

**Jun.-Prof. Dr. Stephan Trenn** studierte Mathematik (Diplom 2004) und Informatik (Diplom 2006) an der Technischen Universität Ilmenau. Dort promovierte er bei Achim Ilchmann zum Thema **differential-algebraischer Gleichungen mit distributionellen Lösungen** und schloss die Promotion im Jahr 2009 mit dem Prädikat *summa cum laude* ab. Nach einem einjährigen Forschungsaufenthalt bei Daniel Liberzon (University of Illinois, Urbana-Champaign, USA), war Herr Trenn von 2010 bis 2011 als Postdoc bei Fabian Wirth (Universität Würzburg). Diese Stelle wurde durch das DFG-Projekt „Zeitvariante und geschaltete differential-algebraische Gleichungen“ finanziert, welche Herr Trenn maßgeblich mitbeantragt hatte. Seit 2011 ist er Juniorprofessor für System- und Kontrolltheorie an der Technischen Universität Kaiserslautern; dort ist er auch eingebunden in die Forschungsaktivitäten des Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik.

Der aktuelle Forschungsschwerpunkt von Herrn Trenn lässt sich an einem einfachen elektrischen Schaltkreis bestehend aus einer Spannungsquelle, einer Spule und einem Schalter, siehe Abbildung 1(a), motivieren. Solange der Schalter geschlossen ist, wächst der Strom durch die Spule gemäß Induktionsgesetz linear und ein Öffnen des (ideellen) Schalters erzwingt einen sofortigen Sprung des Stroms auf Null, siehe Abbildung 1(b). Das Induktionsgesetz gilt auch während des Schaltvorgangs, d.h. der Spannungsabfall über der Spule, der proportional zur Ableitung des Stromes durch die Spule ist, muss die Ableitung eines Sprunges enthalten. Dies ist mathematisch nur möglich, wenn man beim Lösungsbegriff zu Distributionen (verallgemeinerten Funktionen) übergeht; die Spannung springt zum Schaltpunkt also nicht nur, sondern enthält auch noch den Dirac-Impuls, siehe Abbildung 1(c). Physikalisch lässt sich ein Dirac-Impuls in der Spannung als Spannungsblick interpretieren. Dies ist nicht nur ein mathematisches Artefakt, sondern das Phänomen wird bereits im Physikschulunterricht mit Hilfe des Funkeninduktors illustriert (Abbildung 2) und findet bis heute Anwendung z.B. in Zündkerzen.



Aus dem obigen Beispiel kann man zunächst folgende **Schlussfolgerungen** ziehen:

- Selbst einfachste elektrische Schaltkreise haben keine klassischen Lösungen.
- Sprünge und Dirac-Impulse ergeben sich vollständig aus den Eigenschaften der (ideellen) Bauelemente, keine weiteren Argumente oder physikalischen Prinzipien (z.B. Energieminimierung) wurden genutzt.
- Neben den Differentialgleichungen spielen die algebraischen Bedingungen (im Beispiel: Strom gleich Null, wenn Schalter geöffnet) eine entscheidende Rolle.

Das Zusammenspiel von differential-algebraischen Gleichungen (DAEs) und Schaltvorgängen führt zu Modellen, die durch **geschaltete DAEs (switched DAEs)** beschrieben werden können. Obwohl das obige Beispiel zeigt, dass diese Beschreibung seit Langem relevante phy-

sikalische Erscheinungen modelliert, wurden geschaltete DAEs bis vor kurzen mathematisch nicht untersucht. Herr Trenn hat in den letzten Jahren dieses Feld in den Fokus der Systemtheorie gerückt und hat mit seinen Arbeiten einen wesentlichen Beitrag zum mathematischen Verständnis von geschalteten DAEs geleistet [1].

Der wesentliche Durchbruch bei der Behandlung von geschalteten DAEs war die Einführung der **stückweisen glatten Distributionen** als Lösungsraum in der Dissertation von Herrn Trenn [2].

Die Einführung eines geeigneten Unterraums der Distributionen ist notwendig, denn um geschaltete DAEs zu behandeln, muss entweder eine Einschränkung von Distributionen auf Intervalle oder eine Multiplikation von Distributionen mit stückweise glatten Funktionen definiert sein. Man kann zeigen, dass beides für allgemeine Distributionen unmöglich ist.

Eine große mathematische Herausforderung ist die Untersuchung von **nichtlinearen geschalteten DAEs**, denn die Anwendung von beliebigen Funktionen auf Distributionen ist nicht definiert (was ist z.B. der Sinus vom Dirac-Impuls?). Eine wichtige Anwendung für

nichtlineare geschaltete DAEs ist die Modellierung und Stabilisierung des Energienetzwerkes. Die nichtlinearen Energieflussgleichungen zusammen mit den Generatorodynamiken führen zu einer nichtlinearen DAE und Ausfälle oder Vom-Netz-Nehmen von Generatoren führen zu Schaltvorgängen. Um Effekte dieser Schaltvorgänge zu berücksichtigen ist es notwendig das Energienetz als geschaltete nichtlineare DAE zu modellieren. Erste Stabilitätsuntersuchungen für nichtlineare geschaltete DAEs hat Herr Trenn bereits durchgeführt [3], allerdings steht eine allgemeine distributionelle Lösungstheorie noch aus.

Ein weiteres Forschungsgebiet von Herrn Trenn ist die nichtlineare Regelungstheorie, insbesondere der sogenannte **Funnel-Controller**. Der Funnel-Controller wird für die Trajektorienfolgeregelung genutzt, ohne dass das zu regelnde System genauer bekannt ist. Die wesentliche Annahme ist die Kenntnis des Relativgrades (in den

früheren Arbeiten die Relativgrad-Eins-Annahme). Die Idee des Funnel-Controllers ist sehr anschaulich: Zunächst gibt der Anwender einen zulässigen (zeitvarianten) Fehlerbereich vor (den Funnel, siehe Abbildung 3(a)) und wann immer der Fehler (zwischen tatsächlichen Systemausgang und gewünschten Ausgang) dem Funnelrand zu nahe kommt, wird die Fehlerrückführung verstärkt. In der Praxis hat man vorgegebene Stellgrößenbeschränkungen oder sogar nur zwei mögliche Werte (An und Aus, Bang-Bang-Regelung) und der Regler reduziert sich dann zu einer Schaltlogik, siehe Abbildung 3(b). Herr Trenn konnte zeigen, unter welchen Voraussetzungen ein solcher **Bang-Bang-Funnel-Controller** funktioniert, sogar für beliebig hohen Relativgrad [4]. Hervorzuheben ist hier, dass die konstruierte Schaltlogik nur vom Relativgrad des Systems abhängt, weitere Kenntnisse vom System werden für den Entwurf nicht benötigt.

Seit 2011 ist Herr Trenn **Associative Editor** bei der Zeitschrift „Systems & Control Letters“; er ist im **Editorial Board** der Springer-Buchserie „Differential-Algebraic Equations Forum“. In der **GAMM** ist Herr Trenn seit 2006 durch Teilnahme an den Jahrestagungen aktiv, insbesondere war er Sektionsleiter (2012) und Minisymposiorganisor (2012, 2013, 2015); weiterhin ist er regelmäßiger Teilnehmer der halbjährigen Workshops des GAMM-Fachausschusses „Dynamik und Regelung“, und Herr Trenn hat ein solches Treffen 2013 in Kaiserslautern ausgerichtet.

## Literatur

- [1] S. Trenn. "Switched differential algebraic equations". In: *Dynamics and Control of Switched Electronic Systems - Advanced Perspectives for Modeling, Simulation and Control of Power Converters*. Hrsg. von F. Vasca und L. Iannelli. London: Springer-Verlag, 2012. Kap. 6, S. 189–216.
- [2] S. Trenn. "Distributional differential algebraic equations". Diss. Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau, Germany: Institut für Mathematik, Technische Universität Ilmenau, 2009. URL: <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=13581>.
- [3] D. Liberzon und S. Trenn. "Switched nonlinear differential algebraic equations: Solution theory, Lyapunov functions, and stability". In: *Automatica* 48.5 (2012), S. 954–963.
- [4] D. Liberzon und S. Trenn. "The bang-bang funnel controller for uncertain nonlinear systems with arbitrary relative degree". In: *IEEE Trans. Autom. Control* 58.12 (2013), S. 3126–3141.

## Kontakt

Jun.-Prof. Dr. Stephan Trenn  
 AG Technomathematik, Fachbereich Mathematik  
 Technische Universität Kaiserslautern  
 Email: [trenn@mathematik.uni-kl.de](mailto:trenn@mathematik.uni-kl.de)  
 Webseite: [research.stephantrenn.de](http://research.stephantrenn.de)

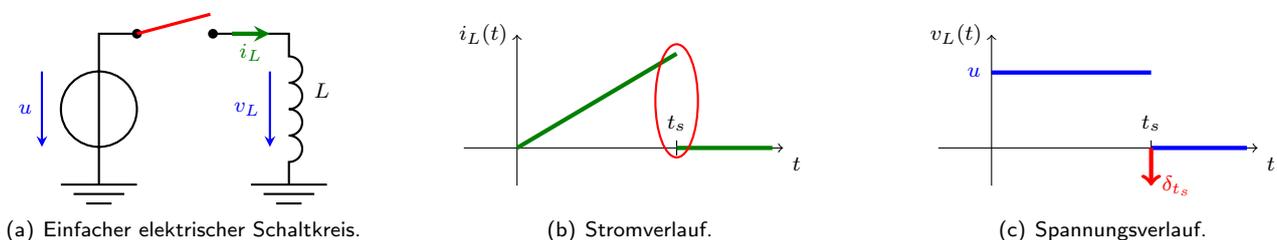


Abbildung 1: Beispiel für impulsives Verhalten in elektrischen Schaltkreisen

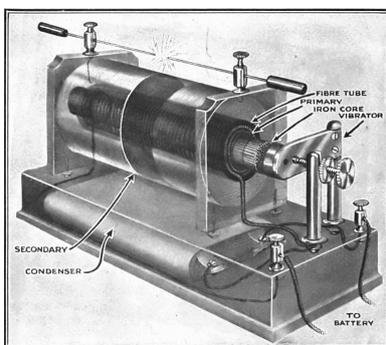


Abbildung 2: Historischer Funkeninduktor, Quelle: Wikimedia Commons

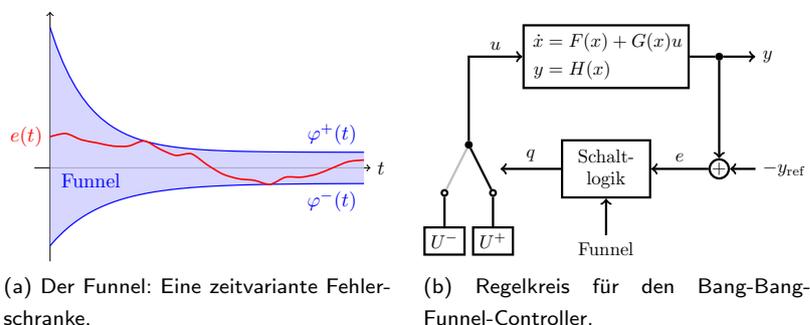


Abbildung 3: Der Bang-Bang-Funnel-Controller.