



Routing und Scheduling im zeitgesteuerten Ethernet

Mathematische Modellierung, Optimierung
und systematische Leistungsbewertung

Dissertation

VORGELEGT VON:

Eike Björn Schweißguth,

geboren am 11.04.1990 in Oldenburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

EINGEREICHT AM:

26.11.2024

Zusammenfassung

Echtzeitfähige Netzwerke dienen der Kommunikation in kritischen Anwendungsbereichen, in denen Nachrichten zuverlässig innerhalb vorgegebener Latenzschranken ihre Empfänger erreichen müssen. Um derartige Anforderungen erfüllen zu können, wurde standardkonformes Ethernet in den letzten Jahren um hierfür notwendige Funktionen erweitert, wobei die entsprechenden Teilstandards unter dem Namen Time-Sensitive Networking zusammengefasst werden. Für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Latenz und Jitter in der Kommunikation wurden dabei in IEEE 802.1Qbv Mechanismen definiert, die das zeitgesteuerte Senden von Frames ermöglichen. Algorithmen zum Ermitteln einer sinnvollen Netzwerkkonfiguration, insbesondere eines Sendezeitplans für das zeitgesteuerte Senden, wurden dabei allerdings nicht standardisiert. Dies hat zu einem gesteigerten Forschungsinteresse an derartigen Algorithmen, auch als Scheduler bezeichnet, geführt.

Die Vielzahl von Publikationen in diesem Gebiet hat jedoch bisher einen aussagekräftigen Vergleich der darin veröffentlichten Scheduler vermissen lassen. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass bisher kein systematischer Entwurf von Testdaten für diese Scheduler stattfindet, sodass Tests mit unzureichender Abdeckung bezüglich der Netzwerk- und Verkehrsparameter durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden daher Testcases zur systematischen Leistungsbewertung der Scheduler entworfen. Die verbesserte Testabdeckung gegenüber bisherigen Untersuchungen ermöglicht es, Stärken und Schwächen einzelner Scheduler identifizieren zu können. Die Veröffentlichung der Testdaten als Datensatz stellt deren Wiederverwendbarkeit für zukünftige Schedulervergleiche sicher, während eine präzise Beschreibung der Erzeugung der Testdaten die Nachvollziehbarkeit und Erweiterbarkeit adressiert.

Des Weiteren werden in der Arbeit Scheduler auf Basis mathematischer Modelle entworfen. Konkret wird dabei Integer Linear Programming eingesetzt, um das Planungsproblem des zeitgesteuerten Netzwerkverkehrs abzubilden und Lösungen zu finden. Entwurfsziel des Schedulers war es, den Lösungsraum bezüglich Routing und Scheduling möglichst vollständig zu erfassen, um Aussagen bezüglich der Planbarkeit gegebener Netzwerkszenarien und der Güte von gefundenen Lösungen treffen zu können, welche beim Vergleich von Schemulern als Referenzwerte nutzbar sind. Eine umfassende Optimierung dieses modellbasierten Ansatzes macht ihn außerdem auch hinsichtlich der Leistungsfähigkeit (insbesondere bezüglich Rechenzeiten) zu einem praktisch anwendbaren Verfahren zur Planung zeitgesteuerter Netzwerke. Durch die Optimierung der Modelle konnte die durchschnittliche Rechenzeit in den systematischen Testcases um mehr als 90 % reduziert werden. Spezielle Modellanpassungen ermöglichen außerdem die Erstellung von Schedules, die mit standardkonformen Bridges nach IEEE 802.1Q kompatibel sind.

Abstract

Real-time networks offer communication services for critical applications, where messages need to be delivered to their destinations reliably and within given latency bounds. In recent years, additional mechanisms were specified in the Ethernet standards in order to satisfy these requirements. The new substandards associated with these extensions are collectively referred to as Time-Sensitive Networking standards. Among these, IEEE 802.1Qbv defines mechanisms for the time-triggered transmission of frames, which enables communication with the lowest possible latencies and jitter. Yet, algorithms for finding sensible network configurations, especially regarding the schedule for time-triggered transmissions, were not defined as part of the standards. This situation led to significant research efforts regarding such scheduling algorithms.

However, the large amount of publications in this area has lacked an expressive comparison of the presented schedulers so far. In this regard, one of the major problems is the absence of a systematic design of test data for the developed schedulers, which has led to evaluations with an insufficient coverage of network and traffic parameters. Therefore, this work presents test cases for a systematic scheduler benchmarking, which offers an improved test coverage and thereby allows the identification of strengths and weaknesses of tested schedulers. The publication of these test cases as dataset ensures reusability for future scheduler comparisons, whereas a precise description of their creation addresses transparency and extensibility.

As another major contribution, this work presents schedulers based on mathematical models. Specifically, Integer Linear Programming is used to represent the planning problem of time-triggered network traffic and find appropriate solutions. With respect to these models, the primary design goal was a comprehensive coverage of the routing and scheduling design space, which allows giving answers regarding the feasibility of networking scenarios and the quality of solutions. Thereby, these models provide reference data for scheduler comparisons. Additionally, comprehensive optimizations were applied to this model-based approach, leading to a high performance (i.e. low runtimes) and ensuring practical applicability for scheduling time-triggered networks. By means of these optimizations, the average runtimes for the systematic test cases were reduced by more than 90%. Furthermore, implemented model extensions enable the creation of schedules that are compatible with standards-compliant IEEE 802.1Q bridges.