



Digital vernetzte Regelungssysteme

Lars Grüne, Universität Bayreuth,
Lothar Litz, TU Kaiserslautern,
Jan Lunze, Ruhr-Universität Bochum

Die Beiträge dieses Heftes berichten über Ergebnisse, die im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Regelungstheorie digital vernetzter dynamischer Systeme“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden sind. Dieses Schwerpunktprogramm beschäftigt sich mit neuartigen Fragestellungen der Modellierung, der Analyse und des Entwurfs von Regelungen, die aus der Möglichkeit resultieren, Informationskopplungen innerhalb eines Regelkreises und zwischen unterschiedlichen Regelkreisen flexibel den Erfordernissen anzupassen. Mit digitalen Datennetzen können zeitveränderliche, auf die aktuellen Aufgaben zugeschnittene Regelkreisstrukturen aufgebaut werden. Andererseits ist die Qualität der Kommunikation von der Netzbelastung und bei Funknetzen auch von technischen Randbedingungen abhängig, die zu Datenausfällen oder erheblichen Zeitverzögerungen in der Datenübertragung führen können, sodass das Datennetz das Verhalten der Regelungen wesentlich mitbestimmt. Die neuen Realisierungsmöglichkeiten für die Regelung eröffnen neuartige Einsatzgebiete, in denen beispielsweise mobile Objekte über Funknetze koordiniert oder gesteuert werden oder Regelungsaufgaben über Netzwerke realisiert werden, die nicht vordergründig für Echtzeitanwendungen ausgelegt sind.

Damit gewinnt der Wert, den Informationen für die Lösung einer Regelungsaufgabe haben, eine zusätzliche Bedeutung und wird zum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Während die Regelungstheorie bisher davon ausgegangen ist, dass jede für die Lösung einer Regelungsaufgabe notwendige Informationsverbindung mit der erforderlichen Qualität und Zuverlässigkeit hergestellt werden kann, muss sich die Regelungstheorie digital vernetzter Systeme der Frage zuwenden, welchen Wert eine Information für die Lösung einer Regelungsaufgabe hat, um anhand dieser Bewertung zu entscheiden, unter welchen Bedingungen und mit welcher Qualität Datenverbindungen im Regelkreis und zwischen unterschiedlichen Regelkreisen aufgebaut werden müssen bzw. können. Auch ist zu entscheiden, ob für die Erfüllung von Gütevorgaben Daten mit größtmöglicher Präzision übertragen werden müssen oder ob dafür Informationen mit

beschränkter Genauigkeit und folglich begrenzter Übertragungsbreite ausreichend sind.

Dieses Schwerpunktheft widmet sich wichtigen Teilaspekten dieser Frage. Mit der **ereignisbasierten Regelung** wird eine neue Methode zur Reduktion des Informationsflusses in der Rückkopplung von Regelkreisen vorgeschlagen. Während eine digitale Regelung zu den von einem Takt vorgegebenen Zeitpunkten eine Informationsrückkopplung im Regelkreis vornimmt, passt die ereignisbasierte Regelung den Informationsaustausch dem aktuellen Systemzustand an. Informationen werden nur dann vom Sensor über den Regler zum Aktor gesendet, wenn ein Ereignisgenerator erkennt, dass diese Informationskopplung für die Gewährleistung der geforderten Regelgüte notwendig ist. Der Beitrag von GRÜNE u. a. *Two complementary approaches to event-based control* beschreibt zwei neue Methoden der ereignisbasierten Regelung und demonstriert deren Wirkungsweise anhand von Experimenten.

Bei der Betrachtung mobiler Agenten, deren Regelung ohne einen Koordinator auskommen muss und bei der die Teilregler ihre Aktivitäten unter Nutzung einer geeignet gewählten Kommunikationsstruktur untereinander abstimmen müssen, hat sich in den letzten Jahren das **Konsensusproblem** als zentrales wissenschaftliches Problem herauskristallisiert. Gesucht sind Algorithmen, mit denen die Agenten schrittweise einen gemeinsamen „Durchschnittszustand“ berechnen. Dieses Problem tritt beispielsweise auf, wenn in einem verteilten physikalischen System mit mehreren Sensoren eine mittlere Temperatur bestimmt werden soll oder wenn sich mobile Agenten an einem gemeinsamen Ort treffen sollen, ohne dass Vorgaben durch einen Koordinator gemacht werden. Der Beitrag von MÜNZ, PAPACHRISTODOULOU und ALLGÖWER *Robust rendezvous of heterogeneous Euler-Lagrange systems on packet-switched networks* untersucht den Einfluss von Zeitverzögerungen im Kommunikationsnetz auf die Regelung von Agenten, wobei die Teilregler nur lokale Informationen nutzen und dabei insbesondere nur von der Dynamik der „eigenen“ Agenten abhängen.



Der Entwurf digital vernetzter Regelungen führt zum interdisziplinären Vorgehen von Regelungstechnik und Kommunikationstechnik, wenn man den Regelalgorithmus nicht an die Charakteristika einer gegebenen Informationsverbindung anpasst, sondern die Freiheitsgrade von Regelalgorithmus und Informationsverbindung gemeinsam zum Wohle des Ganzen vergibt. Dies geschieht im Beitrag von CHAMAKEN und LITZ *Joint design of control and communication in wireless networked control systems*. Die neue Herangehensweise basiert auf gemeinsamer Modellierung und **gemeinsamem Entwurf von Regelung und Kommunikation** für funkbasierte Regelungssysteme. Die theoretischen Ergebnisse werden am invertierten Pendel mit energiearmen Funkknoten experimentell untermauert.

Die weiteren drei Beiträge behandeln als Anwendungsfall digital vernetzter Regelungen die Steuerung von Fahrzeugkolonnen auf Autobahnen oder Schienen, untersuchen in diesem Zusammenhang jedoch sehr unterschiedliche methodische Fragestellungen.

Die **prädiktive Regelung** erhält für digital vernetzte Systeme ein neues Anwendungsfeld, weil hier zur Ermittlung des optimalen nächsten Stelleingriffs in jedem Abtastschritt eine Prädiktion des zukünftigen Verhaltens berechnet und übertragen wird. Bei dezentraler Optimierung in den Teilsystemen kann diese ohne zusätzlichen Rechenaufwand zur Verfügung stehende Information so über das Netzwerk den anderen Teilsystemen zur Verfügung gestellt werden. DOLD und STURSBURG zeigen in ihrem Beitrag *Robuste modellprädiktive Regelung kommunizierender Fahrzeugkolonnen* für eine dezentrale Methode der prädiktiven Regelung für gekoppelte Teilsysteme, welche Güteverbesserung durch diese Art der Kommunikation erreicht werden kann.

Digitale funkbasierte Kommunikationsnetze erweitern den Einsatzbereich der Automatisierungstechnik. Adhoc-Netze bieten die Möglichkeit, Informationen zwischen sich bewegenden Objekten zu übertragen und die Informationsverbindung immer dann aufzubauen, wenn eine Annäherung der Objekte untereinander eine **Kooperation der Teilsysteme** und folglich eine Koordination ihrer Regelungen erfordert. Im Beitrag von DEMIR und LUNZE *Autonomie und Kooperation in seriell gekoppelten Systemen* wird die Fahrzeugkolonne als ein Beispiel für gekoppelte Systeme betrachtet, deren Regelungen immer dann Informationen austauschen sollen, wenn dies für eine Verbesserung der Störkompensation zweckmäßig ist. Im Mittelpunkt dieses Beitrages steht die Frage, in welchen Situationen die Teilsysteme Informationen über ihren aktuellen Zustand und gegebenenfalls über die auf sie wirkende Störung an andere Teilsysteme übermitteln sollen, damit dort die Störkompensation verbessert werden kann.

Mit der Verfügbarkeit flexibler Informationsverbindungen ist in der internationalen Literatur das Thema der **verteilten Regelung** (*distributed control*) wieder in den Mittelpunkt des Interesses gerückt. Im Unterschied zu den früher intensiv betrachteten dezentralen Regelungen stehen die Regler der Teilsysteme in einem Informationsaustausch. Die Frage, welche Informationen dabei auszutauschen sind, ist während des Reglerentwurfs zu klären. CHAVEZ GRÜNEWALD u. a. schlagen in ihrem Beitrag *Regelung und Sicherheitsanalyse einer Gruppe Massenpunktfahrzeuge mit Hilfe energiebasierter Methoden* eine neue Methode für den Entwurf der Kolonnenregelung vor, die von einer Betrachtung der Energie der sich bewegenden Teilsysteme ausgeht, dabei eine verallgemeinerte Energiefunktion einführt und das Reglergesetz durch Minimierung dieser Funktion erzeugt.

Die Beiträge dieses Schwerpunktheftes zeigen in beeindruckender Weise, wie die ursprünglich mit kontinuierlichen Systemen gewachsene Regelungstheorie ausgeweitet werden kann, sodass sie die digitalen Datennetze mit ihrem stets ereignisdiskreten Charakter als Teil der Regelstrecke integriert.



Prof. Dr. Lars Grüne ist Leiter des Lehrstuhls für Angewandte Mathematik an der Universität Bayreuth. Seine Forschungsinteressen liegen in der Mathematischen Kontroll- und Systemtheorie, speziell im Bereich numerischer und optimierungsbasierter Methoden für nichtlineare Systeme.

Adresse: Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, 95440 Bayreuth, Fax: +49-(0)921-55 5361,
E-Mail: lars.gruene@uni-bayreuth.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Litz ist Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Vizepräsident der Technischen Universität Kaiserslautern. Hauptarbeitsgebiete: Digital vernetzte Regelungssysteme, Entwurf und Analyse ereignisdiskreter Systeme, sicherheitsorientierte Automatisierung, Ambient Assisted Living.

Adresse: Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, TU Kaiserslautern, D-67653 Kaiserslautern,
E-Mail: Litz@eit.uni-kl.de



Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze ist Leiter des Lehrstuhls für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik der Ruhr-Universität Bochum und Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms „Regelungstheorie digital vernetzter dynamischer Systeme.“

Adresse: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, D-44780 Bochum, Fax: +49-(0)234-32 14101,
E-Mail: Lunze@atp.rub.de