

# On the Modeling and Evaluation of Real-Time Systems

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
doctor of technical sciences

presented by  
MARTIN NAEDELE  
Dipl.-Ing., Ruhr-Universität Bochum, Germany  
born February 15, 1972  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Lothar Thiele, examiner  
Prof. Dr. Manfred Morari, co-examiner

---

## Abstract

Real-time systems need to be correct with respect to both functional and temporal behavior. The use of models to validate specifications and to evaluate design alternatives is nowadays a necessity for the rapid and efficient development of complex and heterogeneous real-time systems.

Many model-based evaluation methods exist. Some use simulation, others analyze the state space or the numerical parameters of a system. Each method has its individual input model. The evaluation methods and their input descriptions are adapted to specific system characteristics and evaluation purposes. In the area of schedulability analysis, this work proposes a characterization of task arrival and processor service behavior that unifies several previous methods and extends them towards the analysis of bursty and utilization-bound behavior.

In order to evaluate all relevant aspects of a system or its respective model, several different evaluation methods need to be applied. This, however, requires multiple input models for the analysis of functional behavior, the documentation of system structure, and the validation of scheduling algorithms and timing behavior. The use of multiple input models is both error-prone, as the validity with respect to the complete system of results obtained from investigating certain views in isolation is not clear, as well as inefficient and costly, as several different models need to be built and maintained.

This work proposes a novel approach for constructing integrated system models based on Petri nets, an expressive and clearly defined visual and operational specification formalism. A pragmatic generic real-time system model structure is presented which can be used for scheduling and timing simulation as well as for formal verification of functionality. Solutions are proposed for the issues that have previously prevented Petri nets from being used for the modeling of systems with preemptive scheduling. For a model following the proposed generic structure it is shown that certain analytical statements obtained from model abstractions remain valid for the complete model.

A methodology has been developed to systematically construct models that conform to this structure. The model building process makes use of design patterns, a concept that is transferred from the software engineering domain to the area of modeling with dataflow visual languages such as Petri nets. Petri net design patterns capture behavior instead of structure and are thus orthogonal and complementary to the traditional approach of reducing model complexity by hierarchical structuring.

## Zusammenfassung

Echtzeitsysteme müssen sowohl in Bezug auf ihr Zeitverhalten als auch auf ihre Funktionalität korrekt arbeiten. Die Benutzung von Modellen zum Validieren von Spezifikationen und zum Evaluieren von Entwurfsalternativen ist heutzutage eine Notwendigkeit für die schnelle und effiziente Entwicklung komplexer, heterogener Echtzeitsysteme.

Es existieren viele verschiedene modellbasierte Evaluationsmethoden. Einige von ihnen beruhen auf der Simulation, andere auf der Analyse des Zustandsraumes oder der numerischen Parameter des betrachteten Systems. Jede Methode verwendet ein eigenes, spezifisches Modell als Ausgangsbasis. Die Auswertungsverfahren und die ihnen als Eingaben dienenden Systembeschreibungen sind auf spezifische Systemeigenarten und Untersuchungsziele hin ausgerichtet. Für das Gebiet der Analyse von Ablaufplänen stellt die vorliegende Arbeit eine neue Art der Beschreibung von Task-Anforderungen und Abarbeitung durch den Prozessor vor, die verschiedene frühere Ansätze vereinheitlicht und so erweitert, dass auch ein charakteristisches Verhalten analysiert werden kann, das Bursts aufweist oder durch eine allgemeine Grenzauslastungsfunktionen beschrieben werden kann.

Um alle relevanten Aspekte eines Systems bzw. seines Modells zu untersuchen müssen verschiedene Auswertungsmethoden eingesetzt werden. Dies wiederum verlangt mehrere verschiedene Datenmodelle als Eingabebeschreibungen für die Analyse des funktionalen Verhaltens, die Dokumentation der Systemstruktur, sowie die Validierung der Ablaufplanungsalgorithmen und des Zeitverhaltens. Die Verwendung mehrerer verschiedener Eingabemodelle kann einerseits leicht zu Fehlern führen, da die Gültigkeit von Ergebnissen, die durch die isolierte Untersuchung einer Systemansicht gewonnen wurden, in Bezug auf das Gesamtsystem nicht klar ist, und ist andererseits teuer und ineffizient, da mehrere unterschiedliche Modelle erstellt und gepflegt werden müssen.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiger Ansatz zur Erstellung integrierter Systemmodelle vorgeschlagen, der auf Petri-Netzen basiert. Petri-Netze stellen einen ausdrucksstarken und klar definierten visuellen und operationalen Spezifikationsformalismus dar. Eine pragmatische und allgemein anwendbare Modellstruktur für Echtzeitsysteme wird vorgestellt, die für die Simulation von Ablaufplanung und Zeitverhalten ebenso wie für die formale Verifikation der Systemfunktionalität verwendet werden kann. Für die Problembereiche, die bisher die Modellierung von Systemen mit präemptiven Ablaufplanungsverfahren mit Petri-Netzen verhindert haben, werden Lösungen angeboten. Ausserdem wird gezeigt, dass für ein Modell, das der vorgeschlagenen generischen Modellstruktur folgt, basierend auf Teilmodellen bestimmte analytische Aussagen gemacht werden können, die dann auch für das Gesamtmodell gültig sind.

Es wurde eine Methodik für die systematische Erstellung von Modellen entwickelt, die der oben angesprochenen Form folgen. Dieser Modellierungsprozess verwendet Entwurfsmuster, ein Konzept, das aus der Softwaretechnik in das Gebiet der visuellen Datenflusssprachen, zu denen auch Petri-Netze gehören, übertragen wurde. Entwurfsmuster für Petri-Netze drücken Verhalten statt Struktur aus und sind somit orthogonal und komplementär zur hierarchischen Strukturierung, die traditionell zur Verringerung der Modellkomplexität verwendet wird.