



**LEUPHANA**  
UNIVERSITÄT LÜNEBURG

DIPLOMARBEIT

# Varianten- und Komplexitätsmanagement in industriellen Produktionsprozessen

Diplomand: Hendrik Sander  
Fachbereich: Automatisierungstechnik  
Fachrichtung: Industrial Engineering  
Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Heinrich Schleich  
Zweitkorrektor: Prof. Dr.-Ing. Marco Linß  
Abgabedatum: 2. Oktober 2007

# Zusammenfassung

*Any customer can have a car painted any colour he wants so long as it's black.*

Henry Ford

Eine steigende Anzahl von Kunden hegt bei einem Neuwagenkauf den Wunsch nach einem speziell auf ihre Wünsche zugeschnittenen Fahrzeug. Diesem Trend zur Individualisierung begegnen die Automobilkonzerne mit einem umfangreichen Angebot an Fahrzeugvarianten. Da jedoch gleichzeitig ein anhaltend hoher Druck des Marktes zur Kostenvermeidung besteht, rückt das Management von Varianten und der daraus resultierenden Komplexität, immer stärker in den Fokus des Interesses. Ist die Komplexität zu hoch, steigen die Ausgaben rapide. Eine maximale Reduktion der variantengetriebenen Komplexität ist jedoch in den wenigsten Fällen die Lösung des Problems: Gibt es zu wenig Varianten sinkt die Attraktivität für den Kunden, da eine ausreichende Befriedigung seiner Bedürfnisse nicht mehr gegeben ist. Deshalb gilt es, ein Komplexitätsoptimum zu erreichen. Bei diesem Ziel fällt einer Prognose über die Entwicklung der Komplexitätskosten bei einer Veränderung der Variantenzahl eine besondere Bedeutung zu. In dieser Diplomarbeit geht es um die Möglichkeit, derartige Kosten mit Hilfe von Simulationen abzuschätzen und um eine Analyse des derzeitigen Standes der Technik auf diesem Gebiet. Beginnend mit einer Literaturrecherche werden im Anschluss vorhandene Werkzeuge betrachtet und schließlich die bisherigen Ansätze zur Erstellung eines Komplexitätskostenmodells analysiert.

# Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit entstand in der Zeit von April bis September 2007 im Rahmen meines Praxissemesters an der LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG. In dieser Zeit war ich im Forschungsprojekt ILIPT am Fachbereich III - Umwelt und Technik tätig.

Die Diplomarbeit enthält somit den Praxisbericht.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Hans-Heinrich Schleich für die Betreuung der Arbeit und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes, Herrn Jens Schaffer für die Unterstützung und fachliche Hilfestellung im Rahmen des Forschungsprojektes und Herrn Prof. Dr. Marco Linß für die Übernahme der Zweitkorrektur.

Lüneburg, 30. September 2007

Hendrik Sander

# Inhaltsverzeichnis

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>Projektbeschreibung</b>                            | <b>1</b> |
| 1.1      | Das ILIPT Projekt . . . . .                           | 2        |
| <b>2</b> | <b>Literaturrecherche</b>                             | <b>7</b> |
| 2.1      | Einleitung . . . . .                                  | 8        |
| 2.2      | Modellierung . . . . .                                | 8        |
| 2.2.1    | System . . . . .                                      | 13       |
| 2.2.2    | Modell . . . . .                                      | 17       |
| 2.2.3    | Simulation . . . . .                                  | 21       |
| 2.3      | Komplexitätsmanagement . . . . .                      | 25       |
| 2.3.1    | Komplexität . . . . .                                 | 26       |
| 2.3.2    | Variantenbezogene Komplexitätstreiber . . . . .       | 33       |
| 2.3.3    | Externe Variantenvielfalt und Kombinationen . . . . . | 34       |
| 2.3.4    | Interne Variantenvielfalt . . . . .                   | 36       |
| 2.3.5    | Variantengetriebene Komplexitätskosten . . . . .      | 37       |
| 2.3.6    | Komplexitätsfälle . . . . .                           | 39       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.7    | Strategien des Komplexitätsmanagements . . . . .      | 41        |
| 2.3.8    | Begriffe des Komplexitätsmanagements . . . . .        | 43        |
| 2.3.9    | Tools im Bereich des Komplexitätsmanagement . . . . . | 44        |
| <b>3</b> | <b>Erstellung eines Modells</b>                       | <b>52</b> |
| 3.1      | Theorie . . . . .                                     | 53        |
| 3.2      | Aufbau des Modells . . . . .                          | 55        |
| 3.3      | Praxis . . . . .                                      | 57        |
| 3.4      | Ausblick . . . . .                                    | 59        |

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Logo des Projektes ILIPT . . . . .                             | 3  |
| 1.2  | Lieferzeiten im Vergleich . . . . .                            | 4  |
| 1.3  | ILIPT Projektpartner . . . . .                                 | 5  |
| 1.4  | ILIPT Projektorganisation und Forschungsschwerpunkte . . . . . | 6  |
| 2.1  | Übersicht zu System, Modell, Simulation . . . . .              | 9  |
| 2.2  | Simulation: Initialisierungswelle . . . . .                    | 10 |
| 2.3  | Simulation: Ausbreitung der Wellen . . . . .                   | 11 |
| 2.4  | Simulation: Entwicklung im Küstenbereich . . . . .             | 12 |
| 2.5  | Gegenständliches System . . . . .                              | 14 |
| 2.6  | Modellbildung durch Abstraktion . . . . .                      | 17 |
| 2.7  | Stabilitätsanalyse im Automobilbau . . . . .                   | 22 |
| 2.8  | Wetterprognose . . . . .                                       | 24 |
| 2.9  | Komplexes System, 2D . . . . .                                 | 27 |
| 2.10 | Komplexes System, 3D . . . . .                                 | 28 |
| 2.11 | Straßenkarte der Innenstadt von Florenz . . . . .              | 29 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.12 | Fertigung einer einzelnen Variante . . . . .        | 30 |
| 2.13 | Fertigung mehrerer Varianten . . . . .              | 31 |
| 2.14 | Variantengetriebene Komplexitätskosten . . . . .    | 32 |
| 2.15 | Motorenfertigung bei BMW in Steyr . . . . .         | 33 |
| 2.16 | Externe Varianten . . . . .                         | 34 |
| 2.17 | Varianten des Ford Fusion . . . . .                 | 35 |
| 2.18 | Interne Varianten . . . . .                         | 36 |
| 2.19 | Gliederung Komplexitätskosten . . . . .             | 37 |
| 2.20 | Kostenstruktur eines Automobilherstellers . . . . . | 38 |
| 2.21 | Optimale Vielfalt . . . . .                         | 39 |
| 2.22 | Komplexitätsfalle . . . . .                         | 40 |
| 2.23 | Konzept des Komplexitätsmanagement . . . . .        | 41 |
| 2.24 | Bausteine des Variantenmanagements . . . . .        | 42 |
| 2.25 | Logo der Schuh GmbH . . . . .                       | 45 |
| 2.26 | Einflussmatrize . . . . .                           | 46 |
| 2.27 | Einflussmatrize, Parallel . . . . .                 | 47 |
| 2.28 | Einflussmatrize, Sequentiell . . . . .              | 47 |
| 2.29 | Einflussmatrize, Gekoppelt . . . . .                | 47 |
| 2.30 | Ursprüngliche Einflussmatrize . . . . .             | 48 |
| 2.31 | Partitionierte Einflussmatrize . . . . .            | 49 |
| 2.32 | Numerische Einflussmatrize, Zahlenwerte . . . . .   | 50 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.33 | Numerische Einflussmatrize, Farbe . . . . . | 50 |
| 3.1  | Kostenverläufe . . . . .                    | 54 |
| 3.2  | Module des Modells . . . . .                | 55 |
| 3.3  | Aufbau des Modells . . . . .                | 56 |
| 3.4  | Fiktives Ergebnis des Modells . . . . .     | 56 |
| 3.5  | Graph des Treibers Motorbaureihe . . . . .  | 57 |



# Abkürzungsverzeichnis

|            |  |
|------------|--|
| BC         | <i>Build Combinations</i>  |
| BMW        | <i>Bayrische Motoren Werke</i>                                   |
| CAD        | <i>Computer Aided Design</i>                                     |
| CH         | <i>Characteristics</i>   |
| CPO        | <i>Cost Process Optimization</i>                                 |
| DSM        | <i>Design Structure Matrix</i>                                   |
| HPV        | <i>Hasso Plattner Ventures</i>                                   |
| IFM-GEOMAR | <i>Leibniz Institut für Meereswissenschaften</i>                 |
| ILIPT      | <i>Intelligent Logistics for Innovative Product Technologies</i> |
| I          | <i>Impact</i>  |
| MIT        | <i>Massachusetts Institute of Technology</i>                     |
| NOAE       | <i>Network of Automotive Excellence</i>                          |
| PPD        | <i>Point of produkt differentiation</i>                          |
| PPS        | <i>Produktionsplanungs- und Steuerungssystem</i>                 |
| PUC        | <i>Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro</i>        |
| ROP        | <i>Rate of option penetration</i>                                |
| TKA        | <i>TyssenKrupp Automotive AG</i>                                 |
| VDI        | <i>Verein Deutscher Ingenieure</i>                               |

# Kapitel 1

## Projektbeschreibung

## 1.1 Das ILIPT Projekt

### Ausgangssituation

Ein wichtiger Faktor bei der Entscheidung für ein Automobil ist für viele Käufer die Lieferzeit. Je nach Fahrzeugsegment kann diese sehr unterschiedlich sein. Jedoch wird heute kaum ein Hersteller werben wie dies Mercedes im Jahre 1954 tat:

*„Es lohnt sich, auf einen Mercedes-Benz zu warten!“ [48]*

Auf Grund des harten Verdrängungswettbewerbes am Automobilmarkt kann es sich kein Unternehmen leisten, Kunden länger als unbedingt nötig auf ein Fahrzeug warten zu lassen. Seit Beginn des 21. Jahrhunderts gibt es in den Industrieländern eine stagnierende, teilweise sogar sinkende Nachfrage nach Automobilen. Hierdurch entstehen Überkapazitäten in der weltweiten Produktion, die derzeit einen Wert von 20% erreicht haben. Viele Hersteller produzieren Lagerbestände, um ihre Kapazitätsauslastung zu optimieren. Die Entscheidung welche Fahrzeuge hergestellt werden, wird hierbei basierend auf Prognosen getroffen. Da diese Prognosen jedoch oftmals nicht der vom Kunden gewünschten Fahrzeugkonfiguration entsprechen, verlieren alle Parteien:

Der Kunde erhält nicht das von ihm gewünschte Fahrzeug, der Händler verpasst die Chance an attraktiven Sonderausstattungen mitzuverdienen und muss zudem noch für die Bestandskosten nicht verkaufter Fahrzeuge aufkommen. Will er diese Fahrzeuge schließlich verkaufen, muss er hohe Rabatte gewähren, um potentielle Kunden zum Kauf zu bewegen. In Europa wird derzeit etwa die Hälfte aller Fahrzeuge auf Bestand produziert. In den USA sogar fast ausschließlich. Viele europäische Automobilhersteller sind zwar heute schon in der Lage nach Kundenauftrag

zu fertigen, allerdings mit sehr langen Durchlaufzeiten von durchschnittlich 48 Tagen. [28]

Da diese Lieferzeit für viele Kunden nicht mehr akzeptabel ist wurde die europäische Forschungsinitiative ILIPT ins Leben gerufen. Deren Ziel ist die Entwicklung eines Konzeptes für ein Automobil, das innerhalb von fünf Tagen, nachdem der Endkunde eine Bestellung abgegeben hat, hergestellt und geliefert werden kann. Trotz des knappen Zeitrahmens sollen sowohl ein marktfähiger Preis als auch ein für den Kunden attraktives Produkt mit verschiedenen Varianten realisiert werden. Die internationale Bezeichnung des Projektes lautet: INTELLIGENT LOGISTICS FOR INNOVATIVE PRODUCT TECHNOLOGIES (ILIPT).



Abbildung 1.1: *Logo des Projektes ILIPT*, Quelle: ILIPT [30]

## Ziele

Die Ziele von ILIPT sind die Erstellung und Validierung eines technischen und logistischen Gesamtkonzeptes zur Herstellung eines „5-Tage-Autos“, insbesondere die Entwicklung [29]

- innovativer Produktstrukturen für die Auftragsfertigung kundenindividueller Automobile sowie von Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung der Entwicklung von „5-Tage-Autos“ unter Berücksichtigung der Produkt- und Prozesskomplexität sowie der Variantenvielfalt,
- neuer Konzepte zur Umsetzung flexibler Produktions-, Zuliefer- und Logistiknetzwerke,
- neuartiger Methoden und Werkzeuge zum Nachweis der Machbarkeit und Anwendbarkeit hochgradig mehrwertschöpfender Netzwerkstrukturen am Beispiel des „5-Tage-Autos“.

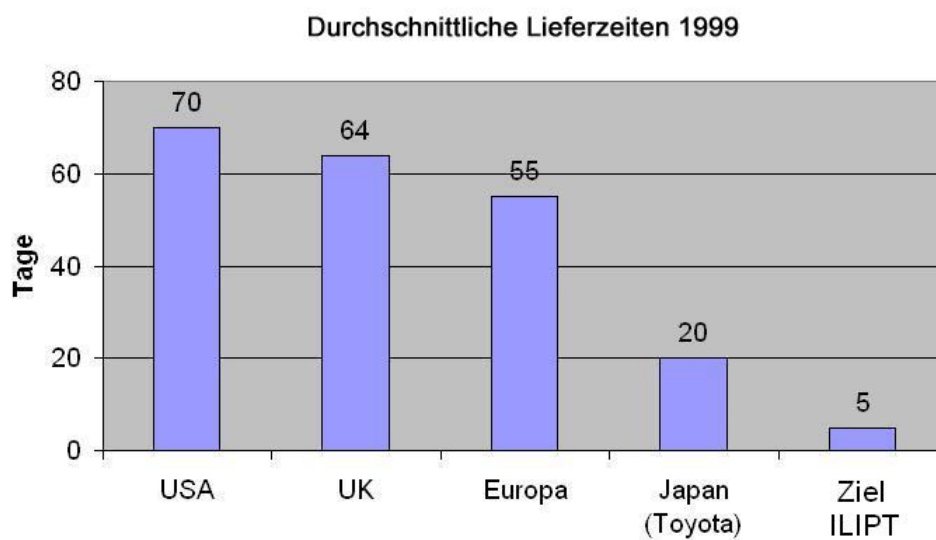


Abbildung 1.2: *Lieferzeiten in der Automobilbranche*, Quelle: ILIPT [30]

Diese Ziele sollen durch den Einsatz innovativer Technologien, Logistikkonzepte und Kooperationsmodelle erreicht werden. Die Lagerhaltung soll dabei innerhalb der Lieferkette konsequent reduziert werden. Die Verkürzung der Zeitspanne von der Bestellung bis zur Auslieferung kundenindividueller Fahrzeuge auf 5 Tage sowie die Realisierung eines lagerlosen Produktionsnetzwerkes mit deutlich verringerten Lager- und Kapitalbindungskosten wirken dem weiter anhaltenden Trend der Produktionsverlagerung in Niedriglohnländer entgegen.

## Beteiligte

Am Projekt sind 33 industrielle Partner, Universitäten sowie kleine und mittelständische Unternehmen der europäischen Automobilindustrie beteiligt.

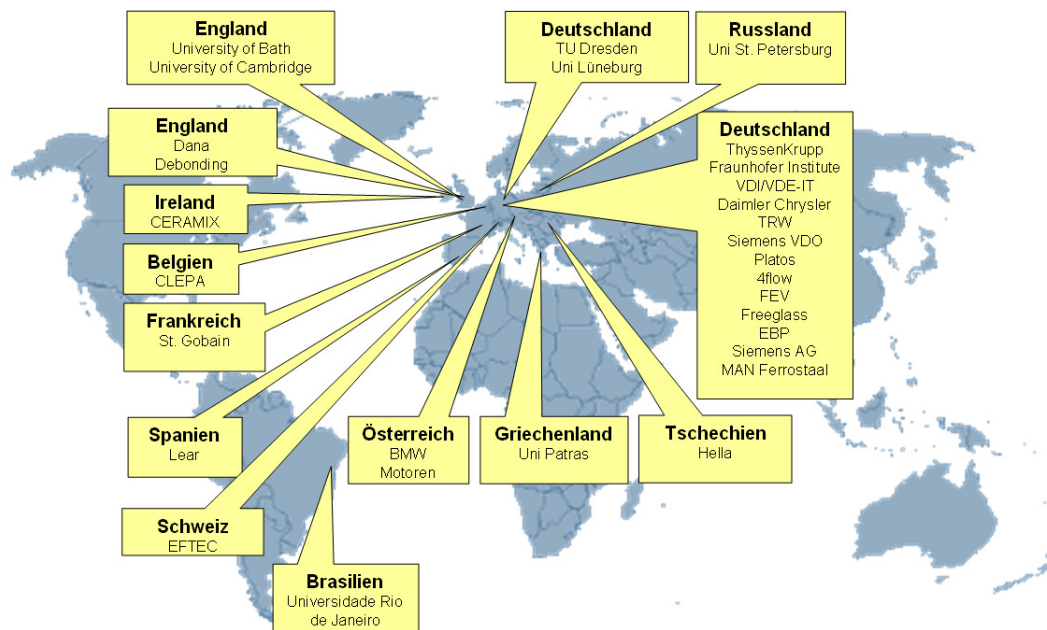


Abbildung 1.3: Projektpartner, Quelle: ILIPT [30]

Die EUROPÄISCHE KOMMISSION fördert ILIPT mit insgesamt neun Millionen Euro. Der Gesamtetat beträgt 16,3 Millionen Euro. [30]

## Struktur

Unter der Leitung der TYSENKRUPP AUTOMOTIVE AG sind die Aufgaben des Projektes in drei Themengebiete unterteilt:

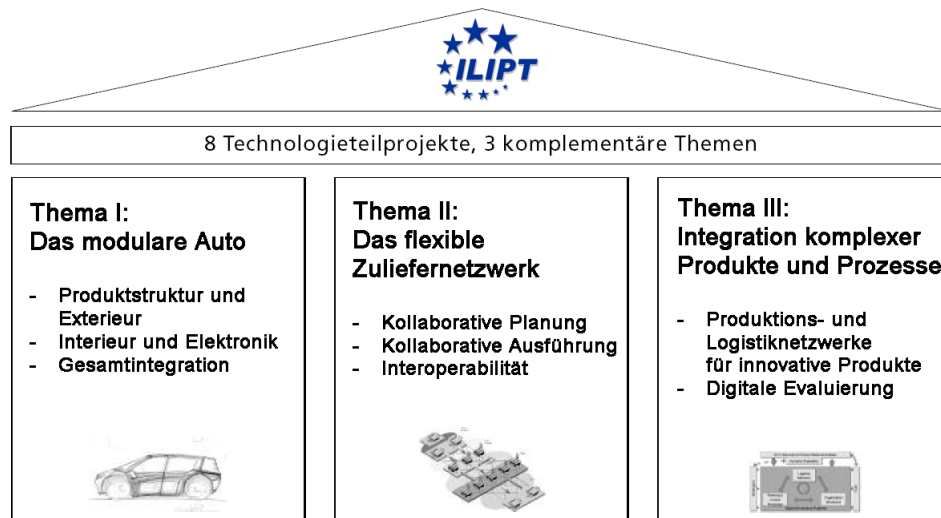


Abbildung 1.4: *Projektstruktur und Schwerpunkte*, Quelle: Fraunhofer [29]

Themenübergreifend existiert eine Arbeitsgruppe, die sich mit der Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse beschäftigt und den Austausch zwischen den unterschiedlichen Themengebieten organisiert.

Die LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG ist im Themenbereich III aktiv. Besonderer Schwerpunkt der Arbeiten in Lüneburg ist die Entwicklung eines Komplexitätskostenmodells zur Bestimmung der optimalen Anzahl von Produktvarianten. Des weiteren kann ein solches Modell auch bei der Optimierung des Prozess- und Produktdesigns eingesetzt werden. [32]

# Kapitel 2

## Literaturrecherche



## 2.1 Einleitung

Um das Verhalten von variantengetriebenen Komplexitätskosten simulieren zu können ist es zunächst erforderlich Gesetzmäßigkeiten zu identifizieren, nach denen sich diese Kosten entwickeln. Ist dies geschehen wird das System durch ein Modell nachgebildet, das die relevanten Eigenschaften des Originals enthält. Dieses Modell kann anschließend zur Simulation der Komplexitätskosten genutzt werden. Durch Veränderung der Modellparameter können mögliche Entwicklungen durchgespielt und Entscheidungen zum Beispiel über die Ausprägung des Variantenreichtums abgesichert werden.

## 2.2 Modellierung

Modelle dienen in vielen Bereichen als ein Hilfsmittel zum Umgang mit der Realität. Durch sie werden Sachverhalte verständlich, Ideen vermittelbar und mögliche Folgen abschätzbar.

Wird ein Modell zur Vorhersage künftiger Ereignisse genutzt, so spricht man von Simulation.

Modelle und Simulationen gibt es in vielfältiger Form, beginnend bei Miniaturen von Menschen, Bauwerken, Maschinen oder Landschaften bis hin zu Computersimulationen von Klima- oder Populationsentwicklungen.

All diesen Modellen ist gemeinsam, dass die Realität durch Abstraktion vereinfacht und verallgemeinert wird. Es werden nur diejenigen Strukturen, Funktionen und Beziehungen betrachtet, die für die Lösung eines fachspezifischen Problems erforderlich sind.

Das einer Modellierung zugrunde liegende System kann sowohl tatsächlicher als auch hypothetischer Art sein, wie SCHÖNE [20] in der folgenden Übersicht darstellt:

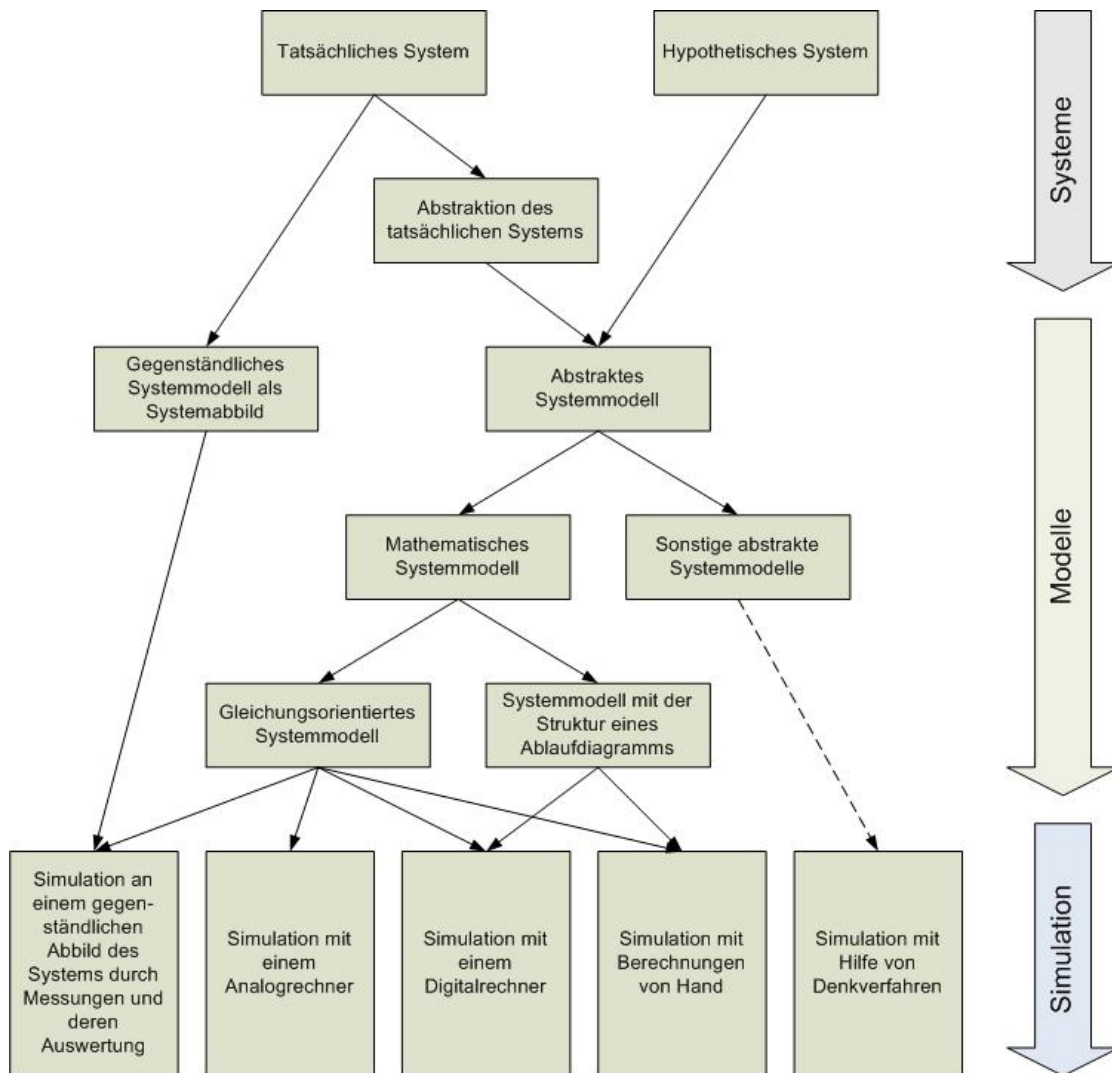


Abbildung 2.1: Übersicht zu System, Modell, Simulation, Quelle: Schöne [20]

Beim Einsatz von Digitalrechnern zur Simulation konnten in der Vergangenheit große Fortschritte erzielt werden. Die verbesserte Hardware ermöglicht es im Zusammenspiel mit ausgereifter Softwaretechnik, sehr große und komplexe Modelle mit hoher Vorhersagegenauigkeit zu betreiben wie das folgende Beispiel beschreibt:

## Einleitendes Beispiel

Nach dem Ausbruch des Cumbre Vieja Vulkans auf der kanarischen Insel La Palma im Jahre 1949 kam es zur Bildung eines Risses, der den Vulkanberg in zwei Hälften teilt. Sollte es zu einer weiteren Eruption des nach wie vor aktiven Vulkans kommen könnte sich ein massiver, etwa  $500 \text{ km}^3$  großer Teil lösen und abrutschen. Die Folgen eines solchen Vorgangs können mit einem mathematischen Modell beschrieben werden, das sich sehr gut zur computerunterstützten Simulation eignet. Die Geowissenschaftler SIMON DAY und STEVEN WARD haben im Rahmen ihrer Arbeit aus dem Jahr 2001 ein solches Modell erstellt. [38]

Physikalische Gesetze zur Wellenbildung und dem grundsätzlichen Verhalten von Wasser bilden die Grundlage des Modells. Geographische Merkmale der Umgebung wie Wassertiefe, Lage und Form der Landmassen sowie weitere Umwelteinflüsse, zu denen Meeresströmungen und Winde gehören, werden bei der Modellbildung berücksichtigt. Für den Modellzweck unerhebliche Gegebenheiten wie beispielsweise die Fischpopulationen der entsprechenden Gebiete werden hingegen nicht berücksichtigt. Auf einen Eingriff des Nutzers hin wird in diesem ruhenden Modell des Atlantiks ein Impuls simuliert, der dem Absacken des einsturzgefährdeten Teilstückes des Vulkans entspricht. Es entsteht eine Initialisierungswelle von 800 bis 1000 Metern Höhe.

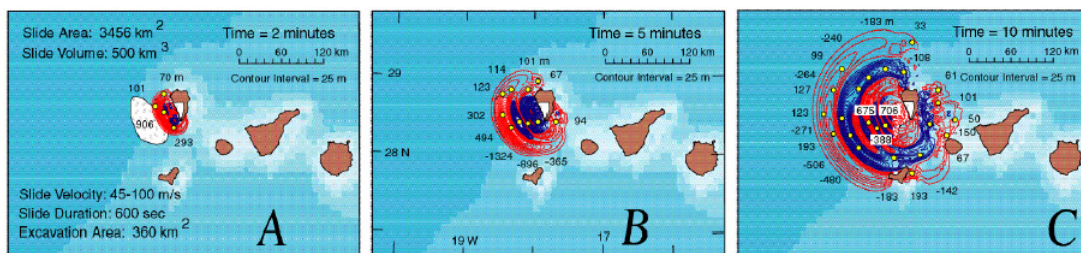


Abbildung 2.2: *Initialisierungswelle*, Quelle: Day/ Ward [38]

In der Folge kann beobachtet werden, wie sich die Wellen in der Simulation ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Höhe der Wellenberge lassen

Schlüsse auf die Auswirkungen für Küstenregionen zu. Ebenso kann die Zeit bestimmt werden, die für Evakuierungsmaßnahmen bleibt. Neben diesen wichtigen Erkenntnissen spricht noch ein weiterer Vorteil für das Modell: Versuche am realen System kommen in diesem Fall selbst dann nicht in Frage, wenn die Möglichkeit bestünde, einen solchen Tsunami künstlich herbeizuführen.

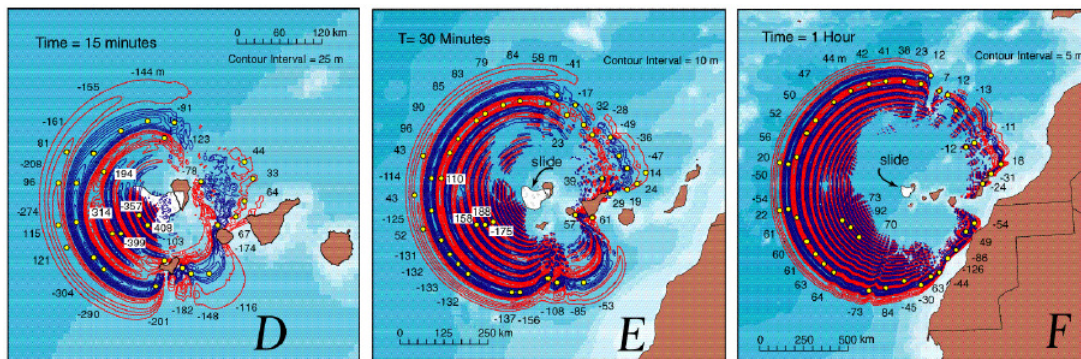


Abbildung 2.3: *Ausbreitung der Wellen*, Quelle: Day/ Ward [38]

Durch Änderung von Modellparametern kann das Modell an verschiedene Szenarien wie beispielsweise die aktuelle Wetterlage angepasst werden.

Ein Problem bei solchen Simulationen allerdings bleibt: Egal wie hoch der Detailierungsgrad gewählt ist, in der Realität sind Abweichungen immer möglich.

Um eine grundsätzliche Aussage über die Wirkung von Ereignissen wie einem durch Absacken von Vulkanteilen verursachten Tsunami zu treffen, ist eine computergestützte Simulation aber ein unverzichtbares Hilfsmittel. Im vorliegenden Simulationsfall würden 10 bis 25 Meter hohe Wellen große Teile der dicht besiedelten amerikanischen Ostküste heimsuchen. Die Zeit für Rettungsmaßnahmen läge bei 6 bis 9 Stunden.

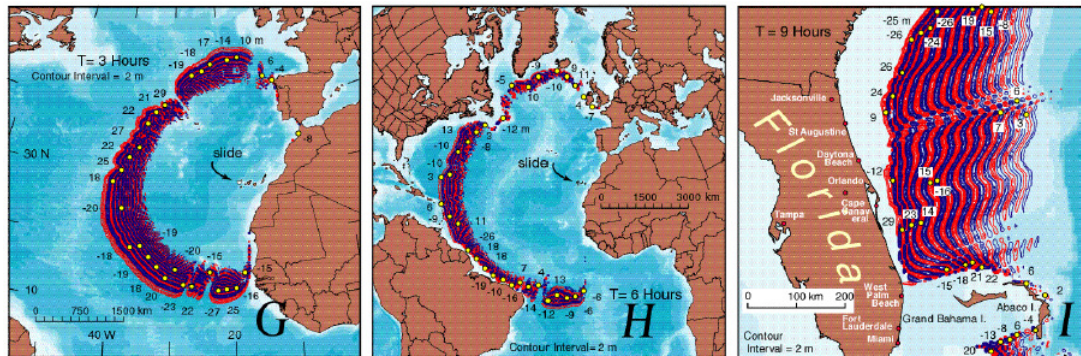


Abbildung 2.4: *Entwicklung im Küstenbereich*, Quelle: Day/ Ward [38]

Die Simulation macht durch die ermittelten Daten und eine sehr anschauliche Art der Darstellung deutlich, wie dramatisch die Folgen für unvorbereitet betroffene Gebiete wären.

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich solch eine Naturkatastrophe in Zukunft ereignet, wird von Geologen als hoch bezeichnet. Der Zeitrahmen, in dem es dazu kommen könnte, ist allerdings recht weit: Forschungen am IFM-GEOMAR in Kiel [41] ergaben, dass die Erde statistisch gesehen im Gebiet der Kanaren nur einmal in 100.000 Jahren mit der notwendigen Stärke bebte.

Simulationen wie diese sind in vielen Bereichen von Wissenschaft und Technik ein unverzichtbares Hilfsmittel geworden. Durch die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und die weiterhin fortschreitende Entwicklung im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung ist zu erwarten, dass in Zukunft noch stärker auf Simulationen als Hilfsmittel zurückgegriffen wird. Gerade die Simulation mit Digitalrechnern bietet viele Vorteile und entwickelt sich immer stärker zu einem selbstverständlich eingesetzten Werkzeug.

### 2.2.1 System

Systeme finden sich in vielen unterschiedlichen Formen. Sie sind die Vorlage für Modelle, die ihr Verhalten nachbilden sollen.

#### Einleitung

Mit Bezug zur aufkommenden Quantenphysik schrieb Albert Einstein gegen Ende des Jahres 1926 in einem Brief an Max Born:

*„Der Alte würfelt nicht !“ [9]*

Gemeint war Gott und dass es keine willkürlich ablaufenden und somit prinzipiell nicht vorhersagbaren Vorgänge gibt, wie es in der statistischen Theorie der Quantenmechanik der Fall ist. Einstein war der Meinung, dass im Grunde jedes Ereignis vorhersagbar sei. Lediglich der Mangel an Information und die Unkenntnis von Zusammenhängen würden dies verhindern. Den Glauben an Zufall hielt er für Ignoranz gegenüber den wahren Ursachen.

Unabhängig von der Frage, ob Einstein Recht hatte und es keinen „reinen Zufall“ gibt oder ob doch Bereiche existieren, in denen dies der Fall ist, wie die heutige Lehrmeinung besagt, ist doch festzustellen, dass die überwiegende Zahl der Ereignisse im menschlichen Erfahrungsraum nach dem Ursache-Wirkungs-Prinzip ablaufen.

Viele Dinge, die zunächst als zufällig erscheinen, sind lediglich zu komplex für gedankliche Modelle oder geschehen nach einem Muster, das dem Betrachter unbekannt ist. Dies gilt auch für Vorgänge wie die Entwicklung der variantengetriebenen Komplexitätskosten. Diese fallen nach einem System an. Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen und der hohen Vernetzung untereinander ist es

jedoch schwierig, dieses System zu erfassen. Noch größer werden die Probleme bei dem Versuch, die Abläufe in einem funktionsfähigen Modell nachzubilden.

### Definition

Der Definition nach besteht ein System aus einem oder mehreren Einzelteilen, die strukturell so verbunden sind, dass sie sich selbst oder andere Teile des Systems bei Zustandsänderungen beeinflussen. [4]

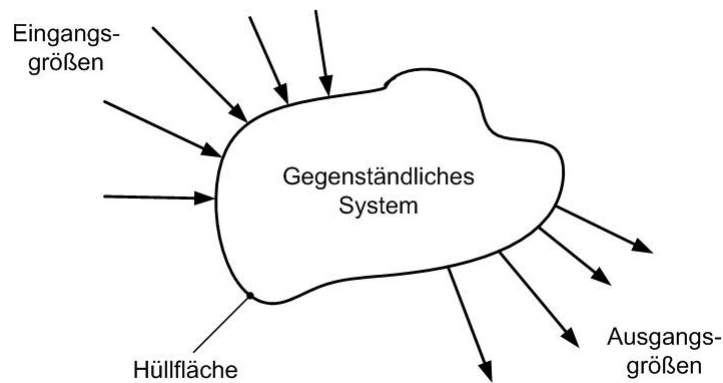


Abbildung 2.5: *Gegenständliches System*, Quelle: Bossel [4]

### Systemgrenze

Für die Untersuchung eines Systems ist es notwendig, eine definierte *Systemgrenze* festzulegen. Da Systeme nie vollständig von ihrer Umwelt isoliert sind, wird diese Grenze im Modellierungsprozess nach folgenden Kriterien oder einer Kombination aus ihnen festgelegt. Die Systemgrenze befindet sich nach BOSSEL [5] dort wo . . .

- die Kopplung zur Umgebung sehr viel schwächer ist als die Binnenkopplung im System (Bei einem Organismus beispielsweise die Haut),
- vorhandene Umweltverkopplungen nicht funktionsrelevant sind, (Beispiel:

Um einen Eisenbahnwagen zu untersuchen, müssen nicht alle mit ihm verkoppelten Wagen ebenfalls untersucht werden.)

- Umwelteinwirkungen nicht durch das System selbstbestimmt oder durch Rückkopplung von Systemauswirkungen verändert werden können (bei Ökosystemen z.B.: Einstrahlung, Temperatur, Niederschlag).

### Eigenschaften

Allgemein ist ein System ein Objekt, das bestimmte Eigenschaften erfüllt [5]:

1. Das Objekt erfüllt eine bestimmte Funktion. Das heißt, es lässt sich durch einen **Systemzweck** definieren, den wir als Beobachter in ihm erkennen.
2. Das Objekt besteht aus einer bestimmten Konstellation von **Systemelementen und Wirkungsverknüpfungen** (Relationen), die seine Funktionen bestimmen.
3. Das Objekt verliert seine Systemidentität, wenn seine Systemintegrität zerstört wird. Ein System ist **nicht teilbar**. In ihm existieren Elemente und Relationen, deren Herauslösung oder Zerstörung die Erfüllung des ursprünglichen Systemzwecks, der Systemfunktion nicht mehr erlauben würde: Die Systemidentität hätte sich verändert oder wäre gänzlich zerstört.



## Beispiele für Systeme

Diese Kriterien des *Systemzwecks*, der *Systemstruktur* und der *Systemintegrität* ermöglichen es Unterscheidungen zu treffen [5]:

*Ein Stuhl* ist ein System, weil er einen Systemzweck, eine Systemstruktur (Sitzplatte, Rückenlehne, Beine mit entsprechenden Wirkungsbeziehungen zwischen ihnen) besitzt. Das Abtrennen bestimmter Elemente (z.B. zweier Beine) führt zu einer Zerstörung der Systemintegrität. Der ursprüngliche Systemzweck kann dann nicht mehr erfüllt werden.

*Ein Sandhaufen* ist kein System, weil sich zwar ein gewisser Systemzweck definieren lässt (Lagerung von Sand), aber selbst das Abtragen einer großen Menge Sand nichts an der Identität als Sandhaufen ändern würde.

*Ein Gewichtsstein* ist kein System. Zwar lässt sich ein Zweck definieren, und die Identität als Gewichtsstein würde durch eine Halbierung zerstört werden. Doch besteht der Gewichtsstein (für die Zwecke dieser Betrachtung) nur aus einem einzigen Element ohne irgendwelche Relationen.

*Das Straßburger Münster* ist ein System, da sich Systemzweck, Elemente und Relationen erkennen lassen und es durch Heraustrennen bestimmter Elemente und Relationen seine Integrität verlieren würde.

## 2.2.2 Modell

### Einleitung

Ein Modell ist die Nachbildung eines Originals in seinen relevanten Eigenschaften. Durch Abstraktion und Verkürzung ist das Modell eine Darstellung mit nur begrenztem Gültigkeitsbereich.

Bei der Erstellung kommt es zu zwei Abstraktionsvorgängen, da schon durch die Wahrnehmung des Modellbildenden eine unbewusste Abstraktion vorgenommen wird, ehe bewusst modelliert wird.

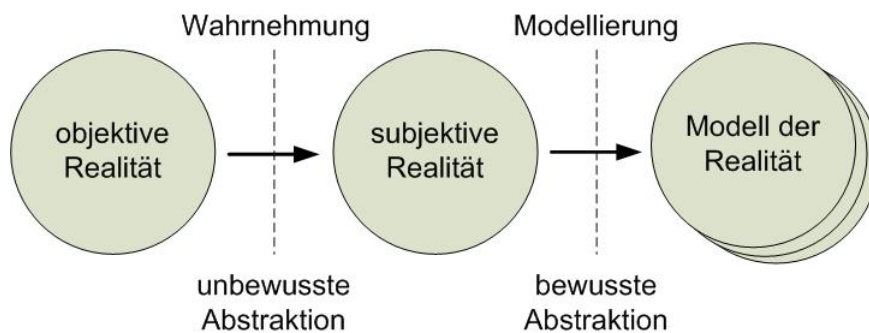


Abbildung 2.6: *Modellbildung durch Abstraktion*, Quelle: Briesen [37]

### Definition

Ein Modell ist nach der allgemein gültigen Definition des BROCKHAUS [6] ein:

„*Modell*, eigentlich Nachbildung oder Entwurf von Gegenständen aller Art in zum Teil verkleinertem Maßstab. In der Naturwissenschaft soll das Modell die wesentlichen Eigenschaften des Vorbildes ausdrücken, nebensächliche außer acht lassen, um durch diese Verei-

fachung zu einem übersehbaren Gedankengang oder einem mathematisch berechenbaren oder zu experimentellen Untersuchungen geeigneten Gegenstand zu kommen.“

Der VDI präzisiert dies in seiner Richtlinie 3633 [24]:

„Ein *Modell* ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“

### **Eigenschaften**

Aus Basis dieser Definitionen ergeben sich drei für alle Modelle gültige Eigenschaften [21]:

**Abbildung:** Ein Modell ist immer ein Abbild von etwas, eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.

**Verkürzung:** Je nach Verwendungszweck ist das Modell verkürzt. Es beschränkt sich auf relevante Eigenschaften und lässt irrelevante außer acht.

**Pragmatismus:** Die Auswahl eines geeigneten Modells erfolgt nach den Kriterien des Modellnutzers. Durch Interpretation des Modells erhält er die für ihn wichtigen Informationen.

## **Funktionsweise**

Der Aufbau eines Modells kann nach zwei verschiedenen Ansätzen erfolgen (siehe [5]). Je nach Zweck des Modells und Aufbau des Originals kann eine der beiden Methoden oder auch eine Mischform eingesetzt werden.

**Das Systemverhalten nachahmen (→ Quantitative Methode)** Bei dieser Methode wird das Originalsystem als *Black-Box* verstanden. Die wirkliche Funktionsweise des Originalsystems ist nicht von Interesse. Es wird versucht, durch zweckmäßige Konstruktionen das Systemverhalten nachzuahmen. Dabei müssen umfangreiche Beobachtungen des Verhaltens vorliegen.

**Die Systemstruktur im Modell nachbilden (→ Qualitative Methode)** Es wird versucht, die Systemstruktur in relevanten Bereichen nachzubilden. Das Originalsystem wird als *Glass-Box* gesehen und muss in seiner Struktur erkannt und verstanden sein, um ein funktionsfähiges Modell erstellen zu können.

## **Gültigkeit von Modellen**

Ein Modell wird immer für einen bestimmten Einsatzzweck erstellt. Hierbei ist es meist nicht möglich, sämtliche Eigenschaften des Originalsystems zu berücksichtigen. Hinzu kommt, dass bei einem steigenden Detailierungsgrad auch die Gefahr komplexitätsbedingter Fehler steigt. Durch den Modellierer wird aus diesen Gründen eine Auswahl der im Modell berücksichtigten Eigenschaften und über die Grenzen des betrachteten Wirksystems getroffen. Diese Auswahl beinhaltet unvermeidlich einen gewissen Grad an Subjektivität, durch den es zu Abweichungen vom Original kommen kann.

Vor dem Einsatz eines Modells sollte es aus diesen Gründen umfangreichen Gültigkeitsprüfungen unterzogen werden. Je nach Einsatzzweck kann sich die Gültigkeit auf verschiedene Arten beziehen. [5]

**Verhaltensgültigkeit:** Die im Rahmen des Modellzwecks liegenden Anfangsbedingungen und die Umwelteinwirkungen des Originalsystems erzeugen im Modellsystem das (qualitativ) gleiche dynamische Verhalten.

**Strukturgültigkeit:** Die Wirkungsweise der für den Modellzweck essentiellen Wirkungsstruktur des Modells entspricht der des Originals.

**Empirische Gültigkeit:** Im Bereich des Modellzwecks entsprechen die numerischen oder logischen Ergebnisse des Modellsystems den empirischen Ergebnissen des Originals bei gleichen Bedingungen, bzw. sie sind (bei fehlenden Beobachtungen) konsistent und plausibel.

**Anwendungsgültigkeit:** Das Modell und die Simulationsmöglichkeiten entsprechen dem Modellzweck und den Anforderungen des Anwenders.

### 2.2.3 Simulation

#### Einleitung

Eine Simulation ist ein Experiment zum Erlangen neuer Erkenntnisse über ein System. Nach Änderungen an einem Modell werden Auswirkungen beobachtet und Prognosen für zukünftiges Verhalten des realen Systems erstellt. Simulationen können auch eingesetzt werden, um das Verhalten eines Realsystems beispielsweise zu Schulungs- oder Anschauungszwecken nachzubilden.

Für das ILIPT-PROJEKT soll eine Simulation erstellt werden die es ermöglicht, die Entwicklung von Komplexitätskosten bei einer Veränderung der Variantenzahl abzuschätzen. Sind zusätzlich Daten über prognostizierte Produktumsätze vorhanden ist es möglich, die ideale Anzahl von Varianten zu bestimmen.

#### Definition

In der Richtlinie 3633 [24] definiert der VDI eine Simulation folgendermaßen:

„Simulation ist ein Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.“

## Vorteile

Die Vorteile gegenüber Experimenten am realen System sind je nach Einsatzzweck unterschiedlich. So ist das Verwenden einer Simulation oftmals deutlich günstiger (Ausbildung am Flugsimulator). Bei Untersuchungen, die in Wirklichkeit zur Systemzerstörung führen würden, entsteht bei Computermodellen kein Schaden und eine Versuchswiederholung ist beliebig oft und in kürzeren Abständen möglich (Crashtest im Fahrzeugbau). Zeitlich sehr schnell oder langsam verlaufende Prozesse können in ihrem Ablauf an den Nutzer ebenso angepasst werden wie besonders große oder kleine Systeme (Atomspaltung, Entwicklung einer Galaxie). Das erwartete Verhalten von Systemen, die aufgrund ihrer Struktur einzigartig sind oder keine Eingriffe erlauben, lässt sich mit Hilfe von Simulationsmodellen erforschen (Ozonloch, Polschmelze).

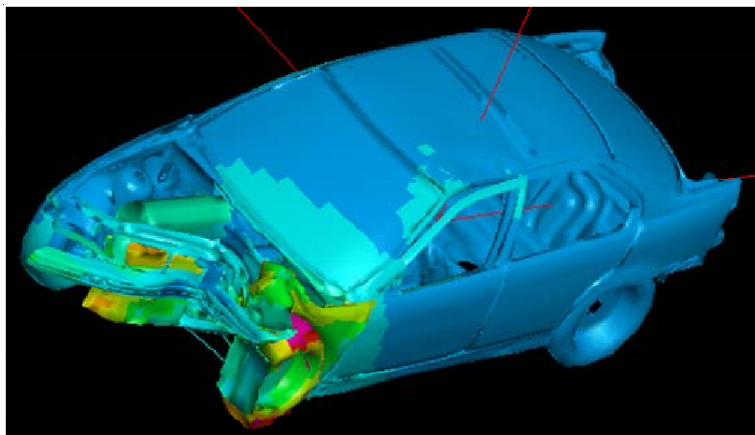


Abbildung 2.7: *Stabilitätsanalyse im Automobilbau*, Quelle: Fraunhofer [49]

Weitere Vorteile von Simulationen sind die einfache Datenerfassung, die Einsatzmöglichkeit als Entscheidungshilfe und die Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme oder Modelle. Durch die besonders hohe Anschaulichkeit und die Möglichkeit, einzelne Parameter zu verändern ist es leichter möglich, die Systemkomplexität zu erfassen und so ein besseres Systemverständnis zu entwickeln.

## Nachteile

Ein Nachteil von Simulationen gegenüber Versuchen am realen System ist der in manchen Fällen unverhältnismäßig hohe Konstruktionsaufwand bei der Modellierung. Kommen die Vorteile nur eingeschränkt zum Tragen und wird zur Simulation ein umfangreiches Modell benötigt, so ist eine Modellbildung oftmals nicht sinnvoll. Außerdem kann auch das Ermitteln der für das Modell notwendigen Daten ein Problem darstellen, das sich mit Experimenten am realen System umgehen lässt.

Da Modelle nur eine begrenzte Genauigkeit aufweisen, lässt sich ihre Abweichung vom realen System nur für eine eingeschränkte Zeit vorhersagen. Bei langfristigen Versuchen kann es vorkommen, dass kleinste Abweichungen in den Anfangsbedingungen im Laufe der Zeit exponentiell verstärkt werden und die Ergebnisse vollkommen unterschiedlich ausfallen. Dieses chaotische Verhalten, auch Schmetterlingseffekt genannt, stellt bei der Nachbildung von natürlichen Systemen ein großes Problem dar.

Am Beispiel von Simulationen zur Wettervorhersage ist dieser Effekt gut zu erkennen [23]:

„Das Wetter für einen Tag kann relativ genau prognostiziert werden, während eine Vorhersage für einen Monat kaum möglich ist. Selbst wenn die ganze Erdoberfläche mit Sensoren bedeckt wäre, diese nur geringfügig voneinander entfernt lägen, bis in die höchsten Lagen der Erdatmosphäre reichten und exakte Daten lieferten, wäre auch ein unbegrenzt leistungsfähiger Computer nicht in der Lage, langfristig exakte Prognosen der Wetterentwicklung zu machen. Da das Computermodell die Räume zwischen den Sensoren nicht erfasst, kommt es zu geringfügigen Divergenzen zwischen Modell und Realität, die sich dann positiv



verstärken und zu großen Unterschieden führen. Beispielsweise lassen sich aus den Daten von 1000 Wetterstationen einigermaßen zuverlässige Prognosen über einen Zeitraum von vier Tagen machen. Für entsprechende Vorhersagen über 11 Tage bräuchte man bereits 100 Millionen gleichmäßig über die Erde verteilte Messstationen. Absurd wird das Vorhaben, wenn sich die Vorhersage über einen Monat erstrecken soll; denn dann wären  $10^{20}$  Wetterstationen erforderlich, das heißt je eine auf je 5 Quadratmillimeter Erdoberfläche.“

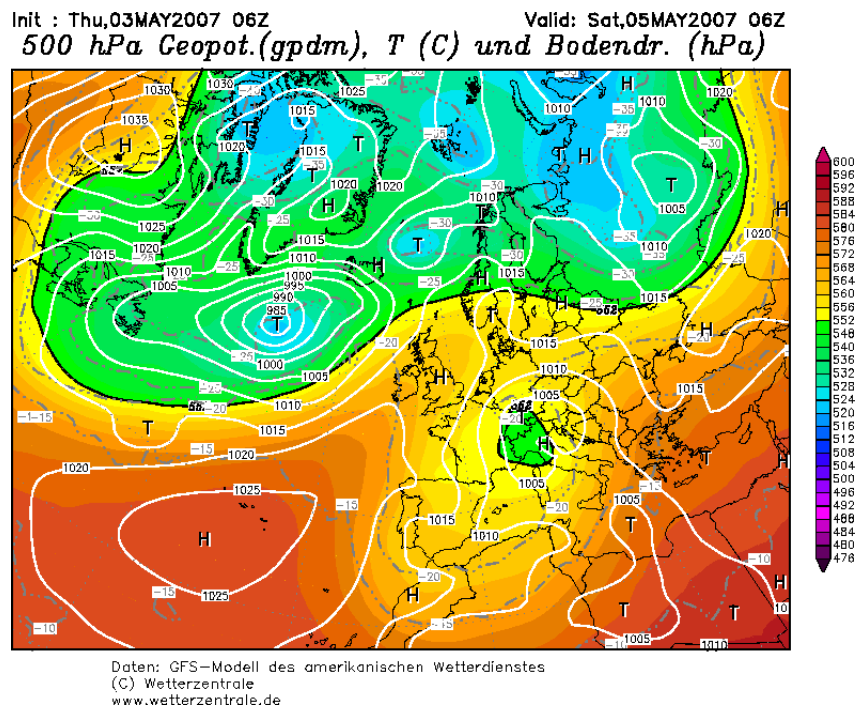


Abbildung 2.8: Wetterprognose über 48h, Quelle: Wetterdienst [51]

## 2.3 Komplexitätsmanagement

Durch die gesellschaftliche Entwicklung hin zu stärkerer Individualisierung sind Unternehmen vieler Branchen gezwungen, ihr Angebot den geänderten Konsumentenwünsche anzupassen. Reichte es vormals aus, in Massenproduktion hergestellte Produkte in wenigen Bauformen anzubieten, so sehen sich heute viele Firmen mit dem Wunsch der Kunden nach einem hohen Individualisierungsgrad konfrontiert. Bei imageträchtigen Produkten wie Automobilen ist diese Entwicklung so stark, dass Experten bereits von einem „*Mega-Trend*“ sprechen. [36]

In der Automobilindustrie reagieren die Konzerne oftmals mit einem erweiterten Angebot an Produktvarianten und der Möglichkeit für den Käufer, sein Fahrzeug im Rahmen bestimmter Vorgaben individuell zu konfigurieren. Einige Werbeslogans bekannter Automobilhersteller spiegeln diesen Sachverhalt wieder:

*„Wer Individualität lebt, soll sie auch fahren können.“* (Volkswagen [50])

*„Die exklusivste Art, BMW zu fahren.“* (BMW [35])

*„So unverwechselbar wie Sie selbst“* (Mercedes [39])

Durch die in Folge dieser Entwicklung erhöhte Anzahl an Varianten wird jedoch ein Mehraufwand verursacht, der sich oftmals, ebenso wie der erzielte Gewinn, nur schwer erfassen lässt. Beginnend bei der Konstruktion bis hin zum Mehraufwand im Vertrieb ergeben sich eine Reihe von variantengebundenen Kostentreibern, die es verursachergerecht zuzuordnen gilt.

Durch eine größere Anzahl an Varianten erhöht sich in der Regel auch die Komplexität, mit der ein Unternehmen vor allem in der Produktion zu kämpfen hat. Das Komplexitäts- und Variantenmanagement beschäftigt sich mit der Identifizierung, Berechnung und Reduzierung der hierdurch auftretenden Kosten.

### 2.3.1 Komplexität

#### Allgemeine Definition

Der DUDEN [8] definiert Komplexität als

1. die Gesamtheit aller Merkmale, Möglichkeiten
2. Vielschichtigkeit

#### Komplexe Systeme

Drei Merkmale sind kennzeichnend für komplexe Systeme [12]:

- Die Vielzahl unterschiedlicher bei der Entscheidung zu berücksichtigender **Variablen** (Elementekomplexität).
- Die Vielzahl heterogener, zwischen diesen Variablen bestehenden **Beziehungen** (Relationenkomplexität).
- Die **Veränderlichkeit** der zu berücksichtigenden Variablen und Beziehungen (Dynamische Komplexität).

Gegenüber einer *statischen* Betrachtung der Komplexität umfasst diese *dynamische* Sichtweise auch die Veränderlichkeit als Komplexitätsmerkmal.

Eine Einordnung komplexer Systeme stammt aus dem Komplexitäts- und Variantenmanagement der AUDI AG:

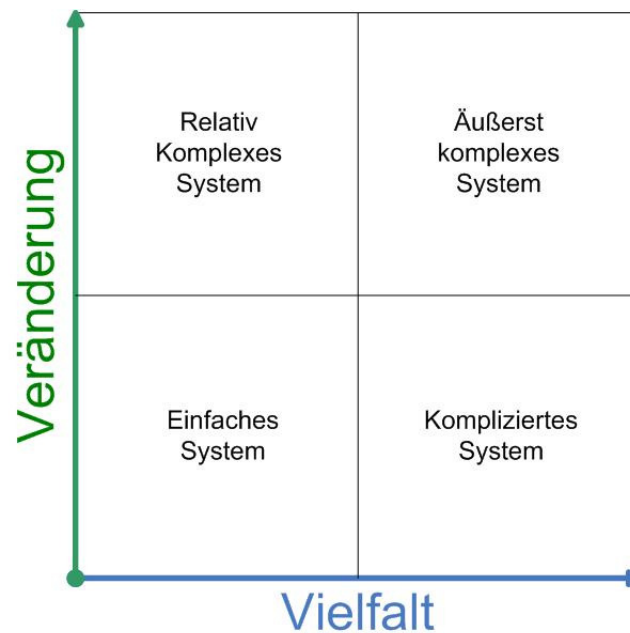


Abbildung 2.9: *Komplexe Systeme in zwei Dimensionen*, Quelle: Alders [10]

Demnach entsteht ein hoher Komplexitätsgrad vor allem durch das gleichzeitige Auftreten von großer Vielfalt bei hoher Veränderlichkeit. Da auch die Vernetzung innerhalb des Systems ein wichtiger Faktor für die Komplexität ist, der jedoch in diesem Modell unberücksichtigt bleibt, lässt sich dieses Modell durch Hinzufügen einer dritten Dimension *Vernetzung* noch verfeinern.

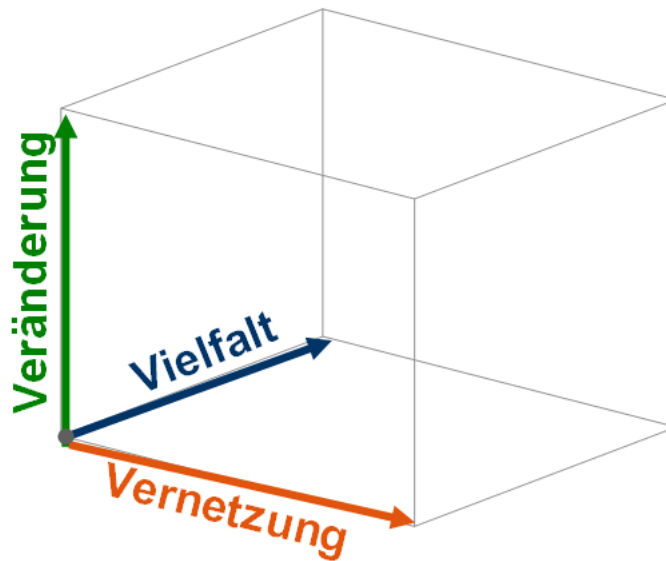


Abbildung 2.10: *Komplexe Systeme in drei Dimensionen*, Quelle: NoAE [47]

Durch Ansteigen der drei Merkmale *Veränderung*, *Vielfalt* oder *Vernetzung* erhöht sich die Komplexität des Systems. Im Gegensatz zum zweidimensionalen Modell ist es hierbei auch möglich, einen hohen Komplexitätsgrad ohne eine hohe Veränderlichkeit zu erreichen, da bei hoher Vielfalt und Vernetzung schon wenig Veränderung ein komplexes System zur Folge hat.

Der Unterschied zwischen einem komplizierten und einem komplexen System besteht in der Veränderlichkeit. Anhand des folgenden Beispiels wird deutlich was das jeweilige System ausmacht:

„Ein kompliziertes System sind die verwickelten Gassen in einer typisch italienischen Altstadt, zum Beispiel Florenz: Fast alle von ihnen sind Einbahnstraßen, aber wenn man einmal das Prinzip durchschaut hat, nachdem die Einbahnregelung aufgebaut ist, hat sich die Verwicklung gelöst und man findet sich gut

zurecht. Eine kleine Änderung macht aus diesem komplizierten System ein komplexes System: Wenn die Richtung der Einbahnstraße je nach Verkehrsbelastung flexibel gehandhabt würde, stadtauswärts oder stadteinwärts, dann entsteht ein Rückkopplungsmechanismus, der wesentlicher Bestandteil vieler komplexer Systeme ist. Er macht es unmöglich, die Richtung der Einbahnstraße zuverlässig vorherzusagen, sie hängt von den Verkehrsteilnehmern selbst ab.“ [16]

*Unmöglich* bezieht sich in diesem Fall auf die Sicht des Verkehrsteilnehmers. Ihm ist es nicht möglich, das gesamte System zu überblicken und auf die Richtung der vor ihm liegenden Einbahnstraße zu schließen. Mit der Bildung eines komplexen Modells wird das Ziel verfolgt derartige Dinge zu prognostizieren.

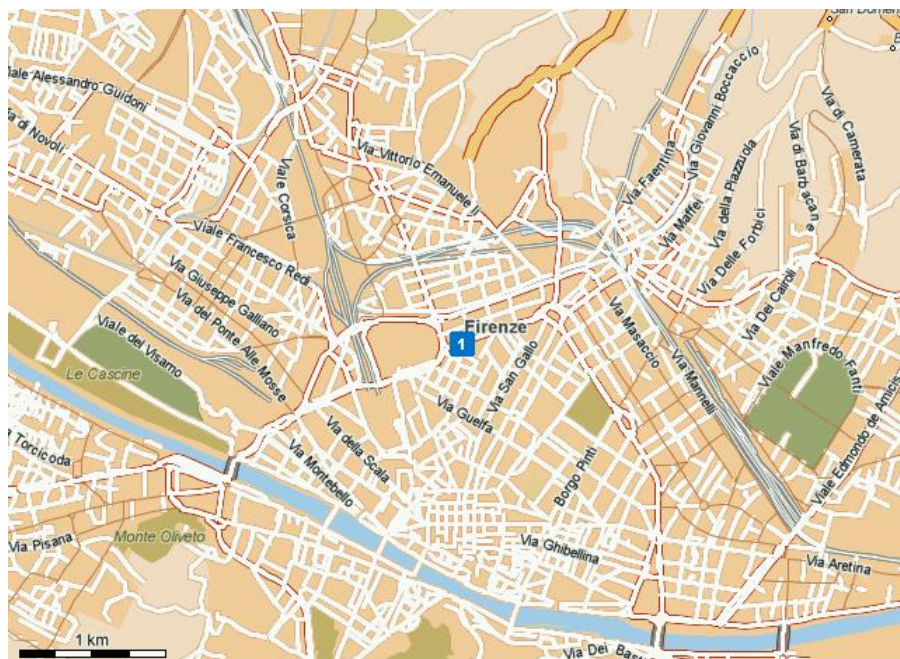


Abbildung 2.11: Karte der Innenstadt von Florenz, Quelle: Map24 [45]

### Definition Variante

Varianten sind laut REFA Gegenstände ähnlicher Form oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile. [7]

### Variantengetriebene Komplexität

Diese Art der Komplexität wird durch die Anzahl der Produktvarianten bestimmt. Sie ist also der durch den Faktor *Vielfalt* hervorgerufene Teil der gesamten Komplexitätskosten.

Produziert ein Unternehmen lediglich eine Variante, so kann bei Fertigung am Fließband die gesamte Arbeitszeit für wertschöpfende Tätigkeiten eingesetzt werden: Es entstehen keine Komplexitätskosten.

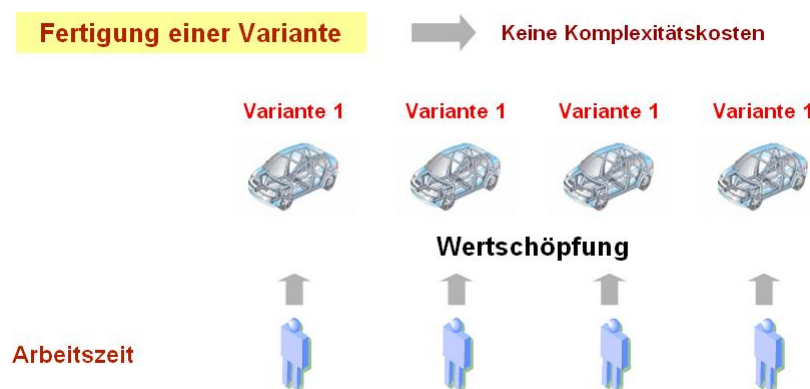


Abbildung 2.12: *Eine Variante*, Quelle: Schaffer [31]

Die Arbeitszeit kann passend für die produzierte Variante bemessen werden ohne dass Taktausgleichszeiten, Rüstzeiten oder Ähnliches berücksichtigt werden müssen.

Produziert ein Unternehmen jedoch mehr als ein Produkt, fallen durch vielfältige Vorgänge Mehrkosten an.

Soll beispielsweise ein Automobil mit optionalem Schiebedach angeboten werden würde der Arbeiter, unabhängig davon ob es tatsächlich eingebaut wird oder nicht, für die Montage bereit stehen.

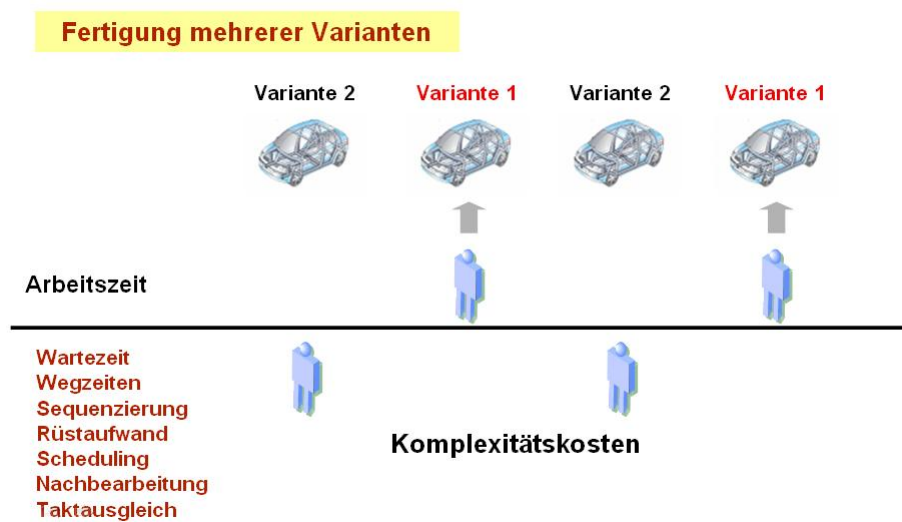


Abbildung 2.13: Mehrere Varianten, Quelle: Schaffer [31]

Werden die hierdurch entstehenden Kosten nicht durch die Mehreinnahmen aus der zusätzlichen Produktvariante mindestens aufgefangen, wirken sie sich negativ auf das Betriebsergebnis aus.



Die variantengetriebenen Komplexitätskosten machen einen Großteil der gesamten Komplexitätskosten aus. Weitere Arten können zum Beispiel die Produktkomplexität oder die Organisationskomplexität sein.

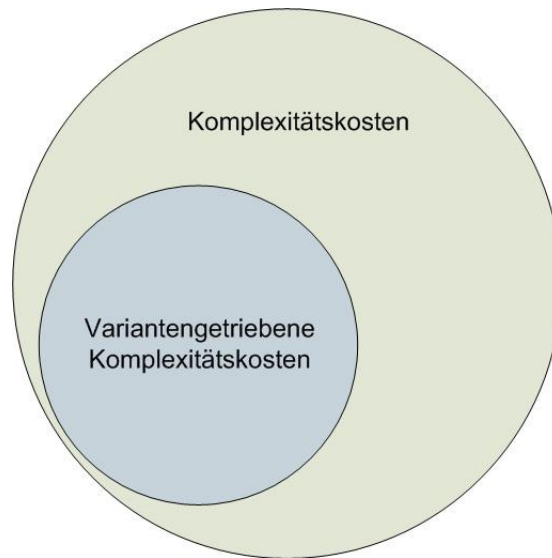


Abbildung 2.14: *Variantengetriebene Komplexitätskosten*

### 2.3.2 Variantenbezogene Komplexitätstreiber

Varianten eines Produktes entstehen durch unterschiedliche Ausführungen einzelner Bestandteile. Diese Bestandteile werden als variantenbezogene Komplexitätstreiber bezeichnet, da durch sie sowohl die interne als auch die externe Komplexität maßgeblich beeinflusst wird.

Im Automobilbau können diese Treiber vielfältig sein und sich auch in ihrer Auswirkung stark unterscheiden. Komplexitätstreiber bei der Produktion eines Fahrzeuges können beispielsweise sein:

- Die Motorbaureihe
- Der Hubraum
- Die Leistungsstufe
- Das Getriebe
- Länderausstattungen
- Die Lenkhilfepumpe



Abbildung 2.15: Motorenfertigung bei BMW in Steyr, Quelle: TU Wien [52]

### 2.3.3 Externe Variantenvielfalt und Kombinationen

Diese Art der Vielfalt bezieht sich auf alle für den Kunden wahrnehmbaren, sich zwischen Varianten unterscheidenden Produktmerkmale. Hierzu zählen auch Bauteilkombinationen (*Build Combinations*), durch die neue Varianten gebildet werden. Das Produkt wird durch Variantenreichtum für den Abnehmer in der Regel attraktiver und führt somit zu höheren Absätzen.

Eine hohe externe Variantenvielfalt ist ein Wettbewerbsvorteil, der auch als Barriere genutzt werden kann, um potentiellen Mitbewerbern den Markteintritt zu erschweren.

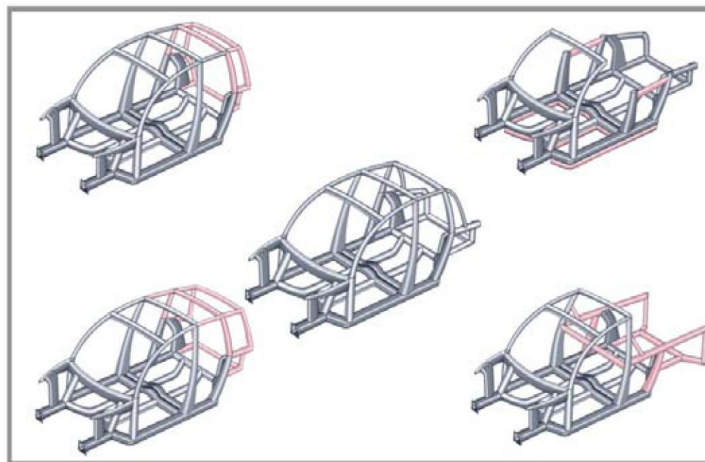


Abbildung 2.16: *Externe Varianten einer Karosserie*, Quelle: Fraunhofer [28]

Eine Möglichkeit, unnötige Komplexität zu vermeiden, ist die Verwendung standardisierter Strukturen, welche sich durch Einfügen relativ kleiner Elemente zu Varianten ausbauen lassen.

Im Rahmen des ILIPT-Projektes wurde von der KATHOLISCHEN UNIVERSITÄT RIO DE JANEIRO (PUC) die Anzahl der externen Varianten des Fahrzeuges FORD FUSION in unterschiedlichen Märkten untersucht.

| Märkte          | Bauformen | Antrieb | Farben & Karosserieelemente |            |           |        | Optionen | Varianten      |
|-----------------|-----------|---------|-----------------------------|------------|-----------|--------|----------|----------------|
|                 |           |         | Farben                      | Karosserie | Versionen | Gesamt |          |                |
| Brasilien       | 1         | 4       | 8                           | 2          | 4         | 48     | 4        | 152            |
| Argentinien     | 1         | 4       | 8                           | 2          | 3         | 32     | 4        | 64             |
| Chile           | 1         | 2       | 8                           | 1          | 2         | 16     | 3        | 40             |
| Mexiko          | 1         | 1       | 8                           | 2          | 1         | 16     | 0        | 16             |
| Kolumbien       | 1         | 1       | 7                           | 1          | 1         | 7      | 0        | 7              |
| Venezuela       | 1         | 1       | 9                           | 1          | 2         | 18     | 0        | 18             |
| Türkei          | 1         | 6       | 12                          | -          | 2         | -      | -        | 3.456          |
| Russland        | 1         | 3       | 11                          | -          | 3         | -      | -        | 392.832        |
| Portugal        | 1         | 4       | 12                          | 3          | 2         | 32     | 15       | 905.728        |
| Grossbritannien | 1         | 6       | 12                          | 11         | 5         | 247    | 18       | 4.087.040      |
| Frankreich      | 1         | 7       | 12                          | 6          | 3         | 121    | 26       | 21.868.417     |
| Deutschland     | 1         | 7       | 12                          | 12         | 5         | 179    | 53       | 15.626.184.576 |

Abbildung 2.17: *Varianten des Ford Fusion*, Quelle: Scavarda [27]

Trotz der Tatsache, dass der auf Basis des FORD FIESTA hergestellte FUSION (in Südamerika: ECO-SPORT) ein Fahrzeug der Kompaktklasse mit relativ wenigen kundenspezifischen Optionen ist, steigt die Zahl der Varianten für Deutschland schnell auf ein beachtliches Maß.

Die Berechnung der Gesamtzahl an Varianten erfolgt durch Multiplikation der Elemente *Bauform*, *Motorisierung*, *Farben* und *Karosserieelemente* sowie *optionaler Ausstattung*. Durch eine Bündelung von Optionen zu Ausstattungspaketen und das Ausschließen bestimmter Kombinationen wird diese Anzahl anschließend leicht herabgesetzt. Die so für Deutschland erhältlichen 15.626.184.576 externen Varianten wiederum schlagen sich in einer ebenfalls sehr hohen interne Variantenvielfalt nieder.

### 2.3.4 Interne Variantenvielfalt

Sie beschreibt die Vielzahl der Varianten, die firmenintern verarbeitet werden müssen. Da sie lediglich Kosten verursachen wird versucht, sie so weit wie möglich zu reduzieren.

Ziel eines Variantenmanagements ist es, eine geforderte externe Variantenvielfalt mit minimaler interner Variantenvielfalt zu erreichen.



Abbildung 2.18: *Interne Varianten: Eingesetzte Klebstoffe*, Quelle: Henkel [42]

Diese Vielzahl an technisch möglichen Varianten hat zur Folge, dass in den Werken nur noch sehr wenige identische Fahrzeuge produziert werden. Bei MERCEDES-BENZ lag der Wiederholfaktor für ein Fahrzeug der C-Klasse im Jahr 2000 bei 1,4. [58]

### 2.3.5 Variantengetriebene Komplexitätskosten

Durch Komplexität entsteht eine Reihe von teilweise schwer zurechenbaren Kosten. Diese können in direkte Kosten und Opportunitätskosten gegliedert werden. Die direkten Komplexitätskosten wiederum teilen sich auf in einmalig und dauerhaft anfallende Kosten.

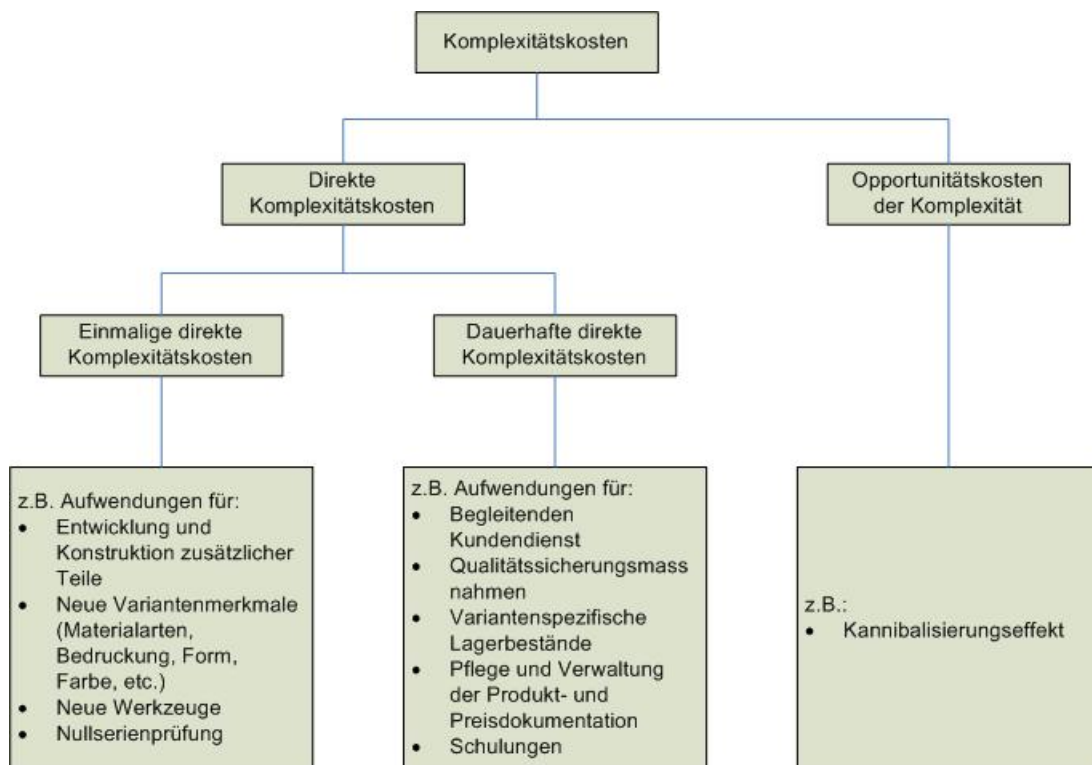


Abbildung 2.19: *Gliederung der Komplexitätskosten*, Quelle: Schuh [19]

Durch umfangreiche Marktforschungsmaßnahmen ist es möglich, Absatzprognosen für zukünftige und über die Entwicklung bestehender Produkte zu erstellen, mit deren Hilfe anschließend eine Berechnung der Opportunitätskosten möglich ist. Dies ist jedoch nicht Bestandteil der Analyse zur Entwicklung eines Modelles für variantengetriebene Komplexitätskosten.

Betrachtet man die innerhalb eines Unternehmens anfallenden Komplexitätskosten wird deutlich, dass sich diese nicht auf einen Funktionsbereich beschränken sondern in allen Unternehmensbereichen auftreten. Bei einem Automobilhersteller beträgt der Anteil der Komplexitätskosten um 20 Prozent der Gesamtkosten und ist damit ein wichtiger Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens.

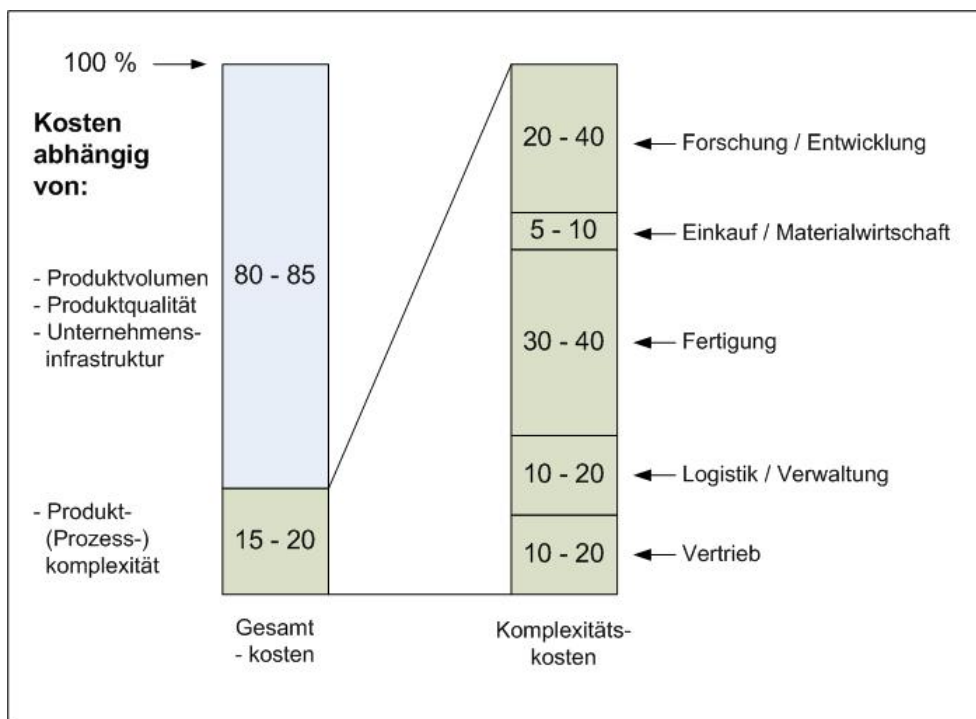


Abbildung 2.20: *Kostenstruktur eines Automobilherstellers*, Quelle: Meffert [12]

Da die Produkt- und Variantenvielfalt zumeist mit wachsender Unternehmensgröße zu- und die Losgröße oftmals abnimmt, wird in Verbindung mit Komplexitätskosten auch von *“diseconomies of scale”* gesprochen. [12]

Auf Grund der schwer zu überblickenden Struktur komplexer Systeme besteht stets die Gefahr, dass die Kosten bei Einführung einer neuen Variante höher als erwartet ausfallen. Es droht die *Komplexitätsfalle*.

### 2.3.6 Komplexitätsfalle

Eine Erhöhung der Variantenzahl führt ab einem gewissen Punkt zu sprunghaft ansteigenden Kosten. Den überproportionalen Kostenerhöhungen stehen nur degressive Erlöszuwächse gegenüber. Ab einer kritischen Variantenzahl sinkt daher der Gewinn bei weiter steigender Komplexität.

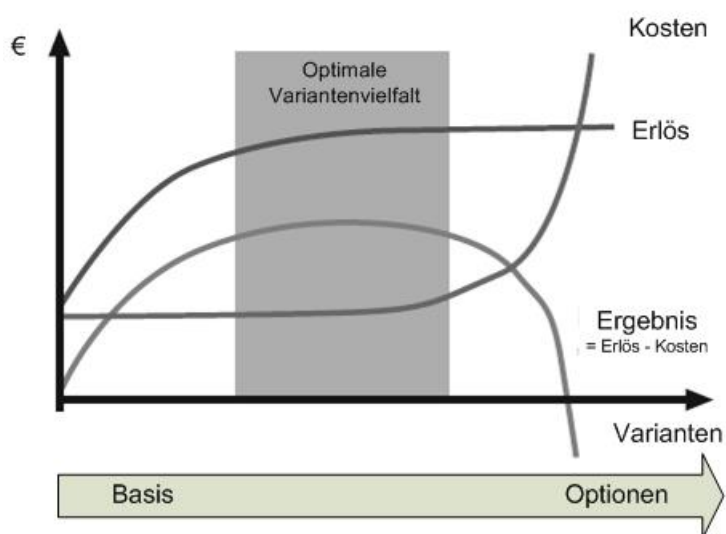


Abbildung 2.21: *Bereich der optimalen Variantenvielfalt*, Quelle: Lindemann [10]

Entscheidet sich ein Hersteller zur Einführung neuer Produktvarianten, betrifft diese Entscheidung zunächst nur die externe Komplexität direkt. Da bei einer Erhöhung dieser unabdingbar auch die interne Komplexität steigt, erhöhen sich auch die Komplexitätskosten. Desweiteren wechseln Kunden des Grundprodukts zur neu eingeführten Variante. Dieser sogenannte Kannibalisierungseffekt führt zu Umsatzeinbußen bei bestehenden Produkten. Werden diese Einbußen und die entstandenen Komplexitätskosten nicht durch zusätzliche Gewinne der neuen Variante mindestens aufgefangen, geht das Gesamtergebnis zurück. Da die Kunden der Varianten nicht bereit sind, wesentlich mehr als für die Grundversion zu



zahlen ist der Hersteller gezwungen, den Preis seiner gesamten Produktpalette anzuheben. Dadurch werden exotische Produkte durch Gewinne der Volumenartikel subventioniert. Die Preise der Volumenartikel steigen, was wiederum die Verkaufszahlen negativ beeinflusst.

Im Falle eines rückläufigen Gesamtergebnisses versucht der Hersteller, durch das Besetzen von Marktnischen oder die Schaffung neuer Märkte mittels Einführung von Varianten seinen Umsatz zu steigern. Dies führt wiederum zu erhöhten Komplexitätskosten, lässt die Umsätze mit alten Produkten sinken und beeinflusst das Gesamtergebnis negativ. Der Kreislauf schließt sich und die Komplexitätsfalle schnappt zu.

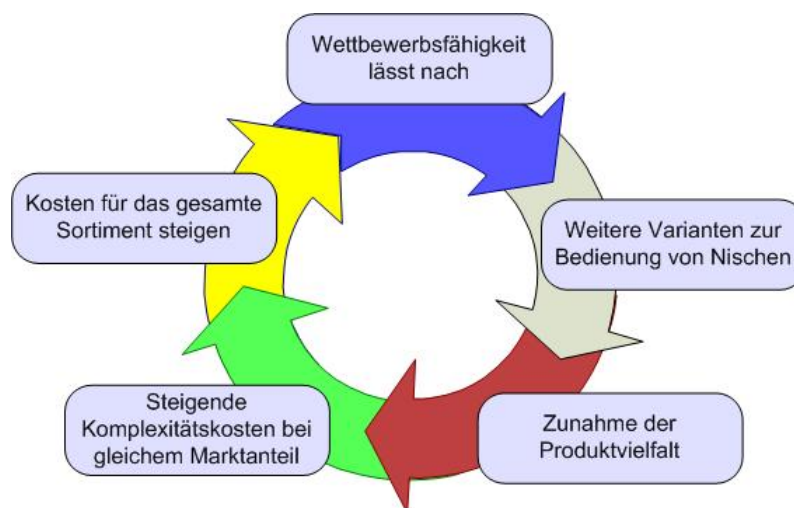


Abbildung 2.22: *Kreislauf der Komplexitätsfalle*, Quelle: Pulm [14]

Mit Hilfe der Simulation von Komplexitätskosten können Strategien zum Umgang mit variantengetriebener Komplexität entwickelt werden. Die Anzahl der Varianten kann im Bereich der optimalen Vielfalt gehalten werden, der durch die Versuche am Modell bekannt ist. Die Komplexitätsfalle wird somit vermieden.

### 2.3.7 Strategien des Komplexitätsmanagements

Eine Definition für Komplexitätsmanagement stammt von SCHUH [19]:

„*Komplexitätsmanagement* umfasst die Gestaltung, Steuerung und Entwicklung der Vielfalt des Leistungsspektrums (Produkte, Prozesse und Ressourcen) im Unternehmen. Durch die Verstärkung und Dämpfung der Komplexität wird die Fähigkeit angestrebt, die Vielfalt in allen Wertschöpfungsstufen so zu beherrschen, dass ein maximaler Beitrag zum Kundennutzen bei gleichzeitiger hoher Wirtschaftlichkeit des Leistungserstellers erzielt werden kann.“

Die drei genannten Funktionen *Gestaltung*, *Steuerung* und *Entwicklung* werden durch die Handlungsstrategien *Reduzierung*, *Beherrschung* und *Vermeidung* umgesetzt. Die einzelnen Strategien unterscheiden sich dabei nach ihrem Wirkungszeitpunkt:

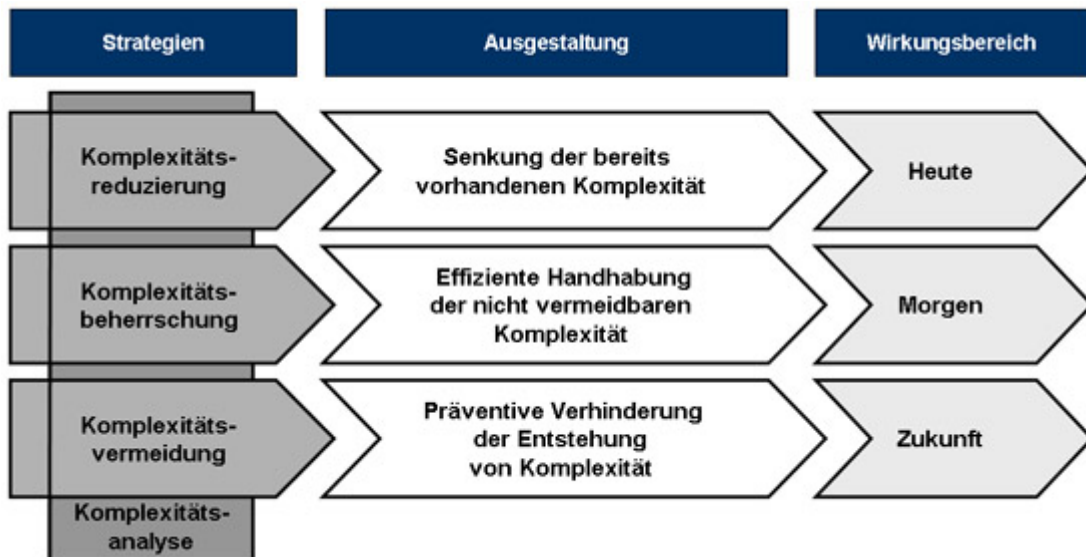


Abbildung 2.23: *Konzept des Komplexitätsmanagements*, Quelle: Wildemann [26]

Je nach gewünschtem Wirkungsbereich können so einzelne Maßnahmen oder ganze Pakete gewählt werden.

**Reduktion:** Ist die Komplexität zu hoch wird versucht, sie zu reduzieren. Dies kann zum Beispiel durch Wegfall von Varianten, Verwendung von Modulbauweise oder Optimierung des Fertigungsprozesses geschehen.

**Beherrschung:** Die Komplexitätsbeherrschung ermittelt die unvermeidliche Komplexität und trifft strategische Entscheidungen zum Umgang mit Varianten und Komplexität.

**Vermeidung:** Es wird versucht, die Entstehung von Komplexität zu vermeiden. Oft kann hierbei schon in der Konstruktions- und Produktionsplanungsphase der Grundstein für erfolgreiches Komplexitätsmanagement gelegt werden.

Im Bereich des Variantenmanagements werden diese Strategien durch unterschiedliche Methoden realisiert. Aufgeteilt in produkt- und prozessgebundene Maßnahmen können so Optimierungsvorgänge geplant und durchgeführt werden.

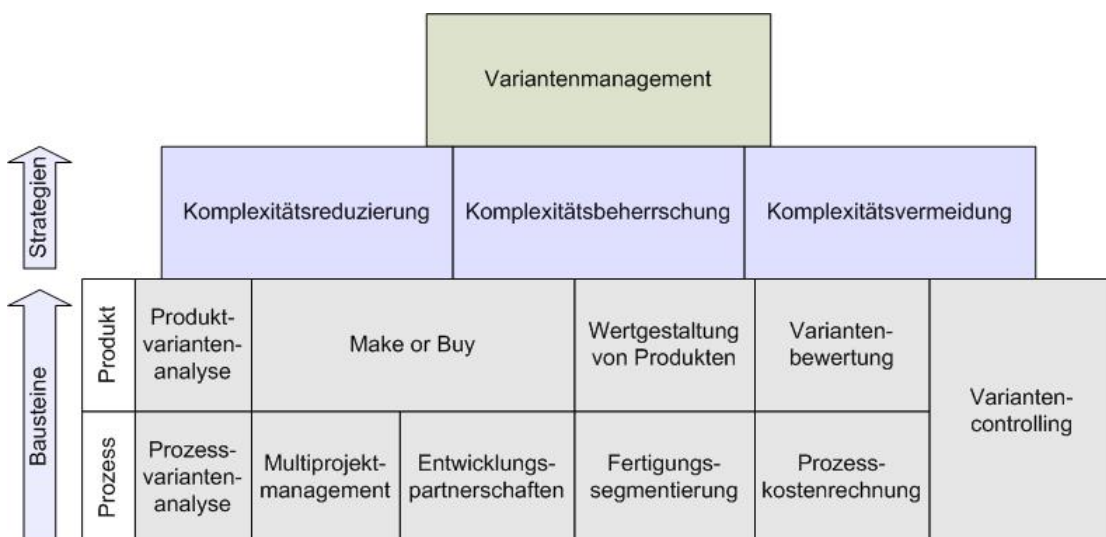


Abbildung 2.24: Bausteine des Variantenmanagements, Quelle: Wildemann [26]

### **2.3.8 Begriffe des Komplexitätsmanagements**

#### **Montagequote (*Rate of option penetration - ROP*)**

Beschreibt das Verhältnis von Produkten, die mit einer bestimmten Option ausgestattet werden, zur Gesamtmenge der hergestellten Ware.

#### **Flexibilität (*Flexibility*)**

Die Fähigkeit eines Systems, schnell und mit wenig Aufwand mit veränderten Bedingungen zurechtzukommen. Diese Eigenschaft ist wichtig wenn es darum geht, in der Produktion verschiedene Varianten zu handhaben.

#### **Differenzierungspunkt (*Point of produkt differentiation - PPD*)**

An diesem Punkt entsteht erstmals eine Variante des Produktes durch alternative Handlungsweisen in der Produktion oder Montage. Durch die Lage des Differenzierungspunktes wird die Anzahl der Varianten in den nachfolgenden Prozessen und damit die Höhe der variantengetriebenen Komplexitätskosten maßgeblich beeinflusst.

### 2.3.9 Tools im Bereich des Komplexitätsmanagement

#### FACTON

Die FACTON GmbH bezeichnet ihre Software als ein Produkt zur *Cost Process Optimization (CPO)*. Die im Jahre 1998 gegründete Firma hat ihren Hauptsitz in Potsdam und beschäftigt derzeit 55 Mitarbeiter. [55] Seit dem Jahr 2006 sind EXTOREL und HASSO PLATTNER VENTURES (HPV) als Gesellschafter an FACTON beteiligt. Seit 2007 unterstützt MICROSOFT das Unternehmen durch die Aufnahme in das sogenannte Tiefenförderungsprogramm. [46]

Die Anwender sollen durch FACTON in die Lage versetzt werden, schon bei der Entwicklung neuer Produkte stärker unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu konstruieren als dies bisher der Fall ist. Die einzelnen Bauteile werden mit ihren Kosten und Beschaffungswegen sehr detailliert erfasst und bilden zusammen mit den Stückzahlangaben die Grundlage für die kalkulierten Kosten. Die Software verfügt über diverse Schnittstellen sowohl zu PPS als auch CAD Systemen und soll eine Verbindungsfunktion erfüllen.

Durch Simulation verschiedener Differenzierungspunkte (PPD) können die Montage- und Fertigungsvorgänge optimiert werden. Es kann eine ABC-Analyse der Bauteile durchgeführt werden.

FACTON bietet verschiedene Möglichkeiten vorhandenen Komplexität zu optimieren und die Entstehung weiterer zu vermeiden. Komplexitätskosten im Sinne von variantengetriebener Komplexität können jedoch nicht ermittelt werden.

### Complexity Manager

Der von der SCHUH GmbH vertriebene COMPLEXITY MANAGER setzt sich je nach Anforderung aus mehreren Modulen zusammen. Der Schwerpunkt hierbei ist die Darstellung und Optimierung der Variantenvielfalt mit dem *Modul F/V*. Das bisher zur Ermittlung von Komplexitätskosten eingesetzte *Modul C* wurde aus dem Portfolio genommen und bisher durch keine andere Lösung ersetzt. Laut Produktmanager MICHAEL FRIEDRICH wird derzeit an einer ACCESS-basierenden Lösung gearbeitet. [58] Ob diese jedoch zu einem späteren Zeitpunkt für den Kunden verfügbar sein wird oder lediglich intern Verwendung findet, steht noch nicht fest.



Abbildung 2.25: Logo der Schuh GmbH

## Einflussmatrizen

Die Verwendung von *Einflussmatrizen* wird erstmals im Jahr 1973 in den Arbeiten von WARFIELD [25] erwähnt. Durch die Weiterentwicklung STEWARDS [22] von 1981 etablierte sich die Methode als ein Tool zur Darstellung, der Analyse und zum Management von Konstruktionsbeschreibungen, später auch für die Analyse von Entwicklungsprojekten. Größere Verbreitung fand die Methode jedoch erst, nachdem in den 90er Jahren das MASSACHUSETTES INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT) umfangreiche Forschungen zum Thema durchgeführt hatte. [18] [10]

Eine *Einflussmatrize* oder auch *Design Structure Matrix (DSM)* ist eine abstrakte Art der Beschreibung technischer Systeme oder Prozesse. Sie wird für die Gestaltung und Beschreibung eingesetzt und beschreibt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Subsystemen oder -prozessen.

Mit Hilfe von *Einflussmatrizen* können komplexe Zusammenhänge anschaulich abgebildet und durch die übersichtliche Darstellung besser geplant und optimiert werden. Die *Einflussmatrize* besitzt zwei Dimensionen. Besteht eine Beziehung zwischen zwei Elementen, so wird diese durch Markierung der jeweiligen Zelle dargestellt.

|     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 0 | ■ |   |   |   | × |   |   | × |
| B 1 |   | ■ |   |   |   | × |   | × |
| C 2 |   |   | ■ |   |   |   |   |   |
| D 3 |   |   |   | ■ | × |   | × |   |
| E 4 | × |   |   |   | ■ | × |   |   |
| F 5 |   | × |   | × |   | ■ |   |   |
| G 6 | × |   | × | × |   |   | ■ |   |
| H 7 | × |   |   |   |   |   |   | ■ |

Abbildung 2.26: *Einflussmatrize*

Die Verbindungen der einzelnen Zellen beruhen auf drei möglichen Arten von Zusammenhängen:

1. Die Elemente beeinflussen sich nicht und können unabhängig von einander ausgeführt oder bearbeitet werden.

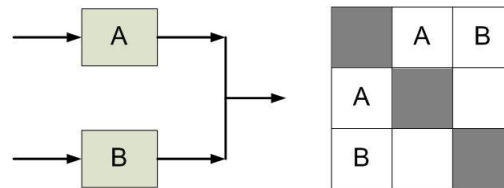


Abbildung 2.27: *Parallel*, Quelle: DSM Web [40]

2. Das Element „A“ beeinflusst Element „B“. Der Vorgang „B“ kann erst ausgeführt werden nachdem „A“ abgearbeitet wurde.

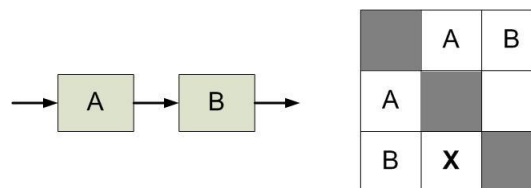


Abbildung 2.28: *Sequentiell*, Quelle: DSM Web [40]

3. Beide Elemente beeinflussen sich gegenseitig. Änderungen an einem der Blöcke haben stets auch Auswirkungen auf den zweiten Block.

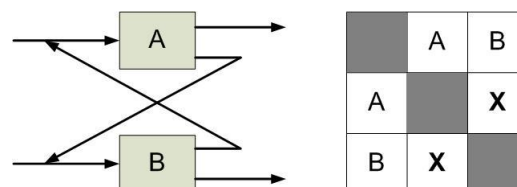


Abbildung 2.29: *Gekoppelt*, Quelle: DSM Web [40]



Betrachtet man eine *Einflussmatrize* so weist eine Markierung oberhalb der Diagonale darauf hin, dass eine früher startende Aufgabe von einer späteren abhängig ist. Eine Markierung oberhalb der Diagonale kann auch bedeuten, dass die Aufgaben nicht der Reihe nach geordnet sind und eine Umordnung dazu führt, dass sie unterhalb der Diagonale eingeordnet werden können. Wenn die oberhalb der Diagonale markierten Tasks nicht so umgeordnet werden können, dass sie im unteren Dreieck erscheinen bedeutet dies, dass eine oder mehrere Aufgaben miteinander gekoppelt sind. [18]

|   | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ■ |   |   |   |   |   |   |   |
| 1 |   | ■ |   |   |   | × | × |   |
| 2 |   |   | ■ | × | × |   |   | × |
| 3 |   |   | × | ■ | × |   |   | × |
| 4 |   |   | × | × | ■ |   |   | × |
| 5 |   | × |   |   |   | ■ | × |   |
| 6 |   | × |   |   |   | × | ■ |   |
| 7 |   |   | × | × | × |   |   | ■ |

Abbildung 2.30: *Einflussmatrize, Urzustand*

Mit Hilfe einer solchen *Einflussmatrize* kann der Anwender schnell und übersichtlich die Verbindungen der Elemente nachvollziehen. Dies erleichtert bei Projekten das Abschätzen von Durchführungszeiten und -kosten sowie die gezielte Planung der Organisationsstruktur.

Ein Verfahren zur Optimierung von *Einflussmatrizen* ist das Bilden von Paketen. Hierbei wird versucht, möglichst viele Elemente nebeneinander zu platzieren. Dies hat den Vorteil, dass der Gesamtvorgang auf mehrere weniger komplexe Teilstücke verteilt werden kann.

Bei dieser sogenannten Sequenzierung oder Partitionierung findet eine Umreihung der Aufgaben statt.

|   | 0 | 1 | 5 | 6 | 4 | 2 | 3 | 7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | ■ |   |   |   |   |   |   |   |
| 1 |   | ■ | × | × |   |   |   |   |
| 5 |   | × | ■ | × |   |   |   |   |
| 6 |   | × | × | ■ |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   |   | ■ | × | × | × |
| 2 |   |   |   |   | × | ■ | × | × |
| 3 |   |   |   |   | × | × | ■ | × |
| 7 |   |   |   |   | × | × | × | ■ |

Abbildung 2.31: Einflussmatrize, Partitioniert

- Gruppe „blau“: 1, 5, 6.
- Gruppe „rot“: 2, 3, 4, 7.

Die gebildeten Blöcke wären bei der Personalplanung von Projektteams eine gute Zusammenstellung, da in diesem Beispiel alle anfallenden Aufgaben innerhalb des Teams bearbeitet werden könnten. Beide Gruppen könnten zudem parallel arbeiten.

Ähnliches gilt, wenn es sich um Montageprozesse handelt. Die Gruppen könnten in diesem Falle zu Modulen zusammengefasst werden.

Je nach Einsatzbereich und Schwerpunkt kann diese Art der Optimierung auf unterschiedliche Weise geschehen. Es existieren verschiedene Algorithmen zu diesem Zweck. Unter Anderem der *Triangularization Algorithm* von KUSIAK [43] der auch in der Einflussmatrizen-Software der TU MÜNCHEN „LOOME“ [44] Verwendung findet.

Zur genaueren Beschreibung der Systemstruktur gibt es außer der bisher beschriebenen binären Verbindungsstruktur noch eine weitere Möglichkeit: Die *numerische Einflussmatrize*. Bei dieser erhalten alle Verbindungen einen Wert zugeordnet, der die Stärke der Verbindung repräsentiert. Dargestellt wird der Wert entweder als Zahl oder als eine zugeordnete Farbe.

|   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 |      |      |      | 1,00 |      | 0,20 |      |      |
| 2 |      |      |      | 0,01 |      |      |      |      |
| 3 |      |      |      |      |      |      | 0,50 |      |
| 4 | 1,00 | 0,75 |      |      | 1,00 | 1,00 |      |      |
| 5 |      |      |      |      |      |      | 0,70 |      |
| 6 |      | 1,00 |      |      |      |      | 1,00 |      |
| 7 | 0,60 |      | 0,90 | 1,00 | 0,05 | 1,00 |      | 1,00 |
| 8 |      |      |      |      |      |      | 0,80 |      |

Abbildung 2.32: *Numerische Einflussmatrize, Zahlenwerte*

|   | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 2 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 3 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 4 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 5 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 6 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 7 |   |   |   |   |   |   |   |   |
| 8 |   |   |   |   |   |   |   |   |

Abbildung 2.33: *Numerische Einflussmatrize, Farbe*

Eine *Einflussmatrize* ist ein geeignetes Werkzeug zur Darstellung und Analyse von Aufgabenzusammenhängen. Ebenso kann mit ihrer Hilfe eine Partitionierung vorgenommen werden, die bei der Behandlung vorhandener Komplexität hilfreich sein kann. Für die Simulation von Komplexitätskosten ist sie jedoch nicht geeignet, da keine anfallenden Kosten und somit auch nicht deren Verläufe berücksichtigt werden können.

### **Fazit der Untersuchung**

Nach Untersuchung der existierenden Werkzeuge im Bereich des Komplexitätsmanagements ergibt sich, dass es keine Möglichkeit gibt, die Höhe von Komplexitätskosten mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Es existieren lediglich branchenspezifische Richtwerte.

Durch ein Simulationsmodell würden sich erhebliche Vorteile bei der Festlegung der Produktvielfalt ergeben. Bei Kenntnis der optimalen Variantenzahl könnte das Angebot so aufgestellt werden, dass keine unrentablen Produkte hergestellt werden. Gibt es auf der anderen Seite zu wenige Varianten, so kann auch dieses mit einem solchen Modell ermittelt und Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Das Bewusstsein für den Umgang mit variantengetriebenen Komplexitätskosten scheint jedoch trotz der erheblichen Größe, in der diese anfallen, nicht besonders ausgeprägt zu sein. Entscheidungen über die Einführung oder das Streichen von Varianten werden oftmals auf keiner gefestigten Grundlage getroffen. Viele Unternehmen geraten hierdurch eine gefährliche *Versuch und Irrtum*-Politik in eine Komplexitätsfalle mit fatalen Konsequenzen.

## **Kapitel 3**

### **Erstellung eines Modells**

## 3.1 Theorie

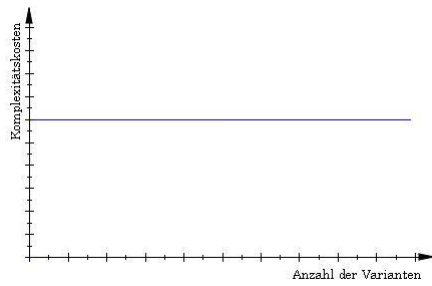
Um die optimale Anzahl an Varianten bestimmen zu können ist es Voraussetzung, die durch sie verursachten Komplexitätskosten ermitteln zu können.

Im Rahmen des ILIPT-Projektes soll zu diesem Zweck ein Modell erstellt werden, das Daten einer Analyse des Produktionsbereiches von BMW in Steyer in allgemein gültige mathematische Zusammenhänge überführt.

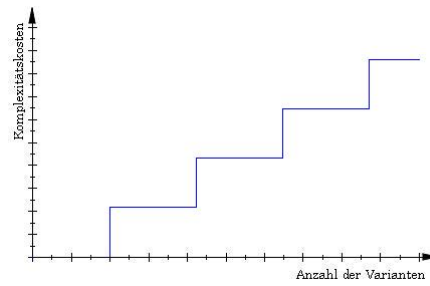
Bei der Analyse des Fertigungsbereiches sollen die Komplexitätskosten unterschiedlichen Treibern zugeordnet werden. Diese Treiber sind Teilbereiche des Produktes, bei deren Produktion Varianten entstehen können wie zum Beispiel: Hubraum, Motorbaureihe, Leistungsstufe, Getriebe oder Länderausstattungen. Diese Treiber verfügen jeweils über eine bestimmte Anzahl an Ausprägungen, im Modell "*Characteristics*" genannt. Ausprägungen des Treibers Hubraum können beispielsweise sein: 1400, 1600 und 2000 ccm. Der Treiber verfügt somit über drei Ausprägungen.

Für jede der Abteilungen werden die Treiber unter dem Punkt "*Impact*" zudem individuell gewichtet. Dies bedeutet für eine Abteilung, die sich mit der Fertigung von Zylinderköpfen befasst, dass Treiber wie *Motorbaureihe*, *Hubraum* und *Leistungsstufe* einen relativ starken Einfluss ausüben. Diese werden höher gewichtet als Variantentreiber mit weniger Einfluss wie *Getriebe*, *Länderausstattung* und *Lenkhilfepumpe*.

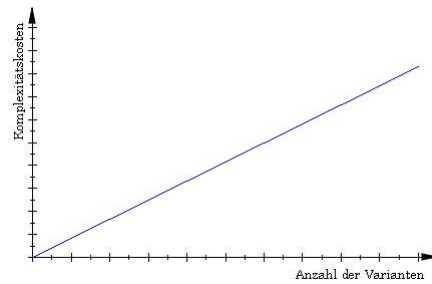
Betrachtet man die einzelnen Treiber wird erwartet, dass sich die Komplexitätskosten nach einer der folgenden fünf mathematischen Grundformen entwickeln:



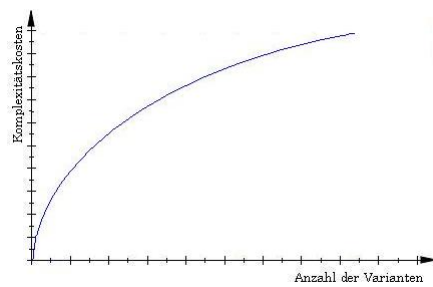
(a) Fixkosten



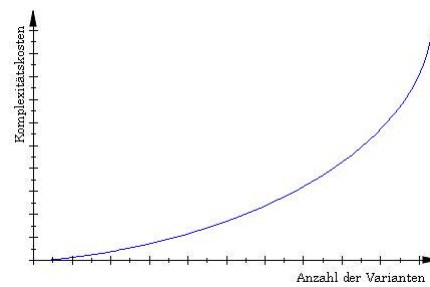
(b) Sprungfixe Kosten



(c) Lineare Kosten



(d) Degressive Kosten



(e) Progressive Kosten

Abbildung 3.1: *Kostenverläufe*, Quelle: Schaffer [31]

Ein Beispiel für einen Kostenverlauf ist ein Barcode-Scanner zur Identifikation von Bauteilen, der zum Einsatz kommt sobald mehr als eine Variante gefertigt wird. Der Scanner kann nach einmaliger Anschaffung nahezu unbegrenzt viele Varianten verarbeiten. Es fallen also keine weiteren Kosten an. Es handelt sich somit um einmalige sprungfixe Kosten.

## 3.2 Aufbau des Modells

Die ermittelten Kostenverläufe der Treiber sollen modulweise so zusammengefasst werden, dass sich eine der fünf mathematischen Grundformen für eine variierende Variantenzahl ergibt. Ist dies nicht möglich sollen die detaillierten Daten beibehalten werden. Somit ergeben sich Komplexitätskostenverläufe für die im Folgenden dargestellten Module:

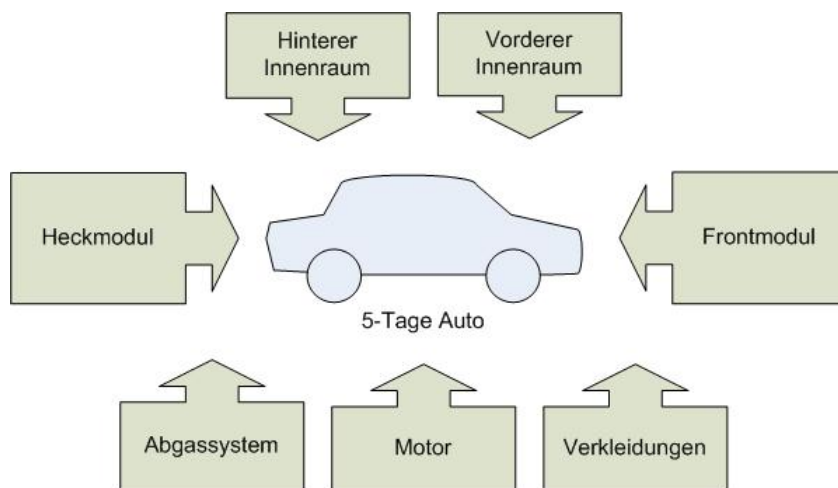


Abbildung 3.2: *Module*, Quelle: Schleich / Schaffer [33]

Auf Grundlage dieser sieben Bestandteile werden im nächsten Schritt die Komplexitätskosten für das gesamte Fahrzeug errechnet.



Der Aufbau des Modells erfolgt schrittweise. Durch diesen modularen Aufbau lassen sich Änderungen durchführen, ohne das gesamte Kostenmodell abändern zu müssen.

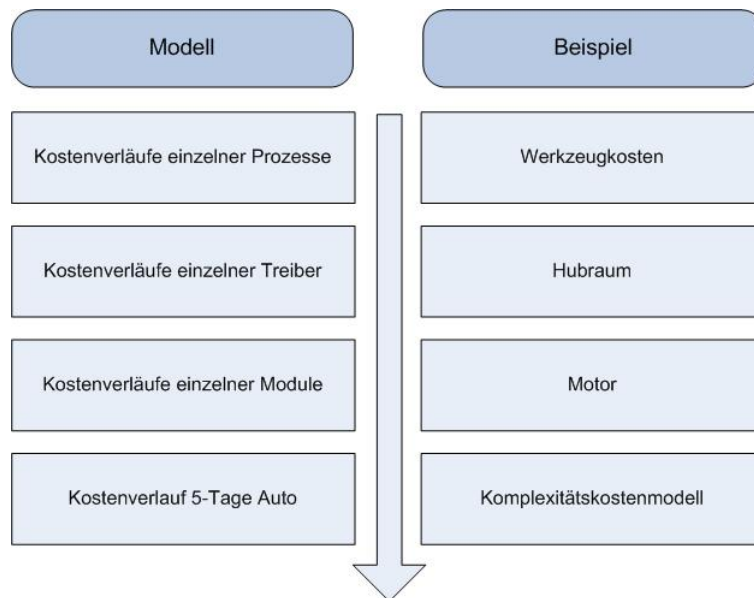


Abbildung 3.3: *Aufbau*

Das gewünschte Ergebnis des Komplexitätskostenmodells ist ein Kostenverlauf in Abhängigkeit der Anzahl der Varianten und Treiber.

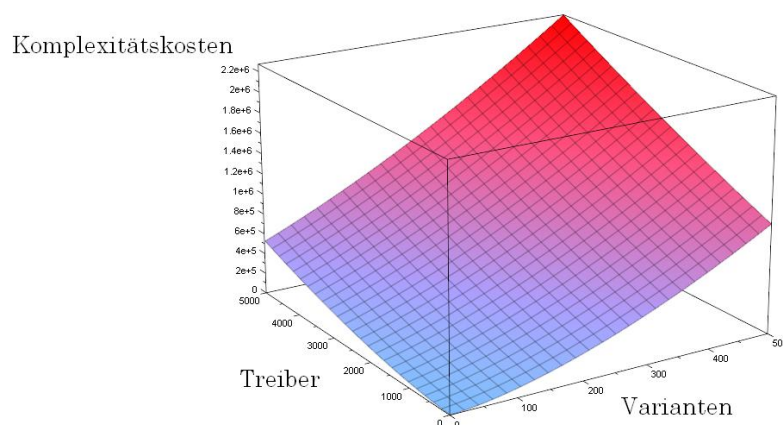


Abbildung 3.4: *Fiktives Ergebnis*, Quelle: Schaffer [31]

### 3.3 Praxis

Ein erster Versuch, die aufgenommenen Daten in aussagekräftige Graphen zu überführen sah vor, die Werte der *Ausprägungen (CH)* multipliziert mit der *Gewichtung (I)* der einzelnen Abteilungen über dem prozentualen Anteil der Komplexitätskosten der jeweiligen Abteilung aufzutragen.

Hierbei wurden die Kosten für Personalkosten und Sachinvestitionen eben so getrennt behandelt wie für Fertigung und Montage.

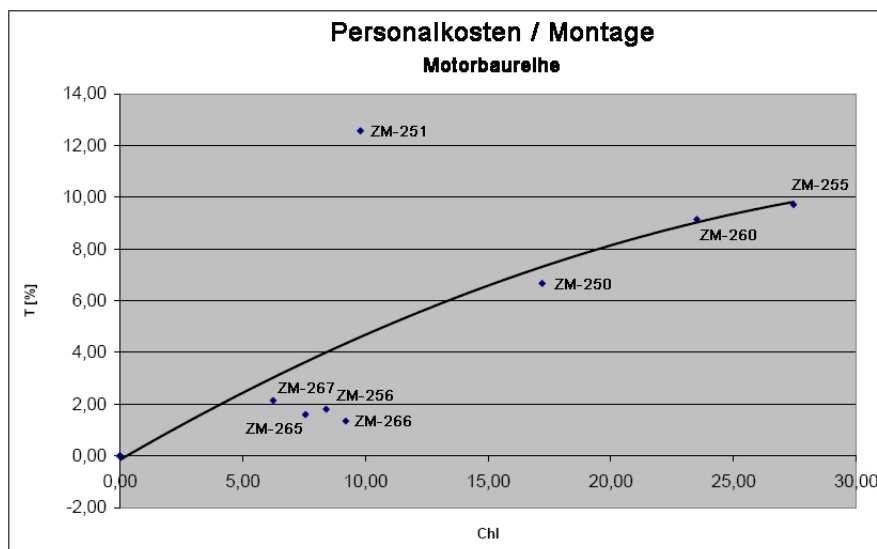


Abbildung 3.5: *Treiber Motorbaureihe*

Hierbei zeigte sich, dass bei vielen Ausprägungen und einer hohen Gewichtung der prozentuale Anteil der Komplexitätskosten an den Gesamtkosten tendenziell höher ist als bei wenigen Ausprägungen und niedriger Gewichtung.

Es ergaben sich jedoch keine verwertbaren Graphen, die präzise Rückschlüsse zulassen.

Die Ursache hierfür liegt in der Verschiedenheit der untersuchten Abteilungen. So kann sich beispielsweise ein Treiber, der in einer der Abteilungen ein lineares Verhalten zeigt, in einer anderen Abteilung sprungfix oder degressiv verhalten.

Um eine derartige Art der Auswertung zu betreiben wäre es notwendig, eine oder mehrere sehr ähnliche Abteilungen bei unterschiedlicher Variantenzahl zu vergleichen.

Ein weiteres Problem ist die Überlagerung der Kostenverläufe unterschiedlicher Prozesse. Durch das gleichzeitige Auftreten fixer, sprungfixer, linearer, degressiver und progressiver Kosten ergibt sich oftmals kein einheitlicher Verlauf.

Die Ausprägung eines Komplexitätstreibers allein ist unter Umständen keine sichere Angabe zu den daraus entstehenden Komplexitätskosten. Als Beispiel sei hier der Treiber *Zusatzausstattung* genannt. Eine Erhöhung, also eine Zusatzausstattung mehr, kann sehr unterschiedliche Auswirkungen haben: Angefangen bei Nebelscheinwerfern, über spezielle Audioausstattungen bis zu einer Standheizung reicht hier die Bandbreite.

## 3.4 Ausblick

Für die Erstellung eines Komplexitätskostenmodells ergeben sich drei grundsätzliche Richtungen:

1. Ein Modell auf einer *höheren* Abstraktionsebene: Es wird durch eine repräsentative Zahl an detaillierten Untersuchungen ein übergeordneter mathematischer Zusammenhang festgestellt, der sich auf ähnliche Produktionsstätten übertragen lässt. Probleme mit dem Verhalten einzelner Kostentreiber werden so umgangen. Das Modell hat jedoch keine Verbindung mehr zu den Prozessen. Es besteht neben einer hohen Unsicherheit aufgrund der Verallgemeinerung auch die Gefahr, dass eine Differenz zwischen Modell und der Realität nicht bemerkt wird.
2. Ein Modell auf einer *niedrigeren* Abstraktionsebene: Ein solches „Graswurzelmodell“ bietet eine relativ hohe Genauigkeit. Um Probleme mit Treibern zu umgehen, werden die Prozesse einzeln aufgenommen und auch in der Folge detailgenau verarbeitet. Nachteile bei dieser Variante sind der sehr hohe Aufwand für Datenerfassung und Pflege sowie eine geringe Übertragbarkeit des Modells auf andere Produktionsstätten.
3. Eine dritte Möglichkeit besteht in der Kombination der beiden erstgenannten Optionen. Treiber mit abgesichertem Verlauf werden auf einer höheren Abstraktionsebene verarbeitet. Hat sich der Verlauf als veränderlich herausgestellt, so werden die Treiber detailliert betrachtet. Hierbei muss noch eine Lösung für die zuvor genannten Probleme gefunden werden. Ein solches Modell ist für das ILIPT-Projekt vorgesehen und wird an der LEUPHANA UNIVERSITÄT LÜNEBURG entwickelt.

Problematisch bleibt jedoch das Zusammenfassen von Komplexitätskosten verursachenden Prozessen zu Treibern und Modulen.

Ein Lösungsansatz wäre, die Zwischenstufe *Treiber* zu entfernen. Dies ist jedoch schwierig, da bei einer solchen Simulation die Anzahl der Varianten eine der variablen Größen ist. In diesem Fall müssten bei einem Modell ohne Treiber alle durch die jeweilige Variante verursachten Prozesse, die zur Bildung von Komplexitätskosten beitragen, erfasst werden. Die Folge wäre ein extrem detailreiches Modell.

Es erscheint sehr schwierig ein Modell zu entwickeln, das die Systemstruktur im Detail nachbildet. Wo es möglich ist, sollte auf die quantitative Methode ausgewichen werden und das Systemverhalten nachgeahmt werden. (*siehe Qualitative und quantitative Methode*, Seite 19)

Für die Lösung dieser Probleme erscheint es hilfreich, zunächst ein detailliertes Modell zu erstellen und die Vorgänge genau zu analysieren um anschließend, wo immer möglich, allgemein gültige Zusammenhänge abzuleiten. Ob ein solches Modell basierend auf den Daten des BMW Werkes anschließend auf die Produktion des ILIPT Fahrzeuges übertragen werden kann hängt entscheidend davon ab, ob die Suche nach übergeordneten Zusammenhängen erfolgreich ist oder nicht.

# Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D.: *Komplexitätsmanagement*. Gabler, 1998
- [2] BECKER, H.: *Auf Crashkurs - Automobilindustrie im globalen Verdrängungswettbewerb*. Springer, 2007
- [3] BLECKER, T. / FRIEDRICH, G. / KALUZA, B. / ABDELKAFI, N. / KREUTLER, G.: *Information and Management Systems for Product Customization*. Springer, 2005
- [4] BOSSEL, H.: *Simulation dynamischer Systeme*. Vieweg, 1987
- [5] BOSSEL, H.: *Modellbildung und Simulation*. Vieweg, 1994
- [6] BROCKHAUS: *Naturwissenschaften und Technik, Band 3*. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, 1989
- [7] VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V.: *Methodenlehre der Betriebsorganisation / REFA, Planung und Steuerung Teil 1-6*. Hanser, 1991
- [8] DUDEN: *Das große Fremdwörterbuch*. Bibliographisches Institut, 1994
- [9] EINSTEIN, A. / BORN, M.: *Briefwechsel 1916-1955*. Langen Müller Herbig Nymphenburger, 2005

- [10] LINDEMANN, U. / REICHWALD, R. / ZÄH, M.F. / ALDERS, K.: *Individualisierte Produkte*. Springer, 2006
- [11] MAUNE, G.: *Möglichkeiten des Komplexitätsmanagements für Automobilhersteller auf Basis IT-gestützter durchgängiger Systeme*. Shaker Verlag, 2002
- [12] MEFFERT, H.: *Marketing*. Gabler, 2000
- [13] MEYR, H.: *Simultane Losgrößen und Reihenfolgeplanung für kontinuierliche Produktionslinien*. DUV, 1999
- [14] PULM, U.: *Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung*. Dr. Hut, 2004
- [15] PILLER, F.T.: *Mass Customization*. DUV, 2001
- [16] RICHTER, K. / ROST, J.-M.: *Komplexe Systeme*. Fischer Taschenbuch Verlag, 2002
- [17] RUMBAUGH, J. / BLAHA, M. / PREMERLANI, W. / EDDY, F. / LORENSEN, W.: *Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen*. Hanser, 1991
- [18] SCHÄPPI, B.: *Handbuch Produktentwicklung*. Hanser, 2005
- [19] SCHUH, G.: *Produktkomplexität managen. Strategien - Methoden - Tools*. Hanser, 2005
- [20] SCHÖNE, A.: *Grundlagen der Simulationstechnik*. Hanser, 1974
- [21] STACHOWIAK, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer, 1973
- [22] STEWARD, D. V.: *System Analysis and Management: Structure, Strategy and Design*. Petrochelli Books, 1981
- [23] HEIDEN, U. AN DER: *Chaos und Ordnung*. Reclam, 1996

- [24] VDI: *Richtlinie 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*. Beuth Verlag, 1993
- [25] WARFIELD, J. N.: *Binary Matrices in System Modeling*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973
- [26] WILDEMANN, H.: *Komplexitätsmanagement in Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion*. TCW, 2007

## ILIPT Projektschriften

- [27] SCAVARDA, L. F.: *Market Variety for ECO-SPORT /FUSION*. 2006
- [28] FRAUNHOFER IML: *Build-to-order: Wie kann Dells Produktionssystem auf die Automobilindustrie übertragen werden?*  
<http://www.iml.fraunhofer.de/media/mediaposter.php?mediaId=3234>  
Zugriffsdatum: 26.09.2007 14:00 Uhr
- [29] FRAUNHOFER IPA: *Jahresbericht 2004*  
[http://www.ipa.fraunhofer.de/PresseMedien/broschueren/Jahresbericht\\_2004.pdf](http://www.ipa.fraunhofer.de/PresseMedien/broschueren/Jahresbericht_2004.pdf)  
Zugriffsdatum: 31.07.2007 12:00 Uhr
- [30] ILIPT PROJEKT  
<http://www.ilipt.org>  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 10:00 Uhr
- [31] SCHAFFER, J.: *Managing Complexity in Automotive Produktion*. 2007
- [32] SCHLEICH, H.-H. / LINDEMANN, E.: *Vortrag: Auf dem Weg zum 5-Tage-Auto*  
<http://webvideo.uni-lueneburg.de/vd/pdf/070305-09.pdf>  
Zugriffsdatum: 31.07.2007 12:00 Uhr



- [33] SCHLEICH, H.-H. / SCHAFFER, J.: *The cost impact of product variety for a 5-day car*. 2006

## Internet

- [34] AUDI AG *Konfigurator R8*  
<http://www.audi.de/audi/de/de2/neuwagen/r8.html>  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 15:00 Uhr
- [35] BMW M GMBH *Produktlinie Individual*  
<http://www.bmw.com/com/de/insights/corporation/mgmbh/individual.html>  
Zugriffsdatum: 01.08.2007 15:00 Uhr
- [36] BRATZEL, S.: *Gesellschaftliche Mega-Trends und die Zukunft des Automobils*  
[http://www.centerofautomotive.de/download/Zukunftstrends\\_DC-Vortrag\\_Zusammenfassung\\_062004.pdf](http://www.centerofautomotive.de/download/Zukunftstrends_DC-Vortrag_Zusammenfassung_062004.pdf)  
Zugriffsdatum: 01.08.2007 15:00 Uhr
- [37] BRIESEN, H. *Skript Simulationstechnik, LPT RWTH*  
<http://www.lpt.rwth-aachen.de/studium/vorlesungen/FaszinationTechnik.pdf>  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 10:00 Uhr
- [38] DAY, S. / WARD, S.: *Cumbre Vieja Volcano - Potential collapse and tsunami at La Palma, Canary Islands*  
[http://www.es.ucsc.edu/ward/papers/La\\_Palma\\_grl.pdf](http://www.es.ucsc.edu/ward/papers/La_Palma_grl.pdf)  
Zugriffsdatum: 31.07.2007 12:00 Uhr
- [39] MERCEDES-BENZ *Produktlinie designo*  
[http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc\\_germany\\_website/de/home\\_mpc/passenger\\_cars/home/products/designo.html](http://www.mercedes-benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passenger_cars/home/products/designo.html)  
Zugriffsdatum: 01.08.2007 15:00 Uhr

- [40] DSM WEB *The Design Structure Matrix Home Page*  
<http://www.dsmweb.org>  
Zugriffsdatum: 31.08.2007 18:00 Uhr
- [41] IFM GEOMAR - LEIBNIZ INSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN: *Interview mit Heidrun Koop*  
<http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=1497>  
Zugriffsdatum: 08.08.2007 14:00 Uhr
- [42] HENKEL KGAA *Produktlinie Loctite*  
[http://www.henkel.de/cps/rde/xchg/henkel\\_de/hs.xsl/206\\_DED\\_HTML.htm](http://www.henkel.de/cps/rde/xchg/henkel_de/hs.xsl/206_DED_HTML.htm)  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 15:00 Uhr
- [43] ANDREW KUSIAK *Triangularization Algorithm*  
<http://www.icaen.uiowa.edu/ankusiak/algorithm.html>  
Zugriffsdatum: 04.09.2007 16:30 Uhr
- [44] TU MÜNCHEN - LEHRSTUHL FÜR PRODUKTENTWICKLUNG *Loomeo development group*  
<http://www.loomeo.com>  
Zugriffsdatum: 03.09.2007 12:00 Uhr
- [45] MAP24 *Routenplaner*  
<http://www.map24.de>  
Zugriffsdatum: 25.09.2007 15:00 Uhr
- [46] MICROSOFT *Tiefenförderung*  
[http://www.microsoft.com/germany/gruender/presse\\_paten.msp](http://www.microsoft.com/germany/gruender/presse_paten.msp)  
Zugriffsdatum: 13.08.2007 12:00 Uhr
- [47] NETWORK OF AUTOMOTIVE EXCELLENCE (NOAE) *Kick off Phase 2*  
<http://www.noae.com/variants.html>  
Zugriffsdatum: 04.05.2007 10:00 Uhr

- [48] SLOGANS - DATENBANK FÜR WERBUNG  
*<http://www.slogans.de/slogans.php>*  
Zugriffsdatum: 31.07.2007 12:00 Uhr
- [49] THOLE, C.-A. / MEI, L.: *Reasons for Scatter in Crash Simulation Result*  
*[http://www.scai.fhg.de/fileadmin/download/vortraege/nafems\\_workshop.pdf](http://www.scai.fhg.de/fileadmin/download/vortraege/nafems_workshop.pdf)*  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 12:00 Uhr
- [50] VOLKSWAGEN INDIVIDUAL GMBH  
*[http://www.volkswagen.de/vwcms/master\\_public/virtualmaster/de3/unternehmen/individual/fahrzeugkonzepte.html](http://www.volkswagen.de/vwcms/master_public/virtualmaster/de3/unternehmen/individual/fahrzeugkonzepte.html)*  
Zugriffsdatum: 01.08.2007 15:00 Uhr
- [51] WETTERVORHERSAGE  
*<http://www.wetterzentrale.de>*  
Zugriffsdatum: 03.05.2007 13:00 Uhr
- [52] TU WIEN ACIN Projektwebsite  
*<http://www.acin.tuwien.ac.at/de/forschung/Projekte/235>*  
Zugriffsdatum: 02.08.2007 14:00 Uhr

## Andere Quellen

- [53] EMO HANNOVER: *Messebesuch am 18.09.2007.*
- [54] PRODUKTPRÄSENTATION FACTON: *Präsentation am 12.07.2007, Videokonferenz am 19.07.2007. Durchgeführt von N. Heinze, Facton.*
- [55] FACTON GMBH: *Unternehmensbroschüre.* FACTON GmbH, 2007
- [56] FERROSTAAL: *Firmenbesichtigung in Rüsselsheim am 02.07.2007.*
- [57] HANNOVER MESSE: *Messebesuch am 16.04.2007.*

- [58] SCHUH GMBH: *EMail von Produktmanager Michael Friedrich:*  
20.06.2007

# Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für andere Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Lüneburg, 30. September 2007

Hendrik Sander

# Digitale Version