

WIR INTEGRIEREN INNOVATIVE SOFTWARE-TECHNOLOGIEN UND  
METHODEN DER „MASCHINELLEN INTELLIGENZ“ IN IHRE PRODUKTION

## KOMBINATORISCHE KONSTRUKTION

### CONSTRUCTIVE COMBINATORICAL ENGINEERING

Kreativität ist das entscheidende Betriebskapital jedes Konstrukteurs. Und deswegen können Computer nicht konstruieren - ein verheerender Trugschluss! Systemforschung zeigt an zwei komplexen Praxisbeispielen, wie innovative Optimierungswerkzeuge umfangreiche Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben automatisch bewältigen. Zwar sind die Zielforderungen an das zu entwickelnde Produkt klar spezifiziert und auch die konstruktiven Mittel (Bausteine, Konfigurationen, Verknüpfungsmöglichkeiten) sind klar definiert. Die Vorgehensweise jedoch, und das ist das eigentlich kreative und schwierige am Konstruktionsprozess, ist dem Computer nicht vorgegeben. Der Mensch nutzt dazu Intuition und systematisches Denken, der Computer „Maschinelle Intelligenz“. In diesem Fall verwendet er dazu moderne Optimierungsverfahren einschließlich genetischer Algorithmen und lernfähige Methoden. Der Vorteil des Rechners: Er kann erheblich mehr Alternativen exakt durchkalkulieren und reagiert schneller und flexibler auf veränderte Bedingungen.

### PROBLEMSTELLUNG KONSTRUKTION

Das Kerngebiet rechnergestützter Automatisierung waren bisher einfache beschreibbare Aufgaben mit klar definierter Vorgehensweise, wie Verwaltung des Material- und Informationsflusses, Rechnungswesen oder Datenbankrecherchen. Hier überzeugt der Rechner durch Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit, gerade bei hohem Datenvolumen.

Aber auch Aufgaben, die dem Menschen ein höheres Maß an Intelligenz, Kreativität und analytischem Denken abverlangen, sind durch innovative Optimierungsverfahren einer computergestützten selbstständigen Bearbeitung zugänglich. Ein Einsatzgebiet solcher Methoden der „Computational Intelligence“ sind wiederkehrende ähnliche Konstruktionsaufgaben, die üblicherweise der Einsatz von qualifizierten, eingearbeiteten Fachkräften erfordern. Dabei ist das Produkt mit seinen gewünschten Eigenschaften genau spezifiziert.

Auch enthält eine Komponentendatenbank die benötigten Bausteine mit den nötigen Informationen über Kombinations- und Konfigurationsmöglichkeiten, Kosten und Verfügbarkeit. Jedoch hat jede neue Aufgabenstellung ihre spezifischen Besonderheiten und Schwierigkeiten und erfordert ihren eigenen Lösungsweg bei der Konstruktion.

Als illustratives Beispiel diene die Konstruktion von Kreiselpumpen für verschiedenste Anwendungen, bestehend aus Gehäuse, Achsen, Lagern, Dichtungen, Rotor, Motor und Steuerung. Die Anforderungen jedes Auftrags (Durchfluß, Viskosität, chemische Reaktivität, Temperatur, Explosionsklasse, etc.) und verschiedene Konstruktionsziele (Preis, Gewicht, Lieferzeit) erfordern jeweils unterschiedliche Lösungswege, da jeweils andere Komponenten die kritischen oder begrenzenden Elemente darstellen.

## ARBEITSWEISE DES KONSTRUKTEURS

Ein Mensch „sieht“ das Kernproblem, schränkt mit den zielgerichteten Entwurf der kritischen Komponenten die Lösungsvielfalt schnell ein und spezifiziert die übrigen Komponenten nachfolgend. Dabei spielt er nur wenige Alternativen tatsächlich konstruktiv und kalkulatorisch durch. Es gibt daher keinen standardisierten Arbeits-

ablauf sondern eine Vielzahl möglicher Vorgehensschemata und kein Konstrukteur hat jemals alle durchdacht oder kann angeben, wann welches erfolgversprechend ist. Dies wäre aber die Voraussetzung für eine rechnerbasierte Lösung.

---

## RECHNERBASIERTE ANSÄTZE

Konventionelle Software bewältigt üblicherweise standardisierte Arbeitsabläufe. Diese sind zwar ideal zu automatisieren, erledigen aber meist nur untergeordnete Teilaufgaben. Auch verbreitete analytische Optimierungsmethoden (Lineare Programmierung, baumorientierte und grafenbasierte Verfahren, Gradientenmethoden) lösen nur abgegrenzte Teilaufgaben praxisrelevanter Probleme. Zur Problemanalyse benötigt man weiterhin den Experten.

Den Schlüssel sah man ein zeitlang in Expertensystemen. Das Wissen der Experten über die Wahl der Vorgehensweise wurde in Form von Regeln niedergelegt, die bei Vorliegen bestimmter Bedingungen (z.B. an den geforderten Durchfluss oder die Viskosität) den nächsten Arbeitsschritt empfehlen (z.B. konstruiere

zunächst den Rotor nach einer bestimmten Vorschrift). Zur Lösung einer bestimmten Konstruktionsaufgabe suchte das System dann anhand dieser Regeln selbstständig die geeignete Vorgehensweise.

Als zentrales Problem erwies sich die Gewinnung dieser Regeln, die „Wissensakquisition“. Selbst wenn sich die Experten kooperativ zeigen, differiert ihre Einschätzung, nach welchen Kriterien sie die Vorgehensweise wählen, erheblich von ihrer tatsächlichen Entscheidung in der Situation. Experten sind gewohnt, ihre Entscheidungen, teilweise intuitiv, von Fall zu Fall zu treffen. Ihre Arbeit verlangt nie, dass sie umgekehrt verallgemeinern, unter welchen Bedingungen sie eine konkrete Entscheidung treffen.

---

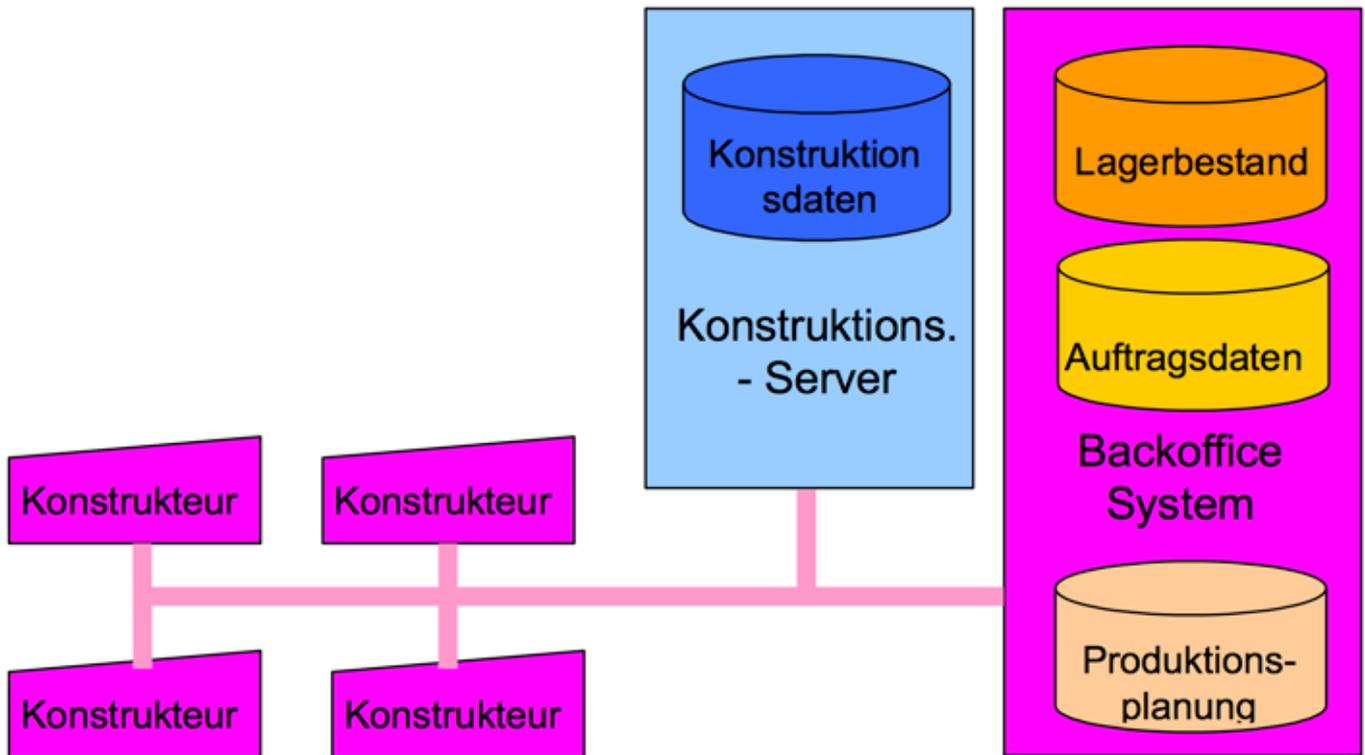
## COMPUTATIONAL INTELLIGENCE - LEARNING BY CONSTRUCTING

Grundsätzlich anders nutzen moderne Optimierungsstrategien das praxisrelevante Erfahrungswissen, die bewährten Heuristiken, Entwurfsideen und Tricks der Konstrukteure, nämlich als mögliche Bausteine oder Lösungsschritte, die das Optimierungssystem selbstständig zur Gesamtlösung zusammensetzt. Dies beinhaltet ein strukturiertes „Ausprobieren“ der gegebenen Ansätze – Trial and Error“ - und ein iteratives Lernen während jeder Aufgabe anhand des erzielten Fortschritts. Problemspezifische effiziente Optimierungsmethoden und/oder genetische Algorithmen kombinieren dabei die Bausteine in eigener Regie und bewerten die entstandene Lösung anhand der geforderten Eigenschaften und angestrebten Optimierungsziele. Im Unterschied zum Menschen spielt der Rechner in kurzer Zeit einige

Millionen von Alternativen durch und lernt währenddessen aus „eigener Erfahrung“, welche der Bausteine oder Heuristiken bei der konkreten Aufgabe zu guten Entwürfen führen. Ebenso erfährt er, welche der geforderten Spezifikationen schwer zu erfüllen sind und richtet die Prioritäten seiner Suchstrategie an diesen Kernproblemen aus.

Im Ergebnis erspart sich somit der Anwender die – unmögliche – exakte Abgrenzung der Einsatzvoraussetzungen für seine bewährten Lösungsansätze und Heuristiken. Dennoch findet er seine erfolgreich eingesetzten Heuristiken in der maschinell generierten Lösung wieder. Dies erhöht ganz wesentlich die Transparenz und Akzeptanz des Ergebnisses.

## VORTEILE FÜR DEN ANWENDER



Der Anwender profitiert von einem solchen automatisierten Konstruktionssystem vor allem durch die gewonnene Flexibilität in einem Bereich, der üblicherweise einen zeitlichen und personellen Engpass darstellt. Kürzere Planungs- und Beratungszeiten sind wesentliche Wettbewerbsvorteile. Je nach Anwendungsfall läßt sich die Produktivitätssteigerung umsetzen in:

**Bessere Qualität** – Gerade bei komplexen Anforderungen wie hohe Kombinationsvielfalt, variierende und heterogene Komponenten, wechselnde Randbedingungen kann der Mensch nicht alle nötigen Informationen „gleichzeitig im Kopf“ haben. Der Computer hingegen greift schnell und sicher auch auf große heterogene Datenbestände zu. Er kann mehr Alternativen hinsichtlich der interessierenden Zielgrößen zügig und durchkalkulieren und kommt daher oft besseren Ergebnissen.

**Höhere Komplexität:** – Das hohe Verarbeitungspotential ermöglicht auch die optimale Lösung komplexerer Aufgaben, die bisher nur in grob vereinfachter Form einer Bearbeitung mit wirtschaftlichem Aufwand zugänglich waren.

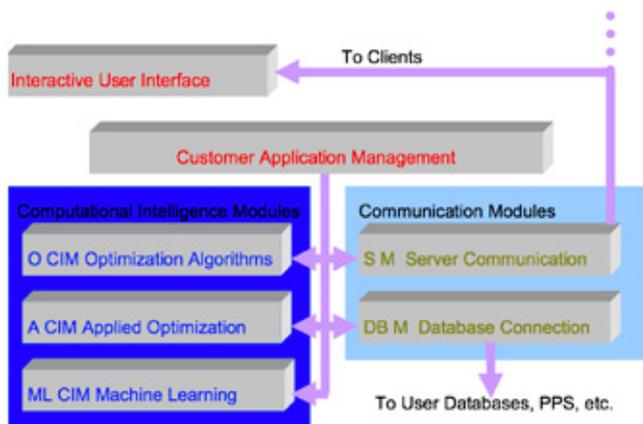
**Schnellere Lösung** – Bei Verwendung effizienter Algorithmen lässt sich die Planungszeit zum Teil drastisch reduzieren. Wozu ein Planungsteam zuvor noch Wochen benötigte, löst der Rechner nur in wenigen Stunden.

Kleinere Aufgaben sind sekundenschnell abgeschlossen, das genügt sonst nicht mal zum Erfassen des Problems. Der Durchsatz der Planungsabteilung steigt dadurch gewaltig. Bei der Applikation „Schließanlagen“ werden über 95% der Aufträge direkt ohne Interaktion berechnet und zum PPS weitergeleitet.

**Effiziente Variantenanalyse** – Eine häufige Fragestellung: Was kostet es wenn Gewicht reduziert, die Funktionalität erweitert, die Lieferzeit verkürzt oder eine andere Spezifikation geändert wird? Sowohl intern bei der Suche nach einem marktgerechten Produkt als auch bei der Kundenberatung direkt vor Ort ist eine schnelle Antwort von hohem Nutzen.

Flexibilität bis zur Produktion – Auch kurzfristige Änderungen, sei es durch geänderte Spezifikationen, interne Produktionsengpässe oder geänderte Eigenschaften der Komponenten lassen sich leicht in einen variierten Entwurf umsetzen.

# MODULARES SOFTWAREDESIGN



Durch vorgefertigte und erprobte Optimierungsmodule ist eine zügige und sichere Adaption an die jeweilige Problemstellung beim Kunden möglich.

## CIM – Computational Intelligence Modules

**O CIM** umfasst allgemeine Optimierungsmethoden wie grafenbasierte Methoden, Lineare Programmierung, Branch and Bound, genetische Algorithmen,...

**A CIM** enthält vorkonfigurierte anwendungsspezifische Optimierungen, wie z.B. Nesting oder Sheduling.

**M CIM** beinhaltet Methoden des maschinellen Lernens wie Künstliche Neuronale Netze, Regression, Clustermethoden, induktive Expertensysteme.

## Communication Modules

**S M** und **DB M** sorgen für die Kommunikation zwischen Server und Clients sowie zu kundeneigenen Datenbanken.

## Customer Application

Die anwenderspezifischen Funktionen und Abläufe sind für jede Applikation im **CAM** zusammengefasst und nutzen die Dienstmodule zu Lösung der speziellen Aufgabenstellung. Zu diesen anwendungsspezifischen Softwareentwicklungen gehört ferner auch die Bedienoberfläche (**IUI**) einschließlich lokaler Dokumentation und Archivierung.

zusammengefasst und nutzen die Dienstmodule zu Lösung der speziellen Aufgabenstellung. Zu diesen anwendungsspezifischen Softwareentwicklungen gehört ferner auch die Bedienoberfläche (**IUI**) einschließlich lokaler Dokumentation und Archivierung.

## INTEGRATION IN DEN ARBEITSABLAUF

Sinnvoll ist der Einsatz eines solchen Optimierungswerkzeugs als zusätzliches Assistenzsystem in einer Planung- oder Entwicklungsabteilung, das in den elektronischen Daten- und Informationsfluß eingebunden ist. Kleine und mittlere Standardaufgaben können vollautomatisch bearbeitet werden. Bei großen oder schwierigen Aufträgen überwachen Fachkräfte den Entwurfsvorgang, bewerten Alternativen und variieren ggf. Zielvorgaben.

Dazu greift der Optimierungs-Server unmittelbar auf Stammdaten im Backoffice System zu, um Aufträge, Lagerbestände und Konstruktionsdaten zu erfassen. Die Konstrukteure kommunizieren über Clients mit dem System direkt von ihrem Arbeitsplatz aus. Die Ergebnisse werden direkt in die entsprechenden Datenbanken des Backoffice Systems (z.B. PPS) eingepflegt.

# EINSATZVORAUSSETZUNGEN

Einsatzbereiche von derartigen Optimierungssystemen sind Konstruktionsaufgaben für wiederkehrende ähnliche Aufgabenstellungen.

## Wesentliche sind:

- Gegebene Zielstellung für das Endprodukt  
(spezifizierte Eigenschaften, Randbedingungen, Optimierungsziele)
- Gegebene konstruktive Mittel  
(Bausteine, Varianten, Einsatzbedingungen, Verknüpfungsmöglichkeiten)

## Dabei kann die Aufgabenstellung durchaus anspruchsvoll sein:

- Hohe Komplexität
- Wechselnde Zielstellungen
- Wechselnde Bausteine

# BERECHNUNG MECHANISCHER SCHLIESSANLAGEN

INNOVATIVE PROJEKTE MIT FÜHRENDEN HERSTELLERN: DOM, KESO, CES, WILKA

Die Bonner Firma SYSTEMFORSCHUNG, die schon viele individuelle Optimierungsprojekte bei Firmenkunden verschiedener Branchen durchgeführt hat, präsentiert nun eine praxisgerechte Lösung zur Kodierung mechanischer Schließanlagen. Sie wurde in enger Zusammenarbeit mit der GMD (jetzt fusioniert mit FHG) entwickelt. Gegenüber verfügbarer Software für Hersteller von Schließanlagen weist der neuartige Optimierungsansatz hinsichtlich der Transparenz und Erweiterbarkeit deutliche Vorteile auf. Er umfaßt den gesamten Entwurfsprozess auch komplexer Anlagen insbesondere im Hinblick auf spätere Erweiterungen. Die bewährte Lösungsstruktur und Vorgehensweise des erfahrenen Planungsteams des Pilotkunden spiegelt sich auch in den maschinell generierten Kodierungen wieder. Auch die maschinellen Lösungen sind für die Kundenberater wie gewohnt transparent und übersichtlich und enthalten gezielt planbare Redundanz für Erweiterungen. Ebenso werden Vorplanungen für spätere Bauabschnitte in übersichtlicher Weise berücksichtigt.

Die Kodierung mechanischer Schließanlagen für Gebäudekomplexe wie Schulen, Verwaltungen und Firmenzentralen ist eine umfangreiche kombinatorische Konstruktionsaufgabe, die einiges an Erfahrung und Übersicht verlangt. Insbesondere die geschickte Einplanung von Redundanz für spätere Erweiterungen verlangt Sachverstand und Systematik.

Jeder Schlüssel soll eine bestimmte Teilmenge der Schlösser öffnen, aus anderen Türen muss er draußen bleiben. Manche Schlösser werden von vielen Schlüsseln geöffnet, z.B. der Haupteingang und es gibt Generalschlüssel, die in viele Türen passen, z. B. für Abteilungsleiter. Klare hierarchische Abteilungsstrukturen oder Zugangsberechtigungen, lassen sich vergleichsweise einfach und übersichtlich in eine mechanische Kodierung der Schlösser umsetzen.

Daneben bestehen zunehmend Funktionsanforderungen für Schlüssel, die diese transparente Gliederung durchbrechen. Hausmeister, Reinigungspersonal, Räume der Klima- und Gebäudetechnik, Werkstätten, Rechenzentren und Labore erfordern kompliziertere Schließfunktionen. Die Komplexität zu realisierender Schließpläne wächst im selben Tempo wie die Ausdifferenzierung zugrundeliegender Arbeitsabläufe, projektbezogene interdisziplinäre Teamarbeit und die Konzentration von Hierarchieebenen und Unternehmensteilen. Hier ist in zunehmendem Maße eine automatisierte Lösung nötig, die dennoch Transparenz und Redundanz gewährleistet.

---

## DIE KODIERUNGSAUFGABE BEI MECHANISCHEN SCHLIESSYSTEMEN

Die mechanischen Schließsysteme, die diese vielfältigen Funktionen realisieren sollen, haben dazu nur beschränkte, konstruktiv bedingte Möglichkeiten: Sie enthalten Strukturelemente wie Nuten, Rippen, Zuhaltstifte, Noppen und Mulden, die in ihrer Kombination die gewünschte Funktion realisieren. Leider kann man damit nicht einfach jedem Zylinder diejenigen Schlüssel mitteilen, die passen sollen. Jedes Strukturelement im Zylinder wirkt sich auf die Funktion vieler Schlüssel aus, ebenso wie jedes Strukturelement am Schlüssel seine Funktion bezüglich vieler Zylinder beeinflusst. Will man für eine Schließanlage mit beispielsweise 5000 Türen all diese Strukturelemente festlegen, so ergibt sich ein kombinatorisches Puzzle ungeheurer Komplexität. Rein rechnerisch gäbe es mehr als  $10^{20000}$  Möglichkeiten.

Dabei lässt es sich nicht vermeiden, dass auch einige nicht bestellte Schlüssel existieren, die in einige Zylinder dieser Anlage passen, also eine vom Kunden nicht benötigte Funktion haben. Diese werden einfach nicht ausgeliefert, schlimmer wiegt aber, dass sie nun auch zur Realisierung anderer Schließanlagen weiterer Kunden nicht mehr verwendet werden dürfen. Bei einem optimal konstruierten Anlagenentwurf gehen nur wenige potentielle Schlüssel für andere Anlagen verloren. Die kombinatorischen Ressourcen eines Schließsystems sollen also sparsam eingesetzt werden, aber doch so, dass die Lösung übersichtlich und erweiterbar bleibt – ein mathematisch schwieriges Problem.

Informatiker sagen, das Problem ist „NP-hard“ und meinen damit, dass die systematische Auswahl der besten aller Alternativen schon bei so wenigen wie 20 Schlössern die Kapazitäten aller Rechenanlagen sprengen würde. Bei den in der Praxis geforderten und auch realisierten Anlagen geht oft die Zahl der Schlösser oft in die Tausende.

Insbesondere die vielfältigen Schließfunktionen jenseits klarer Hierarchien verhindern einfache, übersichtliche Lösungsansätze. Als zusätzlich wichtige Designkriterien müssen beim Entwurf die Erweiterungsfähigkeit und die Transparenz berücksichtigt werden. Dies zwingt meistens zu Kompromissen.

---

## MANUELLE EXPERTENARBEIT

Zwar gab es für die Anlagenplaner vielfältige Computerunterstützung für klar formalisierte Teilaufgaben, das Kernproblem blieb aber Handarbeit. Nicht selten musste ein mehrköpfiges Planungsteam über Wochen auf dutzenden von Quadratmetern Planungswänden eine Lösung iterativ erarbeiten. Dieser schwerfällige Prozess ermöglicht kaum eine flexible Reaktion auf geänderte

Kundenwünsche, auch blieben zuweilen einige Wünsche wegen zu großer Komplexität unerfüllt. Dabei haben sich die Planer umfangreiches Erfahrungswissen, variantenreiche Lösungsansätze und unzählige Tricks angeeignet, die an Neulinge in einem mehrjährigen „training on the job“ weitergegeben werden musste.

---

## RECHERCHE NACH LÖSUNGSKONZEPTEN

Zur Überwindung dieses Engpasses hat die Bonner Firma SYSTEMFORSCHUNG, die schon viele individuelle Optimierungsprojekte bei Kunden verschiedener Branchen durchgeführt hat, eine praxisgerechte Lösung zur Kodierung mechanischer Schließanlagen entwickelt.

Zu Beginn der Analysen war das Problem in der wissenschaftlichen Literatur der Informatik noch völlig unbearbeitet. Inzwischen haben die wissenschaftlichen Begleitforscher um Prof. Wanke fundamentale Erkenntnisse über Art und Mächtigkeit des Problems in der wissenschaftlichen Zeitschrift „Mathematical Methods of Operation Research“ nachzulesen. Parallel dazu verlief die Suche nach Lösungskonzepten und die Erprobung möglicher Vorgehensweisen und Algorithmen.

Die erste Idee zu einer vollautomatischen Kodierung wäre die Abbildung des ungeheuren Erfahrungsschatzes menschlicher Planer in eine Art Expertensystem. Eine solche Software legt formalisierte Handlungsanweisungen in Form von Wenn-Dann-Regeln ab und sucht dann selbst problemabhängig eine passende Kette von Handlungsanweisungen zusammen. Leider bestand das vorgefundene Erfahrungswissen aber nicht aus Regeln mit klar abgegrenzten Einsatzbedingungen.

Der Mensch löst ein Problem von Fall zu Fall und beurteilt jedesmal individuell die Erfolgsaussichten seiner vielfältigen Lösungsansätze vor dem Hintergrund dieser konkreten Situation. Er hat aber umgekehrt nie allgemein darüber nachgedacht, unter welchen Voraussetzungen ein spezieller Lösungsansatz erfolgversprechend ist und – er ist dazu auch gar nicht in der Lage. Ähnlich ergeht es einem Schachspieler, der in einer konkreten Stellung „sieht“, dass eine offene h-Linie hier spielentscheidend sein würde. Aber er könnte nicht allgemeingültig formulieren, in welchen Spielsituationen genau eine offene h-Linien zum Erfolg verhilft. Er könnte nicht einmal alle wesentlichen Stellungsmerkmale benennen. Das Problem ist typisch für den Einsatz vieler Expertensysteme: Ein Mensch kann solche „weichen“ Handlungsanweisungen erfolgreich anwenden, ein Computer nicht. Auch Fuzzy-Logik führt hier nicht weiter, denn der logische Aufbau der Regeln selbst, d.h. die wesentlichen Kennzeichen der Situation, ist nicht bekannt.

Eine weitere Idee sind genetische Algorithmen, Evolutionsstrategien oder abgeleitete Methoden. Leider erwiesen sich diese als zu ineffizient bei größeren Anlagen. Selbst nach Reduktion auf ein vereinfachtes Kernproblem mussten nicht wenige solcher Kodierungsversuche nach Tagen ergebnislos abgebrochen werden.

---

## OPTIMIERUNG MIT SYSTEM

Folglich ist das Problem mit einem einzigen methodischen Ansatz nicht praxisgerecht zu bewältigen. Zum Glück besitzt Systemforschung einen reichen Erfahrungsschatz aus abgeschlossenen umfangreichen Industrieprojekten (Optimierung aller Arbeitsschritte der

Kfz-Endmontage, optimale Ressourcenauslastung bei Maschinenbelegung und Schichtplanung, Flugpersonaleinsatz weltweit, 2D-Nesting unter Echtzeitbedingungen,...) um das Problem lösungsorientiert zu strukturieren.

So entdeckte man auf dem Bottom-Level viele abgegrenzte Teilaufgaben, die der Computer mit bekannten effizienten Optimierungsalgorithmen (Lineare Programmierung, Grafenmethoden, Gradientenverfahren, Branch-and-Bound Verfahren) schnell auf ihre Lösbarkeit untersucht. Existiert für eine Teilaufgabe keine Lösung, so wird sie mit erhöhten Ressourcenforderungen oder Hinweisen auf verletzte Randbedingungen an die übergeordneten Top-Level Module zurückgegeben. Diese Module realisieren verschiedene heuristische Ansätze zur strukturellen Zerlegung des Kernproblems in solche maschinenlösbaren Teilaufgaben. Diese implementierten heuristischen Ansätze repräsentieren das Erfahrungswissen, das Problemlösungsverhalten und die Lösungsansätze menschlicher Planer in bestimmten Situationen. Lediglich die Parameter über die Anwendungssituation, über das Wo, Wann und Wie dieser Ansätze sind dem vorhandenen Erfahrungswissen nicht eindeutig zu entnehmen.

Auf dieser übergeordneten Ebene der Strategieplanung ist nun der sinnvolle Einsatzort für genetische Algorithmen und lernfähige Methoden. Durch evolutionäre Variation dieser Anwendungsparameter werden Lösungsvarianten durchgespielt. Anhand der Rückmeldungen der Bottom-Level Methoden lernt der Computer die Schwierigkeit der Teilaufgaben einzuschätzen, Prioritäten festzulegen und geeignete Lösungsansätze auszuwählen.

Auf diese Weise wird menschliches Problemlösungsverhalten und Erfahrungswissen genutzt, auch wenn a priori nicht exakt die Einsatzbedingungen bekannt sind. Dies ersetzt der Computer durch iteratives Lernen aus Erfolg und Irrtum.

Das Optimierungspaket läuft auf einer Server-Plattform im Batch-Betrieb und Interaktiv mit direkter Anbindung zur Auftrags- und Systemdatenbank (SAP Host System). Die Planer greifen über ein hausinternes Netz von Clients auf diese Dienste zu.

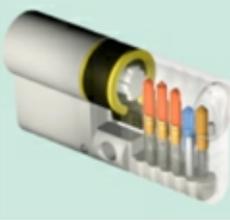
## MEHR EFFIZIENZ UND KÜRZERE BERATUNGSZYKLEN

Gemessen am Versuch, das Gesamtproblem mit genetischen Algorithmen zu lösen, ist dieses hybride Verfahren um Größenordnungen schneller und sicherer. Die Rechenzeit liegt je nach Komplexität zwischen wenigen Millisekunden und einigen Stunden und bei keiner der von Menschen gelösten Kodierungsaufgaben hat das Verfahren bisher versagt.

Die Bearbeitung von Kundenaufträgen erfolgt nun schneller und ressourcensparender. Zuvor wurden Kunden noch angehalten, ihre funktionalen Wünsche einfach und übersichtlich zu halten damit eine manuelle strukturierte Planung durchführbar ist. Nun werden auch komplexe Kundenwünsche mit Erweiterungsoptionen

realisiert und funktionelle Alternativen können leicht auf den nötigen Aufwand getestet werden. Die Idee, mehrere Lösungsentwürfe für einen Auftrag zu vergleichen, war zuvor aufgrund des Arbeitsumfangs indiskutabel.

Der weitaus größte Teil des Neu- und Erweiterungsgeschäfts kann inzwischen ohne Eingriffe des Planungsteams vollautomatisch spezifiziert und an die Fertigungsplanung übergeben werden. Im Ergebnis werden die Planungs-Sachbearbeiter also von zeitraubenden Berechnungstätigkeiten entlastet und können sich intensiver ihrer eigentlichen Aufgabe zuwenden, der schnellen und effizienten Beratung ihrer Kunden.

Soll - Schließfunktionen  SICHERHEITSTECHNIK		benötigte Schlüssel 													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Verw 1	■			■	■		■			■				■
	Verw. 2		■		■	■			■						■
	Verw. 3			■	■	■				■					■
	Flur 1				■	■				■					■
	Flur 2					■	■		■		■				■
	Lager						■				■	■	■		■
	EDV							■				■			■
	Technik								■			■			■
	Eingang	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Garage	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Die gewünschte Schließfunktion (grün: Schlüssel schließt die betreffende Tür, weiß: Schlüssel darf nicht schließen) soll durch möglichst wenige rein mechanische Schließelemente realisiert werden. Dies ist bei mehreren tausend Türen ein anspruchsvolles Optimierungsproblem. Bisherige Installationen bei DOM, KESO, CES, WILKA.

# AUSLEGUNG DES STANZWERKS FÜR DIE BMW 3-ER REIHE

## KOSTENOPTIMALE INVESTITIONSPLANUNG

Ein beachtliches Einsparpotential sieht BMW bei der Optimierung des Blecheinsatzes für eine gesamte Typenreihe. Erstmals bei der neuen 3-er Reihe wird ein intelligentes Optimierungswerkzeug von Systemforschung eingesetzt, um die günstigste Materialwahl für jedes Karosserieteil zu ermitteln. Die konstruktiven Vorgaben für die benötigten Stanz- und Preßstraßen sowie die nötigen Investitionskosten leiten sich daraus ab. Durch den direkten und zügigen Vergleich einer Vielzahl alternativer Entwürfe wird es erstmals möglich, zwischen den konkurrierenden Zielen – geringe Investitionskosten, geringe variable Kosten und geringes Fahrzeuggewicht - sorgfältig und systematisch nach einem günstigen Kompromiß zu suchen.

Dabei geht es um die Konstruktion der gesamten Press- und Stanzstraßen für eine Fahrzeugklasse. Für jedes der ca. 500 Karosserieteile kommen verschiedene Materialarten, Dicken, Beschichtungen, Blechbreiten und Fertigungsarten in Betracht. Der Materialeinsatz reduziert sich erheblich, wenn es gelingt, mehrere Teile platzsparend zusammenzugruppieren (Nesting) und gemeinsam aus dem Blechband auszuschneiden. Erst nach einem solchen Fertigungsentwurf sind die tatsächlichen Fertigungskosten und das Fahrzeuggewicht bestimmt.

Die interessierenden Zielgrößen bei dieser Konzeptoptimierung sind:

1. die **variablen Kosten** für den Materialeinsatz hochgerechnet auf die erwartete Gesamtstückzahl sowie Werkzeugverschleiß,
2. die **Investitionskosten** für die entsprechenden Stanz- und Preßstraßen, die bei verschachtelter Gruppierung der Teile ansteigen und
3. das **Fahrzeuggewicht** infolge der eingesetzten Materialarten und -dicken.

Da die vielen Karosserieteile in Gruppen und nicht unabhängig voneinander gefertigt werden, liegen die gesuchten Werte für diese drei Zielgrößen erst nach Erarbeiten eines detaillierten optimierten Fertigungskonzeptes vor. Möglicherweise kann aber bei geschickter Gruppierung ein Karosserieteil fast gänzlich aus dem Verschnitt eines leichteren Materials gefertigt werden, so dass diese Gewichtsersparnis nur geringen Mehraufwand erfordert. Für eine ertragsorientierte Beurteilung eines solchen Investitionsvorhabens reicht also eine einzige solche Konzeption nicht aus. Die Kosten einer weiteren Gewichtsreduktion durch Verwendung hochwertigerer Werkstoffe oder eine Verringerung des Fixkostenrisikos der Investition wegen der letztlich unbekanntenen Gesamtstückzahl erfordern eine Vielzahl detaillierter Vergleichsentwürfe. Bei diesem Investitionsvolumen lohnt es sich allemal, zwischen den zum Teil konkurrierenden Zielen sorgfältig nach dem günstigsten Kompromiß zu suchen.

## VIELFÄLTIGE RANDBEDINGUNGEN

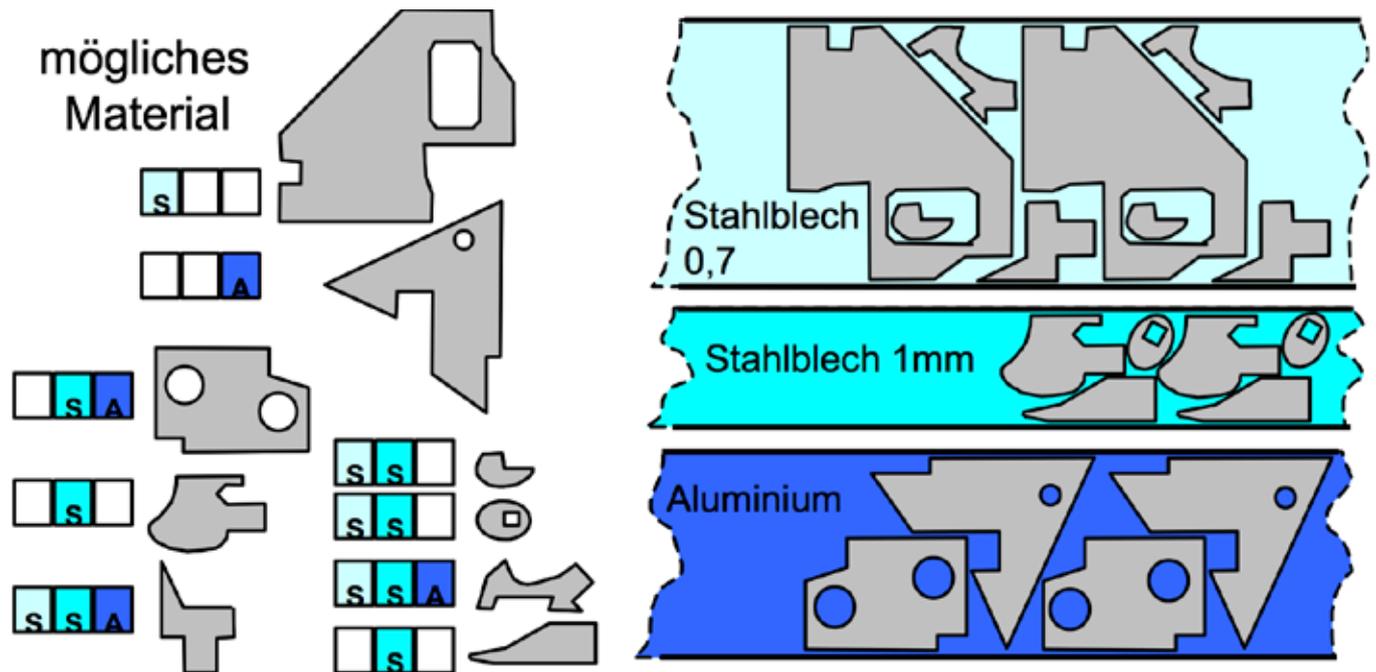
Allerdings ist bereits die Erarbeitung eines einzigen Konstruktionsplans eine zeitaufwendige Angelegenheit für ein Planungsteam. Es sind nämlich eine Reihe technischer und kalkulatorischer Randbedingungen zu beachten, die für den Menschen die Übersicht drastisch erschweren:

- Eine Zusammenlegung von Karosserieteilen zu repetierfähigen Schablonen reduziert den Verschnitt erheblich. Dazu müssen sich die rechte und linke Kontur der Schablone möglichst gut aneinanderfügen. Die gemeinsame Fertigung einer solchen Gruppe erhöht aber auch die Investitionen in entsprechende Stanztechnik.
- Je nach Schnittbild und Blechbreite kommt Stanzen oder Pressen als Fertigungstechnik in Betracht,

mit unterschiedlichen Investitions- und Werkzeugkosten.

- Für jedes Karosserieteil kommen mehrere Werkstoffe alternativ in Frage. Sie unterscheiden sich in der Dicke, der Beschichtung und im Werkstoff und somit auch in Gewicht und Preis.
- Bestimmte Teilepaare müssen aus Gründen der Symmetrie oder Verbindungstechnik aus dem gleichen Material hergestellt werden.
- Je nach Beschichtung können Teile gespiegelt hergestellt werden.
- Bei einigen Teilen ist die Walzrichtung des Bleches zu beachten, andere sind beliebig drehbar.

- Das Blechmaterial ist nur in bestimmten Breiten erhältlich, zu verschiedenen Preisen.  
Bei der Wahl der günstigsten Breiten ist auch eine große Breitenvielfalt in der Logistik hinderlich.



Die linke Seite zeigt zu jedem Karosserieteil als farbige Kästchen die dafür möglichen Blecharten. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Dicke, der verfügbaren Breiten, der Beschichtung und des Werkstoffs und somit im Gewicht und im Preis. Bei manchen Teilen ist die Walzrichtung zu beachten, manche erfordern Materialgleichheit mit anderen Teilen. Diese Vorgaben erhält das Programm direkt aus der Karosserie-Datenbank.

Die rechte Seite zeigt das Optimierungsergebnis. Die Teile werden kostenoptimal und materialsparend auf den verfügbaren Materialarten und Walzbreiten angeordnet. Dies ist die Vorgabe für die Detail-Konstruktion der Stanz- und Preßstraßen.

## AUSGANGSSITUATION

Damit wäre ein Planungsteam in den sich ständig verkürzenden Zeitrahmen für die Entwicklung einer Fahrzeugreihe hoffnungslos überfordert. Es könnte nur wenige Alternativkonzepte bis in die nötige Tiefe durchdenken und selbst diese wären aufgrund der gigantischen kombinatorischen Vielfalt nur unvollständig ausgereizt.

Auf manuelle Weise ist nämlich bereits eine einzige solche Planung für bis zu 500 Karosserieteile äußerst mühselig und würde ein Team mehrere Wochen beschäftigen. Man hat daher bisher von dem enormen Potential zur Materialeinsparung durch geschicktes Zusammengruppieren von Teilen beim Ausschneiden kaum Gebrauch gemacht. Vielfach wurden die Teile unter großem Verschnitt einzeln gestanzt.

## NEUARTIGE OPTIMIERUNGSLÖSUNG

Hier unterstützt das Optimierungswerkzeug von Systemforschung. Die Planer als Assistenzsystem ganz wesentlich. Durch effiziente Optimierungsverfahren wird zu definierten Zielvorgaben und Rahmenbedingungen automatisch ein detailliertes Konzept erstellt und kalkuliert.

Das neue, intelligente Optimierungswerkzeug nutzt den Autonester von Systemforschung für die vielfältigen Layout-Optimierungen aller benötigten Schnittbilder. Die

übergeordnete Optimierung der Blechart und Walzbreite für jedes Karosserieteil nutzt problem-spezifische Optimierungsmethoden für Teilaufgaben sowie genetische Algorithmen. Die Software läuft auf einem Server im lokalen Netz und hat direkten Zugriff auf die benötigten Teile-Spezifikationen in der Karosserie-Datenbank. Ein kompletter Optimierungslauf mit spezifischen Zielvorgaben und Rahmenbedingungen ist bereits nach wenigen Stunden abgeschlossen

## TRANSPARENTE INVESTITIONSPLANUNG

Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, verschiedene Szenarien systematisch und zügig durchzuspielen. Die tatsächlichen Grenzkosten einer Gewichtsreduktion sind auf diese Weise exakt kalkulierbar. Die sorgfältige Betrachtung von Investitionsalternativen hilft zudem, zwischen dem Fixkostenblock und variablen Kosten eine risikobewußte günstige Entscheidung herbeizuführen.

Auch Änderungen in der Karosserie-Konstruktion oder verschiedene Szenarien bei den Rohstoffpreisen lassen sich leicht durchspielen. Erst der Einsatz solcher intelligenter Optimierungswerkzeuge in der Konstruktion schafft die nötige Transparenz, um unternehmerische Entscheidungen kostenoptimal und marktgerecht treffen zu können.

---

### **SYSFO**

Systemforschung M. Kämmerer

Königstrasse 33a ▪ D-53115 Bonn ▪ T +49 (0)228-201 39 0 ▪ F +49 (0)228-229 02 9 ▪ [www.sysfo.de](http://www.sysfo.de)

### **GESCHÄFTSFÜHRUNG**

Dipl. Phys. Martin Kaemmerer ▪ T +49 (0)228-201 39 13 ▪ [kaemmerer@sysfo.de](mailto:kaemmerer@sysfo.de)

### **ENTWICKLUNG**

Dr. Ing. Martin Fritsch ▪ T +49 (0)228-201 39 24 ▪ [mfritsch@sysfo.de](mailto:mfritsch@sysfo.de)

Dipl. Ing. Thomas Krahe ▪ T +49 (0)228-201 39 15 ▪ [tkrahe@sysfo.de](mailto:tkrahe@sysfo.de)