HOCHSCHULE
NEUBRANDENBURG
University of Applied Sciences

Konzeption und Konstruktion einer Fallprüfmaschine zur Simulation von Versandbelastungen mit Ermittlung der Belastungsgrenzen von Versandverpackungen

Bachelorarbeit

im Studiengang
Lebensmitteltechnologie

vorgelegt von

Leopold Winters

am 04.02.2026
an der Hochschule Neubrandenburg

URN: urn : nbn : de : gbv : 519-thesis: 2025-0051-4

Erstprüfer: Prof. Dr. Volker Scheuerle
Zweitprüfer: Prof. Dr. Ing. Heralt Schöne

Kurzfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Konzeption und Konstruktion einer Fallprüfmaschine zur Simulation von Versandbelastungen, die während des Transportes auftreten sowie die Bewertung der Schutzwirkung von ausgewählten Verpackungsmaterialen. Auf Basis des aktuellen Standes der Technik und den Vorgaben durch Normen wie ISTA Project 6 Amazon, ASTM D 5276 und ISO 2248, wird eine Fallprüfmaschine mit Schwungarmprinzip, pneumatischem Auslösemechanismus und manueller Höhenverstellung entwickelt.

Die Versuchsreihe wird mit drei identischen Versandverpackungen, die mit verschiedenen Verpackungsmaterialien gefüllt sind, durchgeführt. Dabei werden die Stoßereignisse mithilfe eines G-Log-Sensors der Firma ASPION erfasst und anhand ihrer Schockverläufe und Schockintensität ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen deutliche Schutzwirkungen durch Verpackungsmaterial, wobei die Luftpolsterfolie den besten Schutz aufweist. (Monica AI, 30.01.2026)

Schlagwörter: Fallprüfmaschine, Versandverpackung, Stoßprüfung, ISTA Project 6 Amazon, ASTM D 5276, ISO 2248, Pneumatik, Beschleunigungssensor

Abstract

The subject of this thesis is to design and construct a drop test machine to simulate shipping stresses that occur during transport, and to evaluate the protective effect of selected packaging materials. Based on the current state of the art and the specifications of standards such as ISTA Project 6 Amazon, ASTM D 5276, and ISO 2248, a Drop-test-machine with a swing arm principle, pneumatic trigger mechanism, and manual height adjustment is being developed.

The test series is carried out with three identical shipping packages filled with different packaging materials. The impact events are recorded using a G-Log-sensor from ASPION and evaluated based on their shock curves and shock intensity. The results show clear protective effects of the packaging materials, with bubble wrap providing the best protection. (DeepL, 30.01.2026)

Keywords: Drop-test-machine, shipping packaging, impact test, ISTA Project 6 Amazon, ASTM D 5276, ISO 2248, pneumatics, acceleration sensor

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung 2
Abstract 2
Inhaltsverzeichnis 3
Abbildungsverzeichnis 4
Tabellenverzeichnis 6
KI-Nutzungshinweis 7
Abkürzungsverzeichnis 8
1 Überblick und Ziele 9
2 Stand der Technik 12
3 Konzeption der Fallprüfmaschine 15
3.1 Ermittlung der Fallprüfmaschinenvariante 15
3.2 Ermittlung des Auslösemechanismus 16
3.3 Ermittlung der Höhenverstellung 17
3.4 Beschreibung der realisierbaren Fallprüfmaschine 18
4 Konstruktion der Fallprüfmaschine 19
4.1 Dimensionierung der Fallprüfmaschine 19
4.2 Materialwahl 20
4.3 Fertigung 21
4.4 Endmontage 22
5 Versuchsaufbau 25
5.1 Versuchsvorbereitung 25
5.2 Versuchsdurchführung 29
6 Ergebnisse 30
7 Diskussion 33
7.1 Bewertung der Fallprüfmaschine 33
7.2 Auswertung der Versuchsergebnisse 34
8 Anhang 37
Literaturverzeichnis 56
Ehrenwörtliche Erklärung 57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Falltester mit Schnelltrennvorrichtung 14
Abbildung 2: Drop Carriage Falltester 14
Abbildung 3: Doppelflügel Falltester 14
Abbildung 4: Schwungarm Falltester 14
Abbildung 5: Verschraubung zwischen Trägerplatte und Palette 23
Abbildung 6: Befestigung des Druckregelventils 23
Abbildung 7: Fertig montierte Fallprüfmaschine 24
Abbildung 8: Testverpackungstypen Einteilung 27
Abbildung 9: Diagramm zur Identifizierung der Flächen von Versandverpackungen ... 27
Abbildung 10: Versandverpackung 1 28
Abbildung 11: Versandverpackung 2 28
Abbildung 12: Versandverpackung 3 28
Abbildung 13:ASPION G-Log Sensor 28
Abbildung 14: Stärkstes Schockereignis Versuch ohne Verpackungsmaterial 30
Abbildung 15: Stärkstes Schockereignis Versuch mit Verpackungschips 31
Abbildung 16: Stärkstes Schockereignis Versuch mit Luftpolsterfolie 32
Abbildung 17: Standfuß Frontalansicht 39
Abbildung 18:Standfuß Seitenansicht 40
Abbildung 19: Standfuß Draufsicht 41
Abbildung 20: Halterung und Fallplatte Frontalansicht 42
Abbildung 21: Halterung und Fallplatte Seitenansicht 43
Abbildung 22: Halterung und Fallplatte Draufsicht 44
Abbildung 23: Pneumatikschaltplan 45
Abbildung 24: Falltest Sequenz 1 46
Abbildung 25: Falltest Sequenz 2 46
Abbildung 26: Falltest Sequenz 3 46

Abbildung 27: Falltest Sequenz 4 46

Abbildung 28: Falltest Sequenz 5 46

Abbildung 29: Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Übersicht 47

Abbildung 30: Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 1-3 ... 48

Abbildung 31: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 4-6 49

Abbildung 32: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 7-9 50

Abbildung 33: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Übersicht..... 51

Abbildung 34: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 1-3..... 52

Abbildung 35: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 4-6..... 53

Abbildung 36: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 7-9..... 54

Abbildung 37: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails Übersicht..... 55

Abbildung 38: G-Log Datenbericht Versuch Luftpolsterfolie Schockdetails..... 55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fallhöhe und Orientierung der Versandverpackungen nach ISTA..... 26

Tabelle 2: Fallhöhen und Orientierung der Versandverpackungen des neuen Standads. 26

Tabelle 3: Protokoll der Dropzeiten und des Gewichts..... 29

KI-Nutzungshinweis

Im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit wurden die KI-gestützten Sprachmodelle Monica AI und DeepL unterstützend genutzt. Die Verwendung beschränkt sich auf sprachliche Umformulierung, stilistische Optimierung und Übersetzung in die englische Sprache.

Die inhaltliche Ausarbeitung, Analyse, Bewertung sowie die Auswahl, Prüfung und Verwendung sämtlicher Quellen erfolgten eigenständig durch den Verfasser. Alle in der Arbeit dargestellten Inhalte wurden kritisch überprüft und verantwortet.

Abkürzungsverzeichnis

Erdbeschleunigung	g (=m/s^2)
Gramm	g
Kilogramm	kg
Millimeter	mm
Meter	m
Hertz	Hz
Deutsches Institut für Normung	DIN
Internationale Organisation für Normung	ISO
International Safe Transit Association	ISTA
American Society for Testing and Materials	ASTM

1 Überblick und Ziele

Versandverpackungen sind aufgrund des Transportes zum Endkunden vielen äußeren Einflüssen während des Versandweges ausgesetzt. Dabei muss die Verpackung deutlich mehr leisten als das Produkt für den Kunden attraktiv zu gestalten. Sie ist für den Schutz des Versandgutes über alle logistischen Stationen zuständig, um den Kunden einen unversehrten Versand von Warenausgang über Umschlagspunkte sowie Sortieranlagen bis hin zur Zustellung zu ermöglichen. Auf diesem Weg wirken wiederholt mechanische Belastungen.

> *Diese werden ursächlich vor allem in Abhängigkeit von der Transportart und den eingesetzten Transportmitteln, der Transportdauer, den Umschlagsprozessen sowie den Ladungsbedingungen durch Belastungsmerkmale unterschieden. Differenziert wird nach dem zeitlichen Wirkungsverlauf in dynamische und statische Belastungen, nach der Wirkungsdauer in kurz- oder langfristige Belastungen, nach dem geometrischen Wirkungsbereich in partielle (...) und totale (...) Belastungen sowie nach der geometrischen Wirkungsrichtung in von außen (...) und von innen (...) auf die Verpackung wirkende Belastungen. (Bleisch, Majschak, & Weiß, 2011, S. 55)*

In Kombination mit diesen treten typische Belastungsarten wie vertikale- und horizontale Stöße, Schwingungsbelastungen und Druckbelastungen auf. (Bleisch, Majschak, & Weiß, 2011, S. 55) Stoß- und Fallereignisse haben einen großen Einfluss auf die Integrität der Versandverpackung. Diese entstehen beispielsweise insbesondere während des manuellen Umschlages, beim Absetzen und Aufnehmen mittels Fördertechnik, dem unabsichtlichen Herunterfallen der Einheit und später bei der Verwendung der Produkte. (Kaßmann, 2020, S. 287) Ebenso können solche Ereignisse während der Zustellung aufgrund von Verkehrsereignissen, wie Gefahrenbremsungen, und Straßenbeschaffenheit, zum Beispiel Schlaglöcher, auftreten. Dabei sind es nicht einzelne starke Stöße, sondern viele wiederkehrende Belastungen auf das Paket in verschiedenen Orientierungen wie Flächen, Kanten und Ecken, die über die Unversehrtheit des Packgutes entscheiden. Um diese Einflüsse bereits vor dem finalen Transport an den Endkunden simulieren zu können gibt es zwei Möglichkeiten. Der Probeversand zeigt die realen Versandbelastungen während des Transportes mithilfe eines G-Log Sensors genau auf. Die dabei ermittelten Daten des Sensors, sowie bei der Sichtung der Packstücke erkennbare Mängel, können nach Erreichen des Zieles sofort ausgewertet werden, wodurch Rückschlüsse hinsichtlich erforderlicher Veränderungen gezogen werden. Ebenso ist der Probeversand, im Vergleich zur zweiten Möglichkeit der Laborprüfung kosten- und

zeitintensiver. Die Laborprüfung bietet den Vorteil, dass stets vergleichbare Prüfbedingungen dargestellt werden können. Durch das gezielte Einwirken definierter Belastungsarten wird ein einfaches Klären von kausalen Zusammenhängen der Schadensentstehung ermöglicht. Jedoch sollte berücksichtigt werden, ob diese Belastungen dem Packgut überhaupt schädigen können. Aus diesem Grund sind entsprechende Simulationsverfahren sowie Eingangsparameter zu wählen und in einem Prüfprogramm festzuhalten. (Kaßmann, 2020, S. 286) Diese Prüfungen werden von Zertifizierten Verpackungslaboren unter anderem durch das BFSV-Verpackungsinstitut nach den Vorgaben der Kunden und innerhalb der Normen durchgeführt. (https://bfsv.de/labor/umweltsimulation/falltest/, 2026)

In dieser Arbeit wird nach den Vorgaben der ISTA Project 6 Amazon gearbeitet. Diese ist eine, von ISTA und Amazon zusammen entwickelte, Norm, die sich explizit mit dem Warentransport von Versandgütern, die in ihrer eigenen Verpackung verschickt werden, beschäftigt. Hier wird genaustens beschrieben, wie Versandverpackungen getestet werden müssen, um über Amazon vertrieben werden zu können. Darin ist in Prüfprotokollen genau aufgeführt, wie und in welcher Reihenfolge, die verschiedenen Versandverpackung vor dem Versand mit Amazon geprüft werden müssen. Hierbei gibt es folgende Testkategorien:

- Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- Freifall-Falltest (Schock)
- Kipptest (Schock)
- Kompressionstest (vertikal und horizontal)
- Vibrationstest
- Dichtigkeitstest

Diese Tests variieren in ihrer Ausführung je nach Verpackungsgröße, Gewicht und Inhalt. In den Testsequenzen ist genau beschrieben mit welchen Geräten und Hilfsmitteln, sowie in welcher Reihenfolge, diese auszuführen sind. Ebenso wird erläutert, ob sie für den gewählten Verpackungstyp nötig sind. Dabei werden für die Tests nicht nur ein Freifall-Falltester benötigt, sondern auch Kompressionstestmaschinen sowie Vibrationsplatten. (ISTA 6-Amazon, 2018)

Um die Auswirkung von Stoß- und Fallereignissen auf Versandverpackungen schon vor dem Versand im Labor feststellen zu können, fokussiert sich diese Bachelorarbeit auf die Konzeption und Konstruktion einer Freifall-Fallprüfmaschine und die Ermittlung von den daraus resultierenden Versandbelastungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine funktionsfähige Fallprüfmaschine zur Simulation von Versandbelastungen zu konzipieren und konstruieren. Die eigenständige Konstruktion einer

solchen Prüfmaschine hat den Hintergrund, die Funktionsweise und die damit einhergehenden Schwachstellen der entwickelten Maschine zu analysieren, um einen möglichst tiefen Einblick in die Konstruktionsweise von Fallprüfmaschinen zu gewährleisten. Diese soll durch einen vertikalen Fall von den in dieser Arbeit gewählten Versandverpackungen mit den Maßen (H x B x L 100 mm x 175 mm x 250 mm) dazu beitragen, die Schutzwirkung der gewählten Verpackungsmaterialien (ohne Verpackungsmaterial, Verpackungschips, Luftpolsterfolie) zu ermitteln und anschließend zu vergleichen. Hierzu verfügt die Fallprüfmaschine über eine Fallplatte, die durch eine pneumatische Schaltung ausgelöst werden kann. Die Platte muss hierfür ausreichend groß und stabil sein, um das Paket und dessen Gewicht problemlos aufnehmen zu können, sodass verschiedene Packstücke getestet werden können.

Dadurch ergibt sich das wesentliche Ziel, eine benutzerfreundliche mobile Fallprüfmaschine zu konstruieren, welche reproduzierbare Versuche mit den einzelnen Versandverpackungen ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in ihrer Abhandlung folgendermaßen: Das Hauptziel der Arbeit, die Konzeption und Konstruktion einer funktionsfähigen, stabilen und mobilen Fallprüfmaschine wie der Vergleich verschiedener Verpackungsmaterialien hinsichtlich ihrer Schutzwirkung wird zuerst formuliert. Das folgende Kapitel ordnet die Aufgabenstellung in den aktuellen Stand der Technik ein, stellt gängige Fallprüfmaschinen-Prinzipien vor und verknüpft diese mit relevanten Standards wie ISO, ASTM und ISTA Project 6 Amazon. Die konzeptionelle Entscheidung für ein Schwungarm-Prinzip mit rein pneumatischer Auslösung mit Zweihandbetätigung und einer manuellen Höhenverstellung werden anschließend begründet. Darauf aufbauend wird die konkrete Konstruktion einschließlich Dimensionierung, Materialwahl, Fertigung und Montage sowie die Ausgestaltung der Pneumatikschaltung unter den gegebenen Randbedingungen wie Anlagenhöhe, Mobilität, Standsicherheit, Tragfähigkeit und Fallhöhen erläutert. Das nächste Kapitel beschreibt den Versuchsaufbau in Anlehnung an ISTA Project 6 Amazon und macht zugleich Abweichungen von vollständiger Normkonformität transparent. Die Dokumentation der Versuchsdurchführung mit mehreren Verpackungsvarianten bei definierten Fallhöhen und die Erfassung der Schockbelastungen mittels ASPION G-Log Sensor sind im Anschluss dargestellt. Das folgende Kapitel stellt die, aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse dar und vergleicht die Schutzwirkungen der Materialien anhand der gemessenen Schockereignisse. Im letzten Kapitel wird schließlich die Aussagekraft der Befunde vor dem Hintergrund konstruktiver und messtechnischer Einschränkungen diskutiert. Daraus leiten sich Ansätze zur Verbesserung von Reproduzierbarkeit und Normnähe ab (Monica AI, 26.01.2026).

2 Stand der Technik

Fallprüfmaschinen beschreiben einen wichtigen Teil der Qualitätssicherung. Im Jahr 1972 werden Fallprüfungen zum ersten Mal durch die ISO 2248:1972 standardisiert, welche jedoch im Jahr 1992 aufgrund von Aktualisierungen der Standards zurückgezogen wird und durch die ISO 2248:1985 ersetzt wird, welche zuletzt 2022 überarbeitet und auf den neusten Stand der Technik gebracht wurde (ISO, 2026) (Europäisches Komitee für Normung, 1992, S. 1). Fallprüfmaschinen kommen in verschiedenen Formen mit verschiedenen Funktionsweisen vor, verfolgen jedoch alle das gleiche Ziel: Das Testen von Versandverpackungen auf äußere mechanische Einflüsse.

Folgende Varianten von Freifalltestern sind im Rahmen der Labornutzung in Verwendung:

- Freifalltester mit Schnelltrennvorrichtung (Abbildung 1)
- Drop Carriage Fallprüfmaschine (Abbildung 2)
- Doppelflügel Fallprüfmaschine (Abbildung 3)
- Schwungarm Freifall-Falltester (Abbildung 4)

Bei der Verwendung des Freifalltester mit Schnelltrennvorrichtung, werden die meist schweren und sperrigen Versandeinheiten zuerst mithilfe von Hebeschlingen über einen Karabiner mit der Einheit verbunden. Diese wird anschließend mit einem Kran oder Flurförderfahrzeug auf die gewünschte Fallhöhe gehoben. Der Mechanismus ist währenddessen mit einem Bolzen gesichert, welcher Versandeinheit und Prüfgerät verbindet. Durch das Auslösen des Bolzens wird diese Verbindung getrennt und das Testobjekt fällt aus der eingestellten Höhe zu Boden (Rycobel, 2026).

Die Drop Carriage Fallprüfmaschine, besitzt durch die spezielle Bauweise die Möglichkeit, jene Verpackungsgüter aus einer theoretischen Höhe von 0 mm fallen zu lassen. Dies wird durch einen in die Fallplatte einfahrenden Falltisch ermöglicht. Mithilfe dieses Falltisches wird die Versandverpackung auch auf die gewünschte Fallhöhe gehoben. Durch Auslösen fällt dieser mit einer höheren Geschwindigkeit als die Verpackungseinheit vertikal nach unten und ermöglicht so die Versuche (Amade-Tech, 2026).

Die Doppelflügel-Fallprüfmaschine. Diese simuliert, wie die anderen Tester, das Szenario des Fallenlassens während des Be- und Entladevorgangs und die dadurch auftretenden möglichen Beschädigungen. Ermöglicht wird dies, wie schon im Namen beschrieben, durch zwei Arme, die gleichzeitig nach unten wegklappen, um der Probe den freien

Fall zu ermöglichen. Die Sequenz wird bei den gängigen Modellen mittels eines Bedienpultes oder Fußpedals ausgelöst, über welche auch die erwünschte Fallhöhe reguliert werden kann (Amade-Tech, 2026).

Die letzte in der ASTM D 5276 beschriebene Fallprüfmaschine ist der Schwungarm Freifall-Falltester. Dieser verfügt nur über einen einzelnen Schwungarm, der bei Betätigung der Anlage unter dem Testobjekt wergklappt. Er wird vor allem speziell zur Simulation des freien Falls von kompletten und gefüllten Versandverpackungen eingesetzt (Amade-Tech, 2026).

> *Experten schätzen, dass ungeeignete Transportverpackungen jährlich Kosten von etwa einer halben Milliarde Euro verursachen. Das sind etwa 10 Prozent aller versicherten Warenschäden. Rund 70 Prozent dieser Transportschäden lassen sich vermeiden.*
>
> *Ein Weg, diese Schäden in den Griff zu bekommen, ist eine geeignete Verpackung. Dabei hilft die Prüfung von Versandverpackungen im Labor. Neben deutschen DIN-Normen müssen Versender heute immer häufiger die Anforderungen ihrer Kunden im Ausland berücksichtigen und auch internationale Prüfnormen erfüllen. (BFSV Verpackungsinstiut, 2026)*

Daraus ist zu entnehmen, dass die Prüfung von Versandverpackungen international einen sehr hohen Stellenwert hat. Dieser ergibt sich daraus, dass Beschädigungen während des Transports zu Mehraufwand für alle beteiligten Parteien führen, beispielsweise durch Reklamationen, Ersatzlieferungen oder zusätzliche Prüf- und Logistikprozesse. Aus diesen Gründen gelten für Fallprüfmaschinen internationale Standards, um die Verpackungen gemäß den darin vorgeschriebenen Normen oder den von Versanddienstleistern festgelegten Testverfahren zu prüfen. Hierbei wird sich beispielsweise auf Standards von ISTA, ISO, ASTM und Amazon bezogen.

Abbildung 1: Falltester mit Schnelltrennvorrichtung (ASTM International, 2021, S. 10)

Abbildung 2: Drop Carriage Falltester (ASTM International, 2021, S. 10)

Abbildung 3: Doppelflügel Falltester (ASTM International, 2021, S. 11)

Abbildung 4: Schwungarm Falltester (ASTM International, 2021, S. 11)

3 Konzeption der Fallprüfmaschine

In diesem Kapitel wird das Konzept der Freifall-Fallprüfmaschine vorgestellt, nachdem die entstandene Baugruppe konstruiert wird. Grundlegend muss die Art und Weise des Aufbaus eruiert werden, damit die Voraussetzungen für das technische Design und die einzusetzende Technik definiert sind. Hierfür werden zuerst die verschiedenen schon existierenden Varianten, welche bereits im Kapitel „Stand der Technik“ beschrieben sind, analysiert, und die Frage der Realisierbarkeit beantwortet. Zudem werden der Auslösemechanismus und die Höhenverstellung diskutiert.

3.1 Ermittlung der Fallprüfmaschinenvariante

Die Fallprüfmaschine mit Schnelltrennvorrichtung ist vorwiegend für schwere sperrige Verpackungseinheiten entwickelt worden und muss an einem Deckenkran oder Gabelstapler befestigt werden. Durch diese wird die Höhe, aus der die Einheit fallen gelassen werden kann, limitiert (Rycobel, 2026). Die Konstruktion stellt eine unkomplizierte Variante dar, schwere Packstücke, die beispielsweise auf einer Palette transportiert werden, den Versuchen zu unterziehen. Da im Betrieb keine passende Aufhängung für die Apparatur besteht, wird diese Variante nicht näher in betrachtet. Auch die Drop Carriage Fallprüfmaschine kommt nicht als Konzept in Frage, da ihre komplexe elektrische Schaltung einerseits, die den Fallschlitten in die gewünschte Höhe bringt, und eine pneumatische Schaltung andererseits, die den Schlitten wieder loslässt, sodass er schneller als die Versandverpackung nach unten fährt, den Umfang des Projekts überschreiten. Deshalb fällt die Entscheidung zwischen einer Schwungarm Fallprüfmaschine oder einer Doppelflügel Fallprüfmaschine. Nach genauerem Betrachten der Konstruktion wird klar, dass die Schwungarm Fallprüfmaschine deutlich einfacher aufgebaut ist als die mit Doppelflügeln. Diese ist deshalb leichter im Projektumfang einzubauen. Ein weiterer Vorteil dieser Maschine ist, dass sie lediglich mit einem alleinstehenden Auslösemechanismus ausgestattet werden muss, was bei den anderen Modellen nicht möglich ist. Negativ zu betrachten ist jedoch auch, dass die Länge des Falltisches die minimale Abwurfhöhe stark beschränkt, da dieser nicht auf dem Boden aufkommen darf oder auf das Paket beim Zurückschwingen der Platte einen weiteren Stoß ausüben kann.

3.2 Ermittlung des Auslösemechanismus

Ebenso wichtig war die Frage, wie die Fallapparatur ausgelöst werden soll. Hierfür gibt es verschiedene Lösungsansätze, welche jeweils Vorteile und Nachteile haben. Es kommt eine hydraulische, pneumatische oder elektrische Schaltung in Frage. Bei hydraulischen Schaltungen, die den Auslösemechanismus durch einen Zylinder darstellen, ist ein Nachteil, dass ein Reservoir zum Auffangen und Halten des zum Betrieb notwendigen Hydrauliköls verbaut werden muss. Ein weiterer Nachteil ist, dass zum Erzeugen des Hydrauliköldruckes eine Hydraulikpumpe verbaut werden muss. Diese bedarf im weiteren Gebrauch der Maschine auch regelmäßiger Wartung, um Defekte zu vermeiden. Im Falle eines Defekts besteht an einem hydraulischen System die Gefahr, dass Hydrauliköl aus der Anlage austritt und das Labor im Folgenden gründlich gereinigt werden muss, damit keine Gefahr für andere Mitarbeiter von der Havarie ausgeht. Ebenso muss das Öl anschließend aufwendig und ordnungsgemäß entsorgt werden. Vorteilhaft an einer hydraulisch gesteuerten Anlage ist, dass sie sehr leise arbeitet und lediglich die Pumpe geringfügigen Lärm verursacht. Ein weiterer Vorteil ist, dass Hydrauliksysteme mit einem sehr hohen Arbeitsdruck arbeiten und somit auch schwere Lasten auf einer festgelegten Höhe halten können.

Rein elektrisch gesteuerte Systeme arbeiten hingegen mit Elektromoren und Elektromagneten, wodurch viele Funktionen ermöglicht werden können. Sie bieten den Vorteil, dass diese präzise über ein Programm gesteuert werden und somit eine hohe Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten ist. Ebenso kann mittels Motoren, die an einer Spindel befestigt sind, welche im Ständer verbaut und mit der Fallplatte verbunden sind, eine automatisierte Höhenverstellung verbaut werden, welche die Fallplatte millimetergenau auf die gewünschte Fallhöhe bringt. Ein großer Nachteil ist hierbei jedoch, dass für solch eine Schaltung ein hoher Wissenstand in Elektrotechnik und Programmiertechnik solcher Anwendungen notwendig ist. Auch ist eine Prüfung von einem ausgebildeten Elektrotechniker notwendig, um die Anlage sicher in Betrieb nehmen zu können und keine Schäden im Betrieb oder Verletzungen von Bedienpersonal herbeizuführen.

Bei einer pneumatisch betriebenen Schaltung soll die Fallplatte mittels eines Pneumatikzylinders ausgelöst werden, der diese von unten stüzt und durch Einfahren freigibt. Hierbei ist die Schaltung ähnlich wie bei einem Hydrauliksystem, jedoch entfällt hierbei der Hydraulikölтank. Nachteilig ist jedoch, dass bei einem pneumatischen System der maximale Arbeitsdruck deutlich geringer als bei einem Hydrauliksystem ist, und schlussfolgernd daraus nicht so hohe Lasten getragen werden können. Ein zu langsames Einfahren des Zylinders bei zu geringem Arbeitsdruck kann ebenfallsauftreten, daraus resultiert, dass das Packstück nicht vertikal zu Boden fällt. Ein weiterer Nachteil ist, dass

dieses System das lärmintensivste ist, da die überschüssige komprimierte Luft, die durch die Betätigung des Zylinders entsteht, in die Atmosphäre entlassen wird. Ebenso muss ein Kompressor den benötigten Luftdruck produzieren. Wenn dieser nicht in einem Extraraum steht, entstehen dabei Vibrationen und weiterer Lärm. Die dadurch entstandenen Vibrationen können den Versuchsablauf negativ beeinflussen. Vorteil einer Pneumatikschaltung ist jedoch, dass diese einfach zu realisieren ist. Zur Sicherheit des Bedieners muss hierbei eine Zweihandsteuerung verbaut werden.

3.3 Ermittlung der Höhenverstellung

Zuletzt muss festgelegt werden, wie die Fallplatte und das pneumatische System an dem Standfuß befestigt werden, um eine Höhenverstellung der Fallplatte zu realisieren. Hierfür kommt eine manuelle Verstellung mit Raststufen oder eine stufenlose Verstellung in Frage, sowie eine automatische Verstellung mittels eines Elektromotors über eine in dem Standfuß verbaute Spindel. Dies bietet den Vorteil, dass die Höhe automatisch und mithilfe einer Eingabe in einer dafür zu programmierenden Schaltung erfolgt. Ebenso könnte die Verstellung auch mit einem Taster realisiert werden. Ein weiterer Nachteil hierbei ist der hohe konstruktive Aufwand, den dieses System benötigt, um störungsfrei bedient werden zu können. Das manuell verstellbare System überzeugt hierbei mit der Einfachheit des Aufbaus. Die stufenlose Verstellung weist in diesem Fall auch Probleme in der Konstruktion auf und bietet deutlich weniger Stabilität als eine Verstellung mit festgelegten Verankerungspunkten. Diese bieten den Vorteil, dass der Falltisch auf die vorgesehene Höhe gehoben werden kann und mittels eine Bolzens stabil mit dem Standfuß verbunden werden kann, um Messtoleranzen zu vermeiden. Ebenso ist die stufenlose Verstellung an einem Vierkantrohr, welches als Standfuß verwendet werden soll, schwer stabil zu gestalten, da der Falltisch nur schwierig ohne vorgegebene Rasten am Rohr verankert werden kann. Um die Art der Rasten festzulegen, werden ebenfalls mehrere Methoden in Betracht gezogen. Die erste Option ist eine Raste, die über kleine Fortsätze den Falltisch am Abrutschen hindert. Diese werden an das Vierkantrohr angeschweißt, um eine Verbreiterung zu erzielen. Die Realisierung dieser Vorgangsweise setzt die Bedingung voraus, dass die Anbindung an den Falltisch durch Kippen eine Vergrößerung des Innendurchmessers bewirkt und folglich ein Schieben über den Fortsatz ermöglicht wird. Eine alternative Option besteht darin, Löcher durch das Vierkantrohr sowie durch die Anbindung an den Falltisch zu bohren, um diese mittels eines Bolzens zu verbinden und so gegen Abrutschen zu sichern. Hierfür können die Löcher auf den gewünschten Höhen für die Versuche gebohrt werden. Der Abstand zwischen den Löchern darf jedoch nicht zu gering sein, da dies die Integrität des Standfußes beeinflusst und zu Schäden führen kann.

3.4 Beschreibung der realisierbaren Fallprüfmaschine

Aus den zuvor genannten Kriterien und deren Vor- und Nachteilen lässt sich die Fallprüfmaschine im Rahmen dieser Arbeit wie folgt realisieren:

- Fallprüfmaschine mit einzelnem Schwungarm
- rein Pneumatischer Auslösemechanismus
- manuelle Höhenverstellung über festgelegte Rasten

4 Konstruktion der Fallprüfmaschine

In diesem Kapitel wird die Konstruktion, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Fallprüfmaschine genauer erläutert. Dabei werden die im vorhergehenden Kapitel zur Konzeption festgelegten Einzelbauteile zugrunde gelegt. Dazu wird zuerst auf die durch die Konzeption festgelegten, Hauptbaugruppen und anschließend auf die auslegungstechnischen Aspekte wie Dimensionierung, Materialwahl, Fertigung und Montage der Anlage eingegangen.

Die Hauptbaugruppen werden nach den Bedingungen, die durch das Konzept der Fallprüfmaschine festgelegt sind, konstruiert. Hierfür werden zuerst technische Zeichnungen angefertigt, die den Umfang des Projektes zeigen. Diese sind in den Abbildungen 17-22 zu sehen. Mithilfe dieser Zeichnungen wird die Bestellung der benötigten Materialien für das Projekt aufgegeben. Ebenso dienen sie als Bauplan für die Maschine, um diese nach den gegebenen Vorgaben zu produzieren. Ebenso wird für die Pneumatiksteuerung der Anlage ein Schaltplan erstellt, der eine Zweihandbetätigung sowie ein Druckregelventil zur sicheren Bedienung beinhaltet (Abbildung 23).

4.1 Dimensionierung der Fallprüfmaschine

Die Dimensionierung der Fallprüfmaschine ist vor allem durch die von dem Betrieb vorgeschriebenen, Parameter abhängig. Der Hauptgrund, der für die Bauhöhe ausschlaggebend ist, sind die nach ISTA Project 6 Amazon vorgeschriebenen Fallhöhen, um die Versuche im Rahmen der Norm durchzuführen. Die zu beprobenden Versandverpackungen sind in den durchzuführenden Versuchen nicht schwerer als 32 kg und enthalten keine anderweitig zu beprüfenden Materialien wie beispielsweise Fernseher oder Monitore. Ebenso werden standardmäßige rechteckige Pakete verwendet. Ausgehend von diesen gegebenen Parametern der Verpackung schreibt die Norm eine maximale Fallhöhe von 910 mm vor. Des Weiteren soll die Maschine in Zukunft auch für extremere Fallprüfungen außerhalb der oben genannten Norm verwendet werden, weshalb noch höhere Fallhöhen von bis zu 1700 mm ermöglicht werden. Die Gesamtbauhöhe wird durch eine weitere Vorgabe beschränkt, da die Fallprüfmaschine problemlos durch die Türen des Betriebes passen soll. Die vollständige Einheit ist mobil, um ein leichtes Einlagern zu ermöglichen. Aus diesen Parametern ergibt sich eine maximale Bauhöhe von 2000 mm und eine Breite von 1000 mm, die vor allem ausschlaggebend für die Dimensionierung des Standfußes sind. Durch diese Einschränkungen wird ein Standfuß konstruiert, welcher 1200 mm lang, 800 mm breit und 1975 mm hoch ist.

Resultierend aus diesen Beschränkungen für den Standfuß, wird die Fallplatte inklusive der Halterung für die Pneumatiksteuerung dimensioniert. Die Platte, die für die Befestigung des doppeltwirkenden Pneumatikzylinders benötigt wird, muss der Fallplatte ermöglichen, dass das Paket an dem Standfuß vorbei fallen kann, weshalb konzeptionsbedingt mindestens eine Länge von 330 mm benötigt wird. Ebenso wird die gesamte Schaltung samt Zylinder an dieser Platte verbaut um die Druckluftschläuche so kurz wie möglich zu halten, sodass kein Druckverlust auf langen Wegen an die einzelnen Aktuatoren und den Zylinder auftritt, um Verzögerungen zu vermeiden. Um einen stabilen Sitz dieser Platte zu gewährleisten, umschließt diese das Vierkantrohr an drei Seiten und wird, um Messfehler bei Fallprüfungen durch Auftreffen auf den Standfuß zu vermeiden, verlängert. Daraus resultiert eine Länge von 502 mm. Die Abmessungen der Fallplatte werden durch die Maße der zu beprobenden Versandverpackungen festgelegt. Die in dieser Arbeit beprobten Verpackungen haben lediglich an der breitesten Stelle eine Breite von 250 mm. Um einen festen Stand der Verpackung zu gewährleisten, wird eine Platte mit einer Länge von 440 mm und einer Breite von 230 mm gewählt. Diese begrenzt somit die minimale Fallhöhe der Testobjekte auf 440 mm.

4.2 Materialwahl

Begonnen wird mit der Grundplatte für den Standfuß. Hierfür soll eine Palette verwendet werden, um die Fallprüfmaschine mittels eines Flurförderfahrzeuges frei im Betrieb bewegen zu können und einen leichten Transport zu ermöglichen. Jedoch kommt hierfür keine standardmäßige Europalette aus Holz in Frage, da die Maschine auch in Bereichen verwendet werden soll, in denen Lebensmittel produziert werden und deshalb auf Hygiene geachtet werden muss. Unbearbeitetes Holz ist anfällig für Feuchtigkeit und bietet somit Mikroorganismen, wie Schimmelpilzen, eine perfekte Oberfläche und kann zudem nur schwer gereinigt werden. (Schneider, 2026) Demzufolge kann nur eine Europalette aus Polyethylen, die für die Verwendung in Hygienebereichen freigegeben ist, für dieses Projekt verwendet werden. Das gewählte Stahlvierkantrohr, welches auf die Grundplatte aufgesetzt wird, überzeugt durch hohe Stabilität bei geringer Wandstärke. Um ein Oxidieren der Anlage zu vermeiden, wurde das Rohr zusätzlich feuerverzinkt. Für die Halterung der Fallplatte wurde ebenfalls ein Vierkantrohr verwendet, welches einen größeren Innendurchmesser als das des Standfußes hat, sodass es knapp darüber passt aber beweglich bleibt. An dieses wird die Platte, die die Halterung für die Steuerung darstellt, montiert. Diese besteht ebenfalls aus Stahl, um sie mittels einer Schweißnaht zu verbinden. Die Fallplatte wurde ebenfalls aus Stahl hergestellt, um eine hohe Abklappgeschwindigkeit der Platte zu gewährleisten. Die Verbindung dieser beiden Platten wird mit vier versetzt angeschweißten Rohren ermöglicht, welche durch eine

passgenaue Stahlrundstange zusammengehalten werden. So entsteht ein bewegliches Scharnier, welches das Abklappen ermöglicht. Das wichtigste Bauteil der Pneumatiksteuerung ist der doppeltwirkende Pneumatikzylinder der Firma Festo. Dieser wird durch zwei Ventile gesteuert. Einem 3/2 Wegeventil, das die Luftzufuhr für das 5/2 Wegeventil freigibt, welches im Folgenden den Zylinder steuert. So wird verhindert, dass der Mechanismus nur mit einer Hand ausgelöst werden kann. Die Luftzufuhr wird durch einen Druckminderer geregelt, welcher an die Druckluftquelle angeschlossen wird. Die einzelnen Komponenten sind mittels Schnellverbindern mit 6 mm Druckschläuchen aus Polyurethan verbunden.

4.3 Fertigung

Bei der Fertigung wird das Material zuerst mithilfe einer Bandsäge auf Maß geschnitten. Anschließend wird das lange Vierkantrohr, welches im weiteren Verlauf den Ständer darstellt, bearbeitet. Hierfür werden die Positionen der benötigten Bohrungen auf dem Rohr angezeichnet und mittels eines Körners markiert, um eine punktgenaue Bohrung durchführen zu können. Mit einem Bohrer mit 13 mm Durchmesser wird durch das komplette Rohr gebohrt. Anschließend werden die Bohrlöcher mithilfe eines Kegelsenkers entgratet, um Verletzungen zu minimieren. Der letzte Bearbeitungsschritt des Vierkantrohrs umfasst das Anfasen und Versäubern der unteren Seite mittels eines Winkelschleifers mit Fächerscheibe, um diese gut mit der Trägerplatte verschweißen zu können. Diese dient im Anschluss als Trägerplatte des Ständers, mit dessen Hilfe er stabil auf der Palette verschraubt werden kann. Auf der Trägerplatte müssen ebenfalls vier Bohrungen angezeichnet sowie die Position des Ständers markiert und versäubert werden. Zunächst wird die Halterung der Steuerung konstruiert, die auch die Verbindung zum Standfuß gewährleistet. Das, über das Vierkantrohr des Fußes passende, Rohr wird ebenfalls mit einer Bohrung versehen. Diese Bohrung dient im weiteren Verlauf zum Verbinden der beiden Bauteile über einen Bolzen. Nach der Bohrung wird die Mitte des Rohrstückes markiert, um dort die Stahlplatte anschweißen zu können. Für die stabile Verbindung mit dem Vierkantrohr muss zuerst in der Mitte der Platte ein Ausschnitt ausgeschnitten werden, der das Rohr von drei Seiten umfasst. Vor dem Verschweißen der beiden Bauteile werden die Bohrungen durchgeführt, an denen, während der Montage, die Steuerventile und der Pneumatikzylinder montiert werden. Die Rohre, die nach der Montage die Verbindung der Platte mit der Fallplatte herstellen, werden an der Außenseite der Trägerplatte verschweißt. Um die richtige Ausrichtung dieser zu gewährleisten, wird hier bereits der Rundstahl, der nach der Montage die Verbindung herstellt, durch die Rohrstücke geschoben, um Verklemmungen zu vermeiden. Für die Befestigung der Stoßdämpfer, die die Energie des Aufpralls aufnehmen, um die Beanspruchung der

Schweißnähte zu minimieren, werden auf beiden Seiten Winkel, die mit jeweils einer 3-mm-Bohrung versehen sind, an die Platte angeschweißt. Auch an die Fallplatte wird an der durch die Zeichnung festgelegten Stelle ein Winkel angeschweißt, der die Kraft der oben wirkenden Fallplatte umleitet, sodass diese nicht von oben auf die Kolbenstange wirkt, sondern frontal. Zuletzt werden die beiden Rohrstücke, die im Folgenden das Scharnier darstellen, an die Platte geschweißt. Dieses Bauteil wird mit einer 2-mm-Bohrung am Ende versehen, sodass dieses im Weiteren durch einen Splint gesichert werden kann. Am anderen Ende des Rundstahles wird ein Schweißpunkt gesetzt, um den Durchmesser zu vergrößern und ein Durchrutschen zu verhindern. Zur Befestigung des Pneumatikzylinders wird ein Aluminiumflachprofil zugeschnitten und nach den Anforderungen des Zylinders gebogen. An den Enden der beiden angefertigten Profile werden Löcher gebohrt, um diese später mittels Schrauben mit der Halteplatte verbinden zu können. Für die Verbindung zwischen den beiden Hauptbaugruppen wird ein Bolzen angefertigt, der aus einem 12 mm Rundedelstahl besteht. Um den Bolzen leichter durch die Bohrungen stecken zu können und die Verletzungsgefahr zu minimieren wird dieser an beiden Seiten mit einer Fase versehen. Anschließend wird eine 3-mm-Bohrung an ein Ende des Bolzens gesetzt, um diesen mit einem Splint sichern zu können. Der Edelstahl wird gebogen, sodass der Bolzen leicht mit der Hand herausgezogen werden kann. Das komplette Durchstecken wird durch eine, auf den Rundstahl geschweißte Beilagscheibe verhindert. Zuletzt wird auf das Vierkantrohr des Ständers eine Abdeckkappe aufgesteckt, um Verletzungen an dem oben offenstehenden Rohr zu vermeiden.

4.4 Endmontage

Um die Endmontage der Fallprüfmaschine durchzuführen, wird zuerst eine passende Palette gewählt. Auf dieser wird anschließend der aus Stahl gefertigte Standfuß, wie geplant, positioniert und die, zur dessen Verankerung benötigten Löcher angezeichnet, um diese im Anschluss mit einem 12-mm-Bohrer bohren zu können. Zur Verankerung werden im Folgenden 10-mm-Gewindestangen auf eine Länge von 120 mm mithilfe eines Winkelschleifers zugeschnitten und an den Schnittstellen entgratet. Da die gewählte Palette ihre Stabilität erst über die eingearbeiteten Verstrebungen erhält und eine sehr dünne und unstabile Oberfläche besitzt, welche wenig Stabilität gewährleistet, wurden die Gewindestangen so abgelängt, dass sie über die Verstrebungen hinausstehen. Dies bietet die Möglichkeit, mithilfe einer Lochplatte, die Verankerung stabil zu gestalten. Von der oberen Seite werden die Gewindestangen mit passenden Hutmuttern versehen. Nach diesem Schritt werden die Gewindestangen durch die Trägerplatte und die Palette mit selbstsichernden Muttern von unten verschraubt. Die Verschraubung der Trägerplatte mit der Palette ist in Abbildung 5 zu sehen. Als nächstes wird die

Pneumatikschaltung an der Halterung des Falltisches montiert. Hierzu werden zuerst die passenden Schnellanschlüsse in den Pneumatikzylinder, die beiden Ventile und das Druckregelventil eingeschraubt. Ebenso werden die Ventile mit Schalldämpfern an den Ausgängen versehen, welche die komprimierte Luft nach der Betätigung in die Atmosphäre entlassen, um die Lärmentwicklung zu minimieren. Nach diesen Arbeitsschritten werden die Ventile mit Schrauben an der Unterseite der Halteplatte montiert. Das Druckregelventil wird mithilfe einer Rohrschelle, die über den Drehregler geschoben wird, montiert. Dieses kann so mithilfe einer Mutter, die zur Befestigung auf der Schelle platziert ist, an der Halteplatte befestigt werden (Abbildung 6). Um den Aktor der Steuerung mithilfe der angefertigten Aluminiumhalterungen an der Platte zu verschrauben, wird unter dem Zylinder eine Anti-Rutschmatte angebracht. Dies wirkt sich auch auf die Fallhöhe aus, da der Zylinder so eingebaut ist, dass er die Platte nur im komplett ausgefahrenen Zustand waagerecht halten kann und die gewünschte Fallhöhe sicherstellt. Der letzte Schritt zur Fertigstellung der Schaltung beinhaltet die korrekte Verbindung der einzelnen Bauteile mithilfe der 6mm Pneumatikschläuche. Die Puffer, die die Kräfte des Aufpralles der Fallplatte aufnehmen, werden mit Schrauben an den dafür vorhergesehenen Bohrungen befestigt. Im Anschluss wird die Fallplatte durch das dafür angefertigte Rundstahl mit der Halteplatte verbunden. Die Montage der Fallprüfmaschine wird durch das Aufstecken der Fallapparatur auf den Standfuß und deren Befestigung auf diesem durch den angefertigten Sicherungsbolzen abgeschlossen. In Abbildungen 7 ist die fertig konstruierte Fallprüfmaschine dargestellt.

Abbildung 5: Verschraubung zwischen Trägerplatte und Palette (Quelle: Winters L., 08.01.2026)

Abbildung 6: Befestigung des Druckregelventils (Quelle: Winters L., 08.01.2026)

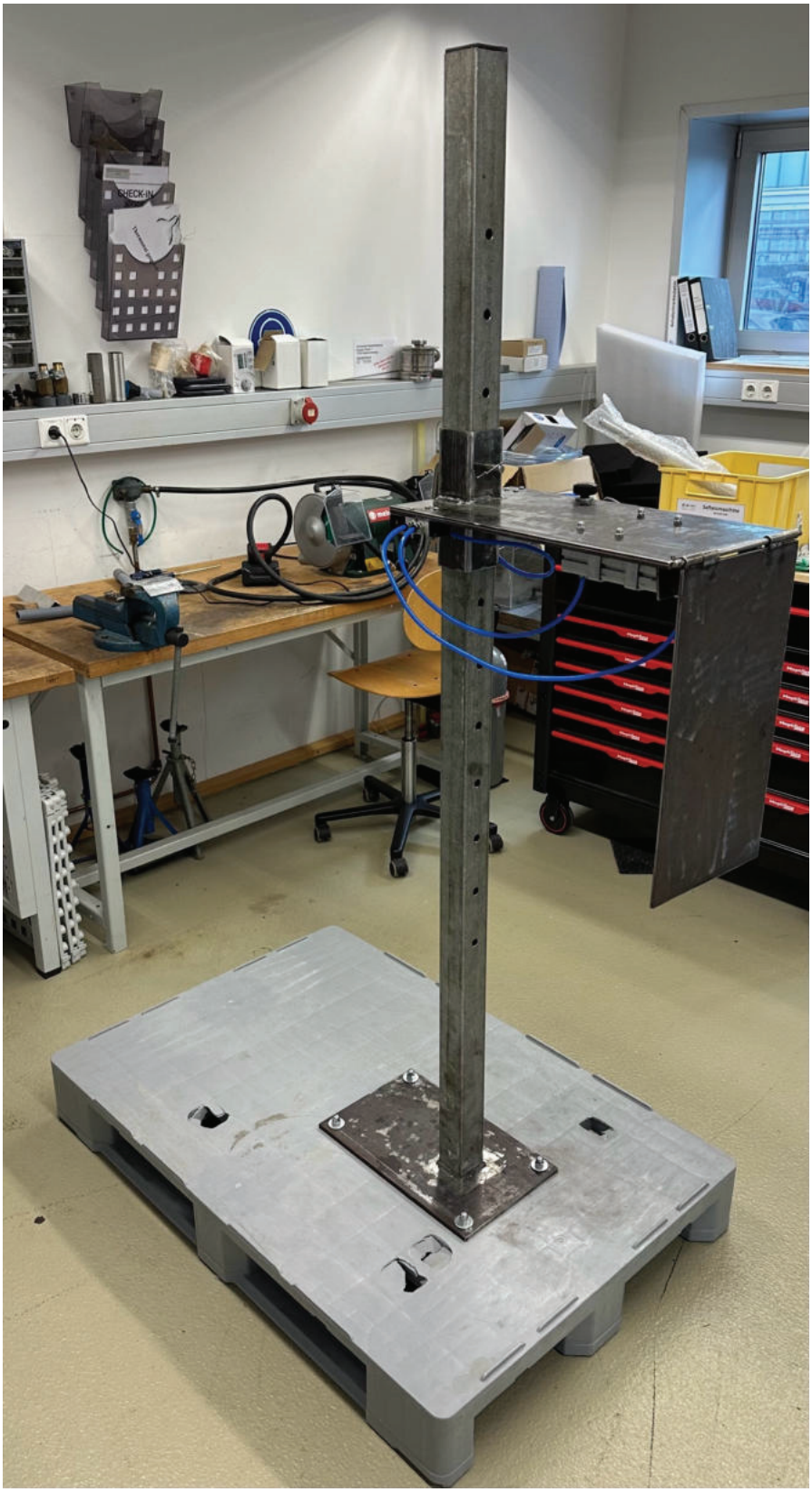


Abbildung 7: Fertig montierte Fallprüfmaschine (Quelle: Winters L., 08.01.2026)

5 Versuchsaufbau

5.1 Versuchsvorbereitung

Die Versuche werden nach dem Leitfaden der ISTA Project 6 Amazon durchgeführt. Dabei muss zuerst der Typ des Paketes, welches den Versuchen unterzogen werden soll, festgelegt werden. Die in den Versuchen verwendeten Pakete haben eine Länge von 250 mm, eine Breite von 175 mm und eine Höhe von 100 mm. Diese werden von Typ A bis H differenziert (Abbildung 8). Die in dieser Arbeit getesteten Versandverpackungen fallen hierbei unter Typ A. Dieser wird durch die Versandart, bei der es sich um den Paketversand einzelner verpackter Produkte handelt, die Handhabungsmethode, welche als Standardhandhabungsmethode definiert ist, das Gewicht, welches kleiner als 23 kg ist, und die Abmessungen die einen Umfang gleich oder weniger als 4,19 m nicht überschreiten dürfen, bestimmt (ISTA 6-Amazon, 2018, S. 2). Aufgrund dieser Bestimmungen wird die Testsequenz für Typ A gewählt, wobei bei dieser Arbeit nur auf Sequenz 3 eingegangen wird, die die Versuche mit dem Frei-Fall-Falltester beschreibt (ISTA 6-Amazon, 2018, S. 3).

Anschließend werden die Seiten, Ecken und Kanten der Versandverpackung nach dem in Abbildung 9 zu sehenden, Diagramm identifiziert, um die Versuche wie vorgeschrieben durchführen zu können. (ASTM International, 2021, S. 2)

Für die Versuche werden 3 Identische Versandverpackungen vorbereitet, um einen Vergleich von diesen anstellen zu können. Versandverpackung 1 wird mit Verpackungschips gefüllt, welche lose die gesamte Einheit ausfüllen (Abbildung 10). Paket 2 wird mit Luftpolsterfolie ausgepolstert (Abbildung 11), wobei Versandeinheit 3 ohne jegliches Verpackungsmaterial getestet wird (Abbildung 12).

In diese Pakete wird anschließend ein G-Log-Datensensor der Firma ASPION eingebettet (Abbildung 13) der anschließend die Aufprallereignisse aufzeichnet. Dieser muss hierfür zuerst mit einem Datenprofil beschrieben werden, welches den Anforderungen der Tests entspricht. Die Schwellenwerte, die für eine Auslösung der Aufzeichnung gelten, sind auf +/- 2 g bei einem Schock und einer Schockdauer von 40 ms festgelegt. Außerdem werden die Daten mit einer Frequenz von 400 Hz aufgezeichnet

Nach den Vorschriften der ISTA sollen neun Fallprüfungen aus zwei verschiedenen Höhen auf verschiedene Flächen, Kanten und Ecken durchgeführt werden. Diese sind in Tabelle 1 zu erkennen. Durch die baulich bedingten Gegebenheiten der konstruierten Freifall-Fallprüfmaschine wird für diese Arbeit ein neuer Standard entwickelt und in

einem Prüfprotokoll dargestellt. Da das Paket nicht aus der Vorgeschriebenen Höhe von 460 mm fallengelassen werden kann, wird die nächstmögliche Einstellung von 600 mm gewählt. Diese ist zugleich die niedrigste Fallhöhe, die mit der Maschine realisiert werden kann. Dieses Problem tritt auch bei der Fallhöhe von 910 mm auf. Das Paket soll jedoch nicht aus einer geringeren Höhe als vorgeschrieben geprüft werden, weshalb diese auf 1000 mm gerundet wurde. Des Weiteren fehlt der Fallprüfmaschine eine Vorrichtung zur korrekten Positionierung der Versandverpackungen auf Ecken und Kanten. Deshalb können nur Versuche durchgeführt werden, bei denen das Paket auf einer Fläche liegt. Dafür wird Fläche drei gewählt. Anschließend wird das Paket mit Fläche zwei nach vorne gerichtet auf der Fallplatte positioniert. Dieser neue Standard ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1: Fallhöhe und Orientierung der Versandverpackungen nach ISTA (ISTA 6-Amazon, 2018)

	Höhe [mm]	Orientierung
Drop 1	460	Kante 3-4
Drop 2	460	Kante 3-6
Drop 3	460	Kante 4-6
Drop 4	460	Ecke 3-4-6
Drop 5	460	Ecke 2-3-5
Drop 6	460	Kante 2-3
Drop 7	460	Kante 1-2
Drop 8	910	Fläche 3
Drop 9	460	Fläche 3

Tabelle 2: Fallhöhen und Orientierung der Versandverpackungen des neuen Standads.

	Höhe [mm]	Orientierung
Drop 1	600	Fläche 3
Drop 2	600	Fläche 3
Drop 3	600	Fläche 3
Drop 4	600	Fläche 3
Drop 5	600	Fläche 3
Drop 6	600	Fläche 3
Drop 7	600	Fläche 3
Drop 8	1000	Fläche 3
Drop 9	600	Fläche 3

Zuletzt wird die Fallprüfmaschine an den gewünschten Ort für die Versuche gestellt und mit dem Druckluftsystem verbunden. Bei der Platzwahl der Maschine ist darauf zu achten, dass die Fläche, auf die das Paket fällt, aus Beton, Stein oder Stahl besteht, eben sowie nicht Abschüssig ist

Packaged-Product Test Types

- **Type A:**
  - **Shipment Method**: Parcel Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** Less than 50 lb (23 kg) **&** Girth equal to or less than 165" (4.19 m)
- **Type B:**
  - **Shipment Method**: Parcel Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** 50 lb (23 kg) to Less than 100 lb (45 kg) **&** Girth equal to or less than 165" (4.19 m)
- **Type C:**
  - **Shipment Method**: Parcel Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** 100 lb (45 kg) or Greater **&** Girth equal to or less than 165" (4.19 m)
- **Type D:**
  - **Shipment Method**: Less-Than-Truckload (LTL) Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** Less than 100 lb (45 kg) **or** Girth greater than 165" (4.19 m)
- **Type E:**
  - **Shipment Method**: Less-Than-Truckload (LTL) Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** 100 lb (45 kg) or Greater **or** Girth greater than 165" (4.19 m)
- **Type F:**
  - **Shipment Method**: Less-Than-Truckload (LTL) Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Pallet Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** N/A **&** N/A
- **Type G: TV/Monitor**
  - **Product Category:** TV/Monitor
  - **Shipment Method**: Parcel Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** Less than 150 lb (68 kg) **&** Girth equal to or less than 165" (4.19 m)
- **Type H: TV/Monitor**
  - **Product Category:** TV/Monitor
  - **Shipment Method**: Less-Than-Truckload (LTL) Delivery of Individual Packaged-Products
  - **Handling Method:** Standard Handling Method
  - **Weight & Dimensions:** 150 lb (68 kg) or Greater **or** Girth greater than 165" (4.19 m)

Abbildung 8: Testverpackungstypen Einteilung (ISTA 6-Amazon, 2018, S. 2)

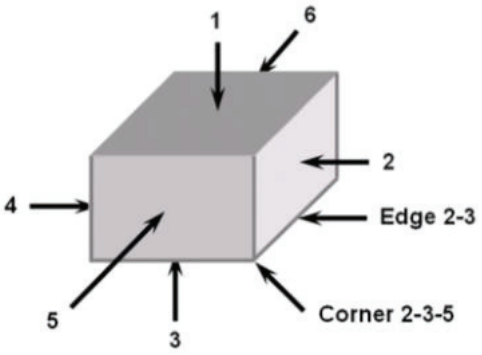


Abbildung 9: Diagramm zur Identifizierung der Flächen von Versandverpackungen (ISTA 6-Amazon, 2018, S. 18)

Abbildung 10: Versandverpackung 1 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Abbildung 11: Versandverpackung 2 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Abbildung 12: Versandverpackung 3 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Abbildung 13:ASPION G-Log Sensor (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

5.2 Versuchsdurchführung

Im Anschluss dieser Vorbereitungen werden die Fallprüfungen durchgeführt und protokolliert. Dabei werden in den drei Versuchen jeweils die neun durch Amazon vorgeschriebenen Fallereignisse mithilfe der Fallprüfmaschine simuliert. Es wird der neu entwickelte Standard verwendet und das Paket dementsprechend auf der Fallplatte ausgerichtet. Während der Fallprüfungen ist zu beobachten, dass das Paket nicht komplett gerade zu Boden fällt und nicht genau auf der definierten Fläche aufkommt. In seltenen Fällen wird die Versandverpackung, durch Zurückschwingen der Fallplatte, einem zweiten, in der späteren Auswertung nicht zu beachtenden, Stoßereignis ausgesetzt. Anschließend wird der Sensor vorsichtig aus dem Paket entnommen und mithilfe der Software von ASPION ausgelesen. Die entstandenen Stoßprotokolle werden anschließend kurz betrachtet, um Fehler bei der Versuchsdurchführung ausschließen zu können. Folgend wird die Verpackung durch eine Sichtprüfung auf physische Beschädigungen geprüft. Ebenso wird, wie in Tabelle 3 dokumentiert, Protokoll über die Fallzeiten und das Gewicht der Versandverpackungen geführt, um im Verlauf der Auswertung die Schockereignisse der korrekten Verpackung und Fallhöhe zuordnen zu können.

Tabelle 3: Protokoll der Dropzeiten und des Gewichts

	Füllgut	Gewicht [g]	Dropzeit 1	Dropzeit 2	Dropzeit 3	Dropzeit 4	Dropzeit 5	Dropzeit 6	Dropzeit 7	Dropzeit 8	Dropzeit 9
Paket 1	Verpackungspellets	136,8	11:14	11:15	11:16	11:17	11:18	11:19	11:20	11:21	11:22
Paket 2	Luftpolsterfolie	177,91	11:34	11:35	11:36	11:37	11:38	11:39	11:40	11:41	11:42
Paket 3	ohne Verpackungsmaterial	118,87	11:47	11:48	11:49	11:50	11:51	11:52	11:53	11:54	11:55

Diese Versuche werden im folgenden Kapitel „Ergebnisse“ dargestellt. Bildliche Darstellungen der Fallprüfungen sind im Anhang in den Abbildungen 24 - 28 dargestellt.

6 Ergebnisse

Im Anschluss an die einzelnen Fallprüfungen wird der G-Log-Sensor ausgelesen und die Schockdetails werden mithilfe der zugehörigen Software von ASPION gespeichert. Die entsprechenden Protokolle sind im Anhang in den Abbildungen 29-38 aufgeführt. Anhand der mit dem Sensor ermittelten Daten kann nun festgestellt werden, welches Verpackungsmaterial den höchsten Schutz für ein mögliches Versandgut bietet.

> *Die höchsten Schock-Ereignisse werden über die sogenannte Schockintensität ermittelt [...]. Diese berücksichtigt die Stärke als auch die Dauer des Schocks. Je höher der Wert, desto höher ist die Belastung. (ASPION GmbH, 2025, S. 45)*

Die Schockdetails sind in einem Diagramm dargestellt. In diesem zeigt die X-Achse die Schockdauer in einem Zeitraum von 45 ms an, während die Y-Achse den Schock von bis zu +/- 15 g beschreibt. Die darin abgebildeten Kurven zeigen den Verlauf der Schockbeschleunigung in die drei orthogonalen Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse) auf. Ebenso wird oberhalb des Diagramms die Schockintensität angegeben, welche den Schock auf Basis der Stärke und Dauer bewertet. Im Folgenden sind jeweils die höchsten Schockereignisse der einzelnen Versuche dargestellt und beschrieben. (Monica AI, 01.02.2026)

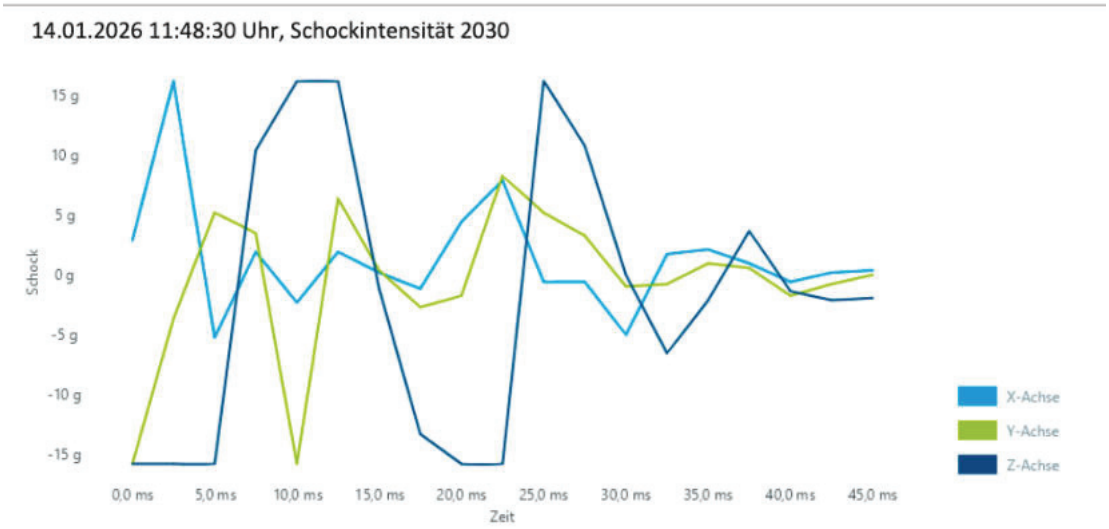


Abbildung 14: Stärkstes Schockereignis Versuch ohne Verpackungsmaterial (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Das oben dargestellte Diagramm, des stärksten Schockereignisses im Versuch ohne Verpackungsmaterial (Abbildung 14), zeigt auf der X-Achse, welche im Folgenden immer in hellblau dargestellt ist, zu Beginn des Schockereignisses eine sehr hohe positive Beschleunigung von 15 g auf. Anschließend folgt ein erkennbarer

Richtungswechsel mit geringeren negativen Beschleunigungswerten von 5 g. Nach einem weiteren positiven Peak nach circa 25 Millisekunden nehmen die Amplituden insgesamt ab und weisen nur noch geringere Schwankungen auf. Die Y-Achse (grün) startet mit zwei stark negativen Beschleunigungswerten von 15 g in den ersten 10 Millisekunden. Im weiteren Verlauf wird ein positves Maximum von circa 8 g erreicht, worauf sich die Kurve im Bereich weniger g einpendelt. Auch auf der Z-Achse (dunkelblau) wird zu Beginn der Schockaufzeichnung ein stark negativer Ausschlag festgestellt. Im Bereich von 5 – 30 Millisekunden schwankt die Kurve zwischen positiven und negativen Werten von 15 g. Ab diesem Momemt nimmt die Amplitude der Kurve deutlich ab. (Monica AI, 01.02.2026)

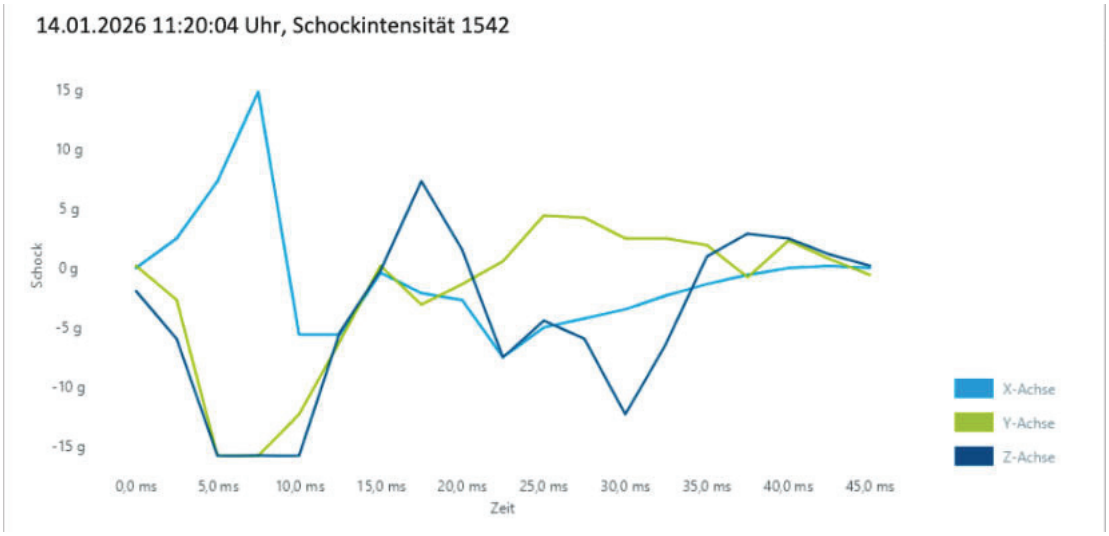


Abbildung 15: Stärkstes Schockereignis Versuch mit Verpackungschips (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Das zweite Diagramm (Abbildung 15), welches den Versuch mit den als Verpackungsmaterial gewählten Verpackungschips darstellt, zeigt zwischen 5 und 10 Millisekunden lediglich eine starke positive Beschleunigung auf ungefähr 15 g auf der X-Achse. Anschließend wird ein maximaler Negativwert von circa 7 g zwischen 20 und 25 Millisekunden festgestellt, nachdem die Kurve bis zum Ende der Aufzeichnung langsam gegen einen Wert von 0 g ansteigt. Die Y-Achse hingegen stellt ihren Maximalausschlag der Beschleunigung von -15 g zu Beginn dar. Zwischen 15 und 35 Millisekunden steigt die Amplitude zu einem Plateau mit einer Maximalbeschleunigung von 5 g an und fällt danach auf 0 g ab. Die Aufzeichnung der Z-Achse fällt zu Beginn von nahe 0 g innerhalb von 5 Millisekunden auf die maximal messbare Beschleunigung ab und ändert ihre Orientierung erst in der Spanne von 10 – 20 Millisekunden auf eine positive Beschleunigung von nahezu 10 g. Danach folgt ein kleinerer negativer Ausschlag bis Millisekunde 30. Anschließend läuft auch diese Kurve über eine kleine positive Beschleunigung Richtung 0 g aus. (Monica AI, 01.02.2026)

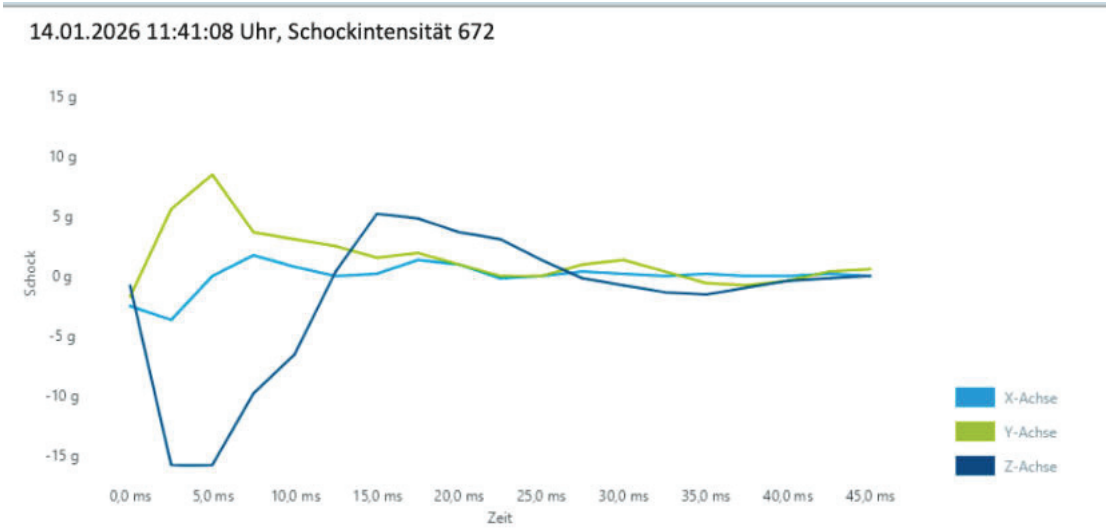


Abbildung 16: Stärkstes Schockereignis Versuch mit Luftpolsterfolie (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Das letzte, in Abbildung 17 dargestellte, Schockdiagramm zeigt das größte Schockereignis des Versuches mit der als Verpackungsmaterial gewählten Luftpolsterfolie auf. Dabei sind auf der X-Achse kaum Schwankungen der Kurve sichtbar. Lediglich zu Beginn der Messung sind kleine positive und negative Ausschläge unter 5 g abzulesen. Die Y-Achse verhält sich ähnlich der X-Achse, zeigt aber in der Frühphase der Aufzeichnung eine deutlich positive Beschleunigung bis nahezu 10 g auf. Im Gegensatz dazu zeigt die Z-Achse initial den stärksten negativen Ausschlag von 15 g, welcher im Weiteren schnell wiederansteigt und sich nach dem positiven Peak von 5 g bei Millisekunde 15 langsam wieder bei 0 g einpendelt. (Monica AI, 01.02.2026)

7 Diskussion

Wenn man die Arbeit insgesamt betrachtet, wurden die beiden Hauptziele im Kern erreicht. Es wurde eine Fallprüfmaschine konzipiert und konstruiert, die tatsächlich funktioniert und wiederholbare Fallversuche ermöglicht. Ebenfalls konnten damit verschiedene Verpackungsmaterialien im direkten Vergleich untersucht werden. Gleichzeitig zeigen die Versuche aber auch sehr deutlich, wo die Grenzen der Konstruktion liegen. Genau diese Punkte sind wichtig, um die Ereignisse richtig einzuordnen und die Maschine sinnvoll weiterzuentwickeln.

7.1 Bewertung der Fallprüfmaschine

Der Bau der Maschine, welcher auf Grundlage der technischen Zeichnungen erfolgte, lief wie geplant ab. Daraus lässt sich schließen, dass das Konzept und die daraus entstandenen Zeichnungen gut durchdacht sind und sich im Rahmen des Projekts realisieren lassen.

Die Anlage erfüllt die Grundidee eines Falltesters. Durch das pneumatische Auslösen wird das Packstück freigegeben und fällt auf den Untergrund, sodass die Sturzbelastungen im Labor nachgestellt werden können. Für den geplanten Einsatz im Betrieb ist außerdem positiv, dass die Maschine mobil bleibt. Auch die Entscheidung für eine pneumatische Lösung ist im Rahmen dieser Arbeit nachvollziehbar. Dieses System ist vergleichsweise gut umsetzbar, robust und in der Bedienung nicht unnötig komplex. Die Zweihandbetätigung ist ebenfalls ein sinnvoller Sicherheitsaspekt, weil dieser das unbeabsichtigte Auslösen erschwert.

Trotzdem muss klar gesagt werden, dass die Maschine im Sinne von ISTA, ASTM und ISO nur eingeschränkt normgerecht ist. Das ist weniger eine Kritik, sondern eher die logische Folge der gewählten Konstruktion und des Projektumfangs. Sobald man die Ergebnisse direkt mit normkonformen Fallprüfungen vergleichen oder sogar als Nachweis im Sinne einer Zertifizierung nutzen will, reichen die aktuellen Rahmenbedingungen nicht aus.

Der wichtigste Punkt ist dabei die Höhenverstellung. Weil Fallhöhen nicht stufenlos eingestellt werden können, lassen sich die in den Normen genannten Werte nicht exakt treffen. Da die Fallhöhe einen sehr großen Einfluss auf die Belastung hat, schränkt das die Vergleichbarkeit mit ISTA-Sequenzen spürbar ein. Noch deutlicher wird die Abweichung dadurch, dass mit der aktuellen Ausführung keine gezielten Kanten- und Eckstürze aufgrund einer fehlenden Aufnahme hierfür möglich sind. Gerade diese

Sequenzen sind in der Praxis oft besonders kritisch, weil die Kräfte lokal konzentriert sind und Schäden schneller entstehen als bei einem Flächenaufprall. In dieser Arbeit wurden deshalb nur Versuche durchgeführt, bei denen die Versandverpackungen mit der Fläche voran fallen gelassen werden. Deshalb sind die Ergebnisse zwar genau für diesen Lastfall aussagekräftig, aber nicht ohne Weiteres auf den allgemeinen Versand zu übertragen.

7.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die drei Versuchsreihen konnten nach dem neu festgelegten Standard durchgeführt werden. Wie zu erwarten, zeigten die verschiedenen Verpackungsmaterialien unterschiedliche Ergebnisse. Die in den Schockdiagrammen dargestellten Kurven stellen die Schockereignisse in die drei orthogonalen Raumrichtungen dar. Die Interessantesten Daten für diese Arbeit sind die der Z-Achse. Das hat den Hintergrund, dass diese die vertikalen Beschleunigungen aufzeigen. Dabei ist zu beachten, dass ein starker Ausschlag der Amplitude in positive oder negative Richtung mit einem entsprechend starken Stoß gleichzustellen ist. Ebenso wichtig ist die dargestellte Schockintensität der Ereignisse. Diese wird anhand der Dauer und der Stärke der Impulse durch das Programm berechnet und gibt Aufschluss über die Intensität des gesamten Stoßereignisses. Dieser Wert kann gut zur schnellen Einordnung der Schockereignisse verwendet werden, da einzelne Ausschläge auf dem Diagramm nicht verglichen werden müssen.

Die Versuchsreihe, die ohne Verpackungsmaterial durchgeführt wurde, zeigt sich in den Diagrammen in den Abbildungen 29 - 32. Dabei ist zu erwähnen, dass alle neun Fallversuche aufgezeichnet wurden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in jedem Drop der benötigte Mindestausschlag erreicht wurde. Jedes Diagramm zeigt Stöße in Z-Richtung auf, welche einen Maximalen positiven und negativen Ausschlag aufweisen. Daraus lässt sich schließen, dass der G-Log Sensor die starken Stöße ungedämpft aufzeichnet. Deshalb ist ein loser Transport ohne Verpackungsmaterialien oder anderweitiger Sicherungen des Packstückes nicht zu empfehlen, da die Stöße den Inhalt mit hoher Wahrscheinlichkeit beschädigen würden. Entgegen den Erwartungen tritt die stärkste Schockintensität von 2030 nicht aus der größten Fallhöhe auf. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sich das Paket im freien Fall so ausrichtet, dass es nahezu perfekt auf Fläche drei landet und somit weniger Stöße in X- und Y-Richtung aufgezeichnet werden.

Vergleicht man nun die Versandverpackung, die mit Verpackungschips gefüllt wurde (Abbildung 33 - 36), mit der ohne Verpackungsmaterial fällt auf, dass die Kurven einen deutlich ruhigeren Gesamtverlauf aufweisen. Lediglich zu Beginn des Schockereignisses wird ein negativer Maximalausschlag der Z-Achse erreicht. Zusätzlich zu erwähnen ist, dass wie im vorhergehenden Versuch alle Fallereignisse aufgezeichnet wurden, da

der Mindestausschlag erreicht wurde. Im Allgemeinen ist die Dämpfungswirkung der Verpackungschips deutlich erkennbar, da die maximale Schockintensität auf 1542 sinkt, welche erneut entgegen den Erwartungen nicht aus der größten Fallhöhe aufgezeichnet wurde.

In der letzten Versuchsreihe, in welcher der Sensor mit Luftpolsterfolie in die Versandverpackung eingebettet wurde, wurde im Gegensatz zu den zwei vorhergehenden Versuchsreihen lediglich ein einziges Schockereignis aufgezeichnet. (Abbildung 37 - 38) Dieses Ereignis wurde, wie erwartet, aus der größten Fallhöhe gemessen. Der Maximalausschlag der Z-Achse wurde erreicht, was auf einen starken Schlag schließen lässt. Dem weiteren Kurvenverlauf ist zu entnehmen, dass die Luftpolsterfolie den Schlag gut dämpft und weitere Vibrationen verhindert. Die für eine Aufzeichnung eines Schocks benötigten Schwellenwerte werden bei den acht anderen Fallereignissen nicht erreicht, was auf eine sehr gute Schutzwirkung dieses Materials hinweist. Ebenso sinkt die Schockintensität erneut stark auf einen Wert von 672 ab.

Ein Punkt, der sich im Versuchsbetrieb als besonders relevant herausgestellt hat, ist das Rückschwingen der Fallplatte. In den Sensordaten tauchen Stoßereignisse auf, die kurz nach dem eigentlichen Aufprall auftreten. Diese Ereignisse sind sehr plausibel dadurch erklärbar, dass die Fallplatte nach dem Auslösen wieder zurückschlägt und dem Paket dadurch einen zusätzlichen Stoß versetzt. Dieser Fall ist beispielsweise in Abbildung 29 im Zeitraum 11:50:27 und 11:50:28 erkennbar. Innerhalb dieser Sekunde ist eine starke Beschleunigung in Richtung der Y-Achse protokolliert, welche die Ausschlagsrichtung der Fallplatte darstellt. Für die Bewertung der Verpackungsmaterialien ist das problematisch, weil damit nicht nur das Fallereignis selbst gemessen, sondern teilweise auch ein maschinenbedingtes zweites Stoßereignis aufgezeichnet wird. Dass diese Ereignisse bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden, ist deshalb richtig und zeigt auf, dass die Konstruktion an dieser Stelle noch Optimierungsbedarf hat.

Aus den Beobachtungen ergeben sich klare Schritte für eine Weiterentwicklung. Aus technischer Sicht wäre es am wichtigsten, das Rückschwingen der Fallplatte konstruktiv zu reduzieren oder zu verhindern, beispielsweise durch eine mechanische Sperre, definierte Anschläge oder eine bessere Dämpfung, damit nach dem Auslösen keine zusätzlichen Stöße auf die Versandverpackung einwirken. Für einen starken Normbezug wären außerdem eine feinere beziehungsweise stufenlose Höhenverstellung sowie eine Vorrichtung für Kanten- und Eckorientierungen notwendig.

Die Messmethodik mit dem ASPION G-Log-Sensor ermöglicht die quantitative Beurteilung der Beschleunigungs- und Schockwerte. Damit lassen sich Unterschiede zwischen Verpackungsvarianten deutlich besser herausarbeiten. Allerdings haben sich auch hier

Grenzen gezeigt. Praktisch störend ist die Limitierung, dass nur eine begrenzte Anzahl an detaillierten Schockereignissen gespeichert wird und der Sensor deshalb häufig ausgelesen und gestoppt werden muss. Dabei muss zudem erwähnt werden, dass der Sensor einen maximalen Beschleunigungswert von +/- 15 g aufzeichnen kann. Aus diesem Grund kann der tatsächliche maximale Ausschlag nicht gemessen werden. Zusätzlich hängt die Messung stark davon ab, wie der Sensor im Paket sitzt. Für strengere Vergleiche wäre es daher sinnvoll, die Positionierung und Fixierung des Sensors konsequent zu standardisieren.

Die Ergebnisse zum Verpackungsmittelvergleich sind insgesamt plausibel und entsprechen dem, was man aus der Praxis erwarten würde. Die Verpackung ohne Füllmaterial erzeugt die höchsten Belastungen. Hierbei fehlt schlicht die Dämpfung, und zusätzlich kann es zu stärkeren internen Bewegungen kommen, wodurch in den Schockdetails mehrere Ereignisse sichtbar werden und die Schockintensität einen vergleichsweise hohen Wert aufweist. Die Verpackungschips haben erkennbar gedämpft, aber die Schutzwirkung ist nicht so zuverlässig wie bei der Luftpolsterfolie. Die lose in der Versandverpackung liegenden Verpackungschips können sich während des Fallereignisses verschieben und verdichten. Luftpolsterfolie zeigte in den Daten die beste Schutzwirkung. Dass dabei teilweise deutlich weniger starke Ereignisse aufgezeichnet wurden, passt zu der Annahme, dass die Stoßspitzen reduziert und die Stoßdauer verlängert werden. Trotzdem sollte man in Betracht ziehen, dass weniger aufgezeichnete Ereignisse auf eine bessere Dämpfung hindeuten und die Signale unterhalb der eingestellten Auslöseschwelle bleiben.

Insgesamt lässt sich damit festhalten, dass die Maschine als mobiler Prüfstand für interne Vergleichstest gut brauchbar ist und bereits verwertbare Hinweise zur Schutzwirkung verschiedener Verpackungsmaterialien gibt. Für eine Nutzung im Sinne normkonformer Qualifizierungsprüfungen nach ISTA/ASTM/ISO sind jedoch konstruktive Weiterentwicklungen erforderlich, insbesondere hinsichtlich der präzisen Fallhöheneinstellung, der Abbildung von Kanten- und Eckfällen sowie der Vermeidung von sekundären Schockereignissen durch das Rückschlagen der Fallplatte. Innerhalb der gewählten Versuchsmethodik zeichnet sich deutlich ab, dass Luftpolsterfolie den besten Schutz gegenüber Fallereignissen bietet. Verpackungschips dämpfen den Stoß zwar ab, sind jedoch weniger konsistent, wohingegen die Versandverpackung ohne jegliche Verpackungsmittel, wie zu erwarten, die größten Schockereignisse aufzeichnet. (Monica AI, 25.01.2026)

8 Anhang

Verwendete Materialien

- Europalette Kunststoff
- Flachstahl (verschiedene Formate)
- Aluminiumprofil flach
- Vierkant Stahlrohr (verschiedene Formate)
- Winkelstahl (verschiedene Formate)
- Rundbaustahl
- Rundedelstahl
- Stahl Rundrohr
- Pneumatikzylinder (Festo adn-40-160-a-p-a)
- 5/2 Wegeventil mit Handhebel (Pneumatik)
- 3/2 Wegeventil mit Taster und Federrückstellung (Pneumatik)
- Druckregelventil mit Manometer (Pneumatik)
- Pneumatikverbinder mit Schnellverschluss
- Pneumatikschlauch aus Kunststoff (6mm)
- Gewindestangen
- Hutmuttern (verschiedene Formate)
- Lochplatten
- Beilagscheiben (verschiedene Formate)
- Schrauben (verschiedene Formate)
- Schweißdraht
- Abdeckkappe aus Kunststoff
- Gummipuffer
- Anti-Rutsch Matte
- ASPION G-Log Sensor
- Paketset S der Deutschen Post
- Verpackungschips (Batch Nr. RD-351150)
- Luftpolsterfolie (Batch Nr. S-771159 V-120624)

Verwendete Geräte und Hilfsmittel

- Horizontal Metallbandsäge Bauer S 180
- Ständerbohrmaschine Gillardon GSB 32 V
- Schwungradpresse (Hersteller unbekannt)
- Schweißgerät Elektra Beckum Typ CO2-200/35
- Winkelschleifer Bosch GWS 19-125 CIE
- Akku – Bohrschrauber GSR 18V – 65 Professional
- Schraubstock
- Hammer
- Fächerscheibe für Winkelschleifer
- Trennscheibe für Winkelschleifer
- Körner mit Hartmetallspitze
- Kegelsenker
- Bohrer (verschiedene Formate)
- Gabelschlüssel (verschiedene Formate)
- Anreißnadel
- Winkel
- Kaltsägeöl
- Schneidöl
- Kriechöl

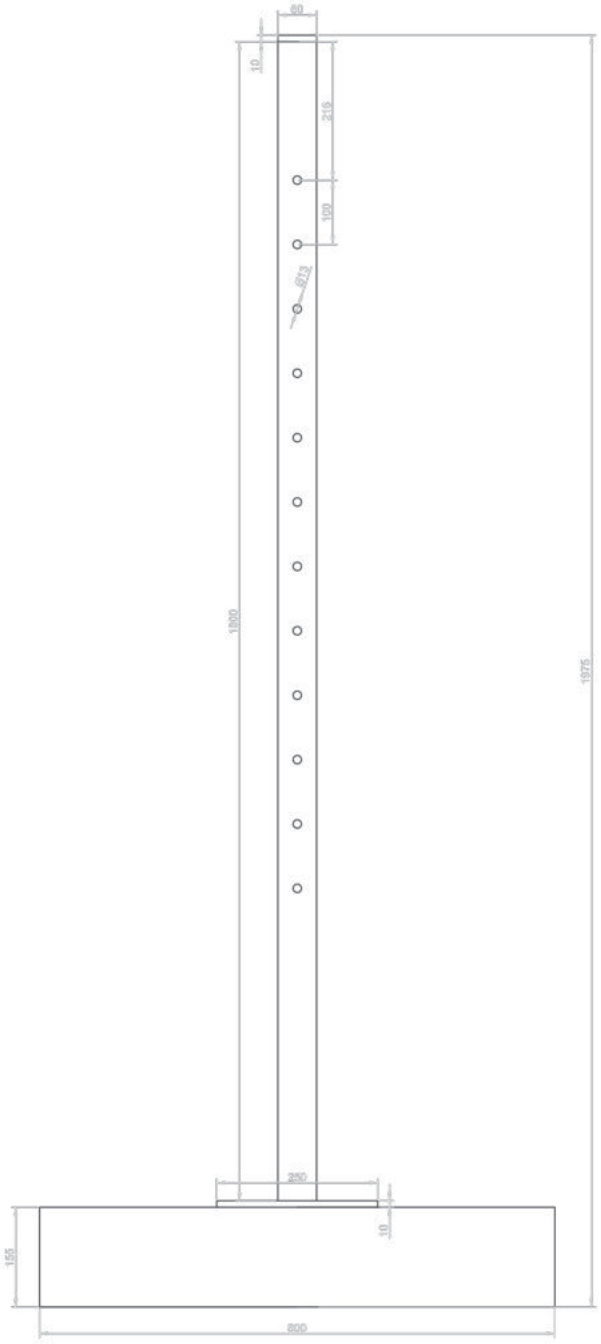


Abbildung 17: Standfuß Frontalansicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

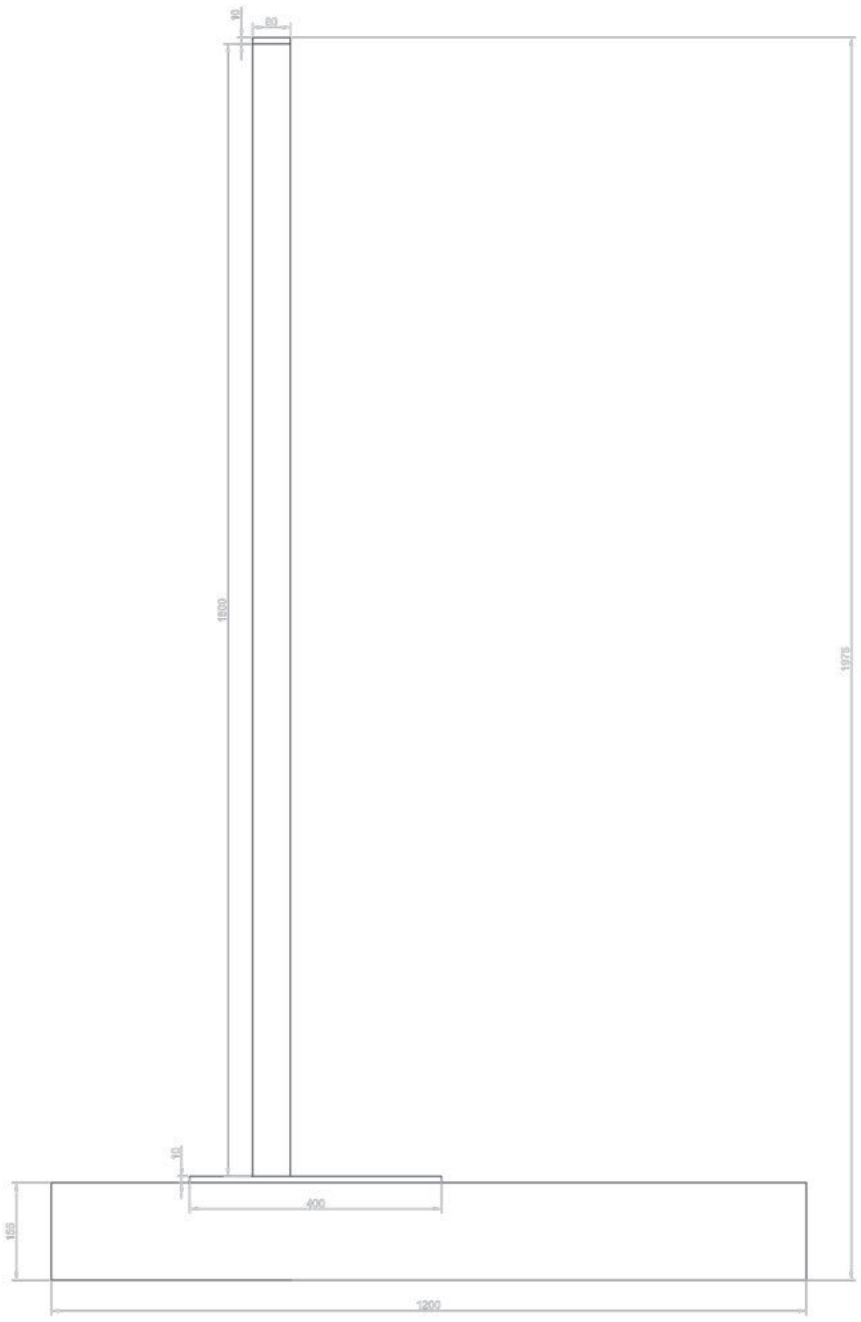


Abbildung 18:Standfuß Seitenansicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

Abbildung 19: Standfuß Draufsicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

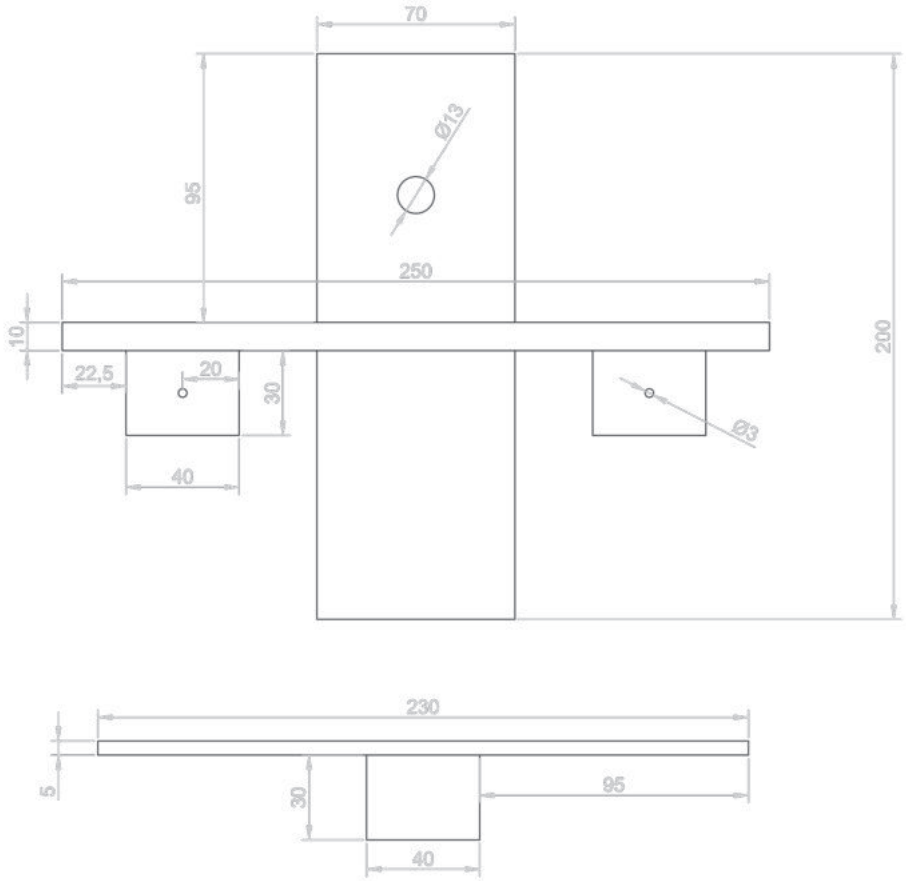


Abbildung 20: Halterung und Fallplatte Frontalansicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

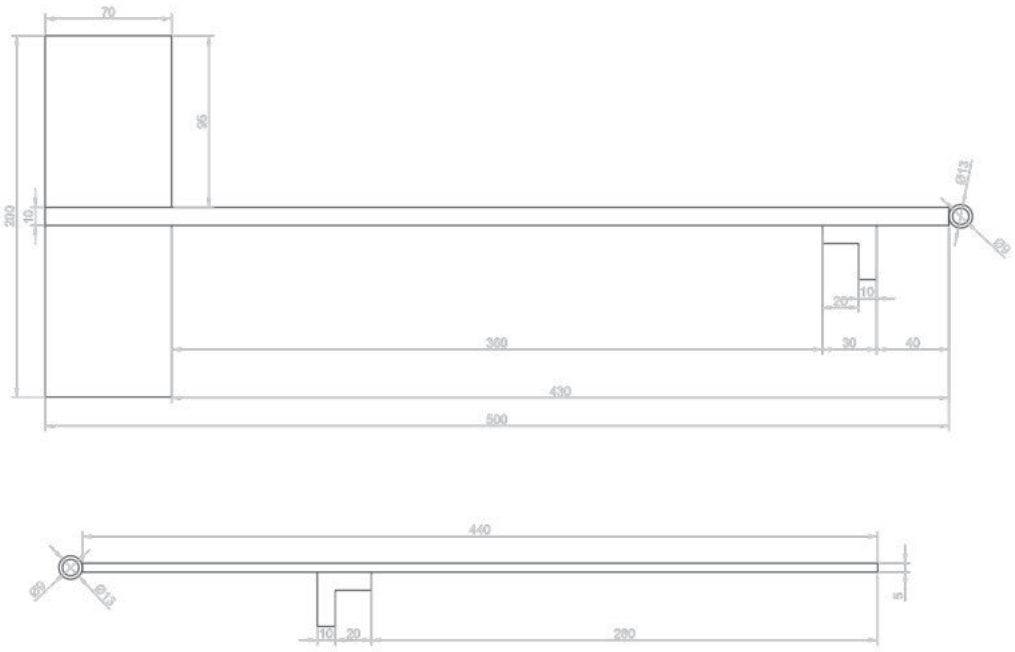


Abbildung 21: Halterung und Fallplatte Seitenansicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

Abbildung 22: Halterung und Fallplatte Draufsicht (Quelle: Winters L., 06.12.2025)

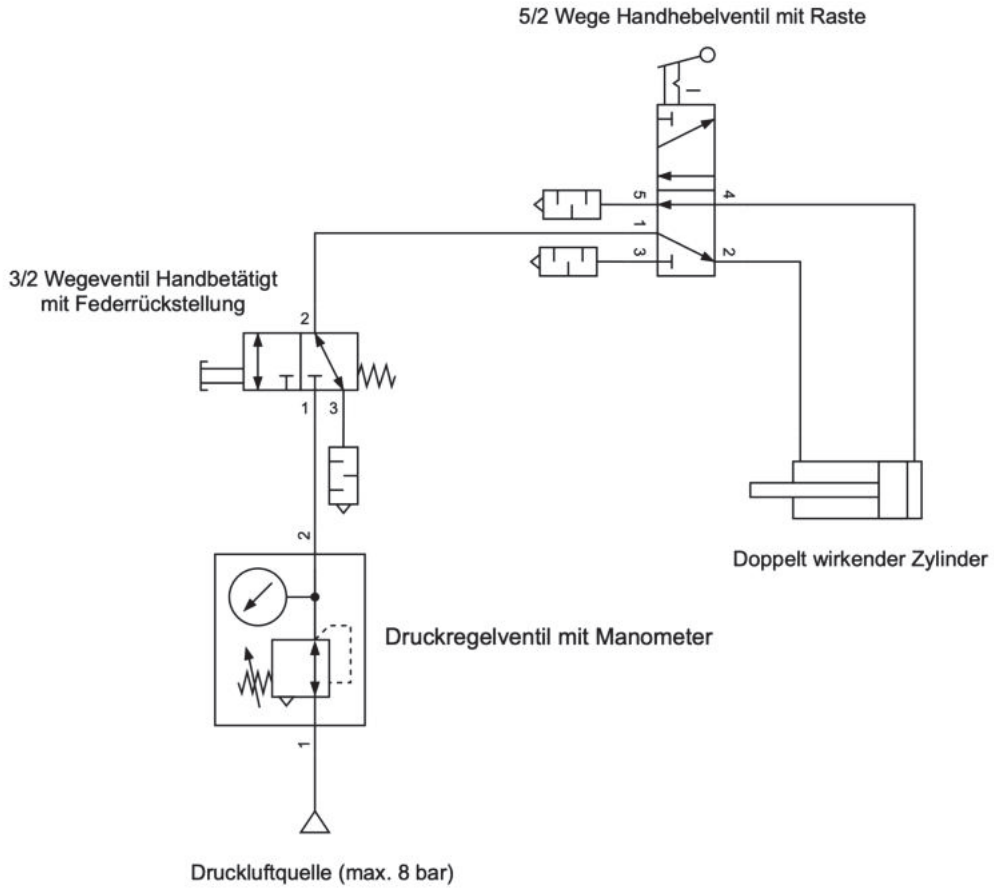


Abbildung 23: Pneumatikschaltplan (Quelle: Winters L., 08.12.2025)

Abbildung 24: Falltest Sequenz 1 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Abbildung 25: Falltest Sequenz 2 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

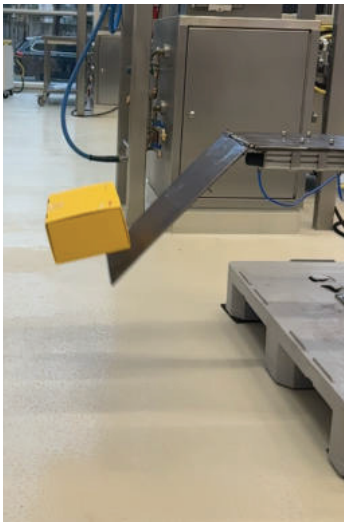


Abbildung 26: Falltest Sequenz 3 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

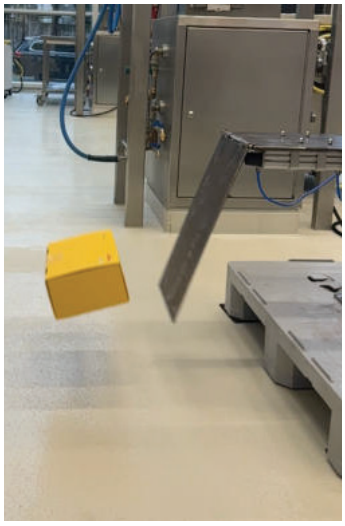
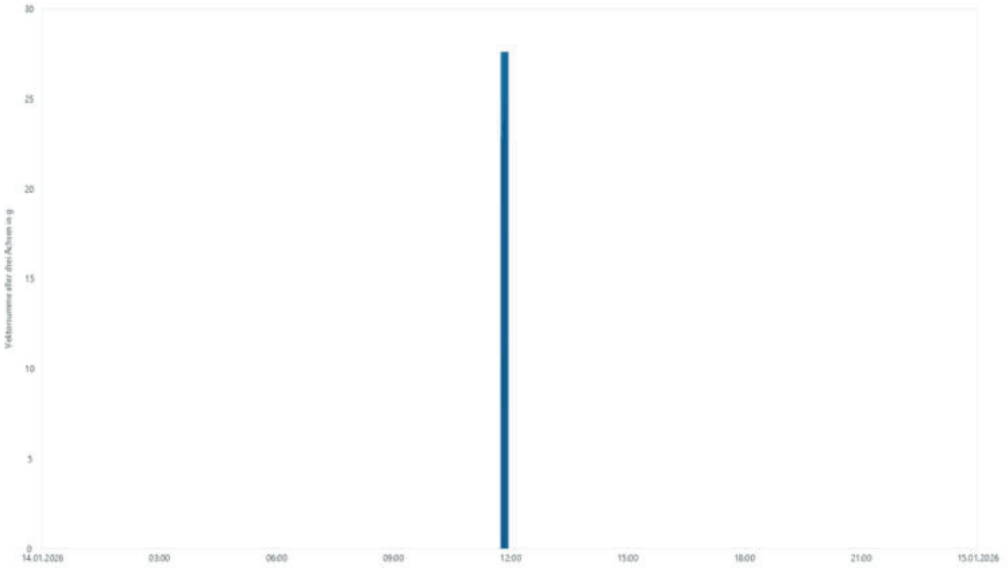


Abbildung 27: Falltest Sequenz 4 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Abbildung 28: Falltest Sequenz 5 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)



Schock-Ereignisse (Schwellenwert für Schock: ±2,00 g)			
Zeit	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
14.01.2026 11:47:54	15,94 g	-15,94 g	15,94 g
14.01.2026 11:48:30	15,94 g	-3,84 g	-15,94 g
14.01.2026 11:49:29	-15,94 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:50:27	15,94 g	7,30 g	-15,94 g
14.01.2026 11:50:28	15,94 g	-4,42 g	-15,94 g
14.01.2026 11:51:07	10,37 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:52:04	-15,94 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:53:09	-8,83 g	-13,82 g	-15,94 g
14.01.2026 11:54:04	15,94 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:55:09	15,94 g	-15,94 g	-15,94 g

Abbildung 29: Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Übersicht (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

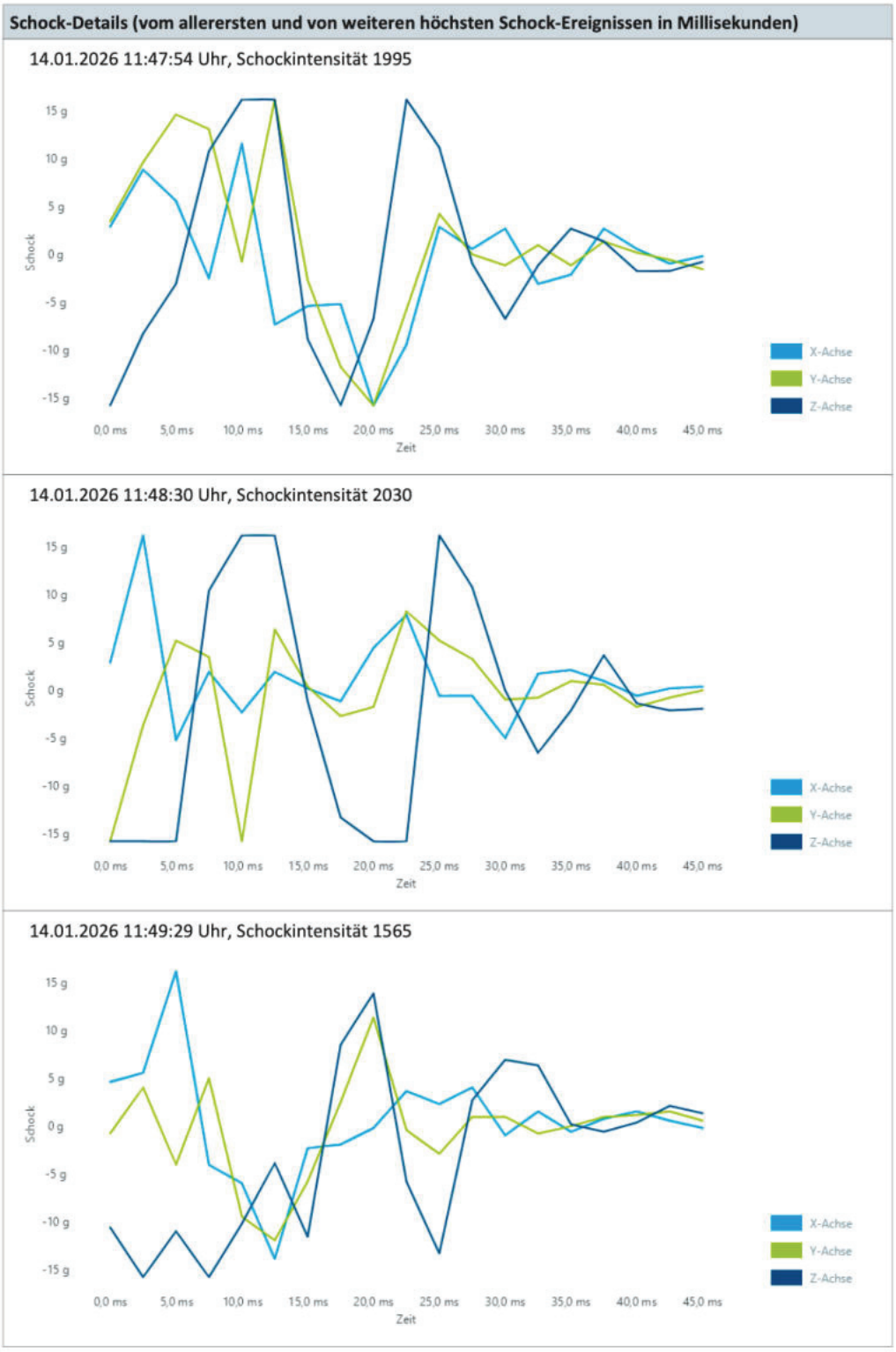


Abbildung 30: Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 1-3 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

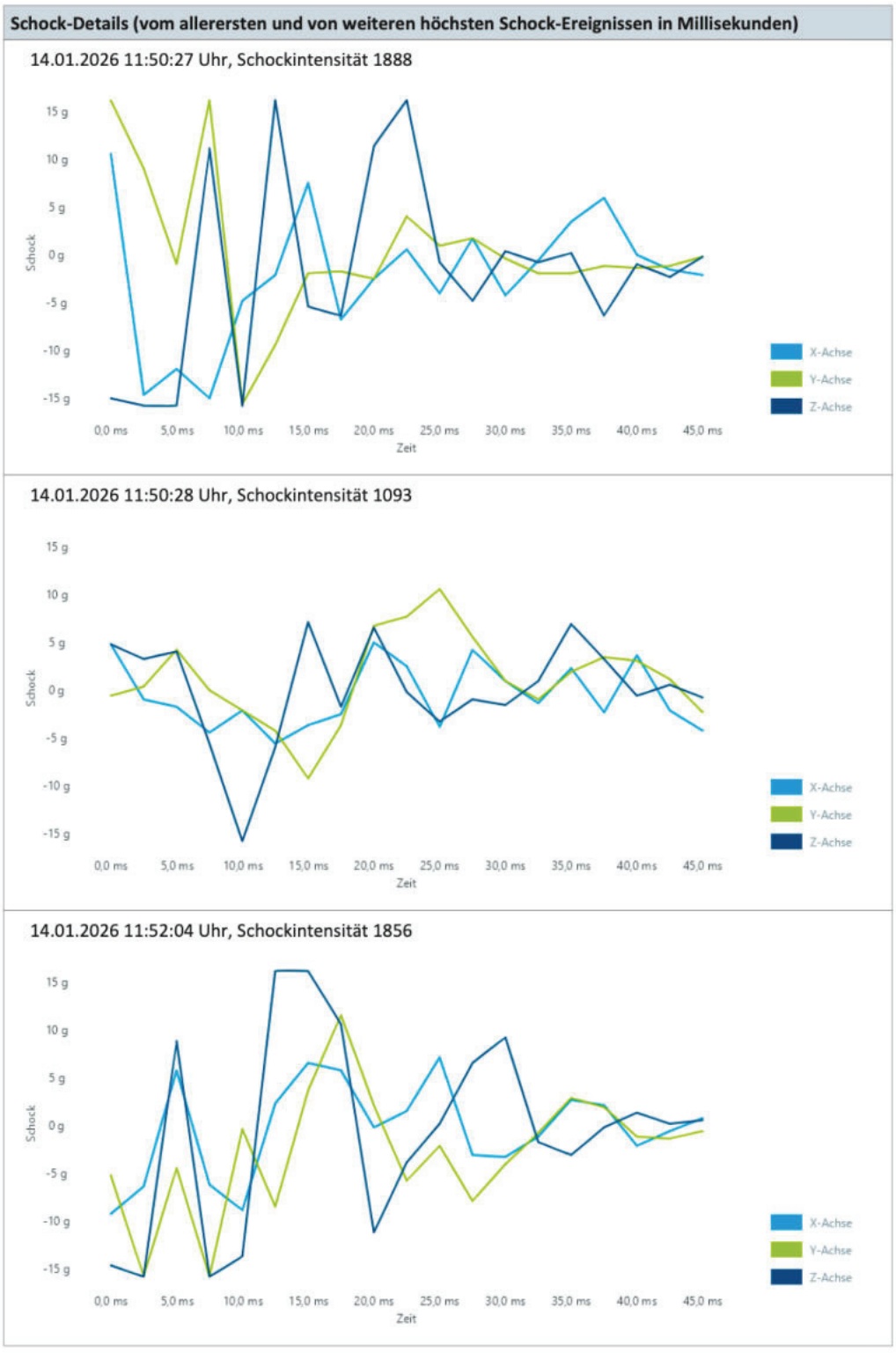


Abbildung 31: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 4-6 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

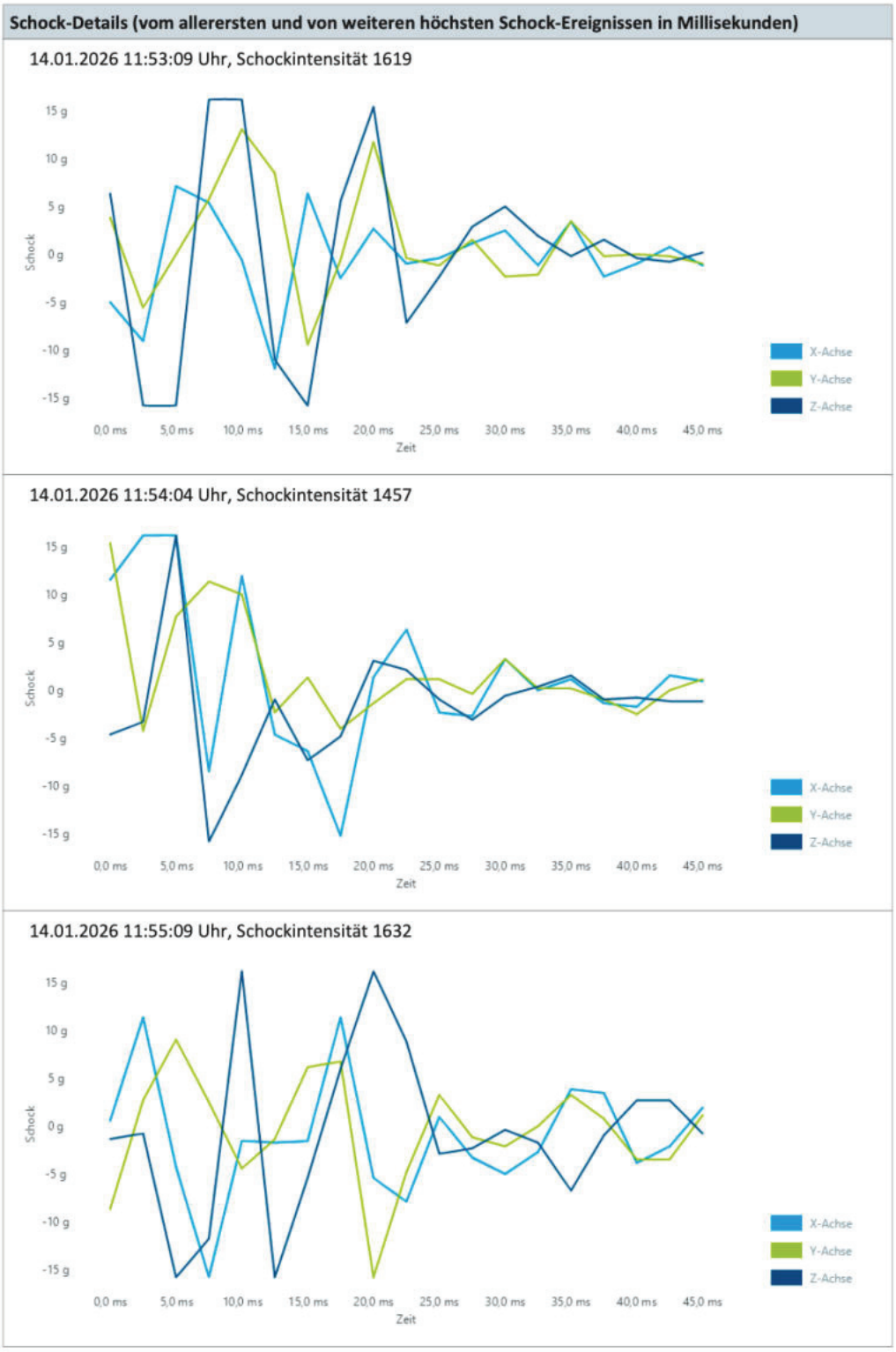
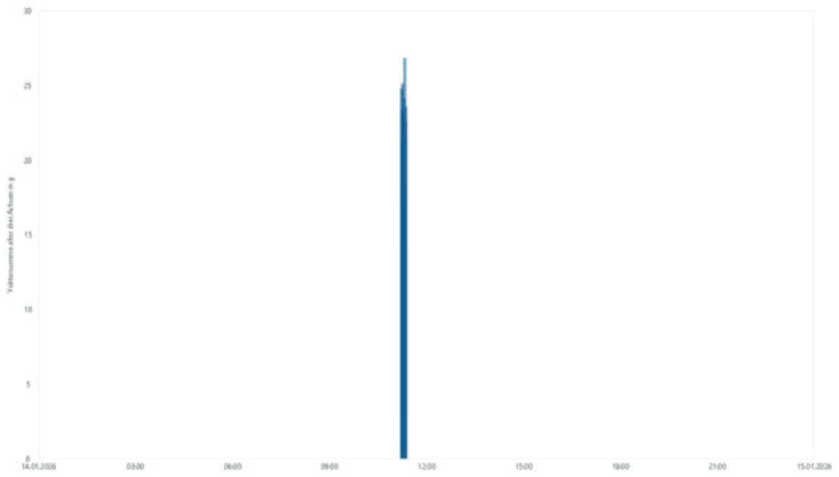


Abbildung 32: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails 7-9 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)



Schock-Ereignisse (Schwellenwert für Schock: ±4,00 g)			
Zeit	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
14.01.2026 11:14:04	13,63 g	-13,25 g	-15,94 g
14.01.2026 11:15:15	9,60 g	-10,56 g	-15,94 g
14.01.2026 11:15:16	-6,14 g	-15,94 g	15,94 g
14.01.2026 11:16:10	11,14 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:17:04	4,22 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:18:06	-1,54 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:19:02	8,64 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:20:04	14,59 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:20:05	3,65 g	8,64 g	-15,94 g
14.01.2026 11:21:33	1,92 g	-15,94 g	-15,94 g
14.01.2026 11:22:05	-6,91 g	-15,94 g	-15,94 g

Abbildung 33: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Übersicht (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

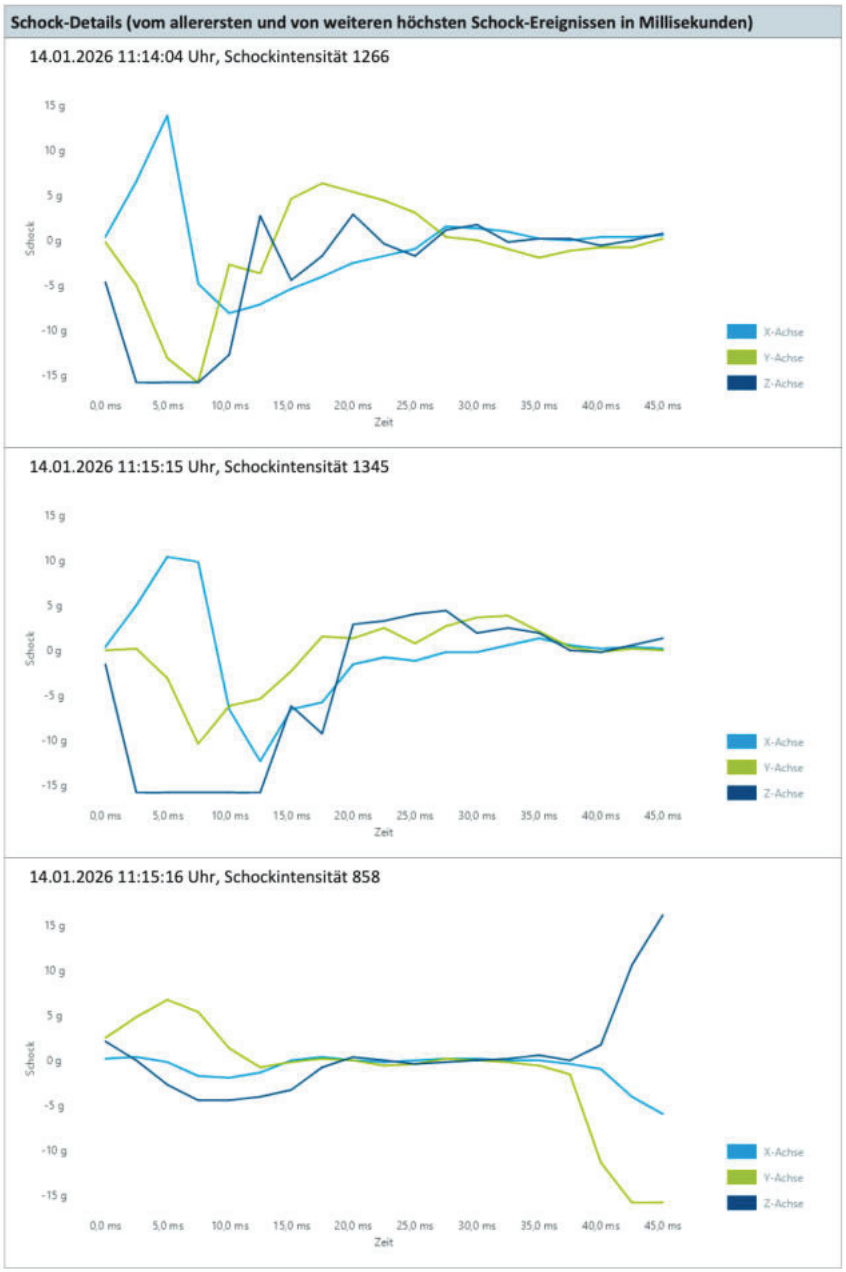


Abbildung 34: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 1-3 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

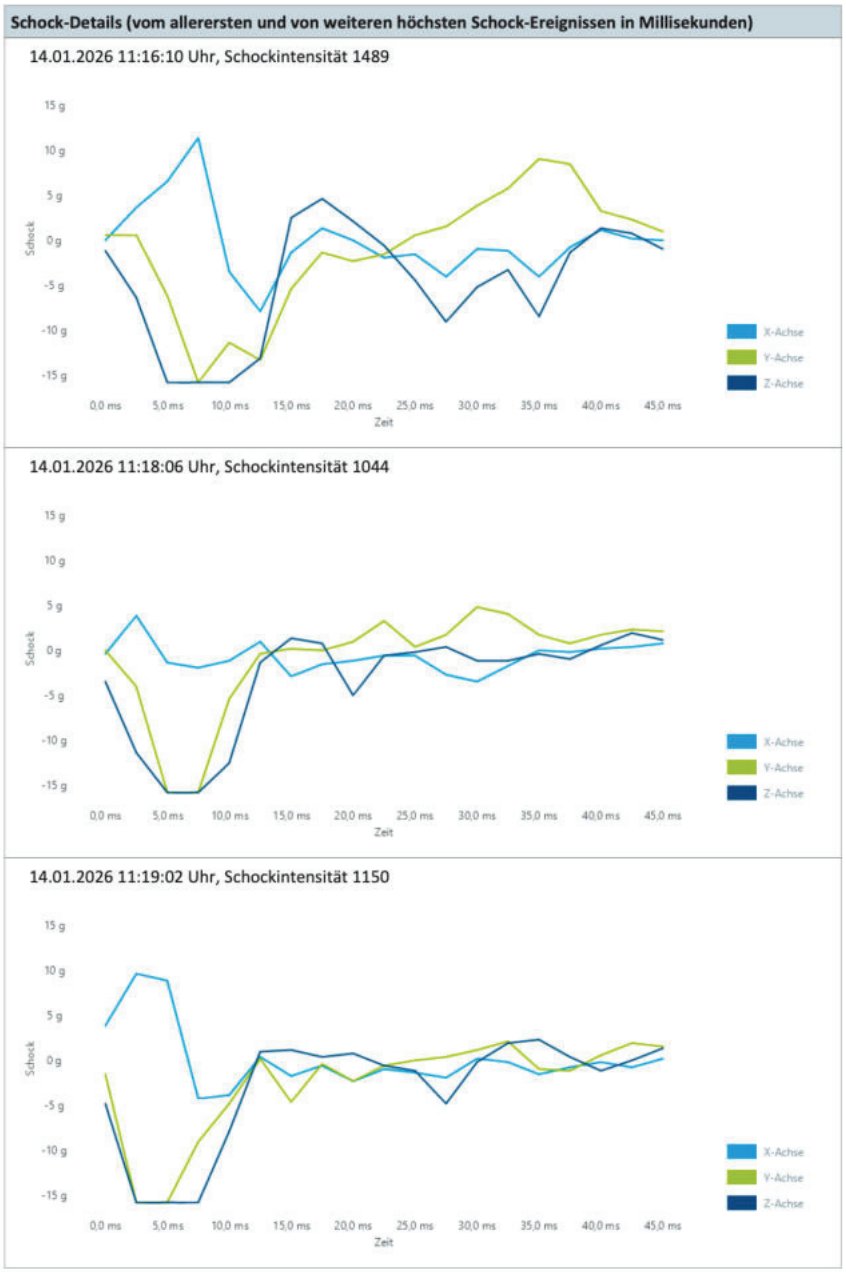


Abbildung 35: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 4-6 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

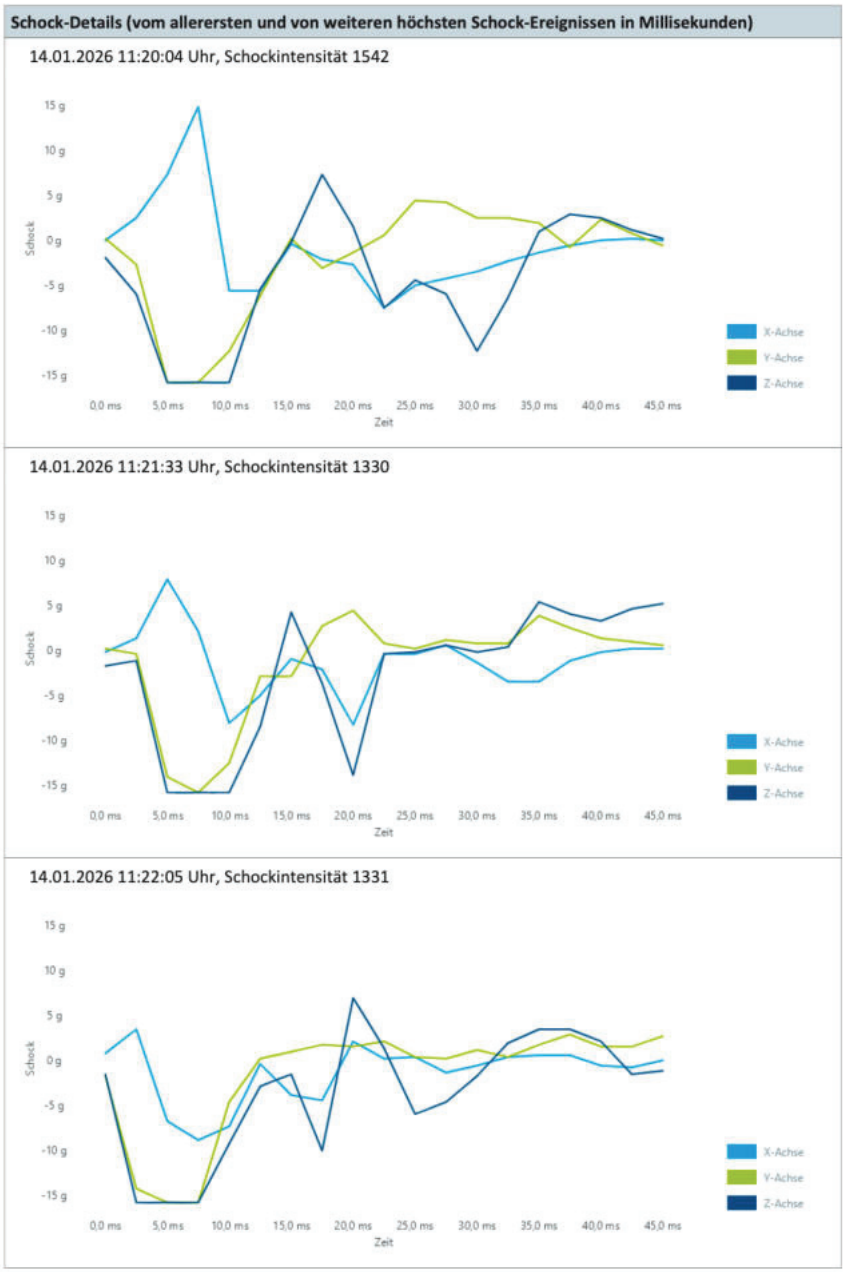
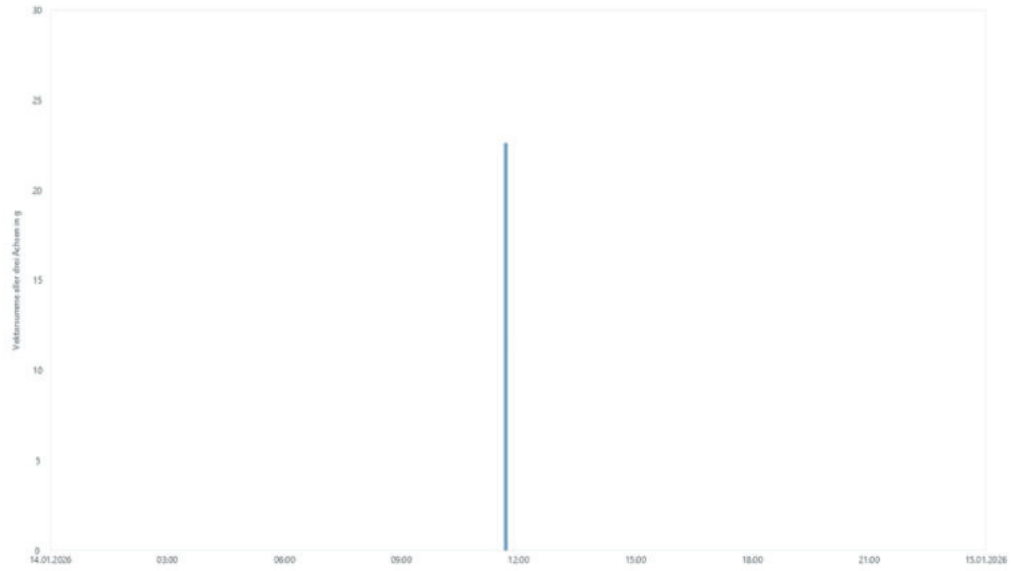


Abbildung 36: G-Log Datenbericht Versuch Verpackungschips Schockdetails 7-9 (Quelle: Winters L., 14.01.2026)



Schock-Ereignisse (Schwellenwert für Schock: ±2,00 g)			
Zeit	X-Achse	Y-Achse	Z-Achse
14.01.2026 11:41:08	-1,92 g	-15,94 g	-15,94 g

Abbildung 37: G-Log Datenbericht Versuch ohne Verpackungsmaterial Schockdetails Übersicht (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

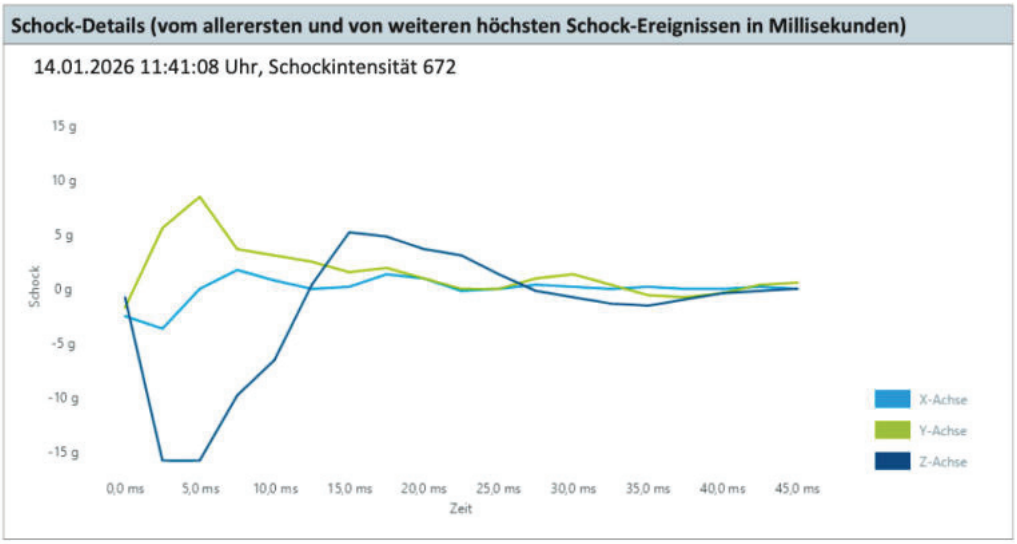


Abbildung 38: G-Log Datenbericht Versuch Luftpolsterfolie Schockdetails (Quelle: Winters L., 14.01.2026)

Literaturverzeichnis

Amade-Tech. (25. 01 2026). *amade-tech.com*. Von https://www.amade-tech.com/de/product/zero-distance-drop-tester/ abgerufen

Amade-Tech. (25. 01 2026). *amade-tech.com*. Von https://www.amade-tech.com/de/product/double-arm-drop-tester/ abgerufen

Amade-Tech. (25. 01 2026). *amade-tech.com*. Von https://www.amade-tech.com/de/product/ista-drop-tester/ abgerufen

ASPION GmbH. (2025). *Benutzerhandbuch.* Karlsruhe.

ASTM International. (2021). *Standart Test Method for Drop Test of Loading Containers by Free Fall.* West Conshohocken.

BFSV Verpackungsinstiut. (01. 02 2026). *bfsv.de*. Von https://bfsv.de/verpackungsforschung/verpackungspruefung/ abgerufen

Bleisch, G., Majschak, J.-P., & Weiß, U. (2011). *Verpackungstechnische Prozesse.* Hamburg: B. Behrs Verlag.

Europäisches Komitee für Normung. (1992). *Versandfertige Packstücke Vertikale Stoßprüfung.* Brüssel: Beuth Verlag.

Europäisches Komitee für Normung. (1992). *Versandfertige Packstücke Vertikale Stoßprüfung (ISO 2248:1985).* Brüssel.

https://bfsv.de/labor/umweltsimulation/falltest/. (31. 01 2026). *bfsv.de*. Von https://bfsv.de/labor/umweltsimulation/falltest/ abgerufen

ISO. (25. 01 2026). *Iso.org*. Abgerufen am 01 2026 von https://www.iso.org/standard/7062.html

ISTA 6-Amazon. (2018). *Ships in Own Container (SIOC) for Amazon.com Distribution System Shipment.* ISTA.

Kaßmann, M. (2020). *Grundlagen der Verpackung - Leitfaden für die fächerübergreifende Verpackungsausbildung.* Dresden: Beuth Verlag.

Rycobel. (5. 01 2026). *rycobel*. Von https://www.rycobel.com/products/qr-3000-quick-release-drop-tester abgerufen

Schneider, S. (01. 02 2026). *baubeaver.de*. Von https://baubeaver.de/schimmel-auf-holz/#:~:text=Fazit,Wie%20entsteht%20Schimmel%20auf%20Holz?,Dächer%20tun%20dazu%20den%20Rest. abgerufen