

Ein klimaneutrales Bayern und das Stromnetz

Die Klimaneutralität ist eines der größten gesellschaftspolitischen Ziele unserer Zeit. Sie wird durch einen breiten Konsens in der Bevölkerung getragen und durch den Koalitionsvertrag sowie das Osterpaket der Bundesregierung wurden konkrete Ziele für Deutschland beschlossen. Bayern hat sich zum Ziel gesetzt, bis ins Jahr 2040 klimaneutral zu werden. Wie dies aussehen könnte und welche Anforderungen die Klimaneutralität an die bayerische Strominfrastruktur stellt, zeigen drei mögliche Zukunftsszenarien.

✚ Von **Dr.-Ing. Egon Leo Westphal**, Vorstandsvorsitzender, **Dr. Andreas Kießling**, Leiter Vorstandsbüro und Politik, **Alexander Jäger**, Referent Vorstandsbüro und Politik, Bayernwerk AG et al.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie die Klimaneutralität eines Energiesystems definiert ist. Insbesondere die Bewertung von Energieimporten aus umliegenden Bundesländern beziehungsweise dem europäischen Ausland, das die Klimaneutralität 2040 noch nicht erreicht haben wird, spielt dabei eine besondere Rolle. In Form von drei Szenarien kann das Spektrum möglicher Entwicklungspfade zu einer klimaneutralen Energielandschaft bewertet werden (siehe Abb. 1).

Szenarien einer klimaneutralen Energielandschaft in Bayern

Im Szenario *Klimaneutralität „made in Bayern“* wird ein Großteil der in Bayern verbrauchten Energie tatsächlich zur gleichen Zeit erzeugt oder gespeichert. In diesem Szenario wird der Import von Strom minimiert und benötigter Wasserstoff zu 90 Prozent in Bayern erzeugt, schließlich kann streng genommen die Klimaneutralität des importierten Stroms nicht sichergestellt werden. Dies führt dazu, dass in

01 Mögliche Szenarien eines klimaneutralen Bayerns

Szenario Klimaneutralität „made in Bayern“



Klimaneutralität in Bayern wird erreicht, wenn ein **Großteil der in Bayern verbrauchten Energie „echt“ in Bayern CO₂-frei erzeugt wird** (zeitgleich oder gespeichert)

Importierte Energie < Exportierte Energie
Stromimport ≈ 0 MWh
Hoher Grad an Elektrifizierung

Szenario Klimaneutralität „Balance“



Klimaneutralität in Bayern wird erreicht, wenn die **CO₂-frei erzeugte Energiemenge in Bayern gleich der in Bayern verbrauchten Energie** ist.

Importierte Energie ≈ Exportierte Energie

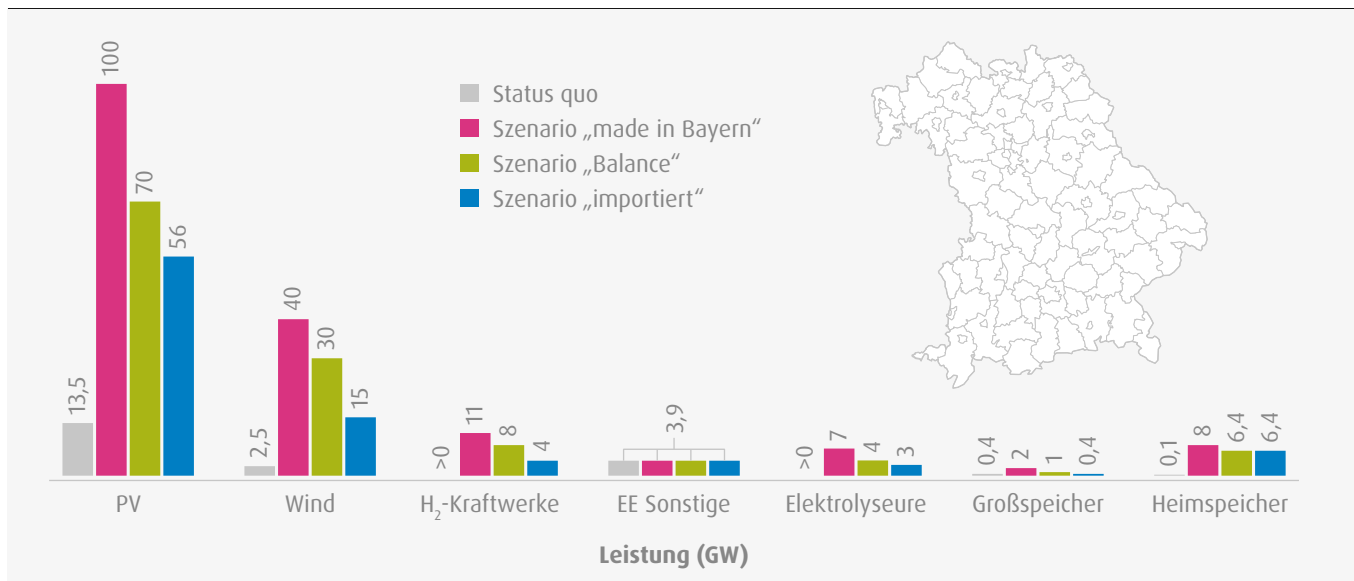
Szenario Klimaneutralität „importiert“



Klimaneutralität in Bayern wird erreicht, wenn die **CO₂-frei erzeugte Strommenge und der Import „grüner Energie“ (bspw. H₂) in Bayern gleich dem Energieverbrauch** in Bayern ist.

Importierte Energie > Exportierte Energie
Stromimport ≈ Stromexport
Hohe Nutzung von H₂

02 Entwicklung der installierten Leistung bis 2040



einem solchen Szenario „made in Bayern“ eine umfassende Elektrifizierung notwendig ist, um mit einer hohen Effizienz im Energieverbrauch die notwendigen Erzeugungsleistungen möglichst gering zu halten.

Das Szenario *Klimaneutralität „importiert“* stellt den Gegenentwurf zum Szenario *Klimaneutralität „made in Bayern“* dar. In diesem Szenario wird Klimaneutralität maßgeblich durch den Import „grüner Energie“ insbesondere in Form von grünem Wasserstoff erreicht. In einem solchen Szenario ist die Wasserstoffnutzung in Industrie, Verkehr und Wärme signifikant hoch.

Als Mittelweg zwischen diesen beiden Extremszenarien ist das Szenario *Klimaneutralität „Balance“* denkbar, in dem die CO₂-frei erzeugte Energiemenge in Bayern bilanziell dem Verbrauch entspricht – aber nicht zwangsläufig zur gleichen Zeit stattfindet.

71-mal Kernkraftwerk Isar 2 an EE-Leistung notwendig

Für eine klimaneutrale Energielandschaft in Bayern werden unabhängig von dem Szenario große Mengen an erneuerbarer Stromerzeugung benötigt. Da die Stromerzeugung aus Photovoltaik das Rückgrat der grünen Stromerzeugung darstellt, werden je nach Szenario 56 bis 100 Gigawatt an PV-Leistung in Bayern benötigt. Dies bedeutet einen Zubau von mehr als 2,5 Gigawatt pro Jahr bis zum Jahr 2040. Auch der Ausbau von Windenergieanlagen muss beschleunigt werden. Bis zum Jahr 2040 muss im Szenario „Balance“ die installierte Leistung auf 30 Gigawatt verzehnfacht werden. Im Szenario „Balance“ werden somit im Jahr 2040 über 100 Gigawatt erneuerbare Erzeugungskapazität installiert sein (vgl. Abb. 2). Dies entspricht in etwa 71-mal der Leistung des Kernkraftwerks „Isar 2“.

Durch die Abschaltung von Kohle- und Kernkraftwerken nimmt die gesicherte Kraftwerksleistung bis zum Jahr 2040 stark ab. Um in Zeiträumen mit geringen EE-Erzeugungsmengen die

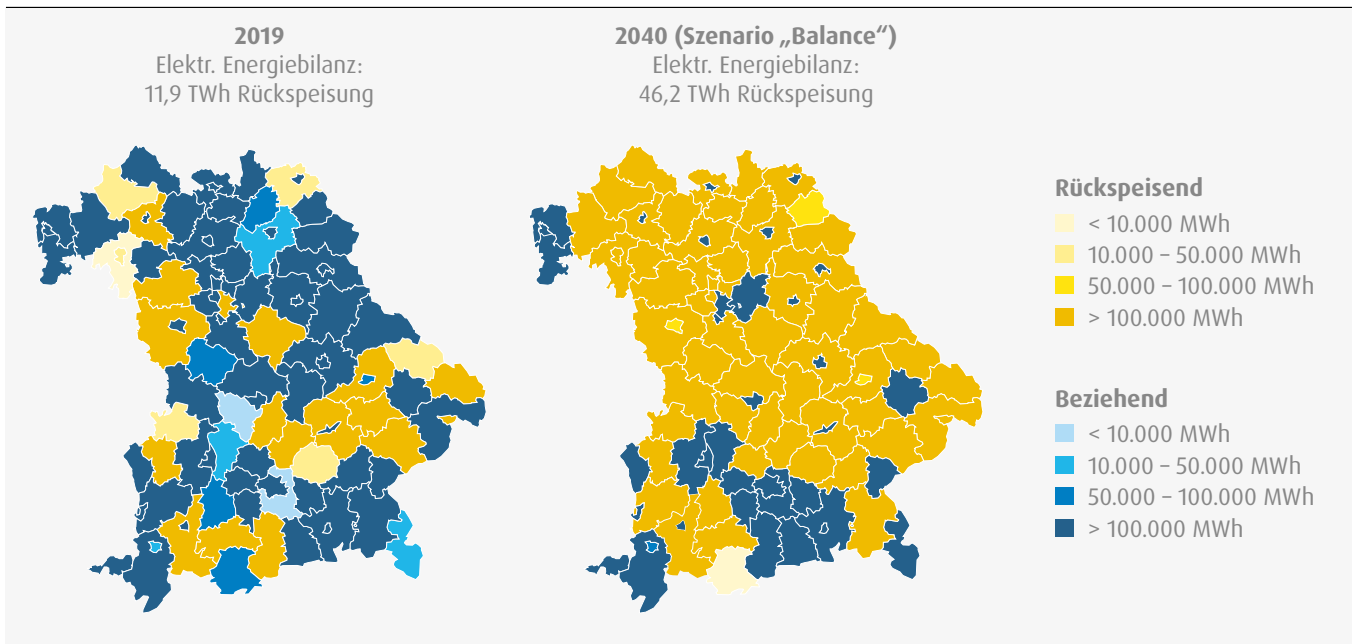
Stromversorgung weiterhin sicherzustellen, sind **Wasserstoffkraftwerke** notwendig, welche ab einer ausreichenden Verfügbarkeit mit Wasserstoff betrieben werden. Im Elektrifizierungsszenario „made in Bayern“ ist die größte Anzahl an H₂-Kraftwerken notwendig (11 GW), da der Stromverbrauch und damit die Spitzen in der Nachfrage in diesem Szenario höher ausfallen als in den beiden anderen Szenarien.

Grüner Wasserstoff dient als Speicher für überschüssige Erzeugungsmengen aus PV- und Windkraftanlagen. Des Weiteren ist ein Import von Wasserstoff aus anderen Ländern möglich und entlastet das Stromnetz. Neben der Nutzung von Wasserstoff in der **Energiewirtschaft** wird auch bei den Endverbrauchern eine signifikante Menge an Wasserstoff benötigt. In der **Industrie** erfolgt im Szenario „made in Bayern“ eine rein stoffliche Nutzung von Wasserstoff. Wasserstoff ersetzt also andere nicht-CO₂-neutrale Gase in der Produktherstellung. Wasserstoff kann beispielsweise als Reduktionsmittel oder als Grundstoff für Kunststoffe verwendet werden.

In den Szenarien „Balance“ und „importiert“ erfolgt auch ein energetischer Einsatz von Wasserstoff in der Industrie. Im **Gebäudesektor** spielt Wasserstoff abhängig vom Szenario in der Wärmeerzeugung eine Rolle. Im Szenario „made in Bayern“ werden ausschließlich Wärmepumpen sowie Fern- und Nahwärme verwendet. Im Szenario „importiert“ spielt auch die Wärmeerzeugung aus der Verbrennung von Wasserstoff eine signifikante Rolle. Hierbei ist die Umwidmung des bisherigen Gasnetzes hin zu einem Wasserstoffnetz mit entsprechendem technischen Aufwand verbunden und wird derzeit politisch intensiv diskutiert.

Im **Verkehrssektor** spielt Wasserstoff heute keine Rolle. Insbesondere im Schwerlastverkehr wird in allen Szenarien künftig eine Nutzung angenommen. Im Szenario „importiert“ wird zusätzlich auch eine signifikante Nutzung von Wasserstoff oder entsprechenden Derivaten in PKWs angenommen.

03 Energiebilanzen im Jahr 2040 auf Landkreisebene



In den drei genannten Sektoren plus der Energiewirtschaft werden im Szenario „Balance“ im Jahr 2040 circa 80 Terawattstunden Wasserstoff benötigt. Dies entspricht dem gesamten heutigen Strombedarf Bayerns.

In der **Industrie** steigt neben dem Wasserstoffbedarf der Strombedarf in den Szenarien „made in Bayern“ und „Balance“ von heute circa 28 Terawattstunden auf 50 beziehungsweise 39 Terawattstunden an. Im Szenario „importiert“ wird angenommen, dass sich die Elektrifizierung sowie Effizienzgewinne ausgleichen und die weitere Dekarbonisierung über Wasserstoffeinsatz erfolgt. Für alle Szenarien wurde ein durchschnittliches Wirtschaftswachstum von 1 Prozent pro Jahr angenommen.

Auch für die **bayerischen Haushalte** stellt die Klimaneutralität einen Wandel dar. Vier von fünf bayerischen Haushalten werden einen **E-PKW** fahren. Etwa jedes zweite Gebäude wird mit einer **Wärmepumpe** beheizt. Die Elektrifizierung von Verbrauchern im Haushalt im Zusammenhang mit einem starken Ausbau von Aufdach-PV-Anlagen und Heimspeichern führt zu immer neuen Flexibilitätsmöglichkeiten der Kunden. Damit gibt es eine Entwicklung von einstigen Stromverbrauchern (Consumern) hin zu „Flexufern“, die eine aktive Rolle im Energiesystem einnehmen.

Die **Energiebilanzen der Landkreise** in Bayern ändern sich signifikant. Im Basisjahr der Untersuchung 2019 hatte Bayern eine positive elektrische Energiebilanz mit ca. 11,9 Terawattstunden Überdeckung. Im Szenario „Balance“ wird eine ausgeglichene Gesamtenergiebilanz Bayerns angestrebt, wodurch ein massiver Ausbau der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung notwendig wird. Dadurch steigt die bilanzielle Überdeckung Bayerns mit elektrischer Energie auf 46 Terawattstunden und gleicht damit den Import von Wasserstoff bilanziell aus.

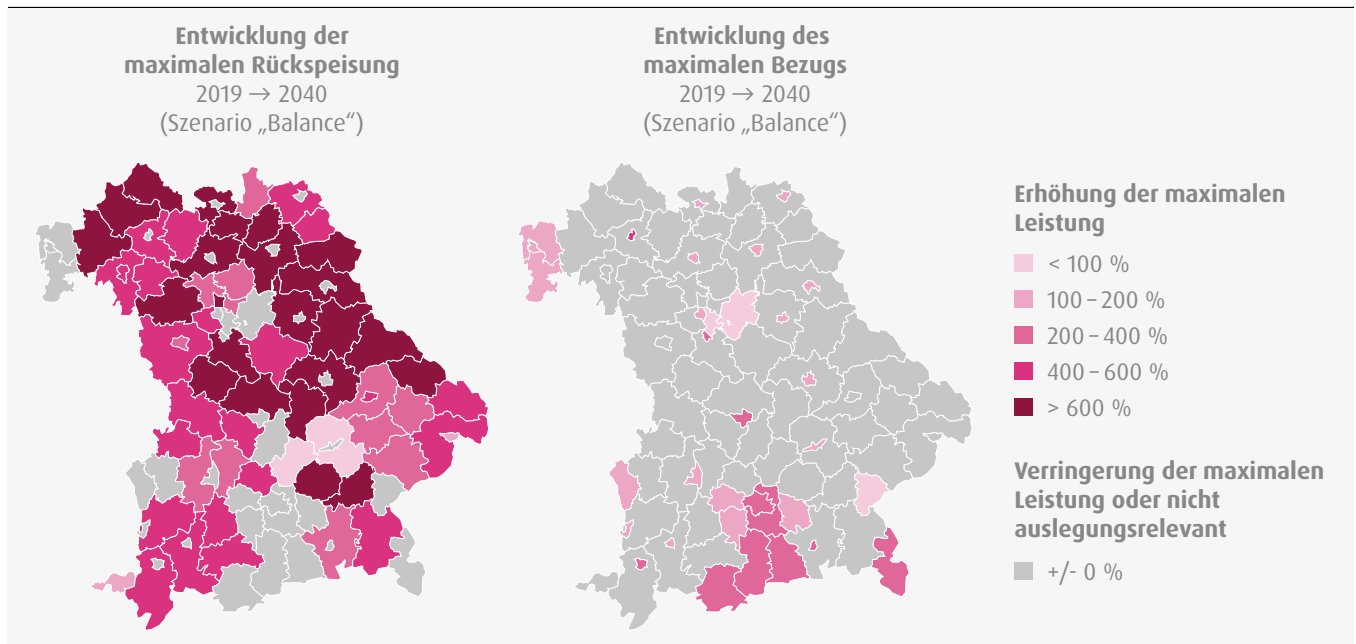
In ländlichen Regionen steigt die Erzeugung aus PV und Windenergieanlagen stark an. **Damit wird der ländliche Raum Bayerns zum „grünen Kraftwerk“**. Da der Anstieg der Erzeugung jedoch stärker ist als der Verbrauch, wird die zeitliche und räumliche Synchronisierung von Einspeisungen und Verbrauch wichtiger (vgl. Abb. 3).

Anforderungen an das Stromnetz steigen stark

Bei der Betrachtung der auslegungsrelevanten Leistungen in den Landkreisen wird jedoch klar, dass ein Großteil der erzeugten Energie nicht zeitgleich lokal verbraucht wird. Dadurch steigt die für die Stromnetze auslegungsrelevante Leistung in den Landkreisen durchschnittlich um 470 Prozent an. Ein netzdienlich optimierter Einsatz von E-PKW, Batteriespeichern, Elektrolyseuren und H₂-Kraftwerken ist hierbei berücksichtigt. Um eine Übertragung der gesamten erzeugten und verbrauchten Energie sicherzustellen, ist ein **massiver Ausbau des Stromnetzes von Bayernwerk** notwendig. Unter den Gesichtspunkten der Finanzierbarkeit und Umsetzbarkeit sind die anstehenden Herausforderungen für Unternehmen und die Gesellschaft enorm.

Die Gründe für die Leistungsanstiege sind unterschiedlich. In den ländlichen Landkreisen resultiert der Anstieg aus **hoher gleichzeitiger Erzeugung von Wind- und PV-Anlagen** in den Mittagstunden. In städtischen Regionen ergibt sich jedoch ein anderes Bild. Der Anstieg der auslegungsrelevanten Leistung ist hier lastseitig getrieben, insbesondere durch die **steigende Anzahl an E-PKW und Wärmepumpen**. Die Spitzenwerte werden meist im Winter in den frühen Abendstunden erreicht. Auch in der Höhe ergeben sich deutliche Unterschiede. Landkreise mit erzeugungsseitig getriebenen Anstiegen der auslegungsrelevanten Leistungen – meist ländliche Regionen – verzeichnen im Schnitt einen Anstieg um 580 Prozent. Dem hingegen sind in städtischen Gebieten mit einem lastgetriebe-

04 Veränderung der auslegungsrelevanten Leistung je Landkreis (2019 im Vergleich zu einem klimaneutralen Bayern)



nen Leistungsanstieg die maximalen Werte mit einem Anstieg um 190 Prozent weitaus geringer. (vgl. Abb. 4).

Bei der Reduzierung des maximalen Bezugs kann die Flexibilität, im Vergleich zur maximalen Rückspeisung, einen höheren Beitrag leisten. Als Flexibilität werden in diesem Falle die H₂-Kraftwerke, Elektrolyseure, Batteriespeicher und E-PKW definiert. Durch eine **intelligente Verschiebung der Ladevorgänge von E-PKW** lässt sich der größte Anteil (ca. 44 %) dieser Reduktion verwirklichen. Damit kann ein flexibler Stromverbrauch auch einen Beitrag für eine sichere Versorgung leisten.

Erfolgskriterien für ein klimaneutrales Bayern

Das Ziel der Klimaneutralität führt zu einem extremen Wandel der bayerischen Wirtschaft, Gesellschaft und Energielandschaft. Denn durch die notwendigen Effizienzsteigerungen führt der Weg an einer starken Elektrifizierung nicht vorbei. Bis zum Jahr 2040 wird sich die Leistung der im Verteilnetz angeschlossenen erneuerbaren Erzeuger von circa 20 Gigawatt auf über 100 Gigawatt erhöhen. **Auch auf der Seite der Verbraucher wird der Strombedarf steigen:** Die Industrie wird viele Prozesse elektrifizieren. Jedes zweite Gebäude wird mit einer Wärmepumpe geheizt und 80 Prozent der bayerischen Haushalte werden einen E-PKW besitzen.

Die deutsche Strategie zur Klimaneutralität schließt den Einsatz von Kernkraft und die Nutzung von Carbon Capture and Storage (CCS), also das unterirdische Speichern von CO₂, aus. Klimaneutralität bedeutet daher faktisch die Deckung des Bedarfs durch 100 Prozent erneuerbare Energien. Aus diesem Grund steigen die Anforderungen an das Verteilnetz um mehr als 470 Prozent und die **Stromnetze müssen massiv ausgebaut werden.** Damit einher gehen Fragen der Finanzierbarkeit, der Ressourcenverfügbarkeit und der breiten gesellschaftlichen Akzeptanz.

Damit auch in Zukunft die Stromversorgung in Bayern sichergestellt ist, bedarf es einer stärkeren Flexibilisierung und Synchronisierung lokaler erneuerbarer Einspeisungen und Lasten. Zusätzlich müssen Anreize geschaffen werden, um neue Energiespeicher zu bauen und zu betreiben. Eine reine Flexibilisierung der Nachfrage wird in Zeiten ohne Solar- und Windenergie, den sogenannten Dunkelflauten, nicht ausreichen. Daher ist der Ausbau gesicherter Erzeugungsleistung in Bayern durch H₂-Kraftwerke unumgänglich. Die Grundlage für die Klimaneutralität ist ein leistungsfähiges Energiesystem. ↗

DR.-ING. EGON LEO WESTPHAL

→ Vorstandsvorsitzender, Bayernwerk AG

DR. ANDREAS KIESSLING

→ Leiter Vorstandsbüro und Politik, Bayernwerk AG

ALEXANDER JÄGER

→ Referent Vorstandsbüro und Politik, Bayernwerk AG

DR.-ING. FRANK WIRTZ

→ Leiter Assetstrategie & techn. Grundsatzaufgaben, Bayernwerk Netz GmbH

DR.-ING. HENNING SCHUSTER

→ Geschäftsführer, E-Bridge Consulting

PHILIPP LASCHET

→ Senior Consultant, E-Bridge Consulting