



Der Einsatz von hybriden Petri-Netzen für den Entwurf komplexer eingebetteter Systeme für mechatronische Anwendungen

Thorsten Hummel, Vesselka Duridanova
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik und Automatisierungstechnik
Fachgebiet Rechnerarchitekturen
Email: thummel, vesselka@theoinf.tu-ilmenau.de

Zusammenfassung: Der Entwurf eingebetteter Systeme ist durch die hohe Komplexität und die Heterogenität dieser Systeme häufig eine große Herausforderung. Beim Entwurf mechatronischer Systeme kommt die unterschiedliche physikalische Natur der einzelnen Komponenten hinzu. In diesem Beitrag werden einige Probleme beim Entwurf solcher Systeme diskutiert. Als Lösungsansatz wird die Verwendung von hybriden Petri-Netzen für die Modellierung und Simulation komplexer eingebetteter Systeme auf einem hohen Abstraktionsniveau vorgeschlagen. Am Beispiel eines eingebetteten mechatronischen Systems werden die Möglichkeiten des Einsatzes einer speziellen hybriden Petri-Netz-Klasse bei der Modellierung und Simulation hybrider eingebetteter Systeme unter Verwendung eines objektorientierten Modellierungs- und Simulationstools gezeigt.

1. EINLEITUNG

Die gegenwärtig existierenden Entwicklungsmethoden und -tools lösen die Probleme des Entwurfes von komplexen eingebetteten Systemen nur unvollständig. Der größte Teil der Spezifikations- bzw. Entwurfsarbeit muss vom Entwickler selbst durchgeführt werden. Um die Entwicklung einfacher und vor allem effizienter zu gestalten, muss eine Methodik eine präzise Vorgehensweise enthalten, welche geeignete Modellierungsansätze und klare Sequenzschritte anbietet, und somit den Entwurfsprozess von der Spezifikation über die Systembeschreibung bis zur Implementierung unterstützt. Es kommt dabei darauf an, in den einzelnen Phasen des Entwurfprozesses Beschreibungsformalismen zu finden, welche die Komponenten aus unterschiedlichen Domänen erfassen können. Dabei muss man feststellen, dass schon die einheitliche Erfassung von Hardware und Software, den klassischen Komponenten eines eingebetteten Systems, Probleme auf Grund ihrer unterschiedlichen Signal- und Zeitkonzepte bereitet.

Gegenstand unseres Forschungsvorhabens sind mechatronische Systeme, die sich durch extrem hohe Heterogenität und Komplexität auszeichnen. Selbst das einfachste mechatronische System besteht aus

Subsystemen von unterschiedlicher physikalischer Natur. Moderne elektrische Antriebssysteme schließen mechanische, elektromechanische und elektronische Subsysteme ein. Darüber hinaus enthält jedes mechatronische Subsystem Komponenten mit unterschiedlichen Verhaltenskonzepten: diskret, kontinuierlich und sehr häufig kontinuierlich/diskret.

Systeme mit solchen Heterogenitäten bezüglich des Verhaltens werden im allgemeinen als hybride Systeme bezeichnet. Das Verhalten dieser Systeme lässt sich nicht durch die bekannten Beschreibungsformalismen in einem geschlossenen Modell erfassen, da die den einzelnen Komponenten zugrundeliegenden Modelle zu verschieden sind. Kontinuierliche Komponenten werden in der Regel durch ein kontinuierliches Zeitmodell beschrieben, während die digitale Komponenten durch diskrete Ablaufschritte dargestellt werden.

Folglich erstreckt sich die Heterogenität bei mechatronischen Systemen zugleich auf die physikalischen Prinzipien, die das Gesamtsystem impliziert, und auf das Verhalten der Systemvariablen innerhalb eines Subsystems. Das Verhalten von solchen heterogenen Systemen kann durch die bekannten Spezifikations- und Beschreibungsformalismen nicht einheitlich wiedergegeben werden.

Systemnahe Beschreibungstechniken, die für spezielle Teilbereiche wie z. B. den mechanischen oder Hardware- bzw. Softwareentwurf entwickelt und angewendet wurden, sind für die geschlossene ganzheitliche Erfassung des gesamten mechatronischen Systems schlecht geeignet. In Frage kommen Beschreibungsmethoden, die auf einem hohen Abstraktionsniveau das Verhalten des Systems abstrahiert von physikalischen, bzw. technischen Details beschreiben, jedoch die beide Grundzeit- bzw. Grundverhaltenskonzepte Kontinuität und Ereignis verbinden können.

Um beide Verhaltensmuster in Ihrer Wechselwirkung zu beschreiben, wurden in den letzten Jahren verschiedenen Ansätzen vorgeschlagen. Man kann entweder die verschiedenen Teilkomponenten durch unterschiedliche Formalismen beschreiben, oder man verwendet ein einheitliches Beschreibungsmittel für die unterschiedlichen Signal- und Zeitvorstellungen.

Wir haben verschiedene Methoden untersucht, die ein einheitliches Konzept für die Beschreibung von hybridem Systemverhalten auf einer hohen Abstraktionsebene, unabhängig von physikalischen und technischen Details anbieten.

Neben der Erfassung der Heterogenität wurden die Methoden auf die Bewältigung der Komplexität des zu beschreibenden Systems geprüft. Mechatronische Systeme kennzeichnen sich durch eine extrem hohe Komplexität aus. Zusätzlich zu seiner Grundfunktion (z. B. die Generierung der Bewegung bei Antriebssystemen) hat ein mechatronisches System eine Reihe weiterer Funktionen auszuführen (z. B. Positionierung, Luftzufuhrbeobachtung, Lasersteuerung usw.). Aber allein die Grundfunktion eines mechatronischen System impliziert in der Regel eine solch hohe Komplexität, dass ihre vollständige Beschreibung ohne Einsatz von Konzepten zur Erfassung und Kapselung von Teilmodulen und Teilfunktionen in einfachen Strukturen nicht nur sehr unübersichtlich, sondern unbeherrschbar wäre. Das erfordert die Anwendung von Methoden und Tools, die Modularisierung, Partitionierung, und hierarchische Strukturierung unterstützen.

Im folgenden wird die Anwendung einer Modellierungsmethode dargestellt, die auf dem Einsatz einer speziellen Petri-Netz-Klasse aufbaut, welche um Möglichkeiten zur Modellierung hybrider, d. h. gemischt kontinuierlich/diskreter Systeme erweitert wurde. Das für die Modellierung verwendete Werkzeug „Visual Object Net ++“ implementiert neben dieser speziellen hybriden Petri-Netz-Klasse auch objektorientierte Konzepte zur Beherrschung der Komplexität von realen Anwendungen.

2. HYBRIDE PETRI-NETZE

Die Theorie der Petri-Netze wurde in den 60er Jahren von C. A. Petri in seiner Dissertation „Kommunikation mit Automaten“ [1] formuliert. Mittlerweile sind die Petri-Netze ein erkannter Beschreibungsformalismus, der in den unterschiedlichsten Gebieten (Informatik, Automatisierungstechnik, Wirtschaft usw.) Anwendung gefunden hat.

Die Vorteile der Petri-Netze liegen in den grafikorientierten Darstellungsmöglichkeiten zur Modellierung von parallel ablaufenden Prozessen und Systemen. Das Interesse an graphischen Beschreibungstechniken ist in den letzten Jahren bedeutend gestiegen. Es zeichnet sich eine deutliche Tendenz der Ersetzung bzw. Ergänzung von konventionellen algebraischen Beschreibungsformalismen durch graphische ab. Einen guten Überblick über graphbasierte Modelle zur Darstellung von hybriden Systemen bietet [2].

Weiterhin gestatten verschiedene Erweiterungen der einfachen Petri-Netze (gefärbte, stochastische,

Intervall-, hybride) die Beschreibung von uneingeschränkt kompliziertem Verhalten, bei unterschiedlichem Abstraktionsgrad der Betrachtung. Auf einem hohen Abstraktionsniveau lassen sich somit Systeme in der Modellierung zusammenfügen, die zu weit voneinander entfernten Anwendungsfeldern gezählt werden.

Es wurde untersucht, inwiefern Petri-Netze im Prozess des Entwurfs mechatronischer Anwendungen verwendet werden können. Dafür wurden die von David und Alla eingeführten hybride Petri-Netze (HPN) [3] ausgewählt, da sie die Möglichkeit zur homogenen Beschreibung von kontinuierlich/diskretem Verhalten erlauben und somit die zwei Grundverhaltensmuster von Systemen verbinden. Die HPN basieren auf den von David und Alla eingeführten kontinuierlichen Petri-Netzen [4]. Eine Erweiterung der von David und Alla eingeführten Netzklasse ist in [5] beschrieben.

HPN sind eine Netzklasse, welche die allgemein bekannten Platz-Transitions-Netze um das Konzept der Kontinuität erweitern. Die Erweiterung bezieht sich sowohl auf die Plätze als auch auf die Transitionen. Kontinuierliche Transitionen feuern bei der Erfüllung der Schaltbedingungen mit einer Geschwindigkeit, die durch eine kontinuierliche Zeitfunktion angegeben wird. Kontinuierliche Plätze enthalten Marken, die kontinuierlich abgetragen werden. Neben kontinuierlichen Plätzen und Transitionen existieren im Beschreibungsformalismus auch diskrete Plätze und Transitionen. Diskrete und kontinuierliche Komponenten werden nach vordefinierten Regeln miteinander verkoppelt. Die möglichen Kombinationen sind ausreichend für die Modellierung und Simulation von kausalen Zusammenhängen, bei denen ereignisdiskrete und kontinuierliche Prozesse und Signale mit **einem** Beschreibungsmittel erfasst werden.

Die HPN bieten vielfältige Möglichkeiten, diskretes und kontinuierliches Verhalten miteinander zu verbinden. Abb. 1 stellt zwei der typischen Grundmuster dar:

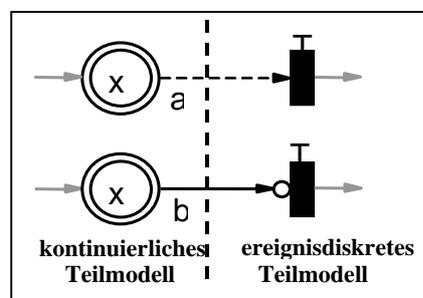


Abb. 1a Generieren von Ereignissen

- a) Erzeugen eines Ereignisses (Event) infolge der Überschreitung einer Schwelle einer kontinuierlichen Systemgröße

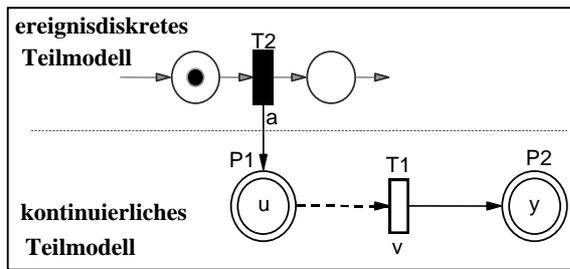


Abb. 1b Generieren einer Sprungfunktion

- b) Starten eines kontinuierlichen Prozesses nach einem zeitdiskreten Ereignis mit der Generierung einer Sprungfunktion

Bei der Betrachtung von bisher veröffentlichten Anwendungsbeispielen von hybriden Petri-Netzen fällt auf, dass sich diese Arbeiten im wesentlichen auf Anwendungsgebiete der Prozesskontrolle oder der Automatisierungstechnik konzentrieren. In diesem Beitrag werden deshalb am Beispiel der Modellierung des Verhaltens eines integrierten Mehrkoordinatenantriebes die Möglichkeiten des Einsatzes hybrider Petri-Netze für den Entwurf mechatronischer Systeme aufgezeigt. Der Beitrag stellt einen Teil eines Projektes zur Entwicklung einer durchgängigen Entwurfsmethodik für eingebettete mechatronische Systeme vor. Der Modellierungsphase wird dabei die wichtige Aufgabe beigemessen, die Funktion aller Komponenten dieses heterogenen Systems in ihrem Zusammenspiel in einer recht frühen Phase des Entwurfes zu überprüfen, sowie Ansätze und Varianten für die Implementierung anzubieten.

Im Visier des Entwurfs standen integrierte multi-axiale Antriebssysteme, die Anwendung in Hochtechnologiebereichen wie Mikroelektronik, Mikrosystemtechnik und Lasertechnik finden und von denen eine hohe Positionier- und Bahnengenauigkeit im Mikrometer- und zunehmend auch im Nanometer-Bereich gefordert wird. In diesem Beitrag wird die Modellierung des Positionsmesssystems des Antriebs vorgestellt.

Zur Modellierung und Simulation der HDN wurde das Werkzeug „Visual Object Net++“ verwendet. Mit diesem Werkzeug ist eine Modellierung hybrider Systeme unter objekt-orientierten Gesichtspunkten möglich. So können Teilsysteme modelliert und in Klassen abstrahiert werden. Ihre Wiederverwendung ist durch die Implementierung der Eigenschaften Vererbung und statischer Polymorphismus unbeschränkt möglich. Die Modularisierung und Bildung von hierarchischen Ebenen ohne Beeinflussung der Semantik des Netzes ermöglicht eine übersichtliche Darstellung und hilft vor allem bei der Bewältigung der Komplexität des Systems.

Das Positionsmesssystem wurde komponentenweise hierarchisch modelliert. Die Komponenten oder Subsysteme wurden einzeln modelliert und in Klassen gekapselt. Anschließend wurden sie in einer Klassenbibliothek abgelegt und bei der Modellierung entsprechend instanziiert.

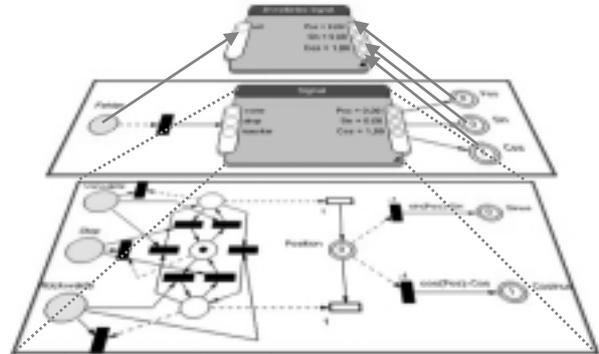


Abb. 2 Modellierung mit hierarchischen Ebenen

Durch Bildung von bis zu drei hierarchischen Ebenen gelang es, das Modell des Positionsmesssystems kompakt, übersichtlich und ohne Verzicht auf Details darzustellen (Abb. 2).

3. MODELLIERUNG

Abb. 3 stellt das Positionsmesssystem dar, das ein Bestandteil des in [6] beschriebenen integrierten Mehrkoordinaten-Antriebes ist. Das Messsystem ist in den Stator und den Läufer des Antriebs integriert. Es besteht aus einem präzise justierten Messgitter und einem photoelektronischem Belichtungsmesssystem, das den Läufer des Antriebes im Messgitter detektiert.

Das Messsystem liefert dem gesamten System die x-Position des Trägers, sowie die mittlere y-Position und die Abweichung der beiden y-Werte. Dazu berechnet das Messsystem aus den anliegenden Sinus- und Kosinussignalen der Sensoren jeweils eine X- und zwei Y-Positionen. Zum einen wird die Position in einem Gitterraster ermittelt. Zum anderen wird mit Hilfe der Sinus- und Kosinussignale die Position zwischen den einzelnen Gittern bestimmt. Während die eine Positionsbestimmung ein diskreter Prozess ist, kann der andere Vorgang eindeutig als kontinuierlich bezeichnet werden. Allerdings wirken dabei die analogen und digitalen Komponenten dieses Systems so eng zusammen, dass eine getrennte Modellierung dieser Komponenten die Funktionalität des Systems nicht korrekt abbilden kann.

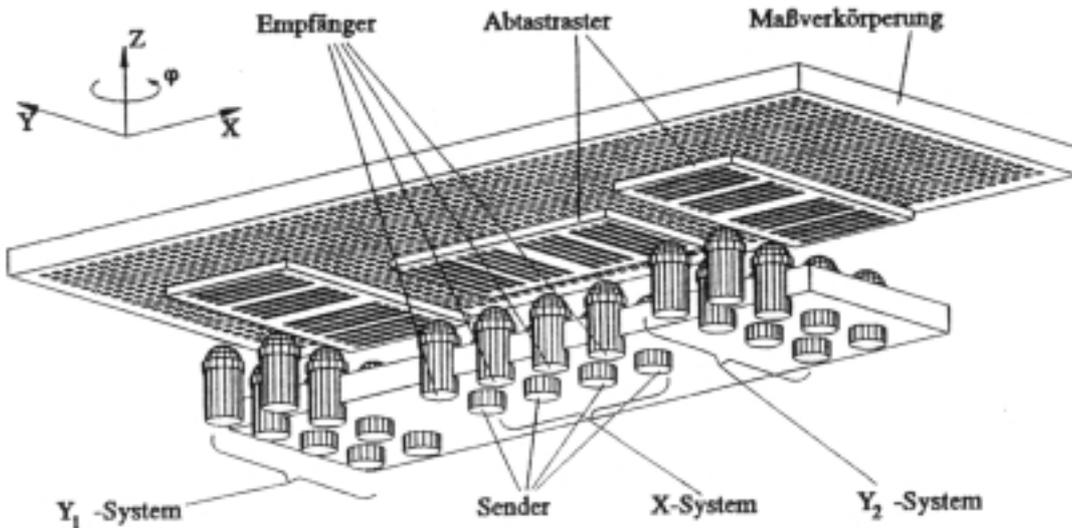


Abb. 3 Mehrkoordinaten-Messsystem

Systemumgebung

Die Komponente „Signalerzeugung“ (Abb. 4) simuliert die Sensordaten und liefert die Sinus- und Kosinussignale sowie einen Positionswert.

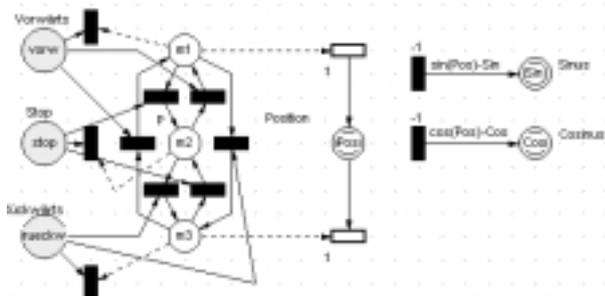


Abb 4 Komponente „Signalerzeugung“

Zur Übersichtlichkeit wird dieses Netz in ein Unternetz (Abb. 5) gespeichert und erhält die Eingabeplätze „Vorwärts“, „Stop“ und „Rückwärts“. Es liefert zusätzlich zum Sinus- und Kosinussignal auch die Position, um später einen Vergleichswert zur Fehlerkontrolle zu haben.

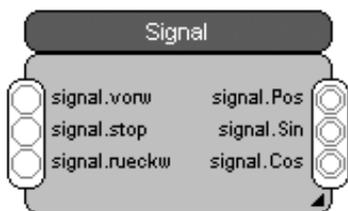


Abb. 5 Unternetz „Signal“

Zur Simulation eines möglichen Fehlverhalten des Messsystems wurden äußere Störungen in dem Unternetz „Scrambler“ (Abb. 6) modelliert, welches

in der Komponente „Störung“ des Gesamtsystems enthalten ist.

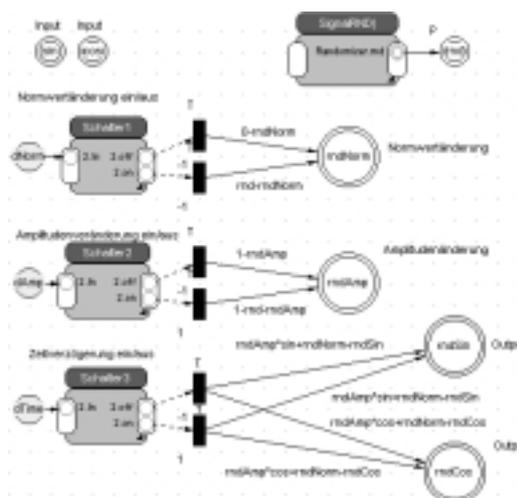


Abb. 6 Unternetz „Scrambler“

Messsystemkomponenten

Die Positionsermittlung für eine Achse wird mit der Komponente „Axmess“ (Abb. 7) modelliert.



Abb. 7 Komponente „Axmess“

Die Eingangssignale „Sinus“ und „Cosinus“ werden zunächst in den Unternetzen „Minmax_S“ und „Minmax_C“ normiert. Diese sind in ihrer Funktion identisch und wurden bei der Modellierung aus der gleichen Klasse „Minmax“ (Abb. 8) instanziiert.

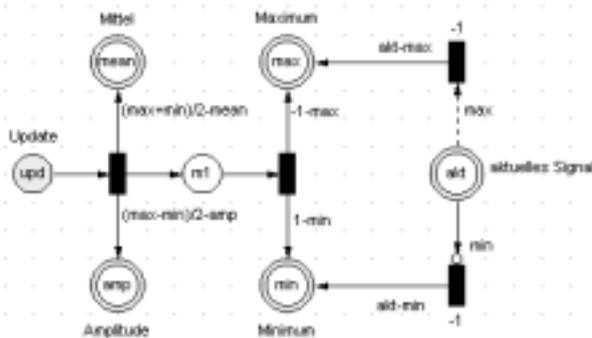


Abb. 8 Klasse „Minmax“

Anschließend erfolgt im sehr komplexen Unternetz „Mess_1“ (Abb. 9) die Bestimmung der Periodennummer, und zuletzt wird in „Position_1“ die exakte Position ermittelt.

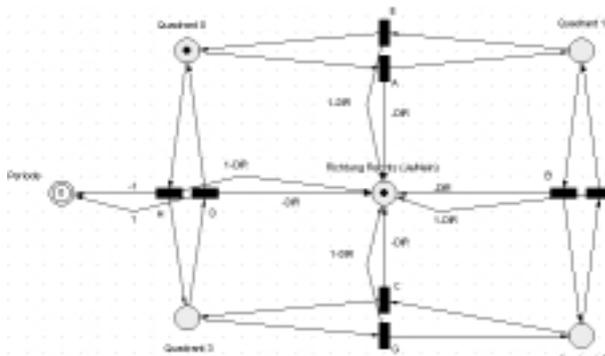


Abb. 9 Ausschnitt aus „Mess_1“

Zur Positionsbestimmung des Trägers muss die Periodenzahl ermittelt werden. Um diese korrekt bestimmen zu können, muss das Messsystem erkennen, in welche Richtung sich der Träger bewegt und damit, ob die Periodenzahl kleiner oder größer wird.

Zur Bestimmung von Periode und Richtung verwendet das originale Messsystem eine Look-Up-Tabelle, welche jedoch nur schwierig durch ein Petri-Netz nachgebildet werden kann. Deshalb wurden die Regeln in eine logische Form gebracht und daraus ein Unternetz „Position_1“ (Abb. 10) entwickelt.

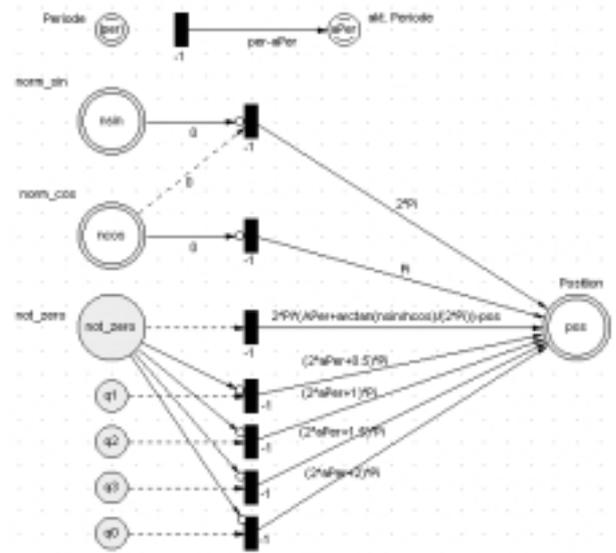


Abb. 10 Unternetz „Position_1“

Modell des Gesamtsystems

In Abb. 11 ist ein Modell des Gesamtsystems dargestellt. Es beinhaltet neben dem eigentlichen Messsystem die Komponenten für die Signalerzeugung sowie die Komponente „Störung“ für die Simulation von äußeren Störungen.

Die Komponenten zur Signalerzeugung „X-/Y1-/Y2-Richtung“ sind Instanzen der Klasse „Signal“. Die Komponenten „Axmess_X/Y1/Y2“ basieren auf der Klasse „Axmess“.

Die Komponente „Störungen“ kann Abweichungen der Normwerte, (z. B. Verschiebungen der Amplitude, Amplitudenänderungen, Zeitverzögerung usw.) erzeugen.

Durch das Zuführen von Marken in die Plätze **m1** bis **m8** können Bewegungsrichtungen und Störungen ein- und ausgeschaltet werden. Letztendlich wird vom Netz die X-Position, die durchschnittliche Y-Position und die Y-Abweichung gebildet.

Systemsimulation

Das Entwicklungswerkzeug „Visual Object Net ++“ ermöglicht nicht nur die Modellierung, sondern auch die Simulation von Systemen, die mit hybriden dynamischen Netzen beschrieben wurden.

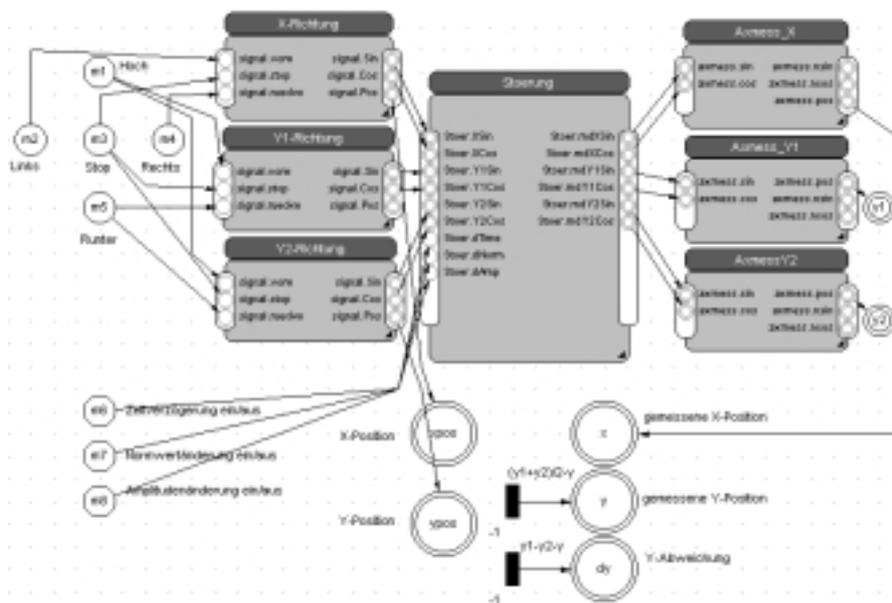


Abb. 11 Modell des Gesamtsystems

Während der Simulation wird das Schalten der Transitionen und der Markentransport vom Programm als Animation dargestellt. Die Änderung der Platzinhalte kann durch die Verwendung von Signaldiagrammen sichtbar gemacht werden (Abb. 12).

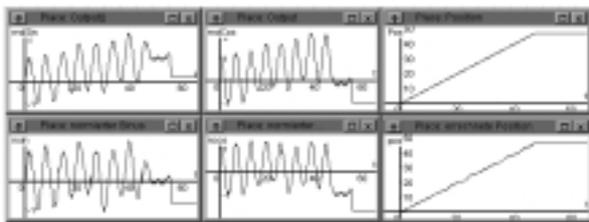


Abb. 12 Systemverhalten bei Störungen

Der hier simulierte Extremfall einer Störung der Normalwerte zeigt ein deutliches Überschreiten der Null des Kosinussignals (Abb. 12, Mitte oben). Trotzdem werden die Normalwerte richtig berechnet, und die Position der Maschine wird korrekt angegeben.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass mit der verwendeten hybriden Petri-Netz-Klasse und dem dazu gehörigen Modellierungs- und Simulationswerkzeug „Visual Object Net ++“ eine einheitliche Modellierung sowie die Simulation der Funktionen des untersuchten eingebetteten mechatronischen Systems möglich ist. Dabei erlaubt der objektorientierte Ansatz der verwendeten Netzklasse eine übersichtliche und trotzdem detaillierte Modellierung auch komplexer Systeme.

Als zukünftige Aufgaben werden neben einer Verfeinerung und Vervollständigung des erstellten Modells vor allem die Einbindung dieses Modellierungsprozesses in den weiteren Entwurfsablauf gesehen.

Diese Arbeit wurde von der DFG unter der Kennziffer FE 373/13-1 im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Entwurf und Entwurfsmethodik eingebetteter Systeme“ im Thema „Entwurf eingebetteter paralleler Steuerungssysteme für integrierte multi-axiale Antriebssysteme“ unterstützt.

LITERATUR

- [1] Petri, C. A.: *Kommunikation mit Automaten*. Schriften des IIM Nr. 2, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.
- [2] Grimm, Ch., Waldschmidt, K.: Spezifikation hybrider Systeme. In: Müller, W., Rammig, F. J. (Hrsg.): *Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen* - GI/ITG/GMM-Workshop, Paderborn, 1998.
- [3] Alla, H., David, R., Le Bail, J.: Hybrid Petri nets. *Proceedings of the European Control Conference*, Grenoble, 1991.
- [4] Alla, H., David, R.: Continuous Petri nets. *Proceedings of the 8th European Workshop on Application and Theory of Petri nets*, Saragossa, 1987.
- [5] Drath, R.: *Modellierung hybrider Systeme auf der Basis modifizierter Petri-Netze*. Dissertation, TU Ilmenau, 1999.
- [6] Saffert, E., Schäffel, C., Kallenbach, E.: Control of an Integrated Multi-coordinate Drive. *Mechatronics'96*, 18.-20.09.1996, Guimaraes, Portugal, Proceedings Vol. 1, S. 151-156.