

IN FÜNF MINUTEN VON DER AUFGABE ZUR OPTIMALEN LÖSUNG – EIN BEITRAG ZUR ALGORITHMISIERUNG DER FRÜHEN PHASEN

Herbert Birkhofer

1 Ausgangssituation

In zunehmendem Umfang bilden Bleche die Ausgangsbasis vieler metallischer Bauteile. Diese Entwicklung ist vor allem durch die vorteilhaften technischen und ökonomischen Eigenschaften von Blechen begründet. Weitere Eigenschaften, wie z. B. die gute Schneid-, Stanz- und Schweißbarkeit, sowie die im Vergleich zu Gussprodukten homogenen Werkstoffeigenschaften, machen Blech zu einem effizienten, flexibel einsetzbaren Halbzeug [1].

Bislang werden Bleche aber nur in ihrer Abwicklung, bzw. in der Blechebene geometrisch verändert. An Grenzen stößt man, wenn Blechbauteile nicht nur als flächiges Tragwerk oder gewickelte Profilstruktur ausgebildet werden sollen, sondern darüber hinaus auch Verzweigungsstellen verlangt werden. Dies zwingt den Konstrukteur bislang, entweder Materialdopplungen zu erzeugen, auf differentielle Bauweisen mit gefügten Einzelteilen oder auf andere Halbzeuge auszuweichen [2].

In vielen Fällen ermöglichen verzweigte Strukturen, wie sie nahezu überall in der Natur auftreten, die Realisierung einer gewünschten Funktion auf kleinstem Raum oder mit kleinster Masse. Durch das gezielte Einbringen von Verzweigungen in Strukturen lassen sich diese, z. B. im Hinblick auf ihre Statik und Stabilität, optimieren [3]. Oft werden verzweigte Strukturen auch eingesetzt, um Oberflächen gebundene physikalische oder chemische Prozesse auf kleinstem Bauraum zu ermöglichen, z.B. in thermodynamischen Systemen für optimalen Wärmeübergang, in der Akustik und Optik, z. B. zur Absorption oder Reflexion von Wellen, oder in der Strömungslehre zur Wechselwirkung zwischen Fluid und Struktur.

Bei der Fertigung von verzweigten Strukturen wird zwischen der differentiellen und der integralen Bauweise unterschieden. Differentiell gefertigte Bauteile weisen wegen der notwendigen Füge- bzw. Verbindungsoperationen Schwachstellen (z.B. Klaffung, Kerbwirkung, Wärmeübergangsbarriere) auf. Integrale Strukturen sind aufgrund der fehlenden Verbindungskomponenten im Allgemeinen leichter, funktional besser und weniger fehleranfällig als differentielle Lösungen [4].

Technisch werden metallische Produkte in Integralbauweise zurzeit vor allem durch Urform- oder Zerspanprozesse realisiert [5]. Umformtechnisch hergestellte, integrale verzweigte Strukturen können bislang nur mit Verfahren der Massivumformung gefertigt werden, wie z.B. durch Strangpressen, Warmwalzen oder Schmieden [6]. Bei der Anwendung von Blechbauweisen können einteilige Verzweigungen bislang nicht erzeugt werden.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 666 ist ein neuer Lösungsansatz angestrebt. Hier soll die Fertigung integraler Blechbauteile im kontinuierlichen Prozess erfolgen, in den spanende und umformende Verfahren integriert sind. Hier sind insbesondere neuartige Spaltverfahren zu nennen, die erst seit Kurzem zur Verfügung stehen.

Beim Spaltprofilieren wird ein translatorisch bewegter Blechzuschnitt partiell in der Blechebene gespalten. Das verfahrensspezifische Werkzeugsystem besteht aus einer Spaltwalze und unterstützenden Hilfswalzen. Das ortsfeste Werkzeugsystem formt in

diskreten Stufen das Werkstück bis zu einem Bauteil der gewünschten Endgeometrie um. Die Verzweigung entsteht in der Längskante der Blechplatinen bzw. -coils durch ein Auseinanderfließen des Werkstoffes (Bild 1).



Bild 1: Verfahrensprinzip des Spaltprofilierens und Musterteile [13]

Die umformbedingten Verfestigungen sind jeweils im Kontaktbereich der Spaltwalze maximal und nehmen mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche ab. Bereits bei einer Gesamspalttiefe von $y_{ges}=10$ mm werden maximale Härtesteigerungen bzw. Vergleichsumformgrade von mehr als 50 % bzw. bis zu 500% ermittelt. Dies eröffnet Branchen übergreifend neue Perspektiven für verbesserte Produkte, wie z. B. im Automobilbau, im Schiffs- und Flugzeugbau, in der Verfahrenstechnik, in der Konsumgüterindustrie oder im Bauwesen.

2 Problemstellung für die Entwicklung spaltprofilierter Bauteile

Die Fertigung integraler verzweigter Blechstrukturen lässt ein erhebliches Potential für innovative Produkte erwarten. Dieses Potential gezielt zu nutzen erfordert neue Wege, um die Limitierungen im Denken von Entwicklern zu überwinden.

Menschliches Problemlösen ist gekennzeichnet durch die Fähigkeit, auch mit vagen und unvollständigen Informationen erfolgreich umzugehen und daraus Schlüsse ziehen zu können. Eine extreme Einschränkung besteht allerdings in der Menge der gleichzeitig verarbeitbaren Informationen im Arbeitsgedächtnis, die auf etwa 7 Informationseinheiten, so genannten „Chunks“ begrenzt ist. Insofern ist der menschliche „Denkapparat“ im Grunde genommen nur unzureichend zum Lösen komplexer Probleme ausgestattet. Gute Problemlöser nutzen deshalb in hohem Maße Erfahrung und Wissen aus früheren Problembearbeitungen, wobei bewährte Verhaltensweisen als Verhaltensmuster verinnerlicht und bevorzugt bei neuen Problemen eingesetzt werden. Der Nutzen von Erfahrung in Form verinnerlichter Verhaltensmuster und abstrahierter Objektmodelle [7] kann allerdings zu gravierenden Fehlentwicklungen oder zumindest suboptimalen Lösungen führen.

Seit vielen Jahren ist man in der Produktentwicklung deshalb bestrebt, den Konstruktionsprozess in algorithmisierbare Einzelschritte aufzuteilen, die eine vollständige und kontinuierliche Bearbeitung mit dem Rechner ermöglichen. Schon früh führten diese Anstrengungen zu systematisch und strukturiert aufgebauten Konstruktionskatalogen [8], welche zusammen mit einer entsprechenden Gliederung des Konstruktionsprozesses die Grundlage für einen verstärkten Rechneinsatz schaffen sollte. Untersuchungen zur generellen Algorithmisierbarkeit der Konstruktion [9] und der Betonung des iterativen Charakters von Vorgehensplänen [10] führten in den darauf folgenden Jahren zu einer stärkeren Betonung des Konstrukteurs und der Kreativität. In der jüngeren Vergangenheit

wird unter dem Begriff „wissensbasiertes Konstruieren“ wieder verstärkt an der Implementierung des Konstruktionsprozesses auf dem Rechner gearbeitet [11].

Die durchgängige Rechnerunterstützung des Konstrukteurs ist besonders in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses nur in einigen elementaren Arbeitsschritten etabliert [11]. In aller Regel liegt dabei ein Entwurf, zumindest aber eine Grundstruktur eines Produkts vor, dessen konkrete Eigenschaften dann mit Hilfe von Auslegungs- und Optimierungsalgorithmen ermittelt werden. Ein Prototyp dieses Verfahrens ist der parametrisierte CAD-Entwurf, dessen geometrische Eigenschaften aufgabenspezifisch festgelegt werden. Weitaus seltener finden sich Arbeiten zur algorithmisierten Erstellung von Produktstrukturen. Bekannt sind Algorithmen zum Getriebeentwurf, in denen die Stufenanzahl und Achslage der Ein- und Ausgangswellen verändert werden kann. Die Erzeugung gänzlich neuer Bauteile direkt aus den Anforderungen wird ansatzweise bei mechanisch beanspruchten Bauteilen mit Hilfe der FEM-Rechnung durchgeführt [11].

Die Frühen Phasen in der Produktentwicklung werden daher heutzutage allgemein als Domäne des kreativen und durch Methoden unterstützten Vorgehens aufgefasst. Der Rechneinsatz beschränkt sich weitgehend auf die Erleichterung der Handhabung von Methoden, ist aber von der eigentlichen Lösungsgenerierung ausgeschlossen. Vielmehr herrscht die Erkenntnis vor, dass die Frühen Phasen wegen der Unbestimmtheit von Lösungsweg und Lösungseigenschaften den Menschen mit seinen Einschätzungen und Erfahrungen in der Produktentwicklung geradezu benötigen, um dann, wenn dieser in einem Grobentwurf einigermaßen verlässlich Geometrie und Werkstoffdaten festgelegt hat, diese in der weiteren Bearbeitung mit CAD zu konkretisieren.

3 Ziele

Die angesprochenen Unzulänglichkeiten der zur Konstruktion verzweigter Blechprofilstrukturen notwendigen Produktentwicklungsprozesse lassen einen klaren Handlungsbedarf erkennen. In dem Sonderforschungsbereich 666 sollen Konstruktionsmethoden und -verfahren gefunden werden, mit deren Hilfe im Hinblick auf ihre Aufgabenstellung optimierte verzweigte Strukturen in integraler Blechbauweise algorithmenunterstützt dargestellt werden können. Dazu sollen Wege zur systematischen und automatisierten Generierung von Lösungen aus Markt- und Kundenerwartungen heraus sowie einer durchgängigen digitalen Produktmodellierung gefunden werden. Hierzu sollen neben konstruktionsmethodischen Vorgehensweisen auch Modelle und Methoden aus der Mathematik und der Informationstechnologie einfließen.

Der Fokus der Arbeiten liegt dabei auf der weitgehend vollständigen Algorithmisierung der Frühen Phasen bei der Entwicklung spaltprofilierte Profile. Es geht also nicht um die alltäglich praktizierte rechnerunterstützte Optimierung einer parametrisierten Bauteilgeometrie, sondern um die rechnerunterstützte Bearbeitung aller Prozesse der Aufgabenklärung und Konzeptphase.

4 Lösungsansatz

Ausgangspunkt des hier beschriebenen algorithmenbasierten Ansatzes ist, dass sich menschliches Konstruktionsdenken in den Frühen Phasen auf mentale Bild- und Begriffsmodelle bezieht, die durch Sprache und Skizzen externalisiert werden. Es wird die Hypothese erhoben, dass dieser konzeptionelle Denkprozess als Transformations-, Zuordnungs- und Beurteilungsprozess verstanden werden kann (Bild 2).

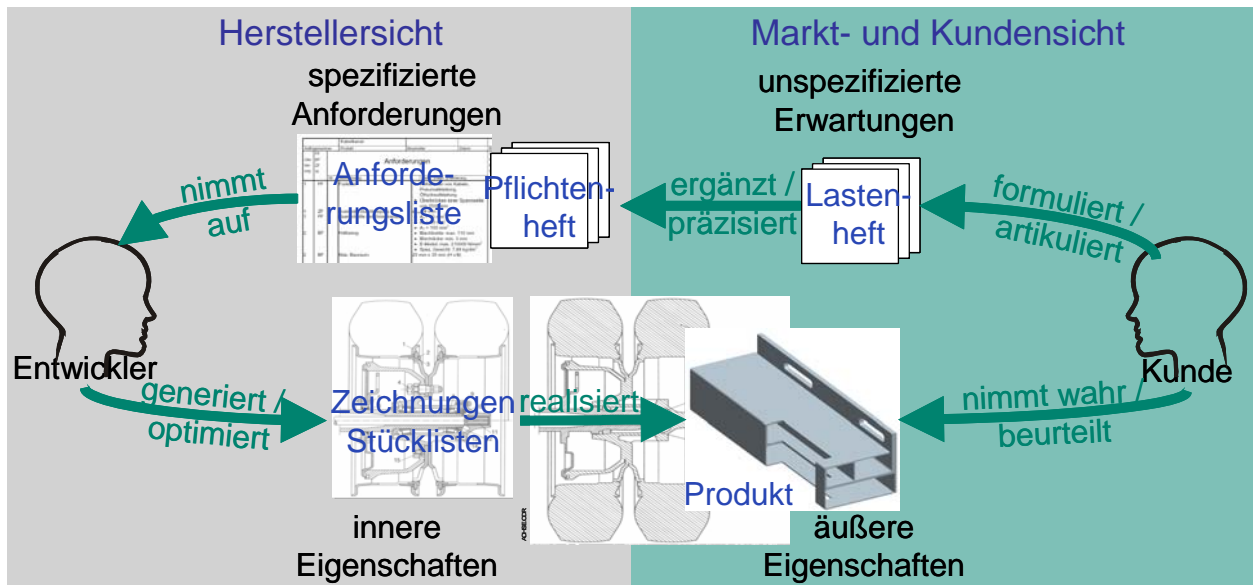


Bild 2: Von den Markt- und Kundenerwartungen zum optimalen Produkt

Dabei wird von einer verbalen Aufgabenstellung aus Kundensicht ausgegangen und schrittweise diese unscharfe und unvollständige Entwicklungsaufgabe soweit konkretisiert, dass mit mathematischen Optimierungsverfahren und neuen CAD-Modellierungstechniken das optimale Profil erarbeitet werden kann. Im Einzelnen werden folgende Algorithmisierungsansätze verfolgt:

- Transformation von Markt- und Kundenerwartungen in Anforderungen

Das algorithmisch geprägte Vorgehen bildet zuerst Aufgabenelemente sowie Randbedingungen und Restriktionen aus der Aufgabe auf einen Satz von Anforderungen ab. Dazu wird ein Begriffsthesaurus auf der Grundlage von Profilbeschreibungen gebildet und eine Sammlung von objektbezeichnenden Begriffen (z.B. Tragprofil, zweikammeriger Querschnitt) zu topologischen und geometrischen Modellen erstellt.

- Transformation von Anforderungen in äußere Produkteigenschaften:

Um den Freiheitsgrad und die Unschärfe im Sprachgebrauch zu reduzieren werden in diesem Schritt die Anforderungen auf definierte äußere Produkteigenschaften abgebildet. Dazu wird eine dynamisch erweiterbare Liste von standardisierten äußeren Eigenschaften von Blechprofilen durch Analyse von Produktbeschreibungen erstellt und durch eine Vorschrift für die Zuordnung von Anforderungen zu äußeren Eigenschaften ergänzt.

- Transformation von äußeren in innere Produkteigenschaften (konstruktive Parameter):

Die Grundlage für dieses Vorgehen liegt in der systematischen Trennung von inneren¹ und äußeren² Eigenschaften [12] der zu entwickelnden Profile. Die äußeren

¹ Äußere Produkteigenschaften (auch Relationseigenschaften) sind Eigenschaften des Produkts, die seine Auswirkungen bzw. sein Verhalten in den Lebensphasen (Herstellung, Nutzung, Verwertung) beschreiben.

Eigenschaften repräsentieren die Kundensicht, während die inneren Eigenschaften Optimierungsparameter darstellen. Die Transformation der äußeren Eigenschaften in für die mathematische Optimierung nutzbare Parameter und die Anreicherung abstrakter Regeln mit Information für die CAD-Modellierung erfolgt in diesem Arbeitsschritt. Dabei wird eine sukzessiv zu erstellende Bibliothek physikalischer, technischer und wirtschaftlicher Modelle und Modellbeschreibungen genutzt.

- Generierung der Profiltopologie aus inneren Produkteigenschaften:

Mittels graphenbasierter Generierungsverfahren, eigenschaftsbestimmender Dimensionierungsmethoden und unter Berücksichtigung von grundsätzlichen, konstruktiven Zusammenhängen insbesondere zur Topologiebestimmung können nun durch mathematische Optimierungsverfahren die inneren Eigenschaften des Bauteils anforderungskonform definiert und präzisiert werden. Dabei erfolgt eine ganzzahlig mathematische Optimierung nach dem Branch & Cut-Verfahren, die auf die Nutzung von individuell gewonnenen und kontextabhängigen erfahrungsbasierten Gestaltungsansätzen [9] verzichtet und im Idealfall systematisch und vollständig konkrete Lösungen für Bauteile mit verzweigten Blechstrukturen generiert (Bild 3).

- Generierung der Profilabwicklung aus der Profiltopologie:

Mit Methoden aus dem Bereich der Ganzzahligen Programmierung werden für die berechnete Feingeometrie eine optimale „Abwicklung“ bestimmt werden, die eine Herstellung des Bauteils aus einem Stück und unter Einhaltung aller Fertigungsrestriktionen ermöglicht.

- Generierung der Profilgeometrie aus der Profiltopologie und der Profilabwicklung:

Hierin erfolgt die informationstechnologische Unterstützung durch Modellbildung und CAD-gestützte Konstruktion für verzweigte Blechstrukturen. Dabei müssen neue Modellierungsfunktionen für integral verzweigte Blechbauteile erarbeitet werden.

² Innere Produkteigenschaften sind Gestalt- und Werkstoffeigenschaften, die der Konstrukteur direkt beim Konstruieren festlegt

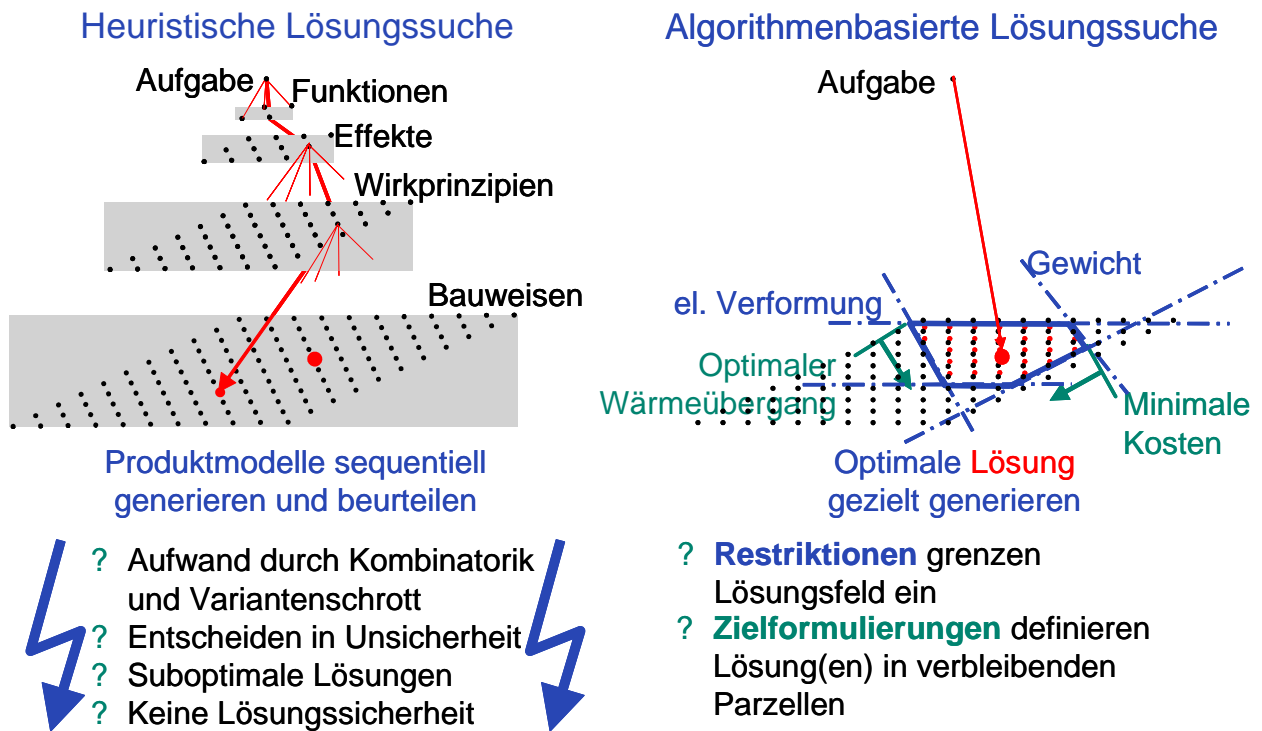


Bild 3: Konventionelles und algorithmbasiertes Vorgehen

Das hier in seinen Grundzügen beschriebene Vorgehen soll in wesentlichen Teilen nun anhand eines Demonstrators veranschaulicht und wenigstens partiell verifiziert werden.

5 Demonstrator

Als Leitbeispiel wird das algorithmbasierte Entwickeln eines Kabelkanals aus spaltprofilierten Profilen gezeigt. Kabelkanäle erlauben die Führung und den Schutz von Kabel, Pressluft und Hydraulikleitungen. Im Rahmen dieses Leitbeispiels soll ein Kabelkanal mit drei Kanälen entwickelt werden, der eine große freie Spannweite überbrücken muss (Bild 4).

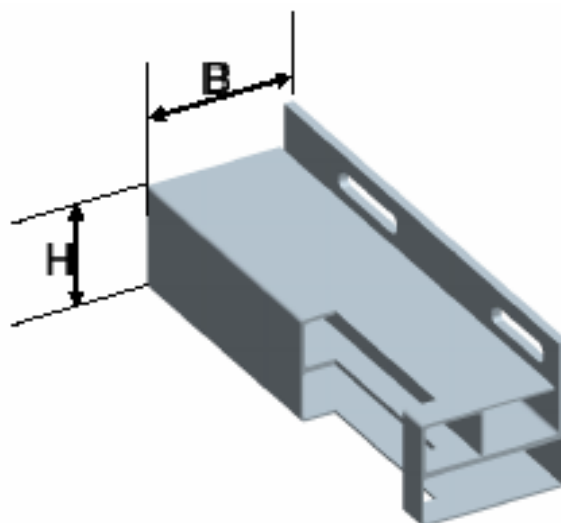


Bild 4: Beispiel eines Kabelkanals mit drei Einzelkanälen [13]

Der Kanal ist definiert durch die Größe der Einzelkanäle, die Spannweite und das Ausgangsmaterial. Entwicklungsziel ist die Generierung eines optimalen Kanalquerschnitts unter den gegebenen Randbedingungen und der Forderung, dass die maximale Durchbiegung unter Eigenlast minimiert werden soll (Bild 5).

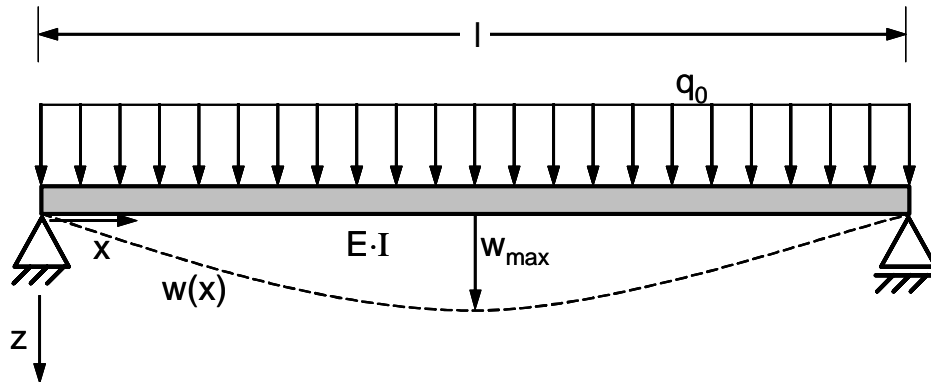


Bild 5: Durchbiegung eines Trägers auf zwei Stützen [13]

Fasst man den Konstruktionsprozess als eine Optimierungsfragestellung auf, so sind zunächst die Parameter und freien Variablen zu identifizieren. Diese sind dann durch Nebenbedingungen aneinander zu koppeln, so dass am Ende ein integrales Modell in der Sprache der Mathematik steht. Im zweiten Schritt ist dann zu diskutieren, wie dieses Modell gelöst werden kann.

Da die Entwicklungsaufgabe im Wesentlichen als Optimierungsproblem aufgefasst wird, müssen zuerst die notwendigen Parameter und freien Variablen identifiziert werden. Im betrachteten Beispiel des Kabelkanals ist die Aufgabe durch die Anforderungsliste genau umrissen. Sie besteht darin, einen Mehrkammer-Kanal zu konstruieren der eine vorgegebene Spannweite überbrücken soll. Die Übertragung der Aufgabenstellung auf standardisierte Eigenschaften zeigt, dass die Entwicklungsaufgabe als Optimierungsaufgabe aufgefasst werden kann. Das Kernziel ist die Erreichung einer möglichst großen Steifigkeit des Trägers unter den gegebenen Randbedingungen.

Die Steifigkeit des Trägers kann jedoch nicht direkt festgelegt und optimiert werden. Aufgabe der Produktentwicklung ist es nun, die physikalischen Beziehungen zwischen der Steifigkeit eines Profils und den sie bestimmenden topologischen und geometrischen Größen zu formulieren und daraus die konstruktiven Parameter für die mathematische Optimierung abzuleiten.

Danach wird ein mathematisches Modell entwickelt, das den zur Verfügung stehenden Bauraum diskretisiert. Dazu wird der Bauraum mit einem Pixelgitter überzogen, wobei jeder Pixel entweder zur Außenwelt gehört, zur Querschnittsfläche eines Kanals oder mit Blech belegt ist. Die Lösung des mathematischen Problems ergibt eine nachweisbar stabilste (minimale Durchbiegung) Bauteiltopologie und Grobgeometrie (Bild 6) mit maximalem Flächenmoment.

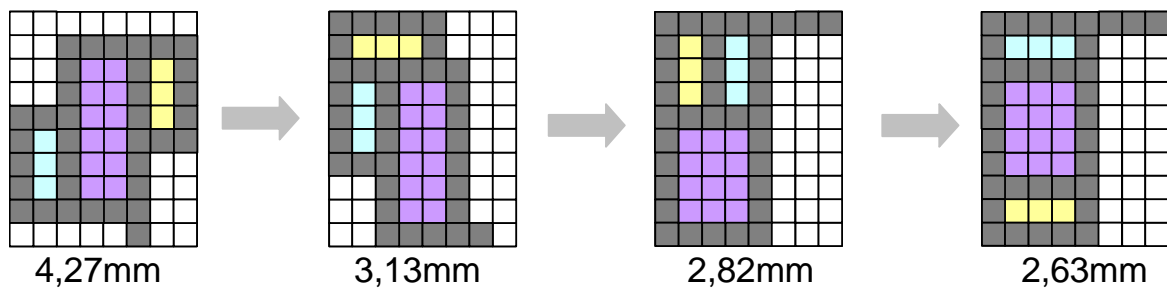


Bild 6: Generierte Profilquerschnitte mit optimalen Profil und resultierende Durchbiegungen

In einem zweiten Optimierungsschritt wird nun die Geometrie der Wandstärke entsprechend den Randbedingungen des Spaltprofilierprozesses optimiert (Bild 7).

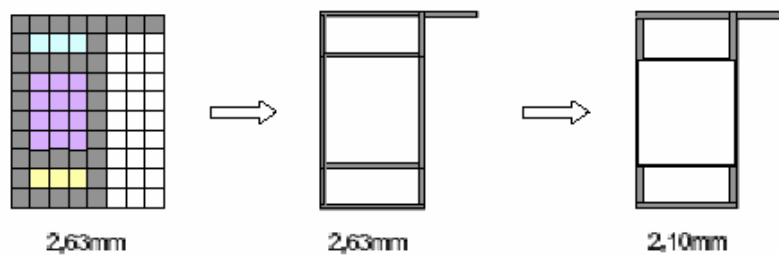


Bild 7: Optimaler Profilquerschnitt unter Berücksichtigung der Wandstärken beim Spaltprofilieren [13]

In einem dritten Optimierungsschritt werden, ausgehend von den inneren Eigenschaften des Bauteils, die für die Geometrie optimalen Trenn- und Fügestellen gesucht und dabei die produktionstechnischen Einschränkungen und Möglichkeiten berücksichtigt. Dazu werden zuerst die Knoten des Profils als Pseudoknoten modelliert (Bild 8)

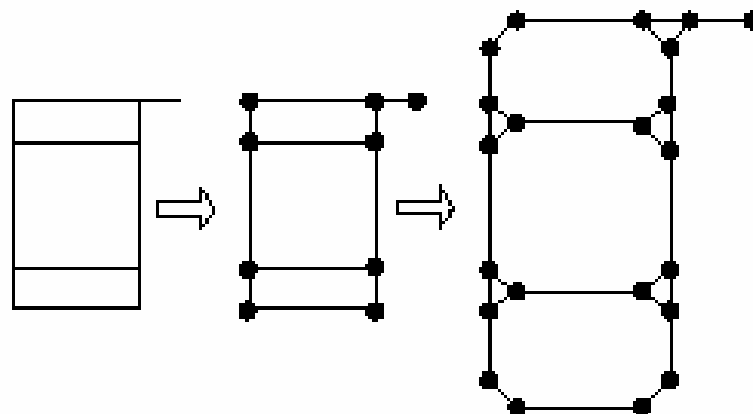


Bild 8: Erzeugung des knotenmodellierten Graphen aus der Topologie [13]

Danach werden alle Knoten systematisch darauf hin untersucht, welche der drei Knotenunterkanten entfallen können (Bild 9) und welche Konsequenzen sich daraus für Herstellung im Hinblick auf das Spaltprofilieren ergeben.

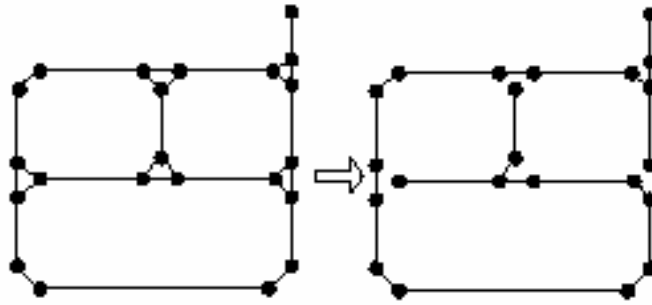


Bild 9: Vom Profilgraphen zur herstellbaren Profilabwicklung [13]

Dazu wird ein Graph eingeführt, der als mögliche Abwicklung des Profils interpretiert werden kann. Damit lassen sich alle möglichen Abwicklungen der Geometrie durch den Graphen beschreiben, jedoch sind nicht alle Graphen mögliche Abwicklungen, da Fertigungsrestriktionen berücksichtigt werden müssen. Beispielsweise muss die maximale Breite des Ausgangsblechstreifens bei der Generierung des Graphen berücksichtigt werden. Die Beschränkung der Anzahl der Flansche kann durch den Grad des Graphen berücksichtigt werden.

Schließlich werden die generierten Daten in der virtuellen Produktentwicklung verarbeitet und in 3D-CAD Daten überführt. Dieser Arbeitsschritt könnte dann ein Ergebnis wie in Bild 10 generieren, womit die Fertigungsvorgaben weitgehend definiert sind.

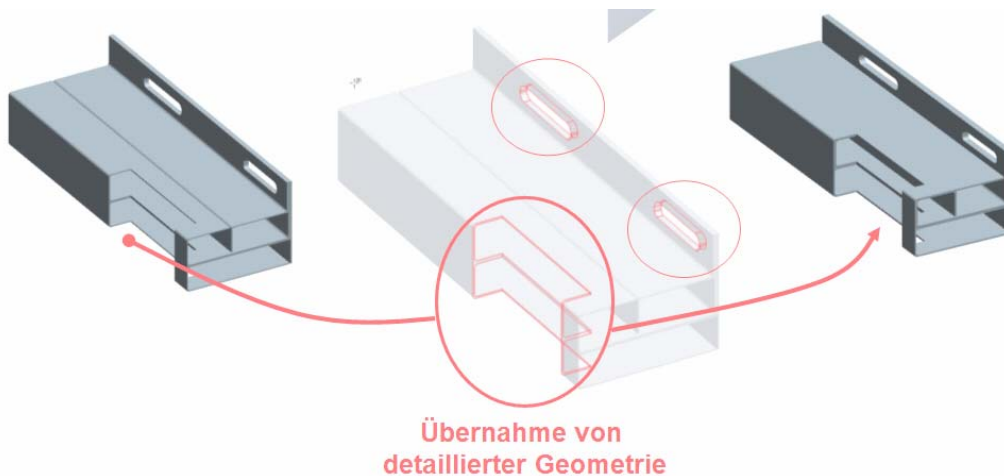


Bild 10: CAD-Entwurf der optimalen Kabelbrücke [13]

6 Ergebnisse und Erkenntnisse

Schon an dem einfachen Beispiel der Entwicklung des Profilquerschnitts einer Kabelbrücke wird deutlich, dass sich ein algorithmenbasiertes Vorgehen hinsichtlich seiner Ergebnisse durchaus mit einem kreativ-erfahrungsbasierten Vorgehen messen kann. Die wesentlichen Vorteile sind:

- Das Optimum wird mit Sicherheit gefunden, wenn es existiert und nicht durch Überforderung eine Lösung generell ausgeschlossen ist. Damit steigt die Lösungssicherheit gegenüber einem kreativ-erfahrungsbasierten Vorgehen.

- Die Optimierung ist im Detail rückverfolgbar, jeder Lösungsschritt lässt sich nachvollziehen. Dies schafft Vertrauen bei Entwicklern und Kunden.
- Die Algorithmisierung erlaubt es, den Einfluss von konstruktiven Parametern auf die Lösung im Sinne einer Sensitivitätsanalyse konkret zu erkennen. Dies wäre ein wichtiges Element im Sinn der Beratung von Kunden hinsichtlich einer technisch wirtschaftlich günstigeren Anpassung der Aufgabenstellung

Diesen Vorteilen stehen derzeit jedoch deutlich Einschränkungen gegenüber:

- Im Demonstratorbeispiel wurden nur einfache Profilquerschnitte erarbeitet. Das „ebene“ Problem wird erheblich schwieriger und aufwendiger, wenn die dritte Dimension mit Anforderungen z.B. hinsichtlich Profilenden, Anschlussgeometrien, Aufhängungen und Abzweigungen berücksichtigt werden muss.
- Das Demonstratorbeispiel basiert auf wenigen, physikalisch eindeutigen Modellen mit vergleichsweise einfacher mathematischer Beschreibung. Wie sich die Optimierung bei komplizierteren Modellen z.B. aus der Thermodynamik oder der Fluidmechanik darstellt ist ebenso offen wie die Modellbildung bei schlecht oder nicht kausal abbildbaren Sachverhalten, z.B. Designzusammenhängen.
- Der Rechenaufwand für den Demonstrator beträgt z.Zt. eine Stunde Rechenzeit auf einem 2,6 GHz Pentium IV-Rechner. Die zukünftig zu erwartende Zunahme an Rechengeschwindigkeit wird allerdings zumindest teilweise kompensiert durch den exponentiell wachsenden Aufwand bei der Bearbeitung komplexerer Geometrien und Aufgabenstellungen. Derzeit kann deshalb noch keine Aussage bezüglich der Rechenzeiten bei umfangreicheren Aufgaben gemacht werden.

Dennoch erscheint ein algorithmenbasiertes Vorgehen, wie es oben beschrieben, ist trotz der zu erwartenden riesigen Lösungsmenge an grundsätzlichen Varianten für vergleichbare Aufgabenstellungen machbar und Erfolg versprechend. Mit Sicherheit wird man sich erst von einfachen zu umfangreicheren Aufgaben vortasten müssen, um Erfahrungen bezüglich der Modellierung und Optimierung zu gewinnen. Analog zu Entwicklung von Schachcomputern wird erwartet, dass sich auch die Entwicklung der algorithmenbasierten Bearbeitung der frühen Phasen von anfänglich mitleidig belächelten „Simpelalgorithmen“ zu Hochleistungsprogrammen entwickelt, deren Ergebnis adäquat zu denen von hervorragenden Konstrukteuren sein werden.

Es ist auch zu erwarten, dass algorithmenbasiert generierte Lösungen nicht nur das Optimum an Anforderungserfüllung repräsentieren, sondern durchaus auch völlig neue, ungewohnte und verblüffende Lösungen erzeugen werden. Ob dies allerdings als rechnerintegrierte Kreativität gedeutet werden kann mag bezweifelt werden. Dass aus der mathematischen Optimierung aber rückwirkend ein Erklärungsmodell für die Wirkungsweise menschlicher Kreativität abgeleitet werden kann, ist durchaus im Bereich des Möglichen.

7 Literatur

- [1] TRUMPF GmbH + Co.: Faszination Blech – flexible Bearbeitung eines vielseitigen Werkstoffs, Raabe, Stuttgart, 1996.
- [2] Roth, K.-H.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen, Band III Verbindungen und Verschlüsse Lösungsfindung, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2000.
- [3] Müller, P. C.: Stabilität und Matrizen : Matrizenverfahren in der Stabilitätstheorie linearer dynamischer Systeme, Springer, Berlin, 1977.

- [4] Bralla, J.: Design for Excellence, McGraw-Hill, New York, 1996.
- [5] Fritz, A., H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, Springer, Berlin, 2001.
- [6] König, W.; Klocke, F.: Fertigungsverfahren Band 4 - Massivumformung, VDI, Düsseldorf, 1995.
- [7] Birkhofer, H.; Jänsch, J.: „Interaction between Individuals“. In: Udo Lindemann (Hrsg.). Human Behaviour in Design., Springer, 2003.
- [8] Roth, K.-H.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen: Systematisierung u. zweckmässige Aufbereitung techn. Sachverhalte für d. method. Konstruieren, New York, Springer, 1982.
- [9] Franke, H.-J.: Untersuchungen zur Algorithmisierbarkeit des Konstruktionsprozesses, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1976.
- [10] VDI-2221, Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Düsseldorf: Beuth-Verlag, 1993.
- [11] Rude, S.: Wissensbasiertes Konstruieren, Aachen, Shaker, 1998.
- [12] Hubka, V. Theorie der Maschinensysteme - Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre, Springer-Verlag, Berlin, 1973.
- [13] Birkhofer, H.; Martin, A.; Ulbrich, S.; Sauer, T.; et. al.: Optimization of sheet Metal Products with OR Methods. Proceedings of the OR 2005, Bremen (2005).

Prof. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer
Fachgebiet Produktentwicklung
Maschinenelemente Darmstadt - *pmd*
Technische Universität Darmstadt
Magdalenstrasse 4, D- 64289 Darmstadt
Tel: +49-6151-16-2155
Fax: +49-6151-16-3355
Email: <mailto:birkhofer@pmd.tu-darmstadt.de>
URL: <http://www.pmd.tu-darmstadt.de>

