidung sollte jedoch kritisch hinterfragt werden, da die Relevanz der zusätzlichen Belastungskomponenten bislang nicht abschließend bewertet wurde.

Andererseits zeigte die Literaturrecherche, dass in den untersuchten Quellen keine Aussagen zur Relevanz dieser zusätzlichen Kräfte und Momente vorliegen. Da die detaillierte Simulation der Innenballistik des MAG58 den Rahmen dieser Arbeit überstieg, konnte diesbezüglich keine eigene Analyse erfolgen. Somit stellt die umfassende Erfassung aller Belastungskomponenten eine vorsorgliche Maßnahme dar, um potenziell relevante Einflüsse im späteren Versuchsbetrieb bewerten zu können. Der damit verbundene Mehraufwand blieb sowohl im zeitlichen als auch im finanziellen Rahmen der Arbeit. Die Sensorik als größter Kostenfaktor verursacht zudem keine zusätzlichen Ausgaben, wenn die im Unternehmensbestand ist.

Das ausgewählte Konzept bringt jedoch zwei bewusst in Kauf genommene Nachteile mit sich. Erstens können infolge der Gelenklager Reibmomente auftreten, die zu geringen Querkräften in den Sensoren führen. Während diese beim Festlager mit weiteren auftretenden Querkräften überlagert werden, sind sie bei den einachsigen Sensoren der Pendelstützen nicht messbar. Diese Effekte wurden jedoch bei der Anforderung zur Mindestmessgenauigkeit berücksichtigt und stellen, sofern diese eingehalten wird, kein signifikantes Problem dar. Der zweite Nachteil betrifft die eingeschränkte Möglichkeit alternativer Messverfahren. Da die Messgenauigkeit jedoch experimentell validiert wird, kann auf redundante Methoden verzichtet werden.

Ob das Prüfstandskonzept weiterverfolgt wird, liegt nun in der Verantwortung des Auftraggebers. Sollte eine Umsetzung angestrebt werden, sind im nächsten Schritt die ausstehenden Anforderungen durch die finale Konstruktion und Experimente nachzuweisen. Dazu müssen die elektrischen Komponenten integriert und das Konzept durch konstruktive Optimierungen bis zur Fertigungsreife gebracht werden. Darüber hinaus muss die Auswahl geeigneter Sensoren und Messverstärker getroffen und begründet werden. Dabei ist insbesondere die Einhaltung der geforderten Mindestabtastfrequenz von 50 kHz sicherzustellen. In der Versuchsphase können dann die Anforderungen an die Messgenauigkeit sowie die Erfassung von Kettengliedern und Hülsen überprüft werden.

Perspektivisch bietet der Prüfstand vielseitige Einsatzmöglichkeiten für unterschiedliche Untersuchungen. Dabei ist es unerheblich, ob die Schnittlasten über den Rahmen – wie im Falle der Rückstoßmessung – oder über die Grundplatte, beispielsweise bei Untersuchungen von Fußpunktanregungen, eingeleitet werden. Die statisch bestimmte Lagerung ermöglicht in beiden Fällen eine vollständige Erfassung aller Schnittgrößen und deren Umrechnung auf beliebige Bezugspunkte. Darüber hinaus kann der Prüfstand als Grundlage für Validierungen numerischer Simulationen dienen, indem gemessene Schnittkräfte mit den simulierten Lastverläufen verglichen werden.

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

Literaturverzeichnis

[1] O. Hoffmann, “Geballte Power für die Ukraine”, Dimensions-Magazin.de, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://dimensions-magazin.de/geballte-power-fuer-die-ukraine/.

[2] Rheinmetall Landsysteme GmbH, *LANCE2– The Modular Medium-Calibre Turret for All Missions*, RLS, Unterlüss, Deutschland, B387e0524, 2024.

[3] FN Browning Group, “FN MAG 7.62x51mm General Purpose Machine Gun”, FNHerstal.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://fnherstal.com/en/defence/portable-weapons/fn-mag/.

[4] Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, “Piezoelektrische oder DMS-basierte Kraftaufnehmer?”, HBM.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.hbm.com/de/%203719/piezoelektrische-oder-dms-basierte-kraftaufnehmer/.

[5] Kistler Instrumente AG, *Kraftsensoren - Transparente Fertigungsprozesse sichern Qualität und reduzieren Kosten*, Kistler Instr. AG, Winterthur, Schweiz, 003-290d, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/960-262d.pdf.

[6] O. Mack, „The Non-Linearity of Piezoelectric Force Transducers and Their Analytical Modelling,“ in *XVII IMEKO World Congress*, Dubrovnik, Kroatien, 22–27 Juni 2003, S. 352–357.

[7] Universität Bielefeld, “Hilfe und Informationen zur Suche”, Base-search.net, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.base-search.net/about/de/help.php..

[8] Ł. SZMIT und R. WOŹNIAK, „Specificity of Design and Action of The Weapon’s Jump and Recoil Laboratory Test Stand,“ in *Problems of Mechatronics: Armament, Aviation, Safety Engineering*, 2012, S. 29–40. DOI: 10.5604/20815891.

[9] I. S. Ilter, S. Dilibal und H. Zengin, „Piezoelectric Force Sensor-based Measurement System for Recoil Force Analysis,“ in *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2021, S. 596–601. DOI: 10.1109/ISMSIT52890.2021.9604676.

[10] M. J. Hall, „Measuring felt recoil of sporting arms,“ in *International Journal of Impact Engineering*, 2008, S. 540–548. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.03.007.

[11] F. De Tommasi, M. Pulcinelli, C. Massaroni u. a., „A 3D-printed sensing element based on fiber Bragg grating technology for grasping force measurement in surgical forceps,“ in *Measurement*, 21 Nov. 2024, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.116236.

[12] Prototypa-ZM, s.r.o, “STZA 13M1 / STZA 13M2 Mobile Firing Rest”, Prototypa.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.prototypa.com/stza-13m1-/-stza-13m2-mobile-firing-rest/.

[13] Prototypa-ZM, s.r.o, “UAWF Universal Adaptors For Weapon Function Tests”, Prototypa.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.prototypa.com/uawf-universal-adaptors-for-weapon-function-tests/.

[14] Hottinger Brüel & Kjaer GmbH, “Häufige Fragen im Zusammenhang mit Faser-Bragg-Gittern, ihrer Technik und Anwendung in Systemen”, HBM.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.hbm.com/de/1629/faser-bragg-gitter-faq/#:~:text=hier%20zu%20finden.-,Wie%20hoch%20ist%20die%20maximale%20Abtastrate%20eines%20FBG%2DSensors?,die%20mechanische%20Schnittstelle%20begrenzt%20wird..

[15] *Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*, VDI 2221-1, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2019.

[16] B. Bender und K. Gericke, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 9. Aufl., Berlin, Deutschland: Springer Vieweg, 2021.

[17] *Mechanical Enviromental Tests*, AECTP-400, Nato Standardization Office, Brüssel, 2019.

[18] *Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen*, DIN EN 1005-2:2009-05, DIN e. V., Berlin, 2009.

[19] Dr. R. Germershausen, *Waffentechnisches Taschenbuch*, 3. Aufl., Düsseldorf, Deutschland: Rheinmetall GmbH, 1977.

[20] Kistler Instrumente AG, *6-Komponenten Kraft-/Momenten Sensor - Typ 9306A 9306A31 9306A41*, Kistler Instr. AG, Winterthur, Schweiz, 960-262d, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-290d.pdf.

[21] D. Gross, W. Hauger, J. Schöder und W. A. Wall, *Technische Mechanik 3*, 16. Aufl., Berlin, Deutschland: Springer Vieweg, 2019, ISBN: 9783662694411.

[22] P. G. Martin, G. W. Hall, J. R. Crandall und W. D. Pilkey, „Measuring the Acceleration of a Rigid Body,“ in *Shock and Vibration*, Menlo Park, USA, 10 Juli 1998, S. 211–224. DOI: 10.1155/1998/134562.

[23] *Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, VDI 2225-3, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 1998.

[24] Ansys, Inc., “Was ist die Design Failure Mode and Effect Analysis (DFMEA)”, Ansys.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.ansys.com/de-de/blog/what-is-dfmea.

[25] Kistler Instrumente AG, *Betriebsanleitung 3-Komponenten Kraftaufnehmer - Typ 9317C 9327C 9347C 9367C 9377D 9397D*, Kistler Instr. AG, Winterthur, Schweiz, 002-893d, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/002-893d.pdf.

[26] Kistler Instrumente AG, *3-Komponenten Kraftaufnehmer - Typen 9317C 9327C 9347C 9367C 9377D 9397D (inkl. 93x8C/D)*, Kistler Instr. AG, Winterthur, Schweiz, 003-531d, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-531d.pdf.

[27] Kistler Instrumente AG, “Piezoelektrischer Kraftaufnehmer - Kraftmessdose (Fz ±3 kN) / 9301C”, Kistler.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.kistler.com/DE/de/p/piezoelektrischer-kraftaufnehmer-9301c/000000000018037809.

[28] Kistler Instrumente AG, “Piezoelektrischer Kraftaufnehmer - Kraftmessdose (Fz ±6 kN) / 9311C”, Kistler.com, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.kistler.com/DE/de/p/piezoelektrischer-kraftaufnehmer-9311c/000000000018037810.

[29] SKF GmbH, *SKF Gelenklager und Gelenkköpfe*, SKF GmbH, Schweinfurt, Deutschland, PUB BU/P1 06116/1 DE, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d19680180f04/pdf_preview_medium/0901d19680180f04_pdf_preview_medium.pdf.

[30] norelem Normelemente GmbH & Co. KG, “The Big Green Book”, Norelem.de, Besucht am: 01.08.2025, [online], Adresse: https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/_XS-ePaper/ePaper_norelem_Katalog_2022_Book1_de/#0.

[31] MÄDLER GmbH, *Mädler Katalog 43 DE*, MÄDLER GmbH, Stuttgart, Deutschland, 43, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://smarthost.maedler.de/files/Katalog43_DE.zip.

[32] Kistler Instrumente AG, *Piezo Kraftaufnehmer für das Messen dynamischer und quasistatischer Zug- und Druckkräfte - Typ 9301C ... 9371C*, Kistler Instr. AG, Winterthur, Schweiz, 003-556d, Besucht am 01.08.2025, [online], Adresse: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/003-556d.pdf.

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

Anhang

Anhangsverzeichnis

A Aufgabenstellung **86**

B Matlab Code zu Abschnitt 4.2 **87**

C Matlab Code zu Abschnitt 6.2 **89**

D Angebot für die Sensorik - Kistler **91**

E Angebote für das Material **92**

A Aufgabenstellung

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Maschinenbau und Produktion

A u f g a b e n s t e l l u n g

für die Bachelorthesis

von Herrn Florian Erb

Matrikel-Nummer: [redacted]

Thema:

Entwicklung und Validierung eines Prüfstandkonzeptes zur Erfassung von stoßartigen und wiederholdenden Lastkomponenten

Aufgabenstellung:

Im Zuge dieser Abschlussarbeit soll ein Prüfstandkonzept für die Erfassung der Lastkomponenten eines, bei der Rheinmetall Landsysteme GmbH eingesetzten, Systems entwickelt werden. Das Konzept soll nach den Verfahren des methodischen Konstruierens nach VDI 2221,2222 und 2225 systematisch erarbeitet werden.

Schwerpunkte:

- Literaturrecherche und Einarbeitung in die Themen methodisches Konstruieren, Prüfstandauslegung und Messkonzepte
- Definition und Diskussion der Anforderungen
- Ausarbeitung und Entwicklung von Messkonzepten
- Umsetzung der Messkonzepte in mechanische Konstruktionen und Diskussion der mechanischen Realisierbarkeit
- Vergleich der entwickelten Konzepte und Auswahl eines Konzeptes
- Validierung des ausgewählten Konzeptes

Datum

Erstprüfer/in

B Matlab Code zu Abschnitt 4.2

```
clear
syms x_1 y_1 F_x A_x A_y M_A
%% Input values
F_x_static = 6500; % [N] Source: Assumption based on recoil of M2 Browning
F_G = 102.64; % [N] Source: CAD fn_herstal_3608995590.prt
x_2 = 0.282; % [m] Source: CAD fn_herstal_3608995590.prt
y_2 = 0.063; % [m] Source: CAD fn_herstal_3608995590.prt


%% Reaction forces gun recoil at Position A
SumF_x = 0 == A_x -F_x;
SumF_y = 0 == A_y -F_G;
SumM_z = 0 == M_A + x_1*A_y - y_1*A_x -x_2*F_G +y_2*F_x;

[A_x, A_y, M_A] = solve([SumF_x, SumM_z, SumF_y], [A_x, A_y, M_A]);


%% Solve equilibrium for x range of -0.400:0.400 [m] and set M_A = 0 Nm

x_values = -0.400:0.2:0.4;
y_values = sym([]);

for x_i = x_values
    M_A_temp = subs(M_A, [x_1, F_x], [x_i, F_x_static]);
    y_i = solve(M_A_temp == 0, y_1);

    y_values(end+1) = eval(y_i);
end

% plotting and formatting it
plot(x_values, y_values, LineWidth=3)
xlabel("\textbf{X-Abstand zur Bohrungsachse}$\mathbf{\; x_1\ [m]}$", "Interpreter", "latex")
ylabel("$\textbf{Y-Abstand zur Bohrungsachse}\mathbf{\;y_1\ [m]}$", "Interpreter", "latex")
grid on
box off
set(gca, FontSize=18, LineWidth=3)
ytickformat('%.3f')

% Reaction forces
disp("If placed on one of the calculated points (x_i, y_i), the reaction forces at the mounting point are:")
disp("A_x = " + num2str(eval(subs(A_x, F_x, F_x_static)))+" N")
```

```
42          disp("A_y = " + num2str(eval(subs(A_y, F_x, F_x_static)))+
                " N")
43          disp("M_A = 0 Nm")
44
45
46          %% Solve equilibrium equations for all coordinates and
               apply half-sine
47
48          F_xn = [0:1600:6000, 6500]; % Range of possible recoil
               forces
49          M_An = []; % Empty matrix for results
50
51          for i = 1:length(x_values)
52              x_i = x_values(i);
53              y_i = y_values(i);
54
55              for n = 1:length(F_xn)
56                  M_A_temp2 = subs(M_A, [x_1, y_1, F_x], [x_i, y_i,
                       F_xn(n)]);
57                  M_An(i, n) = eval(M_A_temp2);
58              end
59          end
60
61          % Plotting and formatting it
62          figure
63          hold on
64
65          for i = 1:length(F_xn)
66              name = sprintf("F_x = %4d N", F_xn(i));
67              plot(x_values, M_An(:,i), LineWidth=3, DisplayName=
                   name)
68          end
69
70          xlabel("$\mathbf{x-Koordinate\ des\ Punktes\ A(x_1|y_1)\ [
               m]}$", "Interpreter", "latex")
71          ylabel("$\mathbf{Moment\ M_A\ [Nm]}$", "Interpreter", "
               latex")
72          grid on
73          box off
74          set(gca, FontSize=18, LineWidth=3)
75          legend(Location="northeast")
```

Listing 1: Belastungsanalyse 6-Komponenten Kraft-/Momentensensor

C Matlab Code zu Abschnitt 6.2

```
%% Vorbereitung
clear
syms A_y B_x B_y B_z E_z G_y E_x

%% Geometrische Vektoren (in mm)
x_1 = [-600; 0; 0];
x_2 = [-160; 0; 0];
z_1 = [0; 0; 300];
z_2 = [0; 0; 140];
z_3 = [0; 0; 80];
y_1 = [0; 279; 0];

%% Kraefte und Momente
B    = [B_x; B_y; B_z];          % Unbekannte
   Reaktionskraft
F_x  = [-6500; 0; 0];            % Aeussere Kraft [N]
F_G  = [0; -102.62+200; 0];          % Moment [Nmm]

%% --- Fall 1: E_z gesucht, E_x = 0 ---

% Momentengleichgewicht
sumM1 = cross(x_1, [0; G_y; E_z]) + ...
        cross(z_1, [0; A_y; 0]) + ...
        cross(x_2 + z_2, F_G) + ...
        cross(y_1 + z_3, F_x);

% Kraftgleichgewicht
sumF1 = B + [0; A_y + G_y; E_z] + F_G + F_x;

% Loesen des Gleichungssystems
[A_y1, B_x1, B_y1, B_z1, E_z1, G_y1] = solve(...
    [sumF1 == [0; 0; 0], sumM1 == [0; 0; 0]], ...
    [A_y, B_x, B_y, B_z, E_z, G_y])

%% --- Fall 2: E_x gesucht, E_z = 0 ---

% Momentengleichgewicht
sumM2 = cross(x_1 + z_1, [E_x; G_y; 0]) + ...
        cross(z_1, [0; A_y; 0]) + ...
        cross(x_2 + z_2, F_G) + ...
        cross(y_1 + z_3, F_x);

% Kraftgleichgewicht
sumF2 = B + [E_x; A_y + G_y; 0] + F_G + F_x;

% Loesen des Gleichungssystems
disp('------------------------')
[A_y2, B_x2, B_y2, B_z2, E_x2, G_y2] = solve(...
    [sumF2 == [0; 0; 0], sumM2 == [0; 0; 0]], ...
```

```
49              [A_y, B_x, B_y, B_z, E_x, G_y])
50
51          %% --- Auswertung am Kraftsensorzentrum ---
52
53          % Sensorposition relativ zum Koordinatenursprung (in m)
54          a_x = 0;
55          a_y = 0;
56          a_z = -0.058;
57
58          % Maximalwerte
59          F_Smax  = 22e3;   % [N]
60          F_Zmax  = 100e3;  % [N]
61          M_Bmax  = 250;    % [Nm]
62          M_Zmax  = 250;    % [Nm]
63          N_ZvMax = 100e3;  % [N]
64          F_Zv    = 70e3;   % [N]
65
66          % Kraefte aus Fall 2 auswerten - F_xs = B_y2, da Sensor
               zum globalen KSYS verdreht wurde
67          F_xs = eval(B_y2);
68          F_ys = eval(B_z2);
69          F_zp = eval(B_x2);
70
71          % Momente und Querkraefte berechnen
72          M_xs = F_zp * a_y - F_ys * a_z;
73          M_ys = F_xs * a_z - F_zp * a_x;
74          M_zs = F_ys * a_x - F_xs * a_y;
75          M_Bs = sqrt(M_xs^2 + M_ys^2);
76          F_Ss = sqrt(F_xs^2 + F_ys^2);
77
78          %% --- Normierte Belastungen ---
79
80          F_SsN = F_Ss  / F_Smax  * 100;
81          F_ZpN = F_zp / F_Zmax  * 100;
82          M_BsN = M_Bs  / M_Bmax  * 100;
83          M_zsN = M_zs  / M_Zmax  * 100;
84          F_ZvN = F_Zv / F_Zmax  * 100;
85
86
87          %% --- Bedingung 1: Sicherheitskriterium ---
88
89          con1Left  = F_SsN + M_zsN + 0.5 * M_BsN;
90          con1Right = F_ZvN + F_ZpN;
91          con1Check = con1Left <= con1Right
92
93          %% --- Bedingung 2: Verteilungskriterium ---
94
95          con2Right = 100 - 2 * abs(50 - (F_ZpN + F_ZvN));
96          con2Check = M_BsN <= con2Right
```

Listing 2: Belastungsanalyse des dreiachsigen Kraftsensors

D Angebot für die Sensorik - Kistler

Home / Warenkorb

Ihr Warenkorb

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Haben Sie alles, was Sie brauchen, hinzugefügt?
Kistler Produkte benötigen oft ein weiteres Produkt, um erfolgreich eingesetzt werden zu können. Wir empfehlen Ihnen, den Warenkorb nochmals zu überprüfen und ggf. Zubehör hinzuzufügen.
Brauchen Sie Hilfe? Kontaktieren Sie uns über das Kontaktformular, unsere Experten werden Ihnen helfen.

Beschreibung	Einzelpreis	Anzahl	Gesamtsumme
Triaxialer Kraftaufnehmer, piezoelektrische Kraftmessdose Fx, Fy, Fz (Fz ±8 kN) / 9327C Verfügbar Notiz (Wird nicht von Kistler überprüft)	Ihr Preis: **5.430,00 €**	1	**5.430,00 €**
Piezoelektrischer Kraftaufnehmer, Kraftmessdose (Fz ±6 kN) / 9311C Verfügbar Notiz (Wird nicht von Kistler überprüft)	Ihr Preis: **2.530,00 €**	3	**7.590,00 €**

Gesamtwertung13.020,00 €
+ Mwst. und Versand

E Angebote für das Material

item

Warenkorb: Warenkorb

4 Artikel

1.0	 Profil 8 40x40, natur 0.0.026.03 Zuschnitt max. 6000 mm Länge [mm] 700,0 Gewicht [kg] 20,748 kg	29,40 EUR / m	*12*	246,96 EUR
1.1	Sägeschnitt Profil, kleine Querschnitte 0.0.026.30 1 Stück	3,05 EUR / Stk.	12	36,60 EUR
2.0	 Hammermutter 8 M6, verzinkt 0.0.626.06 1 Stück Gewicht [kg] 0,060 kg	0,56 EUR / Stk.	*20*	11,20 EUR
3.0	 Winkelsatz 8 40x40 0.0.411.15 1 Satz Gewicht [kg] 3,200 kg	6,67 EUR / Stk.	*20*	133,40 EUR
4.0	 Profil 8 240x40, natur 0.0.473.84 Zuschnitt max. 6000 mm Länge [mm] 700,0 Gewicht [kg] 35,532 kg	219,60 EUR / m	*4*	614,88 EUR
4.1	Sägeschnitt Profil, große Querschnitte 0.0.265.55 1 Stück	12,63 EUR / Stk.	4	50,52 EUR

Deine Bestellung		4 Artikel Gewicht: 59,540 kg
Zwischensumme		1.093,56 EUR
Mehrwertsteuer		207,78 EUR
Summe		1.301,34 EUR

(zzgl. Versandkosten, diese werden im Checkout kalkuliert)

Xometry Europe GmbH
Ada-Lovelace-Str. 9
85521, Ottobrunn
T: +49 893 803 4818
F: +49 89 93 960 142
E: info@xometry.eu
www.xometry.de

UST-id.Nr.: DE318027176
Steuer-Nr.: 143/194/00231
Handelsregister: Amtsgericht München / HRB 256172
Bank: J.P. Morgan AG
IBAN: DE38 5011 0800 6161 5322 02
BIC: CHASDEFX

Director / Geschäftsführer: Dmitry Kafidov

Angebot E-1503582-1454969

An: **HAWKS Racing e.V.**
z. Hd: Florian Erb
Rechnungsadresse: Berliner Tor 9, 20099, Hamburg, Germany

Angebotsnummer: **E-1503582-1454969**
Angebotsdatum: **25.06.2025**
Durchlaufzeit: 12 Werktage
* (berechnet anhand des Datums der Bestellung)
Preis gültig bis: **25.07.2025**

Pos.	Beschreibung	Anzahl	Preis pro Stück	Gesamt
10. 	**Teilebezeichnung**: model1.stp **Abgrenzung**: 60.0mm × 35.0mm × 30.0mm **Verfahren**: CNC-Bearbeitung **Material**: Aluminium EN AW-6082 / 3.2315 / Al-Si1Mg **Finish**: Standard **Einsätze**: - **Gewinde und Gewindebohrungen**: - **Toleranz**: ISO 2768 - medium, entire part **Oberflächenrauheit**: Standard (3.2 um Ra)	8	€40.33	€322.64
20. 	**Teilebezeichnung**: model2_1.stp **Abgrenzung**: 500.0mm × 344.88mm × 10.0mm **Verfahren**: Blechumformung **Material**: Steel S235JR / 1.0038 / St37 / 1.0037 **Finish**: Standard **Einsätze**: - **Gewinde und Gewindebohrungen**: - **Toleranz**: Standard (± 0.500 mm), entire part	2	€61.41	€122.82
	Lieferkosten nach: HAWKS Racing e.V., Berliner Tor 9 20099 Hamburg, Germany. (Delivery terms: DAP)			€13.20
	VAT (19.0%)			€87.15
			Gesamtbestellwert, netto:	**€458.66**
			Gesamtbestellwert, brutto:	**€545.81**

Angebotsstatus: Automatisch kalkuliert

Angebot öffnen

Wir wollen Ihnen das beste Angebot machen. Wenn Sie ein niedrigeres Angebot erhalten, schicken Sie es uns und wir werden uns bemühen, es zu unterbieten.

Bitte überprüfen Sie dieses Angebot vor der Bestellung auf Richtigkeit

- Wir haben den Preis und ein Lieferzeitfenster für Ihre Aufgabe basierend auf der Geometrie des von Ihnen bereitgestellten 3D-Modells geschätzt, zusammen mit den Toleranzen, Funktionen und sekundären Operationen, die Sie während des Einreichungsprozesses ausgewählt und die von uns in diesem Angebot speziell bestätigt wurden. Wir extrahieren keine Merkmale, Toleranzen oder andere nicht-geometrische Informationen automatisch aus Ihrem übermittelten 3D-Modell, selbst wenn sie dort dargestellt sind (z. B. Gewinde, Gewindebohrungen usw.). Obwohl unsere Preise in Echtzeit dynamisch generiert werden, halten wir den Preis in diesem Angebot bis zum 25.07.2025 aufrecht (obwohl das geschätzte Lieferzeitfenster zum Zeitpunkt der tatsächlichen Bestellung neu berechnet wird).

- Auch wenn wir Ihnen Unterstützung beim Design für die Herstellung geben, sind Sie letztendlich für die Tauglichkeit Ihres Designs und die damit verbundene Materialauswahl für jeden beabsichtigten Zweck verantwortlich. Sie können uns eine oder mehrere technische Zeichnungen und/oder Spezifikationsblätter bereitstellen.

Unless specified otherwise, Terms and Conditions of Xometry Europe GmbH apply

Diese Seite wurde absichtlich freigelassen

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen."

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.
Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: *Erb*

Vorname: *Florian*

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung und Validierung eines Prüfstandkonzeptes zur Erfassung von stoßartigen und wiederholenden Lastkomponenten

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:



Lüneburg *06.08.2025*

Ort Datum Unterschrift im Original