

# Innovation durch Simulation: Modellbasierte Entwicklung einer Flotte kollaborativer Transportroboter

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt Collaborative Embedded Systems (CrEST) befasst sich mit der Entwicklung komplexer eingebetteter Systeme, die zur Erfüllung bestimmter Aufgaben in unterschiedlichen Kontexten und mit unterschiedlichen Komponenten effizient zusammenarbeiten müssen. Ziel des Projekts ist es, Methoden und Architekturen mit modellbasierten Systemen und Systemkontextbeschreibungen für dynamische und skalierbare Anwendungen zu definieren. Kollaborierende Eingebettete Systeme (CES) und die notwendigen adaptiven Systemarchitekturen werden in naher Zukunft einen wesentlichen Einfluss auf die technologische Entwicklung haben. Durch diese Systeme und deren Architekturen können bestehende Produktionsprozesse neu definiert werden und von einem hohen Automatisierungsgrad profitieren, so dass intelligente Fertigungsprozesse flexibler auf veränderte Produktionsfaktoren reagieren können. So können beispielsweise lernende Maschinen repetitive Aufgaben übernehmen, die bisher vom Menschen erledigt wurden, um diese Prozesse zielgerichtet zu optimieren. Darüber hinaus können sie die Arbeit von zentralen Auftragsmanagementsystemen übernehmen, um ihre Transportaufträge autonom zu koordinieren und zu organisieren. Basierend auf modellbasierten Systementwürfen können Analysen durchgeführt werden, um alle Funktionen zu untersuchen, die ein System zur sicheren Zusammenwirkung benötigt. Zu den Fällen, in denen eine solche Technologie nützlich wäre, gehören unter anderem autonome Roboter, lernende Steuerungs- und Regelungssysteme sowie anpassungsfähige Fabriken.

## Modellbasierte Entwicklung kollaborativer eingebetteter Systeme

proANT 436 beim Technologieunternehmen DYCONEX

Bild 1: proANT 436 beim Technologieunternehmen DYCONEX

Die InSystems Automation GmbH und Model Engineering Solutions GmbH sind zwei von 22 internationalen Partnern aus Industrie und Wissenschaft, die im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes zusammenarbeiten, um den Zugang zu neuen Technologien und Methoden zur Entwicklung von CES sowie von CSGs (kollaborative Systemgruppen), wie einer Flotte autonomer Roboter, zu ermöglichen. Kollaborierende Systeme werden durch ihre effiziente Zusammenarbeit und das Fehlen konkurrierender Ziele definiert. CrEST ist in sechs so genannte "Engineering Challenges" und sechs interdisziplinäre Themen unterteilt. Die ersten drei ingenieurtechnischen Herausforderungen befassen sich mit der übergreifenden Frage, wie die Architektur von flexiblen, dynamischen und adaptiven Systemen am besten gestaltet werden kann. Im Teilprojekt zu dynamischen Architekturen ist es unter anderem Aufgabe von InSystems Automation und Model Engineering Solutions, Möglichkeiten zu untersuchen, einen Roboter mit Hilfe von Mechanismen wie Plug & Play in eine bestehende Flotte zu integrieren, ohne den gesamten Produktionsprozess unterbrechen zu müssen. Darüber hinaus ist es das Ziel von InSystems, die sogenannten proAnt-Transportroboter zu verbessern, die seit 2012 in Produktion sind. Der allgemeine Fokus liegt auf der Verbesserung der Technologie und der Entwicklung und Bewertung neuer Ansätze für das Gesamtkonzept. Konkret geht es um dezentrales Flottenmanagement, Kommunikation zwischen einzelnen Systemen und Analyse von Umweltdaten.

Aufgrund der Vielzahl von Schwierigkeiten, die sich aus der hohen Komplexität der zu berücksichtigenden Szenarien ergeben, erfordert die Entwicklung adaptiver Systeme einen fundierten Ansatz. Eine Roboterflotte muss auf dynamische Veränderungen in der Ausrichtung des Produktionssystems (Manufacturing Execution System) oder der Anzahl und Art seiner Mitglieder so reagieren, dass die

Gesamtfunktionalität und Effizienz der CSG gewährleistet ist. Die konsequente Anwendung eines modellbasierten Entwicklungsprozesses für Automatisierungssysteme bietet eine Vielzahl von vorteilhaften Eigenschaften. Vor allem aber ermöglicht die Spezifikation der CSGs und CACs (Collaborative AGV Controller) in Form von ausführbaren Modellen eine vollständig virtuelle Darstellung (Digital Twin) der Roboterflottenmitglieder und ihres kollaborativen adaptiven Verhaltens. Diese virtuelle Darstellung bietet eine fundierte Grundlage für die effiziente Entwicklung, Wartung und Erweiterung des eigentlichen Systems sowie seiner Hard-, Software und mechanischen Komponenten. Um sein Potenzial voll auszuschöpfen, beruht der modellbasierte Ansatz in erster Linie auf der Wiederverwendbarkeit von Modellen und Testrahmen über die verschiedenen Entwicklungsphasen hinweg. Dazu gehören die Entwicklung von Funktionen, Systemen und Systemkomponenten. Dabei profitiert der modellbasierte Entwicklungsprozess von einer vollständig integrierten Toolchain, die entsprechenden Entwicklungsaktivitäten einschließlich des Anforderungsmanagements, der Modellierung und Simulation sowie integrierter Qualitätssicherungsaufgaben hochgradig automatisiert. Dazu gehören insbesondere die statische Analyse, das anforderungsbasierte Testen sowie das systematische Testen von Modellen.

## Adaptive Systemarchitekturen für eine Flotte von Transportrobotern

Bei der Entwicklung und Wartung adaptiver eingebetteter Systeme ist die Berücksichtigung des Systemkontextes ein wichtiger Aspekt fast aller Modellierungs- und Analysemethoden. Im Zusammenhang mit dem Anwendungsfall kollaborierender Transportroboter ist das Auftragsvergabeverfahren der kritischste Teil der Zusammenarbeit. Hier geht es darum, eine oder mehrere Strategien zu definieren und anzuwenden, um den verantwortlichen Roboter für die Auftragsausführung zu bestimmen, wenn ein neuer Auftrag an die Flotte gesendet wird. Dabei muss die CSG in der Lage sein, alle von der Fabrik geforderten Aufgaben zu erfüllen und gleichzeitig ihr Verhalten an die Veränderungen der Produktionsziele und der Fertigungsumgebung anzupassen. In diesem Fall stellt sich die Frage, wie eine CSG die Aufträge so unter den Flottenmitgliedern aufteilen kann, dass sie sowohl lokale Ziele, die spezifisch für einzelne Roboter sind, wie z.B. einen Mindestladezustand der Batterie einzuhalten, als auch globale Ziele, die durch eine vorgegebene Produktionsstrategie bestimmt werden, erfüllen kann. Dabei werden die Produktionsvorgaben für kollaborierende Transportroboter durch gemeinsame Ziele der Systemgruppe festgelegt, die zur Laufzeit von einem Produktionsleitsystem an die Flotte übertragen werden.

proANT AGVs Flotte transportieren offene Behältnisse durch die Produktion der Bierbaum Unternehmensgruppe  
Bild 2: proANT AGVs Flotte transportieren offene Behältnisse durch die Produktion der Bierbaum Unternehmensgruppe

In Zusammenarbeit mit InSystems untersuchten und validierten die Softwareingenieur:innen von Model Engineering Solutions vier exemplarische globale Ziele, die vom Produktionsleitsystem dynamisch vorgegeben werden: Wirtschaftlichkeit (die von allen Robotern gefahrene Gesamtstrecke ist zu minimieren); Robustheit (die Auftragswarteschlangen jedes Roboters sind so klein wie möglich zu halten); Durchsatz (die Anzahl der ausgeführten Aufträge pro Zeiteinheit ist zu maximieren) und Wartungsintensität (die Aufgaben sind so zu verteilen, dass alle Roboter ähnliche Gesamtlängen zurücklegen). Diese globalen Ziele werden durch einen geeigneten Parameter im Verteilungsverfahren kodiert. Es ist wichtig zu beachten, dass sich diese Ziele zur Laufzeit ändern können, ohne dass vorherige Informationen zur Designzeit bestehen. Die dynamisch variierenden Ziele müssen als konkrete CSG-Strategien realisiert werden, die von der Roboterflotte autonom gelöst werden. Andere globale Ziele, einschließlich zeitlicher Beschränkungen der Jobverteilung sowie lokale Ziele, müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Des Weiteren kann jede dynamische Änderung im Kontext eine Rekonfigurationsphase auslösen. Dies ist der Fall, wenn ein neuer Auftrag vom Manufacturing Execution System gesendet wird, wenn ein Roboter in die Flotte eintritt oder sie verlässt oder wenn ein neues Hindernis erkannt wird. Unter diesen Umständen muss sich die CSG neu konfigurieren, um weiterhin den Zielen der CSG zu entsprechen. So müssen beispielsweise die von jedem CAC verwalteten Auftragswarteschlangen angepasst oder sogar neu verteilt werden, wenn ein Roboter die Flotte verlässt,

ohne seine Aufgabenliste abgeschlossen zu haben. Solche Rekonfigurationsmechanismen werden durch geeignete Softwaremodule realisiert.

## Modellierung einer Transportroboter-Flotte in Simulink

proAnt Roboter

Bild 3: proAnt Roboter

InSystems und Model Engineering Solutions haben gemeinsam ein MATLAB/Simulink-Modell einer adaptiven Flotte von kooperierenden Transportrobotern wie die von InSystems entwickelten proANT-Roboter entwickelt. Dieses Modell soll das gewünschte adaptive Systemverhalten erfassen, um die oben genannten CSG-Ziele und Herausforderungen effektiver zu bewältigen. Die semiformale Sprache Simulink eignet sich, um das Verhalten der Roboterflotte und ihrer Mitglieder sowie den Kontext einschließlich des Produktionsleitsystems zu beschreiben. Darüber hinaus sind Simulink-Modelle in der Lage, mit typischer Roboter-Middleware oder Kommunikations-Frameworks wie dem Robot Operating System (ROS) zu kommunizieren.

Simulink bietet eine Plattform zum Entwerfen, Simulieren und Validieren des Verhaltens eines dynamischen Systems auf verschiedenen Abstraktionsebenen, einschließlich Funktions-/Spezifikations-, System- und Softwaremodellen. Simulink ist in der Industrie weit verbreitet, da es ein domänenunabhängiges Modellierungswerkzeug für dynamische Systeme bietet. Typische Anwendungen finden sich in Signalverarbeitung, Steuerungs-, Regelungs- und Systemtechnik. Insbesondere bietet Simulink mehrere Simulationsmodi, die von quasi-kontinuierlichen bis hin zu diskreten oder ereignisbasierten Ausführungs- und Abstraten reichen, verschiedene Solveroptionen, die einen maßgeschneiderten Kompromiss zwischen Präzision, Speicherverbrauch und Ausführungszeit ermöglichen. Weiter werden gängige Datentypkonzepte wie Fließkomma-, Festpunkt- und Aufzählungstypen unterstützt. Zusammen mit der integrierten Blockbibliothek und verschiedenen Add-ons für die automatisierte Codegenerierung, finite Zustandsautomaten und zur domänenspezifischen Modellintegration einschließlich FMI-Unterstützung, eignet sich Simulink hervorragend als Werkzeug zum schnellen Erstellen, Simulieren und Testen von CSG-Prototypen. Darüber hinaus ist das hohe Wiederverwendungspotenzial über verschiedene Entwicklungsstufen von großem Nutzen.

Während eines modellbasierten Entwicklungsprozesses ist es außerdem unerlässlich, Modellierungsrichtlinien zu befolgen, um Funktionalität, Wartbarkeit und einen effizienten Workflow zu gewährleisten. So darf beispielsweise das Systemzerlegungsmodell nur Subsystemblöcke und Signalroutingelemente enthalten. Insbesondere werden in einem Zerlegungsmodell keine numerischen Berechnungen durchgeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass die CSG-Anforderungen vollständig auf die Anforderungen der CAC-Komponenten der einzelnen Roboter abgebildet werden können. Darüber hinaus müssen Zerlegungsmodelle zusammenhängende Komponenten mit begrenzter Komplexität spezifizieren, für die geeignete Maßnahmen zur Verfügung stehen. Modellierungsrichtlinien behandeln darüber hinaus viele Aspekte wie Sicherheitsthemen, Variantensteuerung und starke Typisierung. Im Rahmen dieses Projekts wurde die Einhaltung der Vorschriften mit geeigneten Tools zur statischen Modellanalyse wie dem MES Model Examiner automatisch überprüft und korrigiert.

Beispiel eines Simulink-CAC-Modells mit Hauptkomponenten wie Rekonfigurationseinheiten und Aufgabenverteilung

Bild 4: Beispiel eines Simulink-CAC-Modells mit Hauptkomponenten wie Rekonfigurationseinheiten und Aufgabenverteilungslogik

## Von formalisierten Anforderungen bis hin zu automatischen Assessments mit MTest/MARS

Anforderungsbasiertes Testen mit formalisierten Spezifikationen wie MARS

## Bild 5: Anforderungsbasiertes Testen mit formalisierten Spezifikationen wie MARS

Um eine praktische Methode zur Implementierung, Operationalisierung und Validierung des adaptiven Verhaltens der CSG zu entwickeln, wurde der Schwerpunkt auf die Analyse der Simulink-Prototypen gelegt. Die oben genannten Systemanforderungen müssen im Sinne des testgetriebenen Ansatzes validiert und zur Laufzeit überwacht werden, um mögliche Systemausfälle anzuzeigen und geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. So führen Strategieänderungen zu Änderungen in den Kooperationsprotokollen, die in der Systemspezifikation angemessen berücksichtigt werden müssen. Dabei ist zu beachten, dass die erwartete adaptive Systemreaktion vollständig in den CSG-Anforderungen erfasst werden muss. Konsistente Systemspezifikationen müssen klar definiert, einheitlich und eindeutig verständlich sein, was direkt zur Notwendigkeit formalisierter Anforderungen führt.

Im Vergleich zu Ansätzen die auf natürlicher Sprache basieren, welche in der Praxis noch weit verbreitet sind, führen formalisierte Anforderungen zu einer eindeutigen Repräsentation der Anforderungen an die Systemgruppe. Darüber hinaus können formalisierte Anforderungsformate wie die MTest Assessable Requirements Syntax (MARS) vollständig in den modellbasierten Ansatz integriert werden, d.h. zustands- oder ereignisbasierte Trigger und das erwartete Signalverhalten können durch Verweise auf Modellgrößen wie Signalspezifikationen oder Designparameter definiert werden. In Verbindung mit der effizienten Definition geeigneter Testfälle kann die virtuelle Validierung des adaptiven CSG-Verhaltens auf Basis der automatischen Testausführung und -bewertung automatisiert werden. Insbesondere schließt MARS die Lücke zwischen Anforderungen, die auf formalen Sprachen basieren, und Anforderungen, die für Systemingenieur:innen unterschiedlicher Herkunft mit natürlichen Sprachkonzepten leicht formulierbar und zugänglich sind. Im Rahmen des Modelltestsystems MES Test Manager (MTest) bietet MARS darüber hinaus die Grundlage für verschiedene Aspekte der Testautomatisierung im Rahmen der modellbasierten Entwicklung, einschließlich der automatisierten Generierung von Assessments, Testfällen und Monitoren.

Insgesamt kann die Entwicklung und Wartung einer CSG, wie vorstehend beschrieben, auf einem vollständig virtuellen Gegenstück in Form von interagierenden Simulink-Modellen basieren, die das Verhalten der Flotte von Transportrobotern repräsentieren. Dadurch können Qualitätssicherungsmethoden, wie z.B. das anforderungsbasierte Testen, mit Hilfe geeigneter Tools wie MTest zu einem hohen Maße automatisiert werden. Dieser so genannte "Frontloading"-Ansatz hilft, Design- und Implementierungsfehler schon sehr früh im Entwicklungsprozess zu finden. Darüber hinaus erleichtert es das schnelle Testen und Validieren der Integration neuer Robotertypen oder die Implementierung neuer Kooperationsprotokolle.

## **Über InSystems Automation:**

InSystems Automation entwickelt innovative Automatisierungslösungen und Sondermaschinen für Produktions-, Materialfluss- und Qualitätsprüfungen. Unser Leistungsspektrum umfasst alle Aufgaben, von der Erstellung des Pflichtenheftes über Elektroprojekte, Installation und Programmierung bis hin zur Inbetriebnahme, Wartung und Service. Von der Planung bis zur Fertigstellung von Maschinen und Anlagen haben unsere Kunden eine:n einzigen und professionellen Ansprechpartner:in. Das Unternehmen wurde 1999 von den Geschäftsführern Henry Stubert und Torsten Gast gegründet und ist seitdem stetig gewachsen. Derzeit arbeiten mehr als 50 Mitarbeiter:innen bei InSystems. Das Unternehmen mit Sitz im Wissenschaftszentrum Berlin-Adlershof verfügt über Büros, eine Werkstatt, einen Online-Shop und einen Showroom für die Industrie 4.0. Seit 2012 ist InSystems auf die Herstellung von autonom navigierenden Transportrobotern spezialisiert, die nach Kundenwunsch für Lasten von 30 bis 1.000 kg ausgelegt und als Flotte in eine bestehende Produktionssteuerung implementiert werden. Die Transportroboter werden unter dem Namen proANT entwickelt.

## **Über MES: Software Quality. In Control.**

Das 2006 in Berlin gegründete Softwareunternehmen Model Engineering Solutions GmbH (MES) bietet Lösungen zur integrierten Qualitätssicherung von Softwareprojekten. MES unterstützt seine Kunden bei der Entwicklung modellbasierter Software nach Industriestandards wie IEC 61508, ISO 25119 und ASPICE. Die MES Tool Chain umfasst vier komplementäre Werkzeuge für alle Phasen des modellbasierten Softwareentwicklungsprozesses: die MES Quality Tools. Der MES Model Examiner<sup>®</sup> (MXAM) führt automatisierte Prüfungen durch, um die Einhaltung der Modellierungsrichtlinien für MATLAB Simulink<sup>®</sup>/Stateflow<sup>®</sup>, Embedded Coder<sup>®</sup>, TargetLink<sup>®</sup> und ASCET<sup>®</sup> Modelle zu überprüfen. Der MES Test Manager<sup>®</sup> (MTest) setzt anforderungsbasiertes Unit-Testing in der modellbasierten Entwicklung effizient um. Die schnelle und präzise Struktur- und Komplexitätsanalyse von MES M-XRAY<sup>®</sup> ermöglicht Ihnen eine vollständige Transparenz Ihrer Simulink<sup>®</sup>, Stateflow<sup>®</sup>, Embedded Coder<sup>®</sup> und TargetLink<sup>®</sup>-Modelle. Der MES Quality Commander<sup>®</sup> (MQC) bewertet die Qualität und Produktfähigkeit Ihrer Software und liefert wichtige Entscheidungsgrundlagen während des gesamten Produktentwicklungszyklus. MES Model & Refactor<sup>®</sup> (MoRe) unterstützt Anwender:innen bei der Modellierung mit MATLAB Simulink<sup>®</sup>, indem es die Modellbearbeitung vereinfacht und beschleunigt und monotone Arbeitsschritte reduziert. Das Team des MES Test Centers unterstützt seine Kunden mit Testdienstleistungen vom Anforderungsmanagement über die Erstellung von Testspezifikationen und automatisierter Testauswertung bis hin zur Qualitätsüberwachung. Die MES Academy bietet Trainingskurse und unternehmensspezifische Beratungsleistungen und -projekte an. Die Berater:innen unterstützen bei der Einführung und Verbesserung modellbasierter Entwicklungsprozesse zur Erfüllung von Standards wie IEC 61508, ISO 26262 und ASPICE. Zu den Kunden von MES in der Automobilindustrie gehören 16 der 20 größten OEMs weltweit und deren Zulieferer. Darüber hinaus wächst die Zahl der MES-Kunden im Bereich der Automatisierungstechnik kontinuierlich. MES ist ein dSPACE Strategic Partner und ein MathWorks und ETAS Product Partner. Die MES Academy arbeitet mit SAE International zusammen.