

## Effizienzoptimierte Konstruktion von Kranen und deren Komponenten: Lösungswege und Ergebnisse

Gerald Frank Dipl.-Wirtsch. Inf., Thorsten Prante Dipl.-Inf., Vaheh Khachatouri Dr.  
V-Research GmbH – Industrielle Forschung und Entwicklung, Dornbirn, Österreich

Martin Schwarz M.Sc., Klara Fink M.Sc.  
Liebherr-Werk Nenzing GmbH, Nenzing, Österreich

### 1 Einleitung

Die Auftragsgewinnung und -abwicklung im Bereich der Offshore-, Schiffs- und immer mehr auch bei Portalkranen ist zu großen Teilen durch kundenspezifische Vorgehensweisen, und insbesondere kundenindividuelle Konstruktionen geprägt. In diesen Branchensegmenten erfolgreich tätige Industrieunternehmen müssen für ihre Kunden bestmögliche Ergebnisse erzielen und gleichzeitig fortwährend ihre dieses Projektgeschäft bestimmenden Prozesse optimieren. Um diese Aufgabe zu meistern, gilt es, einerseits, durch die Entwicklung und Herstellung qualitativ hochwertiger Produkte, mit innovativen Merkmalen und hohem Kundennutzen, Wettbewerbsvorteile zu realisieren. Andererseits sind die dadurch entstehenden Komplexitäten bei häufig zugleich kleineren Stückzahlen durch Effizienzsteigerungen in der Produktentstehung zu meistern.

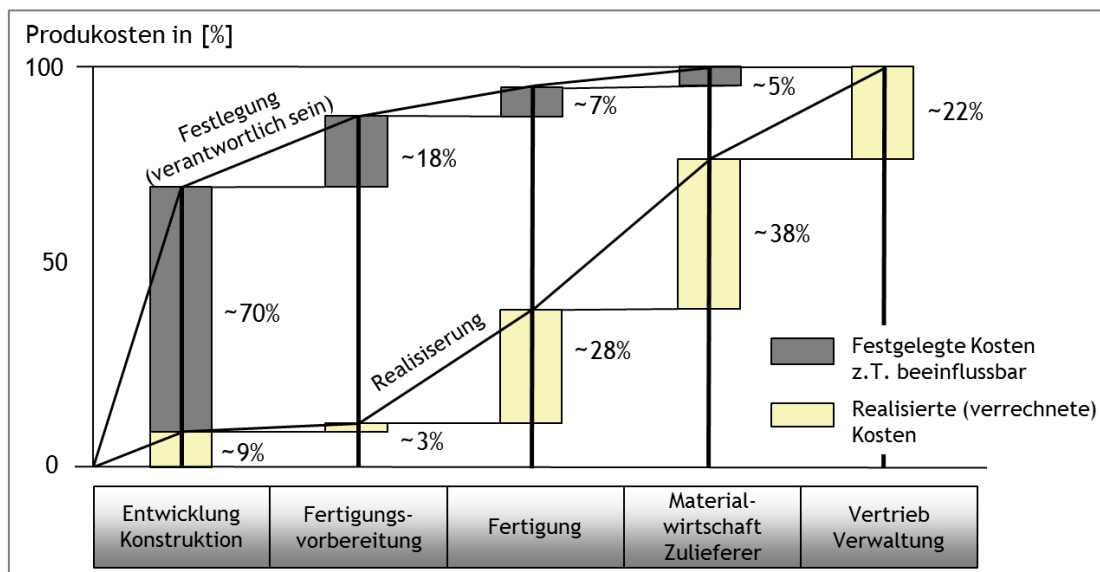


Bild 1: Beeinflussbarkeit der Kosten in der Produktentstehung nach [3]

Bild 1 macht deutlich, dass die Produktkosten in den frühen Phasen der Produktentstehung am besten beeinflussbar sind. Dieser Hebel wird durch die Automatisierung von Konstruktions- und Entwicklungsprozessen bedient.

Bei der Konstruktionsautomatisierung werden im Wesentlichen zwei Ansätze verfolgt. Die sogenannte „Computational Design Synthesis“ kommt dann zum Einsatz, wenn die Suche nach neuartigen Lösungsansätzen algorithmisch unterstützt werden soll [2]. Dagegen werden bei der Konstruktionsautomatisierung nach dem Paradigma des „Knowledge-Based Engineering“ (KBE) Konstruktionsaufgaben mit wiederkehrenden, ähnlichen Anteilen identifiziert und zum Gegenstand von Automatisierungs-

vorhaben gemacht [6]. So wird erreicht, dass als repetitiv bzw. nicht-kreativ charakterisierte Konstruktionsprozesse ganz oder teilweise durch Computerprogramme ausgeführt werden können, und somit die besten der bekannten Vorgehensweisen und das entsprechende Wissen gesichert werden.

In diesem Artikel geht es um KBE-orientierte Konstruktionsautomatisierung. Der Einfachheit halber wird also Konstruktionsautomatisierung ohne nähere Bestimmung synonym dazu gebraucht.

Allgemeine Ziele, die mit der automatisierten Konstruktion kundenspezifischer Produkte in den diesem Artikel zugrunde liegenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten verfolgt wurden, sind die folgenden:

- a) Reduzierte Produktentstehungskosten
- b) Schnellere Projektdurchlaufzeit bzw. Time-to-Market
- c) Frühzeitige Produktvisualisierung und automatisierte Produktkostenkalkulation
- d) Verkürzung der zur Angebotserstellung benötigten Zeit
- e) Vorteile bei der Angebotslegung durch Präsentation mehrerer Lösungen
- f) Insgesamt verbesserte Einbindung der Kunden in die Produktspezifikation
- g) Sicherung und automatisierte Wiederverwendung von Expertenwissen
- h) Prozessstandardisierung in der Konstruktion
- i) Höherer Standardisierungsgrad bei Bauteilen und Baugruppen und dadurch Minimierung der internen Komplexität
- j) Automatische Erstellung von Stücklisten, CAD-Modellen, Fertigungs- und Montageunterlagen sowie deren spezifische Aufbereitung und Optimierung für verschiedene Ausprägungen nachgelagerter Prozessschritte (z. B. zur Senkung der Produktionskosten auf einem bestimmten Typ Fertigungsanlage)
- k) In bestimmten Fällen: Sicherstellung mathematisch optimaler Konstruktionslösungen
- l) Verminderte Fehlerraten bei Vertrieb und Konstruktion bis hin zur Fertigungsvorbereitung und dadurch Minimierung von Fehlerfolgekosten
- m) Bessere Planbarkeit wertvoller Ingenieursressourcen

Aus dieser Liste kann, über die eigentlichen Primäraussagen hinaus, abgelesen werden, dass Methoden und Werkzeuge der Konstruktionsautomatisierung sowie insbesondere ihre Ergebnisse nicht nur im Aufgabenbereich Konstruktion, also in Konstruktionsabteilungen gewinnbringend einsetzbar sind, sondern auch im Vertrieb, besonders im kundenspezifischen Vertrieb, und ebenso auch für die Fertigungsvorbereitung nützlich sind.

Im Folgenden wird eine Systematik von Lösungsansätzen zur Konstruktionsautomatisierung vorgestellt, die zur Realisierung der oben genannten Ziele bzw. Vorteile dient. Diese Systematik wurde von der V-Research GmbH – Industrielle Forschung und Entwicklung [7] in einer Reihe kooperativer Forschungs- und Entwicklungsprojekte in Zusammenarbeit mit namhaften Industrieunternehmen aus der Kranbranche, wie der Liebherr-Werk Nenzing GmbH (LWN) [5], erarbeitet. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis gelegt.

Zur Diskussion der Systematik werden zunächst drei Anwendungsfälle aus der Praxis präsentiert. Diese stehen symbolisch für verschiedene Typen von Baugruppen.

Im Anschluss wird der von uns erarbeitete allgemeine Ansatz zur Entwicklung von Konstruktionsautomatisierungsapplikationen vorgestellt. Auf dessen Grundlage werden dann zwei identifizierte methodische Vorgehensweisen zur Erzeugung von CAD-Modellen erläutert, verglichen sowie ihre Verwendungsmöglichkeiten dargestellt: Bottom-Up und Top-Down. Einige damit bereits erzielte Ergebnisse sowie gemachte Erfahrungen werden anhand der präsentierten Anwendungsfälle insbesondere hinsichtlich Kosten-Nutzen-Verhältnis diskutiert. Dies geschieht unter Bezugnahme auf die Phasen kundenspezifischer Vertrieb, Konstruktion und Fertigungsvorbereitung im Produktentstehungsprozess.

## 2 Anwendungsfälle aus der industriellen Praxis

Die hier vorgestellten Anwendungsfälle illustrieren jeweils beispielhaft eine der drei Klassen Detail-, Haupt- und Gesamtbaugruppe. Es sind Begehung, Ausleger und Gesamtkran (vgl. Bild 2).

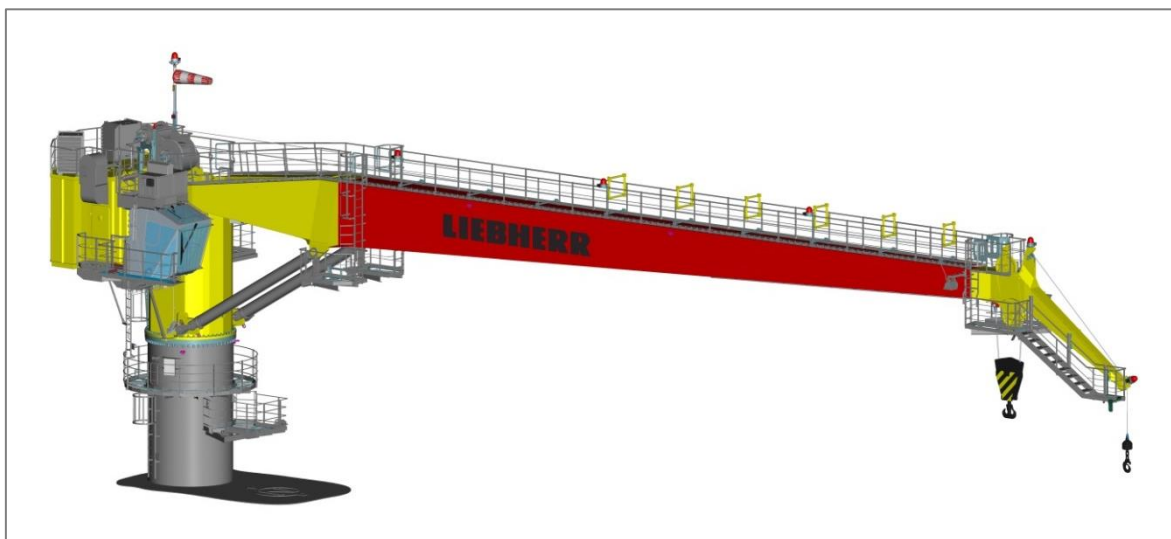


Bild 2: Ein Schiffskran

### 2.1 Begehung

Begehungsbaugruppen werden hier als komplexe **Detailbaugruppen** betrachtet, die insbesondere im Bereich maritimer Krane hohe Aufwände und Kosten verursachen können. Hauptanforderung des hier beispielhaft für die Anwendungsfallklasse Detailbaugruppe diskutierten Projekts war, diese Baugruppen automatisiert und kostenoptimiert zu erzeugen.

Begehungsbaugruppen sind nicht nur komplexe, sondern auch hinsichtlich möglicher Ausformung besonders vielgestaltige, variantendivergente Baugruppen, die, wie der Gesamtkran auch, nach Kundenanforderungen zu gestalten sind. Diese Anforderungen grenzen den Lösungsraum ein, lassen jedoch noch viele Freiheitsgrade bei der Modellgestaltung zu. Darum war es wichtig, dass für Begehungsbaugruppen eine möglichst flexible und dennoch standardisierte Definitionsweise gefunden werden kann.

Begehungsbaugruppen werden zudem oft erst gegen Ende der Spezifikationszeit des Gesamtkrans zuverlässig definiert, so dass sie gegebenenfalls die Projektdurchlaufzeit beeinflussen können. Eine weitere, in diesem Zusammenhang wichtige Beobachtung war die Fehleranfälligkeit des Prozesses der Detailmodellerstellung.

## 2.2 Ausleger

Kastenausleger, etwa als Bestandteil von maritimen Kranen, sind hier beispielgebend für die **Hauptbaugruppe** Ausleger. Die Konstruktion von Kastenauslegern, bzw. einiger ihrer Teile, wird je nach Auftrag neu angepasst, und zwar gemäß kundenseitig definierter Parameter wie Länge, Lastfälle sowie Arbeits- und Interferenzbereiche.

Im Vergleich zu den gerade zuvor besprochenen Begehungsbaugruppen, sind Kastenausleger bzw. Ausleger im Allgemeinen, so geartet, dass veränderte Konstruktionen in aller Regel jeweils erneute Statikprüfungen erforderlich machen.

Auch unter diesen Bedingungen galt es, mittels Konstruktionsautomatisierung eine kostenoptimierte Konstruktionslösung zu finden.

## 2.3 Kran

Krane können auch als **Gesamtbaugruppe** Gegenstand von Konstruktionsautomatisierung sein. Der Anwendungsfokus liegt dann wesentlich auf der Gesamtproduktvisualisierung als Kommunikationsvehikel, um eine Konvergenz der Produktverständnisse von Anbieter und potenziellem Kunden zu erreichen bzw. einen Abgleich von Anbietermöglichkeiten und Kundenwünschen zu erzielen.

Hierzu wird schrittweise eine kundenindividuelle Produktkonfiguration bestimmt. Dimensionen von Hauptkomponenten sowie die Gesamtabmessungen des Krans werden festgelegt. Zudem sind Schnittstellen, wie z. B. der Anschluss der Grundsäule, zu definieren und bei variantenreichen Komponenten (beispielsweise Kabine) die dem Kundenwunsch entsprechende Alternative zu wählen.

Neben der Produktvisualisierung spielen die Kosten der bestimmten Gesamtkonfiguration die zentrale Rolle.

## 3 Allgemeiner Ansatz

Im Laufe einer Reihe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten wurde ein Ansatz entwickelt, der für alle im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Baugruppenklassen eine systemunterstützte Automatisierung des Konstruktionsprozesses unter Optimalitätskriterien (vor allem hinsichtlich Kosten) ermöglicht. Diese Automatisierung ist ein bedeutender Schritt zur Optimierung des gesamten Konstruktionsprozesses, da Menschen nur eingeschränkt fähig sind, kognitive Vorgänge wiederholbar zu durchlaufen. Da verschiedene Personen eine Aufgabe ohne streng fixierte Vorgehensweise, d. h., ohne Systemunterstützung, mit hoher Wahrscheinlichkeit unterschiedlich lösen, wäre ansonsten die Optimalität der Lösung nicht gesichert [1]. Darüber hinaus werden durch Automatisierung die Konstrukteure von solchen Aufgaben entlastet, wo kreative Anteile keine Rolle spielen. So bleibt ihnen mehr Zeit für kreativ-wertschöpfende Arbeit [6].

Der in Bild 3 am Beispiel von Begehungsbaugruppen schematisch dargestellte Ansatz, kann sowohl bei der Erzeugung von vereinfachten Angebots- als auch komplexen Detailmodellen zum Einsatz kommen.

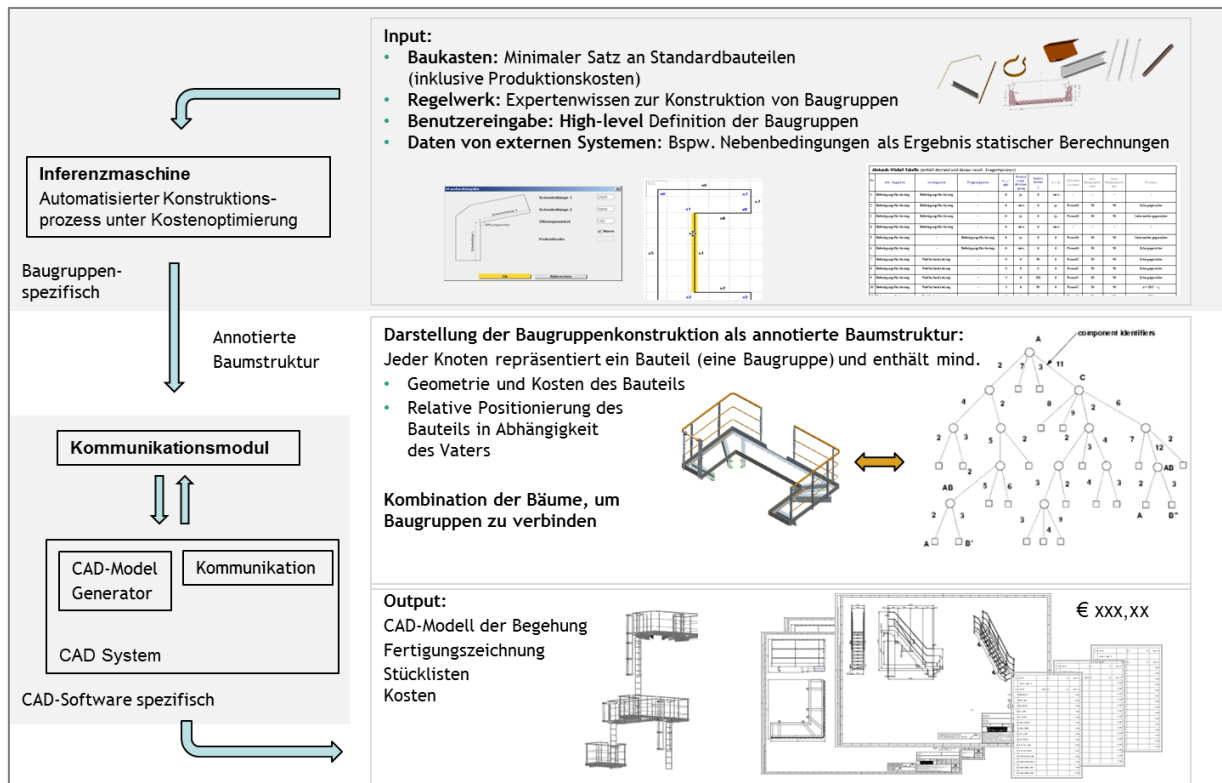


Bild 3: Ansatz zur Konstruktionsautomatisierung

Obige Abbildung zeigt das zu Grunde liegende Lösungsverfahren:

- Bestimmung der das Lösungsmodell definierenden Parameter
- Überführung dieser Eingangswerte in eine CAD-System unabhängige Zwischenrepräsentation
- Erzeugung des Zielmodells und seiner Derivate im CAD-System

Charakteristischer Kern des Ansatzes sind die CAD-System unabhängige Zwischenrepräsentation und die darauf arbeitende allgemeine Inferenzmaschine, ebenso wie das als Verbindungsframework ausgelegte Kommunikationsmodul, das die bidirektionale Anbindung an beliebige CAD-Systeme erlaubt.

Im Folgenden werden die oben genannten Teilschritte im Detail vorgestellt.

### 3.1 Bestimmung der das Lösungsmodell definierenden Parameter

Um ein CAD-Modell automatisch erzeugen zu können, werden sämtliche Informationen benötigt, die den Zielzustand definieren. Hierbei wird zwischen vom Zielzustand unabhängigen und abhängigen Informationen unterschieden. Die unabhängigen Informationen, wie die zu Grunde liegende Konstruktionslogik und Komponenten, liegen bereits nach der ohne Konstruktionsautomatisierung erzielten Erstentwicklung eines Produktes vor. Die Definition des Zielzustandes ist ebenso wie unter Umständen Statik-bestimmende Informationen vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Sie sind also zielzustandabhängig. Beide Informationsklassen werden im Folgenden detailliert.

### 3.1.1 Zielzustandunabhängige Informationen Konstruktionslogik

Eine Analyse des Konstruktionsprozesses ergibt in der Regel, dass sich dieser in repetitive und kreative Anteile klassifizieren lässt. Im Gegensatz zu kreativen Prozessen, werden repetitive jeweils analog durchlaufen. Sie machen keine kreativen Entscheidungen notwendig. Um ein wiederholbares Durchlaufen repetitiver Prozesse sicherzustellen, und alle notwendigen Schritte zur Erstellung einer vollständigen Baugruppenkonstruktion zu erfassen, erfolgt die Analyse dieser Prozesse auf Basis von Experteninterviews mit Entwicklungsingenieuren. Ein großer Teil ihrer Tätigkeit ist durch Aufnahme und Einhaltung der dem Konstruktionsprozess zugrunde liegenden Einflussgrößen bestimmt. Dies sind landesspezifische und Werksnormen, Vorgaben der Statik, entstehende Kosten, konstruktions- und fertigungstechnische Restriktionen sowie Kundenanforderungen. Bei einem Podest können das beispielsweise spezielle Befestigungslogiken unter Beachtung der Flächenlasten sein.

Repetitiv geprägte Anteile von Konstruktionsprozessen können in einem Regelwerk abgebildet werden. Darauf abzielend wird das aufgenommene Wissen aufbereitet und informationstechnisch in einer aus statischen und dynamischen Regeln bestehenden sowie universell formulierten Regelbasis hinterlegt. Damit wird eine allgemeine Anwend- bzw. Übertragbarkeit auf unterschiedlichste Baugruppen mit vielschichtigen funktionalen und konstruktiven Anforderungen erreicht. Resultat der so vollzogenen Optimierung von Konstruktionsprozessanteilen ist, dass der Konstrukteur zukünftig weniger Zeit und mentalen Aufwand darauf verwenden muss, monotone und fehlerträchtige Tätigkeiten auszuführen. Diese Entlastung erlaubt ihm bzw. ihr sich mehr auf wertschöpfende, kreative Tätigkeiten, insbesondere bei kundenindividuellen Anpassungen zu konzentrieren. Dabei deckt der jetzt automatisierte Konstruktionsprozess alle variantenartigen Ausprägungen einer Baugruppenart ab [1].

#### Komponenten

Die Analyse von Konstruktionsprozessen ergibt weiterhin häufig, dass sehr viele verschiedene Bauteile existierten (hohe Varianz). Um das Ziel der Minimierung der Bauteilvielfalt zu erreichen, wird dann ein Bauteilbaukasten aus standardisierten Teilen entwickelt. Die Standardisierung erfolgt anhand einer Klassifizierung der Bauteile.

Eine vierstufige Klassifizierung wird hier beispielhaft erläutert. Ihre Bestandteile sind Bibliotheksteile, Bibliotheksteile mit Freiheitsgraden, Bauteile aus Rohmaterial und nach Regeln zu generierende Bauteile aus definiertem Rohmaterial. Diese Bauteilklassen unterscheiden sich in ihrem Freiheits- bzw. Standardisierungsgrad. Die in der vorangehenden Aufzählung erstgenannte Bauteilkategorie (Bibliotheksteile) besitzt keine Freiheitsgrade, und damit maximale Standardisierung. Die Bauteile dieser Klasse sind geometrisch fixiert und nicht änderbar. Im Gegensatz dazu sind nach Regeln zu generierende Bauteile aus Rohmaterial (letztgenannte Klasse) lediglich durch den Querschnitt ihres Materials reglementiert. Das heißt, Bauteile dieser Klasse weisen maximale Freiheits- und einen minimalen Standardisierungsgrad auf.

Aus einem Baukasten werden, abhängig von den sich durch die jeweilige Baugruppe ergebenden Anforderungen, die passenden Bauteile ausgewählt und anhand ihrer Klasse spezifiziert, dimensioniert und referenziell positioniert.

### 3.1.2 Zielzustandabhängige Informationen

#### Definition Zielzustand

Zur Aufnahme der die Baugruppen definierenden Parameter werden grafische Oberflächen (GUIs) implementiert. Diese erlauben, die zu konstruierenden Baugruppen durch ein Minimum an Eingaben festzulegen. Priorität hat die effiziente, intuitive und komfortable Eingabe aller notwendigen Informationen zur Erstellung des 3D-CAD-Modells. Dabei wird jeweils großer Wert auf visuelle Unterstützung der einzugebenden Parameter gelegt. Bei der Definition einer Treppe beispielsweise steht eine skizzierte Seitenansicht der aktuell ausgearbeiteten Treppe zur Verfügung. Diese mit farblichen Sektoren hinterlegte Skizze, weist Benutzer darauf hin, ob der Winkel der definierten Treppe der zugrunde liegenden Norm entspricht.

Zusätzlich gibt das System dem Benutzer Rückmeldung mittels Dialogfenstern. Dies geschieht, wenn Restriktionen verletzt (wie etwa durch nicht normgerechte Eingaben) oder nicht umsetzbare Parameter eingegeben werden (z. B. im Falle von widersprüchlichen Angaben). Ebenso stehen Assistenten zur Verfügung, die einerseits die Definition häufig wiederkehrender Baugruppenausprägungen beschleunigen und andererseits die allgemeine Baugruppendefinition erleichtern.

GUIs können sowohl in ein CAD-System integriert als auch als externe Applikation umgesetzt werden.

#### Statikbestimmende Informationen

Die statischen Komplexitäten von Baugruppen können sich stark voneinander unterscheiden. Sie können, wie z. B. die lasttragenden Kragarme bei Treppen, aus wenigen, statisch relevanten Bauteilen bestehen. Andere Baugruppen, wie etwa ein Ausleger, setzen sich im Gegensatz dazu fast ausschließlich aus statisch relevanten Komponenten zusammen.

Bei ersterer Baugruppenart existieren aufgrund der vorgenommenen Standardisierung der Bauteile nur noch wenige Varianten der statisch relevanten Bauteile. Somit ist es möglich, die statischen Parameter dieser Bauteile mit vertretbarem Aufwand vorab zu berechnen und in der entwickelten Regelbasis abzulegen. Zum Beispiel kann für die oben erwähnten Kragarme kalkuliert werden, welche Last (bezogen auf eine Fläche) jede Ausprägung dieser Bauteile tragen kann. Daraus kann die notwendige Anzahl an Kragarmen für eine Treppe abgeleitet werden. Daraus folgt, dass diese Informationen in der hier dargestellten Klassifizierung eigentlich den zielzustandunabhängigen Informationen zuzuordnen sind.

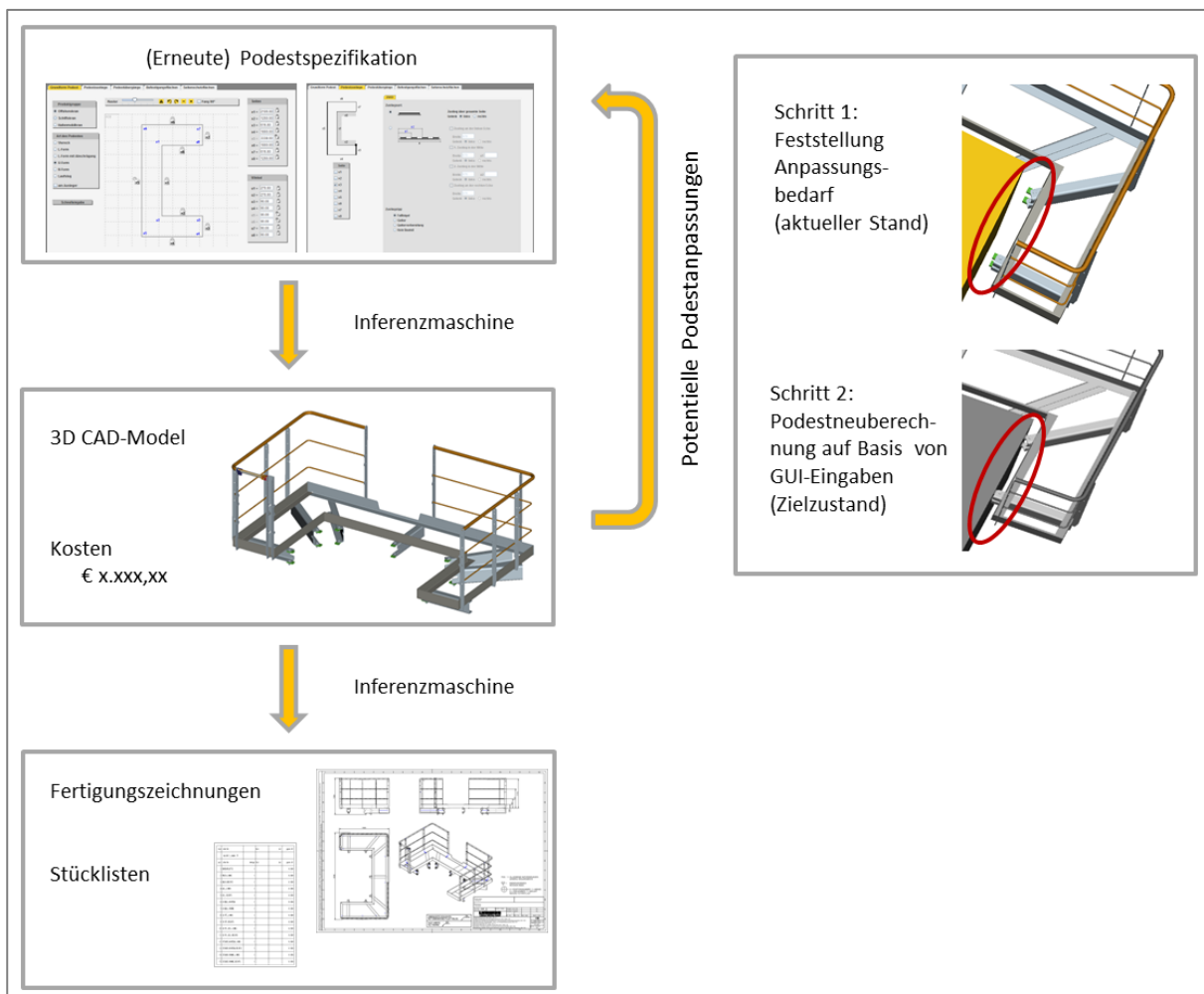
Zweitere Baugruppenart wird beispielhaft durch einen Ausleger repräsentiert. Da sich die Länge und die Struktur eines solchen Auslegers aus Anforderungen des Kunden, wie etwa spezifische Lastfälle (Neigungswinkel, Last und Position am Ausleger) ergeben, werden die strukturdefinierenden Bauteile je Anwendungsfall neu dimensioniert. Da diese Bauteile die Statik des Auslegers bestimmen, können mit argumentierbarem Aufwand nicht alle existierenden Varianten dieser Bauteile vorab statisch berechnet werden. Ihre statische Logik bzw. Statik kann dementsprechend nicht in Regeln abgebildet werden.

Trotz dieser Einschränkung konnte ein Lösungsansatz entwickelt werden, der eine gesamthafte Automatisierung des Konstruktionsprozesses auch solcher Baugruppen

ermöglicht: Die Einbindung einer Statiksoftware, die die entsprechenden Berechnungen vornimmt. Um einen Datenaustausch zu ermöglichen, wurde eine dedizierte Schnittstelle entwickelt, die es über ein standardisiertes Datenformat erlaubt, Parameter an die Statiksoftware zu senden und deren Ergebnisse zu empfangen. Ein Ausleger ist durch die definierten Lastfälle und die Art des Anlenk- und Kopfstücks sowie die Gesamtlänge definiert. Diese Daten werden der Statikberechnungsapplikation übergeben. Das berechnete Resultat ist eine gewichtsoptimierte Baugruppenstruktur, die den zuvor definierten statischen Restriktionen entspricht. Die Ergebnisdaten (wie erforderliche Blechstärken oder Anzahl an Beulsteifen) werden an den Automatisierungsprozess zurückgegeben.

### 3.2 Überführung der Eingangswerte in eine CAD-System unabhängige Zwischenrepräsentation

Die im vorhergehenden Unterabschnitt besprochenen Informationsquellen bilden die Basis für das Kernstück des dargelegten Ansatzes: Die auf der CAD-System unabhängigen Zwischenrepräsentation operierende Inferenzmaschine.



**Bild 4: Iterative Anpassungskonstruktion**

Diese verwendet die in ein Regelwerk überführte Konstruktionslogik, den standardisierten Bauteilbaukasten, die Benutzereingaben und, wenn notwendig, die Ergebnisse einer Statikprüfung, zur Berechnung der kostenoptimalen Struktur des definierten Zielmodelles. Der zugrunde liegende Algorithmus verwendet zur Lösung des resultie-



renden kombinatorischen Optimierungsproblems die Herstellkosten der Bauteile des definierten Baukastens. Diese werden mittels einer analytischen Methodik auf Basis der Mengengerüste (Stücklisten, Arbeitspläne) ermittelt. Der Optimierungsalgorithmus stellt sicher, dass eine, im Beispiel kostenoptimale, Konstruktionsalternative erzeugt und somit ein optimaler Prozess bei der konstruktiven Ausgestaltung des Zielmodells durchlaufen wird.

Da es gängige Praxis ist, die Konstruktion von CAD-Modellen iterativ durchzuführen, d. h., sie schrittweise auf den Zielzustand hin zu entwickeln, wurde die Inferenzmaschine so konzipiert, dass sie nicht nur die Benutzereingaben in eine interne Repräsentation transformiert, sondern auch Unterschiede zwischen verschiedenen Versionen dieser Repräsentation feststellt und entsprechende Anpassungen des CAD-Modells ableitet. So ist es z. B. möglich, die automatisiert erzeugte Erstversion eines Podestes, wie in Bild 4 dargestellt, mit diesem Ansatz anzupassen: Stellt der Konstrukteur fest, dass das so automatisiert entstandene CAD-Modell nicht dem erforderlichen Zielzustand entspricht, weil beispielsweise der Anschluss an die Vaterbaugruppe so aufgrund bestimmter Oberflächenbeschaffenheiten nicht vollständig möglich ist, kann er bzw. sie entsprechende Parameter- und somit Geometrieänderungen über die Oberfläche durchführen. Dies ist mehrfach, also iterativ, möglich.

Das Ergebnis der Inferenzmaschine ist eine baumartige Repräsentation des optimalen Zustandes des Zielmodells, in dem sämtliche Informationen hinterlegt sind, um das Ziel-CAD-Modell und seine Derivate zu generieren.

### **3.3 Erzeugung des Zielmodells und seiner Derivate im CAD-System**

Um die in der CAD-System unabhängigen Zwischenrepräsentation enthaltenen Informationen an das jeweils verwendete CAD-System übermitteln zu können, wurde ein Kommunikationsmodul entwickelt, das als Framework ausgelegt ist. Es erlaubt sowohl das Senden von Daten an CAD-Systeme als auch, umgekehrt, das Empfangen. Dieses Kommunikationsmodul wird zur Übertragung der für die Generierung und Positionierung der einzelnen Teilkomponenten erforderlichen Informationen an das CAD-System verwendet: Sukzessive wird zuerst die Geometrie eines Bauteils erzeugt bzw. angepasst, um es, bei Bedarf, im Anschluss zu einem weiteren Bauteil in Referenz zu platzieren oder dessen Position zu verändern. Durch diese referenzielle Positionierung kann die Änderung eines Bauteils der Baugruppe unmittelbar an alle anderen direkt oder indirekt referenzierten Komponenten weitergegeben werden. Erfolgt eine Änderung eines Bauteils der Baugruppe, so werden alle abhängigen Komponenten automatisch angepasst.

Die geschilderte Vorgehensweise kommt ebenso bei der Kombination von Baugruppen zur Anwendung. So ist es beispielsweise möglich, eine gesamthafte Begehung aus mehreren Baugruppen zu erstellen und anzupassen.

Zur vollständigen Automatisierung des gesamten Konstruktionsprozesses müssen die CAD-Modelle, abhängig vom Anwendungsfall (Angebots- oder Detailmodell), in entsprechend detaillierte Fertigungszeichnungen überführt werden, die den geltenden Normvorgaben entsprechen. Bei einem Angebotsmodell ist in der Regel ein geringerer Detaillierungsgrad als bei produktionsfertigen Detailmodellen gefordert. Deshalb kann hier eine standardisierte Zeichnungsvorlage zum Einsatz kommen, deren Ansichten vom entwickelten System nicht neu erzeugt, sondern angepasst und

deren Maße je nach Anwendungsfall verändert oder neu erzeugt werden. Handelt es sich allerdings um eine, aus einem Detailmodell heraus generierte fertigungsgerechte Zeichnung, ist eine hohe Detailtiefe gefordert. Deshalb werden diese Zeichnungen neu erstellt. Die für die Produktion relevanten Ansichten eines Modells werden auf einem Zeichnungsblatt generiert und positioniert. Um auch dieses Problem mit vertretbarem Zeitaufwand lösen zu können, wurde ein vereinfachter Verschnittoptimierungsalgorithmus entwickelt. Dieser reduziert jede auf einer Zeichnungsseite darzustellende Ansicht auf ein Rechteck, oder eine Kombination dieser, und bestimmt dann die dafür am wenigsten Verschnitt verursachende Position.

Außerdem müssen die Ansichten um für die Produktion relevante Maße ergänzt werden. Bei der Positionierung dieser sind Werks- und Industrienormen zu beachten. Um den Bemaßungsprozess effizient automatisieren zu können, wurde ein generischer Algorithmus entwickelt, der ausschließlich anhand des Typs des zu bemaßenden Elements (z. B. Kante) die Position auf dem Zeichnungsblatt berechnet.

Zusätzlich zum Ziel-CAD-Modell und seiner Zeichnung wird auch die entsprechende Stückliste erzeugt und die resultierenden Herstellkosten dem Benutzer in der GUI angezeigt.

Der so vorgestellte Lösungsansatz wurde in einer Software-Lösung umgesetzt die gesamthaft als Software-Framework ausgelegt ist. Für weitergehende Informationen dazu wird auf [4] verwiesen. Mit Hilfe des sukzessive entstandenen Frameworks wurde der vorgestellte Lösungsansatz unter anderem auf die im Abschnitt 2 beschriebenen Anwendungsfälle angewandt. Die so erzielten Konstruktionsautomatisierungssapplikationen bzw. deren Prototypen befinden sich bei verschiedenen Industriepartnern entweder noch in der Testphase oder sind operativ im Einsatz.

## **4 Erzeugung von CAD-Modellen: Bottom-Up versus Top-Down**

Abhängig von den Anforderungen und der Beschaffenheit einer zu automatisierenden Baugruppenart, kann ein CAD-Modell mit Hilfe des im vorhergehenden Abschnitts vorgestellten allgemeinen Ansatzes auf zwei verschiedene Arten und Weisen automatisiert erzeugt werden: Bottom-Up oder Top-Down. Beide Herangehensweisen werden im Folgenden erläutert, verglichen und schließlich ihre Verwendungsmöglichkeiten dargestellt.

### **4.1 Vorstellung der Herangehensweisen**

#### **4.1.1 Bottom-Up**

Dieser Lösungsweg ist dadurch gekennzeichnet, dass das Zielmodell, ausgehend von den drei Standardebenen eines 3D-Körpers, Bauteil für Bauteil sukzessive neu aufgebaut wird. Jedes Bauteil wird aus dem standardisierten Baukasten geladen und u. U. angepasst bzw. aus Rohmaterial neu erzeugt und im Anschluss positioniert. Handelt es sich um eine Kombination von Baugruppen, werden zuerst alle Baugruppen erzeugt und diese dann zueinander positioniert.

Mit dieser Methodik ist es möglich, eine hohe und divergierende Anzahl an vielgestaltigen Varianten zu erzeugen. Beispielsweise können Teilbaugruppen von Begehungen, wie Leitern, Treppen und Podeste sukzessive einzeln erzeugt und entsprechend definierter Schnittstellen kombiniert werden. Es ist keine globale Struktur vorgegeben. Die Erzeugung eines Leitermodells erfolgt dabei z. B. beginnend mit der ersten

und dann aller weiteren Sprossen. Daraufhin werden die seitlichen Wangen, Befestigungen und die Bestandteile des Rückenschutzes generiert und in Referenz zu diesen positioniert.

#### 4.1.2 Top-Down

Beim Top-Down-Ansatz wird, im Gegensatz zu obiger Methodik, ein generisches und intelligentes Gesamtmodell konstruiert, das aus Standardkomponenten besteht. Dieses Modell wird auf Basis der Anforderungen der jeweiligen Baugruppenvariante angepasst: Komponenten werden hinzugefügt, durch eine andere Ausprägung ersetzt oder entfernt. Einzelne Parameter einer Komponente können zusätzlich verändert werden. Die globale Grundstruktur der Baugruppe bleibt jedoch erhalten. Es werden nur diejenigen Komponenten vom Automatisierungsansatz erfasst, welche für die Zielsetzung relevant sind.

Am Beispiel eines Gesamtkrans kann dieser Ansatz erläutert werden: Die Grundstruktur des Krans ist fix. Allerdings kann es notwendig sein, dass diverse Unterbaugruppen verändert werden müssen. Der Kunde wählt z. B. eine andere Kabine als im Standardmodell enthalten, oder der Kran soll nicht auf einem Schiff, sondern auf einem Fahrwerk montiert werden. Hierzu muss der Durchmesser des Krananschlusses angepasst werden. Das heißt, es werden sowohl Komponenten ausgetauscht als auch Parameter im Modell verändert.

## 4.2 Gegenüberstellung der beiden Methodiken

In diesem Abschnitt werden die beiden beschriebenen Methodiken anhand verschiedener Kriterien miteinander verglichen und gegenübergestellt.

### 4.2.1 Lösungserstellung

Das offensichtlichste Unterscheidungsmerkmal resultiert aus dem Grundprinzip der beiden Vorgehensweisen: Beim Bottom-Up-Ansatz wird das Zielmodell von Grund auf neu erzeugt. So wird die sukzessive Definition und der Aufbau von Baugruppen nach und nach ermöglicht, ohne schon vorab die gesamte Struktur im Blick haben bzw. kennen zu müssen. Beim Top-Down-Ansatz hingegen existiert bereits ein generisches und intelligentes Lösungsmodell, das gemäß den jeweiligen Anforderungen konfiguriert wird.

### 4.2.2 Variantenvielfalt der Baugruppenart

Dadurch, dass der Top-Down-Ansatz auf einem Lösungsmodell basiert, ist die Vielfalt bzw. die Divergenz der erzeugbaren Baugruppenarten begrenzt. Der Lösungsraum ist durch die im Lösungsmodell definierte Struktur vorgegeben. Beim Bottom-Up-Ansatz verhält es sich hingegen so, dass sämtliche Varianten generiert werden können, die mit den Bauteilen des Standardbaukastens und dem hinterlegten Konstruktionswissen erzeugbar sind. D. h., der Lösungsraum dieser Methodik kann wesentlich ausgedehnter und vielgestaltiger sein.

### 4.2.3 Detaillierungsgrad der Baugruppenart

Der gerade zuvor beschriebene Vorteil des großen Lösungsraums hat jedoch zur Folge, dass jedes einzelne Bauteil in der Umsetzungsphase der Automatisierungsapplikation in der Struktur der Applikation abgebildet werden muss. Handelt es sich um eine Baugruppe mit vielen Bauteilen, so ist zu prüfen, ob dieser Modellierungsaufwand den dadurch resultierenden Nutzen rechtfertigt oder besser der Top-Down-Ansatz gewählt wird.

#### 4.2.4 Konstruktionswissensrepräsentation

Beim Bottom-Up-Ansatz wird das Konstruktionswissen durch Analyse und Experteninterviews erhoben, modelliert und in einem externen Regelwerk abgelegt. Im Gegensatz dazu existiert beim Top-Down-Ansatz bereits ein generisches und intelligentes Lösungsmodell, mit dem alle benötigten Varianten erzeugt werden können. D. h., ein Großteil des Konstruktionswissens ist darin implizit hinterlegt. Dieses Wissen wird zudem vom Konstrukteur selbst durch dessen Modellierung im Modell abgelegt und bleibt dadurch für die Konstrukteure transparent verfügb- und änderbar. Die beiden Ansätze unterscheiden sich somit durch die Ablage des Konstruktionswissens: Intern (im CAD-Modell) bzw. extern (in einer Regelbasis).

#### 4.2.5 Verwendung standardisierter Baukästen

Die Grundlage beider Ansätze ist ein standardisierter Bauteilbaukasten. Sowohl bei der Neuerstellung (Bottom-Up-Ansatz) als auch bei der Anpassung (Top-Down-Ansatz) bilden diese Bauteile die Basis zur Erstellung des Zielmodells. Die beiden Ansätze unterscheiden sich lediglich durch den Zeitpunkt der Bauteilverwendung: Im Bottom-Up-Ansatz geschieht dies während der CAD-Modellerzeugung, beim Top-Down-Ansatz v. a. bei der Erstellung des generischen und intelligenten Zielmodells in der Entwicklungsphase der Automatisierungsapplikation.

Die Definition des zu erzeugenden Zielzustands erfolgt bei beiden Ansätzen über die in Abschnitt 3 erläuterten Bedienoberflächen. Deren Anbindung ist von den Ansätzen unabhängig. Gleiches gilt für den Datenaustausch mit dem jeweiligen CAD-System.

### 4.3 Anwendung der Bottom-Up und Top-Down Methodiken

Beim Einsatz der beiden Methodiken sind die im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Charakteristiken mit den Eigenschaften der zu automatisierenden Baugruppenart zu vergleichen und abzuwägen. Entscheidend ist ebenfalls, in welcher Phase des Produktentstehungsprozesses die Konstruktionsautomatisierung eingesetzt werden soll: Für die Erstellung eines Detail- oder Entwurfsmodells.

Ist das Ziel ein Detailmodell zu erzeugen, so eignet sich der Bottom-Up-Ansatz v. a. für Produkte mit einer hohen Variantenvielfalt ohne fixe Grundstruktur und einer begrenzten Anzahl an Bauteilen, wovon potenziell jedes einzelne verändert werden kann. Ist das Produkt jedoch durch eine wenig ausgeprägte Variantenvielfalt, die lediglich die Änderung eines Anteils der Teilkomponenten erfordert und durch eine nahezu fixe Grundstruktur gekennzeichnet, dann bietet sich der Top-Down-Ansatz an.

Soll ein Entwurfsmodell, d. h. dessen grundlegende Struktur, und somit dessen wichtigste Ausprägungen ohne Detailstrukturen erzeugt werden, wie etwa in der Angebotslegung, so empfiehlt sich der Top-Down-Ansatz. Das vormodellierte intelligente Lösungsmodell kann durch entsprechende Konfiguration effizient in das gewünschte Zielmodell überführt werden.

Ein weiteres Entscheidungskriterium ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis bzgl. der Implementierung der resultierenden Konstruktionsautomatisierungsapplikation. Handelt es sich beispielsweise um ein Produkt mit vielen zu verändernden Einzelteilen, so entsteht ein hoher Aufwand zur Aufnahme, Abbildung und Implementierung ihrer Struktur- und Positionierungsspezifika (Konstruktionslogik). Handelt es sich hingegen um eine Baugruppe, deren Varianten mit einer hohen Frequenz erzeugt werden,

kann der entstehende Nutzen den Aufwand rechtfertigen. In allen anderen Fällen ist bei dieser Konstellation vom Bottom-Up-Ansatz abzuraten.

Ist das Ziel ein Produkt, das sich auf keine fixe Grundstruktur festlegen lässt, d. h. die Varianten des Produktes entstehen bereits in der Grundstruktur, so ist die Modellierung des intelligenten Lösungsmodells mit allen Varianten der Grundstruktur zumindest sehr zeitaufwendig oder gar nicht möglich. Deshalb ist der Top-Down-Ansatz für einen derartigen Anwendungsfall nicht zu empfehlen.

Abschließend sei angemerkt, dass die beiden diskutierten methodischen Vorgehensweisen bei der CAD-Modell-Erzeugung nicht zwangsläufig getrennt betrachtet werden müssen. Es ist ebenso möglich, sie in einer Mischform zu verwenden. Beispielsweise kann die Analyse eines Kranmodells ergeben, dass die Automatisierung des Gesamtkranmodells am effizientesten und qualitativ hochwertigsten mittels des Top-Down-Ansatzes durchführbar ist. Beim variantenvielfältigen Ausleger, als Bestandteil des Krans, kann die Analyse jedoch als Ergebnis liefern, dass der Bottom-Up-Ansatz optimalere Ergebnisse hinsichtlich des gewählten Zielzustandes liefert.

## 5 Ergebnisse

Mit Bezug auf die in der Einleitung vorgestellten Ziele bzw. durch Konstruktionsautomatisierung erzielbaren Vorteile wird in diesem Abschnitt über die mit dem dargelegten Ansatz und den diskutierten Bottom-Up und Top-Down-Methodiken erreichten Ergebnisse berichtet. Dies geschieht einerseits strukturiert nach Phasen des Entwicklungsprozesses für kundenspezifische Produkte vom kundenindividuellen Vertrieb über die Konstruktion bis hin zur Fertigungsvorbereitung und andererseits anhand der in Abschnitt 2 präsentierten Anwendungsfälle.

In allen Konstruktionsautomatisierungsprojekten wurde von den Konstrukteuren durchweg als sehr positiv beurteilt, dass das bewusste Befassen mit dem firmeninternen Konstruktionsprozess zu einer Steigerung der Qualität der jeweiligen Modelle und der Qualität des Gesamtprozesses führte.

### 5.1 Vertrieb

Im kundenindividuellen Vertrieb, bis hin zur Angebotserstellung, können insbesondere die Punkte (c) bis (f) als zentrale Erfolgsfaktoren benannt werden. Auch die automatische Generierung von Entwurfsmodellen sowie entsprechender grober Zeichnungsdarstellungen (j) sind wesentlich. Wie auch in den anderen Prozessschritten, ergeben sich durch den Einsatz von Konstruktionsautomatisierung im Vertrieb verminderte Fehlerraten (l).

Die Top-Down-Realisierung des Entwurfsmodells einer **Kran-Gesamtbaugruppe** befindet sich aktuell noch in der Umsetzungsphase, so dass noch keine abschließenden Ergebnisse berichtet werden können. Allerdings sind die ersten Rückmeldungen vom Vertriebspersonal zum entwickelten Werkzeug durchweg sehr positiv. Insbesondere die mittels interaktivem 3D-CAD-Entwurfsmodell erzielte Produktvisualisierung als Kommunikationsvehikel zur gemeinsamen, schrittweisen Definition der Zielkonfiguration, wird als Erfolgsfaktor bewertet. Sie macht auch das schnelle Ableiten grober Zeichnungen mit Hauptabmaßen möglich. Außerdem können auch weitere für Kunden relevante Kenngrößen wie das Gesamtgewicht direkt in den Entscheidungsprozess mit einbezogen werden. Die dazu notwendige interaktive Vorgehens-

weise mit kurzen Berechnungszeiten wurde durch die Top-Down-Vorgehensweise wesentlich begünstigt.

Ein entscheidender Schlüssel zu effizienten und beide Seiten zufrieden stellenden Verkaufsprozessen wird in der gleichzeitig erzielten, automatisierten Kalkulation der Herstellkosten gesehen, die deren Berücksichtigung als wesentliches Entscheidungskriterium direkt im Kundengespräch möglich macht.

## 5.2 Konstruktion

Hinsichtlich des eigentlichen Konstruktionsprozesses haben sich besonders die Punkte (g) bis (k) und (m) als wesentlich herauskristallisiert. Wiederum sind auch verminderte Fehlerraten als Folge von Konstruktionsautomatisierung zu betonen.

Im Bottom-Up bearbeiteten Projekt zur Hauptbaugruppe **Kastenausleger maritimer Krane** wurde speziell die Länge der verwendeten Bleche und damit auch die Position und Häufigkeit von Schweißnähten und Trennblechen mathematisch eindeutig optimiert.

Die statischen Parameter von jeweils kundenindividuell ausgelegten Kastenauslegern können prinzipiell nicht mit vertretbarem Aufwand vorab berechnet und in der entwickelten Regelbasis abgebildet werden, wie oben in Abschnitt 3 beschrieben. Mit dem Automatisierungsalgorithmus und den Ergebnissen der eingebundenen Statikberechnungen konnte mit Hilfe der in der Regelbasis hinterlegten Konstruktionsregeln dennoch eine kostenoptimale Lösung berechnet werden. Es stand also die Einbindung einer Software zur iterativen Statikprüfung im Vordergrund.

Bezüglich der auch in Abschnitt 3 dazu beschriebenen Optimierung war es außerdem wichtig, nicht durch ein vordefiniertes Gesamtmodell eingeschränkt zu sein, obwohl die Komponente Kastenausleger nicht besonders vielgestaltig und variantendivergent ist. Die Optimierung wurde zunächst einer Konstruktorsvorgehensweise nachgeahmt und später durch ein mathematisch eindeutiges Verfahren ersetzt.

Als Ergebnisse wurden Detailmodelle, Fertigungszeichnungen sowie Stücklisten erzeugt.

Die Konstruktion von **Begehungsbaugruppen maritimer Krane** wurde neu definiert. Da Begehungsbaugruppen um einen Kran bzw. an einen Kran heran konstruiert und genau angepasst werden, ist prinzipiell eine vorab definierbare, Kran-unabhängige Gesamtsicht schwer zu erreichen. Sie würde die Mächtigkeit eines automatisierten Konstruktionswerkzeuges für Begehungen bezüglich Kranformen auch zu stark einschränken. Eine flexible Vorgehensweise sollte sich nicht nur in der Konstruktionsprozedur widerspiegeln, sondern auch für Benutzer der Konstruktionsautomatisierungssaplikation gegeben sein. So wurden feste Abfolgen bei der Definition der Parameter als hinderlich eingestuft und somit vermieden: Baugruppen und Baugruppenkombinationen können in frei wählbarer Reihenfolge iterativ Bottom-Up erzeugt werden.

Die Experten von V-Research hatten im Zuge des Projektes die obligatorischen Normen und Anforderungen der Produktion erhoben und diese in Regeln transformiert. Darüber hinaus war das Konstruktionswissen erfasst und zusammen mit den

notwendigen statischen Parametern in einer Regelbasis modelliert worden. Die Einführung eines standardisierten Baukastens hatte die Anzahl der zu Grunde liegenden Bauteile minimiert.

Die entwickelte Softwarelösung ermöglicht – nach Aussage des Unternehmenspartners – einen bis zu 90 Prozent geringeren Zeitaufwand und eine deutliche Senkung der Produktionskosten. Die entwickelte Anwendung ist in die beim Unternehmenspartner verwendete CAD-Software integriert.

Anstatt der zeitaufwändigen Detailkonstruktion wird mithilfe einer grafischen Bedienoberfläche nur noch ein Minimum an Baugruppenparametern eingegeben. Als Ergebnis des automatisierten Konstruktionsprozesses werden ein Detailmodell, inklusive Fertigungszeichnungen, Stücklisten und Produktionskosten erzeugt. Es sind die Gewährleistung der Normvorgaben bzgl. der Gestaltung und damit eine verbesserte Lesbarkeit standardisierter Zeichnungen zu betonen. Außerdem sind alle Modelle wesentlich produzierbar und produktionsfertig, da sie aus Bauteilen aus dem entwickelten Standardbaukasten bestehen. Alle Modelle sind daher hinsichtlich Kosten und Produzierbarkeit optimiert.

Die Erzeugung von Detailmodellen und Produktionsunterlagen war einerseits deswegen wichtig, weil dieser Prozess im Allgemeinen besonders fehleranfällig ist. Im Speziellen galt es hier, wie schon erwähnt, zusätzlich den Umstand ihrer häufig nachgeordneten Spezifikation und deshalb möglichen Relevanz hinsichtlich kritischen Pfads zu berücksichtigen. Dem sollte vorgebeugt werden, indem Produktion und Montage möglichst unverzüglich starten können sollten.

### 5.3 Fertigungsvorbereitung

Bezüglich Fertigungsvorbereitung sind allgemein die Punkte (j) und (l) von besonderer Relevanz.

Bei der **Hauptbaugruppe Kastenausleger** wurde ein Schweiß- und Prüfplan realisiert. Im Projekt, das sich mit den **Begehungsbaugruppen** (Detailbaugruppen) befasste, wurde zusätzlich die Erstellung der Arbeitspläne konzipiert und Vorarbeiten in die Entwicklung integriert.

## 6 Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt, dass die Möglichkeiten des automatisierten Erstellens von CAD-Modellen und ihrer Derivate nicht vom Komplexitätsgrad der jeweiligen Baugruppe abhängen. Sowohl bei Detail-, Haupt- als auch bei Gesamtbaugruppen ist es möglich, die Effizienz des Konstruktionsprozesses mittels Konstruktionsautomatisierung erheblich zu steigern.

Abhängig von den Charakteristiken und dem Einsatzziel (Vertrieb oder Konstruktion bzw. Produktion) der zu automatisierenden Baugruppe stehen, wie erläutert, unterschiedliche Herangehensweisen zur Verfügung, die in einen allgemeinen Lösungsansatz eingebettet sind und durch Software-Frameworks unterstützt werden.

Auf Basis der diskutierten Faktoren kann die Anwendbarkeit der beschriebenen Ansätze aufgrund des jeweils resultierenden Kosten-Nutzen-Verhältnisses bzgl. Umsetzungsaufwand und Kostenersparnis bewertet und gewählt werden.

Die Anwendung des vorgestellten Ansatzes ist nicht auf einzelne CAD-Systeme begrenzt. Er wurde so konzipiert, dass jedes CAD-System, das eine entsprechende Schnittstelle zur Verfügung stellt, eingebunden werden kann.

## 7 Literatur

- [1] Adickes, H. et al. (2008). Lean Innovation – Auf dem Weg zur Systematik. Aachener Werkzeugmaschinen Kolloquium '08 – Aachener Perspektiven, Brecher, C., Klocke, F., Schmitt, R. & Schuh, G., Apprimus Verlag Aachen, 2008, S. 494 ff.
- [2] Chakrabarti, A., Shea, K., Stone, R., Cagan, J., Campbell, M., Hernandez, N. V., & Wood, K. L. (2011). Computer-Based Design Synthesis Research: An Overview. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(2).
- [3] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., & Lindemann, U. (2007). *Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren: Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung*. 6. Auflage, Springer Verlag.
- [4] Frank, G., Entner, D., Prante, T., Khachatouri, V. & Schwarz, M. (2014). Towards a Generic Framework of Engineering Design Automation for Creating Complex CAD Models. *International Journal on Advances in Systems and Measurements*. 7, no. 1 and 2 (June 30): 179-192.
- [5] Liebherr-Werk Nenzing GmbH, <http://www.liebherr.com/de-DE/35267.wfw>
- [6] Verhagen, W. J. C., Bermell-Garcia, P., van Dijk, R. E. C., & Curran, R. (2012). A critical review of Knowledge-Based Engineering: An identification of research challenges. *Advanced Engineering Informatics*, 26(1), 5-15.
- [7] V-Research GmbH, <http://v-research.at>