

Sachbericht

Innovationsprämie der SAB

Studie zur Entwicklung von modularen Leichtbau-Lager-
boxsystemen für Kleinteile

Inhaltsverzeichnis

1	Zielstellung	4
2	Recherche zu relevanten normativen und schutzrechtlichen Randbedingungen	5
2.1	Literaturrecherche zur Anwendung von Lagerboxsystemen in der Automobilindustrie 5	
2.2	Recherche zu verschiedenen Leichtbaumaterialien für den Anwendungsfall	7
2.3	Patentrecherche zum Einsatz von Leichtbau-Lagerboxsystemen.....	9
2.4	Recherche zu relevanten Richtlinien und Normen.....	14
2.5	Ableitung möglicher Varianten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3	Recherche zum Einsatz von Leichtbaumaterialien	15
3.1	Analyse möglicher Matrixmaterialien	15
3.1.1	PA.....	15
3.1.2	PET.....	22
3.1.3	PP.....	24
3.1.4	Gegenüberstellung wichtiger Matrixwerkstoffe	27
3.2	Analyse möglicher Verstärkungsfasersysteme	28
3.2.1	Glasfaser.....	28
3.2.2	Carbonfaser	30
3.2.3	Basaltfaser	32
3.2.4	Analyse zum Einsatz der Materialien.....	35
3.3	Analyse zur verfahrenstechnischen Umsetzung unterschiedlicher Leichtbaumaterialien in Lagerboxsystemen	37
3.3.1	Spritzgießen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten.....	37
3.3.2	Langfaser-Spritzgießen (LFT)	39
3.3.3	Thermoformen (Organobleche).....	40
3.3.4	Hybridverfahren (Organoblech + Spritzguss).....	41
3.4	Erarbeitung einer Bewertungsmatrix und Ableitung einer Vorzugsvariante	42
4	Machbarkeitsuntersuchungen zur Materialherstellung	43
4.1	Herstellung von Probekörpern.....	43
4.2	Mechanische Charakterisierung.....	44

4.3	Erarbeitung einer Bewertungsmatrix und Ableitung einer Vorzugsvariante	46
5	Ableitung von Konzepten und Konstruktionsvarianten zur Positionierung von Kleinteilen in den Leichtbaulagerboxsystemen	48
5.1	Erarbeitung von Lösungskonzepten für eine geeignete Fertigungstechnik zur Separation der Kleinteile	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5.2	Ableitung von Konstruktionsvarianten	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6	Abbildungsverzeichnis	52
7	Tabellenverzeichnis	52
8	Literaturverzeichnis	53

1 Zielstellung

Das Ziel der vorliegenden Studie im Rahmen der Innovationsprämie liegt in der Entwicklung modularer Leichtbau-Lagerboxsysteme für Kleinteile, die sowohl den steigenden Anforderungen an Flexibilität, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit als auch an Wirtschaftlichkeit und Ergonomie gerecht werden. Moderne Logistik- und Produktionsprozesse – insbesondere in der Automobil- und Zulieferindustrie – erfordern zunehmend modulare und skalierbare Systemlösungen, die sich an individuelle Prozessketten, automatisierte Materialflüsse und variierende Produktgrößen anpassen lassen.

Im Zentrum steht die systematische Analyse, Konzeption und Bewertung innovativer Lagerboxsysteme, die durch den Einsatz von Leichtbaumaterialien eine deutliche Reduzierung des Eigengewichts bei gleichzeitig hoher Stabilität, Belastbarkeit und Langlebigkeit ermöglichen. Leichtbau bietet hierbei nicht nur Potenzial zur Reduzierung von Material- und Energiekosten, sondern auch zur Verbesserung der Handhabung, des Transports und der Nachhaltigkeit durch geringeren Ressourcenverbrauch und verbesserte Recyclingfähigkeit.

Zu Beginn der Studie erfolgt eine Systematisierung bestehender Lagersysteme, um ein strukturiertes Verständnis aktueller Lösungen, deren Einsatzgebiete und Limitierungen zu erlangen. Ein weiterer Bestandteil der Arbeit ist die Recherche zu normativen, rechtlichen und schutzrechtlichen Rahmenbedingungen. Dazu zählen nationale und internationale Richtlinien, Normen sowie bestehende Schutzrechte, die den Entwurf, die Herstellung und den Einsatz von Lagerboxsystemen maßgeblich beeinflussen. Parallel dazu erfolgt eine umfassende Untersuchung verschiedener Leichtbaumaterialien, einschließlich potenzieller Matrix- und Verstärkungsfasersysteme, um geeignete Materialkombinationen für den Einsatz in Lagerbehältern zu identifizieren.

Im weiteren Verlauf werden Machbarkeitsuntersuchungen zur Materialherstellung durchgeführt. Diese umfassen die Herstellung von Plattenhalbzeugen im Pressprozess, die Anfertigung von Probekörpern sowie die anschließende mechanische Charakterisierung durch standardisierte Prüfverfahren wie Zug-, Biege- und Schlagzähigkeitsprüfungen. Die erzielten Kennwerte fließen in eine Bewertungsmatrix ein, anhand derer eine technisch und wirtschaftlich bevorzugte Variante abgeleitet wird.

Abschließend erfolgt die Ableitung von Konzepten und Konstruktionsvarianten zur Positionierung von Kleinteilen in den Leichtbaulagerboxsystemen.

2 Recherche zu relevanten normativen und schutzrechtlichen Randbedingungen

2.1 Literaturrecherche zur Anwendung von Lagerboxsystemen in der Automobilindustrie

Es gibt eine Vielzahl von Fachliteratur, die sich mit Lagersystemen, insbesondere Lagerboxsystemen und deren Anwendungsgebieten, beschäftigt. Nachfolgend sind einige empfehlenswerte Werke aufgelistet:

1. Klug, F. (2018). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Springer Vieweg. [1]

Dieses Werk zählt zu den zentralen Standardwerken der industriellen Logistik und behandelt systematisch die gesamte logistische Kette innerhalb der Automobilproduktion – von der Beschaffung über die interne Versorgung bis zur Distribution. Klug erläutert detailliert die strategischen und operativen Prinzipien der Automobillogistik, insbesondere Just-in-Time- und Just-in-Sequence-Konzepte, die auf eine präzise Synchronisierung von Material- und Informationsflüssen abzielen.

Ein Schwerpunkt liegt auf der Materialflussgestaltung innerhalb der Produktionswerke. Hier wird die Bedeutung von standardisierten Behälter- und Lagerboxsystemen für Kleinteile hervorgehoben. Diese Systeme dienen als zentrale Elemente zur Sicherstellung von Materialverfügbarkeit, Ergonomie und Rückverfolgbarkeit in komplexen Fertigungsumgebungen.

Darüber hinaus werden die organisatorischen Rahmenbedingungen erläutert, unter denen ein effizientes Behältermanagement funktioniert – etwa durch den Einsatz von Kanban-Systemen, Barcode-Identifikation und SAP-gestützte Lagerverwaltung. Das Buch bietet somit nicht nur theoretisches Wissen, sondern auch praxisorientierte Ansätze zur Auslegung und Steuerung von Kleinteilelogistik in der Automobilindustrie.

2. Martin, H. (2014). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Springer Vieweg. [2]

Das Buch widmet sich unter anderem der Planung von Lagersystemen, der Klassifizierung von Lagerarten sowie der wirtschaftlichen Bewertung von Lagerlösungen. Ein besonderer Fokus liegt auf der Auslegung von Kleinteilelagern und der Integration von Behältersystemen in automatisierte Lagerstrukturen.

3. ten Hompel, M., & Schmidt, T. (Hrsg.) (2019). *Technische Logistik – Förder- und Lagerwesen*. Springer Vieweg. [3]

Dieses Fachbuch behandelt moderne technische Logistiksysteme mit Schwerpunkt auf Lagertechnik, Kommissionierung und Fördertechnik. Es beschreibt die Funktionsweise und den Aufbau von Behälter- und Kommissioniersystemen in automatisierten Kleinteilelagern. Besonders interessant ist die Darstellung der Schnittstellen zwischen physischer Behälterlogistik, IT-Steuerung und Automatisierungstechnik.

4. Fottner, J., Kern, J., & Kauschinger, B. (2021). *Autonomous Systems in Intralogistics – State of the Art and Trends*. Technische Universität München. [4]

Der Bericht bietet einen Überblick über den Stand der Technik bei autonomen Systemen in der Intralogistik. Er untersucht den Einsatz von autonomen Shuttles, Robotern und Fahrerlosen Transportsystemen in Verbindung mit Behälter- und Boxsystemen. Besonders hervorzuheben ist die Analyse, wie digitale Identifikation (RFID, Sensorik) die Verwaltung und Rückverfolgbarkeit von Kleinteilebehältern in der Automobilindustrie verbessert.

5. SSI Schäfer (2020). *Small Parts Storage – Miniload / LTB Container Systems*. Whitepaper. [5]

Dieses Whitepaper beschreibt praxisorientiert die technischen Lösungen von SSI Schäfer für automatische Kleinteilelager (Miniload-Systeme) und zugehörige LTB-Behälter. Es liefert Kennzahlen zu Lagerdichte, Zugriffszeiten und Systemintegration. Für Praktiker bietet es konkrete Hinweise, wie sich Lagerboxsysteme in bestehende Produktions- und Logistikprozesse integrieren lassen.

6. BITO Lagertechnik Bittmann GmbH (2020). *Kleinteilelager und Behälterlösungen – Praxisratgeber*. [6]

Der Praxisratgeber von BITO liefert einen Überblick über verschiedene Arten von Kleinteilebehältern, ihre Materialeigenschaften, Stapel- und Förderfähigkeit. Das Werk verknüpft theoretische Grundlagen mit praktischen Anwendungsfällen aus der Industrie. Besonders wertvoll sind die Abschnitte zu ESD-Schutz, Kanban-Kompatibilität und ergonomischer Handhabung in der Kommissionierung.

7. Sydow, A. (2018). *Dynamische Behälterlogistik – Konzeption eines IT-gestützten Management- und Entscheidungssystems für automobile Mehrwegbehälterkreisläufe*. Dissertation, Technische Universität Clausthal. [7]

Sydow entwickelt ein Konzept für ein dynamisches Behältermanagementsystem, das den Bestand, die Umläufe und den Zustand von Behältern in Echtzeit überwacht. Die Arbeit legt besonderen Wert auf die IT-Integration und den Informationsfluss innerhalb der Behälterlogistik.

Sie zeigt, wie Kleinteilebehälter als digitale Datenträger im Wertschöpfungsprozess fungieren können.

2.2 Recherche zu verschiedenen Leichtbaumaterialien für den Anwendungsfall

Die Auswahl geeigneter Leichtbaumaterialien ist entscheidend für die Entwicklung modularer Lagerboxsysteme, da sie das Verhältnis von Gewicht, Festigkeit, Kosten, Recyclingfähigkeit und Lebensdauer unmittelbar beeinflusst. Für den Einsatz in Leichtbau-Lagerboxen kommen vor allem Faserverbundkunststoffe, thermoplastische Sandwichsysteme und hybride Materialkombinationen in Betracht.

Ziel ist es, Materialien einzusetzen, die eine hohe mechanische Performance bei möglichst geringer Masse ermöglichen, dabei serientauglich verarbeitbar sind und gleichzeitig die Anforderungen an Nachhaltigkeit und Wiederverwertung erfüllen.

Faserverbundwerkstoffe – insbesondere kohlenstofffaserverstärkte (CFK) und glasfaserverstärkte (GFK) Kunststoffe – sind zentrale Werkstoffe im modernen Leichtbau. In Kombination mit Metallen (Hybrid-Leichtbau) lassen sich material- und kosteneffiziente Strukturen mit hoher Funktionalität realisieren.

Nachfolgend werden die verschiedenen Werkstoffgruppen und deren Materialeigenschaften kurz beschrieben. In Kapitel xxx wird näher auf die verschiedenen Materialien eingegangen.

Glasfaserverstärkte Thermoplaste (GFK-T)

Ein weit verbreitetes und technisch ausgereiftes Material im Leichtbau sind glasfaserverstärkte Thermoplaste (GFK-T). Diese bestehen aus einer Polymermatrix, beispielsweise Polypropylen oder Polyamid, in die Glasfasern eingelagert sind. Durch den Anteil von 20 bis 60 Prozent Glasfasern lassen sich die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe deutlich verbessern. GFK-T weisen eine Dichte zwischen etwa 1,2 und 1,6 Gramm pro Kubikzentimeter auf und erreichen Zugfestigkeiten zwischen 100 und 250 Megapascal. Der Elastizitätsmodul liegt im Bereich von 6 bis 15 Gigapascal, abhängig vom Faseranteil und der Orientierung. Glasfaserverstärkte Thermoplaste bieten ein ausgewogenes Verhältnis aus Festigkeit, Zähigkeit und Verarbeitbarkeit. Sie sind chemisch beständig, schlagzäh und durch Spritzguss oder Thermoformen sehr gut in Serienfertigung zu verarbeiten. Ein wesentlicher Vorteil liegt in der Recyclingfähigkeit, da die thermoplastische Matrix ein Wiedereinschmelzen und Regranulieren ermöglicht. Damit eignen sich GFK-T hervorragend für Lagerboxsysteme, insbesondere in Form großflächiger, strukturtragender Bauteile. Sie sind robust, widerstandsfähig gegen Umwelteinflüsse und zugleich wirtschaftlich in der Herstellung.

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) bieten demgegenüber eine nochmals deutlich höhere mechanische Leistungsfähigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht. CFK besteht aus einer Kunststoffmatrix, meist auf Epoxid- oder thermoplastischer Basis, in die Kohlenstofffasern eingebettet sind. Diese übernehmen nahezu die gesamte mechanische Last. Mit Dichten um 1,5 Gramm pro Kubikzentimeter und Zugfestigkeiten zwischen 500 und 1500 Megapascal erreicht CFK ein exzellentes Steifigkeits-Gewichts-Verhältnis und eine außergewöhnlich hohe Ermüdungsfestigkeit. Der Einsatz von CFK in modularen Lagerboxsystemen ist allerdings aufgrund der hohen Materialkosten und des aufwändigen Fertigungsprozesses auf hochbelastete Strukturbereiche beschränkt. Besonders sinnvoll ist der Einsatz in Komponenten, die extremen Belastungen standhalten müssen, etwa an Kanten, Griffen oder Auflageflächen. Hinsichtlich Nachhaltigkeit ist CFK derzeit noch kritisch zu betrachten, da das Recycling der duroplastischen Systeme energieintensiv und technisch komplex ist. Thermoplastische CFK-Systeme bieten hier Zukunftspotenzial, befinden sich jedoch noch in der Entwicklung.

Thermoplastische Sandwichstrukturen

Ein zentrales Forschungsfeld im Leichtbau ist der Einsatz thermoplastischer Sandwichstrukturen. Diese bestehen aus zwei festen Deckschichten, meist aus faserverstärktem Kunststoff, und einem leichten Kernmaterial. Der Kern, häufig in Form einer Waben- oder Schaumstruktur aus Polypropylen oder PET, verleiht dem Bauteil hohe Biegesteifigkeit bei minimalem Gewicht. Die Decklagen nehmen die Zug- und Druckkräfte auf, während der Kern die Schubkräfte verteilt und die Struktur stabilisiert. Solche Sandwichsysteme erreichen Gewichtseinsparungen von bis zu 70 Prozent gegenüber klassischen Stahlkonstruktionen, ohne an Festigkeit zu verlieren. Gleichzeitig ermöglichen sie eine hohe Beul- und Schlagfestigkeit und eignen sich hervorragend für modulare Boxkonstruktionen. Besonders interessant sind vollständig thermoplastische Systeme, bei denen Deckschicht und Kern aus demselben Basismaterial bestehen – etwa glasfaserverstärktes Polypropylen mit einem PP-Wabenkern. Diese Monomaterial-Systeme sind vollständig recyclingfähig und lassen sich wirtschaftlich im Thermoform- oder Pressverfahren fertigen.

Hybrid-Leichtbau (Metall-FVK-Kombinationen)

Im Hybrid-Leichtbau werden Faserverbundmaterialien mit metallischen Komponenten kombiniert, um die Vorteile beider Werkstoffklassen zu nutzen. Häufig kommen Aluminiumrahmen in Verbindung mit Sandwich- oder GFK-Paneelen zum Einsatz. Diese Kombination ermöglicht hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht und erlaubt stabile Verbindungspunkte für Schraub- oder Stecksysteme. Der Hybridbau bietet damit konstruktive Flexibilität und ist insbesondere für modulare Bauweisen interessant. Nachteilig ist die aufwändigere Trennung der

Werkstoffe beim Recycling, weshalb die Konstruktion so gestaltet werden sollte, dass eine sortenreine Trennung am Lebensende möglich bleibt.

Bio-basierte Werkstoffe

Neben den klassischen Faserverbunden gewinnen bio-basierte und naturfaserverstärkte Werkstoffe zunehmend an Bedeutung. Hierbei kommen pflanzliche Fasern wie Flachs, Hanf oder Jute in Kombination mit thermoplastischen Matrices zum Einsatz. Sie zeichnen sich durch eine geringe Dichte und eine gute ökologische Bilanz aus. Mit Zugfestigkeiten zwischen 50 und 150 Megapascal und Elastizitätsmodulen von etwa 4 bis 8 Gigapascal erreichen sie akzeptable Werte für leichte, sekundäre Strukturbauteile. Ihr Einsatz in tragenden Strukturen ist derzeit aufgrund von Feuchteempfindlichkeit und begrenzter Dauerfestigkeit jedoch eingeschränkt. Für Innenauskleidungen, modulare Trennelemente oder dekorative Komponenten bieten sie hingegen ein hohes Nachhaltigkeitspotenzial.

2.3 Patentrecherche zum Einsatz von Leichtbau-Lagerboxsystemen

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Patentsituation im Bereich der Leichtbau-Lagerboxsysteme untersucht. Ziel dieser Recherche ist es, einen umfassenden Überblick über bestehende Schutzrechte sowie über abgelaufene oder nicht mehr gültige Patente zu gewinnen, die für die Entwicklung, Konstruktion und Anwendung solcher Systeme von Bedeutung sind.

Dabei werden sowohl deutsche, europäische als auch international veröffentlichte Patente berücksichtigt, um eine möglichst vollständige Abdeckung des relevanten Technologiebereichs zu gewährleisten. Die Analyse umfasst insbesondere Patente, die sich mit der Konstruktion, Materialauswahl, Modularität, Verbindungselementen und Stapelbarkeit.

Insgesamt dient die Patentrecherche als Grundlage zur Identifikation bestehender technischer Lösungen, zur Vermeidung von Schutzrechtsverletzungen und zur Ableitung möglicher Innovationspotenziale im Bereich moderner Leichtbau-Lagerboxsysteme.

Schutzschrift	Beschreibung
Patent DE 10 2004 016 976 B4 Lagerbox	Kunststoff-Stapelbox mit keilförmigen, vertikalen Ausbuchtungen in den Seitenwänden, die sich bis zum oberen Rand erstrecken und als Versteifungsprofile dienen. Diese Mulden ermöglichen das sichere Ineinandergreifen leerer Boxen (Nestbarkeit) und eine stabile Stapelung beladener Boxen bei geringer Materialdeformation.

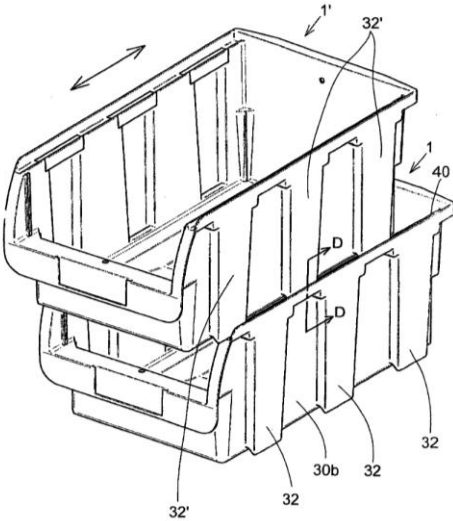
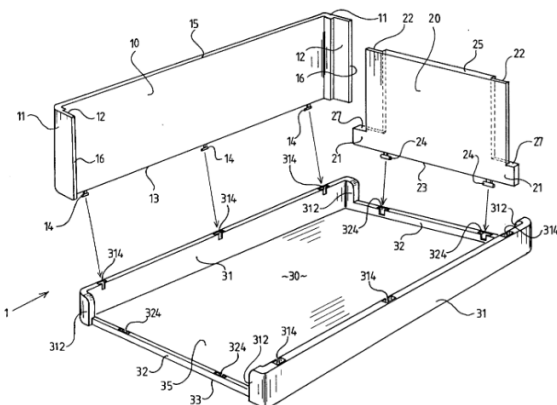
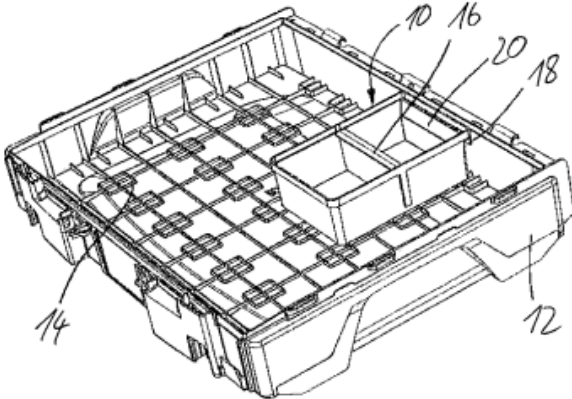
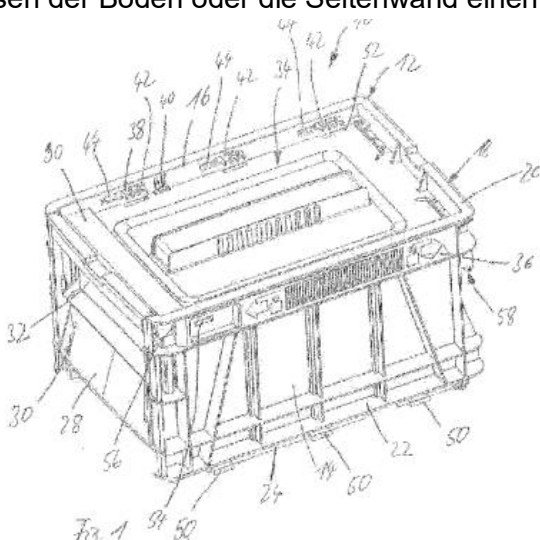
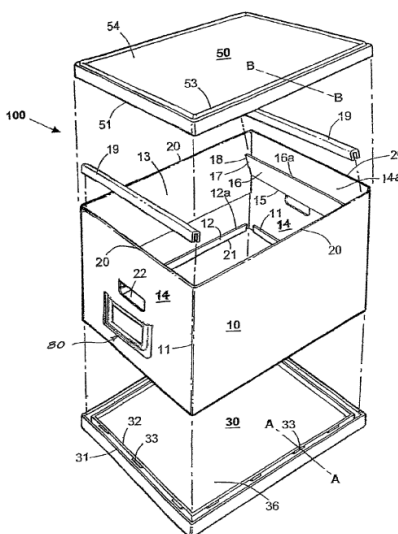
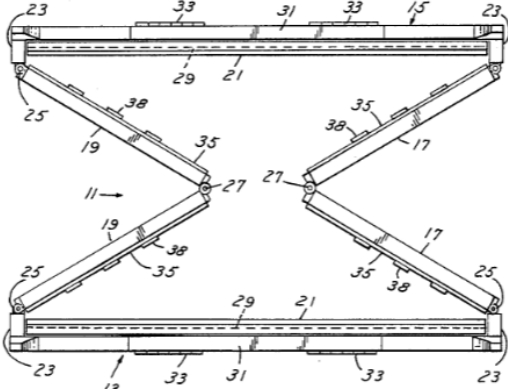
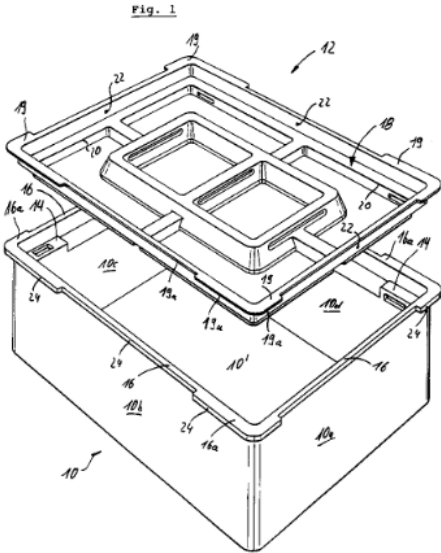
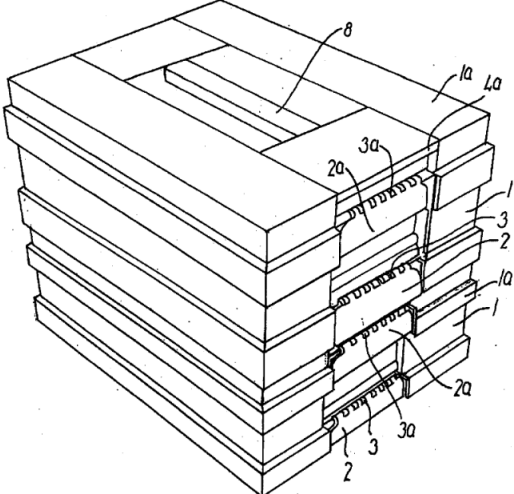
	
Patent EP 0 786 412 B1 Transport- und Lagerbehälter	Zusammenklappbarer Kunststoffbehälter mit Rechteckboden und vier an Scharnieren befestigten Seitenwänden. Boden und Wände sind als spritzgegossene Hohlkörper mit umlaufenden Rippen ausgeführt, um hohe Stabilität bei geringem Gewicht zu erreichen. Verstärkende Waffel-/Wabenmuster und zusätzliche Stege sorgen für zusätzliche Steifigkeit. Die Konstruktion ermöglicht das problemlose Übereinanderschichten mehrerer beladener Behälter. 
Patent EP 3 658 339 B1 Aufbewahrungskasten und Regal	Modulares Sichtlagerbox-System für Regale, bei dem der Boden Aussparungen (Nuten) aufweist. Diese Nuten greifen mit Regalkanten zusammen und führen die Box in zwei definierte, gekippte Positionen (leicht und stark ausgezogen). In diesen stabilen Neigungspositionen kann der Benutzer Kleinteile mit einer Hand entnehmen.

	Fig. 1
Patent DE 195 12 823 C5 Faltbare Verpackungskiste	Einteilige, im Thermoform-Verfahren hergestellte Kunststoffkiste. Boden und Seitenwände sind über integrierte Folienbänder (Folienbänder) verbunden. An den Oberkanten der Seitenwände greifen Rastnocken (Nasen) in Ausnehmungen benachbarter Wände ein, sodass die Seitenwände in der aufgebauten Position selbstverriegelnd eingerastet sind. Ermöglicht flaches Zusammenlegen und platzsparenden Transport.
Patent DE 10 2015 206 606 A1 Sortimentbox und Anordnung mit wenigstens einer Sortimentbox und einer Halteleiste	Die Erfindung betrifft eine Sortimentbox zum Aufnehmen von Kleinteilen mit einem Boden und vier Seitenwänden, wobei die Sortimentbox Formmerkmale zur rutschfesten Anordnung in Transport- und Lagerungseinheiten, insbesondere Koffern, Regalen, Werkstattwagen, aufweist, wobei im Bereich wenigstens einer Außenfläche der Seitenwände eine Haltevorrichtung zum werkzeuglosen Befestigen der Sortimentbox an einer Halteleiste vorgesehen ist.

	
Patent WO2019/020379 A1 Aufbewahrungskas- ten für Kleinteile	Die Erfindung betrifft einen Aufbewahrungskasten für Kleinteile mit einem Boden und wenigstens zwei Seitenwänden, die vom Boden ausgehen und einander gegenüberliegen. Für ein einfaches Stapeln weisen der Boden oder die Seitenwand einen Auflageflansch auf.  Fig. 1
Patent US000008720736B2 Storage Box	Klappbare, stapelbare Box mit faltbarem Mantel, separatem Bodenring mit Kanal — Verriegelungsnoppen und doppelte Wandungen für zusätzliche Steifigkeit bei geringem Gewicht. (Faltbar + Stapelbar + Materialdickenoptimierung). 

Patent US4630746A Collapsible stackable shipping container	Stapelbarer Versand-/Lagerbehälter mit scharnier-artigen Wänden; wichtig für Konzepte zur Materialeinsparung durch Faltbarkeit. 
Patent EP 0 652 161 Kleinladungsträger	Kleinladungsträger mit umlaufenden Profilrippen zur Erhöhung der Steifigkeit bei dünnwandiger Ausführung — früher, aber technisch relevant für Leichtbau-Rippenkonzepte. 
Patent US20100224528A1 Stackable boxes and a storage device	System, bei denen Boxen mit oder ohne Deckel koppelbar sind, flexible Stapelkonfigurationen durch Kopplungsmechaniken (Modularität & Verbindungselemente). 

2.4 Recherche zu relevanten Richtlinien und Normen

Die Auswahl, Gestaltung und der praktische Einsatz von Lagerboxsystemen sind komplexe Prozesse, die einer Vielzahl technischer, logistischer und branchenspezifischer Anforderungen unterliegen. Lagerboxen bilden in vielen industriellen Bereichen eine zentrale Grundlage für die Organisation, den Transport und die Bereitstellung von Kleinteilen, Komponenten und Halbzeugen. Damit diese Prozesse sicher, effizient und wirtschaftlich ablaufen können, müssen die eingesetzten Behältersysteme exakt auf die jeweiligen betrieblichen Abläufe, Lager- und Fördersysteme sowie ergonomischen Anforderungen abgestimmt sein.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Einhaltung einschlägiger Normen und Richtlinien. Diese dienen nicht nur der Vereinheitlichung von Maßen und Schnittstellen, sondern stellen auch sicher, dass Lager- und Transportsysteme herstellerübergreifend kompatibel sind und problemlos in automatisierte Logistik- und Fertigungsprozesse integriert werden können. Darüber hinaus definieren die Normen wesentliche Anforderungen an Materialeigenschaften, wie etwa Stabilität, Temperaturbeständigkeit oder chemische Resistenz, und berücksichtigen sicherheitsrelevante Aspekte wie ESD-Schutz (Electrostatic Discharge) in elektronischen Produktionsumgebungen.

Ebenso spielen Vorgaben zur Kennzeichnung, Rückverfolgbarkeit und Farbgestaltung eine wichtige Rolle, um eine eindeutige Identifikation und effiziente Bestandsführung zu ermöglichen. Zunehmend gewinnen zudem ökologische Kriterien an Bedeutung: Normen und Richtlinien enthalten mittlerweile häufig Anforderungen zur Nachhaltigkeit, etwa hinsichtlich Recyclingfähigkeit, Mehrwegverwendung oder ressourcenschonender Herstellung der Lagerbehälter.

Im Rahmen dieser Recherche wurden nationale wie auch internationale Standards systematisch zusammengetragen und ausgewertet, die den Einsatz von Lagerboxsystemen im industriellen Umfeld maßgeblich beeinflussen. Die nachfolgende Auflistung gibt einen Überblick über die wichtigsten Normen, deren Anwendungsbereiche und Relevanz für die Gestaltung und Nutzung moderner Lager- und Behältersysteme.

VDA 4500 – Verpackung und Behälter für die Automobilindustrie

Inhalt: Richtlinie des Verbands der Automobilindustrie (VDA) zu Standard-Ladungsträgern (KLT, GLT, Blister etc.).

Basisnorm für OEM-Zuliefererketten; enthält Vorgaben zu Maßen, Tragfähigkeit, Labeling und Rückverfolgbarkeit.

VDA 4504 – Lade und Transportbehälter mit elektrostatisch ableitenden Eigenschaften

Inhalt: Richtlinie des Verbandes der Automobilindustrie (VDA) zu ESD-fähigen KLTs

Spezifiziert KLT-Behälter aus leitfähigem Kunststoff, um elektrostatische Entladungen zum Schutz empfindlicher elektronischer Bauteile zu verhindern

VDA 4530 – Einweg-Kleinladungsträger (EW-KLT)- System

Inhalt: Empfehlung für ein einheitliches, mechanisch und manuell handhabbares Einweg-Kleinteileladungsträger-System für Schütt und setzbares Gut. Wird in der Automobilindustrie im Warenverkehr zwischen Zulieferindustrie und Automobilherstellern eingesetzt.

DIN EN ISO 3394 – Verpackung – Versandfertige Packstücke und Ladeeinheiten

Inhalt: Legt Rastermaße für Verpackungen und Lagerbehälter fest (400×300 mm Raster). Grundlage für Behälter- und Regalplanung im europäischen Logistiknetz.

DGUV-Vorschriften (Unfallverhütungsvorschriften) – Betriebssicherheitsverordnung (BetriSichV) und Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)

Allgemeine Vorschriften für Sicherheit und Stabilität. Diese regeln unter anderem die korrekte Stapelhöhe, den Standsicherheitsfaktor und den Umgang mit Lasten.

3 Recherche zum Einsatz von Leichtbaumaterialien

3.1 Analyse möglicher Matrixmaterialien

Im Rahmen der Entwicklung moderner Leichtbau-Lagerboxsysteme steht neben der Gewichtsreduktion zunehmend auch die ökologische Nachhaltigkeit im Vordergrund. Da solche Boxsysteme meist in großen Stückzahlen hergestellt und über lange Zeiträume im Umlauf sind, spielt die Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grund werden für die Umsetzung ausschließlich thermoplastische Matrixmaterialien in Betracht gezogen, während duroplastische Kunststoffe bewusst ausgeschlossen werden. Auf die wichtigsten thermoplastischen Matrixmaterialien wird nachfolgend eingegangen.

3.1.1 PA

Polyamide (Kurzzeichen PA) wurden erstmals im Jahr 1937 synthetisiert und sind Polymere, deren Wiederholungseinheiten als charakteristisches Merkmal die Amidgruppe besitzen. Die Amidgruppe kann als Kondensationsprodukt einer Carbonsäure und eines Amins aufgefasst werden. Die dabei entstehende Bindung nennt man Peptidbindung. Sie ist hydrolytisch wieder spaltbar. [8]

Die Bezeichnung Polyamide wird üblicherweise als Bezeichnung für synthetische, technisch verwendbare thermoplastische Kunststoffe verwendet und grenzt diese Stoffklasse damit von

den chemisch verwandten Proteinen ab. Fast alle bedeutsamen Polyamide leiten sich von primären Aminen ab, d. h. in ihren Wiederholeinheiten kommt die funktionelle Gruppe $-\text{CO}-\text{NH}-$ vor. Daneben existieren auch Polyamide von sekundären Aminen ($-\text{CO}-\text{NR}-$, R = organischer Rest). Als Monomere für die Polyamide finden besonders Aminocarbonsäuren, Lactame und/oder Diamine und Dicarbonsäuren Verwendung. [8]

Eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften der Polyamide zeigt die nachfolgende Tabelle 1.

Tabelle 1: Eigenschaften der Polyamide [8]

Eigenschaft	Wert
Dichte	1.150 kg/m^3
Elektrische Leitfähigkeit (σ)	$10^{-12} (\text{m} \cdot \text{Ohm})^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit	$0,25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Zug-E-Modul	2.300 N/mm^2
Glasübergangstemperatur	60 bis 75°C

Chemische Konstitution

Polyamide lassen sich in die folgenden Klassen einordnen: [8]

a) nach der Art der Monomere:

- aliphatische Polyamide: die Monomere leiten sich von aliphatischen Grundkörpern ab, z. B. PA aus Caprolactam (PA 6: Erklärung der Kurzzeichen siehe unten) oder aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure (PA 66).
- teilaromatische Polyamide: die Monomere leiten sich zum Teil von aromatischen Grundkörpern ab, z. B. PA aus Hexamethyldiamin und Terephthalsäure (PA 6T).
- aromatische Polyamide (Polyaramide): die Monomere leiten sich von rein aromatischen Grundkörpern ab, z. B. para-Phenylendiamin und Terephthalsäure (Aramid)

b) nach der Art der Monomerzusammensetzung

- Homopolyamide: das Polyamid leitet sich von einer Aminocarbonsäure oder einem Lactam bzw. einem Diamin und einer Dicarbonsäure ab. Solche Polyamide lassen sich durch eine einzige Wiederholeinheit beschreiben. Beispiele hierfür sind das PA aus Caprolactam $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_n$ (PA 6) oder das PA aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}]_n$ (PA 66).
- Copolyamide: das Polyamid leitet sich von mehreren unterschiedlichen Monomeren ab. Solche Polyamide lassen sich nur durch Angabe mehrerer Wiederholeinheiten beschreiben. Beispiele hierfür sind das PA aus Caprolactam, Hexamethyldiamin und Adipinsäure $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}]_n-[\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_m$ (PA 6/66), oder PA aus Hexamethyldiamin, Adipinsäure und Sebacinsäure $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}]_n-[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_8-\text{CO}]_m$ (PA 66/610). Zu beachten ist, dass die

angegebenen Formeln lediglich die Polymerzusammensetzung beschreiben, nicht aber die Abfolge der Monomereinheiten, diese sind üblicherweise statistisch über die Polymerketten verteilt.

c) nach Art des Erweichungs-/Erstarrungsverhaltens

- teilkristalline Polyamide: bilden beim Abkühlen aus der Schmelze kristalline Domänen (Phasenübergang 1. Ordnung). In der Regel erstarrt nicht die gesamte Schmelze kristallin, sondern es bilden sich auch amorphe Domänen (siehe unten). Das Verhältnis zwischen kristallinen und amorphen Domänen wird von der chemischen Natur des Polyamids und den Abkühlbedingungen bestimmt. Zusätzlich kann die Kristallisation durch nukleierende oder antinukleierende Additive gefördert oder behindert werden. Leicht kristallisierende Polyamide sind z. B. das PA 46 oder das PA 66, schwer kristallisierende Polyamide sind z. B. das PA mXD6 aus m-Xylylendiamin und Adipinsäure oder bestimmte Copolyamide.
- amorphe Polyamide: erstarren glasartig aus der Schmelze. Im festen Zustand gibt es keine Fernordnung der Wiederholungseinheiten. Der Übergang zwischen fest und flüssig wird durch die Glasübergangstemperatur (Phasenübergang 2. Ordnung) beschrieben. Beispiele sind das PA aus Hexamethyldiamin und Isophthalsäure (PA 6I) und bestimmte Copolyamide. Im Allgemeinen enthalten amorphe Polyamide Monomereinheiten, die eine regelmäßige, kristalline Anordnung der Ketten unmöglich machen. Unter extremen Abkühlbedingungen können auch ansonsten teilkristalline Polyamide amorph erstarren.

Nach diesen Klassifizierungen ist beispielsweise PA 66 ein aliphatisches, teilkristallines Homopolyamid. [8]

Kurzzeichen für Polyamide

Zur rationellen Bezeichnung der Polyamide existieren Kurzzeichen, die aus den Buchstaben PA sowie den darauffolgenden Zahlen und Buchstaben bestehen. Einige wichtige Vertreter sind in der DIN EN ISO 1043-1 genormt. [8]

Polyamide, die sich von Aminocarbonsäuren des Typs $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_x-\text{COOH}$ oder den entsprechenden Lactamen ableiten lassen, werden als PA Z gekennzeichnet, wobei Z die Anzahl der Kohlenstoffatome im Monomer bezeichnet ($Z = x + 1$). So steht z. B. PA 6 für das Polymere aus ϵ -Caprolactam bzw. ω -Aminocapronsäure, $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}]_n$. [8]

Polyamide, die sich von Diaminen und Dicarbonsäuren der Typen $\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_x-\text{NH}_2$ und $\text{HOOC}-(\text{CH}_2)_y-\text{COOH}$ ableiten lassen, werden als PA Z1Z2 gekennzeichnet, wobei Z1 die Anzahl der Kohlenstoffatome im Diamin und Z2 die Anzahl der Kohlenstoffatome in der Dicarbonsäure bezeichnet ($Z1 = x$, $Z2 = y + 2$). So steht z. B. PA 66 für das Polymer aus Hexamethyldiamin und Adipinsäure, $[\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}]_n$. [8]

Analog lassen sich auch Copolyamide bezeichnen. Aus den im Copolyamid vorhandenen Monomeren werden die möglichen Homopolyamidkombinationen gebildet und dann aneinandergehängt. Ein schon genanntes Beispiel ist das PA 66/610, welches aus drei Monomeren (He-

xamethylendiamin, Adipinsäure, Sebacinsäure) gebildet wird. Aus diesen drei Monomeren sind die Homopolymerkombinationen PA 66 (Hexamethylendiamin und Adipinsäure) und PA 610 (Hexamethylendiamin und Sebacinsäure) möglich, woraus sich PA 66/610 als Bezeichnung für das Copolyamid ergibt. [8]

Für einige andere wichtige Monomere, insbesondere solche mit aromatischem Grundkörper, sind auch Buchstabenkürzel gebräuchlich. So steht z. B. T für Terephthalsäure und I für Isophthalsäure. PA 6I ist demzufolge das Polyamid aus Hexamethylendiamin und Isophthalsäure. [8]

Zur klareren Darstellung sind Trennsymbole nicht unüblich (. oder /), die zwischen die Monomerkürzel eingefügt werden, allerdings ist deren Gebrauch häufig nicht einheitlich. Beispielsweise können folgende Bezeichnungen synonym auftreten: PA 6/6.6 = PA 6/66 = PA 6.66 = PA 666. [8]

Des Weiteren existieren auch noch die folgenden Polyamide: [8]

- PA 69 (Hexamethylendiamin/Azelainsäure)
- PA 612 (Hexamethylendiamin/Dodecandisäure)
- PA 11 (11-Aminoundecansäure)
- PA 12 (Laurinlactam oder omega -Aminodecansäure)
- PA 46 (Tetramethylendiamin/Adipinsäure)
- PA 1212 (Dodecandisäure)
- PA 6/12 (Caprolactam/Laurinlactam)

Herstellung von PA 6 und PA 6.6

Die zwei technisch am häufigsten verwendeten Polyamide sind PA 6 und PA 6.6. Ihr Herstellungsprozess ist grundlegend verschieden: [8]

- Polyamid 6.6 ist das Original-„Nylon“ und wird aus HMD (Hexamethylendiamin) und Adipinsäure hergestellt. Es entsteht durch eine Polykondensation unter Wasserabspaltung.

$$\text{H}_2\text{N}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}_2 + \text{HOOC}-(\text{CH}_2)_4-\text{COOH} \rightarrow (-\text{NH}-(\text{CH}_2)_6-\text{NH}-\text{CO}-(\text{CH}_2)_4-\text{CO}-)_n + 2n \text{H}_2\text{O}$$
- Polyamid 6 entsteht durch Ringöffnungspolymerisation aus ϵ -Caprolactam mit Wasser als Starter. Es entsteht $(-\text{NH}-(\text{CH}_2)_5-\text{CO}-)_n$
- Bei der Variante Polyamid 6.10 wird das HMD mit der Sebacinsäure $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$ umgesetzt. Die Formel lautet: $(\text{OOC}(\text{CH}_2)_8\text{CONH}(\text{CH}_2)_6\text{NH})_n$

PA 6 und PA 6.6 sind sich dennoch chemisch und physikalisch sehr ähnlich und unterscheiden sich lediglich durch die gespiegelte Anordnung einer $-\text{CH}_2-\text{NH}-\text{CO}-$ Gruppe. [8]

Handelsnamen für Polyamidfasern

Die drei bekanntesten Handelsnamen für Polyamidfasern sind Nylon, Perlon und Dederon. Daher wird im Folgenden die Historie zu den drei Handelsnamen erläutert: [8]

- **Nylon-Faser:** Der Name Nylon wurde von der E. I. duPont de Nemours für Fasern aus Polyamid 6.6 mit dem Ziel geprägt, ihn als Synonym für „Strümpfe“ zu etablieren. Er wurde jedoch aus firmenpolitischen Gründen nicht als Warenzeichen geschützt. Später wurde er vor allem im angelsächsischen Sprachraum als Gattungsname für lineare aliphatische Polyamide verwendet. Es wurde am 28. Februar 1935 von Dr. Wallace Hume Carothers bei E. I. du Pont de Nemours in Wilmington (Delaware, USA) patentiert. Es war damit die erste synthetische Faser, die vollständig synthetisch (aus Kohlenstoff, Wasser, Luft) hergestellt wurde. Nylon wurde zuerst für Zahnbürsten und nicht für Nylonstrümpfe verwendet. Es wird seit 1938 verkauft.
- **Perlon-Faser:** Perlon ist das Warenzeichen einer 1938 von Dr. P. Schlack für die I. G.-Farbenindustrie AG in Berlin, Deutschland, entwickelte Kunststofffaser. Sie bestand aus Polyamid 6 und wurde als deutsche Alternative zu Nylon (Polyamid 6.6) schnell zum „kriegswichtigen Stoff“ erklärt. Während des Zweiten Weltkriegs wurde Perlon zur Herstellung von Fallschirmen, Borsten zur Reinigung von Waffen und in Flugzeugreifen verwendet. Es wurde ab 1939 unter der Bezeichnung Perlon L vermarktet. Erst 1943 begann die zivile Nutzung für Damenstrümpfe.
- **Dederon-Faser:** Dederon (bzw. DEDERON) war der Handelsname von Polyamidfasern in der DDR. „Dederon“-Fasern wurden u. a. im VEB Chemiefaserkombinat „Wilhelm Pieck“ in Rudolstadt hergestellt. „Dederon“ ist ein nach dem Vorbild „Perlon“ geprägtes Kunstwort, das sich aus DDR und „on“ zusammensetzt. Besondere Bekanntheit erlangte Dederon durch die berühmten Kittelschürzen und Einkaufsbeutel; auch wurde am 12. März 1963 ein Briefmarkenblock Chemie für Frieden und Sozialismus aus Dederonfolie herausgegeben.

Neben diesen drei bekannten Handelsnamen gibt es noch unbekanntere Handelsnamen. Dies sind zum Beispiel Grilon® der Firma EMS-CHEMIE aus der Schweiz und Caprolan® der Firma Honeywell aus den USA. [8]

Handelsnamen für kompaktes Polyamid

Handelsnamen für nichtfasrige Polyamide sind Akulon (DSM), Anjamid (J&A Plastics), Dinalon (Repol), Durethan (Lanxess), Miramid, Dylamid, Schulamid (A. Schulman GmbH), Technyl (Rhodia S. A.), Ultramid (BASF), Unylon (UNYLON Polymers), Vestamid (Degussa), Zytel (DuPont), DYMID (Hoffmann + Voss GmbH) sowie Sunamid (Poly-Beeck GmbH). Diese Materialien können wiederum mit Fasern, meist Glasfasern, verstärkt werden. Polyamid-Granulate, wie Stanyl PA 46 (DSM) werden unter anderem im Spritzguss verwendet. [8]

Eigenschaften

Die meisten technisch bedeutsamen Polyamide sind teilkristalline thermoplastische Polymere und zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit aus, besitzen eine gute Chemikalienbeständigkeit und Verarbeitbarkeit. Viele Eigenschaften der Polyamide werden

weitgehend durch die Amidgruppen dominiert, die über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander wechselwirken. [8]

Genaue Werte für die Eigenschaften der Polyamide hängen unter anderem von deren kristallinem Gefüge und insbesondere von deren Wassergehalt ab. Polyamide reagieren auf den Feuchtegehalt der Umgebung mit reversibler Wasseraufnahme oder -abgabe. Dabei wird das Wasser in die amorphen Bereiche des Polyamids eingelagert. Ganz wesentlich hängt die Wasseraufnahme von der Konzentration der Amidgruppen ab. An Umgebungsluft nimmt z. B. PA 6 ca. 2,5 % - 3,5 % Wasser auf, PA 12 aber nur ca. 0,2 % - 0,5 %. Es sind Additive auf Polyolefin-Basis entwickelt worden, um auch im trockenen Zustand hohe Schlagzähigkeit zu gewährleisten. Dieser Effekt ist auch dafür verantwortlich, dass Nylonstrümpfe zumeist im fabrikenen Zustand am leichtesten Laufmaschen bekommen, wenn sie jedoch die erste Wäsche überstanden haben, viel haltbarer sind. In der nachfolgenden Tabelle 2 sind einige wichtige Eigenschaften für PA6 und PA66 aufgeführt.

Tabelle 2: Eigenschaften von PA6 und PA66 [8]

	PA6	PA66
Schmelzpunkt in °C	220	260
Glastemperatur ¹⁾ in °C (trocken)	50-60	50-60
Dichte in kg/dm ³ - teilkristallin (typischer Wert) - kristalline Phase (α-Modifikation) - amorphe Phase	1,130 1,235 1,084	1,130
Feuchtigkeitsaufnahme in % (23 °C, 50 % Luftfeuchtigkeit)	2,6-3,4	2,5-3,1
Zug-Modul in MPa (trocken / luftfeucht)	2700-3500 / 900-1200	2700-3500 / 1000-1600
¹⁾ Die Glastemperatur sinkt bei zunehmender Feuchtigkeit stark ab und kann dann auch unter 0 °C liegen		

Erkennung

Polyamid lässt sich auf einfache Weise mit wenigen Hilfsmitteln identifizieren. Am einfachsten ist die Brennprobe. Ein kleiner Abschnitt des zu untersuchenden Kunststoffteils wird entzündet. PA brennt mit gelblicher, etwas unruhiger Flamme, wobei das verbrennende Material etwas schäumt und braunschwarze Ränder bildet. Bläst man die Flamme aus, riecht der Rauch leicht hornartig. PA lässt sich mit Ameisensäure anlösen und damit auch kleben, abhängig vom Polyamid benötigt man unterschiedliche Konzentrationen (z. B. PA 6 70 %, PA 66 80 %). [8]

Färben von Polyamidfasern

Fasern kommen entweder als spinndüsengefärbtes Material oder als rohweißes Fasermaterial vor. Das rohweiße Fasermaterial kann in verschiedenen Aufmachungsstufen (Flocke, Garn, Stück) eingefärbt werden. Zur Verwendung kommen Säure- bzw. Metallkomplexfarbstoffe. Auch lässt sich Polyamid mit Dispersions- und Direktfarbstoffen färben, die erzielten Echtheiten sind aber in der Regel deutlich schlechter. In neuerer Zeit kommen auch Reaktivfarbstoffe zum Einsatz, die die Echtheiten von Säure-, Dispers- und Direktfarbstoffen deutlich übertreffen. [8]

Verwendung

Insgesamt wurden 2004 weltweit 6.800 kt Polyamide hergestellt. Die Aufteilung dieser Menge wird in der folgenden Tabelle 3 aufgeschlüsselt. [8]

Tabelle 3: Mengenverteilung von Polyamid weltweit im Jahr 2004 [8]

Poly- amid	Menge	Anteil an Gesamtproduk- tion
PA6	2.500 kt Fasern / 1.100 kt Werkstoffe / 300 kt Folien	57 %
PA66	1.600 kt Fasern / 1.000 kt Werkstoffe	38 %
üb- rige	300 kt	5 %

Der größte Teil der Polyamidproduktion wird demnach als Synthesefaser für Textilien verwendet. Beispiele sind Angelschnur, Büstenhalter, Dessous, Kittel, künstliche Schwämme, Mähfaden für Rasentrimmer, Nylonstrümpfe, Regenbekleidung, Seile jeder Größe vom Kletterseil bis zur Hochsee-Schlepper-Trosse, Spanndrähte, Sprungtücher für Trampoline, technische Gewebe (Papierherstellung), Tennissaiten, Teppichböden, Sportbekleidung (v. a. Turnhosen und Trainingsanzüge), Militärjacken (z. B. Fliegerjacken, Parka), Techno-Clubwear usw. [8]

Außerdem findet es Verwendung zur Herstellung von unzerbrechlichen Haushaltsgegenständen und technischen Teilen, die sehr abriebfest sein müssen, wie Dübel, Schrauben, Gehäuse, Gleitlager, Isolationsteile im Bereich Elektrotechnik, Kabelbinder, Klebesockel, Knotenstücke für Sanitätszelte, Küchenutensilien (Kellen, Löffel usw.), Maschinenteile (Abdeckungen, Zahnräder, Lager, Laufrollen) und Zahnbürsten-Borsten. [8]

Aufgrund seiner Beständigkeit gegen Schmier- und Kraftstoffe bei Temperaturen bis über 150 °C wird es auch im Fahrzeugbau für Motoranbauteile wie Ansaugsysteme, Kraftstoffleitungen, Motorabdeckungen usw. eingesetzt. [8]

3.1.2 PET

Polyethylenterephthalat ist mit etwa 6 % Anteil an der Gesamtmenge der produzierten Kunststoffe einer der bedeutendsten Thermoplaste. Ursprünglich nur für Fasern verwendet, wird heute etwa ein Viertel der produzierten Menge für Verpackungen und Halbzeuge eingesetzt. PET-Fasern werden mittlerweile auch aus recycelten PET-Flaschen hergestellt. Der größte Teil der in Deutschland produzierten PET-Flaschen wird nach Gebrauch in China zu Polyesterfasern für Fleecestoffe recycelt. [9]

Einteilung

Polyethylenterephthalat (PET) ist ein durch Polykondensation entstandener teilkristalliner Thermoplast aus der Familie der Polyester. Dabei existieren zwei Varianten von PET. Diese zwei Varianten lauten wie folgt. [9]

- Kristallines PET (PET-C)
- Amorphes PET (PET-A)

Darüber hinaus gibt es noch ein Copolymer, das mit Glykol modifiziert wurde. PET-G besitzt geschmolzen bessere Eigenschaften, wodurch es sich optimal für die Herstellung kleiner Flaschen sowie für den 3D-Druck eignet. [9]

Die Kristallinität von Polyethylenterephthalat kann durch den Einbau voluminöser Comonomere, zum Beispiel Isophthalsäure, verringert werden, sodass auch transparente Formteile möglich sind. [9]

Herstellung

Die Monomere von Polyethylenterephthalat sind Terephthalsäure und Ethylenglycol. PET ist in der Regel das Ergebnis einer Schmelzkondensation. Diese läuft in zwei Schritten ab. [9]

Zunächst erfolgt eine „Direkt-Veresterung“ von dem Polyethylenterephthalat-Monomer Terephthalsäure mit zweiwertigen Alkoholen, zum Beispiel Ethylenglykol, zum dimeren Veresterungsprodukt. Die Direkt-Veresterung erfolgt bei 220 °C bis 260 °C. Daneben ist auch eine Umesterung des Dimethylesters der Terephthalsäure mit Diolen möglich. Die Reaktion findet bei Temperaturen bis 220 °C statt. [9]

Im Anschluss an die Direkt- beziehungsweise Umesterung erfolgt die eigentliche Polykondensation. Die zähflüssige Polykondensat-Schmelze wird in Form von Bändern oder Strängen ausgetragen, abgekühlt und granuliert. [9]

Eigenschaften

PET ist ein Kunststoff mit außergewöhnlichen Eigenschaften. Dies trifft sowohl auf seine chemischen, mechanischen und auf seine physikalischen Eigenschaften zu.

Polyethylenterephthalat ist gegen viele Chemikalien beständig, zum Beispiel schwache Säuren, und alkalische Lösungen, Öle, Fette, aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe sowie Tetrachlorkohlenstoff. Angegriffen wird PET dagegen von starken Säuren und alkalischen Lösungen, Phenol und bei langem Einsatz in heißem Wasser (>70 °C). PET besitzt außerdem eine gute Bewitterungsstabilität. Vor allem, wenn der Formstoff mit Ruß gegen UV-Strahlung geschützt ist. [9]

Zudem kann PET auch mit seinen mechanischen Eigenschaften punkten, diese werden jedoch stark vom Grad der Kristallinität des PET bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle 4 werden die mechanischen Eigenschaften von Polyethylenterephthalat zusammengefasst.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften von PET-A und PET-C [9]

Eigenschaft	Einheit	PET-A	PET-C
Zug-E-Modul	MPa	2100 - 2400	2800 - 3100
Streckspannung	MPa	55	60 - 80
Streckdehnung	%	4	5 - 7
Nominelle Bruchdehnung	%	>50	>50
Dichte (bei 20 °C)	g/cm ³	1,33 - 1,35	1,38 - 1,40
Schmelzpunkt	°C	>250	>250

Des Weiteren weisen beide Polyethylenterephthalat-Varianten (PET-A und PET-C) zeichnen sich durch sehr niedrige Gleitreibung aus. Darüber hinaus zeigt PET wenig Schwund und somit hohe Maßhaltigkeit. Weiterhin ist PET im Allgemeinen zwar brennbar, aber schwer entzündbar. [9]

Verarbeitung

Polyester wie PET lassen sich durch Spritzgießen, Blasformen, Extrusion und Folienblasen verarbeiten. Platten aus amorphem Polyethylenterephthalat entstehen mithilfe des Thermoformens. [9]

Anwendungen

Der Kunststoff PET ein echter Allrounder und eignet sich für eine Vielzahl von Industrien und Anwendungen.

Polyethylenterephthalat kommt vor allem als Verpackungsmaterial, zum Beispiel für die Lebensmittelindustrie, zum Einsatz. Das bekannteste Produkt ist vermutlich die PET-Flasche, die durch Spritzblasen oder Streckblasen gefertigt wird. [9]

Den mengenmäßig größten Anteil macht allerdings die Verwendung von Polyethylenterephthalat als Textilfaser aus. Auch hier dürfte der Begriff „Polyesterfaser“ bekannt sein. Sie ist in fast 60 Prozent der heute produzierten Kleidungsstücke enthalten und immer häufiger handelt es sich dabei um recyceltes PET (rPET). Aufgrund ihrer Witterungsbeständigkeit eignen sich PET-Fasern zudem hervorragend für Markisen, Segeltuche, Zelte oder Fahnen. Aufgebauscht dienen sie als Füllmaterial für Jacken, Kissen, Schlafsäcke sowie Steppdecken. [9]

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet für Polyethylenterephthalat (PET) sind Polyesterfolien, die sich heute in Dicken von 1 µm bis 500 µm herstellen lassen. Sie werden in erster Linie für Lebensmittelverpackungen verwendet, aber auch als Träger für Kino-, Foto- oder Röntgenfilme. [9]

Weitere Anwendungsgebiete für PET sollen an dieser Stelle der Technologiestudie noch aufgezählt werden. [9]

- Stapelfasern und Filamente
- Verschleißfeste Teile (Lager, Zahnräder, Kupplungen, Türgriffe, etc.)
- Gehäuse für Elektrogeräte
- Trägermaterial für Magnetbänder und Filme
- Farbbänder für Drucker
- Medizintechnik (Gefäßprothesen)

Durch diese zahlreichen Anwendungsgebiete ist ersichtlich, dass Polyethylenterephthalat (PET) einen wichtigen Kunststoff sowohl für den industriellen Sektor als auch für den privaten Sektor darstellt.

3.1.3 PP

Polypropylen (Kurzzeichen PP, gelegentlich auch Polypropen genannt) ist ein teilkristalliner Thermoplast und gehört zu der Gruppe der Polyolefine. Polypropylen wird durch Polymerisation des Monomers Propen mit Hilfe von Katalysatoren gewonnen. [10]

Historische Informationen

Polypropylen wurde vermutlich 1951 zum ersten Mal von John Paul Hogan und Robert Banks synthetisiert. Die großtechnische Synthese begann 1957 durch die Arbeit von Giulio Natta. [10]

Eigenschaften

Da im Gegensatz zu vielen anderen Kunststoffen die Molekülstruktur, die mittlere molare Masse, deren Verteilung, Copolymere sowie weitere Parameter stark variieren und somit auch die Eigenschaften beeinflusst werden können, existiert eine Vielzahl von PP-Sorten. Dennoch besitzt PP allgemeingültige Eigenschaften, welche in den nachfolgenden Punkten aufgeführt werden. [10]

- Die Dichte von PP liegt zwischen 0,895 g/cm³ und 0,92 g/cm³. PP ist somit der Kunststoff mit der geringsten Dichte.
- Der E-Modul von PP liegt bei 1450 N/mm².
- Polypropylen hat eine höhere Steifigkeit, Härte und Festigkeit als Polyethylen (PE). Diese sind jedoch niedriger als bei anderen Kunststoffen wie z.B. Polyamid.
- PP hat eine Glasübergangstemperatur von 0°C bis -10°C und wird somit bei Kälte spröde. Die obere Gebrauchstemperatur liegt bei 100 C bis 110°C. Der Kristallit-Schmelzbereich liegt bei 160°C bis 165°C.
- PP kann mit mineralischen Füllstoffen wie z. B. Talkum, Kreide oder Glasfasern gefüllt werden. Dadurch wird das Spektrum der mechanischen Eigenschaften (Steifigkeit, Gebrauchstemperaturen, etc.) deutlich erweitert.
- PP ist beständig gegenüber fast allen organischen Lösungsmitteln und Fetten sowie den meisten Säuren und Laugen.
- PP ist bei höheren Temperaturen gut löslich in Xylol, Tetralin und Decalin sowie weiteren Lösungsmitteln.
- Aufgrund seiner geringen Oberflächenenergie lässt es sich sehr schlecht verkleben und bedrucken.
- PP ist geruchlos und hautverträglich, für Anwendungen im Lebensmittelbereich und der Pharmazie ist es geeignet. Zudem ist es physiologisch unbedenklich.

Herstellung

Polypropylen (PP) wird durch Polymerisation von Propen hergestellt. Die chemische Strukturformel für Polypropylen zeigt die nachfolgende Abbildung 1.

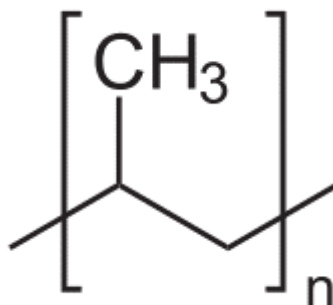


Abbildung 1: Chemische Strukturformel von Polypropylen [11]

Die Methyl-Seitengruppe kann isotaktisch, syndiotaktisch oder ataktisch eingebaut sein. Diese Anordnung hat Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften. Der isotaktische Aufbau,

welcher z. B. mit Hilfe von Ziegler-Natta-Katalysatoren erzeugt werden kann, resultiert in einer teilkristallinen Struktur des PP. Dies lässt sich auf den stets auf einer Seite der Molekülkette befindlichen Methylrest zurückführen, welcher das Makromolekül in eine Helix-Form zwingt (vgl.: Zellulose). Die ataktische Variante des PP ist hingegen weniger kristallin, denn es enthält höhere amorphe Anteile. [10]

Beständigkeit gegen Chemikalien

Die chemische Beständigkeit von Polypropylen ist temperaturabhängig. Nachfolgend ist eine grobe Charakterisierung der Beständigkeit gegen einige wichtige Klassen von Chemikalien bei Raumtemperatur in der Tabelle 5 angegeben.

Tabelle 5: Chemische Beständigkeit von PP gegen Klassen von Chemikalien bei Raumtemperatur [10]

Stoffklasse	Beständigkeit	Legende
Aldehyde	+++	"+" = schlechte bis gar keine Beständigkeit gegen die Stoffklasse (schon einmalige, kurzzeitige Exposition kann das Material schädigen)
Aliphatische Alkohole	+++	
Ester	++	
Ether	++	
Ketone	++	"++" = gute/eingeschränkte Beständigkeit gegen die Stoffklasse (Material ist für eine eingeschränkte Zeit beständig und wird u.U. nur reversibel geschädigt)
Kohlenwasserstoffe aliphatisch	+++	
Kohlenwasserstoffe aromatisch	++	
Laugen	+++	
Oxidationsmittel	+	"+++" = gute Beständigkeit gegen die Stoffklasse (auch lange Exposition fügt dem Material keinen Schaden zu)
schwache Säuren	+++	
starke Säuren	+++	

Verarbeitung

Polypropylen (PP) eignet sich zum Spritzgießen, Extrudieren, Blasformen, Warmumformen, Schweißen, Tiefziehen und für die spanende Verarbeitung. Kleben ist in der Regel nicht möglich. Des Weiteren werden jährlich 5 Millionen Tonnen PP zu Fasern (Filamentgarne oder Stapelfasergarne wie z.B. Polycolon) gezogen. Daraus werden u.a. Vliese und Gewebe hergestellt. [10]

Anwendung

Die Eigenschaften von Polypropylen erlauben es, dass der Kunststoff in vielen Bereichen eingesetzt werden kann. Nachfolgend werden einige Einsatzbereiche genannt. [10]

- Es wird im Maschinen- und Fahrzeugbau für Innenausstattungen für PKW, Armaturenbretter und Batteriegehäuse eingesetzt.
- In der Elektrotechnik wird es für Trafogehäuse, Draht- und Kabelummantelung und Isolierfolien verwendet.
- Im Bauwesen wird es für Armaturen, Fittings und Rohrleitungen verwendet; in der Lüftungs- und Klimatechnik bei korrosionsbegünstigenden Bedingungen und bei der Förderung korrosiver Gase, meist in Form von PP-S (S= Schwerentflammbar).
- In der Textilindustrie wird es als Kammgarn verwendet und zu Polycolon verarbeitet. PP-Fasern werden u.a. zu Heimtextilien, Teppichen, Sporttextilien, Verpackungsmaterialien, Hygieneprodukten, medizinischen Produkten, Seilen, Geotextilien sowie Autoteilen weiterverarbeitet.
- In der Lebensmittelindustrie, im Haushalt und in der Verpackungstechnik finden viele Produkte ihren Einsatz: Flaschenverschlüsse, Innenteile für Geschirrspülmaschinen, für kochfeste Folien, wiederverwendbare Behälter, Verpackungsteile und Trinkhalme
- In feuchten Regionen wird es auch für Kunststoffgeldscheine wie den Australischen Dollar und den Neuseeland-Dollar verwendet.
- In der Orthopädietechnik wird PP als ein mehrgebräuchlicher gut zu verarbeitender Werkstoff angewandt.

3.1.4 Gegenüberstellung wichtiger Matrixwerkstoffe

In der nachfolgenden Tabelle werden die wichtigsten Matrixwerkstoffe miteinander verglichen:

Tabelle 6: Matrixmaterialien [12]

	Polyamid PA6 und 6.6	Polyester PES bzw. PET	Polypropylen PP
Höchstzugkraft cN/tex	70 - 80	70 - 90	60 - 70
Dichte g/cm ³	1,14	1,38	0,90
Höchstzugkraft- Dehnung %	16 - 27	10 - 24	12 - 30
Festigkeitsabfall durch Wasser %	5 - 10	0	0
Wasseraufnahme %	1 - 7	0,5 - 2	0
Lichtbeständig- keit	gut	sehr gut	ausreichend

Säurebeständigkeit 25°C/100°C Restfestigkeit %	17 / 5 - 10	80 / 0	ohne Einfluss
Benzin	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss
Öl / Diesel	ohne Einfluss	ohne Einfluss	ohne Einfluss
organische Lösungsmittel	geringer Einfluss	geringer Einfluss	geringer Einfluss
Alkalien (Laugen)	beständig gegen schwache Laugen	beständig gegen sehr schwache Laugen bei 20°C	beständig gegen schwache Laugen
Temperaturgrenze kurzzeitige Belastung °C	130	170	80
Erweichungs- temperatur °C	170	225	140
Schmelz- temperatur °C	215	260	170

3.2 Analyse möglicher Verstärkungsfasersysteme

3.2.1 Glasfaser

Fasern aus Glas sind ein kostengünstiger, aber dennoch hochwertiger Werkstoff zur Herstellung von Faserverbunden. Wegen ihrer hohen Bruchdehnung und der elastischen Energieaufnahme sind sie die meistverwendete Verstärkungsfasern für mechanisch und thermisch beanspruchte Faserverbundanwendungen. Die Glasfaser ist eine anorganische Faser in Form einer unterkühlten Flüssigkeit, deren Atome zwar ein dreidimensionales Netzwerk bilden, aber mit amorpher Struktur und ohne Orientierung vorliegen. Dadurch besitzt die Faser isotrope Eigenschaften.

Herstellung

Zur Herstellung von Glasfasern kommt vorwiegend das Schmelzspinnverfahren zur Anwendung, wobei die Rohstoffschmelze (ca. 1400 °C) durch Spinndüsen geleitet wird. Das aus den 1-2 mm starken Düsen austretende Glas wird mit hoher Geschwindigkeit abgezogen und dadurch auf Durchmesser zwischen 5 µm und 24 µm gestreckt. Zudem werden die Fasern hinter den Düsen mit einer Schlichte versehen. Diese bildet einen mechanischen Schutz der scheuerempfindlichen Fasern und sorgt je nach Typ der Schlichte, für eine bessere Haftung zwischen Matrix und Faser. Durch die Schlichte erhalten die Fasern einen gewissen Zusammenhalt und werden so als Faserbündel auf Spulen aufgewickelt.

Eigenschaften

Die Festigkeit dünner Glasfäden liegt zwar deutlich unter der Festigkeit aus den atomaren Bindungen berechneten Werten, ist aber um ein Vielfaches höher als die des kompakten Werkstoffes. Die Festigkeitseigenschaften der Glasfasern basieren in erster Linie auf dem Größeneffekt. Ein kleiner Durchmesser ist daher von großer Bedeutung für hohe Zug- und Schwingfestigkeiten, wo hingegen eine dickere Faser hohe Druckfestigkeiten begünstigt, da sie weniger knickgefährdet ist. Neben der stark verringerten Fehlstellendichte durch die Faserform sind vermutlich auch Druckeigenspannungen an der Oberfläche für die hohe Festigkeit von Glasfasern verantwortlich, die durch den später abkühlenden Faserkern hervorgerufen werden. Je nach Zusammensetzung der Ausgangsstoffe entstehen Glasfasersorten unterschiedlicher Festigkeit und E-Moduln (Tabelle 7). Man unterscheidet unter anderem zwischen E-, C- und S-Glas.

- E-Glas: Standardverstärkungsfasern (nicht resistent gegen Säuren und Basen)
- R-Glas: Fasern mit erhöhter Festigkeit
- S-Glas: Fasern mit erhöhter Festigkeit
- C-Glas: Fasern mit erhöhter Chemikalienbeständigkeit
- D-Glas: Fasern mit besonders hohen dielektrischen Eigenschaften und guter Transparenz

Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften verschiedener Glasfasertypen längs zur Faserrichtung ([13], S. 30)

	E-Glas	R-Glas	S-Glas	C-Glas	D-Glas
E-Modul in N/mm ²	73 000	86 000	86 810	71 000	55 000
G-Modul in N/mm ²	29 920		35 578		
Querkontraktionszahl	0,22		0,22		
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /°C]	5,1	4,1	5,58	7,2	3,5
Wärmeleitfähigkeit in Wm ⁻¹ K ⁻¹	1				
Zugfestigkeit in N/mm ²	2 400	3 600	4 500	2 400	1 650
Eigenschaftsverluste ab	300°C	350°C			
Dichte in g/cm ³	2,54	2,55	2,49	2,51	2,14

Glasfasern sind auf Grund der niedrigen Bruchdehnung und des hohen E-Moduls ein guter Federwerkstoff und sind durch ihre niedrige Fasersteifigkeit gut drapierbar. Sie sind thermisch und elektrisch isolierend, unbrennbar, haben eine geringe Feuchtigkeitsaufnahme und eine gute chemische und mikrobiologische Widerstandsfähigkeit.

Durch ihr nahezu linear-elastisches Verhalten bis zum Versagen bricht die Glasfaser spröde. Im Verbund versagen aber nicht alle Fasern gleichzeitig, sodass hier nicht von einem reinen

Spröbruchverhalten gesprochen werden kann. Die Standard-Glasfaser ist nicht beständig gegen Säuren und Basen. Werden Glasfasern mit höheren Temperaturen belastet sinken ebenfalls die Festigkeitswerte, wobei R- und S-Glas gegenüber dem normalen E-Glas etwas unempfindlicher sind. Tiefere Temperaturen sind dagegen unkritisch.

Lieferformen

Es gibt zwei verschiedene Lieferformen von Glasfasern. Bei der ersten Lieferform wird nach dem Ziehprozess das Multifilamentgarn aus Glasfasern direkt zu Spulen aufgewickelt. Bei der zweiten Lieferform fasst man mehrere Multifilamentgarne aus Glasfasern zu nicht gedrehten assemblierten Rovings zusammen. Allerdings sind in einem solchen Roving nicht alle Multifilamentgarne aus Glasfasern gleich lang, wodurch keine gleichmäßige Spannungsaufteilung auf die einzelnen Glasfaserfilamente entsteht. Dem gegenüber steht der Direktroving, welcher der ersten Lieferform entspricht. Dieser wird direkt mit der entsprechenden Filamentanzahl aus dem Ziehprozess hergestellt. Bei diesem Direktroving haben die Filamente jedoch meist einen größeren Durchmesser von 17 µm bis 24 µm. Der üblichen Feinheiten von Glasfaserrovings betragen 300 tex, 600 tex, 1.200 tex, 2.400 tex und 4.800 tex.

3.2.2 Carbonfaser

Unter den Verstärkungsfasern zeichnen sich die Carbonfasern mit herausragenden mechanischen Eigenschaften und auch Leichtbaueigenschaften aus. Dem gegenüber steht jedoch ein hoher Preis für das Carbonfasermaterial. Dieser Preis bewegt sich in der Preisspanne zwischen 15 €/kg und 53 €/kg. Dieser hohe Preis für das Carbonfasermaterial ist der Grund dafür, dass Carbonfasern hauptsächlich im Bereich der Sportgerätetechnik, Medizintechnik sowie der Luft- und Raumfahrt zum Einsatz kommen.

Herstellung

Heute werden Carbonfasern auf Basis der Verkohlung von Synthesefasern hergestellt. Als Ausgangsmaterial dienen Fasern aus Polyacrylnitril (PAN) oder Pech. In mehreren Stufen wird das Vorgarn unter Zug verarbeitet. **Abbildung 2** zeigt die einzelnen Herstellungsschritte für Carbonfasern.

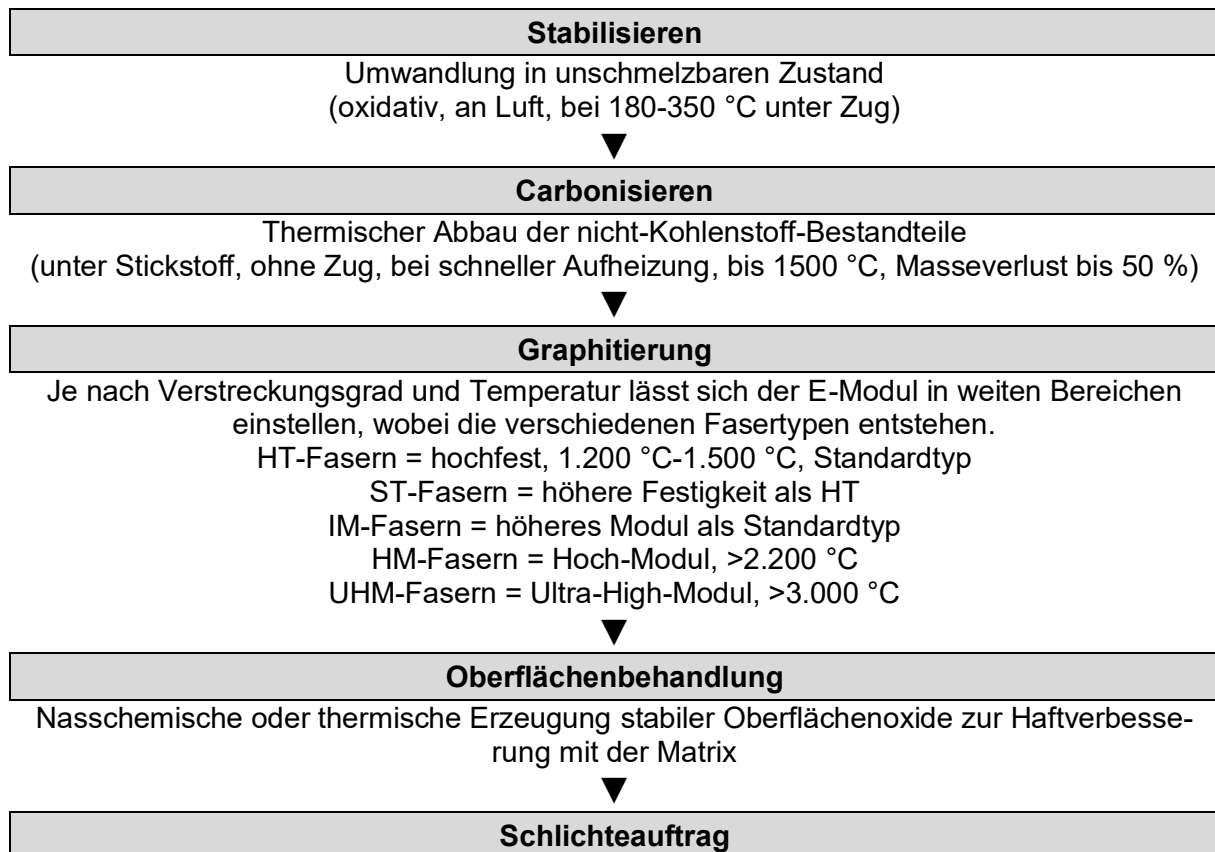


Abbildung 2: Herstellungsprozess für Carbonfasern

Eigenschaften

Carbonfasern besitzen eine hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte (vgl. Tabelle 8). Im Vergleich zur Glasfaser hat die Standard-Carbonfaser (HT-Faser) die doppelte Zugfestigkeit und einen vierfach höheren spezifischen E-Modul. Carbonfasern sind sehr ermüdungsfest. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Carbonfasern ist zunächst linear elastisch. In der Nähe der Bruchspannung nimmt die Steifigkeit noch einmal um etwa 10 % zu. Als Grund vermutet man eine zunehmende Ausrichtung der Graphitkristalle.

Die Ausrichtung der starken kovalenten Bindungen des Graphitkristalls in Faserlängsrichtung bewirkt eine starke Anisotropie im Material, welche auch die Wärmeausdehnung betrifft. Diese ist quer zur Faserrichtung positiv, jedoch in Faserrichtung negativ und zwar umso mehr, je höher die Graphitkristalle ausgerichtet, d. h., je höher das faserparallele Elastizitätsmodul ist. So können Bauteile konstruiert werden, die sich unter Temperatureinfluss kaum verformen. Carbonfasern sind gegen viele Säuren und Alkalien beständig und haben eine gute Wärmeleitfähigkeit. Carbonfasern sind gute elektrische Leiter und sollten wegen der Kurzschlussgefahr von elektrischen und elektronischen Bauteilen ferngehalten werden.

Tabelle 8: Daten verschiedener Carbonfasertypen (PAN-Basis), (Herstellerangaben), ([13], S. 41)

	HT-Faser	ST-Faser	IM-Faser	HM-Faser	UHM-Fa- ser
E-Modul längs in N/mm ²	230 000	245 000	294 000	392 000	450 000
E-Modul quer in N/mm ²	28 000			15 200	
G-Modul in N/mm ²	50 000			28 600	
Querkontraktionszahl	0,23			0,2	
Thermischer Ausdehnungskoeff- fizient längs [10 ⁻⁶ /°C]	-0,455			-1,08	
Thermischer Ausdehnungskoeff- fizient quer [10 ⁻⁶ /°C]	12,5			31	
Zugfestigkeit längs in N/mm ²	3 430	4 510	4 210	2 450	2 150
Dichte in g/cm ³	1,74	1,8	1,74	1,81	1,9

Lieferformen

Handelsübliche Rovingfeinheiten für Carbonfaserrovings sind 1K, 3K, 6K, 12K, 24K, 48K und 50K Rovings. Das „K“ in der Angabe für die Feinheit des Carbonfaserrovings steht für 1000 Filamente. Die Durchmesser der Einzelfilamente der Carbonfaserrovings betragen zwischen 5 µm bis 10 µm, wobei 7 µm der häufigste anzutreffende Durchmesser der Einzelfilamente der Carbonfaserrovings ist. Des Weiteren werden Carbonfaserrovings auf 3-Zoll-Papphülsen mit tangentialem Abzug ausgeliefert. Die Spulenmassen der Carbonfaserrovings betragen zwischen 1 kg und 10 kg. Die Spulenmassen der Carbonfaserrovings sind gegenüber denen der Glasfaserrovings klein und daher können sie besser von den Maschinenbedienern gehandhabt werden.

3.2.3 Basaltfaser

Bei der Basaltfaser handelt es sich um eine anorganische Faser ([13], S. 53), welche aus vulkanischem Ergussgestein (Basalt) hergestellt wird. Die Basaltfaser besitzt eine sehr charakteristische Färbung von dunkelgrau zu goldbraun und diese ist durch den Eisenoxidanteil im Basaltmaterial zu begründen. Die Basaltfaser ist in der typischen Lieferform in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Basaltfaser in der typischen Lieferform als Roving (Multifilamentgarn)

Herstellung

Basaltfasern werden aus vulkanischem Basaltgestein bei etwa 1500 °C schmelzgesponnen, d. h. aus einem Schmelzbad über Platin-Rhodium-Düsen abgezogen. Während Glas aus mehreren Komponenten zusammengemischt werden muss, können die zerkleinerten Basaltbrocken direkt dem Schmelzofen zugeführt werden. Basaltfasern setzen sich im Wesentlichen aus SiO_2 ($\approx 52\%$), Al_2O_3 ($\approx 17\%$), CaO ($\approx 9\%$), MgO ($\approx 5\%$) und kleineren Anteilen von Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 zusammen. Die Zusammensetzung differiert, je nachdem aus welcher Lagerstätte der Basaltfels stammt. Basalt ist nicht wie die Glasfasern amorph, sondern weist eine kristalline Struktur auf. ([13], S. 53)

Eigenschaften

Die folgenden Eigenschaften der Basaltfaser sind für ihren Einsatz bei der Konstruktion und der Fertigung von Bauteilen entscheidend ([13], S. 54):

- Basaltfasern nehmen praktisch kein Wasser auf.
- Die chemische Beständigkeit ist sehr gut.
- Die Basaltfaser ist nicht toxisch, sie verhält sich vollkommen inert.
- Basalt ist ein sehr guter Isolator.
- Die Temperatureinsatzgrenze liegt bei 700 °C.
- Basaltfasern sind gegen UV-Licht-beständig.

Die mechanischen Eigenschaften der Basaltfaser längs zur Faserrichtung ähneln denen der S-Glasfaser und werden in Tabelle 9 aufgezeigt. Der Preis für ein Kilogramm Basaltfaser beträgt 3 - 5 €. Damit liegt die Faser mit ihrem Preis zwischen S-Glasfasern und E-Glasfasern ([13], S. 54). Außerdem ist sie günstiger als die Carbonfaser.

Tabelle 9: Physikalische Eigenschaften der Basaltfaser längs zur Faserrichtung ([13], S. 54)

	9 bis 12 µm Faserdurchmesser
E-Modul in N/mm ²	91 000 bis 110 000
Zugfestigkeit in N/mm ²	3 700
Thermischer Ausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /°C]	0,55
Wärmeleitfähigkeit in Wm ⁻¹ K ⁻¹	1,67
Dichte in g/cm ³	2,6 bis 2,8

Lieferformen

Die Basaltfaserrovings werden in drei Lieferformen angeboten. Die erste Lieferform ist der Direktroving. Das heißt, der Basaltfaserroving wird direkt nach dem Abzug aus dem Schmelzbad auf einen Spuldorn mit mindestens 6 Zoll Außendurchmesser aufgespult. Das Ergebnis dieser Produktion wird häufig auch als Spinnkuchen bezeichnet. Dieser Direktroving bzw. Spinnkuchen ist für den Innenabzug konzipiert. Er kann aber auch durch den Einsatz eines TEXMER-Gatters tangential abgezogen werden. Der Direktroving bewegt sich in einem Feinheitsbereich zwischen 110 tex bis 2.000 tex und die Rovings haben eine Masse von 3 kg bis 12 kg.

Die zweite Lieferform ist der assemblierte Roving. Dieser Roving besteht aus mehreren der vorher genannten Direktrovings. Der assemblierte Roving wird durch das Fachen von mehreren Direktrovings zur gewünschten Zielfeinheit hergestellt. Dabei ist unbedingt auf die gleiche Spannungsverteilung zwischen den Direktrovings zu achten, da sonst ein nicht nutzbarer assemblierter Roving entsteht. Der assemblierte Roving kann sowohl innen als auch außen abgezogen werden. Beim äußeren Abzug wird der assemblierte Basaltfaserroving auf eine 3 Zoll Papphülse aufgespult. Beim inneren Abzug wird der Basaltfaserroving ohne Papphülse ausgeliefert. Der Feinheitsbereich des assemblierten Rovings bewegt sich im Bereich von 300 tex bis 4800 tex. Die Rovingmassen betragen 5 kg bis 8 kg.

Die dritte Lieferform ist ein verzwirnter Basaltfaserroving. Bei dieser Lieferform wird zum einen ein Direktroving mit bis zu 40 Drehungen pro m in Z-richtung verzwirnt, zum anderen werden auch zwei bis drei Direktrovings zu einem Roving verzwirnt. Die Rovings, welche durch das Zwirnen von mehreren Direktrovings hergestellt werden, weisen 28 bis 50 Drehungen pro m in Z-Richtung auf. Die Feinheiten dieser verzwirnten Rovings bewegen sich in dem Bereich

von 68 tex bis 330 tex. Die Rovingmasse beträgt zwischen 4 kg und 6 kg. Die verzwirnten Rovings werden auf Flaschenspulen der Firma SONOCO PLASTICS aufgespult und ausgeliefert.

3.2.4 Analyse zum Einsatz der Materialien

Bei der Entwicklung moderner Leichtbau-Lagerboxsysteme spielt die Wahl des geeigneten Faserverbundwerkstoffs eine zentrale Rolle. Sowohl glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) als auch carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) bieten deutliche Vorteile gegenüber unverstärkten Thermoplasten, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich ihrer mechanischen Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ihres optimalen Einsatzbereichs. Zusätzlich gewinnt in den letzten Jahren auch basaltfaserverstärkter Kunststoff (BFK) an Bedeutung, da er eine interessante Zwischenposition zwischen Glas- und Carbonfasern einnimmt und neue Potenziale für robuste, zugleich nachhaltige Lagerboxlösungen eröffnet.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe werden vor allem dort eingesetzt, wo hohe Robustheit, Wirtschaftlichkeit und chemische Beständigkeit gefragt sind. Durch den Zusatz von Glasfasern lässt sich die Steifigkeit und Festigkeit von Kunststoffen deutlich erhöhen, ohne dass die Fertigung wesentlich komplexer oder teurer wird. Besonders in industriellen Lager- und Transportsystemen, bei denen Stoßfestigkeit, Temperaturbeständigkeit und Langlebigkeit entscheidend sind, bietet GFK eine ideale Lösung. Lagerboxen aus glasfaserverstärktem Polypropylen oder Polyamid sind beispielsweise in der Lage, hohe Stapel- und Stoßbelastungen aufzunehmen, ohne zu brechen oder sich dauerhaft zu verformen. Gleichzeitig bleiben sie deutlich leichter als vergleichbare Metallboxen, was das manuelle Handling verbessert und Transportkosten reduziert. Aufgrund der guten Verarbeitbarkeit im Spritzgießverfahren eignet sich GFK besonders für serienmäßig produzierte Lagerboxen, die in großen Stückzahlen wirtschaftlich hergestellt werden müssen. Auch aus ökologischer Sicht bietet GFK Vorteile, da glasfaserverstärkte Thermoplaste prinzipiell wiederverwertet und zu Rezyklaten verarbeitet werden können.

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe kommen hingegen in Anwendungsbereichen zum Einsatz, in denen maximale Gewichtsreduktion und hohe Steifigkeit im Vordergrund stehen. Carbonfasern besitzen ein sehr hohes spezifisches Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnis und ermöglichen daher den Bau extrem leichter Strukturen bei gleichzeitig hoher Tragfähigkeit. Für Lagerboxsysteme bedeutet dies, dass sich CFK insbesondere für Anwendungen eignet, bei denen das Eigengewicht der Boxen einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz hat – etwa in der Luftfahrtlogistik, im Motorsport oder in automatisierten Hochregallagersystemen. Dort reduziert jedes eingesparte Kilogramm das Gesamtgewicht und damit Energieverbrauch, Antriebsleistung oder Traglastanforderungen der Anlagen. CFK-Boxen sind somit ideal, wenn die

Handhabung häufig erfolgt oder wenn sie Teil mobiler Systeme sind, bei denen Gewicht eine entscheidende Rolle spielt. Darüber hinaus bietet CFK durch seine hohe Formstabilität Vorteile bei Boxen, die präzise Passungen oder modulare Stecksysteme erfordern. Allerdings ist der Werkstoff deutlich teurer als GFK und empfindlicher gegenüber Schlag- und Kerbbelastungen. Auch die Fertigung ist aufwändiger, da Carbonfasern empfindlich auf Scherkräfte reagieren und eine kontrollierte Prozessführung erfordern. Daher wird CFK in der Regel nur bei technisch hochwertigen Speziallösungen eingesetzt, bei denen die Leistungssteigerung die höheren Kosten rechtfertigt.

Basaltfasern stellen eine zunehmend attraktive Alternative dar, insbesondere wenn erhöhte Temperaturbeständigkeit, Robustheit und Nachhaltigkeit gefordert sind. Sie werden aus natürlich vorkommendem Basaltgestein gewonnen und besitzen mechanische Eigenschaften, die zwischen Glas- und Carbonfasern liegen. Basaltfaserverstärkte Kunststoffe zeichnen sich durch eine höhere Wärmebeständigkeit, eine deutlich bessere Abriebfestigkeit sowie eine höhere Korrosions- und Medienbeständigkeit im Vergleich zu GFK aus. In Lagerboxsystemen können BFK-Materialien dort punkten, wo Boxen besonders rauen Umgebungen oder thermischen wechselbelastungen ausgesetzt sind – etwa in metallverarbeitenden Betrieben, ESD-sensiblen Bereichen oder im Außenlager. Gleichzeitig sind Basaltfasern kostengünstiger und ökologisch vorteilhafter als Carbonfasern, da sie ohne energieintensive chemische Prozesse hergestellt werden und vollständig aus natürlichen Rohstoffen bestehen. Damit bieten sie ein spannendes Potenzial für mittelpreisige, besonders langlebige Leichtbauboxen, die sowohl mechanisch als auch ökologisch anspruchsvolle Anforderungen erfüllen sollen. Im Vergleich zu GFK sind sie jedoch etwas teurer, und ihre Verfügbarkeit in spezifischen Faserhalbzeugen ist noch geringer, weshalb sich ihr Einsatz aktuell vor allem für spezielle Nischen- oder Premiumanwendungen im robusten Leichtbau empfiehlt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass GFK-basierte Lagerboxsysteme den optimalen Kompromiss zwischen mechanischer Belastbarkeit, Preis und Herstellbarkeit darstellen und sich für den Großteil der industriellen Anwendungen eignen. Basaltfaserverstärkte Lösungen erweitern dieses Spektrum, indem sie eine robuste, temperaturbeständige und ökologisch attraktive Alternative im mittleren Leistungsbereich bieten und damit besonders für anspruchsvolle Industrieumgebungen interessant sind. CFK-Lagerboxen dagegen sind vor allem dann sinnvoll, wenn das Gewicht entscheidend ist oder wenn besonders hohe Steifigkeitsanforderungen bestehen, wie etwa im Bereich der mobilen, tragbaren oder luftfahrttechnischen Logistiksysteme. Während GFK also als robustes und kosteneffizientes Material für Standard-Leichtbauanwendungen dient, findet BFK seinen Mehrwert in hochbeanspruchten, langlebigen Anwendungen, und CFK schließlich seine Stärke in Premium- oder Hochleistungsanwendun-

gen, bei denen die maximale Gewichtsersparnis im Vordergrund steht. In der nachfolgenden Tabelle 10 werden die 3 Fasertypen gegenübergestellt:

Tabelle 10: Vergleichstabelle

	Gaserfaser (GFK)	Basaltfaser (BFK)	Carbonfaser (CFK)
Spezifische Steifigkeit	Mittel	Mittel-hoch	Sehr hoch
Spezifische Festigkeit	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Gewicht (Dichte)	ca. 2,5g/cm ³	ca. 2,7g/cm ³	ca. 1,8g/cm ³
Schlagzähigkeit	Hoch	sehr Hoch	Mittel
Temperaturbeständigkeit (Faser)	ca. 150-200°C	ca. 700°C	200-300°C
Medien-, Korrosions- und Chemikalienbeständigkeit	Gut	Sehr gut	Gut
Dauerhaltbarkeit / Ermüdungswiderstand	Gut	Gut-sehr gut	Sehr gut
Kosten	Gering	Mittel	Hoch-sehr hoch
Ökologische Bilanz	Gut	Sehr gut (mineralisch, wenig energieintensive Herstellung)	Mittel
Recyclingfähigkeit (thermoplastischer Verbund)	Gut	Gut	Gut
Einsatzgebiet im Lagerboxbereich	Standard- und Hochrobust-Anwendungen	Robuste, thermisch/chemisch belastete Premium Anwendung	Leichtbau-Premium, Mobilität, High-End
Vorteile	Robust- kostengünstig, einfach verarbeitbar	Extrem Robust, hitzebeständig (abhängig von Matrixmaterial), nachhaltiger	Höchste Steifigkeit, sehr leicht
Nachteile	Höheres Gewicht als CFK	Etwas schwerer als CFK/GFK, begrenzte Marktdurchdringung	Teurer, empfindlicher gegen Schlagbelastung

3.3 Analyse zur verfahrenstechnischen Umsetzung unterschiedlicher Leichtbaumaterialien in Lagerboxsystemen

Die Herstellung von Leichtbaustrukturen aus faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen (FKV) bietet eine große Bandbreite an verfahrenstechnischen Ansätzen. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt dabei von mehreren Faktoren ab:

- Geometrie und Größe der Lagerbox
- Mechanische und thermische Anforderungen
- Stückzahlen und Wirtschaftlichkeit
- Recycling- und Nachhaltigkeitsaspekte

Im Folgenden werden die wichtigsten Verfahren zur Verarbeitung thermoplastischer FKV erläutert und hinsichtlich ihrer Eignung für Lagerboxsysteme bewertet.

3.3.1 Spritzgießen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten

Das Spritzgießen ist das am weitesten verbreitete Verfahren zur Herstellung komplex geformter Kunststoffteile. Beim kurzfaserverstärkten Spritzgießen werden vorkonfektionierte Compounds verwendet, bei denen Glas- oder Kohlenstofffasern (typischerweise 0,2–0,5 mm lang) bereits homogen in der Kunststoffmatrix verteilt sind.

Prozessablauf:

Beim Spritzgießen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten wird ein bereits fertig compoundingiertes Granulat verarbeitet, in dem die Fasern – meist Glasfasern – homogen in der Kunststoffmatrix verteilt sind. Das Granulat wird in der Plastifiziereinheit des Spritzgießaggregats erhitzt und aufgeschmolzen. Durch die rotierende Schnecke wird die Schmelze homogenisiert und mit hohem Druck in die Form eingespritzt.

Beim Füllen der Kavität orientieren sich die Fasern überwiegend in Fließrichtung der Schmelze, was zu anisotropen, also richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften führt. Nach dem Einspritzen folgt die Nachdruckphase, in der Material nachgepresst wird, um Schwindung und Porenbildung zu vermeiden. Anschließend kühlt das Bauteil im Werkzeug ab, bis es formstabil ist, und wird schließlich ausgeworfen.

Der gesamte Zyklus dauert meist zwischen 30 und 90 Sekunden, abhängig von der Bauteilgröße und Wandstärke. Dieses Verfahren ist hochautomatisierbar und erlaubt die Herstellung komplexer Geometrien in einem Schritt.

Technische Merkmale:

- Typische Fasergehalte: 10–40 Gew.-%
- Zykluszeiten: 30–90 Sekunden
- Bauteilgewicht: wenige Gramm bis mehrere Kilogramm
- Werkstoffe: PP-GF, PA6-GF, PBT-GF

Vorteile:

- Vollautomatisierbar, hoch reproduzierbar
- Ideal für Großserienproduktion
- Sehr gute Form- und Maßgenauigkeit
- Kombination mit Funktionsbauteilen (Scharniere, Griffe, Clips) möglich

Nachteile:

- Faserverkürzung durch hohe Scherkräfte → begrenzte Steifigkeit
- Mechanische Eigenschaften anisotrop (Fließrichtungseinfluss)

Eignung:

Für Standard-Lagerboxen mit mittlerem bis hohem Produktionsvolumen ist dieses Verfahren aufgrund seiner Kosten- und Zeiteffizienz besonders geeignet.

3.3.2 Langfaser-Spritzgießen (LFT)

Das Langfaser-Spritzgießen ist eine Weiterentwicklung des herkömmlichen Spritzgießens. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass deutlich längere Fasern – meist zwischen 10 und 25 mm – verwendet werden. Diese längeren Fasern erhöhen die mechanische Leistungsfähigkeit der Bauteile erheblich. Es existieren zwei Prozessvarianten: die Direktverarbeitung (LFT-D) und die Verarbeitung von vorgefertigtem Langfasergranulat (LFT-G). Beim LFT-D-Verfahren werden kontinuierliche Faserstränge direkt in die Schmelze eingezo- gen, die zuvor in einer Extrusionsschnecke aufgeschmolzen wurde. Durch diesen Inline-Pro- zess bleiben die Fasern deutlich länger erhalten, was zu einer verbesserten Festigkeit und Schlagzähigkeit führt. Die Schmelze wird anschließend in das Spritzgießwerkzeug einge- spritzt, wo sie abkühlt und aushärtet.

Das alternative LFT-G-Verfahren arbeitet mit Granulaten, bei denen die Fasern bereits im Compound enthalten sind. Hier ähnelt der Prozess stark dem konventionellen Spritzgießen, jedoch ist der Schmelzeffluss durch die längeren Fasern zäher, was längere Füllzeiten zur Folge hat.

Langfaser-Spritzgießen liefert Bauteile mit höherer Energieaufnahme und geringerer Kerb- empfindlichkeit. Typische Zykluszeiten liegen zwischen 60 und 150 Sekunden. Das Verfahren eignet sich hervorragend für Lagerboxsysteme, die eine hohe Stoß- und Stapelbelastung auf- weisen, wie beispielsweise Mehrwegtransportbehälter im industriellen Einsatz.

Prozesscharakteristik:

- **Fasergehalte:** 20–60 Gew.-%
- **Temperaturen:** 200–300 °C (abhängig von Matrix)
- **Faserlängen nach Verarbeitung:** 5–10 mm
- **Zykluszeiten:** 60–150 Sekunden

Vorteile:

- Höhere Schlagzähigkeit und Energieaufnahme
- Gleichmäßigere Faserverteilung
- Bessere mechanische Performance bei Stoß- und Dauerbelastung
- Reduzierte Faserverkürzung durch schonende Verarbeitung

Nachteile:

- Etwas längere Zykluszeiten
- Höhere Materialkosten (Sondercompounds)
- Aufwendigere Dosiertechnik

Eignung:

Ideal für robuste Lagerboxen, die häufig gestapelt oder dynamisch belastet werden (z. B. Transport- und Mehrwegboxen in der Industrie).

3.3.3 Thermoformen (Organobleche)

Das Thermoformen von Organoblechen ist ein Verfahren, das endlosfaserverstärkte Halbzeuge nutzt. Diese sogenannten Organobleche bestehen aus mehreren Lagen von Geweben oder unidirektionalen Faserbändern, die mit einer thermoplastischen Matrix imprägniert sind. Der Prozess beginnt mit dem Aufheizen des flachen Organoblechs auf eine Temperatur oberhalb der Schmelztemperatur der Matrix – bei Polypropylen beispielsweise etwa 220 °C. Das erwärmte Halbzeug wird anschließend in ein temperiertes Formwerkzeug eingelegt. Dort wird es durch Druck verformt, bis die gewünschte Bauteilgeometrie erreicht ist. Während des Formprozesses wird darauf geachtet, dass die Faserorientierung erhalten bleibt, um die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Nach der Umformung erfolgt eine kontrollierte Abkühlung im Werkzeug, um Spannungen und Porenbildung zu vermeiden. Schließlich wird das Bauteil entformt und gegebenenfalls beschnitten. Das Thermoformen ermöglicht sehr kurze Zykluszeiten von etwa einer bis drei Minuten und ist besonders geeignet für flächige, dünnwandige Strukturen mit hohen Steifigkeitsanforderungen. Für Lagerboxsysteme bietet sich dieses Verfahren an, wenn besonders leichte, aber steife Wandelemente benötigt werden, beispielsweise bei modularen oder großformatigen Boxen.

Prozessmerkmale:

- **Zykluszeit:** 60–180 Sekunden
- **Faserorientierung:** gezielt steuerbar (durch Gewebelagenaufbau)
- **Fasergehalt:** bis zu 65 Vol.-%
- **Temperaturbereich:** 200–350 °C

Vorteile:

- Sehr hohe Steifigkeit und Festigkeit (endlose Fasern)
- Gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit
- Kurze Prozesszeiten im Vergleich zu duroplastischen Verfahren (z. B. RTM)
- Geeignet für großflächige, dünnwandige Strukturen

Nachteile:

- Begrenzte Formfreiheit (vorgegebene Halbzeuggeometrie)
- Höherer Handling- und Energieaufwand
- Werkzeugtemperierung kritisch für gleichmäßige Qualität

Eignung:

Für tragende Strukturen oder verstärkte Wände von Lagerboxsystemen, bei denen ein maximales Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht gefordert ist. Auch geeignet für Verbundstrukturen mit spritzgegossenen Funktionselementen.

3.3.4 Hybridverfahren (Organoblech + Spritzguss)

Das Hybridverfahren kombiniert das Thermoformen von Organoblechen mit dem Spritzgießen, um die Vorteile beider Technologien zu nutzen. Der Prozess beginnt mit der Erwärmung eines Organoblechs, das die tragende Struktur des späteren Bauteils bildet. Dieses Blech wird mit Hilfe einer Infrarot-Heizung oder eines Konvektionsofens auf Verarbeitungstemperatur gebracht und anschließend automatisiert in ein Spritzgießwerkzeug eingelegt. Dort wird es fixiert und in Form gebracht. Unmittelbar danach erfolgt das Überspritzen bestimmter Bereiche mit einer thermoplastischen Schmelze – häufig aus demselben Material wie die Matrix des Organoblechs, etwa Polypropylen. Durch das Überspritzen können Funktionselemente wie Verstärkungsrippen, Griffmulden oder Verbindungspunkte direkt integriert werden.

Während der Abkühlphase verbinden sich die beiden Komponenten stoffschlüssig, sofern gleiche oder chemisch kompatible Kunststoffe verwendet werden. Nach dem Abkühlen wird das fertige Hybridbauteil entformt und kann in der Regel ohne Nachbearbeitung weiterverwendet werden.

Dieses Verfahren vereint die hohe Steifigkeit endlosfaserverstärkter Strukturen mit der Designfreiheit und Funktionsintegration des Spritzgießens. Es ist daher besonders für hochwertige, multifunktionale Lagerboxsysteme geeignet, die trotz geringem Gewicht eine hohe Tragfähigkeit und Langlebigkeit aufweisen sollen.

Prozessmerkmale:

- **Zykluszeit:** 90–180 Sekunden
- **Prozessintegration:** Umformen und Funktionseinbringung in einem Schritt
- **Haftung:** chemisch (bei gleicher Matrix) oder mechanisch (bei unterschiedlicher Matrix)

Vorteile:

- Kombination aus hoher Steifigkeit und Funktionsintegration
- Geringe Bauteildicke bei hoher Tragfähigkeit
- Ideal für Automatisierung und Serienproduktion
- Gewichtseinsparungen von bis zu 50 % gegenüber reinem Spritzguss

Nachteile:

- Komplexe Prozess- und Werkzeugauslegung
- Höhere Investitionskosten
- Sorgfältige Temperatur- und Zyklussteuerung notwendig

Eignung:

Das Hybridverfahren ist ideal für hochwertige, multifunktionale Lagerboxsysteme, z. B. modulare Behälter mit integrierten Griffen, Verstärkungszonen oder Befestigungspunkten.

Durch den Einsatz gleicher Matrixwerkstoffe (z. B. PP-Organoblech + PP-Spritzguss) bleibt das Bauteil vollständig recyclingfähig.

3.4 Erarbeitung einer Bewertungsmatrix und Ableitung einer Vorzugsvariante

Auf Grundlage der zuvor durchgeführten verfahrenstechnischen Analyse wurde eine Bewertungsmatrix zur Auswahl des optimalen Fertigungsverfahrens für Leichtbau-Lagerboxsysteme erstellt, diese ist in der Tabelle 11 dargestellt. Ziel war es, eine objektive Entscheidung über das am besten geeignete Verfahren zu treffen, wobei technische Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Designfreiheit, Nachhaltigkeit und Serientauglichkeit berücksichtigt wurden. Für die Bewertung wurde diesmal insbesondere die mechanische Performance der hergestellten Strukturen sowie die Belastbarkeit unter realen Einsatzbedingungen höher gewichtet, da Lagerboxsysteme typischerweise hohen Stoß-, Stapel- und Dauerlasten ausgesetzt sind. Gleichzeitig wurde die Recyclingfähigkeit, die Serientauglichkeit und die Wirtschaftlichkeit bei mittleren bis hohen Stückzahlen stärker berücksichtigt.

Tabelle 11: Bewertungsmatrix

Kriterium	Gewichtung	Kurzfaser-Spritzguss (GF-SG)	Langfaser-Spritzguss (LFT)	Thermoformen (Organoblech)	Hybridverfahren (Organoblech + SG)
Mechanische Performance	30%	6	9	10	10
Gewichtseinsparung	15%	6	8	9	9
Designfreiheit / Funktionsintegration	20%	10	9	5	8
Wirtschaftlichkeit (Invest + Teilekosten)	20%	9	8	6	5
Automatisierbarkeit / Serientauglichkeit	10%	10	9	7	6
Recyclingfähigkeit / Materialkreislauf	5%	8	9	8	9
	Gesamtbewertung	7,6	8,7	7,9	7,3

Die Bewertung zeigt das Langfaser-Spritzgießen (LFT) die beste Gesamtpformance bietet. LFT bietet eine hervorragende Kombination aus:

- hoher Energieaufnahme und Schlagzähigkeit,
- guter struktureller Steifigkeit bei gleichzeitig reduziertem Gewicht,
- sehr guter Prozessstabilität und Automatisierbarkeit,
- vollständiger Recyclingfähigkeit aufgrund thermoplastischer Matrix,
- wirtschaftlicher Fertigung bei mittleren bis großen Serien,
- hoher Designfreiheit durch Spritzgießtypik (Griffe, Clips, Funktionsgeometrien integrierbar).

Insbesondere der robuste Faserverbund mit Fasern von 5–10 mm Länge liefert deutlich bessere mechanische Eigenschaften als kurzfaserverstärkte Systeme, während LFT gleichzeitig kostengünstiger und flexibler ist als Prozesse mit endlosfaserverstärkten Organoblechen.

Damit ergibt sich für das Langfaser-Spritzgießen eine klare technische und wirtschaftliche Vorteilsposition, weshalb es in der Bewertungsmatrix als Vorzugsvariante hervorgeht.

4 Machbarkeitsuntersuchungen zur Materialherstellung

Die Machbarkeitsuntersuchungen zur Materialherstellung dienen dazu, die technische Umsetzbarkeit, Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität der für Leichtbau-Lagerboxsysteme vorgesehenen faserverstärkten thermoplastischen Halbzeuge zu verifizieren. Ziel ist es, mit repräsentativen Plattenhalbzeugen und daraus gefertigten Probekörpern die grundlegenden Herstellprozesse zu qualifizieren, geeignete Fertigungsparameter zu ermitteln und die mechanischen Kenngrößen systematisch zu erfassen. Auf dieser Basis lassen sich fundierte Bewertungen treffen und eine Vorzugsvariante für die Serienfertigung ableiten.

4.1 Herstellung von Probekörpern

Die Herstellung und Prüfung von Probekörpern sind sowohl ein Zeit als auch kostenaufwendiges Unterfangen. Aus diesem Grund wird nachfolgend lediglich ein kleiner Teil der Prüfmöglichkeiten vorgestellt, da dies sonst der Rahmen dieser Technologiestudie übersteigen würde. Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Materialkennwertermittlungen können für eine mögliche FEM-Berechnung als Basis dienen. Somit können diese im weiteren Verlauf für die Auslegung als Grundmaterialien herangezogen werden, mit der Möglichkeit verschiedene funktionelle Bestandteile (z.B. Inserts, Sensordrähte) zu integrieren.

Für die Prüfung der reinen Kunststoffbauteile (als Referenz) sowie für die kurzfaserverstärkten Kunststoffe wurden die Probekörper im Spritzgussverfahren mit einem Mehrzweckwerkzeug, welches in Abbildung 4 dargestellt ist, hergestellt. Das Mehrzweckwerkzeug hat den großen Vorteil, dass mit einem einzigen Guss sowohl die Probekörper für die Zugprüfung als auch die Rechteckstäbe für Biegeprüfung und Schlagzähigkeitsprüfung hergestellt werden können.



Abbildung 4: links: Mehrzweckwerkzeug; rechts: Probekörperspritzguss

Die Geometrien der Prüfproben sind nach den relevanten Normen auszulegen: Für Zugprüfungen werden entsprechend ISO 527-4/5 geeignete Zugproben-Formen verwendet (z. B. rechteckige Querschnittsstreifen oder genormte „dog-bone“-Proben je nach Normangabe und Materialform), für Biegeversuche werden Stäbe mit definierten Breite/Dicke und Prüfspanne vorbereitet (siehe ISO 14125), und für Charpy-Schlagprüfungen werden Charpy-Bars bzw. -Stäbe nach ISO 179 mit gegebenenfalls definierter Kerbe zugeschnitten. Bei allen Probekörpern sind Fertigungseinflüsse, z. B. lokale Delamination, Poren oder Faserbruch, vor Prüfbeginn visuell zu prüfen und zu dokumentieren.

4.2 Mechanische Charakterisierung

Die mechanische Charakterisierung erfolgt entlang eines standardisierten Prüfspektrums, das Zug-, Biege- und Schlagprüfungen umfasst. Prüfbedingungen, Geometrien und Auswerteverfahren sind gemäß den einschlägigen Normen durchzuführen, um vergleichbare und reproduzierbare Materialkennwerte zu erhalten.

Konditionierung

Vor den Prüfungen sind alle Probekörper in einer Standardprüfatmosphäre zu konditionieren (üblich: $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ und $50\% \pm 5\%$ rel. Luftfeuchte. Die Dauer der Konditionierung ist so zu wählen, dass Proben und Materialtemperatur stabil sind.

Zugversuche

Der Zugversuch ist die grundlegendste Methode zur Charakterisierung von mechanischen Eigenschaften eines Materials insbesondere von Metallen, Kunststoffen und Verbundwerkstoffen. Bei diesem experimentellen Verfahren wird eine standardisierte Probekörpergeometrie (Abbildung 5) einer Zugkraft ausgesetzt, wodurch eine gleichmäßige axiale Dehnung des Materials erzeugt wird. Die Zugprobe wird dabei bis zum Bruch des Probekörpers belastet (Ab-

bildung 6). Während des Versuchs werden Parameter wie die Zugfestigkeit, Dehnung, Elastizitätsmodul und Bruchdehnung gemessen, welche wichtige Informationen über das Materialverhalten unter Zugbelastung liefern. Der Zugversuch bietet Einblicke in die Festigkeit, Steifigkeit und Duktilität eines Materials, was für deren Anwendung und die Designmöglichkeiten von großer Bedeutung ist.

Im Weiteren wurden Zugproben für unterschiedliche verstärkten und unverstärkte Kunststoffmaterialien durchgeführt.

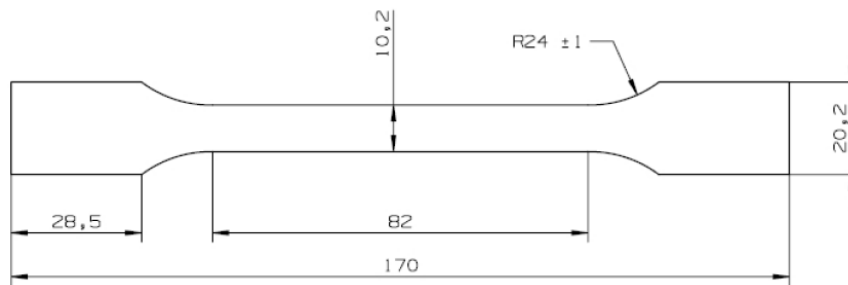


Abbildung 5: Maße für den Normprüfkörper Zug ([14], S. 4)



Abbildung 6: Zugprüfkörper PA6; links: vor der Prüfung; rechts: zerstörte Prüfkörper nach Prüfung

Biegeprüfung

Der Biegeversuch ist neben dem Zugversuch eines der wichtigsten Verfahren zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Materialien. Im Gegensatz zum Zugversuch, der die Materialfestigkeit unter Zugbelastung misst, bewertet der Biegeversuch die Biegefestigkeit und -steifigkeit eines Werkstoffs unter Biegebeanspruchung. Dabei wird eine Probekörpergeometrie (Abbildung 7) einer definierten Biegekraft ausgesetzt, wodurch es zu einer Deformation des Materials kommt. Während des Versuchs werden Parameter wie die maximale Biegespannung, Biegeelastizität, Bruchdehnung und Bruchmodul erfasst, welche wichtige Einblicke in das Verhalten des Materials unter Biegebelastung liefern.



Abbildung 7: Normprüfkörper für Biegeprüfung nach DIN EN ISO 178 ([14], S. 4)

Charpy Schlagzähigkeitsprüfung

Die Charpy-Impact-Prüfung liefert Informationen zur Schlagzähigkeit unter hoher Geschwindigkeit. Getestet werden sowohl unkerbte als auch kerbige Proben (mit vordefinierter Kerbgeometrie), wobei der aufgenommene Energiewert je Fläche als Kennwert angegeben wird. Die Prüfapparatur (Pendelschlagwerk) und die Kerbgeometrie sind gemäß Norm zu wählen; instrumentierte Prüfungen können zusätzlich Kraft-Weg-Kurven liefern und detaillierte Aussagen über Versagensmechanismen erlauben. Wie bei den statischen Prüfungen sind Proben in relevanten Faserorientierungen herzustellen und ausreichend statistisch zu erfassen.

In Tabelle 12 sind die ermittelten Materialkennwerte der Versuche zusammengefasst.

Tabelle 12: Materialkennwerte

	GF	Carbon	Basalt
PP	Zugsteifigkeit 27,5 GPa Zugfestigkeit 492 MPa Bruchdehnung 1,9% Biegesteifigkeit 26,7 GPa Biegefestigkeit 449 MPa Bruchdehnung 3,4% Schlagzähigkeit 123 kJ/m ²	Zugsteifigkeit 97,1 GPa Zugfestigkeit 1140 MPa Bruchdehnung 1,1% Biegesteifigkeit 98,6 GPa Biegefestigkeit 872 MPa Bruchdehnung 0,9%	Zugsteifigkeit 37,4 GPa Zugfestigkeit 667 MPa Bruchdehnung 1,8% Biegesteifigkeit 37,1 GPa Biegefestigkeit 681 MPa Bruchdehnung 2,0% Schlagzähigkeit 154 kJ/m ²
PA6/PA66	Zugsteifigkeit 36,1 GPa Zugfestigkeit 853 MPa Bruchdehnung 2,4% Biegesteifigkeit 31,7 GPa Biegefestigkeit 1137 MPa Bruchdehnung 3,5% Schlagzähigkeit 210 kJ/m ²	Zugsteifigkeit 107,8 GPa Zugfestigkeit 1142 MPa Bruchdehnung 1,0% Biegesteifigkeit 78,1 GPa Biegefestigkeit 1010 MPa Bruchdehnung 1,5% Schlagzähigkeit /	Zugsteifigkeit 41,1 GPa Zugfestigkeit 894 MPa Bruchdehnung 2,3% Biegesteifigkeit 19,6 GPa Biegefestigkeit 590 MPa Bruchdehnung 4,1% Schlagzähigkeit 198 kJ/m ²
PET	Zugsteifigkeit 44,5 GPa Zugfestigkeit 1190 MPa	Zugsteifigkeit 72 GPa Zugfestigkeit 1190 MPa	

4.3 Erarbeitung einer Bewertungsmatrix und Ableitung einer Vorzugsvariante

Nachfolgend ist die Bewertungsmatrix für alle möglichen Materialkombinationen dargestellt. Die Bewertung erfolgt auf einer Skala von 1 (sehr schlecht) bis 5 (sehr gut) unter Berücksich-

tigung der Kriterien Leichtbaupotenzial, Steifigkeit, Festigkeit, Schlagzähigkeit sowie Wirtschaftlichkeit und Verarbeitung. Die Gewichtung der Kriterien ist in der Tabelle berücksichtigt und führt zu einer gewichteten Gesamtbewertung.

Tabelle 13: Bewertungsmatrix

Materialkombination	Leichtbaupotenzial (20 %)	Steifigkeit (25 %)	Festigkeit (15 %)	Schlagzähigkeit (20 %)	Wirtschaft & Verarbeitung (20 %)	Gesamt- bewertung
PP – Glasfaser	5	3	3	4	5	4
PP – Carbon	4	5	5	2	1	3,3
PP – Basalt	4	4	4	5	3	3,85
PA6/PA66 – Glasfaser	3	4	5	5	3	3,95
PA6/PA66 – Carbon	3	5	5	3	1	3,2
PA6/PA66 – Basalt	3	3	3	5	3	3,6
PET – Glasfaser	3	4	5	3	3	3,55
PET – Carbon	3	4	5	2	1	3,05

Auf Grundlage der in der Bewertungsmatrix dargestellten Ergebnisse erfolgt die Ableitung der Vorzugsvariante für den Einsatz in Leichtbaulagerboxsystemen. Ziel der Bewertung war es, eine Materialkombination zu identifizieren, die ein ausgewogenes Verhältnis aus geringem Gewicht, ausreichender mechanischer Leistungsfähigkeit, hoher Robustheit im täglichen Betrieb sowie gute Wirtschaftlichkeit und Verarbeitbarkeit bietet.

Die glasfaserverstärkten Kunststoffe weisen insgesamt die ausgewogensten Eigenschaftsprofile auf. Im Vergleich zu carbon- und basaltfaserverstärkten Varianten erreichen sie eine sehr gute Balance zwischen Steifigkeit, Festigkeit und Schlagzähigkeit bei gleichzeitig deutlich geringeren Material- und Verarbeitungskosten. Carbonfaserverstärkte Kunststoffe erzielen zwar die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte, sind jedoch aufgrund ihrer geringen Schlagzähigkeit, der hohen Kosten sowie der eingeschränkten Recyclingfähigkeit für den vorgesehenen Einsatz in Lagerboxsystemen technisch überdimensioniert und wirtschaftlich nicht sinnvoll. Basaltfaserverstärkte Kunststoffe zeigen gute Ergebnisse insbesondere im Bereich der Schlagzähigkeit, sind jedoch im industriellen Spritzguss noch weniger etabliert und erreichen nicht durchgängig die für formstabile Boxsysteme erforderlichen Steifigkeiten.

Innerhalb der glasfaserverstärkten Materialkombinationen zeigt Polypropylen mit Glasfaserverstärkung die höchste Gesamtbewertung. Ausschlaggebend hierfür ist insbesondere das sehr hohe Leichtbaupotenzial aufgrund der geringen Dichte von Polypropylen, welches für manuell und automatisiert gehandhabte Lagerboxen von zentraler Bedeutung ist. Die erzielte Steifigkeit und Festigkeit sind für die typischen Belastungen durch Stapelung, Befüllung und Transport ausreichend, ohne das Material unnötig zu überdimensionieren. Gleichzeitig weist PP-GF eine gute Schlagzähigkeit auf, die eine hohe Robustheit gegenüber Stoß- und Fallbelastungen im Logistikbetrieb gewährleistet.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil von PP-GF ist die sehr gute Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit. Im Gegensatz zu PA6/PA66 kommt es nicht zu einer nennenswerten Wasseraufnahme, wodurch Maßhaltigkeit und mechanische Eigenschaften über die Einsatzdauer hinweg stabil

bleiben. Zudem ist Polypropylen sehr gut für die wirtschaftliche Großserienfertigung im Spritzguss geeignet und bietet Vorteile hinsichtlich Kosten, Verfügbarkeit und Recyclingfähigkeit. Zusammenfassend ergibt sich Polypropylen mit Glasfaserverstärkung als Vorzugsvariante für Leichtbaulagerboxsysteme. Diese Materialkombination stellt den besten Kompromiss aus Leichtbau, mechanischer Leistungsfähigkeit, Robustheit im praktischen Einsatz sowie wirtschaftlicher und prozesssicherer Herstellung dar und erfüllt damit die Anforderungen des Anwendungsfalls in besonders geeigneter Weise.

5 Ableitung von Konzepten und Konstruktionsvarianten zur Positionierung von Kleinteilen in den Leichtbaulagerboxsystemen

Die effiziente Separation und definierte Positionierung von Kleinteilen stellt eine zentrale Herausforderung in modernen Lager- und Logistiksystemen dar, insbesondere im Kontext modularer Leichtbau-Lagerboxen. Mit zunehmender Automatisierung logistischer Prozesse steigen die Anforderungen an die lagegenaue Bereitstellung von Bauteilen, die Prozesssicherheit bei Transport und Handling sowie die Flexibilität gegenüber wechselnden Produktvarianten. Lagerboxen übernehmen dabei nicht mehr ausschließlich eine passive Transport- oder Aufbewahrungsfunktion, sondern werden zunehmend als funktionale Prozessmodule innerhalb der Wertschöpfungskette verstanden.

Vor diesem Hintergrund bedarf es geeigneter Lösungsansätze, die eine zuverlässige Trennung, Fixierung und Ausrichtung von Kleinteilen ermöglichen und gleichzeitig den Leichtbaugedanken, die Wirtschaftlichkeit sowie die Integrationsfähigkeit in bestehende Logistik- und Automatisierungssysteme berücksichtigen. Im Folgenden werden zentrale konstruktive und systemische Lösungsansätze zur Separation und Positionierung von Kleinteilen vorgestellt und hinsichtlich ihres funktionalen Nutzens und ihrer Einsatzgebiete beschrieben.

Rasterbasierte modulare Trennsysteme

Ein grundlegender Lösungsansatz zur Separation von Kleinteilen basiert auf rasterbasierten modularen Trennsystemen. Hierbei wird der Innenraum der Lagerbox durch Trennsteg oder Trennwände in gleichmäßige oder variabel kombinierbare Fächer unterteilt. Die Rasterstruktur ermöglicht eine flexible Anpassung der Fachgrößen an unterschiedliche Bauteilabmessungen, ohne dass die Lagerbox selbst konstruktiv verändert werden muss.

Dieser Ansatz eignet sich insbesondere für Anwendungen mit hoher Variantenvielfalt und vergleichsweise einfachen Bauteilgeometrien. Durch die modulare Ausführung können Trennelemente schnell ausgetauscht oder neu angeordnet werden, was eine hohe Wiederverwendbarkeit und Anpassungsfähigkeit gewährleistet. Die Positioniergenauigkeit der Bauteile ist jedoch

begrenzt, da die Fixierung überwiegend durch formlose Flächenbegrenzungen erfolgt. Für hochdynamische Transportprozesse oder automatisierte Greifsysteme ist dieser Lösungsansatz daher nur eingeschränkt geeignet.

Formangepasste Nest- und Konturaufnahmen

Ein deutlich höheres Maß an Positioniergenauigkeit wird durch formangepasste Nest- und Konturaufnahmen erreicht. Bei diesem Lösungsansatz werden die Kleinteile in speziell ausgeformte Aufnahmen eingelegt, die die Bauteilgeometrie abbilden und eine definierte Lagefixierung in mehreren Freiheitsgraden sicherstellen. Dadurch wird ein Verrutschen der Bauteile verhindert und eine reproduzierbare Ausgangslage für nachgelagerte Prozesse gewährleistet. Formangepasste Nestlösungen sind besonders geeignet für empfindliche, funktionskritische oder automatisiert zu greifende Bauteile, bei denen eine eindeutige Orientierung erforderlich ist. Sie tragen maßgeblich zur Erhöhung der Prozesssicherheit und zur Reduktion von Ausschuss oder Beschädigungen bei. Der Nachteil dieses Ansatzes liegt in der geringen Flexibilität gegenüber Bauteilvarianten, da die Aufnahmen in der Regel bauteilspezifisch ausgelegt sind. Eine modulare Ausführung der Nestträger kann diesen Nachteil jedoch teilweise kompensieren.

Mehrlagige Etagen- und Zwischenbodensysteme

Zur Steigerung der Raumausnutzung innerhalb einer Lagerbox bietet sich die mehrlagige Separation von Kleinteilen an. Dabei werden Etagen- oder Zwischenbodensysteme eingesetzt, die eine vertikale Gliederung des Innenraums ermöglichen. Auf mehreren Ebenen können unterschiedliche Bauteile oder Varianten getrennt voneinander gelagert und transportiert werden. Dieser Lösungsansatz ist insbesondere für leichte Kleinteile mit geringer Bauhöhe geeignet und erlaubt eine hohe Packdichte bei gleichzeitiger Trennung der Bauteile. Die Herausforderung besteht in der konstruktiven Auslegung der Zwischenlagen, die trotz geringer Materialstärke eine ausreichende Steifigkeit und Tragfähigkeit aufweisen müssen. Zudem ist sicherzustellen, dass die Entnahme der Bauteile sowohl ergonomisch als auch automatisierungsgerecht erfolgen kann.

Variable und adaptive Separationssysteme

Ein weiterer Lösungsansatz adressiert die steigenden Anforderungen an Flexibilität und Variantenvielfalt in modernen Produktions- und Logistiksystemen. Variable und adaptive Separationssysteme basieren auf verstellbaren, verschiebbaren oder austauschbaren Trennelementen, die eine schnelle Anpassung an unterschiedliche Bauteilgeometrien ermöglichen. Die Trennelemente können beispielsweise teleskopisch ausgeführt oder entlang definierter Führungssysteme positioniert werden.

Dieser Ansatz reduziert die Anzahl benötigter Lagerboxvarianten und ermöglicht eine flexible Nutzung der Boxen über verschiedene Produktlebenszyklen hinweg. Gleichzeitig steigen die konstruktiven Anforderungen an die Mechanik und die Dauerhaltbarkeit der beweglichen Elemente. Eine präzise Reproduzierbarkeit der Trennpositionen ist essenziell, um die Eignung für automatisierte Prozesse sicherzustellen.

Hybridlösungen aus Standard- und Individualelementen

Hybridlösungen kombinieren standardisierte Grundstrukturen mit individuell angepassten Separations- oder Positionierungselementen. Die Lagerbox fungiert dabei als einheitliche Schnittstelle, während der Innenraum je nach Anwendung durch spezifische Einsätze konfiguriert wird. Standardisierte Rahmen, Trägerplatten oder Rasterstrukturen werden mit bauteilspezifischen Nest- oder Kontureinsätzen ergänzt.

Dieser Lösungsansatz vereint die Wirtschaftlichkeit standardisierter Systeme mit der Funktionalität individueller Aufnahmen. Gleichzeitig wird eine hohe Systemkompatibilität und Skalierbarkeit erreicht, da nur die anwendungsspezifischen Elemente angepasst werden müssen. Hybridlösungen eignen sich besonders für Serienanwendungen mit moderater Variantenvielfalt und hohen Anforderungen an Prozesssicherheit.

Funktionsintegrierte Separations- und Positionierungssysteme

Über die reine Trennung und Fixierung von Kleinteilen hinaus können Separationssysteme zusätzliche prozessunterstützende Funktionen übernehmen. Dazu zählen beispielsweise die gezielte Ausrichtung der Bauteile für Greifsysteme, die Definition von Entnahmepositionen oder die Integration von Identifikations- und Kodierungselementen. Die Lagerbox wird damit zu einem aktiven Bestandteil des Produktions- oder Logistikprozesses.

Funktionsintegrierte Lösungsansätze ermöglichen eine Reduktion nachgelagerter Prozessschritte und tragen zur Steigerung der Gesamtprozesseffizienz bei. Gleichzeitig erhöht sich die konstruktive Komplexität der Separationslösungen, was eine sorgfältige Abwägung zwischen Funktionsumfang, Kosten und Systemrobustheit erfordert. Insbesondere in hochautomatisierten Umgebungen bieten diese Systeme jedoch ein erhebliches Optimierungspotenzial.

Zusammenfassende Bewertung und Konstruktionsvarianten

Die dargestellten Lösungsansätze zeigen, dass keine universelle Separations- und Positionierungslösung für alle Anwendungsfälle existiert. Vielmehr ist die Auswahl eines geeigneten Ansatzes abhängig von den spezifischen Anforderungen hinsichtlich Bauteilgeometrie, Variantenvielfalt, Automatisierungsgrad und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. In der Praxis haben sich insbesondere modulare und hybride Konzepte bewährt, da sie eine ausgewogene Kombination aus Flexibilität, Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit bieten. Zur Veranschau-

lichung der verschiedenen Lösungsansätze wurden exemplarische Konstruktionsvarianten entwickelt, diese sind in Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Konstruktionsvarianten

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chemische Strukturformel von Polypropylen [11].....	25
Abbildung 2: Herstellungsprozess für Carbonfasern	31
Abbildung 3: Basaltfaser in der typischen Lieferform als Roving (Multifilamentgarn).....	33
Abbildung 4: links: Mehrzweckwerkzeug; rechts: Probekörperspritzguss.....	44
Abbildung 5: Maße für den Normprüfkörper Zug ([14], S. 4)	45
Abbildung 6: Zugprüfkörper PA6; links: vor der Prüfung; rechts: zerstörte Prüfkörper nach Prüfung	45
Abbildung 7: Normprüfkörper für Biegeprüfung nach DIN EN ISO 178 ([14], S. 4).....	46
Abbildung 8: Konstruktionsvarianten	51

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften der Polyamide [8].....	16
Tabelle 2: Eigenschaften von PA6 und PA66 [8]	20
Tabelle 3: Mengenverteilung von Polyamid weltweit im Jahr 2004 [8]	21
Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften von PET-A und PET-C [9]	23
Tabelle 5: Chemische Beständigkeit von PP gegen Klassen von Chemikalien bei Raumtemperatur [10].....	26
Tabelle 6: Matrixmaterialien [12].....	27
Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften verschiedener Glasfasertypen längs zur Faserrichtung ([13], S. 30).....	29
Tabelle 8: Daten verschiedener Carbonfasertypen (PAN-Basis), (Herstellerangaben), ([13], S. 41).....	32
Tabelle 9: Physikalische Eigenschaften der Basaltfaser längs zur Faserrichtung ([13], S. 54)	34
Tabelle 10: Vergleichstabelle.....	37
Tabelle 11: Bewertungsmatrix	42
Tabelle 12: Materialkennwerte.....	46
Tabelle 13: Bewertungsmatrix	47

8 Literaturverzeichnis

- [1] **Klug, F.** (2018). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. Springer Vieweg.
- [2] **Martin, H.** (2014). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Springer Vieweg.
- [3] **ten Hompel, M., & Schmidt, T. (Hrsg.).** (2019). *Technische Logistik – Förder- und Lagerwesen*. Springer Vieweg.
- [4] **Fottner, J., Kern, J., & Kauschinger, B.** (2021). *Autonomous Systems in Intralogistics – State of the Art and Trends*. Technische Universität München.
- [5] **SSI Schäfer.** (2020). *Small parts storage – Miniload / LTB container systems*. Whitepaper.
- [6] **BITO Lagertechnik Bittmann GmbH.** (2020). *Kleinteilelager und Behälterlösungen – Praxisratgeber*.
- [7] **Sydow, A.** (2018). *Dynamische Behälterlogistik – Konzeption eines IT-gestützten Management- und Entscheidungsunterstützungssystems für automobiler Mehrwegbehälterkreisläufe*. Dissertation, TU Clausthal.
- [8] LUMITOS AG, „CHEMIE.DE – Polyamide,“ LUMITOS AG [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Polyamide.html>. [Zugriff am 05 November 2025].
- [9] Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, „Kunststoffe.de – Polyethylenterephthalat (PET),“ Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG [Online]. Available: <https://www.kunststoffe.de/a/grundlagenartikel/polyethylenterephthalat-pet-285552>. [Zugriff am 13 November 2025].
- [10] LUMITOS AG, „CHEMIE.DE – Polypropylen (PP),“ LUMITOS AG [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Polypropylen.html>. [Zugriff am 13 November 2025].
- [11] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, „Polypropylen,“ Wikipedia – Die freie Enzyklopädie [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>. [Zugriff am 13 September 2025].
- [12] <https://www.liros.com/catalog/de/support/technische-infos/#3>
- [13] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [14] Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, „Prüf- und Probekörper Katalog,“ Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH, Leipzig, 2024.