

Kosteneffiziente Verbundbauteilgestaltung in der Luftfahrt – Methoden und Modelle zur Kostenschätzung

Ch. Hueber¹, K. Horejsi^{2,3}, R. Schledjewski^{1,2}

¹ Christian Doppler Labor für Hocheffiziente Composite Verarbeitung

² Lehrstuhl Verarbeitung von Verbundwerkstoffen,

Department Kunststofftechnik, Montanuniversität Leoben

³ FACC Operations GmbH, Ried im Innkreis

Kurzfassung

Ohne erfolgreiche Kostenschätzung ist eine kosteneffiziente Verbundbauteilgestaltung und Fertigung nicht möglich. Es werden die grundlegenden Methoden, Analogous -, Parametric - und Bottom-up Cost Estimation beschrieben sowie einige ausgesuchte Modelle mit Verbindung zur Luftfahrt und der Verbundverarbeitung vorgestellt.

Einleitung

Um sich in der modernen Luftfahrtindustrie auch in Zukunft erfolgreich behaupten zu können wird Fertigungsqualität alleine nicht mehr ausreichen. Es wird immer wichtiger wirtschaftlich international konkurrenzfähig zu bleiben. Dazu reicht es jedoch nicht aus nur in der Fertigung kosteneffizient zu sein, denn der wirtschaftliche Erfolg entscheidet sich bereits in der Angebotsphase, lange bevor das erste Bauteil überhaupt gefertigt wird. Nur wer bereits frühzeitig die Herstellkosten richtig schätzen kann, ist in der Lage weder zu hoch (=> Verlust des Auftrags), noch zu tief (=> eigener monetärer Verlust) anzubieten. Die Kostenschätzung stellt geeignete Methoden und Modelle zur Verfügung um die zukünftigen Projektkosten richtig abschätzen zu können. [1–4] In diesem Beitrag sollen die grundlegenden Methoden und einige Modelle aus der Verbundverarbeitung vorgestellt werden.

Methoden zur Kostenschätzung

Will man eine Einteilung der verschiedenen Methoden für die Kostenschätzung in der Luftfahrt finden eröffnen sich zwei grundlegend verschiedene Wege. Der erste ist der in Bild 8 gezeigte detaillierte Ansatz nach [5]. Dieser gibt einen guten Überblick über die Vielzahl an Methoden. In der Praxis jedoch erscheint eine einfachere Einteilung in lediglich drei grundlegende Gruppen gebräuchlicher. Da alle diese Einteilungen aus der englischsprachigen Literatur stammen wurde auf eine Übertragung der Methodennamen ins Deutsche verzichtet um die Konsistenz mit der Literatur zu wahren.

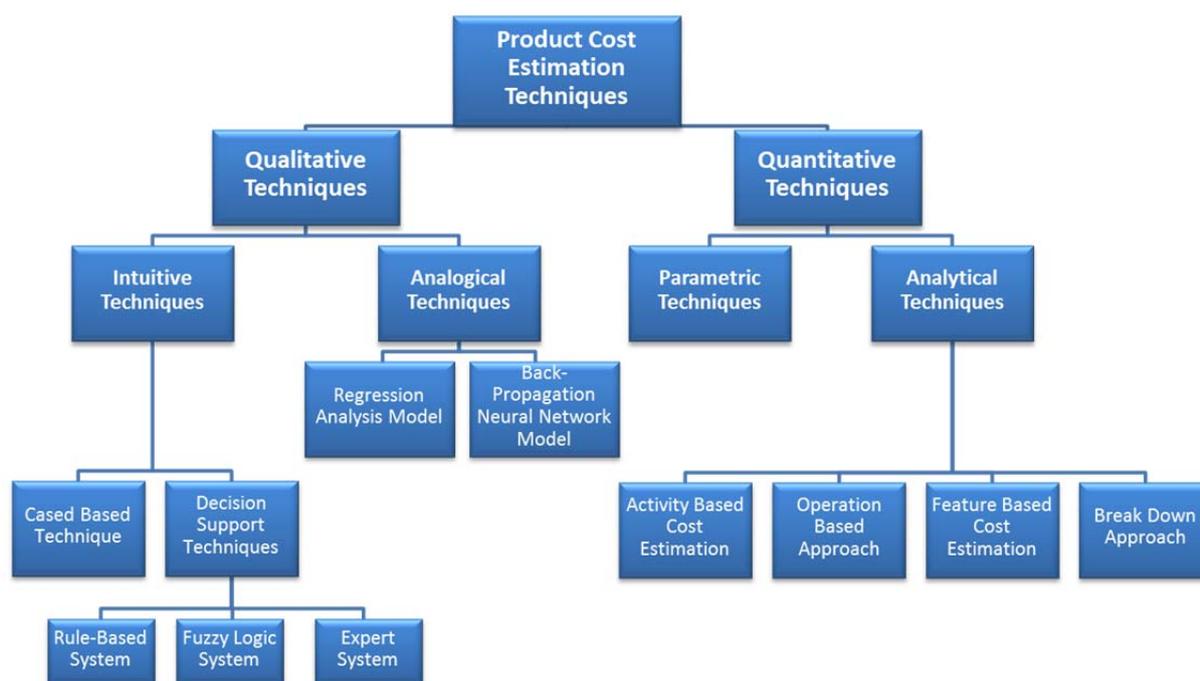


Bild 1: Einteilung der Methoden zur Kostenschätzung nach [5]

Die Methoden werden häufig nur in Analogous Estimation , Parametric Estimation und Bottom-up Estimation eingeteilt, so auch in [6]. Dieses System, dargestellt in Bild 2, hat den Vorteil, dass es schlichtweg einfacher zu handhaben ist. Neue Konzepte sind in einer detaillierten Kategorisierung oftmals nicht genau zuordenbar, lassen sich aber gut in eine der drei Grundkategorien einordnen.

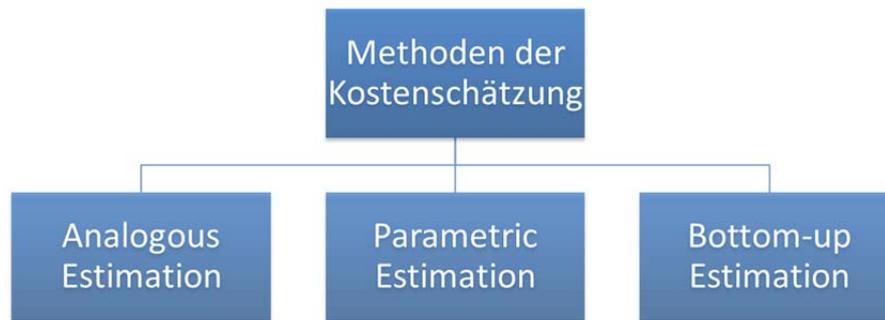


Bild 2: Grundkategorien der Methoden zur Kostenschätzung

- **Analogous Cost Estimation (Kostenschätzung nach dem Ähnlichkeitsprinzip)**

Analogous Cost Estimation beruht auf der Annahme, dass ähnliche Produkte ähnliche Kosten haben. Aus dem Wissen über die Kosten eines vergangenen Projekts wird ausgehend von den Ähnlichkeiten auf die Kosten des aktuellen Projekts geschlossen [2]. Die Methode eignet sich besonders gut zur Kostenschätzung in der frühen Designphase bei wenig bekannten Details und um rasche Abschätzungen treffen zu können [5]. Die große Herausforderung für den Kosteningenieur liegt in der Fähigkeit die entsprechenden Ähnlichkeiten und Unterschiede zu erkennen und diese kosten-technisch richtig zu deuten. Wenn mehrere historische Projekte einer Familie vorhanden sind, kann aus diesen eine Kosten-Basis-Linie erstellt werden. Variationen im Design werden dann als Komplexitätsfaktoren von dieser Basis-Linie abgezogen oder hinzugezählt [6].

- **Parametric Cost Estimation (Parametrische Kostenschätzung)**

Das Prinzip von Parametric Cost Estimation ist es sogenannte Cost Estimation Relationships (CERs) zu finden. Unter CERs versteht man die mathematische Verknüpfung zwischen den Kosten eines Projekts oder Systems und einigen kostenbestimmenden Parametern des selbigen. Diese sogenannten Kostentreiber zeichnen sich durch eine starke Korrelation zwischen Kosten und Parameterwert aus. Beispiel hierfür wäre z.B.: die Größe eines Bauteils, sein Gewicht oder auch die Anzahl an Konstruktionszeichnungen. [2; 5; 7] Die Vorzüge dieser Methode sind die Einsetzbarkeit in frühen Designphasen sowie die schnelle und einfache Anwendbarkeit. Allerdings lässt sich die Methode nicht außerhalb der zugrundeliegenden Datenmenge verwenden und ist nicht in der Lage Technologieänderungen abzubilden. [6; 8]

- **Bottom-up Cost Estimation**

Bei der Bottom-up Methode werden die Kosten für Arbeitszeit, Material, Infrastruktur, etc. für jeden einzelnen Produktionsschritt bestimmt und anschließend zu den Gesamtkosten aufsummiert. Dazu sind hohes Prozessverständnis sowie detailliertes Designwissen erforderlich. [2] Das Erstellen einer Kostenschätzung nach diesem Prinzip ist in der Regel sehr aufwändig, es ist jedoch die einzige Methode mit der neue Prozesse oder Technologien abgebildet werden können. Darüber hinaus ist sie leicht nachvollziehbar und bietet ein hohes Maß an Kausalität. [6] Für den Bottom-up Ansatz können neben Aktivitäten (Activity Based Costing) auch Merkmale (Features) oder Operationen als Grundeinheiten herangezogen werden [5].

Modelle aus der Luftfahrt Verbund Verarbeitung

- **ACCEM – Advanced Composite Cost Estimation Manual**

ACCEM wurde in den 1970er Jahren im Auftrag der USAF entwickelt und stellt einen Katalog an einfachen empirischen Gleichungen zur Bestimmung der Prozesszeit unzähliger in der Composite Verarbeitung nötiger Arbeitsschritte dar. Aus diesen einzelnen Zeiten kann im Bottom-up Verfahren die Herstellzeit des Produkts und daraus die Herstellkosten bestimmt werden. ACCEM gilt in der Luftfahrtindustrie als zuverlässig und weit verbreitet. [9; 10]

- **COSTADE – Cost Optimization Software for Transport Aircraft Design Evolution**

Das COSTADE Modell wurde im Rahmen des NASA/Boeing ATCAS Programms entwickelt mit dem Ziel ein multidisziplinäres Optimierungswerkzeug mit einem integrierten Kostentool zu schaffen, Bild 8. Das implementierte Kostentool arbeitet primär nach dem Bottom-up Prinzip, es erlaubt aber auch die Verwendung Parametrischer Kostenschätzung oder anderer Methoden zur Bestimmung der Kosten in den einzelnen Produktions-Einheiten, Bild 5. [11]

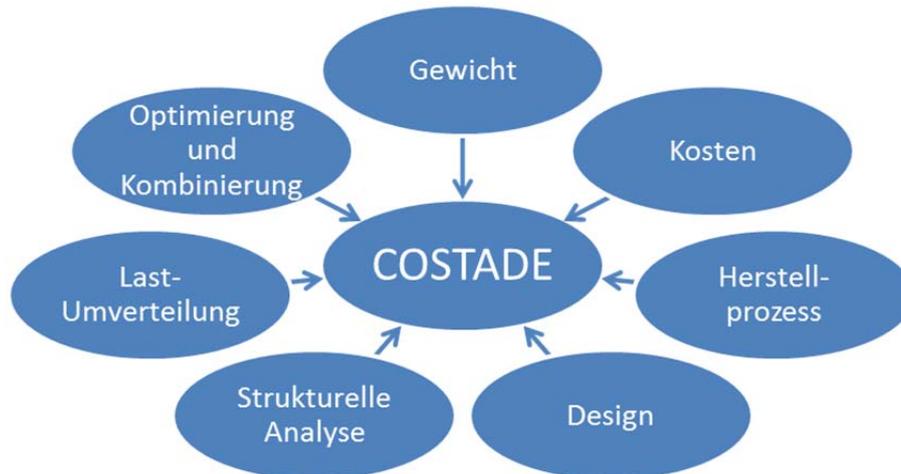


Bild 3: Übersicht über die Optimierungswerkzeuge in COSTADE nach [11]

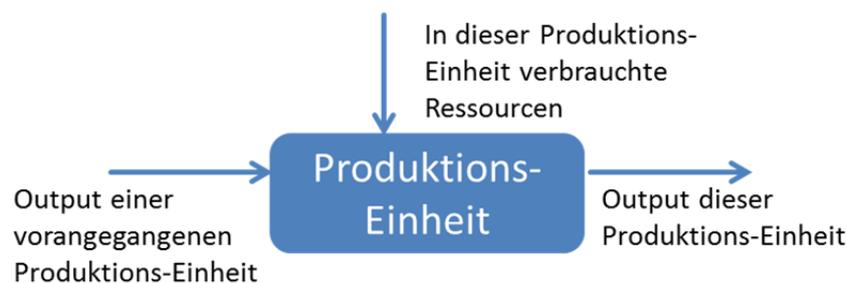


Bild 4: Generische Produktions-Einheit zur Prozessdarstellung nach [11]

Ein Herstellprozess wird als Fluss-Diagramm bestehend aus einzelnen Produktions-Einheiten dargestellt und die Kosten werden aus der Summe der Kosten der einzelnen Einheiten gebildet.

- **PCAD – Process Cost Analysis Database**

PCAD entstand als Teil des ATCAS/COSTADE Projekts und wurde von [10] am MIT (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA) entwickelt. Es sollte sowohl eigenständig als auch als Teil von COSTADE funktionieren. Nach Ende des ATCAS Projekts wurde PCAD am MIT weiterentwickelt und war zumindest bis 2004 öffentlich über das Internet zugänglich und verwendbar [12]. Mit den linearen Geschwindigkeits-Gleichungen aus PCAD war es möglich Herstellzeiten zu kalkulieren. Eine dieser Gleichungen ist beispielhaft in (1) dargestellt [10; 12].

$$t_{process} = \left\{ \left(\frac{setup}{run} \right) + \left[\left(\frac{delays}{operation} \right) + \sqrt{\left(\frac{v_1}{v_0} \right)^2 + \frac{2 * \tau_1 * v_1}{v_0}} \right] * \frac{operations}{run} \right\} * \frac{(parts/shipset)}{(lots/run) * (parts/lot)} \quad (1)$$

- **Knowledge-Based Engineering & Case-Based Reasoning**

Knowledge-Based Engineering (KBE) Modelle bieten die Möglichkeit für eine automatisierte Kostenschätzung nach dem Analogous Cost Estimation Prinzip. Dazu werden Produkt- und Kostenwissen verknüpft in einer Wissensdatenbank gespeichert. Das System ist dann in der Lage auf Grund von Ähnlichkeitsalgorithmen automatisch auf passende gespeicherte Fälle zuzugreifen. Diese Systeme können sowohl auf einem Produktlevel als auch auf einem Elementlevel arbeiten. Zur Bestimmung der Ähnlichkeiten bieten sich unter anderem Fuzzy-Logic oder die Ähnlichkeitsfunktion von [14] an.

Case-Based Reasoning (CBR) zählt zu den Knowledge-Based Prinzipien und kann als eine selbstlernende Rahmenstruktur für die innenliegende Wissensdatenbank angesehen werden. Der Ablauf und die Struktur von CBR ist in Bild 8 grafisch dargestellt.

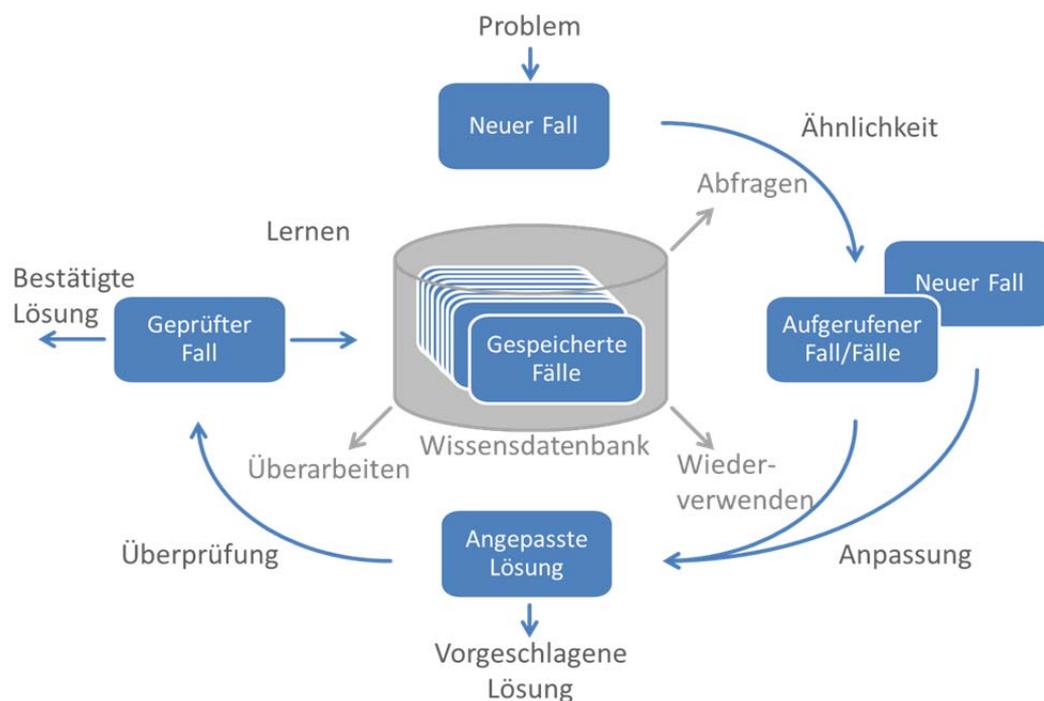


Bild 6: Ablauf-Diagramm des Case-Based Reasoning Prozesses nach [17; 2]

Das CBR System tätigt eine Suchabfrage nach passenden historischen Fällen in der Wissensdatenbank. Diese werden mit dem tatsächlichen Fall verglichen und daraus eine angepasste Lösung generiert. Nach Überprüfung dieser neuen Lösung wird die-

se in die Wissensdatenbank zurückgespielt, wodurch der Selbstlernerneffekt des Systems erzielt wird. [2; 5]

- **FACE_RoaD – FACC Advanced Cost Estimator for Research Or/And Development projects**

Das von [18] bei der FACC in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen der Montanuniversität Leoben entwickelte FACE_Road Model ist ein erfahrungsbasiertes Kostenschätzungswerkzeug, dessen größter Vorteil in der relativ einfachen und schnellen Abschätzung der Herstellungskosten in den frühen Konzept- und Designphasen besteht. Methodisch ist FACE_RoaD als ein Parametrisches Model einzustufen, es erlaubt allerdings gewisse Extrapolation über die reinen parametrischen Beziehungen hinaus.

Basierend auf Erfahrungswerten aus den existierenden Produktionsbauteilen können Kostenbereiche anhand des Bauteilgewichtes, des Herstellungsverfahrens, der Komplexität und ähnlicher Einflussgrößen derart vorhergesagt werden, dass die größten Kostentreiber bereits in der Vorentwicklungsphase nach Möglichkeit reduziert werden. Jedoch bedingt das Verfahren zwingend eine existierende Wissensbasis, welche auch den zu verwendenden Prozess beinhaltet, da Skalierungen über die Prozessketten hinaus unzuverlässig sind.

Im Rahmen dieser Tagung wird das Model im Beitrag „Kosteneffiziente Verbundbauteilgestaltung in der Luftfahrt – Design ↔Fertigung“ genauer vorgestellt und anhand eines Beispiels die Leistungsfähigkeit gezeigt.

Diskussion

Wie in Bild 8 dargestellt werden 70-80% der zukünftigen Produktionskosten in der Planungsphase zu Beginn des Projekts festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt liegen jedoch nicht genügend Informationen für eine detaillierte Bottom-up Analyse vor. Besonders problematisch ist das für neue Produkte oder neue Fertigungsverfahren wenn keine oder nur ungenügende historische Daten für Parametric - oder Analogous Cost Estimation vorliegen. [2; 16; 19].

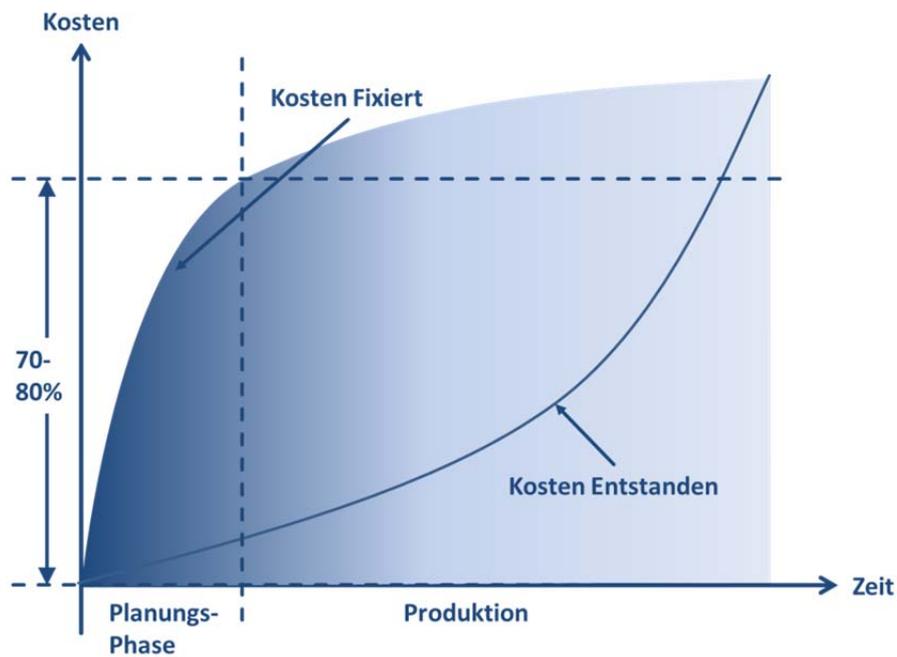


Bild 7: Kosten-Festlegungs-Kurve nach [2]

Die große Herausforderung in der Kostenschätzung ist es daher in dieser frühen Projektphase, wenn die Designdetails festgelegt werden, eine Möglichkeit bereitzustellen, die Auswirkungen dieser Designentscheidungen aus produktionswirtschaftlicher Sicht bewerten zu können

Für geometrisch einfache Bauteile, wie Skin-Stringer Panele, Spoiler oder Flügelemente gibt es Ansätze für automatische Kosten- bzw. Kosten-Gewicht-Optimierung. Dabei werden Bauteilparameter eines CAD Modells, wie Anzahl der Stringer, Stringerhöhe oder Anzahl an Skinlagen, als variabel definiert und automatisiert die möglichen Designvarianten erstellt. Diese werden anschließend mittels FEM auf ihre mechanische Festigkeit geprüft. Gleichzeitig wird für die Varianten eine Kostenschätzung mittels eines Kostenmodells durchgeführt und das erwartete Bauteilgewicht bestimmt. Dieser Optimierungskreislauf ist in Bild 8 beispielhaft und in einer einfachen Ausführung abgebildet. [20–22]

Durch diese Methoden ist es möglich Designvarianten auf Ihre Wirtschaftlichkeit zu untersuchen. Die Voraussetzung dafür ist die Parametrisierbarkeit des Designs und ein für das Bauteil funktionierendes Kostenmodell. Designalternativen oder alternative Fertigungsverfahren vergleichen zu können ist auf diese Art bisher noch nicht möglich.

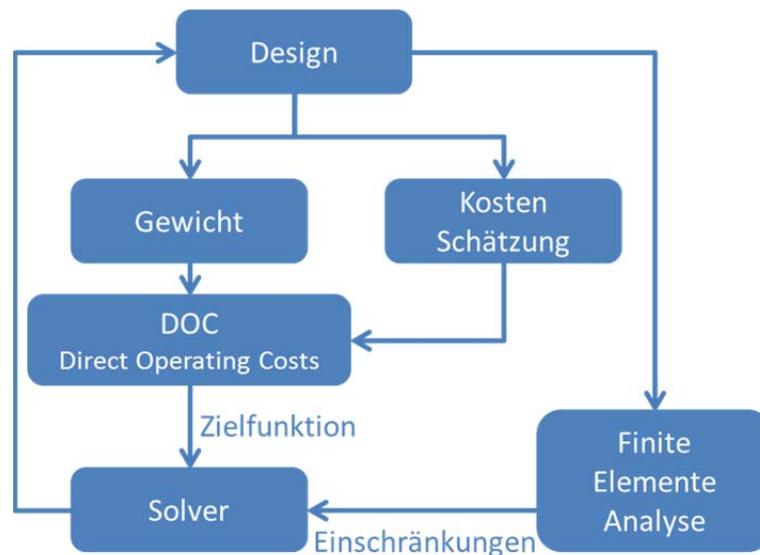


Bild 8: Kosten-Gewicht-Optimierungsschleife nach [20]

Zusammenfassung

Alle Methoden und Modelle laufen letztendlich auf zwei Fälle für eine mögliche Kostenschätzung hinaus:

- Es stehen ausreichend historische Daten oder Erfahrungen zur Verfügung um aus diesem Wissen eine Kostenschätzung ableiten zu können.
- Es sind genügend Design- und Prozessdetails bekannt um eine Bottom-up Kostenschätzung durchführen zu können.

Außerhalb dieser beiden Szenarien ist keine Kostenschätzung, maximal ein „Kostenraten“, möglich. Der wahre Wert kommerzieller Kostensoftware liegt in der beinhaltenen Datenbank an Kostendaten.

Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend für die finanzielle Unterstützung der durchgeführten Forschungsarbeit. Unser Dank gilt darüber hinaus der Christian Doppler Forschungsgesellschaft sowie dem Firmenspartner des Christian Doppler Labors für Hocheffiziente Composite Verarbeitung, der FACC AG.

Literaturverzeichnis

- [1] Weustink, I.; Brinke, E. ten; Streppel, A.; Kals, H. A generic framework for cost estimation and cost control in product design. *Journal of Materials Processing Technology*, 1, pp. 141–148 (2000).
- [2] Roy, R. *Cost Engineering: Why, What and How?* Cranfield, UK (2003).
- [3] Ben-Arieh, D.; Qian, L. Activity-based cost management for design and development stage. *International Journal of Production Economics*, 2, pp. 169–183 (2003).
- [4] Curran, R.; Kundu, A.K.; Wright, J.M.; Crosby, S.; Price, M.; Raghunathan, S.; Benard, E. Modelling of aircraft manufacturing cost at the concept stage. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3-4, pp. 407–420 (2006).
- [5] Niazi, A.; Dai, J.S.; Balabani, S.; Seneviratne, L. Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2, pp. 563 (2006).
- [6] Curran, R.; Raghunathan, S.; Price, M. Review of aerospace engineering cost modelling: The genetic causal approach. *Progress in Aerospace Sciences*, 8, pp. 487–534 (2004).
- [7] International Society of Parametric Analysts *Parametric Estimating Handbook* (2008).
- [8] NASA *NASA Cost Estimating Handbook* (2008).
- [9] LeBlanc, D.J.; Kakawa, A.; Bettner, T.; Timson, F. *Advanced Composite Cost Estimating Manual Volume I* (August, 1976).
- [10] Gutowski, T.G.; Hault, D.; Dillon, G.; Neoh, E.-T.; Muter, S.; Kim, E.; Tse, M.; Gutowski, T.; Dillon, G. Development of a theoretical cost model for advanced composite fabrication. *Composites Manufacturing*, 4, pp. 231–239 (1994).
- [11] Mabson, G.E.; Ilcewicz, L.B.; Graesser, S.L.; Proctor, D.K.; Tervo, D.K.; Tuttle, M.E.; Zabinsky, Z.B. *Cost Optimization Software for Transport Aircraft Design Evaluation (COSTADE)*. NASA Contractor Report (1996).

- [12] Choi, J.-W.; Kelly, D.; Raju, J. A knowledge-based engineering tool to estimate cost and weight of composite aerospace structures at the conceptual stage of the design process. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 5, pp. 459–468 (2007).
- [13] Lutters, E.; Brinke, E. ten; Streppel, T.; Kals, H. Information management and design & engineering processes. *International Journal of Production Research*, 17, pp. 4429–4444 (2000).
- [14] Brinke, E. ten; Lutters, E.; Streppel, T.; Kals, H. Variant-based cost estimation based on Information Management. *International Journal of Production Research*, 17, pp. 4467–4479 (2000).
- [15] Curran, R.; Price, M.; Raghunathan, S.; Benard, E.; Crosby, S.; Castagne, S.; Mawhinney, P. Integrating Aircraft Cost Modeling into Conceptual Design. *Concurrent Engineering*, 4, pp. 321–330 (2005).
- [16] Curran, R.; Castagne, S.; Early, J.; Price, M.; Raghunathan, S.; Butterfield, J.; Gibson, A. Aircraft cost modelling using the genetic causal technique within a systems engineering approach. *Aeronautical Journal*, 1121, pp. 409–420 (2007).
- [17] Aamodt, A.; Plaza, A. Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches. *Artificial Intelligence Communications*, 1, pp. 39–59 (1994).
- [18] Horejsi, K.; Noisternig, J.; Koch, O.; Schledjewski, R. Process Selection Optimization of CFRP Parts in the Aerospace Industry. *ECCM15 - 15th European Conference on Composite Materials*, Venice, Italy (2012).
- [19] Newnes, L.B.; Mileham, A.R.; Cheung, W.M.; Marsh, R.; Lanham, J.D.; Saravi, M.E.; Bradbery, R.W. Predicting the whole-life cost of a product at the conceptual design stage. *Journal of Engineering Design*, 2, pp. 99–112 (2008).
- [20] Kaufmann, M.; Czumanski, T.; Zenkert, D. Manufacturing process adaptation for integrated cost/weight optimisation of aircraft structures. *Plastics, Rubber and Composites*, 2-4, pp. 162–166 (2009).

-
- [21] Curran, R.; Rothwell, A.; Castagne, S. Numerical Method for Cost-Weight Optimization of Stringer-Skin Panels. *Journal of Aircraft*, 1, pp. 264–274 (2006).
- [22] Kassapoglou, C. Minimum cost and weight design of fuselage frames. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 7, pp. 895–904 (1999).