



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

**Ausarbeitung - Seminar  
WS2012-2013**

Kai Müller

Zeitsynchronisierung in verteilten Systemen  
Ein Peer-to-Peer-basierter Ansatz

**Kai Müller**

**Thema der Ausarbeitung - Seminar**

**WS2012-2013**

Zeitsynchronisierung in verteilten Systemen

**Stichworte**

Echtzeit Ethernet, TTEthernet, Bussysteme, Automotive Anwendungen

**Kurzzusammenfassung**

Der Einsatz von echtzeitfähigen Netzwerken nimmt mehr und mehr zu. Unterschiedliche Industriezweige wie dem Automotive Bereich oder der Medizintechnik erwägen diese Technologie in vielen Bereiche einzusetzen, da die ursprünglichen Bussysteme bereits an ihre Grenzen stossen oder dies in naher Zukunft zu erwarten ist. Zudem können erweiterte Funktionen umgesetzt werden, für die die zur Zeit bereitgestellten Leistungen nicht ausreichen. Bisherige Synchronisationsalgorithmen verfolgen ein standardisiertes Master-Slave-Prinzip und weisen so in Hinblick auf Single Point of Failure und Unterstützung von Energiesparfunktionen erhöhten Planungsbedarf und Kostenaufwand auf. Ein neuer auf Peer-to-Peer basierender Ansatz könnte diese Probleme durch seine Architektur auffangen und dadurch Komplexität reduzieren und Wartungs- und Produktionskosten einsparen.

**Title of the paper**

Timesynchronisation in Distributed Systems

**Keywords**

Real-time Ethernet, TTEthernet, Bussystems, Automotive Applications

**Abstract**

The amount of real-time capable networks increases fast. Because bus-systems used today come to their limit, several lines of industry, for example automotive or medical engineering, are planning to adopt this technology. Besides additional functions with heavier demands could be build in. Today's synchronisation algorithms uses standard master-slave-concepts, and therefore have high demands in planing with the use of cost excessive solutions for Single point of Failure strategies and energy saving. A new P2P-based architecture could solve these problems with the use of its concept and so, reduces the extra costs in maintenance and production.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Ziele . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Vorarbeiten</b>	<b>4</b>
2.1	Literaturstudie . . . . .	4
2.2	Projektarbeiten . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Architekturübersicht</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Zielsetzung und Umsetzung</b>	<b>9</b>
4.1	Planung . . . . .	9
4.2	Risiken . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>11</b>
	<b>Bibliography</b>	<b>12</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Die Verarbeitung von Informationen in Echtzeit erfolgt zunehmens in verteilten Topologien, wodurch mehr echtzeitfähige Netze ihre Anwendung finden. Während in den Bereichen des Flugzeugs und der Automatisierungstechnik bereits Erfahrung in dieser Technologie gesammelt werden konnte (vgl. [1]), wird diese in Zukunft auf weitere Gebiete wie der Medizintechnik oder auch im Bereich Automotive adaptiert (vgl. [2]). Es kommen spezielle echtzeitfähige Protokolle zum Einsatz, welche auf die jeweiligen Anforderungen wie Bandbreite und Zeitverhalten (geringe Latenzen und Jitter), sowie deren Zuverlässigkeit in der Datenübertragung hin optimiert entwickelt wurden. Um dies vorhersagbar zu gewährleisten sind Synchronisationskonzepte innerhalb des jeweiligen verteilten Systems notwendig.

Diese Synchronisationskonzepte stellen eine koordinierte Kommunikation der jeweiligen Knoten untereinander sicher, sowie ermöglicht das Erkennen und Reagieren auf Störungen. Typische Störungen sind der Ausfall eines Knotens (Dead Node), sowie das fehlerhafte Senden von Informationen oder das Senden von fehlerhaften Informationen ins Netzwerk (Babbling Idiot). Die Konzepte werden anhand ihrer Metriken in Gruppen kategorisiert, basieren jedoch ausnahmslos auf den gleichen hierarchischen Ansätzen. In diesen erhält jeder Knoten eine Rolle als Synchronisationsmaster oder -client. Da Synchronisationsmaster einen sogenannten "Single Point of Failure" darstellen, erhöhen weiterführende Protokolle, wie das TTEthernet (SAE AS6802) oder das Precision Time Protocol (IEEE 1588) die Anzahl an Stufen in der Hierarchie, indem sie zusätzliche Rollen einführen. Diese Herangehensweise reduziert zwar die Wahrscheinlichkeit einer Störung, kann diese jedoch nicht ausschließen.

Um eine umfassende Ausfallsicherheit zu gewährleisten werden daher zusätzliche Konzepte hinzugezogen. Redundante Knoten werden hinzugefügt, Netzwerkpfade werden gespiegelt sowie je nach Sicherheitsgrad ganze Schattennetzwerke gebildet, was in erhöhten Kosten, sowie in einer komplexen Konfiguration resultiert. Diese Komplexität führt dazu, dass selbst bei vergleichsweise kleinen Netzen (ca. 10 - 20 Knoten) eine Konfiguration mit ökonomischen Aufwand nicht mehr ohne die Hilfe einer ausgereiften Toolchain möglich ist. Die Toolchain ermöglicht Abhängigkeiten zwischen Nachrichten und Ereignissen aufzulösen, sowie Konflikte im Zeitverhalten oder der Bandbreite aufzuzeigen. Es wäre wünschenswert über ein Synchronisationsprotokoll zu verfügen, welches ohne eine statische Rollenverteilung auskommt und somit keine Notwendigkeit einer hohen Vorlaufzeit in der Planung hat. Zudem ließe sich das Einsatzgebiet weiter ausbauen, da mit den traditionellen Ansätzen ausschließlich geschlossene Systeme über eine echtzeitfähige Kommunikation verfügen können.

Der Einsatz des Peer-to-Peer-Konzeptes als Synchronisationsprotokoll ist ein Novum. Trotz des sowohl statischen Entwicklungsprozesses des hierarchischen Ansatzes als auch das Übergrei-



fen der echtzeitfähigen Kommunikation auf neue Einsatzgebiete zeigen sich bisher keine veröffentlichten Arbeiten, welche die Peer-to-Peer-Technologie als Synchronisationskonzept aufgreifen.

## 1.2 Ziele

Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über die angestrebten Ziele der Abschlussarbeit. Es werden zunächst allgemeine Ziele dargestellt, aus diesen in Abschnitt 1.2.2 anschließend konkrete technische Ziele abgeleitet werden.

### 1.2.1 Allgemeine Ziele

Um den Einsatz von Peer-to-Peer-basierenden Synchronisationsmechanismen in echtzeitfähigen Netzen untersuchen zu können, ist es erforderlich, ein Protokoll zu entwickeln, welches den Anforderungen entspricht. Anders als beim Verbreiteten hierarchischen Modell, welches durch Ansätze endlicher Automaten beschrieben wird ist der Peer-to-Peer-Ansatz ein funktionales Modell. Dieser Funktionale Ansatz wird durch eine Reihe von Abhängigkeiten und Parametern beschrieben, deren Verhaltensweisen zu ermitteln sind, da sie die Eigenschaften des Synchronisationsmodells definieren.

Sowohl Parameter, als auch das Funktionsmodell entspringen dem mathematischen Kontext und können dementsprechend simuliert werden. Sie sind jedoch in dieser Funktion in Bezug auf die Synchronisierung von Netzwerken noch wenig aussagekräftig. Hierzu ist es notwendig das mathematische Konzept auf die Semantik der Netzwerkebene zu übertragen (vgl. [3]). Ebenso ist eine Evaluierungsstrategie von Nöten, welche mit der Hilfe von Metriken eine Bewertbarkeit, sowie die Vergleichbarkeit zwischen dem übertragenen Netzwerkkonzept und den hierarchischen Modellansätzen ermöglicht (vgl. [4]). Erst durch diesen Schritt ist die Einhaltung der Anforderungen, welche an ein echtzeitfähiges Netzwerk gestellt werden nachweisbar.

### 1.2.2 Technische Ziele

Aus den in Abschnitt 1.2.1 genannten allgemeinen Zielen lassen sich die folgenden konkreten technischen Ziele ableiten. Die Protokollentwicklung unterteilt sich in drei Phasen. Hierzu zählt die Untersuchung der Wechselwirkung der Nachrichten, die Definition der Architektur, sowie die Bestimmung der Metriken des Protokolls.

## **Wechselwirkung der Nachrichten**

Um eine Synchronisation zwischen zwei Knoten zu ermöglichen muss ein Knoten in Kommunikation mit seinem Partner stehen, um die für den Abgleich nötigen Informationen zu transportieren. Jede verwendete Nachricht erzeugt jeweils ein Ereignis und einen Zeitpunkt auf der Seite des Senders, sowie der des Empfängers. Es gilt die Anzahl an nötigen Ereignissen, sowie die Anzahl und Art der übermittelten Parameter (z.B. die lokale Zeit, eine Zyklusnummer oder die Priorität) zu bestimmen, welche zur Bildung einer netzwerkweiten Zeit nötig sind. Aufgrund der Symmetrie des Protokolls ist es notwendig, dass durch den Informationsaustausch alle Beteiligten gleichermaßen alle Voraussetzungen erhalten, um eine Synchronisation durchzuführen und die gemeinsame Zeitbasis zu bilden. Die Synchronisationskommunikation nutzt in der Regel die Kommunikationskanäle der zu übertragene Nutzdaten und konkurriert somit mit diesen. Dies resultiert in dem Ziel, die Menge an zu übertragene Synchronisierungsinformationen und somit die Anzahl und Größe der notwendigen Nachrichten so gering wie möglich zu halten, um den entstehenden Bandbreitenverlust der Nutzdaten zu begrenzen.

## **Definition der Architektur**

Die Architektur des Synchronisationsprotokolls bestimmt das Zusammenwirken der funktionalen Abhängigkeiten der Informationen eines Knotens über seine Umwelt. Anstelle einer Final-State-Machine mit vordefinierten Rollen arbeitet die neue Architektur gewichtungsabhängig. Gewichtungen entstehen für jeden Knoten und bestimmen wie stark die Informationen eines Knotens in die Bestimmung der Synchronisationsberechnung der Nachbarn einfließt. Dieser Einfluss lässt sich anhand verschiedener Faktoren wie die Güte des Zeitgebers eines Knotens, seiner Vorlaufzeit im synchronisierten Zustand oder auch der Anzahl an synchronisierten Teilnehmern, die mit diesem Knoten verbunden sind ableiten. Weiterhin müssen Mechanismen zur Fehlererkennung und -kompensation bereitgestellt werden, um den Einfluss fehlerhafter Knoten in einem vernachlässigbaren Bereich zu halten. Es gilt hierbei eine Architektur aufzustellen, welche ein schwingungsfreies Verhalten des Netzwerks gewährleistet, unabhängig von der Topologie zeitnah einen synchronisierten Zustand erreicht und Störgrößen in einem realistischen Rahmen kompensiert.

## **Bestimmung der Metriken**

Die Bewertung eines Synchronisationsprotokolls, sowie der Vergleich mit anderen Ansätzen erfolgt mithilfe geeigneter Metriken (vgl. [5]). Nicht alle dieser Metriken lassen sich auf jedes Synchronisationsmodell übertragen. Metriken, welche aus hierarchischen Modellansätzen heraus abgeleitet wurden, müssen, sofern dies möglich ist, übertragen werden. auf der anderen Seite entstehen durch den Ansatz, welcher aus einem physikalischen Federpendelmodell resultiert, zusätzliche Parameter. Aus diesen lassen sich wiederum neuartige Metriken ableiten, für die weder Vergleichswerte, noch Vorschriften existieren. eine weitreichende Abschätzung ist hier von Nöten um die Vergleichbarkeit herzustellen, sowie die Bewertung durchführen zu können.

Die technischen Ziele umfassen somit sowohl die Entwicklung des Synchronisationsprotokolls, als auch notwendige Validierungsstrategien.

## 2 Vorarbeiten

In diesem Kapitel werden die Vorarbeiten zur Abschlussarbeit vorgestellt und bewertet.

### 2.1 Literaturstudie

Die Literaturstudie im Bereich Analyse von Synchronisationsmechanismen innerhalb echtzeitfähiger Systeme ergab, dass schon einige Arbeiten zu Synchronisationsalgorithmen und deren Simulation, sowie Arbeiten, die eher auf die Validierung der Algorithmen eingehen, bedingt genutzt werden können (vgl. [6]). Wie in Abschnitt 1.2 auf Seite 2 dargelegt, sind beide Zweige für meine Abschlussarbeit von Bedeutung. Insbesondere die Ergebnisse aus den Arbeiten der Validierungsmethodiken werden bei den Betrachtungen der Abschlussarbeit Verwendung finden. Analysen von Peer-to-Peer Synchronisation speziell im Einsatz gibt es bisher nicht oder sind nicht veröffentlicht. Dies hängt damit zusammen, dass die Peer-to-Peer-Technologie im Bereich der Synchronisation noch äußerst unbesritten ist.

Die Recherche hat gezeigt, dass vergleichbare Arbeiten auf anderen Architekturen beruhen (vgl. [7]). Eine Übertragung auf Peer-to-Peer-Synchronisation ist mit diesen Arbeiten jedoch nicht direkt möglich. Damit grenzt sich meine Arbeit von den bisherigen Veröffentlichungen ab.

### 2.2 Projektarbeiten

Die erste Projektarbeit im Bereich der Peer-to-Peer-Synchronisation beschäftigte sich mit der Definition des mathematischen Ansatzes. Untersucht wurden hierbei verschieden gekoppelte Pendelmodelle in Hinblick auf Konzept und Übertragbarkeit. Es wurde das lose-gekoppelte Federpendelmodell gewählt, da sich aus dem Aufbau des Pendels, Funktionsweise und Netzwerkanalogie herleiten lassen. Die Ruheposition entspricht einer Übereinstimmung der internen Uhr zum Synchronisationssollpunkt. Dieser wird aus den aktuellen Pendelstellungen der Nachbarknoten gebildet und variiert somit über die Zeit. Jede Abweichung der Uhr wird in einer entsprechenden Auslenkung in einer Dimension interpretiert. Der maximale Ausschlag des Federpendels ist durch die maximale Korrekturfähigkeit des internen Zeitgebers definiert und wird nur durch die Plattform begrenzt, welche den Synchronisationsalgorithmus in Zukunft ausführen soll. Die Rückstellkräfte des Pendels summieren sich aus dem Grad der Abweichung,

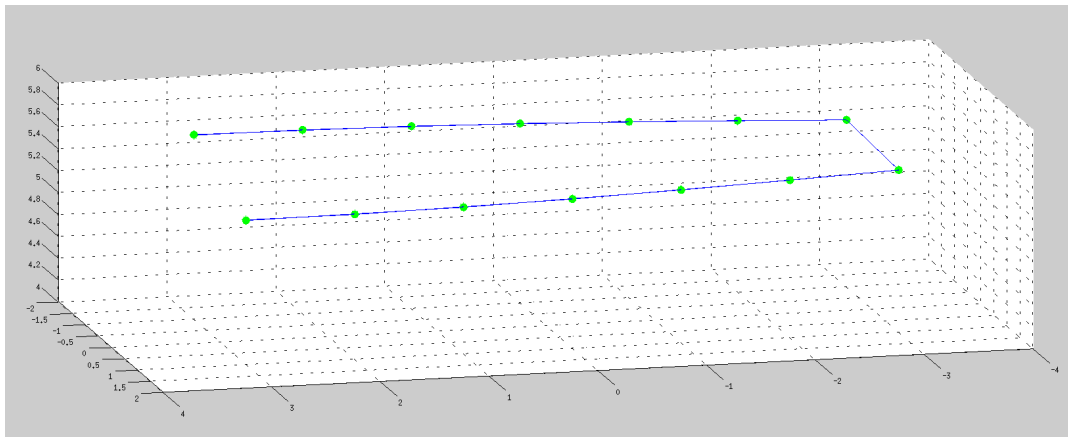
bezogen auf den Synchronisationsruhepunkt und der Ungenauigkeit des simulierten Knotens. Die Synchronisationskräfte treiben das Pendel somit zurück in die dynamische Ruheposition, während die Ungenauigkeiten dem entgegen wirken. Somit ließ sich eine erfolgreiche Portierung zeigen.

Weiterhin wurde die Art der Nachrichtenübertragung untersucht. Es konnte durch eine mathematische Analyse gezeigt werden, dass zur symmetrischen Synchronisation von  $n$  Knoten miteinander, pro Knoten nur eine Nachricht benötigt wird, um in einem periodischen System über die Zeit hinweg einen synchronisierten Zustand herzustellen. Ein solcher Ansatz würde die vom Synchronisationsmechanismus belegte Bandbreite auf dem Kommunikationsmedium so gering wie möglich halten und wäre somit optimal. Jedoch konnte ebenso gezeigt werden, dass ein solcher Ansatz in der Netzwerkebene spezielle Hardware erforderlich macht, welche Zeitstempel von Frames zum Zeitpunkt der Übertragung nehmen kann und diese dem selben Frame hinzufügt. Da solche Hardware sehr speziell und somit kostspielig ist, wurde eine weitere Variante aufgezeigt, welche ausschliesslich auf CoTS-Hardware basieren könnte und somit zwar unabhängig in der Realisierung ist, dies jedoch auf Kosten von zusätzlicher Auslastung der zur Verfügung stehenden Bandbreite erreicht. Um einen Kompromiss zu schaffen ist es zudem möglich durch einen transparenten Ansatz Hardware, welche das Precision Time Protocol unterstützt, zu nutzen. Diese ist zwar zu einem gewissen Grade speziell, stellt jedoch den heutigen Standard für synchronisationsfähiger Hardware zur Unterstützung einer netzwerkweiten Zeitbasis dar und unterliegt daher keinem zusätzlichen Entwicklungsaufwand.

Somit steht ein Ansatz bereit, welcher sich auf die zur Verfügung stehenden Plattform abstimmen lässt und so in Genauigkeit, Overhead und Aufwand ein optimales Verhältnis erreicht.

In der zweiten Projektarbeit wurde eine mathematische Simulation des Feder-Masse-Systems (FMS) unter MATLAB erstellt um Schwingungsverhalten, Parametrisierung und funktionale Abhängigkeiten studieren zu können (vgl. [8]). Hierzu wurde ein Partikelsystem dementsprechend auf das FMS abbildet, sodass es das Verhalten auch für große Netze und komplexe Topologien nachbilden konnte. An ihm konnten alle, für einen Peer-to-Peer-basierenden Ansatz, relevanten Parameter abgeleitet werden. Zudem konnte ein Regelwerk über die Abhängigkeiten der Parameter zueinander aufgestellt werden, was die Konfiguration eines solchen Netzes für unterschiedliche Topologien in Hinsicht auf Synchronisationsgeschwindigkeit und Stabilität hin optimiert.

Erste Untersuchungen zeigten eine Reihe von Anomalien. Eine Anomalie bezeichnet den unerwarteten Zustand eines Netzwerkes durch reguläre Einflüsse, begründet durch seine Synchronisation über eine Peer-to-Peer-Architektur. Diese Anomalien stellen insbesondere ein Problem dar, insofern sie das Netzwerk im gesamten (oder zumindest partiell) in einen nichtoperativen Zustand überführen können. Sie können durch eine Vernetzung über viele Hops, dem Hinzufügen einzelner Knoten mit bestimmter Priorität in Sterntopologien oder auch nach einer langen Laufzeit eines Netzes im synchronisierten Zustand entstehen.

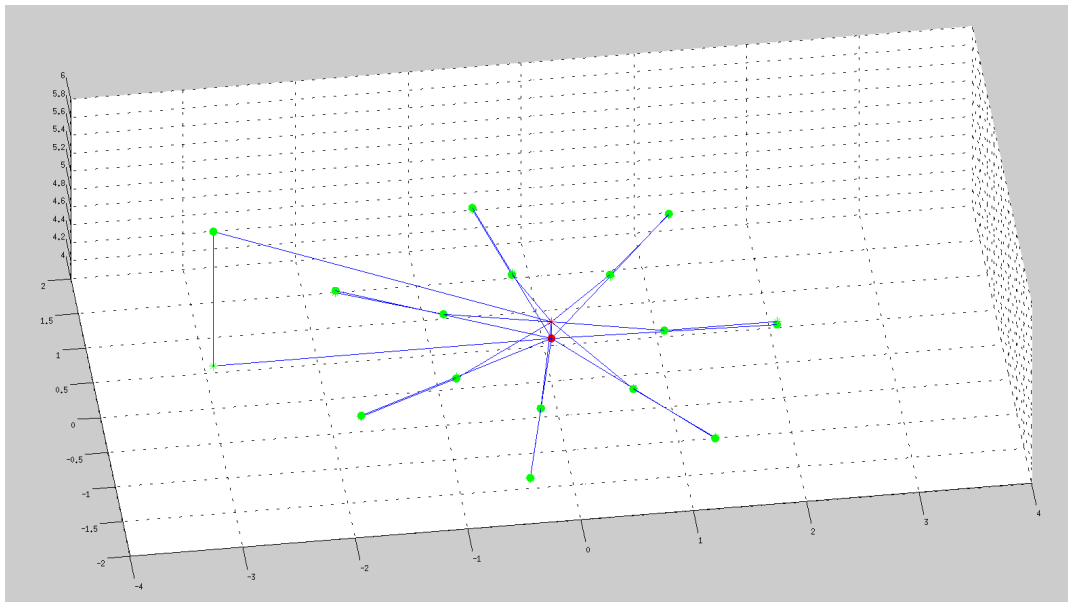


**Abbildung 1: Hop-Count-Anomaly**

Abbildung 1 zeigt eine Anomaly, entstanden durch die Überwindung vieler Hops. Erzeugt wurde der Zustand indem zwei lineare Netze simuliert wurden, welche von einander getrennt, sich über die Zeit hinweg in den synchronisierten Zustand überführten. Anschließend wurde ein Link zwischen diesen gleichstarken Netzen erzeugt, welcher eine netzwerkweite Synchronisation erzwingt. Beide Endknoten (links im Bild) des neu entstandenen Netzes betrachten sich zu ihren jeweiligen Nachbarn als synchron (grüne Färbung) obwohl sie zueinander betrachtet nicht als synchron eingestuft werden können (ersichtlich durch eine hohe Differenz in y-Richtung). Sind beide Knoten Teil einer verteilten Anwendung, so existiert zwischen ihnen kein genügend bestimmtes Zeitverhalten, womit es zum Fehler kommen kann, welcher von den jeweiligen Knoten zudem nicht selbstständig erkannt wird.

Eine weitere Anomalie konnte durch Simulation von dynamischen Charakteristika der Peer-to-Peer-Struktur gezeigt werden und wird in Abbildung 2 auf der nächsten Seite dargestellt. Hier wurde einer synchronisierten Sterntopologie ein Knoten mit einer bestimmten Gewichtung zur Laufzeit hinzugefügt. Durch den massiven Einfluss geht der zentrale Knoten der Sterntopologie in den unsynchronisierten Zustand über (rote Färbung). Die dynamische Kopplung des Knotens stört somit die Funktion des Sterns, was zumindest erkannt wird, jedoch gegen eine Tauglichkeit von Peer-to-Peer-Lösungen für offene Systeme mit echtzeitfähigen Eigenschaften sprechen würde.

Die Vorarbeiten zur Masterarbeit zeigen, dass sich Peer-to-Peer-getriebene Synchronisationsmechanismen sowohl durch mathematische Berechnung, als auch simulationsbasiert analysieren lassen. Damit konnte die grundsätzliche Fragestellung des Schwingungsverhaltens bereits im Vorfeld weitgehend abgesichert werden, weist jedoch auf ein neues unbekanntes Problemfeld, das der Anomalien, hin. Diese erfordern eine genaue Untersuchung in der Masterarbeit, da sie die Realisierbarkeit eines Peer-to-Peer-basierenden Synchronisationsalgorithmus gefährden.



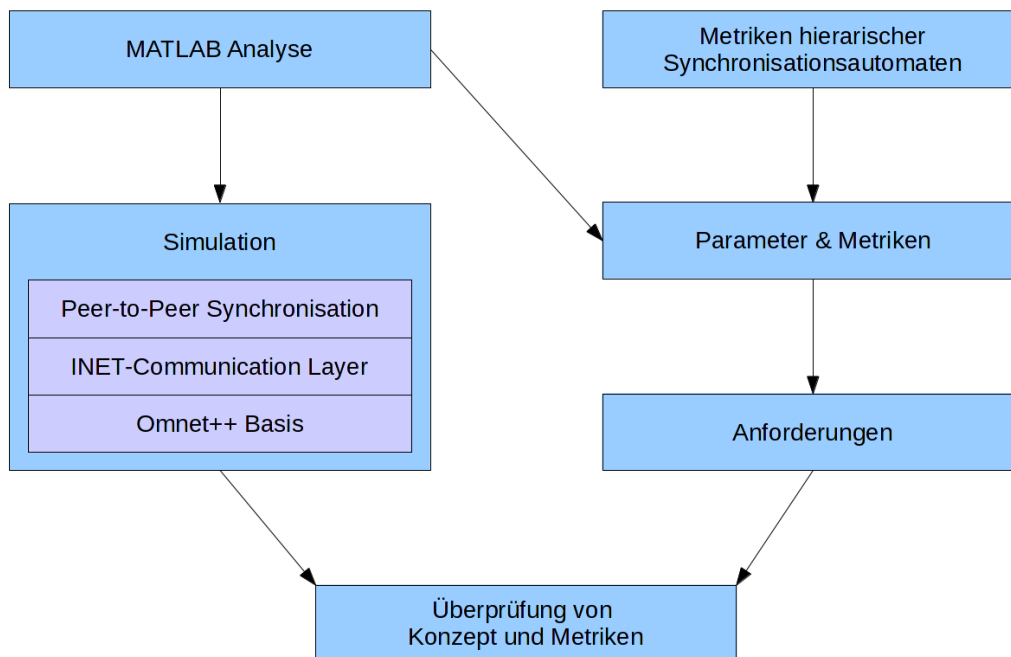
**Abbildung 2:** Priority-Anomaly

### 3 Architekturübersicht

Im Folgenden werden die Komponenten und eine erste grobe Architektur der Abschlussarbeit vorgestellt.

Abbildung 3 auf der nächsten Seite zeigt einen Überblick über die relevanten Stufen der Arbeit. Zu Beginn steht die bereits erfolgte mathematische Simulation und deren Analyse, welche die grundlegende Architektur sowie die Algorithmen liefert. Weiterhin lassen sich aus ihm Metriken, sowie Parameter des entstehenden und zu simulierenden Algorithmus ableiten. Diese sind mit den relevanten Metriken bisheriger hierarischer Ansätze abzugleichen und zu übertragen, um eine Möglichkeit der Überprüfung, sowie des Vergleichs zu schaffen. Architektur und Algorithmen bilden die Grundlage für die Portierung in die Netzwerksimulation. Aus ihnen wird das Simulationsmodell erzeugt, welches anschließend in der Simulation ausgeführt wird.

Die Simulation selbst setzt sich aus drei übereinander gelagerten Schichten zusammen. Die Basis bildet die OMNeT++ (vgl. OMNeT++ Community, [9]) Simulationsumgebung. OMNeT++ ist ein Simulationsframework für Simulationen auf Basis von diskreten Events und eine Standard-Toolchain für die Event-basierte Simulation von Netzwerken. Die Paketweiterleitung lässt sich sehr gut in ein Event-basiertes System überführen. Betrachtet man beispielsweise den Paketfluss zwischen zwei Teilnehmern, sind nur einige wenige Zeitpunkte wie das Eintreffen in den Instanzen zwischen den Teilnehmern von Interesse. Alle weiteren Zeitpunkte, die dazwischen liegen, werden in der diskreten Event-basierten Simulation des Netzwerkes vernachlässigt. Im Gegensatz zum physikalischen Modell, in denen ein bedeutender Rückfluss



**Abbildung 3:** Konzeptüberblick

des Zustandes in das System stattfindet und eine grobe zeitliche Auflösung zu Ungenauigkeiten führt, hat das System in der Event-basierten Simulation bedeutend weniger Ereignisse und ist somit gleichzeitig weniger rechenintensiv.

Basierend auf OMNeT++ wird das INET-Framework (vgl. OMNeT++ Community, [10]) eingesetzt. Das INET-Framework ist eine API, welche die Entwicklung von Simulationen im Bereich der Netzwerkprotokolle vereinfacht. Es fügt eine Reihe von Modulen zu OMNeT++ hinzu, welche die Funktionalität von verschiedenen Elementen vom physikalischen Layer bis zur Applikationsschicht zur Verfügung stellen. Das INET-Framework ist besonders gut für die Verwendung in einer Simulation von Echtzeit-Netzwerken geeignet, da es modular aufgebaut ist und intensiv Vererbung verwendet. Da der Synchronisationsmechanismus echtzeitfähige Netze erweitern soll, können somit große Teile übernommen und um die Synchronisationsmechanismen erweitert werden.

Auf Basis des INET-Frameworks wird das Synchronisationsmodell implementiert. Es erweitert das Framework um die Peer-to-Peer-getriebenen Eigenschaften des neuen Protokolls. Dabei muss besonders auf eine akkurate Abbildung des Zeitverhaltens, sowie der Metriken geachtet werden. Nur so lassen sich die Ergebnisse der Simulation zuverlässig auf ein echtes Szenario übertragen.

Neben der Simulationsumgebung fließt das mathematische Modell ebenfalls zusammen mit den zusammengestellten Metriken in die Anforderungen ein. Hier werden Grenzwerte für die zu untersuchenden Metriken festgelegt, nach denen festgestellt werden kann, ob das Szenario den Anforderungen aus dem Modell genügt.

## 4 Zielsetzung und Umsetzung

### 4.1 Planung

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen und die Aufgaben während der Abschlussarbeit.

In den Vorarbeiten konnte bereits eine gewisse Menge an relevanten Metriken isoliert werden. Diese Menge ist jedoch nicht vollständig und erfordert in Hinblick auf eine Evaluierung des Synchronisationsprotokolls eine Überarbeitung. Zudem ist eine Erweiterung von Nöten, welche eine Klassifizierung und den Vergleich mit den hierarchischen Ansätzen ermöglicht.

Im Gegensatz zu bisherigen automatenbehafteten Synchronisationsstandards klassifiziert sich der Peer-to-Peer-Ansatz durch Parameter seiner funktionalen Abhängigkeiten. Hierbei ist nicht nur die Bestimmung von Anzahl und Art der Parameter wichtig, sondern auch typische Wertebereiche. Hierbei lassen sich in Hinblick auf die Verwendung des Ansatzes die Wahl des Parametersatzes im Voraus eingrenzen um eine spätere Konfiguration durch Nutzer möglichst intuitiv zu halten. Hierzu werden zwei Ansätze kombiniert. Einerseits wird ausgenutzt, dass sich einige Parameter aus anderen zu einem gewissen Grade ableiten lassen, was die Anzahl der Parameter reduziert. Zum anderen gilt es repräsentative Parametersätze für standard Topologien wie z.B. Sterne oder Ringe zu identifizieren, welche direkt übertragen und kombiniert werden können.

Sind Metriken und Parametersatz vollständig, so kann nun begonnen werden den mathematischen Ansatz in das Netzwerkmodell zu überführen. Dieses kann anschließend innerhalb der Simulationsplattform OMNeT++ eingesetzt werden und bildet die Grundlage der weiteren Arbeit. Hierzu ist eine entsprechende Repräsentation der funktionalen Zusammenhänge so zu finden, dass eine möglichst geringe Abweichung repräsentativer Metriken durch den Wechsel vom kontinuierlichen mathematischen Ansatz in die eventbasierte OMNeT++ Simulation entsteht. Gleichzeitig ist ein Evaluationsmodell zu erstellen. Dieses hilft Abweichungen zu erfassen und iterativ in die Erstellung des Modells einfließen zu lassen. Weiterhin ermöglicht es dieses mit Anforderungen abzugleichen, welche ein echtzeitfähiges Netzwerk definieren. Hierzu werden Evaluationsmechanismen bekannter Standards herangezogen und auf Basis der angesprochenen Portierung der Metriken dahingehend erweitert, dass es auf einen Peer-to-Peer-basierenden Synchronisationsalgorithmus übertragbar und anwendbar ist.



Diese Grundstruktur ist anschließend dahingehend zu erweitern, dass eine Betrachtung der gefundenen Anomalien möglich wird. Diese müssen in der eventbasierten Simulation reproduzierbar provoziert und studiert werden können um Algorithmen und Ansätze zur Lösung zu finden. Diese Lösungsansätze können von geänderten Abhängigkeiten der Parameter hin bis zur Bildung neuer funktionaler Zusammenhänge und somit zur Modifizierung des Basismodells reichen.

Als letzte Phase ist der Aufbau eines Prototypennetzwerks geplant, was nicht nur die gewonnenen Ergebnisse unterstreicht, als auch die Machbarkeit anhand einer realen Topologie zeigt, sondern auch der Präsentation des neuartigen Ansatzes dient. Es wird angestrebt, die Arbeit im Spätsommer 2013 abzuschließen.

## 4.2 Risiken

Durch die Vorarbeiten zur Abschlussarbeit konnte das Schwingungsverhalten im Voraus als Risikofaktor ausgeschlossen werden. Jedoch wurde ein Risiko durch Anomalien innerhalb der Projektarbeit identifiziert, welches die grundsätzliche Machbarkeit des Peer-to-Peer-Ansatzes gefährdet (siehe Abschnitt 2.2 auf Seite 4).

Da der in dieser Arbeit untersuchte Ansatz eine architektonische Neuerung im Bereich der Synchronisation von echtzeitfähigen Systemen darstellt, konnten bislang keine vergleichbaren Anomalien in hierarchischen Standards wie beispielsweise dem verbreiteten Precision Time Protocol oder auch dem TTEthernet identifiziert werden. Somit stellt sich eine weitreichende Abschätzung des Aufwands als schwierig heraus. Zur Risikominimierung werden vergleichbare Verhaltensmuster von Netzwerken ohne Echtzeitcharakter herangezogen. Inwieweit solche Lösungsansätze portierbar sind muss untersucht werden.

Ein weiteres Risiko resultiert in der Auswahl der Metriken und den darauf anzuwendenden Anforderungen. Weichen diese Eingaben stark von einem realen echtzeitfähigen Netzwerk ab, so sind die Schlüsse, die aus dem Evaluierungsprozess gezogen werden können, nicht realistisch. Daraus folgt, dass je genauer die Anforderungen und Modelle sind, desto präziser ist auch das Evaluierungsergebnis. Davon unabhängig ist die Qualität des Evaluierungsprozesses zu betrachten.

## 5 Zusammenfassung

Neue Synchronisationsmechanismen bieten dem rapide zunehmenden Gebiet der echtzeitfähigen Netzwerkstrukturen neue potentielle Einsatzgebiete. Aufgrund der gegebenen Restriktionen der heute eingesetzten Standards und ihrem Rollenkonzept sind diese ausschließlich auf geschlossenen Systeme anwendbar, erfordern einen hohen Aufwand in der Planung, sowie sind während des aktiven Betriebs nur bedingt bis überhaupt nicht dynamisch anpassungsfähig. Dies stellt ein Problem für die Gewinnung weiterer Einsatzgebiete und der Entwicklung neuer echtzeitfähiger Kommunikationstechnologien dar. Dieser Bericht beschreibt die zu diesem Thema durchgeführten Vorarbeiten und zeigt das geplante Vorgehen bei der Umsetzung der Ziele im Rahmen der Abschlussarbeit.

Die Arbeit soll die grundlegenden Modelle und Abhängigkeiten untersuchen und eine Machbarkeit bezüglich der Verwendung des Ansatzes zeigen, welcher auf der Peer-to-Peer-Technologie basiert. Damit leistet sie erste Pionierarbeit in der Erschließung neuer Vermittlungsinfrastrukturen und die Grundlage neuer Technologien.

## Literatur

- [1] C. Hammerschmidt, "BMW brings Internet protocol under the hood," *EE Times Europe*, 2007. [Online]. Available: <http://www.eetimes.com/showArticle.jhtml?articleID=204300325>
- [2] G. Schnell and B. Wiedemann, *Bussysteme in der Automatisierungs- und Prozesstechnik - 7. Auflage*. Vieweg + Teubner, 2008.
- [3] K.-W. Gaede, *Zuverlässigkeit, mathematische Modelle*. München: Hanser, 1977.
- [4] P. Van Mieghem, *Performance Analysis of Communications Networks and Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [5] T. Steinbach, F. Korf, and T. C. Schmidt, "Simulationsbasierte Evaluierung von Metriken in Echtzeit-Ethernet basierten Fahrzeugnetzen," in *6ter GI/ITG-Workshop Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen (MMBnet 2011)*, 2011, to appear.
- [6] P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi, and G. Gaderer, "Evaluation of clock synchronization accuracy of coexistent Real-Time Ethernet protocols," in *IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*, Sep. 2008, pp. 87–91.
- [7] J. Loeser and H. Haertig, "Low-latency hard real-time communication over switched Ethernet," in *Real-Time Systems, 2004. ECRTS 2004. Proceedings. 16th Euromicro Conference on*, Jun. 2004, pp. 13–22.
- [8] A. M. Law and W. Kelton, *Simulation modeling & analysis*, 2nd ed., ser. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. New York: McGraw-Hill, 1991.
- [9] A. Varga and R. Hornig, "An overview of the OMNeT++ simulation environment," in *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*, ser. Simutools '08. Brussels: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008, pp. 60:1–60:10. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1416222.1416290>
- [10] OMNeT++ Community, "INET Framework for OMNeT++ 4.0." [Online]. Available: <http://inet.omnetpp.org/>