



Multi-Core für sicherheitskritische Echtzeitsysteme

Rechenintensive Sicherheits- und Komfortfunktionen machen den Einsatz von Multi-Core auch in Fahrzeugen notwendig. Doch Multi-Core-Systeme stellen für die Industrie noch eine sehr große Herausforderung dar: Software muss auf Parallelität optimiert werden, Mapping und Scheduling muss Echtzeitfähigkeit gewährleisten und zusätzlich müssen Safety-Anforderungen garantiert werden. Das Forschungszentrum Virtual Vehicle in Graz stellt sich diesen Herausforderungen und erforscht hierfür neue Lösungen.

Aktive Sicherheitssysteme, Fahrerassistenzsysteme und autonomes Fahren sind aktuelle Trends in der Automobilindustrie. Diese komplexen Funktionen erfordern eine hohe Rechenleistung, welche von aktuellen Single-Core-Steuergeräten nicht mehr erbracht werden kann. Bisher wurde auf den wachsenden Bedarf an Rechenleistung mit dem Wechsel von 8-bit- auf 16-bit- und dann 32-bit-Prozessoren, und später durch die Erhöhung der Taktrate reagiert. Mit den aktuellen Packaging wurde jetzt jedoch die Obergrenze der Taktraterhöhung erreicht, da es dabei auch zu einer immer höheren Wärmeentwicklung kommt. Eine weitere Erhöhung der Taktrate würde zu erheblichen Kosten im Hinblick auf die thermische Auslegung und Fertigung des Steuergerätes führen.

Multi-Core in Embedded Systems

Eine potenzielle Lösung für dieses Problem stellen Multi-Core-Systeme dar. Dabei werden mehrere Cores parallel mit geringeren Taktraten betrieben. Der signifikanten Zunahme an Rechenleistung steht damit nur eine marginale Zunahme an Abwärme gegenüber. Sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht gibt es unterschiedliche potenzielle Anwendungsszenarien für solche Embedded Multi-Core-Systeme:

Multi-Core für höhere Rechenleistung:

Die steigende Anzahl an Cores führt zu höherer Rechenleistung bei gleichbleibenden thermischen Randbedingungen. Damit werden komplexe Funktionen umsetzbar.

Multi-Core für redundante Berechnung:

Durch die zusätzlichen Cores kann Funktionalität redundant auf unterschiedlichen Cores berechnet werden. Mögliches Fehlverhalten wird so besser erkennbar. Dadurch können sicherheitskritische Funktionen kosteneffizient umgesetzt werden.

Multi-Core als Integrationsplattform:

Durch die zusätzlichen Cores kann der Funktionsumfang mehrere Single-Core-Steuergeräte in einem leistungsfähigen Multi-Core-Steuergerät integriert werden.

Herausforderungen auf Software-Level

Speziell in einem zeit- und sicherheitskritischen Umfeld führt die Multi-Core Technologie zu einigen Herausforderungen. Um die zusätzliche Rechenleistung von Multi-Core-Prozessoren nutzen zu können, muss die darauf auszuführende Applikations-Software entsprechend programmiert werden. Software für Single-Core besitzt oft einen sequenziellen Programmfluss und die Ausführung auf Multi-Core-Prozessoren

i Virtual Vehicle

Virtual Vehicle ist ein international aktives Forschungszentrum, das Technologien für leistungsfähige, sichere und umweltfreundliche Fahrzeuge für Straße und Schiene entwickelt.

Wesentliche Elemente der Expertise sind die Verknüpfung von numerischer Simulation und experimenteller Absicherung sowie eine umfassende Systemsimulation bis hin zum Gesamtfahrzeug. Das internationale Partnernetzwerk umfasst mittlerweile mehr als 90 Industriepartner mit Firmen wie Audi, AVL, BMW, MAN, Porsche, Siemens oder Volkswagen. Darüber hinaus wird sehr stark mit der TU Graz kooperiert, die seit der Gründung im Jahr 2002 das wissenschaftliche Rückgrat des Zentrums bildet. Weitere Beispiele der mehr als 30 wissenschaftlichen Partner sind das Karlsruher Institut für Technologie, KTH Stockholm, die Universidad Politécnica de Valencia, die TU München oder das Centre de Recherche Informatique de Montreal.

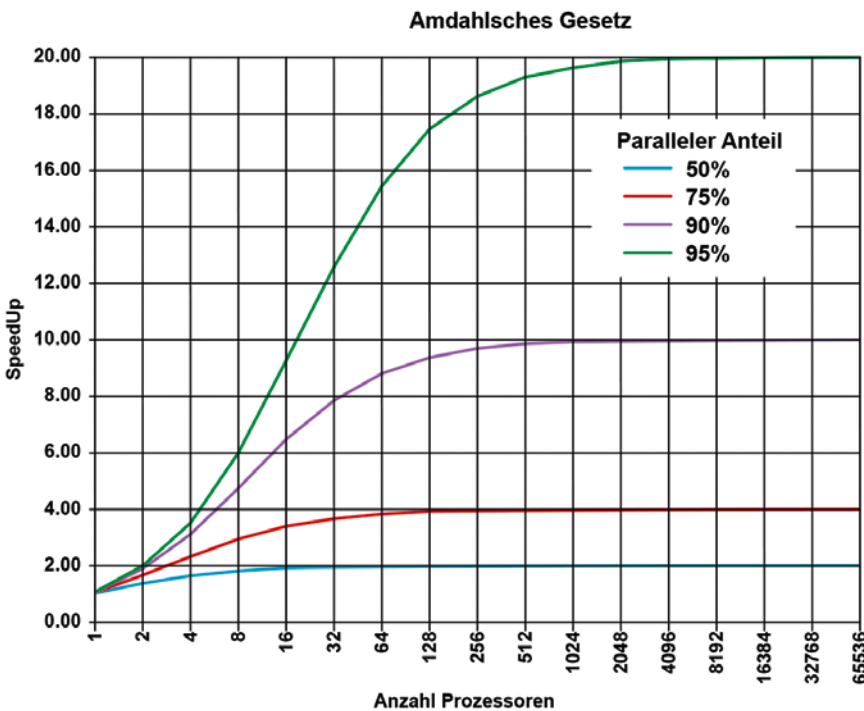


Bild 1: Amdahl's Law: Die Performanz-Steigerung durch den Einsatz von Multi-Core ist stark davon abhängig, wie viel Software-Parallelität herrscht. Daher sollte Software speziell für den Einsatz auf Multi-Core optimiert werden.

ren bringt daher keine Vorteile. Nur Software mit vielen parallelen Codesegmenten kann die parallelen Cores und damit die höhere Rechenleistung nutzen (Bild 1).

Eine weitere Herausforderung ist die geschickte Verteilung der Software-Komponenten auf die verfügbaren Cores. Dieses Optimierungsproblem („task allocation problem“) muss unter unterschiedlichsten Randbedingungen und Optimierungskriterien gelöst werden. Für eine Verteilung auf einem Multi-Core-System treten einige spezifische Aspekte (z. B. zusätzliche Zeitverzögerungen, Synchronisation zwischen Cores, Handhabung von geteilten Ressourcen, etc.) in den Vordergrund.

Rechenintensive Funktionen haben meist auch einen hohen Kommunikationsbedarf. Daher ist neben der Software-Verteilung auch die Auslegung der Bus-Systeme von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Zukunftssichere Bus-Protokolle (Automotive Ethernet, CAN-FD) müssen daher in einer integrierten Konfigurations-Methodik betrachtet werden.

Applikations-Level

Eine Vielzahl von Software im Fahrzeug übernimmt Regelungsfunktionen. Die Interaktion des Reglers mit der Umwelt geschieht mittels Sensoren und Aktuatoren mit beschränkter Auflösung und Leistung. Dies kann zu Messfehlern und Stellgrößenbeschränkungen führen. In einer Car2X-Umgebung wird dieser Effekt nur noch verstärkt, da Signale von außen kommen und daher schwer einschätzbar sind.

Die Aufteilung des Regler-Algorithmus auf mehrere Steuergeräte oder Cores führt zwangsläufig zu Extrapolationsfehlern, da weder die Steuergeräte noch die Kommunikation synchronisiert sind. Das bedeutet, dass berechnete Signale zu unterschiedlichen lokalen Zeitpunkten für weitere Berechnungen verwendet werden. All diese Effekte werfen schlussendlich die Frage auf, welchen Einfluss die Verteilung des Regler-Algorithmus auf die Stabilität und Robustheit des Reglers hat.

Middleware- und Betriebssystem-Level

Zu den Aufgaben eines Echtzeit-Betriebssystems gehört das Verwalten sämtlicher geteilter Ressourcen. Dazu zählen Speicher, Zugriff auf I/Os, Kommunikation via Bus-Systeme, der Umgang mit externen Stimuli und Interrupts und natürlich das Ausführen der Applikations-Software.

All diese Aufgaben müssen in Echtzeit erfolgen und werden vor allem vom Scheduler durchgeführt. Somit hat die Scheduling-Strategie einen maßgeblichen Einfluss auf die Performance, Stabilität und Verlässlichkeit. Aktuell werden im Embedded-Bereich ausschließlich sogenannte „partitioned multi-core scheduling“-Strategien verwendet. Dabei wird jeder Core von einem eigenen Scheduler betrieben. Dies führt zwar zu einer einfacheren Vorhersage des System-Timings, liefert aber nicht die vollen Vorteile einer Multi-Core-Plattform in Bezug auf Flexibilität. Als Pendant stehen die sogenannten „global multi-core scheduling“-Strategien zur Verfügung. Hierbei werden sämtliche Cores von einem einzigen Scheduler betrieben. Dies erhöht zwar die Flexibilität, führt jedoch zu größeren Herausforderungen im Bezug auf Timing-Vorhersagen.

Functional Safety

Anwendungen in Fahrzeugen sind nicht nur zeit- sondern auch sicherheitskritisch. Eine in der Industrie heiß diskutierte Frage ist die Anwendbarkeit von Multi-Core-Prozessoren für sicherheitskritische Systeme. Die Safety-Norm ISO 26262 stellt diesbezüglich u. a. die Forderung nach Unabhängigkeit („freedom from interference“ – ISO 26262 Part 6). Das bedeutet, dass sicherheitskritische Funktionen nachweislich nicht von unkritischen Funktionen gestört werden dürfen, Speicherstellen entsprechend abgesichert sind, usw. Dies muss vor allem bei der Software-Verteilung und beim Scheduling berücksichtigt werden und ist besonders dann wich- »

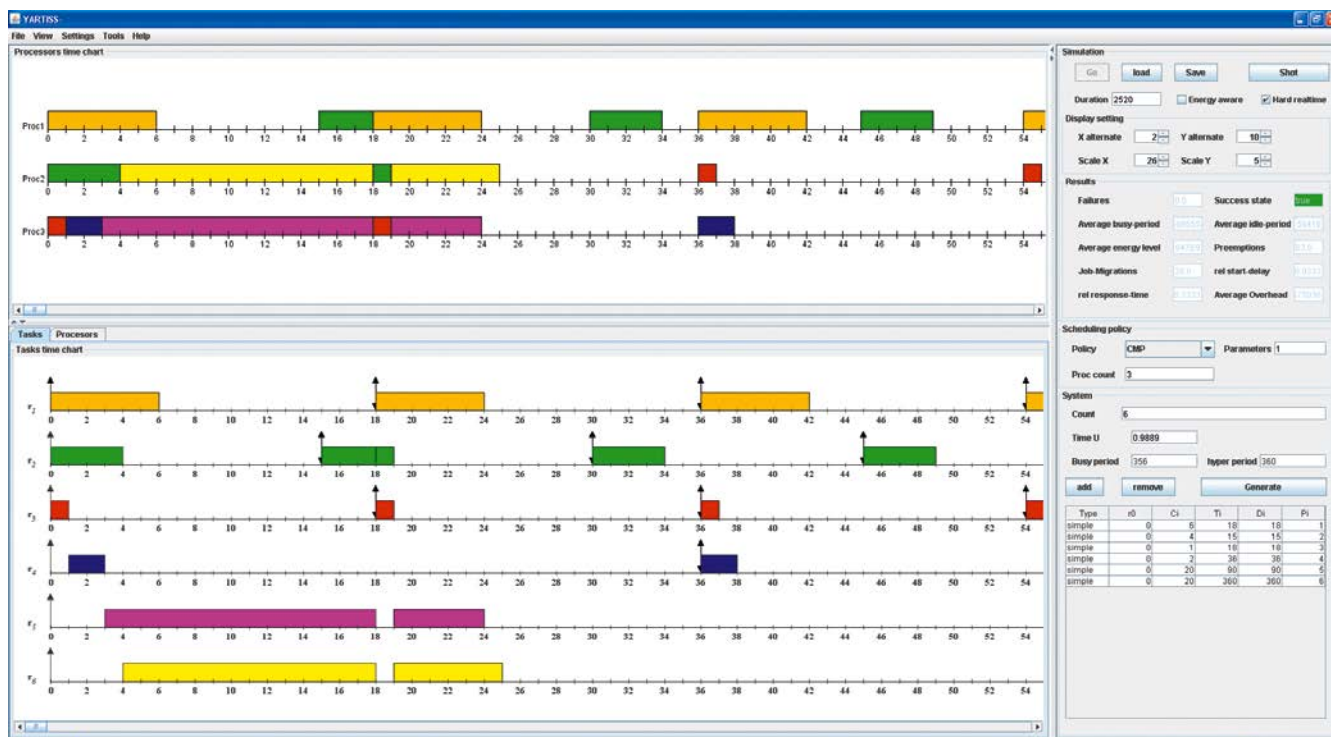


Bild: Virtual Vehicle

Bild 2: Entwurf und Verifikation neuer Multi-Core-Echtzeit-Scheduling-Strategien mittels event-driven Scheduling-Simulator YARTISS. Die Simulation zeigt das zeitliche Verhalten von Echtzeit-Threads mittels Gantt-Charts. Oben: Die lokale und temporale Zuordnung der Threads auf Cores zeigt Thread-Migrationen zwischen Cores. Unten: Scheduling der Threads gemäß deren Prioritäten zeigt Thread-Preemtionen und eventuelle Deadline-Verletzungen.

tig, wenn Funktionen mit unterschiedlicher Kritikalität auf einem Steuergerät integriert werden.

Die Erfüllung des Kriteriums „freedom from interference“ stellt jedoch nicht die einzige Bedingung für Unabhängigkeit dar. Letztlich sind die Cores im selben Chip untergebracht, und daher vom selben Clock getriggert. Außerdem sind sie derselben EMV-Strahlung ausgesetzt, kommunizieren meist mit demselben Speicher, und werden letztendlich von derselben Spannungsleitung versorgt. Das bedeutet, dass für den Nachweis der Software-Unabhängigkeit nicht nur die Software und das Scheduling analysiert werden muss, sondern auch zusätzlich die Architektur-spezifischen Eigenschaften inkludiert werden müssten.

Embedded-Multi-Core-Systeme

Am Virtual Vehicle gibt es einen Forschungsschwerpunkt „Zeit- und sicherheitskritische Systeme“ in dem es auch speziell um die Anforderungen von Multi-Core-Systemen geht. Der folgende Abschnitt beschreibt einige laufende und geplante Forschungsaktivitäten zum Thema Embedded-Multi-Core-Systeme.

Das Virtual Vehicle besitzt bereits Erfahrung mit Software-Verteilung für Single-Core-ECUs. Im K2-Projekt MEMCONS wurde zusammen mit AVL und TenAsys diese Methodik auf Multi-Core-Systeme erweitert. Konkret wurden neben der Parallelisierung von Software auch neue Multi-Core-Scheduling-Strategien entwickelt, welche die Vorteile von „partitioned multi-core scheduling“ und „global multi-core

scheduling“ miteinander vereinen. Hierzu werden u. a. event-driven Scheduling-Simulatoren eingesetzt, welche es ermöglichen, neuartige Scheduling-Strategien zu entwickeln und frühzeitig zu verifizieren (Bild 2).

Um einen Schedule auslegen zu können, ist es notwendig, die Laufzeit der unterschiedlichen Software-Komponenten zu kennen. Neuartige Multi-Core-Architekturen (mit unterschiedlichen Speicher-Architekturen und Cross-Core-Kommunikation) erschweren die Laufzeitmessung zunehmend. Am Virtual Vehicle werden für derartige Systeme neue Ansätze erarbeitet um eine zuverlässige Laufzeitmessung durchführen zu können.

Forschungsprojekte

Im Oktober 2013 haben zwei FP7-EU-Projekte gestartet, in denen die Thematik Multi-Core ein integraler Bestandteil ist. Im EU-Projekt iCOMPOSE, das vom Virtual Vehicle koordiniert wird, wird gemeinsam u. a. mit Lotus, Škoda, Flanders’ Drive, Infineon und AVL ein übergreifendes Energiemanagement für Elektro-Fahrzeuge entwickelt. Als Basis hierfür dient die Multi-Core-Plattform AURIX. Multi-Core-Technologie macht auch die Erprobung neuer IKT-Architekturen möglich. In iCOMPOSE soll dies z. B. eine zentrale Steuereinheit sein, die Daten von verschiedenen Quellen (Sensoren, Car2x,...) sammelt und die Signale als Service allen Funktionen bereitstellt.

Das EU-Projekt eDAS (u. a. mit AVL, Daimler, Infineon, Siemens) fokussiert auf der zuverlässigen Vorhersage der



Reichweite für Elektrofahrzeuge. Hierzu werden unterschiedliche Energiequellen (mechanisch, elektrisch, chemisch) integriert und neue Komponenten entwickelt. Die Regelungsstrategien für das Energiemanagement werden auf einer Multi-Core-Plattform umgesetzt.

Mit EMC² (Infineon, AVL, EADS, Audi Electronics Venture, Volvo, uvm.) wurde 2014 ein weiteres großes EU-Projekt gestartet. In diesem mit knapp 100 Mio. Euro budgetierten Projekt arbeiten über 90 Partner an Methoden und Toolketten zur effizienteren Entwicklung von zeit- und sicherheitskritischen Multi-Core-Systemen. Das Virtual Vehicle entwickelt in diesem Projekt neue Konfigurationsmethoden für Multi-Core-Systeme. Neben Software-Verteilung und Functional Safety werden auch die Integration neuartiger Bus-Systeme (wie CAN-FD) berücksichtigt.

Ein weiteres Forschungsprojekt beschäftigt sich mit dem Problem der Reglerintegration. Wie bereits erwähnt, kann die verteilte, nicht synchronisierte Berechnung auf unterschiedlichen Steuereinheiten oder Cores zu Stabilitätsproblemen führen. Dasselbe gilt für ungenaue oder fehlende Signalwerte. Diese Faktoren sollen bei Stabilitäts- und Robustheitsuntersuchungen schon in einer frühen Phase berücksichtigt werden können. Außerdem soll eine Strategie zur Verteilung der Regelungsfunktionen ohne unzulässige Einschränkung bezüglich Stabilität und Robustheit entwickelt werden.

Fazit

Embedded-Multi-Core-Systeme stellen für die Industrie eine sehr große Herausforderung dar. Software muss auf Parallelität optimiert werden, Mapping und Scheduling muss Echtzeitfähigkeit gewährleisten. Zusätzlich müssen Safety-Anforderungen garantiert werden. Das Virtual Vehicle und seine Partner nehmen diese Herausforderungen an und setzen auf den Aufbau von Kompetenzen, um Embedded-Multi-Core Technologie bald weitflächig einzusetzen. ■ (oe)

» v2c2.at



.....
Dr. Andrea Leitner ist Senior Researcher im Bereich Software-Variability und Functional Safety am Virtual Vehicle in Graz.



.....
Dr. Florian Pölzlbauer ist Senior Researcher im Bereich Real-Time Multi-Core Systems am Virtual Vehicle in Graz.