



// 20 Jahre KI am ZSW:  
Pionierarbeit mit Wirkung

// 20 years of AI at the ZSW:  
pioneering work with impact

# // 20 Jahre KI am ZSW: Pionierarbeit mit Wirkung

// 20 years of AI at the ZSW:  
pioneering work with impact



// The AI team at the ZSW: Moritz Parth, Daniel Leukauf, Martin Felder, Nico Klar, Katharina Strecker, Kay Ohnmeiß, Marcel Zoll, Frank Sehnke und Anton Kaifel (from left to right). Not on the photograph: Linda Menger und Ursula Amann.

## WIE ALLES BEGANN

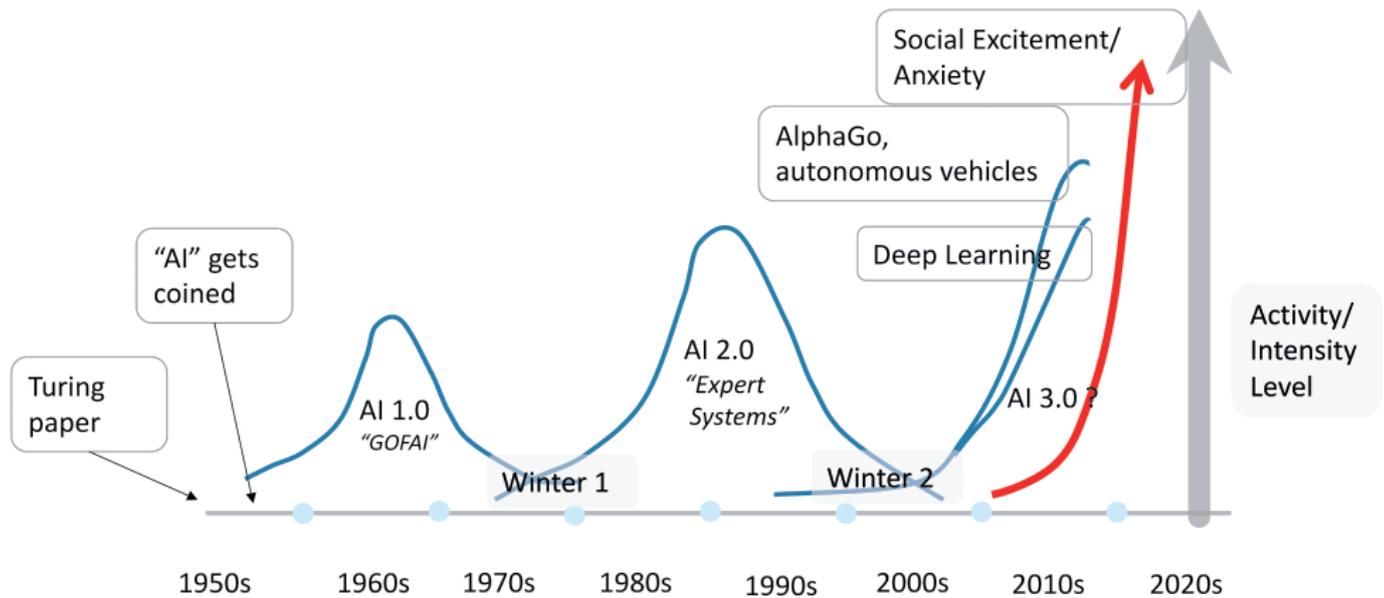
Künstliche Intelligenz (KI) war schon immer ein Thema, das die Fantasie der Menschen beflügelte. Im Jahr 1970 erklärte Marvin Minsky, der „Vater der KI“, dass in wenigen Jahren Maschinen Shakespeare lesen würden. Mit seiner Prognose lag er nicht ganz falsch. Künstliche Intelligenz hat längst alle Bereiche erobert: Selbstlernende Maschinen komponieren, malen, schreiben Gedichte, erkunden das Universum und entschlüsseln die menschliche DNA. Nicht nur für Musikfans war die Schlagzeile eine Überraschung: Ludwig van Beethovens 10. Sinfonie – die „Unvollendete“ – wurde fast 200 Jahre nach dem Tod des großen deutschen Komponisten und Pianisten vollendet und zur Uraufführung gebracht. Zu Ende komponiert wurde das Werk mittels Künstlicher Intelligenz.

## HOW IT ALL BEGAN

Artificial intelligence (AI) has always been a subject which has captured the human imagination. Marvin Minsky, the “father of AI”, said that machines would be reading Shakespeare in a few years. That was in 1970. He was not entirely wrong in his prediction. Artificial intelligence has long since penetrated all aspects of life, with self-learning machines composing, painting, writing poetry, exploring the universe and decoding human DNA. The headline came as a surprise – and not just for music fans: Ludwig van Beethoven’s 10th symphony – the “Unfinished” – had been completed and performed for the first time almost 200 years after the death of the great German composer and pianist. The composition had been finished using artificial intelligence.

// Historie der KI-Entwicklung in den letzten Jahrzehnten. 1989 hat das ZSW begonnen, neuronale Netz-Modelle in der Meteorologie- und Atmosphärenforschung zu entwickeln und anzuwenden.

// History of the development of AI in recent decades. The ZSW began to develop and apply neural network models in meteorological and atmospheric research back in 1989.



Im Sommer sorgte eine Nachricht aus der Medizin für Aufsehen: Der Grundbaustein des Lebens wurde entschlüsselt. Britischen Forschern und Forscherinnen ist es mithilfe von Künstlicher Intelligenz gelungen, die Faltung von Proteinen präzise vorherzusagen und damit, wie Leben funktioniert. Eine frei zugängliche Datenbank, die viele Tausend Proteinstrukturen enthält, soll für Durchbrüche in der medizinischen Forschung genutzt werden, aber auch für die Pflanzenzucht – oder für die Entwicklung von Bakterien, die Plastik in der Umwelt zersetzen können. Die Reihe der Erfolgsmeldungen über die kreative Anwendung von Künstlicher Intelligenz lässt sich beliebig fortsetzen. Vieles, an das wir früher kaum zu denken wagten, ist heute mit KI möglich.

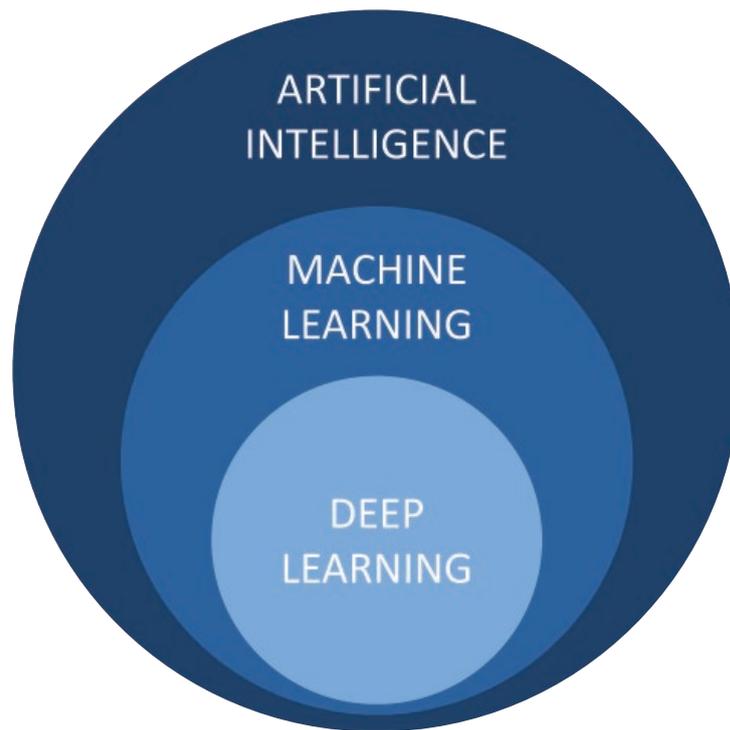
Medical research news caused a stir in the summer, with reports claiming that the basic building block of life had been decoded. With the help of artificial intelligence, British research scientists have managed to arrive at precise predictions of the folding of proteins and therewith the mechanics of life. There are plans to use a freely accessible database containing many thousands of protein structures for breakthroughs in medical research but also for the cultivation of plants – or for the development of bacteria which can degrade plastic in the environment. There is an inexhaustible supply of success stories about the creative application of artificial intelligence, and it emerges very clearly that many things which we hardly dared think of in former times are now possible with AI.



// Foto: Adobe Stock / monsitj

Künstliche Intelligenz ist seit den 50er-Jahren ein Forschungsthema, beginnend mit der symbolischen KI, der sogenannten „Good Old-Fashioned Artificial Intelligence“ (GOFAI). Zu dieser Zeit waren Computer jedoch noch nicht in der Lage, mit KI reale Probleme zu lösen. Erst im Zuge der Entwicklung von günstigen und schnellen Computern sowie dem Zugang zu großen Datenmengen mit Beginn des 21. Jahrhunderts erfolgte der eigentliche Durchbruch für die KI. Lange bevor der große Hype um die KI einsetzte, forschte das ZSW schon an der Entwicklung von intelligenten Lösungen für die Anwendung von erneuerbaren Energien. Damit war das ZSW ein Pionier in diesem zentralen Zukunftsfeld und Innovator für KI-Anwendungen im Bereich erneuerbare Energien, Meteorologie und Atmosphärenphysik.

Artificial intelligence has been a research subject since the 1950s, starting with symbolic AI, also known as “Good Old-Fashioned Artificial Intelligence” (GOFAI). At that time, however, computers were not yet capable of solving real-world problems with AI. Only with the development of affordable and fast computers and access to large amounts of data at the beginning of the 21st century did the real breakthrough for AI take place. Long before there was a big hype about AI, the ZSW was already researching the development of intelligent solutions for the use of renewable sources of energy. This made the ZSW a pioneer in this field of key significance for the future and a driver of innovation in renewable energy, meteorology and atmospheric physics.



## KÜNSTLICHE INTELLIGENZ – DEFINITION

### DEFINITION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

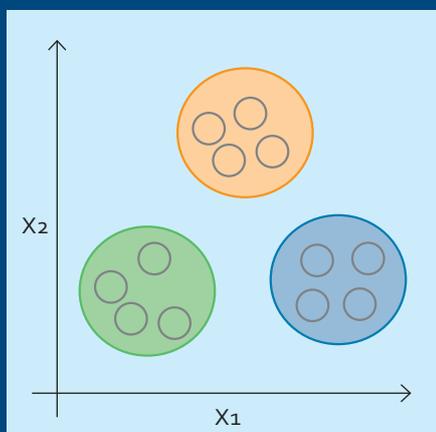
Künstliche Intelligenz oder Artificial Intelligence ist ein Überbegriff und beschreibt den Ansatz, mit dem Maschinen intelligentes menschliches Verhalten auf der Basis von Daten erlernen, um Aufgaben zu lösen, die mit klassischen Methoden nicht lösbar sind. Machine Learning wiederum ist eine Technologie und ein Teilgebiet der Artificial Intelligence. Dazu werden Daten (Bilder, Videos, Audiodateien oder Messdatenzeitreihen) in ein Programm eingespeist, das mithilfe von Algorithmen die Daten analysiert, darin Muster erkennt und so präzise Vorhersagen ermöglicht und Entscheidungen treffen kann. Die Besonderheit ist, dass Machine-Learning-Programme in der Lage sind, ohne weiteren menschlichen Eingriff aus Daten komplexe und nichtlineare Zusammenhänge zu erkennen. Der dritte Begriff in diesem Themenfeld ist Deep Learning. Dabei handelt es sich um eine spezielle Methode der Informationsverarbeitung. Als technische Grundlage des Deep Learnings dienen künstliche neuronale Netze, die während des Lernvorgangs immer wieder neu verknüpft werden. Die Funktionsweise ist vom Lernen im menschlichen Gehirn inspiriert. Auf Basis vorhandener Informationen und des neuronalen Netzes kann das System das Erlernte immer wieder mit neuen Inhalten verknüpfen und dadurch erneut lernen. Entscheidungen werden bestätigt oder in einem neuen Anlauf geändert. Deep Learning eignet sich für alle Anwendungen, bei denen große Datenbestände zur Verfügung stehen, aus denen sich Muster und

Artificial intelligence is an umbrella term referring to the use of machines to learn intelligent human behaviour on the basis of data in order to solve problems which cannot be solved using classic methods. Machine learning is, in turn, a technology and branch of artificial intelligence. This involves feeding data (images, videos, audio files or measurement time series data) into a program which uses algorithms to analyse the data and recognise patterns in the data, thereby enabling precise predictions and decisions to be made. The point of note is that machine learning programs are able to identify complex and non-linear relationships from data without further human intervention. The third term in this section is deep learning. This is a special method of data processing. Deep learning is based on artificial neural networks which are constantly forming new connections as they learn. The way it works is inspired by the process of learning in the human brain. On the basis of existing information and neural networks, the system can keep linking what it has learned with new content, allowing it to learn more. Decisions will be confirmed or changed as the process is repeated. Deep learning is suitable for all applications where large amounts of data are available as a source of patterns and models. There are basically three different approaches in the field of machine learning. There is unsupervised learning which is used to recognise patterns in large amounts of data automatically and to cluster the data according

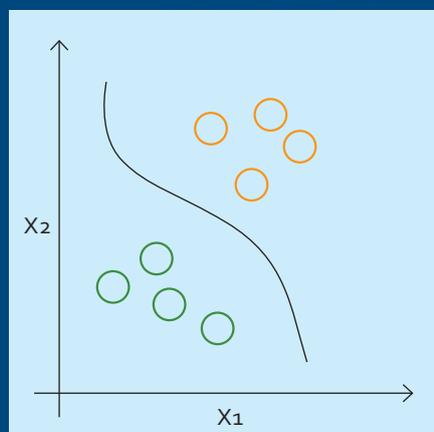
Modelle ableiten lassen. Im Bereich des maschinellen Lernens gibt es grundsätzlich drei unterschiedliche Ansätze: Das unüberwachte Lernen dient dazu, in großen Datenmengen automatisch Muster zu erkennen und die Daten entsprechend zu clustern. Beim überwachten Lernen wird ein Modell trainiert, das den Zusammenhang zwischen den Eingangsdaten und den Zieldaten beschreibt. Dies kann auch komplexer Natur sein. Das sogenannte Verstärkungslernen wird meist für Optimierungsaufgaben eingesetzt. In diesem Fall versucht ein Modell, das Verhalten eines Systems anhand von Beispielen zu erlernen und zu optimieren. Nach jedem Modelllauf wird das Ergebnis mit dem realen Verhalten des Systems verglichen und aus der Differenz ein positiver oder negativer Belohnungsterm (Reward) abgeleitet. Mit dem Reward wird das Modell dann aktualisiert und gleichzeitig werden neue Beispiele präsentiert.

gly. Then there is supervised learning in which a model is trained which characterises the relationship between the input data and the target data. This can also be of a complex nature. The approach called reinforcement learning is mostly used for optimisation purposes. This is where a model tries to learn and optimise the actions of a system on the basis of examples. After each model run, the result is compared with the real behaviour of the system and a positive or negative reward is derived from the difference. The model is then updated with this reward and new examples are presented.

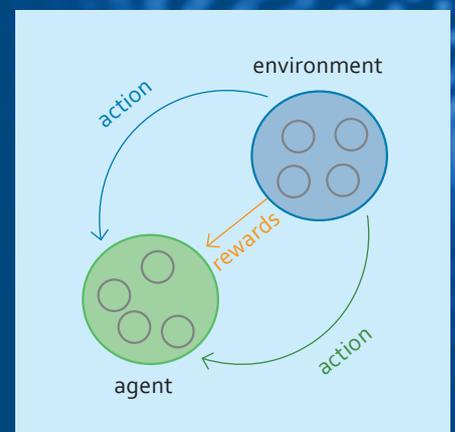
### UNSUPERVISED



### SUPERVISED

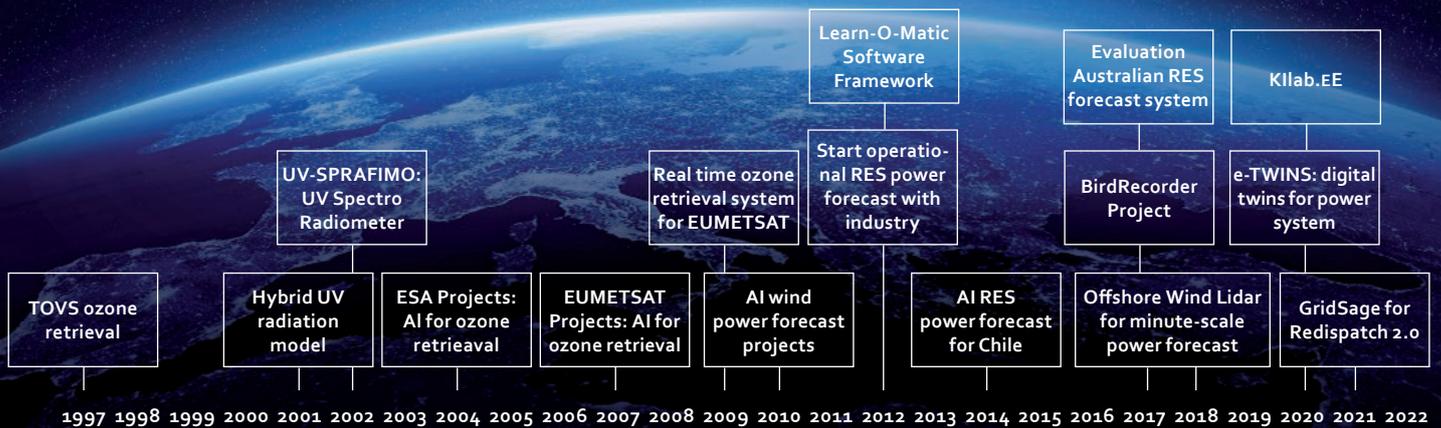


### REINFORCEMENT



# // Focus Report

// Foto: Adobe Stock / Lev



## KI ALS SCHLÜSSEL FÜR INNOVATION

### AI AS THE KEY TO INNOVATION

Künstliche Intelligenz vereinfacht Arbeitsabläufe, ermöglicht präzisere Prognosen und schafft neue Geschäftsmodelle. Sie erlaubt schnellere Entscheidungen aufgrund einer besseren Analyse von Daten und erhöht die Anpassungsfähigkeit von Unternehmen an Marktveränderungen durch Echtzeitinformationen sowie Vorhersagen jenseits menschlicher Fähigkeiten. KI schafft für Unternehmen also weit mehr als Effizienz – sie ist ein Schlüssel zu erhöhter Wettbewerbsfähigkeit und Innovationskraft.

Da sich die KI-Technologie rasant entwickelt, war es für die Forschung am ZSW wichtig, schnell von der Experimentierphase zur Implementierung überzugehen. Seit mehr als 20 Jahren wird KI am ZSW eingesetzt, um die Energiewende voranzubringen. Zuerst standen Anwendungen in den Bereichen der Meteorologie und Atmosphärenphysik im Vordergrund. In den Jahren 2006 bis 2010 hat das ZSW mehrere internationale Projekte für die European Space Agency (ESA) und die Europäische Organisation für die Nutzung von meteorologischen Daten (EUMETSAT) geleitet, um mit Methoden des maschinellen Lernens unter anderem neue Einblicke in die Veränderung der Ozonschicht zu bekommen. Im Rahmen von nationalen Projekten wurden anschließend Methoden für Einspeiseprognosen von erneuerbaren Energien entwickelt und zusammen mit der Industrie in die kommerzielle Anwendung überführt. Parallel werden bis heute vielfältige Forschungs- und Industrieprojekte betreut, um beispielsweise Einspeiseprognosen für erneuerbare Energien auf ein neues Gütelevel zu heben. In den vergangenen Jahren hat sich das Anwendungsfeld erweitert und die Anzahl der Projekte wesentlich erhöht. Unsere Forschungen erstrecken sich auf drei Bereiche: Netzintegration, erneuerbare Energien und Energiesystem, Produktionsforschung und Prozessoptimierung sowie Qualitätssicherung und Betriebssicherheit.

Die Einsatzbereiche sind vielseitig: Angefangen bei der Modellierung und Optimierung von Fertigungsprozessen für Batterien, CIGS-Dünnschichtsolarzellen und Brennstoffzellen über die Auswertung von Satellitendaten für die Erhebung von Photovoltaik-Potenzialen bis zum Monitoring von Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen. Die nächste Stufe ist die Entwicklung von selbstlernenden digitalen Zwillingen für ein zukünftiges Energiesystem.

Artificial intelligence simplifies working processes, enables greater precision in forecasting, and creates new business models. It allows decisions to be made more quickly based on better analysis of data, increases the ability of companies to adapt to market changes through real-time information, and enables predictions beyond human capabilities. So AI offers companies far more than efficiency – it is the key to increased competitiveness and innovative strength.

AI technology is developing rapidly therefore it was important for the research at the ZSW to move quickly from the experimental phase to the implementation stage. AI has been used at the ZSW for more than 20 years to advance the energy transition. The focus initially was on applications in meteorology and atmospheric physics. The ZSW collaborated in several international projects for the European Space Agency (ESA) and the European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) from 2006 to 2010 with a view to using machine learning methods to gain new insights into various subjects, such as the change in the ozone layer. Methods for power forecasts for renewable energy sources were then developed in national projects and deployed in commercial applications in collaboration with industry. Many different research projects and industrial ventures are being supervised to this day. An example target of these parallel undertakings is to raise power forecasts for renewable energies to a new quality level. In recent years, the field of application has expanded and the number of projects has increased significantly. Our research work covers three areas: grid integration, renewable sources of energy and energy systems; production research and process optimisation; quality assurance and operational safety.

There is a wide range of potential applications, starting with the modelling and optimisation of manufacturing processes for batteries, CIGS thin-film solar cells and fuel cells, and moving to the processing of satellite data for the investigation of photovoltaic potential right through to the monitoring of wind energy and photovoltaic systems. The next stage is the development of self-learning digital twins for a future energy system.

# // Focus Report



// Foto: Adobe Stock / conceptcafe

## NETZINTEGRATION UND ENERGIESYSTEM

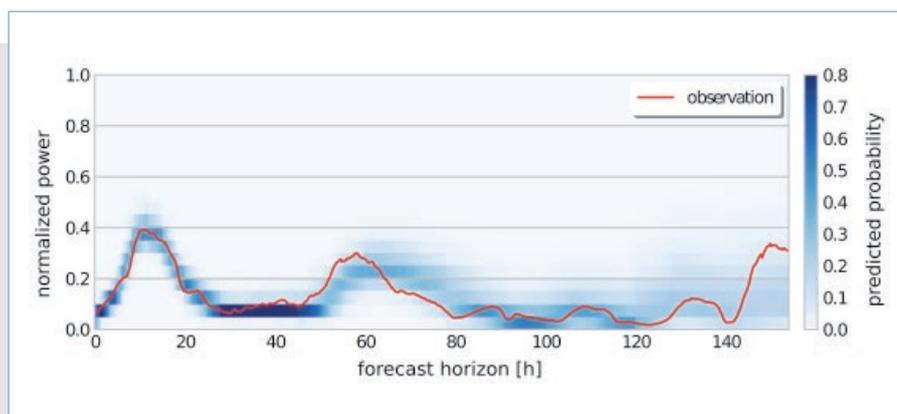
### POWER GRID INTEGRATION AND ENERGY SYSTEM

#### WETTERDATEN SINNVOLL NUTZEN

Der Klimaschutz erfordert eine schnellstmögliche Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien. Da die Stromerzeugung aus Windenergie und solarer Einstrahlung vom Wetter abhängig ist, bedarf es möglichst präziser Erzeugungsprognosen, um Angebot und Nachfrage in der Energieversorgung jederzeit in der Balance halten zu können. Das kann nur mit KI geleistet werden, die mit numerischen Wettermodellen Vorhersagen für Zeiträume bis zu zwei Wochen treffen kann. Eine Wettervorhersage ist aber noch keine Einspeisevorhersage für Solar- und Windenergieanlagen. Hier kommen KI-Methoden ins Spiel: Sie werden eingesetzt, um mithilfe von numerischen Wettermodellen die Wind- oder Photovoltaik-Leistung in unterschiedlichen Aggregationsstufen zu prognostizieren. Diese reichen von Einzelanlagen über Regionen bis hin zu Ländern. Zusätzlich können sie Informationen aus früheren Erträgen sowie Echtzeit-Messwerte relevanter Einflussparameter berücksichtigen. Von meteorologischen Sensoren über Wind-Lidar-Messungen bis hin zu Wolkenkameras kann die KI alle relevanten Informationsquellen einbeziehen. So können Prognosen mit KI die Eintrittswahrscheinlichkeit von Wetterverläufen vorhersagen und damit die Reserveleistung im Stromnetz optimieren. Das ZSW ist an diesen Entwicklungen mit verschiedenen Projekten beteiligt, sei es durch eigene Wettermodellläufe und Prognosen für das WindForS-Windtestfeld, die Integration von Lidar-Messungen in Offshore-Windparks oder Photovoltaik-Prognosen für den Redispatch 2.0 (Regelungen zum Umgang mit Engpässen im Stromnetz).

#### WISE USE OF WEATHER DATA

When it comes to the protection of the environment, the fastest possible action is required to change over to renewable sources in our energy supply. The generation of electricity from wind energy and solar radiation depends on the weather, therefore there is a need for maximum precision in generation forecasts in order to be able to keep energy supply and demand in balance at all times. This can only be achieved with AI which has the ability to make forecasts for periods of up to two weeks using numerical weather prediction models. It must be said, however, that a weather forecast is not a power forecast for solar and wind power systems. This is where AI methods come into play, using weather prediction models to forecast wind power or photovoltaic power at different aggregation levels. They range from individual systems and regions right through to whole countries. They can also take account of previous yield data and real-time measurements of relevant influencing factors. From meteorological sensors and lidar wind measurements right through to all-sky cameras, AI can include all the relevant sources of information. Forecasts with AI can therefore predict the probability of the occurrence of weather patterns, for example, thereby optimising the reserve power in the grid. The ZSW is following these developments in its involvement in various projects, whether by running its own weather forecast models for the WindForS wind test site, integrating lidar measurements at offshore wind farms, or supplying photovoltaic power forecasts for the Redispatch 2.0 scheme (policy aimed at the management of bottlenecks in the power grid).



// Vorhersage der Windleistung eines größeren Gebietes mit Prognoseunsicherheit (blaue Schattierung).  
// Wind power forecast for a relatively large area with problems of uncertainty (blue shading).



# Redispatch 2.0

// Foto: Adobe Stock / gopixa

## HOHE TRANSPARENZ IM NETZ MIT REDISPATCH 2.0

Das am ZSW entwickelte System GridSage kann mithilfe von KI die Versorgungssicherheit im Stromnetz erhöhen. Seit Oktober 2021 ist die Kraftwerkseinsatzplanung in Deutschland gesetzlich neu geregelt. Mit dem Redispatch 2.0 fallen nicht mehr nur Großkraftwerke unter das Engpassmanagement, sondern auch Photovoltaik- und Windenergieanlagen, Laufwasserkraftwerke sowie Blockheizkraftwerke mit installierten Leistungen größer 100 Kilowatt/Stunde. Dies stellt Verteilnetzbetreiber, die auf Mittel- und Niederspannungsebene für die Versorgungssicherheit im Stromnetz verantwortlich sind, vor neue Herausforderungen. Sie müssen nun Leistungsprognosen für alle Erzeugungsanlagen, die größer als 100 Kilowatt sind, in ihrem Netz liefern. Dabei hilft GridSage.

KI-Modelle lernen dabei aus vorhandenen Daten, wie viel Leistung eine Anlage bei welchen Wetterbedingungen erzeugt. Anhand dieser Daten liefert GridSage operative Prognosen für alle relevanten Erzeugungsanlagen für die nächsten 36 Stunden. Die hochauflösenden Prognosen werden den Netzbetreibern on demand zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig generiert GridSage weitere Prognosen, die den Energieverbrauch von Großkunden, die Photovoltaik-Überschusseinspeisung von Prosumern oder den Energiefluss an Kopplungspunkten zu den überlagerten Netzen abbilden. Verteilnetzbetreiber erhalten so mithilfe von Künstlicher Intelligenz einen umfangreichen Einblick in ihre Netze. Durch das hohe Maß an Transparenz können diese effizienter ausgelastet und der Netzausbau optimiert werden. Digitalisierung und KI ermöglichen somit eine kosteneffektive Beschleunigung der Energiewende.

## HIGH TRANSPARENCY WITH REDISPATCH 2.0

The GridSage system developed at the ZSW can guarantee the power supply in the grid with the help of AI. New laws have been in force in Germany since October 2021 on power plant scheduling. Under Redispatch 2.0 the congestion management no longer applies solely to large power plants but also to photovoltaic systems, wind turbines, run-of-river power plants and cogeneration power plants with installed capacities of more than 100 kilowatts per hour. This poses new challenges for distribution network operators who are responsible for the security of supply in the power grid at medium-voltage and low-voltage level. They now have to deliver power forecasts for all generating units in their grid exceeding 100 kilowatts. GridSage helps with this requirement.

AI models learn from existing data how much power a system will generate in any given weather conditions. Using this data, GridSage provides operational forecasts for all the relevant generating units for the next 36 hours. The high-resolution forecasts are made available to the grid operators on demand. At the same time, GridSage generates further forecasts which plot the energy consumption of major customers, the surplus photovoltaic output fed in by prosumers, or the energy flow at coupling points to the higher-level grids. The use of artificial intelligence provides distribution system operators with great insight into their networks. The high degree of transparency allows greater efficiency in the utilisation of capacity and optimisation of network expansion. Digitisation and AI are therefore enabling a cost-effective acceleration of the energy transition.



#### ZWILLINGSTECHNOLOGIE FÜR DAS ENERGIESYSTEM

Mit der steigenden Zahl von Erneuerbare-Energie-Systemen, aber auch von batterieelektrischen Fahrzeugen und Wärmepumpen wächst der Koordinierungsaufwand im Energiesystem stetig. Durch die Digitalisierung lassen sich Daten zwar immer günstiger und effizienter erfassen und übermitteln, doch die riesigen Datenmengen führen auch zu einer Datenflut. Der Einsatz von digitalen Zwillingen (DZ) hilft, die Datenflut zu strukturieren, zu vereinheitlichen und gleichzeitig das volle Potenzial für neue digitale Anwendungen auszuschöpfen. Dabei simuliert der digitale Zwilling eines technischen Gerätes seinen realen Partner quasi in Echtzeit und erlaubt damit Einblicke in dessen Zustand.

Das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt e-TWINS hat sich zum Ziel gesetzt, das elektrische Energiesystem der Zukunft als zelluläres, hierarchisches System von selbstlernenden digitalen Zwillingen abzubilden. Ein digitaler Zwilling kann mehrere Wind- oder Photovoltaik-Anlagen gleichzeitig spiegeln. Die DZ sind dabei über eine gemeinsame Softwareplattform miteinander verbunden, sodass sie Daten gegenseitig austauschen können. Sie verwenden aktuelle Messdaten, um externe Systembedingungen und interne Systemzustände zu erfassen. So werden mit KI-Methoden Vorhersagen verbessert, langfristige Veränderungen abgebildet und Abweichungen bei der Modellierung korrigiert. Das ZSW entwickelt dabei Datenzwillinge von Photovoltaik-Anlagen und Batteriesystemen sowie Methoden zur optimalen Bewirtschaftung von Erneuerbare-Energie-Systemen. Die Partner in dem Verbundprojekt steuern DZ von Windkraftanlagen und deren Teilkomponenten bei.

#### TWIN TECHNOLOGY FOR THE ENERGY SYSTEM

With the increasing number of renewable energy systems and rising sales of battery electric vehicles and heat pumps, the amount of coordination needed in the energy system is constantly growing. Digitisation does mean that data can be recorded and transmitted more and more cheaply and efficiently but the huge amounts of data also lead to a situation of overload. The use of digital twins is a helpful way of structuring and harmonising the flood of data and at the same time exploiting the full potential for new digital applications. The digital twin of a technical device simulates its real partner in real time, as it were, thereby allowing insights into its status.

Funded by the Federal Ministry for Economic Affairs, the e-TWINS project has set itself the goal of mapping the electrical energy system of the future as a cellular, hierarchical system of self-learning digital twins. A digital twin can mirror several wind turbines or photovoltaic systems at the same time. The digital twins are connected to each other through a shared software platform, allowing them to exchange data with each other. They use current measurement data to record external system conditions and internal system status data. This approach and the use of AI methods will allow predictions to be improved, long-term changes to be mapped, and anomalies in the modelling to be corrected. The ZSW is developing digital twins of photovoltaic systems and battery systems as well as methods for the optimum management of renewable energy systems. The partners in the joint project contribute digital twins of wind turbines and their components.

## PRODUKTIONSFORSCHUNG UND PROZESSOPTIMIERUNG

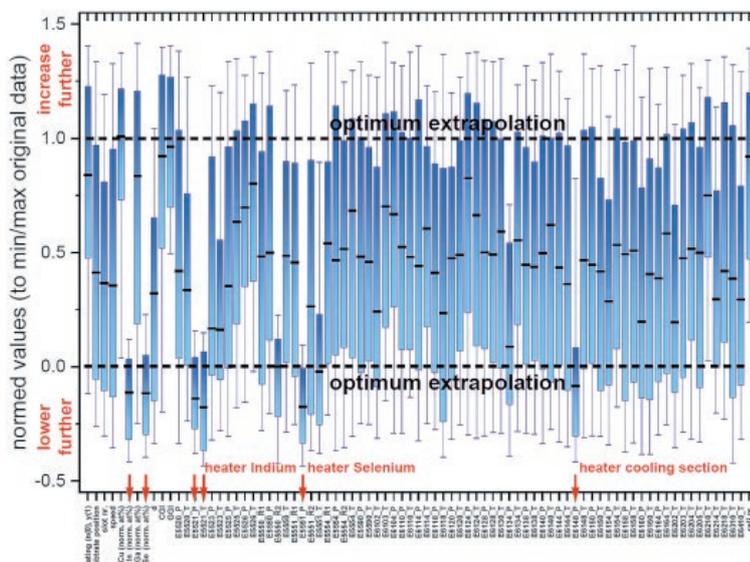
### PRODUCTION RESEARCH AND PROCESS OPTIMISATION

#### KI FÜR DIE FERTIGUNGSOPTIMIERUNG VON SOLARZELLEN

Mit KI lassen sich auch Fertigungsprozesse für Dünnschichtsolarmodule, Batterien und Brennstoffzellen verbessern. So beispielsweise bei der Produktion von CIGS-Zellen (Solarzellen mit Absorbern aus dem Werkstoff Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid), die mithilfe von thermischer Koverdampfung der Bestandteile im Hochvakuum hergestellt werden. Dabei ist es wichtig, dass die verschiedenen Bestandteile im richtigen Mischungsverhältnis in der Schicht eingebaut werden, denn die Zusammensetzung der Schicht beeinflusst maßgeblich den Wirkungsgrad. Mit den am ZSW entwickelten KI-Methoden werden verschiedene Parameter wie Photostrom, Leerlaufspannung, Füllfaktor und Wirkungsgrad analysiert. Die KI-Modelle bewerten die Wichtigkeit der Parameter in Bezug auf den Wirkungsgrad der Solarzellen. Sie liefern unter anderem wichtige Vorschläge zur Reduzierung der Indium- und Selen-Mengen in den Schichten der Solarzellen, zur Anpassung der Heizleistung der entsprechenden Quellen sowie der Abkühlstrecke. Die von der KI vorgeschlagenen Änderungen führten zu einer besseren Zusammensetzung der aktiven Schichten und damit zu einem höheren Wirkungsgrad der CIGS-Solarzellen.

#### AI FOR THE OPTIMISATION OF SOLAR CELL PRODUCTION

Manufacturing processes for photovoltaic thin-film modules, batteries and fuel cells can also be improved with AI. One example is the manufacture of CIGS cells (solar cells with absorbers made of copper indium gallium selenide) which are produced by means of thermal co-evaporation of the components in a high vacuum. It is important that the various components are incorporated in the layer in the correct ratio because the composition of the layer has a significant bearing on the degree of efficiency. The AI methods developed at the ZSW are used to analyse various parameters, such as photocurrent, open-circuit voltage, fill factor and efficiency. The AI models assess the importance of the parameters in relation to the efficiency of the solar cells. They play an important role in various ways, suggesting how the amounts of indium and selenium in the layers of the solar cells might be reduced, for example, and how the heating of the relevant sources and of the cooling section might be adjusted. The changes proposed by the AI system led to a better composition of the active layers and therefore to a greater efficiency of the CIGS solar cells.



// KI-basierte Optimierung der Prozesse für die Herstellung von CIGS-Dünnschichtsolarmodulen. Die KI macht Vorschläge für die Parameteranpassungen, um den Wirkungsgrad zu steigern.  
// AI-based optimisation of production processes for CIGS thin-film solar cells. The AI suggests changes to the parameters which will increase the efficiency.

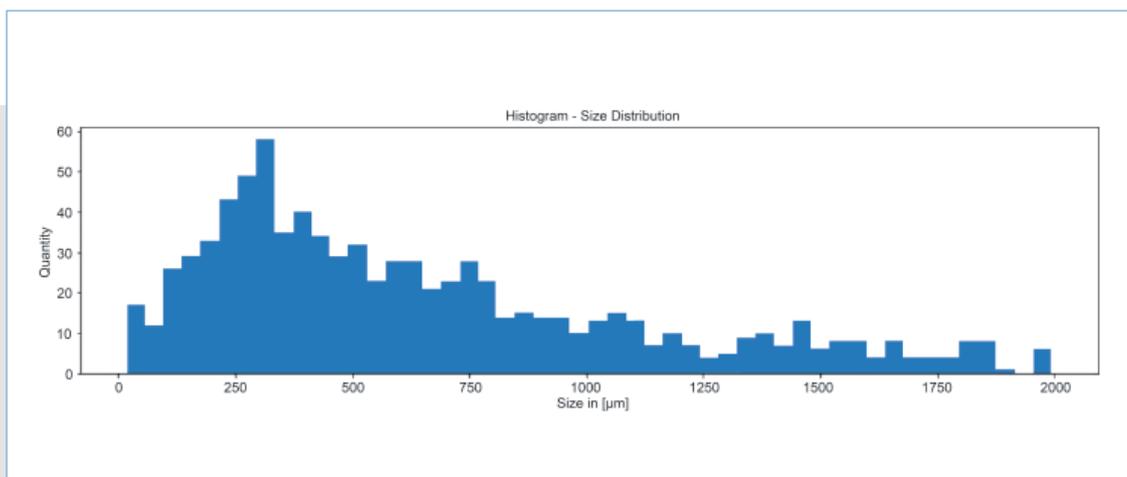


### KI UND BATTERIEZELLFERTIGUNG

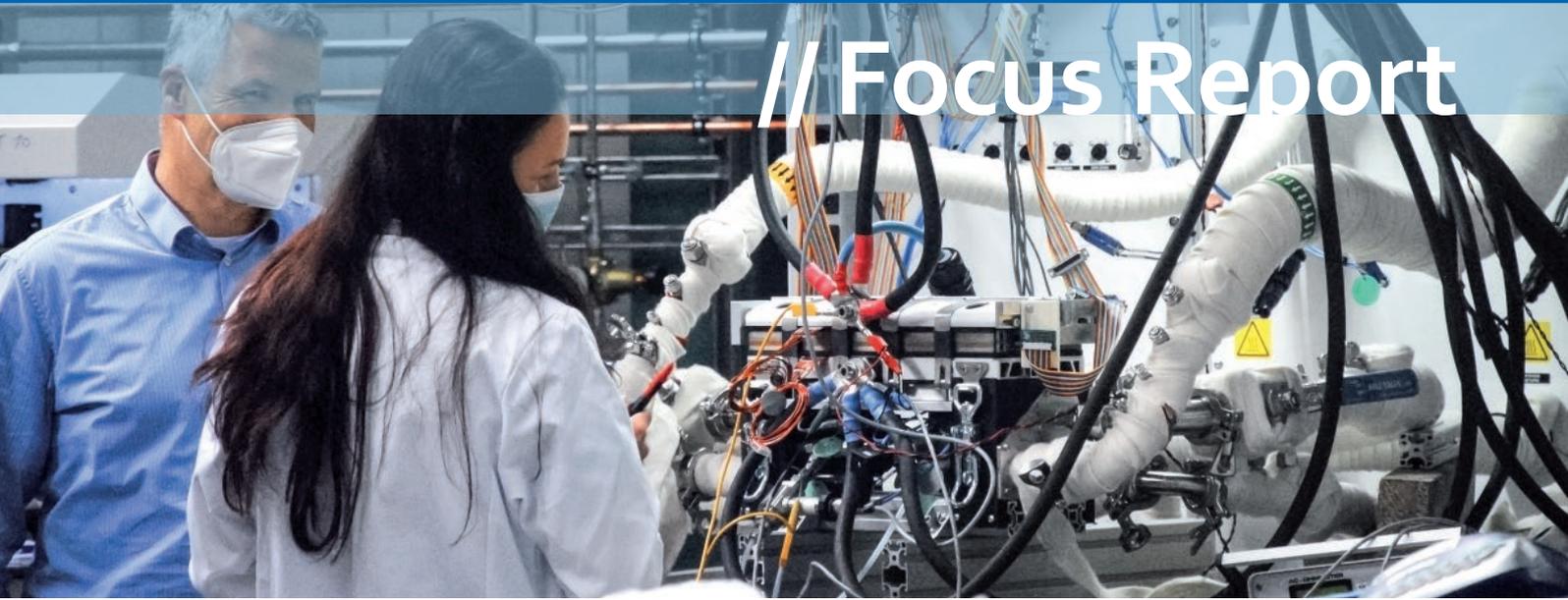
Im Themenfeld Batterien bringt das ZSW seine langjährige KI-Expertise im Projekt „Kontinuerliche, lösungsmittelfreie Elektrodenherstellung mit intelligenter Qualitätssicherung und Prozessüberwachung gekoppelt mit KI“ (KontEIPro) des Forschungsclusters Intelligente Batteriezellproduktion (InZePro) des Bundesforschungsministeriums ein. Am ZSW werden alle Produktionsschritte der Projektpartner durch KI-Modelle abgebildet und anschließend in selbstlernenden digitalen Zwillingen als Gesamtprozess modelliert und optimiert. Erste Ergebnisse zeigen, dass das Verhalten des eingesetzten Kneters für die Mischung des Kathodenmaterials bereits gut mit einem KI-Modell abgebildet wird, sodass Abweichungen vom Regelbetrieb sicher erkannt werden können. Gerade die ersten Arbeitsschritte wie Trockenmischen und Kneten stellen in KontEIPro eine Innovation dar, da keine Lösungsmittel eingesetzt werden. Das ZSW unterstützt die Partner von verschiedenen Fraunhofer-Instituten auch durch bildverarbeitende Informationsgewinnung. So werden aus REM-Aufnahmen Informationen zur Größenverteilung der Granulat-Partikel, zum Vermischungsgrad und zu weiteren produktrelevanten Eigenschaften extrahiert.

### AI AND BATTERY CELL MANUFACTURE

The ZSW is investing its many years of AI expertise in the field of batteries in the “KontEIPro” project (“Continuous, solvent-free electrode production with intelligent quality assurance and process monitoring coupled with AI”) run within the “InZePro” research cluster (“Intelligent Battery Cell Production”) of the German Federal Ministry of Education and Research. All the production steps of the project partners are reproduced by AI models at the ZSW and then modelled and optimised as an overall process by means of self-learning digital twins. Initial results show that the behaviour of the kneading machine used to mix the cathode material is already well mapped with an AI model, allowing reliable detection of any departures from normal operation. The first steps, such as dry mixing and kneading, constitute new ground in the KontEIPro project. The ZSW also assists the partners at various Fraunhofer institutes with information acquired through image processing. Information on the particle size distribution and the degree of mixing is extracted from SEM images, for example, as well as other product-related properties.



// Größenverteilung der Granulat-Partikel.  
// Size distribution of the granulate particles.



## QUALITÄTSSICHERUNG UND BETRIEBSSICHERHEIT

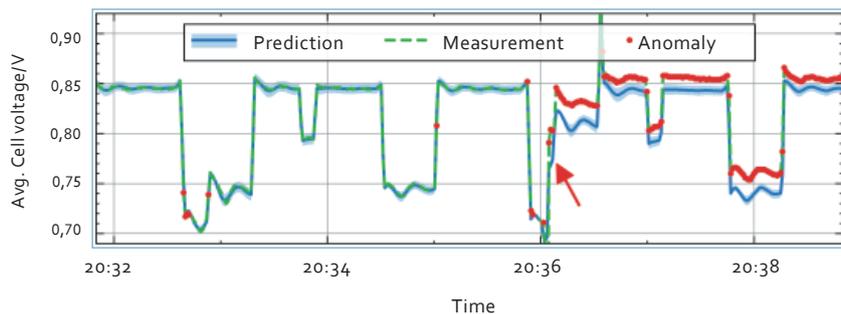
### QUALITY CONTROL AND OPERATIONAL SAFETY

#### KI FÜR BRENNSTOFFZELLENTESTS

Der Betrieb von Brennstoffzellenstapeln auf Testständen wird üblicherweise mithilfe fest eingestellter Alarmgrenzen überwacht. Sobald ein solcher Grenzwert für eine gewisse Zeit überschritten ist, wird der Teststand entweder kontrolliert heruntergefahren oder schaltet sich sofort ab. Aufgrund der breit gefächerten Betriebsbedingungen der Stapel funktioniert diese Art der Überwachung jedoch nur für extreme Betriebsituationen. Zu grobe Grenzen verhindern die Erkennung kleinerer Fehler, wohingegen zu feine Grenzen die Tests häufig unnötig unterbrechen. Aus diesem Grund wird am ZSW eine neuartige Überwachung der Teststände mithilfe KI-basierter Methoden entwickelt. Dabei werden KI-Modelle anhand der umfangreichen historischen Testdaten darauf trainiert, das Betriebsverhalten von Brennstoffzellenstapeln basierend auf gemessenen Betriebsdaten vorherzusagen. Weicht die tatsächliche Messung von der Vorhersage um mehr als die prognostizierte Unsicherheit ab, wird die Messung als nicht plausibel oder fehlerhaft klassifiziert. Dieses Vorgehen wird als Performance Monitoring bezeichnet und eignet sich auch im Betrieb von Brennstoffzellen im mobilen oder stationären Einsatzbereich.

#### AI IN FUEL CELL STACKS

The operation of fuel cell stacks on test rigs is usually monitored using fixed alarm limits (e.g. pressure, temperature). As soon as any such limit is exceeded for a certain period of time, the test rig is either shut down in a controlled manner or it switches itself off immediately. Due to the wide range of operating conditions of the stacks, however, this type of monitoring only works in extreme operating situations. Threshold limits which are too vague will prevent the detection of minor defects whereas threshold limits which are too refined will often interrupt the tests unnecessarily. This is why a new type of system for monitoring the test rigs using AI-based methods is being developed at the ZSW. AI models are being trained to predict the operating behaviour of fuel cell stacks based on test measurements during operation and an extensive data history. If the actual measurement differs from the prediction by more than the forecast uncertainty, the measurement is classified as implausible or erroneous. This procedure is referred to as performance monitoring and is also suitable for the operation of fuel cells in mobile or stationary applications.



// KI-basierte Fehlererkennung bei Brennstoffzellentests: Ein Ausfall des Druckreglers gegen 20:36 Uhr wurde vom KI-Modell erkannt.

// AI-based failure detection in fuel cell testing: A pressure controller outage at about 8:36 p.m. is detected by the by the AI model.

# // Focus Report



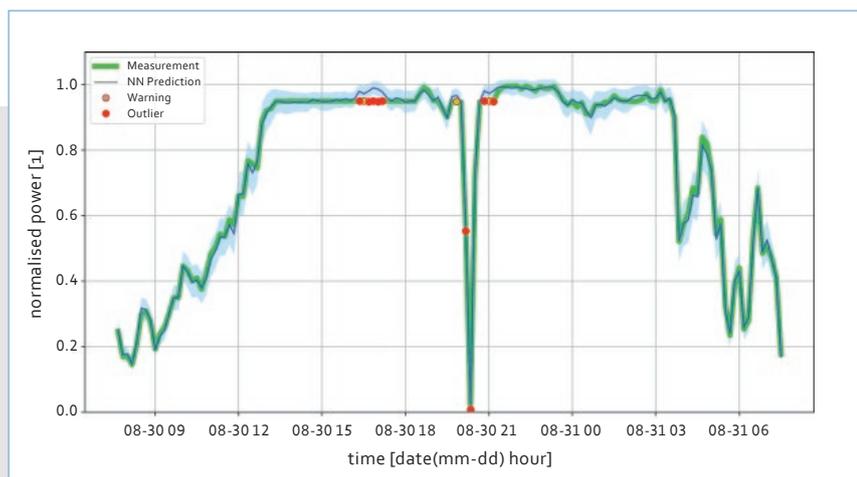
// Foto: Adobe Stock / oida

## MONITORING VON WINDENERGIEANLAGEN

Für den Betrieb von Windenergieanlagen ist es wichtig, dass sie stets störungsfrei und mit maximaler Leistung laufen. Moderne Anlagen sind deshalb mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, um den Betrieb zu optimieren. KI-Anwendungen helfen dabei, Fehler möglichst frühzeitig zu erkennen und ein sogenanntes Performance Monitoring für Windenergieanlagen zu realisieren. Das Performance Monitoring erkennt bereits kleinste Abweichungen vom Regelbetrieb sowie Betriebspunkte mit verminderter Leistung. Doch dies ist nur der erste Schritt für den optimierten Betrieb von Windenergieanlagen. Mit KI-Methoden können auch Anlagenkomponenten wie beispielsweise Lager und Getriebe gezielt überwacht werden. Die Überwachungsdaten dienen dann wiederum als Eingangsdaten für weitere KI-Modelle, um Wartungsarbeiten vorausschauend zu planen. Dies verringert nicht nur die Wartungskosten erheblich, sondern erhöht auch gleichzeitig die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Vermeidung von weitergehenden Fehlfunktionen und Schäden an Anlagenteilen.

## MONITORING OF WIND TURBINES

When it comes to running wind turbines, it is important that there are no malfunctions and that they always deliver the maximum output for the current wind conditions. Modern wind turbines are complex technical systems with a large number of sensors which monitor the various technical components. AI technologies help to keep watch over the systems and sensors, detecting faults as early as possible, and to act as an overall performance monitoring system for wind turbines. The performance monitoring system detects even very small irregularities and deviations from normal operating conditions and identifies any units with reduced power output. But this is only the first step in optimising the performance of wind turbines. It is also possible to monitor specific components (such as bearings and gearboxes) using AI methods. The condition monitoring data will then serve as input data for further AI models with a view to generating predictive maintenance plans. Not only does this bring a significant reduction in maintenance costs but it also increases the availability of the systems at the same time by avoiding further malfunctions and damage to wind turbine components.



// KI-basierte Überwachung und Anomalieerkennung von Windenergieanlagen für Ertragsoptimierung und Predictive Maintenance.  
// AI-based monitoring of wind turbines and detection of anomalies for optimised yield and predictive maintenance.



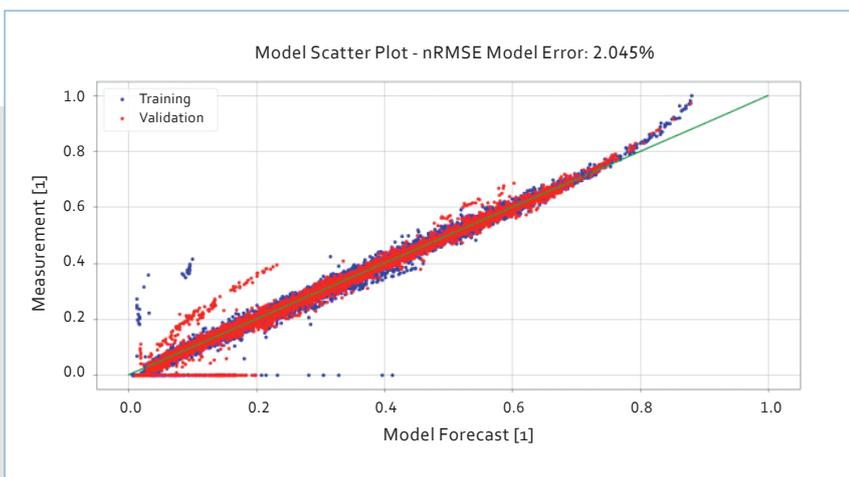
// Foto: Adobe Stock / Piman Khrutmuang

### KI AUF DEM WINDTESTFELD

KI-Methoden werden auch für die automatische Qualitätskontrolle der Messmasten auf dem ZSW-Windtestfeld im Rahmen des WINSENT-Vorhabens eingesetzt. Die KI soll dabei helfen, Fehlmessungen und defekte Sensoren automatisch zu detektieren. Dafür wurden KI-basierte Instrumente entwickelt, welche beispielsweise den Komplettausfall eines Sensors oder Ausreißer in den Messungen sofort bemerken. Für die Fehlersuche und zur frühzeitigen Erkennung von Störungen werden verschiedene Analysemodelle eingesetzt. Die Messdaten der Windmessmasten auf dem Windtestfeld werden für die Entwicklung der KI-basierten Qualitätskontrolle aufbereitet, bereinigt und für die Belernung der KI-Modelle in einer Datenbank bereitgestellt. Anschließend werden die KI-Modelle trainiert. Das Training umfasst mehrere Stufen, die dazu dienen, für unterschiedliche Problemfälle jeweils die optimale KI-Modellarchitektur zu finden. Die KI-Modelle verwenden dabei Daten von zwei Messmasten, um so eine optimale Fehlerabschätzung für die Messdaten in Echtzeit zu realisieren.

### AI AT THE WIND TEST SITE

AI methods are also used on the meteorological masts at the ZSW wind test site for automatic quality control in the WINSENT project. The AI should help to automatically detect incorrect measurements and defective sensors. AI-based methods and models have been developed for this purpose and are able to identify a complete sensor failure, for example, or to spot anomalies in the measurements immediately. Various analysis models are used for troubleshooting and for early detection of faults. The readings taken by the two wind measurement masts at the wind test site are processed and streamlined for the development of the AI-based quality control systems and fed into a database for the teaching of the AI models. The AI models are then trained. The training comprises several stages in a bid to find the optimum AI model architecture for different problem cases. The AI models refer to data from other measurement masts in this process in order to arrive at better estimates of the existing measurement data.



// Windgeschwindigkeits-Überwachung eines Schalenkreuz-Anemometers. Dieses Vorgehen wird am ZSW eingesetzt, um virtuelle Sensoren mit KI-Modellen zu realisieren, komplexe Messsysteme zu überwachen, Fehlfunktionen in Echtzeit zu erkennen und um teure Messsensoren durch KI-Modelle zu ersetzen.

// Wind speed monitored by a cup anemometer. This method is used at the ZSW to enable virtual sensors with AI models, to monitor complex measuring systems, to detect malfunctions in real time and to replace expensive measuring sensors with AI models.



// Foto: Adobe Stock / bennytrapp

### GEFÄHRDETE VOGELARTEN SCHÜTZEN

Eines der wichtigsten Vorhaben der neuen Bundesregierung im Bereich Klimaschutz ist die Beschleunigung beim Ausbau der Windenergie. Wichtiger Hebel hierfür ist die bessere Vereinbarkeit von Windenergienutzung und Artenschutz. Dieses Ziel soll durch den Einsatz von technischen Detektionssystemen erreicht werden. Das ZSW hat dazu den BirdRecorder als Prototyp im Rahmen eines vom Bundesamt für Naturschutz (BfN) geförderten Forschungsvorhabens entwickelt.

Der BirdRecorder ist ein kamerabasiertes System mit bis zu acht fest installierten Kameras und einem nachgeführten Stereokamera-paar. Das System erkennt Vögel im Umkreis von bis zu 700 Metern und ist dadurch in der Lage, Windenergieanlagen rechtzeitig abzuschalten, wenn sich gefährdete Vogelarten wie Rot- und Schwarzmilane der Anlage nähern. Die fest installierten Kameras haben eine Rundumsicht und erfassen alle beweglichen Objekte. Diese werden mit einer am ZSW entwickelten KI unter anderem in die Kategorien Milan, andere Vogelarten oder Flugzeug klassifiziert. Wird ein Milan erkannt, wird dieser mit einer Stereokamera anvisiert, Bilder aufgenommen, dreidimensional verortet, sicher klassifiziert und getrackt. Fliegt der Milan in den Gefahrenbereich einer Windkraftanlage, wird die Anlage in den sogenannten Trudelmodus versetzt, sodass der Rotor in angemessener Zeit zum Stillstand kommt. Verlässt der Milan den Gefahrenbereich, kann die Windenergieanlage wieder anlaufen. Damit werden pauschale Abschaltzeiten vermieden, der Ertrag von Anlagen erhöht und gleichzeitig Kollisionen von Milanen mit Windenergieanlagen verhindert. Somit hilft auch hier der Einsatz von KI, den Windkraftausbau zu beschleunigen und damit die Belange der Energiewende mit dem Vogelschutz zu vereinbaren.

### PROTECTION OF ENDANGERED SPECIES OF BIRDS

One of the most important strategies adopted by the new German government in the face of climate change is to accelerate the expansion of wind energy. One key aim in this plan is to reconcile the use of wind energy with the protection of wildlife to better effect. This goal is to be achieved through the use of technical detection systems. The ZSW has developed the BirdRecorder prototype to this end in a research project funded by the Federal Agency for Nature Conservation (BfN).

The BirdRecorder is a camera-based system with up to eight permanently installed cameras and a tracking stereo camera. The system detects birds within a radius of up to 700 metres and is therefore able to shut wind turbines down in time if endangered bird species like red kites and black kites approach the turbine. The permanently installed cameras have an all-round view and record all moving objects. These are categorised as kites, other bird species or aircraft with an AI system developed at the ZSW. If a kite is detected, it is sighted with a stereo camera, photographed, located in a three-dimensional frame, reclassified and tracked. If the kite flies into the danger zone around a wind turbine, the system is put into idling mode so as to bring the rotor to a standstill in time. Once the kite leaves the danger zone, the wind turbine can start up again. This avoids general shutdown times, increases turbine yield and, at the same time, prevents kites from colliding with wind turbines. So this is another way in which the use of AI is helping to hasten the expansion of wind power and to reconcile the interests of the energy transition with bird conservation.



// Kamerasystem des BirdRecorders auf dem Dach des ZSW in Stuttgart.

//The system BirdRecorder on the roof of the ZSW building in Stuttgart.

# // Focus Report



## KI-LAB FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN

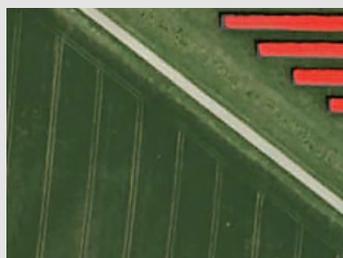
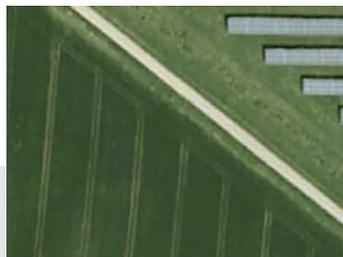
Zu den Innovationstreibern im Bereich der erneuerbaren Energien gehören vor allem Start-ups sowie kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Mit dem KI-Lab.EE unterstützt das ZSW diese Zielgruppe beim Einstieg in die KI. Die KI-Lern- und Anwendungsplattform steht dabei allen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der erneuerbaren Energien offen. Das ZSW bietet Unternehmen nicht nur Beratung im Einsatz von KI, sondern unterstützt und begleitet über die Plattform KI-Lab.EE den Test-Before-Invest-Ansatz. Unternehmen aus dem EE-Bereich können sich kostenlos auf der KI-Plattform registrieren, um mit ihren Daten KI-Modelle beispielsweise für Prozessoptimierung in der Fertigung und Qualitätskontrolle oder für neue KI-basierte Geschäftsmodelle zu trainieren und zu testen. Die Unternehmen erhalten hierbei in fünf Schritten ein KI-Modell, für das sie kein Expertenwissen über KI benötigen.

Zunächst werden die Daten hochgeladen und im geschützten Rechenzentrum am ZSW verarbeitet. Dann setzt die automatische

## AI LAB FOR RENEWABLE ENERGIES

Innovation in the field of renewable energies is mainly being driven by start-ups and small and medium-sized enterprises (SMEs). The ZSW is helping this target group with the introduction of AI through the "AI Lab for Renewable Energies" (KI-Lab.EE). This AI learning and application platform is open to all companies along the entire value-added chain in renewable energies. Not only does the ZSW offer enterprises advice on the use of AI but, through the KI-Lab.EE platform, it also provides support and guidance for businesses adopting the test-before-invest approach. Companies from the renewable energy sector can register free of charge on the AI platform and upload their data in order to train and test AI models for various purposes, such as process optimisation in manufacturing and quality control, or for new AI-based business models. Enterprises follow a five-step plan to arrive at an AI model for which they do not need any expert knowledge of AI.

Firstly, the data are uploaded and processed in the secure data centre at the ZSW. Then the automatic phase starts in which the



// Pilotanwendung von KI im Rahmen des KI-Lab für Erneuerbare Energien: KI-basierte Bildsegmentierung für die Erkennung von PV-Dach- und Freifeldanlagen aus Satellitendaten.  
// Pilot AI application in the AI Lab for Renewable Energies: AI-based image segmentation for the detection of roof-mounted and free-standing PV systems from satellite data.

# // Focus Report

Prozessierung ein, bei der die Daten vorverarbeitet und normiert werden. Fehlerhafte Daten und redundante Werte werden aussortiert. Das Training verschiedener KI-Modellklassen mit Auto-ML kann dann auf der No-Code-KI-Plattform unmittelbar gestartet werden. Das ausgewählte KI-Modell wird anhand der verwendeten Daten intelligent optimiert, trainiert und anhand von Testdaten bewertet. Danach können die Ergebnisse analysiert werden: Anschauliche und problemorientierte Grafiken helfen dabei. Eine Sensitivitätsanalyse der Eingangsdaten wird durchgeführt, ebenso eine automatisierte „Feature Selection“ für die optimale Auswahl der wichtigen und notwendigen Eingangsparameter. Mit der verfügbaren Anomaliedetektion können Datenfehler automatisch identifiziert und entfernt werden. Vielfältige Visualisierungswerkzeuge für weitergehende Daten- und KI-Modellanalysen sind ebenso verfügbar. Die trainierten und validierten KI-Modelle können exportiert und dann innerhalb der IT-Umgebung des eigenen Unternehmens eingesetzt werden. So können Unternehmen mit dem KI-Lab.EE ohne Risiko erproben, welche Vorteile der Einsatz von KI für ihr Unternehmen bringt und somit fundierte zukunftsweisende Entscheidungen zum weitergehenden KI-Einsatz und Rollout im Unternehmen treffen. Mit der Beratung durch die KI-Expertinnen und -Experten des ZSW kann der KI-Einsatz flankiert werden.

Im Rahmen des KI-Lab.EE unterstützte das ZSW bereits mehr als zehn KMU, Start-ups und Unternehmen in Baden-Württemberg beim Einsatz neuester, innovativer KI-Methoden. Eine dieser Firmen ist ein Freiburger Start-up, das sich zur Aufgabe gemacht hat, die Energiewende in die Städte zu bringen. Hierfür bietet das Unternehmen den zentralen Akteuren im Energiesektor die benötigten Daten- und Entscheidungsgrundlagen. Das ZSW arbeitete mit dem Start-up bei der Segmentierung von Photovoltaik und Solarthermie-Anlagen aus Satellitendaten zusammen.

data are preprocessed and standardised. Incorrect data and redundant values are weeded out. Work can then begin straight away on training different AI model classes with AutoML on the no-code AI platform. The selected AI model is optimised and trained in an intelligent process based on the data used and evaluated using test data. The results can then be analysed, a process aided by clear graphics and problem-oriented diagrams. The input data undergo a sensitivity analysis, and an automated “feature selection” is carried out so as to optimise the input parameters, choosing those which are key and essential. The anomaly detection function allows the automatic identification and removal of data errors. There are also various visualisation tools for further data and AI model analyses. The trained and validated AI models can be exported and then used by the company in its IT system. The KI-Lab.EE therefore enables companies to investigate the potential advantages of using AI in their business environments without taking any risks and provides them with a sound basis for making decisions on the future use and roll-out of AI in the company. The use of AI can be accompanied by advice from the AI experts at the ZSW.

The ZSW has supported more than 10 SMEs, start-ups and companies in Baden-Württemberg with their use of the latest innovative AI methods during the KI-Lab.EE project. One of these companies is a Freiburg start-up which has set itself the task of bringing the energy transition to the towns and cities. To this end, the enterprise is providing the key players in the energy sector with the necessary baseline data and foundations for making decisions. The ZSW worked with the start-up on the segmentation of photovoltaic and solar energy systems from satellite data.



// Foto: Adobe Stock / LV DESIGN



## BLICK IN DIE ZUKUNFT

Künstliche Intelligenz wird sich in vielen Bereichen durchsetzen, weil sie einen entscheidenden ökonomischen Erfolgsfaktor aufweist: Eine Studie im Auftrag des Bundeswirtschaftsministeriums hat ergeben, dass Unternehmen, die Künstliche Intelligenz einsetzen, nicht nur innovativer sind, sondern auch bei gleichem Umsatz einen höheren Gewinn erzielen und zusätzliche Arbeitsplätze schaffen. Eine wichtige Voraussetzung für alle KI-Anwendungen ist das Vorhandensein von Daten hinreichender Güte, denn „Daten sind das Gold des 21. Jahrhunderts“. Wo die Innovationsfreude des Mittelstands auf die Einsatzmöglichkeiten Künstlicher Intelligenz trifft, da sind die Chancen so groß wie die Anwendungsfelder. Das trifft besonders im Kontext einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft und des Prinzips „Cradle to Cradle“ zu, wo datengetriebene KI-Methoden das volle Potenzial für „zero emission“-Produktzyklen unterstützen. Am ZSW wollen wir Innovation und Unternehmertum anwendungsorientiert zusammenführen, damit der Technologietransfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft gelingt und die Energiewende für die heimische Industrie auch zu einer ökonomischen Erfolgsgeschichte wird.

// Foto: Adobe Stock / oida

## FUTURE PROSPECTS

Artificial intelligence will hold sway in many sectors because it is a key economic success factor, as claimed in a study commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs showing that companies which use artificial intelligence are not only more innovative but also make more profit with the same turnover and create additional jobs. One important prerequisite for all AI applications is the availability of data of sufficient quality because “data is the gold of the 21st century”. In places where the innovative spirit of small and medium-sized enterprises meets the capabilities of artificial intelligence, the opportunities are as great as the fields of application. This is especially true in the context of a sustainable circular economy and for the principle of “cradle-to-cradle” where data-driven AI methods support the full potential for “zero-emission” product cycles. We want to bring innovation and entrepreneurship together with an eye to practical applications so as to pave the way for the successful transfer of technology from scientific research to business and to turn the energy transition into an economic success story for domestic industry.

### Stuttgart

Meitnerstraße 1  
70563 Stuttgart  
Germany  
Phone: +49 711 7870-0  
Fax: +49 711 7870-100

### Solar-Testfeld Widderstall

Widderstall 14  
89188 Merklingen  
Germany  
Phone: +49 7337 92394-0  
Fax: +49 7337 92394-20

### Ulm

Helmholtzstraße 8  
89081 Ulm  
Germany  
Phone: +49 731 9530-0  
Fax: +49 731 9530-666

### Ulm eLaB

Lise-Meitner-Straße 24  
89081 Ulm  
Germany  
Phone: +49 731 9530-500  
Fax: +49 731 9530-599

[www.zsw-bw.de](http://www.zsw-bw.de)



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg  
Zertifiziert nach DIN EN ISO 9001:2015