

## Kapitel 2 Prozessgrundlagen

Im Bereich der Prozessgrundlagen des Zyklenmanagements werden Ansätze für das grundlegende Verständnis von Zyklen und ihren Charakteristika erläutert, sowie aus einer innovationsprozessübergreifenden Perspektive untersucht.

Aus Sicht der Erfassung, Modellbildung und Analyse von Zyklen werden die strukturellen Abhängigkeiten zwischen und innerhalb prozess- und PSS-bezogener Zyklen untersucht (Kapitel 2.1). Eine übergreifende Perspektive auf das System dient der Identifikation und Analyse disziplinspezifischer und interdisziplinärer Abhängigkeiten sowie zur Abschätzung von Änderungsauswirkungen (Kapitel 2.2). Für die weiterführende, innovationsprozessübergreifende Betrachtung werden strukturelle Analysen mit Arbeiten zur Analyse der Dynamik und Stabilität von Zyklen kombiniert sowie qualitatives Wissen integriert, um sowohl quantitative als auch qualitative Modellierungen (Kapitel 2.3) und Analysen (Kapitel 2.4) des dynamischen Verhaltens von Zyklen und ihres Bezugs zum Innovationsprozess zu ermöglichen. Aus Sicht der am Innovationsprozess beteiligten Teams wird deren Umgang mit Zyklen als auch die Kopplung zu teamexternen Zyklen (d. h. zeitgebende, dynamische und Veränderungen erfordernde Umfeldfaktoren) untersucht (Kapitel 2.4).

## 2.1 Strukturbasierte Modellierung und Bewertung disziplinübergreifender Entwicklungszusammenhänge

*Maurer, M. ; Maisenbacher, S.; Kasperek, D.<sup>1</sup>*

Der Innovationsprozess von PSS ist von zahlreichen zyklischen Abhängigkeiten geprägt, die unvorhersehbare Änderungsauswirkungen mit sich bringen. Bei der Umsetzung von Änderungen sind häufig mehrere Disziplinen betroffen. Durch die Interaktion können zahlreiche Verzögerungen im Prozess entstehen. Ziel ist daher eine verbesserte Handhabung disziplinübergreifender Entwicklungszusammenhänge. Dafür wird ein zyklengerechter Ansatz zur Analyse, Handhabung und Optimierung disziplinübergreifender Komplexität in Innovationsprozessen von PSS vorgestellt. Die Komplexität entsteht neben der Integration vieler Fachdisziplinen durch steigende Variantenzahlen und häufige Änderungen des Entwicklungsumfelds. Der dabei verfolgte strukturbasierte Ansatz soll Entwickler bei der Implementierung innovativer Lösungen unterstützen, indem zyklenrelevante Eigenschaften möglicher Lösungen sowie des Entwicklungsumfelds frühzeitig in ihrer Auswirkung abgeschätzt werden. Als Struktur wird im Ansatz das Vorhandensein von Abhängigkeiten zwischen Elementen (z. B. Komponenten oder Prozessschritten) gesehen. Für die Modellierung der Abhängigkeitsarten werden Strukturmodelle, z. B. Verknüpfungsmatrizen, verwendet.

Basierend auf den spezifischen Herausforderungen struktureller Betrachtungen von PSS, werden im Folgenden die Grundlagen struktureller Betrachtungsweisen von Systemen erläutert. Es wird erläutert wie relevante Systemeigenschaften im Kontext von PSS mittels struktureller Ansätze modelliert und bewertet werden können. Im letzten Abschnitt wird darauf eingegangen wie dynamische Aspekte wie Änderungen von (PSS-) Systemen über der Zeit abgebildet und analysiert werden können.

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Produktentwicklung  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland  
E-Mail: [danilo.schmidt@pe.mw.tum.de](mailto:danilo.schmidt@pe.mw.tum.de)  
Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Teilprojekts A2

### **2.1.1 Herausforderungen der strukturellen Betrachtung von Entwicklungszusammenhängen von Produkt-Service Systemen**

Gestiegene Ansprüche von Kunden sowie der Trend zur Individualisierung von Produkten und Kosten- und Zeitdruck durch globalisierte Märkte stellen immer größere Herausforderungen an Unternehmen. Diese und vielfältige weitere Aspekte machen die Entwicklung von marktgerechten Produkten und insbesondere PSS zu einem komplexen Prozess. Zusätzlich stellt das PSS an sich sehr oft schon ein komplexes System dar. Um die entstehende Komplexität im PSS und im Entwicklungsprozess zu beherrschen werden Modelle eingesetzt [Mart07].

Speziell Strukturmodelle stellen ein wichtiges Werkzeug zur Beherrschung von Komplexität dar [Maur07]. Sie bieten dabei die Möglichkeit Zusammenhänge in Systemen darzustellen und verknüpfen dabei beispielsweise Produktfunktionen, Merkmale, Eigenschaften und Services in dem sie Relationen zwischen ihnen aufzeigen. Diese Informationen können in Form von Graphen visualisiert oder in Matrizen festgehalten werden und somit weiteren Analysen zugänglich gemacht werden. Dabei werden die strukturellen Zusammenhänge in Systemen statisch abgebildet, d. h. sie bilden das System zu einem konkreten Zeitpunkt ab [Maur07].

Das zunehmende Aufkommen der Verknüpfung von Produkten mit Dienstleistungen in PSS stellt neue Herausforderungen an Unternehmen [TaMc06], sowie an unterstützende Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: So zeichnen sich PSS durch die intelligente Verzahnung von physischem Produkt und Dienstleistungsaspekten, die bereits in der Phase der Konzeption und Entwicklung eng miteinander verbunden werden, aus [LeGl08]. Während bereits bei konventionellen Entwicklungszusammenhängen dynamische Einflussfaktoren eine große Rolle spielen, verstärkt sich der Einfluss von dynamischen Aspekten bei der Entwicklung von PSS weiter. Im speziellen der hohe Vernetzungsgrad von Produkt, Dienstleistung und Software sorgt für hochgradig dynamische Reaktionen des Systems „Entwicklungsprozess“.

### **2.1.2 Strukturelles Komplexitätsmanagement**

Jedes System, das aus mindestens zwei Teilen besteht, besitzt eine grundlegende Struktur [BoSa06]. Wenn die grundlegende Struktur bekannt ist, erlaubt dies Rückschlüsse auf das Systemverhalten und führt zu verbessertem Verständnis. Ein komplexes System umfasst eine große Anzahl von Elementen, die stark vernetzt sind, und kann nicht in Subsysteme geteilt werden. Interne Dynamik zeigt sich über das Systemverhalten und die Selbstorganisation [Ande99, MaMa13, MaWe04, Rich01]. Komplexe technische Systeme enthalten mehrfache Abhängigkeiten zwischen ihren Elementen, was bei der Gestaltung einer bestimmten Komponente zu Schwierigkeiten führt. Die Kenntnis über interne Produktabhängigkeiten ist

notwendig, um mögliche Auswirkungen zu bestimmen, die sich aus einzelnen Anpassungen ergeben. Das Wissen über diese strukturellen Abhängigkeiten ermöglicht es den Entwicklern, besser mit Komplexität umzugehen und dadurch z. B. die Time-to-Market zu verringern [LiMB09], [KaKM13].

Ein weit verbreiteter Ansatz, mit komplexen Systemen umzugehen, ist das Strukturelle Komplexitätsmanagement (StCM) [LiMB09]. Dieser Ansatz verbindet die Möglichkeiten der Design Structure Matrizen (DSM) [Stew81] mit denen der Domain Mapping Matrizen (DMM) [DaBr04]. DSM und DMM Methoden werden zur Modellierung und Analyse von Systemstrukturen in einer Vielzahl von unterschiedlichen Projekten, in denen Elemente von verschiedenen Domänen im Mittelpunkt stehen, angewandt (Überblick siehe [Brow01]). In [EpBr12] wird eine hohe Anzahl an Beispielen und Anwendungen aus Industrie und Hochschule für diese Matrizen angeführt. Die Methode des StCM – als eine Kombination von beiden Ansätzen – unterstützt den Umgang mit Systemen, die mehrere Domänen umfassen. Dabei stellen Domänen die Klassifikation von Elementen in Gruppen dar [LiMB09]. Beispiele für Domänen sind Menschen und Anforderungen, während einzelne Elemente bestimmte Beispiele für diese Gruppe repräsentieren. Die Methode des StCM bietet eine Vorgehensweise aus fünf Schritten, die den Nutzer bei der Systemdefinition, der Informationsakquise, dem Ableiten von indirekten Abhängigkeiten, der Strukturanalyse und der praktischen Umsetzung unterstützt (vgl. Abbildung 2.1) [KaKM13].

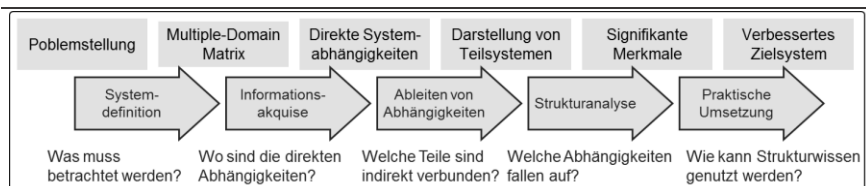


Abbildung 2.1: Phasen von StCM [LiMB09]

Beim Ableiten von indirekten Abhängigkeiten und bei der Strukturanalyse werden Algorithmen zur Berechnung von DSMs aus DMMs benutzt. Die Analysen werden in einer Multiple Domain Matrix (MDM), die aus mindestens zwei bzw. theoretisch aus einer unendlichen Anzahl von Domänen besteht, berechnet. Die Domänen (und damit die Granularität des Modells) werden entweder gemäß den beabsichtigten Analyseergebnissen oder gemäß den vorhandenen Informationsquellen ausgewählt [LiMB09], [KaKM13].

Die matrix-basierte Darstellung einer Struktur kann mit verschiedenen Kriterien analysiert werden. Nach [BiLi11] können die Kriterien neben anderen Anwendungsbereichen auch dazu verwendet werden, um Systeme zu vergleichen. In [Krei09, LiMB09] wird ein umfangreicher Überblick über diese Kriterien

gegeben, während in [BiLi11] die Anforderungen an die Anwendbarkeit von Analysekriterien diskutiert werden. Analysekriterien werden beispielsweise hauptsächlich in dem StCM-Schritt Strukturanalyse verwendet, können jedoch auch in anderen Schritten zum Einsatz kommen. Weiterhin sind die Systemeigenschaften und die ausgewählten Teilsysteme von Bedeutung. Einige Analysekriterien können nicht bei DMMs angewendet werden oder erfordern eine symmetrische Matrix. Die Analyse von MDMs, was bedeutet, dass Analysekriterien domänenübergreifend angewandt werden, bedarf weiterer Interpretation und wird diskutiert in [KHBL10]. Ein Ansatz, die Strukturanalyse zu optimieren, wird von [BiLi11] vorgestellt. In [BiLi11] werden außerdem Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Kriterien deutlich gemacht und es wird gezeigt, dass einige von den Kriterien ähnliche Interpretationen haben. Für eine konsistente Strukturanalyse wird empfohlen, ein Set von an das betrachtete System angepasste Analysekriterien auszuwählen. Eine Übersicht über häufig angewandte Strukturkriterien findet sich in Tabelle 2.1. Zusätzlich zur Analyse mit Analysekriterien kann die Struktur auch in graphische Darstellungen überführt werden, um eine Visualisierung zu erlangen, die für den Anwender leichter zugänglich ist [KaKM13].

Tabelle 2.1: Analysekriterien

Analysekriterium	Definition
Aktivsumme	Anzahl der von einem Knoten ausgehenden Relationen.
Passivsumme	Anzahl der auf einen Knoten eingehenden Relationen.
Vernetzungsgrad	Quotient aus vorhandenen Relationen und theoretisch möglichen Relationen.
Kreisschluss	Zwei oder mehr Elemente, die verbunden sind und sich gegenseitig beeinflussen. Auswirkungen, verursacht durch einen Kreisschluss, sind oft schwer zu kontrollieren.
Kritisches Element	Systemelemente mit hohem Einfluss im System. Sie haben eine relativ hohe Kritikalität, die über Multiplikation von Aktiv- und Passivsumme berechnet wird.
Brückenelement	Das einzige Verbindungselement zwischen verschiedenen Clustern. Das Entfernen des Brückenelements könnte das System in unterschiedliche Teilsysteme aufteilen.
Cluster	Ein Teilsystem mit hoher interner und geringer externer Vernetzung.
Startelement	Die Aktivsumme des Elements ist 1 oder höher und die Passivsumme ist 0.
Endelement	Die Aktivsumme des Elements ist 0 und die Passivsumme ist 1 oder höher.
Blattelement	Das Element ist nur mit einem anderen Element verbunden.

Während StCM im Kontext von Produktentwicklungen entstanden ist, wurde es bereits auf mehrere andere Forschungsbereiche erweitert, wie z. B. Prozessverbesserung [Krei09], Wissenstransfer [Maur11] oder Security Management [MBCD09]. Zur Unterstützung von Erfassung, Darstellung und Analyse von Systemstrukturen sind Softwarekomponenten vorhanden [<http://www.dsmweb.org>].

### 2.1.3 Analyse von Systemeigenschaften

In den frühen Phasen der Entwicklung und Konstruktion werden gewöhnlich mehrere Konzepte entwickelt, um die jeweiligen bevorstehenden Herausforderungen zu bewältigen und die gegebenen Anforderungen zu erfüllen. Beispiele sind verschiedene Produkt-Konzepte, um bestimmte Produkt-Anforderungen oder verschiedene Prozesssequenzen des Produktionssystems zu erfüllen oder unterschiedliche Service-Konzepte für das PSS. Um ein Konzept zur Einführung korrekt auszuwählen, muss es eine Möglichkeit zur Einschätzung und Klassifikation geben. In [MaWe04] wird erklärt, dass die Klassifikation eines technischen Systems nur Sinn macht, wenn spezifische Attribute oder Systemeigenschaften abgewogen werden. Auf hoher Detaillierungsebene kann dies die Diskussion und das Management von Anforderungen eines komplexen System sein [EbLi10, KHBL10]. Für eine abstraktere Einschätzung von Systemen, z. B. um Systeme mit verschiedenen Anforderungen zu vergleichen, sind allgemeinere Systemeigenschaften nötig.

Derartige Systemeigenschaften werden im Konzept der Ilities diskutiert. Die Anwendbarkeit des Konzepts ist jedoch eine Herausforderung, da Methoden fehlen, um ein System bezüglich seiner Ilities zu analysieren und zu bewerten, weil diese schwer zu quantifizieren sind [WeRR12].

Komplexitätskennzahlen bieten eine Basis, um verschiedene System-Konzepte zu vergleichen und zu bewerten. Dazu müssen zwei oder mehr Konzepte des komplexen Systems quantifiziert und nach bestimmten Werten geordnet werden. Die zuverlässige Bestimmung von Steuerungsgrößen innerhalb von Strukturen bleibt jedoch immer noch Gegenstand der Forschung.

In diesem Abschnitt werden Matrix-basierte Analyse Kriterien für komplexe Systeme mit dem Ziel untersucht, Übereinstimmungen mit Ilities zu finden. Es wird angenommen, dass Analyse Kriterien des strukturellen Komplexitätsmanagements qualitative Aussagen bezüglich Ilities ermöglichen werden, um komplexe Systemstrukturen zu bewerten.

Das Konzept von Ilities beinhaltet eine große Vielfalt von unterschiedlichen Ilities, die ein System unabhängig von dessen Hintergrund spezifizieren können [WeRR12]. In [WeRR12] wird ein Überblick über die verschiedenen Ilities sowie über ihre Bedeutung gegeben und die Zusammenhänge zwischen den Ilities basierend auf der Literatur werden abgewogen. Die unterschiedlichen Ilities können auch dazu verwendet werden, ein System zu bewerten und Systeme zu vergleichen [RoRH08]. Einige Ansätze, Systeme durch Ilities qualitativ oder quantitativ zu bewerten, sind verfügbar (Beispiele in [RoRH08]), jedoch werden strukturelle Aspekte, besonders Analyse Kriterien, kaum diskutiert.

In [HöWe07] jedoch wird der Unterschied zwischen integraler und modularer Bauweise erörtert. Eine DSM wird verwendet, um das System zu modellieren und die Eigenwerte der Matrix werden berechnet, um die Modularität des Systems zu bewerten. Damit wird zwischen integralen und modularen Produkten unterschieden. Analyse Kriterien von Strukturellem Komplexitätsmanagement werden jedoch nicht betrachtet.

In [KHBL10] wird die Anwendbarkeit, Robustheit, Agilität und Flexibilität der Ilities und ihr Einfluss auf die Veränderlichkeit eines Systems dargestellt. Drei Hauptprinzipien (Idealität/ Einfachheit, Unabhängigkeit und Modularität/ Einbindung) werden eingeführt, was Veränderlichkeit ermöglicht. Modularität/ Einbindung wird über Cluster in einer DSM bewertet. Dieses Ergebnis passt vollständig zu dem Zusammenhang zwischen dem Analyse Kriterium Cluster und der Ility Modularität und unterstützt die Annahmen. Weitere Analyse Kriterien werden in [FrSc05] nicht diskutiert.

Vor einem Vergleich der Ilities mit Hilfe von Strukturkriterien müssen die Ilities definiert werden. In diesem Rahmen sind bisher Qualität, Sicherheit, Robustheit, Zuverlässigkeit, Modularität, Nachhaltigkeit, Anwendbarkeit und Flexibilität als wichtige Ilities ausgewählt worden, um Zusammenhänge mit Analyse Kriterien zu untersuchen.

Eine der klassischen Ilities ist Qualität. Nach [ReBe94] ist die Qualität der Produkte und Services eines Unternehmens langfristig der wichtigste Faktor, um eine bessere Performanz als der Wettbewerber zu haben. Überraschenderweise existieren sogar für Qualität verschiedene Definition, wie z. B. Qualität als der Wert eines Produkts oder Services, Qualität als die Übereinstimmung mit Anforderungen oder Spezifikationen oder als das Erfüllen von Kundenwünschen [NeTM03, ReBe94]. Qualität ist jedoch am genauesten definiert als Übereinstimmung mit Spezifikationen [ReBe94].

Sicherheit ist die Abwesenheit von unerwünschten Folgen. Sie steht auch in Verbindung mit Risiko, Rückwirkung und Qualität [Dijk07].

Robustheit ist definiert als der Widerstand gegen Eingriffe von außen auf das System. Ein System ist robust, wenn es seine Funktionalität bei einem Eingriff von außen nicht verliert. Es ist die Fähigkeit eines Systems, sein Level und sein Set von Spezifikationsparametern konstant zu halten. Dies ist im Kontext von sich ständig verändernden externen und internen Einflüssen sicherzustellen [CaDo02, JuFr07, MRRH07]. Robustheit hat einige Übereinstimmungen mit Zuverlässigkeit [Žiha00].

Zuverlässigkeit wird definiert als der Widerstand gegen langfristiges Versagen. In anderen Worten, das Versagen eines Systems innerhalb der erwarteten Lebensdauer darf nicht auftreten [RRSH09]. Das System muss den Zweck, für den

es geschaffen worden ist, erfüllen. Beispielsweise muss ein Produkt bestimmte Funktionen über einen gegebenen Zeitraum mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit erfüllen. Wenn ein System keinen Widerstand gegen externe Störungen bieten kann, kann es nicht zuverlässig sein, weil Komponenten, Funktionen oder Relationen versagen.

Modularität, als ein Prinzip zur Kontrolle von Komplexität, bedeutet, ein Produkt mit weitestgehend unabhängigen Komponenten, Gruppen und Montageeinheiten zu definieren, die nur durch wenige, aber sehr genau definierte Schnittstellen verbunden sind [BrPr01, Lang02, SaMa96, WeRR12]. Dies führt zu Kompatibilität und einfacher Austauschbarkeit. Ein Modul besteht aus Elementen, die eng miteinander verbunden sind. Dies kann z. B. bei physisch oder funktionell entkoppelten Produkten auftreten. Die Vorteile sind, dass Einflüsse von Veränderungen und Störungen begrenzt werden und die statistische Lebensdauer des Moduls entkoppelt ist.

Nachhaltigkeit ist ein Prinzip, nach dem es nicht erlaubt ist, dass mehr verbraucht wird, als entsteht, wiederhergestellt wird und in Zukunft wieder angeboten werden kann. Nachhaltigkeit für das betrachtete System bedeutet, dass sich das System nicht selbst zerstören darf.

Anwendbarkeit ist die Fähigkeit eines Systems, intern verändert zu werden [MRRH07, WeRR12]. Das Produkt kann sich selbst verändern, um sich an veränderte Bedingungen anzupassen.

Flexibilität ist die Fähigkeit eines Systems, extern verändert zu werden [FSLW07, MRRH07, WeRR12]. Der Kunde kann das Produkt an die Bedingungen anpassen. Das bedeutet, dass die Komponenten und Funktionen extern verändert werden können. Modularität muss erfüllt sein, damit es möglich ist, bestimmte Module des Systems zu verändern, um es an die Situation anzupassen. Aufgrund der Definition hat Flexibilität eine sehr enge Verbindung zu Anwendbarkeit.

Einige der Zusammenhänge zwischen Ilities und Analyse Kriterien können allgemein diskutiert werden. Dies bezieht sich grundsätzlich auf die Zusammenhänge, die durch einen Vergleich der Definitionen von Ilities und Analyse Kriterien erkannt werden können. Der am einfachsten nachvollziehbare Zusammenhang existiert zwischen Clustern und Modularität. Ein Cluster ist definiert als Teilsystem mit hoher interner und geringer äußerer Vernetzung. Dies passt vollständig zu der Definition von Modularität, bei der angenommen wird, dass eine Struktur mit locker gekoppelten Modulen, die intern hoch und extern gering vernetzt sind, eine höhere Modularität aufweist als eine Struktur mit gleichmäßig gekoppelten Elementen. Weiterhin beeinflusst die Anzahl an Brückenelementen die Modularität von einem System. Je mehr Brückenelemente verschiedene Teilsysteme trennen, desto leichter kann das System in Module aufteilt werden und



desto höher ist die Modularität des Systems. Abbildung 2.2 veranschaulicht diese Zusammenhänge.

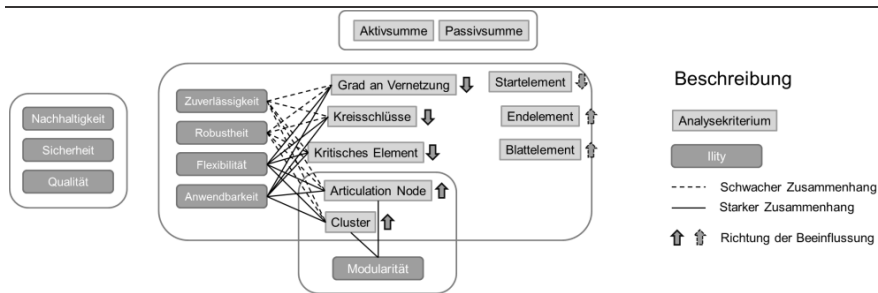


Abbildung 2.2: Analysekriterien und Ilities

Die vier Ilities Zuverlässigkeit, Robustheit, Flexibilität und Anwendbarkeit haben sehr ähnliche Interpretationen [WeRR12]. Dies führt zu der Annahme, dass sie durch dieselben Analysekriterien beschrieben werden können. Interpretationen für Robustheit und Zuverlässigkeit sind jedoch schwieriger und weniger nachvollziehbar als Interpretationen von Flexibilität und Anwendbarkeit (dargestellt durch gepunktete Linien in Abbildung 2.2).

Ein geringer Vernetzungsgrad beschreibt ein schwach verbundenes System. Dies ermöglicht es, das System leichter zu verstehen. Eine Anpassung von Elementen des Systems an verschiedene Voraussetzungen kann leichter durchgeführt werden, da Veränderungen nur wenig Einfluss auf das verbleibende System haben. Ein System mit geringem Vernetzungsgrad ist flexibler und anpassungsfähiger. Ähnliche Interpretationen wie mit dem Vernetzungsgrad können mit Kreisschlüssen und kritischen Elementen gemacht werden. Alle drei Kriterien tauchen öfter in stark gekoppelten Systemen auf, was die ähnlichen Interpretationen unterstreicht. Eine hohe Anzahl an Kreisschlüssen bedeutet eine hohe Zahl an indirekten Abhängigkeiten und führt zu zahlreichen Iterationen im System. Veränderungen im System sind schwer durchzuführen und das System ist weniger flexibel und anpassungsfähig. Eine hohe Anzahl an kritischen Elementen bedeutet eine hohe Zahl von stark vernetzten Systemelementen. Veränderungen von diesen Elementen sind sehr schwierig durchzuführen und haben hohen Einfluss auf den Rest des Systems. Sogar Veränderungen von anderen Elementen sind schwierig, da diese normalerweise mit den kritischen Elementen verbunden sind.

Robustheit ist definiert als der Widerstand eines Systems gegen äußere Einflüsse. Es wird angenommen, dass ein System, das stark vernetzt ist, allgemein eine hohe Anzahl an Kreisschlüssen, kritischen Elementen und einen hohen Vernetzungsgrad hat und damit schwerer zu erfassen sowie aufzuteilen ist und alle möglichen Einflüsse sowie Folgen für das System schwieriger zu erkennen sind. Dies macht es schwieriger ein robustes System zu entwickeln. Ähnlich ist hohe

Zuverlässigkeit in hoch vernetzten Systemen schwerer zu erreichen, da eine Vielzahl an verschiedenen Versagensarten auftreten kann.

Die Analysekriterien Cluster und Brückenelement definieren getrennte Teilsysteme. Eine hohe Anzahl von diesen Analysekriterien steigert die Ordnung des Systems und Veränderungen in den getrennten Teilsystemen haben nur geringen Einfluss auf den Rest des Systems, da Cluster eine relativ geringe äußere Vernetzung haben und ein Brückenelement eine klar definierte Verbindung zwischen zwei Teilsystemen darstellt. So führt eine hohe Anzahl an Clustern und Brückenelementen in einem System zu einem flexibleren und anpassungsfähigeren System. Die Teilsysteme können leicht ausgetauscht werden und Veränderungen in den Teilsystemen haben hohen internen Einfluss auf das Teilsystem, aber nur geringen Einfluss auf den Rest des Systems.

Die Interpretation für die Ilities Robustheit und Zuverlässigkeit sind abstrakter und ungewisser. Äußere Einflüsse und damit Ausfälle oder Probleme können mit oder ohne Cluster und Brückenelemente auftreten. Jedoch könnten die Einflüsse nicht das gesamte System betreffen, sondern nur Folgen für ein einziges Cluster haben. So kann eine hohe Anzahl an Clustern und Brückenelementen die Zuverlässigkeit und Robustheit eines Systems steigern.

Zuverlässigkeit, Robustheit, Flexibilität und Anwendbarkeit können auch durch die Analysekriterien Startelement, Endelement, Blattelement und Transitknoten interpretiert werden. Jedoch sind diese Zusammenhänge, abhängig von System, nur weniger bedeutend, da im Wesentlichen nur ein Element von geringer Bedeutung im System untersucht wird. Startelemente sind Elemente, die nur Einflüsse auf das System haben. Grundsätzlich sind diese Eingangsschnittstellen von dem System. Eine hohe Zahl an Startelementen führt zu vielen Möglichkeiten, das System von außen zu beeinflussen, was es schwieriger macht, ein robustes und zuverlässiges System zu gestalten. Eine hohe Anzahl von Verbindungen zu anderen Systemelementen macht es schwierig, Startelemente zu verändern, da die Änderungen zu weiteren Veränderungen von anderen Elementen führen. Eine hohe Zahl von Startelementen verringert die Flexibilität und Anwendbarkeit von einem System. Im Gegensatz dazu sind Endelemente im Wesentlichen Schnittstellen zum Umfeld des Systems. Sie haben keinerlei Einfluss auf das System. So führen Veränderungen nicht zu weiteren Änderungen im System und Einflüsse von Außen können nicht über Endelemente auftreten. Blattelemente werden per Definition nur von einem anderen Knoten beeinflusst und beeinflussen auch nur einen weiteren Knoten. Sie haben nur geringe Bedeutung im System, können leicht verändert und von Außen nicht beeinflusst werden.

Die zwei Analysekriterien Aktivsumme und Passivsumme können nicht direkt für die Interpretation von Ilities genutzt werden. Beide sind jedoch wichtig für andere Analysekriterien. Sie werden verwendet, um kritische Elemente,

Startelemente, Endelemente und Blattelemente zu identifizieren. Nachhaltigkeit, Sicherheit und Qualität sind auch wichtige klassische Kriterien. Jedoch ist eine allgemeine Interpretation dieser Kriterien mit Analysekr Kriterien kaum möglich, da die Interpretation nur im Kontext des analysierten Systems möglich ist.

### 2.1.4 Analyse von Systemänderungen

Wie bereits erwähnt stoßen die klassischen Ansätze der Strukturmodellierung bei hochgradig dynamischen Systemen oftmals an ihre Grenzen, da die darin abgebildeten Elemente und Relationen per se als statisch angenommen werden. Eine Änderung der Struktur führt dabei zu einer neuen Version des Strukturmodells. Die dynamische Entwicklung des Systems über der Zeit kann nur schwer transparent modelliert werden [FoSt98], [LKMM13].

Dies führt dazu, dass Strukturmodelle nur bedingt geeignet sind, um die Dynamik eines Prozesses abzubilden. Um dies dennoch zu erreichen, wurde ein Ansatz entwickelt, bei dem mehrere Modelle zu definierten Zeitpunkten über den Verlauf des Entwicklungsprozesses erstellt werden [LKMM13]. Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, entstehen so mehrere Schnappschüsse der Struktur des PSS-Entwicklungsprozesses zu verschiedenen Zeitpunkten. Dabei bildet jede der MDMs die direkten Abhängigkeiten zwischen den Elementen der Domänen zum jeweiligen Zeitpunkt ab und dient somit als Grundlage für das Ableiten von indirekten Zusammenhängen und für die Durchführung von Strukturanalysen. Durch Aneinanderreihung aller Schnappschüsse entsteht abhängig von der Anzahl der Schnappschüsse ein Abbild des gesamten Prozesses. Zur strukturbasierten Erfassung der Dynamik des PSS-Entwicklungsprozesses wird die zeitliche Veränderung der Struktur anhand der aufgenommenen MDMs betrachtet [LKMM13].

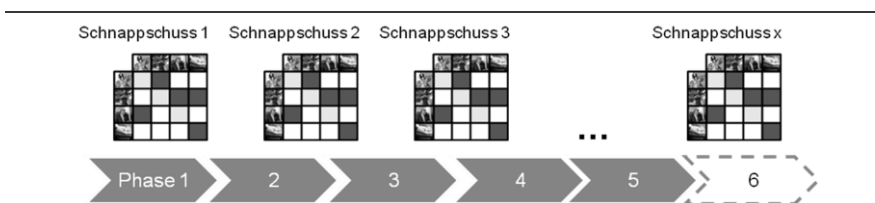


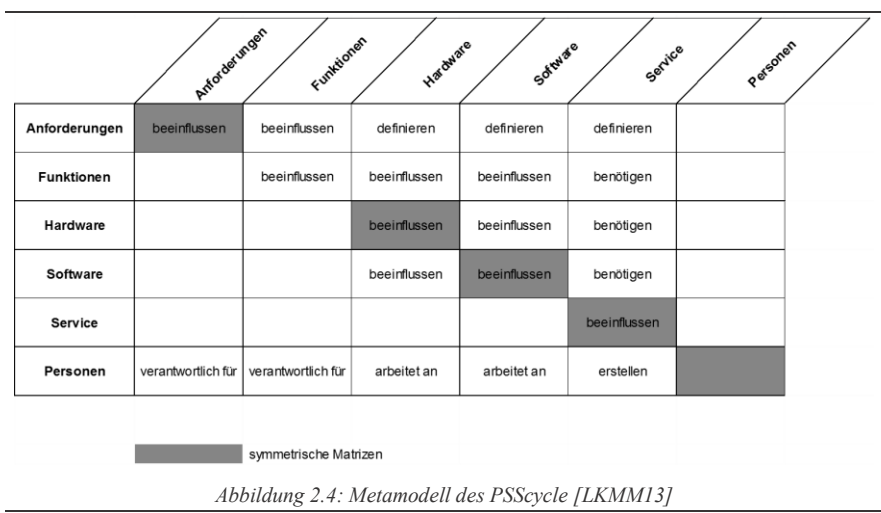
Abbildung 2.3: Strukturbasierte Modellierungsansatz des Entwicklungsprozesses [LKMM13]

Voraussetzung für das Zusammenfügen der einzelnen Schnappschüsse zu einem Gesamtmodell ist die Vergleichbarkeit der einzelnen strukturbasierten Modelle. Hierfür ist es notwendig die Informationen auf Basis eines gemeinsamen Metamodells zu akquirieren. Weiter ist es erforderlich verschiedene beteiligte Entwickler zu gleichen Teilbereichen der MDMs zu befragen, wobei zu jedem Schnappschuss dieselben Entwickler befragt werden sollten. Dies hat vor allem zum Zweck subjektive Einflüsse in der Datengrundlage gering zu halten.

Zur Evaluierung des Vorgehens wurde dieses an einem Konstruktionsprojekt exemplarisch angewendet. Zunächst werden dazu der Aufbau und danach das Vorgehen sowie die Analyse des Anwendungsfalls näher beschrieben.

Im Rahmen eines Projektes wurde auf Basis eines handelsüblichen E-Bikes ein innovatives E-Bike-Sharing Konzept erstellt (PSSycle) und prototypisch umgesetzt. Dabei wurde das PSS um spezifische Features erweitert, um den besonderen Anforderungen eines markttauglichen Leihkonzeptes der Zukunft gerecht zu werden. Beispielsweise seien hier eine spezielle Diebstahlsicherung und die Integration von mehreren Smartphonefunktionen genannt. Das PSSycle wurde durch eine Gruppe studentischer Entwickler im Zeitrahmen von sechs Monaten realisiert [LKMM13].

Zunächst erfolgte im Rahmen der Phase Systemdefinition, eine Identifikation der zu betrachtenden Domänen und Zusammenhänge. Das dabei entwickelte Metamodell, siehe Abbildung 2.4, wurde in regelmäßigen Abständen während der gesamten Dauer des Entwicklungsprozesses mehrmals genutzt, um im Rahmen einer ausführlichen Informationsakquise mittels Workshops und Fragebögen eine Multiple-Domain Matrix des jeweiligen Entwicklungsstandes zu erstellen.



Anschließend wurden die MDMs bezüglich ihrer Struktur analysiert und miteinander verglichen, wobei die Anzahl der Domänen, Elemente und Relationen, sowie Veränderung der Verknüpfungen und Cluster wichtige Gesichtspunkte darstellen. Die in den einzelnen Schnappschüssen erkennbaren Veränderungen dokumentieren die Strukturveränderungen im Laufe des Entwicklungsprozesses [LKMM13].

Betrachtet man die Anzahl und Art der Elemente, ist zu beobachten, dass besonders die Erstellung aktualisierter oder neuer Anforderungslisten einen Einschnitt darstellen. So nimmt zu Beginn des Entwicklungsprozesses des PSS die Anzahl der Elemente deutlich zu, außerdem ändern sich die Elemente häufig. Betrachtet man die Relationen zwischen Elementen zeigt sich ein ähnliches Bild. Aufgrund geringer Informationen über die Interaktionen der Elemente miteinander sind diese zu Beginn nur wenig miteinander verbunden. Im weiteren Verlauf ändern sich viele dieser Relationen aufgrund von zunehmendem Erkenntnisgewinn.

Verfolgt man die Entwicklung einzelner Elemente innerhalb des PSScycle Entwicklungsprozesses hinsichtlich der Kennzahlen Kritikalität, Aktivität und Passivität so kann die dem Prozess zugrundeliegende Dynamik sehr gut erkannt werden. Schon kleinste Veränderungen der Einflussfaktoren führen auf Elementebene zu starken Veränderungen. Im Anwendungsfall PSScycle lässt sich dies am Beispiel des Smartphones beschreiben: Zu Beginn der Entwicklung war dies nur als Interface und Visualisierungsinstrument gedacht. Im Laufe der Zeit übernahm es Steuerungsfunktionen für den Elektromotor und wurde damit zum zentralen Element des PSS [LKMM13].

Ziel der schnappschussbasierten Strukturmodellierung ist es dem Anwender einerseits Transparenz über den dynamischen Entwicklungsprozess von PSS zu verschaffen und andererseits schon während der Entwicklung Defizite und mögliche Komplikationen aufzuzeigen, um Zeitverzögerungen oder kostspielige späte Änderungen zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurde in den Strukturmodellen nach Strukturmerkmalen und Schwachstellen gesucht. Parallel dazu wurden die Entwickler nach aufgetretenen Schwachstellen befragt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse ergab eine Übereinstimmung bei allen gefundenen Schwachstellen. Im Folgenden wird exemplarisch auf die identifizierten Schwachstellen Zeitmanagement, Engpässe in verfügbarer Hardware und Anforderungsmanagement eingegangen [LKMM13].

Defizite im Zeitmanagement können in den Strukturmodellen besonders in der Mitte des Projektes gefunden werden. Während zu Beginn und am Ende des Projekts viele Änderungen in den Elementen und besonders in den Relationen vorhanden waren, sind in der Mitte des Projektes Schnappschüsse ohne jede Änderung zum Vorgänger entstanden. Eine derartige Stagnation in der Dynamik ist nur mit nahezu ruhender Entwicklungstätigkeit zu erklären. Ein Blick auf die reale Ebene verifiziert dies. Besonders deutlich konnte ein Problem mit „verfügbarer Hardware“ aus den Strukturmodellen vorhergesagt werden. Während der Entwicklung waren zwei Smartphones verfügbar. Bereits früh konnte unter Berücksichtigung von indirekten Abhängigkeiten erkannt werden, dass mehr Entwickler Zugriff zur Hardware gegen Ende des Projektes brauchen werden [LKMM13].

Wie bereits erwähnt, können Probleme bezüglich des Handlings und des Managements von Anforderungen durch den Vergleich von Schnappschüssen der Strukturmodelle erkannt werden. Erst durch den Vergleich mehrerer Modelle können Änderungen der Anforderungen und das Verschieben von Anforderungsschwerpunkten ersichtlich gemacht werden. Betrachtet man nur eine Momentaufnahme können diese Änderungen und die daraus resultierende Dynamik nicht erkannt werden [LKMM13].

Die Ergebnisse der Evaluationsstudie zeigen deutlich die Möglichkeit auf mit der Methode des strukturellen Komplexitätsmanagements das Systemverständnis der PSS-Entwicklung und der daran beteiligten Prozesse nachhaltig zu steigern und die Transparenz zu erhöhen sowie Schwachstellen frühzeitig zu erkennen. Dabei stellen qualitativ hochwertige Informationen eine notwendige Basis für die erfolgreiche Strukturmodellierung dar [LKMM13].

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, ermöglicht die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Systemverhalten und Systemstruktur langfristig die Optimierung von Systemstrukturen hinsichtlich eines gewünschten Systemverhaltens [KaMa13].

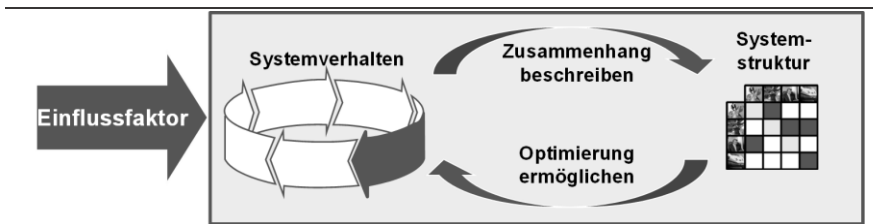


Abbildung 2.5: Gesamtzusammenhang von Systemverhalten und Systemstruktur [LKMM13]

### 2.1.5 Literatur

- [Ande99] P. Anderson, "Complexity theory and organization science," *Organ Sci*, vol. 10, no. 3, pp. 216–232, 1999.
- [BiLi11] W. Biedermann & U. Lindemann, "On the Applicability of Structural Criteria in Complexity Management," in 18th International Conference on Engineering Design, 2011, vol. 4, pp. 21–32.
- [BiLi11] W. Biedermann & U. Lindemann, "Designing Consistent Structural Analysis Scenarios," in 18th International Conference on Engineering Design, 2011, vol. 4, pp. 133–144.
- [BoSa06] J. Boardman & B. Sauser, "System of Systems - the meaning of of," in 2006 IEEE/SMC International Conference on System of Systems Engineering, 2006, no. April, pp. 118–123.
- [Brow01] T. R. Browning, "Applying the Design Structure Matrix to System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 48, no. 3, pp. 292–306, 2001.
- [BrPr01] S. Brusoni & A. Prencipe, "Unpacking the black box of modularity: technologies, products and organizations," *Ind. Corp. Chang.*, vol. 10, no. 1, pp. 179–205, 2001.
- [CaDo02] J. M. Carlson & J. Doyle, "Complexity and robustness," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 99, no. 1, pp. 2538–2545, 2002.
- [DaBr04] M. Danilovic & T. R. Browning, "A Formal Approach for Domain Mapping Matrices (DMM) to Complement Design Structure Matrices (DSM)," in Proceedings of the 6th international design structure matrix (DSM) workshop, 2004.
- [Dijk07] A. Dijkstra, "Resilience engineering and safety management systems in aviation," Second Symp. Resil. Eng. Netw., 2007.
- [EbLi10] K. Eben & U. Lindemann, "Structural analysis of requirements–interpretation of structural criterions," in The 12th International dependency and structure modelling conference, 2010.
- [EpBr12] S. D. Eppinger & T. R. Browning, *Design Structure Matrix Methods and Applications*. Cambridge, USA: The MIT Press, 2012, p. 352.
- [FoSt98] D. N. Ford & J. D. Sterman, "Dynamic modeling of product development processes," *Syst. Dyn. Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 31–68, 1998.
- [FrSc05] E. Fricke & A. P. Schulz, "Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle," *Syst. Eng.*, vol. 8, no. 4, 2005.
- [FSLW07] S. Ferguson, A. Siddiqi, K. Lewis, & O. de Weck, "Flexible and reconfigurable systems: Nomenclature and review," in ASME DETC and CIE Conferences, 2007.
- [HöWe07] K. Hölttä-Otto & O. de Weck, "Degree of modularity in engineering systems and products with technical and business constraints," *Concurr. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 113–126, 2007.
- [JuFr07] R. Jugulum & D. D. Frey, "Toward a taxonomy of concept designs for improved robustness," *J. Eng. Des.*, vol. 18, no. 22, pp. 139–156, 2007.
- [KaKM13] D. Kasperek, A. Kohn, & M. Maurer, "Identifying Uncertainties within Structural Complexity Management," in 19th International Conference on Engineering Design 2013 (ICED13), 2013.
- [KaMa13] D. Kasperek & M. Maurer, "Coupling Structural Complexity Management and System Dynamics to represent the dynamic behavior of product development processes," in 2013 IEEE International Systems Conference (SysCon), 2013, pp. 414–419.
- [KHBL10] S. Kortler, B. Helms, M. Berkovich, U. Lindemann, K. Shea, J. M. Leimeister, & H. Krcmar, "Using MDM-Methods in Order to improve Managing of Iterations in Design Processes," in 12th International DSM Conference, 2010, pp. 125–138.
- [Krei09] M. Kreimeyer, "A Structural Measurement System for Engineering Design Processes," Dr. Hut, München, 2009.
- [Lang02] R. N. Langlois, "Modularity in technology and organization," *J. Econ. Behav. Organ.*, vol. 49, pp. 19–37, 2002.
- [LeGl08] J. M. Leimeister & C. Glauner, "Hybride Produkte – Einordnung und Herausforderungen für die Wirtschaftsinformatik," *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, vol. 50, no. 3, pp. 248–251, Jul. 2008.

- [LiMB09] U. Lindemann, M. Maurer, & T. Braun, *Structural Complexity Management - An Approach for the Field of Product Design*. Berlin, Germany: Springer, 2009, p. 240.
- [LKMM13] C. Lichtenberg, D. Kasperek, S. Maisenbacher, & M. Maurer, "Strukturbasierte Modellierung und Bewertung von Entwicklungsprozessen von Produkt-Service Systemen," in *Tag des Systems Engineering*, 2013, pp. 1–10.
- [MaMa13] M. Maurer & S. Maisenbacher, "Modeling and Analyzing Systems in Application," in *ICoRD'13*, 2013, pp. 707–719.
- [Mart07] M. Marti, *Complexity Management – Optimizing Product architecture of industrial Products*, no. 3352. St. Gallen, Schweiz: Deutscher Universitäts-Verlag, 2007.
- [Maur07] M. Maurer, "Structural Awareness in Complex Product Design," Dr. Hut, Munich, Germany, 2007.
- [Maur11] M. Maurer, "Systematic Knowledge Transfer Based on Knowledge Correlations," in *International Conference on Research into Design*, 2011.
- [MaWe04] C. Magee & O. de Weck, *Complex system classification*. 2004.
- [MBCD09] M. Maurer, W. Biedermann, M. Cole, J. D'Avanzo, & D. Dickmanns, "Airport Security: From Single Threat Aspects to Valid Scenarios and Risk Assessment," in *1st Annual Global Conference on Systems and Enterprises (GCSE)*, 2009.
- [MRRH07] H. McManus, M. Richards, A. M. Ross, & D. E. Hastings, "A Framework for Incorporating 'ilities' in Tradespace Studies," in *AIAA Space*, 2007, pp. 1–14.
- [NeTM03] S. Negash, R. Terry, & I. Magid, "Quality and effectiveness in web-based customer support systems," *Inf. Manag.*, vol. 40, no. 8, pp. 757–768, 2003.
- [ReBe94] C. A. Reeves & D. A. Bednar, "Defining quality: alternatives and implications," *Acad. Manag. Rev.*, vol. 19, no. 3, pp. 419–445, 1994.
- [Rich01] K. A. Richardson, "On the Status of Natural Boundaries: A Complex Systems Perspective," in *Systems in management 7th annual ANZSYS conference*, 2001, pp. 229–238.
- [RoRH08] A. M. Ross, D. H. Rhodes, & D. E. Hastings, "Defining changeability: Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value," *Syst. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 246–262, 2008.
- [RRSH09] M. G. Richards, A. M. Ross, N. B. Shah, & D. E. Hastings, "Metrics for evaluating survivability in dynamic multi-attribute tradespace exploration," *J. Spacecr. Rockets*, vol. 46, no. 5, pp. 1049–1064, 2009.
- [SaMa96] R. Sanchez & J. T. Mahoney, "Modularity, Flexibility, and Knowledge Management in Product and Organization Design," *Strateg. Manag. J.*, vol. 17, pp. 63–76, 1996.
- [Stew81] D. V. Steward, "Design Structure System: A Method for Managing the Design of Complex Systems," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. EM-28, no. 3, pp. 71–74, 1981.
- [TaMc06] A. R. Tan & T. C. McAloone, "Characteristics of Strategies in Product/Service-System Development," in *International Design Conference – Design 2006*, 2006.
- [WeRR12] O. de Weck, A. Roos, & D. Rhodes, *Investigating Relationships and Semantic Sets amongst System Lifecycle Properties (Ilities)*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge: , 2012.
- [Žiha00] K. Žiha, "Redundancy and robustness of systems of events," *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 15, no. 4, pp. 347–357, 2000.



## 2.2 Modellbasiertes disziplinübergreifendes Management von IT-Zyklen in Innovationsprozessen

*Vogel-Heuser, B.; Kernschmidt, K.<sup>2</sup>*

In diesem Kapitel wird aus Sicht der Informationstechnik (IT) aufgezeigt, wie die IT-Zyklen während des Lebenszyklus mechatronischer PSS bei der disziplinübergreifenden Entwicklung und bei der Analyse von Änderungsauswirkungen in Betracht gezogen werden können. Nach einer Beschreibung der Ausgangssituation (Kapitel 2.2.1) wird zunächst aufgezeigt, welche Herausforderungen im Maschinen- und Anlagenbau aus Sicht der Industrie bezüglich IT-Zyklen, insbesondere im Hinblick auf eine interdisziplinäre Modularisierung bestehen (Kapitel 2.2.2). Die resultierenden Anforderungen bilden die Basis für den interdisziplinären Modellierungsansatz für mechatronische Systeme, welcher in Kapitel 2.2.3 vorgestellt wird. In späteren Phasen des Lebenszyklus mechatronischer Systeme kann das so erstellte Modell dann verwendet werden, um Änderungsauswirkungen zu analysieren (Kapitel 2.2.4). Neben der modellbasierten Entwicklung ergibt sich somit ein weiterer Vorteil zum Management von IT-Zyklen über die gesamte Lebensdauer mechatronischer Systeme.

### 2.2.1 Ausgangssituation, Motivation und Zielstellung

In mechatronischen Systemen und PSS trägt die Informationstechnik (IT) zu einem stetig steigenden Anteil zur Funktionserfüllung bei. IT umfasst dabei sowohl die zur Informations- und Datenverarbeitung notwendige Software als auch die Hardware (Elektronik/Elektrotechnik). Trotz des hohen Innovationsfaktors der IT werden bis heute die Abhängigkeiten zwischen IT-Zyklen und Zyklen anderer Disziplinen im Innovationsprozess nicht ausreichend berücksichtigt. Bereits bei der Entwicklung solcher Systeme müssen deshalb die Abhängigkeiten der IT-Komponenten, welche am schnelllebigsten sind, zu Komponenten aus anderen

---

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Deutschland  
E-Mail: {vogel-heuser, kernschmidt}@ais.mw.tum.de  
Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Teilprojekts A6

Disziplinen in Betracht gezogen werden, um die optimale Gesamtfunktionalität des Systems während des Gesamtlebenszyklus des Systems zu gewährleisten.

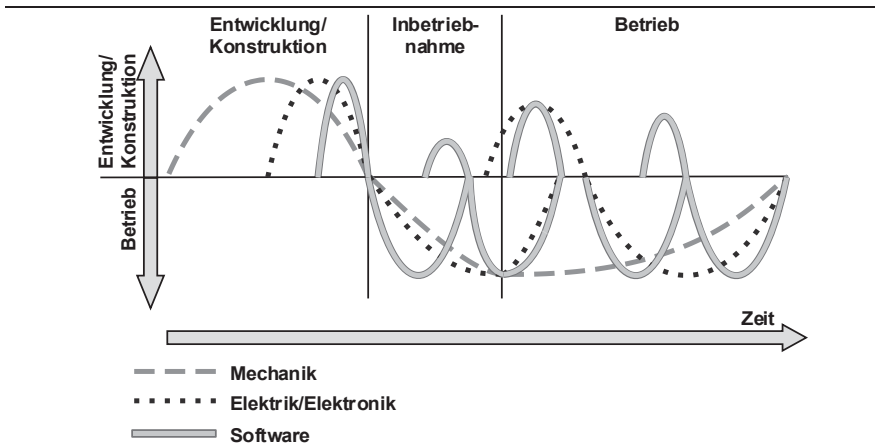


Abbildung 2.6: Unterschiedliche Lebenszyklen der verschiedenen Disziplinen in mechatronischen Systemen (nach [LBKV12])

Durch die kürzeren Zyklen sowohl der Software als auch der Elektrik/Elektronik (siehe Abbildung 2.6) kommt es in späteren Lebenszyklusphasen des Gesamtsystems häufig zu Änderungen oder Updates [LBKV12]. Typische Zyklenauslöser sind dabei neue Produktfunktionalitäten die zu einem späteren Zeitpunkt integriert werden sollen. Die Integration neuer Funktionalitäten in das Produkt hat dabei ebenfalls Auswirkungen auf die zur Erstellung des neuen Produkts erforderliche Fertigungsanlage und somit auch auf deren Entwicklungsprozess. Je nach Betrachtungsgegenstand des jeweiligen Unternehmens kann die Fertigungsanlage auch selbst das Produkt darstellen, deren Funktionen über die Zeit verändert werden sollen. Neben den Anforderungen nach neuen Produktfunktionalitäten können Auslöser für nötige Änderungen in der Fertigungsanlage aber auch ‚erzwungene‘ Innovationen sein, wenn beispielsweise ein benötigter elektrischer Chip nicht mehr am Markt verfügbar ist und somit eine neue Lösung geschaffen werden muss. Ziel eines geeigneten Zyklensmanagements ist es, die Auswirkungen solcher Änderungen vor der Integration in das reale System modellbasiert zu analysieren und den Entwicklern zu visualisieren.

Basierend auf dieser Ausgangssituation ergibt sich somit die Notwendigkeit, IT-Zyklen ganzheitlich zu betrachten und zu modellieren. Bei heutigen Entwicklungen stellt die Mechanik oftmals das führende Gewerk dar, welches beispielsweise die Modularisierung vorgibt. Durch die mangelhafte Synchronisation der Zyklen mit denen der IT, entstehen somit Zwänge für die IT-Entwicklung und die darin enthaltenen IT-Zyklen, die zu mangelhaften Ergebnissen z. B. hinsichtlich der

Produkteigenschaften, Qualität, Wiederverwendbarkeit und Standardisierung sowie bei späteren Änderungen führen können.

## 2.2.2 Innovationstrigger und -hemmer der IT-Zyklen im Maschinen- und Anlagenbau

Die stetig steigende Komplexität im Maschinen- und Anlagenbau, gepaart mit immer kürzeren Lebenszyklen, stellen eine große Herausforderung für das Engineering dar. Paradigmenwechsel, Modularisierung, das Varianten/Versions-Management sowie Datenintegration sind zwar bereits seit längerem bekannt, jedoch stellen sie, aufgrund unzureichender Modellierungsansätze und Tool-Lösungen, immer noch wichtige Herausforderungen für das Engineering im Maschinen- und Anlagenbau dar [Voge09]. Im Rahmen einer Interviewreihe mit Experten aus verschiedenen Maschinen- und Anlagenbau Unternehmen wurden deshalb entsprechende Innovationstrigger und -hemmer genauer identifiziert und deren Ursachen spezifiziert [LBKV12, LiLV14]. Die befragten Unternehmen decken mit ihren Portfolios die Bereiche Fertigungsautomatisierung, Prozessautomatisierung, industrielle Automatisierungstechnik, und Technologie Service-Provider für interne und externe Kunden ab. Schlüsselfragen bezogen sich dabei auf die aktuelle Verwendung, bestehende Ansätze und erwartete Lösungen in den oben genannten Bereichen.

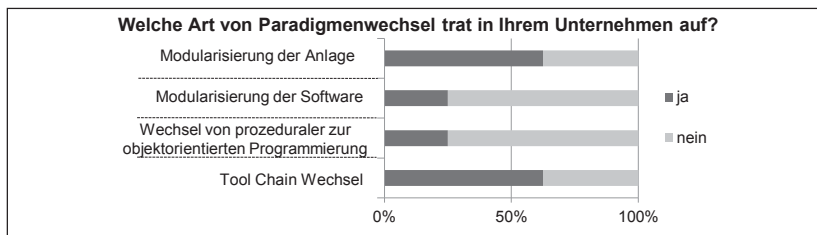


Abbildung 2.7: Wichtige Paradigmenwechsel aus Sicht der befragten Unternehmen (nach [LBKV12])

80% der befragten Unternehmen gaben an in letzten Jahren starke Veränderungen bei bestimmten Vorgehensweisen (sogenannte Paradigmenwechsel) vorgenommen zu haben bzw. diese in Kürze vorzunehmen. Zu den wichtigsten genannten Paradigmenwechsel der befragten Unternehmen (siehe Abbildung 2.7) zählt insbesondere die Modularisierung (sowohl des Systems als auch der Software). Um die individuellen Kundenbedürfnisse schnell und effizient erfüllen zu können sowie eine Reduktion der Komplexität bei der Integration der Komponenten aus verschiedenen Disziplinen in das mechatronische Gesamtsystem zu erreichen, ist nach Meinung der befragten Experten der Einsatz von standardisierten und wiederverwendbaren Modulen anzustreben. Insbesondere das Software Engineering, mit seiner hohen Innovationsfrequenz, spielt eine entscheidende Rolle für die Maschinen-/Anlagenautomatisierung. Bisher werden

Änderungen vornehmlich durch Adaption einer bestehenden Variante oder Version vorgenommen und beziehen andere Disziplinen nicht mit ein. Aufgrund des fehlenden Wissens über die interdisziplinären Zusammenhänge kann es so jedoch zu unerwarteten und unerwünschten Stillstandszeiten der Anlage kommen. Darum sollten bei einer Modularisierung (der Software) sowohl die disziplinspezifischen als auch die interdisziplinären Abhängigkeiten in Betracht gezogen werden.

Der Paradigmenwechsel von prozeduralen zu objektorientierten Programmiersprachen (z. B. C  $\rightarrow$  C++, oder die Objektorientierte Erweiterung der IEC 61131-3 [Inte13]) ermöglicht bereits eine effizientere Modularisierung und, wenn entsprechende Interfaces vorgesehen werden, Wiederverwendung der Softwarebausteine. Hierbei muss jedoch überprüft werden, ob es möglich ist, dieselben Modulgrenzen in der Software wie in der elektrischen/elektronischen oder mechanischen Struktur zu erlangen.

Als weiterer wichtiger Paradigmenwechsel wurde eine Änderung in der Software Toolkette genannt. Nach Ansicht der Experten haben dabei insbesondere folgende Änderungen starken Einfluss auf den Engineeringlebenszyklus:

- Austauschen eines Tools durch ein anderes: Beim Austausch eines disziplinspezifischen Tools sind passende Schnittstellen oder zusätzliche IT-Anwendungen notwendig, um den Datenaustausch mit den Tools der anderen Disziplinen zu ermöglichen und somit Dateninkonsistenz zu vermeiden.
- Einbringen eines neuen Tools: Hierbei wird nicht nur das existierende Vorgehen im Engineeringlebenszyklus beeinflusst, sondern auch die Datenkonsistenz über den Engineeringlebenszyklus muss gewährleistet werden.
- Nutzung eines interdisziplinären Engineeringtools: Zur interdisziplinären Entwicklung von mechatronischen Fertigungssystemen wurden in letzter Zeit Engineeringtools wie Eplan Engineering Center<sup>3</sup> oder Comos<sup>4</sup> (Automation Designer) entwickelt, die in verschiedenen Engineeringphasen und zur Darstellung unterschiedlicher Sichten auf das System verwendet werden können. Zum Datenaustausch mit den etablierten disziplinspezifischen Tools sind jedoch entsprechende Schnittstellen notwendig.

---

<sup>3</sup> <http://www.eplan.de/de/loesungen/mechatronik/eplan-engineering-center>

<sup>4</sup> <http://www.automation.siemens.com/mcms/plant-engineering-software>

Die Interviews haben gezeigt, dass Modularisierung nicht nur einen wichtigen Innovationsfaktor und Trend in der Software bzw. für das Engineering des gesamten mechatronischen Systems darstellt, sondern auch große Herausforderungen birgt, da der Druck zu einer Verkürzung des Time-to-Market und niedrigeren Preisen stetig steigt, aber geeignete Lösungen für ein Modulmanagement fehlen. Die Interviewfragen fokussierten sich deshalb auf die Identifikation von Anforderungen für die Entwicklung eines interdisziplinären Modulmanagements, welches die modellbasierte Entwicklung einer Maschine oder Anlage aus wohldefinierten und wiederverwendbaren interdisziplinären Modulen ermöglicht. Etwa 90% der befragten Unternehmen haben geplant eine Modularisierung ihrer Maschinen/Anlagen vorzunehmen. Abbildung 2.8 zeigt, dass Mechanik, Elektrik/Elektronik und Software als Kernbestandteile interdisziplinärer Module gesehen werden.

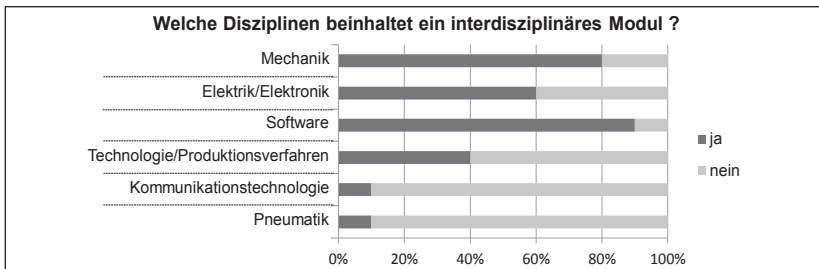


Abbildung 2.8: Betrachtete Disziplinen eines interdisziplinären Moduls (nach [LBKV12])

Als ein Defizit bei der Modularisierung sehen die befragten Unternehmen (Abbildung 2.9), dass Module, als funktionale, wiederverwendbare Einheiten verschiedener Komponenten, nur in disziplinspezifischen Tools (z. B. MCAD, ECAD, Software) gebildet werden können. Die Inkompatibilität der verschiedenen Engineeringssysteme und das Fehlen eines interdisziplinären Tools führen dazu, dass unterschiedliche, disziplinspezifische Modulmanagement Konzepte notwendig sind. Dementsprechend ist die Wiederverwendung von Modulen auf die jeweilige Disziplin und das jeweilige Tool beschränkt.

Innovationsprozesse zyklenorientiert managen  
Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen  
Vogel-Heuser, B.; Lindemann, U.; Reinhart, G. (Hrsg.)  
2014, XII, 247 S. 80 Abb., Hardcover  
ISBN: 978-3-662-44931-8