

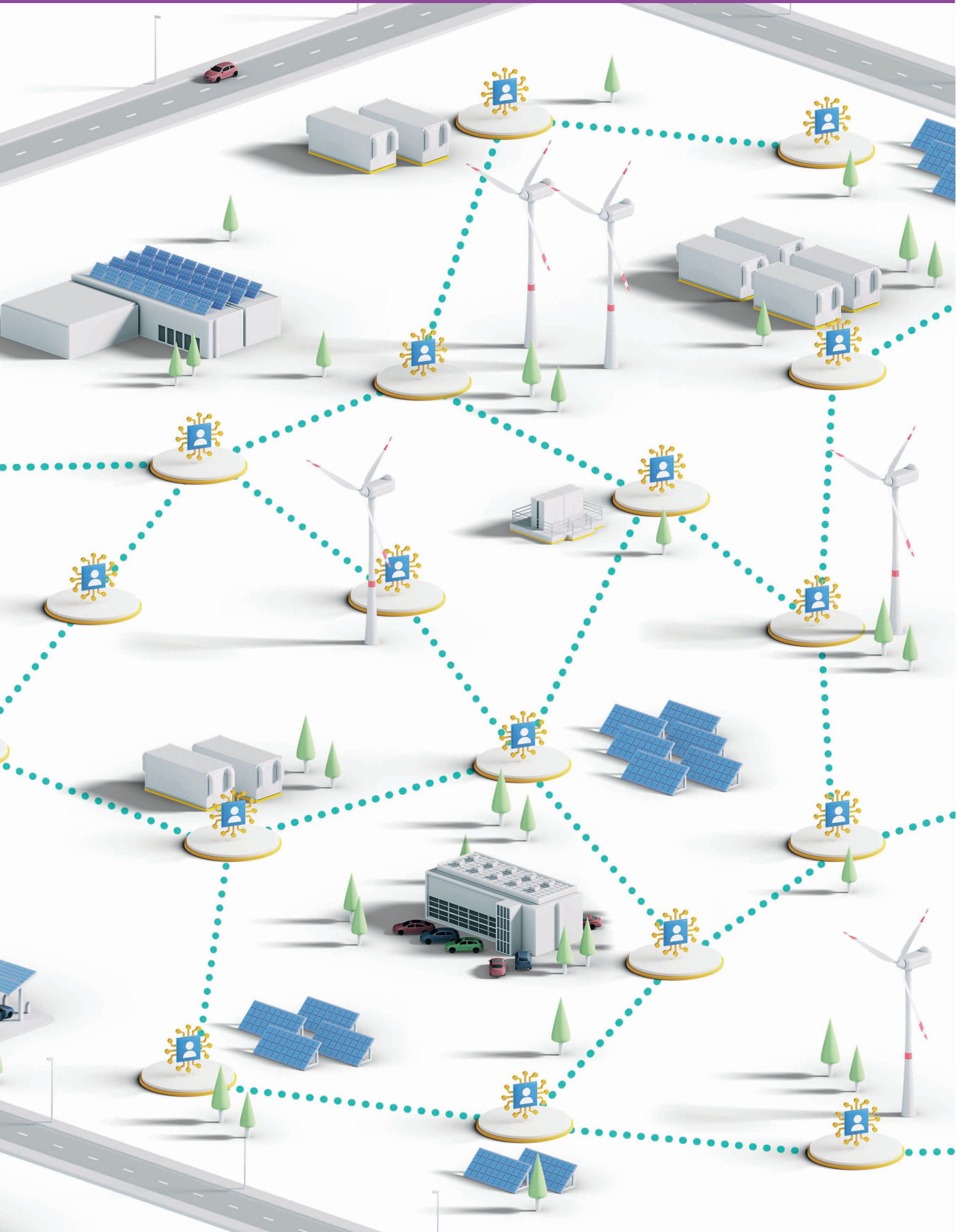
dossier.

Cyber-physisches Energiesystem

Anwendungsmöglichkeiten für KI | Künstliche Intelligenz kann in der Smart City für Energieeffizienz sorgen, interoperable Systeme ermöglichen oder einen resilienten Betrieb von Infrastrukturen der Energieversorgung sicherstellen.

Vers un système cyber-physique

Possibilités d'utilisation de l'IA dans le domaine de l'énergie | L'intelligence artificielle peut assurer l'efficacité énergétique d'une smart city, l'interopérabilité de systèmes, ou une exploitation résiliente des infrastructures d'approvisionnement énergétique.



ASTRID NIESSE

Die vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien in allen Bereichen ist ein unerlässlicher Beitrag zum Erreichen der Klimaneutralität. Dazu müssen nicht nur Erzeugung und Verbrauch elektrischer Energie in Einklang gebracht, sondern auch Infrastrukturen, wie z.B. Stromnetze, zuverlässig und effizient betrieben werden. Mit der zunehmenden Digitalisierung wird aus den historisch gewachsenen Energieversorgungsstrukturen ein komplexes und dynamisches cyber-physisches Energiesystem (CPES), in dem Zehntausende von physischen und digitalen Komponenten miteinander interagieren.

Die aktuelle anwendungsnahe Forschung widmet sich der Realisierung cyber-physischer Energiesysteme mit ganz unterschiedlichen Herausforderungen – energieeffizienten Smart-City-Quartieren, interoperablen Systemarchitekturen, Forschungsdatenmanagement bis hin zu Konzepten für den resilienten Betrieb digitalisierter Infrastrukturen der Energieversorgung.

Dieser Kontext intelligenter Energiesysteme bietet eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für künstliche Intelligenz: Von der Prognose von Netzzuständen im Verteilnetz mit geringer Messpunktabdeckung über die automatisierte Umsetzung von Systemdienstleistungen wie Redispatch oder Blindleistungsmanagement bis hin zur algorithmisch unterstützten Aggregation und Vermarktung von Flexibilität aus dezentralen (Kleinst-) Anlagen am Energiemarkt. Künstliche Intelligenz ermöglicht nicht nur individuell smart agierende Einheiten, sondern hilft auch dabei, das Potenzial vernetzter und interagierender (Teil-) Systeme effizient und zuverlässig zu erschliessen.

Im Folgenden werden einige zentrale Themen vorgestellt und so das aktuelle Forschungs- und Entwicklungsumfeld umrissen. Diese Arbeiten eint eine Vision – AI-empowered Energy Systems. Dabei betrachten wir drei Bereiche: neue Herausforderungen im Bereich der Netzstabilität, optimierte Nutzung von Flexibilitäten in CPES sowie neue Energiemärkte.

Netzzustandsprognose mit neuronalen Netzen

Um auch im Zuge des Ausbaus der erneuerbaren Energien eine stabile Betriebsführung von Verteilnetzen zu erreichen, ist mehr Netztransparenz nötig. Diese wird normalerweise durch Sensorik gewährleistet, deren vollständiger Ausbau jedoch aus Kostengründen nicht möglich ist. Neue Ansätze erweitern die klassische State Estimation aus dem bisherigen Einsatzbereich der Übertragungsnetze auf die Anwendung in Verteilnetzen: KI-basierte Ansätze überführen die etablierte State Estimation in eine Neural State Estimation. Auf Basis dieser Technologie – insbesondere durch den Einsatz von Deep-Learning-Ansätzen, die sich gerade auch zum Erkennen von Zusammenhängen in Zeitreihendaten eignen – können Netzzustände bei geringer Messpunktabdeckung zuverlässiger und genauer prognostiziert werden als bisher. Der Weg zur Anwendung in Verteilnetzen wird somit geebnet.

Convertir entièrement l’approvisionnement énergétique aux énergies renouvelables, et ce, dans tous les domaines, constitue une contribution indispensable à l’atteinte de la neutralité climatique. Il ne suffit pas là d’équilibrer la production et la consommation d’énergie électrique, mais il s’agit également d’exploiter de manière fiable et efficace les infrastructures telles que les réseaux électriques. Avec la numérisation croissante, les structures historiques d’approvisionnement en énergie se transforment en un système énergétique cyber-physique (Cyber-physical energy system, CPES) complexe et dynamique, dans lequel interagissent des dizaines de milliers de composants physiques et numériques.

La recherche appliquée actuelle se consacre à la réalisation de systèmes énergétiques cyber-physiques représentant des défis très variés, qu’il s’agisse de quartiers intelligents à haute efficacité énergétique, d’architectures de systèmes interoperables, de gestion des données de la recherche ou de concepts pour l’exploitation résiliente d’infrastructures d’approvisionnement en énergie numérisées.

Ce contexte de systèmes énergétiques intelligents offre une multitude de possibilités d’application pour l’intelligence artificielle (IA), et ce, de la prévision de l’état du réseau de distribution avec une faible couverture des points de mesure, à l’agrégation et à la commercialisation assistées par algorithmes de la flexibilité des (micro) installations décentralisées sur le marché de l’énergie, en passant par la mise en œuvre automatisée de services système tels que le redispatching ou la gestion de la puissance réactive. L’intelligence artificielle permet non seulement à des composants d’agir individuellement et de manière intelligente, mais elle aide également à exploiter de manière efficace et fiable le potentiel des (sous-)systèmes interagissant en réseau.

Cet article présente quelques thèmes principaux ainsi que les grandes lignes de l’état actuel de la R&D (recherche et développement). Ces travaux sont unis par une vision – les systèmes énergétiques utilisant l’intelligence artificielle. Trois domaines sont considérés ci-après: les nouveaux défis dans le domaine de la stabilité du réseau, l’utilisation optimisée des flexibilités dans les CPES ainsi que les nouveaux marchés de l’énergie.

Prévision de l’état du réseau à l’aide de réseaux neuronaux

Une plus grande transparence du réseau est nécessaire pour pouvoir atteindre une gestion stable des réseaux de distribution également dans le cadre du développement des énergies renouvelables. Cette transparence est normalement assurée par des capteurs, dont l’expansion complète n’est toutefois pas possible pour des raisons de coûts. De nouvelles approches étendent désormais l’estimation d’état classique du domaine d’application des réseaux de transport à celui des réseaux de distribution:



Verteilte KI und Logistik integriert

Im Hamburger Container-Terminal Altenwerder stellen rund 90 autonome Schwerlasttransporter dank einem KI-basierten System nun bis zu 4 MW symmetrische Flexibilität bereit.

IA distribuée et logistique intégrées

Dans le terminal à conteneurs Altenwerder, à Hambourg, près de 90 véhicules lourds autonomes fournissent désormais jusqu'à 4 MW de flexibilité symétrique grâce à un système basé sur l'IA.

Primärregelung mit neuen Akteuren

Auch Systemdienstleistungen mit hohen Anforderungen müssen künftig von diversen Akteuren in Stromnetzen erbracht werden. Am Beispiel der Batteriesysteme einer Flotte von automatisierten Schwerlastfahrzeugen (Automated Guided Vehicles, AGVs) wurde ein entsprechendes System im Hamburger Hafen umgesetzt. Dazu wurde ein System entwickelt, welches die für den Containerumschlag nötigen Transportleistungen der Fahrzeuge mithilfe neuronaler Netze kontinuierlich prognostiziert und mögliche Batteriekapazitäten und Zuweisungen von Ladestationen zu Fahrzeugen optimierend plant. Es kann so einerseits durch reaktive Flexibilität in Form von Regelleistung zur Systemstützung und andererseits durch proaktive Flexibilität in Form von gezielten Ladevorgängen auf Bedarfe des Energiemarkts eingegangen werden.

Ein von Offis entwickeltes Flexibilitätsmanagementsystem plant, koordiniert und überwacht die Ladevorgänge sowie die AGVs auf Basis agentenbasierter Optimierung. Das Logistik-integrierte System hat den Feldtest im Hamburger Container-Terminal Altenwerder erfolgreich absolviert – rund 90 autonome Schwerlasttransporter können nun bis zu 4 MW symmetrische Flexibilität für die Frequenzhaltung bereitstellen.

Selbstorganisiertes Flexibilitätsmanagement

Batteriespeicher sind ein wichtiger Baustein für Energieversorgungssysteme, die vorrangig erneuerbare Energien nutzen. Die Flexibilität von Batteriespeichern ermöglicht es, kurzfristige Schwankungen von PV-Anla-

des approches basées sur l'IA transforment l'estimation d'état établie en une estimation d'état neuronale (Neural State Estimation). Sur la base de cette technologie – en particulier grâce à l'utilisation d'approches d'apprentissage profond (deep learning) qui se prêtent justement aussi à la reconnaissance de corrélations dans des données de séries temporelles –, il est possible de prévoir les états du réseau de manière plus fiable et plus précise que jusqu'à présent, et ce, même en cas de faible couverture des points de mesure. La voie vers une application dans les réseaux de distribution est ainsi toute tracée.

Puissance de réglage primaire avec de nouveaux acteurs

À l'avenir, divers acteurs devront également fournir aux réseaux électriques des services système répondant à des exigences élevées. Un tel système, utilisant les batteries d'une flotte de véhicules lourds automatisés (Automated Guided Vehicles, AGV), a par exemple été mis en place dans le port de Hambourg. Pour ce faire, un système a été développé, lequel, à l'aide de réseaux neuronaux, prévoit en continu les prestations de transport nécessaires pour le transbordement des conteneurs et planifie de manière optimisée les capacités disponibles des batteries ainsi que l'attribution des bornes de recharge aux véhicules. Il est ainsi possible de répondre aux besoins du marché de l'énergie, d'une part, par le biais d'une flexibilité réactive sous forme de puissance de réglage pour le soutien du système et, d'autre part, par le biais d'une flexibilité proactive sous forme de recharges ciblées.



Software-Agenten laufen im Rahmen eines hybriden Feld-Labortests auf geeigneter Hardware sowohl im Feld als auch im Labor, und optimieren somit als Bestandteile des Speicherschwarms den Betrieb der Batterien.

Dans le cadre d'essais hybrides terrain/laboratoire, des agents logiciels fonctionnent sur du matériel approprié aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire, et optimisent ainsi le fonctionnement des batteries en tant que composants d'un « essaim » de systèmes de stockage.

gen und Windkraft auszugleichen und mit den Energiebedarfen von Haushalten, Gewerbe und Industrie in Einklang zu bringen. Gleichzeitig werden für elektrische Energiespeicher kostbare Ressourcen genutzt, die es optimiert und damit nachhaltig einzusetzen gilt. Um die heute zudem noch relativ teuren Speichersysteme wirtschaftlich und technisch optimal zu nutzen, werden Möglichkeiten einer Multi-Purpose-Nutzung von Batteriespeichern erprobt.

In Projekten des Offis mit der be.storaged GmbH wurden Speicher zu einem Speicherschwarm vernetzt, um die entstehenden Freiheitsgrade an Flexibilitätsmärkten anbieten zu können. Moderne Verfahren aus dem maschinellen Lernen und aus der verteilten künstlichen Intelligenz erlauben die Analyse, Vorhersage und verteilte Optimierung der Flexibilitätspotenziale. Kern des Speicherschwarms ist ein selbstorganisierendes Agentensystem: Intelligente Agenten, d. h. (eingeschränkt) autonome und lernfähige Software, managen die Flexibilität einzelner Batteriespeicher und ermöglichen die Nutzung der Gesamtflexibilität des Batteriespeicherschwarms. Der Speicherschwarm wurde in einem Feldtest erprobt und wird aktuell produktiv weiterentwickelt.

Un système de gestion de la flexibilité développé par par l'institut de recherche Offis planifie, coordonne et surveille les processus de recharge ainsi que les AGV au moyen d'une optimisation basée sur des agents. Le système intégré à la logistique a été testé avec succès dans le terminal à conteneurs Altenwerder, à Hambourg: environ 90 véhicules lourds autonomes peuvent désormais fournir jusqu'à 4 MW de flexibilité symétrique pour le maintien de la fréquence.

Gestion de la flexibilité auto-organisée

Le stockage par batterie constitue un élément important des systèmes d'approvisionnement en énergie qui utilisent principalement des énergies renouvelables. La flexibilité des systèmes de stockage par batterie permet de compenser les fluctuations à court terme des installations photovoltaïques et de l'énergie éolienne, et de les équilibrer avec les besoins énergétiques des ménages, du commerce et de l'industrie. Parallèlement, le stockage d'énergie électrique utilise des ressources précieuses, qui doivent être utilisées de manière optimale et durable. Des possibilités d'utilisation multi-usages des systèmes de stockage par batterie – qui sont d'ailleurs encore relativement chers aujourd'hui – sont actuellement testées afin de les exploiter de manière optimale autant d'un point de vue économique que technique.

Dans le cadre de projets réalisés par l'Offis en collaboration avec la société be.storaged GmbH, des systèmes de stockage ont été mis en réseau de sorte à former un « essaim », et ce, dans le but de pouvoir proposer les degrés de liberté ainsi créés sur les marchés de flexibilité. Des procédés modernes issus de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle distribuée permettent d'analyser, de prédire et d'optimiser les potentiels de flexibilité de manière distribuée. Le cœur de l'essaim de systèmes de stockage est constitué d'un système d'agents auto-organisé: des agents intelligents, c'est-à-dire des logiciels (partiellement) autonomes capables d'apprendre, gèrent la flexibilité des systèmes individuels de stockage par batterie et permettent d'exploiter la flexibilité globale de l'essaim de systèmes de stockage par batterie. Ce dernier a été testé sur le terrain et est actuellement en cours de développement pour être utilisé de manière productive.

Des flexibilités pour stabiliser le système

Les installations décentralisées permettent non seulement de détecter les états des réseaux de distribution, mais aussi de remédier aux instabilités et aux congestions afin d'être à même d'atteindre les scénarios cibles post-énergies fossiles, et ce, tout en préservant la sécurité d'approvisionnement.

Le processus de redispatching actuellement esquissé ne couvre cependant pas encore les besoins relatifs à l'intégration des petites installations. Afin que ces flexibilités issues des réseaux de distribution puissent également être intégrées dans le processus de redispatching, des inter-

Flexibilitäten zur Systemstabilisierung

Mit dezentralen Anlagen können nicht nur Netzzustände in Verteilnetzen erkannt, sondern auch Instabilitäten und Engpässe behoben werden, um postfossile Zielszenarien unter Wahrung der Versorgungssicherheit zu erreichen.

Der aktuell skizzierte Redispatch-Prozess deckt dabei die Erfordernisse zur Integration von Kleinstanlagen noch nicht ab. Damit auch diese Flexibilitäten aus den Verteilnetzen in den Redispatch-Prozess eingebunden werden können, werden in aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten standardisierte Schnittstellen für den Flexibilitätsabruf entwickelt sowie eine robuste, anlagenscharfe Nachweiserbringung und Abrechnung on-the-edge von dezentralen Anlagen an der Schnittstelle zu Flexibilitätsplattformen konzipiert.

Die resultierenden Systeme setzen u. a. wegen der anfallenden Datenmengen und entsprechender Anforderungen an die Skalierbarkeit Konzepte aus dem Bereich der verteilten Systeme um. Neben Ansätzen der verteilten KI und kontrollierten Selbstorganisation stehen Ansätze für die sichere Identifikation von Anlagen über sogenannte self-sovereign identities im Fokus der Arbeiten.

Selbstlernende Akteure an Systemdienstleistungsmärkten

Schon jetzt erzeugen in Deutschland mehr als zwei Millionen PV-Anlagen Strom, bis 2030 sollen 15 Millionen Elektroautos unterwegs sein. Hinzu kommen Windparks, Wärmepumpen und Batteriespeicher. Für sich genommen sind die kleinen Verbraucher und Erzeuger von erneuerbaren Energien nicht problematisch, aber in ihrer Gesamtheit können Gleichzeitigkeitseffekte zu Instabilitäten führen.

Künftig sollen private Kleinanlagen auch bei Engpässen mit herangezogen werden, um diese wieder zu beheben oder zumindest abzuschwächen. Dabei sollen auch diese Aufgaben aus dem Bereich der Netzbetreiber marktbasierend erfolgen. Wie aber sieht ein geeignetes Marktdesign aus? Aktuelle Forschungsarbeiten fokussieren die Entwicklung von Tools für die Analyse möglicher Marktdesigns in diesem Kontext. Auswirkungen neuer Marktregeln auf das Akteursverhalten und damit auf die Resilienz des Stromsystems sollen so bewertet werden können. Der Einsatz und die Weiterentwicklung von Open-Source-Software und die umfassende Nutzung und Bereitstellung von Open Data sind dabei zentral.

Verfahren der künstlichen Intelligenz, insbesondere aus dem Bereich der selbstlernenden Systeme, werden mit bewährten Simulationstechniken kombiniert, um die Interaktionen zwischen Prosumern, die am Markt agieren, und der elektrischen Infrastruktur simulativ abzubilden. Dabei sollen die Marktteilnehmer in der Simulation eigenständig Gebotsstrategien lernen, um eine adaptive und damit realitätsnahe Reaktion der Prosumer auf Marktanreize untersuchen zu können.

Schwachstellenanalyse in neuen Märkten

Moderne Energiesysteme werden als cyber-physische Energiesysteme (CPES) verstanden, in denen digitale und

faces standardisierte für den Ruf nach Flexibilität sind aktuell entwickelt im Rahmen von Forschungsarbeiten und Entwicklung, und ein robustes und maßgeschneidertes System zur Rechtfertigung und Abrechnung on-the-edge von dezentralen Anlagen ist auf der Ebene der Schnittstelle der Plattformen der Flexibilität.

Die Systeme, die daraus resultieren, setzen auf Konzepte aus dem Bereich der dezentralen Systeme, insbesondere aufgrund der Mengen von Daten und der Anforderungen an die Flexibilität. Die Arbeiten konzentrieren sich nicht nur auf die Ansätze der dezentralen KI und der Selbstorganisation, sondern auch auf die Ansätze für die sichere Identifikation von Anlagen über sogenannte self-sovereign identities.

Des acteurs auto-apprenants sur les marchés des services système

En Allemagne, plus de deux millions d'installations photovoltaïques produisent déjà de l'électricité, et d'ici 2030, 15 millions de voitures électriques devraient y circuler. S'y ajoutent les parcs éoliens, les pompes à chaleur et les systèmes de stockage par batterie. Pris isolément, les petits consommateurs et producteurs d'énergie renouvelable ne posent pas de problème, mais dans leur ensemble, des effets de simultanéité peuvent conduire à des instabilités.

À l'avenir, les petites installations privées devront également être mises à contribution en cas de congestions, et ce, afin d'y remédier ou du moins de les atténuer. Ces tâches, qui relèvent du domaine des gestionnaires de réseaux, devront également être réalisées en étant basées sur le marché. Mais à quoi ressemble un design de marché approprié? Les travaux de recherche actuels se concentrent sur le développement d'outils pour l'analyse de designs de marché envisageables dans un tel contexte. Les effets de nouvelles règles de marché sur le comportement des acteurs, et donc sur la résilience du système électrique, doivent ainsi pouvoir être évalués. L'utilisation et le développement de logiciels open source ainsi que l'utilisation et la mise à disposition globales de données ouvertes sont essentiels à cet égard.

Des procédés d'intelligence artificielle, en particulier issus du domaine de l'apprentissage automatique, sont combinés à des techniques de simulation éprouvées afin de simuler les interactions entre les prosumers agissant sur le marché et l'infrastructure électrique. Pour ce faire, dans la simulation, les participants au marché doivent apprendre des stratégies d'enchères de manière autonome afin de pouvoir étudier une réaction adaptative et donc réaliste des prosumers aux incitations du marché.

Analyse des points faibles sur les nouveaux marchés

Les systèmes énergétiques modernes sont considérés comme des systèmes énergétiques cyber-physisques dans lesquels les composants numériques et physiques intera-

physische Komponenten interagieren. Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung wächst auch die Angriffsfläche für Cyber-Angriffe. Traditionelle Methoden zur Analyse der Betriebssicherheit stossen dabei an ihre Grenzen, sodass Interaktionen zwischen Komponenten eines CPES sowie das Einwirken von externen Akteuren und Angreifern nicht vollständig erfasst werden können. Deshalb werden neue Analysemethoden benötigt, um systemische Schwachstellen und potenzielle Sicherheitsrisiken solcher komplexen CPES aufzudecken.

Eine Schlüsseltechnologie dazu stellt das sogenannte Adversarial Resilience Learning (ARL) dar. Im Kern der Methodik stehen zwei Akteure: eine angreifende und eine verteidigende künstliche Intelligenz. Der Angreifer sucht nach Schwachstellen und versucht, den Systemzustand negativ zu beeinflussen, während der Verteidiger geeignete Gegenmassnahmen lernt, um das System zu stabilisieren. Angreifer und Verteidiger trainieren sich somit indirekt gegenseitig.

Fazit

Mit der Transformation der Energiesysteme zu cyber-physischen Energiesystemen ergeben sich neue Herausforderungen bezüglich der Systemstabilität, der Marktsysteme, der Cyber-Security und vor allem der Beherrschbarkeit der resultierenden Komplexität. Selbstorganisierende und KI-basierte Ansätze zeigen in diesem Umfeld grosse Potenziale und kommen schon heute im Feld zum Einsatz. Dem Forschungsdatenmanagement kommt in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle zu, um die Effizienz der Forschung im Spannungsfeld zwischen industrieller Anwendung und neuen Ansätzen der Forschung zu verbessern.



Autorin | Auteure

Prof. Dr.-Ing. **Astrid Niesse** ist Professorin für Digitalisierte Energiesysteme.
 Prof. D'Ing. **Astrid Niesse** est professeure en systèmes énergétiques numérisés.
 → Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, DE-26129 Oldenburg
 → astrid.niesse@uni-oldenburg.de

gissent. En raison de la numérisation croissante, la surface d'attaque augmente également pour les cyberattaques. Les méthodes traditionnelles d'analyse de la sécurité d'exploitation se heurtent à leurs limites, de sorte que les interactions entre les composants d'un CPES ainsi que les actions d'acteurs et d'agresseurs externes ne peuvent pas être entièrement saisies. De nouvelles méthodes d'analyse sont donc nécessaires pour détecter les faiblesses du système et les risques potentiels pour la sécurité de ces CPES complexes.

Dans ce contexte, l'Adversarial Resilience Learning (ARL) constitue une technologie clé. Au cœur de la méthodologie se trouvent deux acteurs: une intelligence artificielle qui attaque et une intelligence artificielle qui se défend. L'attaquant recherche les points faibles et tente d'influencer négativement l'état du système, tandis que le défenseur apprend les contre-mesures appropriées pour stabiliser le système. L'attaquant et le défenseur s'entraînent donc indirectement l'un l'autre.

Conclusion

La transformation des systèmes énergétiques en systèmes énergétiques cyber-physiques est à l'origine de nouveaux défis en termes de stabilité du système, de systèmes de marché, de cybersécurité et surtout de maîtrise de la complexité qui en résulte. Les approches auto-organisées et basées sur l'IA présentent un grand potentiel dans cet environnement, et sont déjà utilisées aujourd'hui sur le terrain. Dans ce contexte, la gestion des données de la recherche a un rôle particulier à jouer pour améliorer l'efficacité de cette dernière à la croisée des applications industrielles et des nouvelles approches issues de la recherche.