



© pkproject | AdobeStock

Forschungsprojekt mit Industriepartnern

Absichern autonomer Fahrzeuge in unerwarteten Situationen

Szenario-basiertes Testen gemäß ISO 21448 (SOTIF) ist entscheidend für die Sicherheit zukünftiger selbstfahrender Fahrzeuge. Das Projekt HolmeS³ kombiniert Kausalmodelle und maschinelles Lernen, um kritische Szenarien zu identifizieren und die Teststrategie zu optimieren.

Daniel Ebenhöch, Tilo Linz, Robert Maier, Prof. Dr. Jürgen Mottok

Die Norm ISO 21448 „Safety of the Intended Functionality“ (SOTIF) legt strenge Maßstäbe für die System-sicherheit moderner Kraftfahrzeuge fest. SOTIF fordert, dass das System „Fahrzeug“ auch in unerwarteten Situationen sicher agiert. „Szenario-basiertes Testen“ stellt hierbei einen Baustein der SOTIF und somit auch eine durch nationale und internationale Regulationen und Gesetze geforderte Methodik zur Absicherung zukünftiger autonomer Fahrzeuge dar. Szenario-basiertes Testen bezeichnet hierbei das Testen des Verhaltens eines Cyber-physischen-Systems innerhalb eines Szenarios durch dessen Ausführung mittels Simulation

oder durch reale Fahrversuche (**Bild 1**). Diese Methode kann grundsätzlich nicht nur in der Automobilindustrie, sondern auch bei anderen autonomen Systemen wie beispielsweise bei autonomen Zug-Systemen angewendet werden.

Die Herausforderung in der Praxis besteht dabei darin, potenziell „gefährliche“ Situationen belastbar und nachvollziehbar zu ermitteln und testbar zu machen. Hierfür müssen Entwickler Fahrzeuge und Fahrfunktionen, deren Sollfunktionalität und mögliche Unzulänglichkeiten in komplexen Umgebungs-konstellationen umfassend verstehen und analysieren können.

Hier setzt das Projekt HolmeS³ an: Es verwendet strukturelle Kausalmodelle (SCMs), um die kausalen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Risiko-Einflussfaktoren systematisch zu analysieren. Entstehende Modelle erfassen komplexe Wirkpfade und zeigen, wie Faktoren wie Wetterbedingungen oder Systemfunktionen die Fahrzeugsicherheit beeinflussen – expertenbasiert und durch Daten gestützt.

Beispiel zur Verdeutlichung: der Notbremsassistent

Man stelle sich vor, es soll ein Notbremsassistent (NBA) für den Einsatz

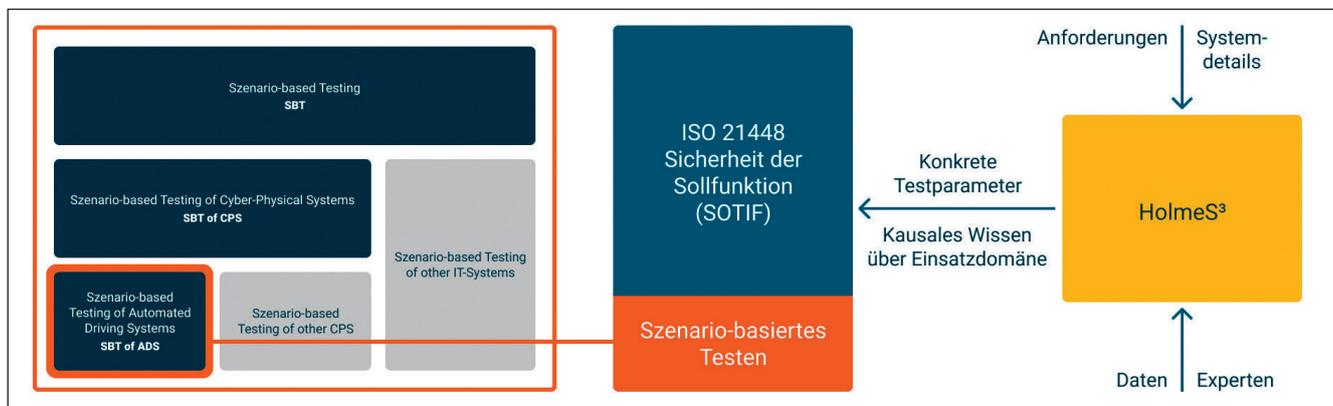


Bild 1: Verortung des Holmes³-Vorgehensmodells in den Kontext der ISO 21448 © OTH Regensburg

in einer dicht befahrenen städtischen Umgebung entwickelt werden. Ein kausales Modell könnte Variablen wie „Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug“, „Straßenzustand“, „Niederschlag“ und „Sensorgenauigkeit“ umfassen. Durch die Modellierung dieser Variablen und ihrer Wechselwirkungen als SCM kön-

nen probabilistische Vorhersagen getroffen werden, wie sich bestimmte Änderungen – etwa ein plötzlicher Regenschauer oder ein Ausfall eines Sensors – auf die Funktionsfähigkeit des NBA auswirken.

Dies ermöglicht es, gezielt kritische Szenarien zu identifizieren, in denen der NBA abweichend von seiner Systemspezifikation arbeitet – und die beispielsweise zu einer Kollision führen können. Die beitragenden Wertebelegungen der Modellvariablen können dann als Grundlage für konkrete Testfälle verwendet werden. Ein so modelliertes System kann rechnergestützt analysiert und so wichtige Vorarbeit für dessen Sicherheit geleistet werden.

Die Erstellung eines SCM ist Toolbasiert mithilfe von explizitem Domänenwissen oder in Kombination mit realen Systemdaten möglich. Diese Kombination aus Fachexpertise und detaillierten Datenanalysen führt zu robusten Modellen mit zuverlässigen Ergebnissen.

Die Holmes³-Methodik setzt genau hier an und bietet Transparenz, Vergleichbarkeit, Erklärbarkeit und Nachvollziehbarkeit in der Modellierung und den eingesetzten Algorithmen. So lässt sich eine Kommunikation der Ergebnisse sowohl gegenüber offiziellen Stellen als auch gegenüber Systementwicklern gewährleisten und fundierte Entscheidungen zur Weiterentwicklung der Systemsicherheit treffen.

Integrierter Ansatz zur Absicherung automobiler Systeme

Die Holmes³-Methodik verfolgt einen integrierten Ansatz zur Untersuchung der Sicherheit und Zuverlässigkeit hochautomatisierter Fahrzeuge. Sie nutzt

verfügbares Weltwissen abstrahiert als kausales Modell, Verfahren des maschinellen Lernens zur Ableitung von Testfallkandidaten und deren Verwaltung durch ein Testmanagement mit angeschlossener Simulation. In Kombination wird so ein robustes Verifikations- und Validierungssystem über den gesamten Lebenszyklus des untersuchten Systems geschaffen (Bild 2).

Kausale Inferenz als Basis zur Generierung von Corner-Cases

Ein kausales Modell basiert auf einem fundierten Verständnis von Systemanforderungen. Es visualisiert und analysiert komplexe Systeminteraktionen, bildet diese mathematisch auswertbar ab und ermöglicht so die Identifikation kritischer Szenarien, die besondere Aufmerksamkeit erfordern. Innerhalb der Holmes³-Toolkette werden verschiedene Modelle in einer zentralen Modell-Datenbank gespeichert und können so zueinander in Verbindung gesetzt werden.

Durch die Analyse von Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Modell können spezifische Szenarien identifiziert werden, die potenziell gefährliche oder unerwartete Systemreaktionen hervorrufen. Diese sogenannten Corner-Cases (konkrete Parameterbelegungen, die das Fahrzeug in kritische Situationen steuern) sind essenziell für das Testen der Systemrobustheit. Sie stellen aber lediglich eine Möglichkeit dar, modellierte Kausalitäten gezielt zur Systemanalyse zu nutzen. Alternativen sind die Durchführung virtueller Experimente („Was wäre, wenn ...?“) sowie statistische Analysen auf Grundlage verfügbarer Datensätze (z. B. aus Fahrversuchen).

INFO

HolmeS³ – das steckt hinter dem Forschungsprojekt

Mit der Initiative „Künstliche Intelligenz – Autonome Mobilität“ förderte das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) Innovationen auf den Gebieten Künstliche Intelligenz (KI) und Data-Science in Anwendungsbereichen wie Mobilität oder Logistik. Im Rahmen dieser Initiative lief das Projekt „HolmeS³“ von Juli 2020 bis Ende 2023.

Die OTH Regensburg – Software Engineering Laboratory for Safe and Secure Systems (LaS³), die Elektronische Fahrwerksysteme GmbH (EFS) und die imbus AG hatten sich für das Technologieprojekt zusammengeschlossen, um die Methoden zum Test und zur Absicherung autonomer Fahrzeuge weiterzuentwickeln.

Ziel war es, eine herstellerübergreifende Vorgehensweise und Tool-Umgebung für „Scenario-based Testing“ und zur KI-basierten Analyse von Fahrscenarien mittels einer „Kausalen Inferenz Engine“ zu entwickeln und bereitzustellen.

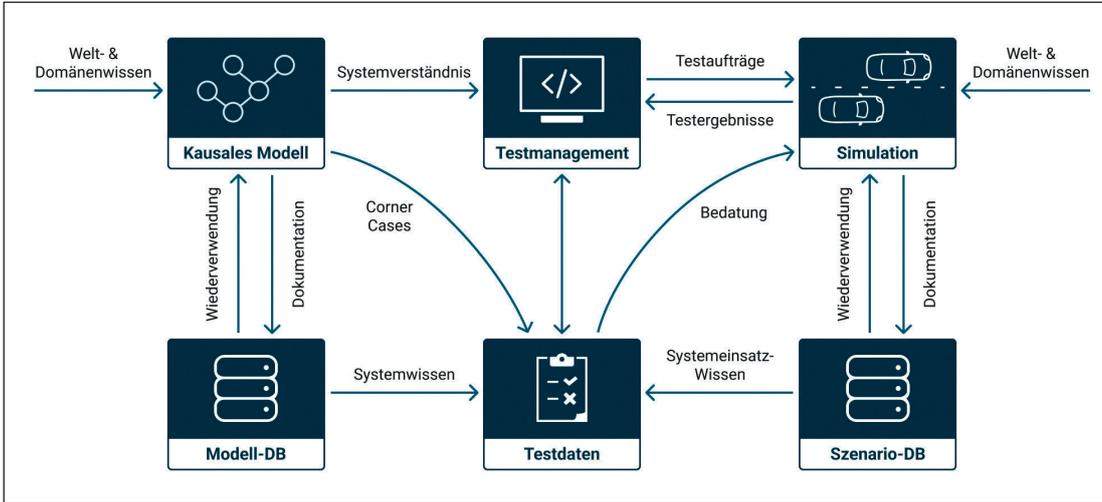


Bild 2: Phasenbausteine des Holmes³-Vorgehensmodells
© OTH Regensburg

Grundlage für die Verwertung von Inferenzergebnissen (berechnete Schätzungen kausaler Effekte) stellen kausale Metriken dar, welche die Stärke des Einflusses einzelner Variablen (z. B. Regen) auf eine Zielvariable (z. B. Kollision) quantifizieren. Im Anwendungsfall der Corner-Case Ermittlung erlaubt die somit mögliche Fokussierung auf kritische Einflussgrößen eine automatisierte und effiziente Berechnung. Die dabei herauskommenden Ergebnisse sind nicht nur einzelne Zahlen, sondern miteinander vergleichbare und gewichtete Schätzungen modellierter Kausaleffekte in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Praktische Verwertung durch Testmanagement und Simulation

Ein Testmanagement steuert die Strategie und Priorisierung der Testfälle, die im obigen systematischen Prozess abgeleitet wurden. Eine zentrale Testdatenbank gewährleistet eine nahtlose

Integration und Abstimmung von vorhandenen Szenario-Templates (verschiedene Verkehrssituationen ohne Wertebelegungen) mit den begründbar relevanten Ergebnissen der kausalen Modelle (z. B. Corner-Cases).

Eine direkte Anbindung von Simulatoren ermöglicht das Ausführen der definierten Szenarien in einer kontrollierten Umgebung und liefert somit erste Erkenntnisse über das tatsächliche Systemverhalten. Diese Ergebnisse helfen bei der Feinabstimmung der kausalen Modelle, einer Optimierung der Teststrategien und vorrangig bei der Evaluation des getesteten Systems.

Holmes³ am Beispiel des Notbremsassistenten

Ein kausales Modell stellt Ursache-Wirkung-Beziehungen systematisch dar. Diese Modelle bestehen aus kausalen Diagrammen (ihre graphische Darstellung), in denen Knoten Variablen wie „Geschwindigkeit des Fahrzeugs“ oder

„Reaktionszeit des Bremsassistenten“ repräsentieren. Gerichtete Kanten zwischen diesen Knoten illustrieren die Einflussnahme zwischen den Variablen. Beispielsweise könnte eine Kante von „Niederschlagsintensität“ zu „Reibungskoeffizient der Fahrbahn“ die Auswirkung von Regen auf die Fahrbahnbeschaffenheit zeigen. Jeder Variable wird zudem ein sogenannter kausaler Mechanismus (funktionale Beschreibung der Wirkzusammenhänge, sowohl rein deterministisch, rein probabilistisch als auch hybrid) zugeordnet.

Die kausale Inferenz ermöglicht es, spezifische Fragen an ein solches Modell zu stellen, wie zum Beispiel: „Wie würde sich eine um 0,2 Sekunden schnellere Reaktion des Bremsassistenten auf die Kollisionswahrscheinlichkeit auswirken?“, „Welchen Einfluss hat starker Nebel auf die Häufigkeit von Kollisionen?“ oder „Welche Geschwindigkeiten sind bei starkem Regen noch zulässig, um das System nicht zu überfordern?“. Als Ergebnis stehen dann für

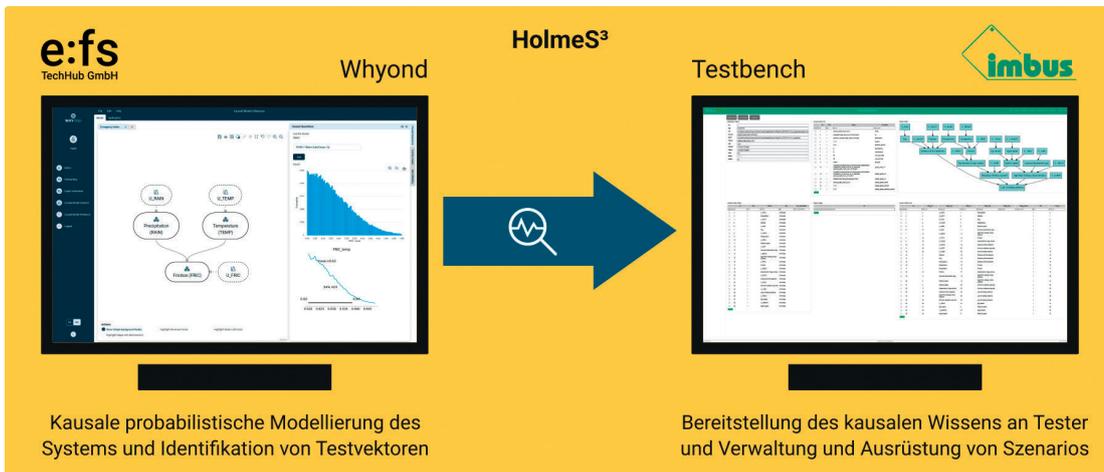


Bild 3: Holmes³-Vorgehensmodell in der Toolinteraktion
© OTH Regensburg

relevante Variablen dieser Fragen individuelle kausale Aussagen mit Konfidenzniveau bereit. Durch ein SCM lassen sich belastbare Antworten zu diesen Fragen ableiten, ohne dass alle dadurch implizierten Szenarien physisch getestet werden müssen. Es hilft somit beispielsweise systematisch Corner-Cases zu identifizieren, die in der realen Welt selten oder schwer zu bestimmen sind.

Überblick über die Toolchain

Die HolmeS³-Toolkette umfasst zwei zentrale Lösungsbausteine: das Modellierungs- und Inferenztool Whyond und die Testmanagement-Plattform TestBench SBT (**Bild 3**). Whyond ist eine webbasierte SasS- oder On-Premises Anwendung zur Erstellung und Berechnung kausaler Modelle. Der Fokus liegt dabei auf einer effizienten und kollaborativen Nutzerführung. Es ermöglicht intuitive grafische Oberflächen zur Erstellung kausaler Graphen und die Durchführung von kausalen Inferenzen.

TestBench SBT unterstützt das Szenario-basierte Testen durch die Verwaltung von Szenario-Repositories, Spezifikation und Verwaltung von Tests und deren Ergebnissen sowie die Ausführung der abgeleiteten Szenarien in Simulatoren.

Beide Produkte sind dabei nur ein Teil eines herstellerübergreifenden Vorgehensmodells, welches aus dem mehrjährigen Industrieforschungsprojekt HolmeS³ der OTH Regensburg, der e:fs TechHub GmbH und der imbus AG entstanden sind.

Vielversprechende Ergebnisse

Das HolmeS³-Projekt zeigt erste vielversprechende Ergebnisse in der Analyse komplexer, automobiler Systeme. Die weitere Entwicklung und Integration der Technologien in Zusammenarbeit mit Industriepartnern kann die Sicherheit und Leistungsfähigkeit automobiler Systeme weltweit verbessern. ■ (ah)

www.oth-regensburg.de



Daniel Ebenhöch ist Lead Ingenieur Absicherung autonome Systeme bei e:fs TechHub GmbH. © e:fs TechHub GmbH



Tilo Linz ist Vorstand und Mitgründer der imbus AG. © imbus AG



Robert Maier ist Doktorand am Software Engineering Laboratory for Safe and Secure Systems (LaS³) der OTH Regensburg. © OTH Regensburg



Prof. Dr. Jürgen Mottok lehrt am Software Engineering Laboratory for Safe and Secure Systems (LaS³) der OTH Regensburg. © OTH Regensburg

Sicherheit von Fahrfunktionen verbessern

Seit 40 Jahren entwickeln wir zukunftsweisende Simulationslösungen für die virtuelle Fahrzeugentwicklung.