

EIN LEITFADEN FÜR

ÖKODESIGN MIT ADDITIVER FERTIGUNG

Interreg



Co-funded by
the European Union

Slovenia – Austria

ADDCIRCLES



DANKSAGUNGEN

Dieser Leitfaden wurde durch die Zusammenarbeit, Forschung und Unterstützung mehrerer wichtiger europäischer Initiativen ermöglicht, die sich der Förderung von Nachhaltigkeit und fortschrittlichen Fertigungspraktiken verschrieben haben.

Wir möchten insbesondere die grundlegende Arbeit, die Daten und die Expertise der Partner des ADDCIRCLES-Projekts würdigen.

PROJEKTLÄUFE: 1. 11. 2023 – 31. 10. 2026

FÖRDERUNG: Interreg Slovenia - Österreich

PARTNER:

Faculty of Polymer Technology, Slovenia (coordinator)

FH Kärnten, Österreich

TECOS, Tool and Die Development Center, Slovenia

WoodKPlus, Österreich

Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Slovenia

“GPS-Kärnten” Gemeinnütziges Personalservice Kärnten GmbH, Österreich

Das ADDCIRCLES-Projekt, das vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (ERDF) im Rahmen des Interreg-Programms Slowenien-Österreich finanziert wurde, lieferte wesentliche Einblicke in den aktuellen Stand und das zukünftige Potenzial der Additiven Fertigung (AF) in der gesamten Region. Sein Fokus auf die Kartierung von Kompetenzen und die Förderung eines kooperativen Umfelds für den Technologietransfer war maßgeblich für die Gestaltung der technischen Richtlinien in dieser Publikation.

Das Projekt lieferte auch entscheidende Informationen zur Integration von Kreislaufwirtschaftsprinzipien in die AF. Die Verpflichtung des Projekts zur Entwicklung von Komponenten und Produkten, die für die Kreislaufwirtschaft optimiert sind, beeinflusste direkt die hier vorgestellten Prinzipien des Ökodesigns und des Lebenszyklusdenkens.

Wir sprechen allen Partnern, Forschern und beitragenden Organisationen unseren aufrichtigen Dank für ihr Engagement für nachhaltige Innovation aus.

Weitere Informationen und Details zum Projekt finden Sie hier: www.ammmap.eu

ZWECK DES LEITFADENS 6

Die entscheidende Rolle der Additiven Fertigung (AF) bei der Ermöglichung der notwendigen Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft.

**ÖKODESIGN UND LEBENSZYKLUSDENKEN:
EIN KURZER ÜBERBLICK 8**

Definition der Ecodesign-Prinzipien und Vorstellung der Phasen des Produktlebenszyklus für einen ganzheitlichen Ansatz zur Nachhaltigkeit.

**WIE MAN LEBENSZYKLUSDENKEN MIT
ADDITIVER FERTIGUNG ANWENDET 14**

Praktische Schritte zur Integration des Lebenszyklusdenkens in den AF-Designprozess zur Optimierung der Ressourceneffizienz und Minimierung der Umweltauswirkungen in jeder Phase.

**RICHTLINIEN ZUR OPTIMIERUNG VON
AF-TECHNOLOGIE, MATERIAL UND PROZESS28**

Richtlinien zur Bewertung der Materialeignung, zur Beurteilung der Umweltleistung und zur Nutzung nachhaltiger Materialströme für die AF.

**ZU VERMEIDENDE FALLSTRICKE UND
MISSVERSTÄNDNISSE 44**

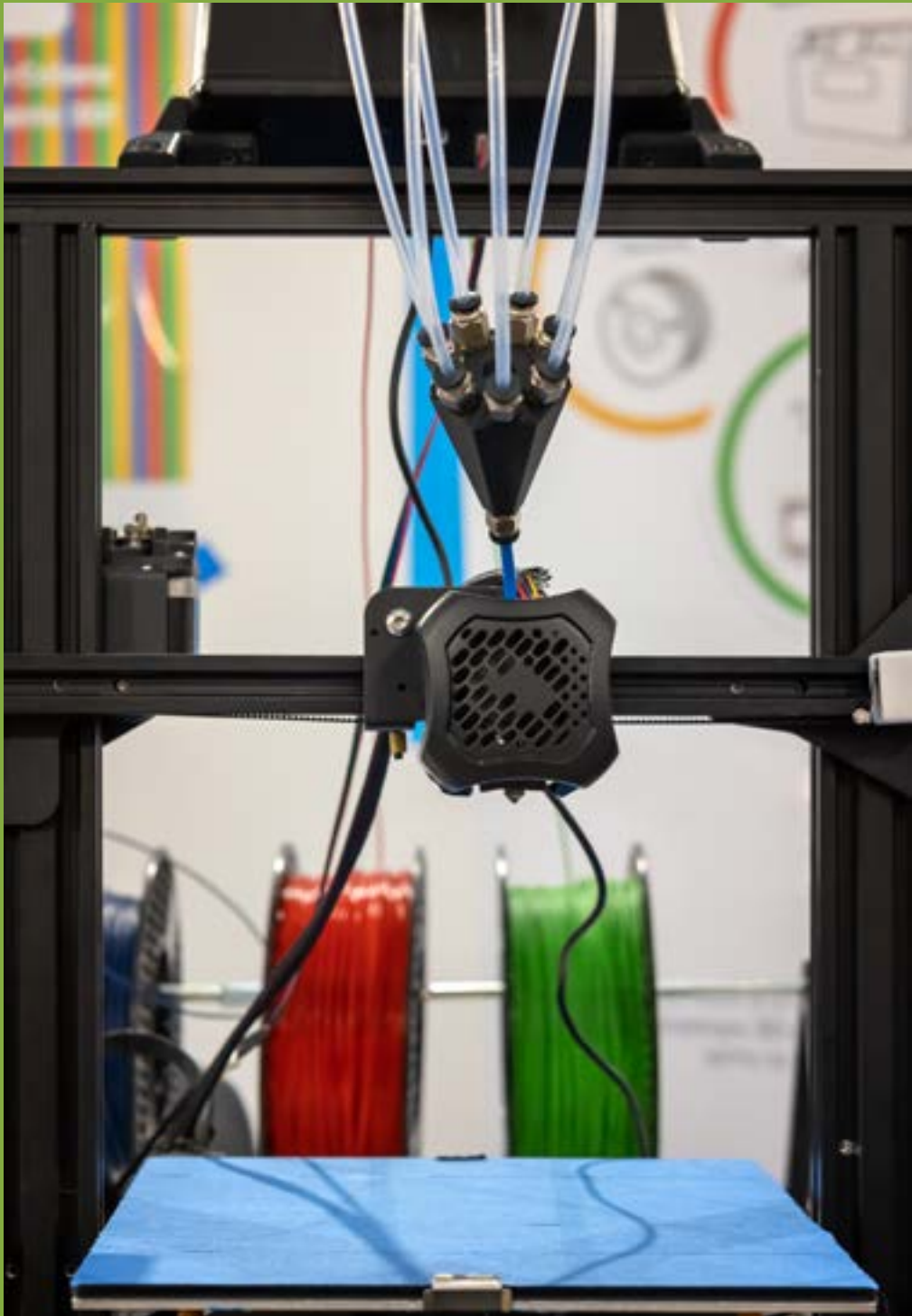
Bewältigung gängiger Herausforderungen, wie Mythen über den Energieverbrauch und Über-Design, um wirklich nachhaltige Ergebnisse zu gewährleisten.

FALLSTUDIEN 48

Praxisbeispiele, die die erfolgreiche Anwendung von Ecodesign und AF für greifbare ökologische und ökonomische Vorteile aufzeigen.

01

www.ammmap.eu



Zweck des Leitfadens

01

ZWECK DES LEITFADENS

Dieser kurze und praktische Leitfaden richtet sich an Unternehmen, die Additive Fertigung (AF) als eine Möglichkeit betrachten, Design, Herstellung und Produktlebenszyklus zu gestalten, und zwar:

- **effizient:** Der Prozess nutzt Methoden, Ansätze und Technologien, die am besten zum jeweiligen Geschäftsfall passen, und
- **ökologisch nachhaltig:** Ressourcenverbrauch, Energieeinsatz und Abfallerzeugung werden entlang des gesamten Lebenszyklus minimiert.

Die AF kann innovative Produktionssysteme und Geschäftsmodelle ermöglichen, die sowohl technische Vorteile (wie die Fähigkeit, komplexe Geometrien und Teile zu drucken, die bei viel geringerem Materialeinsatz die gleichen strukturellen Eigenschaften bieten) als auch nicht-technische Vorteile (wie die Ermöglichung kundenspezifischer und dezentralisierter Print-on-Demand-Geschäftsmodelle, die logistischen Aufwand vermeiden) mit sich bringen. Die AF schränkt auch das Produktdesign weniger ein, was Designern einen größeren kreativen Freiraum für die Entwicklung innovativer Lösungen gibt.

Der Zweck dieses Leitfadens ist es, umsetzbare Richtlinien und Prinzipien für die Anwendung von Ökodesign mit AF sowie Fallstricke und gängige Missverständnisse aufzuzeigen, die beim Aufbau nachhaltiger Geschäftsmodelle vermieden werden sollten. Wir verfolgen einen ganzheitlichen Ansatz, der sowohl den technischen Standpunkt (wie Materialien und Technologien) als auch den Lebenszyklus-Standpunkt (wie man regenerative Systeme und Geschäftsmodelle mit AF aufbaut) abdeckt.

02

www.ammmap.eu



Ökodesign und
Lebenszyklusdenken:
Ein kurzer Überblick

02

ÖKODESIGN UND LEBENSZYKLUSDENKEN: EIN KURZER ÜBERBLICK

Da die Folgen des Fußabdrucks der globalen Wirtschaft auf die natürliche Umwelt von Jahr zu Jahr besorgniserregender werden, liegt es in der Verantwortung aller Unternehmen, Umweltaspekte in den Kern ihrer Produktentwicklung und Entscheidungsfindung zu integrieren.

80 % der Umweltauswirkungen eines Produkts werden durch Entscheidungen in der Designphase beeinflusst [1]. Alles, von der Wahl der Materialien und Produktionsmethoden bis hin zur Reparierbarkeit und der erwarteten Lebensdauer, wird entweder durch die Produktgestaltung bestimmt oder zumindest stark eingeschränkt. Genau hier kommt das Ökodesign ins Spiel.

Der zentrale Denkweise-Wechsel im Ökodesign ist das Lebenszyklusdenken (Lifecycle Thinking). Es bedeutet, ein Produkt nicht als isoliertes Objekt zu betrachten, sondern als Teil eines größeren Systems von Material- und Energieflüssen. In vielen Fällen trägt die eigentliche Produktion nur einen geringen Teil zu den gesamten Umweltauswirkungen eines Produkts bei – der Großteil entsteht während der Nutzung oder in anderen Phasen des Lebenszyklus, die außerhalb der Kontrolle des Herstellers liegen.



Ökodesign ist die Integration von Umweltaspekten in den Produktentwicklungsprozess durch das Ausbalancieren ökologischer und ökonomischer Anforderungen. Ökodesign berücksichtigt Umweltaspekte in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses und strebt Produkte an, die über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg die geringstmögliche Umweltbelastung verursachen.

Glossar der Europäischen Umweltagentur
(EEA)

Deshalb ist es sinnlos, über Nachhaltigkeit auf Produktebene zu sprechen – wir müssen den gesamten Lebenszyklus und die Schlüssel-Systeme, mit denen das Produkt interagiert, betrachten.

Dies ermutigt Designer dazu, über die Funktionalität und das Nutzererlebnis für alle Interessengruppen nachzudenken, die während des Lebenszyklus mit dem Produkt interagieren – nicht nur den Nutzer, sondern zum Beispiel auch diejenigen, die

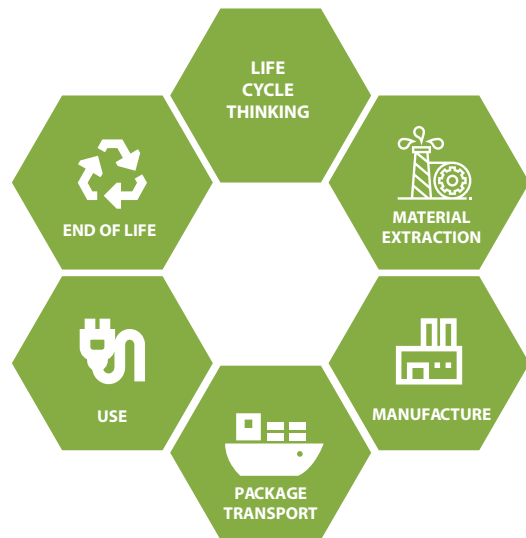
Reparaturen durchführen, oder jene, die das Produkt am Ende seiner Lebensdauer zur Wiederverwertung von Materialien oder Komponenten zerlegen.

Beispiel

Das Ausmaß, in dem ein Produkt oder die involvierten Ressourcen recycelt werden, hängt von Designüberlegungen ab, die den gesamten Lebenszyklus im Blick haben – die Verwendung recycelbarer Materialien reicht beispielsweise nicht aus, wenn das Produkt so konzipiert ist, dass es keine effiziente Trennung und Verarbeitung von Materialien oder Komponenten ermöglicht, und wenn die beabsichtigte Nutzung des Produkts keine angemessene Abfallsammlung berücksichtigt.

EIN TYPISCHER PRODUKTLEBENSZYKLUS UMFASST:

- Materialgewinnung und -verarbeitung
- Herstellung
- Vertrieb
- Nutzungsphase (Betrieb, Wartung, Reparaturen...)
- Ende des Lebenszyklus (End-of-life) (Wiederverwendung, Recycling, Entsorgung...)



Durch die Identifizierung von Hotspots in diesen Phasen können Designer fundierte Entscheidungen treffen, die die Gesamtbelastung reduzieren. Wer einen solch ganzheitlichen Ansatz für Nachhaltigkeit nicht anwendet, riskiert, in die Falle der Lastenverschiebung (Burden-shifting) zu tappen – ein Problem wird „gelöst“, indem es außerhalb des eigenen Zuständigkeitsbereichs verlagert wird.

Beispiele für Misserfolge durch Lastenverschiebung:

Reduzierung der Treibhausgasemissionen durch die Verwendung eines anderen Materials, das sich jedoch als toxischer erweist.

Umstellung auf ein dienstleistungsbasiertes Modell, bei dem weniger Material benötigt wird, aber der Energieverbrauch letztendlich eine größere Auswirkung hat.

Verbesserung des Fußabdrucks von Produkten, die von vornherein völlig unnötig sind.

Das wissenschaftliche Instrument, das im Zentrum des Lebenszyklusdenkens steht, ist die Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment, LCA). Es handelt sich um einen komplexen, datenorientierten Prozess, bei dem das zu betrachtende System definiert, die Zuflüsse (Inputs), Abflüsse (Outputs), Emissionen und Abfallströme in jedem Schritt des Lebenszyklus erfasst und der kumulative Fußabdruck entlang einer Reihe von Umweltwirkungskategorien berechnet wird. Um Transparenz zu gewährleisten, folgt die LCA einem standardisierten Rahmenwerk, das durch ISO 14040:2006 und ISO 14044:2006 geregelt wird.

Die Durchführung einer vollständigen LCA erfordert Erfahrung und sollte von auf diesem Gebiet spezialisierten Experten vorgenommen werden. Die Prinzipien und die Logik hinter der LCA können jedoch sehr gut von Produktdesignern

und Managern genutzt werden, um ihren Entwicklungsprozess zu leiten und zu beurteilen, an welchem Punkt und zu welchem Zweck sie in eine vollständige LCA investieren sollten.



Was sagt die EU zum Thema Ökodesign?

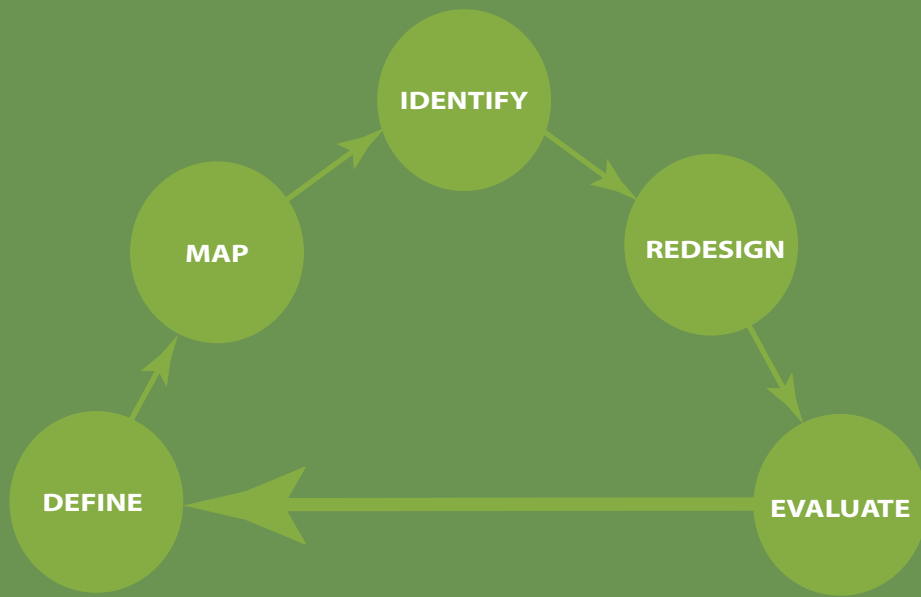
Die Verordnung über die umweltgerechte Gestaltung nachhaltiger Produkte (Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR) [2] trat am 18. Juli 2024 in der EU in Kraft. Die ESPR ermöglicht die Festlegung von Leistungs- und Informationsvorschriften – bekannt als „Ökodesign-Anforderungen“ – für nahezu alle Kategorien von physischen Gütern, einschließlich:

- Verbesserung der Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Aufrüstbarkeit und Reparierbarkeit von Produkten
- Verbesserung der Möglichkeiten zur Wartung und Überholung von Produkten
- Gestaltung von Produkten, die energie- und ressourceneffizienter sind
- Berücksichtigung des Vorhandenseins von Substanzen, die die Zirkularität behindern
- Erhöhung des Recyclinganteils
- Erleichterung der Wiederaufbereitung (Remanufacturing) und des Recyclings von Produkten
- Festlegung von Regeln für den Kohlenstoff- und ökologischen Fußabdruck
- Begrenzung der Abfallerzeugung
- Verbesserung der Verfügbarkeit von Informationen zur Produktnachhaltigkeit

Im Laufe der nächsten Jahre werden regulatorische Maßnahmen für Produktgruppen in vorrangigen Bereichen umgesetzt. Die ESPR wird alle Mitglieder der Wertschöpfungsketten von Unternehmen, die in der EU tätig sind, betreffen.

03

www.ammmap.eu



Wie man Lebenszyklus-
denken mit Additiver Fer-
tigung anwendet

03

WIE MAN LEBENSZYKLUS- DENKEN MIT ADDITIVER FER- TIGUNG ANWENDET

Schritt 1: Definieren

Beginnen Sie mit der Definition von drei Dingen:

1. ZIELE:

Warum durchlaufen Sie diesen Prozess und was sind Ihre erwarteten Ergebnisse? Entwickeln Sie ein neues Produkt oder möchten Sie den Fußabdruck eines bestehenden Produkts verbessern? Falls Sie Nachhaltigkeits- und/oder Business-KPIs haben, wie lauten diese? Antworten auf diese Art von Fragen werden Sie durch Ihren Prozess leiten und Ihnen helfen, den Umfang der betrachteten Auswirkungen festzulegen (siehe Punkt 3 unten).

2. FUNKTIONALE EINHEIT:

Eine Einheit ermöglicht es, verschiedene Möglichkeiten und deren Auswirkungen zu vergleichen und diese Auswirkungen in einen Kontext zu stellen. Aus der Sicht des Lebenszyklus ist es sehr wichtig, die Einheit basierend auf der Funktion, die das Produkt erfüllen soll, und nicht auf dem Produkt selbst zu wählen. Zum Beispiel: Bei der Untersuchung des Lebenszyklus eines Autos könnte die Einheit eine Person, transportiert über einen Kilometer, sein. Nur auf

diese Weise können wir die Gesamtauswirkungen verschiedener Autos oder verschiedener Transportmittel vergleichen und Nutzungsmuster einbeziehen (die meisten Autos sind für 5 Personen gebaut, befördern aber im Durchschnitt nur 1,3 Personen [3]).

Merken Sie sich:

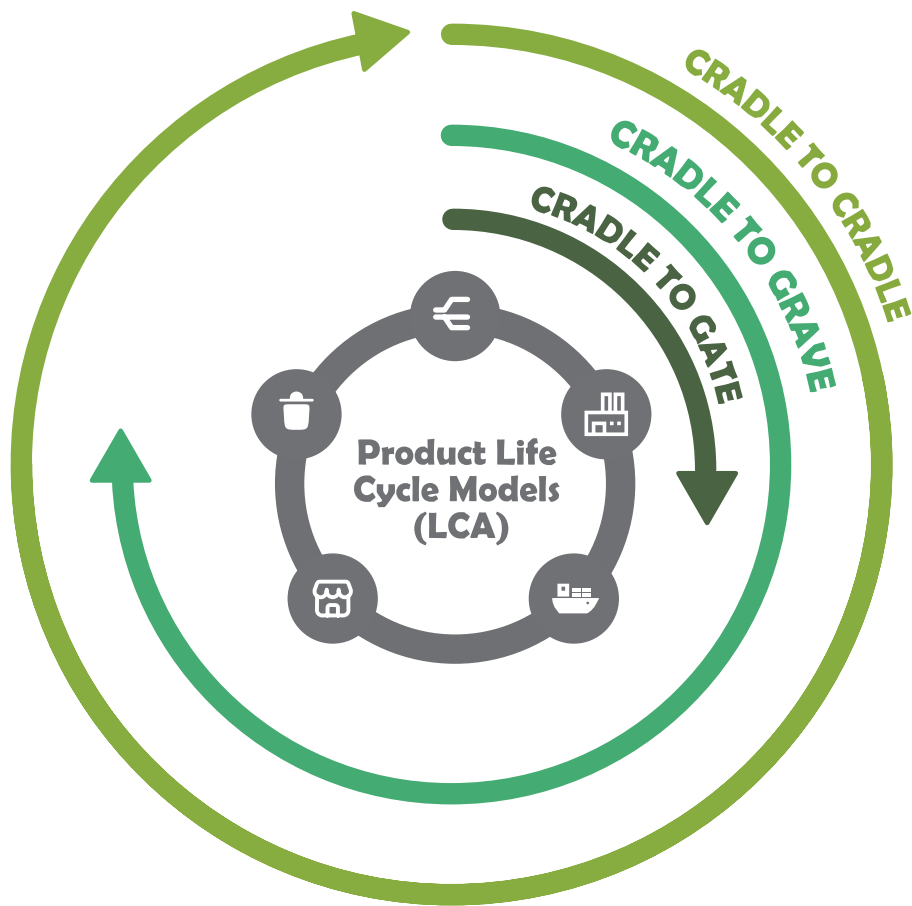
Der Sinn des Ökodesigns besteht darin, die gewünschte Funktion mit dem geringstmöglichen Umweltschaden zu erreichen. Deshalb müssen wir die Auswirkungen pro funktionaler Einheit, nicht pro Produkt, abschätzen. Es könnte sich beispielsweise herausstellen, dass dieselbe Funktion mit einem radikal anderen Produkt erreicht werden kann – oder indem die Notwendigkeit eines physischen Produkts gänzlich eliminiert wird.

3. UMFANG UND SYSTEMGRENZEN:

Definieren Sie klar, welche Prozesse und Teile des Lebenszyklus Sie berücksichtigen und welche nicht. Wenn Sie beispielsweise ein völlig neues Produkt entwerfen, möchten Sie Ihre Grenze möglicherweise auf alle Prozesse im Lebenszyklus ausweiten, um Klarheit über den breiteren Umfang der Auswirkungen zu gewinnen. Wenn Sie hingegen den Fußabdruck eines bestehenden Produkts verbessern möchten, ohne seine Funktionalität drastisch zu verändern, können Sie sich auf die Produktion beschränken.

Anmerkung

Gängige (aber nicht alle) Kategorien des Umfangs, die bei Lebenszyklusanalysen (LCA) verwendet werden, sind Cradle to Gate (von der Wiege bis zum Werkstor – Berücksichtigung der Auswirkungen bis zu dem Punkt, an dem ein Produkt das Werk verlässt), Cradle to Grave (von der Wiege bis zur Bahre – vollständiger Lebenszyklus, einschließlich der Entsorgung) und Cradle to Cradle (von der Wiege zur Wiege – vollständiger Lebenszyklus, aber anstelle der Entsorgung werden die Materialien oder Komponenten wieder in den Kreislauf zurückgeführt).



Schritt 2: Kartieren

Erstellen Sie eine Lebenszyklus-Karte für das Produkt und identifizieren Sie dabei:

- Eingangsmaterialien und deren Herkunft
- Energiequellen und -verbrauch bei AF-Prozessen
- Logistik und Verpackung
- Nutzungsbedingungen (Wartung, Energieverbrauch)
- Entsorgungswege (End-of-Life-Pfade)

Der folgende Rahmen [4] kann Ihnen einen strukturierten Satz von leitenden Fragen für die Kartierung des Lebenszyklus liefern.

DIE ÖKODESIGN-CHECKLISTE

Bedarfsanalyse

Wie erfüllt das Produktsystem tatsächlich gesellschaftliche Bedürfnisse?

- Welche Haupt- und Hilfsfunktionen hat das Produkt?
- Erfüllt das Produkt diese Funktionen effektiv und effizient?
- Welche Nutzerbedürfnisse erfüllt das Produkt derzeit?
- Können die Produktfunktionen erweitert oder verbessert werden, um die Bedürfnisse der Nutzer besser zu erfüllen?
- Wird sich dieses Bedürfnis im Laufe der Zeit ändern?
- Können wir dies durch (radikale) Produktinnovation antizipieren?

Ecodesign-Strategie: Entwicklung neuer Konzepte

- Dematerialisierung
- Gemeinsame Nutzung des Produkts
- Integration von Funktionen
- Funktionale Optimierung des Produkts (Komponenten)

Phase 1 des Lebenszyklus: Produktion und Bereitstellung von Materialien und Komponenten

Was für Probleme entstehen bei der Produktion und Bereitstellung von Materialien und Komponenten?

- Wie viel und welche Arten von Kunststoff und Gummi werden verwendet? Wie viel und welche Arten von Zusatzstoffen (Additiven) werden verwendet? Wie viel und welche Arten von Metallen werden verwendet? Wie viel und welche anderen Arten von Materialien (Glas, Keramik usw.) werden verwendet?
- Wie viel und welche Art von Oberflächenbehandlung wird angewendet?
- Wie ist das Umweltprofil der Komponenten?
- Wie viel Energie ist für den Transport der Materialien erforderlich?

Ecodesign-Strategie: Auswahl umweltverträglicher Materialien

- Saubere Materialien
- Erneuerbare Materialien
- Materialien mit geringem Energiegehalt
- Recycelte Materialien
- Recyclbare Materialien

Ecodesign-Strategie: Reduzierung des Materialeinsatzes

- Gewichtsreduzierung
- Reduzierung des (Transport-)Volumens

Phase 2 des Lebenszyklus: Hauseigene Produktion

Welche Probleme können im Produktionsprozess im eigenen Unternehmen entstehen?

- Wie viele und welche Arten von Produktionsprozessen werden angewendet? (einschließlich Verbindungen, Oberflächenbehandlungen, Bedruckung und Etikettierung)
- Wie viel und welche Arten von Hilfsstoffen werden benötigt?
- Wie hoch ist der Energieverbrauch?
- Wie viel Abfall wird erzeugt?
- Wie viele Produkte entsprechen nicht den erforderlichen Qualitätsnormen?

Ecodesign-Strategie: Optimierung der Produktionstechniken

- Alternative Produktionstechniken
- Weniger Produktionsschritte
- Niedriger/sauberer Energieverbrauch
- Weniger Produktionsabfall
- Wenige/saubere Produktionshilfsmittel

Phase 3 des Lebenszyklus: Distribution

Welche Probleme können bei der Distribution des Produkts an den Kunden entstehen?

- Welche Arten von Transportverpackungen, Großverpackungen und Einzelhandelsverpackungen werden verwendet (Volumen, Gewichte, Materialien, Wiederverwendbarkeit)?
- Welche Transportmittel werden genutzt?
- Ist der Transport effizient organisiert?

Ecodesign-Strategie: Reduzierung des Materialeinsatzes

- Gewichtsreduzierung
- Reduzierung des (Transport-)Volumens

Ecodesign-Strategie: Optimierung des Distributionssystems

- Weniger/saubere/wiederverwendbare Verpackung
- Energieeffizienter Transport

Phase 4 des Lebenszyklus: Nutzung

Welche Probleme entstehen bei der Nutzung, Bedienung, Wartung und Reparatur des Produkts?

- Wie viel und welche Art von Energie wird benötigt, direkt oder indirekt?
- Wie viel und welche Art von Verbrauchsmaterialien werden benötigt?
- Wie hoch ist die technische Lebensdauer?
- Wie viel Wartung und Reparaturen sind erforderlich?
- Welche und wie viele Hilfsstoffe und Energie sind für Betrieb, Wartung und Reparatur erforderlich?
- Kann das Produkt von einem Laien zerlegt werden?
- Sind die Teile, die häufig ausgetauscht werden müssen, abnehmbar?
- Wie hoch ist die ästhetische Lebensdauer des Produkts?

Ecodesign-Strategie: Reduzierung der Auswirkungen in der Nutzungsphase

- Geringer Energieverbrauch
- Saubere Energiequelle
- Wenige Verbrauchsmaterialien
- Saubere Verbrauchsmaterialien
- Keine Verschwendung von Energie oder Verbrauchsmaterialien

Ecodesign-Strategie: Optimierung der anfänglichen Lebensdauer

- Zuverlässigkeit und Langlebigkeit
- Einfache Wartung und Reparatur
- Modulare Produktstruktur
- Klassisches Design
- Starke Produkt-Nutzer-Beziehung

Phase 5 des Lebenszyklus: Rückgewinnung und Entsorgung

Welche Probleme können bei der Rückgewinnung und Entsorgung des Produkts entstehen?

- Wie wird das Produkt derzeit entsorgt?
- Werden Komponenten oder Materialien wiederverwendet? Welche Komponenten könnten wiederverwendet werden?
- Können die Komponenten ohne Beschädigung demontiert werden?
- Welche Materialien sind recycelbar? Sind sie identifizierbar? Können sie schnell abgenommen werden?
- Werden inkompatible Tinten, Oberflächenbehandlungen oder Aufkleber verwendet?
- Sind gefährliche Komponenten leicht abnehmbar?

Ecodesign-Strategie: Optimierung des End-of-Life-Systems

- Wiederverwendung des Produkts (Komponenten)
- Wiederaufbereitung/Aufarbeitung (Remanufacturing/Refurbishing)
- Recycling von Materialien
- Sichere Verbrennung

Schritt 3: Identifizieren

Identifizieren Sie Hotspots, bei denen die größten Auswirkungen auftreten. Gängige Hotspots und Engpässe in der AF umfassen:

- Materialherstellung und -vorbereitung (z. B. energieintensive Produktion von Metallpulvern wie Titan oder Aluminium)
- Energieverbrauch während des Drucks (insbesondere bei Hochtemperatur- oder Hochleistungsprozessen wie Lasersintern oder Schmelzen)
- Nachbearbeitung (Post-processing)
- Entsorgung am Ende des Lebenszyklus bei Verbund- oder Multimaterialteilen

An dieser Stelle sollten Sie je nach Ihrem Fall einen der folgenden Ansätze in Betracht ziehen:

a) Eine LCA-Studie durchführen

Vorteile:

- Die Erkenntnisse sind detailliert, zuverlässig und basieren auf wissenschaftlichen Daten.
- Standardisierter Ansatz – Ergebnisse können auch für die Kommunikation verwendet werden.
- In einigen Fällen, wie z. B. bei einer Partnerschaft mit einem Großunternehmen, das Nachhaltigkeitsdaten melden muss, oder bei öffentlichen Ausschreibungen, ist sie erforderlich oder bringt eine höhere Bewertung.

Nachteile:

- Erfordert die Beauftragung eines externen Experten.

b) Eines der Online-Tools verwenden

Erkunden Sie Tools wie SimaPro, Ecochain oder Sphera. Für schnelle und grobe Schätzungen können Sie sogar ein kostenloses Tool wie den [GHG Emissions Calculator](#) (CO₂-Emissionsrechner) verwenden, den wir im Interreg SI-AT ADDCIRCLES-Projekt entwickelt haben.

Vorteile:

- Kann intern durchgeführt werden.
- Einige Tools bieten eine relativ gute Annäherung an eine vollständige LCA-Studie.

Nachteile:

- Es gibt eine Lernkurve.
- Angemessen gute Tools erfordern Lizenzen oder Abonnements.

c) Nach offensichtlichen „ schnell realisierbare Verbesserungen“ suchen

Oft können Sie offensichtliche Verbesserungsbereiche auch ohne eine detaillierte quantitative Bewertung finden. Dinge wie die Reduzierung oder Vermeidung von Einwegprodukten und Verpackungen, die Verlängerung der Produktlebensdauer oder ein modulares Design, das die Wiederverwendung und das Recycling von Komponenten ermöglicht, sind Beispiele für solche Bereiche. Sie müssen jedoch vorsichtig sein in Bezug auf die Falle der Lastenverschiebung (siehe Kapitel 2). Es ist immer am besten, Ihre Annahmen anhand solider Daten zu überprüfen.

Vorteile:

- Kann ohne externe Experten oder Software durchgeführt werden.
- Keine Notwendigkeit für detaillierte Datenerfassung.
- Potenzial, das Team in Brainstorming und agile Entwicklungsprozesse einzubeziehen.

Nachteile:

- Anfällig für falsche Annahmen und die Falle der Lastenverschiebung.
- Sie benötigen zumindest ein solides Verständnis von Nachhaltigkeit, um dies richtig durchführen zu können.
- Ein qualitativer Ansatz kann dazu führen, dass Sie fälschlicherweise viel Aufwand in marginale Verbesserungen stecken, während die Hauptauswirkungen an anderer Stelle liegen.

Schritt 4: Neugestalten

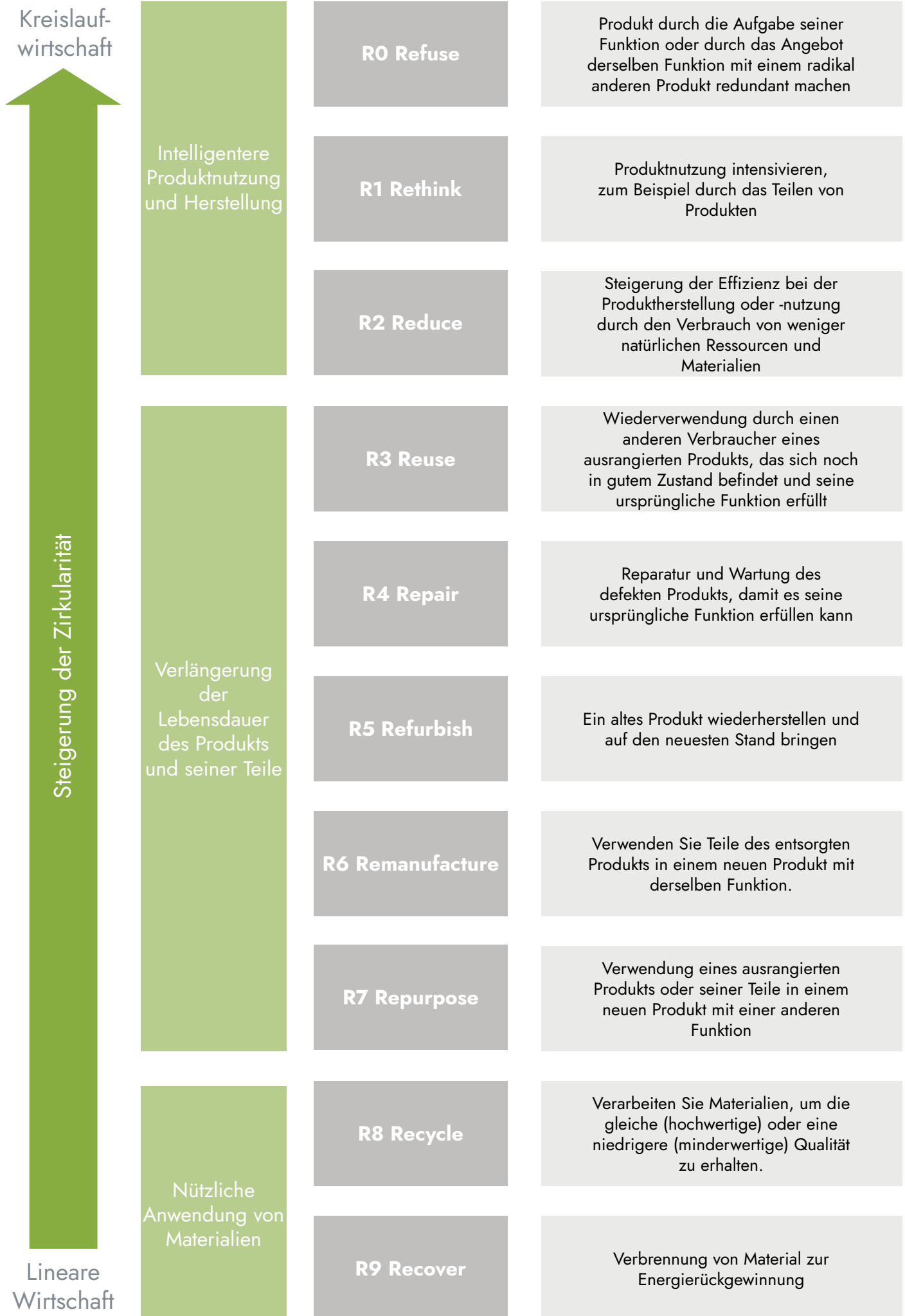
Nachdem Sie die Hotspots identifiziert haben, gestalten Sie Ihr Produkt oder Geschäftsmodell neu, indem Sie diese in den Fokus rücken.

Um das Design und die Strategie rund um die ökologischen Auswirkungen zu leiten, ist der 9R-Rahmen der Kreislaufwirtschaft [5] äußerst nützlich. Er stellt eine Liste von neun Strategien dar, die von jenen mit hoher Material- und Energiewerterhaltung oben bis zu jenen mit niedriger Werterhaltung unten hierarchisch geordnet sind. Bei Überlegungen zu Design, Produktion und Geschäftsmodell-Setup sollten wir oben beginnen und die Strategien mit hohem Wert umsetzen, bevor wir zu den niedrigeren übergehen.

Beispiel:

Was bedeutet es, Produkte und Materialien mit dem höchstmöglichen Wert in den Kreislauf zurückzuführen?

Das Recycling eines Toasters beinhaltet das Zerlegen in Komponenten, die Zerstörung dieser Komponenten zur Materialgewinnung und die Verarbeitung der gewonnenen Materialien, um sie für die nächste Verwendung geeignet zu machen. Dieser Prozess verschwendet die in die Herstellung des Produkts geflossene Energie, erfordert viel zusätzliche Energie, Ausrüstung und Chemikalien und führt zu Materialverschwendung. Dies macht das Recycling häufig sowohl ökonomisch als auch ökologisch unrentabel. Wenn wir hingegen das Produkt mit seinem höchsten Wert in den Kreislauf zurückführen – z. B. indem wir die beschädigte Komponente austauschen oder bestehende Komponenten in einem neuen Produkt wiederverwenden – vermeiden wir einen Großteil dieses Aufwands. Die AF kann mit ihrer Fähigkeit zur kundenspezifischen, lokalen Fertigung in kleinen Mengen solche Prozesse erleichtern – z. B. indem ein neues Teil gedruckt wird, um das beschädigte zu ersetzen.



BEISPIELE FÜR 9R-STRATEGIEN, ANGEWANDT AUF (ODER MIT) AF:

R0 Refuse (Verweigern):

Digitale Bereitstellung anstelle physischer Produkte (z. B. können 3D-Modelle anstelle der physischen Lagerung und des Versands von Ersatzteilen an Kunden gesendet und lokal gedruckt werden).

R1 Rethink (Überdenken):

Gemeinsame oder On-Demand AF-Produktionszentren, die einen gemeinsamen Zugang zur Produktionskapazität für kundenspezifische Teile bieten.

R2 Reduce (Reduzieren):

- Topologie- und Bauausrichtungsoptimierung, zelluläre/Gitter-Designs – die gleiche Produktfunktionalität und strukturelle Eigenschaften mit weniger Material bieten.
- Minimierung der Druckzeit.
- Maximierung der Packungsdichte und Konsolidierung von Teilen in einem Druck.
- Maximierung der Lebensdauer eines Produkts durch Simulation typischer Nutzungsmuster und Optimierung des Designs für maximale Haltbarkeit.

R3 Reuse (Wiederverwenden):

- Gemeinsame Repositorien von 3D-Modellen, in denen sie wiederverwendet und angepasst werden können, ohne dass neue von Grund auf erstellt werden müssen.
- Gestaltung des Nutzererlebnisses und Marketings auf eine Weise, die zur Wiederverwendung anregt.
- Aktivierung von Gebrauchtmärkten für Ihre Produktkategorie.

R4 Repair (Reparieren):

- Einsatz von AF zum lokalen Drucken von Ersatzteilen für die Produktreparatur.
- Design von Produkten, das eine einfache Reparatur und den Austausch von Komponenten ermöglicht – z. B. modulares Design für einfachen Komponentenaustausch.

R5 Refurbish (Aufarbeiten/Renovieren):

Neugestaltung und Drucken eines neuen Gehäuses, um ein funktionsfähiges Produkt mit einem abgenutzten Gehäuse wiederherzustellen.

R6 Remanufacture (Wiederaufbereiten):

Verwendung funktionsfähiger gebrauchter/ausrangierter Komponenten alter Produkte in einem neuen Produkt und Drucken der fehlenden Teile.

R7 Repurpose (Umwidmen):

Gestaltung von Komponenten, sodass sie in mehreren Produkten/Funktionen verwendet werden können.

R8 Recycle (Recyclen):

- Pulver- oder Filament-Wiederaufbereitung in geschlossenen Kreislaufsystemen.
- Auswahl von Rohstoffen, die recycelbar oder aus erneuerbaren Quellen stammen.
- Design für Demontage oder Mono-Materialität, um ein einfaches und effizientes Recycling zu ermöglichen.
- Verwendung von digitalen Wasserzeichen oder QR-Codes zur Identifizierung von AF-Materialien.

R9 Recover (Wiederherstellen/Energetische Verwertung):

Nutzung von AF-Abfällen zur Energierückgewinnung, wenn Recycling nicht möglich ist.

Weitere detaillierte Richtlinien zur Technologie- und Prozessoptimierung finden Sie im nächsten Kapitel.

Schritt 5: Evaluieren und Iterieren

Ökodesign (wie jedes Design) ist iterativ – nachdem Sie Lösungen und Verbesserungen entwickelt haben, evaluieren Sie die Lebenszyklusauswirkungen Ihrer Lösungen neu, um zu sehen, wie sich die Verbesserungen in einem Hotspot auf den Rest des Lebenszyklus auswirken. Sie könnten feststellen, dass eine Verbesserung in einem Teil des Lebenszyklus zu einer schlechteren Auswirkung in einem anderen Teil oder in einer anderen Wirkungskategorie führt (z. B. geringerer Materialverbrauch auf Kosten eines höheren Energieverbrauchs oder niedrigere CO₂-Emissionen auf Kosten einer höheren Toxizität). Wiederholen Sie diesen Vorgang, bis Sie eine Gesamtverbesserung erreicht haben.





*Die größte Bedrohung
für unseren Planeten ist
der Glaube, dass jemand
anderes ihn retten wird.*

Robert Swan



Richtlinien zur Optimierung von AF-Technologie, Material und Prozess

04

RICHTLINIEN ZUR OPTIMIERUNG VON AF-TECHNOLOGIE, MATERIAL UND PROZESS

Die Additive Fertigung (AF) bietet erhebliche Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltleistung durch Leichtbau, Materialeffizienz, reduzierte Werkzeugbestände und lokale Produktion. Ihre Vorteile hängen jedoch von der korrekten Auswahl von Technologie und Material, Energiemanagement, Prozessoptimierung und den Ökodesign-Prinzipien ab, die in den frühesten Phasen der Produktentwicklung angewendet werden. Die Richtlinien in diesem Kapitel werden Ihnen dabei helfen, folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Die beste AF-Technologie und das beste Material für Umwelt- und Leistungsanforderungen auszuwählen.
- Nachhaltigkeits-Zielkonflikte (Trade-offs) bei AF-Prozessen zu verstehen.
- Design for Additive Manufacturing (DfAM) anzuwenden, um sowohl die Funktion als auch den ökologischen Fußabdruck zu verbessern.
- AF-Prozesse für einen geringeren Energieverbrauch, Materialabfall und eine geringere gesamte Umweltbelastung zu optimieren.

Auswahl der richtigen AF-Technologie für Nachhaltigkeit und Leistung

Die Wahl einer geeigneten Technologie ist eine der folgenreichsten Ökodesign-Entscheidungen in der AF. Die Technologien unterscheiden sich stark in Bezug auf Energieintensität, Materialeffizienz, Oberflächengüte, Festigkeit und Nachbearbeitungsbedarf – all diese Faktoren beeinflussen die Umwelleistung. In diesem Abschnitt werden wir uns die Vor- und Nachteile der wichtigsten AF-Technologien ansehen.

Material Extrusion (FDM/FFF)

Bei der Materialextrusion wird das Ausgangsmaterial (typischerweise ein thermoplastisches Polymerfilament) durch eine beheizte Düse gedrückt, wo es schmilzt. Die gedruckten Teile werden durch schichtweises Abscheiden des geschmolzenen Materials aufgebaut.

Vorteile:

- Relativ geringer Energieverbrauch (kann durch die Installation einer geschlossenen Kammer oder die Isolierung des Heizbetts zur Reduzierung der Wärmeableitung weiter gesenkt werden) und geringer Materialabfall.
- Verarbeitung von gut recycelbaren thermoplastischen Polymeren.
- Verfügbarkeit von recycelten und biobasierten Polymeren.

Nachteile:

- Schlechte Oberflächengüte (Teile erfordern möglicherweise eine Nachbearbeitung).
- Hohe Anisotropie der Teile aufgrund schwacher Zwischenschichten (verringerte Haltbarkeit).
- Notwendigkeit von Stützstrukturen (Abscheidung von zusätzlichem Material).



Typische Einsatzbereiche:

- Prototypen,
- Vorrichtungen,
- einfache funktionale Komponenten.

Vat Photopolymerization (SLA/DLP/LCD)

Diese Technologie verwendet ein Photopolymerharz, das unter Einwirkung von UV-Licht aushärtet. Ein UV-Laser wird verwendet, um das Photopolymer schichtweise selektiv auszuhärten.

Vorteile:

- Typischerweise der geringste Energieverbrauch für die Verarbeitung.
- Sehr hohe Genauigkeit und glatte Oberfläche minimale maschinelle Bearbeitung und Nachbearbeitung.
- Gut geeignet für konsolidierte Teile und Hohlstrukturen.

Nachteile:

- Photopolymerisierbare Harze können toxisch sein.
- Duroplaste (Thermosets) weisen eine schlechte Recyclingfähigkeit auf (werden typischerweise verbrannt oder gemahlen und als Füllstoff verwendet).
- Teile sind typischerweise zerbrechlich (begrenzt die mechanische Haltbarkeit).

Typische Einsatzbereiche:

- Hochdetaillierte visuelle Modelle,
- Formen,
- Mikrofluidik,
- medizinische/zahnmedizinische Formen.

Abbildung: Formlabs



Powder Bed Fusion (SLS für Polymere / LPBF für Metalle)

Bei der Pulverbettfusion wird ein Pulver (Metall oder Polymer) selektiv geschmolzen oder gesintert (Schicht für Schicht) unter Verwendung einer fokussierten Wärmequelle wie einem Laser oder einem Elektronenstrahl.

Vorteile:

- Keine dedizierten Stützstrukturen ermöglichen Materialeinsparungen.
- Hochleistungsteile ermöglichen eine lange Lebensdauer.
- Wiederverwendung von Polymerpulver möglich (überprüfen Sie die empfohlenen Auffrischungsraten (Refresh Rates), um Materialeffizienz und Qualität auszugleichen; wählen Sie, wenn möglich, das Material, das niedrige Auffrischungsraten zulässt).
- Effizient für leichte, hochfeste Teile.

Nachteile:

- Hoher Prozessenergiebedarf – typischerweise der höchste Energieverbrauch während der Verarbeitung unter den AF-Technologien (optimieren Sie die Packungsdichte, um den Energieverbrauch pro Teil und das überschüssige Pulver zu minimieren).
- Begrenzte Materialoptionen, die verarbeitet werden können.
- Für Metalle ist Inertgas erforderlich.
- Hohes Ausschussrisiko (Scrap Risk), wenn thermische Probleme auftreten.



Typische Einsatzbereiche:

- Luft- und Raumfahrt,
- medizinische Implantate,
- funktionale Polymerteile.

Abbildung: Beamer

Directed Energy Deposition (DED / LMD)

Das Ausgangsmaterial (Pulver oder Draht) wird durch einen Elektronenstrahl oder einen Laser geschmolzen. Die Düse und die Energiequelle sind zusammen an einem Mehrachs-Roboterarm montiert, wodurch die Materialabscheidung der gewünschten Geometrie folgen kann. Diese Methode ermöglicht eine effiziente Materialzugabe zu bestehenden Modellen, was sie für Reparaturen nützlich macht.

Vorteile:

- Ideal für Reparaturen – große Verlängerung der Lebensdauer von Komponenten.
- Hohe Auftragungsraten – gute Energie-Volumen-Effizienz.
- Geeignet für große Teile, die mit der Pulverbettfusion (PBF) nicht bearbeitet werden können.

Nachteile:

- Raue Oberfläche bedeutet, dass eine maschinelle Bearbeitung erforderlich ist.
- Hoher Energieverbrauch pro Teil.
- Eingeschränkte geometrische Freiheit.

Typische Einsatzbereiche:

- Reparatur/Wiederaufbereitung,
- große Metallstrukturen,
- Hybridfertigung.

Abbildung: Trumpf



Binder Jetting

Diese Technologie funktioniert, indem eine dünne Schicht Pulver auf die Bauplattform aufgetragen, ein flüssiges Bindemittel in dem gewünschten Muster aufgesprüht und der Bauprozess Schicht für Schicht wiederholt wird. Der Hauptvorteil des Binder Jetting ist die Möglichkeit, dem flüssigen Bindemittel Farbe hinzuzufügen, was den Mehrfarbendruck ermöglicht.

Vorteile:

- Schnellster AF-Prozess.
- Geringer Energieverbrauch – es ist weder Erhitzen noch Schmelzen involviert.
- Mehrfarbendruck (Multicolor printing).
- Pulver sind hochgradig wiederverwendbar.

Nachteile:

- Erfordert Nachbearbeitung (Aushärten oder Sintern), die energieintensiv sein kann.
- Schrumpfung während des Sinterns kann zu Ausschuss (Scrap) führen.
- Nicht für alle Geometrien oder große massive Abschnitte geeignet.
- Die Vermischung von Ausgangsmaterial und Bindemittel erschwert das Recycling gedruckter Teile.

Typische Einsatzbereiche:

- Metall-Serienproduktion,
- Sandformen,
- Keramik.

Abbildung: ExOne



Material Jetting (PolyJet / Multijet)

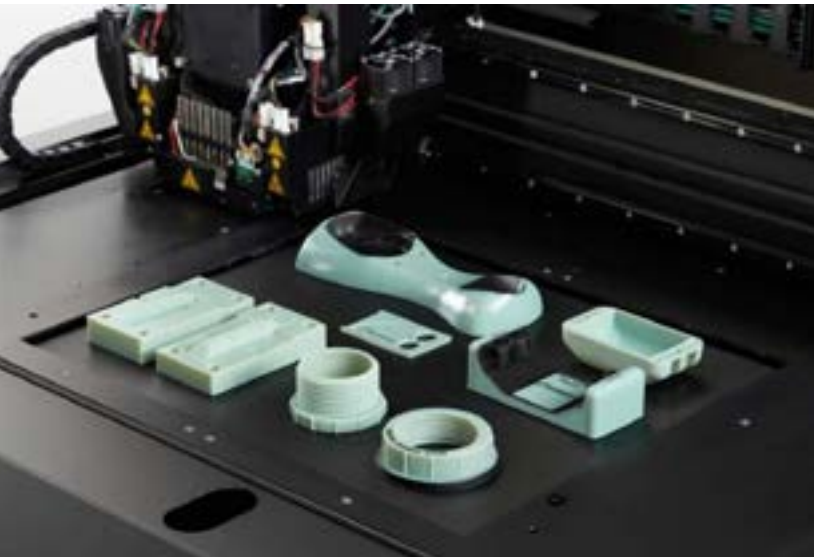
Beim Material Jetting werden Tröpfchen eines flüssigen, lichtempfindlichen Materials aufgesprüht und durch UV-Licht ausgehärtet. Das Teil wird durch schichtweises Abscheiden und Aushärten des Materials aufgebaut.

Vorteile:

- Hohe Genauigkeit, Präzision und glatte Oberfläche - minimale maschinelle Bearbeitung und Nachbearbeitung, reduzierter Ausschuss.
- Multi-Material- und Farbfähigkeit, die eine Teilkonsolidierung ermöglicht.

Nachteile:

- Photopolymermaterialien haben eine schlechte Recyclingfähigkeit.
- Stützmaterialien erfordern oft eine chemische Entsorgung.
- Harzkartuschen und Aushärtung erhöhen die Umweltbelastung und die Toxizitätsprobleme.
- Multi-Material-Drucke können das End-of-Life-Recycling behindern.



Typische Einsatzbereiche:

- High-End-Prototypen,
- medizinische Modelle,
- mikrofluidische Geräte,
- Multi-Material-Funktionstests,
- visuelle/ergonomische Bewertung.

Abbildung: Danish Technologic Institute

Sheet Lamination (LOM, UAM)

Bei der Laminatschichfertigung (Sheet Lamination) oder Laminated Object Manufacturing (LOM) werden 2D-Muster aus dünnen Materialblechen oder -folien geschnitten und die Schichten dann miteinander verbunden, um das 3D-Objekt zu erzeugen.

Vorteile:

- Geringer Abfall – ungenutztes Plattenmaterial kann oft wiederverwendet werden.
- Niedriger Energieverbrauch.
- Schnelle Baugeschwindigkeiten und große Bauvolumina.
- Ungiftige Materialien (Papier) verfügbar.

Nachteile:

- Begrenzte mechanische Leistung.
- Teile werden typischerweise nur für Prototypen oder visuelle Modelle verwendet.
- Abfallfolien sind manchmal mit Klebstoffen beschichtet, was ihr Recycling erschwert.

Typische Einsatzbereiche:

- Architekturmodelle,
- visuelle Prototypen,
- große Modelle

Abbildung: MCor Technologies



Probieren Sie das AM CO2-Emissionsbewertungstool aus!

Allgemeine Richtlinien können nur bis zu einem gewissen Grad helfen – viel hängt vom spezifischen Fall ab. Aus diesem Grund haben wir ein kostenloses Online-Tool entwickelt, um die CO₂-Emissionen und den Energieverbrauch für die gängigsten Polymer-AM-Technologien und -Materialien zu bewerten. Das Tool kann Ihnen helfen, die Emissionen auf der Grundlage einiger grundlegender Eigenschaften und Druckparameter abzuschätzen. Probieren Sie es hier aus: www.ammmap.eu/emissions-calculator.

Materialauswahl

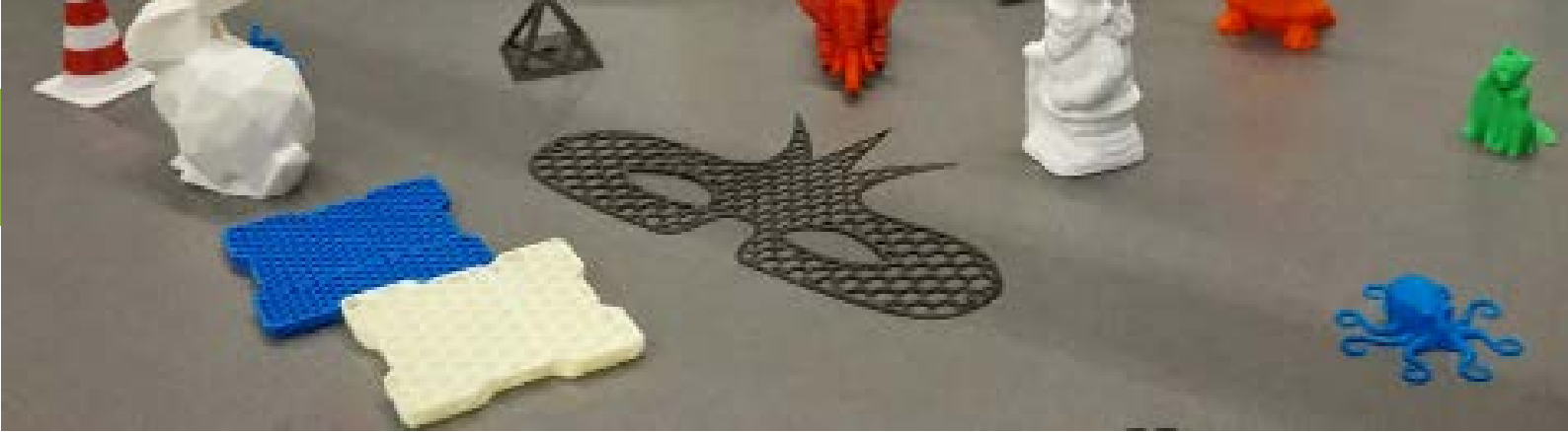
Es gibt eine Vielzahl von Materialien mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften und ökologischen Fußabdrücken. Die Wahl eines Materials ist immer mit Zielkonflikten (Trade-offs) verbunden, und es gibt selten nur eine beste Option. Dieser Abschnitt bietet einige Leitlinien, um fundierte Entscheidungen zu treffen und die Zielkonflikte zu bewerten.

Materialien evaluieren, die mit Ihren Anforderungen kompatibel sind

Definieren Sie basierend auf der beabsichtigten Verwendung des Produkts die gewünschten Materialeigenschaften. Dies ist auch aus Sicht des Lebenszyklus wichtig – wenn Sie ein Material mit einem geringeren eingebetteten Umwelteinfluss, aber unzureichenden Eigenschaften (wie z. B. Festigkeit) wählen, wird das Produkt wahrscheinlich viel früher verschwendet oder weist während der Nutzung eine schlechtere Umweltleistung auf. Dies kann zu einem schlechteren Gesamtlebenszykluseinfluss führen. Umgekehrt kann die Wahl eines Materials mit schlechterem eingebettetem Einfluss manchmal zu einem geringeren Gesamtlebenszykluseinfluss führen (z. B. könnte ein leichtes Material mit etwas höherer eingebetteter Energie den Energiebedarf während der Nutzung senken, was zu einer Nettoverbesserung führt). Denken Sie an Eigenschaften wie:

- Erforderliche mechanische Leistung (Festigkeit, Steifigkeit, Ermüdung).
- Umweltbedingungen (Hitze, UV, Chemikalien, Feuchtigkeit).
- Erforderliche Maßtoleranz und Oberflächengüte.
- Erwartete Lebensdauer und Haltbarkeit.
- Sicherheits-, Regulierungs- und Zertifizierungsanforderungen.





Materialdaten sammeln

- Parameter, die für zuverlässiges Drucken erforderlich sind (z. B. Geschwindigkeit und Temperaturen beim FFF – Heizbettdüse und Düsentemperaturen sind die Hauptfaktoren für den Energieverbrauch).
- Eingebettete Umweltauswirkungen (wie z. B. Treibhausgasemissionen, die aus der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung resultieren).
- Recyclingfähigkeit und Wiederverwendungspotenzial (z. B. Pulver-Auffrischungsraten), einschließlich der Verfügbarkeit von Recyclinginfrastruktur.
- Ausschussrisiko (Materialien, die zu Destabilisierung, Verzug usw. neigen, verursachen mehr Abfall).
- Nachbearbeitungsbedarf (einschließlich Energieverbrauch und Chemikalieneinsatz).
- Gesundheitssicherheit (z. B. Toxizität, Partikelinhalationsrisiken).

Einige Daten sind von Herstellern verfügbar, andere aus unabhängigen Quellen und Studien, und für einige müssen Sie möglicherweise eine LCA durchführen oder eines der in Kapitel 3 genannten Online-LCA-Tools verwenden.

Unser [CO2 - Emissionsbewertungstool](#) enthält Daten für einige gängige Polymere. Die folgende Tabelle fasst diese Daten zusammen und bietet ein Beispiel für eine Entscheidungsunterstützungsmatrix (Datenquellen und Referenzen sind auf der Webseite des Bewertungstools aufgeführt [6]).

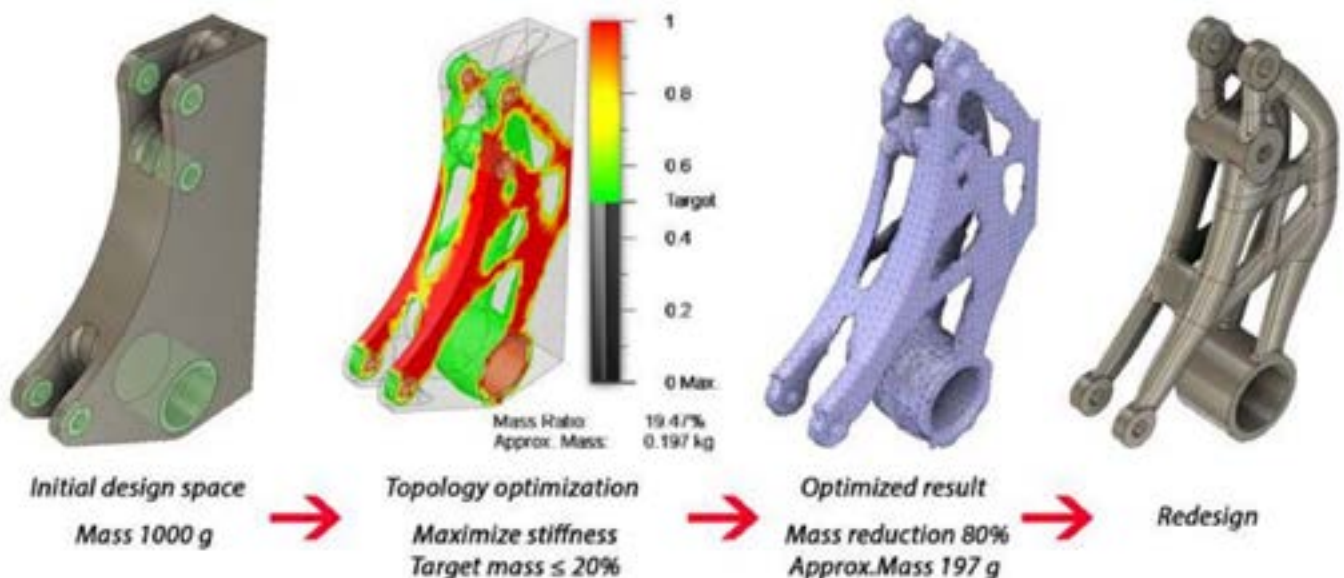
Material	Quelle	Global warming potential [gCO ₂ eq/g]	Ende des Lebenszyklus
PLA	Organisch	4.79	Biologisch abbaubar (unter industriellen Bedingungen)
ABS	Fossil	3.22	Recyclbar, aber baut schnell ab
PETG	Fossil + Organisch	6.27	Selten recycelt
TPU	Fossil	4.41	Recyclbar
Nylon	Fossil	6.57	Recycling teuer, baut schnell ab
PC	Fossil	3.41	Recyclbar, aber schlecht etablierte Infrastruktur
HIPS	Fossil	2.18	Recyclbar
PP	Fossil	1.63	Recyclbar
PPS	Fossil	6.39	Recycling ist schwierig
Photocurable resin	Fossil	3.85	Im Allgemeinen nicht recycelbar

Beispiel für eine Entscheidungsunterstützungsmatrix mit umweltrelevanten Daten für gängige AF-Polymere

Design für AF (DfAM) und Prozessoptimierung

Hier stellen wir eine allgemeine Checkliste der DfAM-Prinzipien vor, die sich mit dem Ökodesign überschneiden. Um DfAM und Design-Software technisch zu beherrschen, ist jedoch ein tieferes Eintauchen erforderlich, wofür wir die folgenden Ressourcen empfehlen:

- Additive Manufacturing in a Nutshell: Ein im Rahmen des ADDCIRCLES-Projekts entwickelter Zertifikatskurs. (ammap.eu/am-certificate-course-for-senior-experts/)
- Moodle Course on Green Additive Manufacturing: Ein Online-Kurs, der im Rahmen des ADDCIRCLES-Projekts entwickelt wurde. (ammap.eu/moodle-course-on-am-technologies-for-educators/)
- Additive Manufacturing: Process Optimization, MDPI, Special Issue Reprint [7]



Beispiel für einen Topologieoptimierungsansatz zur Neugestaltung eines Titan-Kipphebels (Rocker) mit einer Massenreduzierung von 80 % [8]

Kernprinzipien des DfAM

DfAM ist eine Sammlung von Werkzeugen und Methoden, die die spezifischen Fähigkeiten der AF im Designprozess berücksichtigen. Es ist ein vielschichtiges Studienggebiet, in dem verschiedene Themen wie Kreativität, Bio-Inspiration, Materialien, Optimierung und Validierung für die Verbesserung des AF-Designs mit integrierten Ansätzen in Betracht gezogen werden [7]. Die Kernprinzipien sind:

- Konsolidierung mehrerer Teile: Reduzierung von Befestigungselementen, Verbindungen und Montageaufwand, geringerer Materialverbrauch und Eliminierung von Werkzeugen.
- Design für minimale Stützstrukturen: Ausrichtung von Teilen, um nicht gestützte Oberflächen von mehr als 45° zu vermeiden, und Integration von sich selbst tragenden Merkmalen.
- Verwendung von Gittern und Topologieoptimierung: Gitter reduzieren das Gewicht, erhöhen aber die Druckzeit. Ein ausgewogenes Verhältnis finden und ultrafeine Gitterzellen vermeiden, die Pulver einschließen.
- Design für Materialeffizienz:: Hohlbereiche, wo möglich. Fügen Sie interne Kanäle zur Kühlung oder zum Leichtbau hinzu. Vermeiden Sie unnötig große massive Blöcke.
- Einbeziehung von Merkmalen, die die Nachbearbeitung vereinfachen (Including Features that Simplify Post-Processing): Fügen Sie nur dort Bearbeitungszugaben (Machining Allowance) hinzu, wo sie benötigt werden. Bieten Sie Kanäle zur Pulverentfernung. Integrieren Sie selbst positionierende und selbst fixierende Oberflächen.

Wie immer gilt: Wenn Sie Designmerkmale implementieren, überprüfen Sie den gesamten Lebenszyklus und prüfen Sie, welche Konsequenzen das Design auf die Gesamtbelastung hat. Zum Beispiel:

- Die Topologieoptimierung kann Strukturen schaffen, die mehr Stützstrukturen erfordern.
- Ultra Dünne Wände können die Haltbarkeit verringern und zu einer kürzeren Produktlebensdauer führen.
- Wenn die Nutzungsphase sehr kurz ist und keine signifikante Energie erfordert, ist der erhöhte Energieverbrauch für die Topologieoptimierung möglicherweise nicht lohnend.

Topologieoptimierung und Generatives Design

Die AF beseitigt viele Einschränkungen der traditionellen subtraktiven Fertigung und ermöglicht die Realisierung von Geometrien, die zuvor unmöglich waren. Im Gegensatz zum traditionellen Designansatz, bei dem CAD-Systeme zur Erzeugung einer detaillierten Geometrie entsprechend den Vorgaben des Designers verwendet werden, ermöglichen die Einführung von Topologieoptimierungs- und Generativen Design-Tools den Designern, sich primär auf die Funktion statt auf die Form zu konzentrieren und die Optimierungstools mit der Generierung von Designalternativen zu beauftragen [8].

Die Topologieoptimierung ist eine computergestützte Designmethodik, die mithilfe der Finite-Elemente-Analyse die Generierung eines optimalen Materiallayouts in einem gegebenen Designbereich ermöglicht, wobei vorgegebene Einschränkungen, Belastungen und Randbedingungen eingehalten werden.

Das Generative Design hingegen nutzt KI, um eine Reihe unterschiedlicher Designlösungen zu generieren, die vorab festgelegte Kriterien erfüllen. Diese Art des Designs ist darauf ausgerichtet, eine bessere Leistung auf Weisen zu erzielen, an die Designer, die traditionellen Designpfaden folgen, nicht gedacht hätten.

Die wichtigsten Richtlinien zur Designoptimierung unter Anwendung dieser Prinzipien sind:

- Mit den richtigen Lastfällen beginnen: Falsche Randbedingungen führen zu ungünstigen Geometrien.
- Realistische Fertigungseinschränkungen festlegen: Mindeststrukturgrößen (z. B. 0,4–0,6 mm für LPBF), Überhanggrenzen (30–45° je nach Material).
- Das Topologieoptimierungsmodell nachbearbeiten: Glatte Übergänge schaffen, Radien (Fillets) hinzufügen, um Spannungskonzentrationen zu reduzieren, organische Formen in strukturierte Gitter umwandeln.
- Mit Simulation validieren (Finite-Elemente-Analyse): Topologieoptimierte Teile können Spannungskonzentrationen aufweisen, die eine Verfeinerung erfordern.
- Nachhaltigkeitsauswirkungen bewerten: Überprüfen Sie das Verhältnis von reduzierter Masse im Vergleich zu erhöhter Druckzeit, hinzugefügtem Stützvolumen und im Inneren von Kanälen eingeschlossenem Pulver.

Prozessoptimierung

Wir können all diese Ansätze in einer Reihe allgemeiner Richtlinien zusammenfassen, die darauf abzielen, den gesamten Design- und Herstellungsprozess mit dem Ziel zu optimieren, sowohl die funktionale als auch die Umwelleistung zu maximieren.

Materialeffizienz:

- Überschüssiges Pulver zurückgewinnen und empfohlene Pulver-Auffrischungsraten verwenden, um Abfall zu minimieren und gleichzeitig die Materialqualität zu erhalten.
- Stützstrukturen durch Ausrichtung minimieren.
- Tools wie Topologieoptimierung und Generatives Design verwenden, um das zur Erfüllung der Funktion benötigte Material zu reduzieren.
- Füllstrategien (Infill Strategies) verwenden, die die Reduzierung des Materialverbrauchs, die Druckzeit und die Festigkeit ausbalancieren.

Energieoptimierung:

- Bauvolumenauslastung maximieren.
- Batch-Verarbeitung für die Nachbearbeitung (Aushärten, Waschen) verwenden.
- Wenn möglich, Bauvorgänge während energiearmer Zeiten planen.
- Druckzeit innerhalb des Bereichs akzeptabler Druckparameter minimieren.
- Die Temperatur hat einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch – verwenden Sie nach Möglichkeit Isolierung, um die Wärmeableitung zu reduzieren, und wählen Sie Materialien und Druckparameter, die niedrigere Temperaturen ermöglichen.

Bauqualität und Ausschussreduzierung

- In-situ-Überwachung verwenden, sofern verfügbar.
- Temperaturgleichmäßigkeit in Kammern validieren.
- Laser, Extruder und Beschichter (Recoaters) regelmäßig kalibrieren.
- Feuchtigkeit für hygroskopische Materialien (PA, TPU, PLA) kontrollieren.

Reduzierung der Nachbearbeitung

- Auf Prozesse mit geringer Umweltbelastung abzielen (einige Prozesse haben einen hohen Energieverbrauch oder verwenden toxische Substanzen).
- Die Entfernung von Stützstrukturen optimieren (z. B. Verwendung wasserlöslicher Materialien, wo möglich).
- Übermäßiges Schleifen und Polieren vermeiden, es sei denn, es ist erforderlich.

“

*Komplexität ist in der
additiven Fertigung
kostenlos, nutze sie!*

05

www.ammmap.eu



Zu vermeidende
Fallstricke und
Missverständnisse

05

ZU VERMEIDENDE FALLSTRICKE UND MISSVERSTÄNDNISSE

Produkte oder Materialien als nachhaltig bezeichnen

Kein Produkt oder Material kann per se als nachhaltig bezeichnet werden – wie sie in ihrem Lebenszyklus zirkulieren und wie hoch die Verbrauchs- (und Regenerations-) Rate ist, ist das, was wirklich zählt. Holz zum Beispiel kann nachhaltig sein, wenn es verantwortungsvoll und langsam genug gewonnen wird – oder sehr nicht nachhaltig, wenn die wachsende Nachfrage zur Degradierung von Waldökosystemen führt.

Was stattdessen zu tun ist:

- Ökosysteme mit Stakeholdern einrichten, die den gesamten Lebenszyklus abdecken.
- Die Regenerationskapazitäten der beteiligten Ressourcen analysieren und verbessern.
- Benutzer Ihrer Produkte über den umweltbewussten Gebrauch Ihrer Produkte und über End-of-Life-Verfahren aufklären.

Annehmen, dass AF automatisch nachhaltig ist

AF kann Werkzeugbestände reduzieren und Abfall verringern, aber der Energieverbrauch oder die Produktfunktionalität können diese Vorteile überwiegen. Ohne eine Lebenszyklusanalyse (LCA) können Nachhaltigkeitsbehauptungen irreführend sein.

Was stattdessen zu tun ist:

- Eine vergleichende LCA der AF im Vergleich zu anderen Produktionsmethoden durchführen, um festzustellen, unter welchen Umständen ein Gesamtnutzen entsteht.
- Lebenszyklen, nicht Produkte, gestalten.

Denken, dass natürlich, erneuerbar, biologisch abbaubar oder recycelbar gleich nachhaltig ist

Dass ein Material recycelbar oder biologisch abbaubar ist, bedeutet nicht, dass es tatsächlich recycelt oder biologisch abgebaut wird. Viele Biopolymere erfordern spezifische industrielle Kompostierungsprozesse (sind nicht zu Hause kompostierbar) und können auf Deponien Methan erzeugen. Einige Recyclingprozesse können ebenfalls energieintensiv sein oder chemische Behandlungen beinhalten, die Abfallströme erzeugen. Das bedeutet, ob das Material ordnungsgemäß recycelt wird, hängt stark von der Verfügbarkeit und dem Management der Recyclinginfrastruktur ab. Auch erneuerbare Quellen haben ihre Regenerationsgrenzen, und Erneuerbarkeit ist keine Freikarte für grenzenlosen Konsum.

Was stattdessen zu tun ist:

- Die Regenerationsgrenzen und Biodegradations-/Recyclingbedingungen für die von Ihnen verwendeten Materialien untersuchen und sicherstellen, dass sie berücksichtigt werden.
- Ihre Wertschöpfungskette und Ihr Geschäftsmodell so aufbauen, dass sie zirkuläre Prozesse ermöglichen. Partner in den Designprozess einbeziehen, die Ihnen helfen können, den Kreislauf zu schließen (z. B. biologische Abbaueinrichtungen).
- Sich auf die Maximierung der Nutzungsdauer Ihrer Produkte konzentrieren.

Die Nutzungsphase ignorieren

Designer konzentrieren sich oft auf die Materialeffizienz, vernachlässigen jedoch das Nutzerverhalten und den Ressourcenverbrauch während der Nutzungsphase des Produkts, z. B. Energie-, Wasser- oder Batterieverbrauch. Dies kann die gesamte Umweltauswirkung erheblich beeinflussen.

Was stattdessen zu tun ist:

- Nutzererfahrungen gestalten, die nachhaltige Nutzungsmuster kodieren.
- Reparaturen und End-of-Life-Verfahren einfach gestalten.

Design für Komplexität statt Funktion

AF ermöglicht geometrische Freiheit, aber unnötige Komplexität kann die Druckzeit, den Nachbearbeitungsaufwand und den Energieverbrauch erhöhen. Aus Sicht der Nutzererfahrung und Bedarfsanalyse stellt sich oft heraus, dass Produkte überentwickelt sind und unnötige Funktionen bieten.

Was stattdessen zu tun ist:

Genug Zeit für die Bedarfsanalyse aufwenden und sich auf die Strategien R0 (Refuse) und R1 (Rethink) konzentrieren, um Innovationen zu entwickeln, die die gewünschte Funktion (den Bedarf) mit minimaler Funktionalität und Komplexität erreichen.

Fehlen einer End-of-Life-Planung

Viele AF-Teile vermischen Polymere, Harze und Füllstoffe, die später unmöglich zu trennen sind. Nachhaltigkeit muss bereits in der Materialauswahlphase in das Design integriert werden.

Was stattdessen zu tun ist:

- Modular und mono-materiell gestalten, um die Materialtrennung zu ermöglichen.
- Materialien wählen, die Haltbarkeit und Recyclingfähigkeit ausbalancieren.
- Sicherzustellen, dass die Produkte tatsächlich recycelt oder auf andere Weise in den Kreislauf zurückgeführt werden, ist ebenfalls die Verantwortung des Herstellers – gestalten Sie die Nutzererfahrung entsprechend und bauen Sie Partnerschaften in der Wertschöpfungskette auf, um sicherzustellen, dass der Kreislauf geschlossen wird.

Sich ausschließlich auf Effizienzgewinne verlassen

Obwohl ressourcen- und energieeffiziente Lösungen Teil einer nachhaltigen Produktion sind, können sie niemals eine Lösung für sich allein sein. Ohne grundlegend unterschiedliche Geschäftsmodelle kann Effizienz bestenfalls die Überschreitung der Regenerationsgrenzen verzögern und schlimmstenfalls zu einem noch größeren Verbrauch führen, was als Jevons-Paradoxon bezeichnet wird (z. B. bedeuten kostengünstigere Produktion mehr verfügbares Geld für Expansion, was letztendlich zu höherem Verbrauch führt).

Was stattdessen zu tun ist:

- Sicherstellen, dass Effizienzgewinne nicht zu einer Ausweitung der bestehenden Aktivität führen, wenn diese Aktivität eine hohe Umweltbelastung aufweist – dies würde jeden Umweltnutzen zunichtemachen und zu einem größeren Ressourcenverbrauch zurückführen.
- Synergetische Industriesysteme aufbauen.

06

www.ammmap.eu



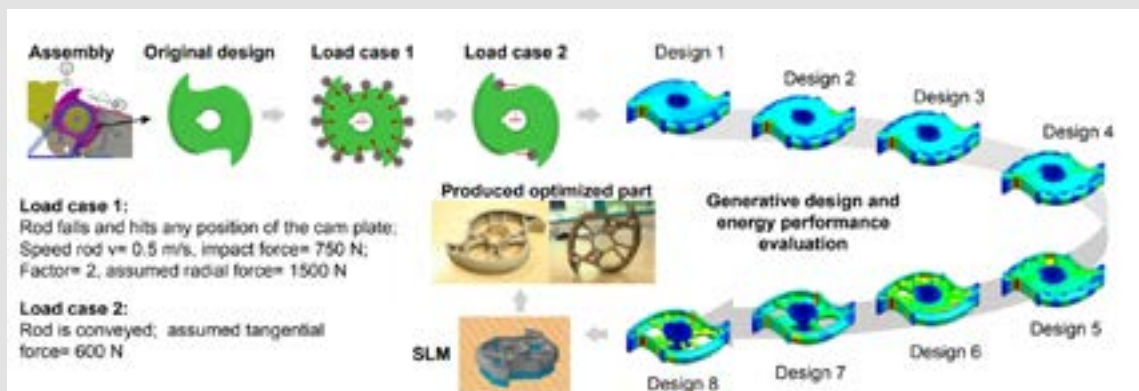
Fallstudien

06

FALLSTUDIEN

1) Gewichtsreduktion einer Nockenplatte

Das Projekt konzentrierte sich auf die Optimierung einer Stahl-Nockenplatte (Cam Plate), die in einem Fördersystem verwendet wird [9]. Ursprünglich als vollständig massives, maschinell bearbeitetes Teil konzipiert, bot die Komponente ein großes Potenzial zur Gewichtsreduktion (Lightweighting) und Ressourcenreduzierung durch Neugestaltung. Mithilfe eines Generativen Designansatzes wurden acht Geometrievarianten mit zunehmenden Leichtbaufaktoren erstellt. Jede Konstruktion wurde unter realistischen mechanischen Lastszenarien bewertet, um die strukturelle Integrität auch unter Stoß- und Tangentialkräften zu gewährleisten. Die Simulationsergebnisse bestätigten, dass Massenreduktionen von bis zu 64 % erreichbar waren, ohne die zulässigen Materialspannungen zu überschreiten. Um die Umweltschonung zu bewerten, wandte das Team eine auf die AF zugeschnittene Energie-Leistungs-Bewertung (Energy Performance Assessment, EPA) an. Im Gegensatz zur vollständigen Lebenszyklusanalyse (LCA) bietet die EPA schnelle, quantitative Einblicke während der Designphase, wodurch Nachhaltigkeit die Designentscheidungen in Echtzeit leiten kann. Detaillierte Energiesimulationen des Selektiven Laserschmelzens (SLM) wurden verwendet, um Schlüsselindikatoren wie den Gesamtenergieverbrauch, den Sicherheitsfaktor pro Energieeinheit und das Verhältnis von Verformung zu Energie zu berechnen. Nach der Normierung und Gewichtung dieser Indikatoren wurde der leistungsstärkste Entwurf – der den niedrigsten Energiebedarf und die höchste funktionale Effizienz bot – ausgewählt und erfolgreich mittels SLM gefertigt.



Teilkonstruktion mithilfe des Generativen Designansatzes [9]

Wichtigste Erkenntnisse

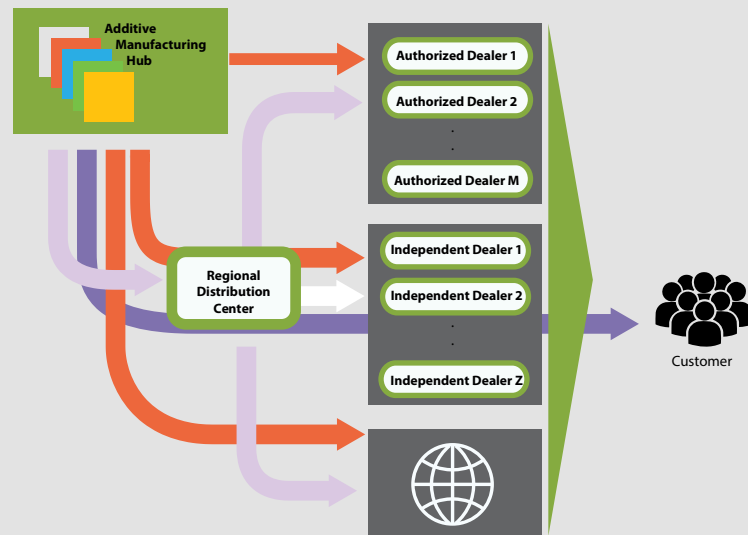
- Signifikante Materialeinsparungen: Eine Gewichtsreduzierung von bis zu 64 % wurde durch Generatives Design erreicht, ohne die Festigkeit oder Funktionalität zu beeinträchtigen.
- Energieoptimierte Fertigung: Energiesimulationen identifizierten Designvarianten mit dem niedrigsten Energieverbrauch während der SLM-Produktion.
- Datenbasierte Entscheidungsfindung: Die EPA (Energie-Leistungs-Bewertung) ermöglichte eine quantitative Bewertung der Umweltauswirkungen bereits während des Designprozesses – und nicht erst im Nachhinein.
- Verbesserte Nachhaltigkeit: Der reduzierte Materialverbrauch und der niedrigere Prozessenergiebedarf führen direkt zu einem kleineren ökologischen Fußabdruck.
- Erfolgreiche AF-Implementierung: Das optimierte Teil wurde mit hoher Dichte (98,5–99,5 %) hergestellt, wodurch der Design- und Bewertungsansatz validiert wurde.

2) Vertrieb von Kfz-Ersatzteilen

Diese Fallstudie konzentriert sich auf eine mittelgroße Automobilmarke in Spanien [10]. Die Untersuchung verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz, indem sie die ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitsauswirkungen der Integration der AF (Additive Fertigung) in die Ersatzteilproduktion bewertet. Die AF ermöglicht die Herstellung von Teilen mit präzisen Formen und Materialien ohne Abfall, was die Produktionskosten und die Umweltbelastung senken kann.

Die Studie analysierte reale Verkaufsdaten von Juli 2018 bis Juli 2019, wobei nur Teile berücksichtigt wurden, die aufgrund von Komplexität, Volumen und anderen Kriterien für die AF geeignet waren. Ein Kostenkalkulationsmodell wurde entwickelt und durch Angebote europäischer AF-Anbieter validiert. Das aktuelle Lieferkettenmodell, das durch zentralisierte Produktion und Distribution gekennzeichnet ist, wurde einem vorgeschlagenen dezentralen AF-basierten Modell gegenübergestellt, das verteilte Lieferanten umfasst, die in automatisierten „AF-Hubs“ organisiert sind.

Die ökonomische Analyse ergab, dass die Einführung der AF für Teile mit geringer Komplexität und geringem Volumen die Gewinnmarge der Marke um 15,12 % steigern könnte. In ökologischer Hinsicht könnte der Materialverbrauch um 12,3 % und die transportbedingten Energieeinsparungen (und CO₂-Emissionen) um 9,2 % reduziert werden. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass selbst in einem frühen Stadium der industriellen AF-Einführung synergistische Nachhaltigkeitsvorteile und eine verbesserte Rentabilität erzielt werden, obwohl weiterer Forschungsbedarf bezüglich geistiger Eigentumsrechte, Reparaturmöglichkeiten und der Skalierung auf globale Märkte besteht.



Zusammenfassendes Schema des Logistikmanagements (SCM) für den Vertrieb von Ersatzteilen im Automobilsektor bei Verwendung der Additiven Fertigung [10]

Wichtigste Erkenntnisse

- Die Studie konzentrierte sich auf Ersatzteile mit geringer Komplexität und geringem Verkaufsvolumen, bei denen die AF derzeit am praktikabelsten ist.
- Ein neues dezentrales Lieferkettenmodell mit „AF-Hubs“ kann die traditionellen zentralisierten Lieferanten ersetzen.
- Geschätzte Steigerung der Gewinnmarge um 15,12 % für die Marke durch die Einführung der AF bei ausgewählten Teilen.
- Reduzierung des Materialverbrauchs um 12,3 % und Einsparung von Transportenergie um 9,2 %, wodurch die CO₂-Emissionen gesenkt werden.
- Das Kostenkalkulationsmodell für die AF wurde mit tatsächlichen Angeboten von AF-Anbietern validiert, wobei die Abweichungen zwischen 4,3 % und 16,2 % lagen.
- Es bestehen weiterhin Herausforderungen in Bezug auf geistiges Eigentum, Haftung und Skalierbarkeit auf dem Markt.

3) Neugestaltung eines Türgriffs

Diese Fallstudie stellt die Neugestaltung eines Türgriffs unter Anwendung von Long-Life Manufacturing (LLM)-Prinzipien im Möbelsektor vor, wobei die AF mit PLA, einem biologisch abbaubaren Polymer, genutzt wird [11]. Der Fokus liegt auf der Verbesserung der Produktoptimierung, der Reparierbarkeit und der Verlängerung des Lebenszyklus, indem Verbraucher in die Lage versetzt werden, Teile per 3D-Druck herzustellen und zu ersetzen.

Die Neugestaltung umfasste die Integration von Gitterstrukturen und Schutzbeschichtungen, um Festigkeit, Gewicht und Aussehen zu optimieren. Das modulare Design und der AF-Prozess ermöglichten auch eine Individualisierung und einfachere Reparatur, was die Personalisierung und damit die Motivation erhöhte, das Produkt nicht wegzuerwerfen.

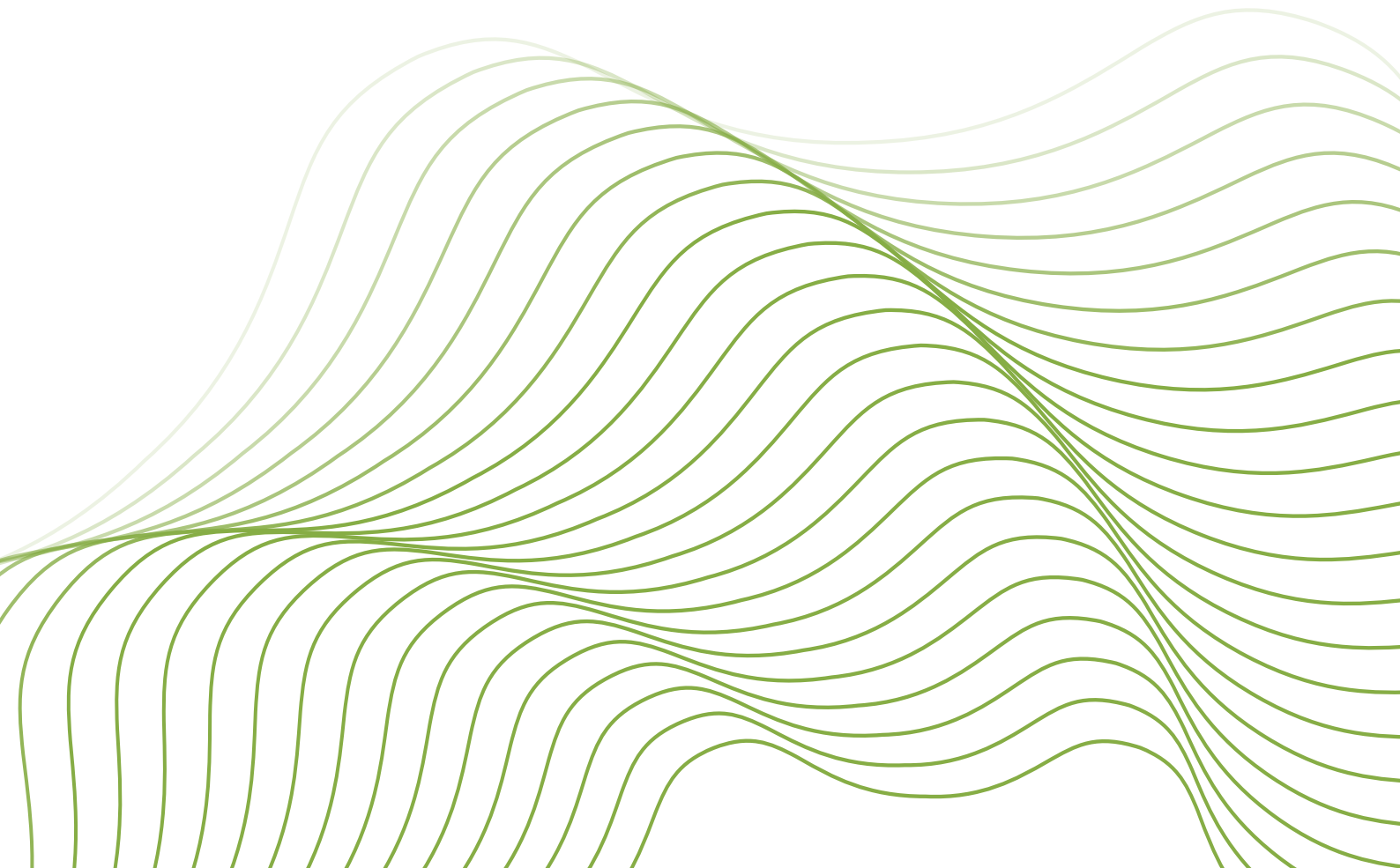
Die PLA-Türgriffe wurden Degradationstests unterzogen, die reale Umgebungsbedingungen simulierten, einschließlich UV-B-Exposition und thermischem Zyklus. Die Ergebnisse zeigten eine signifikante Massenreduzierung von über 50 % im Vergleich zu traditionellen Metallgriffen, während über 95 % der anfänglichen Zugfestigkeit nach 14 Tagen UV-B und thermischem Zyklus erhalten blieben. Die Farbstabilität war zufriedenstellend, insbesondere bei weiß lackierten Proben, was auf eine gute ästhetische Erhaltung hindeutet.



Hebelgriff, der sowohl das CAD-Design als auch den gedruckten Prototyp zeigt [11]

Wichtigste Erkenntnisse

- Der neu gestaltete PLA-Türgriff erzielte eine Gewichtsreduzierung von über 50 % im Vergleich zu Stahlgriffen.
- Die mechanischen und ästhetischen Eigenschaften blieben nach den Umwelttests (UV-B und thermisches Zyklieren) zufriedenstellend.
- Gitterstrukturen und modulares Design ermöglichten Materialeinsparungen, Haltbarkeit und Reparierbarkeit.
- Die AF befähigt die Verbraucher, Ersatzteile lokal zu drucken, wodurch die Produktlebensdauer verlängert und Abfall reduziert wird.
- Die Personalisierung durch AF erhöht die Bindung des Benutzers an das Produkt und fördert die Wartung statt der Entsorgung.



Note

A large white rectangular area containing horizontal lines for writing notes. The lines are evenly spaced and cover the majority of the page's width and height, providing a template for handwritten or typed text.

REFERENZEN

- [1] <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/news/an-introduction-to-circular-design>
- [2] https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- [3] https://unece.org/sites/default/files/2022-06/3%20DGMOVE%20UNECE_EU%20Transport%20Policy.pdf
- [4] Ecodesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption; Brezet, Van Hemel, 1997
- [5] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919303015>
- [6] <https://www.ammmap.eu/emissions-calculator/>
- [7] https://mdpi-res.com/bookfiles/book/9206/Additive_Manufacturing__Process_Optimisation.pdf
- [8] <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/4/2106>
- [9] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827121000822>
- [10] <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8461>
- [11] <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/11/4969>

