



## Liebe Leserinnen, liebe Leser,

wir freuen uns, Ihnen nach einer längeren, Corona-bedingten Pause eine neue Ausgabe des Forschungsmagazins ‚Blick in die Wissenschaft‘ in der Ausgabe 44/45 präsentieren zu können.

Die Corona-Pandemie hat auch die Universität Regensburg und alle ihre Mitglieder vor große Herausforderungen gestellt. Dennoch konnten zentrale Zukunftsprojekte weitergeführt und umgesetzt werden. So stellt vor allem die Gründung unserer neuen Fakultät für Informatik und Data Science (FIDS) einen wahren Meilenstein in der Geschichte und Entwicklung der Universität Regensburg dar. Als größtes Strukturprojekt seit der Gründung der Fakultät für Medizin vor 30 Jahren ist unsere Informatikfakultät ein Zukunftsprojekt von weitreichenden Dimensionen. Mit der neuen strategischen Schwerpunktsetzung im Bereich Informatik und Data Science und vor allem auch der Querschnittsorientierung der neuen Fakultät sieht sich die Universität Regensburg sehr gut gerüstet, ihre bisherigen Stärken in diesen Bereichen zu bündeln, weiter auszubauen und zu

vertiefen. Schließlich sind *Digital Transformations* als eines der vier Gestaltungsfelder und Zukunftsthemen in unserem *Hochschulentwicklungsplan 2025* fest verankert. Dieses Gestaltungsfeld adressiert die neue Fakultät ebenso wie den Bereich *Integrated Sciences in Life, Health, and Disease* als ein weiteres Schwerpunktgebiet unserer Universität.

Die Grundsatzbeschlüsse in den Gremien der Universität Regensburg im Sommer und Herbst 2019 zur Einrichtung der neuen Fakultät erfolgten nach einer vorhergehenden Phase intensiver Planungen dann letztlich fast zeitgleich mit der Regierungserklärung des Bayerischen Ministerpräsidenten Dr. Markus Söder am 10. Oktober 2019 und der Verkündung der Hightech Agenda Bayern. Unterstützt und beschleunigt durch die Mittel der Hightech Agenda Bayern konnte der Auf- und Ausbau der Fakultät für Informatik und Data Science zügiger umgesetzt werden, nachdem die neue Fakultät im März 2020 formal gegründet und im Laufe des WS 2021/22 aus sich heraus handlungs- und

funktionsfähig wurde. Im Mai 2022 konnten wir gemeinsam mit Ministerpräsident Dr. Markus Söder und Staatsminister für Wissenschaft und Kunst Markus Blume den offiziellen Kickoff für die Fakultät begehen. Dass dieser komplexe Prozess im Kontext der Herausforderungen der Corona-Pandemie vollzogen und abgeschlossen werden konnte, ist ein Zeichen für die Bedeutung dieser gesamtuniversitär-strategischen Maßnahme und für den Rückhalt für das Großprojekt in der universitären Gemeinschaft.

Im Laufe des Gründungsprozesses ist es gelungen, die verschiedenen Informatiknahen und -interessierten Kräfte der Universität an einen Tisch zu bringen und gemeinsam ein zukunftsorientiertes Konzept für die Fakultät zu entwickeln. Ein externes Gutachten mit hochrangiger Expertise skizzierte und evaluierte 2019 wesentliche inhaltliche Schwerpunkte und Strukturierungen für die neue Fakultät, an denen sich in den Jahren 2019-2021 die von Vizepräsident Prof. Dr. Nikolaus Korber geleitete Gründungskommission in der

konkreten Arbeit zum Aufbau der Fakultät orientierte. In insgesamt 15 Berufungsverfahren wurden die ersten neuen Professuren in der Fakultät zügig besetzt – ein Prozess, der in Kürze abgeschlossen sein wird. Im Besetzungsprozess hat sich vor allem auch gezeigt, wie attraktiv die Neugründung einer Fakultät und die Möglichkeiten zur Mitgestaltung und zum Aufbau neuer Strukturen für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind und wie viel Zukunftspotential von unserer neuen Fakultät ausgeht. So konnten wir zum Wintersemester 2023/24 130 Studierende für den B.Sc. Informatik und den B.Sc. Data Science begrüßen.

Im vorliegenden Heft von ‚Blick in die Wissenschaft‘ möchten wir Ihnen nunmehr vor allem die Forschungsaktivitäten der Fakultät für Informatik und Data Science näher vorstellen. Dabei beglückwünsche ich die Fakultät, dass sie bereits eineinhalb Jahre nach ihrer vollständigen Handlungs- und Funktionsfähigkeit und während der weiteren Planungen zum Aufbau und der Ausarbeitung ihrer Studiengänge insbe-

sondere im Master-Bereich ein so vielfältiges Themenheft zu ihren aktuellen Forschungsarbeiten vorlegen konnte.

Das facettenreiche und vielfältige Themenspektrum dieses Sonderhefts illustriert, wie die Fakultät für Informatik und Data Science die an der Universität Regensburg bisher vorhandenen IT-Kompetenzen erfolgreich bündelt und in die Zukunft gerichtet erweitert. Sie ermöglicht die essentielle interdisziplinäre Vernetzung mit der gesamten Universität, von den Geistes- und Sozialwissenschaften bis zu den Natur- und Lebenswissenschaften. Die Beiträge verdeutlichen, wie interdisziplinäre Forschung das Fundament starker methodischer und fachlicher Grundlagen weiterentwickelt und wie die bisherigen Informatik-Schwerpunkte der Universität Regensburg (Computational Science, Informationswissenschaft, Medieninformatik, Wirtschaftsinformatik) erfolgreich in die neue Fakultät überführt werden konnten und die Querschnittsorientierung unterstützen.

Das vorliegende Heft mit seinem Schwerpunkt auf aktuellen Forschungsar-

beiten begleitet den im Wintersemester 2023/24 erfolgten Start der beiden grundständigen Bachelor-Studiengänge Informatik und Data Science. Ein kurzer Überblicksbeitrag zur Lehre in der neuen Fakultät zeigt anschaulich die bereits gewachsene Vielfalt der Informatikstudiengänge und die intensive und gelebte Verbindung von Forschung und Lehre auch an dieser neuen Fakultät.

Unsere neue Fakultät leistet hervorragende Arbeit und ich bin sicher, dass Ihnen die nachfolgenden Seiten einen spannenden Einblick in die verschiedenen Facetten der FIDS geben werden. Ein ganz besonderes Dankeschön möchte ich an dieser Stelle an das gesamte Dekanat der Fakultät für Informatik und Data Science und insbesondere an Forschungsdekanin Prof. in Dr. Meike Klettke richten, die für diese Sonderausgabe die Koordinationsarbeit der vorliegenden Ausgabe federführend übernommen hat.

Prof. Dr. Udo Hebel  
Präsident der Universität Regensburg

**Blick in die Wissenschaft  
Forschungsmagazin  
der Universität Regensburg**

ISSN 0942-928-X  
Heft 44/45  
31. Jahrgang

**Herausgeber**

Prof. Dr. Udo Hebel  
Präsident der Universität Regensburg

**Redaktionsleitung für diese Ausgabe**

Prof.in Dr. Meike Klettke / Fakultät für Informatik und Data Science

**Redaktionsbeirat**

Prof. Dr. jur. Christoph Althammer  
Prof. Dr. rer. nat. Ferdinand Evers  
Prof. Dr. rer. nat. Stefan Friedl  
Prof. Dr. rer. nat. Mark W. Greenlee  
Prof. Dr. theol. Andreas Merkt  
Prof. Dr. phil. Omar W. Nasim  
Prof. Dr. rer. nat. Klaus Richter  
Prof. Dr. rer. pol. Daniel Rösch  
Prof. Dr. med. Ernst Tamm  
Prof. Dr. paed. Oliver Tepner  
Prof. Dr. phil. Christiane Heibach

Universität Regensburg  
93040 Regensburg  
Telefon +49 941 9432300  
Telefax +49 941 9433310

**Verlag**

Universitätsverlag Regensburg GmbH  
Leibnizstraße 13, 93055 Regensburg

Telefon +49 941 78785-0  
Telefax +49 941 78785-16

info@univerlag-regensburg.de  
www.univerlag-regensburg.de  
Geschäftsführer: Dr. Albrecht Weiland,  
Felix Weiland M.A.

**Abonnement-service**

bestellung@univerlag-regensburg.de

**Anzeigenleitung**

Larissa Nevecny  
MME-Marquardt  
info@mme-marquardt.de

**Herstellung**

Universitätsverlag Regensburg GmbH  
info@univerlag-regensburg.de

**Einzelpreis € 7,00  
Doppelheft € 14,00**

**Jahresabonnement**

bei zwei Ausgaben pro Jahr

**€ 10,00 / ermäßigt € 9,00**

Für Schüler, Studierende und Akademiker/innen im Vorbereitungsdienst (inkl. 7% MwSt.) zzgl. Versandkostenpauschale € 1,64 je Ausgabe. Bestellung beim Verlag. Für **Mitglieder des Vereins der Ehemaligen Studierenden der Universität Regensburg e.V.**, des **Vereins der Freunde der Universität Regensburg e.V.** und des **Vereins ehemaliger Zahnmedizinstudenten Regensburg e.V.** ist der Bezug des Forschungsmagazins im Mitgliedsbeitrag enthalten.

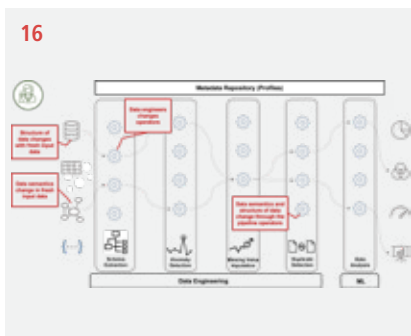
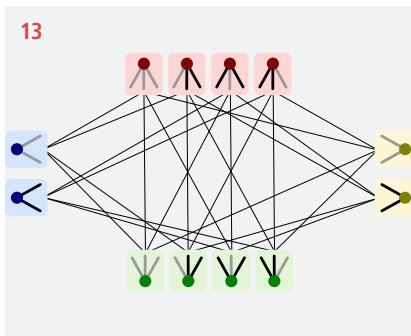
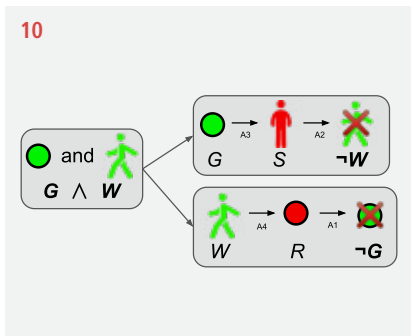
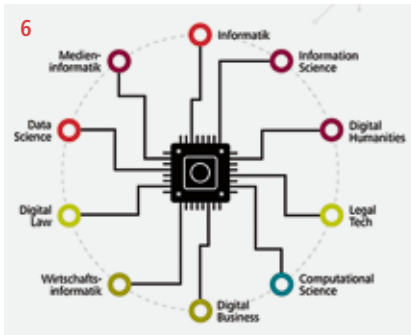


Rohstoffe  
Transporte  
Produktion

g CO<sub>2</sub>e  
492  
Pro Produkt

CO<sub>2</sub>-Emissionen  
ausgeglichene

# Inhalt



**Einleitung** 5  
*Florian Erhard, Bernd Heinrich, Meike Klettke, Christian Wolff*

**Lehre an der Fakultät für Informatik und Data Science** 6  
*Florian Erhard, Udo Kruschwitz, Bernd Heinrich, Christian Wolff*

**Automatisches Beweisen: Methoden und Anwendungen** 10  
*Julie Cailler, Philipp Rümmer*

**Algorithmen und Komplexitätstheorie** 13  
*Radu Curticapean*

**Evolution in Datenbanken und Data Engineering Workflows** 16  
*Meike Klettke*

**IoT-basiertes Prozessmanagement – Mobile Benutzerführung in der digitalen Fabrik** 19  
*Stefan Schönig*

**Cyber Threat Intelligence: Gemeinschaftliche IT-Sicherheit durch den Austausch von Informationen** 23  
*Johannes Grill, Daniel Schlette, Günther Pernul*

**Kann man den Entscheidungen Künstlicher Intelligenz trauen? Zu den Auswirkungen unsicherer Daten auf die Entscheidungen Neuronaler Netze** 26  
*Thomas Krapf, Bernd Heinrich*

**Mensch vs. Maschine: Wettbewerb und Kooperation mit künstlicher Intelligenz in digitalen Märkten** 30  
*Andreas Schauer, Daniel Schnurr*

**Notfallpläne für den Ernstfall testen** 34  
*Maria Leitner*

**Maschinelles Lernen mit Anwendungen in den Naturwissenschaften** 37  
*Merle Behr, Markus Schmitt*

Automatisierte, KI-basierte Analyse von Bilddaten:

Der Lehrstuhl für Bildverarbeitung

Dorit Merhoff

40

Die Genome des Menschen – Forschungsschwerpunkte der Arbeitsgruppe für Algorithmische Bioinformatik

Birte Kehr

43

Algorithmen zum Entschlüsseln der Genregulation

Francisca Rojas Ringeling, Stefan Canzar

46

Mit Hilfe von Daten Immunprozesse entschlüsseln:

Der Lehrstuhl Computational Immunology

Florian Erhard

49

Maschinelles Lernen enthüllt den verborgenen Prozess der Tumorentstehung

Linda Hu, Andreas Lösch, Rainer Spang

52

Allgegenwärtige Mensch-Maschine-Interaktion: Entwicklung, Forschung und Infrastruktur der Medieninformatik

Raphael Wimmer, Johanna Bogon, Niels Henze, Christian Wolff

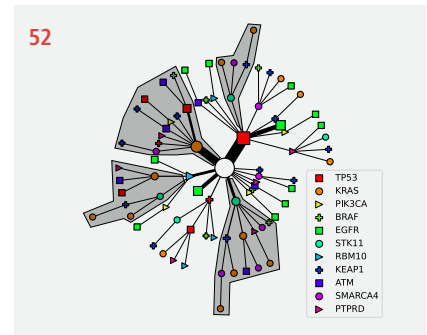
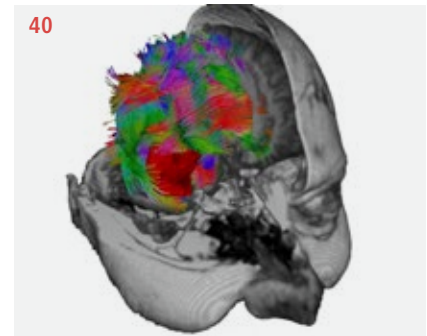
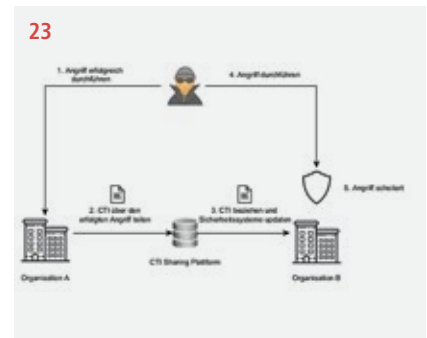
54

Wissen aus dem Internet – Genug, genau, geprüft und geeignet?

Informationswissenschaft in Regensburg

Udo Kruschwitz, Bernd Ludwig, David Elsweiler

60



## SOFTWAREENTWICKLER (M/W/D) GESUCHT

Voll- oder Teilzeit (30 -40 Std.) | Alle Fachbereiche

Hallo, **wir sind mb Support.**

Seit 20 Jahren unterstützen wir die Versicherungswirtschaft mit unseren Lösungen, u.a. Konzerte und Kunstwerke weltweit zu versichern. Als inhabergeführtes **Familienunternehmen** arbeiten wir auf Augenhöhe in einer familiären Atmosphäre. Als stark wachsendes und profitables Unternehmen bieten wir gleichzeitig **attraktive Benefits**.

**Wer bist du?** Jedes unserer rund 60 Teammitglieder bringt seine eigene Persönlichkeit, Geschichte und Perspektive mit. Für uns zählt, was dich interessiert, was dich antreibt, wie du bist. Du entscheidest, wie du bei uns mitgestalten möchtest. **Wir freuen uns auf dich.**

Die gesamte Stellenausschreibung findest du auf [www.mbsupport.de/karriere](http://www.mbsupport.de/karriere).

[www.mbsupport.de](http://www.mbsupport.de) | Friedenstraße 18 | 93053 Regensburg | +49 941 942 60 0 | mb Support GmbH

# Automatisches Beweisen: Methoden und Anwendungen

Julie Cailler, Prof. Dr. Philipp Rümmer

## Einleitung

Mit der zunehmenden Verbreitung und Komplexität von Computersystemen ist Zuverlässigkeit zu einem wichtigen Thema geworden. Dies gilt insbesondere für Computersysteme, die sicherheitskritische Funktionen implementieren, z. B. Systeme, die in Fahrzeuge oder Flugzeuge eingebettet sind. *Formale Methoden* bieten eine Möglichkeit, Vertrauen in solche Systeme zu schaffen. Insbesondere die *Programmverifikation* ermöglicht es uns, die Abwesenheit von Fehlern in einem System oder seinen Komponenten nachzuweisen: mit stringenten logischen und mathematischen Methoden wird ein Beweis für die Korrektheit eines Systems erbracht, der bestätigt, dass das System genau so funktioniert wie beabsichtigt und keine Abweichungen aufweist.

Formale Methoden stützen sich auf Techniken für computergestütztes Ableiten logischer Formeln, ein Bereich der Informatik, der sich in den letzten Jahren rasch weiterentwickelt hat. Logisches Denken wird alltäglich von Menschen verwendet, z. B. wenn sie argumentieren oder schlussfolgern. Logisches Schließen kann aber auch von Maschinen ausgeführt werden und ermöglicht formale Schlussfolgerungen über Probleme, die viel zu komplex sind, um von Menschen allein bewältigt zu werden. Um ein System formal zu verifizieren, werden sowohl das System selbst als auch die gewünschten Eigenschaften des Systems (automatisch) in logische Formeln übersetzt, die dann von Theorembeweisern verarbeitet werden können, um das korrekte Verhalten des Systems nachzuweisen oder zu falsifizieren. Um dies zu erreichen, werden zwei Hauptansätze verwendet: *Interaktives Beweisen* und *Automatisches Beweisen*.

*Interaktive Beweiser* funktionieren wie Assistenten, die einen menschlichen Benutzer bei der Beweisführung unterstützen und gleichzeitig sicherstellen, dass die konstruierte Ableitung nicht fehlerhaft ist. Interaktive Beweiser werden insbesondere in der Mathematik eingesetzt, um Beweise von Sätzen zu formalisieren und zu überprüfen; derartige Beweiser werden aber auch in der Verifikation genutzt, um Komponenten in Systemen zu überprüfen, die für die Sicherheit von Menschen von kritischer Bedeutung sind. So wurden beispielsweise Sicherheitsaspekte der Pariser Metrolinie 14 mit Hilfe der sogenannten B-Methode verifiziert, das Betriebssystem sel4 wurde mit dem Beweisassistenten Isabelle/HOL verifiziert und der Beweisassistent HOL Light war ein wichtiges Werkzeug beim Beweis der Keplerschen Vermutung im Jahr 2017. Die neuesten Entwicklungen im Bereich des interaktiven Beweisens wurden kürzlich auf der Sommerschule *Interactions of Proof Assistants and Mathematics* vorgestellt, die gemeinsam von FIDS und der Fakultät für Mathematik in Regensburg organisiert wurde.

*Automatische Beweiser* sind in der Lage, logische Formeln ganz oder teilweise automatisch abzuleiten. Sie werden auch als *Theorembeweiser* bezeichnet und in vielen Bereichen eingesetzt, z. B. bei der Verifikation und dem Testen von Programmen, im Scheduling und auch bei der Lösung mathematischer Probleme. Interaktive und automatische Beweiser können in Kombination verwendet werden, indem beispielsweise einfachere Teile eines interaktiv erstellten Beweises an automatische Theorembeweiser ausgelagert werden. Es gibt ein breites Spektrum an automatischen Beweismethoden, die alle von einer mathematischen Formulierung eines Prob-

lems und vorgegebenen Annahmen ausgehen. Automatische Beweiser verarbeiten die formalisierte Aussage und untersuchen symbolisch den Raum der möglichen Interpretationen der Formel und versuchen dadurch, ein Modell zu finden (d. h. eine Interpretation, die die Formel erfüllt) oder andernfalls einen Beweis zu konstruieren, dass die Formel nicht erfüllbar ist.

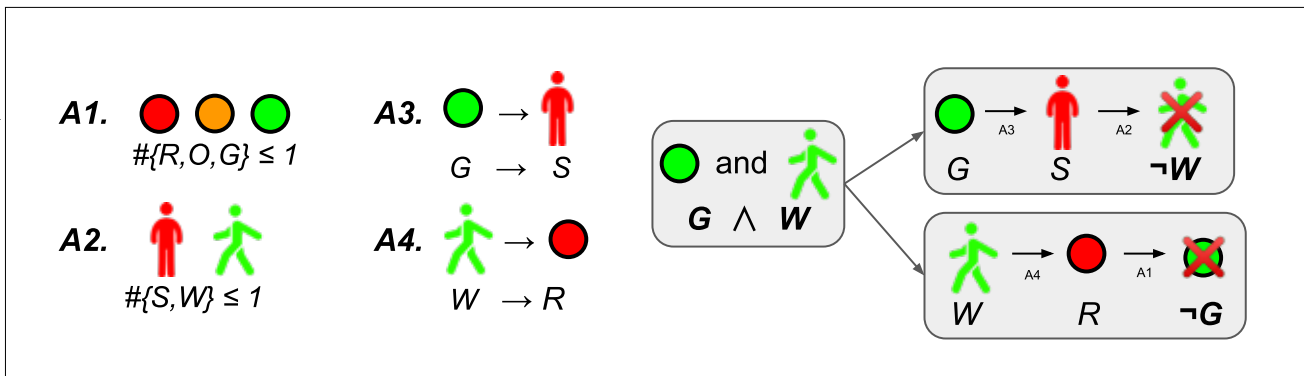
## Ein Verifikationsbeispiel

Als Beispiel betrachten wir die Beweisschritte, die zur Verifikation eines (drastisch vereinfachten) Systems angewandt werden. Eine Kreuzung ist mit zwei Ampeln ausgestattet: eine für die Autos und eine für die Fußgänger. Die Interaktion der beiden Ampeln kann wie folgt spezifiziert werden. Die Ampel für Autos kann Grün (G), Orange (O) oder Rot (R) sein, während die Fußgängerampel zwei Modi hat: Gehen (W) und Stehen (S). Um das System zu analysieren, müssen wir anschließend Annahmen (oder Axiome) über die möglichen Zustände des Systems formulieren. In realistischeren Fällen wird diese formale Beschreibung des Systems automatisch aus der Systemimplementierung abgeleitet:

- **A1:** Rot, Orange und Grün schließen sich gegenseitig aus: höchstens eines von R, O, G ist wahr ( $\#\{R, O, G\} \leq 1$ )
- **A2:** Stop und Walk schließen sich gegenseitig aus: höchstens eines von S und W ist wahr ( $\#\{S, W\} \leq 1$ )
- **A3:** Die Fußgängerampel zeigt nur dann Gehen an, wenn die Ampel Rot ist:  $W \rightarrow R$
- **A4:** Die Ampel zeigt nur dann Grün, wenn die Fußgängerampel Stehen anzeigt:  $G \rightarrow S$



Bildnachweis: Julie Cailler, Universität Montpellier



1 Formalisierung und Verifikation einer vereinfachten Ampelschaltung.

Unser Ziel ist es, sicherzustellen, dass der Verkehr an der Kreuzung ordnungsgemäß geregelt ist, um Unfälle zu vermeiden. Eine interessante Eigenschaft in diesem Modell ist die Frage, ob es jemals vorkommen kann, dass die Ampel Grün zeigt, während die Fußgängerampel im Modus Gehen ist: Können  $G$  und  $W$  gleichzeitig wahr sein, oder, logisch ausgedrückt, ist die Formel  $G \wedge W$  unter unseren Annahmen erfüllbar. Ein Theorembeweiser kann dieses Szenario auswerten und Schritt für Schritt beweisen, dass  $G \wedge W$  unmöglich ist. Da dieser Beweis *maschinell* geführt und überprüft wird, ist er ein starkes Argument für die Korrektheit der Ampelimplementierung.

Praktisch gesehen simuliert ein Beweiser alle möglichen Szenarien und zeigt, dass die untersuchte Fehlersituation in jedem Fall aufgrund von Widersprüchen unerreichbar ist. Für ein und dieselbe Eigenschaft können mehrere Beweise vorliegen: Wenn beispielsweise die Ampel grün ist, befindet sich die Fußgängerampel im Modus Stehen ( $G \rightarrow S$ ), wie im oberen Block dargestellt. Der Modus Stehen ist mit dem Modus Gehen unvereinbar ( $\#\{S, W\} \leq 1$ ), was der ursprünglichen Aussage ( $W$ ) widerspricht. Eine ähnliche Argumentation kann auch für den Modus Gehen gemacht werden, was uns erlaubt, auf zwei verschiedene Arten zu schließen, dass  $G \wedge W$  unerfüllbar ist. Indem wir auf diese Weise die komplette Funktionalität der Ampelsteuerung analysieren, können wir bestätigen, dass jede Komponente wie erwartet funktioniert und somit das System als Ganzes verifiziert ist.

### Methoden und Forschungsthemen in automatischen Beweisen

Manche Systeme lassen sich relativ leicht modellieren, während andere, komplexere Systeme auch ausdrucksstärkere Beschreibungssprachen erfordern. Glücklicherweise gibt es nicht nur eine einzige Art von Logik, sondern eine Vielzahl von verschiedenen Logiken. Diese unterscheiden sich bezüglich der verfügbaren logischen Konstrukte (*Syntax*) und der Art und Weise, wie man Termen und Formeln Bedeutung zuweist (*Semantik*). *Aussagenlogik*, die relativ einfache Logik, die in unserem Ampelbeispiel verwendet wird, hat den Vorteil, dass sie entscheidbar ist; das bedeutet, dass wir in der Lage sind, effektiv zu berechnen, ob eine Formel erfüllbar ist oder nicht. Erfüllbarkeit in der Aussagenlogik ist jedoch ein *NP-vollständiges* Problem, was bedeutet, dass alle bekannten Algorithmen im schlimmsten Fall exponentielle Laufzeit haben. Verbesserungen bei den Beweissystemen, den Algorithmen und den in den Implementierungen verwendeten Datenstrukturen haben in den letzten Jahren jedoch zu einer überraschenden Steigerung der Leistungsfähigkeit von Theorembeweisern für Aussagenlogik geführt. Solche Beweiser, die gemeinhin als *SAT-Solver* bekannt sind, können heute problemlos Formeln mit Millionen von Variablen verarbeiten, z. B. Formeln, die industrielle Systeme modellieren.

Ausdruckskräftigere Logiken, z. B. die *Prädikatenlogik erster Stufe* oder *Logiken höherer Stufe*, erlauben es uns, komplexere Aussagen (z. B. mathematische Probleme) zu formulieren, aber Beweise sind schwieriger zu finden. Auch hier wurde viel Forschungsarbeit in die Entwicklung effizienter automatischer Theorembeweiser

investiert, und die heutigen Systeme sind in der Lage, auch sehr komplexe Probleme zu lösen. In unserer Gruppe in Regensburg haben wir insbesondere an Methoden zur *Parallelisierung* von Theorembeweisern gearbeitet, d. h. an der Nutzung moderner paralleler Hardwarearchitekturen um die Beweissuche zu beschleunigen.

Weitere Logiken werden fortlaufend entwickelt und bringen eine Vielzahl konzeptioneller, theoretischer und praktischer Fragestellungen mit sich, wie z. B.:

- Was ist die *richtige Logik* für die Modellierung einer bestimmten Art von System?
- Welche *Zeit-* oder *Platzkomplexität* haben Inferenzprobleme in einer bestimmten Logik? Sind Probleme wie Erfüllbarkeit entscheidbar?
- Was sind *gute Beweissysteme* und effektive oder effiziente Algorithmen in einer gegebenen Logik?

Viele Anwendungen erfordern auch den Umgang mit domänenspezifischen *Axiomen*. In unserem Beispiel gibt es nur vier Axiome, A1-A4, während die Modellierung realer Systeme Tausende von Axiomen erfordern kann. Um diese Situation handhabbar zu machen, werden bestimmte standardisierte (Mengen von) Axiomen als *Theorien* zusammengestellt, die in der Programmierung verwendeten standardisierten Datentypen oder Bibliotheken entsprechen. Eine Theorie umfasst Hintergrundwissen aus einem bestimmten Bereich (z. B. verschiedene Arten von Arithmetik, Mengenlehre oder Arrays) und kann durch spezifische Beweisregeln und Prozeduren repräsentiert werden. Die Entwicklung spezieller Theorembeweiser, die mit Theorien umgehen können, auch bekannt als *Satis-*

*fiability Modulo Theory Solver* oder *SMT Solver*, hat sich in den letzten Jahren zu einem besonders erfolgreichen Forschungszweig entwickelt. SMT Solver haben den Bereich der formalen Methoden grundlegend verändert, indem sie leistungsstarke Bausteine zur Verfügung stellen, aus denen sich neue Verifikationswerkzeuge mit viel geringerem Aufwand konstruieren lassen.

Unsere Forschungsgruppe in Regensburg hat selbst mehrere SMT Solver entwickelt, die auf Probleme in der Programmverifikation zugeschnitten sind. Wir arbeiten dabei an einigen der spannendsten Theorien auf diesem Gebiet: unter anderem

an Theorembeweisern für verschiedene Varianten der Theorie der *Zeichenketten*, die sowohl mit Wortgleichungen über freien Monoiden als auch mit der Automatentheorie zusammenhängen; Theorembeweisern für verschiedene Arten von *Arithmetik*, einschließlich Problemen in nichtlinearer Ganzzaharithmetik und modularer Arithmetik; und Theorien von *Sequenzen* und *Arrays*. Die Vielfalt der in Frage kommenden Theorien und logischen Fragmente macht den Bereich SMT zu einem hochinteressanten Forschungsgebiet, sowohl aus theoretischer als auch aus praktischer Sicht.

## Referenzen

Leonardo Mendonça de Moura, Nikolaj S. Bjørner: *Satisfiability modulo theories: introduction and applications*. Commun. ACM 54(9): 69–77 (2011)

John Harrison: *Handbook of Practical Logic and Automated Reasoning*. Cambridge University Press 2009, ISBN 978-0-521-89957-4, pp. I-XIX, 1-681

*Interactions of Proof Assistants and Mathematics*. International Summer School, Regensburg, Germany, 2023. <https://itp-school-2023.github.io/>

Raymond M. Smullyan. *What is the Name of this Book?: The Riddle of Dracula and Other Logical Puzzles*. Prentice-Hall, 1978.

## DREI FRAGEN ...

### Wie verändert KI Ihr Fachgebiet?

Automatisches Beweisen ist ein Teilbereich der künstlichen Intelligenz. Im Gegensatz zu statistischen Methoden der KI und insbesondere dem maschinellen Lernen, fokussiert das automatische Beweisen auf symbolische Methoden, mit denen logische oder mathematische Aussagen exakt und fehlerfrei von gegebenen Annahmen abgeleitet werden können. Automatisches Beweisen und maschinelles Lernen ergänzen sich daher ausgesprochen gut, weshalb viele Forschergruppen heute versuchen, Methoden des maschinellen Lernens in das automatische Beweisen zu integrieren oder umgekehrt.

### Welche Entwicklung in der Informatik wünschen Sie sich für die nächsten 5 Jahre?

Formale Methoden werden heute hauptsächlich im Bereich von kritischen Computersystemen eingesetzt. Wir sind überzeugt, dass es an der Zeit ist, dass formale Methoden diese Nische verlassen und zu einem Mainstream-Werkzeug in der Softwareentwicklung werden. Neben den im Artikel genannten Gründen ist ein weiterer Punkt, dass in Zukunft immer mehr Computerprogramme maschinell generiert werden, was zu dem neuen Problem führt, sicherzustellen, dass sich diese generierten Programme tatsächlich wie erwartet verhalten. Genauso wie wir einem von ChatGPT generierten Text nicht blind vertrauen sollten, bedürfen auch maschinell generierte Computerprogramme einer sorgfältigen Überprüfung. Im Gegensatz zu Texten in natürlicher Sprache sind Menschen jedoch eher schlecht darin,

Programmcode zu überprüfen: maschinell erstellte Programme sollten maschinell überprüft werden!

### Welches Fachbuch lesen Sie gerade?

»What Is the Name of This Book?« von Raymond M. Smullyan – Eine unterhaltsame Einführung in die Deduktion und logische Beweisführung, die Grundlage des automatischen Beweisens. Anhand von Rätseln gibt das Buch einen Einblick in die Art und Weise, wie Theorembeweiser Probleme lösen. Dies ist wahrscheinlich das unterhaltsamste Logikbuch, das je geschrieben wurde, und wir empfehlen es Lesern jeden Alters! Mit den Worten von Melvin Fitting: »Ich stelle Ihnen jetzt Professor Smullyan vor, der Ihnen beweisen wird, dass entweder er nicht existiert oder Sie nicht existieren (aber welches davon werden Sie nicht wissen!).«



Foto © Universität Montpellier

#### Julie Cailler

ist seit 2023 Post-Doktor am Lehrstuhl für Theoretische Informatik. In ihrer Forschung beschäftigt sich Julie Cailler primär mit Techniken und Werkzeugen des automatischen Beweisens, sowie mit der Kombination von interaktiven und automatischen Beweismethoden. Sie ist die Hauptautorin des Beweissystems Goéland, eines nebenläufigen Tableau-basierten Theorembeweisers für die Prädikatenlogik ersten Stufe.



Foto © Isabella Rümmer

#### Prof. Dr. Philipp Rümmer

ist seit 2022 Professor für Theoretische Informatik an der Universität Regensburg. Die Schwerpunkte seiner Forschung sind das automatische Beweisen, insbesondere Methoden aus dem Bereich SMT-Solving und der Constraint-Programmierung, sowie Methoden für die Verifikation von Software-Programmen mit Hilfe von Deduktion und Model Checking. Neben theoretischen Resultaten hat diese Forschung auch zu mehreren Software-Werkzeugen für das automatische Beweisen und der Programmverifikation geführt.