

# **Domänenübergreifende Spezifikation der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme unter Berücksichtigung der auf das System wirkenden Einflüsse**

## **Domain-Spanning Specification of the Principle-Solution of Self-Optimizing Systems with Focus on the Influences on the System**

Prof. Dr.-Ing. **J. Gausemeier**, Dipl.-Wirt.-Ing. **U. Frank**, Dipl.-Ing. **B. Schulz**, Universität Paderborn

### **Kurzfassung**

Die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik eröffnet faszinierende Perspektiven für den Maschinenbau: mechatronische Systeme mit inhärenter Teilintelligenz. Hierfür verwenden wir den Begriff Selbstoptimierung. Selbstoptimierende Systeme reagieren autonom und flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen. Sie sind lernfähig und optimieren ihr Verhalten im Betrieb. Der Entwurf solcher Systeme ist eine Herausforderung. Ein entscheidendes Resultat im Rahmen des Entwurfs ist die Prinziplösung, die am Ende der Konzipierung vorliegt. Mit ihr sind die wesentlichen Weichenstellungen für den Aufbau und die Funktionsweise des Systems erfolgt. Der Beitrag stellt ein Set von Spezifikationstechniken zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme vor. Die Modellierung mit diesen Spezifikationstechniken wird exemplarisch an der Prinziplösung des Antriebs- und Bremsmoduls des Vorhabens „Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab“ aufgezeigt. Schwerpunkt liegt dabei auf der Modellierung der Einflüsse auf das System und den aus den Einflüssen resultierenden Verhaltensänderungen.

### **Abstract**

Considering the rapid development of information technology, novel prospects arise for mechanical engineering: systems with inherent partial intelligence. Selfoptimizing systems are able to react autonomously and flexibly to changing environmental conditions. They are capable of learning and optimize their behavior at run-time. Actually developing self-optimizing systems is a challenge. One decisive milestone in the development process is the principle solution created by the conceptual design process which embodies the essential decisions as to the system's structure and manner of function. This article introduces a set of specifica-

tion techniques for describing the principle solutions of self-optimizing systems. Then it will illustrate their application with an example from the project “New Rail Technology Paderborn/RailCab” with concentration of modeling the influences on the system and system’s adaptive behavior.

Diese Arbeit ist im Sonderforschungsbereich (SFB) 614 „Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ der Universität Paderborn entstanden und wurde auf seine Veranlassung unter Verwendung der ihm von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten Mittel veröffentlicht.

## **1. Einführung**

Viele Erzeugnisse des Maschinenbaus und verwandter Branchen wie der Automobilindustrie beruhen auf dem engen symbiotischen Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik, was durch den Begriff Mechatronik zum Ausdruck kommt. Ziel der Mechatronik ist es, das Verhalten eines technischen Systems zu verbessern. Dafür werden mit Hilfe von Sensoren Informationen über die Umgebung, aber auch über das System selbst erfasst und in Prozessoren verarbeitet. Dies führt zur Ansteuerung der Aktoren und somit zur Beeinflussung des Systems.

Die dynamische Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik führt zu neuen Funktionen und zu neuen Lösungen für bekannte Funktionen [1]. Der Trend geht hin zu intelligenten, autonomen Systemen, die flexibel auf sich ändernde Umfeldbedingungen reagieren. Diese Systeme bezeichnen wir als selbstoptimierend.

Unter Selbstoptimierung eines technischen Systems wird die endogene Anpassung der Ziele des Systems auf veränderte Einflüsse und die daraus resultierende zielkonforme autonome Anpassung der Parameter und ggf. der Struktur und somit des Verhaltens dieses Systems verstanden. Damit geht Selbstoptimierung über die bekannten Regel- und Adaptionstrategien wesentlich hinaus; Selbstoptimierung ermöglicht handlungsfähige Systeme mit inhärenter „Intelligenz“, die in der Lage sind, selbstständig und flexibel auf veränderte Betriebsbedingungen zu reagieren.

Im SFB 614 wird eine Methodik für den Entwurf selbstoptimierender Systeme des Maschinenbaus erarbeitet [www.sfb614.de]. Den Ausgangspunkt für die Forschungsarbeiten bilden die Konstruktionslehre des klassischen Maschinenbaus [2] und aktuelle Arbeiten auf dem Gebiet der Entwicklungsmethodik Mechatronik, wie die VDI-Richtlinie 2206 [3].

Ein wichtiger Bestandteil dieser Entwurfsmethodik ist ein Set von Spezifikationstechniken zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme. Die Prinziplösung ist ein wesentliches Ergebnis der Produktentwicklung. Sie legt domänenübergreifend das Konzept des zu entwickelnden Systems fest und ist Grundlage für die folgende domänenspezifische Konkretisierung des Systems. Die Spezifikation der Prinziplösung ist ferner eine wesentliche Grundlage für die Kommunikation und Kooperation der Fachleute aus den beteiligten Disziplinen Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik im Zuge der weiteren Konkretisierung. Es ist leicht nachvollziehbar, dass diese Fachleute ein gemeinsames Verständnis der Prinziplösung gewinnen müssen, bevor sie das System in ihrer jeweiligen Disziplin mit den entsprechend spezifischen Sichten weiter konkretisieren.

Dieser Beitrag erläutert zuerst das Paradigma der Selbstoptimierung und die Architektur der Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme. Dann stellt er das im SFB 614 entwickelte Set von Spezifikationstechniken zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme vor. Danach wird das Modellieren mit dem Set an Spezifikationstechniken exemplarisch an dem Antriebs- und Bremsmodul des Vorhabens „Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab“ verdeutlicht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Modellierung der Einflüsse auf das System und den aus den Einflüssen resultierenden Verhaltensänderungen.

Bei dem Vorhaben „Neue Bahntechnik Paderborn/RailCab“ handelt es sich um ein innovatives Bahnsystem, das als umfassende Versuchsanlage im Maßstab 1:2,5 realisiert ist [<http://nbp-www.upb.de>]. Den Kern des Systems bilden autonome Fahrzeuge (Shuttles) für den Personen- und Gütertransport, die nach Bedarf und nicht nach Fahrplan fahren. Sie handeln proaktiv, beispielsweise um die Auslastung zu erhöhen und den Energiebedarf durch Konvoibildung zu reduzieren. Die Shuttles sind modular mit standardisierten Baugruppen aufgebaut. Der Antrieb erfolgt mit Hilfe eines elektromagnetischen Linearantriebs berührungslos. Der Langstator-Linearmotor ermöglicht die Energieübertragung ins Fahrzeug ohne Oberleitungen oder Stromschienen. Das Tragen und Führen erfolgt über einen Rad-Schiene-Kontakt. Dadurch können bestehende Trassen genutzt werden. Durch eine aktive Spurführung auf Basis eines Einzelachsfahrwerks mit Losrädern kann die Richtungswahl der Fahrzeuge beim Überfahren von Weichen fahrzeugseitig erfolgen. Die Weichen sind also im Gegensatz zur konventionellen Bahn passiv. Eine aktive Federungstechnik - auf der Basis von Luftfedern - mit zusätzlicher Neigetechnik führt zu einem bisher unerreichten Fahrkomfort. Die wesentliche Technik der Fahrzeuge ist in der flach bauenden Bodengruppe untergebracht, auf der die Nutzlastzellen für den Personen- und Gütertransport aufsetzen.

## 2. Von der Mechatronik zur Selbstoptimierung

Die hier betrachteten intelligenten Systeme des Maschinenbaus von morgen beruhen auf der Mechatronik. Daher wurde die von Lückel vorgeschlagene hierarchische Strukturierung komplexer mechatronischer Systeme aufgegriffen und um den Aspekt der Selbstoptimierung erweitert (siehe Bild 1). Die Basis bilden so genannte mechatronische Funktionsmodule (MFM), die aus einer mechanischen Grundstruktur, Sensoren, Aktoren und einer lokalen Informationsverarbeitung, die den Regler enthält, bestehen. Informationstechnisch und/oder mechanisch gekoppelte MFM führen zu autonomen mechatronischen Systemen (AMS). Sie weisen ebenfalls eine Informationsverarbeitung auf. In dieser Informationsverarbeitung werden übergeordnete Aufgaben wie beispielsweise Überwachung mit Fehlerdiagnose und Instandhaltungsentscheidungen realisiert sowie Vorgaben für die lokale Informationsverarbeitung der MFM generiert. AMS bilden so genannte vernetzte mechatronische Systeme (VMS). VMS entstehen allein durch die Kopplung der beteiligten AMS via Informationsverarbeitung. Analog zu AMS werden in der Informationsverarbeitung von VMS übergeordnete Aufgaben realisiert. Übertragen auf die Fahrzeugtechnik wäre ein Feder- und Neigemodul ein MFM, das Shuttle mit einem aktiven Fahrwerk ein AMS und ein Fahrzeugverband ein VMS.

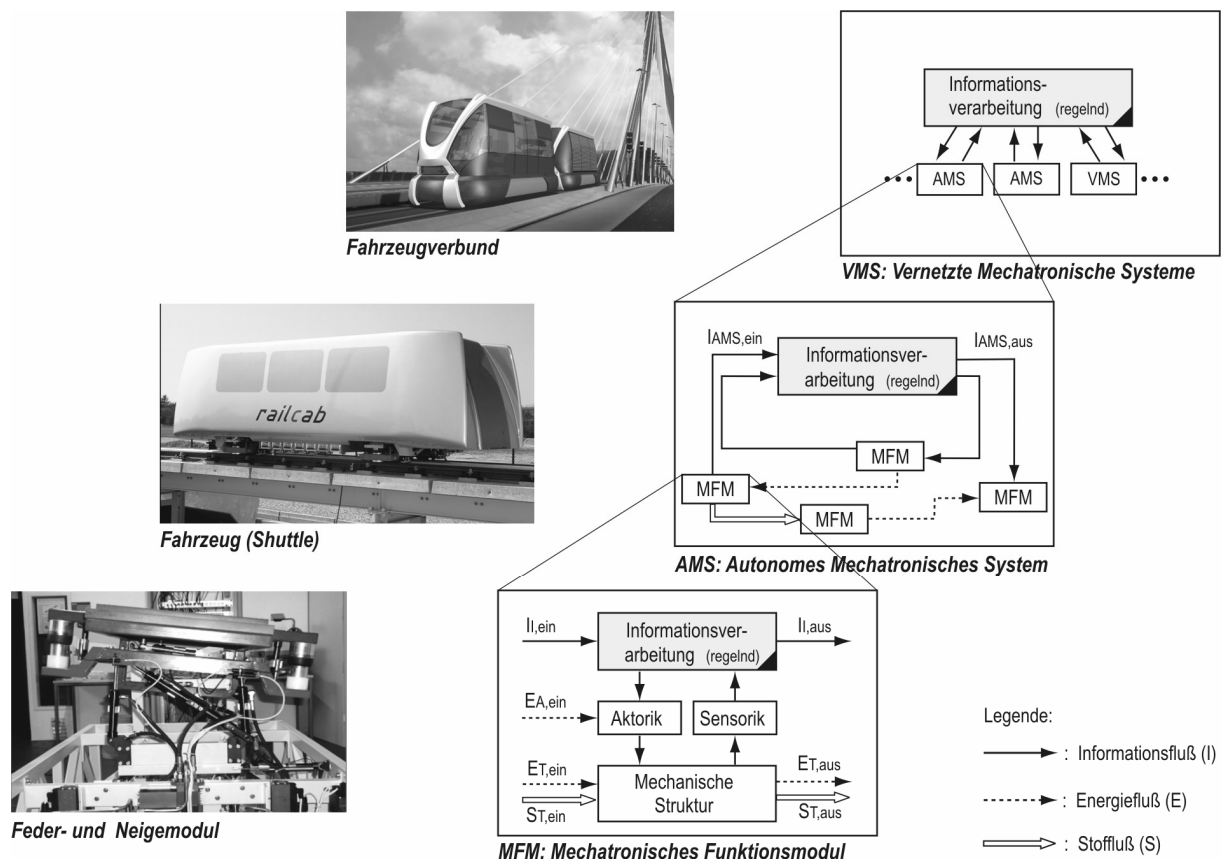


Bild 1: Struktur eines komplexen mechatronischen Systems nach Lückel [4]

In dieser Struktur kann auf jeder Stufe die regelnde Informationsverarbeitung um eine selbstoptimierende ergänzt werden. Somit erhalten die genannten Systemelemente (MFM, AMS, VMS) eine inhärente Teilintelligenz. Das Verhalten des Gesamtsystems wird durch die Kommunikation und Kooperation dieser intelligenten Systemelemente geprägt. Aus informationstechnischer Sicht handelt es sich nach unserem Verständnis um verteilte Systeme von miteinander kooperierenden Agenten.

Das Zusammenwirken der wesentlichen Aspekte eines selbstoptimierenden Systems ist in Bild 2 dargestellt. Auf Basis der Einflüsse bestimmt das selbstoptimierende System die aktiv zu verfolgenden internen Ziele, d.h. die Optimierungsziele. Diese internen Ziele beruhen auf externen Zielen, die von außen dem System vorgegeben werden (z.B. durch den Benutzer oder andere Systeme), und inhärenten Zielen, die den Entwurfszweck des Systems widerspiegeln. Beispiele für inhärente Ziele eines Antriebs- und Bremsmoduls sind das Sichern der Funktionen Antreiben und Bremsen, geringer Verschleiß und ein hoher Wirkungsgrad. Wenn im Folgenden von Zielen die Rede ist, dann meinen wir die internen Ziele. Die Anpassung der Ziele bedeutet, dass die Gewichtung der Ziele verändert wird, neue Ziele hinzukommen oder vorhandene Ziele entfallen und nicht mehr verfolgt werden. Diese Anpassung der Ziele führt zu einer Anpassung des Systemverhaltens. Die notwendige Verhaltensanpassung wird durch Parameter- und ggf. durch Strukturanpassungen erreicht. Unter einer Parameteranpassung wird die Anpassung eines Systemparameters verstanden, z.B. das Ändern eines Regelparameters. Strukturanpassungen betreffen die Anordnung und Beziehungen der Elemente eines Systems. Bei strukturellen Anpassungen wird zwischen Rekonfiguration, bei der die Beziehungen einer festen Menge von verfügbaren Elementen verändert wird, und kompositionaler Anpassung, bei der neue Elemente in die bisherige Struktur integriert bzw. Elemente aus der Struktur herausgenommen werden, unterschieden.

Selbstoptimierung drücken wir durch drei aufeinander folgende Aktionen aus, die in der Regel wiederkehrend ausgeführt werden. Die Folge dieser Aktionen bezeichnen wir als Selbstoptimierungsprozess:

**1. Analyse der Ist-Situation:** Die betrachtete Ist-Situation umfasst den Zustand des Systems selbst sowie alle durchgeführten Beobachtungen über seine Umgebung. Dabei können Beobachtungen auch indirekt durch Kommunikation mit anderen Systemen gewonnen werden. Der Zustand eines Systems beinhaltet weiterhin eventuell gespeicherte zurückliegende Beobachtungen. Ein wesentlicher Aspekt der Analyse ist die Prüfung des Erfüllungsgrades der verfolgten Ziele.

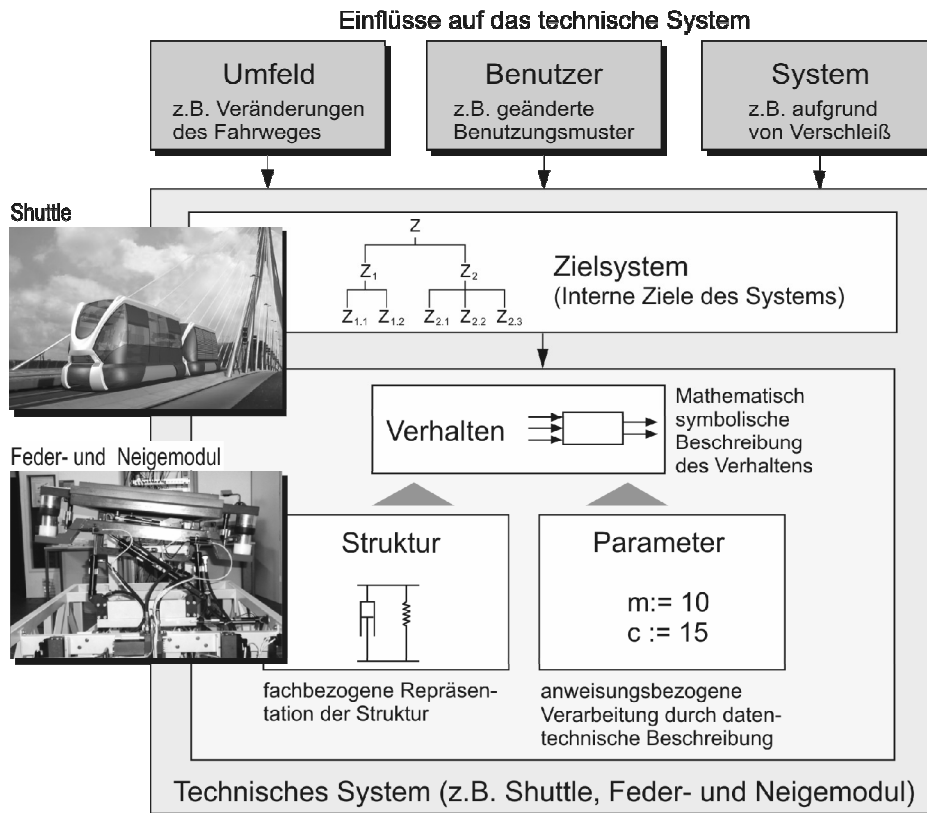


Bild 2: Die Hauptaspekte eines selbstoptimierenden Systems

**2. Bestimmung der Systemziele:** Die aktuellen Ziele des Systems können durch Auswahl, Anpassung oder Generierung gewonnen werden. Hierbei verstehen wir unter Auswahl die Selektion einer Alternative aus einer fest vorgegebenen, diskreten, endlichen Menge von möglichen Zielen. Eine Anpassung von Zielen dagegen beschreibt die graduelle Veränderung bestehender Ziele. Von Generierung der Ziele sprechen wir dagegen dann, wenn diese unabhängig von den bisher bekannten neu erzeugt werden.

**3. Anpassung des Systemverhaltens:** Dies wird durch die drei Aspekte Parameter, Struktur und Verhalten bestimmt. In dieser Aktion wird die abschließende Rückwirkung des Selbstoptimierungskreislaufes durch Anpassung des Systemverhaltens vorgenommen. Die einzelnen Fälle der Anpassung können, je nachdem auf welcher Ebene eines mechatronischen Systems (MFM, AMS, VMS) wir uns befinden, sehr unterschiedlich ausfallen. Auch die Domäne, in der die Anpassung umgesetzt wird, spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Ausgehend von einem Zustand führt der Selbstoptimierungsprozess aufgrund von bestimmten Einflüssen zu einem neuen Zustand. Es findet also ein Zustandsübergang statt. Diese einen Zustandsübergang auslösenden Einflüsse bezeichnen wir als Ereignisse. Der Selbstoptimierungsprozess definiert die Aktivitäten, die diesen Zustandsübergang realisieren. Er beschreibt somit das Anpassungsverhalten des Systems.

### 3. Architektur der Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme

Die Realisierung komplexer mechatronischer Systeme mit inhärenter Teilintelligenz erfordert vor dem Hintergrund der starken Vernetzung der Systembestandteile (MFM, AMS) und ihrer Fähigkeit zur autonomen Verhaltensanpassung ein geeignetes Strukturierungs- und Architekturkonzept für die Informationsverarbeitung. Im SFB 614 wurde hierzu das Konzept des Operator-Controller-Modul (OCM) entwickelt [5]. Es entspricht aus informationstechnischer Sicht einem Agenten. Bild 3 zeigt seinen Aufbau. Demnach gliedert sich ein OCM in drei Ebenen (Controller, Reflektorischer Operator und Kognitiver Operator), auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

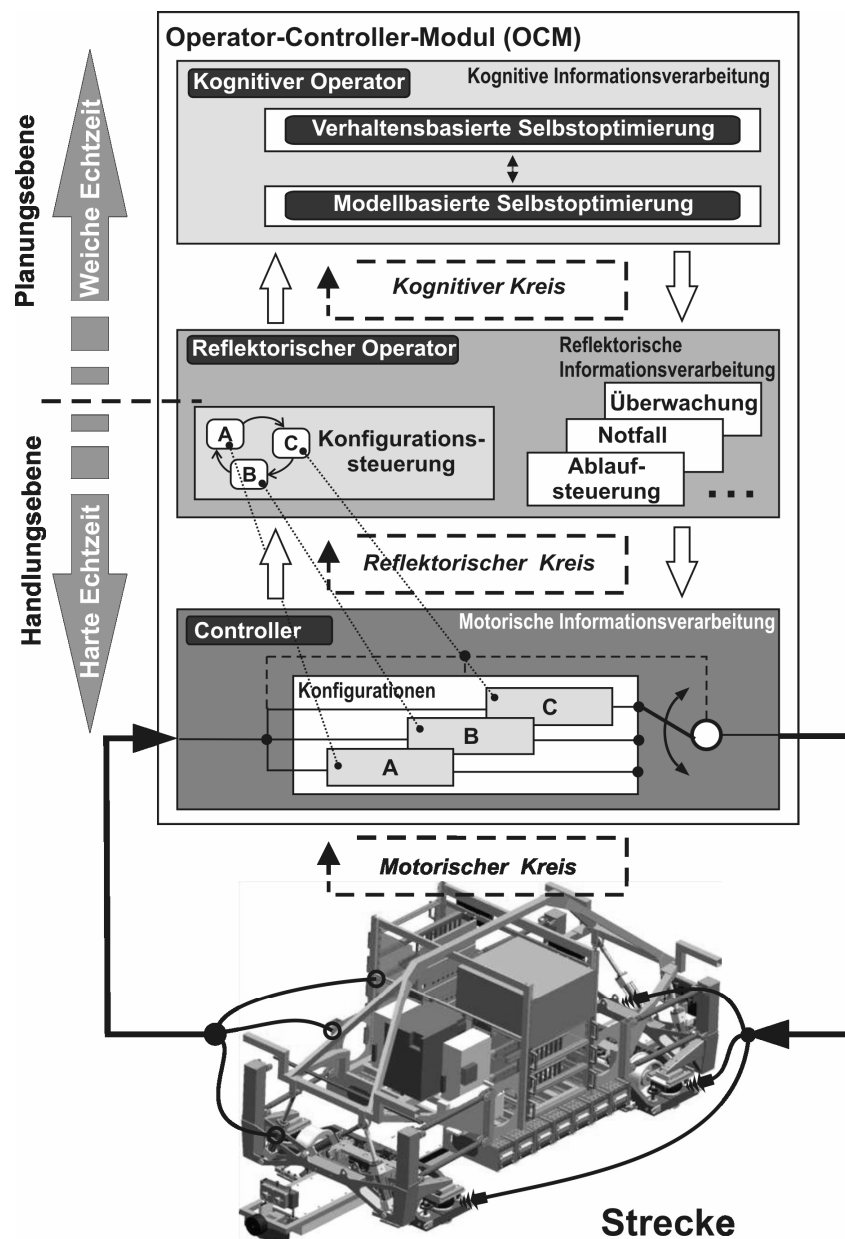


Bild 3: Architektur des Operator-Controller-Moduls (OCM)

**Controller:** Bezogen auf den Durchgriff auf das technische System (Strecke) ist das die unterste Ebene. Dieser Regelkreis verarbeitet in direkter Wirkkette die Messsignale, ermittelt Stellsignale und gibt diese aus. Er wird daher als „motorischer Kreis“ bezeichnet. Die Software auf dieser Ebene arbeitet quasi-kontinuierlich unter harten Echtzeitbedingungen. Der Controller kann sich aus mehreren Reglern zusammensetzen, zwischen denen umgeschaltet werden kann. Die Umschaltung erfolgt in einem Schritt; erforderliche Überblendungsmechanismen u.ä. sind in einem eigenen Reglerelement zusammengefasst.

**Reflektorischer Operator:** Er überwacht und steuert den Controller. Er greift dabei nicht direkt auf die Aktorik des Systems zu, sondern modifiziert den Controller, indem er Parameter- oder Strukturänderungen initiiert. Bei Strukturänderungen - wie beispielsweise Rekonfigurationen - werden nicht nur die Regler ausgetauscht, sondern es werden auch entsprechende Kontroll- bzw. Signalflüsse im Controller umgeschaltet. Kombinationen aus Reglern, Schaltelementen und zugehörigen Kontroll- bzw. Signalflüssen werden als Controllerkonfigurationen bezeichnet. In Bild 3 sind Controllerkonfigurationen im Controller durch die Blöcke A, B und C angedeutet. Die Konfigurationssteuerung – realisiert durch eine Zustandsmaschine - definiert, bei welchem Systemzustand welche Konfiguration gültig ist sowie wie und unter welchen Bedingungen zwischen den Konfigurationen umgeschaltet wird. Der Reflektorische Operator arbeitet überwiegend ereignisorientiert. Die enge Verknüpfung mit dem Controller erfordert eine Abarbeitung in harter Echtzeit. Als Verbindungselement zur kognitiven Ebene des OCM bietet der Reflektorische Operator ein Interface zwischen den nicht echtzeitfähigen, bzw. mit weicher Echtzeit arbeitenden Elementen und dem Controller. Er filtert die ankommenden Signale und bringt sie in die unterlagerten Ebenen ein. Der Reflektorische Operator ist weiterhin für die Echtzeitkommunikation zwischen mehreren OCM verantwortlich, die gemeinsam ein zusammengesetztes selbstoptimierendes System bilden.

**Kognitiver Operator:** Auf der obersten Ebene des OCM kann das System durch Anwendung vielfältiger Methoden (etwa Lernverfahren, modellbasierte Optimierungsverfahren oder den Einsatz wissensbasierter Systeme) Wissen über sich und die Umgebung zur Verbesserung des eigenen Verhaltens nutzen. Der Schwerpunkt liegt hier auf den kognitiven Fähigkeiten zur Durchführung der Selbstoptimierung. Modellbasierte Verfahren erlauben eine vorausschauende und vom realen System zeitlich entkoppelte Optimierung.

Im Rahmen der OCM-Architektur können die Aktionen des Selbstoptimierungsprozesses (1. Analyse der Ist-Situation, 2. Bestimmung der Systemziele und 3. Anpassung des Systemverhaltens) auf vielfältige Art und Weise durchgeführt werden. Wenn die selbstoptimierende Anpassung Echtzeitanforderungen genügen muss, werden alle drei Aktionen im reflektorischen Operator durchgeführt. Systeme, die die Selbstoptimierung nicht in Echtzeit



durchführen müssen, können hier aufwändigere Verfahren einsetzen, die im kognitiven Operator angesiedelt werden. Die Verhaltensanpassung erfolgt in diesem Fall indirekt unter Vermittlung durch den reflektorischen Operator, der die Anweisungen zur Verhaltensanpassung auf geeignete Weise mit dem Echtzeitablauf des Controllers synchronisieren muss. Daneben können innerhalb eines einzelnen OCM auch Mischformen auftreten, bei denen die beiden beschriebenen Formen der Selbstoptimierung parallel und zueinander asynchron ablaufen.

#### **4. Spezifikation der Prinziplösung**

Zur Beschreibung der Prinziplösung selbstoptimierender Systeme wird ein Set von Spezifikationstechniken eingesetzt, mit deren Hilfe unterschiedliche Sichten auf das zu entwickelnde selbstoptimierende System beschrieben werden. Jede Sicht wird rechnerintern durch ein Partialmodell abgebildet. Nach Bild 4 besteht die Prinziplösung aus sieben Sichten bzw. Partialmodellen: Anforderungen, Umfeld, Zielsystem, Anwendungsszenarien, Funktionen, Wirkstruktur, Gestalt sowie der Gruppe Verhalten. Bei Verhalten handelt es sich um eine Gruppe, weil es verschiedene Verhaltensarten gibt, z.B. Logik einer Schaltung, dynamisches Verhalten von Mehrkörpersystemen, elektromagnetische Verträglichkeit oder Interaktionsverhalten. Zwischen den einzelnen Partialmodellen gibt es Beziehungen. Dies führt zu einem vernetzten System von Partialmodellen, das die Prinziplösung eines selbstoptimierenden Systems repräsentiert. Der Fokus liegt hier nicht wie bisher üblich auf der Wirkstruktur eines Systems, sondern im Vordergrund stehen die Zustände und die Zustandsübergänge des Systems und die entsprechenden Auswirkungen auf die Struktur und die Funktionsweise des Systems. Im Folgenden werden die Partialmodelle kurz erläutert.

**Anforderungen:** Es handelt sich um die rechnerinterne Repräsentation der Anforderungen.

**Umfeld:** Dieses Modell beschreibt das Umfeld des Systems und seine Einbettung in das Umfeld. Es werden die relevanten Einflussbereiche und mögliche Störgrößen identifiziert (z.B. Witterung, mechanische Belastungen, übergeordnete Systeme). Weiterhin werden die Wechselwirkungen zwischen den Einflüssen untersucht. Eine konsistente Menge von gemeinsam auftretenden Einflüssen bezeichnen wir als Situation, in denen das technische System funktionieren muss.

**Zielsystem:** Es handelt sich um die Repräsentation der externen, inhärenten und internen Ziele und ihrer Verknüpfung.

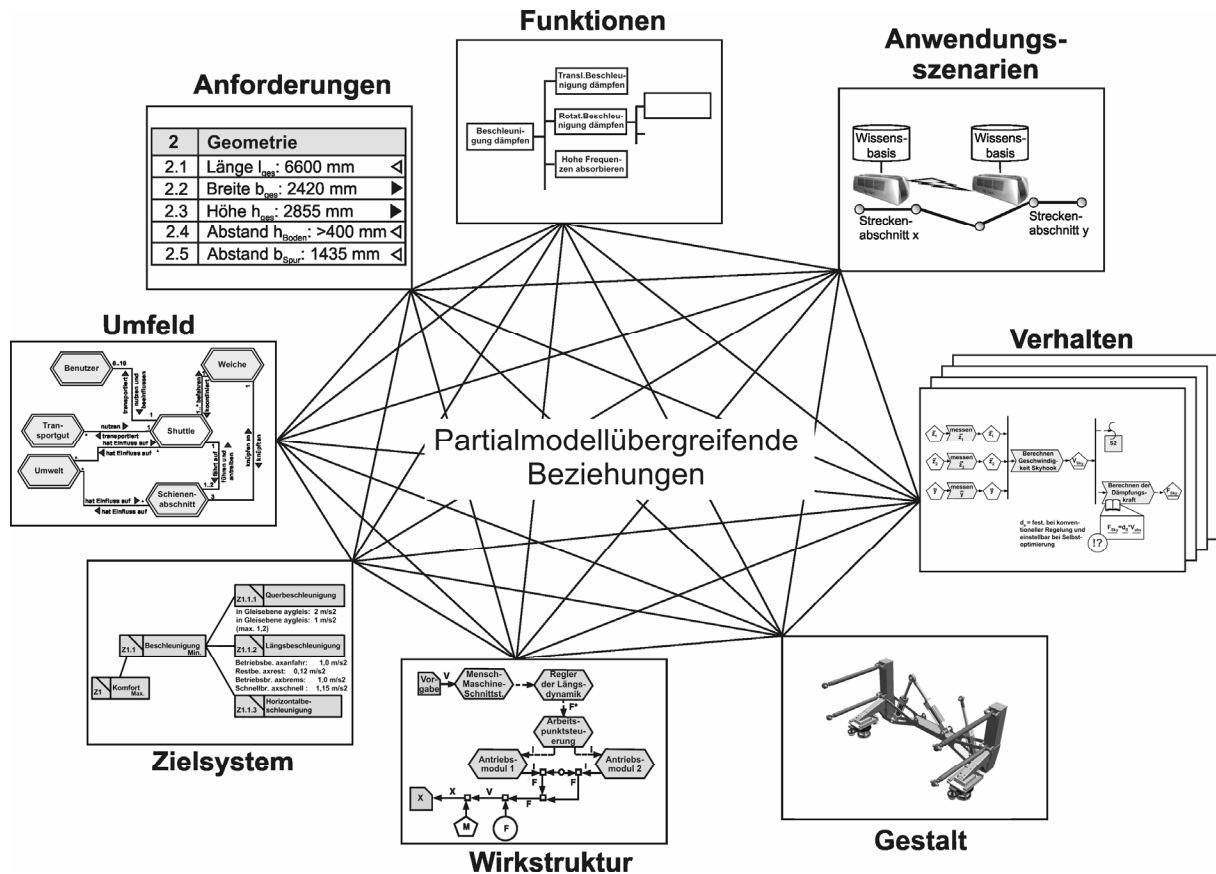


Bild 4: Vernetztes System von Partialmodellen zur Beschreibung der Prinziplösung eines selbstoptimierenden Systems

**Anwendungsszenarien:** Anwendungsszenarien beschreiben Ausschnitte der Funktionalität des zu entwickelnden Systems. Sie spezifizieren in welcher Art und Weise sich das System in einem Zustand und einer bestimmten Situation verhalten soll bzw. in welcher Art und Weise aufgrund welcher Ereignisse Zustandsübergänge stattfinden sollen.

**Funktionen:** Es handelt sich um eine hierarchische Aufgliederung der Gebrauchsfunktionen. Sie dienen zur Definition der grundsätzlichen Funktionalität des Systems. Bei den Funktionen kann es sich grundsätzlich um herkömmliche Funktionen (vgl. [2], [6]) oder um Funktionen zur Selbstoptimierung handeln [5].

**Wirkstruktur:** Hier werden die Systemelemente, deren Eigenschaften sowie ihre Beziehungen zueinander abgebildet. Ziel ist die Beschreibung der grundsätzlichen Struktur des selbstoptimierenden Systems inkl. aller vorausgedachten Systemkonfigurationen. Wichtig ist die Modellierung von zu erfassenden Messgrößen und abzuleitenden Größen. Auf diese Weise wird die Basis für das reaktive Verhalten eines selbstoptimierenden Systems spezifiziert, d.h. welche Größen erfasst werden können und somit auch auf welche Einflüsse bzw. Ereignisse das System grundsätzlich mit Verhaltensanpassungen reagieren kann.

**Gestalt:** Dieses Modell beinhaltet Angaben über Anzahl, Form, Lage, Anordnung sowie Art der Wirkflächen und der Wirkorte des selbstoptimierenden Systems. Schon während der Konzipierung können erste grobe Angaben über die Gestalt des Systems gemacht werden.

**Verhalten:** Diese Gruppe umfasst unterschiedliche Arten von Verhalten. Grundsätzlich sind die Systemzustände mit den damit verbundenen Ablaufprozessen und die Zustandsübergänge mit den zugrunde liegenden Anpassungsprozessen zu modellieren. Die Anpassungsprozesse stellen die konkrete Umsetzung des Selbstoptimierungsprozesses dar. Je nach Entwicklungsaufgabe sind darüber hinaus weitere Arten von Verhalten wie die Kinematik, die Dynamik oder das Kooperationsverhalten der Systemelemente zu spezifizieren.

Diese Partialmodelle werden nicht sequentiell erarbeitet, sondern entstehen im Wechselspiel. Die Reihenfolge der von zahlreichen Iterationen gekennzeichneten Entwicklungsschritte ist vom Entwurfsobjekt, organisatorischen Randbedingungen und vor allem den individuellen Handlungsweisen des Entwicklers sowie dem Einsatz geeigneter Methoden abhängig.

## 5. Anwendungsbeispiel

Dieses Kapitel erläutert beispielhaft an einem Ausschnitt des Antriebs- und Bremsmoduls eines Shuttles der Neuen Bahntechnik Paderborn bzw. dessen Prüfstand, wie die Prinziplösung spezifiziert wird. Dazu wird das Anwendungsszenario „Arbeitspunktsteuerung“ dargestellt. Ziel des Anwendungsszenarios „Arbeitspunktsteuerung“ ist die Bestimmung von Arbeitspunkten in Abhängigkeit von der aktuellen Situation.

Das Antriebs- und Bremsmodul besteht aus einem doppelt gespeisten Langstator-Asynchronmotor (Bild 5). Der Stator befindet sich zwischen den Schienen und der Läufer im Fahrzeug. Die im Stator liegenden Drehstromwicklungen bilden ein magnetisches Feld, welches entlang der Schiene asynchron mit dem Fahrzeug fortbewegt werden kann. Die magnetischen Kraftwirkungen zwischen Stator- und Läufermagnetfeld erfolgen im Luftspalt. Das ermöglicht ein Beschleunigen und Bremsen des Fahrzeugs ohne die Nutzung des Rad-/Schiene-Kontaktes [7]. Die Doppelspeisung realisiert eine angepasste Ausrichtung des Fahrzeugmagnetfeldes, so dass sich die Fahrzeugposition mit der relativen Lage des Läufermagnetfeldes optimal auf das Feld des Stators ausrichten lässt. Dadurch können sich mehrere Fahrzeuge auf dem gleichem Statorabschnitt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortbewegen. Durch die asynchrone Betriebsweise werden die Funktionen „Schub- bzw. Bremskrafterzeugung“, „Leistungsübertragung von der Strecke zum Fahrzeug“ und „Stabilisierung der Nickbewegung der Einzelachsfahrwerke“ realisiert [8].

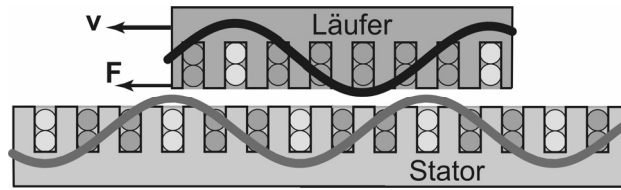


Bild 5 Antriebsprinzip des Linear Motors: Magnetische Kraftwirkungen zwischen Stator und Läufer treibt das Fahrzeug an

Beim klassischen Betrieb eines doppelt gespeisten Motors findet entweder keine Anpassung des Arbeitspunktes statt, d.h. der Stator ist fest mit einem Versorgungsnetz verbunden, oder der Arbeitspunkt wird optimal an feste Ziele (z.B. hoher Wirkungsgrad) adaptiert. In diesem Anwendungsszenario soll u.a. in Abhängigkeit der geforderten Schubkraft, der geforderten Leistungsübertragung und des Batterieladegrads der Arbeitspunkt optimal angepasst werden. Die entstehende Schubkraft ist im Wesentlichen von dem Produkt der Ströme im Stator sowie im Läufer abhängig. Maßgeblich für die Übertragung der Leistung und der damit verbundenen elektrischen Versorgung des Fahrzeuges ist der Schlupf. Dieser entspricht der Frequenz des Läuferstromes. Bei der Wahl dieser Frequenz und des einzustellenden Statorstroms treten Freiheitsgrade auf, die eine situationsabhängige Anpassung des so beschriebenen elektrischen Arbeitspunktes des Motors an unterschiedliche Ziele ermöglicht [9]. Die genannten Funktionen sowie die Verfahren für die selbstoptimierende Arbeitspunktsteuerung werden an einem Prüfstand erarbeitet und untersucht. Dieser besteht aus einem Wagen, der durch zwei Läuferelemente über einen mit Statorelementen ausgestatteten Schienenweg von ca. 8 m Länge bewegt werden kann. Die Läuferelemente in Verbindung mit den Statorelementen stellen den Motor dar. Über leistungselektronische Stellglieder, die Stromrichter, ist es möglich, gezielt Strom in den Motor einzuprägen. So ergeben sich die erforderlichen Schub- und Normalkräfte sowie die Leistungsübertragung im Antrieb. Diese Vorgänge werden durch eine auf dem Fahrzeug befindliche Echtzeitrecheneinheit beeinflusst. Zusätzlich steht ein PC-System zur Verfügung, auf dem Optimierungen für einzelne Anwendungsszenarien wie dem hier beschriebenen Anwendungsszenario „Arbeitspunktsteuerung“ realisiert werden.

Entsprechend des oben in Prosa beschriebenen Anwendungsszenarios werden im Folgenden zuerst die auf das Antriebs- und Bremsmodul wirkenden Einflüsse durch das Partialmodell Umfeld modelliert. In der Wirkstruktur wird dann aufgezeigt, auf welche Systemelemente die Einflüsse wirken, von welchen Systemelementen sie erfasst werden und welche Systemelemente eine Verhaltensanpassung aufgrund dieser Einflüsse initiieren bzw. durchführen. Die für eine Verhaltensanpassung notwendigen Aktivitäten des Selbstoptimierungsprozesses

werden in dem Partialmodell Verhalten-Aktivitäten veranschaulicht. Hier geht es um die Abbildung des logischen Verhaltens und zwar um die Reihenfolge der von dem System durchzuführenden Aktivitäten. Dieser Selbstoptimierungsprozess wird durch das anschließend vorgestellte ausgeprägte OCM realisiert. Bei der Durchführung des Selbstoptimierungsprozesses nehmen die Bestandteile des OCM unterschiedliche Unterzustände ein, diese werden durch das Partialmodell Verhalten-Zustände spezifiziert. Fokus der Spezifizierung des Partialmodells Verhalten-Zustände ist die Abbildung von Zuständen, Zustandsübergängen und Einflüssen, die einen Zustandsübergang auslösen. Schließlich wird exemplarisch für einen Einfluss auf das System der zeitliche Ablauf der Verhaltensanpassung mit Hilfe des Partialmodells Verhalten-Zeitdiagramm erläutert. Dabei wird ausgehend von einem Einfluss dargestellt, wann welcher Unterzustand des Systems wie lange aktiv ist.

Bild 6 stellt einen Ausschnitt aus dem Umfeld des Antriebs- und Bremsmoduls dar. Er enthält die Mengen von Systemelementen, die direkt oder indirekt Einfluss auf das Antriebs- und Bremsmodul ausüben. In diesem Anwendungsszenario sollen insbesondere die durch den Benutzer geforderten Fahrspiele bzw. Fahrprofile ( $s_{soll}^*$ ,  $v_{max}$ ,  $a_{max}$ ), die vom Energiemanagement vorgegebenen Leistungsvorgaben ( $P_B^*$ ), die ortsabhängigen Motorparameter in Folge des ortsabhängigen Luftspalts ( $\delta$ ) zwischen Stator und Läufer sowie die temperaturabhängigen Motorwiderstände ( $\nu$ ,  $R_L$ ) berücksichtigt werden.

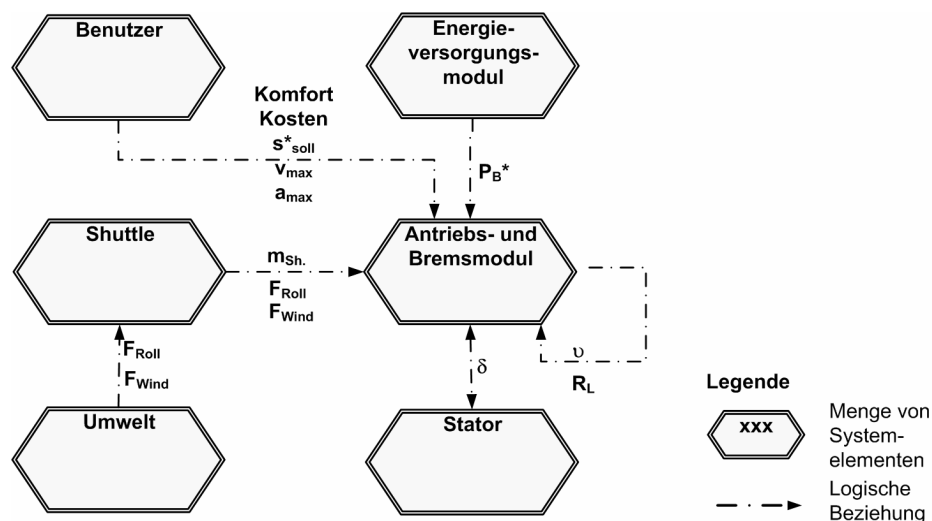


Bild 6: Umfeld des Antriebs- und Bremsmoduls (Ausschnitt)

Bild 7 oben visualisiert einen Ausschnitt aus der Wirkstruktur des Antriebs- und Bremsmoduls auf dem Prüfstand. Die Wirkstruktur spezifiziert hier Systemelemente wie Stator, Läuferhälften, Pulswechselrichter, Regler und Steuerungen sowie deren Beziehungen. Weiterhin

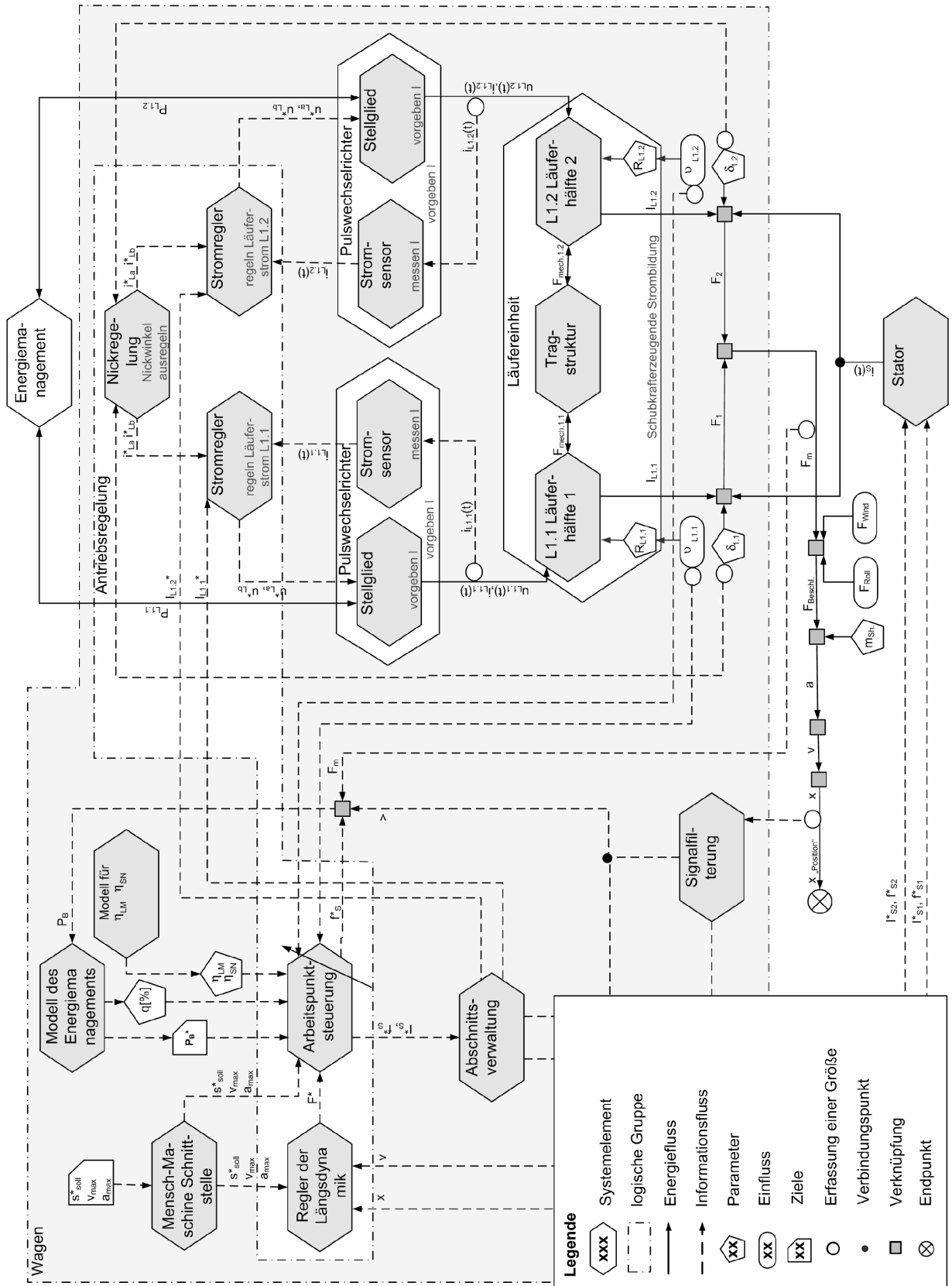


Bild 7: Ausschnitt aus der Wirkstruktur des Antriebs- und Bremsmoduls auf dem Prüfstand

werden die Einflüsse auf das System als eingehende Größen beschrieben. Sie haben entweder Einfluss auf das physikalische Verhalten des Systems, beispielsweise variiert die Leistungsübertragung in Abhängigkeit des Luftspalts ( $\delta$ ) zwischen Läufer und Stator, oder auf das logische Verhalten des Systems. Im zweiten Fall bedeutet das z.B., dass die Vorgaben des Benutzers und des Energiemanagements in der Arbeitspunktsteuerung zur Bestimmung des Arbeitspunktes entsprechend der aktuellen Situation genutzt werden. Die Leistungsvorgaben ( $P_B^*$ ) des Energiemanagements werden auf dem Prüfstand durch ein Modell abgebildet.

Vom System zu erfassende Größen werden durch einen unausgefüllten Kreis gekennzeichnet. Das System wird mit Hilfe von logischen Gruppen strukturiert, hier sind z.B. die Regler und die Arbeitspunktsteuerung zur Antriebsregelung zusammengefasst. Systemelemente, in denen die für die Selbstoptimierung wichtigen Aktivitäten der Zielbestimmung stattfinden, sind durch einen Pfeil gekennzeichnet (hier: Arbeitspunktsteuerung). In Bild 8 ist die umgesetzte Regelungsstruktur domänenspezifisch als Blockschaltbild dargestellt.

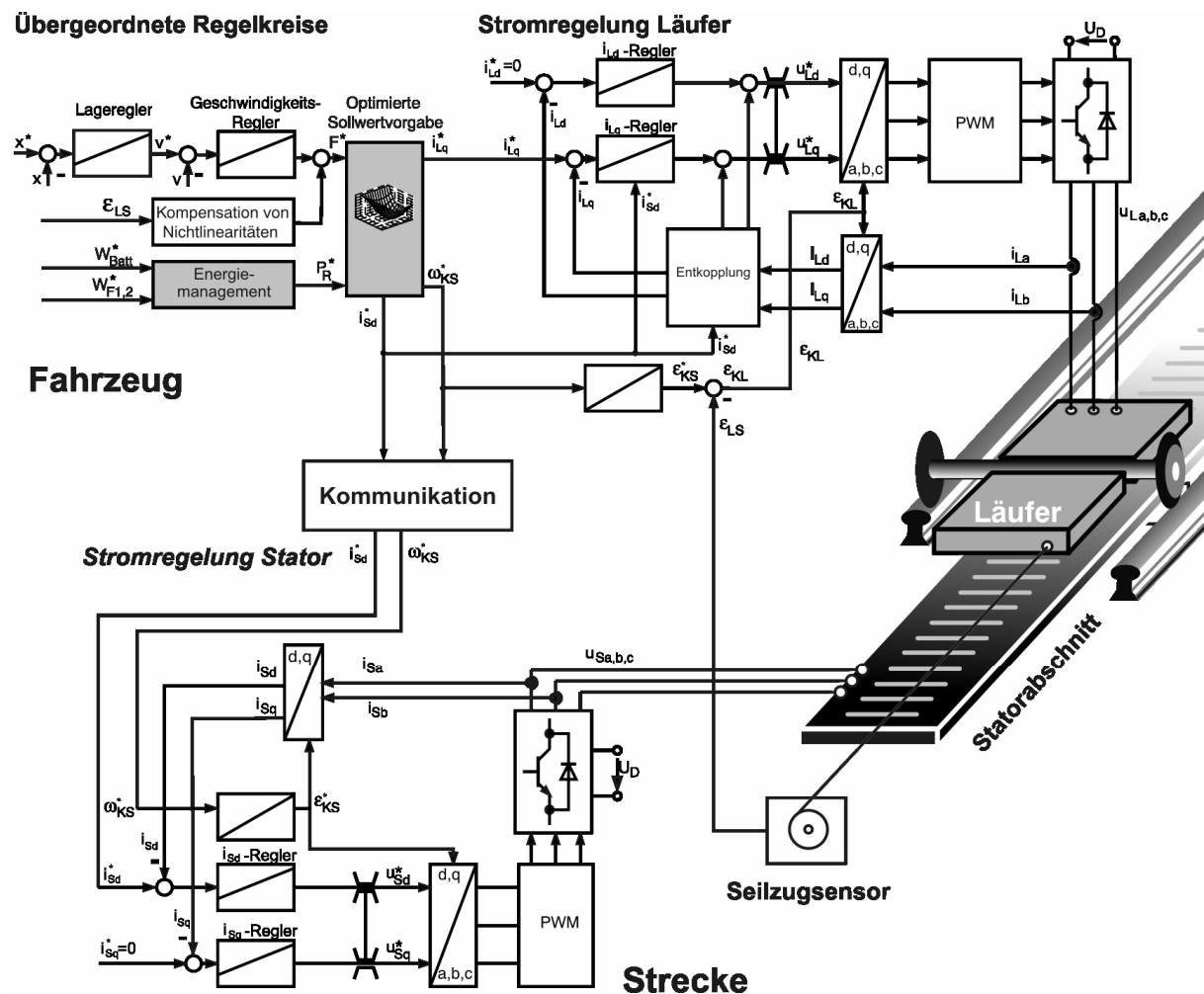


Bild 8: Realisierte Regelungsstruktur am Prüfstand

Bild 9 stellt ausschnittsweise den anwendungsspezifischen **Anpassungsprozess** zur Bestimmung eines geeigneten Verlaufs für den Arbeitspunkt des Antriebs- und Bremsmoduls dar. Er besteht aus den drei Schritten Analyse der Ist-Situation, Zielbestimmung und der Verhaltensanpassung. Mit Hilfe der Spezifikationstechnik für Anpassungs- und Ablaufprozesse selbstoptimierender Systeme sind die Aktivitäten, deren Ein- und Ausgangsgrößen, ihre logischen Beziehungen, Restriktionen und Abhängigkeiten dargestellt. Mit Hilfe logischer Gruppen werden in diesem Beispiel die entsprechenden Aktivitäten in Analyse der Ist-Situation, Zielbestimmung und Verhaltensanpassung strukturiert. Die Verhaltensanpassung ist hier nur ausschnittsweise dargestellt. Die Aktivitäten können bezüglich ihrer Echtzeitfähigkeit charakterisiert werden. Weiterhin kann angegeben werden, auf welcher Methode sie basieren und bei Entscheidungen, auf welcher Basis sie getroffen werden (hier die inhärenten Ziele Wirkungsgrad und Stromrichternutzungsgrad).

In der **Situationsanalyse** werden die Ziele des Benutzers erfasst, die Vorgaben von dem Energiemanagement und die Läufertemperatur analysiert, sowie der Erfüllungsgrad des aktuellen Zielsystems bestimmt. Der Erfüllungsgrad des aktuellen Zielsystems wird bestimmt, indem der gemessene Wirkungsgrad und der gemessene Stromrichternutzungsgrad mit dem in der Verhaltensanpassung bestimmten Wirkungsgrad sowie dem Stromrichternutzungsgrad verglichen werden.

Liegt keine signifikante Abweichung vor, folgt im nächsten Schritt die **Zielbestimmung**. Liegt eine signifikante Abweichung vor, wird ein neuer Selbstoptimierungsprozess gestartet. Die bisher beschriebenen Aktivitäten des Selbstoptimierungsprozesses werden immer durchgeführt. Der gesamte Selbstoptimierungsprozess wird nur durchlaufen, wenn das System gestartet wird, signifikante Abweichungen der Zielgrößen vorliegen oder eine Veränderung der Anforderungen sowie Systemparameter erkannt wird. In der Zielbestimmung werden basierend auf dem Ladegrad des Energiespeichers und der Läufertemperatur (Entscheidungsvariablen) die augenblicklichen Ziele der Arbeitspunktsteuerung bestimmt. Dieses erfolgt durch Festlegen einer Entscheidungsheuristik (Gewichtung der Ziele). Bei einem niedrigen Ladegrad ist die Leistungsübertragung wichtiger als das Ziel einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Andererseits ist bei einer hohen Läufertemperatur die Bedeutung der Verluste (insbesondere im Läufer) entscheidend.

In der **Verhaltensanpassung** werden unter Anwendung einer Mehrzieloptimierung Pareto-mengen von Arbeitspunkten sowie der dazugehörige optimale Wirkungsgrad und optimale Stromrichternutzungsgrad für die aktuelle Situation berechnet. Der optimale Wirkungsgrad und der optimale Stromrichternutzungsgrad werden, wie oben beschrieben, in der Situations-



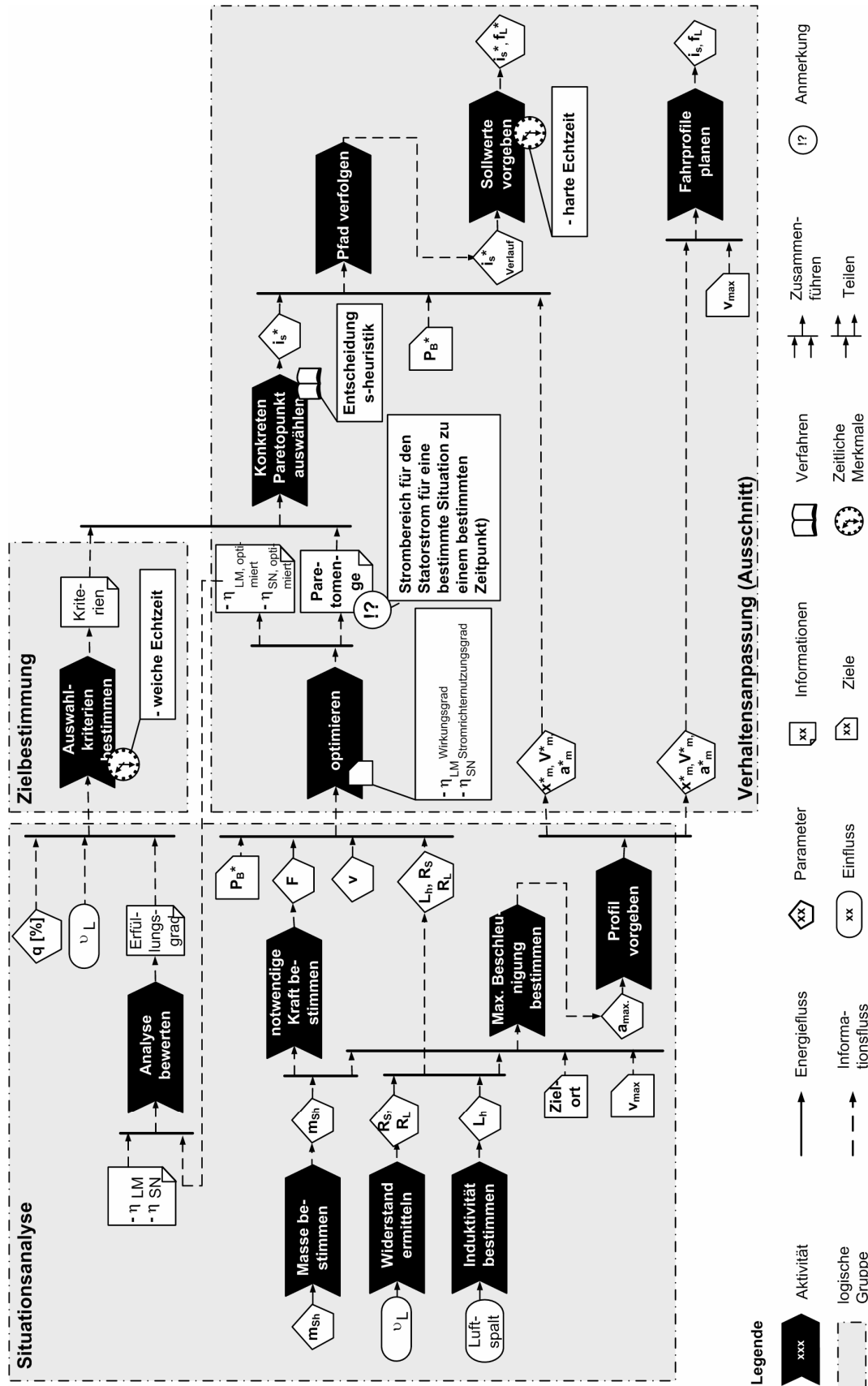


Bild 9: Ausschnitt aus einem Selbstoptimierungsprozess des Antriebs- und Bremsmoduls

analyse zur Bewertung des aktuell gemessenen Wirkungsgrad und Stromrichternutzungsgrad genutzt. Mit Hilfe der in der Zielbestimmung ermittelten Entscheidungsheuristik wird dann eine Folge von Arbeitspunkten auf Basis der ermittelten Paretomengen ausgewählt und dem System vorgegeben [10]. Um eine kontinuierliche optimale Anpassung des Arbeitspunktes an den jeweiligen Kraft- und Leistungsbedarf auch zwischen den einzelnen Optimierungen zu gewährleisten, kommt ein Extrapolationsverfahren zum Einsatz, das auch zwischen den expliziten Optimierungen paretooptimale Arbeitspunkte sicherstellen kann [11]. Liegen nicht rechtzeitig neue Arbeitspunkte vor, sind also die voraus bestimmten Verläufe nicht lang genug, schaltet der Reflektorische Operator auf einen Notbetrieb um und stellt auf diese Weise die Funktion des Systems sicher.

Der erläuterte Selbstoptimierungsprozess wird durch das Zusammenspiel von mehreren Systemelementen wie z.B. der Arbeitspunktsteuerung und den Stromreglern durchgeführt und durch Informationsverarbeitung realisiert. Entsprechend der Architektur der Informationsverarbeitung selbstoptimierender Systeme (siehe Kapitel 3) wird diese Informationsverarbeitung entsprechend des in Bild 10 dargestellten OCMs strukturiert. Dabei erfolgt im Controller die Einstellung des Arbeitspunktes, also das Einregeln des entsprechenden Statorstroms unter Berücksichtigung der jeweiligen Frequenz für den Läuferstrom. Durch den Reflektorischen Operator werden die Sollwerte für Statorstrom und Läuferfrequenz vorgegeben, d.h. die Parameter werden zeitrichtig an den Controller übergeben. Weiterhin werden hier der aktuelle Wirkungsgrad sowie der aktuelle Stromrichternutzungsgrad bestimmt. Die Zielbestimmung und Optimierung werden im Kognitiven Operator durchgeführt.

Während des Betriebs nimmt jede Ebene des OCM verschiedene Unterzustände ein. Mögliche Unterzustände und deren Zustandsübergänge sind in dem Partialmodell Verhaltenszustände dargestellt (Bild 11). Den Unterzuständen sind die oben genannten Aktionen des Selbstoptimierungsprozesses zugeordnet. Aktivitäten der Situationsanalyse finden im Reflektorischen Operator in den Unterzuständen „Analyse“ und „Parameter bestimmen“ sowie im Kognitiven Operator im Unterzustand „Warten und Analyse bewerten“ statt. Die Zielbestimmung erfolgt im Kognitiven Operator. Die Verhaltensanpassung findet im Kognitiven und Reflektorischen Operator statt und wird durch den Controller umgesetzt.

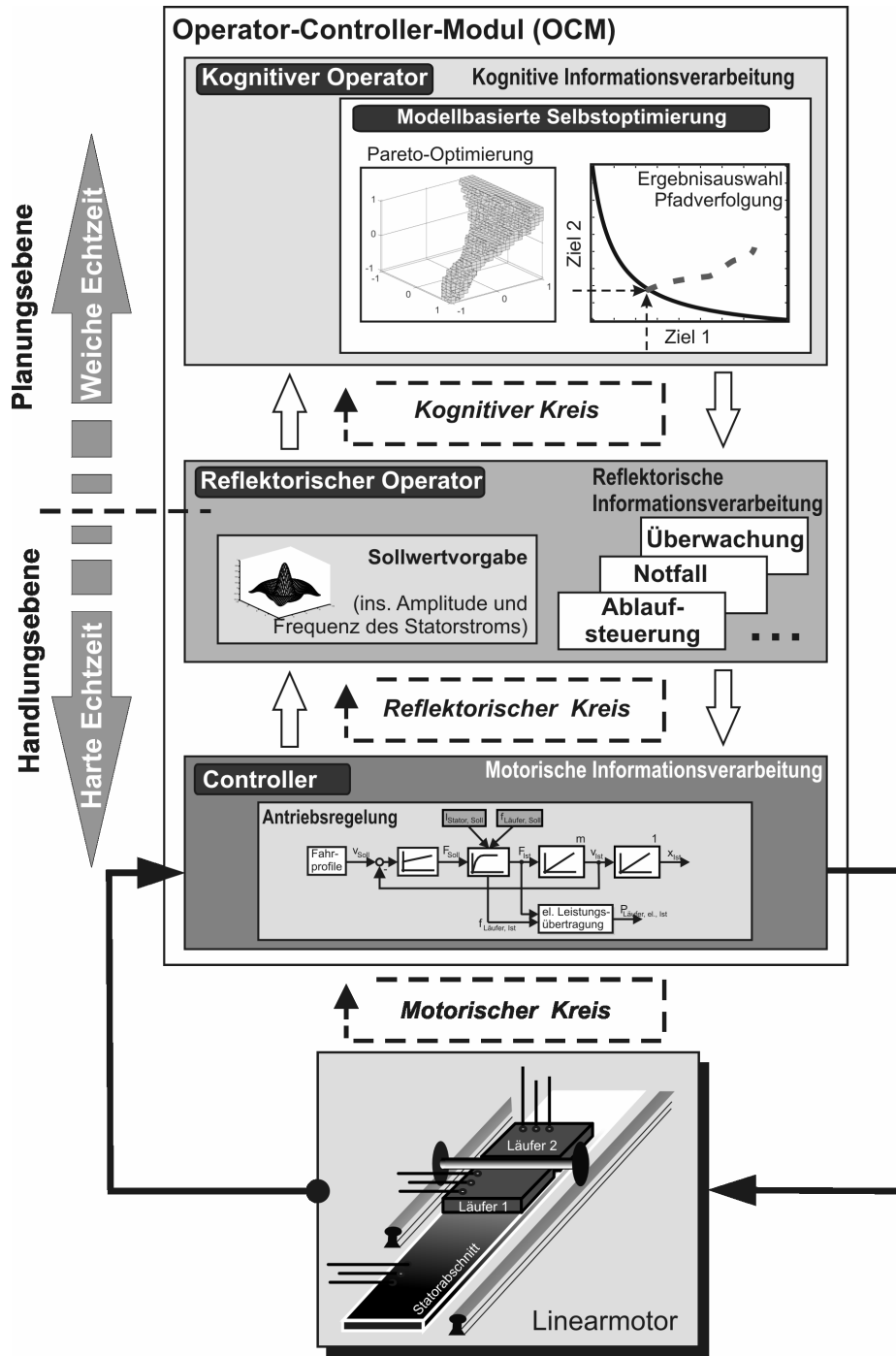


Bild 10 Ausgeprägtes Operator-Controller-Modul (OCM) für die Arbeitsplatzsteuerung

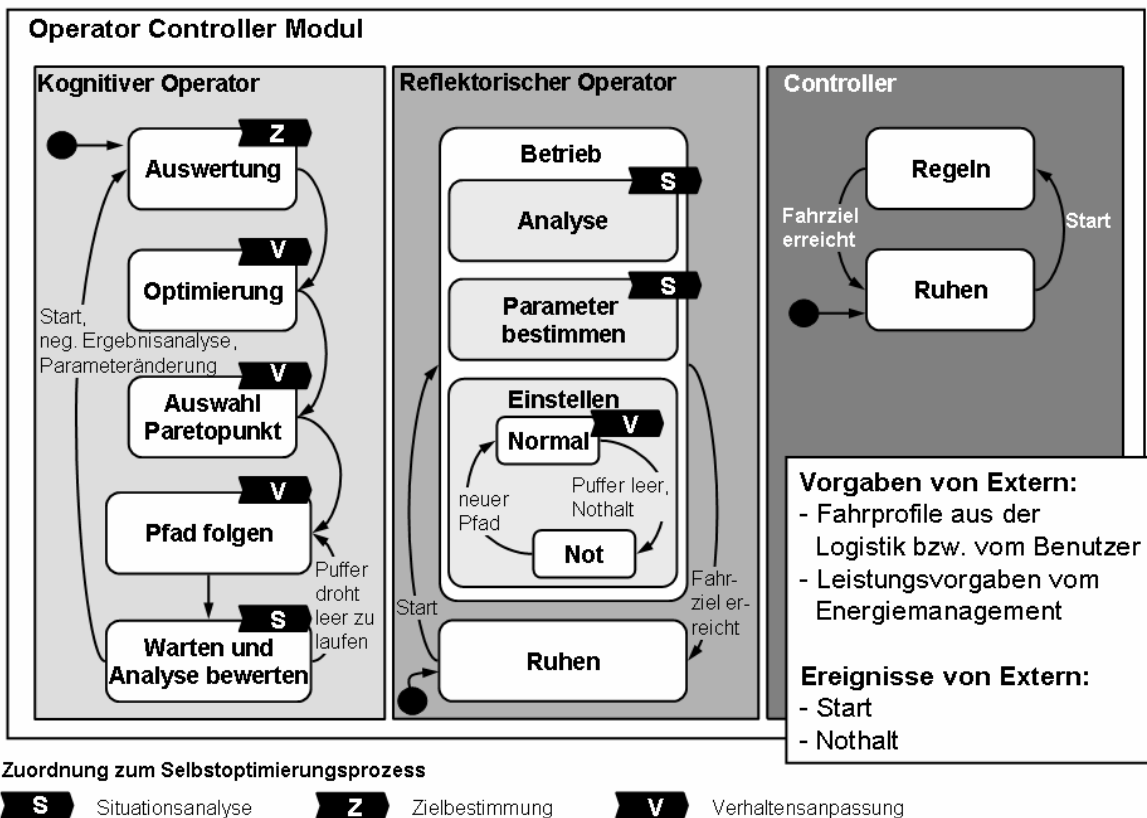


Bild 11 Unterzustände des OCMs und Zuordnung zu dem Selbstoptimierungsprozess

Bild 12 veranschaulicht den zeitlichen Ablauf einer Verhaltensänderung aufgrund eines neuen Parameters (z.B. Motorparameter oder Fahrprofil) mit Hilfe eines Zeitdiagramms (Partialmodell Gruppe Verhalten). Bei Inbetriebnahme des Shuttles wird das Antriebs- und Bremsmodul aktiviert, das bedeutet, dass der Controller von dem Zustand „Ruhen“ in den Zustand „Regeln“, der Reflektorische Operator in die Zustände „Not“, „Analyse“ sowie „Parameter bestimmen“ und der Kognitive Operator in den Zustand „Auswertung“ wechselt. Nun findet die Selbstoptimierung statt. Dabei durchläuft der Kognitive Operator mehrere Zustände, während der Reflektorische Operator in den Zuständen „Not“, „Analyse“ sowie „Parameter bestimmen“ und der Controller im Zustand „Regeln“ verharren. Erreicht der Kognitive Operator den Zustand „Warten und Analyse bewerten“, stellt der Reflektorische Operator auf die Zustände „Normal“, „Analyse“ und „Parameter bestimmen“ um. Tritt nun eine Parameteränderung auf, wechselt der Zustand des Kognitiven Operators von dem Zustand „Warten und Analyse bewerten“ in den Zustand „Auswertung“ und der Reflektorische Operator in die Zustände „Normal“, „Analyse“ und „Parameter bestimmen“. Der Selbstoptimierungsprozess wird ein weiteres Mal durchlaufen.

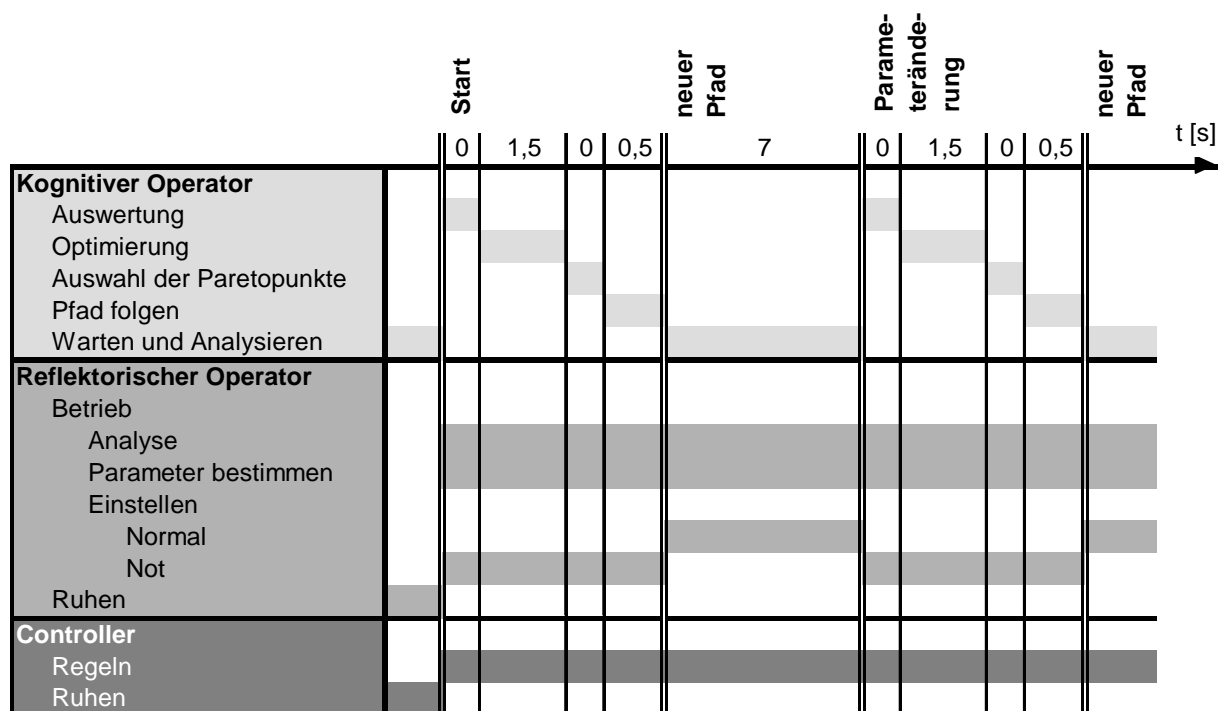


Bild 12 Zeitlicher Ablauf der Verhaltensanpassung aufgrund einer Parameteränderung

## 6. Resumee

Das Wirkparadigma der Selbstoptimierung eröffnet für den Maschinenbau neue Perspektiven: Maschinen mit einer inhärenten Teilintelligenz. Die Basis dafür bildet die Mechatronik. Bereits in der Mechatronik zeigt sich sehr deutlich die Notwendigkeit, eine Prinziplösung fachgebietsübergreifend zu spezifizieren, weil die Prinziplösung den Ausgangspunkt für die parallelen Entwurfs- und Ausarbeitungsaktivitäten in den beteiligten Fachgebieten Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und Softwaretechnik bildet. Dies gilt umso mehr für selbstoptimierende Systeme. In den frühen Phasen der Entwicklung solcher Systeme sind weitaus mehr Aspekte zu modellieren als das im klassischen Maschinenbau bzw. in der Mechatronik der Fall ist. Das in diesem Beitrag vorgestellte Set an Spezifikationstechniken zur Beschreibung der Prinziplösung eines selbstoptimierenden Systems konnte am Beispiel eines komplexen Systems - dem Antriebs- und Bremsmodul eines Schienenfahrzeugs - erfolgreich validiert werden. Damit zeichnet sich ab, wie die Entwicklung der Maschinen von morgen und der Einsatz adäquater Spezifikationstechniken erfolgen könnten.

## Literatur

- [1] Isermann, R.; Breuer, B.; Hartnagel, H.L.(Hrsg.): Mechatronische Systeme für den Maschinenbau - Ergebnisse aus dem Sonderforschungsbereich 241 „Integrierte mechanisch elektronische Systeme für den Maschinenbau (IMES)“. WILEY-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002
- [2] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI-Richtlinie 2206, Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [4] Lückel, J.; Hestermeyer, T.; Liu-Henke, X.: Generalization of the Cascade Principle in View of a Structured Form of Mechatronic Systems 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2001), Villa Olmo ; Como, Italy
- [5] Frank, U.; Giese, H.; Klein, F.; Oberschelp, O.; Schmidt, A.; Schulz, B.; Vöcking, H.; Witting, K.; Gausemeier, J. (Hrsg.): Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus - Definitionen und Konzepte. HNI-Verlagsschriftenreihe Band 155, Paderborn, 2004
- [6] Huang, M.: Funktionsmodellierung und Lösungsfindung mechatronischer Produkte. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, 2001
- [7] Henke, M.: Antrieb mit doppeltgespeistem Linearmotor für ein spurgeführtes Bahnfahrzeug. Dissertation, LEA, Universität Paderborn, Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 533, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003
- [8] Yang, B.; Meyer, M.; Grotstollen, H.: Coupled Pitch and Velocity Control of a doublyfed Linear Motor. In: 5th International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT 2003). Beijing, China, 2003
- [9] Pottharst, A.; Baptist, K.; Schütze, O.; Böcker, J.; Fröhleke, N.; Dellnitz, M.: Operating Point Assignment of a Linear Motor Driven Vehicle Using Multiobjective Optimization Methods. In: 11th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPEPMC 2004). Riga, Lettland, 2004
- [10] Dellnitz, M.; Schütze, O.; Hestermeyer, T.: Covering Pareto Sets by Multilevel Subdivision Techniques. Journal of Optimization, Theory and Applications. 2004
- [11] Witting, K.; Schulz, B.; Pottharst, A.; Dellnitz, M.; Böcker, J.; Fröhleke, N.: A new approach for online multiobjective optimization of mechatronical systems. submitted to the Int. J. on Software Tools for Technology Transfer STTT (Special Issue on Self-Optimizing Mechatronic Systems), 2004