



*Energieversorgung in Mecklenburg-Vorpommern*

*Szenario für ein vollständig  
erneuerbares Energiesystem  
2035*

**4**  
*Vorbemerkungen  
Klimaschutz durch Energiewende*

**6**  
*Methodik und Ziele der Studie*

**24**  
*Zusammenfassung*

**5**  
*Einleitung*

**8**  
*Energieszenario*  
*Flächenpotentiale*  
*Effizienzsteigerung*  
*Minderungspotentiale und Energiebereitstellung*  
*Speicher*  
*Umsetzungsstrategien*  
*Kosten*

**26**  
*Quellen*  
*Impressum*



Der menschengemachte Einfluss auf unser Klima muss gestoppt werden. Nur so können zukünftigen Umweltkatastrophen, wie Dürren, Hitzeperioden, heftigen Niederschlägen und Überschwemmungen sowie massives Artensterben und unkalkulierbaren Folgekosten abgewendet oder zumindest noch abgemildert werden. Deswegen hat sich die Weltgemeinschaft auf das 1,5 °C Ziel von Paris geeinigt und das Bundesverfassungsgericht hat unlängst bestätigt, dass auch aus Gründen der Freiheit künftiger Generationen ambitionierter Klimaschutz betrieben werden muss. Es besteht somit mittlerweile auch politisch und rechtlich die Notwendigkeit die richtigen Schritte endlich zu gehen.

Die Klimakrise ist kein fernes Zukunftsszenario. Die letzten sechs Jahre waren die wärmsten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Dieser Trend macht auch vor Mecklenburg-Vorpommern keinen Halt, die Klimakrise verändert bereits jetzt dieses Land: Überflutungen und Stürme nehmen zu, die Zahl der heißen Tage steigt und die Winter werden feuchter. Trockenstress ist zu einer enormen Belastung für die Landwirtschaft geworden. Auch die Ostsee, die von immenser wirtschaftlicher und touristischer Bedeutung für Mecklenburg-Vorpommern ist, bleibt nicht unberührt. Sie ist das sich am schnellsten erwärmende Meer weltweit, mit katastrophalen Folgen auch für die Fischpopulationen. Es bedarf also schnellen und konsequenten Handelns: Mecklenburg-Vorpommern muss aktiv seinen Teil dazu beitragen, die Erderhitzung zu begrenzen. Die Ideen, Instrumente und Technologien dafür sind vorhanden. Denn unser Land soll lebens- und liebenswert bleiben! Der Tourismus ist einer der wichtigsten Wirtschaftszweige, daher muss Mecklenburg-Vorpommern weiterhin für Urlauber\*innen ein abwechslungsreiches Ziel bleiben. Zudem muss das Energiesystem vom Kopf auf die Füße gestellt werden. All die Dinge müssen jedoch mit nur minimalen Eingriffen in die Natur umgesetzt werden. Sind diese Ziele realistisch? Was braucht es um sie umzusetzen? Welche Flächen müssen wir für Wind- und Photovoltaikanlagen in unserem Land vorsehen und wie können wir Energie einsparen? Diesen Fragen sind die Autoren mit Hilfe der Entwickler\*innen der Energiesystemsimulation von »100prosim« und Expert\*innen aus der Energiebranche auf den Grund gegangen. Entstanden ist, was die Landesregierung in keiner der bisherigen Legislaturen vorgelegt hat: ein Zielszenario für eine 100 % erneuerbare Energieversorgung bis 2035 auf dem konkrete politische Maßnahmen aufbauen. Das Ergebnis ist gleichzeitig motivierend und drängend: Es ist möglich – alles ist drin – für ein modernes, nachhaltiges und klimafreundliches Mecklenburg-Vorpommern.

Hannes Damm, M.Sc. Physik,  
Universität Greifswald

Jens Hinrich Prause, M.Sc. Maschinenbau,  
Universität Rostock und Leitautor der Studie

Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt  
Dipl.-Ing. an der Ostfalia Hochschule für  
angewandte Wissenschaften  
und Entwickler der Software »100prosim«

Das heutige Energiesystem ist die maßgebliche Triebkraft für den menschengemachten Klimawandel. Kohlendioxid, Methan und andere Treibhausgase werden durch Energie-wandlungsprozesse in unfassbaren Mengen freigesetzt. Das bedeutet: Es braucht rasch ein zu 100 % erneuerbares Energiesystem. Wie in Abbildung 1 dargestellt, stagnieren die CO<sub>2</sub> Emissionen in Mecklenburg-Vorpommern faktisch seit 1991 - also seit 30 Jahren! Was dafür getan werden muss, ist klar: schnellstmöglicher Kohleausstieg, beherzter Ausbau der erneuerbaren Energien, effizientere Nutzung von Energie und Ressourcen. Mecklenburg-Vorpommern kann und muss als Küsten- und Flächenland eine Vorreiterrolle einnehmen, denn es besitzt hervorragende Standortvorteile. Und das ist eine Chance: In einem 100 % erneuerbaren Energiesystem werden die Emissionen gesenkt und der regionale Arbeitsmarkt gestärkt. Um diese Ziele vollständig zu erreichen, bedarf es einer Kehrtwende in allen Energiesektoren, damit möglichst alle vorhandenen Verbesserungspotentiale ausgeschöpft werden. Die vorliegende Studie beschreibt den Status-Quo sowie das resultierende Szenario für das zukünftige 100 % erneuerbare Energiesystem. Es stellt die Potentiale erneuerbarer Energien realistisch dar, da mit realen Energieerträgen und durch Studien belegbaren Effizienzsteigerungen gerechnet wurde. Es wurden zur Verfügung stehende oder bereits erprobte Techniken zugrunde gelegt. Unter Berücksichtigung des zukünftig angenommenen Energiebedarfes, der Gesamtsystemeffizienz und unter der Maßgabe eines ökologisch vertretbaren Energiesystems, ist

in dieser Studie ein mögliches Szenario entstanden. Es beschreibt insbesondere die Potentiale. Es ist noch kein Umsetzungskonzept mit allen nötigen Maßnahmen und kann die vielfältigen Detailplanungen vor Ort nicht ersetzen. Mit diesen Vorschlägen kann jedoch der Blick in die Zukunft geworfen und die Energiewende ausgehend vom Ziel gedacht werden. Dies erlaubt richtige politische Meilensteine zu setzen und an der politischen Willensbildung entscheidend mitzuwirken. Mecklenburg-Vorpommern muss Vorreiter bei der Energiewende werden und so wichtige Grundlagen für die zukünftige Entwicklung des Technologie- und

Wirtschaftsstandortes Deutschland legen. Mecklenburg-Vorpommern hat mit zahlreichen Herstellern, Pionieren und Forschungsinstitutionen aus dem Bereich der Erneuerbaren Energien die Möglichkeit, aus einem dünn besiedelten ostdeutschen Flächenland einen der innovativsten Standorte für das Zukunftsfeld der erneuerbaren Energien in Europa zu machen. Sowohl die Produktion von Windrädern und Solarmodulen, als auch die optimale Vernetzung und Regelung eines landesweiten erneuerbaren Energiesystems unter Einbindung innovativer Speichertechnologien, bieten entscheidende Zukunftschancen<sup>2</sup>.

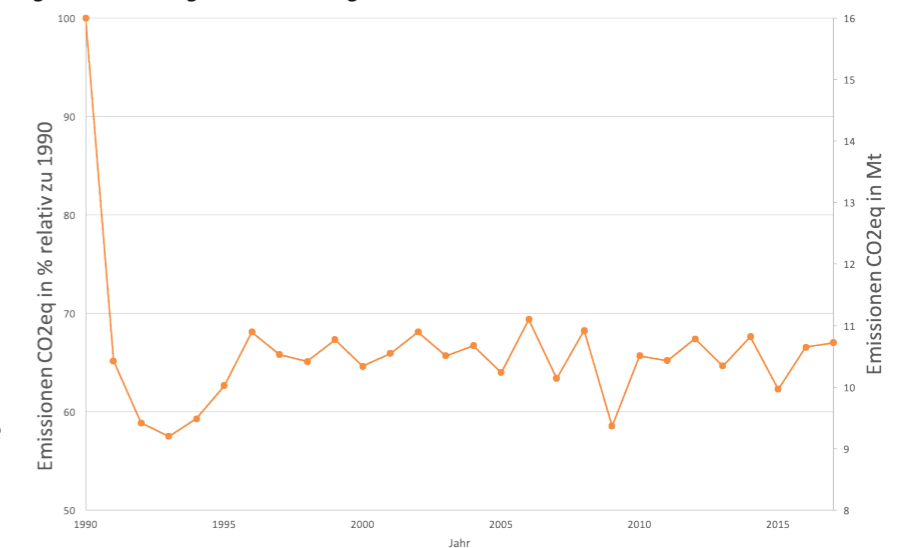


Abbildung 1: bisherige Entwicklung der energiebedingten Treibhausgas-Emissionen in M-V. 1

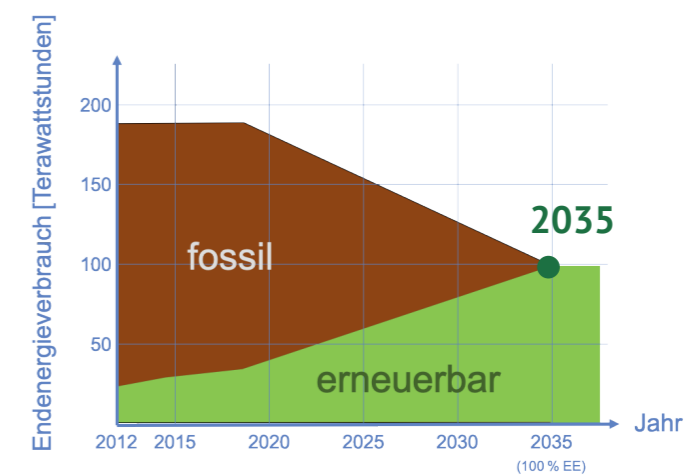


Abbildung 2: Energie-Entwicklungspfad Mecklenburg-Vorpommern: Energieverbrauch verringern und für die Energieversorgung fossile Energieträger durch erneuerbare ersetzen.

Es reicht dabei nicht, einfach nur Klimaneutralität zu fordern. Wir benötigen eine klare Strategie zur Erreichung der oben genannten Ziele. Um konkrete Maßnahmen zu benennen, müssen bereits mögliche Technologien, Ideen und Konzepte für den zukünftigen Energieverbrauch und die Energieerzeugung ausgearbeitet und bewertet werden. In vielen Bereichen herrscht bereits Konsens:

- » Der Energieverbrauch muss gesenkt werden.
- » Die erneuerbaren Energien müssen ausgebaut werden.
- » Es braucht eine effizientere Infrastruktur.
- » Es muss ressourcenschonender gelebt und gearbeitet werden.

Was dies genau bedeutet ist allerdings vielen unklar. Wo genau liegen die Einsparpotentiale und wie groß sind sie? Welche Flächen müssen für Wind- und Photovoltaikanlagen in Mecklenburg-Vorpommern vorgesehen werden? Welcher Umfang an Speicherinfrastruktur wird benötigt, um die Energieversorgung unabhängig von Wetterlage und Tageszeit sicherzustellen? Um diese Fragen faktenbasiert zu

beantworten, wurde diese Studie erstellt. Es droht das Risiko, dass zu hohe selbstgesteckte Ziele verfehlt werden, wenn unrealistische Annahmen eine spätere praktische Umsetzung unmöglich machen, der Bedarf an Energie in den einzelnen Sektoren unter- oder überschätzt wird oder weil der angestrebte Energiemix nicht zur geplanten Netz- und Speicherinfrastruktur passt. Aus diesem Grund ist es wichtig einen Plan zu entwickeln, der auf überprüf- baren Daten und realistischen Prognosen basiert. Hierzu wurde mit Hilfe der Energiesystemsimulation »100prosim« ein konkretes Szenario für die Klimaneutralität 2035 entwickelt. Mit Hilfe des Software- tools »100prosim« wurden in der Vergangenheit zahlreiche Energiesys- temanalysen durchgeführt, so zum Beispiel im Jahr 2018 eine Studie des BUND mit der Zielregion Nieder- sachsen<sup>3</sup> und eine Studie aus dem Jahr 2017, die das gesamtdeutsche Energiesystem betrachtet<sup>4</sup>. Das Tool basiert auf einem wissenschaftlichen Gutachten für die Landesregierung Niedersachsen, an dem vier Institute unter Leitung von Prof. Dr. Martin



### Die grundlegende Idee der Energiesystemsimulation »100proSim« basiert im Wesentlichen auf drei Schritten<sup>5</sup>:

1. Zunächst wird der Ist-Zustand, der Status Quo, des zu betrachtenden Gebietes definiert, in diesem Fall des Bundeslandes Mecklenburg-Vorpommern. Hier fließen eine Vielzahl an Daten ein, zum Beispiel:

- » Derzeitiger prozentualer Anteil bei der Flächennutzung
- » Derzeitiger Energiebedarf, aufgeschlüsselt nach Sektoren
- » Wetter- und Umweltbedingungen
- » Derzeitiger Energiemix (Kohle, Wind, Atomstrom, Sonne, ...)

2. Anschließend wird ein Ziel definiert, wobei die Ambition und der Ehrgeiz maßgeblich von folgenden Faktoren abhängig ist:

- » Bis wann soll Klimaneutralität erreicht werden?
- » Welcher Energiebedarf soll gedeckt werden?
- » Wie soll die vorhandene Fläche auf die verschiedenen Ressorts (Landwirtschaft, Forstwirtschaft, solare Flächen, Windparkflächen, ...) verteilt werden?

3. Sind Anfangsbedingungen und Ziel definiert, kann die Simulationssoftware »100prosim« Verlauf und zwischenzeitliche Meilensteine berechnen. Mit diesen Informationen kann der Blick in die Zukunft geworfen und die Energiewende ausgehend vom Ziel gedacht werden. Dies erlaubt richtige politische Meilensteine zu setzen und an der politischen Willensbildung entscheidend mitzuwirken. Für eine realistische Berechnung des Zukunftsszenarios werden weitere Eingabegrößen benötigt, wie zum Beispiel:

- » Mit welchen Effizienzsteigerungen können wir bei den verschiedenen Technologien rechnen?
- » Wie entwickelt sich der Energiebedarf für verschiedene Sektoren (Mobilität, Wärme, Strom, ...)?
- » Wie entwickelt sich der Ausbau der verschiedenen erneuerbaren Energien?

Für die drei Teilabschnitte wurden im Rahmen dieser Studie aktuelle Daten zum Status Quo ausgewertet, detaillierte Ziele definiert und darauf aufbauend Prognosen ausgearbeitet und sinnvoll und umsetzbar erscheinende Annahmen getroffen. Sie sind im Detail in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Webseite mit dem Tool:  
<https://www.ernes.de/seite/410818/szenario-methodik.html>

Faultstich beteiligt waren. Zu den Grundsätzen der Methode zählen der ganzheitliche Ansatz – es werden alle energieintensiven Sektoren betrachtet, der flächenbasierte Ansatz, der insbesondere eine realistische Einschätzung zur Veränderung der Landschaft freigibt und die Fokussierung auf das Zielszenario 100 % erneuerbare Energie. Die Modellrechnungen bestehen aus täglichen Energiebilanzen, aus denen eine ausgeglichene Jahresenergiebilanz für das entsprechende Referenzjahr berechnet wird. Für die vorliegende Studie sind erneuerbare Energieerzeugungs- und Wetterdaten aus dem Jahr 2012 hinterlegt, da hierfür eine breite Datenbasis vorhanden ist. Im Jahresverlauf können zwischen Leistungsangebot und –bedarf somit Über- beziehungsweise auch Unterdeckungen auftreten, die bei sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien entsprechend gespeichert werden müssen. Die Speicherauslegung und die Be- und Entladung vorhandener Speicher erfolgt ebenso mit Hilfe des Simulationswerkzeuges »100prosim«.

Mecklenburg-Vorpommern ist mit rund 23.295 km<sup>2</sup> das sechstgrößte Bundesland der Bundesrepublik. Mit 1,61 Mio. Einwohner steht es allerdings lediglich auf dem 14. Platz der bevölkerungsreichsten Bundesländer. Im Durchschnitt ergibt dies eine Bevölkerungsdichte von 69

Einwohner/km<sup>2</sup>. Dies ist die niedrigste Bevölkerungsdichte aller Bundesländer<sup>6</sup>. In Tabelle 1 ist die detaillierte Aufteilung der Bodenfläche Mecklenburg-Vorpommerns ersichtlich. Unser Bundesland wird vor allem durch die Landwirtschaft geprägt. Lediglich

5,5 % des Gesamtgebietes sind Siedlungsfläche<sup>7</sup>. Hiervon wiederum nur etwa 0,3 % werden aktuell als solare Dachfläche genutzt<sup>8</sup>. Ähnlich mager sieht die Bilanz bei Windenergieanlagen bisher aus. Lediglich 0,51 % der Landesfläche sind mit Windenergieanlagen bestückt.

Tabelle 1: Detaillierte Aufteilung der Bodenfläche Mecklenburg-Vorpommerns im Status Quo<sup>9</sup>

Fläche	in ha	Anteil an der Gesamtfläche in %
Bodenfläche gesamt	2.329.422	
<b>Siedlungsfläche (ehem. Gebäude- &amp; Freifläche)</b>	<b>128.628</b>	<b>5,52 %</b>
Solare Dachflächen	482	0,02 %
<b>Landwirtschaftsfläche (LF)</b>	<b>1.438.838</b>	<b>61,77 %</b>
Solare Freiflächen	2.062	0,09 %
Ackerland	1.076.600	46,22 %
Getreide-Anbaufl. (Stroh)	582.100	24,99 %
Energiepfl. (Biogas)	78.399	3,37 %
Energiepfl. (Pflanzenöl)	97.933	4,20 %
Energiepfl. (Ethanol)	13.471	0,58 %
Energiepfl. (Kurzumtr.)	600	0,03 %
(ohne energet. Relevanz)	304.097	13,05 %
Dauergrünland	269.600	11,57 %
Grasschnitt (Biogas)		
(sonstige Nutzung)	90.576	3,89 %
<b>Waldfläche</b>	<b>494.457</b>	<b>21,23 %</b>
Forstfl. (u.a. Energieholz)	442.457	18,99 %
(ohne forstwirtschaftl. Nutzung)	52.000	2,23 %
<b>(sonstige Flächen)</b>	<b>267.499</b>	<b>11,48 %</b>
Windparkfläche	11.775	0,51 %

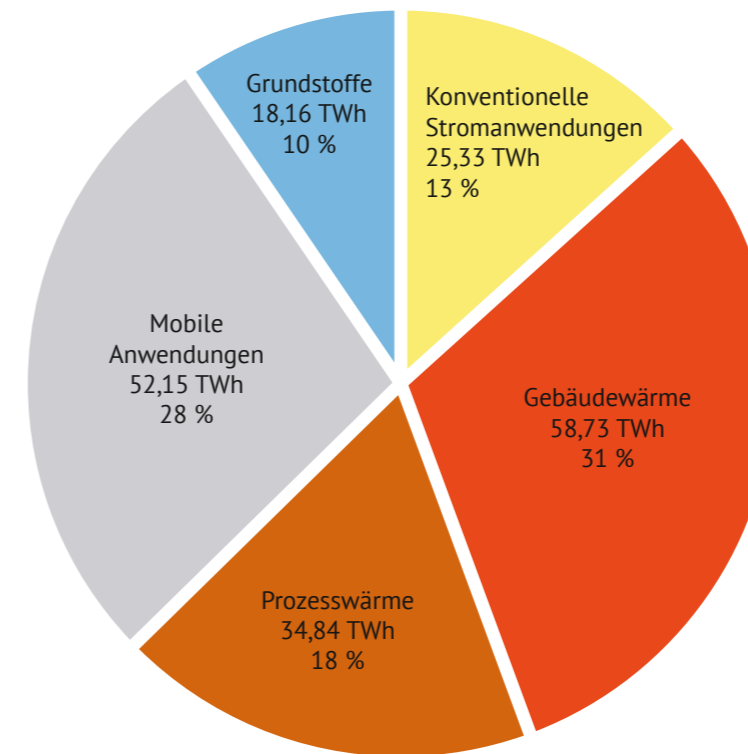


Abbildung 3: Endenergieverbrauch Mecklenburg-Vorpommerns aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen in TWh (»100prosim« Studie, M-V)

Dass das Thema der Energiewende längst im Mainstream der Bevölkerung angekommen ist beweisen zahlreiche repräsentative Umfragen. Demnach halten 86 % der Befragten den Ausbau erneuerbarer Energien für wichtig oder sehr wichtig. Dem gegenüber stehen »nur« 10 %, die diesem Ziel keinen wichtigen Stellenwert einräumen<sup>10</sup>. Die gleiche Studie gibt ebenfalls eine breite Mehrheit von 57 % an, die glaubt, dass der Ausbau des elektrischen Versorgungsnetzes und erneuerbarer Energien die regionale Wirtschaft stärken. Dies sehen 27 % anders. Das Gebot der Energiewende wird auch durch die aktuellen Treibhausgasemissionen gestützt. So verursachte der Energiesektor rund 60 % der Gesamtemissionen im Jahr 2017<sup>11</sup>. Dieser Prozentsatz war - wie eine kleine Anfrage der Linken im Landtag von Mecklenburg-Vorpommern ergab - mehr oder weniger über die letzten Jahrzehnte konstant. Insgesamt verursachte der Energiesektor 11.033.000 Tonnen CO<sub>2</sub> im Jahr 2017.

Neben der Akzeptanz und der Notwendigkeit für erneuerbare Energien bleibt eine wichtige dritte Kategorie zu beachten. Die Kosten erneuerbarer Energien sind in den letzten Jahren stetig gesunken<sup>12</sup>. Absolut gesehen hängen die Stromgestehungskosten, also die Kosten über den gesamten Lebenszyklus der Anlagen von verschiedenen Faktoren ab. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang der CO<sub>2</sub>-Preis und die Betriebsstunden spezifischer Anlagen. Laut Studien des Fraunhofer Instituts sind Wind- und Photovoltaikanlagen schon heute kostengünstiger als konventionelle Energieträger<sup>13</sup>. Berechnet man Umweltfolgeschäden in die jeweiligen Bilanzen ein, so gilt dieses umso mehr<sup>14</sup>. Nicht unerwähnt soll in diesem Zusammenhang bleiben, dass die Leistungsbereitstellung erneuerbarer Energien naturgemäß vom Wetter abhängt. Diesem Nachteil ist langfristig mit passenden Speichertechnologien zu begegnen. Festzuhalten bleibt dennoch, dass erneuerbare Energien

weitgehend erwünscht und von der Bevölkerung akzeptiert sind, sie sind kostengünstig und überall zuverlässig verfügbar. Sie schaffen Arbeitsplätze und tragen in erheblichem Maße zu einer emissionsarmen Energiebereitstellung bei. Der Umstieg ist folglich aus vielerlei Hinsicht dringend geboten. Es ist dabei falsch anzunehmen, Energiesysteme würden sich nicht entlang gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen verändern. Im Zuge der Energiewende vollzieht sich aktuell ein Transformationsprozess, der den Wärme-, Elektrizitäts-, Mobilitäts- und Industriesektor nachhaltig umgestalten wird. Im **MOBILITÄTSSEKTOR** bestimmt das Thema der Elektromobilität die Diskussion. Parallel verläuft ein Trend zum autonomen Fahren und zu mehr Sicherheitsassistenten. Beide Tendenzen werden den Mobilitätssektor weitreichend verändern. Um die Emissionen in diesem Sektor zu drücken, muss einerseits mehr Fahrradverkehr, ein schnellerer



## Solidarprinzip

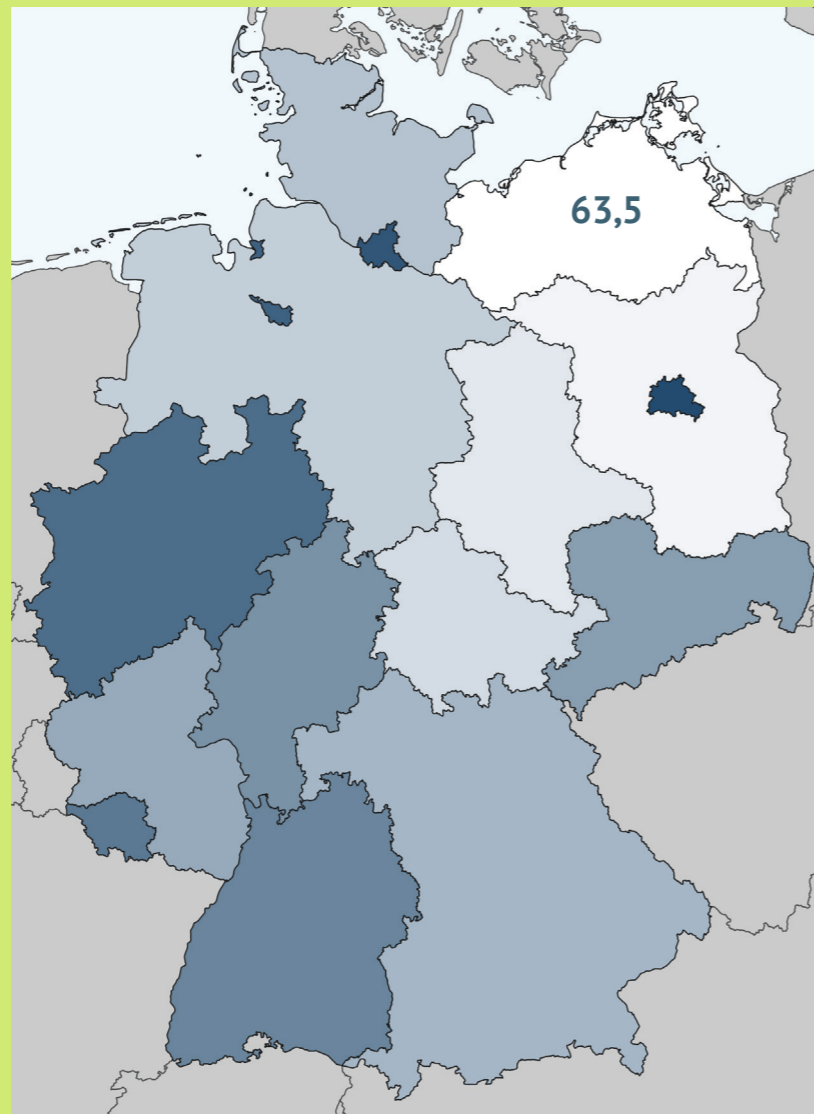


Abbildung 4: Einwohnerdichte je km<sup>2</sup> der Bundesländer im Vergleich von hell zu dunkel zunehmend

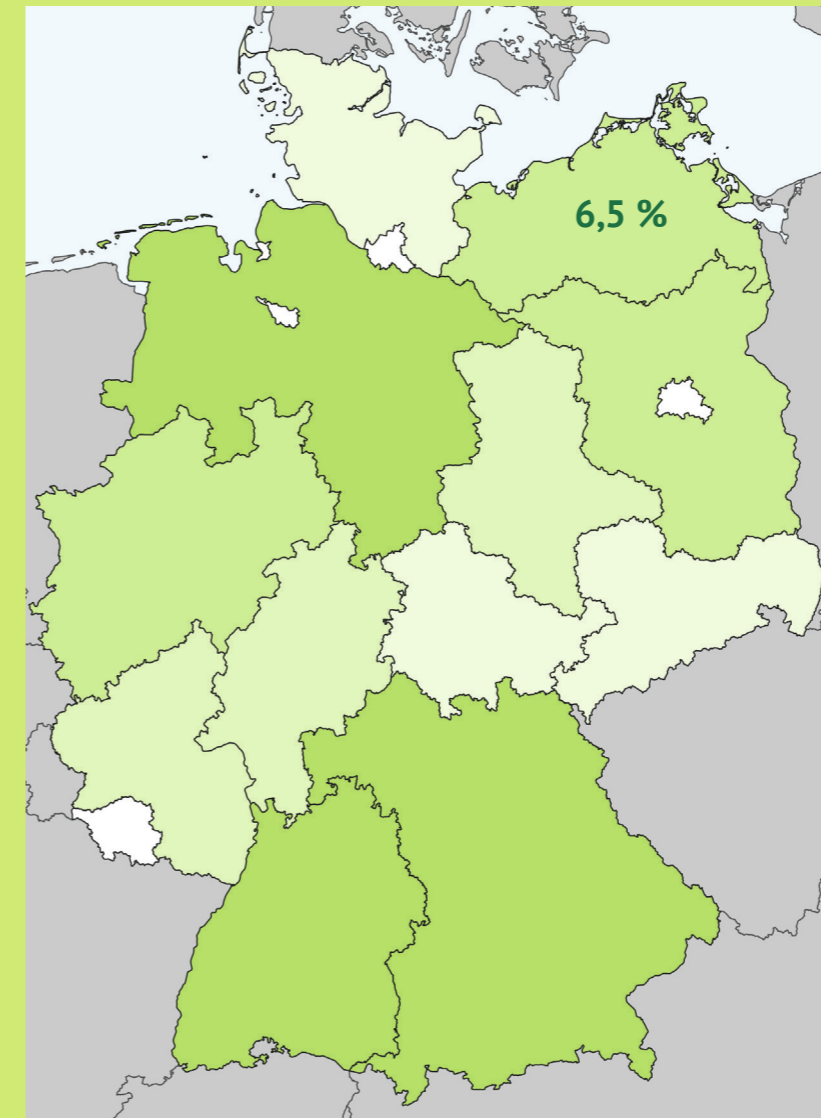


Abbildung 5: Flächenanteil der Bundesländer im Vergleich von hell zu dunkel zunehmend

Ausbau des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs und ein Plus bei Carsharingangeboten zu einer deutlichen Reduzierung des Gesamtverkehrsaufkommens führen und andererseits die Energieeffizienz des Gesamtsystems verbessert werden müssen. Eine weitgehende Umstellung auf Elektrofahrzeuge stellt dafür den größten Hebel dar.

Der **WÄRMESEKTOR** macht rund die Hälfte des deutschen Energieverbrauches aus. In den letzten Jahrzehnten stagnierte der Anteil erneuerbarer Energien in diesem Bereich. Aufgrund der Größe dieses Sektors ist ein fundamentaler Wandel nötig. Heute dominieren häusliche Gasthermen und großtechnische fossile Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung. In Zukunft streben wir ein breites Technologiespektrum an, wobei Wärmepumpen und Power-to-Heat-Anlagen den Schwerpunkt bilden. Darüber hinaus müssen effiziente Wärmenetze weiterentwickelt werden und als zentrale Maßnahme Häuser schneller und wirksamer gedämmt werden. Die größten Veränderungen ergaben

Auf dem Weg zu einem 100 % erneuerbaren Energiesystem ist es wichtig, dass sich jedes Bundesland entsprechend seiner Fläche an der Energieerzeugung beteiligt, da der Ausbau der Erneuerbaren im wesentlichen Flächen benötigt. Im Falle von Mecklenburg-Vorpommern ist der Flächenanteil am Bundesgebiet 6,5 %. Folglich beziehen sich das Energieangebot und der Energiebedarf stets auf 6,5 % der deutschlandweiten Energiemengen. Der Energiebedarf, der inklusive der Mitversorgung deutscher Ballungsgebiete nach dem Solidarprinzip ermittelt wurde, setzt sich im gegenwärtigen Zustand anteilig für Mecklenburg-Vorpommern entsprechend Abbildung 3 zusammen. Bisher wird dieser Bedarf hauptsächlich durch konventionelle Energieträger bereitgestellt. Der heutige und der künftige Energieverbrauch wird im Szenario nach dem Solidarprinzip erhoben: Die nicht direkt im Land benötigte Energie

wird in die Ballungszentren wie Hamburg und Berlin exportiert, denen es an Flächen zur eigenständigen Energieversorgung fehlt. Im Gegenzug profitieren die Bewohner im Land von der industriellen Produktionsleistung dort. Die Energieerzeugung im Szenario resultiert aus dem deutschen Pro-Kopf-Verbrauch der 5.400 Tausend Personen, die gemäß Deutscher Bevölkerungsdichte von 232 Personen / Quadratkilometer auf die Fläche Mecklenburg-Vorpommerns von 23,3 Tausend Quadratkilometer entfallen. Tatsächlich hat das Land aber nur 1.479 Tausend Einwohnende entsprechend einer Bevölkerungsdichte von 63,5. Damit entfallen von der in MV erzeugten Energie 27,4 % direkt auf den von der Bevölkerung im Land verursachten Verbrauch, der Rest entfällt auf die Belieferung der Ballungszentren.

sich in der Vergangenheit im **STROMSEKTOR**. Deutschlandweit lag der Anteil Erneuerbarer im Jahr 2020 bei 45,4 %. In Mecklenburg-Vorpommern lag dieser Anteil 2017 sogar bei 71,9 %.

Einen erheblichen Teil der Energienachfrage macht die Produktion von Grundstoffen im **INDUSTRIESEKTOR** aus. Insgesamt sind hierfür in Mecklenburg-Vorpommern rund 18 TWh nötig. Durch eine höhere Recyclingfähigkeit und die deutliche Reduzierung der benötigten Grundstoffe muss der Energiebedarf auch in diesem Sektor angegangen werden.

Zukünftig werden vermehrt Technologien zum Einsatz kommen, bei denen elektrische Energie auch in anderen Sektoren benötigt wird. In diesen Fällen spricht man von Sektorenkopplung. Dies können Power-to-Heat-Anlagen im Wärmesektor oder elektrische PKWs im Mobilitätssektor sein. Dadurch lassen sich signifikante CO<sub>2</sub>-Emissionsminderungen in allen Sektoren erreichen.

Deutschlandweit lag der durchschnittliche Flächenverbrauch für Siedlungen und Verkehr bei 56 Hektar pro Tag<sup>15</sup>. Auch in Mecklenburg-Vorpommern werden weitere Flächen versiegelt. Daher muss diesem Trend entgegengewirkt werden. Es besteht somit die Forderung, den Flächenverbrauch in Mecklenburg-Vorpommern zu halbieren und den täglichen Zuwachs versiegelter Flächen auf 1,5 ha pro Tag zu begrenzen<sup>16</sup>. Dies würde immer noch eine Steigerung der Flächen von heute 128.628 ha auf dann 136.293 ha bis ins Jahr 2035 ergeben. Das entspricht einer jährlichen Steigerung von 0,53 %/Jahr. Die bundesweite Steigerung liegt bei 0,22 %/Jahr<sup>17</sup>. Versiegelte Flächen haben Einflüsse auf die Umwelt. Sie steigern das Risiko für Hochwasser und lassen

durch eine höhere Zersiedelung die Verkehrsleistung zunehmen. Der Flächenverbrauch für Siedlungen und Verkehr zwingt zur Reduzierung an anderer Stelle. Eine Reduzierung von Waldflächen ist hiervon ausgenommen, denn Wälder sind wichtige CO<sub>2</sub>-Speicher und nützen der hiesigen Biodiversität. Für unser Energieszenario nehmen wir somit eine Verringerung der Landwirtschaftsfläche um 0,7 % in Kauf. Stark anwachsen soll der Flächenanteil für Photovoltaik und solarthermische Anlagen auf Dächern. Hier brauchen wir eine deutliche Steigerung von heute 482 ha auf 9.925 ha im Jahr 2035. Dies entspricht in etwa einer Verzwanzigfachung. Bei diesem Ziel werden rechnerisch 75 % geschätzten des Potentials an

geeigneten Dachflächen in Mecklenburg-Vorpommern genutzt. Essentiell für eine gelingende Energiewende ist zudem ein starker Ausbau solar genutzter Freiflächen. 2017 wurden gemäß der Agentur für erneuerbare Energien 2.062 ha für diesen Zweck genutzt. Als Beitrag zur Deckung des Strombedarfs sind in Zukunft 23.503 ha Photovoltaikfreiflächenanlagen vorgesehen<sup>18</sup>. Dadurch wären 1,6 % der Landwirtschaftsfläche (50 % auf Dauergrünland, 50 % auf Ackerland) mit PV-Anlagen belegt. Ein relativ geringer Anteil von Flächennutzung erscheint einerseits wegen eines vielfachen Energieertrages gegenüber Bioenergie sinnvoll und andererseits unkritisch, wenn er durch entsprechend eingeschränkte NAWARO-Anbauflächen für Bioenergie bzw. durch

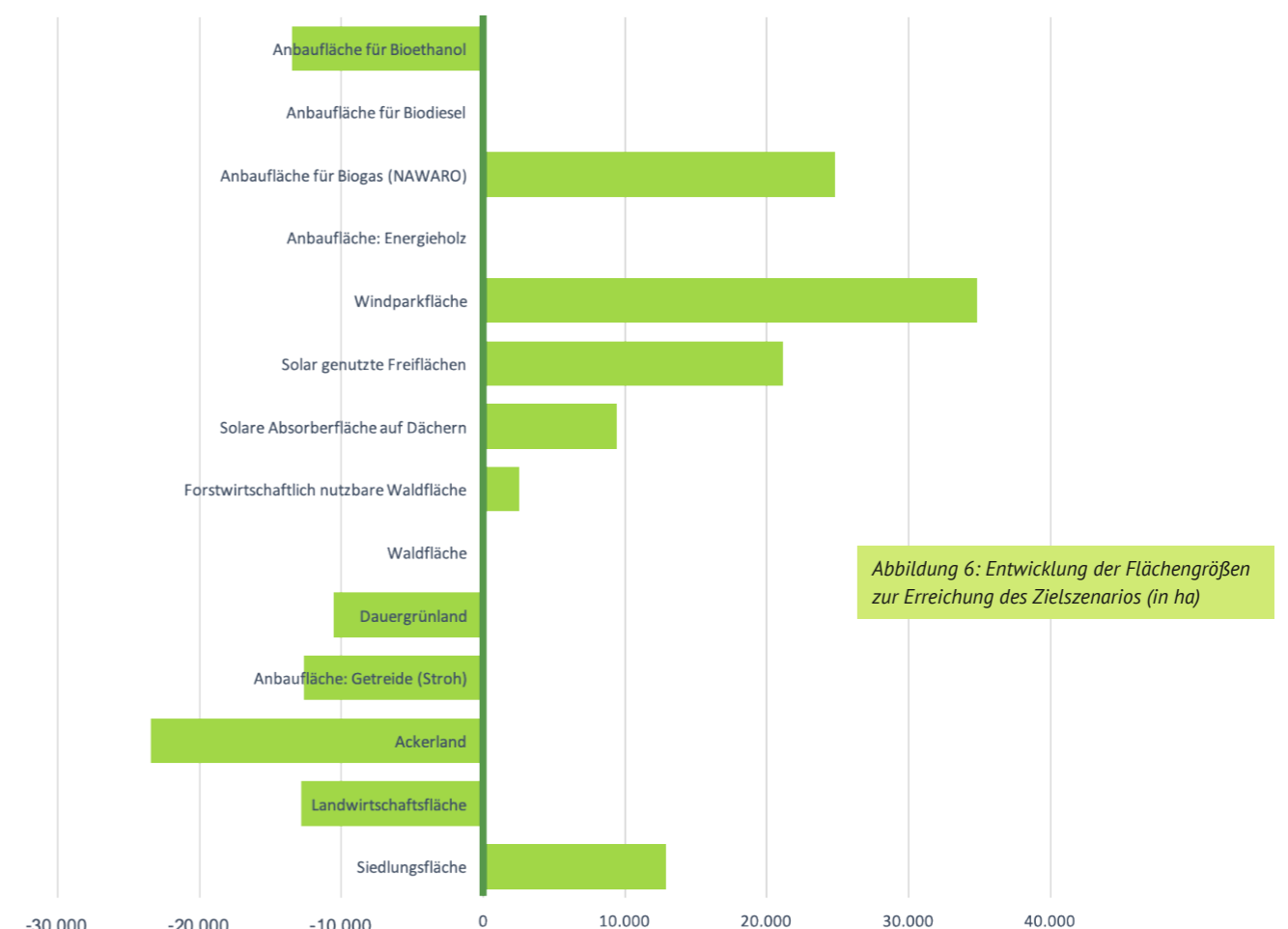
Aufstellung auf Dauergrünland ausgeglichen wird. Photovoltaikanlagen auf Ackerland bringen mit 1.000 MWh/ha/a den 30-fachen Energieertrag pro Hektar gegenüber der Biogasgewinnung (33,5 MWh/ha/a). In der vorliegenden Energiesystemvariante wird auf den Zubau solarthermischer Anlagen weitestgehend verzichtet. Dies resultiert zu einem erheblichen Teil auf der Überlegung, dass in den Wintermonaten das Heizen über die Kombination von Windstrom und Wärmepumpen zu bewerkstelligen sein wird. In den Sommermonaten können die Wärmepumpen dann entsprechend auch mit Photovoltaikanlagen genutzt werden. Diese Technologie ist somit weitgehend redundant zur Nutzung von solarthermischen Anlagen.

Zwingend ist darüber hinaus der Ausbau von onshore Windenergieanlagen. Im Status-Quo sind 11.775 ha als Windparkfläche vorhanden<sup>19</sup>. Dieser Wert muss bis zum Erreichen des Zielszenarios knapp vervierfacht werden. Auf dann zukünftige 46.588 ha. Auf die Gesamtfläche von Mecklenburg-Vorpommern gerechnet entspricht dies einem Anteil von 2,0 %. Das berechnete Potential Mecklenburg-Vorpommerns liegt dabei mit bis zu 14,6 % noch wesentlich höher<sup>20</sup>. Einen moderaten Zuwachs braucht es bei der Anbaufläche nachwachsender Rohstoffe zur Gewinnung von Biogas. Im Status-Quo werden hierfür 7,3 % der Ackerfläche genutzt. Dies entspricht einem absoluten Wert von 78.399 ha<sup>21</sup>. Diesem Wert liegt eine jährliche Stromproduktion von 1.780

GWh zu Grunde. Insgesamt soll bis 2035 die Fläche auf dann 103.479 ha ansteigen. Auf die komplexen Zusammenhänge zwischen Bioenergieanbauflächen und Nahrungsmittelversorgung unter Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitsgesichtspunkten wird in diesem Zusammenhang nicht eingegangen. Dafür wird auf die Studie »Treibhausgasneutrales Deutschland 2050« des Umweltbundesamtes verwiesen. Aufgrund einer erheblich höheren Flächenproduktivität bei Biogas ist es sinnvoll auf die Gewinnung von Pflanzenöl für Biodiesel und Bioethanol zu verzichten und demzufolge den Flächenverbrauch hierfür aufzulösen. Unverändert bleiben die Flächennutzungen von Wasserkraft und die Anbaufläche von Energieholz (600 ha im Status-Quo)<sup>22</sup>.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Flächenpotentiale

	Status-quo	Zielszenario
Siedlungsfläche	128.628 ha	138.757 ha
Landwirtschaftsfläche	1.438.838 ha	1.428.709 ha
Ackerland	1.076.600 ha	1.055.906 ha
Anbaufläche: Getreide (Stroh)	582.100 ha	570.911 ha
Dauergrünland	269.600 ha	259.035 ha
Waldfläche	494.457 ha	494.457 ha
Forstwirtschaftlich nutzbare Waldfläche	442.457 ha	445.011 ha
Solare Absorberfläche auf Dächern	482 ha	9.917 ha
Solar genutzte Freiflächen	2.062 ha	23.193 ha
Windparkfläche	11.775 ha	46.588 ha
Anbaufläche: Energieholz	600 ha	600 ha
Anbaufläche für Biogas (NAWARO)	78.399 ha	103.211 ha
Anbaufläche für Biodiesel	97.933 ha	0 ha
Anbaufläche für Bioethanol	13.471 ha	0 ha



Natürlich bleiben die Entwicklung und der ingenieurtechnische Fortschritt nicht aus. Falls dieser Aspekt ausgeblendet wird, droht das Zielszenario unrealistisch zu werden, werden die Energieeffizienzpotentiale allerdings überschätzt, so kann dies zum gleichen Effekt führen. Im Sinne der Transparenz, zur besseren Vergleichbarkeit und als Diskussionsgrundlage ist es sinnvoll die zu Grunde liegenden Werte aufzuzeigen. Der Energieertrag solarthermischer Anlagen lag 2018 bei 4.212 MWh/ha a. Das Institut für Solarenergieforschung schätzt, dass die zu erzielenden Energieerträge erheblich zu steigern sind. In einer Stellungnahme des Instituts finden sich 5.000 MWh/ha a bis 5.500 MWh/ha a. In dieser Studie wird folglich mit dem arithmetischen Mittelwert fortgefahren. Der Energieertrag von Photovoltaikanlagen als Modulfläche beispielsweise auf Dächern kann in der Gegenwart mit circa 1.232 MWh/ha a angenommen werden<sup>23</sup>. In Zukunft gehen wir von Energieerträgen von 1.725 MWh/ha a aus und bei Photovoltaikanlagen auf Freiflächen von 1.000 MWh/ha a<sup>24</sup>. Die Vollbetriebsstunden bleiben unverändert bei 862 Stunden pro Jahr. Diese Steigerungen des Mittelrenen Ertrags ergeben sind nicht zuletzt dadurch, dass bisher noch kaum solare Anlagen in Mecklenburg-Vorpommern vorhanden sind. Somit kann in Zukunft mit Erträgen aktueller Anlagen kalkuliert werden. Durch effizientere und modernere Windenergieanlagen lässt sich

der spezifische Flächenbedarf für onshore-Windenergieanlagen von derzeit 3,63 ha/MW auf 2,80 ha/MW reduzieren und die jährlichen Vollbetriebsstunden von heute 1.856 Stunden auf 2.143 Stunden steigern<sup>25</sup>. Bei offshore-Windenergieanlagen gehen wir von einer Steigerung der Vollbetriebsstunden von etwa 35 % auf dann 4.500 h/a aus<sup>26</sup>. Dies entspricht einem Mittelwert aktueller und Bestandsanlagen. Diese Annahme ist sinnvoll, weil schon ein nicht unerheblicher Teil der Anlagen gebaut ist<sup>27</sup>. Unverändert bleiben die spezifischen Energieerträge aus Energieholz und Stroh. Bei der Gewinnung von Biogas ist mit einem Rückgang des Methanertrages zu rechnen. Auf der einen Seite werden Effizienzsteigerungen nur noch in geringem Umfang erwartet. Dies liegt an den weitgehend hohen Standards bei Sorten, beim Ackerbau oder beim Gärprozess. Auf der anderen Seite senken Faktoren wie die Optimierung der Bodenerosionen, des Humusgehaltes, der Biodiversität und des Artenschutzes den Ertrag. Aus heutiger Sicht scheinen Wildpflanzen als Biogassubstrat erfolgsversprechend. Deren Methanerträge liegen allerdings erst bei knapp der Hälfte von Mais. Dies führt zu absoluten Einbußen beim Methanertrag von heute 47,1 MWh/ha a auf angenommene 33,5 MWh/ha a<sup>28</sup>. Die Jahresarbeitszahl von Luftwärmepumpen unterliegt in unserer Studie nur einer moderaten Steigerung von derzeit 3,2 auf 3,3. Diese Überlegung resultiert aus einer Studie des

Fraunhofer ISE von Wärmepumpen im realen Betrieb<sup>29</sup>. Hier übertrafen lediglich 2 von 18 Wärmepumpen den Wert von 3,3. Der Bestwert lag in der Studie bei 3,4. Aufgrund der noch zu vollziehenden Lernkurve erscheinen Durchschnittswerte über den heute zu erzielenden Spitzenwerten nicht realistisch. Für Erdwärmepumpen gehen wir von einer Steigerung der Jahresarbeitszahl von 3,9 auf 4,4 aus. Dieser Wert ist laut Angaben des Bundesverbandes Wärmepumpe<sup>30</sup> durch technische Weiterentwicklungen, niedrigere Vorlauftemperaturen und besser gedämmte Häuser zu erreichen. In zukünftigen Energiesystemen mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien wird die Speicherung zunehmend wichtiger. Speicherkonzepte sind sehr vielfältig. Kurz-, Mittel- und Langzeitspeicher jeweils mit einer chemischen oder thermischen Verfahrensweise stehen zur Verfügung. Die Wasser-Elektrolyse zur Gewinnung von Wasserstoff ist im Szenario mit einem Wirkungsgrad von 65 % behaftet. Der Wirkungsgrad der weitergehenden Methanisierung ist mit 80 % angenommen und die Langzeitspeicherung mit anschließender Rückverstromung mit knapp 38 %<sup>31</sup>. Durch eine 3,94 %-ige jährliche Sanierungsrate fällt der spezifische Raumwärmeverbrauch bis 2035 von 124,8 kWh/m<sup>2</sup> a auf 45,2 kWh/m<sup>2</sup> a<sup>32</sup>. Die pro Person bewohnte Fläche steigt von heute 43,2 m<sup>2</sup> auf angenommene 46,5 m<sup>2</sup>.

Tabelle 3: Angenommene Effizienzsteigerungen

	Status-quo	Zielszenario
Solarthermie Energieertrag	4.212 MWh/ha/a	5.250 MWh/ha/a
Photovoltaik (Modulfläche) Energieertrag	1.232 MWh/ha/a	1.725 MWh/ha/a
Photovoltaik (Freifläche) Energieertrag	417 MWh/ha/a	1.000 MWh/ha/a
Jährliche Vollbetriebsstunden Photovoltaik	862 h/a	862 h/a
Spezifischer Flächenbedarf onshore Wind	3,63 ha/MW	2,8 ha/MW
Jährliche Vollbetriebsstunden onshore Wind	1.856 h/a	2.143 h/a
Jährliche Vollbetriebsstunden offshore Wind	3.285 h/a	4.500 h/a
Energieholz (Forst) Energieertrag	25,3 MWh/ha/a	25,3 MWh/ha/a
Energieholz (Acker) Energieertrag	29,9 MWh/ha/a	51,4 MWh/ha/a
Getreidestroh Energieertrag	23,8 MWh/ha/a	23,8 MWh/ha/a
Nutzungsgrad Strom aus biogenen Brennstoffen	28 %	36,2 %
Abwärme aus Verstromung biogener Brennstoffe	16,2 %	55 %
Nutzungsgrad Wärmenetze	75 %	75 %
Biogas Methanertrag	47,1 MWh/ha/a	33,5 MWh/ha/a
Nutzungsgrad Biogasverstromung	37,5 %	45 %
Nutzungsgrad Biomethan-Kraftstoff	94 %	94 %
Nutzungsgrad Biogas zu Flüssigkraftstoff	45 %	45 %
Biodiesel Energieertrag	16,1 MWh/ha/a	12,9 MWh/ha/a
Luftwärmepumpen (Jahresarbeitszahl)	3,2	3,3
Erdwärmepumpen (Jahresarbeitszahl)	3,9	4,4
Nutzungsgrad Wasserelektrolyse	-	65 %
Kraftstoffsynthese	-	63 %
Wasserstoff Methanisierung	-	80 %
Stromspeicherung gesamt	-	37,7 %
Einfluss der Endgeräteeffizienz in Haushalten	100 %	73 %
Nutzungsgrad Brennstoffe für Gebäudewärme	80 %	85 %
Nutzungsgrad Brennstoffe für Prozesswärme	70 %	80 %
Nutzungsgrad Elektrotraktion Personenverkehr	78 %	78 %
Nutzungsgrad Kraftstofftraktion Personenverkehr	25,5 %	28,8 %
Nutzungsgrad Brennstoffzelletraktion	35 %	40 %
Nutzungsgrad Elektrotraktion Güterverkehr	78 %	78 %
Nutzungsgrad Kraftstofftraktion Güterverkehr	27,0 %	30,1 %
Kraftstoffverbrauch in der Luftfahrt	100 %	71,9 %



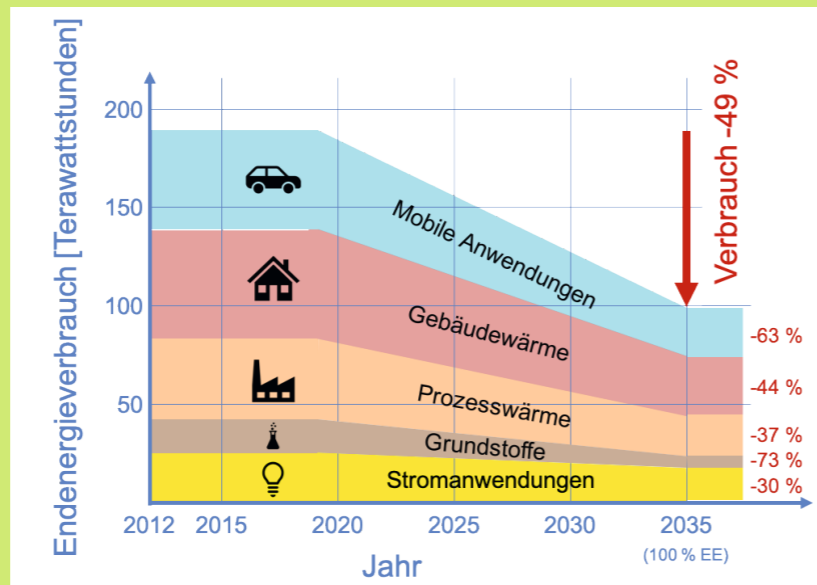


Abbildung 7: Notwendige Entwicklung des Endenergieverbrauchs bis 2035 in den einzelnen Energiesektoren.

Jedes Energiesystem basiert zum einen auf dem entsprechenden Bedarf und zum anderen auf der Energiebereitstellung zur Bedarfsdeckung. Für ein zu 100 % klimaneutrales und effizientes Energiesystem braucht es sowohl Einsparungen als auch die vollständige Umstellung fossiler Energieträger zu erneuerbaren. Wind- und Sonne sind dabei klar die vorherrschenden Technologien. Hierzu bedarf es Flächen und Effizienzsteigerungen. Beide Punkte wurden in den vorangehenden Abschnitten erläutert. Es stellt sich allerdings die berechnete Frage, wie viel Solar- und Windenergieanlagen werden benötigt, um ein sicheres, bezahlbares und effizientes Energiesystem aufzubauen? Man könnte auch fragen: Wieviel werden wir noch brauchen und wo soll es herkommen? Neben der wirtschaftlichen Entwicklung beeinflusst auch die Bevölkerungszahl den Endenergieverbrauch erheblich. Hierfür wird vom aktuellen Status-Quo ausgegangen. Dieser Energiebedarf muss zukünftig alleine durch erneuerbare Energien

Insgesamt werden im Zielszenario Endenergie-Einsparungspotentiale von 49 % ausgeschöpft. Im Detail soll der Mobilitätssektor 63 % weniger Energie verbrauchen. Diese hohe Einsparung ist nicht mit einer einzigen Maßnahme zu erzielen. Einen großen Einfluss hat ein hoher Anteil von Elektromobilität sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr. Elektromotoren haben eine hohe Effizienz. Sie beträgt in etwa das Dreifache von herkömmlichen Verbrennungsmotoren<sup>33</sup>. In unserer Studie gehen wir von einem knapp 90 %-igen Anteil von Elektromobilität aus. Darüber hinaus wird auf eine generelle Reduzierung der Verkehrsleistung gesetzt. Mehr Homeofficeangebote, mehr Angebote zum Carsharing, besseren öffentlichen Nah- und Fernverkehr und die Förderung von Mitfahrzentralen können ein deutlich sinkendes Verkehrsaufkommen bewirken. Eingepreist in diesen Gedanken ist eine steigende Güterverkehrsleistung und eine

sinkende Luftverkehrsleistung. Im Gebäudewärmesektor muss der Energiebedarf knapp halbiert werden. Hier liegt der Fokus auf der energetischen Sanierung des Gebäudebestandes. Wir wollen unsere Bemühungen deutlich steigern und eine jährliche Sanierungsrate von 3,94 % erreichen. Dadurch erreichen wir bis 2035 knapp 60 % der hiesigen Häuser. Zum Teil wird dieser Beitrag durch einen höheren Nutzungsanspruch revidiert, sodass schlussendlich mit einer Gesamtreduzierung von 44 % zu rechnen ist. Der Energieverbrauch im Sektor der Prozesswärme soll um 37 % sinken. Diese Reduzierung orientiert sich an der Annahme, dass der Energieverbrauch im produzierenden Gewerbe abnimmt. Dies liegt unter anderem an der Verlagerung hin zu Dienstleistungen. Insgesamt wird in dieser Studie von einer Minderung in diesem Bereich um 7 % ausgegangen. Weitere Einsparpotentiale können in verschiedenen Studien abgelesen werden. Durch Einzelmaßnahmen zur Effizienzsteigerung der thermischen

Tabelle 4: Detaillierte Darstellung der Verbrauchsentwicklung in den Energiesektoren.

Sektor	Prozentuale Veränderungen	Absoluter Wert im Status-quo	Absoluter Wert im Zielszenario
Mobile Anwendungen	-63 % • Effizienz (kWh/Pkm): -49 % • Nutzungsanspruch (Pkm/Pers.): -14 %	52.155 GWh/a	19.213 GWh/a
Gebäudewärme	-44 % • Effizienz (Wärmeschutz, San.-Rate): -52 % • Nutzungsanspruch (qm/Pers.): +8 %	58.730 GWh/a	32.670 GWh/a
Prozesswärme	-37 % • Effizienz (Produktions-Proz.): -30 % • Nutzungsanspruch (Prod.-Vol./Pers.): -7 %	34.840 GWh/a	22.037 GWh/a
Grundstoffe	-73 % • Effizienz (Kunststoff-Recycling): -10 % • Nutzungsanspruch (Kunststoff-Vol./Pers.): -63 %	18.162 GWh/a	6.720 GWh/a
Strom-Anwendungen	-30 % • Effizienz (Elektrische Geräte): -26 % • Nutzungsanspruch (El. Geräte/Pers.): -4 %	25.331 GWh/a	17.752 GWh/a
Umwandlungsverluste		~45 TWh/a	~31 TWh/a

Prozesse in der Industrie besteht ein technisches Minderungspotential von 13,6 % (Stand 2006), durch Prozess und Systemoptimierungen, die über die Einzelmaßnahmen hinausgehen ist ein weiteres Potential von 22 % realisierbar<sup>34</sup>. Anzustreben ist weiterhin eine Reduzierung des Energieverbrauches für die Herstellung von Grundstoffen für die Kunststoffherzeugung. Dieses Potential beruht auf zwei Säulen. Zum einen müssen wesentlich mehr Grundstoffe recycelt werden und zum anderen muss wesentlich weniger Verpackungsmaterial verwendet werden. Einsparpotentiale müssen auch bei aktuellen Stromanwendungen gehoben werden. Große Potentiale ergeben sich bei der Effizienzsteigerung elektrischer Geräte. Allein in diesem Bereich werden 26 % weniger Energie benötigt werden<sup>35</sup>.

ausgeglichen werden. Dazu muss die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern so schnell wie möglich sukzessive gemindert werden. Es braucht ein 100 % klimaneutrales Energiesystem, welches folglich keine treibhauswirksamen Gase emittiert. Klar ist, dass hierfür andere – erneuerbare Energien – teilweise stark ausgebaut werden müssen. Im Detail heißt das eine Versechsfachung der Strommenge aus Windenergieanlagen. Dazu muss die installierte Leistung von heute 3,2 GW auf 17 GW gesteigert werden. Dazu bedarf es 2 % der Gesamtfläche unseres Bundeslandes. Offshore müssen von derzeit 5,9 GW weitere Anlagen zugebaut werden, sodass schlussendlich eine installierte Leistung von 54 GW in Nord- und Ostsee vorhanden ist. Diese werden im Rahmen der Studie nach Bevölkerungsanteil zu Mecklenburg-Vorpommern hinzugerechnet. Die Stromgewinnung aus Solaranlagen muss deutlich ausgebaut werden. Um die gesetzten Ziele zu erreichen, müssen 75 % der geeigneten Hausdä-

cher mit PV-Anlagen bestückt werden und darüber hinaus braucht es auf 1 % der Landesflächen Sonnenkraftwerke. Neben der Energiegewinnung dürfen andere Themen nicht aus dem Blick geraten. Hierzu zählen unter anderem eine Verbesserung der Bodenerosionen, des Humusgehaltes, der Biodiversität und des Artenschutzes. Deshalb ist es richtig von sinkenden Erträgen beim Energiepflanzenanbau auszugehen. Ebenso müssen Wälder geschützt und nachhaltige Forstwirtschaft betrieben werden, sodass auch in diesen Bereichen von sinkenden Energieerträgen auszugehen ist. Zuwächse werden allerdings in den Bereichen der Strohverwertung, in der besseren Nutzung von Bioabfall und bei Klärschlammkraftwerken erwartet. Einen überaus deutlichen Ausbau braucht es im Bereich der Wärmepumpen. Im Bereich der Wärme ist der erneuerbare Energieanteil derzeit sehr gering und kaum ansteigend. Abhilfe können Wärmepumpen leisten, sofern sie mit erneuerbaren Energien gespeist werden.

# Speicher

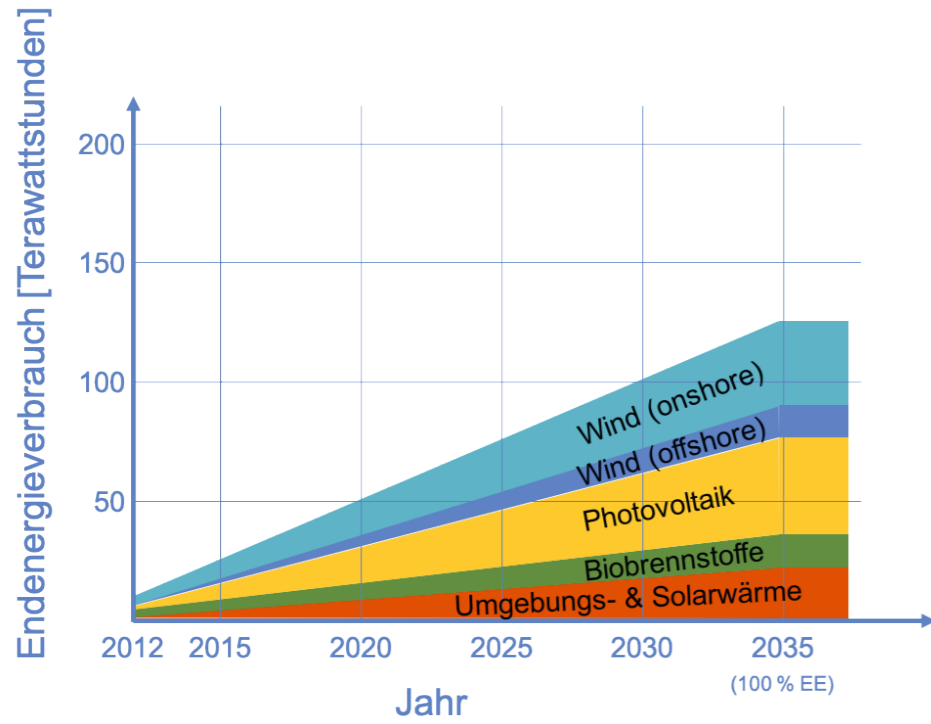


Abbildung 8: erneuerbare Energien bis 2035

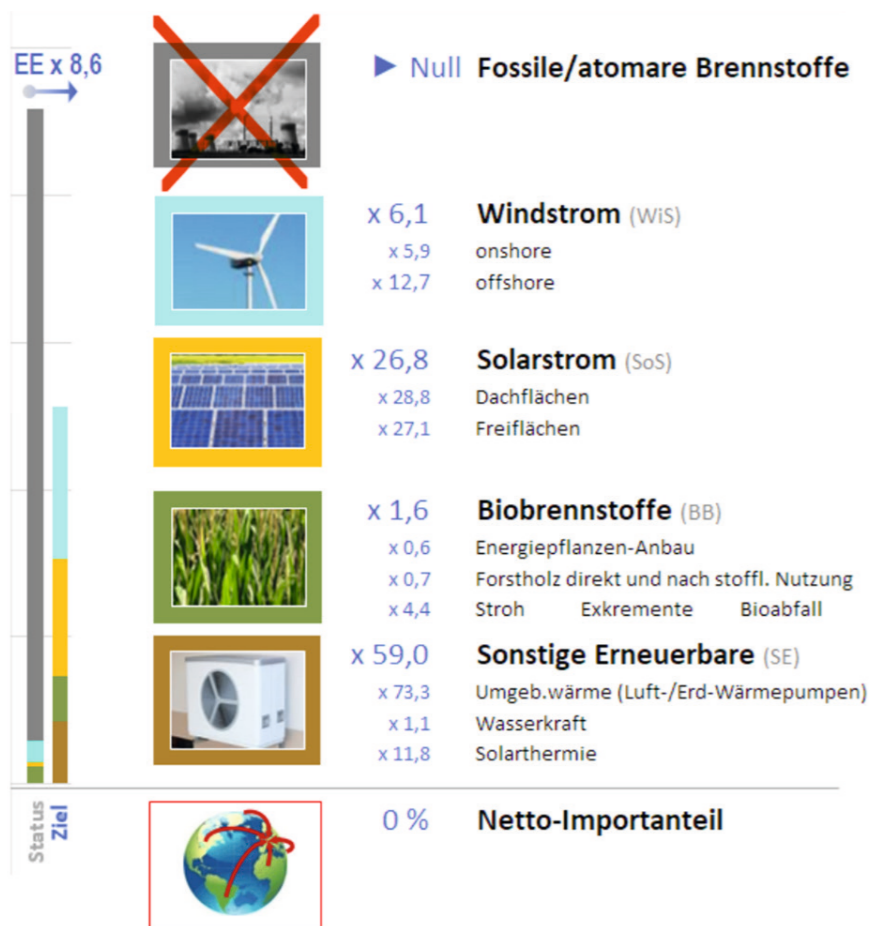


Abbildung 9: Energieversorgung Mecklenburg-Vorpommern 2035: Wo soll es herkommen?

Da der Energiebedarf die Erzeugung aus erneuerbaren Quellen in bestimmten Zeiten, zum Beispiel an kühlen, windarmen und trüben Novembertagen zeitweise übersteigen kann, ist es notwendig, Energie aus Überschusszeiten in Zeiten des Mangels übertragen zu können. Während sich fossile Energieträger problemlos zu diesem Zweck lagern lassen und das für erneuerbare Brennstoffe wie Energiepflanzen, Holz oder Stroh ebenfalls kein Problem darstellt, bedarf es für die großtechnische Lagerung (erneuerbaren) Stroms einer neu zu errichtenden Speicherinfrastruktur. Um Aussagen zur Speichergröße und installierten Ladeleistung und damit

auch über mögliche Speichertechnologien treffen zu können, wurde die reale erneuerbare Stromerzeugung aus Wind- und Photovoltaikanlagen in Deutschland im Jahr 2012 von der zu diesem Zeitpunkt installierten Leistung auf die in »100prosim« ermittelten Größen im Endausbau skaliert. Daraus ergeben sich die im Diagramm dargestellten Beiträge zur Stromerzeugung in einem 100 % erneuerbaren Mecklenburg-Vorpommern. Im nächsten Schritt wurde tagesweise die Differenz zwischen Erzeugungskapazität und Jahreslastkurve gebildet, um die nötige Speicherkapazität zu ermitteln. Positive Werte tragen dabei zur Füllung und negative Werte zur

Entleerung des Saisonalspeicher bei. Die genaue Speichergröße hängt wesentlich vom Verhältnis zwischen installierter Wind- und Solarleistung ab. Während Photovoltaikanlagen in den Wintermonaten nur sehr geringe Strommengen erzeugen, sammelt hier die Windenergie in der Regel gute Erträge. Das vorgestellte Szenario wurde hinsichtlich der sozial und politisch verträglichen Flächenkulisse optimiert und nicht hinsichtlich des kleinstmöglichen (und damit günstigsten) Speichers. Dies ist jedoch eine spannende eigene Untersuchung, da die Energiespeicher nach heutigem Wissensstand ein wesentlicher Kostentreiber sein werden (siehe Kapitel »Kosten«).

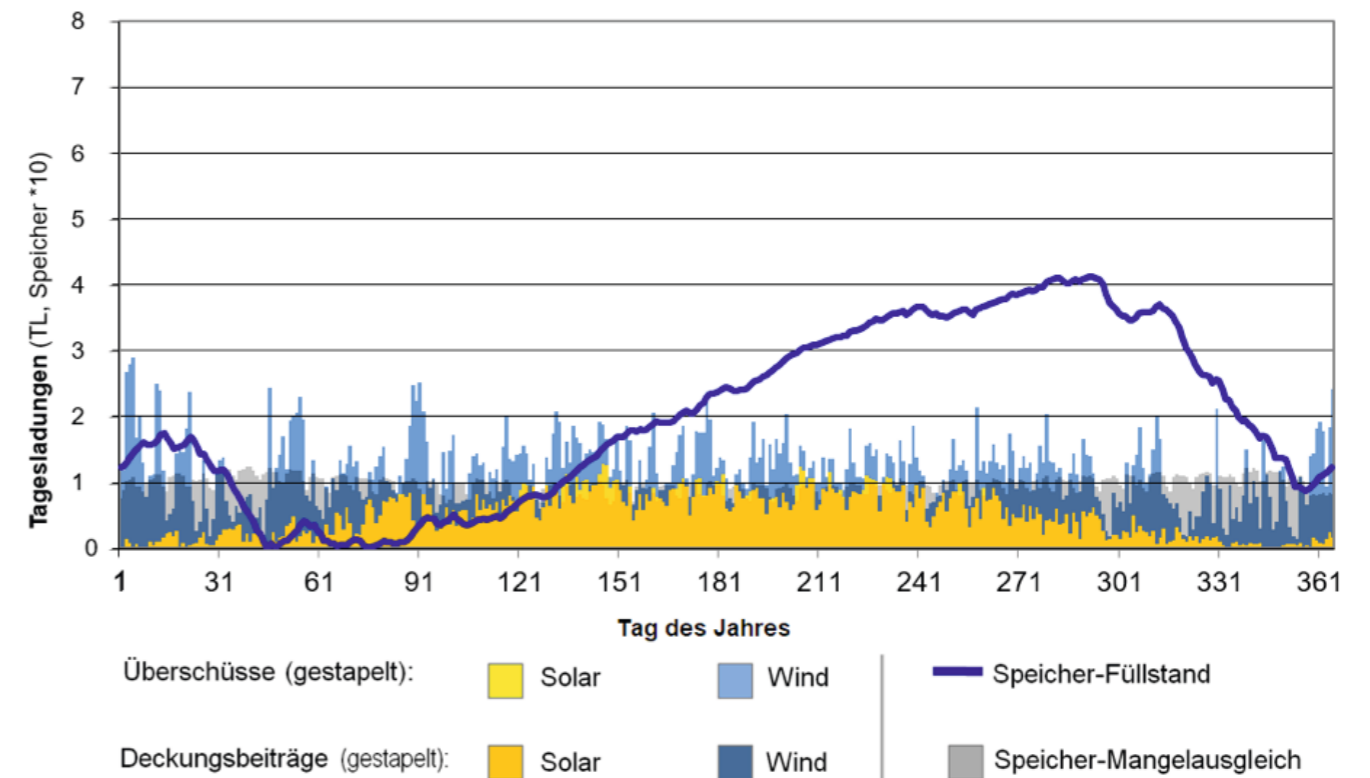


Abbildung 10: Szenario »Mecklenburg-Vorpommern 100 % EE« (210825): Jahresgang Strom (Ziel)

Das Optimum zwischen Solar- und Windstrom mit Blick auf den Speicher ergibt sich bei einer Flächenkulisse von ca. 2,8 % der Landesfläche für Windenergieanlagen. Die Speicherkapazität könnte in diesem Fall um knapp 40 % reduziert werden. Im hier gewählten Szenario muss der Speicher im maximalen Füllstand knapp 42 Tagesladungen (die im Mittel an einem Tag verbrauchte Strommenge) bzw. 7,7 TWh aufnehmen können, um zu jeder Tages- und Nachtzeit im Jahr die Stromversorgung garantieren zu können. Zugleich muss die Ladeleistung bzw. Entladeleistung ausreichen, um die Überschussstrommengen an ertragsreichen Tagen aufzunehmen und die benötigte Energie an ertragsarmen Tagen wieder freizusetzen. Um die Ladeleistung nicht überzudimensionieren und jede noch so seltene Erzeugungsspitze aufzunehmen, wurde für die Auslegung eine Abregelung von 6,5 % (aktuell werden ca. 3 % abgeregelt) der Strommenge zugelassen. Die hier gewonnene Energie stünde in keinem Verhältnis zu den Infrastrukturinvestitionen. Unter diesen Überlegungen ergibt sich eine Lade-/Entladeleistung für Mecklenburg-Vorpommern von 6,8 GW. Bei der Auslegung eines Speichers bzw. Speichertyps spielen sowohl die Speicherkapazität, als auch die Leistung eine entscheidende Rolle. Oftmals lässt sich mit Blick auf die Gesamtkosten jedoch nur einer der beiden Faktoren gut optimieren. Auch die technischen Potentiale müssen bei der Speicherwahl berücksichtigt werden. So ist ein Pumpspeichersystem zum Beispiel ein etablierter

Stromspeicher, wegen der äußerst geringen Höhendifferenzen für MV jedoch denkbar ungeeignet. Für eine solch enorme benötigte Kapazität eignet sich laut Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme<sup>36</sup> vor allem ein System für den gesuchten Speicher: Eine Wasserstoffelektrolyse mit unterirdischem Kavernenspeicher in Salzstock-Höhlen. Die Kosten pro kWh Speicherkapazität sind hier mit 28 € zum Beispiel etwa eine Größenordnung kleiner, als bei Batteriespeichern. Dafür sind die Kosten pro installierte Leistung deutlich höher, was jedoch bei weitem nicht den Kostenvorteil aus der Speichergroße kompensieren kann. Die Kosten für den (bzw. die) Wasserstoffspeicher würden sich insgesamt auf etwa 220 Mrd. € belaufen. Für reine Batteriespeicher wären die Kosten momentan fast 20-mal höher. Die Batteriepreise fallen zwar aktuell kontinuierlich, werden jedoch durch die Rohstoffe und die begleitende Hardware/Installation nach unten begrenzt. Aller Voraussicht nach lässt sich daher der Vorsprung der Wasserstoffspeicher auch in Zukunft nicht einholen. Da das vorliegende Modell eine völlig entkoppelte Versorgung des Bundeslandes zugrunde legt, die in der Realität natürlich nicht gegeben ist, lassen sich die Speicherkosten unter Berücksichtigung von Stromimporten und -exporten stark reduzieren, da sich Regionen mit jeweils besseren/schlechteren erneuerbaren Erträgen gegenseitig »aushelfen« können. Das ist natürlich auf gewisse maximale Entfernungen limitiert und setzt einen entsprechenden Netzausbau voraus.

## Umsetzungsstrategie

Das 1,5 °C Ziel kann noch erreicht werden, wenn das Energiesystem bis 2035 zu 100 % aus erneuerbaren Energien gespeist wird. Mithilfe des hier vorgestellten Zukunftsszenarios können klare Zwischenziele, insbesondere bezüglich zukünftigen Energieeinsparungen, zukünftiger Flächennutzung und dem Ausbau erneuerbarer Energien benannt werden.

Zur Erreichung dieser Ziele braucht es unter anderem:

- » ein Landes Klimaschutzgesetz mit verbindlichen, zeitlich definierten Treibhausgas-Minderungszielen: Im Vergleich zu 1990 müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2025 um 70 %, bis 2030 um 90 % und bis 2035 um 100 % gesenkt werden.
- » einen integrierten Klimaschutzplan MV, mit sektorspezifischen Vorgaben, einem wirksamen Monitoring und regelmäßiger Fortschreibung in einem Turnus von fünf Jahren. Die Umsetzungsergebnisse müssen in einem jährlichen Energiewende- und Klimaschutzbericht veröffentlicht werden.
- » eine bessere Einbeziehung der Kommunen in Klimaschutzmaßnahmen auch durch neue gesetzliche Rahmenbedingungen zur Aufgabewahrnehmung.

Neben der Windkraft an Land und auf See brauchen wir auch Solarenergie, Biomasse und Geothermie für einen ausgewogenen Energiemix. Der Zuwachs von Erneuerbaren Energien muss an klare jährliche Zwischenziele gekoppelt werden. Der faktische Ausbaustopp für die Wind- und Solarstromerzeugung muss überwunden werden. Auf landes- und regionalplanerischer Ebene sind deshalb die

Ausschluss- und Restriktionskriterien für die Nutzung erneuerbarer Energien neu zu justieren. Der Ausschluss von Standorten muss auf Situationen beschränkt werden, in denen diese Nutzungen rechtlich oder tatsächlich unmöglich sind. Dies gilt auch für den Austausch älterer Anlagen durch neuere, das sogenannte Repowering. Um die Energieversorgung in der Zukunft sicherzustellen, braucht es verbindliche Zielvorgaben zum Ausbau der erneuerbaren Energien:

- » Windenergie auf 2 % der Landesfläche.
- » Freiflächenphotovoltaik auf 1 % der Landesfläche.
- » Solarenergie auf 75 % der Gebäude. Dazu muss der Zubau von Photovoltaik auf Dachflächen attraktiver gemacht und auf landwirtschaftlich ertragsarmen Böden deutlich erleichtert werden. Dazu kommt die deutliche Erleichterung und Fördern des Umstieges von Öl- oder Gasheizungen auf hocheffiziente Wärmepumpen und Solarthermie. Im Energiesektor liegen große Einsparpotentiale. Derzeit werden

40 % des deutschen Endenergieverbrauchs für Raumheizung und Warmwasser verwendet. Im Wärmesektor werden somit ein Drittel der deutschen CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Die Reduzierung des Verbrauchs in Gebäuden, hohe Energieeffizienzstandards und der Ausstieg aus der fossilen Wärme sind vor diesem Hintergrund zentrale Themen der Energiewende und damit grundlegend für den Klimaschutz. Um die Klimaziele zu erreichen, müssen die Gebäude in Deutschland einen nahezu klimaneutralen Energiestandard erreichen. Heute entsprechen lediglich die Hälfte der 18 Millionen Wohngebäude in Deutschland dem aktuellen Wärmeschutzstandard. Durch effektivere Isolierungen muss die Wärme in den Gebäuden gehalten werden und überall da, wo es möglich ist, sollte Restwärme genutzt werden. Flächenheizungen mit geringeren Vorlauftemperaturen ermöglichen es, Wärmepumpen und Abwärme aus Industrieprozessen besser zu nutzen und Transportverluste in Wärmenetzen gering zu halten.





Grundlegend übereinstimmend berichten alle betrachteten Studien wie zum Beispiel die »Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aus dem Jahr 2017, dass eine vorausschauende Energiesystemplanung mit entsprechender politischer Steuerung einen deutlichen Kostenvorteil gegenüber einer rein marktwirtschaftlich gesteuerten Transformation mit sich bringt. Zudem geht man davon aus, dass sich der Übergang wesentlich schneller und mit signifikant weniger wirtschaftlichen und sozialen »Kollateralschäden« vollziehen lässt. Die Erkenntnis, dass eine »vom Ende gedachte« Energiewende aus ganz verschiedenen Perspektiven vorteilhaft ist, auch um die richtigen Pfadentscheidungen zu treffen, war die ursprüngliche Motivation der vorgelegten Studie. Den Betrachtungen der Kosten eines Umbaus des Energiesystems hin zu einer 100 % erneuerbaren Energieversorgung sein zwei Dinge vorausgeschickt.

» Die Studie »Net-Zero Europe Decarbonization pathways and socioeconomic implications« des Beratungsunternehmens McKinsey aus dem Jahr 2020<sup>37</sup> kommt zu dem Schluss, dass der Umbau hin zu einem klimaneutralen System unter dem Strich kostenneutral zu realisieren ist, da sich Investitionen und Subventionen zeitnah zum Beispiel durch Mehreinnahmen und vermiedene Folgekosten aufheben. » Das Simulationstool »100prosim« enthält aktuell keine Optimierung hinsichtlich der Transformationskosten. Im gegenwärtigen Zustand

ließen sich die Kosten für verschiedene Szenarien nur in einem post-mortem Vergleich gegenüberstellen.

Bei den im Folgenden veranschlagten Kosten handelt es sich um eine Abschätzung, motiviert anhand Studien und Untersuchungen von Dritten, die eine größenmäßige Einordnung bieten soll. Vor dem Hintergrund rascher technologischer Entwicklungen und Fluktuationen der Weltwirtschaft müssen entsprechend große Unsicherheiten berücksichtigt werden.

In der folgenden Tabelle sind die Investitionskosten entsprechend der »100prosim« Cluster sowohl für die Verbrauchsminderungsmaßnahmen als auch für das erneuerbare Energiesystem für Mecklenburg-Vorpommern aufgeführt. Wo sich keine landesspezifischen Daten aus »100prosim« ableiten ließen, wurden bundesweite Annahmen (gekennzeichnet durch \*) verwendet und, anders als bei den Energiemengen, über den Bevölkerungsanteil auf MV heruntergebrochen, da die Investitionen natürlich nicht vom Flächenbedarf, sondern von der Finanzkraft abhängig sind. Investitionen die ausschließlich durch die Industrie geleistet werden, sind kursiv gestellt. Die Kosten für den Ausbau einer flächendeckenden Ladeinfrastruktur sind hier nicht erfasst. Laut Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. wird diese jedoch unter bestimmten Rahmenbedingungen ein sich rasch selbst tragendes Geschäftsmodell. Der investierte Betrag wäre damit auch der positiven Seite der Industrieinvestitionen zuzurechnen. Die Gesamtsumme der Investitionen für Mecklenburg-Vorpommern beläuft

sich auf ca. 328 Mrd. €. Zum Vergleich: Das Brutto-Inlands-Produkt für MV lag 2020 bei 46 Mrd. € und der Landeshaushalt bewegt sich um ca. 8 Mrd. € im Jahr.

Die Investitionen müssen jedoch nicht allein von der Landesebene geschultert werden, sowohl auf Bundes- als auch auf Europa-Ebene liegen verschiedene Fördermittel und Verantwortlichkeiten. Zudem wird ein großer Teil durch private bzw. privatwirtschaftliche Gelder abgedeckt und muss folglich nicht vollständig von der öffentlichen Hand getragen werden. So lassen sich aus Tabelle 5 Investitionen von etwa 263,4 Mrd. € der privaten Wirtschaft zuordnen. Diese Investitionen werden für einen deutlichen wirtschaftlichen Aufschwung in Mecklenburg-Vorpommern sorgen.

Die verbleibenden 64,4 Mrd. € müssen zwischen Privaten und der öffentlichen Hand aufgeteilt werden. McKinsey kommt unter der Annahme einer CO<sub>2</sub>-Bepreisung von 50 – 100 €/t (ein für Deutschland realistisches Szenario) auf einen öffentlichen Anteil von ca. 20 %, was in etwa der Größenordnung der heutigen KfW-Förderung für energetische Wohngebäudesanierung oder Elektromobilität entspräche. Entsprechend werden 50,7 Mrd. € von Privatpersonen getragen und 13,7 Mrd. von der öffentlichen Hand.

Verteilt man diesen Betrag auf die verbleibenden 14 Jahre bis 2035, ergibt sich eine jährliche mittlere Investition von 0,9 Mrd. € aus öffentlichen Mitteln in Mecklenburg-Vorpommern.

Dem gegenüber stünden jedoch wie bereits erwähnt deutliche Mehreinnahmen, wie allein schätzungsweise

jährlich 0,5 Mrd. € Gewerbesteuerreinnahmen beim Endausbau von 5 GWpeak Offshore Windenergie<sup>50</sup>. Auch der nochmals größere Ausbau der Onshore Windenergie (ca. 1 Mrd. € Gewerbesteuer) und Photovoltaik (1,1 Mrd. €) sowie die dafür nötige

Industrie würde zu ganz erheblichen staatlichen Mehreinnahmen führen. Die Aussage von McKinsey, dass sich der Umbau des Energiesystems unter dem Strich kostenneutral realisieren lässt, kann somit grundsätzlich gefolgt werden. Für das Land

Mecklenburg-Vorpommern wäre aufgrund der günstigen Bedingungen wahrscheinlich sogar eher eine deutlich positive Kostenbilanz zu erwarten.

Tabelle 5: Investitionskosten für ein 100 % erneuerbares Energiesystem in Mecklenburg-Vorpommern

	Investment	spezifische Kosten oder bundesweiter Ansatz	absolute Kosten MV
<b>Verbrauchsseitige Investitionen</b>			
Elektromobilität	856.520 Elektrofahrzeuge <sup>38</sup>	36.000 €/PKW <sup>39</sup>	30,8 Mrd. €
Gebäudewärme (Heizung und Dämmung)*	energetische Sanierung für klimaneutralen Gebäudebestand	BRD: 750 Mrd. € <sup>40</sup>	15 Mrd. €
Industrie*	Dekarbonisierung der Raffinerien sowie der Stahl-, Zement- und Chemieindustrie	BRD: 40 Mrd. € (geschätzt anhand BMWI Fördertopf zum klimaneutralen Umbau der Stahlindustrie) <sup>41</sup>	0,8 Mrd. €
Stromanwendungen (elektrische Geräte)	Austausch elektrischer (klein) Geräte bei einer Effizienzsteigerung von im Mittel 25 %	Kostenneutral im Rahmen der normalen Abschreibung	0 Mrd. €
<b>Erzeugungssseitige Investitionen</b>			
Windausbau Onshore	11 GWpeak	1400 €/kW <sup>42</sup>	15,4 Mrd. €
Windausbau Offshore	4 GWpeak	3000 €/kW <sup>43</sup>	12 Mrd. €
Photovoltaik (Dach)	19,5 GWpeak	900 €/kW <sup>44</sup>	17,6 Mrd. €
Photovoltaik (Freifläche)	26,9 GWpeak	530 €/kW <sup>45</sup>	14,3 Mrd. €
Biobrennstoffe	Steigerung der thermischen Verwertung von Stroh	kostenneutral	0 Mrd. €
Solarthermie	1.586.720 qm	600€/qm <sup>46</sup>	1 Mrd. €
Netzausbau*	Ausbau der Übertragungs- und Verteilnetze	BRD: 139 Mrd. € <sup>47</sup>	3 Mrd. €
Elektrolyseure	6,8 GW	250 €/kW <sup>48</sup>	1,7 Mrd. €
Wasserstoffspeicher	7,7 TWh	28 €/kWh <sup>49</sup>	217 Mrd. €
<b>Gesamtsumme</b>			<b>328 Mrd. €</b>

Die Szenario-Studie untersucht die Machbarkeit eines vollständig erneuerbaren Energiesystems für Mecklenburg-Vorpommern bis 2035. Dabei wird ein besonderer Fokus auf die politisch entscheidende Frage der Flächenverfügbarkeiten für den Ausbau der erneuerbaren Energien gesetzt. Zusätzlich werden wesentliche technologische Entwicklungspotentiale sowohl auf der Erzeugung- als auch der Verbrauchsseite sowie mögliche Reduktionen des Konsums und eine verstärkte Sektorenkopplung berücksichtigt. Neben den üblichen Sektoren Elektroenergie, Gebäudewärme und Mobilität wurden auch die Grundstoff- und Prozessindustrie mit einbezogen. Den Kalkulationen wird ein Solidarprinzip zugrunde gelegt; Für eine angenommene mittlere Bevölkerungsdichte erzeugen alle Bundesländer entsprechend ihrer Grundfläche den jeweiligen Anteil am deutschen Energieverbrauch, also 6,5 % im Falle Mecklenburg-Vorpommerns.

## drei zentrale Erkenntnisse

- » Es ist physikalisch und technologisch sehr gut machbar, ein 100 % erneuerbares Energiesystem für Mecklenburg-Vorpommern aufzubauen.
- » Die notwendigen Investitionen werden durch resultierende Mehreinnahmen gedeckt und bieten eine enorme wirtschaftliche Chance für das Bundesland.
- » Um den Systemumbau bis 2035 zu schaffen, braucht es ein konsequentes und umgehendes Handeln der Politik.

Unter Berücksichtigung des kurzen verbleibenden Zeitfensters, um das Energiesystem 1,5 °C kompatibel umzubauen, muss die Transformation umgehend begonnen und konsequent und zielorientiert umgesetzt werden. Die in Mecklenburg-Vorpommern vorhandenen und in der Studie eingehend geprüften Flächenpotentiale bieten hierfür deutlich genug Raum. In der Studie konnte eine 100 % erneuerbare Energieversorgung unter anderem mit folgenden Flächen für Photovoltaik und Windenergie realisiert werden:

- » 17 GW Onshore Windenergie auf 46.588 ha = 2 % der Landesfläche (Potential 14,6 %)
- » 6,5 % von 54 GW Offshore (technisches Potential 54 GW, davon ca. 5 GW in Ostsee)
- » -> Solidarprinzip (Landesfläche/Bundesfläche)
- » 27 GW Freiflächenphotovoltaik auf 23.496 ha = 1 % der Landesfläche (Potential 22,5 %)
- » 19 GW Dachflächenphotovoltaik auf 75 % der Dachflächen (Potential 75 %)

Die technischen Potentiale für Dachflächen PV und Offshore Wind wurden ausgereizt, da hier keine Nutzungskonflikte zu erwarten sind. Offshore Windenergie wird jedoch mit nur gut 2 GW in der Ostsee bis 2035 durch die Bundesregierung aktuell zu wenig ausgeschrieben/bebaut. Vor dem Hintergrund der langen Genehmigungsprozesse (mehrere Jahre) ist eine baldige Ausschreibung dringend geboten. Würde man versuchen den notwendigen Windenergieanteil durch Photovoltaik bereitzustellen, wäre der Umbau des Gesamtenergiesystems deutlich teurer, da mehr

kostenintensive Großspeicher dafür gebaut werden müssten, um die gute Sonnenenergie aus dem Sommer für den Winter zu speichern. Bei 1,5 % Windparkfläche hätte das zum Beispiel einen Kostenanstieg von knapp 20 % zur Folge. Andererseits liegt das Kosten-Optimum für Windparks bei ca. 2,8 % der Landesfläche. Durch ein anderes Verhältnis zwischen Wind- und Photovoltaik-Leistung ließen sich andererseits ca. 30 % der Kosten einsparen. Welche Variante letztendlich zur Anwendung kommt, ist schließlich eine politische Abwägung zwischen Umsetzbarkeit und Kosten. Die Ausbaugeschwindigkeit zur Zielerreichung bis 2035 ist hoch aber nicht zu hoch. Für die Onshore-Windenergie müsste die Geschwindigkeit, die zwischen 2010 und 2015 erreicht wurde etwa verdoppelt bis verdreifacht werden. Für die Photovoltaik wären deutlich größere Anstrengungen nötig.

Die damit entstehenden Arbeitsplätze und die notwendigen Investitionen stellen eine große wirtschaftliche Chance für MV dar: Die jährlichen Investitionskosten bis 2035 aus öffentlichen Mitteln in Mecklenburg-Vorpommern belaufen sich schätzungsweise auf 0,9 Mrd. €. Dem gegenüber stünden jedoch beispielsweise schon die zu erwartende Gewerbesteuererinnahmen in Höhe von jährlich 2,6 Mrd. € (Endausbau Wind- und PV-Energie). Auch wenn eine 100 % erneuerbare Energieversorgung auf verschiedene Weisen erreichbar ist, müssen teure Fehlinvestitionen vermieden werden, da sie das fossile Energiesystem manifestieren oder das Erneuerbare unnötig verzögern und verteuern.

## Beispiele für solche »Pfadentscheidungen«

- » Der Einbau neuer fossiler Heizsysteme für die Gebäudewärme (z.B. neue Gasheizung) ist dringend zu vermeiden, da die Lebensdauer der neuen fossilen Anlage über 2035 hinausreicht.
- » Es sollte auf bessere Gebäudedämmung gesetzt werden, statt nur den Energieträger erneuerbar zu machen, da für den aktuellen Gebäudebestand zum Beispiel 2 statt 1 % Landesfläche für Photovoltaik oder 2,5 % statt 2 % der Landesfläche für Wind nötig wären, um den enormen Bedarf zu

decken. Um diese Energiemengen saisonal zu verschieben bräuchte es auch noch mehr teure Speicher.  
 » Energiepflanzen werden dringend für die stoffliche Nutzung benötigt und sind folglich zu wertvoll, um sie ineffizient über E-Fuels für die Fortbewegung zu nutzen bzw. zu schade für eine Verbrennung zur thermischen Nutzung. In entsprechende Systeme sollte nicht investiert werden.  
 » Biomassekraftwerke müssen ab sofort als flexible Erzeuger ausgelegt werden, um den Lasten-

gang im 100 % erneuerbaren Stromnetz auszugleichen, statt wie bisher dauerhaft und konstant einzuspeisen.  
 » Quasi alles zur thermischen Nutzung verfügbare Holz wird künftig benötigt, um Hochtemperaturprozesse in der Industrie zu befeuern. Der Rohstoff wird also absehbar zur privaten Wohngebäudebeheizung zu wertvoll. In entsprechende Systeme sollte also nicht mehr investiert werden.

Die angenommenen knapp 50 % Verbrauchsreduktion lassen sich durch eine Kombination aus maßvolle »Einsparung durch Umstellung« (Fahrrad statt Auto auf kurzen Strecken etc.) sowie durch wesentliche Verbrauchsminderung durch Sektorenkopplung und Technologieumstellung erreichen (E-Autos, Wärmepumpen, Dämmung, Alternativen zu Kunststoffen etc.). Die Studie zeigt mit Blick auf die

(Selbst-)Versorgung eines einzelnen Bundeslandes natürlich nur ein Modell auf und in der praktischen Umsetzung wäre eine exklusive Bundesländerweise Energieversorgung weder erstrebenswert noch realistisch. Die vorgelegten Berechnungen sind insofern als »obere Berechnungsgrenze« zu verstehen. Durch den Import / Export von Strom lassen sich beispielsweise Einsparungen bei den Speicherkapazitäten erzielen.

Weitere »Puffer« wie die spezifischen Energieerträge der Windenergieanlagen, für die derzeit ein Mittelwert des Anlagenbestands verwendet wird, tragen weiter zur Robustheit des Modells bei. Dies bestätigt, dass es physikalisch und technologisch sehr gut machbar ist, ein 100 % erneuerbares Energiesystem für Mecklenburg-Vorpommern aufzubauen.

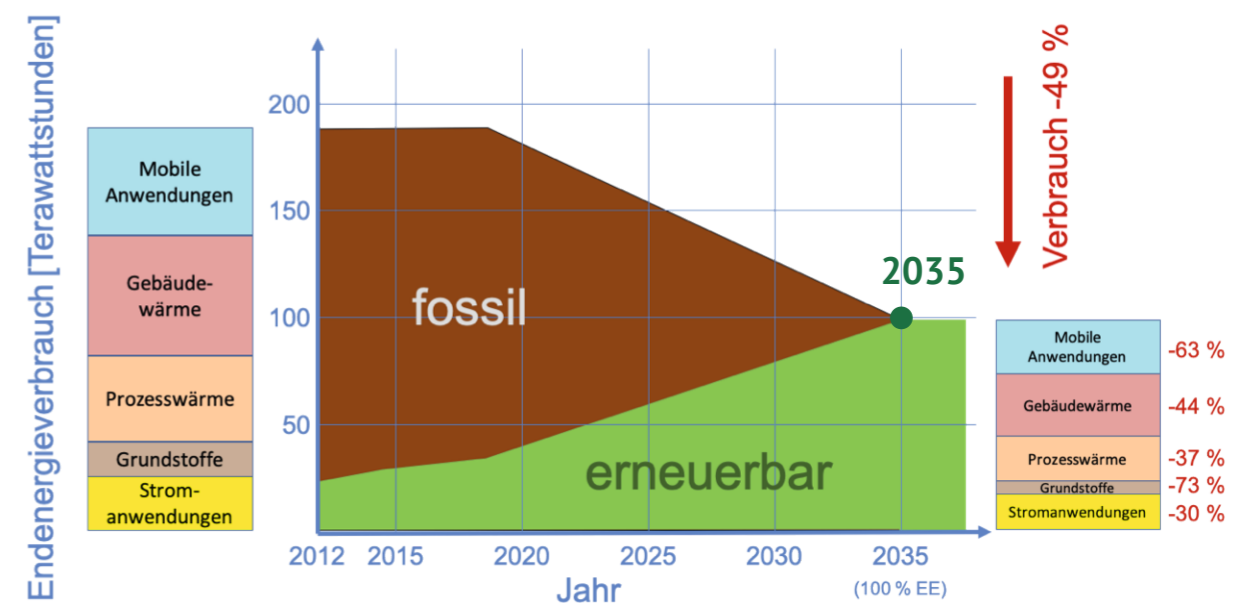


Abbildung 11: Energie-Entwicklungspfad für Mecklenburg-Vorpommern bis 2035.

Das vollständige Zahlenmaterial inklusive Quellen und Exceltabellen zur Berechnung steht hier zum Download bereit:  
<https://wolke.netzbegruenung.de/s/KLcZR34a9tfBXGz>

- 1 [http://www.dokumentation.landtag-mv.de/parldok/dokument/47336/entwicklung\\_der\\_treibhausgasemissionen\\_in\\_mecklenburg\\_vorpommern.pdf](http://www.dokumentation.landtag-mv.de/parldok/dokument/47336/entwicklung_der_treibhausgasemissionen_in_mecklenburg_vorpommern.pdf)
- 2 [https://dorothea-frederking.de/userspace/SA/dorothea\\_frederking/Bilder/Diverse\\_Fotos\\_fuer\\_Artikel/Energie/Landesenergieszenario/181225\\_Ergebnisbroschue-re\\_Energiesz\\_klein-1.pdf](https://dorothea-frederking.de/userspace/SA/dorothea_frederking/Bilder/Diverse_Fotos_fuer_Artikel/Energie/Landesenergieszenario/181225_Ergebnisbroschue-re_Energiesz_klein-1.pdf)
- 3 <https://www.bund-niedersachsen.de/service/publikationen/detail/publication/bund-szenario-energieversorgung-in-niedersachsen-im-jahr-2050/>
- 4 <https://www.bund.net/service/publikationen/detail/publication/konzept-fuer-eine-zukunftsaehige-energieversorgung/>
- 5 <https://www.wattweg.net/index.html>
- 6 Statistische Ämter des Bundes und der Länder, <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/logon>
- 7 <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/siedlungs-verkehrsflaeche#textpart-1>
- 8 <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/MV/kategorie/solar/ausgabe/download>
- 9 <https://www.laiv-mv.de/Statistik/Zahlen-und-Fakten/Wirtschaftsbereiche/Land%E2%80%93und-Forstwirtschaft,-Fischerei>
- 10 <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/akzeptanz-erneuerbarer/akzeptanz-umfrage/zustimmung-fuer-den-ausbau-der-erneuerbaren-energien-bleibt-hoch>
- 11 [http://www.dokumentation.landtag-mv.de/parldok/dokument/47336/entwicklung\\_der\\_treibhausgasemissionen\\_in\\_mecklenburg\\_vorpommern.pdf](http://www.dokumentation.landtag-mv.de/parldok/dokument/47336/entwicklung_der_treibhausgasemissionen_in_mecklenburg_vorpommern.pdf)
- 12 [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA\\_Costs\\_2019\\_DE.PDF?la=en&hash=755C59F88440F9ADD2819AE6FCE387B517EE82D1](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Costs_2019_DE.PDF?la=en&hash=755C59F88440F9ADD2819AE6FCE387B517EE82D1)
- 13 [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- 14 <https://www.quarks.de/technik/energie/welche-art-von-strom-ist-am-guenstigsten/>
- 15 <https://www.nabu.de/news/2020/07/30hektartag.html>
- 16 <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/agrarschwerin-bund-fordert-halbierung-des-flaechenverbrauchs-in-mv-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210206-99-327197>
- 17 <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/agrarschwerin-bund-fordert-halbierung-des-flaechenverbrauchs-in-mv-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210206-99-327197>
- 18 Bericht: Flächeninanspruchnahme für Freiflächenanlagen nach § 36 Freiflächenausschreibungsverordnung (FFAV) Stand: Dezember 2016
- 19 <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/MV/kategorie/wind/ausgabe/download>
- 20 [https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/bwe\\_potenzialstudie\\_kurzfasung\\_2012-03.pdf](https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/03-naturschutz/bwe_potenzialstudie_kurzfasung_2012-03.pdf)
- 21 <https://www.foederal-erneuerbar.de/landesinfo/bundesland/BY/kategorie/bioenergie/ausgabe/download>
- 22 [https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-land-forstwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile)
- 23 <https://www.energieagentur.nrw/solarenergie/photovoltaik-nrw/themen/online-rechner-photovoltaik-15111.asp>
- 24 <http://www.zsd-solar.de/wp-content/uploads/2013/02/Fakten-zur-PV-Fraunhofer-ISE-120202.pdf>
- 25 <http://www.agora-energiewende.de/service/publikationen/publikation/pub-action/show/pub-title/entwicklung-der-windenergie-in-deutschland/>
- 26 <https://www.wattweg.net/media/files/strukturwindenergieanlagenbestand2019.pdf>
- 27 [http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD\\_2018.pdf](http://windmonitor.iee.fraunhofer.de/opencms/export/sites/windmonitor/img/Windmonitor-2018/WERD_2018.pdf)
- 28 Schmidt-Kanefendt, Hans-Heinrich. Methanertrag aus dem Mix der verschiedenen Biogas-Substrate vom Acker
- 29 [http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp\\_effizienz\\_endbericht\\_kurzfassung.pdf](http://wp-effizienz.ise.fraunhofer.de/download/wp_effizienz_endbericht_kurzfassung.pdf)
- 30 <http://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/article/immer-mehr-bauherren-setzen-auf-waermepumpe.html>
- 31 [http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal\\_portal\\_2012\\_1/leitstudie2011\\_bf.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal_portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf)
- 32 <http://skn.privat.t-online.de/wattweg/media/files/BA130306.pdf>
- 33 <https://www.vde.com/de/regionalorganisation/bezirksvereine/suedbayern/facharbeit%20regional/akenergietechnik/documents/vortrag%2015112012%20elektromobilit%C3%A4t%20und%20energieeffizienz.pdf>
- 34 [http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/prognos\\_Effizienzpotenzial\\_070915\\_final.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/prognos_Effizienzpotenzial_070915_final.pdf)
- 35 [http://en-q.de/media/links/VDE\\_Effizienz\\_und\\_Einsparpotentiale\\_in\\_Deutschland.pdf](http://en-q.de/media/links/VDE_Effizienz_und_Einsparpotentiale_in_Deutschland.pdf)
- 36 [https://www.bag-energie.de/cms/wp-content/uploads/2017/10/171028\\_Uebersicht-Stromspeicher-Sektorkopplung\\_Hanke-Rauschenbach.pdf](https://www.bag-energie.de/cms/wp-content/uploads/2017/10/171028_Uebersicht-Stromspeicher-Sektorkopplung_Hanke-Rauschenbach.pdf)
- 37 <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/sustainability/our%20insights/how%20the%20european%20union%20could%20achieve%20net%20zero%20emissions%20at%20net%20zero%20cost/net-zero-europe-vf.pdf>
- 38 [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20\\_N055\\_461.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/09/PD20_N055_461.html)
- 39 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36408/umfrage/durchschnittliche-neuwagenpreise-in-deutschland/>
- 40 [https://www.ifh.wiwi.uni-goettingen.de/upload/veroeffentlichungen/gbh/ifh\\_gbh-1\\_2015.pdf](https://www.ifh.wiwi.uni-goettingen.de/upload/veroeffentlichungen/gbh/ifh_gbh-1_2015.pdf)
- 41 <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2021/06/20210621-spitzengesprach-der-stahlindustrie.html>
- 42 [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- 43 [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- 44 [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- 45 [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf)
- 46 <https://www.energieheld.de/solaranlage/solarthermie/kosten>
- 47 [https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basiszenario.pdf%3F\\_\\_blob%3DpublicationFile%26v%3D4](https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basiszenario.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D4) und <https://www.eid-aktuell.de/nachrichten/netze-speicher/detail/news/eon-studie-sieht-hohe-folgekosten-bei-heutigem-netzfinanzierungsniveau.html>
- 48 [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die\\_Kosten\\_synthetischer\\_Brenn-\\_und\\_Kraftstoffe\\_bis\\_2050/Agora\\_Kosten\\_strombasierter\\_Brennstoffe\\_WEB.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2017/Die_Kosten_synthetischer_Brenn-_und_Kraftstoffe_bis_2050/Agora_Kosten_strombasierter_Brennstoffe_WEB.pdf)
- 49 [https://www.bag-energie.de/cms/wp-content/uploads/2017/10/171028\\_Uebersicht-Stromspeicher-Sektorkopplung\\_Hanke-Rauschenbach.pdf](https://www.bag-energie.de/cms/wp-content/uploads/2017/10/171028_Uebersicht-Stromspeicher-Sektorkopplung_Hanke-Rauschenbach.pdf)
- 50 <https://www.sueddeutsche.de/politik/steuern-schwerin-land-verdient-an-windraedern-63-millionen-euro-gewerbesteuer-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-200916-99-589119>

## Impressum

### HERAUSGEBER

Hannes Damm  
 Mühlenstraße 25/26  
 17489 Greifswald  
[www.hannes-damm.de](http://www.hannes-damm.de)

### VERFASSER

*Hannes Damm, M.Sc. Physik*  
 Universität Greifswald  
 Energiepolitischer Sprecher von  
 Bündnis 90/Die Grünen  
 Mecklenburg-Vorpommern  
*Jens Hinrich Prause, M.Sc. Maschinenbau,*  
*(Leitautor der Studie)*  
 Universität Rostock  
*Hans-Heinrich Schmidt-Kanefendt,*  
*Dipl.-Ing., Ostfalia Hochschule für*  
*angewandte Wissenschaften*  
 Entwickler der Software »100prosim«

### GESTALTUNG UND SATZ

hundert91 - grafikdesign sanna kinz

### DRUCK

Onlinepublikation

### BILDNACHWEISE

Umschlag: iStock, Henglein and Steets  
 Abbildung 1, 9, 10:  
 Software »100prosim«  
 Abbildung 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11:  
 ENEKA Energie & Karten GmbH  
 Richard-Wagner-Str.1a | 18055 Rostock

### ERSCHEINUNGSJAHR

2021, 1. Auflage

»Wir danken allen an der Erstellung dieser Studie beteiligten Menschen auf das herzlichste!«



**Energieversorgung in  
Mecklenburg-Vorpommern**

**Szenario für ein vollständig  
erneuerbares Energiesystem  
2035**

