

Systems Engineering

Oliver Quirnbach

**Integration der System- und Kostenentwicklung
am Beispiel eines Satellitensystems**



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0019-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01
utz@utzverlag.com · www.utzverlag.de

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|------------|
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS | VII |
| 1. EINLEITUNG | 1 |
| 1.1 AUSGANGSSITUATION UND PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 1.2 ZIELSETZUNG | 3 |
| 1.3 VORGEHENSWEISE..... | 4 |
| 2. KOSTENMANAGEMENT IN DER PRODUKTENTWICKLUNG..... | 6 |
| 2.1 KONZEPT- UND ANGEBOTSPHASE IN DER SATELLITENENTWICKLUNG..... | 7 |
| 2.2 PROJEKTPLANUNG | 9 |
| 2.2.1 <i>Projektstrukturplan</i> | 9 |
| 2.2.2 <i>Terminplanung und Netzplantechniken</i> | 11 |
| 2.3 GRUNDLAGEN DER KOSTENRECHNUNG UND KOSTENPLANUNG | 12 |
| 2.4 KOSTENSCHÄTZKALKULATION..... | 15 |
| 2.4.1 <i>Methoden und Verfahren</i> | 15 |
| 2.4.2 <i>Sicherung von Erfahrungsdaten</i> | 18 |
| 2.5 DESIGN-TO-COST IN DER RAUMFAHRT..... | 19 |
| 2.6 TARGET COSTING..... | 20 |
| 2.6.1 <i>Zielkostenermittlung</i> | 21 |
| 2.6.2 <i>Zielkostenspaltung</i> | 22 |
| 2.6.3 <i>Zielkostenverfolgung und Zielkostenerreichung</i> | 24 |
| 2.7 ANFORDERUNGSANALYSE FÜR EINEN INTEGRIERTEN MODELLANSATZ..... | 25 |
| 2.7.1 <i>Schlußfolgerungen</i> | 25 |
| 2.7.2 <i>Anforderungen an ein integriertes Modell der System- und Kostenentwicklung</i> | 26 |
| 3. MODELLBILDUNG UND SYSTEMTECHNIK | 28 |
| 3.1 GRUNDLAGEN DER SYSTEMTECHNIK..... | 28 |
| 3.1.1 <i>Entwicklung und Definitionen der Systemtechnik</i> | 28 |
| 3.1.2 <i>Vorgehensmodelle</i> | 30 |
| 3.2 GRUNDLAGEN DER SYSTEMTECHNISCHEN MODELLIERUNG | 32 |
| 3.2.1 <i>Zielsystem</i> | 35 |
| 3.2.2 <i>Objektsystem</i> | 37 |
| 3.2.3 <i>Prozeßsystem</i> | 37 |
| 3.2.4 <i>Handlungssystem</i> | 37 |
| 3.2.5 <i>Funktionen</i> | 38 |
| 3.2.6 <i>Grundlagen der objektorientierten Systemanalyse- und modellierung</i> | 39 |
| 3.3 METHODEN DER INTEGRIERTEN PRODUKTENTWICKLUNG | 40 |
| 3.3.1 <i>Bestehende Ansätze zur Integration von System- und Kostenentwicklung</i> | 41 |
| 3.3.2 <i>Schlußfolgerungen</i> | 43 |
| 3.4 ZIELE FÜR DIE MODELLBILDUNG..... | 44 |
| 4. MODELLIERUNGSANSATZ | 46 |
| 4.1 OBJEKTORIENTIERTE SYSTEMANALYSE | 46 |
| 4.2 BASISMODELL DER KOSTENANALYSE UND KOSTENPLANUNG..... | 48 |
| 4.2.1 <i>Allgemeines Projektmodell</i> | 48 |
| 4.2.2 <i>Modellansatz der Kostenrechnung</i> | 50 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.3 | MODELLSTRUKTUR | 56 |
| 4.3.1 | <i>Funktionsstrukturen der verschiedenen Abstraktionsebenen</i> | 57 |
| 4.3.2 | <i>Produkt- und Objektsystem</i> | 59 |
| 4.3.3 | <i>Prozeßstrukturen</i> | 62 |
| 4.3.4 | <i>Handlungssystem</i> | 63 |
| 4.4 | MODELLIERUNGSPROZEß | 64 |
| 4.5 | MODELLUMSETZUNG AM BEISPIEL DES SATELLITENSYSTEMS | 68 |
| 5. | RECHNERUMSETZUNG IN MUSSAT | 77 |
| 5.1 | ANFORDERUNGEN AN DAS PROGRAMM | 77 |
| 5.2 | PROGRAMMKONZEPT | 78 |
| 5.3 | MODELLBILDUNG IM RECHNERPROGRAMM MUSSAT | 80 |
| 5.4 | MODELLANWENDUNG | 84 |
| 5.4.1 | <i>Kostentableaus</i> | 87 |
| 5.4.2 | <i>Kennzahlen</i> | 88 |
| 5.4.3 | <i>Kostenfunktionen zur Kostenschätzung und Kostenverfolgung</i> | 90 |
| 6. | SYSTEMANALYSE | 94 |
| 6.1 | INTEGRIERTE PLANUNG AM BEISPIEL EINES SOLARGENERATORANGEBOTES | 94 |
| 6.1.1 | <i>Zielsetzung und Ausgangssituation für den Angebotsprozeß</i> | 94 |
| 6.1.2 | <i>Prozeßanalyse für ein Solargeneratorangebot</i> | 95 |
| 6.1.3 | <i>Analyse der Lösungsvarianten</i> | 97 |
| 6.2 | ANGEBOTSPROZEß IN EINEM SATELLITE DESIGN OFFICE (SDO) | 105 |
| 6.2.1 | <i>Ausgangssituation und Zielsetzung für das SDO</i> | 105 |
| 6.2.2 | <i>SDO Konzept</i> | 105 |
| 6.2.3 | <i>Umsetzung des integrierten SDO-Prozesses in MuSSat</i> | 108 |
| 6.2.4 | <i>Konzept zur Integration von Target Costing im SDO-Prozeß</i> | 111 |
| 6.2.5 | <i>Integrierte System- und Kostenplanung im SDO</i> | 117 |
| 7. | FAZIT UND AUSBLICK | 121 |
| 7.1 | ZUSAMMENFASSUNG | 121 |
| 7.2 | AUSBLICK | 122 |
| 8. | LITERATURVERZEICHNIS | 125 |

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

| | |
|------|--|
| AIT | Assembly, Integration & Test |
| AOB | Anordnungsbeziehung |
| AOCS | Attitude and Orbit Control |
| AP | Arbeitspaket |
| AR | Acceptance Review |
| BAB | Betriebsabrechnungsbogen |
| BOL | Begin of Life |
| BPR | Business Process Reengineering |
| CAC | Cost at Completion |
| CAD | Computer Aided Design |
| CDR | Critical Design Review |
| CER | Cost Estimation Relationship |
| CT | Cost Table |
| DH | Data Handling |
| DSS | Dornier Satellitensysteme GmbH |
| DTC | Design-to-Cost |
| DZK | Direkt zugeordnete Kosten |
| ECSS | European Cooperation for Space Standardization |
| EDB | Erfahrungsdatenbank |
| EDM | Engineering Data Management |
| EEK | Elementeinzelnkosten |
| EGK | Elementgemeinkosten |
| EGSE | Electrical Ground Support Equipment |
| EOL | End of Life |
| EPK | Ereignisgesteuerte Prozeßketten |

| | |
|------|-------------------------------------|
| ERP | Enterprise Resource Planning |
| EVK | Elementvollkosten |
| FM | Flugmodelle |
| GaAs | Gallium-Arsenid |
| GEO | Geostationärer Orbit |
| GPS | Global Positioning System |
| GSK | Gesamtsystemkosten |
| HD | Häufigste Dauer |
| HS | Handlungssystem |
| JPL | Jet Propulsion Laboratory |
| KA | Kostenarten |
| KAV | Kostenartenvektor |
| KIV | Kosteninputvektor |
| KOV | Kostenoutputvektor |
| KSKZ | Kostenstrukturkennzahl |
| LEO | Low Earth Orbit |
| MD | Mittlere Dauer |
| MD | Mittlere Zeitdauer |
| MGSE | Mechanical Ground Support Equipment |
| MGU | Motor Gear Unit |
| MPM | Metra-Potential-Methode |
| MTA | Meilenstein Trendanalyse |
| OD | Optimistische Dauer |
| OOA | Objektorientierter Analyse |
| OOD | Objektorientierter Design |
| PD | Pessimistische Dauer |
| PDC | Project Design Center |

| | |
|------|---|
| PDM | Product Data Management |
| PDR | Preliminary Design Review |
| PERT | Program Evaluation and Review Technique |
| PF | Produktfunktion |
| PLM | Product Lifecycle Management |
| PRR | Preliminary Requirements Review |
| PS | Produktstruktur |
| PSP | Projektstrukturplan |
| QFD | Quality Function Deployment |
| SADA | Solar Array Drive Mechanism |
| SCA | Solar Cell Assembly |
| SDO | Satellite Design Office |
| SE | Systems Engineering |
| SG | Solargenerator |
| Si | Silizium |
| TC | Target Costing |
| TT&C | Telemetry Tracking & Control |
| WBS | Work Breakdown Structure |
| WDP | Work Package Description |
| ZK | Zielkosten |
| ZM | Zuordnungsmatrix |

1. EINLEITUNG

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

In den letzten Jahren hat das Marktvolumen der satellitengestützten Kommunikation stark zugenommen. Zweistellige Wachstumsraten in diesem Marktsegment und die gleichzeitige Senkung der staatlichen Fördergelder forcieren die Kommerzialisierung der Raumfahrtindustrie in Europa. Die Nachfrage nach Kommunikationssatelliten entwickelt sich von der Einzelsystementwicklung hin zu Satellitenkonstellationen mit bis zu mehreren hundert Flugeinheiten (WILKE ET AL. 1998). Dies führt zu einem erhöhten Wettbewerbsdruck unter den Satellitenherstellern und damit auch zu einem steigenden Kostendruck in diesem Markt. Im Entwicklungsprozeß sind die Kosten daher zum entscheidenden Auslegungsparameter geworden. Die Lebenszykluskosten werden bereits zu über 70% in der Konzeptphase durch die Präzisierung der Anforderungen und die Definition der Produktfunktionen festgelegt (vgl. EHRENSPIEL, 1985 und Abbildung 1-1).

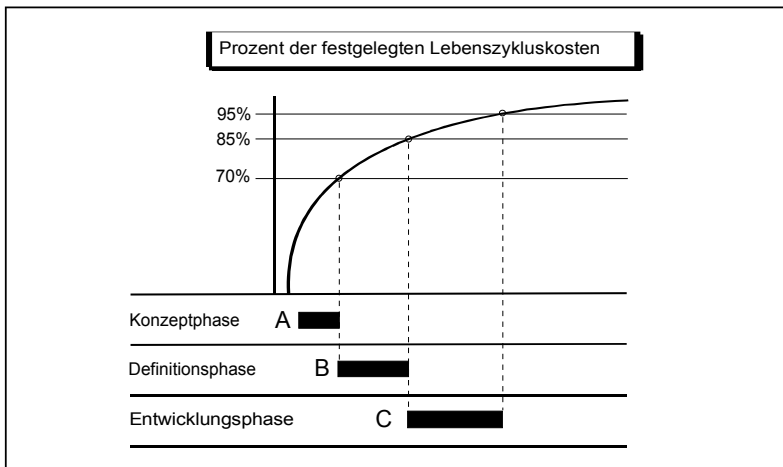


Abbildung 1-1: Festlegung der Lebenszykluskosten eines Systems (IGENBERGS, 1993)

Dadurch müssen in den frühen Phasen der Satellitenkonzeption noch stärker als bisher verschiedene Auslegungsvarianten untersucht und auch kostenmäßig bewertet werden. Um sich weiterhin erfolgreich im Markt bewegen zu können, bedarf es innovativer Ansätze und neuer Vorgehensweisen im Bereich der Satellitensystemauslegung. Besonders problematisch ist dabei die Tatsache, daß sogenannte Festpreisangebote mit sehr kurzen Fristen bereits am Anfang der Produktentwicklung, also mit geringer Systemkenntnis abgegeben werden müssen. Dies erfordert eine kostenorientierte Produktauslegung in der frühen Konzept- und Angebotsphase für Satellitensysteme.

Die erste Phase im Produktlebenszyklus ist gekennzeichnet durch einen hohen Freiheitsgrad und eine große Variabilität der zu bestimmenden Systemparameter. Diese werden von den unterschiedlichen Disziplinen beeinflusst und beeinflussen wiederum die verschiedenen Funktionsbereiche eines Unternehmens. Die an der Angebotserstellung beteiligten Mitarbeiter können die Vielfalt an benötigten Informationen in der Regel allein nicht erbringen und sind daher auf die Zuarbeit der verschiedenen Fachabteilungen angewiesen. Dieser Informationsfluß verläuft oft unstrukturiert und bedient sich selten der vorhandenen Lösungsstrukturen aus vorangegangenen oder parallel verlaufenden Projekten. Speziell in der Produktkonzeption fehlen oft die für eine kostenoptimale Auslegung nötigen Kosteninformationen und das Wissen um die übergreifenden Zusammenhänge (EHRENSPIEL, 1985). Erschwert wird diese Phase durch Änderungen der Anforderungen im laufenden Angebotsprozeß. Deren Auswirkungen auf die Kosten sind mit den heutigen Methoden der Kostenplanung nur bedingt nachvollziehbar. Die Ursache dafür liegt in der meist sequentiell ablaufenden Produkt- und Kostenplanung. Dies macht auch eine ganzheitliche Analyse der zur Auswahl stehenden Lösungsvarianten in der Konzeptphase unmöglich. Die beteiligten Institutionen — insbesondere Produktentwicklung und Controlling — greifen auf ihre jeweils isolierten Softwaretools und Datenstämme zu, deren Modelle sich grundlegend unterscheiden. Im Controlling verwendet man betriebswirtschaftliche Standardsoftware (Enterprise Resource Planning: ERP), wie z.B. SAP R/3® und im Engineering technische Auslegungs- und Simulationssoftware. Hier fehlt ein konsistentes Datenmodell, das alle relevanten Parameter enthält, sich ergebende Änderungen berücksichtigt und allen Beteiligten als Arbeits-, Informations- und Analyseplattform zur Verfügung steht.

Eine Spaltung der in den Kostenstellen erfaßten Kosten auf die kostentreibenden Produktfunktionen erweist sich mit den bisherigen Controlling-Prozessen und den dort eingesetzten Werkzeugen als schwierig. Hier resultieren die Schwierigkeiten aus der Tatsache, daß die betriebliche Kostenrechnung üblicherweise kostenstellen- und produktbezogene, nicht aber funktionsbezogene Kosten ausweist. Funktionen eines Produktes weisen aber eine weitaus höhere zeitliche Beständigkeit auf als die jeweilige produkttechnische Verwirklichung (SEIDENSCHWARZ, 1993). Die klassische Kostenträgerrechnung erweist sich dabei als eindimensionale Betrachtungsweise, deren Informationen für die vielschichtige Auslegung komplexer Systeme nicht immer ausreichend sind. Insbesondere die hohe Kostenverantwortung der Entwicklung und der daraus entstehende Bedarf an geeigneten Kosteninformationen für diesen Bereich, wird in den Ansätzen der betriebswirtschaftlichen Kostenrechnung nicht ausreichend berücksichtigt (vgl. BINDER, 1997).

Die Problematik für die Kostenplanung liegt auch in der fehlenden Verfügbarkeit und Eindeutigkeit der jeweiligen Parameter. Komplexe Systeme, wie z.B. Satelliten sind aber durch die Vielfalt und die starke Vernetzung ihrer Parameter gekennzeichnet (NEGELE, 1998). Diese Zusammenhänge sind, außer für Fachleute, schwer nachvollziehbar und erschweren fundierte Kostenanalysen. Selbst das Konzept einer speziellen Erfahrungsdatenbank scheitert meist an der Datenpflege, da das qualifizierte technische Fachpersonal neben dem Alltagsgeschäft keine Zeit für diese Aufgabe aufbringen kann. Zudem erfahren diese Parameter im Laufe eines Angebotsprozesses häufig Änderungen und müßten ständig aktualisiert werden.

In einer kundenorientierten Produktentwicklung gilt es, den Nutzen für den Kunden zu optimieren, der sich aus dem Verhältnis der befriedigten Anforderungen und dem dazu notwendigen Aufwand ergibt. Um dies zu erreichen, gilt es, möglichst viele Lösungsvarianten zu untersuchen und gegeneinander zu bewerten (vgl. IGENBERGS, 1993; EHRENSPIEL, 1995). Daher wäre es von Vorteil, verschiedene Systemvarianten auf der Basis eines einheitlichen integralen Datenmodells abbilden und analysieren zu können.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Integration der System- und Kostenentwicklung. Daher sollen Methoden und Verfahren zur Implementierung von Kostenanalyse und Kostenplanung in einem ganzheitlichen Systemmodell entwickelt werden. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist es, einem interdisziplinären Angebotsteam ein flexibles konsistentes Datenmodell zur Verfügung zu stellen, welches den Angebotsprozeß strukturiert, beschleunigt und die Kosten als einen zentralen Entwurfsparameter ausweist. Damit soll der Nutzer des Modells die treibenden Kosteneinflußgrößen (Funktionen und Eigenschaften) aller relevanten Produkt- und Prozesselemente identifizieren und analysieren können. Auf dieser Basis sollen verursachungsgerechte und individuelle Kostenfunktionen bestimmt und verifiziert werden können und die Kostentransparenz für die Systemingenieure in der frühen Auslegungsphase erhöht werden. Das zu erarbeitende Modell muß für eine ganzheitliche Betrachtung der Produktentwicklung geeignet sein, d.h. es muß sowohl die technische Modellierung als auch die Abbildung der betriebswirtschaftlichen Zusammenhänge gleichermaßen unterstützen. Zudem soll das Modell im Rahmen einer Wissensdatenbank die systematische konsistente Erfassung und Sicherung der Projektdaten aus dem Arbeitsprozeß heraus ermöglichen. Dies wiederum stellt die Basis für Kennzahlensysteme, Aufwandsschätzverfahren und Kostenanalysen dar.

Das integrierte Datenmodell soll als Software in eine, am Fachgebiet Raumfahrttechnik entwickelte, integrierte Designumgebung für Satellitensysteme (MuSSat – Modellierung und Simulation von Satellitensystemen) implementiert werden, um alternative Konzepte schnell untersuchen und bewerten zu können. Dabei soll es den Prozeß der Kostenplanung in einem integrierten Konzept- und Angebotszentrum für Satellitensysteme (SDO – Satellite Design Office) der Firma Dornier Satellitensysteme GmbH maßgeblich unterstützen. Dafür müssen die zu betrachtenden Kostenstrukturen flexibel sein und die Bedürfnisse der verschiedenen am Angebot beteiligten Disziplinen abdecken.

Das verwendete Verfahren soll einerseits helfen, die eigenen Angebotspreise sowie die Angebote von Lieferanten zu bewerten. Andererseits soll es die Zielkostenfindung im Rahmen eines Zielkostenmanagements (Target Costing) unterstützen. Dabei muß speziell auf die in der Raumfahrtindustrie verschärfte Problematik der schwankenden Systemeigenschaften und deren Auswirkungen auf andere Disziplinen eingegangen werden. Es gilt, die interdisziplinären Teams in der Phase der Produktgestaltung durch entsprechende Werkzeuge zu unterstützen. Der Schwerpunkt liegt auf den zu optimierenden Gesamtsystemkosten. Insgesamt sollen die Kostentransparenz und die Qualität für die Angebots- und Konzeptphase gesteigert werden.

1.3 Vorgehensweise

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit (vgl. Abbildung 1-2) basiert auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus der Raumfahrtindustrie, speziell im Bereich der Satellitenentwicklung. Gerade Projekte und Angebotsprozesse im sich rasant verändernden Geschäft der Kommunikationssatelliten prägten den Inhalt dieser Untersuchung, deren Struktur nachfolgend kurz aufgezeigt werden soll. Den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet dabei die Integration der Kostenentwicklung, während WILKE (2001) die Aspekte der technischen Modellierung und Analyse in den Vordergrund stellt. Es muß an dieser Stelle erwähnt werden, daß nur die enge Zusammenarbeit der beiden Doktoranden und die gemeinsame Konzeption des Modells in Zusammenarbeit mit den verschiedenen Unternehmensbereichen des Industriepartners Dornier Satellitensysteme GmbH (DSS) die Basis für den Erfolg des Projektes bildeten.

Die ersten drei Kapitel dienen gemäß dem systemtechnischen Problemlösungszyklus (vgl. Kapitel 3) der Zielsuche. Der Abschnitt 1.1 zeigt einleitend die zu lösende Problemstellung auf. Durch die Zielsetzung im vorangegangenen Kapitel wird die Aufgabe formuliert. Das Kapitel 2 dient einer detaillierteren Problemanalyse und endet daher mit einer Anforderungsliste an ein Modell der integrierten System- und Kostenentwicklung. Dabei werden die heutigen Ansätze des Kostenmanagements aufgezeigt und analysiert. Daraus werden die Ziele für das zu entwickelnde Modell hergeleitet.

Neben der Darstellung des Wissensstandes wird in Kapitel 3 das Problem strukturiert und damit in die Lösungssuche überführt. Hier werden parallele Vorgehensweisen und ähnliche Modellstrukturen für das System Engineering und das Zielkostenmanagement aufgezeigt. Der Ansatz der integrierten Produktentwicklung nach EHRENSPIEL (1995) stellt eine Ausgangsbasis für diese Arbeit dar und wird in diesem Abschnitt vorgestellt. Die Eignung der systemtechnischen Methoden für eine ganzheitliche Lösung der aufgezeigten Problemstellung kann dabei belegt werden.

In Kapitel 4 wird ein Grundmodell für die integrierte System- und Kostenentwicklung hergeleitet. Diese Synthese erfolgt mit einem an den Methoden der objektorientierten Analyse (OOA) und des objektorientierten Designs (OOD) angelehnten systemtechnischen Modellansatz. Es wird ein generisches Grundmodell entwickelt, das eine Betrachtung der Kosten für die verschiedenen Systemstrukturen ermöglichen soll. Das Modell wird am Beispiel eines Satellitensystems im allgemeinen und eines Solargenerators im speziellen dargestellt.

In Kapitel 5 wird die Rechnerumsetzung des Modells in dem Softwaretool MuSSat demonstriert. Auch die Einbindung des neuen Werkzeuges in die betriebswirtschaftliche Standardsoftware wird aufgezeigt. Zudem wird der mit der Modellanwendung verbundene Prozeß der integrierten Kostenanalyse dargestellt.

In Kapitel 6 wird das Modell durch die Auswertung und Analyse von Ergebnissen verifiziert. Die Prozesse eines interdisziplinären Angebotsteams in einem Satellite Design Office (SDO) unter Verwendung der Software MuSSat werden aufgezeigt und untersucht. Am Ende der Arbeit steht ein Fazit und der Ausblick auf Möglichkeiten zur Weiterentwicklung des vorgestellten Modellansatzes.

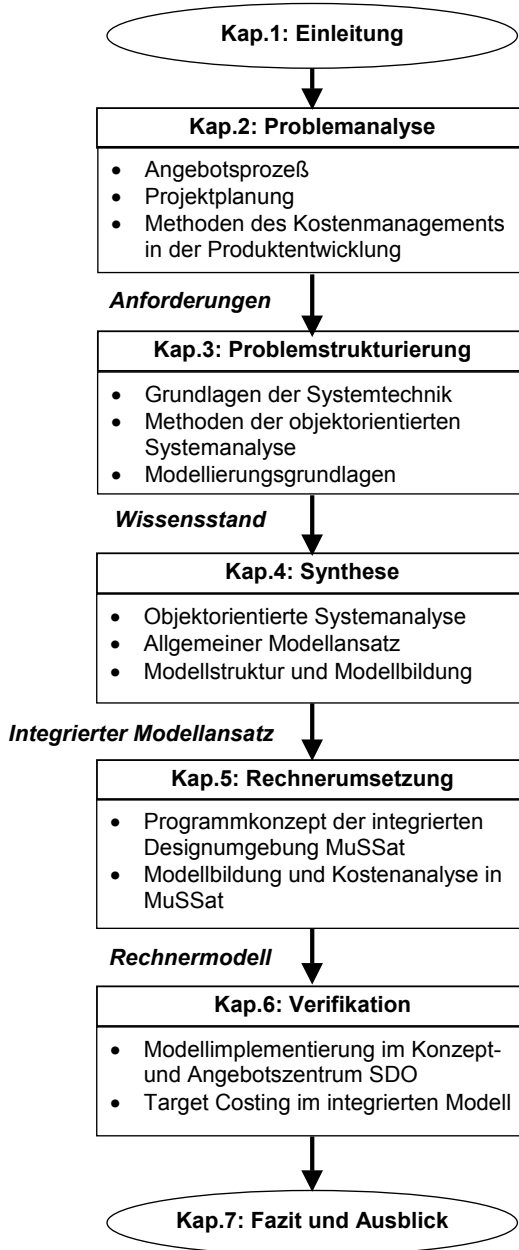


Abbildung 1-2: Struktur der Arbeit und Vorgehensweise