

# Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik

Dr. Matthias Tichy, Felix Oestersötebier, Thomas Schierbaum

Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn

## Zusammenfassung

Produktinnovationen des modernen Maschinenbaus beruhen zunehmend auf dem engen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik und Softwaretechnik. Dafür steht der Begriff Mechatronik. Ein technisches Produkt ist dabei immer das Ergebnis einer Branchenwertschöpfungskette, in der der Hersteller eines Produktes oftmals auch Lieferant eines Bauteils für das nächste Unternehmen in der Wertschöpfungskette ist. Problematisch hierbei ist, dass die Auswahl von Lieferanten und deren Produkten oftmals auf langjährigen Lieferantenbeziehungen bzw. dem Erfahrungswissen des Entwicklers basiert und damit naturgemäß deutlich eingeschränkt ist.

Hier setzt das Projekt ENTIME „Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik“ an. Ziel ist es Techniken des Semantic Web einzusetzen, um diesen Auswahlprozess im Entwurf eines mechatronischen Systems deutlich zu verbessern. Im Semantic Web werden zusätzlich für die einzelnen Lösungsmuster und Lösungselemente simulationsfähige Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad abgelegt, die es dem Entwickler ermöglichen, bereits frühzeitig im Prozess Simulationen des Systems durchzuführen. Wir veranschaulichen die Konzepte an einem Robotersystem. Es handelt sich um zwei interagierende Delta-Roboter, die hohe regelungstechnische Anforderungen stellen.

# 1 Einleitung

Der Einsatz von Software ermöglicht dem modernen Maschinenbau die Entwicklung innovativer Systeme. Im Bereich der Automobilindustrie sind derzeit bereits 30-40% der Wertschöpfung und 90% der Produktinnovation getrieben durch die eingebettete Software [Fürst10]. Das enge Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik/Elektrotechnik, Regelungs- und Softwaretechnik und ggf. neuen Werkstoffen drückt der Begriff Mechatronik aus. Mechatronische Systeme ermöglichen Funktions- und Verhaltensverbesserungen sowie eine Reduzierung von Baugröße, Gewicht und Kosten.

Die Entwurfstechnik für mechatronischer Systeme muss der steigenden Komplexität sowie dem wachsenden Zeit- und Kostendruck gewachsen sein. Hierbei ist der Trend zu erkennen, dass Entwurfsaufgaben zwischen Nachfrager und spezialisiertem Anbieter von Lösungselementen geteilt werden. Lösungselemente sind realisierte und bewährte Lösungen – Baugruppen, Module, Softwarebibliotheken etc. – die eine oder mehrere Funktionen des Gesamtsystems erfüllen. Lösungselemente bestehen aus verschiedenen Aspekten, wie zum Beispiel Struktur, Verhalten und Gestalt. Diese weisen unterschiedliche Konkretisierungsstufen auf, die den Phasen des Entwicklungsprozesses entsprechen.

Eine geschickte Auswahl und Komposition zugekaufter Lösungselemente und Eigenentwicklungen ist daher von entscheidender Bedeutung. Folgende Fragestellung ist dabei wesentlich: Finden die Entwickler im vorliegenden Angebot geeignete Lösungselemente, um diese zu einer bestmöglichen Gesamtlösung zu kombinieren?

Oftmals wählen die Entwickler hierbei nur die Lösungselemente von Anbietern aus, die Ihnen durch langjährige Kooperationen bekannt sind. Dies bedeutet, dass nicht die besten Lösungselemente ausgewählt werden und hierdurch die Innovation eingeschränkt wird. Auch die in der Vergangenheit von Lösungselementherstellern entwickelten Online-Kataloge bieten nur eine eingeschränkte Lösung. So sind diese Online-Kataloge zwar einfach zu durchsuchen, aber es muss die konkrete Terminologie der Lösungselementhersteller und -nachfrager zusammenpassen. Dies ist derzeit nicht der Fall.

Ziel des Projekts ENTIME „Entwurfstechnik intelligente Mechatronik“ ist ein Entwurfsinstrumentarium, das auf Basis semantischer Technologien diese Lücke zwischen der Sicht der Entwickler und der Sicht der Anbieter von Lösungselementen schließt. Nur so ist es möglich, das vorhandene Angebot auszuschöpfen, um neue und bessere Lösungen zu erhalten.

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2206 [VDI2206] gliedert sich der Prozess, der im Projekt ENTIME verfolgt wird, für den Entwurf eines mechatronischen Systems in die in Bild 1 dargestellten Phasen „fachgebietsübergreifende Konzipierung“ und „fachgebietspezifische Konkretisierung“. Es handelt sich um einen funktionsorientierten

Entwurf, der seinen Ursprung in der klassischen Konstruktionslehre nach PAHL/BEITZ [PBF+07] hat. Die wiederkehrenden Prozessschritte, die sowohl in der Konzipierung als auch in der Konkretisierung durchlaufen werden, sind Zielbestimmung, Synthese und Analyse. Ergebnis der Konzipierung ist die Prinziplösung. Sie bildet die Grundlage für die Konkretisierung und wird im Rahmen der fachspezifischen Ausarbeitung weiterentwickelt [GSA+11]. Die Ausarbeitung erfolgt in den jeweiligen Domänen.

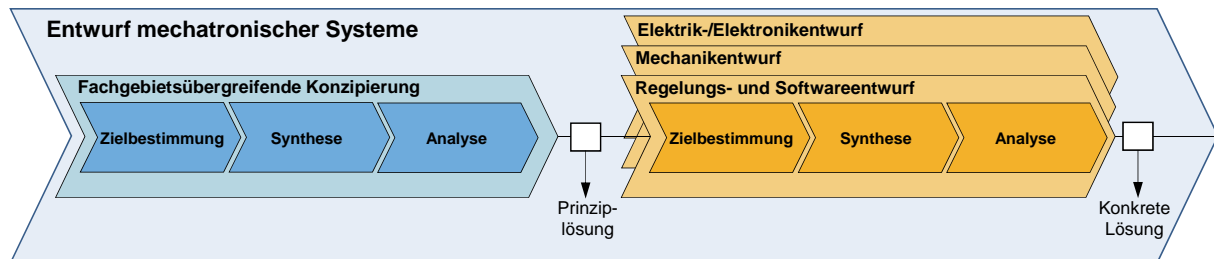


Bild 1: Vorgehensmodell für den Entwurf mechatronischer Systeme

Demonstrator des Projekts ENTIME ist ein Robotersystem bestehend aus zwei identisch aufgebauten Robotern mit einer Delta-Kinematik sowie drei Elektromotoren (siehe Bild 2). Im Tool-Center-Point ist eine Spielplatte angebracht, die das Zuspielen eines Balls zwischen den beiden Robotern ermöglicht. Eine externe Erfassung zur Ermittlung der Flugkurve und des Auftreffpunkts erfolgt nicht. Jeder Roboter agiert autonom und berechnet die voraussichtliche Flugbahn des Balls. Hierzu werden zwischen den Robotern Informationen ausgetauscht.

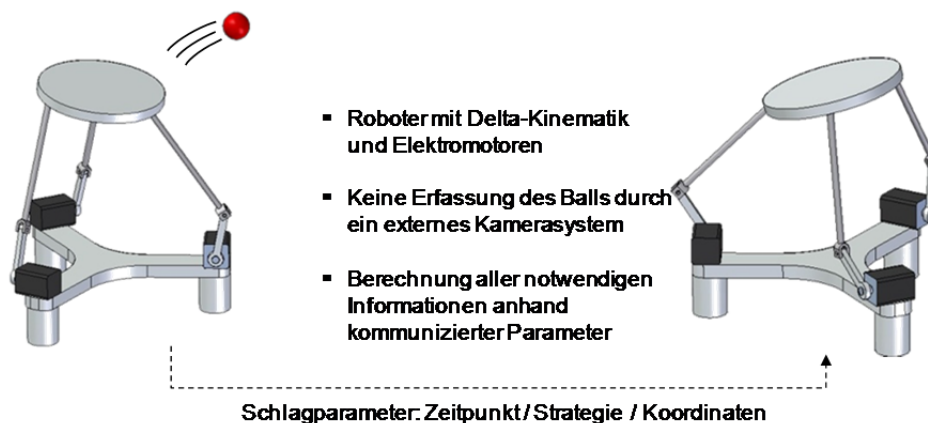


Bild 2: Grundaufbau des ENTIME-Demonstrators

Im folgenden Abschnitt erläutern wir den in ENTIME verfolgten Entwicklungsprozess. Abschnitt 2.1 beschreibt die Aktivitäten in der disziplinübergreifenden Konzipierung während Abschnitt 2.2 die folgenden Schritte in der Konkretisierung erläutert. Wir schließen mit einem Resümee und Ausblick auf zukünftige Arbeiten in Abschnitt 3.

## 2 Entwicklungsprozess

### 2.1 Konzipierung

Die fachdisziplinübergreifende Konzipierung beginnt mit der Zielbestimmung (siehe Bild 3). Dazu wird im Rahmen der Phase *Planen und Klären der Aufgabe* die Aufgabenstellung abstrahiert, um den Kern der Entwicklungsaufgabe zu identifizieren. Anschließend wird das Umfeldmodell erstellt. Mit dessen Hilfe werden die Randbedingungen und Einflüsse, die auf das System wirken, ermittelt. Die gesammelten Erkenntnisse aus den Anwendungsszenarien und dem Umfeldmodell werden in der Anforderungsliste dokumentiert. Diese ist die Basis für die Definition der erforderlichen Funktionen des Gesamtsystems. Die Funktionen werden durch die Funktionshierarchie repräsentiert. Mit der Erstellung der Funktionshierarchie ist die Zielbestimmung abgeschlossen.

Die Synthese beginnt mit der Suche nach Lösungsmustern mithilfe des Semantic Web. Die Auswahl erfolgt in drei Schritten: Suche, Filterung und Kombination. Diese Schritte werden später näher erläutert. Anschließend wird die Wirkstruktur modelliert sowie die Verhaltens- und Gestaltmodelle. In der nächsten Phase erfolgt eine Analyse des Systems. Im Folgenden fokussieren wir auf die Analyse des dynamischen Verhaltens. Abschließend findet eine Bewertung des zu entwickelnden Systems statt. Werden alle Anforderungen gemäß der Zielbestimmung erfüllt ist die Konzipierung abgeschlossen und eine komplette Prinziplösung [Fra06] erstellt.

#### Fachgebietsübergreifende Konzipierung

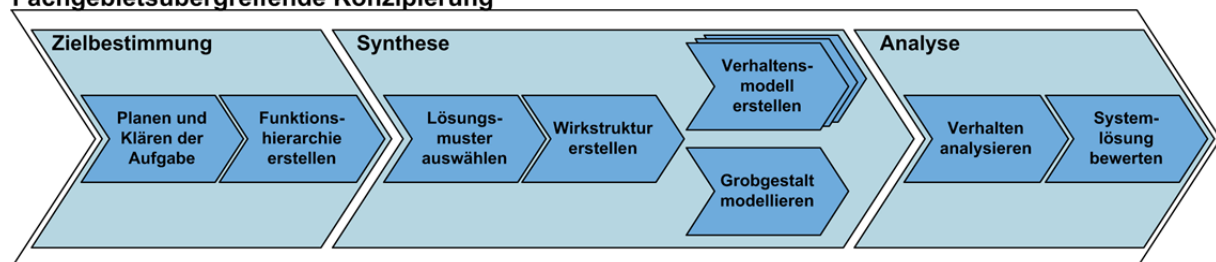


Bild 3: Wesentliche Phasen in der fachgebietsübergreifenden Konzipierung

Die Phase *Lösungsmuster auswählen* soll nun näher erläutert werden. Ein Lösungsmuster beschreibt allgemein den Kern der Lösung für ein in einem bestimmten Kontext wiederkehrendes Problem [AIS+77]. Dabei wird das Lösungsmuster in abstrakter Form dargestellt und beschreibt unter anderem die Struktur und das Verhalten in verallgemeinerter Form [GSA+11]. Die Suche nach geeigneten Lösungsmustern wird auf Basis des Aspekts Funktionen, welcher den Lösungsmustern als Information angehängt ist (siehe Bild 4), durchgeführt. Es werden diejenigen gefunden, die eine oder mehrere der geforderten Funktionen erfüllen.

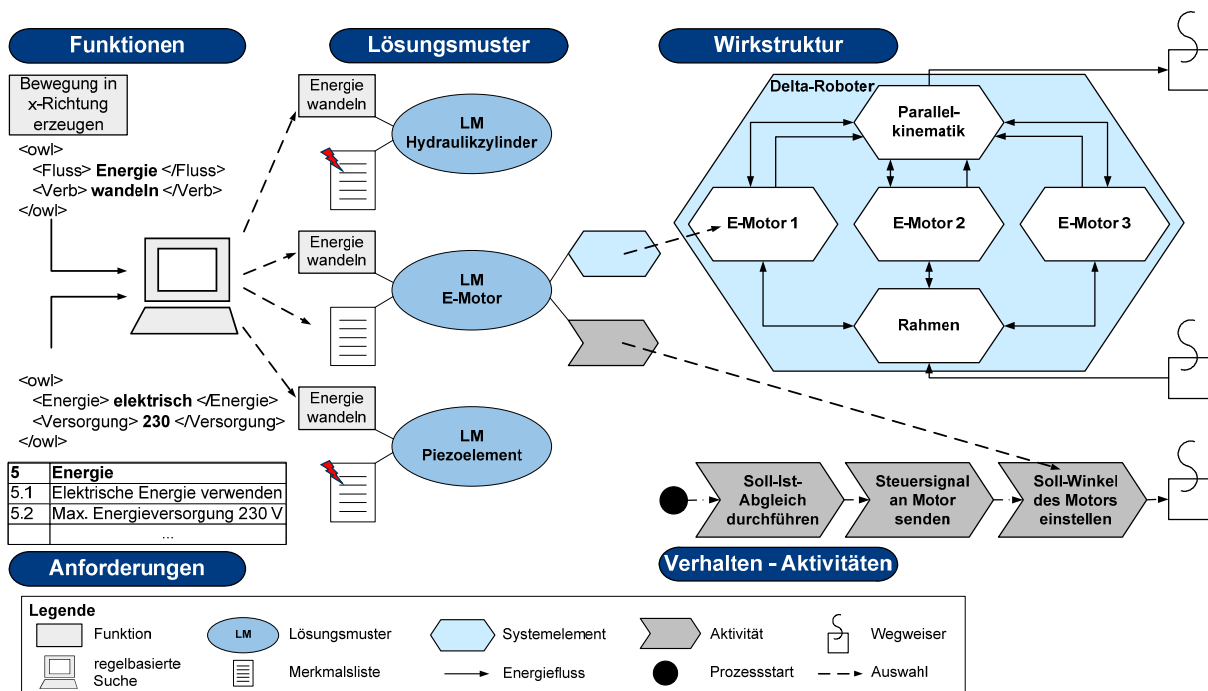


Bild 4: Auswahl von Lösungsmustern und deren Synthese

Grundlage hierfür ist ein Katalog mit allgemeinen Funktionen, der auf den Arbeiten von BIRKHOFFER [Bir80] und LANGLOTZ [Lan00] basiert. Solche Funktionen können z.B. *Energie wandeln*, wie es für den Demonstrator benötigt wird, oder *Stoff leiten* sein. Ein Elektromotor beispielsweise erfüllt die Funktion *Energie wandeln*. In einem nächsten Schritt werden auf Basis der Anforderungen die Lösungsmuster gefiltert. Der Aspekt Merkmale gibt dabei das Intervall eines bestimmten Leistungsparameters an (z.B. 500-6000 U/min). Es werden diejenigen Lösungsmuster ausgewählt, deren Intervall die Anforderungen erfüllt. Jedes Lösungsmuster wird als Systemelement in der Wirkstruktur abgebildet (siehe Bild 4). Im dritten Schritt *Kombination*, wird diese durch mögliche Verbindungen der Systemelemente untereinander erreicht. Der Elektromotor hat drei eingehende Energieflüsse (mechanische Verbindung zum Rahmen und zur Parallelkinematik sowie elektrische Energie) sowie einen ausgehenden Energiefluss (rotatorische Energie). Die Systemelemente welche mit dem Elektromotor verbunden werden, müssen zu diesen Größen kompatibel sein.

In Bild 5 wird die Wirkstruktur des im Rahmen des Projekts ENTIME entwickelten Demonstrators dargestellt. Dieses Partialmodell stellt die meisten Anknüpfungspunkte für die domänenspezifische Ausarbeitung bereit. Selbstredend sind alle Informationen der Prinziplösung für die weitere Ausarbeitung notwendig und relevant.

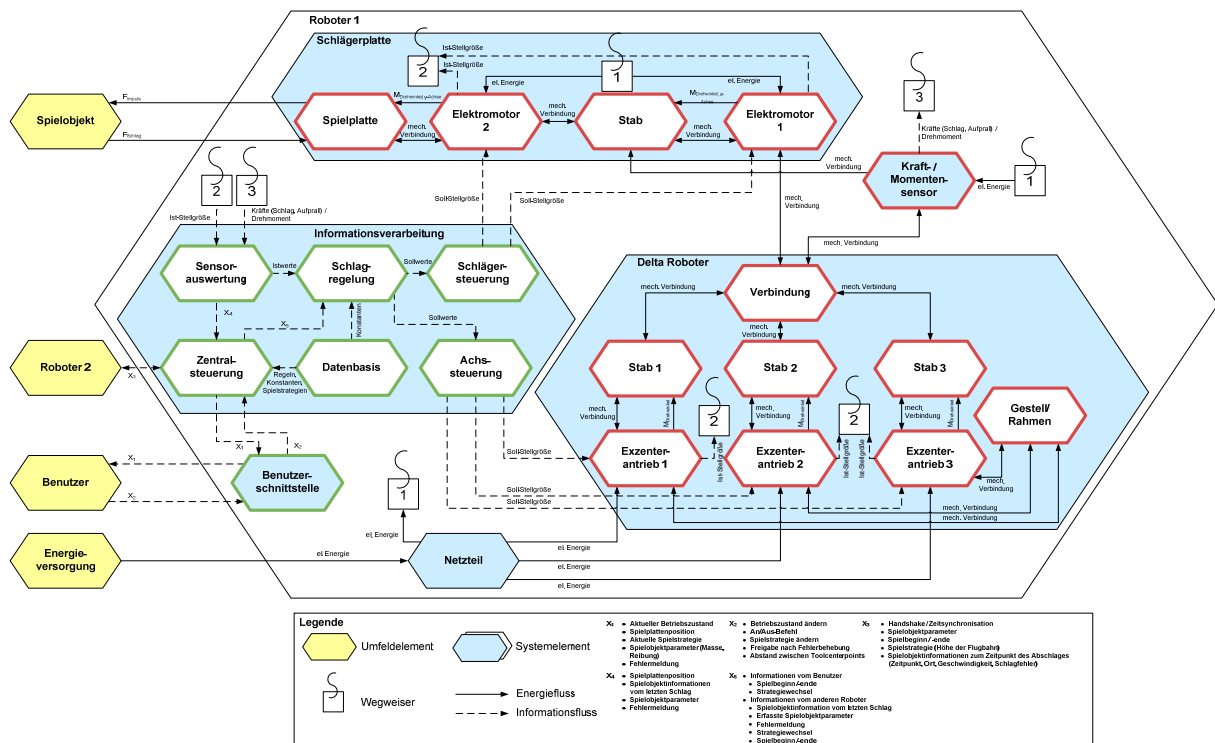


Bild 5: Wirkstruktur eines Roboters des Demonstrators

Auf Basis der Prinziplösung lässt sich eine erste Aussage über das dynamische Verhalten des Systems tätigen. Die Analyse der Dynamik der Prinziplösung erfolgt mithilfe von Simulationsmodellen. Solche Modelle des zu entwickelnden Systems sind heute zentraler Bestandteil beim Entwurf mechatronischer Systeme. Es existieren Modelle unterschiedlichster Ausprägung und Detaillierung, die den Entwicklungsingenieuren der verschiedenen Domänen schon vor dem ersten Aufbau eines Prototypens wichtige Erkenntnisse geben können. Vor allem für die Entwicklung anspruchsvoller, hochdynamischer Regelungen ist ein geeignetes Modell als Basis notwendige Voraussetzung. Zur domänenübergreifenden Modellierung und Analyse der physikalisch-technischen Prinzipien der Prinziplösung und deren Zusammenspiel eignen sich besonders Modellierungssprachen wie Modelica.

Der Detaillierungsgrad der idealisierten Lösungsmuster-Modelle ist aufgrund Ermangelung genauerer Informationen „nur“ so hoch, dass das zugrunde liegende physikalische Prinzip wiedergegeben wird. Mit Blick auf das Zusammenspiel von Teilsystemen aus verschiedenen Domänen und der möglichen Anzahl von Prinziplösungen stellt die Modellierung dennoch einen erheblichen Aufwand dar. Es bietet sich daher an, wiederkehrenden Lösungsmustern entsprechende Modellrepräsentationen zuzuordnen und ebenfalls in einer Ontologie zu speichern. Darüber hinaus bietet die Wirkstruktur des Systems den Ausgangspunkt der Modellbildung. Durch die semantische Verknüpfung von Systemelementen in der Wirkstruktur, Gestaltmodell, Lösungsmuster und deren Modellen kann diese sogar teilautomatisiert werden (siehe Bild 6 – links).

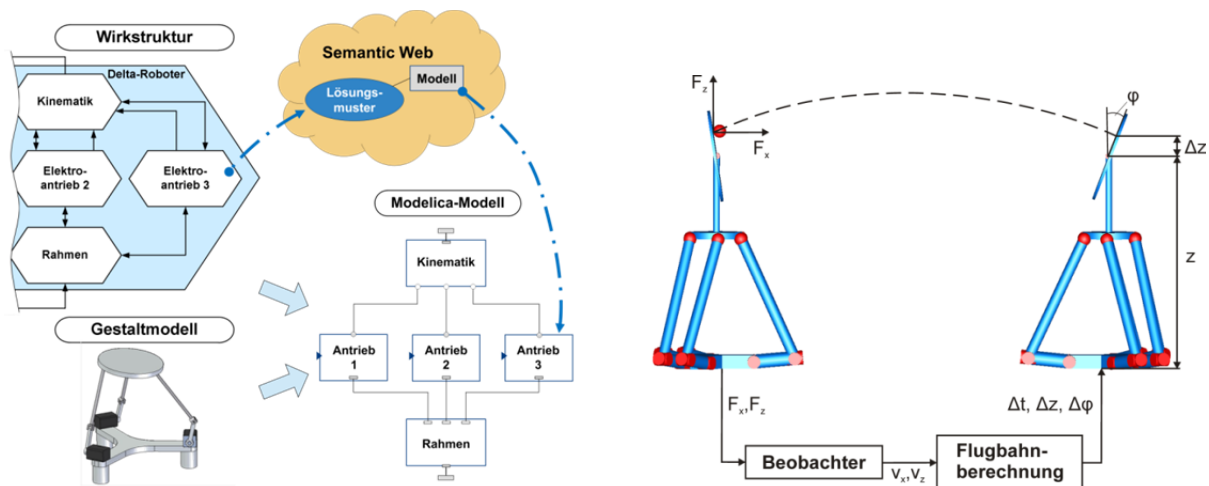


Bild 6: Modellbildung und Regelungskonzept

Auf Basis der einfachen, idealisierten Lösungsmuster-Modelle lässt sich das Konzept der Steuerung und Regelung erarbeiten und erproben (siehe Bild 6 – rechts), sodass der Funktionsnachweis des zu entwickelnden Systems erbracht werden kann. Im Zuge dessen werden auch weitere Randbedingungen und Anforderungen an das mechanische Grundsystem festgelegt, die Sensorik und die Aktorik konkretisiert und somit der Lösungsraum weiter eingeschränkt.

Bei der modellbasierten Analyse des ursprünglich gewählten Prinzips zum Spielen des Balles konnte festgestellt werden, dass der Arbeitsraum der Delta-Roboter aufgrund der Verkopplung von Schlägerneigung und Position nicht ausreichend ist. Daher wurde die Prinziplösung um eine Schlägerplatte und zwei zusätzliche Drehgelenke inklusive Aktorik erweitert. So wird eine quasistatische Verstellung der Schlägerneigung ermöglicht. Da die Anforderungen an das System optische Sensoren ausschließen, müssen Ballposition und –geschwindigkeit auf andere Art und Weise bestimmt, d.h. beobachtet werden. Dies geschieht durch Messung der Aufprallkräfte auf der Schlagplatte, die in einem Flugbahnbeobachter ausgewertet werden. Der Beobachter berechnet dann den korrekten Schlagzeitpunkt und die erwartete Auftreffposition für den Mitspieler voraus (siehe Bild 6 – rechts).

## 2.2 Fachgebietsspezifische Konkretisierung

Ausgangspunkt für die Konkretisierung ist die Prinziplösung. Zu Beginn werden die Partialmodelle in die domänenspezifischen Modelle transferiert. Das Vorgehen in der Konkretisierung wird in Bild 7 näher erläutert. Im Folgenden wird der Fokus auf die Regelungstechnik gelegt.



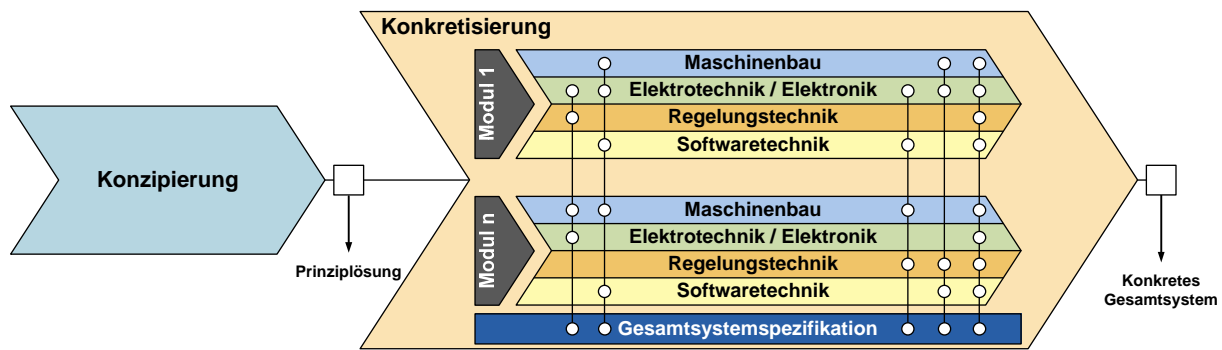


Bild 7: Konkretisierung der Prinziplösung

Die am idealisierten LM-Modell konkretisierten Anforderungen bilden die Basis zur Suche nach Lösungselemente in den einzelnen Disziplinen. Durch das Simulationsmodell der Prinziplösung werden Zielwerte für charakteristische Größen, wie Parameter oder Kennlinien des jeweiligen Systemelements spezifiziert. Diese „harten“ Kriterien bieten den Ausgangspunkt zur herstellerübergreifenden, semantischen Suche nach Lösungselementen, weil sie direkt oder indirekt mit den Kenndaten verfügbarer Produkte in Verbindung stehen. Um diese Zusammenhänge maschinenlesbar zu machen, bedarf es der Annotation von semantischen Informationen und Regeln. Solche werden mithilfe von Ontologien (siehe [HKR+08]) definiert. Darüber hinaus können hierin im zweiten Schritt auch „weiche“ Faktoren hinterlegt werden, z.B. geringes Anlaufmoment eines Kondensatormotors. Dieses Expertenwissen kann mit den spezifizierten Anforderungen verglichen werden und dem Entwickler darüber hinaus Entscheidungshilfen zur Produktauswahl geben. Durch die semantische Verknüpfung der jeweiligen Parameter und Modelle wird so bei der Suche von Lösungselementen automatisch eine Vorauswahl relevanter Lösungselemente getroffen.

Im Zuge der Konkretisierung werden die Lösungsmuster durch konkrete Lösungselemente ersetzt. Lösungselemente sind daher ebenfalls mit Dynamikmodellen verknüpft, die sich allerdings durch eine höhere Modellierungstiefe auszeichnen und demzufolge eine realitätsnähere Simulation durch Einbeziehung weiterer physikalischer und technischer Effekte ermöglichen, um die Systemabstimmung unter realeren Bedingungen zu analysieren und weiter zu optimieren. Wurde auf Lösungsmuster-Ebene lediglich das technologische Prinzip von z. B. Aktoren abgebildet, so bedarf es nun einer Modellierung der detaillierten, produktspezifischen Eigenschaften, die zum Beispiel auch systemeigene Störgrößen beinhalten können. Dies setzt einen sehr viel höheren Detailierungsgrad des Modells voraus und erfordert überdies detailliertes Wissen (z.B. genaue Messungen) über die eingesetzten Komponenten. In [Wit02] wird daher vorgeschlagen, dass Lösungselement-Lieferanten ihren Kunden dieses Wissen in Form von dynamischen Modellen zur Verfügung stellen, ähnlich wie es vielfach bereits mit CAD-Modellen gehandhabt wird. Denkbar ist auch, dass herstellerübergreifende Modelle von Lösungselementgruppen genutzt werden, die produktspezifisch parametrisiert sind. Diese LE-Modelle werden dann ebenfalls aufberei-



tet, sodass sie über die Suche im Semantic Web gefunden und automatisch parametrisiert werden.

Während des Entwurfsprozesses finden Modelle für Lösungsmuster (LM) und Lösungselemente (LE) mit wachsendem Detaillierungsgrad Verwendung. Des Weiteren beinhaltet der mechatronische Entwurfsprozess in der Regel zahlreiche Iterationen. Für die praktische Umsetzung ist es deshalb wichtig, dass sich Simulationsmodelle unterschiedlicher Detaillierung im Gesamtmodell des Systems einfach gegeneinander austauschen lassen. Hierzu ist die Einführung von einheitlichen Modellschnittstellen notwendig. Diese stellen die zur Erfüllung der Funktion erforderlichen Minimal-schnittstellen dar.

Vor dem Hintergrund von für den Entwickler über das Semantic Web zugänglichen Modelldatenbanken/-bibliotheken bietet sich der Ansatz der topologie- und objektorientierten Modellierung an, wie er etwa mit der Modellierungssprache Modelica [Ott99] verfolgt wird. Diese ermöglicht darüber hinaus die domänenübergreifende Simulation. Die Systemgrenzen und Schnittstellen können dort mithilfe eines „Interface-Modells“ festgelegt werden. Mithilfe von Vererbung werden die so definierten Minimalschnittstellen des Interface-Modells an die idealisierten LM-Modelle und an die detaillierten LE-Modelle weitergereicht.

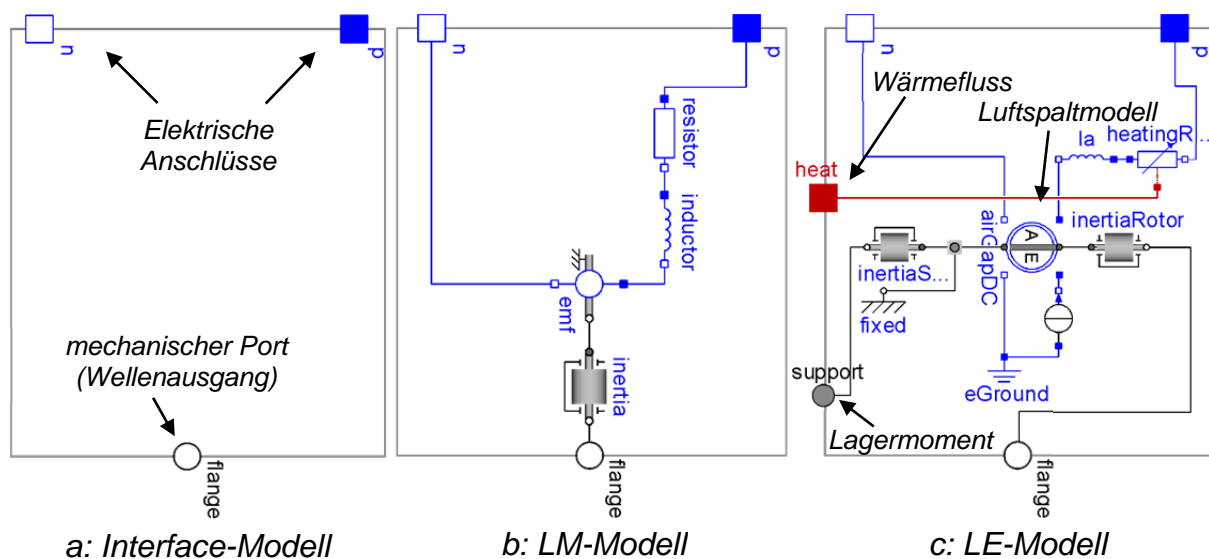


Bild 8: Schnittstellenvererbung am Beispiel von DC-Motormodellen in Dymola

In Bild 8 ist dies exemplarisch für einen DC-Motor gezeigt. Ein solcher kann zum Beispiel zur Verstellung der Schlägerplatte des Demonstrators verwendet werden. Im detaillierten LE-Modell (Bild 8c) wurden hier im Vergleich zum LM-Modell (Bild 8b) die Wärmeentwicklung aufgrund des Ohm'schen-Widerstandes, das Trägheitsmoment des Stators und die Verhältnisse im Luftspalt zwischen Rotor und Stator zusätzlich berücksichtigt. Dies hat zusätzliche Schnittstellen zur Folge.

Um frühzeitig möglich Fehler und Abstimmungsprobleme aufdecken zu können, wird neben der Analyse in den einzelnen Fachdisziplinen auch eine ganzheitliche Systemanalyse auf Basis der gewählten Lösungselemente durchgeführt. Fokus ist auch hier das dynamische Verhalten.

### **3 Resümee und Ausblick**

Die vorliegende Arbeit zeigt wie semantische Technologien den Entwurf mechatronischer Systeme erheblich verbessern können. Im Vordergrund stehen die effektive Suche nach Lösungsmustern und -elementen sowie die frühzeitige Simulation des zu entwickelnden Systems in den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses mechatronischer Systeme. Dies wird durch eine Verknüpfung der Lösungsmuster und -elemente mit dynamischen Modellen ermöglicht.

Die entwickelten Konzepte werden am vorgestellten Demonstrator sowie verschiedenen Demonstratoren aus Industrieprojekten evaluiert. Derzeit stehen die weitere Verfeinerung der Ontologien sowie die Integration der vorgestellten Techniken in Softwarewerkzeuge für den Entwurf mechatronischer Systeme im Vordergrund.

#### **Danksagungen**

Diese Arbeit ist im Rahmen des Verbundprojekts „ENTIME: Entwurfstechnik Intelligente Mechatronik“ entstanden. Das Projekt ENTIME wird vom Land NRW sowie der EUROPÄISCHEN UNION, Europäischer Fonds für regionale Entwicklung, „Investition in unsere Zukunft“ gefördert.

## 4 Referenzen

- [AIS+77] ALEXANDER, C.; ISHIKAWA, S.; SILVERSTEIN, M.; JACOBSON, M.; FIKSDAHLKING, I.; ANGEL, S.: A Pattern Language – Towns, Buildings, Construction. Oxford University Press, 1st Edition, 1977
- [Fra06] FRANK, U.: Spezifikationstechnik zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 175, Paderborn, 2006
- [Fürst10] FÜRST, S.: Challenges in the design of automotive software. In: Proc. of Design, Automation, and Test in Europe, DATE 2010, Dresden, Germany, March 8-12, 2010. IEEE, 2010
- [GSA+11] GAUSEMEIER, J.; SCHÄFER, W.; ANACKER, H.; BAUER, F.; DZIWOK, S.: Einsatz semantischer Technologien im Entwurf mechatronischer Systeme. HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 294, Paderborn, 2011
- [HKR+08] HITZLER, P.; KRÖTZSCH, M.; RUDOLPH, S.; SURE, Y.: Semantic Web – Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008
- [Ott99] OTTER, M.: Objektorientierte Modellierung physikalischer Systeme, Teil 1. In: at Automatisierungstechnik, 47 (1), R. Oldenbourg Verlag, 1999
- [PBF+07] PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung. Springer Verlag, Berlin, 7. Auflage, 2007
- [VDI2206] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth-Verlag, Berlin, 2004
- [Wit02] WITTLER, G.: Integrative Modellierung von Gestalt und dynamischem Verhalten beim Entwurf mechatronischer Systeme. Dissertation, Fachbereich 10 Maschinentechnik, Universität Paderborn, 2002