FACHBUCH · AUSGABE 1 · LESEPROBE

Additive Fertigung mit Kunststoffen

Verfahren, Werkstoffe, Konstruktion, Betrieb —
vom ersten Bauteil bis zur ingenieurmäßigen Auslegung

Schicht-Werk · Tulln an der Donau

Struktur wird Funktion. Material. Prozess. System.

Zu diesem Buch

Dieses Werk beschreibt die additive Fertigung mit Kunststoffen in der Breite, in der sie im Alltag eines Fertigungsbetriebs tatsächlich vorkommt: von der ersten eigenen Datei über Werkstoffauswahl und Konstruktion bis zu Auslegung, Qualitätssicherung, Arbeitsschutz und Rechtsrahmen. Es ist gleichzeitig als Schulungsunterlage angelegt — jedes Kapitel beginnt mit Lernzielen und endet mit Kontrollfragen.

Drei Lesestufen

Die Abschnitte sind durchgehend einer von drei Stufen zugeordnet. Wer nur Teile benötigt, liest entlang seiner Stufe und überspringt den Rest, ohne den Faden zu verlieren.

Stufe	Zielgruppe	Was der Abschnitt leistet
Anwender	Einsteiger, Einkauf, Produktentwicklung ohne AM-Erfahrung	Begriffe, Verfahrenswahl, was beauftragbar ist und was nicht
Praktiker	Bediener, Techniker, Werkstatt, Konstruktion	Parameter, Konstruktionsregeln, Fehlerbilder, Nachbearbeitung
Ingenieur	Auslegung, QS, Betriebsleitung, Verantwortliche	Kennwerte und ihre Grenzen, Auslegung, Prüfung, Recht, Arbeitsschutz

Was dieses Buch nicht tut

— Es nennt keine Herstellermodelle als Empfehlung und enthält keine Maschinenwerbung.

— Es gibt keine Kennwerte als zugesicherte Eigenschaften aus. Alle Zahlen sind Richtwerte und ersetzen keine Prüfung am eigenen Bauteil mit dem eigenen Material.

— Es behandelt keine Rüstungs-, Waffen- oder Dual-Use-Luftfahrtanwendungen.

— Es trifft keine medizinischen Aussagen und beschreibt keine Medizinprodukte im Sinne der Verordnung (EU) 2017/745.

Offenlegung

Herausgeber dieses Werks ist Schicht-Werk, ein Betrieb der additiven Fertigung. Der Herausgeber ist damit Marktteilnehmer auf dem beschriebenen Gebiet, und es besteht ein wirtschaftliches Eigeninteresse an der Verbreitung dieses Wissens. Das Werk ist Fachinformation aus dieser Position heraus, keine unabhängige Marktbetrachtung. Verfahren und Werkstoffe werden trotzdem einschließlich ihrer

Nachteile und Grenzen dargestellt; wo eine Aussage strittig oder nicht belegbar ist, wird das genannt.

> HAFTUNG
>
> Schicht-Werk fertigt im Kundenauftrag nach übergebenen Daten. Eignung, Auslegung und Produktverantwortung des gefertigten Teils liegen beim Auftraggeber. Die in diesem Werk genannten Werte sind Richtwerte ohne Zusicherung einer Eigenschaft; eine Haftung für Konstruktions- oder Fertigungsentscheidungen auf Basis dieses Textes ist ausgeschlossen.

Stand, Fassung und Sprache

Ausgabe 1, Leseprobe. Rechtliche Angaben beziehen sich auf die österreichische und europäische Rechtslage. Das vollständige Werk erscheint deutsch; eine englische Fassung ist vorgesehen, sobald der deutsche Text vollständig gesetzt ist.

Inhalt

Sechs Teile, 31 Kapitel, Anhang. Die Leseprobe enthält Kapitel 5 vollständig gesetzt; die übrigen Kapitel sind hier als Gliederung mit Umfangsschätzung ausgewiesen.

Teil A — Grundlagen

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
1	Was additive Fertigung ist und was sie nicht ist	Anwender	12
2	Verfahrensfamilien: FDM, SLA/MSLA, SLS, MJF im Vergleich	Anwender	18
3	Die Prozesskette vom Modell zum Bauteil	Anwender	14
4	Das erste Projekt: Anforderung, Datei, Auftrag	Anwender	10

Teil B — Werkstoffe

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
5	Thermoplaste im FDM: PLA, PETG, ABS/ASA, PA	Praktiker	20
6	Photopolymere im SLA: Klassen, Aushärtung, Alterung	Praktiker	16
7	Faserverstärkte und hochtemperaturfeste Werkstoffe	Ingenieur	14
8	Werkstoffkennwerte und warum sie für Druckteile nicht gelten	Ingenieur	14
9	Alterung: UV, Feuchte, Medien, Temperatur, Kriechen	Ingenieur	12

Teil C — Konstruktion

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
10	Konstruktionsregeln FDM	Praktiker	20
11	Konstruktionsregeln SLA	Praktiker	14
12	Toleranzen, Passungen, Maßhaltigkeit	Praktiker	16
13	Verbindungstechnik, Gewinde, Baugruppen	Praktiker	16
14	Leichtbau, Rippen, Gitterstrukturen, Topologie	Ingenieur	14
15	Auslegung: Anisotropie, Beiwerte, Grenzen der FEM	Ingenieur	18

Teil D — Prozess und Fertigung

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
16	Slicing: jeder Parameter und seine Wirkung	Praktiker	24
17	Druckprofile entwickeln, testen, freigeben	Praktiker	16
18	Maschinenpark, Kalibrierung, Wartung, Ersatzteile	Praktiker	16
19	Nachbearbeitung: mechanisch, chemisch, thermisch, farblich	Praktiker	18
20	Fehlerbildkatalog mit Ursachen und Abhilfen	Praktiker	26
21	Qualitätssicherung, Prüfmittel, Rückverfolgbarkeit	Ingenieur	16

Teil E — Betrieb, Sicherheit, Recht

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
22	Arbeitsschutz: Emissionen, Grenzwerte, Absaugung, PSA	Ingenieur	18
23	Gefahrstoffe im SLA-Betrieb: Harze, Isopropanol, Entsorgung	Ingenieur	14
24	Brand- und Elektrosicherheit im Druckerraum	Ingenieur	10
25	Produktverantwortung, GPSR, CE, Lohnfertigung	Ingenieur	18
26	Urheber- und Lizenzrecht bei 3D-Daten	Anwender	12
27	Energie, Abfall, Rezyklate, Ökobilanz	Ingenieur	12

Teil F — Anwendung und Vertiefung

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
28	Kalkulation, Angebot, Nachkalkulation	Praktiker	14
29	Kleinserie, Vorrichtungsbau, Ersatzteilfertigung	Praktiker	14
30	Reverse Engineering, Scannen, Datenaufbereitung	Ingenieur	12
31	Fallbeispiele über alle Stufen	alle	16

Anhang

Nr.	Kapitel	Stufe	S.
A	Glossar Deutsch–Englisch	alle	14
B	Formelzeichen und Einheiten	Ingenieur	4
C	Checklisten zum Kopieren	alle	10
D	Kontrollfragen mit Lösungen	alle	16
E	Normen und Rechtsquellen mit Fundstelle	Ingenieur	8

Geschätzter Gesamtumfang Textteil: rund 536 Seiten, zuzüglich Titelei, Register und Abbildungen.

05

KAPITEL · TEIL B — WERKSTOFFE

Thermoplaste im FDM

Die Werkstoffwahl entscheidet über mehr als die Farbe des Teils: über Formstabilität in der Sonne, über Bruchverhalten bei Schlag, über Maßhaltigkeit, über Kosten und über die Frage, ob im Betrieb abgesaugt werden muss. Dieses Kapitel ordnet die vier Standardwerkstoffe ein, erklärt Compounds und Trocknung und zeigt, warum ein Datenblatt für ein gedrucktes Bauteil nur eingeschränkt gilt.

LERNZIELE

Sie können für eine gegebene Anforderung einen geeigneten Standardwerkstoff begründet auswählen.

Sie kennen die typischen Ausschlusskriterien: Wärme, UV, Schlag, Medienkontakt, Maßhaltigkeit.

Sie wissen, warum faserverstärkte Compounds nicht pauschal die bessere Wahl sind.

Sie können erklären, warum Zugfestigkeiten aus Datenblättern nicht in die Auslegung eines Druckteils übernommen werden dürfen.

5.1 Die Auswahl beginnt bei der Anforderung

ANWENDER

Der häufigste Fehler in der Werkstoffwahl ist die Frage „welches Material ist das beste“. Sie ist nicht beantwortbar. Beantwortbar ist: Welcher Temperatur ist das Teil ausgesetzt? Steht es dauerhaft in der Sonne? Wird es schlagartig belastet oder ruhig? Muss es maßhaltig bleiben oder darf es sich einige Zehntel bewegen? Kommt es mit Ölen, Reinigern oder Lösemitteln in Kontakt? Wer diese fünf Fragen beantwortet, hat die Werkstoffwahl in fast allen Alltagsfällen bereits getroffen.

Erst danach folgen die weichen Kriterien: Oberfläche, Farbe, Preis, Druckbarkeit. Sie entscheiden zwischen zwei zulässigen Werkstoffen, nie über die Zulässigkeit selbst.

5.2 Die vier Standardwerkstoffe

ANWENDER / PRAKTIKER

Über neunzig Prozent aller Alltagsteile lassen sich mit vier Werkstofffamilien abdecken. Die folgende Übersicht ordnet sie nach dem, was in der Praxis zuerst gefragt wird.

Werkstoff	Stärken	Grenzen	Typischer Einsatz
PLA	einfachster Druck, hohe Formtreue, gute Detailwiedergabe, geruchsarm	wird bereits bei mäßiger Wärme weich, spröde bei Schlag, nicht für Außeneinsatz	Anschauungsmodelle, Vorrichtungen im Innenraum, Gehäuse ohne Wärmelast
PETG	zäher als PLA, gute Chemikalienbeständigkeit, geringe Neigung zum Verzug	neigt zu Fäden, kratzempfindlich, begrenzte Wärmeformbeständigkeit	Halterungen, Behälter, Schutzabdeckungen, feuchte Umgebung
ABS / ASA	wärmeformbeständiger, schlagzäh, gut nachbearbeitbar; ASA zusätzlich UV-stabil	deutlicher Verzug bei großen Flächen, Emissionen beim Druck, beheizter Bauraum nötig	Außenteile, Fahrzeugumfeld, Gehäuse mit Wärmelast
PA (Polyamid)	sehr zäh, abriebfest, gute Gleiteigenschaften, hohe Dauerfestigkeit	stark hygroskopisch, maßlich empfindlich gegen Feuchte, anspruchsvoll im Druck	Zahnräder, Gleitlager, Klemmen, dauerbelastete Funktionsteile

Tabelle 5.1 — Einordnung der Standardwerkstoffe. Die Reihenfolge entspricht steigendem Anspruch an Anlage und Bediener.

> PRAXISREGEL
>
> Ein Bauteil, das im Sommer hinter einer Fensterscheibe oder in einem parkenden Fahrzeug liegt, ist mit PLA falsch ausgeführt. Diese Temperaturen erreichen den Bereich, in dem PLA erweicht — das Teil verformt sich ohne äußere Last.

5.3 Faserverstärkte Compounds

PRAKTIKER / INGENIEUR

Kohlenstoff- oder glasfaserverstärkte Compounds erhöhen Steifigkeit und Formstabilität deutlich und verringern den Verzug. Sie sind deshalb dort sinnvoll, wo ein Bauteil steif bleiben muss. Sie sind aber kein pauschales Upgrade, und drei Nebenwirkungen werden regelmäßig übersehen.

— **Sprödigkeit.** Die Steifigkeit steigt, die Schlagzähigkeit sinkt. Ein Teil, das federn oder einen Schlag aufnehmen soll, wird durch Fasern schlechter, nicht besser.

— **Werkzeugverschleiß.** Fasern sind abrasiv. Ohne gehärtete Düse ist der Düsendurchmesser nach wenigen Kilogramm messbar aufgeweitet — mit unmittelbarer Wirkung auf Maßhaltigkeit und Wandstärke.

— **Schichthaftung.** Fasern verstärken innerhalb der Lage. Zwischen den Lagen tragen sie nichts bei; die Richtungsabhängigkeit der Festigkeit wird dadurch ausgeprägter, nicht geringer.

5.4 Feuchte und Trocknung

PRAKTIKER

Mehrere der genannten Werkstoffe nehmen Feuchtigkeit aus der Luft auf. Beim Aufschmelzen verdampft diese schlagartig und reißt den Strang auf: Die Oberfläche wird rau und porös, die Schichthaftung sinkt, in schweren Fällen wird das Teil unbrauchbar. Bei Polyamid ist der Effekt am stärksten ausgeprägt; hier verändert die Feuchteaufnahme zusätzlich die Maße des fertigen Teils.

Praktisch heißt das: hygroskopische Werkstoffe vor dem Druck trocknen und während des Drucks trocken halten. Eine Trockenbox mit direkter Zuführung zum Extruder ist bei Polyamid keine Komfortmaßnahme, sondern Voraussetzung für reproduzierbare Ergebnisse.

5.5 Warum Datenblattwerte nicht für Druckteile gelten

INGENIEUR

Kennwerte in Werkstoffdatenblättern werden an genormten Probekörpern ermittelt, die in der Regel spritzgegossen sind — also isotrop, porenfrei und mit definierter Molekülorientierung. Ein gedrucktes Bauteil ist keines davon. Es besteht aus aneinandergefügten Strängen mit Grenzflächen, enthält prozessbedingte Hohlräume und ist in Aufbaurichtung deutlich schwächer als in der Lagenebene.

Die Folge für die Auslegung ist eindeutig: Ein Datenblattwert taugt zum Vergleich zweier Werkstoffe untereinander, nicht als Eingangsgröße für eine Festigkeitsrechnung am Druckteil. Wer rechnen muss, braucht Kennwerte aus Proben, die mit demselben Material, derselben Anlage, demselben Profil und derselben Orientierung gefertigt wurden wie das spätere Bauteil. Alles andere ist eine Schätzung mit unbekanntem Vorzeichen.

> KONSEQUENZ FÜR DIE PRAXIS
>
> Sicherheitsrelevante Bauteile werden nicht auf Basis von Datenblattwerten ausgelegt. Entweder es liegen eigene, prozessnah ermittelte Kennwerte vor, oder das Bauteil wird geprüft statt gerechnet — oder es wird nicht additiv gefertigt.

5.6 Entscheidungsweg in vier Schritten

ANWENDER / PRAKTIKER

— **Wärme prüfen.** Liegt die höchste zu erwartende Einsatztemperatur nahe an oder über dem Erweichungsbereich, entfällt PLA sofort.

— **Außeneinsatz prüfen.** Dauerhafte Sonneneinstrahlung führt zu UV-stabilen Werkstoffen; ASA ist hier der übliche Weg.

— **Lastart prüfen.** Schlagartige Last führt zu zähen Werkstoffen wie PETG, ABS oder PA; ruhende Last erlaubt steifere, sprödere Werkstoffe.

— **Medien prüfen.** Kontakt mit Lösemitteln, Kraftstoffen oder Reinigern erfordert eine Beständigkeitsprüfung am konkreten Werkstoff, nicht am Werkstofftyp.

5.7 Arbeitsschutz in Kurzform

INGENIEUR

Beim Schmelzen von Thermoplasten entstehen flüchtige Verbindungen und ultrafeine Partikel. Menge und Zusammensetzung hängen stark vom Werkstoff und von der Verarbeitungstemperatur ab. Für den Betrieb mehrerer Anlagen in einem Raum ist ein eingehauster Bauraum mit Abluftführung oder Filterung der praktikable Standard. Die Grenzwerte und die vollständige Betrachtung für Betriebe stehen in Kapitel 22, die Gefahrstoffbetrachtung für den SLA-Betrieb in Kapitel 23.

5.8 Zusammenfassung

— Die Anforderung bestimmt den Werkstoff, nicht umgekehrt.

— PLA ist der einfachste Werkstoff und zugleich der mit der engsten Einsatzgrenze.

— Fasern erhöhen Steifigkeit und senken Zähigkeit; sie verschärfen die Richtungsabhängigkeit.

— Hygroskopische Werkstoffe brauchen Trocknung als Prozessschritt, nicht als Option.

— Datenblattwerte vergleichen Werkstoffe, sie legen keine Druckteile aus.

5.9 Kontrollfragen

1. Ein Halter soll im Sommer an der Windschutzscheibe eines Fahrzeugs sitzen. Welche zwei Anforderungen schließen welche Werkstoffe aus?
2. Warum verbessert eine Faserverstärkung die Festigkeit in Aufbaurichtung nicht?
3. Ein Polyamidteil ist nach vier Wochen Lagerung nicht mehr maßhaltig. Nennen Sie die wahrscheinlichste Ursache und eine Gegenmaßnahme.
4. Ein Datenblatt weist eine Zugfestigkeit von 50 MPa aus. Welche drei Gründe sprechen dagegen, diesen Wert in eine Auslegung zu übernehmen?
5. Nennen Sie zwei Fälle, in denen PETG gegenüber ABS die sachlich richtige Wahl ist.

Lösungen im Anhang D.

Produktionsplan

Das Werk entsteht teilweise, nicht am Stück. Jede Lieferung enthält einen abgeschlossenen Teil als gesetztes PDF und als Quelltext, damit Korrekturen ohne Neusatz möglich sind.

Lieferung	Inhalt	Umfang
L1	Diese Leseprobe: Struktur, Didaktik, Layout, Musterkapitel	ca. 12 Seiten
L2	Teil A vollständig — Grundlagen	ca. 54 Seiten
L3	Teil B vollständig — Werkstoffe	ca. 76 Seiten
L4	Teil C vollständig — Konstruktion	ca. 98 Seiten
L5	Teil D vollständig — Prozess und Fertigung	ca. 116 Seiten
L6	Teil E vollständig — Betrieb, Sicherheit, Recht	ca. 84 Seiten
L7	Teil F und Anhang, Register, Gesamtsatz	ca. 108 Seiten

Offene Punkte vor L2

— Abbildungen: Der Text ist bisher abbildungsfrei geschrieben. Für Verfahrensschemata, Fehlerbilder und Konstruktionsregeln braucht es entweder eigene Fotos aus dem Betrieb oder gezeichnete Schemata. Fremdbilder und Stockmaterial sind ausgeschlossen.

— Normen und Rechtsquellen: In Anhang E kommen nur Quellen mit geprüfter Fundstelle. Der Rechtsteil in Teil E braucht vor der Auslieferung eine fachliche Durchsicht.

— Zielformat: A4 als Schulungsunterlage, oder zusätzlich ein Satz im Buchformat für Druck und Bindung.