

# Methodische Darstellung der „Relativität“ von Optimalbegriffen im Flugzeugvorentwurf am Beispiel von Flugzeugpanels

L. Beilstein<sup>a</sup>, P. Arnold<sup>b</sup>, S. Rudolph<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

<sup>b</sup> Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Deutschland

## Kurzfassung

Der Entwicklungsprozess eines Flugzeugentwurfs umfasst Aktivitäten von der strategischen Produktplanung über die Produktentwicklung bis hin zur Serienproduktion in Form einer wirtschaftlichen Positionierung am Markt. Dabei ist das Bestreben groß, eine sogenannte *Optimallösung* für den Gesamtentwurf zu generieren. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass eine computergestützte Wissensverarbeitung mittels graphenbasierter Entwurfssprachen für die Sicherstellung konsistenter Modelle aus den verschiedenen Entwurfssphasen essentiell ist und Optimallösungen ausschließlich für einen betrachteten Kontext gelten. Insbesondere der Aufbau einer automatisierten Prozesskette vom Entwurf bis in die Digitale Fabrik anhand von Flugzeugpanels ermöglicht dabei prinzipiell eine methodische Untersuchung des Begriffs der Optimalität unter dem Aspekt einer signifikanten Änderung des Modellkontextes.

## 1. Einleitung

Der Gesamtentwurf einer komplexen Flugzeugstruktur wird durch zahlreiche Flug- und Bodenlastfälle dimensioniert sowie durch weitreichende Randbedingungen u. a. aus Zulassungsvorschriften beeinflusst. Ausgehend von einer Marktanalyse, mittels der die Notwendigkeit eines neuen Entwurfs gerechtfertigt wird, kommen heute Methoden unterschiedlicher Detaillierungsgrade zum Einsatz, die in den verschiedenen Phasen des Entwurfsprozesses (Konzeptentwurf, Vorentwurf, Detailentwurf)<sup>1</sup> den Weg für ein wirtschaftliches Gesamtprodukt bereiten. Der dabei stets allgemein präsente Wunsch, die auftretenden Entwurfsprobleme bestmöglich bzw. *optimal* zu lösen, ist dabei an sich verständlich. Jedoch ergibt die in dieser Arbeit durchgeführte methodische Untersuchung, dass derartige Optimallösungen stets nur im direkten Kontext der lokalen Fragestellung gelten. Aus der methodischen Betrachtung folgt weiterhin, dass die systemisch wirklich optimale Entwurfslösung manuell meist auch gar nicht gefunden werden kann, da der hierfür erforderliche gesamtsystemische Kontext manuell in

hinreichendem Umfang und ausreichender Konsistenz aller Modelle, Methoden, Tools und Prozesse zeitnah nicht erstellt werden kann.

Eine neue, alternative Art der computergestützten Wissensverarbeitung, für die diese Einschränkung nicht mehr gilt, stellen die sogenannten graphenbasierten Entwurfssprachen dar [2]. Durch die vollständige digitale Abbildung des Entwurfswissens kann die Lösung der Entwurfsaufgabe über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg ganzheitlich automatisiert und damit unter unterschiedlichsten Anforderungen und Randbedingungen erneut maschinell wiederholt bzw. ausgeführt werden. Die durch die immer wieder mögliche maschinelle Übersetzung (Compilation) der Entwurfssprache in konsistente Teilmodelle zur Optimierung einzelner Systemfunktionen erlaubt damit die immer wieder neu erfolgende Modifikation des Systemkontextes im fortschreitenden Entwurfsprozess über die Zeit hinweg und ermöglicht damit Einsichten in Kopplungen vieler Entwurfsgrößen über disziplinäre Fachgrenzen (Entwurf mit Physik und Geometrie, Fertigung mit verschiedenen Fügeverfahren und Materialien usw.) hinweg.

Als konkrete Anwendung der methodischen Untersuchung wird in dieser Arbeit am Beispiel von Flug-

<sup>1</sup> Typische Einteilung des Flugzeugentwurfsprozesses nach RAYMER [1].

zeugrumpfschalen mit Hilfe graphenbasierter Entwurfssprachen eine automatisierte Prozesskette erstellt, anhand derer die Methodik zur Generierung optimaler, d. h. bezüglich eines bestimmten Kontextes dominanter Konstruktionslösungen durch eine Implementierung automatisierter Entwurfs- und Fertigungsanalysen dargestellt wird. Dadurch, dass bereits in einem frühen Stadium fertigungsnahe Geometriedaten eines Flugzeugrumpfes mit unterschiedlich definierten Bauteilgrenzen generiert werden können, lassen sich im vorgesehenen Topologie- und Parameterbereich durch die hinterlegten Entwurfsregeln nahezu beliebige konsistente Varianten der Struktur aufbauen. Die Dekomposition der Flugzeugrumpfstruktur in die einzelnen Bauteilklassen ist angelehnt an eine ungestörte reale Metallflugzeugrumpfsektion. Die abgeleitete geometrische Dekomposition<sup>2</sup> umfasst die Haut (Skin), Längsversteifungen (Stringer), Clips und Spante (Frames). Ausgehend von Flugzeugrumpfhäuten verschiedener Hautdicken und Abmessungen werden beispielhaft verschiedene Fertigungszellen erzeugt, die die einzelnen Montage- und Fertigungsschritte darstellen.

Die erzeugbare Vielfalt an Flugzeugpanelvarianten wird nicht nur in der frühen Designphase durch analytische Methoden evaluiert, indem aufbauend auf abstrahierten Strukturmodellen dimensionslose Gewichtsfunktionale für die regelbasierte Auslegung gewichtsminimaler Strukturverbindungen zum Einsatz kommen, sondern es wird zusätzlich auch die Prozesskette vom Vorentwurf bis in die Digitale Fabrik unterstützt, erstellt und genutzt. Dadurch lassen sich im Rahmen der Fertigungssimulation in der Digitalen Fabrik Untersuchungen mit Fertigungsprozessen verschiedenste Variationen u. a. der Fügetechnik darstellen und simulieren.

Indem zudem die Möglichkeit geschaffen wird, die erzeugten Varianten zusätzlich zu einer physikalischen Gewichtsbewertung Simulationen aus dem Fertigungsprozess und zukünftig einer Kostenabschätzung u. a. zu unterziehen, kann nicht nur aus Leichtbausicht das Entwurfsziel des Gewichtsminimums aufgezeigt werden, sondern abhängig von der Art der gewählten Gütfunktion die jeweiligen spezifischen Optima der Entwurfslösung herausgearbeitet werden. Dieses Optimum hängt jedoch vom betrachteten Kontext ab und ist daher stets nur *relativ* zu interpretieren.

<sup>2</sup>Andere Dekompositionen von Entwürfen (z. B. funktionelle und mathematische) sind möglich.

### 1.1. Graphenbasierte Entwurfssprachen

Graphenbasierte Entwurfssprachen sind eine Form regelbasierter Entwurfssysteme. Entwurfssprachen zeichnen sich dadurch aus, dass in einem sogenannten Meta-Modell alle relevanten parametrischen und topologischen Entwurfsinformationen zentral abgelegt sind. Den Entwurfssprachen liegt eine Grammatik zugrunde, die aus Vokabeln und Regeln besteht [3]. Ein Entwurfscompiler<sup>3</sup> verarbeitet die Regeln maschinell und leitet daraus die spezifischen Datenformate für die Analyse-Modelle der unterschiedlichen Design-Domänen ab (z. B. CAD, CFD, FEM). Die Architektur des Design Compilers ist in Abbildung 1 dargestellt.

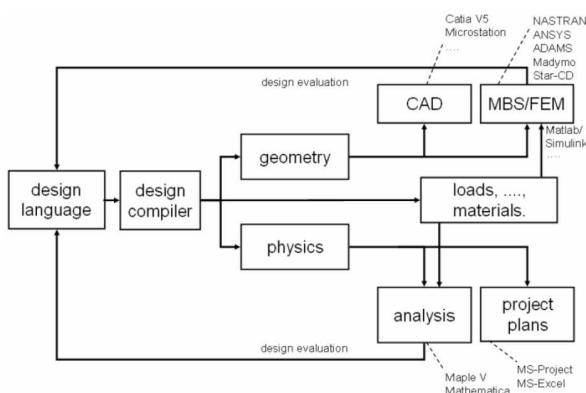


Abbildung 1: Architektur einer Entwurfssprache [3]

Der hier verwendeten Flugzeugentwurfssprache liegt eine typische Rumpfstruktur in Halbschalenbauweise zugrunde. Der strukturelle Aufbau beschränkt sich auf Sektionen, die aus sogenannten ungestörten Panels<sup>4</sup> bestehen. Angelehnt an die realen Strukturbaueteile einer Sektion erfolgt die geometrische Dekomposition und damit die Definition der Klassen für die Entwurfssprache (siehe Abbildung 2).

Durch die regelbasierte Umsetzung lassen sich nahezu beliebige konsistente Varianten der Struktur

<sup>3</sup>Der Entwurfscompiler 43, der von der IILS mbH Stuttgart in Kooperation mit dem Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen der Universität Stuttgart entwickelt wurde, ermöglicht die grafische Definition einer Entwurfssprache in der standardisierten Modellierungssprache UML.

<sup>4</sup>Fenster, Türen u. ä. finden hier zunächst keine Berücksichtigung, wobei eine Erweiterung der Entwurfssprache um weitere Strukturbaueteile für einen detaillierteren Rumpfaufbau jederzeit möglich ist.

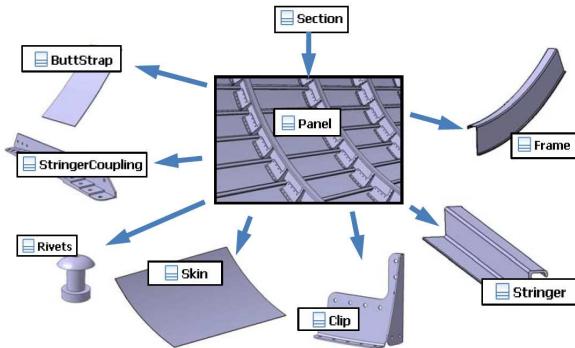


Abbildung 2: Dekomposition einer Panel-Struktur [4]

aufbauen. Dies ist anhand Abbildung 3 beispielhaft mit zwei Varianten verdeutlicht. Weitere Details hierzu finden sich in [4].

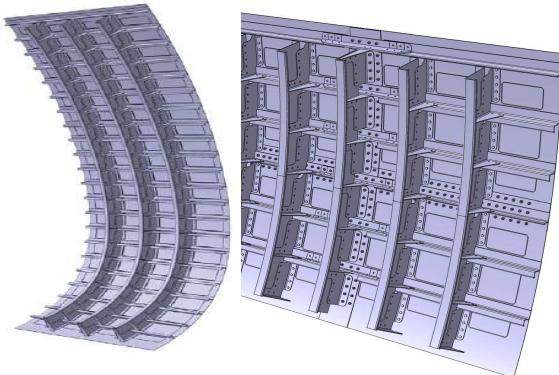


Abbildung 3: Varianten von Flugzeugpanels [4]

Der zur Erzeugung der Panelvarianten erforderliche Prozessablauf kann über ein Aktivitätsdiagramm<sup>5</sup> abgebildet werden. Darin werden aus den allgemeinen Klassen durch Regeln die Instanzen<sup>6</sup> erzeugt, die den Zusammenbau der Struktur aus den zur Verfügung stehenden Vokabeln definieren.

## 1.2. Aufbau einer Prozesskette

Die Rumpfstruktur eines Flugzeugs wird in Sektionen eingeteilt, die wiederum aus einzelnen Panels bestehen und über Längs- und Quernähte vernietet werden. In Abhängigkeit der Belastungen auf

die Struktur werden hauptsächlich 2-reihige und 3-reihige Verbindungen eingesetzt. Prinzipiell wird eine Minimalanzahl an einzelnen Hautfeldern angestrebt, da Bauteilgrenzen zusätzliches Gewicht implizieren. Aufgrund von Fertigungsrandbedingungen, Stabilitätsauslegungen u. a. ist die Größe der Hautfelder aber in Grenzen vorgegeben.

Zur substantiellen Untersuchung dieser vielfältigen gegensätzlichen Einflüsse wird ein Meta-Modell zur Abbildung eines exemplarischen Entwurfsprozesses aufgebaut, wobei im hier gezeigten Beispiel die Variation der Geometrie der Hautfelder, der Pocket-Fräsvorgang und die Umsetzung des Fügeprozesses der Nähte vorgesehen sind. Um überhaupt schnelle Variationsrechnungen im Produktentwicklungsprozess durchführen zu können ist die Implementierung zahlreicher digitaler Modelle aus den verschiedenen Phasen eines Entwurfsprozesses zur Unterstützung für eine Entwurfsentscheidung unumgänglich. Um jedoch auch Fertigungsaspekte mit berücksichtigen zu können sollte idealerweise bereits der Vorentwurf mit dem Herstellungsprozess verknüpft sein.

Ausgehend von Flugzeugrumpfhäuten verschiedener Hautdicken und Abmessungen werden deshalb i. F. beispielhaft verschiedene Fabrikzellen erzeugt, die die einzelnen Montage- und Fertigungsschritte darstellen. Die nun verfügbare Vielfalt an Flugzeugpanneldesigns wird nicht nur in der frühen Designphase evaluiert, sondern zeigt die Möglichkeit auf, durch den Einsatz graphenbasierter Entwurfsprachen die Prozesskette bin in die Digitale Fabrik zu etablieren und vorteilhaft einzusetzen.

## 2. Physikalische Gewichtsbewertung

Im Flugzeugbau werden die Ideen des Leichtbaus konsequent umgesetzt, da ein direkter Zusammenhang zwischen dem Gewicht und der Leistung der Fluggeräte besteht. Man ist bestrebt das Strukturgewicht der Konstruktionen möglichst zu minimieren, wobei immer zu berücksichtigen ist, dass die Wirtschaftlichkeit neuer Entwürfe gewahrt bleiben muss. Vielfach spielen weitere Randbedingungen im Entwurfsprozess eine Rolle, die definiert werden von der zukünftigen Betreiberfluglinie, den Herstellern selbst oder die aus den Zertifizierungs-Spezifikationen stammen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch vor allem auf der methodischen Untersuchung zur Generierung von Optimallösungen im Vorentwurf hinsichtlich einem minimalen Strukturgewicht und der Umsetzung

<sup>5</sup> Ausgehend von einem Startknoten und der Festlegung des Ablaufs werden, durch das Aktivitätsdiagramm gesteuert, die einzelnen Transformationsschritte durchlaufen.

<sup>6</sup> Eine Instanz – oft auch als Objekt bezeichnet – ist in UML die konkrete Ausprägung des Objekts einer Klasse.

eines automatisierten Entwurfsprozesses bis in die Digitale Fabrik. Dieser Ansatz wird exemplarisch für das Zusatzgewicht von Längsnähten und den Fabrikzellen des Fügevorgangs demonstriert. In diesem Kapitel werden die verwendeten physikalischen Gewichtsgleichungen zur Bewertung gewichtsminimaler Strukturverbindungen vorgestellt, die beispielhaft als Regeln im Entwurfsmodell für einen automatisierten Auswahlprozess der Fügetechnik hinterlegt sind. Exemplarisch wird das Nieten, das am häufigsten eingesetzte Fügeverfahren für die Flugzeugprimärstruktur, herangegriffen<sup>7</sup>.

## 2.1. Gewichtsgleichung für Strukturverbindungen

Basierend auf einem vereinfachten analytischen Modell für genietete Strukturverbindungen können symbolische Gewichtsgleichungen entwickelt werden. Dies wurde bereits in [6] ausführlich dargestellt. Ausgehend von einer Belastung auf das Strukturelement und den geometrischen Größen wird die zulässige Spannung als Funktion dieser Auslegungsparameter ausgedrückt. Man beschränkt sich hier auf eine statische Festigkeitsauslegung zur Dimensionierung der Nietverbindung. Mit Einführung des klassischen Strukturkennwerts  $K$  nach WIEDEMANN [7] kann die Gewichtsgleichung zusammengefasst folgendermaßen dargestellt werden:

$$\frac{G}{g b l^2} = a_1 \left( \frac{\rho}{R_m} \right) K + a_2 \left( \frac{\rho}{R_m^2} \right) K^2 \quad (1)$$

- mit  $G$  : Gesamtgewicht der Verbindung  
 $g$  : Erdbeschleunigung  
 $b$  : Breite  
 $l$  : Länge  
 $\rho$  : Dichte  
 $R_m$  : Bruchfestigkeit  
 $a_1$  : Variable 1  
nietsspezifischer Parameter  
 $a_2$  : Variable 2  
nietsspezifischer Parameter

Der dimensionsbehaftete klassische Strukturkennwert (hier:  $K=F/bl$ ) hat die Dimension einer Spannung und wird zweckmäßig eingesetzt als struk-

<sup>7</sup>Dies stellt jedoch keinerlei methodische Einschränkung dar, wie in [5] für verschiedene Fügetechniken gezeigt wurde.

turgeometrische Ähnlichkeitskenngröße [7–9]. Allerdings konnte gezeigt werden, dass der klassische dimensionsbehaftete Strukturkennwert nicht als globale Ähnlichkeitskennzahl<sup>8</sup> herangezogen werden kann und ein dimensionsloser Strukturkennwert zur Bewertung geeigneter erscheint [5]. Unter Zuhilfenahme der Dimensionsanalyse wird hierzu die dimensionsbehaftete Beschreibungsfunktion durch Einführung geeigneter Ähnlichkeitskennzahlen in eine dimensionslose Gewichtsgleichung überführt. Der formale Ansatz der Dimensionsanalyse garantiert dabei allgemeingültige Kennzahlen. Für eine dimensionsanalytische Betrachtung wird das Pi-Theorem von BUCKINGHAM [10] verwendet. Dieses sichert für jede dimensionshomogene und vollständige Funktion  $f(x_1, \dots, x_n) = 0$  die Existenz einer Funktion  $F(\pi_1, \dots, \pi_m) = 0$  mit  $m = n - r$  dimensionslosen Kennzahlen  $\pi_j$  (mit  $j = 1, \dots, m$ ). Diese Kennzahlen bilden zudem die Grundlage einer objektiven Bewertungsmethodik [11] und die Basis für einen optimierungsgestützten Entwurf.

$$\pi_j = x_{r+j} \prod_{i=1}^r x_i^{-\alpha_{ji}} \quad (2)$$

Aus der analytischen Gewichtsgleichung (1) und den darin enthaltenden physikalischen Parametern kann die Relevanzliste und daraus die Dimensionsmatrix erstellt werden. Es entstehen  $m = n - r$  dimensionslose Kennzahlen (auch als Potenzprodukte bezeichnet), wobei  $r$  den Rang der Dimensionsmatrix darstellt, die weiter durch Multiplikation mehrerer  $\pi_j$  auf zwei physikalisch vorstellbare Kennzahlen reduziert werden. Die charakteristischen Kennzahlen sind nachfolgend aufgeführt [5], wobei  $\pi_B$  dem sogenannten dimensionslosen Strukturkennwert entspricht.

$$\pi_A = \frac{G R_m}{F l g \rho} \quad \pi_B = \frac{F}{R_m l b} \quad (3)$$

Durch Einsetzen dieser Kennzahlen in die Gewichtsgleichung (1) ergibt sich nachfolgend das dimensionslose Gewichtsfunktional.

$$\pi_A = \pi_1 \pi_C \pi_B \quad (4)$$

<sup>8</sup>Um Missverständnissen vorzubeugen wird an dieser Stelle explizit auf den Unterschied zwischen dimensionslosen Ähnlichkeitskennzahlen (im Sinne des Pi-Theorems nach BUCKINGHAM [10]) und sonstigen dimensionsbehafteten Größen hingewiesen.

mit  $\pi_C$ : Anzahl der Nietreihen  
 $\pi_1$ : Dimensionslose Variable  
 nietspezifischer Parameter

Betrachtet man den nicht-optimalen Gewichtsanteil<sup>9</sup> ( $\pi_{A_{Ver}} - \pi_{A_{Ref}}$ ) einer genieteten Verbindung erhält man für die Variation der Nietreihenanzahl eine Geradenschar gemäß Abbildung 4.

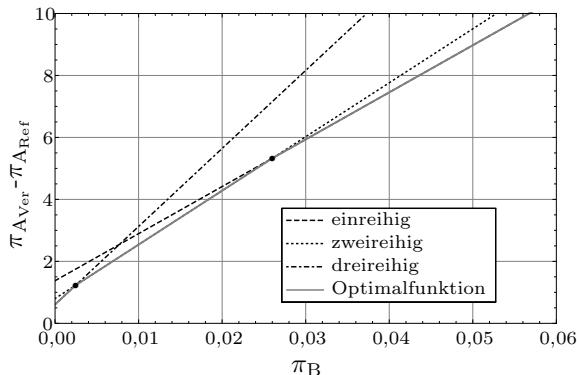


Abbildung 4: Strukturelles Zusatzgewicht einer überlappten Nietverbindung und zugehörige Optimalfunktion

Es können drei Bereiche mit den sogenannten Wechselpunkten ausgemacht werden, die ein Optimum – also das niedrigste Zusatzgewicht der gefügten Verbindung – darstellen. Aus dieser Betrachtung heraus könnte somit ein Optimum unter dem Gesichtspunkt der Fügetechnik hergeleitet werden (1. Optimum). Der zugehörige Kontext umfasst ein Funktional mit zahlreichen Variablen aus dem Gebiet der Geometrie, der Werkstoffe und der Strukturmechanik.

### 3. Modell der Digitalen Fabrik

Zur weiteren Steigerung der Effizienz ist der Einsatz von rechnergestützten Entwurfsmethodiken essentiell. Der Begriff der *Digitalen Fabrik* nach Richtlinie VDI 4499 [13] ist folgendermaßen definiert: „Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die

<sup>9</sup>Nach NIU [12] besteht der nicht-optimale Gewichtsanteil aus Randbedingungen resultierend aus dem praktischen Design wie z. B. Verbindungsstellen und Standardmaße.

durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ Ein wichtiges Ziel der Digitalen Fabrik ist während des Planungsprozesses eine abgesicherte Produktqualität zu garantieren [14]. Nach WESTKÄMPFER [15] müssen u. a. Fertigungs-, Montagesysteme und Prozesse schnell an veränderte Aufgaben angepasst werden können, um wirtschaftlich optimale Betriebspunkte zu realisieren. Zur Darstellung der Prozesse wird häufig auf phasenorientierte Prozessmodelle zurückgegriffen. Dabei wird der Gesamtablauf in einzelne Teilprozesse zerlegt, die iterativ miteinander verknüpft sind und mehrere, verschiedene Zielfunktionen erfüllen müssen.

Im Sinne einer Fertigungsoptimierung wird es immer wichtiger, bereits den Bereich der Forschung und der Produktentwicklung in das Konzept der Automatisierung zu integrieren und damit eine durchgängige Prozesskette vom Vorentwurf bis hin zur Produktion zu erschließen. Dabei muss die Herausforderung des Datenaustauschs zwischen verschiedenen digitalen Modellen gelöst werden. In einer Arbeit von ARNOLD [16] wird die in der Vergangenheit bestandene Lücke zwischen dem Produktdesign und dem Produktionsprozess unter Zuhilfenahme graphenbasierter Entwurfssprachen geschlossen.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5 den Nietvorgang in der Digitalen Fabrik. Es ist bekannt, dass für den realen Nietprozess von Flugzeugstrukturen spezielle<sup>10</sup> Roboter eingesetzt werden. In diesem Paper liegt der Fokus auf der Erstellung einer Prozesskette zur Verknüpfung von Entwurfsregeln aus dem Vorentwurf mit dem Fertigungsprozess, weshalb zunächst auf den Aufbau exakt detailgetreuer Fertigungsstraßen verzichtet wurde. Durch die große Anzahl an verschiedenen Simulationsmodellen in der Digitalen Fabrik soll im Folgenden beispielhaft die Verknüpfung zweier Modelle aufgezeigt werden. Es sind zahlreiche weitere Verknüpfungen möglich; so wurde in [16] z. B. eine Lackiersimulation für ein Flugzeugpanel implementiert.

<sup>10</sup>Es kommen z. T. speziell entwickelte Nietroboter (Eigenschaften u. a. flexibel, intelligent usw.) zum Einsatz. Das spielt methodisch im Sinne auf die Abstraktion als vorgegebene kinematische Kette in der Simulation keine Rolle.

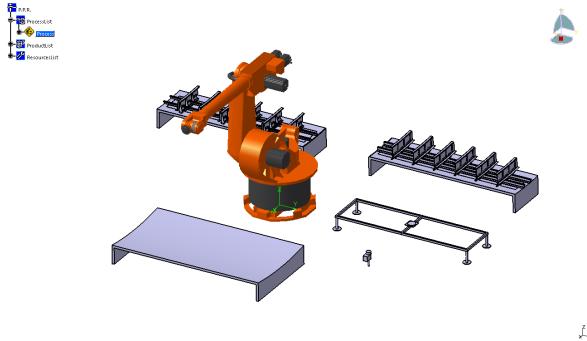


Abbildung 5: Fügevorgang in der Digitalen Fabrik

### 3.1. Mechanisches Fräsen

Alle notwendigen Daten werden auf einer einheitlichen semantischen Ebene abgelegt. Dies ermöglicht ein Ansteuern des CNC-Patterns in DELMIA<sup>11</sup> zur Erstellung der Pockets mittels hinterlegter Modelltransformationen. Ausgehend von einer Flugzeughaut mit konstanter Dicke wird – abhängig von der Position der Längsversteifungen und Spante aus dem Entwurf – die Materialabtragung simuliert (siehe hierzu Abbildung 6).

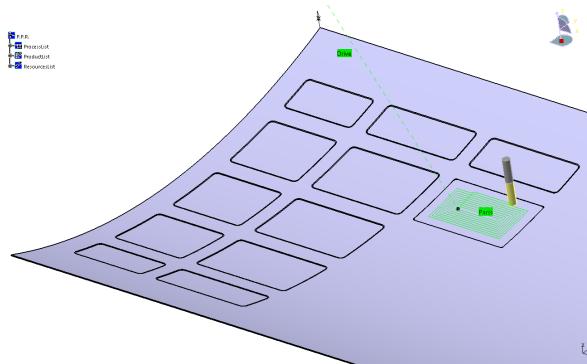


Abbildung 6: Gewichtsoptimierung durch mechanisches Fräsen von Pockets

Fertigungstechnisch muss zur Erzeugung der taschenartigen Aussparungen lediglich ein zylindrischer Fräskopf in einer mäandernden Bewegung über das Werkstück geführt werden, so dass durch die tiefenversetzte Hin- und Herbewegung des Fräisers die vordefinierte Form der Aussparung entsteht.

<sup>11</sup>DELMIA steht hier stellvertretend für ein digitales Fabrikprogramm, das als Komponente einer kompletten Toolsuite die Daten aus dem dazu passenden Geometriemodeller CATIA direkt übernehmen kann.

### 3.2. Fügesequenz

Die Reihenfolge des Fertigungsprozesses kann mittels eines Lösungspfadgenerators<sup>12</sup> für mathematische Gleichungen ermittelt werden. Dazu wird analog aus den topologischen Kopplungen der Strukturbauenteile eine Sequenz für den Fügeprozess [16] ermittelt. Durch zusätzliche Randbedingungen (fertigungstechnische, geometrische usw.) wird die Anzahl der möglichen Sequenzen weiter eingeschränkt [16]. Der mögliche Lösungsraum ist aber dennoch sehr groß. (Anmerkung: Zur Ermittlung der optimalen Sequenz dürften keinerlei Randbedingungen eingeführt werden, was jedoch nicht praktikabel ist. Weitere Detailinformationen zum verwendeten Algorithmus sind [16, 17] zu entnehmen.) Im Allgemeinen kann eine vollständige Pfadplanung – beispielsweise einer Schweißzelle mit mehreren Robotern – PSPACE-vollständig<sup>13</sup> [18] sein. Damit ist unter Umständen eine optimale Lösung mit heutigen Computerkapazitäten in polynomieller Laufzeit nicht ermittelbar.

Der nachfolgende Roboterpfad ist deshalb in diesem Fall über einen heuristischen Ansatz modelliert. Es werden die einzelnen Panels ausgerüstet, die dann im nächsten Schritt über eine überlappte Verbindung vernietet werden. In der nachfolgenden Abbildung 7 ist die Längsnaht gezeigt, wobei zur besseren Übersichtlichkeit die restlichen Bauteile ausgeblendet sind.

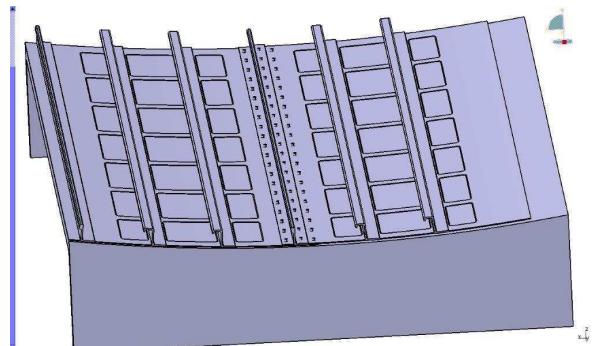


Abbildung 7: Vernietete Längsnaht zweier Skins

<sup>12</sup>Aus Teilmodellen entsteht durch den maschinellen Übersetzungsprozess ein Gleichungssystem, welches mittels Graphenalgorithmen analysiert wird und alle Lösungspfade ermittelt. Die Lösungen können in einem symbolischen Computeralgebraprogramm gefunden werden.

<sup>13</sup>In der aktuellen Forschung wird davon ausgegangen, dass in der Komplexitätsklasse PSPACE die Klasse der NP-vollständigen Probleme enthalten ist.

## 4. Diskussion

Die Herleitung von dimensionslosen physikalischen Gleichungen zur Gewichtsberechnung und die Möglichkeit der Implementierung dieser als Optimalfunktionen stellt die Grundvoraussetzung für Anwendungen der rechnerunterstützten Entwurfs-erzeugung dar. Beispiellohaft wurden gewichtsoptimale Funktionale für gefügte Verbindungen hergeleitet und mittels graphenbasierter Entwurfssprachen der Aufbau einer automatisierten Prozesskette vom Vorentwurf bis in die Digitale Fabrik methodisch anhand von Flugzeugpanels umgesetzt, wobei für verschiedene Teilprozesse jeweils im gewählten Kontext Optima ausgewiesen wurden.

Dabei zeigt die nahezu direkt ersichtliche Existenz der verschiedenen Optimalbegriffe aus verschiedenen Kontexten, dass der Begriff des Optimums an sich in der Praxis wahrscheinlich gar nicht die herausragende Rolle spielt, die ihm aufgrund seiner theoretischen Aussagekraft an sich zukommt. In diesem Sinne ist die „Relativität“ des Optimalbegriffes zu sehen und als auf seinen Kontext bezogen zu begreifen. Wenn also der Optimalbegriff als Zielvorstellung nicht taugt, stellt sich die Frage, durch welches andere Gütekriterium er im Gesamtentwurf komplexer Systeme ersetzt werden kann. Da die bisherigen Untersuchungen aufzeigen, dass sich der Optimalbegriff wahrheitsgemäß bei Kontextänderung verschieben wird, wäre es durchaus vorstellbar, dass Kriterien wie *Robustheit* an diese dominante Stelle als Charakteristikum des Entwurfs treten werden. Die hier vorgestellte graphen-basierte Entwurfssprache von der Konzeptionspha-se bis in die Digitale Fabrik erscheint aus unseren bisherigen Erfahrungen zur systematischen Unter-suchung derartiger Begrifflichkeiten gut geeignet.

## 5. Zusammenfassung

Für eine regelbasierte Implementierung von gewichtlichen Optimallösungen von Strukturverbindungen im Flugzeugvorentwurf wurden beispielhaft dimensionslose Gewichtsfunktionale entwi-ckelt. Aufbauend auf einer Flugzeugentwurfssprache für die Generierung von geometrischen CAD-Modellen von Flugzeugsektionen wurde eine Prozesskette von der Vorentwurfssphase bis in die Digitale Fabrik aufgebaut. Die Digitale Fabrik ist ein Werkzeug zur Unterstützung zahlreicher realer Produktionsprozesse und bietet durch den Einsatz digitaler Modelle die Möglichkeit, Entwurfs-

entscheidungen sehr früh simulieren und absichern zu können. Da sich durch die schnelle Änderung der betrachteten Kontexte (z. B. Entwurf, Ferti-gung, Betrieb) auch die darauf bezogenen Optimallösungen verschieben bzw. verändern, muß die Relativität von Optimalbegriffen im Entwurf kom-plexer Systeme in Zukunft, weitaus deutlicher als bisher, betont und herausgearbeitet werden.

## Schriftum

- [1] D. P. Raymer, Aircraft design : a conceptual approach, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, 2012.
- [2] S. Rudolph, B. Kröplin, Entwurfsgrammatiken - Ein Paradigmenwechsel?, Der Prüfingenieur (April) (2005) 34–43.
- [3] S. Rudolph, Übertragung von Ähnlichkeitsbegriffen, Habilitation, Universität Stuttgart, Stuttgart (2002).
- [4] J.-P. Fuhr, Erstellung einer Entwurfssprache zur re-gelbasierten Generierung von Flugzeuggrumpfsektionen, Studienarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart (2010).
- [5] L. Beilstein, Eine Methodik zur analytischen Gewichts-abschätzung und Bewertung von Strukturverbindun-gen im Flugzeugvorentwurf, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart (2012).
- [6] L. Beilstein, F. Mutschler, S. Rudolph, K. Drechsler, Eine Methodik zur Gewichtsabschätzung von Verbin-dungselementen im Flugzeugvorentwurf (2009).
- [7] J. Wiedemann, Leichtbau : Elemente und Konstruktion, Springer, Berlin, 2007.
- [8] H. L. Cox, The design of structures of least weight, Per-gamon Press, Oxford, 1965.
- [9] F. R. Shanley, Weight-strength analysis of aircraft structures, McGraw-Hill, New York, 1952.
- [10] E. Buckingham, On Physically Similar Systems; Illus-tration of the Use of Dimensional Equations, Physical Review (4) (1914) 345–376.
- [11] S. Rudolph, Eine Methodik zur systematischen Bewer-tung von Konstruktionen, Diss., Universität Stuttgart, Stuttgart (1994).
- [12] M. C.-Y. Niu, Airframe Structural Design, Comilit Press Ltd., Hong Kong, 1988.
- [13] Digitale Fabrik : Grundlagen, Richtlinie VDI 4499 Blatt 1 (Mai 2006).
- [14] U. Bracht, D. Geckler, S. Wenzel, Digitale Fabrik : Me-thoden und Praxisbeispiele, Springer, Heidelberg, 2011.
- [15] E. Westkämper, Erfolg in Netzwerken, Springer, Hei-delberg, 2002.
- [16] P. Arnold, S. Rudolph, Bridging the gap between pro-duct design and product manufacturing by means of graph-based design languages (2012).
- [17] D. Serrano, Constraint management in conceptual de-sign, Diss., MIT (1987).
- [18] M. Rupp, Zeitoptimale Bearbeitungsreihenfolgen für mehrere Schweißroboter: Modelle und Algorithmen, Diplomarbeit, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt (2004).