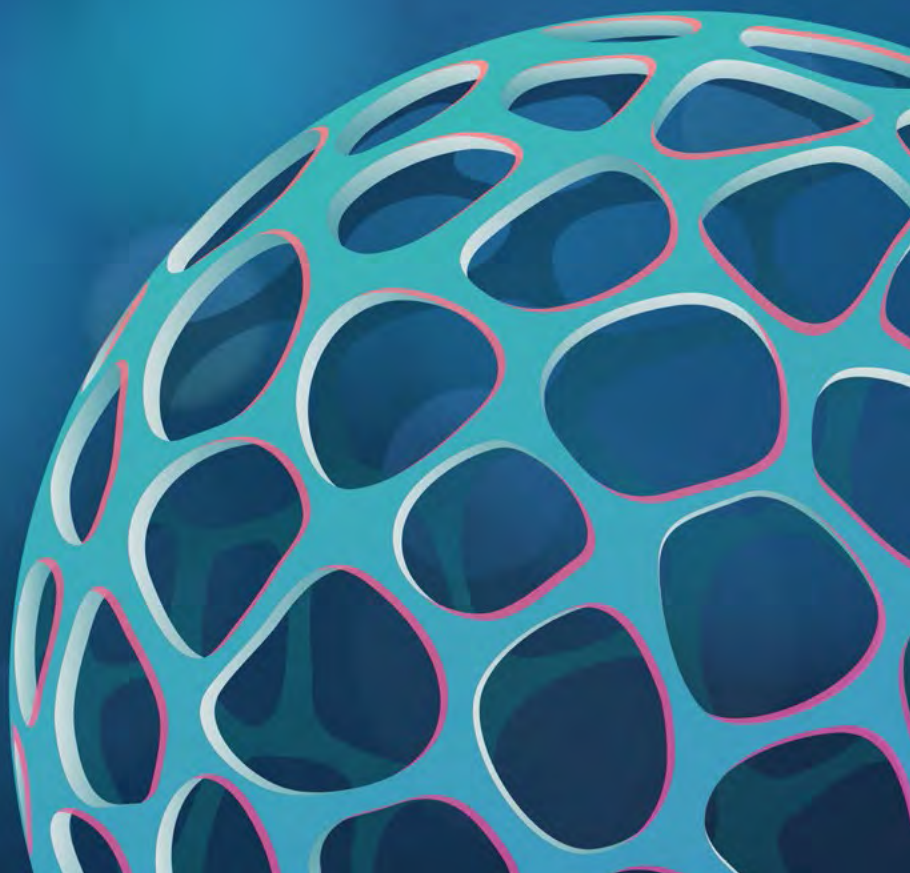


# **TRENDS FÜR DIE KÜNSTLICHE INTELLIGENZ**



# INHALT

- 3 Vorwort
- 5 Prominente Zitate
- 6 Glossar
- 8 »Noch lange nicht am Ende der Entwicklung«  
Interview mit Prof. Dr. Stefan Wrobel
- 14 Auftrag: Mythbusting
- 16 Quantencomputer: Dramatische Fortschritte in der KI  
Interview mit Prof. Dr. Christian Bauckhage
- 20 Die KI im Kampf gegen Cyber-Angriffe und Anomalien
- 22 Paradigmenwechsel: Deep Learning auf Supercomputern  
Interview mit Dr. Janis Keuper
- 24 Zentrifugen: Intelligent trennen dank neuronaler Netze
- 26 Kurzmeldungen: Trends & Projekte
- 31 Impressum



## **MIT MENSCHLICHER UND KÜNSTLICHER INTELLIGENZ DIE ZUKUNFT GESTALTEN**

Künstliche Intelligenz (KI), kognitive Systeme und lernende Maschinen spielen eine entscheidende Rolle in der künftigen Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft. Für die internationale Wirtschaft und die industriellen Wertschöpfungsketten bedeutet dies einen grundlegenden Strukturwandel – denn diese technischen Systeme sind lernfähig und zunehmend in der Lage, Erlerntes auf neue Situationen zu übertragen. Sie können Prozesse planen, Prognosen treffen und sogar mit Menschen interagieren. Die International Data Corporation rechnet mit weltweiten Ausgaben für kognitive Lösungen in Höhe von 40 Milliarden US-Dollar bis zum Jahr 2020.

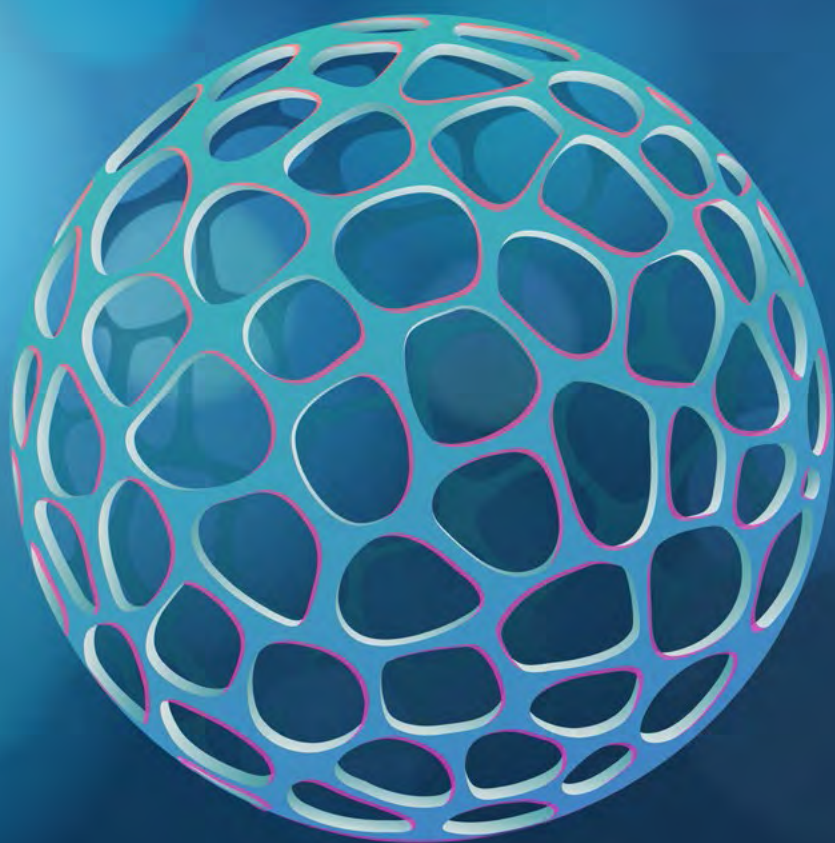
Der Einsatz neuer Technologien eröffnet nicht nur Chancen, sondern stellt uns alle stets auch vor Herausforderungen. Für eine dauerhafte Technologieführerschaft Deutschlands im Bereich der KI sind nicht nur technologische Lösungen gefragt, sondern auch der gesellschaftliche Dialog. Ängsten und Mythen müssen wissenschaftliche Erkenntnisse entgegengesetzt

werden. Maschinen werden unseren Wirkungskreis erweitern, jedoch nicht die Führung übernehmen.

Die Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt an vielen Instituten Schlüsseltechnologien der KI und ihrer Anwendungen in Bereichen wie Robotik, Bild- und Sprachverarbeitung sowie Prozessoptimierung.

Maschinelle Lernverfahren für die Industrie gehören ebenso dazu wie der Einsatz kognitiver Systeme in der Cybersicherheit und die notwendige Erforschung künstlicher neuronaler Netze. Unsere Forschung leistet wesentliche Beiträge zur Theorie und ethischen Gestaltung der KI und orientiert sich zugleich eng am praktischen Bedarf der Kunden.

Prof. Dr. Reimund Neugebauer



»Seit 20 Jahren liest man regelmäßig, dass der Durchbruch der Künstlichen Intelligenz unmittelbar bevorsteht. Aber jetzt stimmt es wirklich.«

***Sascha Lobo, Autor und Blogger***

»Die Gefahr der Künstlichen Intelligenz liegt nicht darin, dass Maschinen mehr und mehr wie Menschen denken, sondern dass Menschen mehr und mehr wie Maschinen denken.«

***Joseph Weizenbaum, Informatiker, Kybernetiker und Gesellschaftskritiker***

»Evolution ist mehr als die Summe aller Revolutionen.«

***Gerald Dunkl, Psychologe und Aphoristiker***

»Indes sie forschten, röntgten, filmten, funkten, entstand von selbst die köstlichste Erfindung: der Umweg als die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. «

***Erich Kästner, Schriftsteller***

»Künstliche Intelligenz ist allemal besser als natürliche Dummheit.«

***Hans Matthöfer, ehemaliger Bundesminister***

---

### Die wichtigsten Begriffe zum Thema kurz erklärt:

---

#### Kognitive Systeme/Maschinen

Kognitive Systeme/Maschinen sind technische Systeme, die digitale Information aus Sensordaten und Netzen aufnehmen und daraus auf Basis von lernenden Algorithmen Schlussfolgerungen, Entscheidungen und Handlungen ableiten und mit ihrer Umgebung im Dialog verifizieren und optimieren.

#### Maschinelles Lernen

Als maschinelles Lernen werden Verfahren bezeichnet, in denen ein Algorithmus / eine Maschine durch Wiederholen einer Aufgabe lernt, diese bezüglich eines Gütekriteriums immer besser auszuführen.

#### Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik, das sich damit beschäftigt, Maschinen mit Fähigkeiten auszustatten, die intelligentem (menschlichem) Verhalten ähneln. Dies kann mit vorprogrammierten Regeln oder durch maschinelles Lernen erreicht werden. Starke bzw. generelle KI bezeichnet Maschinen, die generalisierende Intelligenz- und Transferleistungen erbringen können und somit nicht nur auf sehr begrenzte, vordefinierte Aufgabenfelder beschränkt sind.



### Neuronale Netze (Deep Learning)

Künstliche neuronale Netze sind eine Basis für maschinelle Lernverfahren nach dem Vorbild der Nervenzellenvernetzung im Gehirn. Sie bestehen aus Datenknoten und gewichteten Verbindungen zwischen diesen. Durch Änderung verschiedener Parameter im Netz können maschinelle Lernverfahren realisiert werden. Mit »Deep Learning« werden neuronale Netze mit stark erhöhter Anzahl von Ebenen bezeichnet, mit denen man in neue Problemklassen vorstoßen konnte.

### Blackbox-, Greybox-, Whitebox-Modelle

Blackbox-, Greybox-, Whitebox-Modelle unterscheiden sich darin, ob und in welchem Umfang der Algorithmus das physikalische Modell der zu lernenden Problemstellung kennt und in seinen Lernprozess miteinbezieht. Whitebox-Modelle kennen dies möglichst genau, Blackbox-Ansätze berücksichtigen das Modell hingegen nicht. Greybox bezeichnet Kombinationsansätze zwischen beiden.

### Neuromorphe Chips

Neuromorphe Chips sind Mikrochips, bei denen Eigenschaften und Architektur von Nervenzellen auf Hardware-Ebene nachgebildet werden. Diese Neuronen-ähnlichen Bauelemente simulieren die Lern- und Assoziationsfähigkeit des Gehirns, was besonders die Erkennung von Mustern in Bildern oder in Big-Data-Strukturen beschleunigen kann.

## »NOCH LANGE NICHT AM ENDE DER ENTWICKLUNG«

Ein Interview mit Prof. Dr. Stefan Wrobel, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS und Professor für Informatik an der Universität Bonn, zu Chancen, Herausforderungen und der Akzeptanz Künstlicher Intelligenz.

**Was genau ist die »Künstliche Intelligenz«?**

**Wrobel:** Intelligenz ist eine zentrale Eigenschaft des Menschen, die wir üblicherweise auch nur Menschen zubilligen. Wenn jetzt Maschinen in der Lage sind, Dinge zu tun, die wir gemeinhin als intelligent klassifizieren würden, bezeichnen wir diese als Künstliche Intelligenz. Sie umfasst aktuell Maschinen, die beispielsweise in der Lage sind, Bilder zu interpretieren, auf sprachliche Äußerungen angemessen zu reagieren, sie steht gar für vermeintlich einfache Dinge wie die digitalen Assistenten auf unseren Mobiltelefonen.

**Wo sehen Sie die Abgrenzung zum Begriff des maschinellen Lernens?**

**Wrobel:** Schon zu Anfang der Künstlichen Intelligenz war dem KI-Pionier Alan Turing klar, dass man intelligente Computer kaum händisch bis in jedes Detail würde programmieren können.

---

**»Das bedeutet, dass die menschliche Arbeit weniger umfangreich wird. Und dass wir intelligente Systeme trainieren können.«**

---

Er hat schon 1950 geschrieben, dass es eine zügigere Methode geben müsste – eben das maschinelle Lernen. Mit diesen





*Prof. Dr. Stefan Wrobel*

Methoden sind Computer in der Lage, aus Beobachtungen, vorhandenen Daten und Beispielen zu lernen und dadurch ihr Verhalten zu verbessern.

**Kann man diese intelligenten Computersysteme mit der menschlichen Intelligenz vergleichen?**

**Wrobel:** Vergleichen kann man zwei Dinge immer, auch wenn sie unterschiedlichen Charakter haben. Ein Flugzeug fliegt nicht so wie ein Vogel, ein Computer denkt nicht so wie ein Mensch. Wir müssen die Leistungen betrachten und dann beurteilen, ob wir dieses als genauso intelligent, weniger intelligent oder als intelligenter einstufen als das, was im Vergleich ein Mensch tun würde. Da haben Computer bereits große Durchbrüche erzielt, man denke an den Gewinn der Gameshow Jeopardy oder das Knacken des Spieles GO, von Schach ganz zu schweigen.

**Könnte man sagen: Bei Themen wie Strategie oder Bilderkennung funktioniert die KI mittlerweile wie der Mensch oder gar besser, beim Kreativen hat der Mensch jedoch noch den Stab in der Hand?**

**Wrobel:** Ich glaube, es ist heute nicht mehr so leicht, dass pauschal zu sagen. Es kommt darauf an, ob eine Aktion durch den Computer tatsächlich aus Beispielen erlernbar ist. Kann das notwendige Wissen vorab modelliert werden? Ob bei der Ausführung dann eine kreative Komponente enthalten ist oder nicht, ist eine tiefere philosophische Frage.

**Bei Interaktionen stellt sich mittlerweile die Frage: Wie lange brauche ich, um eine KI zu identifizieren? Beim Kundenservice und bei Supportanfragen trifft man heutzutage ja schon recht häufig erst einmal auf einen Chat-Bot.**

**Wrobel:** Wir können nicht in einer philosophischen Weise eine Künstliche Intelligenz bestätigen, lediglich die Nicht-Unterscheidbarkeit zwischen den Interaktionen von Mensch zu Mensch und von Mensch zu Maschine. Das ist natürlich für praktische Zwecke sehr nützlich. Wenn Sie an Unternehmen denken, die KI beispielsweise beim Kundenkontakt einsetzen möchten: Da können einfache Funktionalitäten, simple Antworten auf erster Ebene, bereits von Maschinen gegeben werden.

**»Neuronale Netze« sind ein weiteres Schlagwort, das im KI-Umfeld zurzeit in aller Munde ist. Was kann man sich darunter vorstellen?**

**Wrobel:** Neuronale Netze sind eine ursprünglich biologisch inspirierte Methode des maschinellen Lernens. Wir verstehen darunter eine Abfolge von Funktionen, die aus einer bestimmten Menge von Eingaben über mehrere Schichten Ausgaben berechnen. Über die vergangenen Jahre haben wir uns die Fähigkeit

angeeignet, solche Netze auch dann zu trainieren, wenn sie über mehrere Ebenen vielfältige Parameter haben, was bis in die Hunderttausende, bis in die Millionen gehen kann.

---

**»Neuronale Netze sind eine ursprünglich biologisch inspirierte Methode des maschinellen Lernens.«**

---

Ähnlich wie beim menschlichen Gehirn können Zwischenergebnisse von einem solchen Netz in ganz anderer Art festgestellt, aufgebaut und repräsentiert werden, so dass sehr viel größere Leistungen machbar sind. Möglich wird dies durch die algorithmischen Fortschritte und die massiven Trainingsdaten, die wir heute zur Verfügung haben. Die Auswahl dieser Daten ist von immenser Bedeutung, gerade wenn man darauf verzichtet, vorher Wissen zu modellieren und dadurch gewisse Leitplanken auch für das System einzuziehen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist zudem die stark gewachsene Rechenleistung.



Man liest oft von »starken« und »schwachen« KIs. Was genau ist da der Unterschied?

**Wrobel:** Diese Diskussion begleitet uns schon viele Jahrzehnte, es gibt da keine universell akzeptierte Regelung. Die Diskussion um »starke« und »schwache« KI hat damit zu tun, ob wir KI lediglich als »sich intelligent verhaltend« klassifizieren – was eher eine »schwache« KI beschreiben würde –, oder ob KI letzten Endes so funktioniert, wie ein Mensch auch funktioniert. Das würde man als »starke« KI bezeichnen. Damit verbunden stellt sich dann die Frage, ob wir einem künstlichen intelligenten System gar ein Bewusstsein oder Personenrechte zubilligen würden – emotional, philosophisch oder auch nur juristisch. Dahinter steckt immer die hochspannende Frage: Was ist in einem tiefen Sinne intelligent, was kreativ? Wie wollen wir künstliche intelligente Systeme akzeptieren und behandeln? Darüber lohnt es sich, ausführlich zu diskutieren.

Stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob sich eine KI ethisch oder moralisch verhalten muss?

**Wrobel:** Es wäre niemals akzeptabel, wenn sich eine KI weniger ethisch, weniger moralisch, weniger korrekt, weniger gesellschaftlich akzeptiert verhält als ein Mensch. Selbstverständlich müssen wir an KI-Systeme mindestens die gleichen Maßstäbe anlegen wie an Menschen. Wir sollten sogar höhere Maßstäbe anlegen, denn KIs ermüden nicht, sind nie unkonzentriert oder emotional.

---

**»Es wäre niemals akzeptabel, wenn sich eine KI weniger ethisch, weniger moralisch, weniger korrekt, weniger gesellschaftlich akzeptiert verhält als ein Mensch.«**

---

Was das im konkreten Einzelfall heißt, wird natürlich schwierig zu diskutieren sein. Wir kennen alle die beispielhafte Debatte bei autonomen Fahrzeugen.

Ich glaube jedoch, dass die Diskussion eben durch die Fähigkeiten und die Verlässlichkeit maschineller Systeme weniger kompliziert werden wird. Wenn KI-Systeme gefährliche Situationen von vornherein gar nicht aufkommen lassen, müssen wir das positiv bewerten. Grundsätzlich wünsche ich mir eine engagierte, gesamtgesellschaftliche Debatte darüber, was künstlich intelligente Systeme tun und können sollten, und was nicht tun.

### Wie wird KI heutzutage bereits in den Unternehmen eingesetzt?

**Wrobel:** Im Bereich Bildverarbeitung etwa haben wir im industriellen Einsatz schon lange intelligente Lösungen, die nun durch die Lernfähigkeit noch mal intelligenter geworden sind – im ganzen Bereich der Produktion, der Industrie, der visuellen Inspektion sind Systeme des Maschinen-Sehens, der sogenannten »Machine-Vision«, schon im Einsatz. Sichtbar für die Öffentlichkeit sind außerdem vor allem Systeme im Bereich

des autonomen Fahrens, Chat-Bots und Benutzeroberflächen – zum Beispiel bei der stark verbesserten Fähigkeit von Computern, mit Sprache umzugehen.

### Wie ist denn der aktuelle Forschungsstand zum Thema KI?

**Wrobel:** Wir haben in den vergangenen Jahren bei den Möglichkeiten sehr parameterreicher, tiefer neuronaler Netze, die man tatsächlich trainieren kann, einen beeindruckenden Fortschritt gesehen. Da sind wir noch lange nicht am Ende der Entwicklung. Wichtig wird in den nächsten Jahren werden, auch andere, wissensbasierte Techniken im Bereich der KI wieder anzubinden. Das ist ein Forschungsschwerpunkt, den wir auch bei Fraunhofer gezielt fokussieren.

---

**»Wichtig wird in den nächsten Jahren werden, auch andere, wissensbasierte Techniken im Bereich der KI wieder anzubinden.«**

---



In der Medizin ist es beispielsweise immer noch sehr aufwendig, notwendige Daten für große Auswertungen zu beschaffen, in der Industrie hat ein Mittelständler eben nicht Millionen von Posts eines Video- oder Bilderdiensts zur Verfügung, sondern nur 500 oder 1000 individuelle Klassifikationen, die im eigenen Betrieb vorgenommen wurden. Dies wird eine große und wichtige Entwicklung sein.

### **Was sollten Unternehmen Ihrer Meinung nach jetzt am besten in Sachen KI tun?**

**Wrobel:** Die Unternehmen sollten sich natürlich genau mit den aktuellen Möglichkeiten der KI befassen und sich Beispiele ansehen – und darüber nachdenken: Wie können wir diese Möglichkeiten nutzen? Das muss von oberster Ebene her geschehen, denn es hat Auswirkungen auf das grundsätzliche Design des eigenen Geschäftsmodells und die eigene Positionierung. Ich kann kein Unternehmen werden, das Künstliche

Intelligenz einsetzt, wenn ich nicht auch ein datenorientiertes, ein datengetriebenes, ein digitalisiertes Unternehmen bin. Wenn die Daten die zentrale Ressource sind, mit der ich arbeiten möchte, dann müssen diese Daten sicher sein. Wenn sie sogar ein Asset sind, ein Trumpf, mit dem ich im Markt agieren will, dann muss ich überlegen: Mit wem kann ich diese Daten teilen, mit wem baue ich diese Geschäftsmodelle auf? Welche Daten kann und darf ich sammeln? Wie ist es um die Cybersicherheit bestellt? Insofern die simple Botschaft: »Start now«. Investieren Sie jetzt, bauen Sie Kompetenz auf, suchen Sie sich die richtigen Partner. Wir integrieren daher bei Fraunhofer die Unterstützung zum Thema KI auch in unsere Beratung zur Digitalisierung oder zu Big Data – denn diese Fragen hängen eng zusammen.

[www.iais.fraunhofer.de](http://www.iais.fraunhofer.de)

## AUFTRAG: MYTHBUSTING

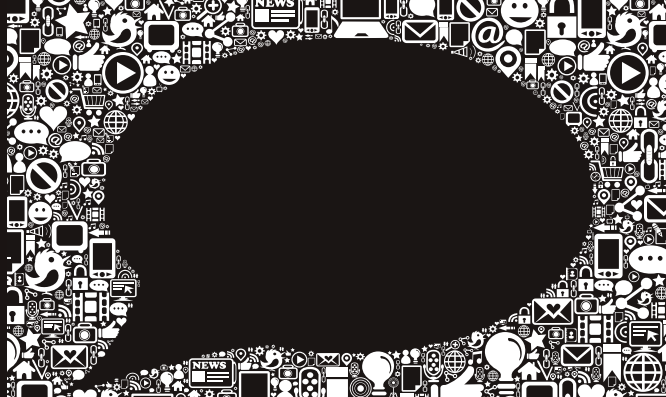
Dr. Hans Meine und Dr. Markus Wenzel vom Fraunhofer-Institut für Bildgestützte Medizin MEVIS stellen Mythen und Klischees zur Künstlichen Intelligenz auf den Prüfstand.

### »KI schafft künstliche Gehirne.«

Wir bauen keine künstlichen Gehirne oder künstliche Menschen. Genauso wenig wie ein Flugzeugbauer versucht, einen künstlichen Vogel zu bauen. Er möchte einfach etwas konstruieren, das fliegt. Wir bauen Maschinen, die elementare kognitive Aufgaben erledigen, für die Intelligenz benötigt wird. Solche Maschinen oder Mechanismen haben unseren Alltag bereits erreicht: Es gibt Geräte, die Autos steuern, unsere Sprache verstehen oder simultan übersetzen. Doch auch wenn wir einer Maschine einzelne Fähigkeiten so gut beibringen, dass sie darin besser als der Mensch ist – beispielsweise Lippenlesen – spricht man am Ende nicht von einem intelligenten Gerät.

### »Entscheidungen von KI-Systemen sind neutraler und objektiver.«

Das ist nicht richtig. KIs haben keine intrinsische Motivation, kein Eigeninteresse, neutral oder objektiv zu sein. Sie sind vom Trainingsmaterial und von der Intention des Trainers abhängig. Letztlich ist die Maschine darauf trainiert, eine Eingabe zu verarbeiten und eine Ausgabe zu liefern. Ein Beispiel aus der Medizin: Wird eine Maschine darauf trainiert, bösartige Veränderungen der Leber in CT-Aufnahmen zu erkennen, ist sie nicht fähig, bösartige Veränderungen in der Milz, der Niere oder der Lunge zu finden. Wir brauchen Menschen, um maschinen-gestützte Entscheidungen zu überprüfen und zu verantworten.



**»KI macht die Medizin kalt und unpersönlich.«**

Ganz im Gegenteil. Den sogenannten »menschlichen Faktor« in der Medizin möchte niemand verlieren. Aber was heißt hier menschlich? Zum Beispiel Flüchtigkeit, Unwissen, Fehltrail. Das sind Eigenschaften des Menschen, die im Rahmen von medizinischen Diagnosen keinen Vorteil bieten. Computer helfen Menschen, sicherere Entscheidungen angesichts großer Datenmengen zu treffen. Sie verarbeiten Informationen sehr viel schneller, reproduzierbarer und meistens auch nachweislich besser, wenn es um einfache kognitive Aufgaben geht. In diesem Sinne helfen Computer den Ärzten, die positiven menschlichen Eigenschaften mehr in den Klinikalltag zu bringen. Zum Beispiel, indem die KI monotone Arbeiten erledigt und dem Arzt Zeit lässt, Patienten mit Einfühlungsvermögen zuzuhören und auf Basis seines breiten medizinischen Wissens und seiner Erfahrungen mit Anteilnahme Orientierung in einer psychisch belastenden Situation zu geben.

**»Wo es um Leben und Tod geht, hat KI nichts zu suchen.«**

Falsch: Gerade da, wo schnell richtige Entscheidungen notwendig sind, leistet KI wertvolle Hilfe. Überall dort wo die Informationslage komplex ist, wo großer Zeitdruck herrscht oder die Rahmenbedingungen ungünstig sind, passieren die meisten menschlichen Fehler. Ein KI-System, das als zweites Paar Augen dient und darauf hinweist, dass etwas übersehen wurde, ist sehr nützlich. Es sortiert die Informationen nach Wichtigkeit und unterstützt den Arzt.

**[www.mevis.fraunhofer.de](http://www.mevis.fraunhofer.de)**

## QUANTENCOMPUTER: DRAMATISCHE FORTSCHRITTE IN DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ

Was nach Science Fiction klingt, ist in wenigen Jahren vielleicht schon Alltag. Erste Unternehmen haben bereits Quantencomputer-Modelle entwickelt und arbeiten mit Hochdruck daran, diese zur Marktreife zu bringen. Prof. Dr. Christian Bauckhage vom Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS erklärt die Hintergründe.

### **Quantencomputer werden bald in aller Munde sein. Was unterscheidet sie von herkömmlichen Computern?**

**Bauckhage:** Bei herkömmlichen, digitalen Computern ist die minimale Einheit der Repräsentation von Informationen das Bit, das entweder den Wert 0 oder 1 hat. In einem Quantencomputer hingegen werden einzelne Elektronen manipuliert – und die Berechnungen basieren auf den Prinzipien der Quantenmechanik. Ein sogenanntes Quantenbit ist 0 und 1 gleichzeitig. Es legt sich erst fest, wenn man nachmisst. Solange keine physikalische Messung an einem Qubit-System durch-

geführt wird, kann man nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit sagen, ob es 0 oder 1 ist. Das klingt bizarr und entspricht in keiner Weise unserer Alltagserfahrung. Aber Natur auf dem subatomaren Level funktioniert so. Wir müssen uns auf die Mathematik verlassen, die in dem Fall extrem komplex ist. Aber seit den 1930er Jahren ist die Menschheit in der Lage, diese Vorgänge mathematisch zu beschreiben.

### **Wie weit ist die Forschung heutzutage? Werden Quantencomputer bereits eingesetzt?**





*Prof. Dr. Christian Bauckhage*

**Bauckhage:** Eine kanadische Firma, die Quantencomputer produziert, hat diese an die NASA, die NSA und Google für 15 Millionen US-Dollar verkauft. VW Research hat diese Systeme, die dem Paradigma des adiabatischen Quantencomputings folgen, geleast. Gleichzeitig hat IBM eigene Quantencomputer, die wiederum dem Paradigma des Quantum Gate Computings folgen. Das ist im Wesentlichen der Versuch, logische Schaltungen digitaler Computer – also »AND«, »OR« und »NOT« – in die Quantenmechanik zu übertragen. Intel und Microsoft arbeiten ebenfalls an solchen Modellen. Google hat für Ende 2017 einen Quantencomputer mit 49 Quantenbits angekündigt, der die sogenannte Quanten-Supremacy erreicht, also wesentlich schneller rechnet als ein klassischer Computer. Quantencomputer sind nur noch ein Engineering-Problem. Sie müssen jetzt kleiner und billiger gemacht werden, das ist alles.

### **Was sind die Hürden und Herausforderungen bei der Herstellung von Quantencomputern?**

**Bauckhage:** Die Hürde ist die sogenannte Dekohärenz. Wenn ein Elementarteilchen gegen ein anderes stößt, ist das wie eine Messung, und der Effekt der beiden gleichzeitigen Grundzustände verschwindet. Die Schwierigkeit ist also, Geräte herzustellen, in denen Quantenzustände so isoliert werden können, dass sie an der Interaktion mit anderen Quantenteilchen gehindert werden. Weder Temperaturen, Schwingungen, mechanische Bewegungen noch Strahlungen dürfen von außen einwirken. Dafür braucht man sehr niedrige Temperaturen, schwingungsfreie Aufhängungen und mitunter Laser.

### **Das klingt sehr aufwendig. Welche Vorteile haben Quantencomputer gegenüber klassischen Computern?**

**Bauckhage:** Ein Qubit kann zwei Zustände haben. Zwei Qubits können insgesamt vier Zustände haben. Drei Qubits acht Zustände, vier 16 und so weiter. Das ist bei digitalen Computern ähnlich. Vier Bits können insgesamt 16 Zahlen darstellen – jedoch immer nur eine aus diesen 16 Zahlen. Vier Quantenbits stellen die 16 Zahlen jedoch gleichzeitig dar. Wenn man das mathematisch versteht, ist man in der Lage, exponentiell schwierige Probleme in sogenannter Polynomzeit zu lösen. Das klassische Beispiel ist Verschlüsselung: Wenn die Verschlüsselungszahlen groß genug sind, bräuchte ein digitaler Computer Milliarden Jahre, bis er eine Verschlüsselung knacken kann, er muss nämlich unfassbar viele Kombinationen nach und nach durchtesten. Ein Quantencomputer hingegen testet diese Kombinationen alle simultan durch. Statt Milliarden von Jahren dauert diese Berechnung nur ein paar Sekunden. Quantencomputing wird alles ändern. Keine Banktransaktion über das Internet wird mehr sicher sein.

### **Sie sehen da ein Gefahrenpotenzial?**

**Bauckhage:** Das Gefahrenpotenzial ist nicht, dass wir Quantencomputer nutzen können, sondern dass unsere Verschlüsselungsalgorithmen in Zukunft womöglich nicht ausreichen werden.

### **Beim maschinellen Lernen lösen Algorithmen Probleme, indem sie sehr viele Daten auswerten. Werden Quantencomputer diesen Vorgang folglich beschleunigen?**

**Bauckhage:** Maschinelles Lernen ist Statistik. Die Parameter von statistischen Modellen werden optimal an Daten angepasst. Auf klassischen Computern sind diese Optimierungsprobleme aufwendig und teuer. Dank starker, herkömmlicher Computer haben wir trotzdem große Fortschritte in dem Feld gemacht. Quantencomputer jedoch sind prädestiniert, diese Optimierungsprobleme sehr schnell zu lösen. Innerhalb kurzer Zeit werden Computer Prozesse lernen, für die sie



heute Monate brauchen. Wo heute isolierte Spezialprogramme zum Beispiel für Bilderkennung, für Spracherkennung, für Prozessplanung nötig sind, wird bald ein einziges Programm reichen. Der heutige Zustand kann vertausendfacht werden. Viel aufwendigere Probleme werden gelöst und dann verkauft werden. Wir werden dramatische Fortschritte in der Künstlichen Intelligenz sehen.

**Quantencomputer werden zunächst wohl großen Unternehmen vorbehalten sein. Diese wiederum verkaufen basierend auf ihren Systemen Problemlösungen als Dienstleistung?**

**Bauckhage:** Genau. Und das wird uns vor große Herausforderungen stellen. Wir werden beispielsweise in der Informatik-ausbildung und dem IT-Arbeitsmarkt Probleme bekommen. Für Leute, die theoretische Physik studiert haben, werden die Veränderungen gut sein, für alle anderen wird es schwierig. Denn Quantencomputing setzt andere Algorithmen und eine

sehr komplexe Mathematik voraus. In Deutschland gibt es bislang kaum Leute, die adäquat ausgebildet sind, um mit der Technologie zu arbeiten.

**Gibt es auch in Deutschland bereits Initiativen, die sich mit Quantencomputing auseinandersetzen?**

**Bauckhage:** Was Forschung angeht, war Deutschland schon immer gut aufgestellt, auch in diesem Fall. Zum Beispiel hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung zur Förderung der Quantentechnologien in Deutschland beschlossen, die nationale Initiative »Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen (QUTEGA)« einzurichten. Auch bei der Fraunhofer-Gesellschaft spielt die Forschung hierzu eine große Rolle. Ich persönlich kümmer mich um das Thema Quantencomputing für maschinelles Lernen. Wenn die Technologie in fünf Jahren ein Standard sein wird, müssen wir vorbereitet sein.

**[www.iais.fraunhofer.de](http://www.iais.fraunhofer.de)**

## **DIE KI IM KAMPF GEGEN CYBER-ANGRIFFE UND ANOMALIEN**

Die Digitalisierung und die vernetzte Industrie 4.0 bilden die Grundlage für komplexe Anwendungen und neue Geschäftsprozesse – und liefern zugleich Angriffsflächen für IT-basierte Angriffe jeder Art. Neue Erkenntnisse beim maschinellen Lernen helfen, die Früherkennung zu verbessern und fatale Folgen durch Cyber-Schäden zu verhindern.

Im Hinblick auf digitale Innovationen befinden wir uns heute mitten in einer mehr als rasanten Entwicklung. Alle Zeichen deuten auf eine immer umfassendere Vernetzung und Automatisierung hin – mithilfe von Technologien wie Internet der Dinge (IoT), Big Data, Blockchain, maschinellem Lernen und Künstlicher Intelligenz. Menschen, Unternehmen und Organisationen revolutionieren dabei ihre Prozesse, die gesamte Produktion und die dazugehörigen Arbeitsumgebungen. Diese Trends und Entwicklungen ermöglichen enorme Vorteile für Effizienz und Konnektivität, stellen die Anwender jedoch auch vor immer größere Herausforderungen – beispielsweise in Sachen Cybersicherheit.

Denn Datenvolumen und Datenkomplexität steigen in Riesenschritten. Manche Sicherheitsingenieure und Analysten sind angesichts einer exponentiell ansteigenden Anzahl von Cyber-Bedrohungen zunehmend überfordert. Für potenzielle Angreifer wird es immer einfacher, bösartige Attacken auf ihre gewählten Ziele durchzuführen – sie können auf eine Vielzahl öffentlich verfügbarer Hacking-Tools zurückgreifen und mit entsprechender Sachkenntnis zahllose fremde Rechner als sogenannte »Bots« nutzen, um ihre Vorgehensweisen zu verschleiern oder unerlaubte Zugriffe zu erhalten.



## Neue Sicherheit durch KI

Um diesen Gefahren der vernetzten Welt zu begegnen, wird es immer wichtiger, innovative Sicherheitstechnologien zu entwickeln. Diese müssen dabei helfen, potenzielle Bedrohungen und bösartiges Verhalten im Cyberspace effizienter zu analysieren und zudem besser zu verstehen – nur so können rechtzeitig sicherere Systeme und adäquate Schutzmechanismen bereitgestellt werden. Das Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit AISEC greift zu diesem Zweck auf intelligente Technologien der kognitiven Sicherheit zurück: Die Sicherheitsforscher setzen komplexe Algorithmen für Künstliche Intelligenz ein, um aktuelle IT-Systeme sowohl bei der Software- als auch der Hardware-Sicherheit fortlaufend zu verbessern. Durch die Nutzung von Techniken des maschinellen Lernens und der Verwendung neuronaler Netze können die neu entstehenden Cybersicherheitssysteme kontinuierlich aus Daten lernen, um sich dynamisch an Veränderungen der operativen Szenarien anzu-

passen – und so beispielsweise Anomalien zuverlässig aufzudecken.

## Erkennung, Analyse und Beurteilung von Cyber-Angriffen

Sicherheitsingenieure können mithilfe der Künstlichen Intelligenz ihre täglichen Aufgaben auf diese Weise sowohl in großem Maßstab als auch in hoher Komplexität bearbeiten. Das Fraunhofer AISEC entwirft und entwickelt hierzu skalierbare Sicherheitslösungen für die Erkennung, die Analyse und die rasche Beurteilung von Angriffsaktivitäten im Internet und bietet direkte Lösungen, neue Schutzmechanismen sowie Best-Practice-Anwendungen aus dem Bereich Machine Learning. Eine enge Zusammenarbeit und der stetige Austausch mit weiteren renommierten Sicherheitsexperten sorgen für die notwendige Weiterentwicklung KI-basierter Sicherheitstechnologien und führen zu maßgeschneiderten Lösungen für die individuellen Herausforderungen aller Kunden.

<http://s.fhg.de/cybersecurity>

## PARADIGMENWECHSEL: DEEP LEARNING AUF SUPERCOMPUTERN

Trotz einer Vielzahl von richtungsweisenden Entwicklungen muss das Machine Learning einen Paradigmenwechsel vollziehen – denn der aktuelle Bedarf an Daten und Rechenleistung zur Berechnung der Lernmodelle steigt rasanter als die Qualität der berechneten Lösungen, erklärt Dr. Janis Keuper vom Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM.

**Maschinelles Lernen ist zu einer Notwendigkeit geworden, seit unsere Ansprüche an IT-Systeme immens gestiegen sind.**

**Keuper:** Denken Sie an autonom fahrende Autos, die Verkehrssituationen richtig einschätzen müssen, an Spracherkennung oder das »Erkennen« des Inhalts eines Bildes. All das soll ein Computer beziehungsweise dessen Software mittlerweile zuverlässig beherrschen. Das aber wird kaum funktionieren, wenn Sie versuchen, mit klassischen Methoden menschliche Intelligenz in Algorithmen zu fassen. Sie müs-

sen auf die Vorteile datengetriebener Ansätze wie Deep Learning setzen. Hier wurden beeindruckende Erfolge erzielt, vor allem, wenn wir sie mit denen klassischer logikbasierter Systeme vergleichen.

**Kommt die Hardware dabei nicht an ihre Grenzen?**

**Keuper:** Maschinen lernen datengetrieben über eine Fülle von Informationen. Die dafür nötige Datenmasse führt dazu, dass der bisher übliche Einsatz von high-end shared-memory Multi-GPU-Systemen für die Berechnung eines mittelgroßen



*Dr. Janis Keuper*

Modells mehrere Tage benötigt. Das erreichbare Maximum an Rechenleistung in einem lokalen System kann mit den Anforderungen des maschinellen Lernens also kaum mehr mithalten. Deshalb sehe ich die Algorithmen des maschinellen Lernens vor einem grundlegenden Umbruch: Wir brauchen die Umstellung auf eine verteilte Berechnung auf heterogenen High-Performance-Computern, kurz HPC.

### **Diese Forderung fokussiert auf das Lernen an sich?**

**Keuper:** Genau. Der Rechenaufwand bezieht sich immer auf den eigentlichen Lernvorgang bei HPC. Wenn etwas gelernt ist, könnte die Software hinterher auch auf Ihrem Handy laufen. Aber das Lernen erfordert einen immensen Aufwand. Nehmen wir zum Beispiel die Automobilindustrie, die für ihre autonomen fahrenden Fahrzeuge eine Vielzahl von Algorithmen benötigt: Für das Fahren selbst, um Verkehrszeichen oder Fußgänger zu erkennen und so weiter. Diese Mo-

delle müssen vortrainiert werden, zunehmend auf Großrechnern. Am Fraunhofer ITWM arbeiten wir an Methoden, wie HPC für das Deep Learning besser und einfacher eingesetzt werden können. Ein zentrales Problem dabei ist die Frage, wie man die Unmengen an Daten überhaupt durch den eigentlichen Rechnungsvorgang sozusagen »durchschleusen« kann. Wir bewegen uns im Bereich von  $10^{10}$  bis  $10^{15}$  oder sogar  $10^{20}$  Rechenoperationen. Deshalb versuchen wir, auf quasi allen Ebenen den dafür nötigen Datentransport in den Griff zu bekommen – von mathematischen Modellen, die die Menge an Daten herunterrechnen über die Kommunikationsprotokolle bis hin zur Hardware, mit der wir den Transport beschleunigen. Das ist auch Gegenstand von Projekten wie dem »High Performance Deep Learning Framework«, das wir im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) durchführen.

**[www.itwm.fraunhofer.de/ml](http://www.itwm.fraunhofer.de/ml)**

## INTELLIGENT TRENNEN

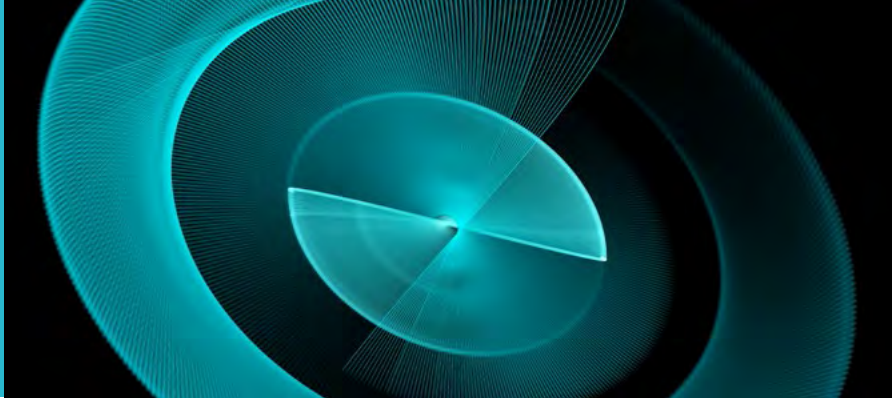
Bei der industriellen Herstellung von Lebensmitteln spielen Zentrifugen zur mechanischen Trennung von Substanzen eine bedeutende Rolle. Bislang waren für das optimale Einstellen der Maschinen Erfahrung, Gehör und Intuition eines Bedieners nötig. Nun ist es gelungen, dieses Wissen in ein Expertensystem unter Verwendung von neuronalen Netzen zu übertragen.

In der industriellen Praxis ist vieles deutlich schwerer als im Unterricht: Ob in der chemischen Industrie, der Pharmabranche, der Mineralölverarbeitung oder dem Lebensmittelbereich: Notwendige Separierungen verschiedener Stoffe sind oftmals deutlich komplizierter als die schulische Trennung beispielsweise von Feststoff und Flüssigkeit mithilfe maximal einstellbarer Fliehkraft – zudem müssen pro Stunde zehntausende Liter verarbeitet werden. »In der Regel gibt es hier mehrere Phasen des Separierens. Bei der Verarbeitung von Rohmilch beispielsweise müssen Milch, Sahne und diverse Feststoffe

sauber getrennt werden«, erklärt Sebastian von Enzberg vom Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM.

»Werden Separatoren nicht exakt eingestellt und fortlaufend angepasst, kann es zu Qualitätsverlusten und Produktschädigungen kommen.« Das korrekte Einstellen der Separatoren orientierte sich lange Zeit an Gespür und Gehör der jeweiligen Zentrifugen-Experten – meist der Hersteller oder Maschinenbediener. »Charakteristische Geräusche und Vibrationsmuster sind oft die einzigen Anhaltspunkte für einen optimalen Separationsprozess oder notwendiges Nachjustieren«, so von Enzberg.





## **Komplexe Sensorik und intelligente Datenverarbeitung**

Das Anbringen von Sensoren, die den Ablauf auch technisch überwachbarer gestalten, ist aufwendig und anspruchsvoll, da diese kontinuierlich im Millisekundenbereich Daten der Maschine liefern müssen, die zusätzlich noch an unterschiedlichsten Stellen während der Rotation gemessen werden. Das Forscherteam am Fraunhofer IEM hat nun Sensoren nicht nur an Gehäuse und Ablaufrohr, sondern auch im Inneren eines Rotationsbehälters angebracht – diese können bis zu 48 000 Messungen pro Sekunde vornehmen und weitergeben.

Doch die Fülle dieser Daten muss auch schnell und intelligent verarbeitet werden, so dass die Zentrifuge möglichst in Echtzeit gesteuert werden kann. »Ziel der intelligenten Datenverarbeitung ist es, die Wahrnehmungsleistung und Beurteilung eines menschlichen Bedieners nachzuempfinden«, betont von Enzberg. »Wir setzen deshalb auf maschinelles Lernen

und haben neuronale Netze sowie die Unzahl von gewonnenen Daten genutzt, um ein von uns programmiertes System zu schulen. Es kann Fehlerzustände erkennen und Strategien für die Anpassung von Maschinenparametern entwickeln, um dann die Maschine auch im laufenden Betrieb in Sekundenbruchteilen entsprechend feinzustjustieren.«

Dieses Wissen lässt sich auch auf die Handhabung unterschiedlicher Zentrifugen und Aufgaben übertragen. Dafür ist Voraussetzung, dass die Maschinen und Anlagen mit entsprechender Sensorik ausgestattet sind und die Datenbasis groß genug ist. Ist der Lernprozess einmal abgeschlossen, können Zentrifugen künftig auch autonom und fernüberwacht arbeiten.

[www.iem.fraunhofer.de](http://www.iem.fraunhofer.de)

# TRENDS & PROJEKTE

## Blick in die »Black Box«

Heutige Modelle der KI und des maschinellen Lernens sind groß (Gigabytes), komplex – und somit energiehungrig bei der Ausführung. Folglich können die Modelle zwar auf leistungsstarken Rechnern ausgeführt werden, aber nicht auf Embedded Devices, IoT-Geräten oder Smartphones. Das Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI entwickelt Techniken, um die Komplexität von neuronalen Netzen zu reduzieren und diese ohne Performance-Einbußen zu komprimieren. Beim Einsatz maschinellen Lernens in kritischen Anwendungen werden zudem Methoden entwickelt, um neuronale Netze tiefer untersuchen zu können – und so beispielsweise zu verifizieren, dass der Lösungsweg der KI sinnvoll ist und sie auf dem richtigen Weg zu richtigen Ergebnissen kommt: Der sogenannte Blick in die »Black Box«.

[www.hhi.fraunhofer.de](http://www.hhi.fraunhofer.de)

## Mikroskopiesystem »MCube«

Laut Schätzungen der WHO waren im Jahr 2015 etwa 214 Millionen Menschen weltweit von Malaria betroffen – mit ca. 438 000 Todesfällen. Die Krankheit wird durch Parasiten der Gattung Plasmodium hervorgerufen, die durch eine mikroskopische Untersuchung in Blutaussstrichen nachgewiesen werden können. Die mikroskopische Untersuchung kann jedoch sehr zeitaufwendig sein, wenn nur wenige Erreger in der Probe vorhanden sind und eine hohe Anzahl von Sichtfeldern manuell zu begutachten ist. Das Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS entwickelte mit »MCube« daher im Rahmen eines multidisziplinären Projekts der Fraunhofer-Zukunftsstiftung ein computergestütztes Mikroskopiesystem zur automatischen Aufnahme von Blutaussstrichen und zur Detektion von Malariaerregern basierend auf Verfahren der Künstlichen Intelligenz.

[www.iis.fraunhofer.de](http://www.iis.fraunhofer.de)

### Optimierte Energienetze

Bis 2020 sollen in Deutschland tausende Kilometer neuer Netze entstehen, um erneuerbare Energien zu nutzen. »Intelligente Netze« steigern Komplexität, Kosten und Anfälligkeit. Bei Planung und Betrieb komplexer Strom-, Gas- oder Fernwärmenetze hilft die Simulationssoftware MYNTS (Multiphysical Network Simulator) des Fraunhofer-Instituts für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI. Mit ihr kann etwa berechnet werden, wie Änderungen oder gar Ausfälle in Teilnetzen die übrigen Netzkomponenten beeinflussen bzw. alle Verdichterstationen eines Gasnetzes energieeffizient betrieben werden können. Eine neue Entwicklung betrachtet sektorübergreifende Netze und Flexibilisierungsoptionen. Das macht den Ausbau für Netzbetreiber flexibler und günstiger, entlastet die Umwelt und erhöht die Sicherheit.

[www.scai.fraunhofer.de](http://www.scai.fraunhofer.de)

### »DeepER«: Moderne Dokumentenanalyse

Technologien zur optischen Zeichenerkennung werden künftig von den Durchbrüchen im Bereich der KI profitieren. Dafür steht das Forschungsprojekt »Deep learning based optical character recognition« (DeepER). Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts arbeitet das Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS gemeinsam mit Partnern an einer neuen Software zur zuverlässigen Dokumentenanalyse. Dabei sollen lernende intelligente Systeme basierend auf Deep-Learning-Methoden für einen erheblichen Technologiefortschritt sorgen. Optical Character Recognition (OCR) wird unter anderem bei der Digitalisierung von Bibliotheksinhalten, Zeitungsarchiven oder Versicherungsdokumenten eingesetzt.

[www.iais.fraunhofer.de](http://www.iais.fraunhofer.de)

# TRENDS & PROJEKTE

## Intelligentes Behältermanagement

Ein Mangel an Informationen über die tatsächliche Höhe der Bestände in Behälterkreisläufen führt zu höheren Kosten und Lieferzeiten. Am Bedarf der punktgenauen Steuerung von Behältern in der Produktionsversorgung setzt das Forschungsprojekt »DProdLog« des Fraunhofer-Instituts für Integrierte Schaltungen IIS und der Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Supply Chain Services SCS an – und sorgt durch eine digitale, modulare Service-Plattform für eine Steigerung von Qualität und Umsatz. Smarte Kleinladungsträger mit s-net® Technologie ermöglichen datenbasierte Dienstleistungen, die zum Beispiel selbstständig Nachversorgungsprozesse auslösen, Engpässe in der Wertschöpfungskette erkennen, die Disposition anpassen und Mitarbeiter visuell informieren.

[www.scs.fraunhofer.de](http://www.scs.fraunhofer.de)

## Der »Griff-in-die-Kiste«

Experten des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA arbeiten daran, Machine-Learning-Verfahren in industrielle Anwendungen zu überführen. An der Optimierung des roboterbasierten »Griffs-in-die-Kiste«, also des automatisierten Vereinzelns von ungeordneten Werkstücken, setzt das gemeinsam mit der Universität Stuttgart durchgeführte Projekt »DeepGrasping« an. Bisherige Lösungen nutzen zur Objekterkennung wiedererkennbare Merkmale und feste Erkennungsmethoden. Nun sollen sich die nötigen Algorithmen (für Objekterkennung, Positionsschätzung, Greifen, Manipulation) autonom optimieren. Ein neuronales Netz lernt aus einer hohen Anzahl simulierter Griffe und verbessert sein Prozesswissen kontinuierlich und damit auch Berechnungszeiten, Erfolgsrate und Prozesssicherheit der Griffe.

[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)

## Prozessindustrie 4.0

Das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF entwickelt ein neues, digitales Monitoring-Verfahren, das Industrie-4.0-Techniken auch für die Prozessindustrie und Unternehmen beispielsweise aus der Chemie- und der Pharmaziebranche, der Stahl- und Zementherstellung und deren Zulieferer nutzbar macht. Betriebsdaten und Mitarbeiterwissen werden dabei effizient kombiniert.

Der neue Prozess soll die Anlagen für die Instandhaltung in drei Dimensionen vernetzen. Die erste Dimension betrifft den Life Cycle: Die Experten nutzen Dokumente aus der Anlagenplanung für den Betrieb der Maschine – zum Beispiel das dreidimensionale CAD-Modell, das bei der Planung der Produktionsanlage erstellt wird. Braucht ein Werker beispielsweise Informationen zu einer bestimmten Komponente, etwa zur Pumpe, so liest er über einen Tablet-PC den QR-Code der Pumpe ein – und bekommt alle vorhandenen Planungsdokumente zu dieser Kom-

ponente angezeigt. Zusätzlich kann er Betriebsdaten einsehen, etwa Temperatur- und Druckverläufe. Bei der Fehlerbehebung hilft der digitale Zwilling ebenfalls: Für jeden Fehler, den das Leitsystem meldet, wollen die Forscher eine interaktive Handlungsempfehlung erstellen.

Die zweite Vernetzungsebene ist die vertikale Vernetzung. Hierbei schicken die an der Anlage befindlichen Sensoren die von ihnen erhobenen Zustandsdaten in die Cloud. So lässt sich auch für solche prozesstechnischen Anlagen eine vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance) umsetzen. Die dritte Vernetzungsebene soll die laufende Produktion mit der Supply Chain verbinden. Muss bei einer Anlage beispielsweise eine Dichtung ausgetauscht werden, erhält der Mitarbeiter gleich die Information, ob sie im Lager vorrätig ist.

**[www.iff.fraunhofer.de](http://www.iff.fraunhofer.de)**



---

## Impressum

---

### Kontakt

Fraunhofer-Gesellschaft e.V.  
Kommunikation  
Hansastraße 27c  
80686 München  
<http://s.fhg.de/pressekontakt>

### Konzept:

Katrin Berkler, Henning Köhler,  
Roman Möhlmann

### Redaktion:

Janis Eitner (V.i.S.d.P.), Katrin Berkler,  
Henning Köhler, Roman Möhlmann,  
Anne-Marie Tumescheit

Gestaltung, Layout, Produktion:  
Markus Jürgens, Silke Schneider

### Mehr Informationen:

[www.bigdata.fraunhofer.de/ki](http://www.bigdata.fraunhofer.de/ki)

### Bildquellen

Cover, Rückseite, Seite 4: Markus Jürgens  
Seite 3: Fraunhofer | Bernhard Huber  
Seite: 4, 7, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 25  
iStockphoto  
Seite 9: Fraunhofer | IAIS  
Seite 11: Creative Commons CC  
Seite 17: Fraunhofer | Laura Ganske  
Seite 23: Fraunhofer | ITWM

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V., 2017

