

VDI

Zentrum  
Ressourceneffizienz

Im Auftrag des:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und nukleare Sicherheit



# STRATEGIEN UND MAßNAHMEN

Steigerung der Ressourceneffizienz  
im Unternehmen

Fertigungsgerechte  
Produktgestaltung

<https://www.ressource-deutschland.de/instrumente/strategien-und-massnahmen/produktbezogen/fertigungsgerechte-produktgestaltung/>

## 1 RESSOURCENEFFIZIENZ, ANWENDUNGSBEREICH, GRENZEN

### Ziel und Funktion

Eine fertigungsgerechte Produktgestaltung zielt darauf ab, Produkte so zu gestalten, dass diese bei gegebener Produktionsinfrastruktur herstellbar sind. In diesem Fall steht zusätzlich im Vordergrund, wie Produktentwickler mit dieser Strategie den Ressourcenaufwand zur Herstellung beeinflussen können. Indikatoren für eine misslungene Berücksichtigung der Fertigung in der Produktgestaltung sind beispielsweise hohe Aufwände für Nacharbeit, qualitäts- und fertigungsbedingte Ausschüsse sowie eine große Anzahl notwendiger Fertigungsschritte. Die Stellhebel des Produktentwicklers liegen hier in der Definition einer fertigungsgerechten Baustruktur sowie in der Beteiligung an der Auswahl und Optimierung des Fertigungsverfahrens.

### Bezug zur Ressourceneffizienz

Fertigungsbedingte Ressourcenaufwände entstehen durch Stoffe, welche entweder direkt in das Produkt fließen (Roh- und Hilfsstoffe) oder in der Produktion verbraucht werden (Betriebsstoffe). In der Konstruktion werden Roh- und Hilfsstoffe durch die Materialwahl, die Geometrie und die Spezifikation von Fügeverbindungen direkt festgelegt. Darüber hinaus können qualitätsbedingte Ausschüsse reduziert werden (z. B. durch Vermeidung diffiziler Geometrien, die mit bestehenden Mitteln kaum herstellbar sind). Ein Einfluss auf den Bedarf an Betriebsstoffen erfolgt indirekt. So legen die gewählte Geometrie und das Material des Produktes die Anzahl notwendiger Bearbeitungsschritte fest. Hierdurch ergeben sich unter anderem auch die Betriebsdauer der Maschinen und der damit verbundene Stromverbrauch.

### Anwendungsbereiche und Akteure

Eine Beeinflussung der Produktgestalt im Sinne einer ressourceneffizienten Fertigung ist für alle physisch herstellbaren Produkte relevant. Die konkreten Vorgaben zur Optimierung der Konstruktion unterscheiden sich nach den jeweiligen Fertigungsverfahren in urformgerecht, umformgerecht, trenngerecht und fügegerecht [1].

Als Grundlage für produktbezogene Maßnahmen zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Fertigung bedarf es eines engen Dialoges zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung/Arbeitsvorbereitung.

**Grenzen**

Eine Optimierung der Produktgestalt für die Fertigung kann unter Umständen zu Wechselwirkungen und Zielkonflikten mit anderen Phasen des Produktlebenszyklus führen. So ist z. B. ein zentrales Element einer fertigungsgerechten Konstruktion eine möglichst einfache Bauteilgestaltung, die auf wenigen Verarbeitungsschritten beruht. Im Gegensatz dazu verlangt eine Gewichtsoptimierung von Gussbauteilen im Rahmen einer Leichtbaustrategie aufwändigere und komplexere Gussgestaltungen, die den Gießprozess risikoreicher und schwieriger gestalten [2]. Neue Möglichkeiten additiver Fertigung bieten hier große Potenziale, derartige Strukturen mit wenig Aufwand zu erzeugen. Nichtsdestotrotz entstehen durch die additive Fertigung hohe Energieaufwände, die der Einsparung von Material und Gewicht gegenübergestellt werden müssen. Dies kann im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse erfolgen.

**Einordnung der Strategie/Maßnahme**

<b>Bezug</b>	Produkt
<b>Einflussnehmender Akteur</b>	Produktentwicklung, Arbeitsvorbereitung
<b>Lebensphasen mit relevanten Auswirkungen</b>	Produktherstellung
<b>Lebensweganalyse</b>	bedingt erforderlich

**2 WEGE DER UMSETZUNG**

**2.1 Fertigungsgerechte Baustruktur**

Die Festlegung der Baustruktur eines Produktes definiert bereits zu wesentlichen Teilen, wie viele Komponenten gefertigt werden müssen, welche Verfahren für die Fertigung infrage kommen und ob die Teile zukaufbar

bzw. inhouse produzierbar sind. Aus Sicht der Ressourceneffizienz stellt sich hier insbesondere die Frage, ob eine Integral- oder Differenzialbauweise sinnvoll ist [3].

Eine Differenzialbauweise ist vor allem gut mit einer Modularisierungsstrategie kombinierbar. Durch die Definition von Fertigungsbausteinen ergibt sich der Vorteil, dass die interne Variantenvielfalt für die Fertigung gering gehalten wird (z. B. durch Nutzung von gemeinsam verwendeten Bauteilen über verschiedene Produktvarianten bzw. eine Produktfamilie hinweg) [4]. In diesem Fall können z. B. Rüst- und Anfahrverluste in der Produktion durch höhere Losgrößen vermieden werden. Darüber hinaus ergeben sich Skaleneffekte über eine Lernkurve bei der Produktion, die zu geringerem qualitätsbedingtem Ausschuss führen kann. Komplementär zu Vorteilen in der Produktion können modulare Produkte auch positive Effekte in anderen Lebenszyklusphasen nach sich ziehen (z. B. bessere Reparierbarkeit, Wartbarkeit, teilweise kompakteres Transportvolumen).

Eine Integralbauweise bietet ebenfalls viele Vorteile. Wenn verschiedene Komponenten und Funktionen in einem Bauteil vereint werden, sinkt zu meist die Anzahl der Bearbeitungsschritte. So konnte z. B. die Anzahl der Bearbeitungsvorgänge eines Bauteils innerhalb des Airbus-A380-Treibstoffsystems durch Integralbauweise von 31 auf fünf Schritte reduziert werden [5]. Darüber hinaus bietet sich ein hohes Potenzial für Material- und Energieeffizienz, indem Bauteile über Urformen anstelle einer spanenden Bearbeitung hergestellt werden. Aufgrund der komplexeren Geometrien, die mit diesen Verfahren herstellbar sind, bietet sich die Integralbauweise vor allem in Kombination mit einer beanspruchungsgerechten Konstruktion bzw. einer Leichtbaustrategie an.

### **Funktionsintegration von Motorkomponenten durch Optimierung der Baustruktur**

Ein Hersteller für Lastkraftfahrzeuge hat ein völlig neues Konzept für die Herstellung von Vierzylinder-Motoren präsentiert. Durch die Optimierung der Konstruktion für die additive Fertigung konnten jeweils 25 % der Teile (ca. 200 von 841 Teilen) in andere Komponenten integriert werden. Neben einer signifikanten Reduktion der Fertigungsschritte

ergab sich hierdurch auch eine Gewichtseinsparung im Endprodukt von ca. 25 % (ca. 120 kg von 525 kg) [6].

## 2.2 Auswahl und Optimierung des Fertigungsverfahrens

Für die fertigungsgerechte Auslegung eines Produktes ist es für den Produktentwickler wichtig, möglichst frühzeitig das Verfahren der Herstellung zu kennen, um das Produkt an die Prozesskette anzupassen. Sind mehrere Verfahren möglich, sollte zusammen mit der Produktionsplanung der ressourceneffizienteste Weg der Herstellung gewählt werden (siehe Beispiel). Ansonsten kann der Produktentwickler auch indirekt durch seine Konstruktion Einfluss auf mögliche Verfahren und den Ressourcenverbrauch der Fertigung nehmen. So impliziert z. B. die Vorgabe eines sehr geringen Bohrungsdurchmessers im Mikrometerbereich, dass herkömmliche Bohrmaschinen nicht mehr einsetzbar sind. In diesem Fall müsste eine energieintensive Laserbohrung vorgesehen werden. Ein weiteres Beispiel sind niedrige Toleranzen [7], die zumeist aufwändigere Herstellverfahren mit größerem Verschnitt, mehr Nacharbeit und umfassende Qualitätskontrollen fordern. Durch zu genaue Angaben der Konstruktion steigt außerdem das Risiko qualitätsbedingter Ausschüsse. Im Allgemeinen sollte die Konstruktion also nur die tatsächlichen technisch-funktionalen Bedarfe des Produktes widerspiegeln und ein "Over Engineering" vermieden werden.

### **Berücksichtigung des Fertigungsverfahrens bei der Konstruktion von Titangroßbauteilen für die Luftfahrt**

Zur Realisierung von Leichtbauprojekten in der Flugzeugindustrie werden Bauteile aus einer Titan-Aluminium-Legierung hergestellt. Die Teile können entweder aus dem Vollen gefräst oder gegossen werden. Daher sollte schon in der Konstruktion entschieden werden, welche Art der Herstellung aus Sicht der Ressourceneffizienz sinnvoller ist. In diesem Fall führt eine Fräsbearbeitung zu einem Materialverlust von ca. 90 % in Form von Spänen. Des Weiteren ist der Fräsprozess sehr energieintensiv, da Titan über schlechte Wärmeleiteigenschaften verfügt und somit große Mengen Kühlschmierstoff verwendet werden müssen.

Verglichen mit dem spanenden Verfahren kann der Materialverbrauch

pro Bauteil durch Gießen von 10 kg auf 2 kg Titan gesenkt werden. Der Energieaufwand bei der Rohstoffherstellung wird von 1.090 kWh auf 266 kWh verringert. Übertragen auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoß kann dieser von 650 kg/Fertigteil auf 127 kg reduziert werden [8]. Aus diesem Grund sollte bereits in der Konstruktion auf eine gussgerechte Konstruktion der Bauteile geachtet werden.

### 2.3 Digital integrierte Produktentwicklung und Produktion

Digitale Engineering-Prozesse an der Schnittstelle zwischen Produktentwicklung und Produktion können bei der Erschließung neuer Ressourceneffizienzpotenziale unterstützen. Dies ist zum einen durch die Vermeidung von physischen Prototypen und Testständen möglich. Darüber hinaus ergeben sich Optionen, Konstruktionsentwürfe anhand von Simulationen des Ressourcenverbrauchs einzelner Fertigungsvorgänge zu optimieren.

Innerhalb der Produktentstehung werden in vielen Unternehmen noch immer umfangreiche Versuche mit physischen Prototypen durchgeführt. Zweck dieser Versuche ist einerseits die Absicherung von Funktionen des Produktes sowie die Vorbereitung einer Serienfertigung. Da die speziell für Tests gebauten Prototypen zumeist im Anschluss verschrottet werden, ergeben sich hier ebenfalls Potenziale für Ressourceneffizienz. Im Zuge der Digitalisierung der Engineering-Prozesse können diese Potenziale auch immer besser genutzt werden. Dies geschieht insbesondere dadurch, dass die Gestalt und das Verhalten von Produkt (virtueller Prototyp) und Produktionsanlage (digitale Fabrik) durch Modelle prospektiv abbildbar sind.

Als virtueller Prototyp wird eine Kombination von statischen (z. B. CAD) und dynamischen (z. B. FEM, MKS) Modellen eines Produktes bezeichnet [9]. Durch die modellhafte Abbildung können die Gestalt und das Verhalten des Produktes bereits frühzeitig simuliert und gegenüber allen prognostizierten Beanspruchungen und gewollten Funktionsmustern abgesichert werden. Hierdurch ist es möglich, die Anzahl physischer Prototypen zu verringern und somit auch Ressourcen einzusparen.

Die digitale Fabrik definiert sich durch das Zusammenwirken von Methoden, Modellen und Werkzeugen, die den Produktionsplaner bei Vorberei-

tungen der Inbetriebnahme, des Anlaufes und der Serienfertigung unterstützen. Hierbei stehen die Verkürzung und Absicherung des Anlaufs sowie die Optimierung der Serienproduktion im Vordergrund. Zu diesem Zweck erfolgt eine digitale Abbildung von statischen (z. B. Bauteilgeometrie) und dynamischen (z. B. Materialfluss) Modellen von Anlagen und Produktionsabläufen [10]. Neben Modellen der Fertigungsstationen können an dieser Stelle ebenfalls Modelle des Produktes integriert werden. Hierdurch bietet die digitale Fabrik eine wichtige Schnittstellenfunktion zwischen Produktentwicklung und Produktionsplanung. Aus Sicht der Ressourceneffizienz können durch Methoden der digitalen Fabrik daher neben fabrikplanerischen Maßnahmen, wie z. B. der Organisation effizienter Materialflüsse, auch Rückschlüsse auf das Produktdesign gezogen werden. So ist z. B. eine Simulation von Bearbeitungsvorgängen möglich, um den Verschleiß zu bestimmen. Ist dieser zu hoch, können Anpassungen der Produktgeometrie sinnvoll sein, z. B. die Vermeidung schwieriger Radien [11].

Wenn das digitale Fabrikmodell soweit mit dem real existierenden Maschinenpark verknüpft ist, dass es ein realitätsgetreues Abbild der Maschinen und Anlagen liefert, kann von einem digitalen Fabrikzwilling gesprochen werden. Ziel sind die Simulation, Steuerung und Verbesserung der physischen Assets aus der virtuellen Welt. Charakteristisch hierbei ist die Kopplung eines statischen Fabrikmodells mit Echtzeitdaten, welche die reale Produktion widerspiegeln. Hierbei können Auftrags- und Betriebsdaten sowie Energie- und Materialverbrauchsdaten im Vordergrund stehen. Außerdem sind im Zwilling die jeweiligen Fähigkeiten und Konfigurationsmöglichkeiten der Maschinen hinterlegt, so dass sich diese automatisch und selbstständig an neue Situationen in der Produktion anpassen können (z. B. neue Aufträge, Störungen etc.).

#### **Demozelle Smarte Fabrik 4.0**

Am Fraunhofer IPK wird im Kontext von Industrie 4.0 an Lösungen geforscht, um individuelle Produkte in kleinen Stückzahlen zu fertigen, ohne dabei den Produktionsablauf im Vorfeld fest planen zu müssen. Hierfür erfolgt der Aufbau einer durchgängigen digitalen Prozesskette vom Produktmodell zum Produktionsprozess. Diese ist insbesondere wichtig, um die Herstellbarkeit des Produktes automatisiert zu evaluie-

ren, den Prozess ggf. anzupassen und darüber hinaus den Ressourcenverbrauch der Herstellung vorab zu prüfen. In der "Smart Factory 4.0" wird diese Vorgehensweise anhand eines vereinfachten Produktionsprozesses (Herstellung eines Kaffeeuntersetzers) bereits aufgezeigt. Wesentlicher Bestandteil der Smart Factory ist ein digitaler Zwilling des Produktionsprozesses, der Daten zum Prozess in Echtzeit generiert und darüber hinaus auch Simulationen erlaubt. Im Kontext der Entwicklung ressourceneffizienter Produkte wäre zukünftig beispielsweise folgendes Szenario denkbar: Die Entwicklung konstruiert auf Basis eines Kundenauftrages ein Bauteil und möchte sich über den Ressourcenaufwand zur Fertigung informieren. Hierfür kann der Produktionsplaner direkt auf Basis des digitalen Zwillings und entsprechender Simulationsmodelle eine Abschätzung für den Energie- und Materialbedarf der Herstellung geben. Auf dieser Basis kann ein Angebot zur Herstellung des Bauteils für den Kunden genau definiert bzw. das Produktdesign entsprechend abgeändert werden, um Ressourcenaufwände zu verringern [12].

### 3 METHODEN

#### 3.1 Abteilungsübergreifende Projektteams

Eine typische Barriere für eine erfolgreiche und ressourceneffiziente Produktentwicklung liegt in einem mangelnden Austausch der verschiedenen an einer Produktentwicklung beteiligten Stakeholder. Hierzu zählen z. B. Vertreter aus den Bereichen Marketing, Beschaffung, Kostenmanagement und Fertigung. Da die hier genannten Bereiche in Unternehmen zumeist in getrennten Abteilungen organisiert sind, empfiehlt es sich, diese starre Struktur projektbasiert in interdisziplinären Teams aufzubrechen. Hierdurch ergibt sich neben dem fachlichen Austausch, der kontinuierlichen Produkt- und Prozessverbesserung sowie dem frühzeitigen Erkennen von Problemen auch die Möglichkeit, Entwicklungszeit zu sparen (Simultaneous Engineering). Die unter dem Begriff „Integrierte Produktentwicklung“ zusammengefasste Vorgehensweise von Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H. [13] greift diesen Gedanken auf und kann als Anleitung zur besseren Integration der Stakeholder verwendet werden. Es empfiehlt sich für derartige Projekte klare Ziele und Zeitpläne zu definieren. Außerdem kann gerade



bei sensiblen Themen mit verfahrenen Ansichten auch eine externe Moderation von Projekttreffen sinnvoll sein.

### 3.2 Heuristiken für fertigungsgerechte Produktentwicklung

In der einschlägigen Fachliteratur wurden bereits zahlreiche Positiv- und Negativbeispiele für eine fertigungsgerechte Produktgestaltung definiert. Diese unterscheiden sich unter anderem nach den jeweiligen Fertigungsverfahren in urformgerecht, umformgerecht, trenngerecht, fügerecht [3]. Neben Tipps zur Herstellbarkeit (z. B. Vermeidung von Hinterschneidungen bei Gießprozessen) finden sich hier auch Hinweise, Ressourcen einzusparen, z. B. Minimierung von Bearbeitungsflächen bei Fräsvorgängen [14].

### 3.3 Simulationstools

Mittels Simulationen lassen sich Ressourceneffizienzpotenziale genau evaluieren, ohne kostenintensive Prototypen herzustellen und Versuche durchzuführen. Standardwerkzeuge, wie Computer Aided Manufacturing, helfen dabei, aus dem CAD-Modell effiziente Bearbeitungswege (z. B. bei Fräsvorgängen) abzuleiten und diese vorab zu prüfen. Darüber hinaus existieren spezielle Softwarelösungen, die einzelne Fertigungsverfahren fokussieren (z. B. Druckgussimulation).

### 3.4 Entwicklungsbegleitende Kostenabschätzung

Einige CAD-Programme bieten mittlerweile die Funktion an, mittels einer gegebenen Konstruktion Aussagen über die Material- und Fertigungskosten des Entwurfs zu treffen. Hierfür wird anhand der Geometrie auf die Fertigungsschritte geschlossen, die in einer Datenbank mit ihren jeweiligen Kosten hinterlegt sind. Hierdurch ist es möglich, verschiedene Geometrialternativen des Entwurfs zu evaluieren und diese auch hinsichtlich der Materialkosten zu vergleichen. Auf dieser Basis können dann ggf. Konstruktionsalternativen in Betracht gezogen werden, die weniger Fertigungsschritte und Materialverluste nach sich ziehen (siehe z. B. [15]).

#### 4 LITERATUR

- [1] **Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K. H. (2013):** Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 426 ff.
- [2] **Herrmann, C.; Pries, H. und Hartmann, G. (Eds.) (2014):** Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 48.
- [3] **Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K. H. (2013):** Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 419 ff.
- [4] **Reichwald, R. und Piller, F. T. (2000).** Mass customization-Konzepte im electronic business. In: Handbuch Electronic Business (pp. 359 - 382). Gabler Verlag, Wiesbaden., S. 364 ff.
- [5] **Grützmann, C. und Wischeropp, T. (2014):** A380 Fuel Connector unter Anwendung generativer Fertigungsverfahren, 13. Fachtagung Rapid Prototyping, HAW Hamburg
- [6] **Bratrich, N. (2017):** Zukunftsweisender 3D-Metalldruck [sic!] [online]. Renault-Trucks, [abgerufen am: 23.01.2017], verfügbar unter: <https://www.renault-trucks.de/pressemitteilungen/3d-metalldruck.html>
- [7] **Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. und Grote, K. H. (2013):** Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 427 ff.
- [8] **Gerke-Cantow, R. und Hellwig, C. (2010):** Innovative, material-effiziente Produktion von Titangroßbauteilen mittels Titanfeinguss [online]. TITAL GmbH. 11.2010, [abgerufen am: 12.11.2018], verfügbar unter: <http://www.cleaner-product->

tion.de/fileadmin/assets/pdfs/Abschlussberichte/Abschlussbericht\_20118\_TITAL.pdf

- [9] **Feldhusen, J. und Gebhardt, B. (2008):** Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung [online]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-34009-6, verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10223382>, S. 62
- [10] **VDI 4499 Blatt 2: 2011-05:** Verein Deutscher Ingenieure e.V., Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [11] **Sauer, O. (2018):** Digitales Abbild - Was in den Digitalen Zwilling gehört [online]. TeDo Verlag GmbH [abgerufen am: 18. März 2019], verfügbar unter: <https://www.it-production.com/produktentwicklung/digitalen-zwilling-komponenten/>
- [12] **Damerau, T. und Vorsatz, T. (2016):** Demozelle Smarte Fabrik 4.0 [online]. Fraunhofer IPK, 02.2016 [abgerufen am: 14. November 2018], verfügbar unter: <https://www.plmportal.org/de/forschung-detail/demozelle-smarte-fabrik-4-0.html>
- [13] **Ehrlenspiel, K. und Meerkamm, H. (2017):** Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit [online]. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser. ISBN 978-3-446-44089-0, verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/buch/Integrierte+Produktentwicklung/9783446440890>
- [14] **Kalweit, A.; Paul, C.; Peters, S.; Wallbaum, R. (2012):** Handbuch für Technisches Produktdesign - Material und Fertigung - Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. 2. Auflage

ge, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-02641-6 ,  
S. 600 ff.

- [15] **aPriori (2018):** Design to Cost [online]. aPriori [abgerufen am:  
27. November 2018], verfügbar unter:  
<https://resources.apriori.com/design-cost-analysis>