



Der Einsatz von hybriden Petri-Netzen für den Entwurf gemischt analog-digitaler eingebetteter Systeme

Dipl.-Ing. Thorsten Hummel
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik und Automatisierungstechnik
Fachgebiet Rechnerarchitekturen
Email: thummel@theoinf.tu-ilmenau.de

***Zusammenfassung:** Der Entwurf von eingebetteten analog-digitalen Systemen verlangt nach Formalismen, welche auf einem hohen Abstraktionsniveau eine einheitliche Beschreibungsmöglichkeit sowohl für die kontinuierlichen als auch für die diskreten Funktionsbaugruppen des Systems bieten. Hybride Petri-Netze stellen eine Weiterentwicklung herkömmlicher Petri-Netze dar und ermöglichen die Beschreibung sowohl diskreter als auch kontinuierlicher Funktionen. Am Beispiel eines eingebetteten hybriden Systems werden die Möglichkeiten des Einsatzes einer speziellen hybriden Petri-Netz-Klasse bei der Modellierung und Simulation solcher Systeme unter Verwendung eines objektorientierten Modellierungs- und Simulationstools gezeigt.*

1. Einleitung

Der Entwurf gemischt analog-digitaler Systeme stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Entwurfswerkzeuge und -methoden. Das Verhalten dieser Systeme lässt sich nicht einfach in einem geschlossenen Modell beschreiben, da die den einzelnen Komponenten zugrunde liegenden Modelle zu verschieden sind. So werden kontinuierliche Komponenten durch ein kontinuierliches Zeitmodell beschrieben, während die digitalen Komponenten durch diskrete Ablaufschritte dargestellt werden. Systeme mit solchen Heterogenitäten werden im allgemeinen als hybride Systeme bezeichnet.

Für die Spezifikation und Modellierung solcher Systeme gibt es verschiedene Ansätze. Man kann entweder die verschiedenen Teilkomponenten durch unterschiedliche Formalismen beschreiben, oder man verwendet ein einheitliches Beschreibungsmittel für die unterschiedlichen Signal- und Zeitvorstellungen. In diesem Artikel sollen die Möglichkeiten eines hybriden dynamischen Netzes als ein graphbasiertes Beschreibungsmittel für die einheitliche Darstellung solcher Systeme dargestellt werden.

Einen guten Überblick über graphbasierte Beschreibungsmittel zur Darstellung von hybriden Systemen bietet [1]. Zu diesen graphbasierten Modellen zählen die Petri-Netze. Im folgenden wird die Anwendung einer speziellen Petri-Netz-Klasse, welche um Möglichkeiten zur Modellierung hybrider Systeme erweitert wurde, für den Entwurf hybrider Systeme vorgestellt.

2. Entwurf elektronischer Systeme mit Petri-Netzen

Die Theorie der Petri-Netze wurde in den 60er Jahren durch C. A. Petri in seiner Dissertation „Kommunikation mit Automaten“ [2] formuliert. Petri-Netze bieten formale, grafikorientierte Beschreibungsmöglichkeiten zur Modellierung von Systemen, die aus parallel ablaufenden Prozessen bestehen. Sie erweitern die Automatentheorie um Aspekte wie Nebenläufigkeit und Synchronisation.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Ansätze zur Nutzung von Petri-Netzen für den Entwurf und die Synthese synchroner und asynchroner digitaler Systeme entwickelt. Eine Übersicht ist in [3] und [4] zu finden.

Eine Methode zur Spezifikation und Modellierung von komplexen digitalen Systemen, die als Teil eines automatisierten Entwurfsprozesses synthesefähigen VHDL-Code erzeugt, ist in [5] und [6] beschrieben.

Das dort verwendete Hardware-Petri-Netz ist ein Platz-Transitions-Netz, welches für die Erfordernisse der Signalmodellierung erweitert wurde. So bietet das Hardware-Petri-Netz die Möglichkeit, bestimmten Plätzen synchrone Funktionalitäten und bestimmten Transitionen entsprechend asynchrone Funktionalitäten zuzuordnen. Jeder Transition kann eine externe Schaltbedingung zugeordnet werden. Außerdem werden zusätzlich zu den vorhandenen Kantentypen Setz- und Testkanten definiert, die der Steuerung des Signalflusses dienen.

Mit dem Hardware-Petri-Netz kann man sowohl synchrones als auch asynchrones Verhalten modellieren. Weiterhin ermöglicht es ein hierarchisches Design sowie eine Partitionierung desselben. Der aus dem Hardware-Petri-Netz generierte VHDL-Code ist voll synthesefähig.

Probleme beim Entwurf gemischt analog-digitaler Systeme mit Petri-Netzen

Digitale elektronische Systeme sind häufig nur Teilkomponenten größerer Systeme, die für die Interaktion mit der realen Welt analoge Komponenten besitzen. Der Entwurf solcher gemischt analog-digitaler oder hybrider Systeme stellt sich als eine wesentlich schwierigere Aufgabe dar als der Entwurf rein digitaler Systeme.

Petri-Netze wurden ursprünglich als Formalismus zur Modellierung und Analyse diskreter Systeme eingeführt. Seit Einführung der Petri-Netze wurden zahlreiche Varianten und Erweiterungen für Petri-Netze vorgeschlagen. Dazu gehört u.a. die Einführung von Konzepten zur Modellierung von zeitlichen Abläufen, wobei diese Abläufe immer noch diskret betrachtet werden. Analoges Verhalten liegt aber ein kontinuierliches Zeitmodell zugrunde, was nur näherungsweise durch Diskretisierung beschrieben werden kann.

Ein Ansatz, der Prädikat-Transitions-Netze zum Entwurf hybrider eingebetteter Systeme nutzt, wurde in [7] vorgestellt. Die Überführung zeitkontinuierlicher Differentialgleichungen in zeitdiskrete Differenzgleichungen führt jedoch zu Einschränkungen in der Genauigkeit, die unter bestimmten Bedingungen nicht hinnehmbar sein können.

3. Hybride Petri-Netze

Eine Möglichkeit zur homogenen Beschreibung von hybriden Systemen bietet die Nutzung von hybriden Petri-Netzen (HPN)[8]. Sie basieren auf den von David und Alla eingeführten kontinuierlichen Petri-Netzen[9]. HPN sind eine Netzklasse, welche die 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 Erfüllung der Schaltbedingungen mit einer Geschwindigkeit, die durch eine kontinuierliche Zeitfunktion angegeben wird. Kontinuierliche Plätze enthalten Marken, deren Wert nicht ganzzahlig interpretiert wird, sondern die in eine theoretisch unendlich kleine Menge von Bruchstücken zerlegt werden. Neben den kontinuierlichen Plätzen und Transitionen existieren im Beschreibungsformalismus auch die klassischen diskreten Plätze und Transitionen. Diskrete und kontinuierliche Komponenten werden nach definierten Regeln miteinander verkoppelt.

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

- a) Erzeugen eines Ereignisses (Event) infolge des Überschreitens einer Schwelle einer kontinuierlichen Systemgröße
- b) Starten eines kontinuierlichen Prozesses nach einem zeitdiskreten Ereignis mit der Generierung einer Sprungfunktion

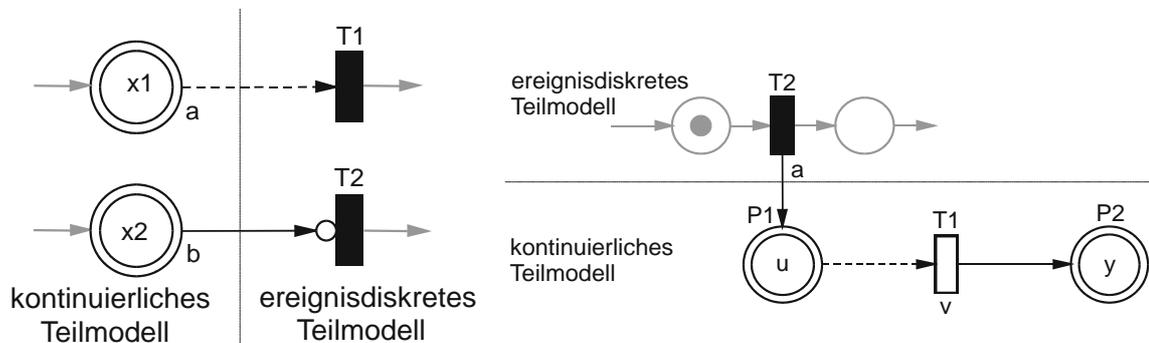


Abb. 1a Generieren von Ereignissen **Abb. 1b** Generieren einer Sprungfunktion

Dieser Ansatz bildete die Grundlage für verschiedene Arbeiten zur Modellierung hybrider Systeme, so z.B. der in [10] beschriebene Einsatz höherer Netze zur Modellierung komplexer hybrider Systeme.

Eine Erweiterung der von David und Alla eingeführten Netzklasse wird in [11] beschrieben. Dieses Hybride Dynamische Netz (HDN) beschreibt das Verhalten eines ereignisdiskreten, kontinuierlichen oder hybriden Systems oder Teilsystems und bietet durch ein objektorientiertes Konzept verbesserte Möglichkeiten zur Beschreibung komplexerer Systeme.

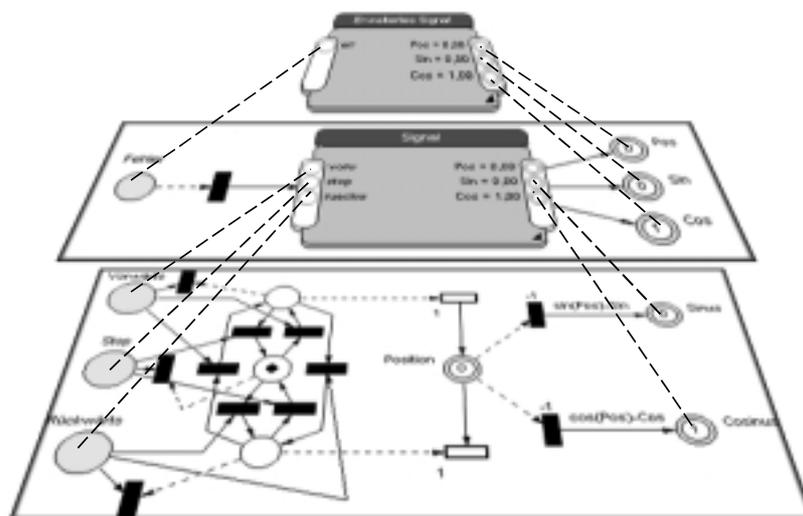


Abb. 2 Modellierung mit hierarchischen Ebenen

Zur Modellierung und Simulation der HDN wird das objektorientierte Werkzeug „Visual Object Net ++“ [12] verwendet. Mit diesem Werkzeug ist eine Modellierung hybrider Systeme unter objektorientierten 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 (Abb. 2) ohne Beeinflussung der Semantik des Netzes ermöglicht eine übersichtliche Darstellung und hilft vor allem bei der Bewältigung der Komplexität des Systems.

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. Anwendungsbeispiele aus dem Gebiet des analog-digitalen Schaltungs- und Systementwurfs fehlen völlig. Deshalb werden in diesem Beitrag am Beispiel eines eingebetteten hybriden Systems die Möglichkeiten des Einsatzes hybrider Petri-Netze aufgezeigt.

4. System- und Schaltungsentwurf mit Hybriden Dynamischen Netzen

Als Anwendungsbeispiel zur Untersuchung der Möglichkeiten von hybriden Petri-Netzen beim Entwurf gemischt analog-digitaler Systeme wurde ein inkrementelles Mehrkoordinatenmesssystem (Abb. 3) als Bestandteil eines in [13] beschriebenen integrierten Mehrkoordinatenantriebes für einen Messtisch ausgewählt. Das Messsystem ist in den Stator und den Läufer des Antriebes integriert. Es besteht aus einem präzise justierten Messgitter und einem photoelektronischen Belichtungsmesssystem, welches die Position des Läufers im Messgitter bestimmt.

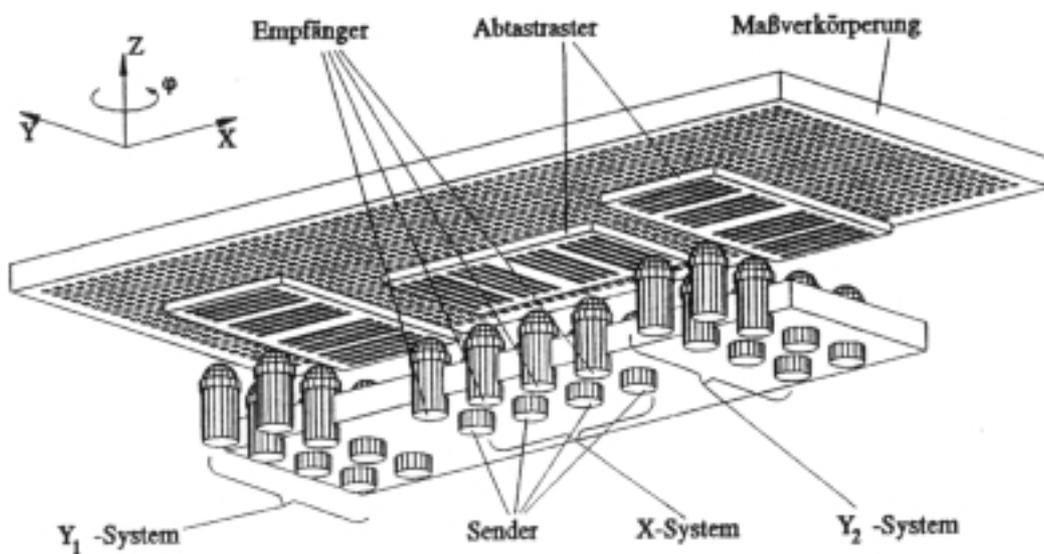


Abb. 3 Mehrkoordinatenmesssystem

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.

Das Messsystem wird komponentenweise hierarchisch modelliert. Die Komponenten der Subsysteme wurden einzeln modelliert und in Klassen abstrahiert, diese in einer Klassenbibliothek abgelegt, und bei der Modellierung entsprechend instanziiert. Durch die Bildung von bis zu drei hierarchischen Ebenen gelang es, das Modell des Positionsmesssystems kompakt, übersichtlich und ohne Verzicht auf Details darzustellen.

Systemumgebung

Die Komponente „Signalerzeugung“ (Abb. 4) simuliert die von den Sensoren kommenden Daten und liefert die Sinus- und Kosinussignale sowie einen Positionswert. Dazu wurde ein Netz geschaffen, welches über die drei Eingabeplätze „Vorwärts“, „Stop“ und „Rückwärts“ verfügt, die Umschalter darstellen. Die wirklichen Zustände **Vorwärts**, **Stop** und **Rückwärts** werden durch die Plätze **m1**, **m2** und **m3** mit der Kapazität 1 repräsentiert.

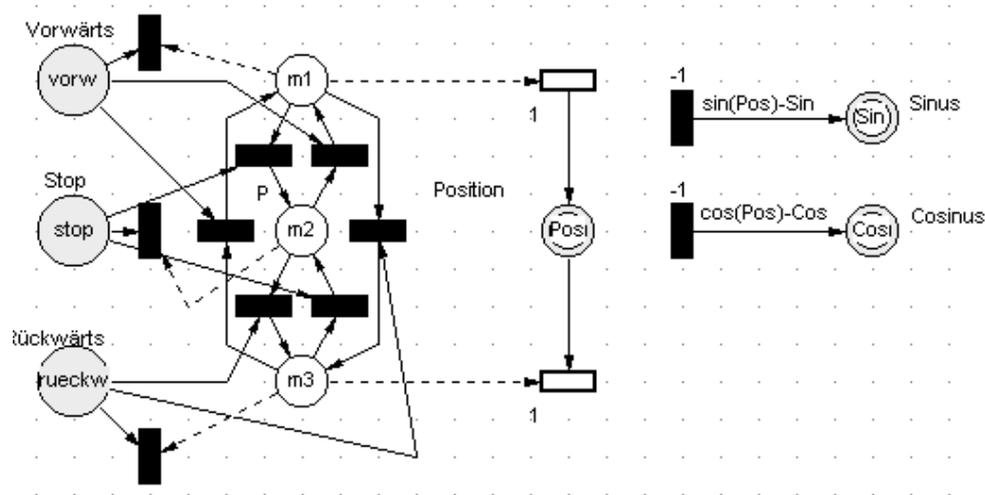


Abb. 4 Signalerzeugung

Abhängig vom aktiven Zustand muss die Zahl **Pos** erhöht oder verringert werden. Dies geschieht durch 2 kontinuierliche Transitionen, welche die Plätze **m1** bzw. **m3** testen und entsprechend nach Platz **Pos** feuern. Die Sinus- und Kosinussignale werden von zwei weiteren Transitionen gebildet, welche die entsprechenden Werte aus **Pos** bilden und in die Plätze Sin und Cos legen.

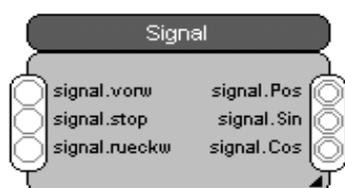


Abb. 5 Unternetz „Signal“

Zur Erhöhung der 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.

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.

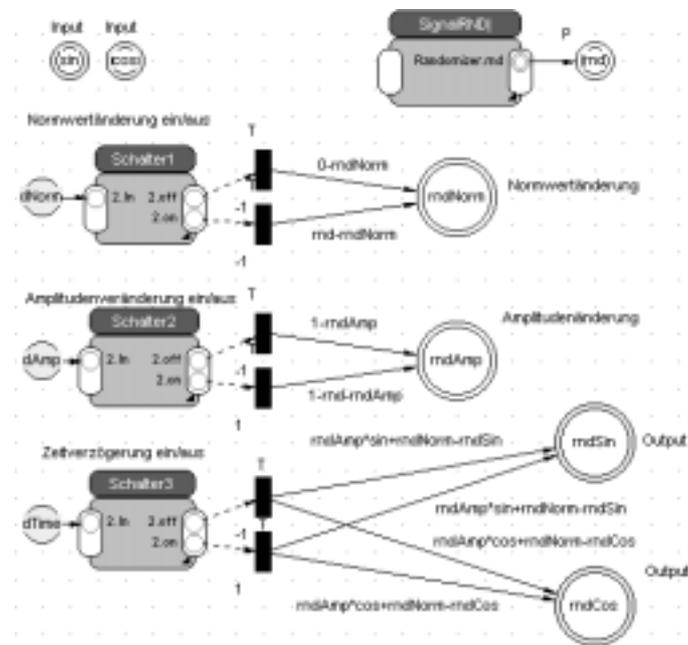


Abb. 6 Unternetz „Scrambler“

Messsystemkomponenten

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

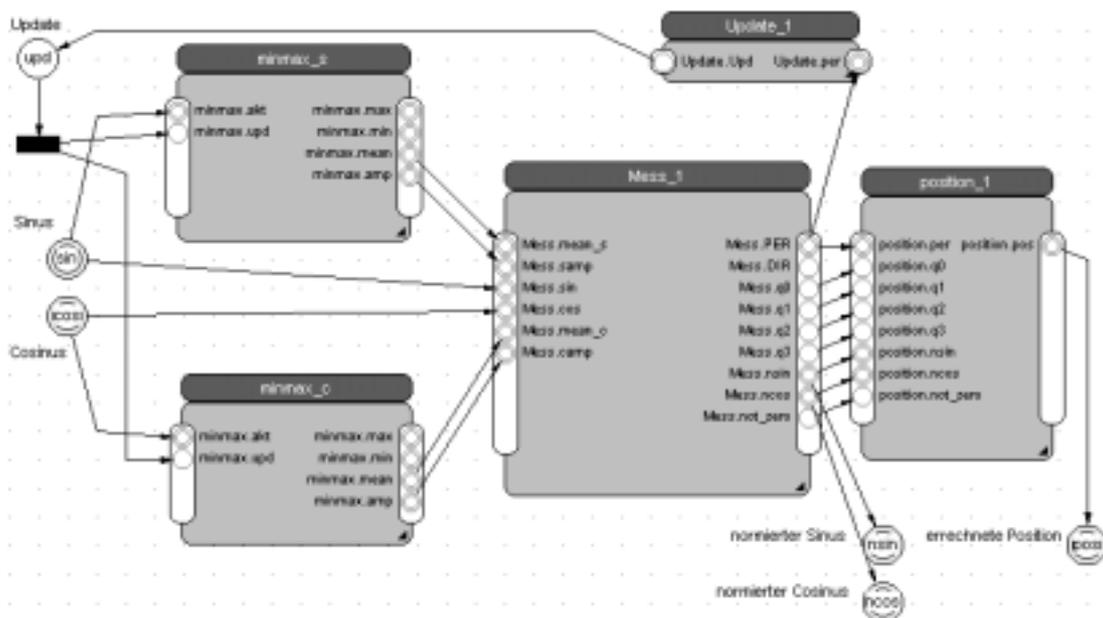


Abb. 7 Unternetz „Axmess“

Die Eingangssignale Sinus und Kosinus werden zunächst in den Unternetzen „Minmax_s“ und „Minmax_c“ (Abb. 8) normiert. Diese sind in ihrer Funktion identisch und wurden bei der Modellierung aus der gleichen Klasse „Minmax“ instanziiert. Die Netze „Minmax_s“ und „Minmax_c“ benötigen zusätzlich eine Aktualisierung der Normwerte, welche durch das Unternetz „Update_1“ alle 2 Perioden erfolgt.

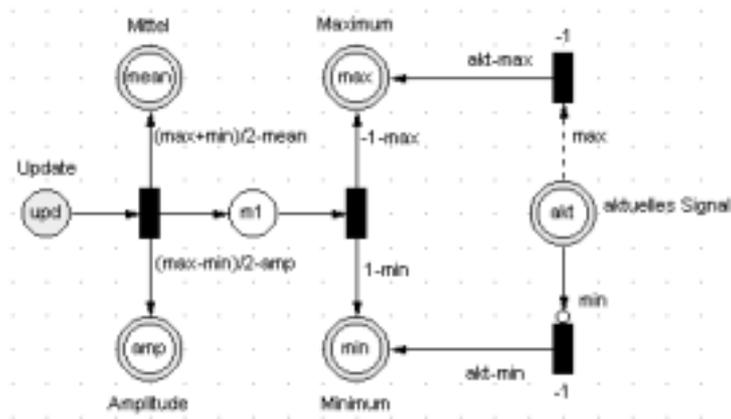


Abb. 8 Unternetz „Minmax“

Anschließend erfolgt in „Mess_1“ (Abb. 9) die Bestimmung der Periodenzahl. Sie muss für die Positionsbestimmung des Trägers ermittelt werden. Um die Position 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 Netz entwickelt.

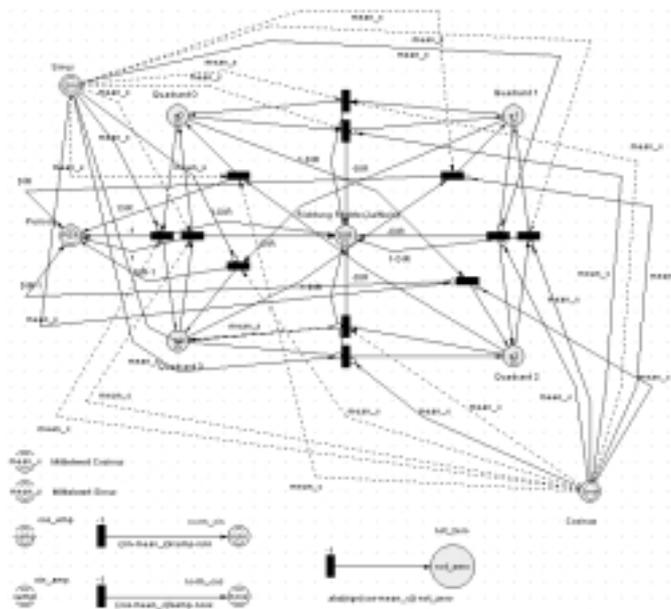


Abb. 9 Unternetz „Mess_1“

Abschließend wird die exakte Position ermittelt. Da bei der Signalerzeugung die Rasterkonstante des Messtisches außer Acht gelassen wurde, werden auch die Gleichungen zur Bestimmung der exakten Position auf 1 normiert. Es entstand das Netz „Position_1“ (Abb. 10) zur Berechnung der Position des Tisches.

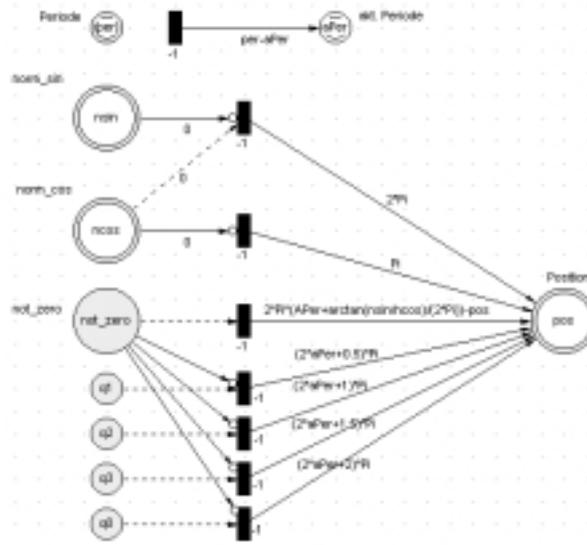


Abb. 10 Unternetz „Position_1“

Zunächst mußte die Änderung der Periodenzahl **Per** um einen Takt verringert werden, damit das Netz synchron laufen kann und keine Sprünge bei der Positionsberechnung entstehen. Der synchronisierte Wert **aPer** wird nun für die Berechnung der Position benutzt. Um die Ausführung einer Division durch Null zu verhindern, wird der Platz **not_zero** genutzt. Ist der Kosinus ungleich Null, erfolgt eine normale Berechnung der Position.

Modell des Gesamtsystems

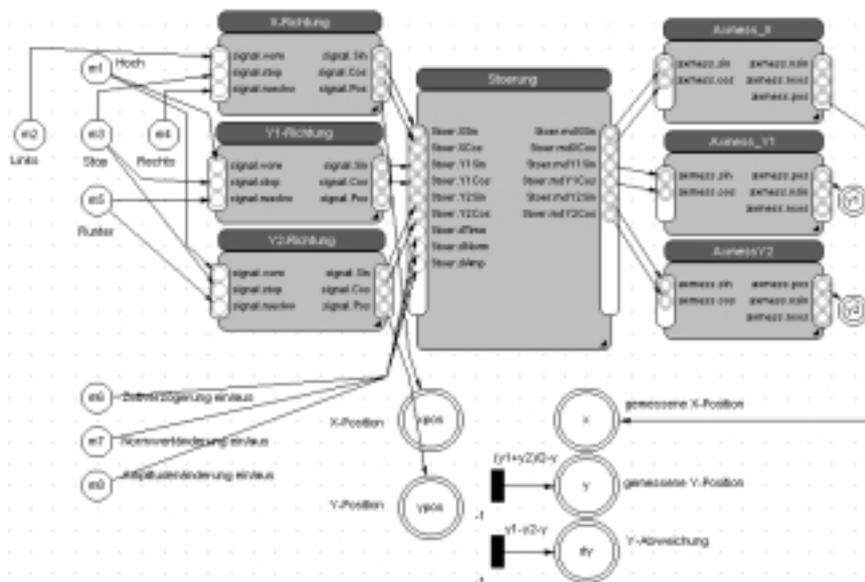


Abb. 11 Modell des gesamten Messsystems

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“, während die Komponenten „Axmess_X/Y1/Y2“ auf der Klasse „Axmess“ basieren.

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

Simulation des Systems

Das Werkzeug „Visual Object Net ++“ ermöglicht nicht nur die Modellierung, sondern auch die Simulation von mit HDN beschriebenen Systemen.

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

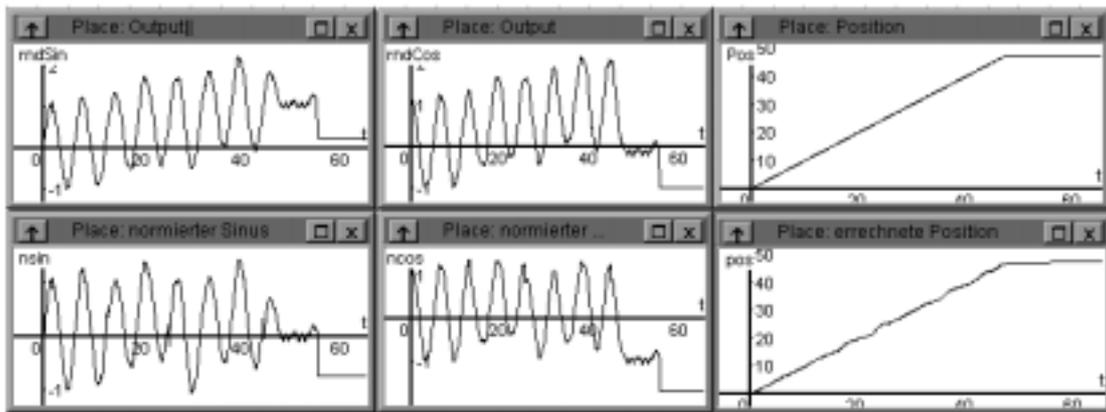


Abb. 12 Verhalten des Messsystems bei Störungen

Dieser Extremfall der Simulation einer Störung der Normalwerte zeigt ein deutliches Überschreiten der Null des Kosinussignals (Abb. 12, Mitte oben). Die Normalwerte werden richtig berechnet, und die Position der Maschine wird richtig angegeben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Entwurf gemischt analog-digitaler Systeme verlangt nach Beschreibungsmöglichkeiten sowohl für diskretes als auch für kontinuierliches Verhalten. Hybride Petri-Netze bieten die Möglichkeit, eine anschauliche graphbasierte Beschreibung eines gemischt analog-digitalen Systems zu erstellen.

Neben anderen, häufig beschriebenen Anwendungsgebieten hybrider Systembeschreibungen, eignen sich hybride Petri-Netze sehr gut für die Beschreibung gemischt analog-digitaler Schaltungen und Systeme.

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 hybriden Systems möglich ist. Dabei erlaubt der objektorientierte Ansatz der verwendeten Netzklasse eine übersichtliche 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. Dies kann durch die Überführung der grafischen Petri-Netz-Notation in eine Beschreibung mit einer Hardwarebeschreibungssprache wie z.B. VHDL-AMS geschehen.

Literatur

- [1] Grimm, Ch., Waldschmidt, K.: Spezifikation hybrider Systeme. Müller, W., Rammig, F. J. (Hrsg.): Methoden und Beschreibungssprachen zur Modellierung und Verifikation von Schaltungen und Systemen - GI/ITG/GMM-Workshop, Paderborn, 1998.
- [2] Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Schriften des IIM Nr. 2, Institut für Instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962.
- [3] Marranghello, N., Mirkowski, J., Bilinski, K.: Synthesis of Synchronous Digital Systems Specified by Petri nets. Yakovlev, A., Gomes, L., Lavagno, L. (Hrsg.): Hardware Design and Petri Nets, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [4] Yakovlev, A., Koelmans, A., Semenov, A., Kinniment, D.J.: Modelling, Analysis and Synthesis of Asynchronous Control Circuits Using Petri Nets. Integrations - The VLSI Journal, 21(3), pp.143-170, 1996.
- [5] Rokyta, P.: ESDA-basierter System- und ASIC-Entwurf mit Petri-Netzen. Dissertation, TU Ilmenau, Ilmenau, 2000.
- [6] Rokyta, P., Fengler, W., Hummel, Th.: Electronic System Design Automation Using High Level Petri nets. Yakovlev, A., Gomes, L., Lavagno, L. (Hrsg.): Hardware Design and Petri Nets, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [7] Kleinjohann, B., Tacke, J., Tahedl, C.: A Design Environment Using High Level Petri nets as Common Model for Specification, Analysis, and Validation of Hybrid Real Time Systems. Monjau, D. (Hrsg.): Hardwarebeschreibungssprachen und Modellierungsparadigmen: 3. ITG/GI/GMM-Workshop, Holzgau, 1997.
- [8] Alla, H., David, R., Le Bail, J.: Hybrid Petri nets. Proceedings of the European Control Conference, Grenoble, 1991.
- [9] Alla, H., David, R.: Continuous Petri nets. Proceedings of the 8th European Workshop on Application and Theory of Petri nets, Saragossa, 1987.
- [10] Wieting, R.: Modellbildung und Simulation mit hybriden höheren Netzen. Dissertation, Universität Oldenburg, 1997.
- [11] Drath, R.: Modellierung hybrider Systeme auf der Basis modifizierter Petri-Netze. Dissertation, TU Ilmenau, 1999.
- [12] Drath R.: Objektorientierte Modellierung hybrider Prozesse - Vorstellung eines neuen Werkzeuges. 42. IWK Ilmenau, 1997.
- [13] 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.