

AMPRION IM KURZPROFIL

AMPRION SETZT AUF NEUE LÖSUNGEN  
FÜR DAS ENERGIESYSTEM VON MORGEN.

# ENERGIEWENDE BRAUCHT INNOVATIONSTREIBER

# AMPRION IM KURZPROFIL

Amprion ist **EINER VON VIER ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBERN** in Deutschland.

Unser Stromnetz ist **11.000 KILOMETER** lang und erstreckt sich von der Nordsee bis zu den Alpen.

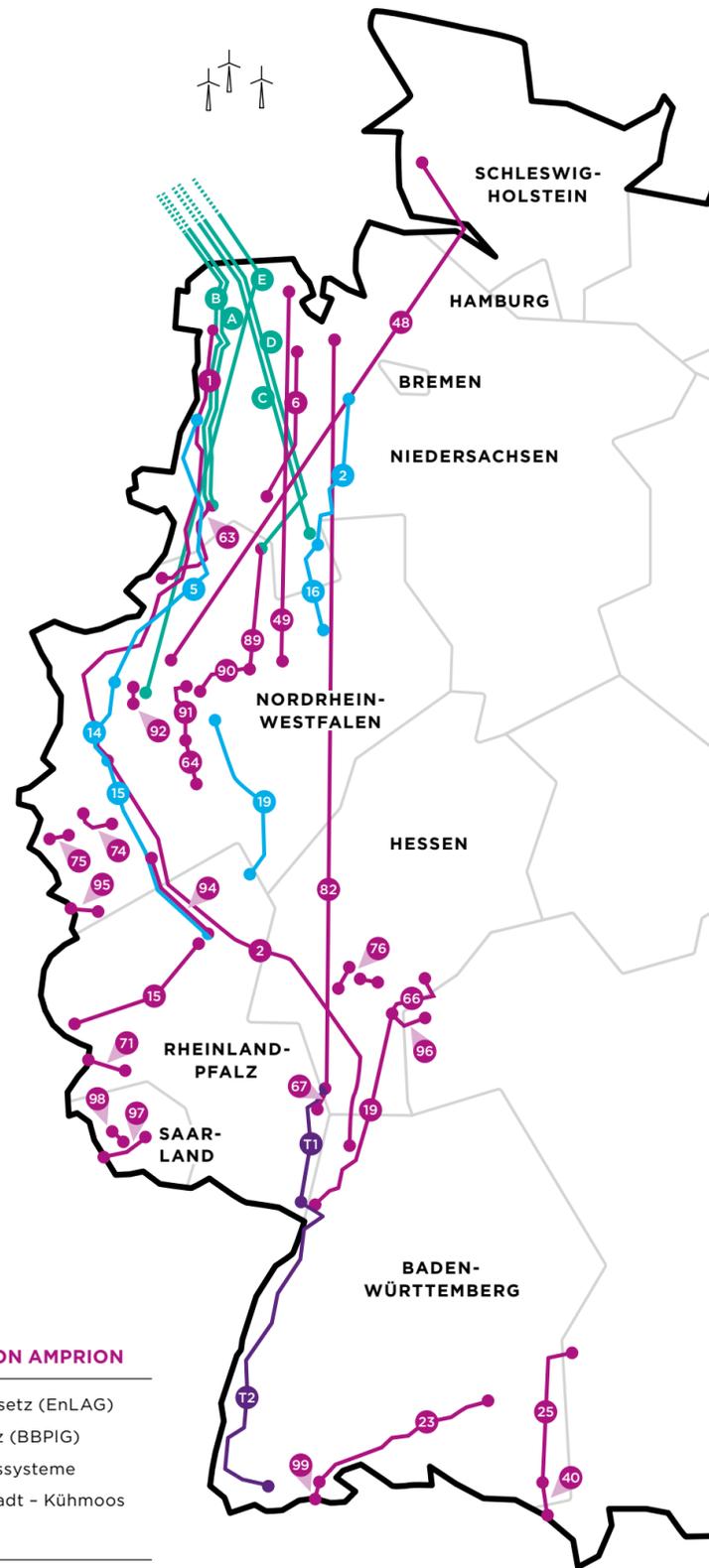
Wir sichern eine stabile und zuverlässige Stromversorgung für **29 MILLIONEN MENSCHEN** in unserem Netzgebiet.

Bis 2030 sollen **80 PROZENT** des Stroms in Deutschland aus erneuerbaren Energien stammen. Dafür bauen wir das Übertragungsnetz auf einer Länge von **3.700 KILOMETERN** aus und um.

Bis 2026 wird das Unternehmen etwa **12 MILLIARDEN EURO** in den Umbau des Energiesystems investieren.

## LEITUNGSBAUPROJEKTE VON AMPRION

- Energieleitungsausbaugesetz (EnLAG)
- Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG)
- Offshore-Netzanbindungssysteme
- Ad-hoc-Maßnahme Bürstadt - Kühmoos
- ① Vorhabensnummer



AMPRION IM KURZPROFIL

AMPRION SETZT AUF NEUE LÖSUNGEN FÜR DAS ENERGIESYSTEM VON MORGEN.

# ENERGIEWENDE BRAUCHT INNOVATIONSTREIBER

# INHALT

<b>Vorwort der Geschäftsführung</b>	<b>07</b>
<b>„Wir sind eine Ideenschmiede“ - Interview mit Dr. Hans-Jürgen Brick, CEO</b>	<b>08</b>
<b>„Wir sind auf neue Lösungen angewiesen“ - Bedeutung von Innovationen</b>	<b>13</b>
<b>1 Energiesystem im Wandel</b>	<b>17</b>
1.1 „Systemvision 2050“	19
1.2 Energiesystem-Modellierung und -Analyse (ESMA)	22
1.3 Blindleistungsaustausch zwischen Verteil- und Übertragungsnetzbetreibern	25
1.4 Systemmarkt: Konzept für ein systemdienliches Marktdesign	27
<b>2 Neue Netzelemente</b>	<b>29</b>
2.1 Weiterentwicklung der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)	31
2.2 Offshore-Vernetzung	34
2.3 Schwarzstartfähige Offshore-Systeme	38
2.4 Innovative Anlagen zur Systemstabilisierung	40
2.5 Dezentraler Netzbooster	45
2.6 Neue Betriebsmittel im Höchstspannungsnetz	47
<b>3 Netzausbau 2.0</b>	<b>49</b>
3.1 Powergrid Pathfinder	51
3.2 E-Power-Pipe	53
3.3 Mehrfachpflüge für Erdkabeltrassen	54
3.4 Modifiziertes Spülbohrverfahren	55
3.5 SF <sub>6</sub> -freie Technologien	56
3.6 Gleichstrom-Kompaktmasten	57
<b>4 Systemführung und Betriebskonzepte der Zukunft</b>	<b>59</b>
4.1 Hauptschaltleitung Brauweiler	61
4.2 Kurative Systemführung	63
4.3 Balancing-Plattform MARI	65
4.4 Adaptiver Freileitungsbetrieb	66
4.5 Online-Monitoring	68
4.6 Drohnen	71
4.7 Satellitengestütztes Trassenmanagement	73
<b>5 Digitalisierung von Unternehmensprozessen</b>	<b>75</b>
5.1 Cloud-Infrastruktur für Innovationen	77
5.2 „Digitaler Zwilling“	78
5.3 Big-Data-Plattform	79
5.4 Künstliche Intelligenz	81
5.5 Neue (digitale) Arbeitsweisen	86
5.6 Digitale Stakeholderkommunikation	88
<b>Dank</b>	<b>92</b>
<b>Impressum</b>	<b>93</b>





## LIEBE LESER\*INNEN,

als Übertragungsnetzbetreiber bereitet Amprion den Weg für ein klimaneutrales Energiesystem. Dieser Wandel ist mit großen Herausforderungen für die Stabilität des Stromnetzes verbunden. Allein mit den Lösungen von heute werden wir sie nicht bewältigen. Zudem wollen wir Amprion in die Lage versetzen, das sektorenübergreifende Energiesystem von morgen zu planen und zu koordinieren. Auch dafür sind wir auf Innovationen angewiesen. Daher intensiviert Amprion seine Anstrengungen in den Bereichen Forschung und Entwicklung, arbeitet an neuen Technologien, kreativen Lösungen und ressourcenschonenden Konzepten.

Diese Innovationstätigkeiten stellen wir Ihnen im vorliegenden Bericht vor. Sie umfassen Forschungs- und Entwicklungsprojekte aus unterschiedlichsten Geschäftsbereichen. Wir haben ihre Darstellung an fünf Hauptthemen orientiert. Wir beginnen mit dem „Energiesystem im Wandel“ und geben Einblicke in innovative „neue Netzelemente“. Wir stellen Innovationen für den „Netzausbau 2.0“ vor, blicken auf „Systemführung und Betriebskonzepte der Zukunft“ und betrachten die „Digitalisierung von Unternehmensprozessen“.

Wir berichten über zukunftsfähige Technologien, die wir entwickeln und erproben, teilweise aber auch schon in der Praxis einsetzen. Kriterien wie Nachhaltigkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit stehen dabei im Vordergrund. Bei vielen Innovationen arbeiten wir mit nationalen und internationalen Partnern zusammen, pflegen und initiieren Kooperationen mit Wirtschaft und Wissenschaft.

Innovationen entstehen, wenn Menschen initiativ werden und Ideen entwickeln, wie Dinge besser und effizienter laufen können. Wir danken allen Mitarbeiter\*innen, die sich in dieser Weise engagieren, und werden die Innovationskraft bei Amprion weiter fördern.

**PETER RÜTH**  
Chief Financial Officer (CFO)

**DR. HANS-JÜRGEN BRICK**  
Chief Commercial Officer (CCO) und  
Vorsitzender der Geschäftsführung (CEO)

**DR. HENDRIK NEUMANN**  
Chief Technical Officer (CTO)

## »WIR SIND EINE IDEENSCHMIEDE.«

**Amprion setzt auf Innovationen, um die Zukunft der Energiewelt mitzugestalten, sagt CEO Dr. Hans-Jürgen Brick. Das zeigt sich an Projekten aus allen Bereichen des Unternehmens.**

**ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER GELTEN ALS KONSERVATIV. SCHLISSLICH GEHT ES IHNEN UM DIE SICHERHEIT DES STROMSYSTEMS. IST DA ÜBERHAUPT SPIELRAUM FÜR INNOVATIONEN?**

Aber sicher. Als Übertragungsnetzbetreiber haben wir nicht nur die Aufgabe, das Stromsystem stabil und sicher zu halten, sondern bereiten auch den Weg für ein klimaneutrales Energiesystem. Um diese beiden Aufgaben zu verbinden, sind wir auf neue Technologien, auf neue Lösungen angewiesen. Um es klar zu sagen: Wir sind kein Netzbetreiber, der sein Netz lediglich verwaltet. Wir gestalten die Zukunft der Energiewelt mit – und das geht nur mit einem Denken, das nach vorne gerichtet ist. Dieses Denken gehört zur DNA von Amprion. Daraus entstehen Innovationen.

**WAS SIND DAS FÜR NEUE TECHNOLOGIEN, NEUE LÖSUNGEN?**

Das Spektrum reicht von neuen Bohrverfahren für die Verlegung von Erdkabeln bis zum Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Systemführung, von neuen Betriebsmitteln, die das Netz stabilisieren, bis zu digitalen Analysewerkzeugen, die uns helfen, das Energiesystem der Zukunft zu modellieren. Die Innovationsdynamik durchzieht alle Geschäftsbereiche. Wir gehen für die Energiewende an so vielen Stellen neue Wege, dass wir uns entschlossen haben, die Innovationstätigkeit von Amprion umfassend und systematisch darzustellen. Dazu dient der vorliegende Bericht.

**»Wir gestalten die Zukunft der Energiewelt mit.«**



#### WAS FASZINIERT SIE AN INNOVATIONEN?

Es geht darum, neue Wege zu gehen, um unsere volkswirtschaftlich wichtigen Aufgaben zu erfüllen. Ich bin kein Ingenieur, aber freue mich sehr, wenn Kolleg\*innen initiativ werden und Ideen entwickeln, wie Dinge besser, effizienter laufen können. Amprion war immer schon eine Ideenschmiede. Wir stehen ja in der Tradition jener Ingenieur\*innen, die vor 100 Jahren das Übertragungsnetz in Deutschland erfunden haben. Damals entstand die erste Stromverbindung in den Alpenraum. Sie ermöglichte das Zusammenspiel von Kohlekraftwerken in Westdeutschland und Wasserkraftanlagen in den Alpen, um die Industrie an Rhein und Ruhr mit Strom zu versorgen. Die Hauptschaltleitung in Brauweiler hat dieses neue System der Elektrizitätsversorgung gesteuert und erfüllt bis heute eine zentrale Aufgabe in der Systemführung. Das macht sie mithilfe modernster IT und künstlicher Intelligenz. Anders könnten unsere Ingenieur\*innen die Mengen an Daten nicht verarbeiten, die an mehr als 2.800 Leitungen und an mehr als 50.000 Schaltgeräten in 160 Umspannanlagen erhoben werden.

»Es geht darum, neue Wege zu gehen, um unsere volkswirtschaftlich wichtigen Aufgaben zu erfüllen.«



#### WELCHE INNOVATIONEN BRAUCHEN WIR FÜR DIE ENERGIEWENDE?

Die Herausforderung liegt darin, das Energiesystem auf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien umzustellen. Wir verabschieden uns zunehmend zum Beispiel von konventionellen Kraftwerken, deren Generatoren die Spannung im Stromnetz stützen. An ihrer Stelle integrieren wir neuartige Betriebsmittel wie rotierende Phasenschieber ins Netz. Ein anderes Beispiel ist das Projekt „Systemvision 2050“. Dort haben wir Partner aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zusammengebracht, um die unterschiedlichen Anforderungen an ein klimaneutrales, sektorenübergreifendes Energiesystem zu identifizieren und zu diskutieren. Daraus kann eine gemeinsame Vision für ein Energiesystem der Zukunft entstehen. Das Projekt liefert damit eine Blaupause, um einen künftigen Systementwicklungsplan zu erstellen, der die energiewirtschaftlichen Sektoren Strom, Wärme, Methan und Wasserstoff gemeinsam betrachtet und optimiert.

#### WIE HELFEN INNOVATIONEN BEIM NETZAUSBAU?

Diesem Thema widmet der vorliegende Bericht ein eigenes Kapitel. Das zeigt die Bedeutung für Amprion. Gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie arbeiten wir zum Beispiel an neuen bodenschonenden Bohrverfahren. Um Genehmigungsverfahren zu beschleunigen, haben wir ein Computerprogramm mitentwickelt, das dabei hilft, Trassen so zu planen, dass es weniger Konflikte mit Stakeholder\*innen in der Region gibt. Zur Beschleunigung tragen auch innovative Maßnahmen der Kommunikation bei: Wir können Stakeholder\*innen künftig auch durch digitale Dialogformate einbinden, zum Beispiel durch einen Bürgerinfomarkt im Internet. Dadurch erhöhen wir unsere Reichweite. Und je besser sich Menschen informiert fühlen, desto eher sind sie bereit, den Bau von Stromleitungen in ihrer Nachbarschaft zu tolerieren.



»Wir setzen neue Lösungen nur ein, wenn sie sich in der Praxis bewähren und uns voranbringen.«

#### WIE FÖRDERT AMPRION INNOVATIONEN?

Wir halten uns an den Dreiklang aus Zielen, Prozessen und Kultur. Wir haben strategische Ziele. Um sie zu erreichen, setzen wir unter anderem auf Innovationen. Im kommenden Jahr werden wir ein internes Innovationssymposium veranstalten. Die Unternehmenskultur von Amprion ist darauf ausgerichtet, Wissen und Erfahrungen zu teilen, sich Herausforderungen anzupassen und veränderungsfähig zu sein. Daher bin ich mir sicher, dass uns die guten Ideen für neue Technologien und neue Lösungen nicht ausgehen werden. Und in unseren Netzwerken finden wir die Partner, mit denen wir Innovationen nicht nur entwickeln, sondern auch erproben können. Das ist uns als Übertragungsnetzbetreiber wichtig: Innovationen sind kein Selbstzweck. Wir setzen neue Lösungen nur ein, wenn sie sich in der Praxis bewähren und uns voranbringen. Da sind wir auf gute Weise konservativ.

## »WIR SIND AUF NEUE LÖSUNGEN ANGEWIESEN.«

**Damit der Wandel zu einem klimaneutralen Energiesystem gelingt, intensiviert Amprion seine Innovationstätigkeit. Viele Innovationen entstehen gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern.**

Die Energiewirtschaft in Deutschland und Europa steht vor großen Herausforderungen. Um die Klimaziele der Bundesregierung und der EU zu erreichen, bedarf es einer Transformation des gesamten Strom- und Energiesystems, unserer heutigen industriellen Wertschöpfung, unserer Mobilität und teilweise auch unserer Art zu leben – und das alles in einer nie da gewesenen Geschwindigkeit. Die aktuelle Energiekrise verdeutlicht die Dringlichkeit des Wandels – und führt unserer Gesellschaft einmal mehr die zentrale Bedeutung einer sicheren und bezahlbaren Energieversorgung vor Augen.

Allein mit den Lösungen von heute werden diese Herausforderungen nicht zu bewältigen sein. Wir sind auf neue, innovative Lösungen und Technologien angewiesen. Mit seiner Innovationstätigkeit leistet Amprion schon heute einen wichtigen Beitrag für den Wandel zu einem klimaneutralen Energiesystem. Doch es ist notwendig, die Anstrengungen zu intensivieren. Das gilt nicht nur für Amprion, sondern für die gesamte Energiewirtschaft.

## AUSGANGSPUNKT: DIE AMPRION-STRATEGIE

Die Schwerpunkte der Innovationstätigkeit von Amprion ergeben sich aus der Unternehmensstrategie: Als „Übertragungsnetzbetreiber der nächsten Generation“ wollen wir erhebliche Kompetenzen in den Bereichen der sektorenübergreifenden Systemplanung und des Systembetriebs aufbauen. Der Ausbau des Übertragungsnetzes muss sehr viel schneller voranschreiten. Kurz- und mittelfristig bedarf es einer Leistungssteigerung und Höherauslastung der bestehenden Netzinfrastruktur unter Wahrung der Systemstabilität.

## ENTWICKLUNG MIT PARTNERN

Bei der Entwicklung von Innovationen und der Erweiterung des Know-hows kann Amprion an vielen Stellen auf langjährige Betriebserfahrungen zurückgreifen. Gleichzeitig werden neue Erkenntnisse durch den Einsatz innovativer Technologien und Prozesse sowie digitaler Lösungen gewonnen. Viele Innovationen entwickeln wir dabei in Kooperation mit nationalen und internationalen Partnern aus Forschung und Industrie. Hierbei nimmt Amprion nicht selten die Rolle des Impulsgebers ein oder arbeitet als Projektpartner daran, technische Lösungen im Rahmen von Pilotprojekten ins Übertragungsnetz zu integrieren und zu erproben. Dabei setzt Amprion nicht auf die „eine“ Innovation, sondern auf eine Vielzahl von innovativen Ansätzen und Technologien in den einzelnen Unternehmensbereichen.

Das europäische Energiesystem ist stark vernetzt. Wir erreichen das ambitionierte Ziel der Klimaneutralität nur gemeinsam mit unseren Partnern. Dafür kooperieren wir eng mit den anderen nationalen Übertragungsnetzbetreibern 50Hertz, TenneT und TransnetBW. Zudem engagieren wir uns in internationalen Gremien, etwa im Internationalen Rat für große elektrische Netze (CIGRE) und im Verband der europäischen Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E) sowie in nationalen Fachverbänden wie dem Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN). Darüber hinaus verfolgt Amprion seit 2020 eine intensive Kooperation mit Europas größtem Verteilnetzbetreiber E.ON.

## SCHWERPUNKTE DER INNOVATIONSTÄTIGKEIT

Die Energiewende kann nur gelingen, wenn sich die verschiedenen Stakeholder\*innen und Interessengruppen intensiver austauschen und wenn Unternehmen aus verschiedenen Sektoren, Netzbetreiber und Marktteilnehmer\*innen enger zusammenarbeiten. Daher setzt Amprion bei der Innovationstätigkeit einen Schwerpunkt an den Schnittstellen und Sektorengrenzen des Übertragungsnetzes [→ KAPITEL 1, SIEHE SEITE 17].

Das Übertragungsnetz von morgen ist geprägt durch weniger Synchrongeneratoren, deutlich mehr dezentrale Umrichtereinspeisungen, höhere Volatilität, größere Lastferne der Erzeugung und damit großräumigere Transite. Zur Integration der erneuerbaren Energien und gleichzeitigen Wahrung der Netz- und Systemstabilität setzt Amprion verstärkt auf neue Betriebsmittel und eine Vernetzung der Netzelemente [→ KAPITEL 2, SIEHE SEITE 29].

Zudem bedarf es einer signifikanten Beschleunigung des Netzausbaus. Das gilt insbesondere für die Planungs- und Genehmigungsverfahren. Hierzu wurden im Sommer 2022 bereits wichtige Gesetzesänderungen umgesetzt. Sie reichen aber noch nicht aus. Amprion verfolgt deshalb innovative Ansätze und neue Verfahren zur Baubeschleunigung und Akzeptanzsteigerung [→ KAPITEL 3, SIEHE SEITE 49].

Um mehr Strom transportieren zu können, arbeitet Amprion seit vielen Jahren an Maßnahmen zur Höherauslastung des Bestandsnetzes. Kurz- und mittelfristig rückt dieser Punkt jedoch besonders in den Fokus der Innovationstätigkeit. Damit steigen auch die Anforderungen an die Systemführung und den effizienten Betrieb des Netzes. [→ KAPITEL 4, SIEHE SEITE 59].

Ein weiteres wichtiges Feld der Innovationstätigkeit von Amprion ist es, Potenziale zur Digitalisierung von Prozessen zu nutzen. Indem wir Daten optimal auswerten, Simulationen verbessern und KI-gestützte Verfahren einsetzen, können wir bei Amprion schnellere und nachhaltigere Entscheidungen treffen [→ KAPITEL 5, SIEHE SEITE 75].

**Amprion steht vor der vielleicht spannendsten und herausforderndsten Dekade der eigenen Unternehmensgeschichte. Gemeinsam mit unseren Partnern treiben wir Innovationen voran und liefern damit einen wichtigen Beitrag zu einem klimaneutralen Energiesystem.**

### DIE AUTOREN DES BEITRAGS:



**THOMAS DEDERICHS**  
Leiter Strategie und Energiepolitik



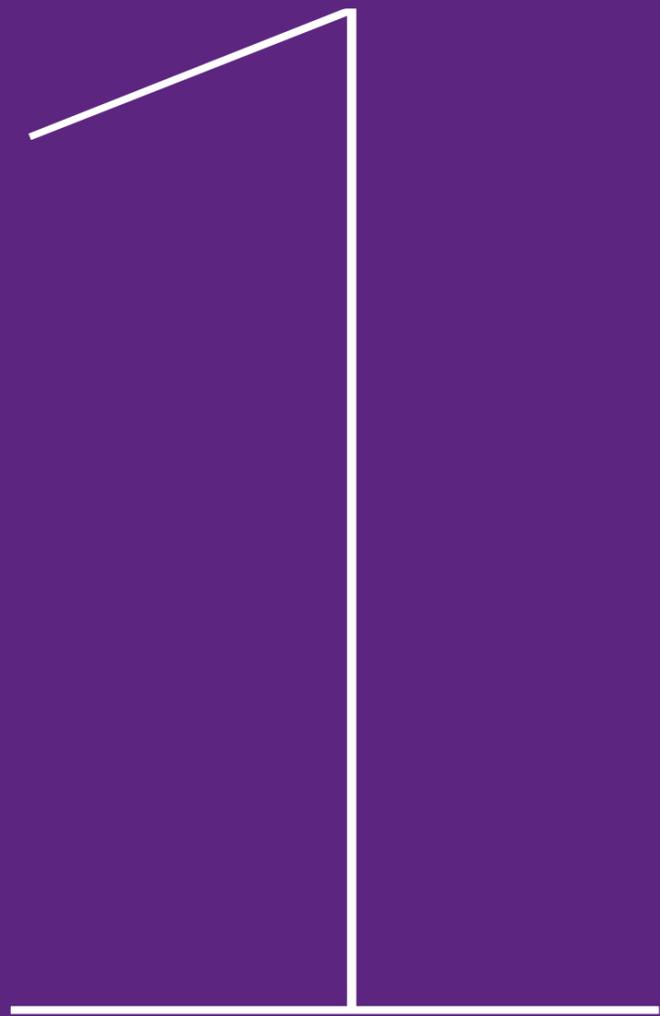
**DR. BARTOSZ RUSEK**  
Leiter Technologische Innovationen



**JAN PETER GETZLAFF**  
Leiter Digitale Innovation und IT-Steuerung



# ENERGIE- SYSTEM IM WANDEL



1.1	„Systemvision 2050“	19
1.2	Energiesystem-Modellierung und -Analyse (ESMA)	22
1.3	Blindleistungsaustausch zwischen Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber	25
1.4	Systemmarkt: Konzept für ein systemdienliches Marktdesign	27

# „SYSTEMVISION 2050“

## NUTZEN DER INNOVATION

Partnerschaftliche Entwicklung einer Vision für ein klimaneutrales, sektorenübergreifendes Energiesystem

Die Energiewende ist ein Gemeinschaftsprojekt. Sie kann nur gelingen, wenn sich Stakeholder\*innen aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft intensiver über das Energiesystem der Zukunft austauschen und gemeinsam Lösungen für System- und Marktfragen entwickeln. Amprion hat dafür innovative Vorschläge in die Diskussion eingebracht.

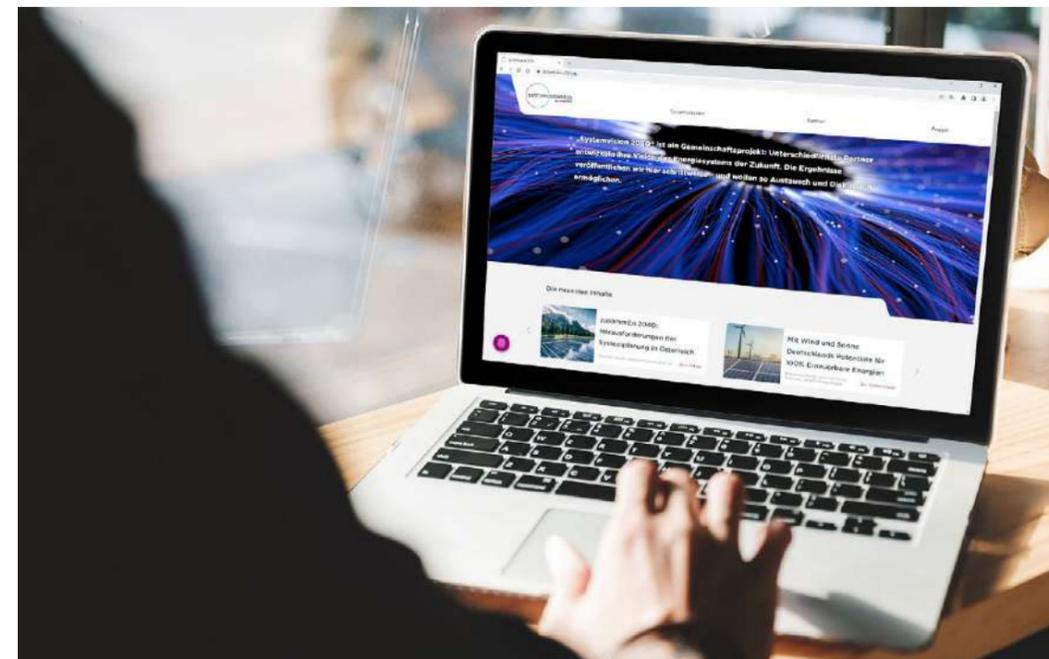


ABB. 01 Internetseite systemvision2050.de

Das Projekt „Systemvision 2050“ bringt Stakeholder\*innen aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft zusammen. Sein Ziel ist es, die unterschiedlichen Anforderungen und Erwartungen an ein klimaneutrales Energiesystem zu identifizieren und zu diskutieren. Dabei werden neben dem Stromsektor auch die Sektoren Wärme, Methan und Wasserstoff in den Blick genommen. Auf diesem Wege wird deutlich, wie breit der Lösungsraum ist, um ein klimaneutrales Energiesystem zu erreichen. Folgen für die Infrastruktur werden abgeschätzt und Hemmnisse sowie Abwägungen zwischen Nachhaltigkeit, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit adressiert.

Getreu unserem Motto „Amprion verbindet“ bieten wir in diesem Projekt eine Plattform. Im Projekt teilen uns die Projektpartner\*innen ihre individuellen Annahmen mit, um ein klimaneutrales Energiesystem zu erreichen. Auf Basis des bei Amprion entwickelten Energiesystemmodells [→ ESMA, SIEHE SEITE 22] wird für die einzelnen Partner\*innen ein individuelles, klimaneutrales Szenario berechnet. Die Sektoren werden dabei gemeinsam betrachtet und optimiert. Durch den Modellierungsansatz werden sowohl die Annahmen als auch die Ergebnisse quantifiziert und objektiviert.

Ein zentrales, innovatives Element im Projekt „Systemvision 2050“ liegt darin, dass sich die Teilnehmer\*innen nicht auf einige wenige Konsensszenarien einigen, wie es in den bekannten Energiesystemstudien der Fall ist. Stattdessen erarbeiten alle Partner\*innen ihr individuelles Szenario. Durch die konsistente Modellierung

erreichen wir eine Vergleichbarkeit aller „Systemvisionen“ miteinander, sodass die einzelnen Szenarien objektiv diskutiert werden können. Diese bilden die Basis für das Projekt.

Auf Basis dieser Szenarien verschriftlichen die Partner\*innen ihre jeweiligen „Systemvisionen“ in Gastbeiträgen, die neben dem reinen Zahlenwerk auch die individuelle Sicht der Partner\*innen auf die Energiewende darlegen. Alle Beiträge werden auf der Projektwebsite [systemvision2050.de](http://systemvision2050.de) veröffentlicht.

Neben den Gastbeiträgen gibt es auf der Website zusätzliche Inhalte: Die Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) hat eine wissenschaftliche Querschnittsanalyse über alle Systemvisionen durchgeführt und sie mit den aktuellen Energiesystemstudien von der Deutschen Energie-Agentur (dena), dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz und weiteren namhaften Think-Tanks verglichen. Unsere Partner\*innen erhalten zudem die Gelegenheit, ihre Sichtweise im Rahmen von Interviews genauer darzulegen.

Innovativ ist weiterhin die Online-Vermarktung des Projekts. Hier wurden neue Wege in den sozialen Medien beschritten. Die Erfahrungen lassen sich für künftige Projekte nutzen. Erfolgsfaktoren waren die klare Definition von Zielgruppen bei Social-Postings, die Nutzung von Paid Social Media und die Suchmaschinenoptimierung. Zusätzliche Kurzvideos für die sozialen Medien wurden mit der KI-Engine „Lumen5“ erstellt.

Als weiteres Online-Element wurde ein Crowdsourcing-Szenario erstellt, für das die Community nach ihrer Meinung zum Energiesystem der Zukunft befragt wurde. 143 Teilnehmer\*innen aus der Fachcommunity haben sich daran beteiligt. Auch hier zeigt sich ein breites Spektrum an Lösungen. Die Szenarien unterscheiden sich nach Effizienz, Schwerpunkten beim Ausbau erneuerbarer Energien und Nutzungstiefe bei grünem Wasserstoff.

Ein zentrales Ergebnis eines jeden Szenarios ist das sogenannte Energieflussdiagramm beziehungsweise Sankey-Diagramm [SIEHE ABB. 02]. Es zeigt auf einen Blick, welche Energiequellen für die jeweilige Systemvision eingesetzt werden – also etwa, wie viel Wasserstoff importiert werden muss oder wie viel Windenergie erzeugt wird, welche Umwandlungsschritte es in Form von Elektrolyseuren oder Wärmepumpen gibt und wie die Energie in den einzelnen Verbrauchssektoren verwendet wird.

Die Projektwebsite zählt mittlerweile mehrere tausend Besucher\*innen. Das zeugt von interessanten Inhalten.

Wir sind überzeugt, mit dem Projekt einen wichtigen Beitrag dazu zu leisten, dass die Energiewende insgesamt besser verstanden wird und die Akzeptanz dafür steigt. Da wir verschiedene Interessengruppen eng einbinden und das Projekt sektorenübergreifend modelliert ist, ergibt sich aus unserer Sicht eine Blaupause für die Erstellung eines zukünftigen Systementwicklungsplans, der die energiewirtschaftlichen Sektoren Strom, Wärme, Methan und Wasserstoff gemeinsam plant und optimiert.

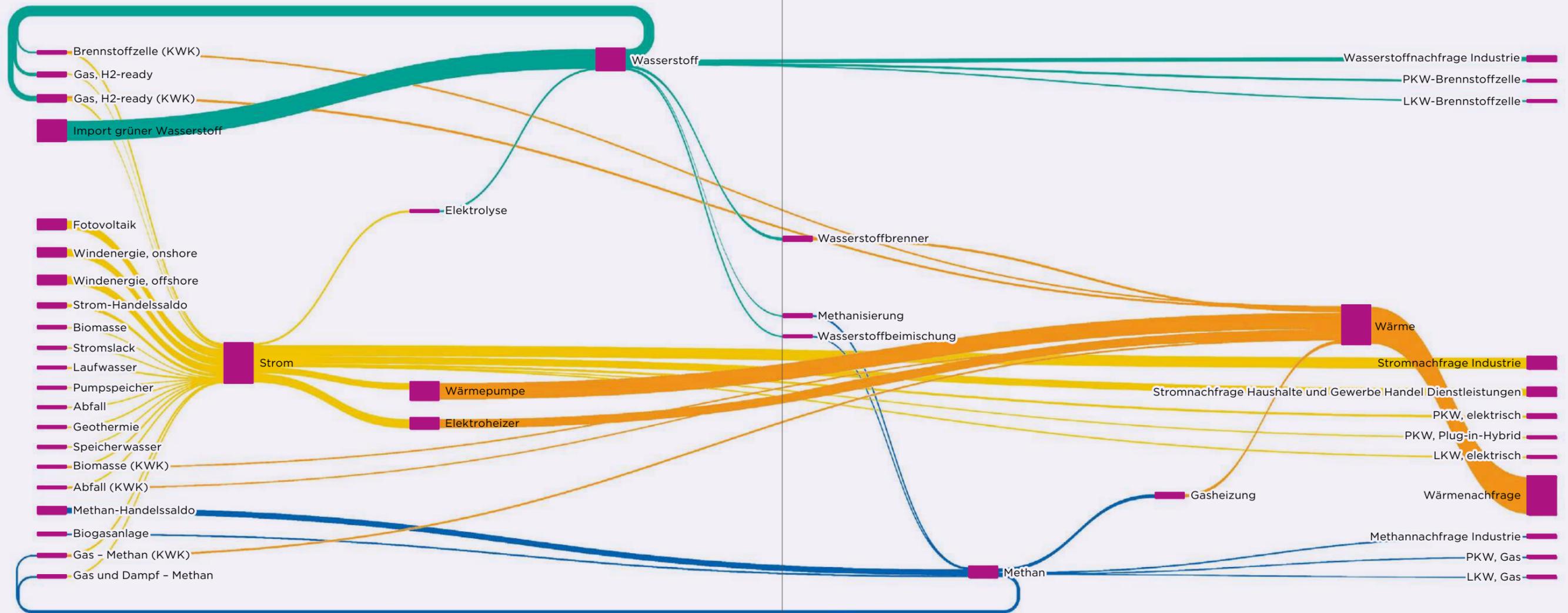


ABB. 02 Sektorenübergreifende Energieflüsse als Ergebnisbeispiel

# ENERGIESYSTEM- MODELLIERUNG UND -ANALYSE (ESMA)

## NUTZEN DER INNOVATION

Modellierung und Analyse des künftigen klimaneutralen Energiesystems, um komplexe Szenarien zu berechnen und Infrastrukturbedarfe zu bestimmen

Deutschland und Europa haben sich auf eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesystems bis spätestens 2045 beziehungsweise 2050 verpflichtet. Hierfür muss nicht nur im Stromsektor, sondern sektorenübergreifend Klimaneutralität erreicht werden. Dem Stromsystem kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da vor allem Solar- und Windenergie in großen Mengen verfügbar sind und regenerativen Strom bereitstellen. Durch Sektorkopplung kann dieser Strom genutzt werden, um andere Sektoren zu dekarbonisieren. Im Gegenzug können diese Sektoren Flexibilität für die Integration der volatilen Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen bereitstellen. Hier sind beispielsweise der sich im Aufbau befindende Wasserstoff-, aber auch der Mobilitätssektor sowie der Wärme- und Erdgassektor zu nennen. Ein solch gekoppeltes Energiesystem kann daher nicht mehr isoliert geplant werden. Eine integrierte Betrachtung ist erforderlich, um die Auswirkungen und das Zusammenwirken aller Sektoren mit dem Stromsystem zu analysieren.

Dadurch wird das Untersuchungssystem signifikant komplexer, weswegen bestehende Modellierungsansätze an ihre Grenzen stoßen. Der weit entfernte Horizont von 2045+ in Kombination mit der Betrachtung von immer neuen Sektoren und Technologien erschweren es zudem, Zukunftsszenarien zu erstellen. Diese bilden aber die Grundlage für alle Modellierungen.

Trotz der gestiegenen Komplexität sollen auch in Zukunft die Auswirkungen aktueller Entwicklungen auf das Energiesystem quantitativ und objektiv analysiert werden können. Dafür bedarf es eines eigenständigen und fortschrittlichen Modellierungs- und Analyseframeworks. Hierbei ist ein hoher Automatisierungsgrad erforderlich, um das integrierte Energiesystem in Kombination mit einer Vielzahl von Szenarien zu betrachten, aber vor allem auch, um deren Auswirkungen und Implikationen für das Stromnetz von morgen leitungs- und knotenscharf bis ins Detail zu analysieren, zu planen und auszuwerten.

Amprion hat einen Prozess zur Energiesystem-Modellierung und -Analyse (ESMA) entwickelt, der diesen Anforderungen entspricht. ESMA bündelt und managt Methoden und Tools zur Energiesystem-Modellierung und -Analyse sowie deren Anwendung in Fallstudien für aktuelle, bereichsübergreifende und interdisziplinäre Fragestellungen rund um das Thema Energiesysteme. Auch das Projekt „Systemvision 2050“ [→ „SYSTEMVISION 2050“, SIEHE SEITE 19] greift auf neu entwickelte Methoden und Tools aus ESMA zurück.



Drei exemplarische innovative Methoden, die im Rahmen von ESMA weiterentwickelt worden sind, stellen wir im Folgenden vor.

### „LISA“ - WEITERENTWICKLUNG SEKTOREN- ÜBERGREIFENDER PLANUNGSMETHODEN FÜR EIN KLIMANEUTRALES ENERGIESYSTEM

Für die sektorenübergreifende Planung hat Amprion im Rahmen von ESMA das Tool LISA entwickelt. LISA steht für „Light Integrated System Analysis“ und ermöglicht es, das ganze Energiesystem inklusive Wasserstoff, Erdgas und Wärme abzubilden, zu analysieren und die Energieflüsse innerhalb Europas und darüber hinaus zu quantifizieren. Alle Energiequellen und -senken, Flexibilität und Transportkapazitäten werden in einem Optimierungsmodell gemeinsam betrachtet. Zudem kann über LISA der hierfür erforderliche Infrastrukturausbau ermittelt werden, wie etwa Transportkapazitäten für den überregionalen Energietransport oder die Verortung und Dimensionierung von Elektrolyseuren zur Erzeugung von Wasserstoff aus Strom. Abbildung 03 zeigt exemplarisch den Ausbaubedarf des Wasserstoff- und Stromnetzes eines Zukunftsszenarios. Dabei kann neben einer Zieljahrbeurteilung auch ein Transformationspfad über mehrere Jahre berechnet werden, um die Energiewende „von Anfang bis Ende“ zu denken.

LISA arbeitet für diese langfristigen Analysen bewusst auf einer hohen Flugebene und konzentriert sich auf die wesentlichen Zusammenhänge, um sehr schnell zu Antworten zu kommen. Die Ergebnisse können anschließend in detaillierten Netzberechnungen weiter analysiert werden.

### ZUKUNFTSSZENARIEN

Mit dem weiten Horizont von 2045+ sowie dem vergrößerten Betrachtungsspektrum von unterschiedlichen Sektoren und zukünftigen Technologien steigt die Unsicherheit über die sich verändernden Rahmenbedingungen des Energiesystems. Die Auswirkungen dieser Entwicklungen auf das gesamte Energiesystem gilt es zu antizipieren, um die nötigen Anforderungen an das Stromsystem der Zukunft abzuleiten.

Hierfür werden die Rahmenbedingungen und mögliche zukünftige Entwicklungen in verschiedene Kennzahlen übersetzt, zum Beispiel die erwarteten Nachfragen der Sektoren oder die installierten Kapazitäten von erneuerbaren und Sektorkopplungstechnologien. Ein Set aus diesen Kennzahlen bildet dann ein spezifisches Szenario der Zukunft ab, welches die relevanten Aspekte des gesamten Energiesystems mit allen Sektoren berücksichtigt.

Um ein großes Spektrum der zukünftigen Entwicklungen zu erfassen, sollte dabei ein breiter Trichter aus Szenarien aufgespannt werden. Auf diese Weise können die zukünftige Infrastruktur bedarfsgerecht ermittelt und optimale Pfade zur Klimaneutralität für diverse Szenarien aufgezeigt werden.

Für die Ermittlung der Szenarien hat sich Amprion unter anderem der sogenannten Szenariotechnik bedient und zahlreiche verschiedene Schlüsselfaktoren mit unterschiedlichen Ausprägungen und Projektionen identifiziert, die das Energiesystem der Zukunft maßgeblich beeinflussen könnten. Diese übersetzen wir in quantifizierbare Parameter, durch deren Kombination wir eine Vielzahl von Szenarien ermitteln. Durch Konsistenzprüfungen und Clusterverfahren brechen wir diese anschließend auf eine handhabbare Zahl herunter.

Die Szenarien dienen als Basis für Berechnungen für das zuvor vorgestellte Energiesystemmodell LISA. Außerdem bilden sie die Grundlage für die Szenarien der Partner\*innen in der „Systemvision 2050“ [→ „SYSTEMVISION 2050“, SIEHE SEITE 19].

### AUTOMATISIERTE NETZPLANUNG

Wenn wir von der Betrachtung des gesamten Energiesystems in die detaillierte, langfristige Netzplanung übergehen, verfolgt Amprion das Ziel, bedarfsgerechte und kosteneffiziente Netzstrukturen zu ermitteln, die die Versorgungsaufgabe erfüllen und Systemsicherheit gewährleisten können. Aufgrund des extrem großen Lösungsraums und der wechselseitigen Abhängigkeiten der unterschiedlichen Ausbauoptionen setzen wir selbst entwickelte Algorithmen mit einem hohen Automatisierungsgrad ein, um Netzausbauvarianten effizient zu ermitteln und in einem ersten Schritt zu bewerten. Mit diesen Methoden lassen sich die Rechenzeiten für die Bewertung einzelner Ausbauvarianten deutlich reduzieren und die Anzahl der betrachteten Planungsalternativen wesentlich steigern.

**»ESMA bündelt und managt Methoden und Tools zur Energiesystem-Modellierung und -Analyse sowie deren Anwendung in Fallstudien für aktuelle, bereichsübergreifende und interdisziplinäre Fragestellungen rund um das Thema Energiesysteme.«**

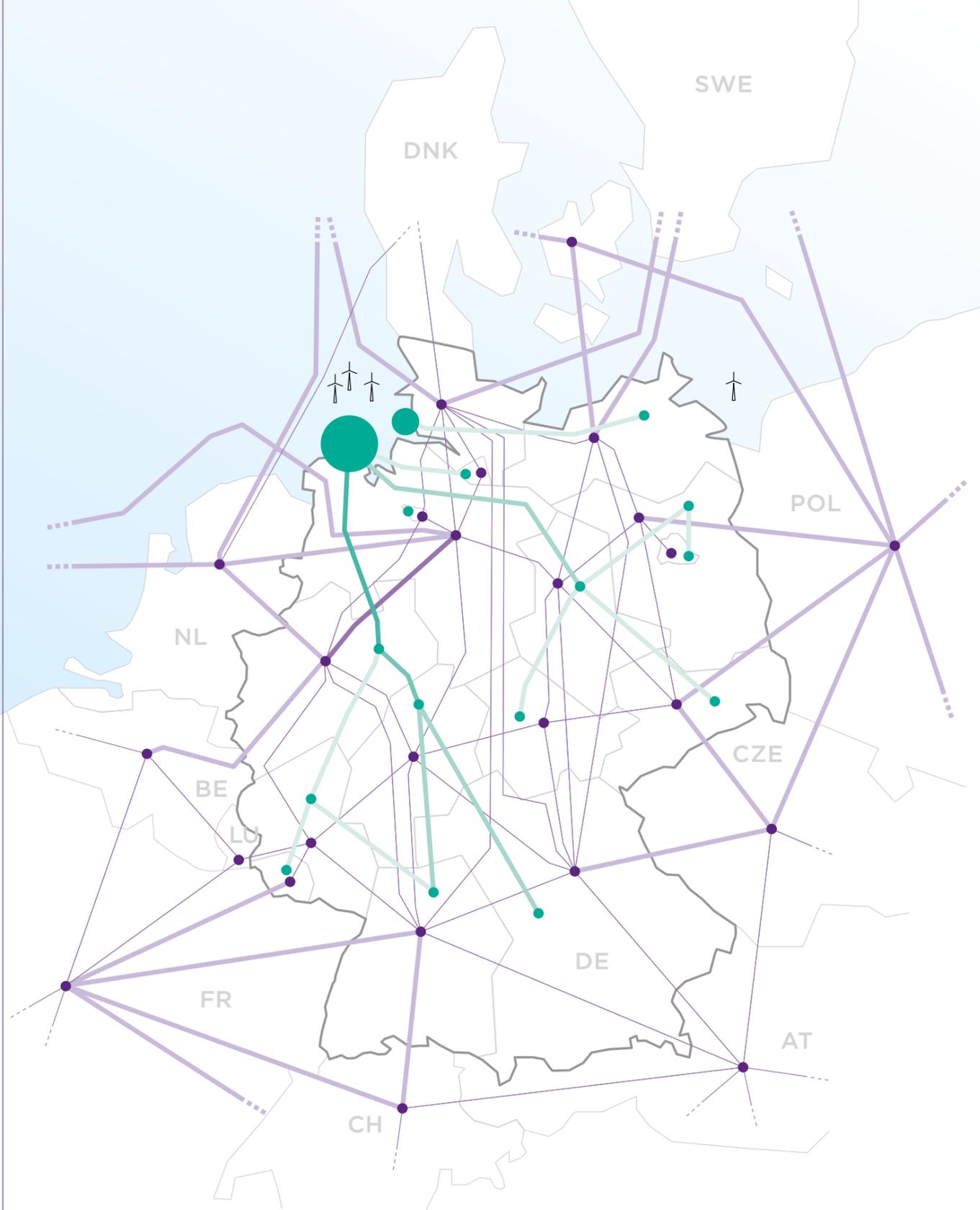


ABB. 03 Exemplarischer Ausbaubedarf des H<sub>2</sub>- und Stromnetzes in einem Zukunftsszenario

● Netzregion Strom    ● Netzregion H<sub>2</sub>

# BLINDLEISTUNGS- AUSTAUSCH ZWISCHEN VERTEIL- UND ÜBERTRAGUNGS- NETZBETREIBER

## NUTZEN DER INNOVATION

Bereitstellung von Blindleistung aus den Verteilnetzen, um die Spannung im Übertragungsnetz zu stützen

Um die Spannung im Übertragungsnetz zu regeln, wird Blindleistung heute entweder durch netzbetreibereigene Kompensationsanlagen oder als Systemdienstleistung durch direkt ans Übertragungsnetz angeschlossene Kraftwerke eingespeist. Die perspektivische Stilllegung direkt angeschlossener Kraftwerke reduziert das im Übertragungsnetz verfügbare Blindleistungspotenzial jedoch deutlich. Zukünftig könnte dieser Wegfall zumindest teilweise dadurch ersetzt werden, dass vermehrt Blindleistung aus den unterlagerten Verteilnetzen bereitgestellt wird.

Dazu hat Amprion sich gemeinsam mit Verteilnetzbetreibern (VNB) der Aufgabe angenommen, das Potenzial eines koordinierten Blindleistungsaustausches zwischen VNB und Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) zu bewerten und weiterzuentwickeln. Das gemeinsam mit dem E.ON VNB Westnetz entwickelte und inzwischen gültige Konzept sieht vor, den Blindleistungsaustausch an die Gegebenheiten des zunehmenden Ausbaus dezentraler Erzeugungsanlagen (DZE) anzupassen und damit einen Blindleistungsaustausch auch bei geringem Wirkleistungsaustausch zwischen VNB und ÜNB zu ermöglichen. Die Pönalisierung bei Verletzung der Blindleistungsgrenzen wurde abgeschafft. Als Alternative werden bei Grenzwertverletzungen Gegenmaßnahmen gemeinsam mit VNB und ÜNB abgestimmt.

Der Blindleistungsaustausch soll in Zukunft auf Anfrage des ÜNBs aktiv verändert werden können, sodass die unterlagerten Verteilnetze dazu beitragen, die Spannung im Übertragungsnetz zu stützen. Da die Nutzbarkeit des insgesamt installierten Blindleistungspotenzials aus DZE technisch begrenzt ist, muss das tatsächlich nutzbare Potenzial vor Anwendung des Konzepts ermittelt werden.

Für eine exemplarische Netzregion wurden die theoretisch und tatsächlich nutzbaren Blindleistungspotenziale aus DZE mit Westnetz zunächst anhand von Netzberechnungen ermittelt und anschließend in realen Feldversuchen bestätigt. Das gesamte installierte Blindleistungspotenzial im untersuchten Netzgebiet betrug 638 Megavar (MVar).

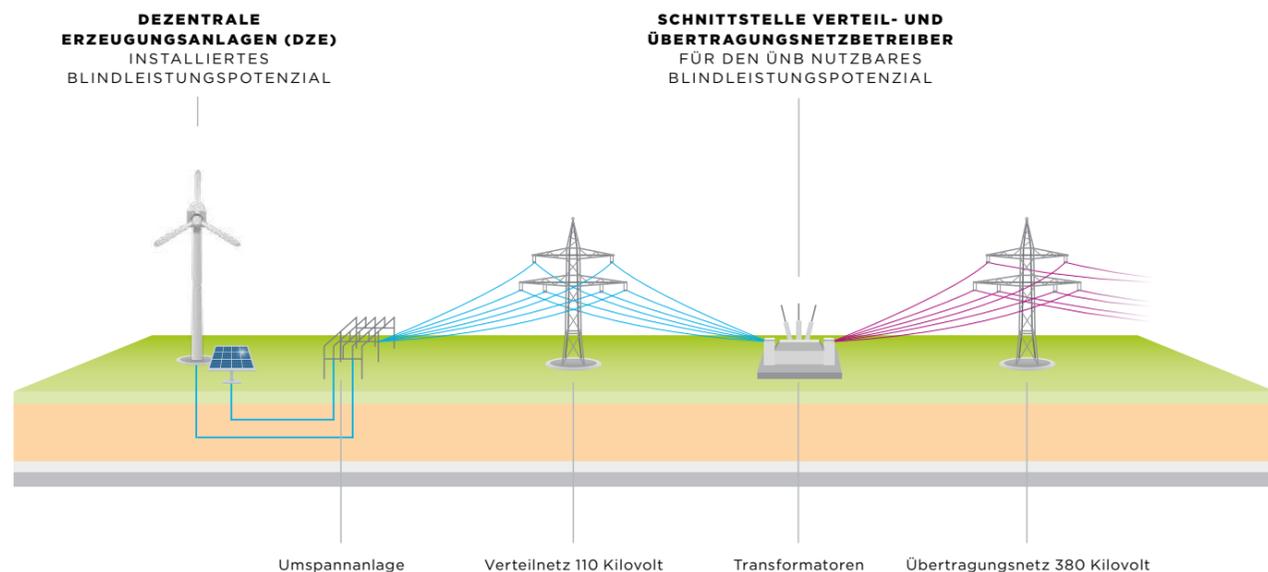


ABB. 04 Blindleistungspotenzial der Dezentralen Erzeugungsanlagen (DZE) im Verteilnetz und Schnittstelle zwischen Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber (VNB/ÜNB)  
Schematische Darstellung

In den anschließend durchgeführten Pilotversuchen zeigten sich verschiedene technische Einschränkungen, die das tatsächlich nutzbare Blindleistungspotenzial reduzierten:

- unterschiedliche technische Anschlussregeln
- DZE im Niederspannungsnetz sind aufgrund fehlender Kommunikationsanbindung größtenteils nicht ansteuerbar
- Einhaltung lokaler Spannungsgrenzen im Verteilnetz
- hohe elektrische Entfernung zum Übertragungsnetz
- zu hoher koordinativer Aufwand für ansteuerbare Kleinstanlagen

Das im Feldtest an der Schnittstelle VNB/ÜNB tatsächlich genutzte Blindleistungspotenzial belief sich auf etwa 75 Mvar spannungshhebend und auf ca. 80 Mvar spannungssenkend [SIEHE ABB. 04]. Eine übliche Blindleistungskompensationsanlage wird mit etwa 300 Mvar dimensioniert.

Die Ergebnisse der Feldtests zeigen erstmals, dass ein aktiver Blindleistungsaustausch zwischen VNB und Amprion in der Praxis möglich und sinnvoll ist. Zudem kann dieser im begrenzten Maße dazu beitragen, den Bedarf an neuen Blindleistungskompensationsanlagen zu reduzieren. Die Erkenntnisse aus den Feldtests fließen in eine aktuelle E.ON-Amprion-Kooperation ein. Sie können dafür genutzt werden, das tatsächlich nutzbare und bereits vorhandene Blindleistungspotenzial weiterer Netzgruppen zu ermitteln sowie den Blindleistungsaustausch zwischen VNB und ÜNB zu verbessern.

# SYSTEMMARKT: KONZEPT FÜR EIN SYSTEMDIENLICHES MARKTDESIGN

## NUTZEN DER INNOVATION

Marktmodell mit Anreizen, um Anlagen im Netz systemdienlich auszulegen und so Versorgungssicherheit mit Systemsicherheit zu verbinden



ABB. 05 Internetseite systemmarkt.net

Amprion hat mit dem Konzept des Systemmarkts Anfang 2022 einen eigenen Vorschlag zur Weiterentwicklung des heutigen Marktdesigns vorgestellt. Der Systemmarkt dient nicht als „die eine kurzfristige und schnelle Lösung“ im Kontext der aktuellen Energie- und Preiskrise oder der aktuellen Versorgungsherausforderung im Winter. Er setzt jedoch bei der bestehenden Problematik an und würde zukünftig das Risiko einer solchen Krise reduzieren. Der Systemmarkt zielt darauf, durch sachlich und örtlich differenzierte Kapazitätzahlungen ökonomische Anreize für Marktteilnehmer\*innen zu schaffen, ihre Anlagen systemdienlich auszulegen und ihre jeweiligen Standorte entsprechend zu wählen.

Im heutigen Marktdesign werden nachgelagerte Netz- und Systemkosten bei den Investitions- und Betriebsentscheidungen der Marktteilnehmer\*innen oftmals nicht oder nicht angemessen berücksichtigt. Eine gesamtsystemische Betrachtung findet nicht statt. Der Systemmarkt adressiert diese Thematik und ergänzt die heutigen Spot- und Terminmärkte

des Energy-only-Markts. Er funktioniert dabei ähnlich wie ein klassischer zentraler Kapazitätsmarkt, jedoch erweitert um eine lokale Komponente sowie Systemdienstleistungsbedarfe.

Konkret sieht das Konzept eine zentrale Plattform vor, welche die Bedarfe des Energiesystems auf einen Blick aufzeigt und deren Beschaffungsprozess koordiniert. Zunächst werden dabei die Bedarfe definiert und regional differenziert bewertet, die zur System- und Versorgungssicherheit beitragen. Der Systemmarkt sollte allerdings nur Anreize für Systembedarfe setzen, die sich für eine marktgestützte Beschaffung eignen. Das sollte zuvor aus technischer, ökonomischer oder operativer Sicht geprüft werden. Kommt eine marktgestützte Beschaffung für einen Systembedarf grundsätzlich infrage, wird ein entsprechendes Beschaffungsverfahren gestartet. Sollte der lokale Systembedarf wider Erwarten nicht oder nur teilweise durch die Marktteilnehmer\*innen effizient erbracht werden können, stellen die Netzbetreiber die noch benötigten (Rest-)Bedarfe sicher.

## DER LEITGEDANKE: DAS SYSTEM ALS GANZES BETRACHTEN

Der Systemmarkt vereint die Stärken einer langfristigen und koordinierten Systemplanung mit der Innovationskraft des Strommarkts [SIEHE ABB. 06]. Auf diese Weise unterstützt er eine kosteneffiziente und sichere Transformation des Energiesystems. Er stellt sicher, dass zukünftig ausreichend Potenziale an geeigneten Standorten verfügbar sind, um einen stabilen Betrieb des Stromsystems zu gewährleisten. Außerdem bekommen Marktteilnehmer\*innen Anreize, ihre Anlagen systemdienlich auszuliegen. Dadurch wachsen die volkswirtschaftlich weniger effizienten Netzreserven nicht weiter. Investitionen fließen stattdessen in einen zukunftssicheren Umbau des Stromsystems.



Weitere Informationen zum Systemmarkt finden Sie auf [systemmarkt.net](https://systemmarkt.net)

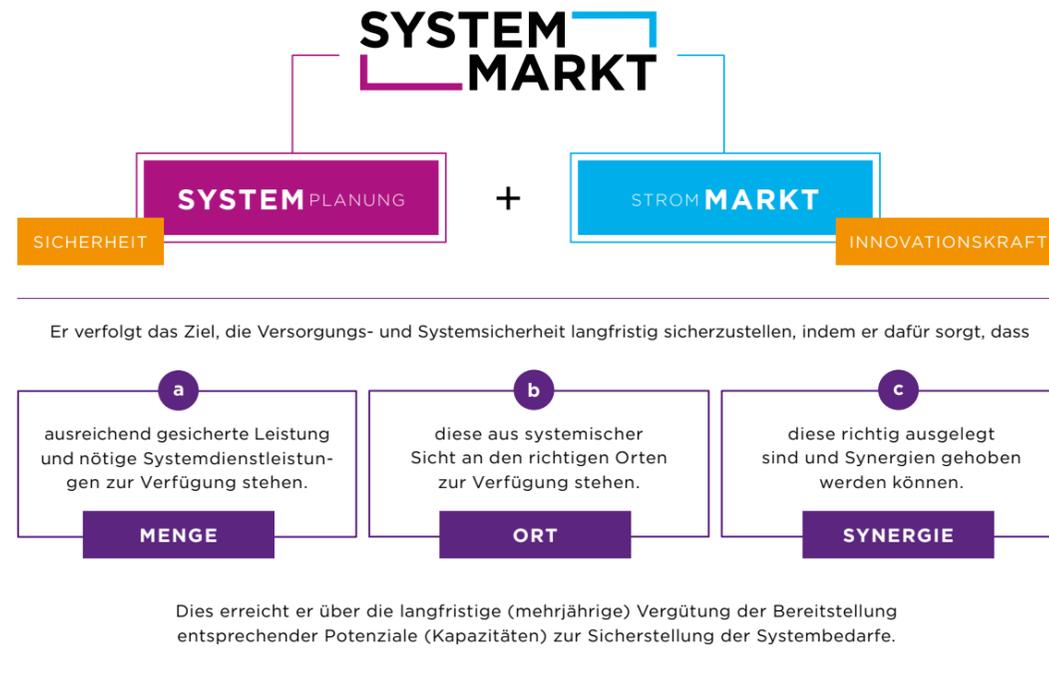


ABB. 06 Der Leitgedanke: Das System als Ganzes betrachten

# NEUE NETZ- ELEMENTE



2.1	Weiterentwicklung der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)	31
2.2	Offshore-Vernetzung	34
2.3	Schwarzstartfähige Offshore-Systeme	38
2.4	Innovative Anlagen zur Systemstabilisierung	40
2.5	Dezentraler Netzbooster	45
2.6	Neue Betriebsmittel im Höchstspannungsnetz	47

In der Energiewelt von morgen stammt Strom aus erneuerbaren Energien. Das Übertragungsnetz ist geprägt durch höhere Volatilität und großräumigere Stromtransporte. Um es stabil zu halten und effizient zu betreiben, setzt Amprion unter anderem auf neue Betriebsmittel und Offshore-Vernetzung.

# WEITERENTWICKLUNG DER HOCHSPANNUNGS-GLEICHSTROM-ÜBERTRAGUNG (HGÜ)

## NUTZEN DER INNOVATION

Kostengünstiger, platzsparender und effizienter Netzausbau durch Erdkabel- und Freileitungsprojekte mit Gleichspannungstechnik

Der Umbau des deutschen Energiesystems hin zur Klimaneutralität schreitet voran. Im Rahmen dieses Transformationsprozesses entfernen sich Erzeugungszentren von Lastschwerpunkten. Dadurch wird es notwendig, hohe Leistungen über weite Entfernungen zu transportieren. Dafür ist die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) die wirtschaftlichste und teils einzig mögliche technische Lösung. Daher setzt Amprion diese Technologie sowohl für die zukünftige Anbindung von Offshore-Windparks in der Nordsee als auch für lange Nord-Süd-Korridore ein.

Die HGÜ-Technologie lässt sich grundsätzlich über Erdkabel oder Freileitungen realisieren. Im Bereich der Erdkabel sind neben dem abgeschlossenen Projekt ALEGrO die in Planung beziehungsweise Genehmigung befindlichen HGÜ-Projekte Korridor B und DC34 sowie diverse Offshore-Anbindungssysteme zu nennen (DoWin4, BorWin4, LanWin1 und LanWin3). Darüber hinaus ist Amprion an der Umsetzung des Korridors A beteiligt, der teils als Erdkabel (A-Nord) und teils als Freileitung (Ultranet) realisiert wird. Durch eine geplante Zwischenstation wird aus dieser Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindung ein Multi-Terminal-System.

Die vollständige Vernetzung von HGÜ-Systemen im Amprion-Netz ist laut aktuellem Netzentwicklungsplan (NEP 2035) beim Projekt DC34 mit zwei Offshore-Projekten vorgesehen. In diesem Zusammenhang kommt der Entwicklung eines Leistungsschalters für HGÜ-Netze eine große Bedeutung zu. Zudem nutzt Amprion in diesem Projekt sowie bei den beiden Teilvorhaben des Korridors B die neuartige 525-kV-HGÜ-Technik, die mit einer hohen Übertragungsleistung bei geringem Platzbedarf große Vorteile bietet.

## ALEGrO

Über das mit dem belgischen Übertragungsnetzbetreiber Elia erfolgreich umgesetzte Netzausbauprojekt ALEGrO (Aachen Lüttich Electricity Grid Overlay) hat Amprion bereits wichtige praktische Erfahrungen beim Bau eines HGÜ-Systems gewonnen. ALEGrO wurde als symmetrisches Monopol mit einer Spannung von plus/minus 320 Kilovolt (kV) realisiert und überträgt eine Leistung von bis zu 1.000 Megawatt (MW). Je Pol wurde ein kunststoffisoliertes Erdkabel verwendet. Die Länge der ersten unterirdischen Verbindung zwischen Belgien und Deutschland beträgt etwa 90 Kilometer. Damit stellt sie einen wichtigen technologischen Schritt auf dem Weg zu weiteren HGÜ-Erdkabelprojekten von Amprion dar. Seit der Inbetriebnahme von ALEGrO Ende 2020 ist das System zuverlässig in Betrieb und liefert als deutsch-belgischer Interkonnektor einen wichtigen Beitrag zur Integration des europäischen Energiemarkts.



ABB. 07 OBE N Konverterhalle ALEGrO, außen

ABB. 08 RECHTS Konverterhalle ALEGrO, innen, mit Ventiltürmen (IGBT-Valves)



### LEISTUNGSSCHALTER FÜR HGÜ-NETZE

Mit zunehmender Integration einzelner Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Systeme in das Übertragungsnetz wächst der Bedarf, aus Einzelsystemen vernetzte Multi-Terminal-HGÜ-Systeme zu machen. Diese Systeme bieten zusätzliche Freiheitsgrade, wenn es darum geht, die elektrische Übertragungsleistung auf verschiedene Netzverknüpfungspunkte zu übertragen und die Teilübertragungsleistung beim Ausfall einzelner Strecken zu erhalten. Amprion hat sich dieser Thematik sehr früh gestellt: Als Gründungsmitglied der EUROBAR-Initiative hat Amprion einige europäische Übertragungsnetzbetreiber mit gleichen Interessen vereinigt, um die Standards und Methoden der HGÜ-Vernetzung national und international voranzutreiben. Für die vollständige Vernetzung von HGÜ-Systemen zu Multi-Terminal-HGÜ-Systemen müssen letztlich auch HGÜ-Leistungsschalter eingesetzt werden. Somit

können im Fehlerfall - analog zum Drehstromsystem - auch im HGÜ-System fehlerbehaftete Stromkreise selektiv freigeschaltet werden, sodass der Betrieb des intakten HGÜ-Restnetzes gewährleistet ist.

Mit der RWTH Aachen, der Ruhr-Universität Bochum und der Avasition GmbH führt Amprion detaillierte Simulationsstudien zur Bewertung des Einsatzes und der Wirkungsweise von Leistungsschaltern für HGÜ-Netze in vernetzten HGÜ-Systemen durch. Diese zukunftsrelevante Technologie wird aktuell von nur sehr wenigen großen internationalen Herstellern beherrscht. Während für die Klärung von Kurzschlüssen im Drehstromnetz bis zu 150 Millisekunden verstreichen dürfen, müssen Fehler im HGÜ-System aufgrund des sehr starken Anstiegs des Kurzschlussstroms bereits nach weniger als 10 Millisekunden geklärt sein. Die Ergebnisse der Studien werden die Auswahl der geeigneten Technologie maßgeblich beeinflussen.

### KORRIDOR A ALS HYBRIDE MULTI-TERMINAL-HGÜ-VERBINDUNG

Im Rahmen von Korridor A errichtet Amprion mit dem Erdkabelprojekt A-Nord und dem HGÜ-Freileitungsvorhaben Ultramet sowie der in Nordrhein-Westfalen befindlichen Zwischenstation auf der Korridor-A-Trasse zwischen Niedersachsen und Baden-Württemberg die weltweit erste hybride Multi-Terminal-HGÜ-Verbindung. Um den Eingriff in die Umwelt zu reduzieren, nutzt Amprion dabei für den Freileitungsabschnitt bestehende Freileitungsmasten, auf die der HGÜ-Stromkreis aufgelegt wird. Vereinzelt müssen hierfür Masten umgebaut werden. Zur Erhöhung der Übertragungsfähigkeit der bestehenden Freileitungstrasse setzt Amprion für Ultramet erstmals eine 380-kV-HGÜ-Technologie ein. Kurzzeitige Störungen durch atmosphärische Einflüsse und Kurzschlüsse können durch die hier erstmals eingesetzten HGÜ-Kopfstationen mit Vollbrückenumrichtern auch ohne den Einsatz von gleichspannungsseitigen Leistungsschaltern kontrolliert beherrscht und geklärt werden. Die Konverter werden zu einem einzigartigen Multi-Terminal-System zusammengesetzt, bestehend aus drei Kopfstationen mit je zwei Konvertern pro Pol. Zusammen mit Herstellern und Universitäten analysiert Amprion dieses neuartige Technologiekonzept umfangreich, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb der HGÜ-Verbindung langfristig gewährleisten zu können.

### 525-KV-HGÜ-TECHNOLOGIE

Zur Übertragung einer Leistung von bis zu 1.000 MW sind HGÜ-Systeme mit einer Nennspannung von 320 kV hervorragend geeignet. Diese Technologie kommt beispielsweise bei ALEGrO sowie bei den Offshore-Netzanschlüssen von DolWin4 und BorWin4 zum Einsatz. Besteht der Bedarf für eine größere Übertragungskapazität, wie bei den beiden Teilvorhaben des Korridors B, beim Projekt DC34 oder den Offshore-Netzanschlüssen von Amprion nach 2030, so wären für 2.000 MW zwei HGÜ-Systeme bei einer Nennspannung von 320 kV notwendig. Damit würde sich der Flächenbedarf in der Trasse verdoppeln. Gleiches gilt für die Nutzung von 525-kV-HGÜ-Massekabeln, die vor allem im Bereich der Seekabel bis heute häufig verwendet werden. Im Vergleich dazu ist bei der 525-kV-Technik unter Nutzung kunststoffisolierter HGÜ-Kabel nur ein Kabelsystem zur Übertragung von 2.000 MW notwendig. Daher fällt der Flächenbedarf deutlich geringer aus, wodurch Auswirkungen auf Umwelt und Natur reduziert werden [SIEHE ABB. 09].

Kunststoffkabel wurden bisher weltweit noch nie im realen Netzbetrieb mit einer Spannung von 525 kV verwendet. Diese Technologie wird aber aufgrund der genannten Vorteile mittelfristig eine führende Rolle bei der Realisierung von HGÜ-Kabelprojekten bei Amprion einnehmen. In diversen Studien sowie bei der Präqualifikation von 525-kV-HGÜ-Kabeln im Kreise der vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber engagiert sich Amprion aktiv bei der Entwicklung und Anwendung von 525-kV-Systemen, um die volkswirtschaftlichen Vorteile auszunutzen.

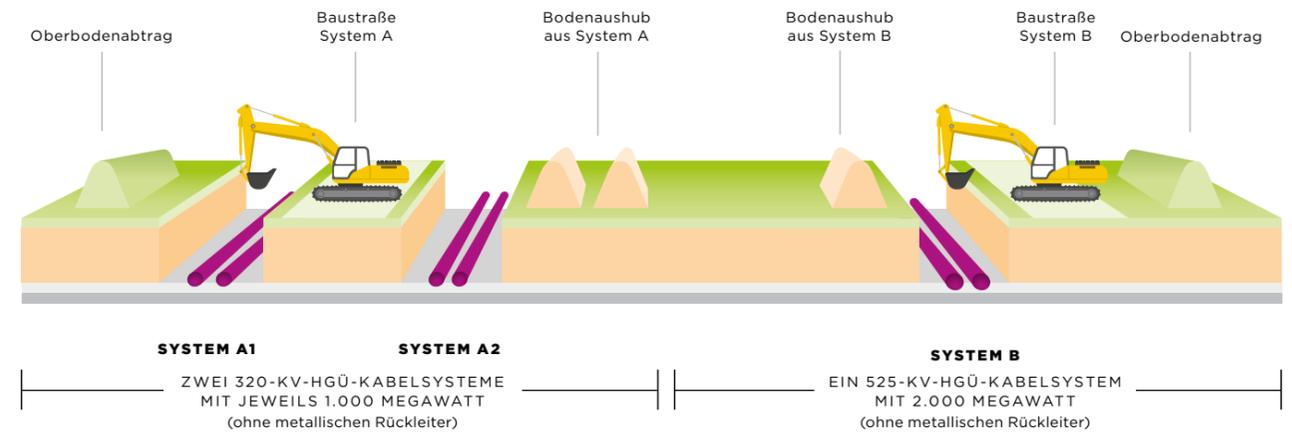


ABB. 09 320-kV-HGÜ versus 525-kV-HGÜ mit 2.000 MW

Wenn es das Gesamtsystem zulässt, kann durch kunststoffisolierte 525-kV-HGÜ-Kabel der Kabelgraben einer 2.000-MW-Trasse um bis zu 50 Prozent schmaler werden.  
Schematische Darstellung

# OFFSHORE- VERNETZUNG

## NUTZEN DER INNOVATION

Zusätzliche Transportkapazitäten,  
mehr Flexibilität und höhere Effizienz  
in Systemplanung und -betrieb

Um die Klimaziele zu erreichen, sieht die Europäische Union einen Ausbau der installierten Offshore-Leistung bis auf 300 Gigawatt (GW) in 2050 vor. Die europäischen Übertragungsnetzbetreiber haben die Aufgabe, diese beträchtliche und systemrelevante Erzeugungskapazität in die angrenzenden Übertragungsnetze zu integrieren und den Weitertransport innerhalb dieser Netze zu gewährleisten. Neben einer entsprechend großen Anzahl an neuen Offshore-Netzanschlussystemen, die aktuell als Punkt-zu-Punkt-Systeme ausgeführt werden [SIEHE ABB. 11, SEITE 36], ist auch ein signifikanter Onshore-Netzausbau erforderlich.

In diesem Kontext rücken zunehmend auch lastnahe Netzanschlusspunkte für Leitungen mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) in den Fokus. Durch deren Umsetzung werden andernfalls notwendige Netzausbaumaßnahmen an Land vermieden. Über diese Maßnahmen würde die Windleistung sonst nachgelagert aus den küstennahen Regionen in Richtung der Lastzentren weitergeleitet, was jedoch volkswirtschaftlich weniger effizient wäre.

Aktuelle Ergebnisse aus Systemplanungsstudien belegen, dass sich gerade Offshore-Anschlussysteme mit lastnah gelegenen Netzanschlusspunkten im nächsten Schritt um innovative Vernetzungskonzepte auf See ergänzen lassen. Auf diese Weise lässt sich ein substanziiell infrastruktureller Mehrwert im Rahmen der Systemintegration erschließen. Identifizierte Synergieeffekte müssen dafür technologisch, planerisch und regulatorisch effizient und mit geringen Risiken in der Umsetzung gehoben werden.

Das übergeordnete Konzept, das Amprion in diesem Zusammenhang verfolgt, ist die schrittweise und modulare Offshore-Vernetzung von Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Systemen auf See. Der große Mehrwert solcher Offshore-Vernetzungen zeigt sich sowohl auf der nationalen als auch auf der internationalen Betrachtungsebene.

Bei der nationalen und der internationalen Vernetzung auf See ergibt sich aus der ausgebildeten Redundanz für den einzelnen Windpark-Netzanschluss ein volkswirtschaftlicher Nutzen. Mithilfe dieser Anschlussredundanz kann bei andauernden plan- und außerplanmäßigen Nichtverfügbarkeiten eines leistungsstarken Anbindungssystems weiterhin ein Großteil der Windenergie an Land transportiert werden – anders als beim heutigen Konzept ohne eine Vernetzung. Viel relevanter für den Gesamtnutzen der Offshore-Vernetzung sind allerdings zwei andere Wirkweisen.



ABB- 10 Offshore-Konverterplattform in der Nordsee

Erstens: National zeigen sich insbesondere Verbindungen zwischen Offshore-Netzanbindungssystemen als vielversprechend, die zu einer Kombination von lastnahen und küstennahen Netzverknüpfungspunkten an Land führen. Denn solche Systemkonstellationen ermöglichen es den Netzbetreibern, bei der Leistungsintegration der Offshore-Windparks flexibel auf die Engpasssituation im Onshore-Netz zu reagieren. Sind die Offshore-Netzanbindungssysteme nicht vollständig ausgelastet, kann aufgrund der Offshore-Vernetzung zusätzliche Transportkapazität bereitgestellt werden. Dadurch können Netzengpässe an Land effektiv entschärft beziehungsweise aufgelöst und somit Redispatch vermieden werden.

Zweitens: Der überwiegende Beitrag für das Gemeinwohl wird auf internationaler Ebene erzielt, indem die Nettotransferkapazitäten zwischen Marktgebieten erweitert werden und damit verbunden der grenzüberschreitende Handel gefördert wird. Darüber hinaus wird in technologischer Hinsicht international die Systemsicherheit gesteigert, da eine Zunahme der Nettotransferkapazität die gegenseitige Stützfähigkeit zwischen asynchronen AC-Netzen verbessert. Dies kann bei kritischen Störeignissen, beispielsweise sogenannten „System Splits“, von nennenswerter Bedeutung sein, um den Netzbetrieb schnell zu stabilisieren und unterbrechungsfrei aufrechtzuerhalten.

ABB. 12 Eurobar-Initiative

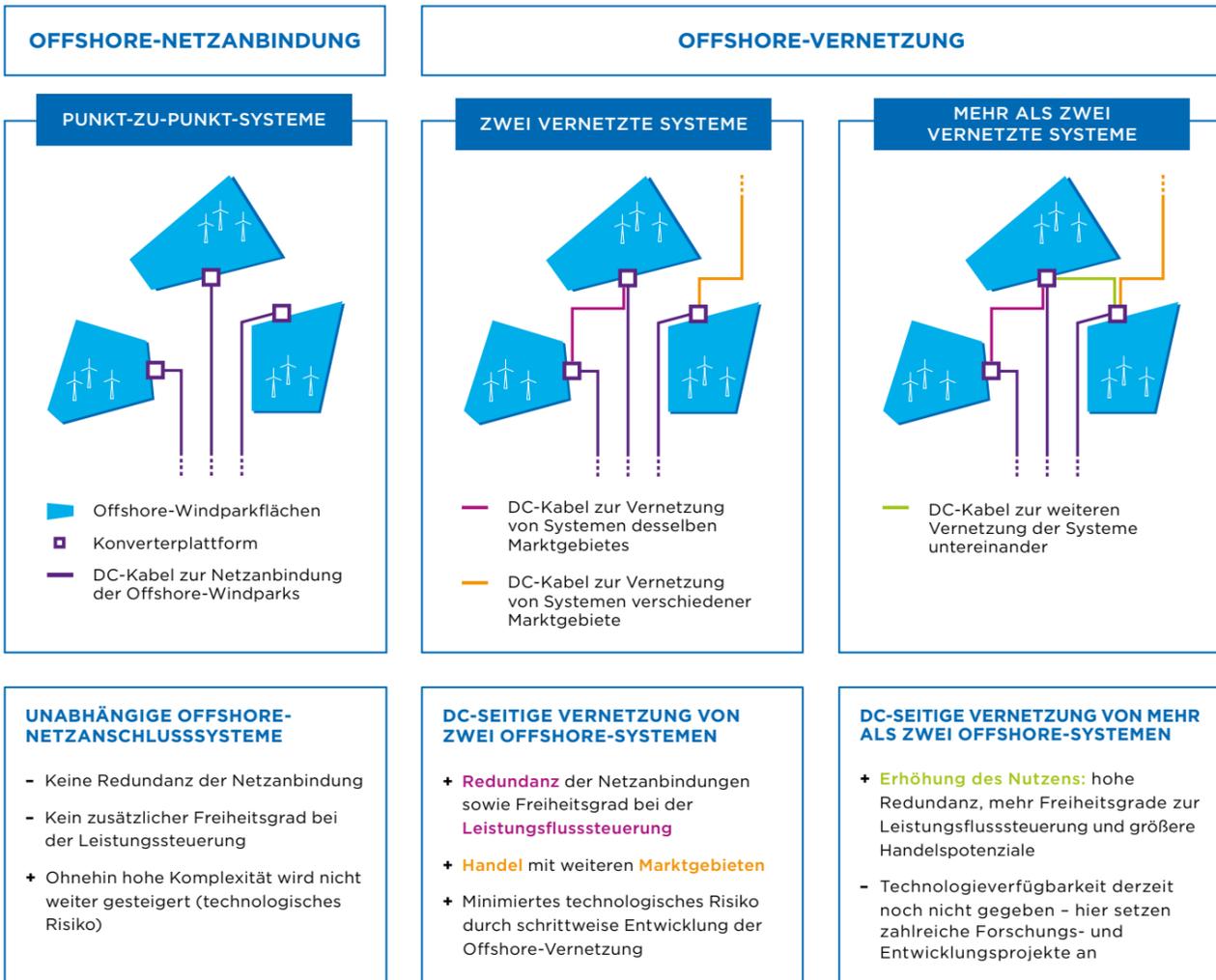
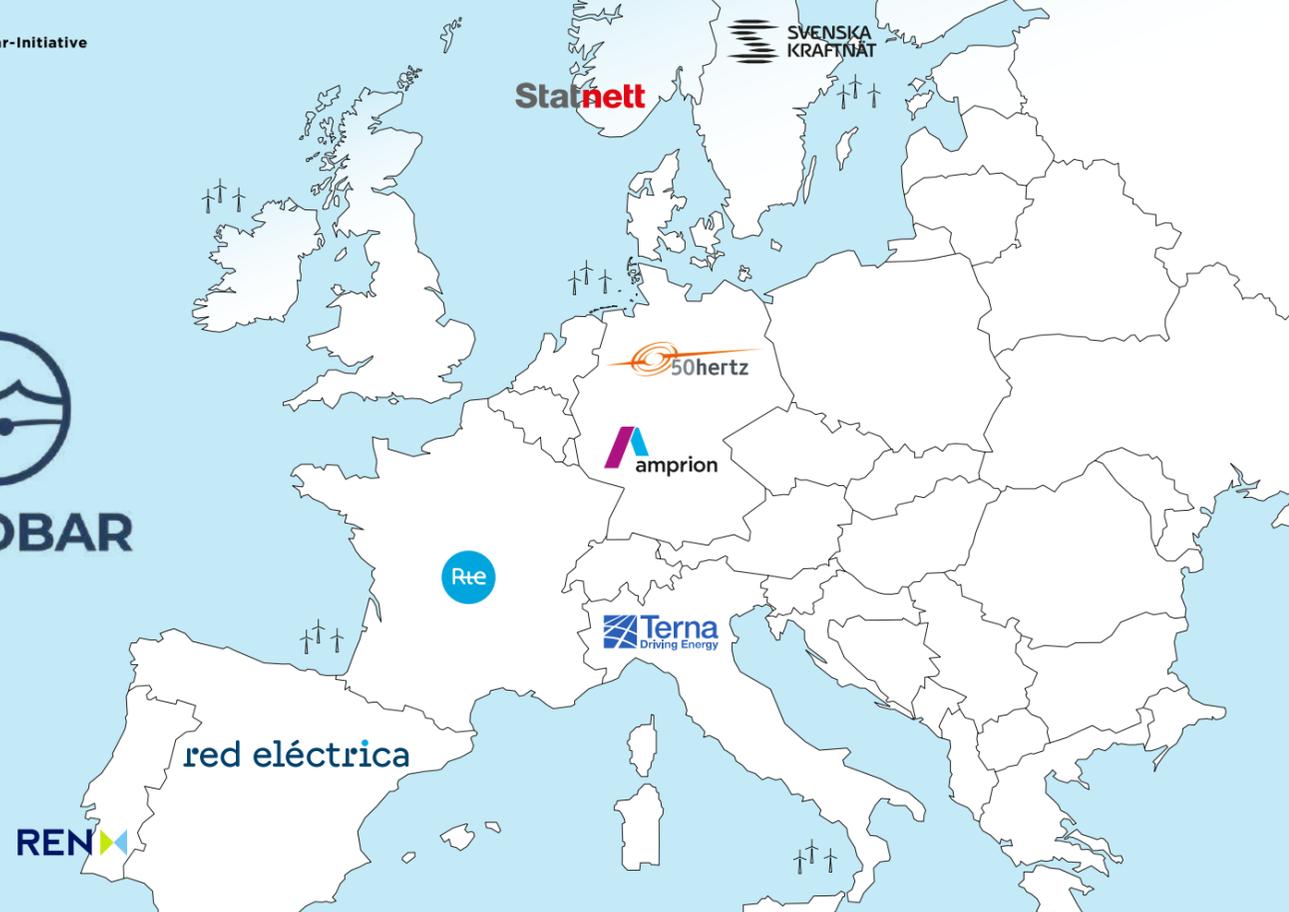


ABB. 11 Grafik zur Offshore-Vernetzung

Schrittweises und modulares Vorgehen bei der Offshore-Vernetzung; links: Punkt-zu-Punkt-Systeme, mittig: Vernetzung von zwei Systemen desselben Marktgebietes, rechts: Vernetzung von zwei oder mehr Systemen auch aus verschiedenen Marktgebieten möglich.

EUROBAR

Eurobar ist eine Initiative von acht europäischen Übertragungsnetzbetreibern [SIEHE ABB. 12], die eine effiziente und sichere Integration der Offshore-Windenergie durch Vernetzung europäischer Offshore-Systeme ermöglichen soll. Aufgaben der Initiative sind dabei der Wissensaustausch zu relevanten Fragestellungen im Kontext der Offshore-Vernetzung sowie die Entwicklung gemeinsamer ÜNB-Positionen. Die Initiative besteht aus einer Lenkungsgruppe (Steering Group) sowie zwei Arbeitsgruppen mit den folgenden inhaltlichen Schwerpunkten.

- Arbeitsgruppe „Policies and Regulation“
  - Kostendeckung und Rolle von antizipativen Investments
  - Kosten-Nutzen-Analyse
  - Vertragliche Regelungen mit Herstellern und Haftungsfragen
  - Maritime Raumplanung
- Arbeitsgruppe „Engineering“
  - HGÜ-Offshore-Infrastruktur
  - Hochspannungskabel
  - Netzzugangsbedingungen (Network Codes)
  - Tiefenwasserinfrastruktur

Das übergeordnete Ziel von Eurobar ist es, die Offshore-Vernetzungsmaßnahmen zu beschleunigen und das damit verbundene Risiko zu reduzieren. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Unterstützung der Standardisierungsprozesse von Schnittstellen und Technologien.

FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN

Aufgrund der hohen Komplexität vernetzter Offshore-Systeme ergeben sich technologisch wie regulatorisch diverse offene Forschungsfragen. Diese werden in verschiedenen Forschungsprojekten adressiert, darunter:

- ZONES: konzeptionelle Analysen für zukünftige Offshore-Netzanschlusskonzepte
- ZONES EMT: Simulation elektromagnetischer Vorgänge (EMT) im Kontext zukünftiger Offshore-Netzanschlusskonzepte
- Ready4DC: Vorbereitung für die Multi-Vendor- und Multi-Terminal-DC-Technologie
- InterOPERA: Ermöglichung der Interoperabilität von HGÜ-Netzen mit Systemen verschiedener Hersteller
- HVDC WISE: Auslegung HGÜ-basierter Netzarchitekturen für zuverlässige und widerstandsfähige hybride AC/DC-Übertragungssysteme mit großer räumlicher Ausdehnung

Ein zentrales Ziel der Forschungsaktivitäten ist der sichere und zuverlässige Betrieb vernetzter Offshore-Systeme. Aus der Offshore-Vernetzung dürfen keine Risiken für die Stabilität des elektrischen Energieversorgungssystems entstehen. Zukünftig müssen HGÜ-Systeme außerdem interoperabel sein. Das bedeutet, die Systeme verschiedener Hersteller müssen miteinander funktionieren. Notwendige Eigenschaften der Systeme werden in diesem Zusammenhang häufig mit den Begriffen Multi-Terminal-Fähigkeit, Multi-Vendor-Fähigkeit und Multi-Purpose-Fähigkeit beschrieben.

# SCHWARZSTARTFÄHIGE OFFSHORE-SYSTEME

## NUTZEN DER INNOVATION

Netz- und Versorgungswiederaufbau mithilfe von Offshore-Windparks

Das Übertragungsnetz bildet das Rückgrat der Energieversorgung und ist ein komplexes und widerstandsfähiges System. Schwerwiegende Störungen sind rar. Das System ist so ausgelegt, dass auch bei Fehlern keine Einschränkungen bei Endkund\*innen entstehen. Dennoch kann auch das Übertragungsnetz theoretisch an seine technischen Grenzen kommen – es käme im schlimmsten Fall zu einem europäischen Netzzusammenbruch. In diesem unwahrscheinlichen Fall ist das ganze Stromnetz spannungsfrei, es fließt kein Strom. Bevor wieder Endkund\*innen versorgt werden können, muss das Netz Schritt für Schritt unter Spannung gesetzt werden.

Für den Fall eines Netzzusammenbruchs ist Amprion verpflichtet, einen Netzwiederaufbauplan vorzuhalten. Dieser Plan beschreibt Strategien, wie die elektrische Energieversorgung im Netzgebiet wiederhergestellt werden kann. Zur Umsetzung dieses Plans ist das Übertragungsnetz gegenwärtig auf konventionelle Großkraftwerke wie Gas- und Kohlekraftwerke angewiesen. Auf dem Weg hin zu einer 100-prozentigen Erzeugung aus regenerativen Quellen werden solche Kraftwerke jedoch nach und nach abgeschaltet. Folglich müssen die Erzeuger von erneuerbaren Energien für den Netzwiederaufbau und die Wiederversorgung – den sogenannten Versorgungswiederaufbau – nutzbar gemacht werden.

Mit dem deutschen Ausbauziel von 70 Gigawatt (GW) bis 2045 hat die Offshore-Windenergie das Potenzial, eine tragende Rolle beim Wiederaufbau zu übernehmen – insbesondere da deren Netzanschlussysteme direkt an das Übertragungsnetz angeschlossen werden und somit direkt vom ent-

sprechenden Übertragungsnetzbetreiber gesteuert werden können. Die Offshore-Netzanschlüsse im Gebiet der Amprion werden aufgrund der Übertragungsdistanzen zwischen Windparks und den Netzanschlusspunkten als Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungssysteme (HGÜ) realisiert.

Um dieses Potenzial bestmöglich zu nutzen, untersucht Amprion schon heute, wie über HGÜ angebundene Offshore-Windparks zum Netz- und Versorgungswiederaufbau beitragen können. Dabei geht es auch um die sogenannte Schwarzstartfähigkeit: die Fähigkeit, aus eigener Kraft – ohne Stromzufuhr von außen – angefahren zu werden. Amprion ermittelt die Anforderungen an zukünftige schwarzstartfähige Offshore-Netzschlussysteme und Offshore-Windparks und entwickelt die notwendigen Schnittstellen. Für das Gelingen dieses Vorhabens ist ein reibungsloses Zusammenspiel der Systemführung von Amprion, der HGÜ-Systeme und der Offshore-Windparks essenziell.

Daher arbeitet Amprion eng zusammen mit Windparkbetreibern, den Herstellern von HGÜ-Systemen und Offshore-Windturbinen sowie führenden Forschungseinrichtungen – und das sowohl in F&E-Projekten als auch begleitend zu den ersten Amprion-Offshore-Projekten DolWin4 und BorWin4.

### HVDC-BLADE

Im Forschungsvorhaben HVDC-BLADE („Black Start Demonstration“ of Offshore Windparks – Demonstration der Schwarzstartfähigkeit von über HGÜ angebundene Offshore-Windparks) arbeitet Amprion als Teil eines breiten Konsortiums an der konkreten Ausgestaltung der einzelnen Anforderungen, Funktionen und Schnittstellen für den Schwarzstart von über HGÜ angebundene Offshore-Windparks. Mitglieder des Konsortiums sind die RWTH Aachen, acht Offshore-Windparkbetreiber (zusammengeschlossen im Offshore Wind Accelerator) und Siemens Energy. Die Ergebnisse werden einerseits durch Simulationen und andererseits mittels eines Hardware-in-the-Loop-Prüfstands der RWTH Aachen validiert.

### OFFWIPP

Im Forschungsprojekt OffWiPP („Offshore-Windparks als Kraftwerke“) untersucht die Universität Rostock zusammen mit dem HGÜ-Hersteller Siemens Energy und dem Offshore-Windturbinen-Hersteller Siemens Gamesa, inwieweit Offshore-Windparks in der Zukunft typische Aufgaben von konventionellen Kraftwerken im Netzbetrieb übernehmen können. Ein Aspekt ist hier auch die Schwarzstartfähigkeit. Die Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz und Amprion sind im Forschungsprojekt als assoziierte Partner beteiligt und geben die netz- und systemtechnischen Anforderungen an die Forschungspartner\*innen weiter.

### DOLWIN4 UND BORWIN4

Um den Netzwiederaufbau so bald wie möglich durch Offshore-Windenergie unterstützen zu können, führt das Offshore-Konsortium aus Siemens Energy und Dragados Offshore eine Machbarkeitsstudie zur Integration der Schwarzstartfähigkeit in die ersten Offshore-Projekte von Amprion – DolWin4 und BorWin4 – durch.



ABB. 13 Windenergieanlagen auf hoher See

# INNOVATIVE ANLAGEN ZUR SYSTEM- STABILISIERUNG

## NUTZEN DER INNOVATION

Bereitstellung von Blind- und Wirkleistung, um die Stabilität eines sich verändernden Energiesystems zu gewährleisten

Die Übertragungsnetze bilden das Rückgrat des Energiesystems in Deutschland. Die Aufgabe von Amprion als Stromnetzbetreiber ist es, das Übertragungsnetz in seiner Regelzone stabil und sicher zu betreiben. Doch der Umbau des Energiesystems schreitet voran: Konventionelle Kraftwerke werden nach und nach abgeschaltet. Dadurch fällt eine Vielzahl von Synchrongeneratoren weg, die bei der Sicherung der Systemstabilität bislang eine wichtige Rolle spielen. Durch den stetigen Ausbau erneuerbarer Energien steigt die Menge an Leistungselektronik im Netz. Dieser technologische Wandel führt zu einem veränderten Systemverhalten, das im Hinblick auf die Systemstabilität ebenfalls neue Herausforderungen mit sich bringt.

Ein wichtiger Beitrag zur Systemstabilität wird durch ausreichende Blind- und Wirkleistung geliefert. Als Blindleistungskompensationsanlagen kommen bei Amprion rotierende Phasenschieber, STATCOM-Anlagen (Static Synchronous Compensators), Konverteranlagen von HGÜ-Stationen sowie MSCDN-Anlagen (Mechanically Switched Capacitor with Damping Network) und Kompensationsdrosseln zum Einsatz, während darüber hinaus neue Technologien wie der ARESS (Asynchronous Rotating Energy System Stabilizer) untersucht werden.

Wirkleistungsänderungen, beispielsweise bedingt durch den Ausfall eines Kraftwerks oder bei Netzaufrennungen, werden im ersten Moment vollständig durch die Momentanreserve kompensiert. Sie wird traditionell durch Generatoren und Turbinen in Kraftwerken – die sogenannten rotierenden Massen – bereitgestellt. Aufgrund des durch Leistungselektronik dominierten Netzes müssen dafür jedoch ebenfalls neue Lösungen gefunden werden. Um den fehlenden rotierenden Massen entgegenzuwirken, beschäftigt sich Amprion mit Technologieoptionen rund um netzbildende Eigenschaften (Grid Forming Capabilities).

Damit im Netz auch künftig ausreichend Blind- und Wirkleistung zur Verfügung steht, kommen bei Amprion verschiedene innovative Technologien und Konzepte zum Einsatz.

### UMRÜSTUNG VON KRAFTWERKEN ZU ROTIERENDEN PHASENSCHIEBERN

Wenngleich der Neubau von Kompensationsanlagen kontinuierlich voranschreitet, muss aufgrund der hohen Auslastung des Übertragungsnetzes und des beschleunigten Kohleausstiegs teilweise kurzfristig gehandelt werden, um zusätzlich regelbare Blindleistung bereitstellen zu können – sowohl kapazitiv als auch induktiv. Mittels diverser Machbarkeitsstudien und dynamischer Simulationen hat Amprion in Zusammenarbeit mit Kraftwerksbetreibern und Herstellern analysiert, inwieweit Potenziale dafür bestehen, Generatoren (Synchronmaschinen) stillgelegter großer Kraftwerkseinheiten zu rotierenden Phasenschiebern umzurüsten. Hierbei wurden auch die notwendigen Spezifikationen abgeleitet. Damit können diese Anlagen für eine Überbrückungszeit von etwa fünf bis acht Jahren genutzt werden, bis ausreichend moderne Blindleistungskompensationsanlagen im Netz installiert sind. Der rotierende Phasenschieber verbleibt dabei im Eigentum des Kraftwerksbetreibers. Parallel zur technischen Realisierung des Phasenschiebers

müssen die notwendigen Verträge mit dem Kraftwerksbetreiber und der Bundesnetzagentur abgeschlossen werden.

Amprion hat diese Umrüstung erstmals in Deutschland vorgenommen – im Kraftwerk Biblis A. Im Netzbetrieb konnte bestätigt werden, dass die Anlagen durch die Bereitstellung von Kurzschlussleistung und einem Anteil an rotierender Masse einen zusätzlich stabilisierenden Charakter haben. Die entwickelten grundlegenden Konzepte müssen für das jeweilig umzubauende Kraftwerk angepasst werden. Die Umbauzeit beträgt dabei etwa sechs bis zwölf Monate. Aufbauend auf der zunehmenden Betriebserfahrung werden die Konzepte weiterentwickelt. Zuletzt wurde der stillgelegte Steinkohleblock Westfalen E umgebaut. Er ist seit Ende Mai 2022 im Netzbetrieb und stützt die 380-kV-Netzspannung im Bereich Westfalen.

Die Nutzung stillgelegter Kraftwerksanlagen als Phasenschieber ist zwar grundsätzlich als nachhaltig anzusehen, allerdings muss beachtet werden, dass die Anlagen teilweise schon Jahrzehnte an Kraftwerksbetrieb durchlebt haben, wodurch sie reparaturanfälliger sind. Des Weiteren sind die laufenden Betriebskosten im Vergleich zu neuen, effizienteren Kompensationsanlagen höher. Zur Sicherung des Blindleistungsbedarfs in kritischen Netzgebieten kann die Umrüstung von Kraftwerksgeneratoren zu rotierenden Phasenschiebern eine gute Übergangslösung darstellen.

ABB. 14 UND 15 Synchronmaschine rotierender Phasenschieber mit Anfahrumsrichter im Kraftwerk Westfalen E





ABB. 16 OBEN Blick in die STATCOM Krieffel  
ABB. 17 RECHTS Die MSCDN-Anlage in Krieffel



#### HYBRIDANLAGE ZUR BLINDLEISTUNGSKOMPENSATION

In der Nähe von Frankfurt am Main wurde 2019 mit der hybriden Blindleistungskompensationsanlage in der Umspannanlage Krieffel die leistungstärkste Anlage dieser Art in Europa sowie die erste derartige Anlage von Amprion in Betrieb genommen. Die Hybridanlage besteht aus zwei Einheiten: einem mechanisch geschalteten Kondensator mit Dämpfungsnetzwerk (MSCDN) und einem Static Synchronous Compensator (STATCOM).

Die MSCDN-Anlage basiert auf Kondensatoren, mit denen sich die Spannung im Netz anheben lässt. Sie verringert die erforderliche Übertragung von Blindstrom auf den angrenzenden Leitungen und erhöht so die maximale Übertragungsleistung. Die STATCOM-Anlage ist eine Kompensationsanlage zur Umformung elektrischer Energie, mit der sich die Spannung im Netz sowohl anheben als auch absenken lässt. Auch sie wird eingesetzt, um das Spannungsniveau aufrechtzuerhalten. Mit ihr ist die Blindleistung stufenlos und sehr schnell einstellbar, sodass Amprion unmittelbar auf wechselnde Bedingungen im Netz reagieren und die Spannung stabilisieren kann.

Im Rahmen von umfangreichen Voruntersuchungen zeigte sich, dass sich die Station Krieffel aufgrund ihrer Lage auf der Nord-Süd-Achse im Übertragungsnetz und der hohen elektrischen Last im Raum Frankfurt besonders für den Einsatz einer solchen Blindleistungskompensationsanlage eignet. Aufbauend auf den von Amprion erarbeiteten Anforderungen wurde die Hybridanlage ins Übertragungsnetz integriert, mit dem Systempartner Siemens errichtet und erfolgreich in Betrieb genommen. Der zuvor durch Analysen und Modelle vorhergesagte Nutzen der Anlage konnte im Betrieb bestätigt werden. Darüber hinaus sammelt Amprion seitdem wertvolle Betriebserfahrungen im Umgang mit einer leistungsstarken MSCDN-STATCOM-Hybridanlage, auf denen bei zukünftigen Projekten aufgebaut werden kann.

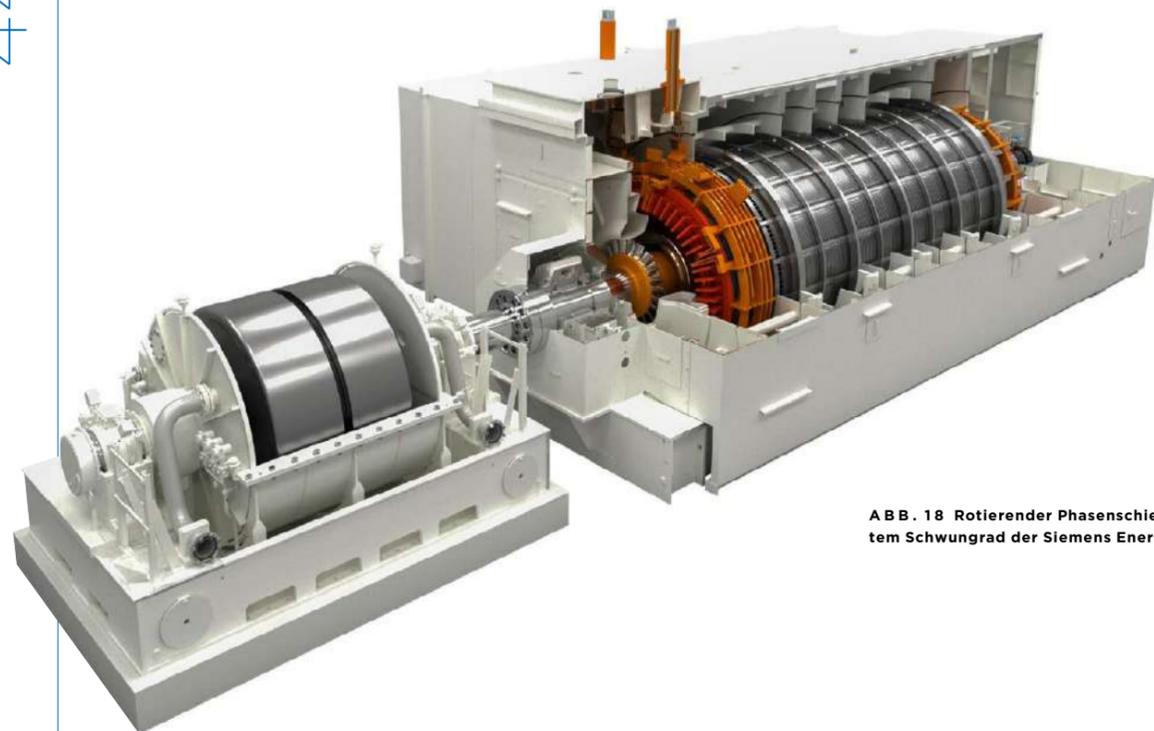


ABB. 18 Rotierender Phasenschieber mit gekoppeltem Schwungrad der Siemens Energy AG

#### ROTIERENDER ASYNCHRONER PHASENSCHIEBER (ARESS)

Der rotierende asynchrone Phasenschieber (ARESS) stellt Blindleistung bereit und trägt signifikant dazu bei, den Bedarf an Kurzschlussleistung und Momentanreserve zu decken. Insbesondere bei der Bereitstellung von Momentanreserve kann im Gegensatz zum gängigen synchronen Phasenschieber der drehenden Welle weit mehr Rotationsenergie entnommen werden. Da es sich beim rotierenden asynchronen Phasenschieber um eine vollintegrierte Technologie handelt, können die Anforderungen an Blindleistung, Kurzschlussleistung und Momentanreserve platz- und kosteneffizient bedient werden. Aufgrund dieser Vorteile planen Amprion und Siemens Energy mit Partnern aus der Forschung die Entwicklung und den Bau des weltweit ersten rotierenden asynchronen Phasenschiebers mit einer hohen Leistung von etwa 300 Megavoltampere (MVA) in einem Netz mit einer Frequenz von 50 Hertz (Hz).

Der ARESS verwendet das Prinzip der doppelt gespeisten Asynchronmaschine mit fest gekoppeltem Schwungrad als Energiespeicher [SIEHE ABB. 18]. Die elektrische Maschine ähnelt äußerlich dem synchronen Phasenschiebermotor, enthält aber eine Dreiphasenwechselstrom-Wicklung im Rotor. Diese wird von einem Frequenzrichter (M3C: Modular Multilevel Matrix Converter) gespeist. Dadurch ist die mechanische Drehzahl der Asynchronmaschine von der Netzfrequenz entkoppelt und eine energetische Be- und Entladung des rotierenden Schwungrads wird durch geregelte Drehzahländerung ermöglicht.

#### MOMENTANRESERVE AUS REGELBAREN BLINDLEISTUNGSKOMPENSATIONSANLAGEN

Um den stabilen Netzbetrieb auch bei einem hohen Anteil an stromrichterbasierter Erzeugung von 60 bis 100 Prozent zu gewährleisten, sollen

zukünftige Anlagen mit selbstgeführten Netzumrichtern (etwa HGÜ-Verbindungen oder STATCOM-Anlagen) durch netzbildende Eigenschaften (Grid Forming Capabilities) erweitert werden. Netzbildende Eigenschaften sind etwa die Bereitstellung von Momentanreserve. Bei einer Frequenzabweichung, beispielsweise aufgrund einer Störung, wirkt die Momentanreserve unverzüglich und begrenzt damit auftretende Frequenzgradienten, bis andere frequenzstützende beziehungsweise -entlastende Maßnahmen einsetzen.

STATCOM-Anlagen werden zunehmend zur dynamischen Blindleistungsbereitstellung verwendet. Aufgrund ihrer Technologiearchitektur sind sie jedoch nur sehr eingeschränkt bis gar nicht dazu fähig, Momentanreserve zu liefern. Aus diesem Grund erarbeitet Amprion derzeit Anforderungen an die Erbringung von Momentanreserve durch STATCOM-Anlagen. Die Realisierung der Funktionalität „Momentanreserve“ wurde in umfassenden Simulationen untersucht. Daneben sind aber noch weitere zentrale Fragen zu berücksichtigen, zum Beispiel welche Anforderungen an die Einhaltung regulatorischer Randbedingungen, an die Umgebung (Aufstellort und -fläche, Umweltgefährdungen etc.) und an den Betrieb derartiger Anlagen (Instandhaltung und Wartung, Remotezugang, Betriebssicherheit etc.) zu stellen sind.

Eine weitere Möglichkeit, die Momentanreserve im Übertragungsnetz zu erhöhen, ist der Einsatz von rotierenden Phasenschiebern mit Schwungrad. Rotierende Phasenschieber werden seit vielen Jahren bei Amprion eingesetzt. Da der primäre Einsatzzweck derzeit nicht die Bereitstellung von Momentanreserve ist, haben Phasenschieber eine verhältnismäßig kleine rotierende Masse, die jedoch durch die Ankopplung eines Schwungrads erhöht werden kann. Ein Beispiel hierfür ist das bereits in Betrieb befindliche Schwungrad am Phasenschieber in der Station Uchtelfangen. Darüber hinaus sieht Amprion die Ausrüstung rotierender Phasenschieber mit einem Schwungrad in weiteren Anlagen vor.

# DEZENTRALER NETZBOOSTER

## NUTZEN DER INNOVATION

Höherauslastung des Übertragungsnetzes im kurativen Betrieb



ABB. 19 Großbatteriespeicher in modularer Bauweise

Das Übertragungsnetz stabil zu halten und gleichzeitig noch höher auszulasten, ist eine ständige Herausforderung für Übertragungsnetzbetreiber wie Amprion. Ein Instrument dafür sind Netzbooster.

Netzbooster sind Großspeicher, die im Rahmen der kurativen Systemführung [→ „KURATIVE SYSTEMFÜHRUNG“, SIEHE SEITE 63] in die Leitsysteme der Übertragungsnetzbetreiber eingebunden sind. Sie bilden eine Sicherheitsreserve, die es ermöglicht, das Netz im Normalzustand vor der Störung (präventiv) höher auszulasten. Dadurch wird der Bedarf an teurem präventivem Engpassmanagement reduziert. Bei Auftreten einer Störung im Übertragungsnetz kann mittels Netzboostern schnell (kurativ) reagiert und so störungsbedingte Überlastungen entgegengewirkt werden, ehe es zu Folgeschäden kommt. Netzbooster wirken im Übertragungsnetz innerhalb von Minuten bis zu einer Stunde lang entgegen, bevor sie abgelöst werden müssen. Sie stehen ausschließlich dem Netzbetrieb

als „Versicherung“ gegen Störungen im Übertragungsnetz zur Verfügung, nicht aber marktlichen Anwendungen.

Getreu dem Grundsatz des systemischen Denkens und Handelns hat Amprion das Netzboosterkonzept weiterentwickelt: Statt eines zentralen Batteriespeichers kommen nun mehrere dezentrale, modulare Speicher zum Einsatz [SIEHE ABB. 20, SEITE 46]. Diese Modifikation erlaubt es, die Module im Verteilnetz an netzdienlichen Orten zu integrieren. Hiermit wird ein Nutzen sowohl im Übertragungs- als auch im Verteilnetz geschaffen. Das dezentrale Konzept ermöglicht höhere Resilienz gegenüber Störungen und greift aufgrund deutlich geringerer Abmessungen weniger in die Umwelt ein. Das wiederum führt zu einer höheren Akzeptanz in der Bevölkerung. Gemeinsam mit E.ON verfolgt Amprion aktuell das Projekt „Dezentraler Netzbooster“ in der Region Bayerisch-Schwaben. Als Gesamtleistung sind 250 bis 300 Megawatt (MW) geplant, verteilt auf diverse Speichermodule.

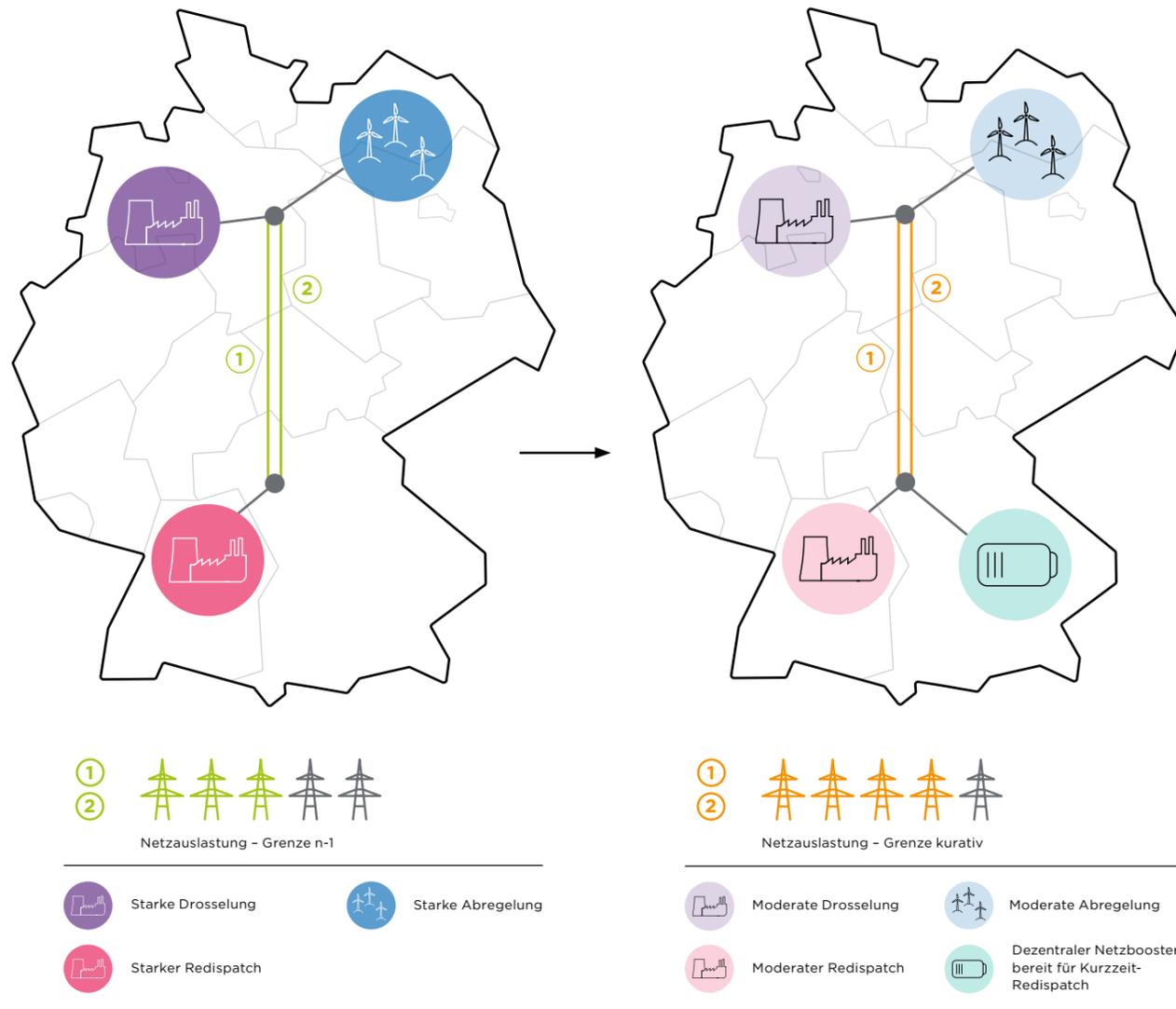


ABB. 20 Vereinfachte Darstellung der durch den dezentralen Netzbooster ermöglichten Höherauslastung des Übertragungsnetzes

Links: Status quo ohne Netzbooster, rechts: kurativer Zielbetrieb mit Netzbooster.  
Schematische Darstellung

# NEUE BETRIEBS- MITTEL IM HÖCHST- SPANNUNGSNETZ

## NUTZEN DER INNOVATION

Steigerung der Leistungsfähigkeit des Übertragungsnetzes

Um der Herausforderung der ansteigenden Transportbedarfe im Übertragungsnetz langfristig gewachsen zu sein, untersucht Amprion schon heute mit Partnern aus Industrie und Wissenschaft neue Betriebsmittel und -konzepte. Von einer frühzeitigen Begleitung vielversprechender Ideen durch einen Übertragungsnetzbetreiber profitieren die Entwickler\*innen und Netzbetreiber gleichermaßen: Aufgrund der gesellschaftlichen Relevanz des Übertragungsnetzes werden besondere Anforderungen an Netzbetriebsmittel gestellt. Diese Anforderungen können durch Kooperationen frühzeitig von der Praxis in die Forschung und Entwicklung einfließen. Gleichzeitig können schon reife Technologien und Konzepte bei System- und Netzplanungsprozessen berücksichtigt werden, um schnellstmöglich vom Nutzen der Innovationen zu profitieren.

### FLEXIBLE KOMPONENTE ZUR LASTFLUSSSTEUERUNG IM 380-KV-NETZ

Durch den Ausbau erneuerbarer Energien und den zunehmenden Stromverbrauch ändern sich die Lastflüsse innerhalb des Netzes erheblich. Dabei kommt es zu einer teilweise ungleichen Verteilung von Lastflüssen, was Netzengpässe und Redispatch-Maßnahmen zur Folge haben kann. Als Ad-hoc-Maßnahmen zur Steigerung der Flexibilität und Optimierung der Netzauslastung werden in den nächsten Jahren fünf Umspannwerke mit lastflusssteuernden Betriebsmitteln ausgerüstet. Dabei handelt es sich in der Regel um Phasenschiebertransformatoren (PST). Weitere Betriebsmittel zur Lastflusssteuerung im Netz der Amprion wurden in einem Projekt mit der US-amerikanischen Firma Smart Wires Inc. untersucht. Während dieser Machbarkeitsstudie wurden umfangreiche Bedingungen zum Einsatz modularer Einheiten zur Lastflusssteuerung im 380-kV-Höchstspannungsnetz der Amprion geprüft.

Die SmartValves™, auf Leistungselektronik basierende Komponenten des Typs „modular Static Synchronous Series Compensators“ (mSSSC), können ergänzend oder an Stelle eines PST eingesetzt werden, wenn dieser aufgrund der baulichen Abmessungen, des Gewichtes oder aus Gründen der Systemstabilität nicht integriert werden kann [SIEHE ABB. 21 UND 22]. Zudem sind SmartValves™ skalierbar und können variabel an andere Standorte verschoben werden. Neben der Berechnung von Bedarfsanalysen wurden die technischen Randbedingungen zur Integration von SmartValves™ in die Stationen der Amprion untersucht. Außerdem wurden weitere Studien zur Bewertung der Rückwirkungen leistungselektronischer Komponenten an beliebigen Netzverknüpfungspunkten initiiert. Über dieses Projekt hat sich Amprion ein weiteres innovatives Netzelement erschlossen, um die Netzauslastung flexibler zu gestalten. Ein mögliches Pilotvorhaben zur Validierung der gewonnenen Erkenntnisse wird aktuell geprüft.

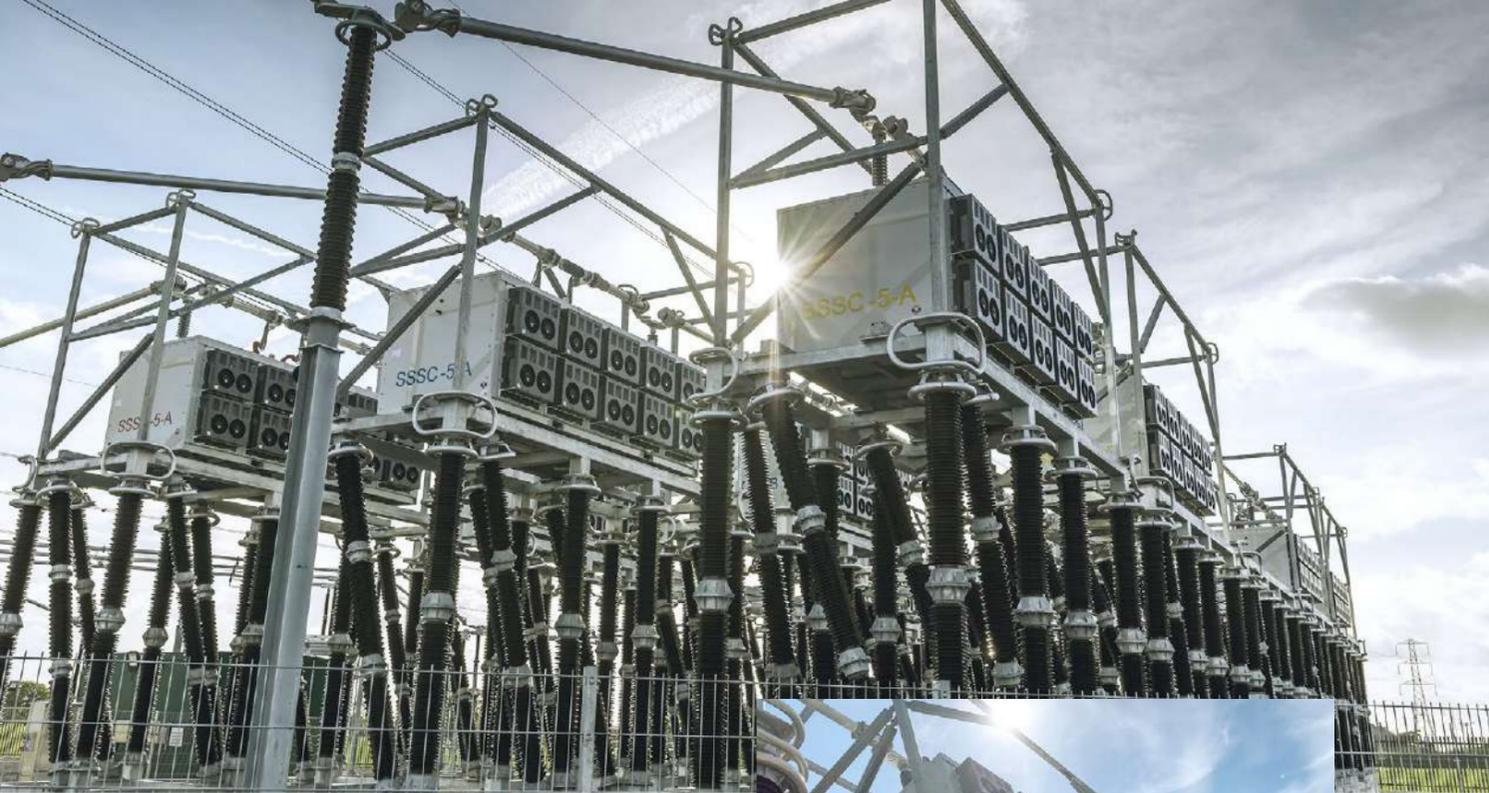


ABB. 21 UND 22 Beispiel Kundenanlage, SmartValves™ der Smart Wires Inc.



#### SUPRALEITENDE GLEICHSPANNUNGSKABEL IM ÜBERTRAGUNGSNETZ

Als Supraleiter werden Materialien bezeichnet, die bei Unterschreiten einer bestimmten Temperatur den elektrischen Widerstand verlieren, beispielsweise Hochtemperatursupraleiter (HTS), die mit einem Kühlmedium wie Flüssigstickstoff unter minus 180 °C gekühlt werden müssen. Zusammen mit der Vision Electric Super Conductors GmbH (VESC), dem Karlsruher Institut für Technologie und der Messer SE & Co. KGaA hat Amprion im Rahmen einer Studie den Einsatz von HTS-Kabeln als Alternative zu konventionellen Gleichspannungskabeln untersucht. Ein Vorteil supraleitender Kabel im Vergleich zu konventionellen Kabeln ist beispielsweise, dass die Übertragungskapazität pro Kabelsystem deutlich gesteigert werden kann. Außerdem wird aufgrund fehlender Stromwärmeverluste im Kabel keine Abwärme ins Erdreich abgegeben und elektromagnetische Felder außerhalb des Kabels können vermieden werden.

Allerdings werden Flächen entlang der Trasse für Zwischenkühlstationen benötigt, die je nach Konzept 10 Kilometer bis zu mehr als 100 Kilometer auseinanderliegen. Die Kühlung der Supraleiter benötigt Energie – ähnlich wie ein handelsüblicher Kühlschrank. Daher muss beim nachhaltigen Betrieb des Systems sichergestellt werden, dass die eingesparte Verlustleistung auf der Kabelstrecke höher ist als die notwendige Kühlleistung. Die Wirtschaftlichkeit supraleitender Kabel hängt stark vom Preis der Supraleiter im Vergleich zum Kupferpreis ab. Aktuell liegen weltweit keine Erfahrungen für den Einsatz oder die Zuverlässigkeit supraleitender Kabel für die Überbrückung langer Übertragungsstrecken vor. Pilotanlagen liegen im Bereich von mehreren Hundert Metern bis wenigen Kilometern.

Supraleitende Kabel für lange Übertragungsstrecken sind mittel- bis langfristig eine vielversprechende Technologie. Im Vergleich zu konventionellen Kabeln müssen sie allerdings noch ihre Verlegbarkeit und Zuverlässigkeit unter Beweis stellen. Anwendungsbereiche, in denen die Vorteile von supraleitenden Kabeln zum Tragen kommen können, werden von Amprion aktuell bewertet und bilden die Grundlage für mögliche Anschlussstudien. Die Studienergebnisse wurden der Fachöffentlichkeit 2022 durch die VESC im Rahmen der 8. Tagung zur Zukunft und Innovation der Energietechnik mit Hochtemperatur-Supraleitern präsentiert.

# NETZAUS- BAU 2.0



3.1	Powergrid Pathfinder	51
3.2	E-Power-Pipe	53
3.3	Mehrfachpflüge für Erdkabeltrassen	54
3.4	Modifiziertes Spülbohrverfahren	55
3.5	SF <sub>6</sub> -freie Technologien	56
3.6	Gleichstrom-Kompaktmasten	57

Um die Energiewende voranzubringen, bedarf es einer Beschleunigung des Netzausbaus. Jede Maßnahme zählt. Gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie arbeitet Amprion deshalb unter anderem an neuen bodenschonenden Bohrverfahren für Erdkabelprojekte und verfolgt neue Ansätze bei der Trassenplanung.

# POWERGRID PATHFINDER

## NUTZEN DER INNOVATION

Vermeidung von Konflikten bei der Trassenplanung und dadurch Beschleunigung von Netzausbauprojekten

Durch die Energiewende steigt der Bedarf an Übertragungsnetzkapazitäten – und damit auch der Bedarf an Netzinfrastruktur. Sie soll nun noch schneller geplant, genehmigt und gebaut werden, um das Stromnetz fit für eine klimaneutrale Zukunft zu machen. Zugleich aber berührt der Bau neuer Stromleitungen die Interessen vieler Menschen, greift in ihr Lebensumfeld und in die Natur vor Ort ein. Das kann zu Konflikten führen, die Genehmigungsverfahren verzögern. Schon bei der Planung von Netzinfrastruktur geht es Amprion daher darum, jegliche Art von Eingriffen und daraus erwachsende Konflikte zu minimieren – und dies nachvollziehbar zu dokumentieren. Hinzu kommt: So verschieden die einzelnen Leitungsbauprojekte von Amprion auch sind – ihre Planung muss nach einheitlichen Grundsätzen erfolgen. Der Maßstab für die Bewertung von Eingriffen und der Intensität von Konflikten muss projektübergreifend konsistent sein.

Daher hat Amprion in Kooperation mit der TU Dortmund das Planungswerkzeug Powergrid Pathfinder (kurz: „P<sup>2</sup>“) entwickelt. Es unterstützt die Projektteams bei der Identifikation konfliktarmer Trassenverläufe zwischen zwei zuvor festgelegten Anknüpfungspunkten. P<sup>2</sup> ist auf die fachplanerischen Rahmenbedingungen von energieleitungsbezogenen Infrastrukturprojekten zugeschnitten und in eine GIS-gestützte Planungssoftware integriert.

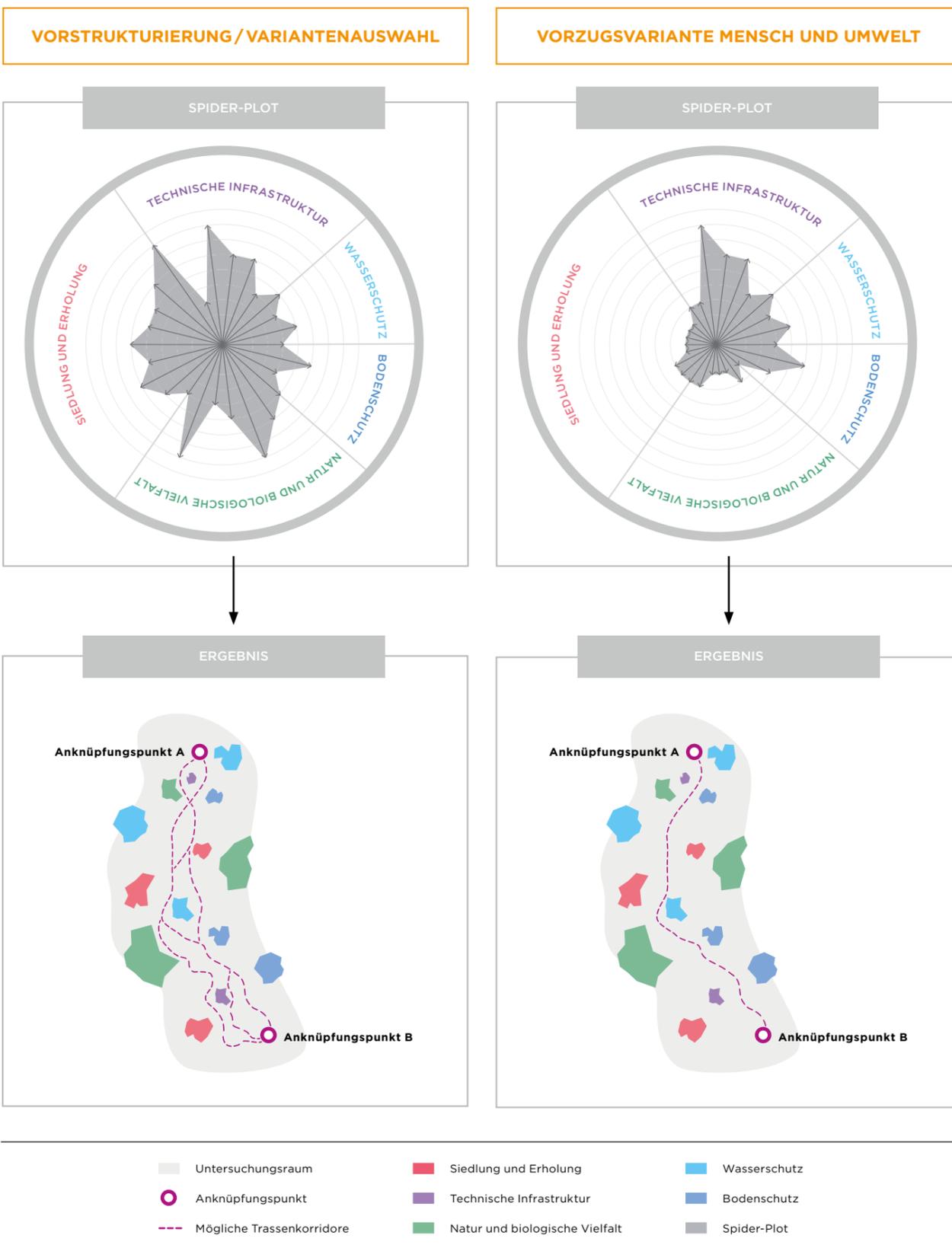
Als maßgebliche Kriterien für Konfliktpotenziale werden die sogenannten Querungslängen in unterschiedlichen Raumkategorien (etwa Raumwiderstände, Flächennutzungen, vorbelastete Bereiche) betrachtet. Ziel ist es, die Querungslängen innerhalb dieser Flächen zu minimieren. Im Gegensatz zu den bisher angewendeten Verfahren der Grenzkostenanalyse basiert die bei Amprion entwickelte Methodik auf einem mehrkriteriellen Optimierungsansatz. Der Vorteil ist, dass eine vorherige Gewichtung der Kriterien zueinander entfällt, wodurch der planerisch notwendige Abwägungsprozess präziser modelliert wird.

Das Resultat dieses mehrkriteriellen Optimierungsansatzes ist nicht die eine Lösung für alle

Probleme. Vielmehr stehen am Ende viele Lösungen. Diese werden als die nicht-dominierten oder auch Pareto-optimalen Lösungen des Optimierungsproblems bezeichnet.

Ein möglicher Trassenverlauf ist dabei durch einen anderen dominiert, wenn dieser in allen betrachteten Kriterien mindestens so gut und in mindestens einem Kriterium besser ist (geringere Querungslänge). Die alternativen Verläufe stellen genau die Konflikte zwischen den einzelnen Optimierungskriterien dar. Eine Lösung in einem Kriterium zu verbessern ist nur möglich, wenn gleichzeitig eine Verschlechterung in mindestens einem anderen Kriterium in Kauf genommen wird. Durch das Planungswerkzeug wird der Abwägungsprozess des Projektteams abgebildet und dieses bei der Beurteilung des Raums unterstützt.

Mithilfe des sogenannten Spider-Plots ist eine interaktive Navigation durch die Menge der Lösungen möglich [SIEHE ABB. 23]. So lassen sich verschiedene Alternativen bewerten und die Wechselwirkungen zwischen den Kriterien intuitiv gegenüberstellen.



**ABB. 23** Mögliche Trassenkorridore inklusive Abbildung unterschiedlicher Raumkategorien (unten) und multikriterielle Abwägung mittels Spider-Plot (oben)  
Schematische Darstellung

# E-POWER-PIPE

## NUTZEN DER INNOVATION

Verlegung von Erdkabeln über große Entfernungen mit geringen Auswirkungen auf die Umwelt



**ABB. 24** E-Power-Pipe-Baustelle der Amprion GmbH in Bacharach

Wenn Rohre im Untergrund verlegt werden, wird neben der Standardbauweise des offenen Leitungsgrabens ortsabhängig auf geschlossene, das heißt grabenlose Bautechniken zurückgegriffen. Bei den Planungen zu den ersten Kabeltrassen stellte Amprion fest, dass unter den zur Verfügung stehenden geschlossenen Bauverfahren eine Möglichkeit fehlte, kleinere Rohre oberflächennah über große Streckenlängen hinweg einzubauen.

Mit Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie entwickelte die Herrenknecht AG in Zusammenarbeit mit Amprion und der RWTH Aachen das E-Power-Pipe-Verfahren. Es kombiniert die bewährten Bohrtechnologien des Horizontal Directional Drilling (HDD) und des Mikrotunnelbaus (Rohrvortrieb). Das Verfahren wird seitens der Herrenknecht AG technisch fortlaufend weiterentwickelt und kann auch im Bereich des Pipelinebaus eingesetzt werden.

Die zum Einsatz kommende neu entwickelte Vortriebsmaschine besitzt einen Bohrlochdurchmesser von 505 Millimetern. Sie kann heute über eine Strecke von bis zu 2.000 Metern ins Ziel vortrieben werden. Mittels eines Steuerungs- und Navigationssystems besteht die Möglichkeit, sowohl horizontale als auch vertikale Kurven aufzufahren. Vorhandene Infrastrukturen wie Leitungen, Gewässer, Straßen oder Schienen können dabei unterquert werden.

Ein erster Praxistest erfolgte im Jahr 2017 anlässlich einer Erdkabelbaustelle von Amprion in Borken. Auf einer 300 Meter langen Strecke konnte die Leistungsfähigkeit des neu entwickelten Verfahrens unter Beweis gestellt werden. Seit dieser Zeit sind weitere Einsätze mit höheren Schwierigkeitsgraden erfolgreich absolviert worden.

Der große Vorteil des E-Power-Pipe-Verfahrens besteht darin, dass Kabelschutzrohre auf großen Streckenlängen oberflächennah eingebaut werden können und dabei nur punktuell in die anstehenden Oberflächen eingegriffen werden muss. Das war zuvor in dieser Form nicht möglich. Die Eingriffe konzentrieren sich im Wesentlichen auf den Bereich der benötigten Baustelleneinrichtungsflächen im Start- und Zielbereich, auf denen temporär Gruben sowie Arbeits- und Materiallagerflächen zu errichten sind. Die im Rahmen der Genehmigungsverfahren zu berücksichtigenden Umweltauswirkungen können je nach Einzelfall als vergleichsweise günstig eingestuft werden. Nachteilig sind die im Vergleich zur Verlegung im offenen Leitungsgraben höheren Baukosten und längeren Bauzeiten.

Das Verfahren ist aktuell noch nicht explizit in den technischen Normen erwähnt. Wegen der bereits erfolgten Einsätze kann das Verfahren zurzeit als „Stand der Technik“ angesehen werden.

# MEHRFACHPFLÜGE FÜR ERDKABELTRASSEN

## NUTZEN DER INNOVATION

Schnellere Umsetzung der Gleichstromprojekte auf Teilabschnitten



ABB. 25 Zweifachflug während des Amprion-Tests

Der Einsatz von Pflügen gehört zu den halb-offenen Verlegeverfahren. Dabei wird das Erdreich mithilfe eines Pflugschwertes verdrängt und ein Kabel beziehungsweise Kabelschutzrohr über eine geeignete Zuführung auf die Sohle des so geformten Schlitzes abgelegt oder in einen durch einen Verdrängungskörper geweiteten Hohlraum eingezogen. Ein Graben ist nicht erforderlich.

Kabelpflüge werden in Netzausbauprojekten bereits seit längerer Zeit zuverlässig genutzt, um Kabel beziehungsweise Rohre im Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetz bis 110 Kilovolt (kV) zu verlegen. Dabei handelt es sich um Kabel mit geringeren Abmessungen. Das Verfahren gilt unter den in der Öffentlichkeit bekannten Bauverfahren als kostengünstige und schnelle Methode. Daher bitten uns Eigentümer\*innen immer wieder, dieses Verfahren auf ihren Flächen auch für Höchstspannungsleitungen einzusetzen. Sie haben unter anderem die Vorstellung, dass sich so bodenschonender arbeiten lasse, als es zum Beispiel beim Ausheben von Leitungsgräben möglich sei.

Unter Leitungsbauexpert\*innen gehen die Meinungen allerdings auseinander. Denn während sich einzeln liegende Leitungen mit diesem Verfahren je nach Umständen des Einzelfalls gut verlegen lassen,

bestehen die Anforderungen im Höchstspannungsnetz mit Spannungen von 220 bis 525 kV darin, zwei bis drei nebeneinander angeordnete Rohrleitungen mit genau bestimmten Abmessungen in das Erdreich einzubringen.

Hersteller von Kabelpflügen haben inzwischen Mehrfachpfluggeräte entwickelt. Bisher durchgeführte Tests konnten die Expert\*innen von Amprion allerdings nicht überzeugen. Wir haben daher beschlossen, das Potenzial dieses halb-offenen Verlegeverfahrens mit einem speziell für den eigenen Bedarf konstruierten Zweifachpflug und eigenen Testreihen zu erforschen. Wir testen

- die projektspezifische Einsetzbarkeit: die Geradlinigkeit der Trassenführung, den Flächenbedarf und eine tolerierbare Anzahl von Hindernissen
- die Wirtschaftlichkeit: die Verlegeleistung und die Einstandskosten
- die Einsatzgrenzen: die Genauigkeit der Verlegung, den Baugrund, die Witterung, Umwelteingriffe.

# MODIFIZIERTES SPÜLBOHRVERFAHREN

## NUTZEN DER INNOVATION

Grabenlose und oberflächennahe Verlegung von Erdkabeln über große Entfernungen bei kleinen Durchmessern

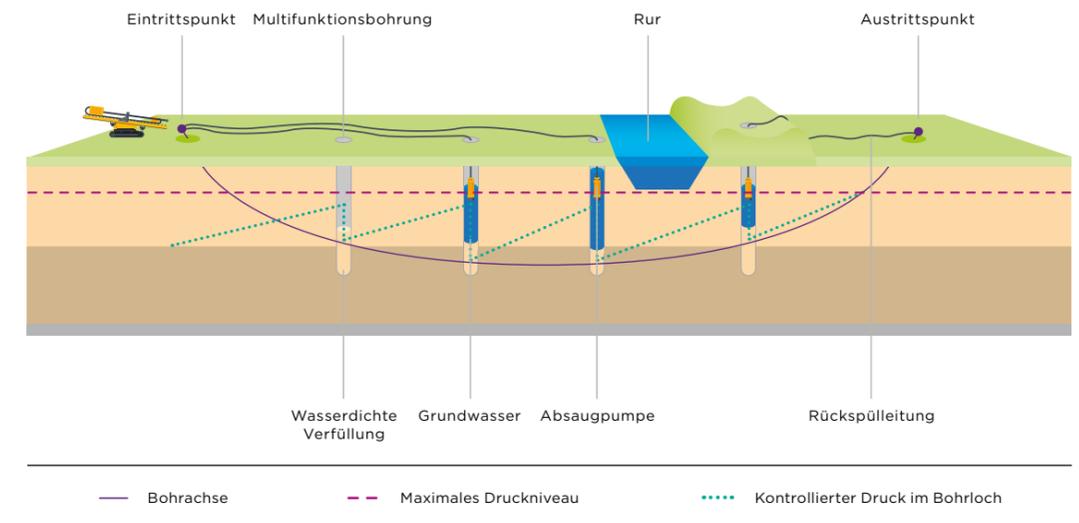


ABB. 26 Geplante Bohrprofile sowie Position der Absaugpumpen (Multifunktionsbohrung) Schematische Darstellung

Mit dem modifizierten Spülbohrverfahren ist es Bohrfirmen gelungen, ein grabenloses Bauverfahren zu entwickeln, das zwischen dem klassischen Spülbohrverfahren und einer Verlegung von Rohren im Leitungsgraben anzusiedeln ist. Die Rohre können dadurch auch bei sehr langen Bohrungen oberflächennah und mit geringer Gefahr von unkontrolliert eintretenden Spüldurchbrüchen – den sogenannten Ausbläsern – unter einer ebenen Fläche oder einem Gewässer verlegt werden. Die Gefahr von Spülsaustritten wird dadurch reduziert, dass an zuvor definierten Stellen gewisse Mengenanteile der Bohrflüssigkeit aus dem Spülungskreislauf mit Pumpen abgesaugt werden können. Dadurch lässt sich der Ringraumdruck im Bohrloch unterhalb der auf den Baugrund abgestimmten zulässigen Druckhöhe halten.

Das Verfahren wurde unter Beteiligung von Amprion erstmals im März 2018 in einem Feldversuch getestet. Er erbrachte den Nachweis, dass das Verfahren geeignet ist, um oberflächennahe Bohrungen durchzuführen.

Im Rahmen des Netzausbauprojekts ALEGrO [→ WEITERENTWICKLUNG DER HOCHSPANNUNGS-GLEICHSTROM-ÜBERTRAGUNG (HGÜ), SIEHE SEITE 31] setzte Amprion die neue Technik im Jahr 2019 auf zwei grabenlos geplanten Streckenabschnitten ein. Konkret wendeten wir das modifizierte Spülbohrverfahren bei der Unterquerung des Flusses Rur nahe Düren an [SIEHE ABB. 26]. Hier musste bei geringer Tiefenlage eine 850 Meter lange Horizontalbohrung unter der Rur, dem Lendersdorfer Mühlenteich und einer Bundesstraße erfolgen. Mit konventioneller Bohrtechnik wären Spülsausrüche in die Gewässer praktisch unvermeidbar gewesen. Trotz der enorm schwierigen Rahmenbedingungen hat sich das modifizierte Spülbohrverfahren dagegen bewährt. Durch die gewonnenen Erkenntnisse kann das Verfahren weiter optimiert werden, sodass den Trassenplaner\*innen künftig ein weiteres Werkzeug für die grabenlose Verlegung von Rohrleitungen zur Verfügung steht.

# SF<sub>6</sub>-FREIE TECHNOLOGIEN

## NUTZEN DER INNOVATION

Reduktion der Treibhausgasemissionen von Betriebsmitteln

ABB. 27 Spannungswandler mit klimaneutraler technischer Luft bei Amprion



Das Gas Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) wird aufgrund seiner herausragenden Eigenschaften für die Isolation und zur Lichtbogenlöschung seit mehr als 40 Jahren in Hoch- und Höchstspannungsbetriebsmitteln verwendet. Da SF<sub>6</sub> aber ein sehr hohes Treibhauspotenzial besitzt – es liegt beim etwa 25.000-fachen von CO<sub>2</sub> –, setzt Amprion seit langem Handlungsanweisungen und Maßnahmen zur Reduzierung der SF<sub>6</sub>-Emissionen um. Das Gas wird bei Amprion in einem geschlossenen Kreislauf behandelt, die SF<sub>6</sub>-Gasräume werden kontinuierlich überwacht. Eventuelle Leckagen können daher zeitnah erkannt und umgehend beseitigt werden. Gleichwohl trägt Amprion zu dem Ausstoß von SF<sub>6</sub> bei, auch wenn dieser nur einen sehr geringen Anteil an den gesamten SF<sub>6</sub>-Emissionen in Deutschland darstellt.

Nur durch den Einsatz neuer innovativer SF<sub>6</sub>-freier Technologien lassen sich die Emissionen langfristig senken und kann perspektivisch vollständig auf das Gas verzichtet werden. Neben dem Einsatz von SF<sub>6</sub>-freien Technologien in der Mittelspannungsebene testet Amprion bereits heute erste innovative Technologien mit klimaneutralem Alternativgas in der Hoch- und Höchstspannungsebene. Dazu gehören:

- seit 2018: 245-kV-Spannungswandler mit technischer Luft [SIEHE ABB. 27]
- seit 2021: 420-kV-Spannungswandler mit technischer Luft
- ab 2023 (geplant): 123-kV-Leistungsschalter mit Vakuum-Schalttechnik
- ab 2026 (geplant): GIS-Ausleitungen mit technischer Luft

Ein weiteres Pilotprojekt mit SF<sub>6</sub>-freien Technologien ist angelaufen. Es geht dabei um Kombiwandler. Zusätzlich wird auch der Einsatz von Alternativgas in weiteren Bestandteilen der gasisolierten Schaltanlagen verfolgt.

Für den Einsatz SF<sub>6</sub>-freier Technologien insbesondere im Bereich der kritischen Schaltaufgaben bis zu 420 Kilovolt (kV) ist weitere Forschung und Entwicklung bei den Herstellern erforderlich.

Amprion ist bereit, weitere innovative Produkte zu erproben und damit den Technologiereifegrad zu steigern. Durch die hier beschriebenen Maßnahmen leistet Amprion einen Beitrag, um Treibhausgasemissionen des Stromnetzes zu reduzieren. Gleichzeitig werden dabei eine gleichbleibende Versorgungssicherheit bei der aktuell geplanten Netzerweiterung und die damit verbundene Integration der erneuerbaren Energien sichergestellt.

# GLEICHSTROM-KOMPAKTMASTEN

## NUTZEN DER INNOVATION

Weiterentwicklung kompakter Freileitungen für DC-Anwendungen, um dünn besiedelte, topografisch anspruchsvolle Trassenkorridore zu erschließen

Für den Großteil der im Bundesbedarfsplan enthaltenen Leitungen zur Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung ist ein Erdkabelvorrang gesetzlich festgelegt (Ausnahme: Ultranet). Betroffene Gebietskörperschaften können nach Bedarf eine Prüfung auf Freileitungsmöglichkeit verlangen. In der Praxis hat sich diese jedoch nicht bewährt und es wurde dadurch auch keine Verfahrensbeschleunigung erreicht.

**»Amprion besitzt einen umfassenden Werkzeugkasten verschiedenster Mastbauformen.«**

Für den weiteren Netzausbau ist vor diesem Hintergrund mehr Flexibilität erforderlich, um außergewöhnliche Herausforderungen bei der Erdverkabelung zu überwinden. Insbesondere topografische Bedingungen wie etwa in den Mittelgebirgen können bei einer Erdkabelplanung und im Bau technisch und zeitlich sehr anspruchsvoll sein. Daher schlägt Amprion dem Gesetzgeber vor, für außergewöhnliche technische Herausforderungen bei Erdkabelvorhaben eine Freileitungsoption zu eröffnen.

Für diesen Fall entwickelt Amprion derzeit kompakte Gleichstrom-Freileitungsmasten. Diese beeinflussen das umliegende Landschaftsbild in geringerem Ausmaß und nehmen weniger Fläche in Anspruch. Amprion hat dabei verschiedene Möglichkeiten, die Gleichstrom-Freileitungsmasten kompakter zu gestalten. So werden beispielsweise Isoliertraversen statt klassische Traversen in Stahlgitterbauform eingesetzt [SIEHE ABB. 28].

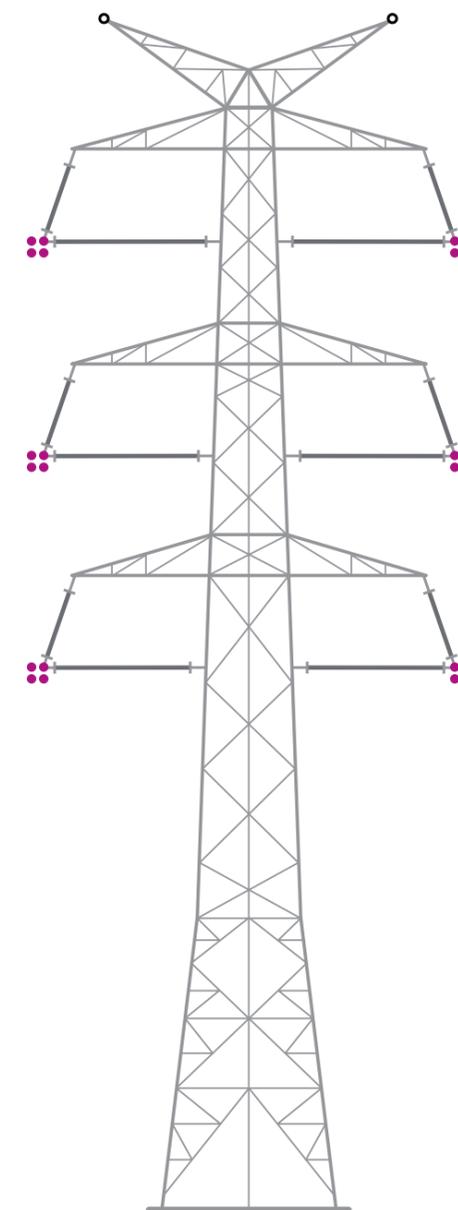


ABB. 28 Gleichspannungskompaktmast als Stahlgittermast mit Isoliertraversen  
Schematische Darstellung

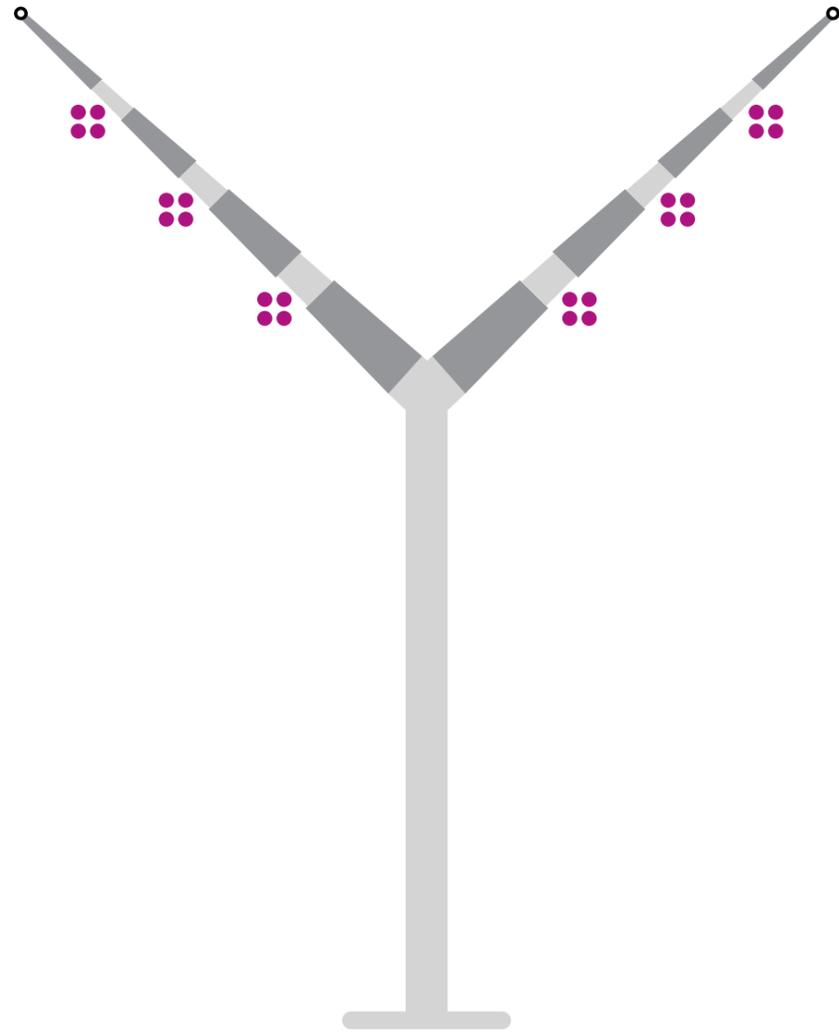
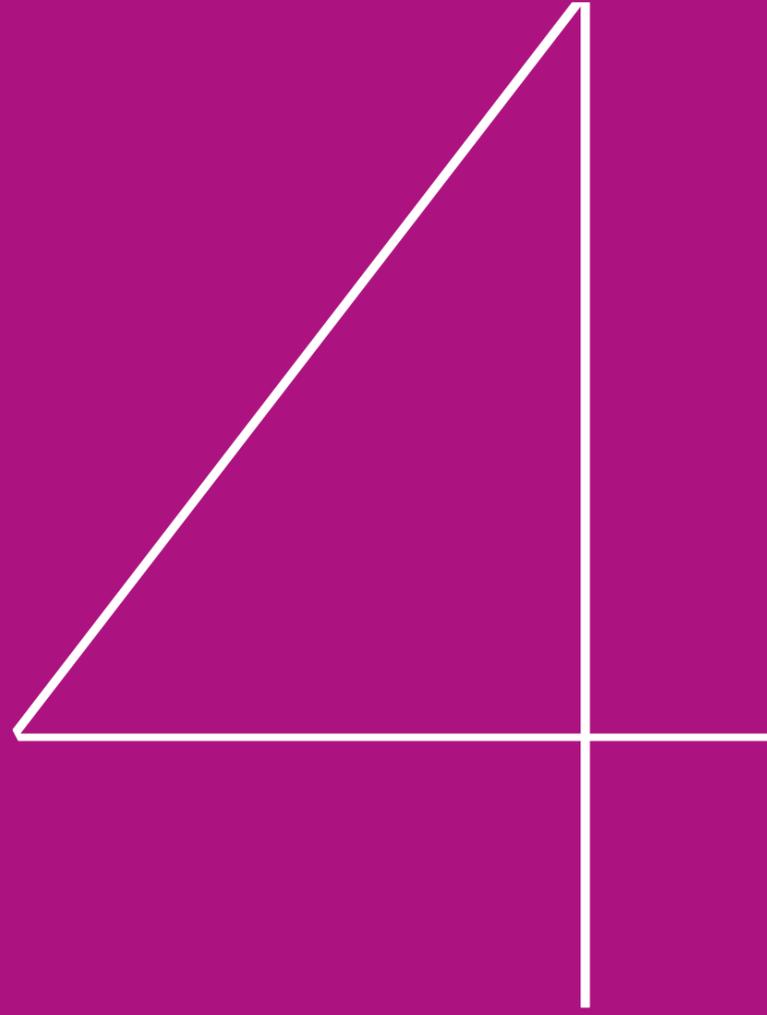


ABB. 29 Vollwandmast in Bauform des European Composite Pylon  
Schematische Darstellung

Entsprechend der individuellen Randbedingungen eines jeden Projekts kann Amprion auf einen umfassenden Werkzeugkasten mit verschiedenen Mastbauformen in Gitterbauweise zurückgreifen. Hierzu können für den Gleichstrombereich die Masthöhen und -breiten reduziert werden, wobei die statischen Möglichkeiten und normativen Abstände zu berücksichtigen sind. Zusätzlich können spezifische Ketten-

ausführungen und Phasenarrangements sowie die Wahl der Zugkräfte und Spannfeldlängen so optimiert werden, dass eine raumschonende Bauweise erreicht wird. Derzeit prüft Amprion für den Gleichstrombereich ergänzende Bauformen, wie etwa eine Weiterentwicklung von Gleichstrom-Vollwandmasten mit geringeren Austrittsmaßen [SIEHE ABB. 29].

# SYSTEM- FÜHRUNG UND BETRIEBS- KONZEPTE DER ZUKUNFT



4.1	Hauptschaltleitung Brauweiler	61
4.2	Kurative Systemführung	63
4.3	Balancing-Plattform MARI	65
4.4	Adaptiver Freileitungsbetrieb	66
4.5	Online-Monitoring	68
4.6	Drohnen	71
4.7	Satellitengestütztes Trassenmanagement	73

Mit dem Umbau des Energiesystems steigen die Anforderungen an die Systemführung und den Betrieb des Übertragungsnetzes. Mit der neuen Hauptschaltleitung in Brauweiler bereitet Amprion den Weg für eine Systemführung der nächsten Generation. Sie setzt unter anderem auf innovative Verfahren, um das bestehende Netz höher auszulasten.

# HAUPTSCHALTLEITUNG BRAUWEILER

## NUTZEN DER INNOVATION

Systemführung in Echtzeit mit Unterstützung durch hochmoderne Rechenzentren und künstliche Intelligenz, um ein sicheres Netz in Deutschland und Europa zu gewährleisten



ABB. 30 Großbildanzeige in der Hauptschaltleitung Brauweiler

In der neuen Hauptschaltleitung (HSL) von Amprion überwachen Ingenieur\*innen Stromflüsse, Spannung und Frequenz des Übertragungsnetzes in Echtzeit. Im Zentrum der HSL befindet sich die Großbildanzeige [SIEHE ABB. 30] mit einer Fläche von 108 Quadratmetern. Damit ist sie eine der weltweit größten im Energiebereich. Mit ihrer Hilfe können die Kolleg\*innen die Lastflüsse in ihrem Beobachtungsgebiet noch schneller erfassen und behalten auch in herausfordernden Situationen den Überblick. Weil Umfang und Volatilität überregionaler Lastflüsse zunehmen, geht das Beobachtungsgebiet weit über das Amprion-Netzgebiet hinaus. Es umfasst das Höchstspannungsnetz in Gesamtdeutschland, den Niederlanden, Belgien, großen Teilen von Frankreich, der Schweiz, Österreich, Norditalien, Slowenien, Tschechien und Polen.

## SYSTEMFÜHRUNG MIT KÜNSTLICHER INTELLIGENZ

Die Ingenieur\*innen in der HSL können die Großbildanzeige individuell mit Abbildungen und Übersichten belegen. So erfassen und beurteilen sie mit geschultem Blick alle wichtigen Systemgrößen und Kennwerte – und können auch in Extremsituationen einen verlässlichen Stromtransport sicherstellen. Zwei hochmoderne Rechenzentren unterstützen sie dabei. Sie verarbeiten täglich Millionen von Daten aus dem Netz. Beispielsweise erfassen sie in Echtzeit die Zustände von mehr als 50.000 Schaltgeräten in 800 Schaltanlagen sowie die Messwerte von etwa 2.800 Netzelementen.

Amprion setzt in der neuen Hauptschaltleitung auf verschiedene Arten künstlicher Intelligenz, um vor allem die Einspeisung aus erneuerbaren Energien vorherzusagen [→ **KÜNSTLICHE INTELLIGENZ, SIEHE SEITE 81**]. Algorithmen werten dafür Wettervorhersagen verschiedener Quellen aus. Hierbei bezieht der selbstlernende Algorithmus Prognosen, die in der Vergangenheit bei vergleichbaren Großwetterlagen die besten Vorhersagen abgaben, stärker in die Berechnung der aktuellen Vorhersage ein. Dadurch verbessert sich die Vorhersage immer weiter.

## EUROPA IM BLICK

Amprion hat für das europäische Verbundnetz weitreichende Koordinierungsaufgaben übernommen. Damit leistet Amprion einen wichtigen Beitrag zum Funktionieren des EU-Binnenmarkts für Strom. Eine zentrale Rolle spielt dabei unter anderem der „Synchronous Area Monitor“. Im Synchrongebiet – also dem europäischen Verbundnetz – muss die Netzfrequenz stabil bleiben. Ein spezieller Bereich auf der Großbildanzeige in der HSL umfasst daher eine Europakarte, Anzeigen für Systemzustände, Alarmmeldungen und grenzüberschreitende Stromflüsse. Sie gibt aber auch Hinweise auf die immer weiter in den Vordergrund rückenden Inter-Area-Oscillations, die mit einem europaweiten Netzwerk hochauflösender Messgeräte ermittelt werden. Außerdem werden die Beiträge jedes einzelnen Übertragungsnetzbetreibers im kontinentaleuropäischen Synchronverbund zur Netzfrequenz- und zur Synchronzeithaltung grafisch aufbereitet. Darüber kann im Störfall die Ursache zügig ermittelt, kommuniziert und behoben werden. Somit tragen das Netzleitsystem und die stetig weiterentwickelte Visualisierung von Netzdaten zu einer sicheren und zuverlässigen Energieversorgung in Europa bei.

In der HSL muss je Arbeitsplatz eine Vielzahl von Systemen überwacht und bedient werden. In der Vergangenheit nutzten die Ingenieur\*innen für verschiedene Systeme und Computer jeweils separate Eingabegeräte. Das war besonders in angespannten Netzsituationen nicht effizient. Heute werden über eigens für die Hauptschaltung entworfene Multifunktionsstationen alle Systeme der HSL mit nur einer Tastatur und einer Computermaus effizient gesteuert.

# KURATIVE SYSTEMFÜHRUNG

## NUTZEN DER INNOVATION

Optimierung des Engpassmanagements und Reduktion von präventivem Redispatch – die Transportaufgaben der Zukunft

Die Kosten für das Beheben von Engpässen im deutschen Übertragungsnetz sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Durch den beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien sowie die Integration europäischer Märkte ist auch mittelfristig nicht mit einer Entlastung der Netze zu rechnen. Amprion verfolgt daher innovative Ansätze im Netzbetrieb mit dem Ziel, das Bestandsnetz höher auszulasten und so die Aufwendungen für das Engpassmanagement zu reduzieren. Ein im Kontext der Höherauslastung und innovativer Technologien vielfach diskutierter Ansatz ist die sogenannte kurative Systemführung.

Die kurative Systemführung unterscheidet sich zur bisherigen präventiven Systemführung insbesondere im Zeitpunkt, an dem der Engpass behoben wird [SIEHE ABB. 32]. Eine präventive Maßnahme – zum Beispiel ein Redispatch mit Kraftwerken – wird bereits vor einer möglichen Störung aktiviert und reduziert entsprechend die Auslastung, um im Fehler-

fall das Netz weiterhin engpassfrei zu betreiben. Damit geht einher, dass wertvolle Transportkapazitäten für seltene Ereignisse zurückgehalten werden.

Im Gegensatz dazu wird eine kurative Maßnahme erst dann aktiviert, wenn es tatsächlich zu einer Störung kommt. Bis zur vollständigen Wirksamkeit der kurativen Maßnahme greifen sogenannte thermische Reserven der Betriebsmittel, die für einen kurzen Zeitraum höhere Ströme erlauben. Die Betriebsmittel im Netz wie Leitungen oder Transformatoren werden also unmittelbar nach der Störung kurzzeitig höher ausgelastet. Vor der Störung wird die Auslastung der Betriebsmittel nicht reduziert, sodass das Betriebsmittel insgesamt höher ausgelastet werden kann.

Für beide Konzepte gilt weiterhin das (n-1)-Kriterium. Es besagt, dass es bei einer Störung wie dem Ausfall einer Leitung oder eines Transformators zu keinem Engpass kommen darf.

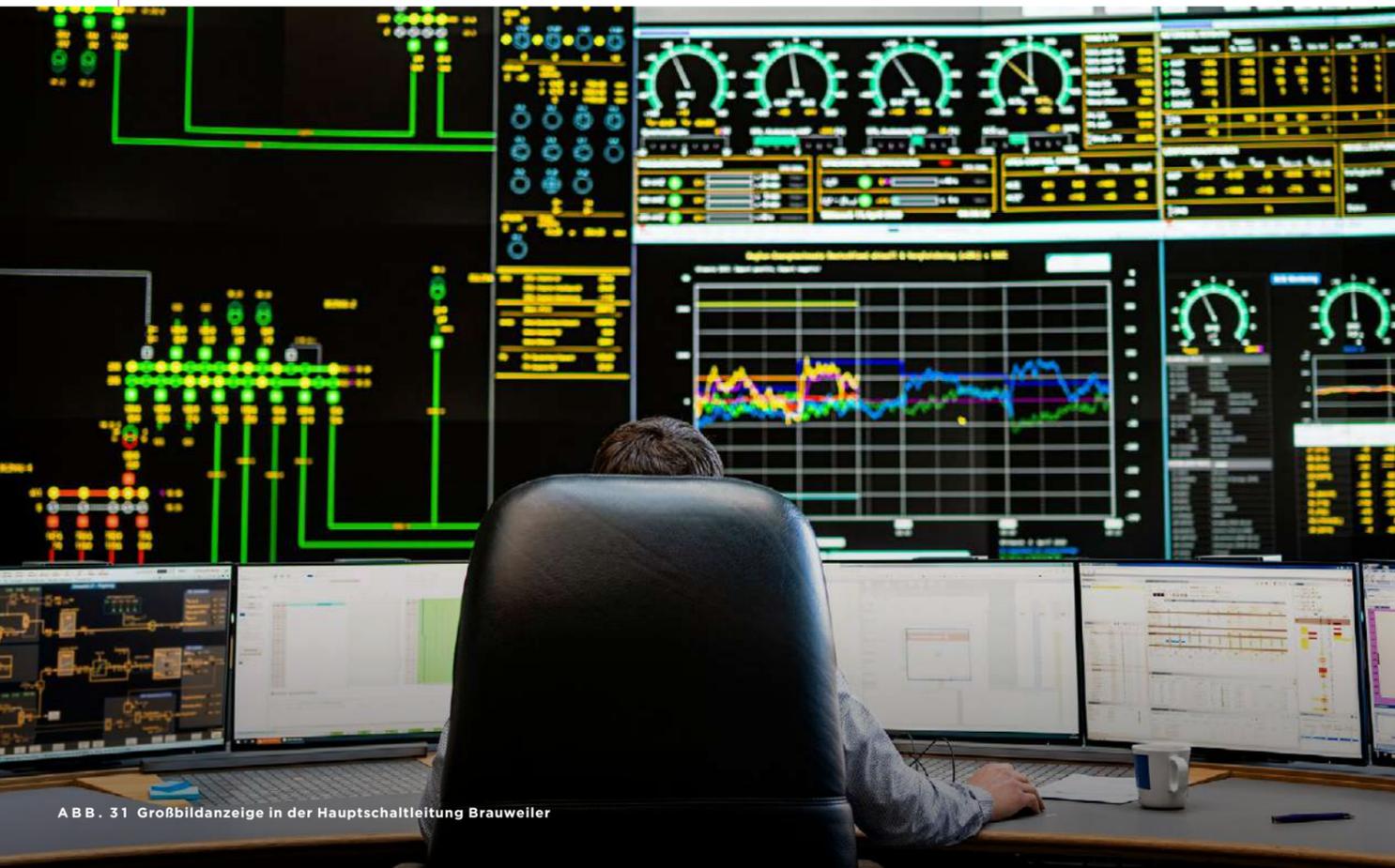


ABB. 31 Großbildanzeige in der Hauptschaltleitung Brauweiler

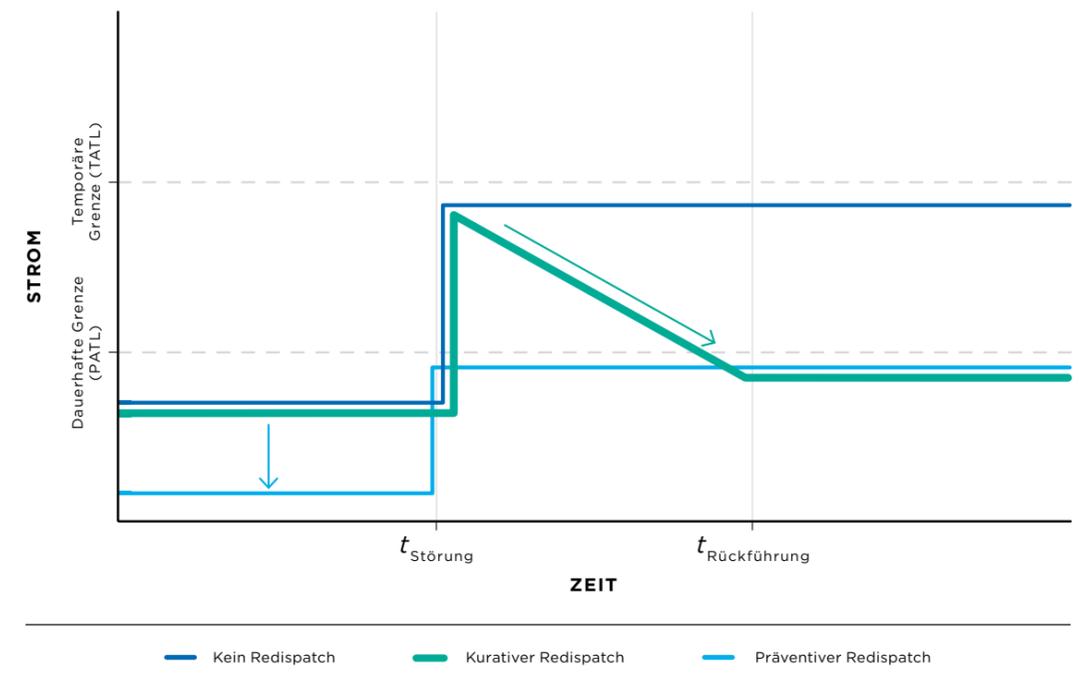


ABB. 32 Wirkmechanismen von präventivem und kurativem Engpassmanagement

Amprion hat den innovativen Ansatz der kurativen Systemführung zusammen mit insgesamt 17 Partnern im Forschungsprojekt „Innovationen in der Systemführung bis 2030 (InnoSys 2030)“ umfassend untersucht und die Potenziale bewertet. Eine zentrale Erkenntnis: Erst der gemeinsame Einsatz von präventiven und kurativen Maßnahmen ermöglicht eine sichere Höherauslastung des Stromnetzes. Somit muss die kurative Systemführung in das bisherige Engpassmanagement integriert werden. Einen ersten Grundstein dafür hat Amprion bereits im Rahmen von InnoSys gelegt. Ein Feldtest im eigenen Leitsystem hat die praktische Abbildung von kurativen Maßnahmen in der eigenen Ausfallvariantenrechnung erprobt und konnte dem Forschungsprojekt wertvolle Erkenntnisse zu operativen Herausforderungen liefern.

Darauf aufbauend verfolgt Amprion nun die konkrete Konzeption und Umsetzung von ausgewählten kurativen Maßnahmen. Priorisiert werden dabei Anwendungsfälle des kurativen Redispatches mit konventionellen und erneuerbaren Erzeugern, kurative Topologiemassnahmen sowie der Einsatz von Netzboostern [→ DEZENTRALER NETZBOOSTER, SIEHE SEITE 45]. Dabei ist es sinnvoll, schrittweise vorzugehen:

Zunächst werden die Maßnahmen in Pilotprojekten erprobt. Amprion hat sich dabei als Ziel gesetzt, bis 2024 einen Pilotbetrieb mit kurativen Maßnahmen umzusetzen. Hier wird es darum gehen, die komplexen Wechselwirkungen in der Systemlandschaft zunächst in kleinen Dimensionen praktisch zu testen. Ein Fokus ist dabei die zuverlässige Auslösung der kurativen Maßnahme unmittelbar nach dem Störungsereignis. Wo bei einer präventiven Maßnahme der Abruf heute mit genügend Vorlauf koordiniert werden kann, muss bei einer kurativen Maßnahme der unmittelbare Abruf vollautomatisiert umgesetzt werden. Hierfür muss die Infrastruktur beim Anlagenbetreiber sowie in der Leittechnik umfassend angepasst werden.

Im Anschluss an eine positive Testphase soll auf geeigneten Stromkreisen eine gezielte Höherauslastung durch kurative Maßnahmen erfolgen. Dabei wird es herausfordernd sein, die deutlich erhöhte Komplexität der kurativen Systemführung operativ zu beherrschen. Zum einen kann nun für jede betrachtete Ausfallsituation eine individuelle kurative Maßnahme geplant werden, die verlässlich mit anderen Netzbetreibern koordiniert werden muss. Zum anderen bringt die Höherauslastung erhöhte Anforderungen hinsichtlich Spannungsstabilität und Blindleistungsbedarf mit sich. Es gilt daher, die Assistenzsysteme der Systemführung schrittweise weiterzuentwickeln, sodass präventive und kurative Maßnahmen sachgerecht, intuitiv und robust geplant, überwacht und koordiniert werden können.

Erst diese Beherrschbarkeit wird es operativ ermöglichen, den Einsatz von präventivem Redispatch bei gleichbleibender Systemsicherheit in begrenztem Maße zu reduzieren. Regulator und Gesetzgebung können entsprechende Rahmenbedingungen für die Höherauslastung schaffen, um diese Einsparpotenziale möglichst zeitnah nutzbar zu machen.

Die kurative Systemführung bietet mit diesem Vorgehen Möglichkeiten, sowohl die Kosten für das Engpassmanagement zu reduzieren als auch die Systemführer\*innen mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad beim sicheren Netzbetrieb zu unterstützen.

Aspekte der Systemsicherheit sind weiterhin von höchster Priorität. Sie bilden die Randbedingungen, um kurative Maßnahmen in das Engpassmanagement zu integrieren. Mit der Berücksichtigung dieser Randbedingungen stellt sich Amprion den teils großen Herausforderungen, die es in den kommenden Jahren gemeinsam mit anderen Netzbetreibern, Anlagenbetreibern und dem Gesetzgeber zu bewältigen gilt.

**»Die kurative Systemführung bietet Möglichkeiten, sowohl die Kosten für das Engpassmanagement zu reduzieren als auch die Systemführer\*innen mit einem zusätzlichen Freiheitsgrad beim sicheren Netzbetrieb zu unterstützen.«**

# BALANCING-PLATTFORM MARI

## NUTZEN DER INNOVATION

Europäische Balancing-Plattform zum Austausch von Regulararbeit mit hohen Effizienzgewinnen

Einspeisung und Entnahme elektrischer Energie müssen im Stromsystem jederzeit ausgeglichen sein. Um kurzfristige Abweichungen auszugleichen, setzen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) die sogenannte Regelreserve ein. Dazu gehört auch die Minutenreserve: Sie stellt kurzfristig Energie zum Ausgleich von Frequenzschwankungen im Netz zur Verfügung. Bisher wurde sie auf nationaler Ebene aktiviert: Jedem ÜNB standen nur die Erzeugungsanlagen im eigenen Land zur Verfügung, um den Systemausgleich sicherzustellen.

Seit Herbst 2022 betreibt Amprion im Auftrag der europäischen ÜNB mit der „Manually Activated Reserves Initiative“ (MARI) eine europaweite Plattform für Minutenreservearbeit. Ihr Leitgedanke: Die europäischen ÜNB nutzen eine gemeinsame Plattform, um grenzüberschreitend Angebot und Nachfrage mit Blick auf die Minutenreserve zu koordinieren.

ÜNB leiten die von Regelreserveanbietern (RRA) an den nationalen Märkten abgegebenen Regelreservegebote, ihre Bedarfe für den Systemausgleich sowie die verfügbare grenzüberschreitende Übertragungskapazität an die Plattform weiter. Unter Berücksichtigung der Informationen aller teilnehmenden Länder ermittelt die Aktivierungs-Optimierungsfunktion der Plattform dann, welche Gebote in Europa aktiviert werden müssen, um den Regelreservebedarf mit möglichst geringen Kosten zu decken. Die Plattform ermöglicht zudem die Abrechnung zwischen den ÜNB, während der einzelne ÜNB weiterhin RRA lokal vergütet.

Gemeinsam mit den Schwesterprojekten TERRE (Trans European Replacement Reserves Exchange), PICASSO (Platform for the International Coordination of the Automatic frequency restoration process and Stable System Operation) und IGCC (International Grid Control Cooperation) ist MARI aus regulatorischer Sicht ein wesentlicher Bestandteil zur Umsetzung des europäischen Binnenmarkts für Regulararbeit gemäß der „Electricity Balancing Guideline“ der EU. Aus technischer Sicht bilden die

Plattformen das weltweit größte System zur Echtzeitoptimierung des Systemausgleichs. Insbesondere in Zeiten mit volatilen Großhandelspreisen und zunehmenden Unsicherheiten sind die Plattformen eine entscheidende Grundlage für den sicheren und kostengünstigen Betrieb des europäischen Elektrizitätsversorgungssystems. Das jährliche Einsparpotenzial über alle Plattformen liegt bei mehreren hundert Millionen Euro.

Seit 2017 treibt Amprion den Aufbau der Plattformen systematisch voran und stellt daher den Partner-ÜNB entscheidende Komponenten für den Plattformbetrieb zur Verfügung: Neben dem Hosting der MARI-Plattform verantwortet Amprion auch das Hosting eines Kommunikationsnetzwerks für MARI und PICASSO, basierend auf der „ENTSO-E Connectivity and Communication Service Platform“. Dieses Netzwerk soll langfristig auch auf das „Capacity Management Module“ der Balancing-Plattformen ausgeweitet werden.

Insgesamt zeigen die Aktivitäten von Amprion im Bereich des Systemausgleichs, dass wir Vorreiter beim Aufbau europäischer Prozesse zur Koordination des internationalen Systembetriebs sind.



Weitere Informationen zur Balancing-Plattform MARI finden Sie auf [entsoe.eu/network\\_codes/eb/mari/](https://entsoe.eu/network_codes/eb/mari/)

# ADAPTIVER FREILEITUNGS- BETRIEB

## NUTZEN DER INNOVATION

Witterungsabhängige Höherauslastung des Netzes

Um die Übertragungskapazität im Stromnetz betrieblich zu optimieren, bieten sich verschiedene technische Optionen an. Beispielsweise können Elemente eingesetzt werden, die Leistungsflüsse steuern, oder Schaltmaßnahmen im Netz durchgeführt werden. Die effizienteste Möglichkeit zur Erhöhung der Übertragungskapazität stellt der witterungsabhängige oder adaptive Freileitungsbetrieb (AFB) dar, da dieser ohne Netzausbau und Trassenfindung auskommt. Ziel ist es, die Stromtrassen witterungsabhängig höher belasten zu können. Für die technische Umsetzung werden neue Ansätze aus dem Bereich der Wettermodell-Reanalyse-Ensembles, aber auch strömungsmechanische, statistische und Machine-Learning-Verfahren bei Amprion eingesetzt. Im Gegensatz zu den vergleichsweise regional homogenen Größen Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit ist die räumliche und zeitliche Simulation der Windbedingungen und der Globalstrahlung wesentlich komplexer. Dies ist primär durch mikroskalige Geländeeffekte und Landnutzung sowie durch die lokale Wolkenbedeckung bedingt, sodass für den Einsatz von AFB Wetterstationen an Masten im Netzgebiet notwendig sind. Um die erforderlichen Daten bereitzustellen, sind aktuell 120 Wetterstationen im Amprion-Netz in Betrieb. Anhand der ausgewerteten Daten durch die Systemführung kann somit die optimale Auslastung sowohl für den Realbetrieb als auch für das Engpassmanagement auf Basis von individuellen Wetterprognosen ermittelt werden. Das ist vor allem deswegen wichtig, weil die Strombelastbarkeit einer Freileitung durch die Wärmeausdehnung des Leiterseils und damit durch den Seildurchhang begrenzt ist. Der AFB wird laufend weiterentwickelt, wobei zusätzlich neue Ideen und Ansätze in Forschungsprojekten verfolgt werden. Im Rahmen eines vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Vorhabens unter dem Akronym WAFB 4.0 wird gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Energie-

wirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE) sowie der Luna Innovations Germany GmbH ein Verfahren zur Nutzung eines faseroptischen Messsystems für die Ermittlung von Umgebungstemperaturen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung im Verlauf der Freileitungstrasse entwickelt und in Bezug auf den AFB bewertet. Für sogenannte Baueinsatzkabel wird im Rahmen des Projekts der Einsatz eines faseroptischen Messsystems zur Bestimmung der Temperatur des Kabels getestet. Baueinsatzkabel werden im Rahmen von Bauprojekten als Provisorien eingesetzt und meist oberirdisch verlegt. In beispielsweise Kreuzungsbereichen sind dennoch häufig vergrabene Teilabschnitte vorhanden. Damit spielen Wetterdaten wie Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur eine ähnlich große Rolle wie bei Freileitungen, während abschnittsweise die Bedingungen im Erdreich die Kabeltemperatur beeinflussen. Da Stromkreise mit Baueinsatzkabeln bisher nur in Ausnahmefällen und bei kompletter oberirdischer Verlegung witterungsabhängig betrieben werden können, würde die Kenntnis der Kabeltemperatur für sowohl unter- als auch oberirdische Abschnitte von Baueinsatzkabeln die bedarfsgerechte Aufnahme der betroffenen Stromkreise in den AFB ermöglichen. Die Ergebnisse des dreijährigen Forschungsprojekts werden 2024 erwartet.



ABB. 33 UND 34 Amprion-Wetterstation am Strommast



## NUTZEN DER INNOVATION

Erhöhung der Leistungsfähigkeit  
und Verfügbarkeit des Stromnetzes

Mit Online-Überwachungssystemen – auch Online-Monitoring genannt – können Informationen über den Zustand des Netzes in Echtzeit verarbeitet und beispielsweise in der Systemführung, im Netzbetrieb und der Netzplanung genutzt werden. Neben einer Vielzahl von Bestandssystemen, wie zum Beispiel der Überwachung der witterungsabhängigen Belastbarkeit von Freileitungen oder des Transformator-Zustandsmonitorings, werden kontinuierlich weitere Überwachungssysteme bei Amprion erprobt und eingeführt. Hierzu gehört beispielsweise, die Temperatur von Kabeln und Kabeltrassen sowie die Spannungsqualität des Netzes zu überwachen oder die Funktionsunregelmäßigkeiten von Trennschaltern zu erfassen.

### ÜBERWACHUNG DER TEMPERATUR VON KABELN UND KABELTRASSE

Amprion nutzt unterschiedliche Sensoren an und um Höchstspannungskabelanlagen für umweltfachliche und betriebliche Zwecke. Um noch genauer vorherzusagen, wie sich der Betrieb von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden auswirkt, wird am deutsch-belgischen Interkonnektor ALEGrO seit Frühjahr 2022 die Temperatur überwacht. Hierbei wurden an vier Standorten Messstellen eingerichtet. Dort werden Temperatur und Feuchte im Boden in unmittelbarer Kabelnähe gemessen. Das ALEGrO-Kabel bietet deutschlandweit die einmalige Gelegenheit, live zu messen, wie sich der Erdkabelbau und -betrieb auf die Bodeneigenschaften an einem Hochspannungsgleichstromkabel während des Regelbetriebs auswirken. Hierdurch erhoffen wir uns wertvolle Erkenntnisse. Bei den Messungen steht im Fokus, wie sich die jahreszeitliche Temperatur entwickelt und wie sich die betriebsbedingte Bodenenerwärmung auf den Bodenwasserhaushalt auswirkt. Das Projekt wird in Zusammenarbeit mit Wissen-

schaftler\*innen und bodenkundlichen Expert\*innen umgesetzt. Dabei wird innerhalb eines definierten Bereichs in unterschiedlichen Tiefen mittels Messsonden die Bodenfeuchte und -temperatur überwacht. Insgesamt sind pro Messstelle 32 Temperatur- und zwölf Feuchtesonden in den Boden oberhalb der Kabelanlage und 16 Temperatur- sowie zwölf Feuchtesonden in einen angrenzenden unbeflussten Kontrollbereich eingebracht worden [SIEHE ABB. 35-37]. Ergänzt werden die Messungen durch ein weiteres Temperatur-Monitoring mittels Lichtwellenleiter, welche während des Baus zum einen im Kabelmantel, zum anderen oberhalb des Bettungskörpers verlegt wurden. Ziel ist es, entlang des Kabels Temperaturveränderungen zu identifizieren und bewerten zu können. Dabei werden die Auslastung, die Verlegeart sowie die Boden- und Witterungseinflüsse berücksichtigt. Amprion plant darüber hinaus, die zeit- und orts aufgelöste Kabeltemperaturverteilung zu nutzen, um zukünftig den Betrieb und die Instandhaltung bei verschiedenen Kabeltrassen zu optimieren.



ABB. 35 LINKS Messsonden zur Bodenfeuchte- und Temperaturüberwachung  
ABB. 36 OBEN Installation der Messsonden im Kontrollbereich

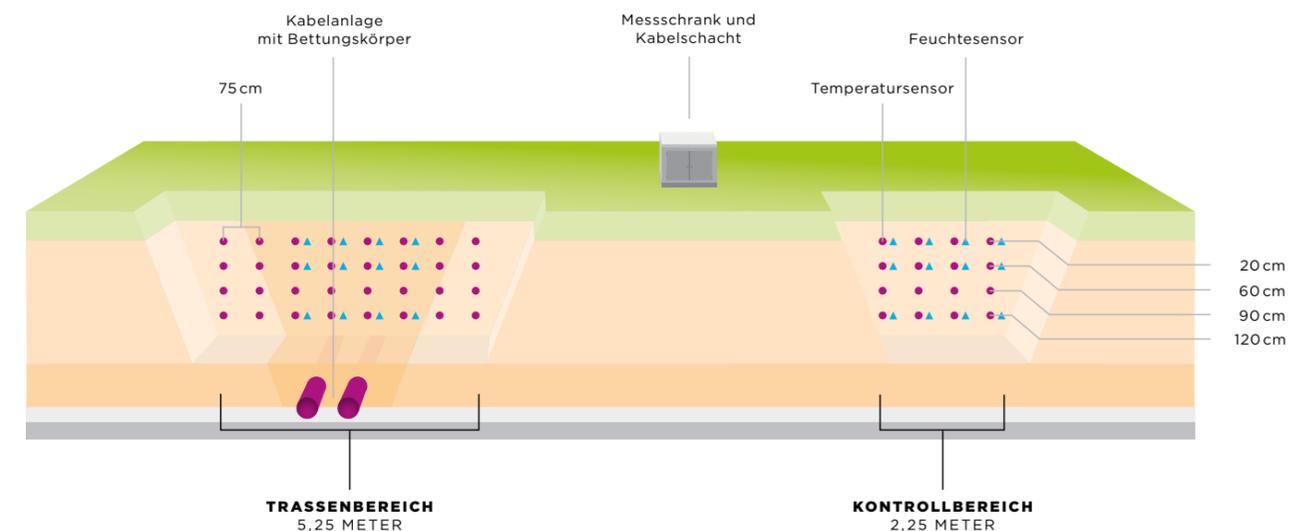


ABB. 37 Querschnittsdarstellung Bodensensoren der ALEGrO-Trasse  
Schematische Darstellung

Das Ziel des Projekts „Trenn- und Erdungsschalter-Monitoringsystem Amprion“ („TrEMoniA“) ist die automatisierte Zustandsüberwachung von Trenn- und Erdungsschaltern im Übertragungsnetz. Die Hauptaufgabe der Trennschalter in den Anlagen der elektrischen Energieübertragung ist es, bei Bedarf eine sichtbare Trennstelle zu erzeugen. Erdungsschalter können eine Verbindung zwischen Anlagenteilen und Erdpotenzial herstellen, um diese zum Beispiel für Instandhaltungsmaßnahmen zu sichern. Zur Überwachung werden die Motorstromverläufe der Schalter beim Schaltvorgang aufgezeichnet und anschließend analysiert. Durch das Monitoring besteht die Möglichkeit, Unregelmäßigkeiten bei Schaltvorgängen zu erfassen und entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten. Die Funktionsfähigkeit der Trennschalter wird fortlaufend kontrolliert. Dadurch ist es möglich, die Instandhaltungszyklen der Betriebsmittel zu verlängern, wodurch mehr Netzkomponenten verfügbar und Betriebsaufwendungen gesenkt werden.

**»Durch das Monitoring besteht die Möglichkeit, Unregelmäßigkeiten bei Schaltvorgängen zu erfassen und entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten.«**

Das Überwachungssystem besteht aus mehreren Komponenten: der zentralen Erfassung der Motorströme je Anlage, einer zentralen Datenablage, der Verknüpfung mit dem SCADA-System, einem Diagnoseverfahren und der Ergebnisdarstellung bei der Betriebsstelle. Kernkomponente des Systems ist ein Diagnose-Algorithmus, welcher einen aktuell aufgenommenen Motorstrom hinsichtlich Unregelmäßigkeiten analysiert. Den Zustand ermittelt Amprion mittels Abgleich eines Referenzstromverlaufs unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur sowie anlagen- und gerätespezifischer Eigenschaften. Durch das System identifizierte Abweichungen werden kategorisiert und geben einen Indikator zu Handlungsbedarfen. Schlechte Zustände werden vom System als Meldung an die entsprechende Betriebsstelle zur Kontrolle und Maßnahmenableitung kommuniziert. Das Überwachungssystem befindet sich gerade in der Einführung hin zum Regelbetrieb.

Durch den vermehrten Einsatz von Leistungselektronik etwa in Konverteranlagen, die zunehmende Umsetzung von Übertragungsstrecken als Erdkabel sowie den Rückbau leistungsstarker Synchrongeneratoren in Großkraftwerken gewinnt die Spannungsqualität im Übertragungsnetz zunehmend an Bedeutung. Unzulässige Überschreitungen von Qualitätskenngrößen sowie die Anregung von Netzresonanzen können den stabilen Netzbetrieb gefährden. Aus diesem Grund erweitert Amprion im Netzgebiet aktuell die Erfassung der Spannungsqualität. Hierbei kommt ein eigens entwickeltes Messsystem zum Einsatz, welches auf der bestehenden Infrastruktur aufbaut. Im Falle einer erfolgreichen Pilotphase ist anschließend eine kurzfristige und kostengünstige Realisierung möglich.

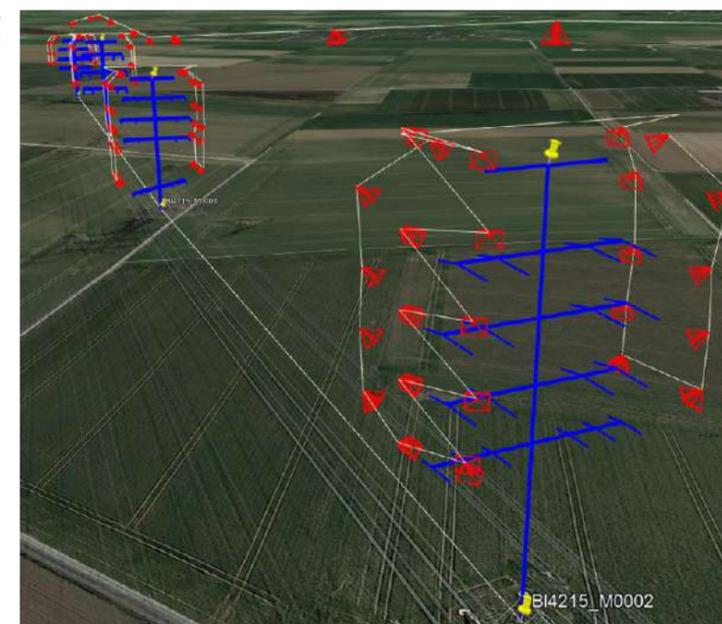
Die valide Messung der Spannungsqualität stellt zusätzliche Anforderungen an die Abbildungseigenschaften der einzusetzenden Messtechnik, die von konventionellen induktiven Spannungswandlern im Höchstspannungsnetz nicht erfüllt werden. Konventionelle Spannungswandler sind Standardkomponenten im Höchstspannungsnetz, die auf eine Messung der Netzspannung bei 50 Hertz ausgelegt sind. Messungen höherer Frequenzanteile unterliegen nicht vernachlässigbaren Messfehlern, sodass sie nicht im geforderten Umfang zur Überwachung der Spannungsqualität genutzt werden können.

Das bei Amprion langjährig in Betrieb befindliche Transformator-Zustandsmonitoring liefert einen idealen Ausgangspunkt, um die Spannungsqualität umfassend zu überwachen. Dabei werden zur Spannungswandlung die kapazitiv gesteuerten Transformatordurchführungen mitgenutzt, die durch Beschaltung mit einer Messkapazität einen kapazitiven Spannungsteiler bilden. Intensive Voruntersuchungen bestätigen, dass die Abbildungseigenschaften der Transformatordurchführungen den Anforderungen entsprechen, sodass eine quantitative Beurteilung der Netzzrückwirkungen bis in hohe Frequenzbereiche möglich ist. Ein zusätzliches Power-Quality-Messgerät (PQ-Messgerät) verarbeitet die Messspannung und leitet die Qualitätskenngrößen in Konformität mit internationalen Normen ab, um die Spannungsqualität zu beurteilen. Nachdem die Funktionsfähigkeit des Messsystems in Testmessungen bereits bestätigt wurde, ist im nächsten Schritt ein Pilotsystem mit ausgewählten Messorten geplant. Im Rahmen des Pilotprojekts werden außerdem Werkzeuge zur effizienten Auswertung und Analyse der großen Messdatenmengen entwickelt.

## NUTZEN DER INNOVATION

Hochwertige Luftaufnahmen, die die Inspektion von Stromleitungen erleichtern

**ABB. 38 Vorgegebenes Flugmuster zur Mastinspektion**



Amprion setzt Drohnen für verschiedene Anwendungsfälle ein und integriert sie mehr und mehr in bestehende Arbeitsprozesse. Das Gesamtsystem aus Drohne, Fernsteuerung, Sensorik und Kameraequipment wird als Unmanned Aircraft Systems (UAS) bezeichnet. Zurzeit sind unternehmensweit etwa 25 UAS mit qualifizierten Pilot\*innen im Einsatz. UAS kommen unter anderem zum Einsatz bei

- der Inspektion von Masten oder Leitungen
- der Überprüfung der Trassenräume
- der Bauüberwachung/-kontrolle
- Foto-/Filmdokumentation
- der Thermografie
- Vermessungen.

Beispielhaft sei die Inspektion des Höchstspannungsnetzes erläutert: Dank der UAS können einzelne Instandhaltungskomponenten detaillierter als in bestehenden Inspektionsverfahren begutachtet werden, ohne dass Stromkreise vom Netz genommen werden müssen. Durch den höheren Detailgrad steigt die Netzverfügbarkeit und gleichzeitig wird die Arbeitssicherheit erhöht. Gerade für Leitungsabschnitte in unwegsamem Gelände ist die UAS ein gut geeignetes Werkzeug für punktuelle Aufnahmen.

Am Markt gibt es eine Vielzahl von Drohnenmodellen mit verschiedenen Kameraequipments und unterschiedlicher Qualität. Die Modelle werden fortlaufend weiterentwickelt und verbessert. Amprion beobachtet den Markt und analysiert, inwiefern die Fortschritte in der Drohntechnologie neue Anwendungsfelder eröffnen. Vor einer Anschaffung testet Amprion neue Drohnenmodelle.

UAS unterliegen zahlreichen gesetzlichen Anforderungen, welche die Sicherheit der Produkte und deren Anwendung gewährleisten sollen. Darüber hinaus bedarf es verschiedener Softwarelösungen, um die aufgenommenen Daten zu erfassen, zu integrieren, zu speichern, auszuwerten und zu visualisieren. Sie müssen stetig weiterentwickelt werden, wobei zukünftig auch künstliche Intelligenz (KI) angewendet werden kann. Um UAS und die erfassten Daten zweckmäßig bei Amprion nutzen zu können, müssen die Technologien sicher und ISMS-konform (ISMS = Information Security Management System) sowie wirtschaftlich und einfach anwendbar sein. In Zukunft wird Amprion voraussichtlich deutlich vermehrt UAS einsetzen.

Momentan erfolgt bei Amprion eine Validierung zur automatisierten Befliegung. Dabei fliegt die Drohne nach einem vorgegebenen Flugmuster die Masten ab und erfasst einzelne Mastbauteile

[SIEHE ABB. 38].

# SATELLITENGESTÜTZTES TRASSENMANAGEMENT

## NUTZEN DER INNOVATION

Optimierung des Trassenmanagements durch Nutzung von Satellitenbildern



**ABB. 39** OBEN UAS werden bei Amprion für unterschiedlichste Arbeitsfelder eingesetzt  
**ABB. 40** LINKS Zurzeit gibt es bei Amprion etwa 50 qualifizierte Pilot\*innen für UAS



**ABB. 41** Inspektion eines 15 Meter tiefen Kabelschachtes mit einer Indoor-Käfigdrohne

Freileitungstrassen verlaufen durch den öffentlichen Raum. Daher muss Amprion regelmäßig kontrollieren, ob sie in einwandfreiem Zustand und vor allem verkehrssicher sind. Dafür wird auch geprüft, ob die stromführenden Leiterseile weit genug von der Vegetation unter der Freileitung entfernt sind.

Neben der rein visuellen Inspektion führt Amprion die Abstandsermittlung per Laserscanning durch. Das ermöglicht es, Abstände zentimetergenau zu ermitteln. Der Aufwand ist allerdings bedeutend. Daher suchen wir effizientere Möglichkeiten zur Abstandsermittlung. Eine Option ist es, verfügbare Satellitenbilder auszuwerten.

Im Rahmen von zwei Machbarkeitsstudien zum satellitengestützten Trassenmanagement arbeitet Amprion daran, die Effizienz und Genauigkeit dieser neuen Option zu untersuchen. Die Studien sollen bisherige Erfahrungen auswerten sowie mittelfristig verschiedene Anbieter auf europäischer Ebene im Rahmen einer Kooperation mit anderen europäischen Übertragungsnetzbetreibern und der European Space Agency (ESA) vergleichen.

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudien werden für ausgewählte Trassenabschnitte aktuelle Satellitenbilder ausgewertet und mit den geografischen Leitungsdaten verglichen. Hieraus lassen sich sowohl Veränderungen im Schutzstreifen der Leitung als auch Abstände zwischen den Leiterseilen und der Vegetation ermitteln.

In beiden Projekten werden innovative Verfahren zur automatischen Bildanalyse angewendet. Hierbei wird die Messgenauigkeit in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Verfahren zur Bildanalyse sowie den unterschiedlichen Auflösungen der Satellitenbilder bewertet. Als Referenz dienen die Ergebnisse des Laserscannings.

Zu den ersten Ergebnissen der Studien zählt, dass sich Veränderungen im Schutzstreifen wie Baustellen häufiger erfassen lassen, ebenso Bilder schwer zugänglicher Standorte. Die Abstände zwischen Vegetation und Leiterseilen lassen sich allerdings weniger genau und zuverlässig ermitteln. Gleichwohl bieten sie die Möglichkeit, Veränderungen im Schutzstreifen zu überprüfen. Nach dem Motto „Der Appetit kommt beim Essen“ sind bei der Durchführung der Studien zudem Ideen entstanden, die Satellitenbilder auch anders zu nutzen, um Veränderungen über den Kabeltrassen zu erfassen oder eine grobe Klassifizierung der Flächen im Schutzstreifen vorzunehmen.



ABB 42 Freileitungstrasse mit Schutzstreifen

# DIGITALISIERUNG VON UNTERNEHMENS-PROZESSEN



5.1	Cloud-Infrastruktur für Innovationen	77
5.2	„Digitaler Zwilling“	78
5.3	Big-Data-Plattform	79
5.4	Künstliche Intelligenz	81
5.5	Neue (digitale) Arbeitsweisen	86
5.6	Digitale Stakeholderkommunikation	88

Amprion nutzt die Potenziale zur Digitalisierung von Arbeits- und Kommunikationsprozessen und hat unter anderem ein innovatives Datenmanagement eingeführt. Indem wir Daten optimal bereitstellen, Simulationen verbessern und Verfahren einsetzen, die auf künstlicher Intelligenz basieren, können wir schnellere und nachhaltigere Entscheidungen treffen.

# CLOUD-INFRASTRUKTUR FÜR INNOVATIONEN

## NUTZEN DER INNOVATION

Bereitstellung eines sicheren und flexiblen IT-Umfelds für die Innovation des Energiesystems

Damit Innovation nicht an der Technik scheitert, braucht es eine flexible, schnelle und einfach verfügbare sowie leistungsfähige IT-Infrastruktur. Amprion hat sich entschieden, mit einer Single-Cloud-Strategie solch einen Unterbau für digitale Innovation zu setzen. Die Vorteile dieser Strategie werden im Folgenden anhand von Fokusfeldern erläutert.

Die in digitalen Prozessen erzeugte Datenmenge zu speichern und nutzbar zu machen, ist eine große Herausforderung – besonders in einem schnelllebigen Technologieumfeld und mit Fragestellungen, die sich fortlaufend verändern. Daher implementiert Amprion in der Cloud eine dynamische Datenanalyseplattform mit einem zentral organisierten Datenbestand, dem „Amprion Data Lake“ [\[→ BIG-DATA-PLATTFORM, SIEHE SEITE 79\]](#). Hierbei setzen wir auf die ausgefeilte Kombination von Datenanalysemöglichkeiten und Datenmanagement sowie die automatisierte Anbindung diverser Datenquellen. Zukünftig sollen auch weitere Workloads in dieser Datenplattform abgebildet werden. Dazu gehört etwa eine in wenigen Stunden verfügbare Sandbox-Umgebung. In dieser können Fachbereiche Guthaben aufladen, um Infrastruktur selbst bereitzustellen. Somit können IT-Lösungen und -Produkte effizient und ressourcenschonend evaluiert werden: Infrastruktur für Innovation – so einfach wie Prepaidtelefonie.

Die zunehmende Prozessdigitalisierung bedeutet, dass die Zahl der Datenaustausche und Schnittstellen zwischen Amprion und Dienstleistern rasant zunimmt. Um einen kontrollierten Datenfluss zu ermöglichen, evaluiert Amprion ein API-Management. Auf diese Weise werden Schnittstellen für den Zugriff auf Systeme im Rechenzentrum und der Cloud auch aus dem Internet sicher und flexibel bereitgestellt. So können unter anderem Apps auf Endgeräten von Wartungsdienstleistern automatisiert Rückmeldung geben – ohne den aufwändigen Aufbau einer internen Umgebung oder die Änderung der eigenen Software. Dies ermöglicht neue Innovationen an definierten digitalen Schnittstellen und schlankere Betriebsprozesse.

Die Anforderungen an die Netzentwicklungsplanungen werden immer anspruchsvoller und dynamischer. Daher muss dafür gesorgt werden, dass die bestehende Rechenleistung bei Bedarf kurzfristig und für einen begrenzten Zeitraum erweitert werden kann. Dies wird mit einer Skalierung über die Cloud realisiert. So können bei Bedarf hochleistungsfähige virtuelle Maschinen (VM) genutzt werden, die weit mehr als 100 leistungsstarke Rechenkerne und mehrere Terabyte Arbeitsspeicher zur Verfügung stellen und die nur im Moment der Nutzung Kosten verursachen. Hierdurch können Simulationen und Berechnungen schnell durchgeführt und in Folgeprozessen verwendet werden.

Eine flexible und leistungsfähige Infrastruktur für Innovationen in den genannten Fokusfeldern allein wird unseren Anforderungen allerdings nicht gerecht. Als Übertragungsnetzbetreiber trägt Amprion die Verantwortung für die Stabilität des Stromsystems. Deshalb haben die Betriebsstabilität unserer IT und die Sicherheit unserer Informationen einen übergeordneten Stellenwert. Vor dem Einsatz der Cloud haben wir umfangreiche Sicherheitskonzepte entwickelt – von A wie Access Control bis Z wie Zero Trust. Teams für Innovationen finden sich zum Beispiel teils aus ganz Europa zusammen und benutzen ganz unterschiedliche IT-Systeme. Trotzdem muss ein Zugriff schnell und sicher möglich sein. Dafür werden die Identitäten der Gäste separiert von lokalen On-Premise-Umgebungen verwaltet und Zugriffe von diesen externen Gastidentitäten umfänglich abgesichert – mit risikobasierten Zugriffsregeln und Multi-Faktor-Authentifizierung. Ergänzt werden diese Sicherheitsmaßnahmen durch KI-gestützte Anomalieerkennung und eine strenge Separierung der einzelnen Workloads. Somit senken wir das Risiko eines Lateral Movements – des Eindringens von Angreifern von unseren flexiblen Innovationsumgebungen in tatsächlich produktionsrelevante IT-Systeme –, was wiederum größere Freiheiten in den Innovationsumgebungen ermöglicht.

Auf diese Weise schaffen wir ein sicheres und flexibles IT-Umfeld für die Innovation des Energiesystems der Zukunft.

# „DIGITALER ZWILLING“

## NUTZEN DER INNOVATION

Effizienter Umgang mit Daten, um die enormen Herausforderungen des Netzausbaus und Systembetriebs weiterhin sicher bewältigen zu können

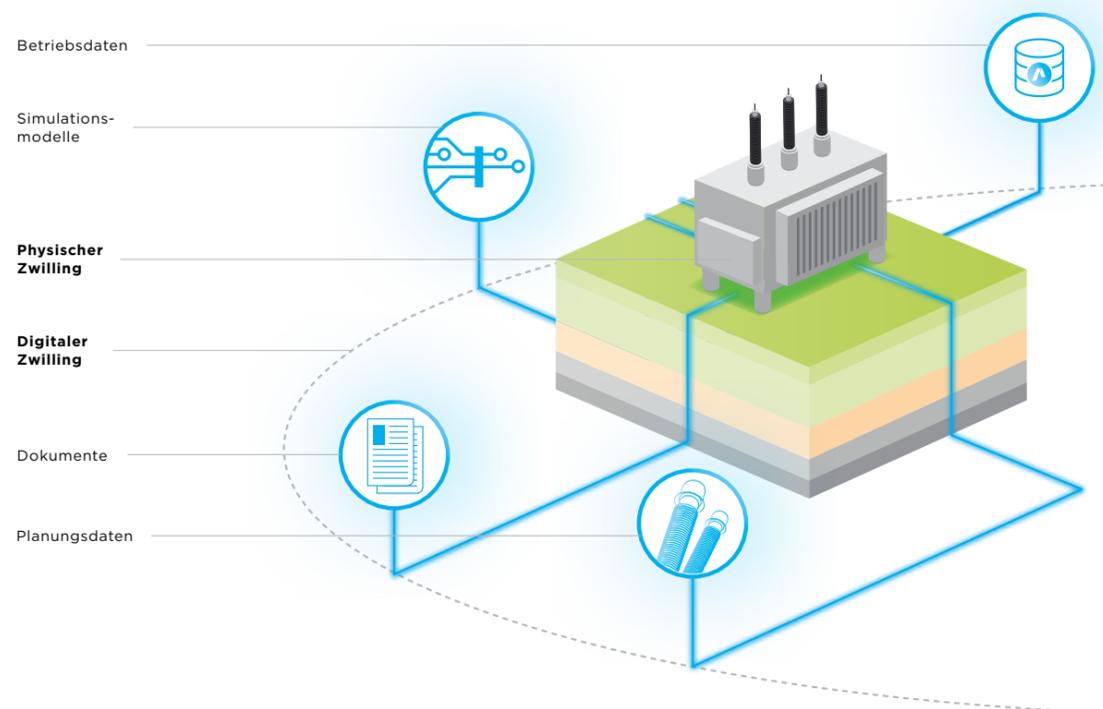


ABB. 43 Digitaler Zwilling zur gemeinsamen und effizienten Nutzung unterschiedlichster Daten

Als Übertragungsnetzbetreiber mit europaweiten Koordinierungsaufgaben und großer Verantwortung auf dem Gebiet der netzbetriebsrelevanten Datenverarbeitung will Amprion die Aufgaben im Energiesystem effizient und sicher ausführen. Durch die steigende Anzahl an Daten und die zunehmende Komplexität der Geschäftsprozesse ist ein effizienterer Umgang mit digitalen Informationen zu Assets des Übertragungsnetzes – also Anlagen und Leitungen – notwendig.

Die allgemeine Definition eines digitalen Zwillings beschreibt ein branchenübergreifendes und allgemeingültiges Konzept, bei dem die Kombination von verschiedenen Datenwelten im Fokus steht, um neue Informationen zu generieren.

Für Amprion bedeutet dies die Kombination aus elektrotechnischen, bautechnischen und betriebswirtschaftlichen Daten. Ziel hierbei ist es, sämtliche verfügbaren Daten miteinander zu verknüpfen. Es sollen netzplanerische, projektbezogene sowie betriebliche Aspekte zusammengeführt werden. Dadurch könnten die in verschiedenen Systemen abgelegten Daten gemeinsam effizient genutzt werden. Die Grundlage dafür ist eine eindeutige Identifizierung (ID) von Assets innerhalb des Unternehmens und zukünftig sogar darüber hinaus. Dadurch

kann aus jedem angeschlossenen System immer auf das gleiche Objekt verwiesen werden [SIEHE ABB. 43].

Amprion realisiert den digitalen Zwilling bereits heute in unterschiedlichen Projekten. In einem Pilotprojekt wird zum Beispiel die Verknüpfung digitaler Abbilder von realen Assets an der Schnittstelle zwischen Planung/Bau und dem Betrieb erprobt. Die digitale Erfassung und Verknüpfung aller anfallenden Informationen zu einem Asset entlang seines Lebenszyklus – Planung, Errichtung und Betrieb bis Demontage – liefert einen Mehrwert, insbesondere im Hinblick auf die Wiederverwertung und die eindeutige Herkunft von Daten sowie die kontinuierliche Sicherstellung aktueller Datenstände.

Hierdurch können künftig stets aktuelle Netzdatensätze zur Koordinierung des Netzbetriebs mit anderen Netzbetreibern generiert werden, ohne aufwändige und manuelle Datenpflege betreiben zu müssen. Analysen lassen sich deutlich beschleunigen, wenn notwendige Eingangsdaten stets aktuell und ohne großen Beschaffungsaufwand zur Verfügung stehen. Die Visualisierung von Daten profitiert vom digitalen Zwilling und erlaubt so eine einfache Navigation zu einem gesuchten Datensatz.

# BIG-DATA-PLATTFORM

## NUTZEN DER INNOVATION

Unterstützung der fortschreitenden Digitalisierung von Arbeitsmethoden

Neben dem hohen Anpassungsbedarf des Übertragungsnetzes und dem stetig komplexer werdenden Systembetrieb steigen auch die Anforderungen der Stakeholder\*innen an Amprion. Um der zunehmenden Dynamik gerecht zu werden, bedarf es schnellerer Analysen und Entscheidungen auf diversen internen und externen Ebenen bei gleichzeitig sehr hohen Qualitätsanforderungen. Weiterhin müssen bei eingeschränkter zur Verfügung stehenden Ressourcen die Betriebs- und Planungsprozesse durch neue Erkenntnisse unterstützt und optimiert werden. Hierzu ist eine unternehmensweite effiziente Verfügbarkeit von Daten und Datenanalysemöglichkeiten nötig.

Daten aus dem Betrieb und der Bewirtschaftung des Netzes stellen schon seit langem die Grundlage für Analysen und Prognosen dar. Historisch bedingt werden die Daten dabei häufig unter hohem manuellen Aufwand in die Systeme kopiert, mit denen die Analysen und Prognosen durchgeführt werden. Das heißt, die jeweils benötigten Daten sind in diesem Moment zwar für den einzelnen Anwendungsfall gut verfügbar, sobald andere Prozesse oder Prozessschritte jedoch mit den Daten versorgt oder die Daten aktualisiert werden müssen, wird es schwieriger. Gleichzeitig bestehen neben den systemischen Barrieren unterschiedlichste Sicherheitsanforderungen an die Datensätze, was die Bereitstellung von Daten erheblich verzögert und ineffiziente Redundanzen in der Datenhaltung begünstigt.

Damit die Daten erfolgreich zwischen den unterschiedlichen Unternehmensprozessen bei klaren Rollen und Verantwortlichkeiten ausgetauscht werden können, hat sich Amprion dazu entschlossen, unternehmensweit eine Datenanalyse-Plattform aufzusetzen, die den Anforderungen eines Übertragungsnetzbetreibers genügt.

Dabei verfolgt Amprion einen hybriden Ansatz: Für sämtliche Daten, die außerhalb der kritischen Prozesse in der Systemführung entstehen und benötigt werden, wird in der Microsoft Azure Cloud Plattform ein „Amprion Data Lake“ (ADLA) als zentrale Datenhaltung geschaffen. Darüber können die cloudbasierten Analysetools sowie Data-Self-Services genutzt und versorgt werden. Da Daten für einige Prozesse in der Planung und Instandhaltung des Netzes aus dem Systembetrieb benötigt werden, wird der Data Lake um eine Komponente der Analyseplattform für die kritischen Prozessdaten der Systemführung ergänzt (Projekt „amAise“). Diese Komponente ermöglicht es auch, den Data Lake mit Daten aus der Systemführung zu versorgen. Neben der primären Zielsetzung, die Daten schneller und einfacher

verfügbar zu machen, wird gleichzeitig dem steigenden Bedarf an Datenanalysen und dem Einsatz von KI-Ansätzen in der Systemführung Rechnung getragen, indem KI-Modelle außerhalb der kritischen Systemführungsbereiche trainiert werden [→ **KÜNSTLICHE INTELLIGENZ, SIEHE SEITE 81**]. Trainierte Modelle benötigen in der Systemführung anschließend erheblich weniger Ressourcen.

Die Data-Plattform macht es möglich, unterschiedlichste Datensilos zu integrieren, ineffiziente Redundanzen in der Datenhaltung abzubauen und damit die Datenqualität perspektivisch zu steigern. Darüber hinaus wird eine fundierte Sicht auf die Amprion-Datenwelt ermöglicht. Zudem kann die Plattform verschiedene Vorhaben unterstützen, zum Beispiel einen digitalen Zwilling unseres Netzes erschaffen [→ **„DIGITALER ZWILLING“, SIEHE SEITE 78**].

#### AMPRION DATA LAKE

Kern des ADLA-Projekts ist, neben der sicheren Bereitstellung der Cloud-Plattform einen sogenannten Data Lake einzurichten. In einen Data Lake können unterschiedlichste Rohdaten in verschiedenen Formaten eingespeist werden. Auf Basis der Rohdaten werden später in automatisierten Verarbeitungsschritten die Daten für verschiedene Anwendungsfälle aufbereitet und bereitgestellt. Datenquellen werden also nachhaltig und automatisiert angebunden. Gleichzeitig werden Rohdaten nach der Verarbeitung nicht gelöscht und können damit jederzeit für zukünftige Anforderungen schnell neu aufbereitet werden. Künftige Datenanalyse-Vorhaben bei Amprion werden vorrangig in ADLA umgesetzt, wodurch der Zeitaufwand der Vorverarbeitung von Daten erheblich reduziert werden soll. Expert\*innen und Datenanalyst\*innen können sich somit auf die eigentlichen Analysen fokussieren, während die Aufbereitung zentral erfolgt.



#### PROJEKT „AMAISE“

Mit diesem Projekt verfolgt Amprion einen integrativen Ansatz, um Daten bereitzustellen. Zudem streben wir eine gemeinsame Nutzung von Analysetools für Datenanalyst\*innen innerhalb und außerhalb der Systemführung an – beispielsweise für Reporting-, Advanced-Analytics- oder Machine-Learning-Zwecke. Um Systemführungsprozesse durch eingesetzte KI zu unterstützen, wurden zunächst datengetriebene Use-Cases aus den Fachabteilungen identifiziert sowie die erforderlichen Daten und Datenflüsse ermittelt. Darauf basierend werden künftig ein passendes Architekturkonzept und die benötigte Technologie ausgewählt. Dabei stellen die hohen Sicherheitsanforderungen im Bereich der Systemführungsprozesse eine große Herausforderung dar.

# KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

## NUTZEN DER INNOVATION

Optimierungen des Betriebs, der Planung und Bewirtschaftung des Übertragungsnetzes

Eine Vielzahl von Prognosen und Analysen wird bei Amprion durchgeführt, um den sicheren Betrieb, die Planung und die Bewirtschaftung des Übertragungsnetzes zu ermöglichen. Aufgrund hoher Kapitalbindung und langer Umsetzungszeiträume analysieren wir Änderungen des Systems, die zum Beispiel durch den Netzausbau erfolgen, im Vorfeld systematisch. Im Betrieb wird Amprion den hohen Anforderungen an die System-sicherheit durch kurz- und mittelfristige Prognosen des Systemverhaltens gerecht. Gleichzeitig entstehen Daten über das System und sein Verhalten, indem Messwerte und Meldungen im Systembetrieb und der Bewirtschaftung erfasst werden.

Mit zunehmender Komplexität in Betrieb, Planung und Bewirtschaftung des Übertragungsnetzes steigt im Vergleich zur bisherigen Praxis der Bedarf an umfassenderen und weiterführenderen Analysen und Prognosen. So müssen beispielsweise bei hohen Auslastungen des Bestandsnetzes Möglichkeiten und Zeitfenster zur Freischaltung identifiziert werden, damit Instandhaltungen oder Um- und Ausbauprojekte im laufenden Betrieb umgesetzt werden können.

Moderne Ansätze der Data Science bedienen sich Algorithmen und selbstlernenden Verfahren, die häufig unter dem Begriff der künstlichen Intelligenz (KI) zusammengefasst werden. Sie alle setzen sich systematisch mit vorhandenen Daten auseinander, um – basierend auf Szenarien – das Systemverhalten voraussagen und somit Entscheidungen unterstützen zu können. Der Einsatz von KI bei Amprion ist daher eine immer wichtiger werdende Ergänzung zu dem Expertenwissen und den etablierten Analyse- und Prognoseansätzen. Die auf KI basierende Auswertung von sehr großen Datenmengen ermöglicht die Identifikation von Mustern im Systemverhalten. Neben den Ansätzen, die in den eigenen Rechenzentren umgesetzt werden, ist es durch die bewusste Entscheidung für den Einsatz von Cloud-Technologien möglich, KI-Ansätze schnell und skalierbar zu erproben.

Während bei großen Internet-Technologieunternehmen das Verhalten der User\*innen mithilfe von KI vorhergesagt wird und daraus Kaufempfehlungen abgeleitet werden, setzt Amprion KI hauptsächlich ein, um den Systembetrieb zu optimieren und die Kosten bei Redispatch und Systemdienstleistungen zu senken sowie maßgeschneiderte Bewirtschaftungsmodelle der Netzbetriebsmittel einsetzen zu können. Dies alles dient letztlich einem nachhaltigen und ressourcenschonenden Betrieb, während gleichzeitig die hohen Erwartungen an die Verfügbarkeit und Systemsicherheit des Übertragungsnetzes erfüllt werden.

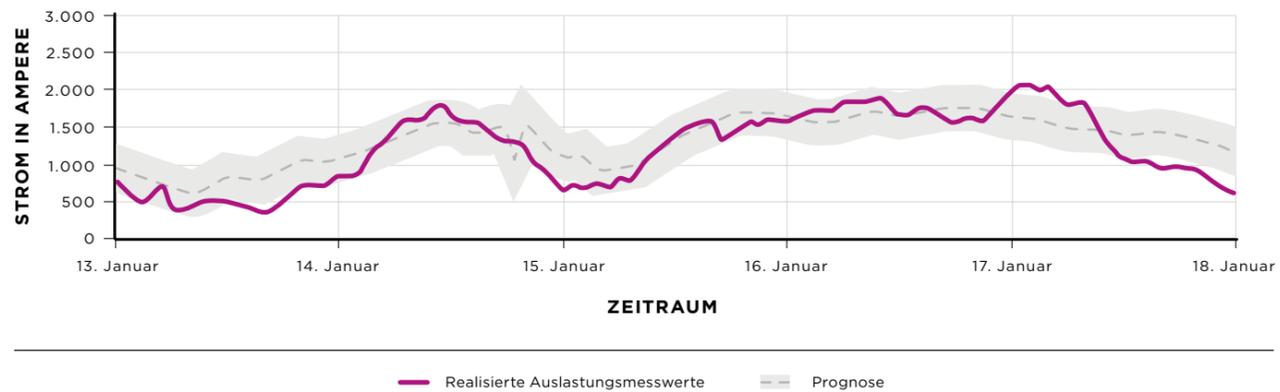


ABB. 44 Vergleich Prognose und realisierte Auslastungsmesswerte Emslandstromkreise

#### PROGNOSE ZUR STROMKREISAUSLASTUNG

Um eine effiziente Systemauslastung zu ermöglichen, legt Amprion die entsprechenden Grenzwerte dynamisch fest. Prognosen zur erwarteten Auslastung der Stromkreise ermöglichen es, Grenzwerte zu ermitteln sowie Reparatur- und Instandhaltungsmaßnahmen zu planen. Zur Erstellung der Prognose wurde im Projekt Blackbird ein KI-Ansatz gewählt, der eine Vielzahl von relevanten Eingangsdaten auswertet und anschließend eine mittelfristige Prognose zur Verfügung stellt. Neben Wetterdaten werden in den eingesetzten Algorithmen sowohl Marktdaten als auch Messwerte, Meldungen und die Schaltzustände im Übertragungsnetz der Vergangenheit berücksichtigt. Die derzeit für die Prognose herangezogenen etwa 2,5 Milliarden Datensätze werden in einer cloudbasierten Applikation verarbeitet. Dies ermöglicht eine zielgenauere Prognose des betrachteten Zeitraums, da auch saisonal stark unterschiedliche Auslastungsprofile berücksichtigt werden können. Die Abbildung 44 zeigt den Vergleich der durch Blackbird erstellten Prognose und der realisierten Auslastungsmesswerte auf den Emslandstromkreisen von Amprion.

#### ALGO-TRADING

Amprion hat als Übertragungsnetzbetreiber auch die Rolle eines Stromhändlers – mit gesetzlichem Auftrag. Seit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ist es unter anderem Aufgabe der deutschen ÜNB, den Strom aus erneuerbaren Energien, der nicht direktvermarktet wird, an der Strombörse zu vermarkten. Zusätzlich bewirtschaftet Amprion untertägig auch die eigenen Portfolien, die beispielsweise zur Deckung der anfallenden Netzverluste oder zur Wahrung der Systemstabilität dienen. Neben der kontinuierlichen Verbesserung der hierfür genutzten Leistungsprognosen setzt Amprion auf den Einsatz von Auto-Tradern, um den Stromhandel automatisiert und optimiert zu betreiben.

Damit die Herausforderungen volatiler Wind- und Solar-Einspeiseprognosen – verbunden mit sich schnell wechselnden Strommarktlagen – bewältigt werden können, entwickelt Amprion aktuell ein innovatives Algo-Trading als Weiterentwicklung der Auto-Trader. Anders als bei den Auto-Tradern sollen somit auf Basis einer breiten Datengrundlage die Prognose- und Marktänderungen dauerhaft analysiert und daraus eine dynamische und dem Marktgeschehen angepasste Handelsstrategie in Echtzeit abgeleitet werden. Somit soll zukünftig eine Echtzeitorientierung am aktuellen Energie-marktgeschehen automatisiert gewährleistet sein.

#### PROGNOSEN ZU SPANNUNGSEINBRÜCHEN

Seit dem Winter 2017/2018 werden im deutschen Übertragungsnetz immer wieder kurzzeitige deutliche Spannungseinbrüche im Minutenbereich beobachtet [SIEHE ABB. 45].

Die Spannungseinbrüche sind in der Regel stationsübergreifend und treten hauptsächlich in zwei geografischen Regionen (Nord und Süd) auf.

Da solche Spannungseinbrüche die Einhaltung des Betriebsspannungsbandes gefährden können, wurde ein Prognoseprozess entwickelt, mit dessen Hilfe sich das Auftreten dieser Spannungseinbrüche mit angemessener Vorlaufzeit (Day Ahead) prognostizieren lässt. Der Prozess ist seit Oktober 2019 Teil der Betriebsplanungsprozesse der vier Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland.

Die bisherigen Betriebsplanungsprozesse fokussieren sich auf die Vorschau von Wirkleistungslastflüssen und etwaigen Stromengpässen im Stundenraster. Für die Prognose von Vorgängen im Minutenbereich sind neue Prozessschritte und verbesserte Datenmodelle erforderlich.

Aus diesem Grund wurde für die Entwicklung des Rechenkerns des Prognosetools auf das sogenannte Random-Forest-Klassifikationsverfahren aus dem Bereich Machine Learning zurückgegriffen. Mit diesem Klassifikationsverfahren lässt sich auf Basis verschiedener Eingangsdaten eine Indikation für das Auftreten eines Spannungseinbruchs ableiten.

Sowohl die Betreuung als auch die regelmäßige Weiterentwicklung des Prognosetools wird federführend von Amprion übernommen.

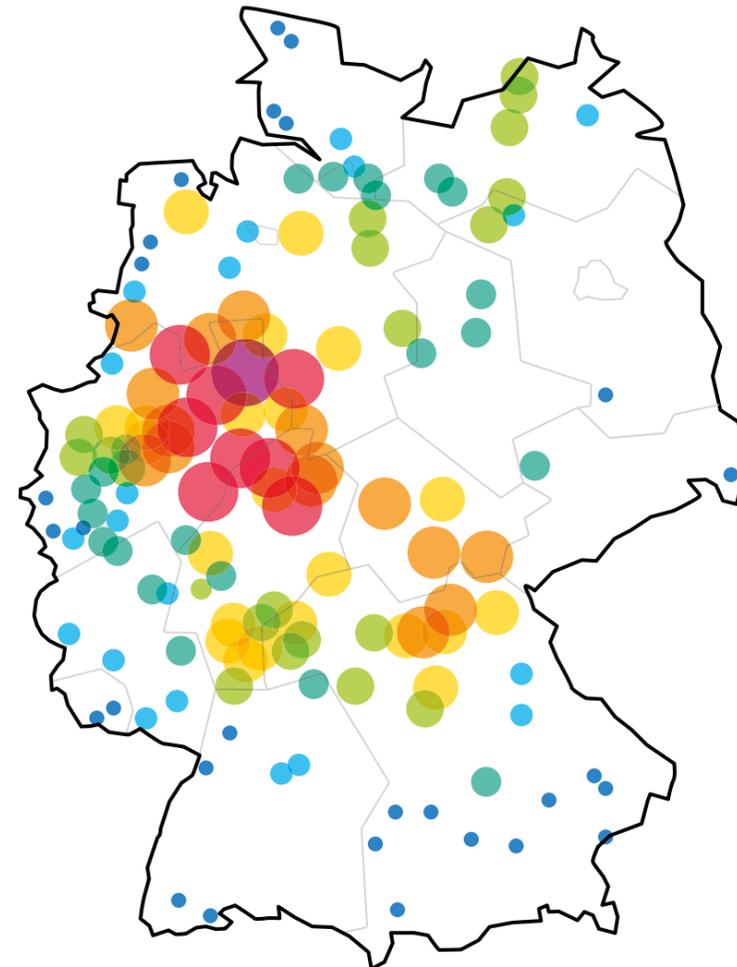


ABB. 45 Spannungseinbruch vom 29. Januar 2018 um 6 Uhr morgens

Darstellung der regionalen Ausbreitung des Spannungseinbruchs (oben) und des Spannungsverlaufs in einer Station (unten).

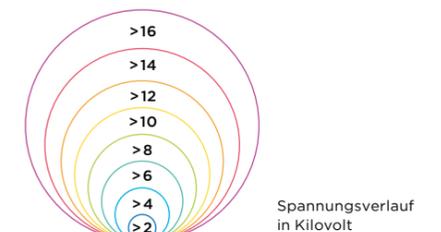




ABB. 46 OBEN Erneuerbare-Energien-Vermarktung im Frontoffice  
ABB. 47 RECHTS Windenergieanlagen



#### PROGNOSEN ZUR EINSPEISUNG ERNEUERBARER ENERGIEN

Prognosen bilden eine der wichtigsten Grundlagen für die erfolgreiche Integration der erneuerbaren Energien in das Stromnetz und werden dabei für unterschiedlichste Zwecke verwendet. Für einen sicheren Netzbetrieb ist Amprion als Übertragungsnetzbetreiber auf eine hohe Prognosequalität und eine sehr hohe Prognoseverfügbarkeit angewiesen. Daher nutzt Amprion generell für alle Einsatzzwecke Prognosen von unterschiedlichen Datenquellen und unterschiedlichen Basismodellen. Die Prognosen werden unter anderem für die Vermarktung der erneuerbaren Energien durch den Übertragungsnetzbetreiber, für die Betriebsplanungsprozesse sowie für das Einspeisemanagement im Redispatch-2.0-Prozess verwendet.

Im Rahmen der Einführung des Redispatch 2.0 wurde eine Detaillierung und Regionalisierung der bisher bereits bei Amprion im Einsatz befindlichen Prognosemodule erforderlich. Einhergehend mit der Regionalisierung musste neuartige KI eingesetzt werden, um so die Prognosequalität zu erhöhen, da die bisherigen Verfahren eine Optimierung auf Ebene des Amprion-Übertragungsnetzes als Ziel hatten.

In den neu entwickelten Prognoseverfahren werden verschiedene Methoden der künstlichen Intelligenz eingesetzt, um eine möglichst hohe Prognosegüte für jedes einzelne Prognoseobjekt bei unterschiedlichen Eingangsdaten-Szenarien zu erzielen. Hierdurch ist Amprion eigenständig und unabhängig von externen Prognoselieferanten in der Lage, Prognosen für die Mehrzahl aller in ihrer Regelzone redispatch-relevanten Windenergie- und PV-Anlagen mit verschiedenen Wettermodellen anzufertigen. Die Prognosemodule erstellen für ca. 1.400 Windenergieanlagen und etwa 15.000 Solarparks Prognosen mit Vorhersagehorizonten von 15 Minuten bis vier Tagen in die Zukunft. Diese werden anschließend mittels statistischen Verfahren zusammengeführt und mit weiteren KI-Verfahren kombiniert, sodass für jede Aggregationsebene eine optimierte Prognose vorliegt.

# NEUE (DIGITALE) ARBEITSWEISEN

## NUTZEN DER INNOVATION

Verbesserung der Zusammenarbeit und Effizienzsteigerung

Aus der Digitalisierung der täglichen Zusammenarbeit und der Verbesserung der Arbeitsmethoden ergibt sich für Unternehmen ein hohes Effizienzpotenzial. Kleine Verbesserungen können sich auf einen Großteil der Beschäftigten positiv auswirken und damit einen erheblichen Mehrwert schaffen. Deshalb ist es für uns bei Amprion wichtig, mit innovativen Initiativen den Status quo kontinuierlich zu hinterfragen, zu optimieren und zu digitalisieren. Damit schaffen wir mehr Freiraum für unsere Kernaufgaben, stärken die Vernetzung im Unternehmen und können flexibel auf zukünftige Anforderungen reagieren. Im Zuge der Coronapandemie hat dieser Ansatz geholfen, schnell auf eine flexiblere Arbeitsweise umzustellen, während wir gleichzeitig eine effiziente Kommunikation sicherstellen konnten.

Damit eine systematische Innovationsentwicklung im Themenfeld der (digitalen) Arbeitsweise erfolgen kann, haben wir als Rahmen eine nutzerzentrierte Ausrichtung entwickelt [SIEHE ABB. 48]. Darin wurden verschiedene Anwendungsfälle und Eigenschaften in den Fokus genommen, die nahezu alle Beschäftigten betreffen und deshalb für die Entwicklung den größten Mehrwert versprechen.

Neuerungen werden dabei umsichtig, Schritt für Schritt und mit einer bestmöglichen Unterstützung für alle Beschäftigten eingeführt, um eine breite Akzeptanz der Veränderungen zu erzielen.

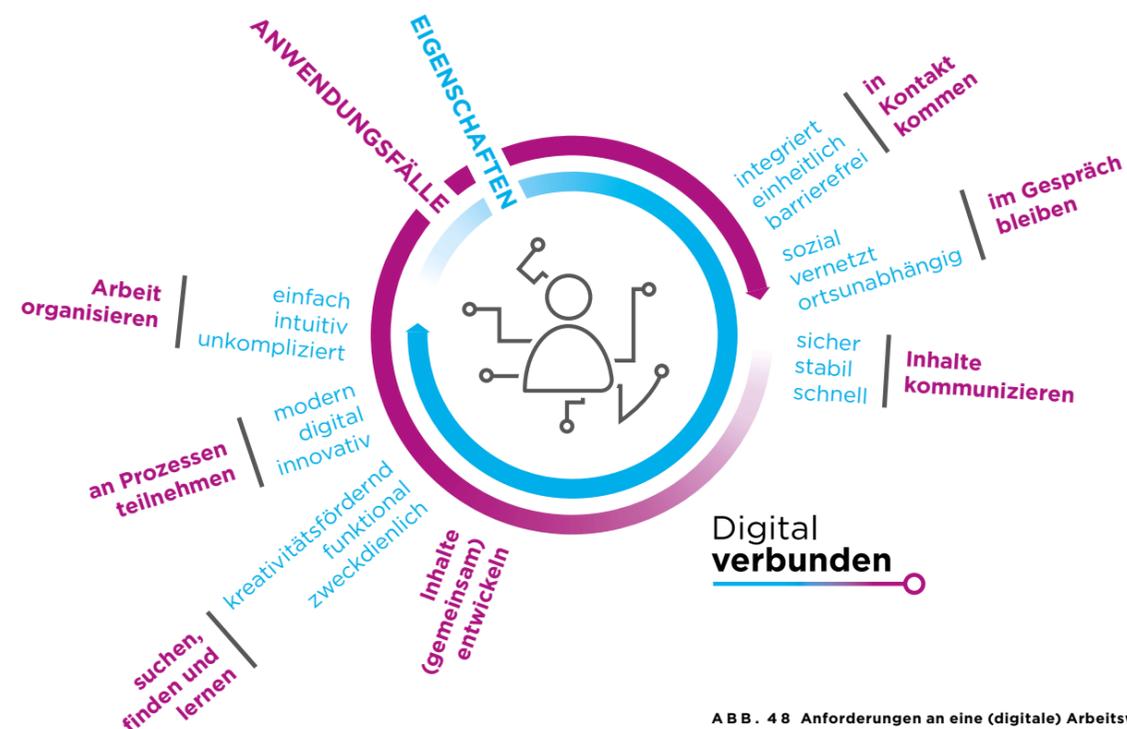


ABB. 48 Anforderungen an eine (digitale) Arbeitsweise

Im Folgenden werden drei ausgewählte Initiativen vorgestellt, welche die Zusammenarbeit bereits verbessert haben und auch in Zukunft weiter verbessern werden.

Neben zwei Digitalisierungsinitiativen, der Einführung von Microsoft 365 und einer aktiven Prozessdigitalisierung in allen Geschäftsbereichen, konnte auch durch angepasste Prozessabläufe beispielsweise nach der SCRUM-Methodik zur agilen Zusammenarbeit eine Optimierung erzielt werden.

### MICROSOFT 365: ZUSAMMENARBEIT INTEGRIERT UND EINFACH

Vor zwei Jahren hat Amprion beschlossen, Microsoft 365 als strategische Plattform für die Zusammenarbeit einzuführen. Insbesondere der Einsatz von Microsoft Teams und SharePoint Online als entscheidende Bausteine der Plattform haben die Arbeitsweise bei Amprion stellenweise neu geprägt. Dabei bildet nicht die Technik den innovativen Charakter, sondern die veränderte Arbeitsweise von allen Beschäftigten. Das gilt einerseits für kleinere Änderungen wie die Nutzung von Chats oder die Umstellung von E-Mail-Anhängen hin zu Dokumentenlinks, andererseits für weitreichendere Änderungen wie die Nutzung von Teamsräumen zur zielgerichteten Kommunikation.

Microsoft 365 und die Auswirkungen auf die Arbeitsweise:

- **Informationstransparenz und Wissenstransfer durch Teamsräume steigern:** mit klaren Kommunikationsstrukturen, auch beim Wechsel von Mitarbeiter\*innen und fachbereichsübergreifend
- **Offen für Veränderungen sein und eine positive Lern- und Fehlerkultur fördern:** die Transparenz für einen gemeinsamen Lernprozess und eine einfachere Zusammenarbeit nutzen
- **Vertrauen und Eigenständigkeit weiter stärken:** viele Werkzeuge aus dem Microsoft-365-Lösungsbaukasten basieren auf gegenseitigem Vertrauen
- **Freiräume gezielt nutzen - individuell, in den Organisationseinheiten und als Unternehmen:** Teams bietet viele Gestaltungsfreiräume, die richtig genutzt einen großen Mehrwert bieten
- **Redundanzen vermeiden und Klarheit schaffen:** Teamsräume gegenüber E-Mails bevorzugen, Ablagen klar definieren, Meetings reduzieren und Informationen über Teamsräume teilen

### AGILES ARBEITEN MIT SCRUM

Agiles Arbeiten ist eine innovative Arbeitsmethode, die mithilfe des Rahmenwerks SCRUM in ausgewählten, zeitlich befristeten Projekten bei Amprion eingesetzt wurde, um Ziele effizienter zu erreichen. Das agile Arbeiten an sich eignet sich besonders für kleine Teams mit vorgegebenen Zielen und einem begrenzten Zeitrahmen. Dabei werden in kurzen Sprints Teilergebnisse produziert, die sich am Ende des Projekts zum Gesamtergebnis zusammenfügen. Es werden feste „Events“ in jedem Sprint durchgeführt, um die Zusammenarbeit im Team sowie die Arbeitsergebnisse kontinuierlich zu verbessern. Dadurch war es bei den entsprechenden Projekten möglich, stets die gesetzten Mindestanforderungen zu erreichen und stellenweise zu übertreffen.

### PROZESSDIGITALISIERUNG MIT ZWEISTUFIGEM ANSATZ

Prozesse in Unternehmen sollen möglichst effizient ablaufen. Dazu trägt ihre Digitalisierung und Automatisierung bei. Im Zuge der Prozessdigitalisierung nutzen wir einen zweistufigen Ansatz zur Steigerung der Geschwindigkeit. Klassisch wird zum einen die Prozessdigitalisierung aus der IT heraus vorgenommen, zum Beispiel mit durch SAP digitalisierten Personalprozessen. Zum anderen wird bis Ende 2022 ein begleiteter Self-Service auf Basis der Microsoft-Power-Plattform für die Fachbereiche aufgebaut. Geschulte Beschäftigte erhalten somit die Möglichkeit, mithilfe eines Baukastensystems selbstständig Prozesse digital abbilden und einfache Arbeitsabläufe automatisieren zu können. Mit dem Ziel, Digitalisierungspotenziale dort zu heben, wo die Anforderungen entstehen, und Automatisierungen schneller nutzbar zu machen.

# DIGITALE STAKEHOLDER-KOMMUNIKATION

## NUTZEN DER INNOVATION

Digitale Einbindung von Stakeholder\*innen als Ergänzung in der frühzeitigen Öffentlichkeitsbeteiligung

Für die erfolgreiche Gestaltung der Energiewende und des damit einhergehenden Netzausbaus ist der intensive Kontakt zu Anspruchsgruppen aus den jeweiligen Planungsregionen und den überörtlichen Stakeholder\*innen besonders wichtig. Amprion informiert bereits in einem frühen Projektstadium – in der Regel lange vor den formellen Verfahren der Raumordnungs-, Bundesfachplanungs- und Planfeststellungsbehörden die Träger\*innen öffentlicher Belange sowie die Öffentlichkeit in der Projektregion.

Dabei geht es um mögliche Planungsalternativen, projektspezifische Verfahrensweisen sowie informelle und formelle Beteiligungsmöglichkeiten. Wir streben Lösungen an, die von möglichst vielen Stakeholder\*innen nachvollzogen werden können. Deshalb wollen wir transparent und kontinuierlich informieren, warum wir Projekte so planen und umsetzen, wie wir es tun. Zudem veranschaulichen wir technische Details und verfahrensrelevante Informationen möglichst zielgruppengerecht.

Die Coronapandemie erschwerte dies zunächst aufgrund der behördlichen Beschränkungen bei Veranstaltungen. Um dennoch der gesetzlichen Informationspflicht und auch dem eigenen Anspruch an die Projektkommunikation nachkommen zu können, haben wir neue Beteiligungsformate geschaffen. Sie bieten auch künftig im Rahmen der Digitalisierung einen Mehrwert durch anschauliches und selbst-erklärendes Informationsmaterial. Im Folgenden stellen wir den digitalen Bürgerinfomarkt als Pendant zum herkömmlichen Bürgerinfomarkt sowie das virtuelle Modell EnLAG14 Rheinquerung als innovatives Tool zur Erläuterung der Projektrahmenbedingungen vor.

### DIGITALER BÜRGERINFOMARKT

Der digitale Bürgerinfomarkt ist ein virtueller dreidimensionaler Raum, der als Informationsplattform der Projektkommunikation genutzt wird. Stakeholder\*innen haben die Möglichkeit, sich wie auf einem herkömmlichen Bürgerinfomarkt über verschiedene Themenfelder zu informieren und mit Amprion persönlich in Kontakt zu treten. Dies geschieht über Chat oder Videokonferenz. Dabei ist die Oberfläche wie eine Messehalle mit unterschiedlichen Ständen – den Themenboxen – aufgebaut. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, in einem separaten Raum – dem Forum – einen Livestream mit Präsentati-

on zu integrieren. Für sensible persönliche Gespräche etwa über privatrechtliche Belange kann auch eine Lounge als separater Raum mit Zugangsdaten für externe Stakeholder\*innen eingebunden werden. Der digitale Bürgerinfomarkt ist nach vorheriger Anmeldung über einen Link zu den angegebenen Öffnungszeiten zugänglich. Die Nutzer\*innen können sich eigenständig über die virtuelle Plattform bewegen und für sie relevante Informationen rund um das jeweilige Projekt individuell abrufen. Bei der Entwicklung lag der Fokus auf einer intuitiven Bedienung, sodass sich allen Altersgruppen der Zugang zu relevanten Informationen barrierearm erschließt. Die Anwendung ist browserbasiert, es muss kein Programm installiert werden. Anspruch des digitalen Bürgerinfomarkts ist es, auch in Gegenden mit nicht gut ausgebautem Internet voll funktionstüchtig zu sein.

Jede Themenbox bietet auf drei Wänden anschauliches Informationsmaterial. Videos, Übersichtspläne und Fotostrecken lassen sich ebenso einbinden wie Textfelder und Roll-ups. Zusätzlich können Materialien als Downloads zur Verfügung gestellt werden.

Das Tool ermöglichte den Austausch und Informationstransfer während der Coronapandemie. Mit seiner Hilfe konnten wir auch Stakeholder\*innen erreichen, denen eine Anreise zu einer Veranstaltung vor Ort nicht möglich gewesen wäre. Trotzdem bietet der digitale Bürgerinfomarkt keinen Ersatz für den persönlichen Austausch vor Ort.

diesem Fall des Projekts EnLAG14 Rheinquerung. Nutzer\*innen können sich jederzeit und in eigenem Tempo über den Planungsstand sowie verschiedene Projektrahmenbedingungen und technische Details informieren. Die Informationen zu den verschiedenen Bestandteilen der Kabeltrasse und den geplanten Bauweisen werden in kurzen Videos dargestellt. Ziel bei der Entwicklung des virtuellen Modells war es, die Dimensionen des Leitungsbauvorhabens sowie die unterschiedlichen Bauweisen der einzelnen Abschnitte realitätsnah, verständlich und anschaulich darzustellen und hierdurch Transparenz gegenüber den Stakeholder\*innen zu schaffen.

Die Bedienung sollte so intuitiv wie möglich erfolgen und von anderen Anwendungen – wie beispielsweise Google Maps – bekannt sein. Einzelne Abschnitte des Leitungsbauvorhabens sind dabei farblich abgesetzt und können interaktiv ausgewählt werden. Beim Hineinzoomen in die einzelnen Kartenpunkte werden Erklärvideos gestartet.

Zielgruppen des virtuellen Modells sind in erster Linie konkret betroffene Stakeholder\*innen entlang des Leitungsverlaufs sowie die interessierte Öffentlichkeit. Durch das Zoomen auf die einzelnen Kartenpunkte bekommen Stakeholder\*innen einen Eindruck davon, inwieweit sie vom Netzausbau betroffen sind. Auch das Ausmaß der eigenen Betroffenheit kann durch das Hineinzoomen auf die einzelnen Kartenpunkte nachvollzogen werden. Sensible Themen wie Hochwasser- und Naturschutz lassen sich ebenfalls so behandeln.

### VIRTUELLES MODELL ENLAG14 RHEINQUERUNG

Das virtuelle Modell stellt den Planungsstand sowie technische Details eines Teilerdkabelungsprojekts sehr anschaulich und informativ vor – in



Das virtuelle Modell EnLAG14 Rheinquerung finden Sie auf unserer Internetseite [rheinquerung.info](http://rheinquerung.info)

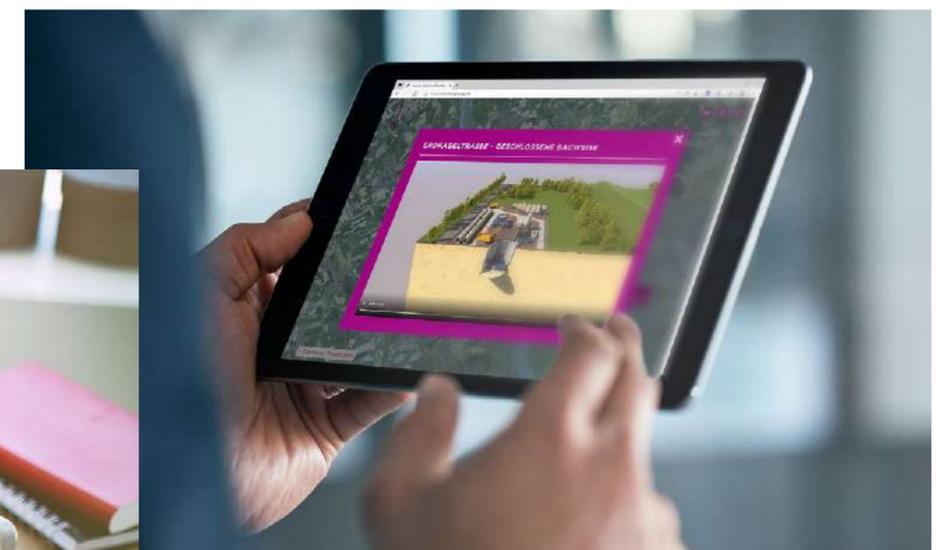


ABB. 49 LINKS Internetseite Bürgerinfomarkt  
ABB. 50 OBEN Internetseite mit virtuellem Modell



## DANK

Die Geschäftsführung von Amprion dankt allen Mitarbeiter\*innen, die dazu beitragen, neue Technologien und neue Lösungen zu entwickeln, zu erproben und in der Praxis einzusetzen. Sie machen Amprion zu einem innovativen Unternehmen.

An der Erstellung dieses Berichts haben mitgewirkt:

Stephan Baack

Daniel Bachmann

Dr. Michael Baranski

Manuel Blumenthal

Tom Bösterling

Dr. Thomas Butschen

Dr. Tim Felling

Dr. Kai Flinkerbusch

Jan Peter Getzlaff

Melina Groß

Dr. Tobias Hennig

Daniel Henschel

Dr. Patrick Hermanns

Dr. Maren Herzog

Daniel Hördemann

Tobit Jensen

Dimitrij Kamenschikow

Dr. Ulf Kasper

Patrick Kausch

Dr. Jan Kays

Dr. Matthias Livrozet

Martin Lösing

Kevin Lunge

Peter Milchert

Rainer Millinghaus

Andre Peters

Dr. Philipp Ruffing

Dr. Jan Teuwsen

Daniel Scherbarth

Kathleen Schirmacher

Niklas Schmack

Thomas Schneider

Dr. Alexander Schütz

Stefan Steevens

Martin Swaczyna

Leon van Altena

Niklas Winkelmann

Stephan Wittner

## IMPRESSUM

### HERAUSGEBER

Amprion GmbH  
Robert-Schuman-Straße 7, 44263 Dortmund  
Telefon 0231 5849-14109  
E-Mail [info@amprion.net](mailto:info@amprion.net)

### ANSPRECHPARTNER

Thomas Dederichs (U-S)

### KONZEPTION UND GESTALTUNG

Berit Urbaniak, Dominik Buschmann und Elina Hetzel

### REDAKTION

Andre Peters, Christian Schwarz, Liliia Makovii,  
Maria Bechert und Volker Götttsche

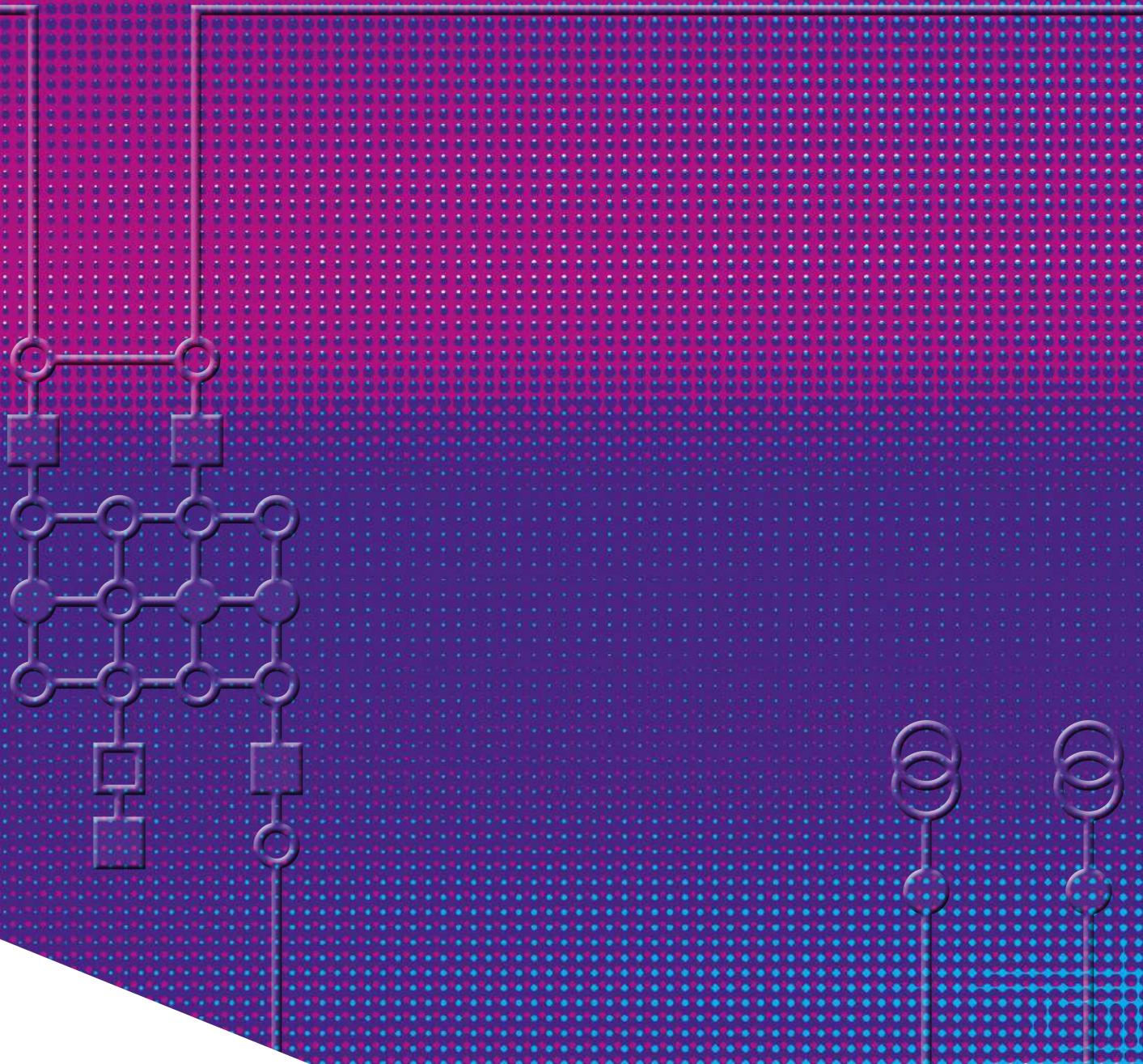
### DRUCK

Woeste Druck, Essen

### ILLUSTRATION UND FOTOGRAFIE

Amprion GmbH	S. 32 rechts, 69 oben, 71, 72
Berit Urbaniak	S. 24, 26, 28, 33, 37, 52, 55, 63, 69 unten, 82, 83
Björn Behrens	S. 54
Daniel Schumann	S. 4-5, 15, 16, 42, 43, 66, 67, 84, 90-91
Dominik Buschmann	S. 78, 80, 86
Elina Hetzel	S. 22, 36, 46, 57, 58
Günther Bayerl	S. 74
Hans Blossey	S. 32 oben
Herrenknecht AG	S. 53
iStock	Titel, S. 19, 27, 45, 85, 88, 89
Julia Sellmann	S. 6, 9, 10, 12
Logarithmo	S. 20-21
Matthias Livrozet	S. 61, 62
Paul Langrock	S. 39
RWE AG	S. 41
Siemens Energy AG	S. 44
Smart Wires Inc.	S. 48
Tom Bösterling	S. 56
123Trim	S. 35





**Sie haben Rückfragen oder Anregungen?**

Treten Sie mit uns in Kontakt  
unter [innovation@amprion.net](mailto:innovation@amprion.net)

**Amprion GmbH**  
Robert-Schuman-Straße 7  
44263 Dortmund

November 2022