

AD@chronVAL

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht INCHRON AG

01.07.2021 – 31.12.2024

*Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen*

01IS21031A

gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zuwendungsempfänger	Förderkennzeichen
INCHRON AG Neumühle 24-26 91056 Erlangen	01IS21031A

Vorhabensbeschreibung
<p>Ziel des Projektes ist es, der Schedulabilityanalyse neben der Simulation als zweiter wesentlicher Verifikationsmethode für das zeitliche Verhalten und eines darauf basierenden Werkzeugs im Entwicklungsprozess für autonome Fahrzeuge zum Durchbruch zu verhelfen. Dazu werden die bestehenden Defizite der Analyse systematisch beseitigt. Die aus der Forschung bekannten Methoden werden so weiterentwickelt, dass sie realitätsnahe Analyseergebnisse erzielen. Dies geschieht durch eine Kombination von aktuellen Forschungsergebnissen der Universität Ulm mit Entwicklungen von INCHRON. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Analyse für den Anwender der Werkzeuge so verständlich aufbereitet, dass sie nachvollziehbar werden, um so eine Akzeptanz der Ergebnisse und der Methoden in der Praxis zu ermöglichen. Die Umsetzung der entwickelten Methoden und der Ergebnisaufbereitung erfolgt in einer Software zur Schedulabilityanalyse von INCHRON. Die Etablierung einer analytischen Methode für das Zeitverhalten im Entwurfsprozess für das autonome Fahren wird nicht nur den Umsatz und die Marktdurchdringung von INCHRON steigern, sondern vor allem auch im Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie schneller zu robusteren Systemen führen.</p>

Laufzeit des Vorhabens
01.07.2021 – 31.12.2024

Ansprechpartner
Dr. Karsten Albers INCHRON AG Konsumhof 2-3 14482 Potsdam Email: karsten.albers@inchron.com

Inhalt

1	<i>Thema und Ausgangspunkt des Vorhabens</i>	3
1.1	<i>Erkannte Defizite der bisherigen Lösungen und Problemstellung des Vorhabens</i>	5
2	<i>Einschlägige Vorarbeiten der Partner</i>	6
2.1	<i>Wichtige Methoden der Echtzeitanalyse von INCHRON</i>	6
2.2	<i>Ergänzende Methoden der Uni Ulm als Ausgangspunkt</i>	7
2.3	<i>Konsortium und Aufgabenteilung</i>	7
3	<i>Arbeiten, Highlights und Ergebnisse</i>	7
3.1	<i>Heterogene Schedulingverfahren mittels Interferenzpunkt-Methode</i>	7
3.2	<i>Konfidenzgrenzen</i>	8
3.3	<i>Ressourcen-übergreifende Wirkkettenanalyse und Antwortzeitberechnung durch Segmentierung von Jitter-Intervallen</i>	10
3.4	<i>Begrenzende Ereignisspektren</i>	13
3.5	<i>Integration von praxisrelevanten Herausforderungen</i>	13
3.6	<i>Vernetzung von Simulation und Analyse</i>	14
3.7	<i>Visualisierung von Analyseergebnisse und ihre Nachvollziehbarkeit</i>	15
3.8	<i>Evaluation</i>	15
3.9	<i>Gesamtergebnis der entwickelten Methoden</i>	15
4	<i>Ergänzende Angaben zur Verwendung der Zuwendung</i>	16
5	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	17

1 Thema und Ausgangspunkt des Vorhabens

Um die hohen Qualitäts- und sicherheitskritischen Anforderungen autonomer Fahrzeuge bei aggressiven Marktterminen und hoher technischer und organisatorischer Komplexität sicherzustellen, müssen Automobilhersteller und Zulieferunternehmen zwingend eine frühzeitige, den Entwicklungsprozess begleitende, virtuelle Verifikation der Systemarchitektur und der beteiligten Softwarekomponenten durchführen. Hierbei ist insbesondere das korrekte zeitliche Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten im

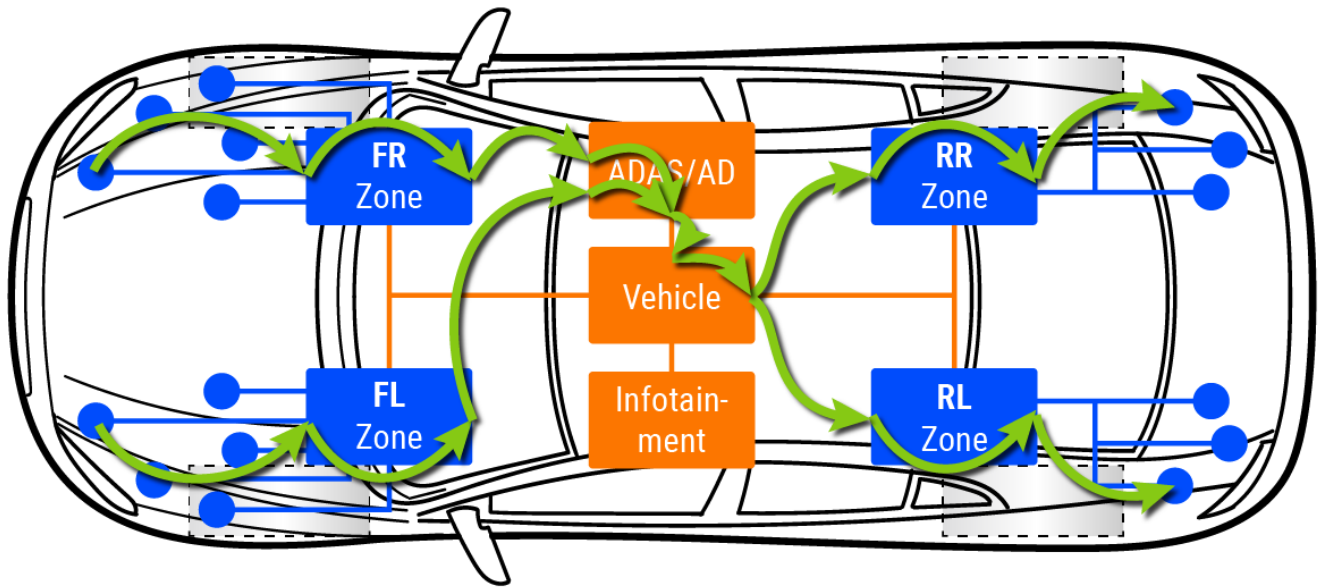


Abbildung 1 Beispiel für ein System im Fokus von AD@chronVAL

Rahmen ihrer Kommunikation relevant (Abbildung 1). Dabei spielt die Entwicklung von Steuergeräten (ECUs), die die Sensordaten (Radar, Lidar, Kamera, etc.) verarbeiten und unter Verwendung von Algorithmen Fahrtrajektorien berechnen, um die entsprechende Aktorik (Lenkung, Bremse, Motor) anzusteuern, eine besondere Rolle. Die hierfür benötigten komplexen Algorithmen haben einen deutlich höheren Bedarf an Rechenleistung als die Algorithmen heutiger Fahrerassistenzsysteme. Deswegen werden neben Mikrocontrollern auch System-on-Chip (SoC), die aus Mehrkernsystemen sowie Hardwarebeschleunigern bestehen, als High Performance Computer eingesetzt. Die hierdurch exponentiell steigende technische Komplexität und die technischen und organisatorischen Herausforderungen der Zukunft führen damit zu einer deutlichen Steigerung der Komplexität des Entwicklungsprozesses. Von zentraler Bedeutung für den erfolgreichen Umgang mit dieser Komplexität ist erstens ein modellbasierter Ansatz, der zeitaufwändige und teure Re-Design-Zyklen bereits in der frühen Phase vermeidet, und zweitens eine das Entwicklungsprojekt begleitende und frühzeitige Verifikation der Systeme mittels virtueller Modelle und Prototypen.

Bei Fahrerassistenzsystemen ist – genauso wie beim autonomen Fahren – das korrekte Echtzeitverhalten eines der zentralen Entwurfskriterien. Liegt ein Berechnungsergebnis zu spät vor, kann dies zu einem sicherheitskritischen Fehlverhalten oder nicht vorhergesehenen Instabilitäten des Systems führen. Dabei können sich Probleme im Zeitverhalten auch nur in einem sub-optimalen Verhalten des Fahrzeugs niederschlagen wie z.B. in einer verschlechterten Fahrdynamik. Ziel muss es sein, solche Probleme mit Hilfe von Softwarewerkzeugen frühzeitig aufzudecken und zu vermeiden.

Für die Validation und Verifikation des zeitlichen Verhaltens stehen zwei Verfahren zur Verfügung, für die INCHRON jeweils passende Werkzeuge anbietet: Echtzeitsimulation und Echtzeitanalyse, die häufig auch Schedulabilityanalyse genannt wird. Dieser Name rührt daher, dass mathematisch überprüft wird, ob ein gegebener Ablaufplan von Berechnungen vom System immer eingehalten werden kann.

1.1 Erkannte Defizite der bisherigen Lösungen und Problemstellung des Vorhabens

Die Verfahren zur Echtzeitanalyse haben zum Ziel, eine sichere Berechnung des zeitlichen Verhaltens zu ermöglichen. Dabei müssen die Verfahren alle theoretisch denkbaren Abläufe abdecken. Des Weiteren müssen alle Facetten der analysierten Systeme bzw. der darauf beruhenden Modelle durch die Analyse ausreichend erfasst werden. Daher sind die Verfahren darauf ausgelegt, für alle Eventualitäten sichere obere bzw. untere Schranken für das zeitliche Verhalten zu bestimmen. Diese Schranken können eine Überabschätzung der Zeiten sein, sind also nicht notwendigerweise durch Abläufe im System darstellbar. Die Analyseverfahren müssen lediglich auf der sicheren Seite bleiben. Bei komplexeren Problemstellungen für die Analyseverfahren besteht die Möglichkeit, dass auch für mehrere Berechnungsschritte intern nur Schranken bestimmt werden. In solchen Fällen können sich Abweichungen von einem realistischen Ablauf kumulieren. Obere Schranken finden auch automatisch Anwendung in den Analyseverfahren, wenn für das Gesamtzeitverhalten relevante Abhängigkeiten zwischen Systemelementen nicht hinreichend in den Analyseverfahren abgebildet werden. Solche Abhängigkeiten können z.B. der Ausschluss einer Korrelation zwischen mehreren Ereignissen sein. Stoßen diese Ausführungen verschiedene Prozesse an, so kann ggf. auch die Korrelation zwischen den Prozessausführungen ausgeschlossen oder beschränkt werden. Dies kann zu reduzierten Antwortzeiten führen gegenüber dem Fall, dass die Abhängigkeit nicht berücksichtigt wird.

Ein weiterer Punkt ist, dass der Ablauf hinter einem Extremwert einer Antwortzeit beim Zeitverhalten möglich, aber unwahrscheinlich sein kann. Dies ist der Fall, wenn hierfür alle an der Antwortzeit beteiligten Zufallswerte jeweils Extremwerte einnehmen. Eine solche Kumulierung von Extremwerten in der gleichen Konstellation kann sehr unwahrscheinlich sein. Problematisch kann nun werden, dass solche Extremwerte die Ergebnisse der Analyse dominieren. Ein System kann ggf. nicht auf solche Werte ausgelegt werden. Dies gilt insbesondere, wenn solche Ausreißer anderweitig abgefangen werden.

Die Simulationsverfahren decken automatisch alle in einem System vorhandenen Abhängigkeiten ab. Auch die sehr unwahrscheinlichen Konstellationen treten in der Simulation nur selten auf, sofern man in der Simulation nicht mit auf Extremwerte spezialisierten Zufallsverteilungen arbeitet oder durch interaktive Manipulation des Modells gezielt danach sucht. Solche Werte können beim Auftreten durch Statistiken eingeordnet werden.

Andererseits gibt eine Echtzeitanalyse eine höhere Sicherheit bezüglich der Abdeckung aller Fälle, insbesondere wenn diese sich erst aus einer Kombination von seltenen Konstellationen mehrere Teilkomponenten ergeben.

Ziel im Projekt war daher, die Echtzeitanalyse weiterzuentwickeln, sodass folgende Punkte erreicht werden:

- Eine Überabschätzung durch die Verwendung von Schranken wird vermieden
- Die sich bei der Fragestellung des autonomen Fahrens ergebenden Timing-Modelle werden mit ihren Besonderheiten durch die Analyseverfahren umfänglich berücksichtigt.
- Für das Problem der Extremwerte wird eine praxistaugliche Lösung gefunden.

In der Literatur existiert eine Reihe von Lösungen für spezifische Problemstellungen, die auch einige der im Projekt aufgetauchten Fragestellungen adressieren. Eine Integration in eine umfassende Gesamtanalyse, die alle für ein praxistaugliches Projekt relevanten

Fragestellungen simultan adressiert, erfolgt aber nicht ausreichend. Das gilt insbesondere für die Kombination mit einer akkuraten Einberechnung der Effekte von Offsets, was für die hier betrachteten System aber essenziell ist.

Weitere Fragen betreffen die Präsentation der Ergebnisse insbesondere in Hinblick auf Nachvollziehbarkeit durch den Anwender der Echtzeitanalyse.

2 Einschlägige Vorarbeiten der Partner

Ein zentraler Aspekt zur Lösung der Fragestellung war die Kombination der von INCHRON entwickelten Methoden zur Analyse offset-basierter Systeme und praxisrelevanter Erweiterungen mit den von der Uni Ulm maßgeblich entwickelten Methoden des Heaviside-Echtzeitkalküls und der begrenzenden Ereignisspektren.

2.1 Wichtige Methoden der Echtzeitanalyse von INCHRON

Bei INCHRON wurde vor dem Projekt bereits eine Echtzeitanalyse für das Werkzeug chronVAL entwickelt, das eine ganze Reihe von Problemen und Fragestellungen gelöst hat. Im Kern beruht die Analyse dabei auf dem Real-Time Calculus in Ergänzung mit eigenen akademischen Vorarbeiten. Der Real-Time Calculus ist dabei eine vom Network Calculus abgeleitete Methode und wurde maßgeblich an der ETH Zürich entwickelt [1]. Sie verwendet die Max-Plus- und Min-Plus-Algebra, um Ereignisdichten und Kapazität mit Intervallbasierten Funktionen zu beschreiben, und erlaubt durch die Verrechnung dieser Funktionen, unter Einbeziehung von Ausführungszeiten, Werte wie maximale und minimale Antwortzeiten und benötigte Warteschlangenlängen zu berechnen. Zusätzlich werden ausgehende Ereignisströme und verbleibende Kapazitäten wiederum als intervallbasierte Funktionen aus den Eingangswerten bestimmt. Für die mathematische Beschreibung dieser intervallbasierten Funktionen wurde in den eigenen akademischen Vorarbeiten eine effiziente Approximation mit einer garantierten Qualität entwickelt [2], die eine Echtzeitanalyse erst effizient ermöglicht. Die Ereignisströme werden in [2] und im folgenden Ereignisspektren genannt, um sie von anderen, nicht auf Intervallfunktionen beruhenden, Ereignismodellen und Ereignisströmen abzugrenzen.

Bei INCHRON wurden die genannten Verfahren weiterentwickelt, um Herausforderungen der industriellen Praxis zu begegnen. Ein wesentlicher Fortschritt war dabei die Erweiterung des Analyseverfahrens um eine neue effiziente Methodik zur Berücksichtigung von Offsets, auch Phasen genannt, in den Ereignismodellen. Offsets stehen dabei immer in Bezug zu einer Periode, die auch unendlich sein kann, und verschiedene Offsets von Ereignissen können das Zusammentreffen daraus resultierender Lasten vermeiden. Dies kann sich beispielsweise entspannend auf Antwortzeiten auswirken. Werden die Offsets nicht berücksichtigt, führt dies zu einer Überabschätzung von oberen Schranken. Die Bestimmung der möglichen Abstände zwischen offset-basierten Ereignissen erfolgt durch die Bestimmung gemeinsamer Teiler der involvierten Perioden. Die Offsets können durch diese gemeinsame Periodenteiler mittels Modulo-Operation reduziert werden.

Zusammen mit einer Vielzahl von Lösungen für Detailfragen der Modelle konnte so ein umfassendes, aber noch nicht vollständiges Analyseverfahren entwickelt werden. Es war vor Projektbeginn noch nicht gelungen die Lösung der hier aufgeworfenen Fragestellungen mit der entwickelten Echtzeitanalyse zu erreichen.

2.2 Ergänzende Methoden der Uni Ulm als Ausgangspunkt

Am Institut für eingebettete Systeme / Echtzeitsysteme der Uni Ulm wurde in der Zeit vor diesem Projekt eine neue formale Grundlage für die Echtzeitanalyse erforscht. Die dabei entstandene Methode, genannt das Heaviside-Echtzeitkalkül, ist mathematisch ausdrucksstärker als die bis dahin bekannten Verfahren, bietet also mehr Möglichkeiten der mathematischen Formulierung der Analyseaufgabe. Sie beruht auf einer mathematischen Analyse auf der Ebene der Instanzen der Ereignisse. Insbesondere ermöglicht die Methode durch die Berechnung auf Instanzebene eine höhere Flexibilität in Hinblick auf die Integration in die Analyse verteilter Systeme.

2.3 Konsortium und Aufgabenteilung

Um die Ziele des Projektes zu erreichen, sollten die Vorteile der bei INCHRON und bei der Uni Ulm entwickelten Methoden miteinander kombiniert werden. Schwerpunkte für INCHRON waren dabei die Methodenentwicklung und die softwaremäßige Implementierung. Die Uni Ulm hatte die wissenschaftlichen Fragestellungen und Begleitung im Fokus.

3 Arbeiten, Highlights und Ergebnisse

Um die Qualität der Ergebnisse auf ein praxistaugliches Maß zu steigern, wurden schrittweise die existierenden Quellen für die Überabschätzung der Antwortzeiten der bisherigen Echtzeitanalyseverfahren anhand von einer Reihe von Beispielen identifiziert. Dabei spielte die quantitative Auswirkung auf das Gesamtergebnis der Analyse eine wichtige Rolle. Die Arbeiten im Projekt konnten auf diejenigen methodischen Fragestellungen fokussiert werden, die in ihrem Zusammenwirken eine entscheidende Verbesserung der Qualität der Ergebnisse erzielen sollten. Dies wird auch in Form einer Fix-Punkt Iteration über die Ergebnisse erreicht (Abbildung 2). Einige wichtige im Projekt

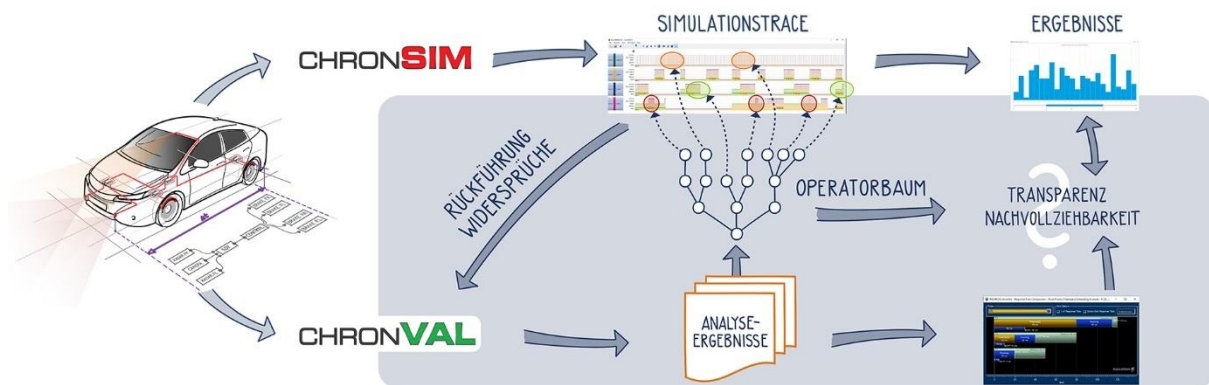


Abbildung 2 Work-Flow der neuen Analyse

erreichten methodischen Ergebnisse werden im Folgenden genauer ausgeführt.

3.1 Heterogene Schedulingverfahren mittels Interferenzpunkt-Methode

Im Projekt konnten durch Übernahmen von Ideen und Konzepten aus dem Heaviside-Echtzeitkalkül an mehreren Stellen Unzulänglichkeiten und Problemstellen der bisherigen

Offset-basierten Analyse eliminiert werden. Die Stärken beider Verfahren konnten somit erfolgreich kombiniert werden.

Problemstellung: Eine große Stärke der Heaviside-Echtzeitkalküls ist die separate formale Beschreibung der zeitlichen Auswirkungen des Scheduling auf die einzelnen Prozesse. Es kann also für jeden Prozess eine Formel aufgestellt werden, die die beeinflussenden Ereignisse auf die Antwortzeit anderer Prozess bestimmt. Das Besondere ist dabei, dass durch die Berechnung auf Ebene der Prozesse theoretisch für jeden Prozess eine andere Formel und somit ein anderes Schedulingverfahren angewendet werden kann. Es können verschiedene Schedulingverfahren auf Varianten einer Formel zurückgeführt werden. Das erleichtert die Berechnung in Systemen mit hierarchischen und gemischten Schedulingverfahren. Praxisrelevante Beispiele sind die Mischung von präemptiven und nicht-präemptiven Scheduling oder die Verwendung von „First Come First Serve“ Scheduling für Prozesse mit gleichen Prioritäten.

Entwickelte Problemlösung: In der offset-basierten Analyse gab es zwar auch für viele dieser Kombinationen von Schedulingverfahren Speziallösungen, die aber nicht die notwendige Flexibilität aufwiesen und teilweise zu Überabschätzungen geführt haben. Mit dem theoretischen Fundament des Heaviside-Echtzeitkalküls konnte für eine flexible Integration multipler Schedulingverfahren auf Ebene der Prozesse eine korrespondierende Lösung auch für die offset-basierte Analyse gefunden werden. Kern der Lösung ist dabei die Bestimmung von relativen Interferenz-Punkten für diejenigen Prozessinstanzen, die nicht mehr in die Antwortzeitberechnung einfließen. Die Prozesslasten für die verschiedenen Schedulingverfahren sind zunächst getrennt, gemäß ihren Klassen von Interferenzpunkten, zu analysieren. Die Ergebnisse können dann aber verlustfrei auf einem gemeinsamen Periodizitätsniveau fusioniert werden. Dadurch wird im Ergebnis eine Überabschätzung vermieden. Diese Methode ist eine bessere Alternative zu der im Projektantrag angedachten Lösung, die die gezielte nachträgliche Modifikation von Offset-Berechnungen vorsah, und vermeidet die Nachteile dieser Methode. Somit konnte durch die Arbeit im Projekt ein signifikanter Fortschritt in der Methodik erreicht werden.

Ein anderes Konzept, das auf den Ergebnissen des Heaviside-Echtzeitkalküls beruht, ist die getrennte Antwortzeitberechnung für Gruppen von Instanzen eines Prozesses, beispielsweise getrennt nach der ursprünglichen Quelle des Ereignisses. Diese Trennung ermöglichte eine Qualitätsverbesserung bei Ende-zu-Ende Antwortzeiten von mehreren Wirkketten, die durch den gleichen Prozess laufen.

Diese Arbeiten adressieren hauptsächlich Task T2.1 „Reduktion der Lücke zwischen Simulations- und Analyseergebnisse“, der letzte Teil auch T2.2 „Wirkkettenzentrierte Analyse“.

3.2 Konfidenzgrenzen

Problemstellung: Ein Problem ergibt sich, wenn in einer Antwortzeitberechnung viele Instanzen eines kurzen Prozesses oder Interrupts eingehen, dessen Ausführungszeiten variieren können. Diese Schwankung kann in einem Modell über verschiedene Zufallsverteilungen modelliert werden, wenn andere Einflussfaktoren nicht bekannt oder im Modell hinterlegt sind. Häufig ergeben sich bei der Modellbildung dann Zufallsverteilungen wie die Gleich- oder die Normalverteilung. Bei diesen Verteilungen ist es sehr unwahrscheinlich, dass hohe Ausführungszeiten sehr oft hintereinander vorkommen können. Die Echtzeitanalyse muss aber zunächst vom pessimistischen Fall ausgehen. In der Bestimmung der Antwortzeit addieren sich die Ausführungszeiten aller in die Berechnung eingehender Prozessinstanzen. Die Gesamtsumme der extremen

Ausführungszeiten liegt dann aber weit jenseits der realistisch auftretenden und beobachtbaren Werte.

Entwickelte Problemlösung: Für die Lösung wird ausgenutzt, dass die Wahrscheinlichkeit für das direkt aufeinanderfolgende Auftreten von Extremwerten in vielen Zufallsexperimenten sehr klein ist. Dadurch können die zu berücksichtigenden kumulierten Lasten durch aufeinanderfolgende Instanzen der gleichen Prozesse erheblich reduziert werden. Die Begrenzung der Auftrittswahrscheinlichkeit von kumulierten Lasten durch eine angestrebte

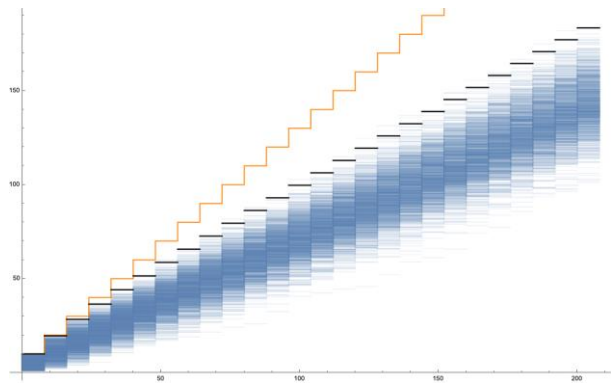


Abbildung 3 Beispiel für eine Konfidenzgrenze (99,9999%) in Relation zur Simulation und zur theoretischen oberen Schranke

Auch bei hohen Konfidenzwahrscheinlichkeiten wie 99,9 % nähert sich die kumulierte Ausführungszeit bereits nach 20-30 Instanzen stark den beobachtbaren Werten an, die bei einer großen Anzahl von Instanzen zum Mittelwert konvergieren. Verglichen mit der Summe der Extremwerte ergibt sich daraus eine sprunghafte Reduktion der Antwortzeiten, zumal sich die überhöhten Summen der Ausführungszeiten aufgrund der notwendigen Einbeziehung zusätzlicher Nachfolgeinstanzen interferierender Prozesse bei der Antwortzeitberechnung verstärkt auswirken würden.

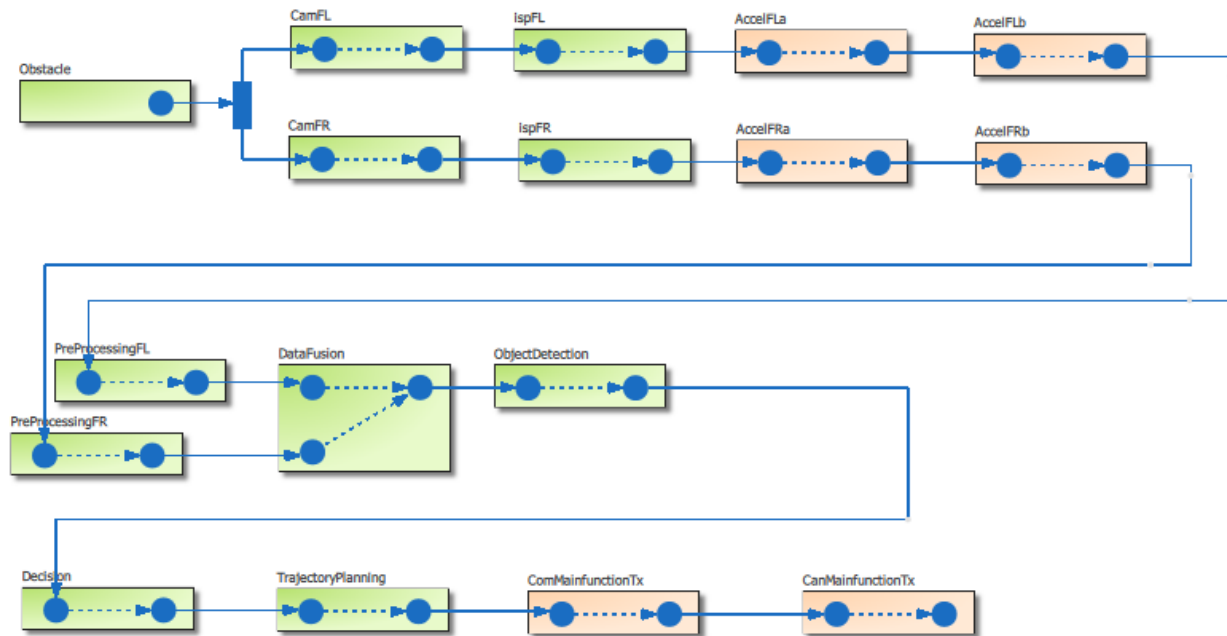
Versuche haben gezeigt, dass die dabei resultierenden Lasten und Antwortzeiten auch bei hohen Konfidenzwahrscheinlichkeiten von über 99,9% nahe an den in der Simulation beobachtbaren Verläufen liegen. In Abbildung 3 sind für ein einfaches Beispiel die theoretische Obergrenze (**gelb**), die Konfidenzgrenze (99,9999%) (**schwarz**) sowie die beobachteten Werte aus mehreren Simulationsläufen (**blau**) dargestellt. Insbesondere wird dadurch die Lücke zwischen den beobachteten Lasten und der praktisch nicht möglichen Summe der Worst-Case Ausführungszeiten geschlossen. Die Ergebnisse werden dadurch realistisch. Es besteht auch die Möglichkeit, die Analyse für mehrere verschiedene Konfidenzgrenzen durchzurechnen. Dann können diese zusammen mit dem theoretischen Worst-Case und den Ergebnissen aus Simulationsläufen dem Anwender präsentiert werden, und geben somit einen Einblick in die Auswirkung solch seltener Extremfälle im konkreten System.

Mit dieser Arbeit wird Task T2.1 „Reduktion der Lücke zwischen Simulations- und Analyseergebnisse“ adressiert.

3.3 Ressourcen-übergreifende Wirkkettenanalyse und Antwortzeitberechnung durch Segmentierung von Jitter-Intervallen

Problemstellung: Das Timing von Wirkketten (siehe Abbildung 4) sowie die Berechnung und Begrenzung der resultierenden Antwortzeiten ist ein wesentliches Maß für die Performance, der durch die Wirkketten modellierten, sichtbaren Funktionen, insbesondere

Abbildung 4 Beispiel für eine Wirkkette



von autonomen oder teilautonomen Fahrfunktionen. Herausforderung ist dabei auch, dass in einem System viele Wirkketten, teilweise auch mit gemeinsamen Verarbeitungsschritten, gleichzeitig und um Ressourcen konkurrierend ablaufen. Die Wirkketten verlaufen in der Regel über mehrere Ressourcen und die dazwischen liegenden Kommunikationsbusse.

Dies gilt auch für Zonenarchitekturen mit zentralen High-Performance Recheneinheiten (HPC). Diese bilden mit heterogenen Rechenkernen, den für KI benötigten Beschleunigern und einer Hypervisor-basierten Systemarchitektur bereits in sich ein hochkomplexes, verteiltes System. Dazu kommen noch Zonen mit intelligenten Sensoren, eigenen Wirkkettenschritten und schnellen Kommunikationsnetzen.

Mit der bisher beschriebenen Methodenverbesserung ist eine qualitativ hochwertige Echtzeitanalyse für die einzelnen Scheduler und Rechenkern, und der darauf lokalisierten Rechenlasten möglich. Herausforderung war, die Echtzeitanalyse des Einzelsystems zu einer qualitativ hochwertigen Analyse für verteilte Systeme und ressourcenübergreifende Wirkketten zu verbinden.

Entwickelte Problemlösung: Um Überabschätzungen zu vermeiden, müssen bei der Analyse verteilter Systeme Korrelationen und Abhängigkeiten sowohl innerhalb einer Wirkkette als auch zwischen Wirkketten berücksichtigt werden. Für die Analyse auf einer Ressource (einem Rechenkern) werden für alle Prozesse zunächst diejenigen Zeitfenster und Dichten bestimmt, in denen eingehende Aktivierungs- und Datenereignisse auftreten können. Diese werden dann durch Instanzen eines Ereignismodells beschrieben. Die Ermittlung dieser Ereignismodelle erfolgt für die einzelnen Prozesse in der Regel unabhängig voneinander. Nur in bestimmten, genau umrissenen Konstellationen können Abhängigkeiten innerhalb der Wirkketten und zwischen Wirkketten berücksichtigt werden.

Ein Beispiel sind Teilabschnitte von Wirkketten, die auf einer gemeinsamen Ressource liegen.

Für andere Konstellationen war eine solche Berücksichtigung bisher nicht oder nur eingeschränkt möglich. So ist es in verteilten Systemen möglich, dass Wirkkettenabläufe zwar für einzelne Wirkkettenschritte jeweils hohe Antwortzeiten aufweisen, diese aber nicht gemeinsam in einem Ablauf auftreten können (negative Korrelation). Die maximale Gesamtlatenz der Wirkkette ist also kleiner als die Summe der einzelnen maximalen Latenzen der Wirkkettenschritte.



Abbildung 5 Beispiel für eine zeitliche negative Korrelation innerhalb einer Wirkkette

Ein solche Konstellation ist für ein einfaches Beispiel in Abbildung 5 aufgezeigt. In der dargestellten Prozesskette, die auf mehrere Hardware-Ressourcen verteilt ist, können zwei Prozesse jeweils von Prozessen mit höherer Priorität verzögert werden. Da diese Prozesse zueinander synchron sind, erfolgt die Verzögerung niemals gleichzeitig in der gleichen Instanz der Wirkkette. Eine solche negative Korrelation kann auch in Wirkketten und anderen Abhängigkeiten innerhalb der interferierenden Prozesse begründet sein. Werden solche Abhängigkeiten nicht berücksichtigt, kann dies zu einer Überabschätzung der Antwortzeiten der Wirkketten und anderer relevanter Metriken wie Datenkonsistenz führen.

Die entwickelte Methode bestimmt für die berechnete Worst-Case-Antwortzeit die jeweils benötigten Zeitfenster für die Auftretszeitpunkte aller interferierenden Prozesse innerhalb der eingehenden Ereignismodelle. Diese werden zu den vorherigen Schritten, also den Erzeugern der Ereignisse propagiert und von dort gegebenenfalls weiter zu deren Vorgängern. Die Propagation kann erst stoppen, wenn die Anfänge der Ketten mit den ursprünglichen Ereignissen erreicht ist. In einer Simulation kann hier auch eine Varianz des Auftretszeitpunktes durch einen Zufallswert erlaubt sein.

Treffen die propagierten Zeitfenster bei gemeinsamen Vorgängern aufeinander, kann entweder eine Schnittmenge der Fenster mit gemeinsamen Auftretszeitpunkten gefunden werden oder es gibt keine Überlappung der Zeitfenster. In diesem Fall wurde eine

Abhängigkeit identifiziert, die zu einem Widerspruch bezüglich der für die berechnete Worst-Case Antwortzeit benötigten Auftrittszeitpunkte führt.

Ein anderer Fall ist das Zusammentreffen von Vorgängern auf einer gemeinsamen Ressource. Hier ist zu berechnen, ob ein Schedule auf der Ressource existiert, der eine Bedienung aller Zeitfenster in einer gemeinsamen Konstellation erlaubt.

Entscheidend ist nun die Auflösung der Widersprüche und damit der Abhängigkeiten. In der vorgeschlagenen Methode erfolgt dies durch die Zerlegung eines Ereignismodells in zwei oder mehr Teilmodelle, und einer erneuten Antwortzeitberechnung des Gesamtsystems jeweils unter der Annahme der Gültigkeit eines der Teilmodelle. Hierbei wird der in der Berechnung berücksichtigte Auftrittszeitpunkt eines der Ereignisse künstlich auf ein Teilmodell beschränkt. Dann wird für jedes Teilmodell separat eine komplette Berechnung durchgeführt, sodass im Ergebnis wieder alle Zeitpunkte berücksichtigt sind. Sind im weiteren Verlauf mehrere solcher Zerlegungen notwendig, so sind die Antwortzeiten für alle theoretisch möglichen Kombinationen der Teilmodelle zu berechnen. Dann ist eine vollständige Abdeckung gegeben und die Worst-Case-Antwortzeit wird sicher ermittelt.

Können die so ermittelten Worst-Case-Antwortzeiten durch die Rückpropagation der Zeitfenster widerspruchsfrei auf die ursprünglichen Zufallswerte im korrespondierenden Simulationsmodell zurückgeführt werden, so ist die Worst-Case-Antwortzeit in der Simulation exakt reproduzierbar und kann auch in einem dem Simulationsmodell entsprechenden realen System auftreten. Die ermittelte obere Schranke der Antwortzeit entspricht damit einem im System möglichen Ablauf. Dies erfüllt die Qualitätsanforderungen an die Echtzeitanalyse für diese Problemstellung.

Dieses Konzept kann nun auch auf die anderen, ebenfalls der Variabilität unterliegenden und das Zeitverhalten beeinflussenden Faktoren angewendet werden. Beispiele sind Ausführungszeiten, aber auch Varianten von Ereignissen, die verschiedene Abläufe triggern. Auch die temporäre Auslagerung von Arbeit auf andere Ressourcen wie Hardwarebeschleuniger und die Effekte von Spinlocks (Synchronisationselemente mit aktivem Warten) können nun besser berücksichtigt werden.

Die Methode bezieht sich auf die Rückverfolgung der einzelnen Instanzen bis zu ihrer ursprünglichen Erzeugung. Sie kommt an ihre Grenzen, wenn die Zeitfenster rekursiv vom Zeitfenster von Vorinstanzen desselben Prozesses abhängig sind. Dann kann es sein, dass nicht alle Instanzen bis zu ihren Quellen aufgelöst werden können. Dies ist aber für eine Nachstellung des Ablaufs im System notwendig. Solche zirkulären Abhängigkeiten sind aber auch aus anderen Gründen problematisch und sollten im Systemdesign vermieden werden.

Das hier entwickelte Verfahren beantwortet eine im Forschungsantrag aufgeworfene wesentliche Fragestellung und weicht dabei von dem dort angedachten Lösungsansatz ab. Es stellt aber in Hinblick auf Komplexität und Anwendbarkeit auf verschiedenen Problemstellungen eine erhebliche Verbesserung dar. Dieses Ergebnis ist maßgeblich auf die Zusammenführung der Vorarbeiten der Partner und der sich gegenseitig befruchtenden Projektarbeit zurückzuführen. Dies unterstreicht die Bedeutung solcher Forschungsprojekte für KMUs wie der INCHRON AG.

Diese Arbeit adressiert hauptsächlich Task T2.2 „Wirkkettenzentrierte Analyse“, aber auch T3.2 „Nachvollziehbarkeit der Analyseergebnisse“.

3.4 Begrenzende Ereignisspektren

Die im vorherigen Abschnitt vorgeschlagene Methode ist ausreichend, um alle Abhängigkeiten aufzulösen. Allerdings kann eine Anwendung der Methode allein zu vielen Widersprüchen und Abhängigkeiten führen, deren Auflösung algorithmisch aufwändig und teuer ist.

Die Uni Ulm hatte als Vorarbeit das Konzept der begrenzenden Ereignisspektren entwickelt, das prinzipiell die Erfassung von Abhängigkeiten zwischen ausgehenden Ereignisströmen ermöglicht, deren Erzeuger um eine gemeinsame Ressource konkurrieren. Aus dieser Konkurrenz resultieren lastreduzierenden Effekte, wenn die Zielprozesse beider Ereignisströme wieder auf einer gemeinsamen Ressource allokiert sind. Das existierende Konzept war allerdings für ein anderes, weniger mächtiges Analyseverfahren entwickelt worden.

Im Projekt konnte nun, nachdem mehrere Ansätze nicht zum Ziel geführt haben und verworfen werden mussten, eine Lösung gefunden werden, das Konzept der begrenzenden Ereignisströme in die Offset-Analyse von INCHRON zu integrieren. Die begrenzenden Ereignisströme erlauben es nun, solche Abhängigkeiten schon in der Berechnung der Antwortzeiten zu berücksichtigen. Damit entfällt die aufwändige Segmentierung von widersprüchlichen Zeitfenstern, und die Komplexität verringert sich, was sich daraus ergibt, dass für alle möglichen Kombinationen von Segmenten verschiedener Zeitfenster eigene Antwortzeitberechnungen durchgeführt werden müssen.

Die Kombination der Methode der Segmentierung mit den begrenzenden Ereignisströmen erlaubt, solche Abhängigkeiten zielgerichtet zu identifizieren, die für die berechnete Antwortzeit relevant sind, und gezielt nur für diese die begrenzenden Ereignisströme zu ermitteln.

Diese Arbeiten adressieren schwerpunktmäßig T2.2 „Wirkkettzentrierte Analyse“ und T2.3 „Schließen von Fähigkeitslücken“.

3.5 Integration von praxisrelevanten Herausforderungen

Das hier entwickelte Analyseverfahren muss eine methodische Antwort für alle benötigten Modellaspekte bieten, die für das Zeitverhalten der hier betrachteten Systeme relevant sind. Entscheidend ist dabei, dass die Analysemethoden der einzelnen Fragestellungen in eine konsistente Gesamtmethode eingebettet sind, das heißt, dass es eine Echtzeitanalyse gibt, die alle relevanten Teilaspekte der Systeme abdeckt.

Im Simulationsmodell, dessen vollständige Unterstützung angestrebt wurde, existieren nicht nur Elemente wie Prozesse und Funktionen, sondern auch das Verhalten solcher Elemente kann durch ein detailliertes Modell, den Call-Graphen, ausgedrückt werden. Dieser Call-Graph beinhaltet Modellelemente für Verzweigungen, Schleifen, Ausführungszeiten, Datenkommunikation, Thread-Erzeugung und vieles mehr.

Die Entwicklung abstrakter Modellelemente für diese und andere Modellaspekte erlaubt erst eine effiziente Integration in einer gemeinsamen Analysemethodik. Die Einführung des neuen Modellelements „Time Consumer“ in die Analyseverfahren ermöglicht eine allgemeinere Anwendung der Methoden, nicht nur für Prozesse. Ein Time Consumer kann ein Prozess, ein Task, ein Teilabschnitt eines Prozesses, eine AUTOSAR RunnableEntity, eine zeitbehaftete Sequenz von Berechnungsschritten innerhalb eines Prozesses, oder auch eine zeitbehaftete Kommunikation sein, kurz gesagt, alle Modellelemente, die zu dem Zeitverbrauch einer Wirkkette beitragen. Orthogonal zu dem Element Time Consumer wird die Beanspruchung von Berechnungskapazität durch das Modellelement „Capacity

Consumer“ dargestellt. Dies sind primär Scheduler mit ihren Sub-Elementen, aber auch wieder Prozesse usw. Viele Modellelemente sind sowohl „Time Consumer“ als auch „Capacity Consumer“. Es ist im Projekt gelungen, die Analyseverfahren so zu gestalten, dass sie auf diesen abstrakten Modellelementen arbeiten. Damit reduziert sich für viele Modellelemente die Frage nach einer Analyseverfahren auf die Abbildung auf diese beiden abstrakten Modellelemente.

Eine weitere als relevant identifizierte Herausforderung war die Analyse des Einflusses von Speicherbussen auf die Antwortzeiten der auf den Speicher zugreifenden Prozesse. Das korrespondierende Simulationsmodell beruht auf einem konkurrierenden Sharing des Speicherbusses, durch das sich die Zugriffszeiten der Prozesse verlängern, wenn gleichzeitig konkurrierende Zugriffe auf den Speicherbus durch Prozesse auf anderen Rechenkernen erfolgen. Dabei sind nicht die laufenden Zugriffe, die z.T. durch den Cache abgefangen werden, relevant. Diese können gut in die Ausführungszeiten integriert werden. Relevant sind dagegen größere Lese- und Schreiboperation auf neuen Daten, z.B. auf ganzen Kamerabildern.

Hierfür wurden auf Basis der bisherigen Offset-Analyse von INCHRON systematisch neue Methoden entwickelt und schrittweise auf immer komplexere Fragestellungen ausgeweitet. Die gelöste Herausforderung war dabei die Berücksichtigung von Ausführungszeitverlängerungen durch zeitgleiche Ausführungen konkurrierender Prozesse auf anderen Ressourcen (Prozessor-Cores) und die daraus resultierende indirekte Beeinflussung. Hierzu mussten die maximal möglichen zeitlichen Korrelationen von relevanten Lasterzeugern auf mehreren ansonsten unabhängigen Ressource zueinander bestimmt werden. Dabei müssen auch die Interferenzen durch andere für die Belastung des Speicherbusses nicht relevanten Prozesse auf diesen Ressourcen berücksichtigt werden. Korrelieren die Speicherzugriffe, kann sich das in einer Verlängerung von Ausführungszeiten niederschlagen.

Andere relevante Herausforderungen können mit der kombinierten Anwendung der in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Methoden und Erweiterungen der Analyse abgedeckt werden. Wirkketten mit propagierten Variablen können je nachdem mit den begrenzenden Ereignisspektren (3.4) oder durch Aufspaltung in mehrere wertabhängige Wirkketten mit ggf. unterschiedlichen Verläufen erfasst werden. Spinlocks (Synchronisationselemente mit aktivem Warten) können durch die Interferenzpunkte (3.1) in Verbindung mit der Segmentierung von Jitter-Intervallen (3.3) integriert werden.

Mit diesen Arbeiten werden die Tasks T2.3 „Schließen von Fähigkeitslücken“ und T3.3 „Vernetzung von Simulation und Analyse“ adressiert.

3.6 Vernetzung von Simulation und Analyse

Wesentliche Arbeiten an der Schnittstelle zwischen Simulation und Analyse dienen zur Unterstützung eines integrierten Modells von Simulation und Analyse. Die Mächtigkeit der modellbasierten Simulation (ohne die Berücksichtigung von C-Code) wurde in den letzten Jahren erheblich ausgeweitet. Für viele der neu hinzugefügten Modellelemente und Konzepte war die hinreichende methodische Unterstützung durch Analyseverfahren noch nicht gegeben. Mit den Arbeiten an diesem Projekt wurden hier wesentliche Lücken geschlossen. Daher kann nun die Kombination und Integration von Analyse und Simulation auf Basis eines gemeinsamen Metamodells, das im Wesentlichen dem Simulationsmodell entspricht, realisiert werden. Die Arbeiten hierzu sind mit Projektende noch nicht abgeschlossen und werden im Rahmen der Produktentwicklung fortgesetzt, um planmäßig zu einem Release eines integrierten Softwarewerkzeugs zu kommen. Die Integration

umfasst dabei die Modellierung genauso wie die Simulations- und Analyseergebnisse. Sie ist auch die Grundlage für die Integration der Ergebnisse beider Verfahren in gemeinsamen vergleichenden Metriken.

Diese Arbeiten adressieren T3.3 „Vernetzung von Simulation und Analyse“.

3.7 Visualisierung von Analyseergebnissen und ihre Nachvollziehbarkeit

Ein wesentlicher Faktor für die Visualisierung und Nachvollziehbarkeit von Analyseergebnissen ist die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Methode der Segmentierung von Jitter-Intervallen. Wie dort bereits erläutert, ermöglicht sie die akkurate Nachbildung der dann qualitativ hochwertigen Analyseergebnisse in der Simulation. Diese Möglichkeit bildet zusammen mit flankierenden Erläuterungen der Verfahren und ihrer Grenzen sowie den umfassenden Explorationsmöglichkeiten der Simulation eine gute Grundlage, um die Akzeptanz der Analyseverfahren und ihrer Ergebnisse zu erreichen.

Eine weitere Maßnahme hierfür ist die integrierte Visualisierung von Analysegrenzen in aggregierten Simulationsergebnissen wie Histogrammen von Antwortzeiten. Hierfür wurde eine Metrik entwickelt, um zeitintervall-basierte Diagramme effizient aus Simulations- oder Messdaten zu extrahieren. Diese Art von Diagrammen visualisiert in der Analyse die Ereignis- und Lastspektren, die die mathematische Grundlage der hier vorgestellten Analyseverfahren sind. Vereinfacht stellen sie maximale oder minimale Lasten bzw. Ereignisanzahlen dar, die in beliebigen Instanzen von Zeitintervallen einer Länge vorkommen können. Die Diagramme visualisieren diese Ergebnisse über alle Längen von Zeitintervallen hinweg.

Mit diesen Arbeiten wird Task 3.2 „Visualisierung der Analyseergebnisse und ihre Nachvollziehbarkeit“ adressiert.

3.8 Evaluation

Die programmatische Implementierung der Analyse wird laufend mit zahlreichen Beispielen gegen die Simulation getestet. Die stellt eine wichtige Kontrolle der Analysealgorithmen und ihrer Implementierung dar, um Fehler zu finden, die zu einer nicht nachvollziehbaren Abweichung zwischen Analyse und Simulation führen. Für alle dabei gefundenen Überabschätzungen konnten methodische Durchbrüche erreicht werden, die eine hinreichend genaue Analyse ermöglichen. Diese konnten zum Projektende noch nicht vollständig umgesetzt werden, auch weil die Integration mit dem mächtigeren Simulationsmodell noch nicht abgeschlossen ist.

Es zeigt sich aber in vielen Beispielen eine deutliche Verbesserung der Qualität der Ergebnisse, insbesondere der berechneten Antwortzeiten. Daher ist zu erwarten, dass die Projektziele mit Abschluss der vollständigen Umsetzung und Integration der Methoden vollumfänglich erreicht werden.

Die Evaluation adressiert das Arbeitspaket AP4 „Evaluation“

3.9 Gesamtergebnis der entwickelten Methoden

In Kombination decken diese im Projekt entwickelten und erläuterten Methoden die wesentlichen Schritte der Analyse ab, die für die bisherige Überabschätzung verantwortlich sind. Es wurde eine Methode entwickelt, die die einheitliche Integration verschiedener Schedulingverfahren in die bestehende Analyse ermöglicht. Der teilweise extremen Überabschätzung durch die Kombination vieler zufallsbehafteter Prozessinstanzen konnte mit einer Beschränkung der Wahrscheinlichkeit durch Konfidenzgrenzen wirksam begegnet

werden. Die Ergänzung der Offset-Analyse durch die Verwendung von Interferenzpunkten konnte Problemstellungen wie die Kombination mehrerer verschiedene Ereignisquellen wirksam lösen. Für verteilte Systeme und den zentral wichtigen Wirkketten konnte mit der Methode der Segmentierung des Jitter-Intervalls, flankiert durch die erfolgreiche methodische Integration des begrenzenden Ereignisstroms, die entscheidenden Verbesserungen in der Qualität erreicht werden. Ergänzt durch die oben aufgeführten Methoden, die primär auf die Analyse der einzelnen Ressourcen abzielen, wird nun ein qualitativ hochwertiges Analyseergebnis für das Gesamtsystem ermöglicht.

Daneben wurde für praxisrelevante Probleme, wie die genauere Berücksichtigung von Spinlocks oder Effekten aus konkurrierenden Speicherzugriffen, methodische Lösungen entwickelt.

Nicht weiter verfolgt wurde die ursprüngliche Idee aus Task 3.1. „Interaktionsmöglichkeiten“, für den Anwender der Methode eine Möglichkeit zur manuellen Modellierung von Abhängigkeiten zu schaffen. Die jetzt im Projekt erreichten Methoden erlauben bereits eine umfassende automatische Berücksichtigung der im Systemmodell vorhandenen Abhängigkeiten. Daher fehlt jetzt für diese Idee der schlüssige Anwendungsfall. Für die hinter dem Task stehende Methode der begrenzenden Ereignisströme wurde, wie ausgeführt, hingegen eine effiziente Integration in die Analysemethodik gefunden.

Viele dieser Verbesserungen sind auch das Ergebnis von Überführungen von Elementen des von der Uni Ulm entwickelten Heaviside-Echtzeitkalküls in die von INCHRON entwickelte Offset-Analyse. Dieser Transfer wurde durch die Projektförderung und die im Ergebnis fruchtbaren Diskussionen und Arbeiten erst ermöglicht.

4 Ergänzende Angaben zur Verwendung der Zuwendung

- Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektmittel wurde ausschließlich für Personal- und Reisekosten aufgewendet. Der Förderanteil für diese Aufwendungen betrug 365k€. Diese Förderung hat INCHRON erst die Durchführung des Projektes und die Erreichung der damit verbundenen Zielsetzung ermöglicht.

- Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Wie der Umfang und die Zahl der im Projekt entwickelten Methoden und ihr Zusammenspiel zeigen, war die im Projekt geleistete Arbeit für die Problemstellung angemessen. Um die im Projektantrag aufgeworfenen Fragestellungen zu lösen, war auch die Entwicklung all dieser Methoden und die Lösung der dahinterstehenden Fragestellungen notwendig. Es hat sich gezeigt, dass ein Analysewerkzeug eine qualitativ hochwertige Antwort für die Gesamtheit, der in den jeweiligen Modellen vorhandenen Herausforderungen geben muss. Dabei wird die Qualität der Analyseergebnisse in der Automobilindustrie vor allem auch im Vergleich zum simulierten oder gemessenen Verhalten der Systeme bewertet.

- Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die näherer Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die primäre Verwertung der Projektergebnisse wird durch eine grundlegend neu gestaltete Version des Echtzeitanalysewerkzeugs chronVAL als Teil der Werkzeugverbundes chronSUITE erfolgen. Mit dem qualitativen Sprung, der durch die Projektergebnisse erfolgt,

wird dieses Werkzeug wesentlich bessere Analyseergebnisse liefern und einen bisher nicht gekannten Modellumfang abdecken können.

- Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Arbeiten zum Thema Probabilistic Response Time Analysis beruhen zwar auch auf zufallsverteilten Ausführungszeiten, haben aber einen anderen Fokus als die hier vorgestellte Methode der Konfidenzgrenze [3]. Arbeiten, die die Wahrscheinlichkeitsbeschränkungen auf die gleiche Weise in die Echtzeitanalyse einbringen, insbesondere im Hinblick auf die Einbeziehung von Offsets, sind nicht bekannt. Eine während der Projektlaufzeit erschienene Arbeit hat zwar teilweise eine ähnliche Argumentation, aber eine völlig andere Problemstellung [4].

In [3] ist eine Publikation zum Thema Wirkketten aus 2023 zu finden. Die von den Autoren vorgeschlagene Analyse von Ende-zu-Ende Wirkketten beschränkt sich dabei allerdings auf Systeme ohne Jitter. Auch andere relevante Aspekte, wie schwankende Ausführungszeiten, werden nicht hinreichend berücksichtigt.

- Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner konnte im Rahmen des Projektes eine Masterarbeit betreut werden. Für Einzelheiten wird hierzu auf den Bericht des Projektpartners Uni Ulm verwiesen. Von Seiten von INCHRON haben weiterhin zwei Projektmitarbeiter an ihren jeweiligen Dissertationen gearbeitet, die thematisch eng mit dem Inhalt des Projektes verknüpft sind. Die Promotionsverfahren sind beide noch nicht abgeschlossen.

Obwohl INCHRON als Projektpartner seinen Fokus auf die Entwicklung der Methoden und des resultierenden Softwarewerkzeuge chronVAL gelegt hat, sind im Rahmen des Projektes folgenden Veröffentlichung erfolgt:

- **POLLEX, Victor**; SLOMKA, Frank. A Mathematical Comparison Between Response-Time Analysis and Real-Time Calculus for Fixed-Priority Preemptive Scheduling. In: 34th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS 2022). Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2022.
- **SADEGHI, Mohammadreza**, et al. MIAT Efficient analysis of adaptive variable-rate tasks. Journal of Systems Architecture, 2022, 127. Jg., S. 102472.
- **POLLEX, Victor**; **SLOMKA, Frank**. Formal Comparison of Outgoing Event Streams Between CPA and RTC. (accepted for) 37th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS 2025). Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik, 2025.

Des Weiteren wird der Schlussbericht als Technischer Bericht im Internet publiziert. Eine ausführlichere Journal-Publikation wird in zeitlicher Nähe zum Vermarktungsstart des neu gestalteten Softwaretools chronVAL, das auf die beschriebenen Methoden aufbauen wird, angestrebt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Projektes war es, für Systeme des hoch automatisierten bzw. teilautonomen Fahrens eine neue Echtzeitanalyse zu entwickeln, die der industriellen Praxis für solche

Systeme gerecht wird. Dabei sollten qualitätsmäßige Defizite bisheriger Verfahren beseitigt und eine methodisch umfassende Unterstützung der benötigten Modelle erreicht werden.

Im Projekt konnten entscheidende Methoden entwickelt werden, um die Qualität von Echtzeitanalyseverfahren im Hinblick auf den Abstand zwischen den Ergebnissen der Analyse und dem real beobachtbaren Systemverhalten zu verbessern. Dabei wurden Forschungsergebnisse von INCHON und der Uni Ulm zusammengebracht, um identifizierte Herausforderungen existierender Echtzeitanalyseverfahren zu lösen. Die entwickelten Methoden betreffen Fragen wie die akkurate Integration multipler Schedulingverfahren in die Analyse, die Möglichkeit, höchst unwahrscheinliche Abläufe aus den Analyseergebnissen auszuschließen, die Integration von Herausforderungen aus der industriellen Praxis und vor allem eine qualitativ hochwertige Analyse von Ressourcen-übergreifenden Wirkketten. Insbesondere letztere sind zentral für das Zeitverhalten automatisierter Fahrfunktionen. Diese Verbesserungen werden entscheidend für eine breite Anwendung der Methoden und des darauf beruhenden Werkzeugs in der industriellen Praxis sein. Die Ergebnisse des Projektes fließen in das Echtzeitanalysewerkzeug chronVAL von INCHRON ein und werden Echtzeitanalyse auf ein neues Niveau heben.

Literaturverzeichnis

- [1] E. Wandler, Modular performance analysis and interface-based design for embedded real-time systems, Phd-thesis nr. 16819, ETH Zürich, 2006.
- [2] K. Albers, *Approximative real-time analysis*, Ulm, 2011.
- [3] R. I. Davis und L. Cucu-Grosjean, „A Survey of Probabilistic Timing Analysis Techniques for Real-Time Systems,“ *Leibnitz Transactions on Embedded Systems*, Bd. 6, Nr. 1, pp. 03:1-03:60, 2019.
- [4] K. Zagalo, Y. Abdeddaim, A. Bar-Hen und L. Cucu-Grosjean, „Response Time Stochastic Analysis for Fixed-Priority Stable Real-Time Systems,“ *IEEE Transactions on Computers*, Bd. 72, Nr. 1, 2023.
- [5] M. Günzel, K.-H. Chen, N. Ueter, G. von der Brüggen, M. Dürr und J.-J. Chen, „Compositional Timing Analysis of Asynchronized Distributed Cause-effect Chains,“ *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, Bd. Vol 22, Nr. Article 63, 2023.
- [6] D. Suruga, „A probabilistic analysis on general probabilistic scheduling problems,“ in *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, 2024.