

# Entwurfsverfahren für eingebettete Systeme zum Einsatz in der Mechatronik

Wolfgang Fengler, Bernd Däne

Fakultät IA, Institut TTI  
Technische Universität Ilmenau  
PSF 100565  
D-98684 Ilmenau  
wolfgang.fengler@tu-ilmenau.de  
bernd.daene@tu-ilmenau.de

**Abstract:** Beim Entwurf von Hard- und Software für eingebettete Systeme, die z.B. zur Steuerung mehrachsiger Präzisionsantriebe verwendet werden sollen, ist neben harten Echtzeitforderungen auch die Koexistenz unterschiedlicher Beschreibungsparadigmen und die Notwendigkeit formaler Exaktheit zu beachten. Das erfordert den Einsatz spezieller Beschreibungsmittel im modellbasierten Entwurf. Ein Beispiel sind Message Sequence Charts (MSC), die im vorliegenden Ansatz durch Anwendung eines Färbungskonzepts (analog zu Coloured Petri Nets) in gefärbte MSC mit wesentlich größerer Darstellungsmächtigkeit überführt werden. Durch Transformation der gefärbten MSC in Coloured Petri Nets werden deren Verfahren zur formalen Analyse zugänglich gemacht. Als weitere Modellierungsmittel, die durch Erweiterung des Petrinetz-Konzeptes entstanden sind, werden zeitintervall-bewertete Petrinetze, hybride Petrinetze und hybride Objektnetze einbezogen. Die Anwendung des Entwurfsverfahrens für einen planaren Mehrkoordinatenantrieb wird demonstriert.

## 1 Problemstellung

Eingebettete Systeme müssen oft unter harten Echtzeitbedingungen arbeiten. Ein Beispiel ist die Steuerung und Regelung von Bewegungsvorgängen innerhalb integrierter Mehrkoordinatenantriebe [SK00], [Ha02]. Hier werden Funktionen, die in konventionellen Lösungen durch mechanische Baugruppen ausgeführt werden, durch eingebettete Systeme übernommen. Dazu sind geschlossene Regelkreise mit kurzen Reaktionszeiten und komplexen Algorithmen erforderlich.

Beim Entwurf der eingebetteten Systeme müssen zu einem frühen Zeitpunkt Entwurfsentscheidungen getroffen werden, die die Performance und die Kosten des fertigen Systems entscheidend beeinflussen. Zu diesem Zeitpunkt ist in der Regel noch kein funktionierendes Exemplar des Gesamtsystems verfügbar. Der Entwurf und insbesondere die Verifizierung und Validierung müssen daher in möglichst aussagekräftiger Form an einem Modell vorgenommen werden. Die Modelle müssen dazu nicht nur das zu entwer-

fende eingebettete System darstellen, sondern das Gesamtsystem in seiner Vielfalt und Heterogenität widerspiegeln können.

## 2 Ausgangssituation

Aus dem Gesagten ergibt sich die Notwendigkeit, im Prozess der Modellierung folgende sich gegenseitig widersprechende Anforderungen zu erfüllen:

- Multi-Domain-Fähigkeit, d.h. Verknüpfung und gleichberechtigte Behandlung unterschiedlicher Modellierungsparadigmen (insbesondere zeitdiskrete und quasikontinuierliche Ansätze),
- Qualifizierte Notation von Zeiteigenschaften und Zeitrestriktionen,
- Durchgehender Weg bis zur Implementierung von Hard- und Software.

Verfügbaren Lösungen mangelt es an der gleichzeitigen Beachtung dieser drei Forderungen. Viele verbreitete Modellierungswerkzeuge bieten z.B. keine wirkliche Multi-Domain-Fähigkeit, sondern stellen jeweils eine bestimmte Domäne in den Vordergrund. Ausgewiesenen Multi-Domain-Entwurfswerkzeugen mangelt es hingegen an der vollen Unterstützung von formaler Analyse und von Implementierungsvorgängen im Targetsystem bei Beibehaltung der Multi-Domain-Eigenschaften. Stark formalisierten Modellierungsmitteln fehlt wiederum in besonders starkem Maße die Fähigkeit, unterschiedliche Modellierungsdomänen abzudecken.

## 3 Entwickelte Methoden

Ausgehend von dieser Situation wurde das Konzept entwickelt, die Darstellungsmöglichkeiten mit stark formalisierten Modellierungsmitteln wie Petrinetzen und Message Sequence Charts (MSC) zu untersuchen und zu erweitern [Fe03]. Durch Transformationen zwischen diesen Darstellungsmitteln untereinander und mit solchen aus dem Bereich von Multi-Domain-Werkzeugen sollte ein Weg von der Multi-Domain-Modellierung zur formalen Analyse und darauf aufbauend auch zur Implementierung im Targetsystem entwickelt werden. Im Verlauf dieses Weges wurden Beiträge zur Erweiterung der Darstellungsmittel und zur gegenseitigen Konvertierung geleistet.

### 3.1 Zeitanalyse mit Intervall-Petrinetzen (IPN)

Petrinetze mit Zeitintervall-Attributen [Po89] eröffnen den Weg zur formalen Analyse zeitbezogener Eigenschaften für komplexe Systeme. Die Analyse des Modells liefert Angaben über folgende Eigenschaften:

- Erreichbarkeit und Nichterreichbarkeit von Systemzuständen,
- Beschränktheit von Systemressourcen (z.B. Speicher) oder Verklemmungen im System, d.h. Synchronisationsfehler zwischen Teilmodulen, die zu unerwünschtem Stillstand im Gesamtsystem führen.

Das Problem bei der Analyse solcher Petrinetze ist die Zustandsexplosion. Die Analy-

semethode von Popova [Po89] gibt jedoch die Möglichkeit, einzelne Entwicklungsprozesse im Netz, d.h. Pfade im Erreichbarkeitsraum, zu verfolgen und unter vertretbarem Rechenaufwand Prozesseigenschaften zu analysieren. Für einen angegebenen Anfangszustand und eine Transitionssequenz lassen sich mehrere Zeitkennziffern ermitteln.

Auf Grundlage dieser Methode wurde ein Analyseverfahren entwickelt [GFN00] und in einem Petrinetz-Werkzeug implementiert.

### 3.2 Erweiterung der Hybriden Objektetze um die Intervall-Petrinetze

Der Formalismus der Hybriden Objektetze nach Drath [Dr99] vereint diskrete und kontinuierliche Komponenten. Dazu werden zusätzlich zu den zeitdiskreten Elementen des gewöhnlichen Petrinetzes kontinuierliche Transitionen und Plätze definiert. Damit existiert innerhalb eines formal gut analysierbaren Darstellungsmittels eine gleichwertige Kombination unterschiedlicher Modellierungsdomänen [DH01]. Die Hybriden Objektetze verfügen über ein leistungsfähiges objektorientiertes Hierarchiekonzept.

Das Konzept der Zeitintervalle wurde nun in die zeitdiskreten Transitionen integriert, um eine Zugangsmöglichkeit zu den Analysemöglichkeiten der Intervall-Petrinetze zu schaffen. Damit ist ein Schritt auf dem Wege zu formal analysierbaren domänenübergreifenden Darstellungsmitteln gegeben. Zur Unterstützung der praktischen Anwendung und als Werkzeug für weitere Untersuchungen wurde ein Petrinetz-Werkzeug um das Konzept der Intervall-Petrinetze erweitert und auch die im vorigen Unterabschnitt beschriebene Analyseverfahren implementiert [HF01].

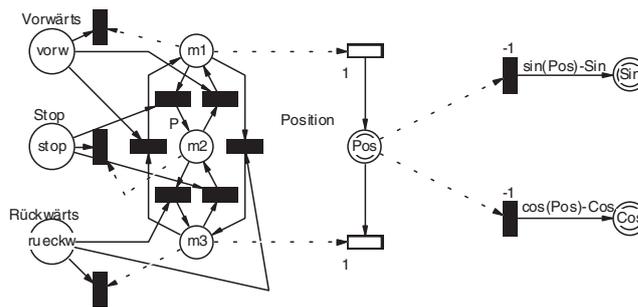


Abbildung 1: Ausschnitt aus einem zeitintervallbewerteten Hybriden Objektetz für einen Mehrkoordinatenantrieb

Zur Validierung des Konzepts wurden Modelle für die beispielhaft betrachteten Mehrkoordinaten-Antriebs- und Positioniersysteme entwickelt und untersucht. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt aus einem zeitintervallbewerteten Hybriden Objektetz für ein derartiges Antriebssystem.

### 3.3 Transformation von Message Sequence Charts in Intervall-Petrinetze

Das Konzept der Transformation von Message Sequence Charts in Intervall-Petrinetze dient als weiterer Angriffspunkt für die Überführung vorhandener spezialisierter Modelldarstellungen in eine formal analysierbare Darstellungsform. Damit wird das Ziel unterstützt, aus vorhandenen Modellen eine besser analysierbare einheitliche Darstel-

lungsform zu generieren und die Analyseergebnisse im ursprünglichen Modell auszuwerten. Es wurden strukturbasierte Transformationsvorschriften für Message Sequence Charts entworfen, implementiert und verifiziert [Fe04].

Unabhängig davon wurde eine Erweiterung der Message Sequence Charts (MSC) zu Coloured Message Sequence Charts (CMSC) konzipiert, implementiert und verifiziert. Analog zum Konzept der Gefärbten Petrinetze werden strukturähnliche Teilmodelle innerhalb eines MSC aufeinander gefaltet, wobei die einzelnen Instanzen durch unterschiedliche Farben adressiert werden können [FFD02]. Das führt zu einer Kompaktierung der Darstellung mit entsprechenden Vorteilen bei Übersichtlichkeit und Darstellungsmächtigkeit (siehe Abbildung 2). Die Verhaltensgleichheit ist durch die Faltungsregeln gesichert. Auf dem Weg über gefärbte Intervall-Petrinetze und deren Entfaltung können die CMSC denselben Transformations- und Analyseverfahren zugänglich gemacht werden wie die zuvor genannten MSC.

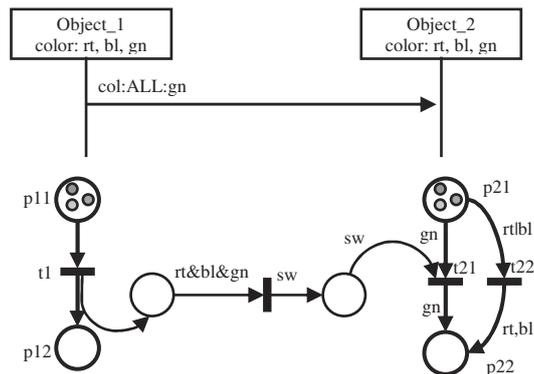


Abbildung 2: CMSC und resultierendes gefärbtes Petrinetz

### 3.4 Implementierung im Zielsystem

In Kooperation mit anderen Forschungsprojekten wurden Wege der Implementierung von Software aus den Modellen in konkrete Targetsysteme untersucht. Dabei wurden Mehrprozessorsysteme auf der Basis besonders schneller Digitaler Signalprozessoren angepeilt, welche die Bedienung der geschlossenen Regelkreise innerhalb der Mehrkoordinatenantriebe übernehmen sollen. Dabei war insbesondere die Erhaltung der Multi-Domain-Eigenschaften der Modelle mit ihrer Verbindung diskreter und kontinuierlicher Paradigmen von Bedeutung.

Aufgrund der Eigenheiten realer Zielsysteme ist die Integration in Echtzeitumgebungen mit Multitask-Echtzeit-Betriebssystemen notwendig. Diese Betriebssysteme bieten Funktionen zur Verwaltung von Konkurrenz, Prioritäten, zyklischen Abläufen und Nachrichtenaustausch. Für eine effektive Implementierung müssen diese Funktionen in zweckmäßiger Weise ausgenutzt werden. Insbesondere muss die zuverlässige Aktivierung ratenmonotoner Funktionen aus quasikontinuierlichen Domänen innerhalb ihrer Deadline in Einklang gebracht werden mit den notwendigen kurzen Reaktionszeiten ereignisdiskreter Prozesse. Die Schnittstellen beider Paradigmen bedürfen einer besonderen Behandlung, welche nicht im Widerspruch zu den im Modellierungsprozess verwendeten Prinzipien stehen darf.

In einer experimentellen Implementierung wurde die automatische Generierung von Targetcode aus Multi-Domain-Modellen erprobt [DF04]. Als Zielsystem wurde ein

eingebettetes System mit Digitalen Signalprozessoren verwendet, wobei eine Kooperation mit der gleichzeitig verlaufenden Entwicklung eines problemangepassten Echtzeitbetriebssystems stattfand.

## 4 Ergebnisse und Ausblick

Bei der Erprobung der vorgestellten Verfahren und Methoden fanden Kooperationen mit Forschungsprojekten und Industriepartnern statt, die sich einerseits auf die benutzten Modellierungstools und andererseits auf die modellierten mechatronischen Systeme bezogen. Dabei konnte die Anwendbarkeit belegt und ein wechselseitiger Nutzen erzielt werden. Diese Kooperationen sollen bei der Weiterentwicklung der Verfahren gewinnbringend fortgesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

- [DF04] Däne, B.; Fengler, W.: Implementing Mixed Discrete-Continuous Models into Realtime Environments. In: MIC 2004, The 23rd IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control, Grindelwald 2004, S. 583-588.
- [DH01] Duridanova, V.; Hummel, T.: Modelling of Embedded Mechatronic Systems Using Hybrid Petri Nets. In: IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control, Innsbruck 2001, S. 521-526.
- [Dr99] Drath, R.: Modellierung hybrider Systeme auf der Basis modifizierter Petri-Netze. Dissertation, TU Ilmenau, 1999.
- [Fe03] Fengler, W.; Däne, B.; Duridanova, V.; Licht, T.: Design Methodology for an Embedded System for High-Performance Computing. In: Real-Time Programming 2003, Proceedings of WRTP 2003, 27th IFAC/IFIP/IEEE Workshop on Real-Time Programming, Lagow 2003, S. 99-104.
- [Fe04] Fengler, O.: Erweiterung und formale Verifikation von dynamischen objektorientierten Modellierungsansätzen auf Basis höherer Petri-Netze. Dissertation, TU Ilmenau, 2004.
- [FFD02] Fengler, O.; Fengler, W.; Duridanova, V.: Modeling of Complex Automation Systems Using Colored Sequence Charts. In: Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Washington 2002, S. 1901-1906.
- [GFN00] Gurovic, D.; Fengler, W.; Nützel, J.: Development of Real-Time System Specifications Through the Refinement of Duration Interval Petri Nets. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Nashville 2000, S. 3098-3103.
- [Ha02] Hausotte, T.: Nanopositionier- und Nanomessmaschine. Dissertation, TU Ilmenau, 2002.
- [HF01] Hummel, T.; Fengler, W.: Design of Embedded Control Systems Using Hybrid Petri Nets. In: The International Workshop on Discrete-Event System Design DESDes'01, Przytok 2001, S. 181-194.
- [Po89] Popova-Zeugmann, L.: Zeit-Petri-Netze. Dissertation, Humboldt-Universität Berlin, 1989.
- [SK00] Saffert, E.; Kallenbach, E.: Nanopositionierung mit integrierten Mehrkoordinatenmotoren. In: Technisches Messen, Bd. 67 (2000), 7-8, S. 313-318.