



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur



**Expertennetzwerk**  
Wissen Können Handeln

# Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infra- struktur verstärkt erschließen

Ergebnisbericht des Themenfeldes 5 im BMVI-Expertennetzwerk für die  
Forschungsphase 2016 – 2019





# Inhalt

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>Executive summary</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Hintergrund und Zielstellung</b> .....	<b>10</b>
1.1 Herausforderungen im Themenfeld: Energiewende.....	10
1.2 Einordnung in das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln" .....	10
1.3 Pilotprojekt.....	12
<b>2 Forschungsergebnisse</b> .....	<b>13</b>
2.1 Energiebedarf.....	13
2.1.1 Straße.....	13
2.1.2 Schiene .....	16
2.1.3 Wasserstraße.....	19
2.2 Stromerzeugung für den Eigenverbrauch.....	23
2.2.1 Meteorologische Grundlagen .....	24
2.2.2 Sensitivitätsstudien zum PV-Ertrag.....	31
2.2.3 Pilotanlagen und neue Technologien.....	35
2.2.4 Bahnspezifische Regelwerke.....	41
2.2.5 Stromerzeugungsszenarien .....	42
2.3 Energienutzung und -management .....	44
2.3.1 Bewirtschaftung der Wasserstraßen .....	45
2.3.2 Neue Antriebstechnologien.....	48
<b>3 Fazit und Ausblick</b> .....	<b>53</b>
3.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn .....	53
3.1.1 Teilprojekt 1: Landverkehr .....	53
3.1.2 Teilprojekt 2: Wasserstraße .....	54
3.1.3 Teilprojekt 3: Hochauflösende Reanalysen.....	55
3.2 Verwertung der Ergebnisse .....	55
3.3 Offene Forschungsfragen .....	56
3.4 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020 .....	58
<b>4 Literatur</b> .....	<b>60</b>
<b>5 Anhang</b> .....	<b>65</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.....	10
Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.....	11
Abbildung 3: Lastdaten Strom des Allachtunnels (Autobahndirektion Südbayern, 2019).....	14
Abbildung 4: Beispielhafter Endenergieverbrauch (rot=Wärme, gelb=Strom, grün=Kraftstoff) und CO <sub>2</sub> -Ausstoß (braun) des Jahres 2017 der Autobahnmeisterei (AM) Hannover.....	15
Abbildung 5: Verteilung der Fahrzeuge nach Antriebsart (links) und die dazugehörigen spezifischen Emissionen pro Jahr und Fahrzeugtyp (rechts).....	15
Abbildung 6: Emissionen der Meistereifuhrparks nach Fahrzeugtyp (akkumuliert).....	16
Abbildung 7: Leistungsabnahme der Meisterei Hannover 2018 (rot: Tageshöchstbedarf, blau: Minimalbedarf, schwarz: tägliche Temperaturminima).....	16
Abbildung 8: Bahnstrommix Deutsche Bahn 2018 (Deutsche Bahn AG, 2018).....	17
Abbildung 9: Hauptenergieverbraucher in Personenbahnhöfen.....	18
Abbildung 10: Endenergiebedarf Personenbahnhöfe in Deutschland 2018.....	18
Abbildung 11: Aufnahme der Traktionsenergie aus dem Bahnstromnetz 2018 (eigene Darstellung nach DB Netze (2018)).....	18
Abbildung 12: Lage des Untersuchungsgebietes und Übersicht über die Kanalstauhaltungen und Pumpwerke. MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal.....	19
Abbildung 13: Mittlerer Stromverbrauch der Pumpwerke Anderten, Lüneburg, Minden, Sülfeld und Uelzen für die hydrologischen Jahre 2001–2015 und als Mittelwert über den gesamten Zeitraum.....	21
Abbildung 14: Mittlerer Stromverbrauch der einzelnen Pumpwerke für die hydrologischen Jahre 2001–2015. Die Balken zeigen die Schwankungsbreite des Verbrauchs einzelner hydrologischer Jahre an.....	21
Abbildung 15: Jahresgang des Strombedarfs der fünf Pumpwerke im Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind als rote Linie die Mittelwerte für jeden Kalendermonat. Im dunkelgrauen Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil liegt die Hälfte aller Monatsmittelwerte, 25 % der Werte sind kleiner und 25 % sind größer. Im hellgrauen Bereich, zwischen dem 5. und 95. Perzentil, liegen 90 % aller Monatsmittelwerte, 5 % sind jeweils kleiner und größer. Der Untersuchungszeitraum ist 01.11.2000–31.10.2015.....	22
Abbildung 16: Mittlerer Jahresgang des Strombedarfs in monatlicher Auflösung, aufgeteilt nach Kanalhaltungen, für den Zeitraum 01.11.2000–31.10.2015. MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal. Unterschiedliche Skalierung der y-Achse zur Erhöhung der Sichtbarkeit.....	22

Abbildung 17: Zeitreihen der 10-m-Windgeschwindigkeiten während des Kyrill-Sturms an den Stationen Spiekeroog (links) und Hohenpeissenberg (rechts) für Messungen, COSMO-REA6 und ERA5. MAE absoluter mittlerer Fehler.....	27
Abbildung 18: Bias (links), Korrelation (Mitte) und absoluter mittlerer Fehler (MAE, rechts) zwischen COSMO-REA6 und Stationsmessungen für VMAX im Mittel über die Jahre 1995–2015 an den ausgewählten 207 Stationen.....	28
Abbildung 19: Häufigkeiten verschiedener Windklassen in Beobachtungen und COSMO-REA6 an Küstenstationen (links), Inlandstationen unter 500 m (Mitte) und Bergstationen (rechts).....	29
Abbildung 20: Scatterplot der solaren Einstrahlung für COSMO-REA6 (links), TRY (Mitte) und SARAH-2 (rechts) im Vergleich zu Messungen an der Station Bamberg für die zeitliche Periode 2008–2012.....	29
Abbildung 21: Globalstrahlung an der Station Genthin für eine Periode im Juli 2010. Dargestellt sind sowohl DWD-Messungen (orange) als auch COSMO-REA6 (blau), TRY (rot) und SARAH-2 (grün). MAE absoluter mittlerer Fehler.....	31
Abbildung 22: Globalstrahlung an der Station Oberstdorf für eine Periode im Februar 2010. Dargestellt sind sowohl DWD-Messungen (orange) als auch COSMO-REA6 (blau), TRY (rot) und SARAH-2 (grün). MAE absoluter mittlerer Fehler.....	31
Abbildung 23: Korrelation zwischen Bodenmessungen der Stationen Soltau (Stern) sowie Oberstdorf (Quadrat) und COSMO-REA6, TRY und SARAH-2 in Abhängigkeit des Bewölkungsgrads. Datengrundlage sind Stundenwerte des Zeitraums 2008–2012.....	31
Abbildung 24: Mittlerer Kapazitätsfaktor eines südlich ausgerichteten Moduls mit 30° Neigung im Untersuchungsgebiet Elbe-Seitenkanal (ESK) und Mittellandkanal (MLK) unter Berücksichtigung der Jahre 2001–2015. Die rote Linie markiert ein 7-tägiges gleitendes Mittel, während die schwarzen Punkte den Kapazitätsfaktor einzelner Tage ausdrücken.....	32
Abbildung 25: Jahr-zu-Jahr-Variabilität (oben), Tag-zu-Tag-Variabilität im Juli (links unten) und Januar (rechts unten). Es werden die Kapazitätsfaktoren für südliche Ausrichtung und 40° Neigung aus den Jahren 2001–2015 berücksichtigt.....	33
Abbildung 26: Mittlerer Tagesgang des Kapazitätsfaktors am Pumpstandort Minden bei 40° Modulneigung und wahlweise Ausrichtung nach Osten (blau), Südosten (dunkelgrün), Süden (rot), Südwesten (hellgrün), Westen (hellblau) und Norden (schwarz). Es werden stündliche Daten der Jahre 2001–2015 einbezogen.....	34
Abbildung 27: Mittlerer Kapazitätsfaktor an der Station Minden bei südlicher Ausrichtung in Abhängigkeit der Modulneigung für die Sommermonate (orange), Wintermonate (blau) und das gesamte Jahr (grün). Es werden stündliche Daten der Jahre 2001–2015 einbezogen.....	34
Abbildung 28: Ausschnitt aus dem im Pilotprojekt gewählten Untersuchungsgebiet, Exposition der LSW am Schienenstreckennetz.....	41

Abbildung 29: Standorte der WSV-Dienstgebäude sowie Autobahnmeistereien (AM) im gewählten Untersuchungsgebiet. Das Rechteck symbolisiert den Bereich zur Ausweisung der Flächen der LSW und Lärmschutzwälle an den Straßen sowie zur Ermittlung der Kapazitätsfaktoren. ABz Außenbezirk, BHf Bauhof, WSA Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt.....	42
Abbildung 30: Szenarien zur angenommenen Energieerzeugung mit jeweiligem Flächenbedarf.....	42
Abbildung 31: Den Szenarien 1 bis 4 zugrunde liegende Kapazitätsfaktoren der Stromerzeugung im mittleren Jahresverlauf (11/2000–10/2015).....	44
Abbildung 32: Schematische Abbildung der berücksichtigten Bilanzgrößen im Kanalmodell (rot: Verluste, grün: Zuflüsse, jeweils bezogen auf Kanalstauhaltung 1). Die Kanalentlastung und die Pumpen sind keine Eingangsgrößen des Modells, sondern werden von diesem gesteuert. ....	46
Abbildung 33: Zusammensetzung der verbrauchten Energie für die Pumpwerke in verschiedenen Stromerzeugungsszenarien. Dargestellt sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Steuerstrategien (Ref: Referenzsteuerung, Abbildung der bisherigen Praxis, Modell WabEE-T; EO: energieorientierte Steuerung, ausgerichtet auf die Nutzung des selbst erzeugten Stroms, Modell WabEE-S). Grundlage sind Modellrechnungen für den Zeitraum 11/2000–10/2015. Bitte geteilte Skalierung der y-Achse beachten. EE: erneuerbare Energien. ....	47
Abbildung 34: Kraftstoffkosten im ersten und zehnten Jahr (akkumuliert) nach Anschaffung (blau: Diesel-fahrzeug; rot: battery electric vehicle (BEV) mit 100 % Strombezug aus dem öffentlichen Netz, grün: 50 % Strombezug öffentliches Netz, 50 % Eigenstromverbrauch; lila: 100 % Eigenstromverbrauch). MZGT Mehrzweckgeräteträger.....	49

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Kanalhaltungen im Untersuchungsgebiet und ausgewählte angrenzende Haltungen (GDWS, 2015; GDWS, o. J.). MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal, DEK Dortmund-Ems-Kanal. ....	20
Tabelle 2: Übersicht über die Pumpwerke im Untersuchungsgebiet.....	20
Tabelle 3: Untersuchte meteorologische Parameter mit Einfluss auf den PV-Ertrag sowie untersuchte Datensätze. ....	25
Tabelle 4: Räumliche und zeitliche Auflösung/Abdeckung der meteorologischen Datenprodukte. ....	25
Tabelle 5: Korrelation, mittlerer Fehler (Bias) und absoluter mittlerer Fehler (MAE) zwischen 10-m-Wind-Messungen und den drei ausgewählten Reanalysen COSMO-REA6, ERA5 und ERA-Interim. Als Datengrundlage dienen 209 Stationen und die Auswertungsperiode 1995–2015. ....	27
Tabelle 6: Korrelation, mittlerer Fehler (Bias) und absoluter mittlerer Fehler (MAE) zwischen Bodenmessungen und den drei ausgewählten Strahlungsdatensätzen COSMO-REA6, TRY und SARAH-2. Als Datengrundlage dienen 38 Stationen, sowie der Auswertungszeitraum 2008–2012.....	30
Tabelle 7: PV-Ertragspotenzial Autobahnwälle: Annahmen für die Szenarien-Berechnung.....	37
Tabelle 8: Ertragsprognosen für PV auf Lärmschutzwällen an Bundesfernstraßen.....	38
Tabelle 9: Potenzielle Energieerzeugung an Lärmschutzwänden (LSW) in Abhängigkeit ihrer Ausrichtung im Pilotareal. ....	40
Tabelle 10: Kennzahlen der unterschiedlichen Szenarien zur Stromerzeugungsprognose.....	44
Tabelle 11: Eingangsdaten der Sensitivitätsanalysen.....	50
Tabelle 12: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen MZGT gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren. ....	50
Tabelle 13: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen Lkw > 3,5 t gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.....	51
Tabelle 14: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen Lkw < 3,5 t gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.....	51
Tabelle 15: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrisch betriebenen Pkw gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.....	51

# Abkürzungsverzeichnis

ABz	Außenbezirk (eines Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes)
AM	Autobahnmeisterei
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	engl. battery electric vehicle
BEWASYS	Bewirtschaftung Wasserwirtschaftlicher Systeme
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BHf	Bauhof (eines Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes)
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CNG	engl. compressed natural gas
CM SAF	engl. satellite application facility of climate monitoring
DB	Deutsche Bahn
DEK	Dortmund-Ems-Kanal
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMFC	engl. direct methanol fuel cell
DZSF/EBA	Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt
duraBAST	Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Straßenwesen
DWD	Deutscher Wetterdienst
EE	erneuerbare Energien
EO	energieorientierte Steuerung
ERA	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage: Reanalyse
ESK	Elbe-Seitenkanal
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
HErZ	Hans-Ertel-Zentrum
ISE	Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
ISO	engl. International Organization for Standardization
LCA	engl. life cycle analysis
LED	Leuchtdiode
LNG	engl. liquefied natural gas
LSW	Lärmschutzwand
ME	engl. mean error



MAE	engl. mean absolute error
MLK	Mittellandkanal
MZGT	Mehrzweckgeräteträger
MVIRI	engl. Meteosat visible and infrared imager
NWV	numerische Wettervorhersage
o. J.	ohne Jahr
PEMFC	engl. polymer electrolyte membrane fuel cell
PV	Photovoltaik
PVGIS	engl. photovoltaic geographical information system
RIL	Richtlinie
SARAH	engl. surface solar radiation data records – Heliosat
SEDa	Untersuchung multifunktionaler Straßenbaumaterialien und Verbundwerkstoffe zur Nutzung solarer Energie und Verbesserung der Dauerhaftigkeit
SEVIRI	engl. spinning enhanced visible infrared imager
SOFC	engl. solid oxide fuel cell
TRY	engl. Test-Reference-Year
WabEE	Wasserbewirtschaftung mit erneuerbaren Energien
WEA	Windenergieanlage
WS	Warnstufe
WSA	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

# Kurzfassung

Für die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße ergibt sich die grundlegende Gemeinsamkeit des Energiebedarfs zur Bewirtschaftung und Unterhaltung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Aufrechterhaltung des Betriebes. Um die Bemühungen zur Einhaltung des Pariser Klimaschutzabkommens und die damit einhergehende Reduktion von Treibhausgasemissionen voranzubringen, muss der anfallende Energiebedarf der Verkehrsinfrastruktur reduziert oder mithilfe von erneuerbaren Energien (EE) gedeckt werden. Ziel der Untersuchung ist daher eine verkehrsträgerübergreifende Analyse der an der Infrastruktur anfallenden Energieverbräuche, um Hauptverbraucher und Einsparpotenziale zu identifizieren. Da ein Großteil der untersuchten Verbraucher nach wie vor aus fossilen Energieträgern gespeist wird, muss neben der Erhöhung der Energieeffizienz die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen wie Sonnenenergie, Windenergie, Bioenergie und Geothermie vorangebracht werden. Daher ist ein weiteres Ziel des Themenfelds 5 die Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten für regenerative Energieerzeugungsanlagen an oder in der Verkehrsinfrastruktur. Sie werden für alle drei Verkehrsträger ermittelt und ausgewählte Pilotprojekte und Demonstratoren vorgestellt. Weiterhin werden die Möglichkeiten zur Nutzung des an der Verkehrsinfrastruktur erzeugten Stroms durch Verbraucher an der Infrastruktur untersucht. Hierzu wird die Stromnutzung durch Pumpwerke an der Wasserstraße modelliert.

In dieser Studie werden für die Straße die Energieverbräuche der Autobahnmeistereien (Strom, Wärme und Kraftstoff) und Verkehrsleitzentralen (Strom) untersucht, wobei sich ein höherer Energieverbrauch in den Wintermonaten mit häufigerem Auftreten von Lastspitzen abzeichnet. Für die Wasserstraße wird hauptsächlich der Energiebedarf ausgewählter Pumpwerke analysiert. Hierbei zeigt sich im Winter, im Gegensatz zur Straße, ein im Vergleich zum Sommer verminderter Energieverbrauch. Für die Schiene wird der Bedarf von Personenbahnhöfen sowie des Güter- und Personenverkehrs betrachtet, wobei festgehalten werden kann, dass bei großen Bahnhöfen eine individuelle Optimierung des Energieverbrauchs notwendig ist, während für kleine Bahnhöfe die Entwicklung eines Standardvorgehens ausreichend erscheint.

Durch die weitverzweigten Verkehrswege und großen Flächen besteht bei allen Verkehrsträgern ein hohes Potenzial

für die Nutzung von Photovoltaik (PV). Daher wird sowohl das mögliche Potenzial von Frei- und Gebäudeflächen als auch eine Integration in Verkehrs(neben)flächen im Pilotprojekt rund um den Mittelland- und Elbe-Seitenkanal untersucht. Dafür ist eine Vielzahl von Datensätzen notwendig, die im Rahmen des BMVI-Expertenetzwerks von den beteiligten Behörden zusammengetragen wurden. Bei der Qualitätsabschätzung der verwendeten meteorologischen Datensätze erwiesen sich satellitengestützte Strahlungsdatensätze als geeignet, während die Untersuchungen im Bereich Wind eine hohe Qualität regionaler Reanalysen gezeigt haben.

Bei einer verkehrsträgerübergreifenden Betrachtung der Energieerzeugung ergibt sich mit der Wasserstraße die Option, die zeitlichen Fluktuationen der erneuerbaren Energien durch eine energieorientierte Steuerung (EO) der Kanalstauhaltungen abzumildern und diese als "Pufferelement" zu nutzen. Bei der Abschätzung der Stromerzeugungspotenziale mittels PV auf Gebäudeflächen in der Umgebung der untersuchten Kanalabschnitte zeigt sich, dass im Mittel über den Zeitraum von November 2000 bis Oktober 2015 14 % des Strombedarfs der Pumpwerke gedeckt werden können. Werden auch Flächen von Lärmschutzwänden und -wällen des Verkehrsträgers Straße in dem Untersuchungsgebiet hinzugenommen, können 99 % des Strombedarfs gedeckt werden.

Zur weiteren Einsparung von Treibhausgasen ist insbesondere die Einführung neuer Antriebstechnologien wichtig. Auch diese werden im Themenfeld für den Bereich Straße und Schiene untersucht. Es zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit alternativer, batteriebetriebener Antriebe gegenüber herkömmlichen Dieselmotoren stark von der Eigenstromnutzung beeinflusst wird. Bei der Eigenstromnutzung wird der Strom ohne Netznutzung direkt aus der EE-Anlage bezogen. Mangels Netznutzung fallen insbesondere die Netznutzungsentgelte und die daran gekoppelten Abgaben und Umlagen nicht an. Der Erzeuger deckt seinen Energiebedarf möglichst mit seinem eigenen vor Ort produzierten Strom. Lediglich EE-Strom, der im Moment der Erzeugung nicht verbraucht werden kann, wird in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist. Der Netzstrombezug erfolgt ausschließlich im Bedarfsfall.

# Executive summary

A common feature of the rail, road and waterway modes is their need for energy to manage and maintain the transport infrastructure and to maintain operation. In order to advance the efforts to comply with the Paris Climate Change Agreement and the associated reduction in greenhouse gas emissions, the energy demand of the transport infrastructure has to be reduced or covered by energy from renewable sources. The objective of the analysis is thus a cross-modal analysis of the energy consumed by the infrastructure in order to identify the principal consumers and potential for savings. Since a large proportion of the consumers continue to be covered by fossil energy sources, it is necessary not only to improve energy efficiency but also to advance the use of energy from renewable sources, such as solar energy, wind power, bioenergy and geothermal energy. Thus, another objective of Topic 5 is an analysis of the application potential of renewable energy generation systems within the transport infrastructure. The potential is analysed for all three modes of transport and selected pilot projects and demonstrators are presented. In addition, the possibilities of consumers within the infrastructure to use the electricity generated within the transport infrastructure are being studied. To this end, the use of electricity by pumping stations on the waterways is being modelled.

For the roads, the energy consumed by the motorway maintenance depots (electricity, heating and fuel) and traffic management centres (electricity) has been examined, with higher energy consumption becoming apparent in the winter months with a more frequent occurrence of peak loads. For the waterways, it is primarily the energy needs of selected pumping stations that have been analysed. In contrast to the roads, there is lower energy consumption in winter compared with summer. For the railways, the needs of passenger stations as well as of freight and passenger transport have been studied. It can be stated that in the case of major stations there is a need for individual optimization of energy consumption, whereas for small stations the development of a standardized procedure seems sufficient.

As a result of the widely ramified transport infrastructure and large areas, there is great potential inherent in all modes

of transport for the use of photovoltaics (PV). For this reason, the pilot project investigated the possible potential of open and building surfaces, and in particular the integration into (adjacent) traffic areas around the Mittelland Canal and the Elbe Lateral Canal. A large number of datasets is required for this purpose, which have been collated by the authorities participating in the BMVI Network of Experts. When assessing the quality of the meteorological datasets used, satellite-based radiation datasets proved to be suitable for assessments of solar energy, while for wind energy a high quality of regional reanalyses was shown.

If a cross-modal view is taken of energy generation, waterways provide an option for attenuating the temporal fluctuations of renewable energy sources by means of energy-oriented control of the canal sections and using them as a "buffer element". The estimate of the scope for electricity generation by means of PV on building surfaces in the vicinity of the canal sections studied showed that, over the period from November 2000 to October 2015, it was possible on average to meet 14 % of the electricity needs of the pumping stations. If surfaces on noise barriers and earth embankments of the road mode in the study area are included, up to 99 % of the electricity needs can be met.

To further reduce greenhouse gas emissions, the introduction of new drivetrain technologies is important. These, too, are being studied in the topic for the road and rail sectors. It is apparent that the economic viability of alternative, battery powered drivetrains compared with conventional diesel engines is highly dependent on the use of self-generated electricity. The use of self-generated electricity involves obtaining the electricity directly from the renewable energy plant without using the grid. In this case, grid usage fees and the related levies and surcharges, in particular, are not incurred. Electricity requirements are met with own locally produced electricity wherever possible. Only electricity from renewable sources that cannot be consumed at the moment of generation is fed into the public grid. Electricity is obtained from the grid solely if needed.

# 1 Hintergrund und Zielstellung

## 1.1 Herausforderungen im Themenfeld: Energiewende

Die Unterzeichnerstaaten des am 4. November 2016 in Kraft getretenen Pariser Klimaschutzabkommens haben sich das Ziel gesetzt, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber den vorindustriellen Werten zu begrenzen. Sie verpflichten sich, alle Anstrengungen zu unternehmen, dass die weltweiten Treibhausgasemissionen möglichst rasch sinken, wobei den Entwicklungsländern zur Reduktion mehr Zeit eingeräumt wird.

Die nationalen Klimaschutzziele sind in dem im November 2016 vom Bundeskabinett beschlossenen Klimaschutzplan 2050 (BMU, 2016) formuliert und enthalten eine inhaltliche Orientierung für alle Handlungsfelder in der Energieversorgung, im Gebäude- und Verkehrsbereich, in Industrie und Wirtschaft sowie in der Land- und Forstwirtschaft. Ein zentrales Element des Klimaschutzplans sind Meilensteine und Ziele als Rahmen für alle Sektoren bis 2030. Für den Verkehrssektor lagen die Treibhausgasemissionen im Jahr 2016 mit 167 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent etwas über dem Niveau des Jahres 1990 (164 Mio. t). Dies entspricht einem Anteil von rund 18 % an den gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland. Bis 2030 sollen die Emissionen von 164 auf 95–98 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent sinken, was einer Reduktion um 40–42 % entspricht. Der Energiesektor hat in 2016 mit 332 Mio. t 37 % der gesamten Treibhausgasemissionen verursacht (Umweltbundesamt, 2016).

Einen substanziellen Beitrag des Verkehrssektors zur Reduktion der Treibhausgasemissionen muss der Verkehr durch eine gezielte Verlagerung bestehender Verkehre hin zu emissionsärmeren Verkehrsträgern selbst leisten, z. B. die Bahn oder Schifffahrt. Zudem muss der Einsatz alternativer Antriebstechnologien bzw. Kraftstoffe erhöht werden. Aber auch die Verkehrsinfrastruktur kann einen Beitrag leisten, indem sie sich das Ziel setzt, zukünftig energieeffizienter zu werden, verstärkt erneuerbare Energien (EE) zu nutzen und lokal zu speichern, um hierdurch den konventionellen Strombezug zu reduzieren oder gegebenenfalls zur Netzstabilisierung beizutragen. Dies bedeutet, dass die zum Betrieb der Verkehrsinfrastruktur nötige Energie durch ein breites Spektrum von EE vor Ort oder über Stromtrassen bereitgestellt wird, wobei darüber hinaus die teilweise Versorgung des Verkehrs mit EE angestrebt wird.

## 1.2 Einordnung in das BMVI-Expertennetzwerk "Wissen – Können – Handeln"

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) hat im Jahr 2016 die Gründung des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln veranlasst, um das Zusammenwirken seiner Ressortforschungseinrichtungen und Behörden hinsichtlich verkehrsträgerübergreifender Forschung zu fördern. Erstmals wurde damit in der Ressortforschung ein verkehrsträgerübergreifendes Forschungsnetzwerk entwickelt, erprobt und etabliert.

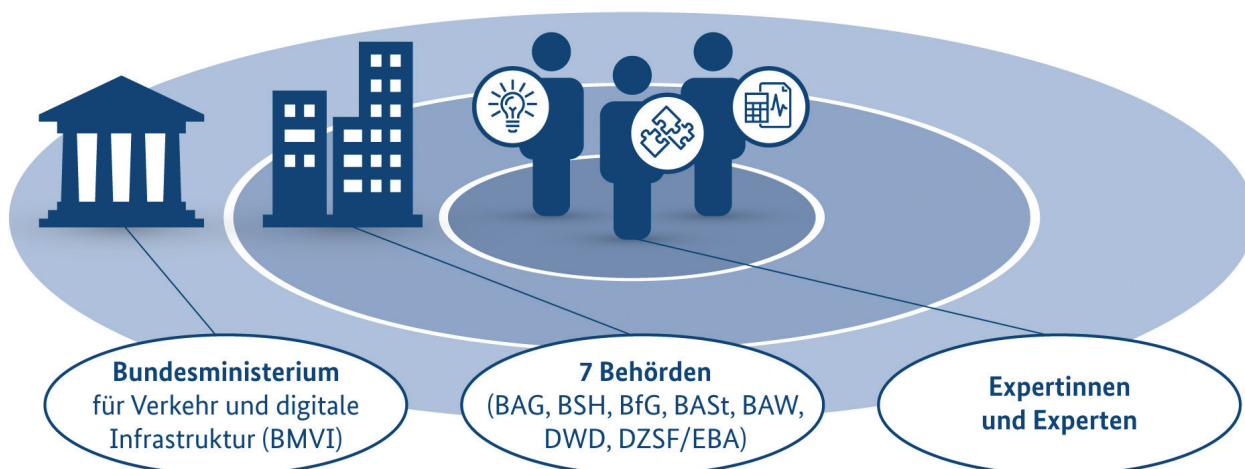


Abbildung 1: Struktur der Vernetzung innerhalb des BMVI-Expertennetzwerks.

# FORSCHUNGSSTRATEGIE 2030

Das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht gestalten



Abbildung 2: Themenfelder des BMVI-Expertennetzwerks im Kontext der Forschungsstrategie 2030.

Im BMVI-Expertennetzwerk forschen das Bundesamt für Güterverkehr (BAG), das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), der Deutsche Wetterdienst (DWD) und das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF/EBA) zusammen. Mehr als 70 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit unterschiedlichen Kompetenzen forschen vernetzt und transdisziplinär, um Lösungsansätze zu zukunftsorientierten Fragestellungen rund um das Verkehrssystem zu erarbeiten. Dabei sind die Forscherinnen und Forscher in die Behörden eingebettet und werden dort fachlich und organisatorisch unterstützt. Die Abstimmung zu den Forschungsinhalten und den organisatorischen Abläufen erfolgt zwischen BMVI, Bundesoberbehörden und Expertinnen und Experten (Abbildung 1). Dadurch wird eine praxisorientierte fachwissenschaftliche Beratung des BMVI sichergestellt.

Der Forschungsprozess wird darüber hinaus von kontinuierlicher Interaktion mit Anwenderinnen und Anwendern

begleitet, z. B. mit den Landesstraßenbaubehörden, der Deutschen Bahn AG und der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Dieser Praxisbezug ermöglicht die zielgerichtete Entwicklung von anwendungsorientierten Innovationen.

Die Vision des BMVI-Expertennetzwerks ist es, das Verkehrssystem resilient und umweltgerecht zu gestalten. Das BMVI-Expertennetzwerk stellt hierfür wissenschaftlich fundierte Grundlagen bereit. In diesem neuen Forschungsformat in der Ressortforschung wurden verkehrsträgerübergreifende Ziele definiert und in der Forschungsstrategie 2030 (BMVI-Expertennetzwerk, 2018) festgehalten. Dieser strategische Forschungsrahmen beschreibt den Umgang des BMVI-Expertennetzwerks mit Herausforderungen wie Klimawandel, Umweltschutz, Alterung der Infrastruktur sowie Digitalisierung und zeigt den Weg auf, wie die Vision schrittweise erreicht werden kann (Abbildung 2).

Zur Gewährleistung einer effizienten Bearbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen wurde die Forschung in Themenfelder gegliedert (Abbildung 2). Die Arbeiten in den

Themenfeldern 1 bis 3 wurden bereits 2016 aufgenommen. Die Themenfelder 4 und 5 wurden in Form von Pilotprojekten ab 2017 bearbeitet. 2019 wurde das Themenfeld 6 etabliert. Die sechs Themenfelder des BMVI-Experten Netzwerks ergänzen sich inhaltlich und schaffen Grundlagen, um die Forschungsstrategie 2030 im Dialog mit Anwenderinnen und Anwendern erfolgreich umsetzen zu können.

Vorliegender Bericht stellt die Ergebnisse des Themenfeldes 5 aus der ersten Phase des BMVI-Experten Netzwerks (2016–2019) dar. Die Forschungsergebnisse wurden unter Koordination durch den DWD gemeinschaftlich mit der BASt, der BfG und dem DZSF/EBA erarbeitet.

### 1.3 Pilotprojekt

In der ersten Phase des BMVI-Experten Netzwerks arbeiten unter Leitung des DWD die BfG, die BASt und das DZSF/EBA im Themenfeld 5 zusammen, um möglichst verkehrsträgerübergreifend eine Ist-Analyse des Energieverbrauchs zu erstellen und darauf aufbauend die Identifikation möglicher Einsparpotenziale vorzunehmen. Die betrachteten Verkehrsträger des 2018 gestarteten Pilotprojekts umfassen Straße, Wasserstraße und Schiene, der Luftverkehr ist zunächst ausgeschlossen. Es wurden Analysen zur Erzeugung und Nutzung von EE-Strom im Bereich der Verkehrsinfrastruktur durchgeführt und erste Aussagen darüber

getroffen, ob Systeme wie Photovoltaik (PV) in bzw. an Lärmschutzwänden (LSW) zur Stromversorgung vorhandener Infrastrukturen beitragen können. Ferner wurden die Kanalstauhaltungen als "Pufferelement" für EE-Strom untersucht. Ein weiteres Ziel des Pilotprojekts war die Betrachtung der Umstellung der Wartungsfahrzeuge auf alternative Antriebe (z. B. batterieelektrisch, Brennstoffzelle, Erdgas).

Dank der Vernetzung der Behörden und des verkehrsträgerübergreifenden Ansatzes können vorhandene Synergien genutzt werden, womit Mehrarbeit in den Behörden vermieden wird. Ein Beispiel für die Zusammenarbeit der im Themenfeld 5 beteiligten Ressortforschungseinrichtungen im BMVI ist die Bestimmung standortspezifischer Stromerzeugungspotenziale mit PV-Anlagen. Hierfür werden sowohl meteorologische Informationen als auch Flächeninformationen wie Angaben zur Lage und zu den geografischen Randbedingungen (z. B. potenzielle Verschattungen) der verschiedenen Verkehrswege benötigt. Im Rahmen des Pilotprojekts in Themenfeld 5 wurde der Fokus dabei zunächst auf ein Untersuchungsgebiet um Elbe-Seitenkanal (ESK) und Mittellandkanal (MLK) gelegt. In diesem Bereich wurden standortbezogene Daten zur Installation von PV auf Betriebsgebäuden erhoben sowie im angenäherten Areal von 7,5°-11° E und 52°-53° N auch für Lärmschutzbauten von Straßen- und Schienenwegen. Diese Daten wurden in mehreren Szenarienrechnungen berücksichtigt.

## 2 Forschungsergebnisse

### 2.1 Energiebedarf

Energie wird in unterschiedlichster Form benötigt, um die Verkehrsinfrastruktur instand halten und betreiben zu können. Hierzu zählen Kraftstoffe, Strom und Energieträger, die in Wärmeenergie umgewandelt werden können. Um eine Optimierung des Energiebedarfs in Abhängigkeit vom EE-Dargebot zu erreichen, ist die Kenntnis über den bisherigen Verbrauch entscheidend. Hierbei ist der Energiebedarf zu ermitteln, der u. a. für die Unterhaltung der Betriebsgebäude und Streckennetze, z. B. den Winterdienst und das Vegetationsmanagement, benötigt wird. Es wird ein möglichst großes Spektrum der Infrastruktur abgedeckt, um so einen guten Überblick über Energieeinsparpotenziale zu erlangen. Aus den Energieeinsparpotenzialen ergeben sich dann die monetären sowie Treibhausgaseinsparungen. Des Weiteren ist die zeitliche Variabilität des Bedarfs der (bau)technischen Anlagen auf und an den Verkehrswegen ein wichtiger Faktor, um Optimierungspotenziale aufzeigen zu können. Hierzu werden im Folgenden die Hauptenergieverbräuche der Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße aufgezeigt.

#### 2.1.1 Straße

Auf rund 13.000 km Bundesautobahnen und 38.000 km Bundesstraßen tragen die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Autobahnmeistereien (AM) sowie der Straßenmeistereien dazu bei, dass die Funktionsfähigkeit des Straßennetzes gegeben und somit die Verkehrssicherheit auf den genannten Straßen gewährleistet ist. Hierfür beseitigen die Meistereien kleinere Schäden an den Straßen, die z. B. durch Extremwetterereignisse eingetreten sind. Mäharbeiten und Gehölzpflege, die Wartung und Instandhaltung der Straßenausstattung, wie Verkehrszeichen, Verkehrseinrichtungen, Markierungen etc., die Reinigung von Entwässerungseinrichtungen wie Straßenabläufen und Regenrückhaltebecken sowie die umweltgerechte Entsorgung von Abfällen ist auch Aufgabe der Meistereien. Das Räumen und Streuen im Winter sowie die laufende Wartung des Straßennetzes finden sich ebenfalls in deren Profil wieder. Außerdem sind die Straßenmeistereien neben den Bundesstraßen für die Landes-, Staats- und teilweise für die Kreisstraßen zuständig (BMVI, o. J.). Um die Bearbeitung der weitreichenden Aufgaben vollumfänglich gewährleisten zu

können, stehen den Meistereien diverse Fahrzeugtypen zur Verfügung. In den Fuhrparks befinden sich unter anderem (Klein)Lkw, Mehrzweckgeräteträger (MZGT), Pkw, Gabelstapler und Radlader.

Im Rahmen des Pilotprojekts haben zehn Autobahnmeistereien und acht Straßenmeistereien durch das Ausfüllen von Fragebögen (siehe Anhang) zur Datenermittlung beigetragen. Außerdem konnten die Daten zum Strombedarf zweier Straßentunnel beschafft und analysiert werden. Daten der Verkehrsleitzentrale Leverkusen flossen ebenso in die Auswertung mit ein wie Daten des Regierungspräsidiums Stuttgart. Im Folgenden werden die Stromverbräuche von Tunneln und Verkehrsleitzentralen, sowie die Energieverbräuche der Autobahnmeistereien vorgestellt.

#### Tunnel

Tunnel besitzen hohe Sicherheitsanforderungen, die mit entsprechenden Stromverbräuchen einhergehen. Die Auswertung des Stromverbrauchs des Tunnels Allach in Bayern zeigt dies beispielhaft, um einen ersten Eindruck vom Strombedarf eines solchen Bauwerks zu bekommen. Das Lastgangprofil des Tunnels Allach ist in Abbildung 3 dargestellt.

Für den Betrieb des Tunnels Allach wurden im Jahr 2018 1.185.795 kWh Strom verbraucht. Die maximal abgerufene Leistung waren 575 kW am 17.10.2018. Grund für die auftretenden Lastspitzen ist die Zuschaltung der Strahltriebwerke zur Belüftung des Tunnels. Im Tunnel Allach sind 40 Ventilatoren mit einer jeweiligen Leistung von 15 kW installiert. Werden in einer Röhre 20 Ventilatoren in Betrieb genommen, entspricht dies einer Leistungsabnahme von 300 kW. Weiterhin ist erkennbar, dass von Mai bis September die angeforderte Leistung jeweils in einem ähnlichen Bereich liegt, wenn die Lastspitzen Anfang und Ende Juli als Ausreißer betrachtet werden. Ferner sind drei weitere Lastspitzen in den vorhandenen Daten aufgezeichnet worden, die deutlich nach unten abweichen: (i) am 24. April 2018 mit einer kurzfristig erfassten Leistung von 0 kW (20:00-21:00 Uhr), (ii) am 25. September 2018 mit einer abgerufenen Leistung von 3,6 kW (22:15 Uhr-22:30 Uhr) und (iii) am 20. November 2018 mit einer abgerufenen Leistung von 0 kW (19:30-20:15 Uhr). Dies liegt nach Rücksprache mit dem zuständigen Mitarbeiter voraussichtlich an Unterbre-

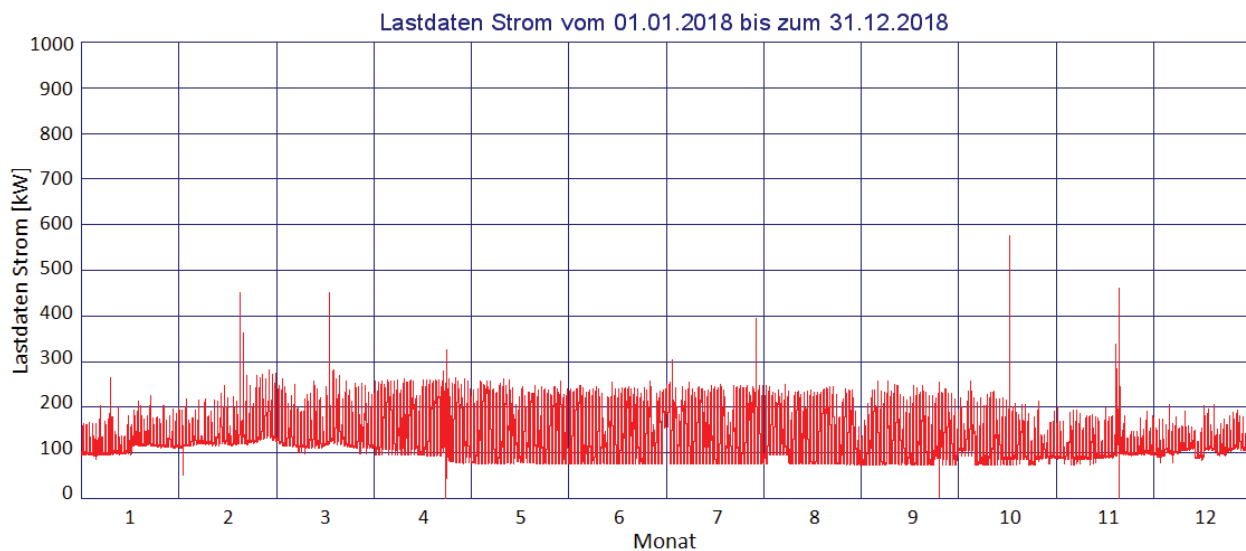


Abbildung 3: Lastdaten Strom des Allachtunnels (Autobahndirektion Südbayern, 2019).

chungen in der Datenübertragung. Die Zähler werden über Fernmeldeleitungen vom Energieversorger fernabgelesen.

### Verkehrsleitzentralen

Um einen Überblick über den Stromverbrauch der Verkehrsleitzentralen zu bekommen, ist die Verkehrsleitzentrale Leverkusen im April 2018 besucht worden. Im Anschluss an das Gespräch wurden die Verbrauchszahlen aus dem Jahr 2016 übermittelt. Die Verkehrsleitzentrale hat zur Steuerung des Verkehrs mit 80 unterschiedlichen Energieversorgungsunternehmen Verträge über die Lieferung von Strom geschlossen. Im Jahr 2016 wurden insgesamt 993.890 kWh Strom bezogen. Dabei waren zu diesem Zeitpunkt 905 Zähleranschlussäulen installiert (Straßenbau. NRW, 2018).

Des Weiteren konnte die BASt Daten des Regierungspräsidiums Stuttgart auswerten. Diese stammen aus den Jahren 2012 und 2015 und umfassen unter anderem Verbrauchsdaten zu Verkehrs- und Streckenbeeinflussungsanlagen. Die größten Verbraucher im Zuständigkeitsbereich des Regierungspräsidiums Stuttgart sind die vorhandenen Tunnel. Insgesamt wurden im Jahr 2015 ca. 5,3 Mio. kWh elektrische Energie für Verkehrsbeeinflussungsanlagen und Tunnel im Zuständigkeitsbereich des Regierungspräsidiums Stuttgart verbraucht. Davon entfallen fast 94 % auf

den Tunnelbetrieb (4,97 Mio. kWh) und 6 % auf die restlichen Verkehrsbeeinflussungsanlagen (Regierungspräsidium Stuttgart, 2019).

### Autobahnmeistereien

Im Rahmen des Pilotprojekts konnte ermittelt werden, dass der größte Energieverbrauch bei den Meistereien aus dem Bedarf an Kraftstoff für die Fahrzeuge resultiert. Dieser ist für deutlich über die Hälfte des Gesamtverbrauchs einer Meisterei verantwortlich. Die Umwandlung von Primärenergieträgern in Wärmeenergie stellt in den Meistereien den zweitgrößten Energieverbrauch dar. Die Analysen zeigen, dass die Bereitstellung der Wärmeenergie vor allem durch den Primärenergieträger Öl erfolgt. Der Stromverbrauch hat bilanziell den geringsten Anteil am Endenergieverbrauch einer Meisterei. Zur Berechnung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wurde der deutsche Strommix 2017 angenommen. Die Ergebnisse sind beispielhaft für die Meisterei Hannover in Abbildung 4 dargestellt.

Da der Fuhrpark am meisten Energie bei den Meistereien benötigt und dieser ebenso im Verhältnis am meisten Emissionen verursacht, ist hier das größte Potenzial zur Emissionsminderung vorhanden. Aktuell befinden sich vor allem dieselbetriebene Fahrzeuge im Fuhrpark der Meistereien, wie Abbildung 5 (links) verdeutlicht. Die 18 Meiste-



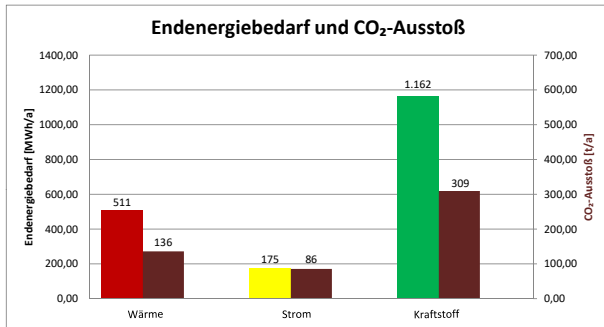
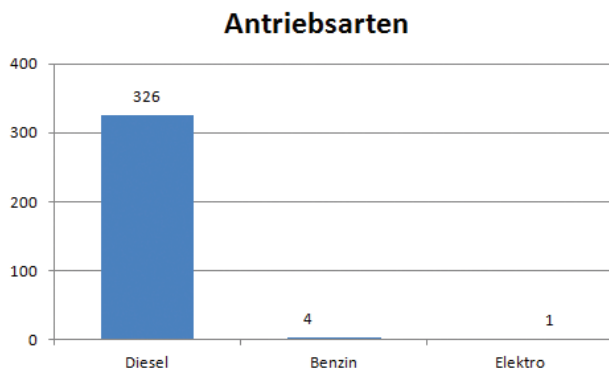


Abbildung 4: Beispielhafter Endenergieverbrauch (rot=Wärme, gelb=Strom, grün=Kraftstoff) und CO<sub>2</sub>-Ausstoß (braun) des Jahres 2017 der Autobahnmeisterei (AM) Hannover.

reien aus Bayern und Niedersachsen haben 331 Fahrzeuge angegeben, dies entspricht im Schnitt ca. 18 Fahrzeugen pro Meisterei. Von den 331 Fahrzeugen werden 326 mit Diesel angetrieben. Fahrzeuge mit Wasserstoffantrieb, Erdgasantrieb (engl. compressed natural gas, CNG) oder Flüssiggasantrieb (engl. liquefied natural gas, LNG) sind in den Fuhrparks der Meistereien nicht vorhanden beziehungsweise wurden nicht angegeben. Von den 331 Fahrzeugen sind 193 Lkw und Klein-Lkw. Das ist ein Anteil von 59,2 %. Es befinden sich 34 Pkw in den Fuhrparks der Meistereien (10,3 %), 29 MZGT (8,8 %), 32 Radlader (9,7 %), 6 Gabelstapler (1,8 %) sowie 37 Fahrzeuge in der Kategorie sonstige Fahrzeuge (11,2 %). In die Kategorie sonstige Fahrzeuge fallen z. B. Hubsteiger. Abbildung 5 (links) zeigt die Verteilung der Fahrzeuge nach Antriebsart und die dazugehörigen spezifi-



schen Emissionen pro Jahr und Fahrzeugtyp (rechts). Dabei wurde von den befragten Meistereien nicht ein spezielles Jahr angefordert, da davon ausgegangen wird, dass sich die Fahrprofile der verschiedenen Jahre jeweils stark ähneln.

Abbildung 5 zeigt ebenfalls, dass die spezifischen Emissionen bei den Lkw mit ca. 27 t CO<sub>2</sub> pro Fahrzeug und Jahr am höchsten sind, gefolgt von den MZGT (23 t CO<sub>2</sub> pro Jahr und Fahrzeug). Die Klein-Lkw, Pkw und sonstigen Fahrzeuge weisen einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß in Höhe von jeweils zwischen 4 und 7 t pro Jahr und Fahrzeug aus. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei den Radladern und Gabelstaplern liegen bei ca. 1,5 bzw. 0,7 t pro Fahrzeug und Jahr. Absolut stoßen die von den 18 Meistereien angegebenen Fahrzeuge ca. 4000 t CO<sub>2</sub> pro Jahr aus, vergleiche Abbildung 6.

Aus den betriebenen Analysen kann geschlossen werden, dass die theoretisch höchsten Einsparpotenziale bezüglich der Emissionen bei den Fahrzeugen liegen. Hier emittieren insbesondere die schweren Nutzfahrzeuge pro Jahr im Vergleich zu den leichten Nutzfahrzeugen und Pkw am meisten CO<sub>2</sub>. Durch eine Umstellung der Fahrzeugflotte auf batterieelektrische, wasserstoffbetriebene oder erdgasbetriebene Fahrzeuge könnten hier große Einsparungen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Emissionen erschlossen werden.

Die Analyse des Lastgangs Strom der Meisterei Hannover für das Kalenderjahr 2018 zeigt, dass der Strombedarf im Sommer geringer ausfällt als in den Wintermonaten. Ferner ist ersichtlich, dass die auftretenden Lastspitzen

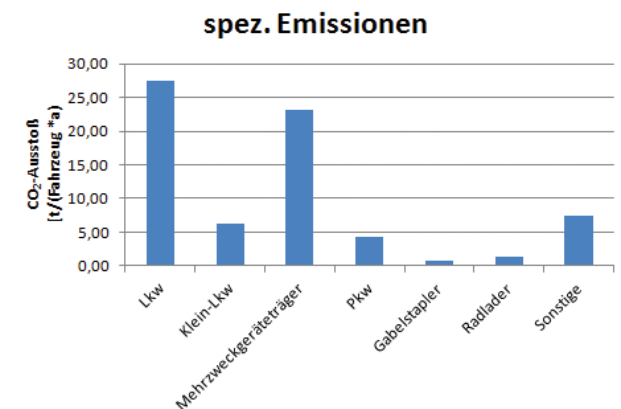


Abbildung 5: Verteilung der Fahrzeuge nach Antriebsart (links) und die dazugehörigen spezifischen Emissionen pro Jahr und Fahrzeugtyp (rechts).

### Emissionen gesamt [t CO<sub>2</sub>/Jahr]

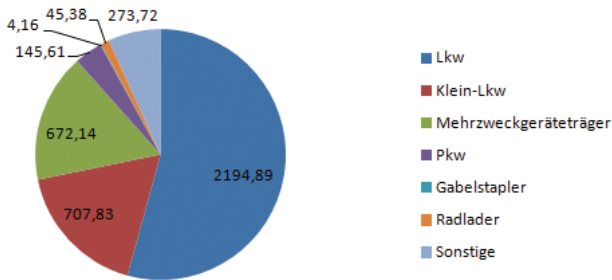


Abbildung 6: Emissionen der Meistereifuhrparks nach Fahrzeugtyp (akkumuliert).

zeitlich nur von kurzer Dauer sind und vor allem in den Wintermonaten auftreten. Aufgrund der Kurzfristigkeit der Lastspitzen ist zu vermuten, dass zu diesen Zeitpunkten die Pumpen anspringen, die zur Beförderung des Salzes aus der Salzhalle in das nebenstehende Silo benötigt werden. Auch ein erhöhter Bedarf durch die Werkstatt (Geräte mit Starkstrom) ist denkbar. Es lässt sich festhalten, dass der Bedarf an elektrischer Leistung der AM Hannover schwankend ist. Die Schwankungen sind in den kalten Monaten (Oktober bis März) stärker ausgeprägt als in den Sommermonaten (April bis September). Damit lässt sich insgesamt eine saisonale Schwankung des Energiebedarfs feststellen (Abbildung 7). Die blaue Linie stellt den täglichen Minimalbedarf der Meisterei an elektrischer Leistung dar, die rote Linie gibt entsprechend den Tageshöchstbezug wieder. Die

Temperaturdaten wurden durch den DWD bereitgestellt und zeigen eine Abhängigkeit des Bedarfs an elektrischer Energie von der Temperatur.

### 2.1.2 Schiene

Die Deutsche Bahn AG (DB AG) betreibt ein Streckennetz von ca. 33.000 km, rund 5400 Bahnhöfe sowie zahlreiche Werks- und Betriebsgebäude in Deutschland. Diese stationären Anlagen verbrauchen ca. 7 % des Gesamtenergiebedarfs des DB-Konzerns. Der größte Anteil wird indes durch Traktionsenergie aufgebracht, d. h. die Erbringung der Verkehrsleistung erfolgt durch elektrische Energie. Zur Versorgung des Streckennetzes wird ein eigenes Bahnstromnetz mit 16,7 Hz und zur Versorgung von Bahnhöfen sowie Bahnanlagen werden mehrere dezentrale 50-Hz-Stromnetze betrieben. Diese 50-Hz-Mittelspannungs- und Niederspannungsnetze sind keine Netze der allgemeinen, öffentlichen Stromversorgung, sondern geschlossene Verteilernetze zur betrieblichen Eigenversorgung. Eine Einspeisung in das mit 50 Hz betriebene öffentliche Stromnetz ist sowohl bei der zentralen als auch bei der dezentralen Versorgung ausschließlich über sogenannte Umformer und Umrichter möglich, die den elektrischen Strom auf die erforderliche Netzfrequenz des Bahnstroms umwandeln. Neben dem Bezug von Bahnstrom aus dem Energieversorgungsnetz der allg. Versorgung gemäß § 3 Nr. 17 EnWG (im

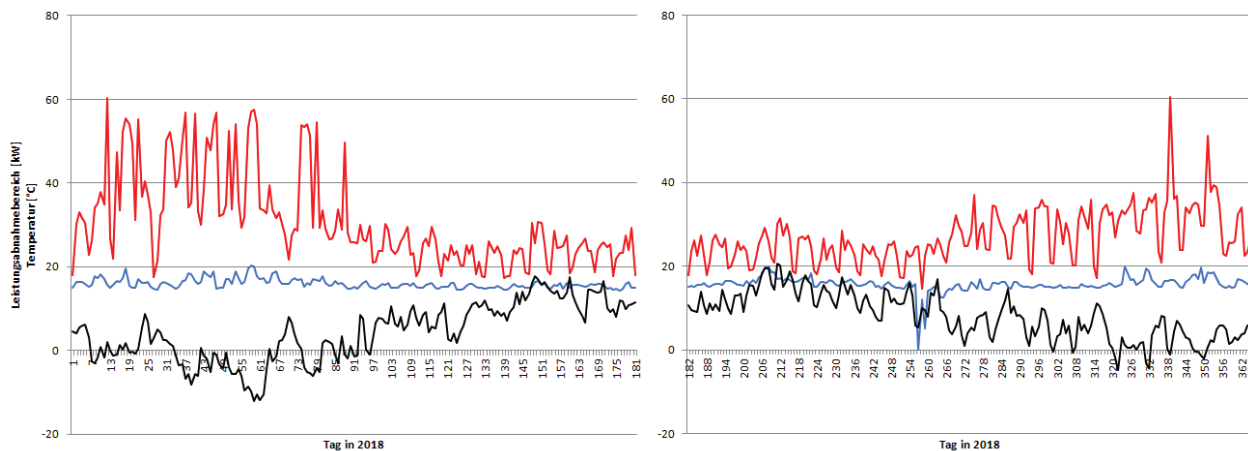


Abbildung 7: Leistungsabnahme der Meisterei Hannover 2018 (rot: Tageshöchstbedarf, blau: Minimalbedarf, schwarz: tägliche Temperaturminima).

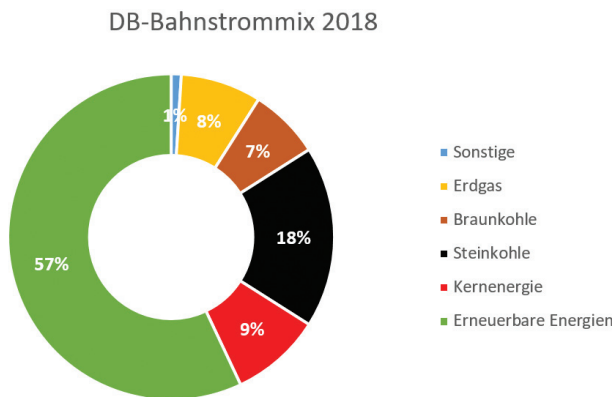


Abbildung 8: Bahnstrommix Deutsche Bahn 2018 (Deutsche Bahn AG, 2018).

Weiteren auch als "öffentliches Netz" bezeichnet) bezieht die DB Energie auch Traktionsenergie für ihr Bahnstromnetz direkt aus diversen Bahnstromkraftwerken. Die bilanzielle EE-Strommenge liegt im Jahr 2018 für den DB-Konzern bei 57 % (Abbildung 8). Der größte Anteil der durch die DB Energie betriebenen EE-Anlagen entfällt auf die Wasserkraft. Zudem hat die DB Energie Stromlieferverträge mit Windparkbetreibern in Brandenburg und Niedersachsen abgeschlossen. Im Jahr 2030 soll der bilanzielle EE-Stromanteil am Bahnstrommix bis auf 80 % ansteigen.

Der DB-Konzern verfolgt das strategische Klimaziel, den spezifischen – also auf die Verkehrsleistung bezogenen – Ausstoß der Treibhausgase bis 2030 gegenüber dem Jahr 2006 weltweit mehr als zu halbieren. Um Einsparpotenziale zu identifizieren und den Energieverbrauch langfristig zu überwachen, wurden in den Vorjahren für die Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie in rund 700 Tochtergesellschaften Energieaudits durchgeführt. Die DB-Regio AG, die S-Bahn Berlin GmbH, die S-Bahn Hamburg, die DB Fernverkehr AG, die DB Station & Service AG und die DB Energie GmbH betreiben seit dem Jahr 2016 ein Energiemanagementsystem nach DIN ISO 50001. Dies hat dazu beigetragen, dass der stationäre Energieverbrauch im Vergleich zu den Vorjahren weiter gesunken ist. Die DB Netze Personenbahnhöfe konnte bis Ende 2018 den absoluten Primärenergieverbrauch im Vergleich zu 2010 um 20,5 % senken. Im Rahmen des Energiemanagements bei DB Station & Service AG werden beispielsweise energetische Inspektionen, Leuchtmittelaustausch, die Dämmung von Geschossdecken und Rohrleitungen sowie der Austausch

veralteter Heizkesselanlagen durchgeführt. Bei der Auswahl von Beleuchtungssystemen rücken zunehmend Energieeffizienzanforderungen in den Vordergrund. Hierbei bieten Leuchtdiode-Applikationen (LED-Applikationen) eine hervorragende Möglichkeit, um herkömmliche lichttechnische Systeme in speziellen Bereichen von Personenbahnhöfen abzulösen.

Wird der Bahnhofbestand in Deutschland untersucht, ergibt sich ein sehr heterogenes Bild. Bahnhöfe besitzen trotz ihrer ähnlichen Aufgaben und Funktionen zum Teil sehr unterschiedliche bauliche Strukturen. Dies hängt in erster Linie mit den unterschiedlichen Größen und dem Verkehrsaufkommen sowie der zeitlichen Errichtung als auch mit den geografischen Gegebenheiten zusammen. Auch wenn es keine abgrenzbaren Gruppen kleiner und großer Bahnhöfe gibt, da der Größenverlauf beinahe stetig ist, lassen sich doch einige allgemeine Aussagen hinsichtlich der mengenmäßigen Verteilung von Bahnhöfen in Deutschland treffen: Je kleiner die Haltepunkte, desto größer die Anzahl der Bahnhöfe mit vergleichbarer baulicher Struktur. Je größer die Bahnhöfe, desto stärker die Heterogenität, desto höher das Verkehrsaufkommen und die Anzahl der Komfortzonen und Geschäfte. Daraus folgt der Schluss, die Energieeffizienz für Großbahnhöfe individuell zu optimieren, während es für kleine Haltepunkte zweckmäßiger ist, Standardverfahren für alle Standorte zu finden. Der Energieverbrauch in Bahnhöfen wird von einer großen Anzahl von Kriterien beeinflusst. Die Hauptverbraucher sind in Abbildung 9 vereinfacht dargestellt.

In Bahnhöfen, anders als in allen anderen Gebäudetypen, dominiert der Verbrauch elektrischer Energie. Insbesondere im Bahnsteigbereich wird ausschließlich Strom zum Betrieb der Beleuchtungs- und Fahrgastinformationsanlagen verwendet. Der Gesamtbedarf an elektrischer Energie in Personenbahnhöfen (Abbildung 10) beträgt 341 GWh im Jahr 2018. Das entspricht ca. 75 % des Gesamtenergiebedarfs, wovon der Anteil für die Beleuchtung ca. 59 % ausmacht. Weitere elektrische Hauptverbraucher sind aufgrund höhenungleicher Wegführungen der Betrieb von Aufzügen und Fahrtreppen mit ca. 20 % sowie die Raumlufttechnik (inkl. Konvektoren) mit 13 %. Die Gewerbeflächen im Vermarktungsbereich werden dagegen mit Gas, Öl oder Fernwärme versorgt. Die Bereitstellung erfolgt in erster Linie über Heizkessel und in einigen Fällen über nahe

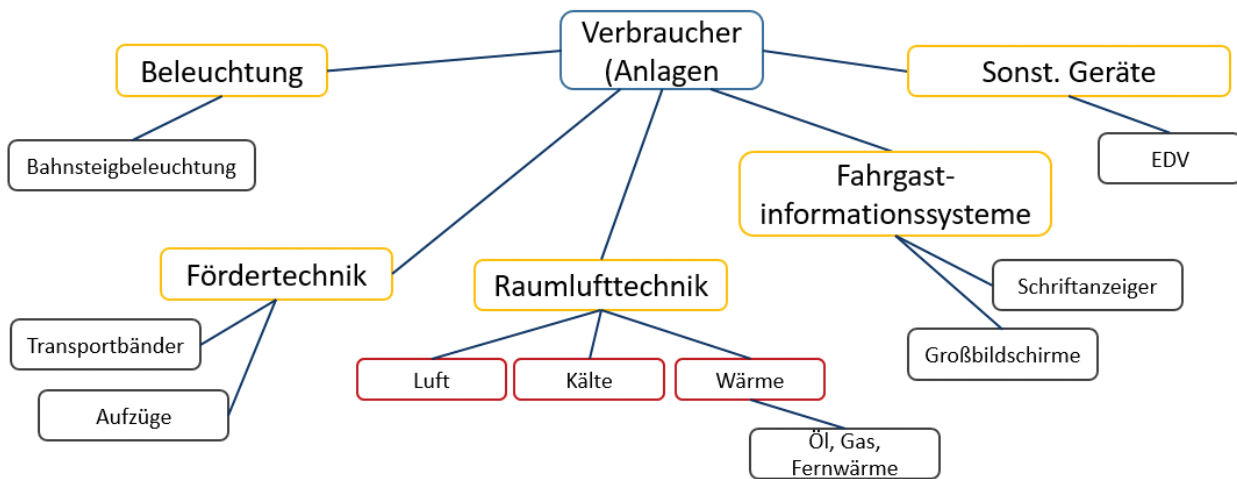


Abbildung 9: Hauptenergieverbraucher in Personenbahnhöfen.

liegende Blockheizkraftwerke durch Kraft-Wärme-Kopplung. Neben den stationären Energieverbrauchern in den Personenbahnhöfen sind weitere stationäre Energieverbraucher mit nicht unerheblichem Verbrauch elektrischer Energie vorhanden: Weichenheizung im Schienennetz, Beleuchtung auf Rangierbahnhöfen, Leit- und Sicherungstechnik sowie Belüftung und Beleuchtung in Werkshallen.

Wie zu Beginn genannt, wird der größte Teil des Energieverbrauchs für den Personen- und Gütertransport aufgewendet (Abbildung 11). Im Jahr 2018 waren in Deutschland fast 13.000 angetriebene Fahrzeuge registriert. Dazu zählen Lokomotiven, Triebköpfe, Triebwagen und Triebzüge. Der typische Bedarf an Traktionsenergie für einen

Triebwenzug im Schienenpersonennahverkehr liegt bei durchschnittlich 9 kWh, für längere Doppelstockzüge etwa 14 kWh je Trassenkilometer. Im Schienenpersonenfernverkehr benötigen lokbespannte Reisezüge etwa 13 kWh, ein Ferngüterzug durchschnittlich 18 kWh pro gefahrenen Trassenkilometer. Die für die elektrischen Triebfahrzeuge benötigte Traktionsenergie umfasst im Jahr 2018 einen Gesamtstrombezug von 8672 GWh. Insgesamt konnten durch Bremsrekuperation 1349 GWh zurückgewonnen werden. Hier unterscheiden sich der Schienengüterverkehr (9 % zurückgewonnene Energie), Schienenpersonenfernverkehr (12 %) und Schienenpersonennahverkehr (21 %) deutlich voneinander.

### Gesamtenergiebedarf der Personbahnhöfe [GWh/ Jahr]

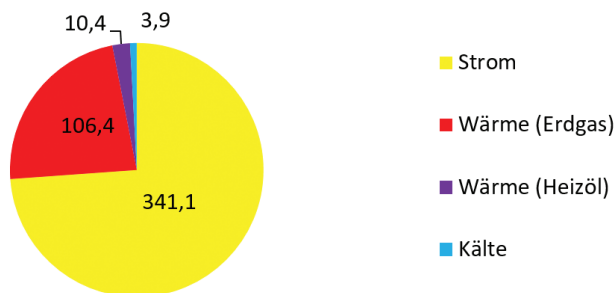


Abbildung 10: Endenergiebedarf Personbahnhöfe in Deutschland 2018.

### Strombezug/Traktionsenergie 2018 [GWh]

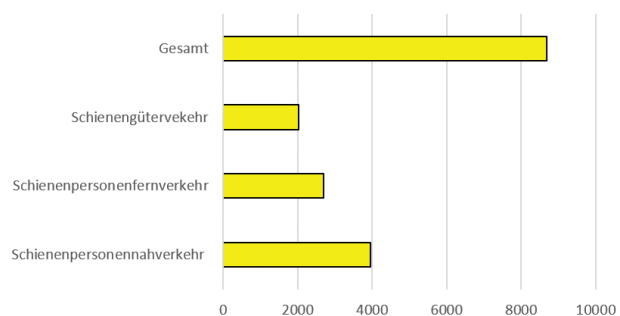


Abbildung 11: Aufnahme der Traktionsenergie aus dem Bahnstromnetz 2018 (eigene Darstellung nach DB Netze (2018)).

### 2.1.3 Wasserstraße

Um den Energieverbrauch reduzieren und Treibhausgasemissionen zielgerichtet einsparen sowie den vorhandenen Energiebedarf verstärkt aus EE decken zu können, ist es sinnvoll, zunächst die Arten und den Umfang der gegenwärtigen Energienutzung zu untersuchen. Eine Vielzahl verschiedener Anwendungen bezieht Energie in Form von elektrischem Strom, der beispielsweise in Büro- oder Betriebsgebäuden und in technischen Anlagen aller Art zum Einsatz kommt. Für weitere Anwendungen dienen Brennstoffe als Energieträger. Als Beispiele für die verschiedenen Energieträger werden in diesem Abschnitt drei Schwerpunkte behandelt:

- der Strombedarf von Pumpwerken zur Bewirtschaftung von Schifffahrtskanälen,
- der Kraftstoffbedarf für Land- und Wasserfahrzeuge der WSV sowie
- der Energiebedarf zur Wärmebereitstellung in Gebäuden der WSV.

### Strombedarf ausgewählter Pumpwerke

Schifffahrtskanäle verbinden als Wasserstraßen oft verschiedene Flusseinzugsgebiete miteinander und müssen daher Höhenunterschiede überwinden. Der Schiffsverkehr wird dabei durch Schleusen geleitet. Beim Füllen und Leeren der Schleusenkammern wird Wasser von der höher gelegenen in die tiefer liegende Kanalhaltung transportiert, was für die höher gelegene Haltung einen Wasserverlust bedeutet. Zusätzlich wird der Wasserhaushalt der Kanäle durch weitere natürliche und anthropogene Prozesse beeinflusst (Abbildung 32, Seite 46). Die Wasserverluste werden entweder kostenfrei aus höher gelegenen Reservoiren gedeckt (z. B. aus weiteren Kanalstauhaltungen oder natürlichen Gewässern) oder müssen, falls dies nicht ausreicht, durch Pumpen mit Wasser aus tiefer liegenden Reservoiren ausgeglichen werden. Dies führt zu einem Energiebedarf, der in der folgenden Untersuchung für ein begrenztes Gebiet quantifiziert wird.

Als Untersuchungsgebiet wurden drei Kanalstauhaltungen in Norddeutschland sowie die daran angeschlossenen fünf Pumpwerke ausgewählt (Abbildung 12). Das Gebiet verbind-

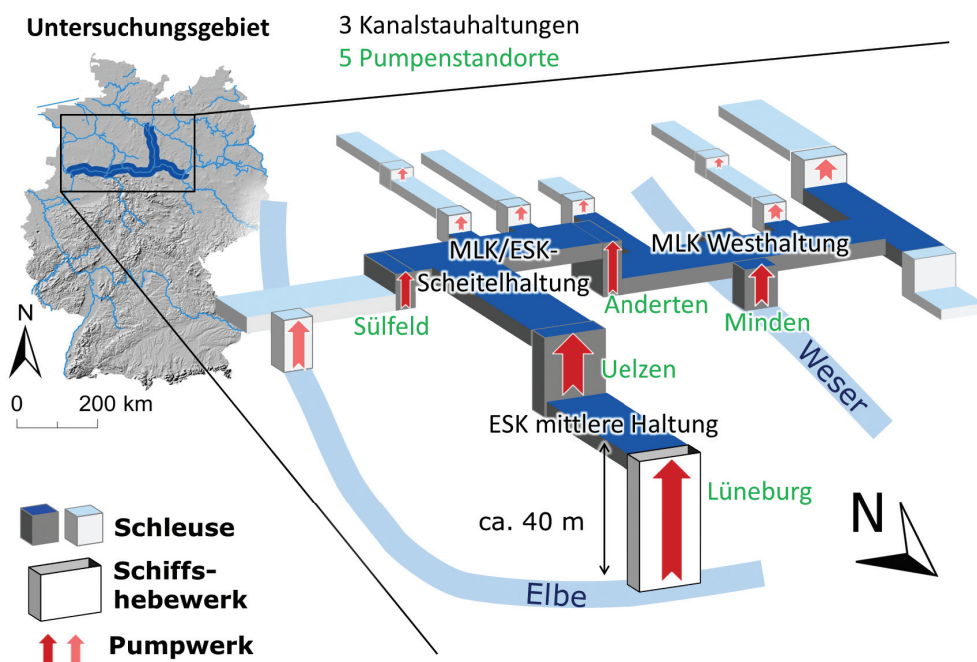


Abbildung 12: Lage des Untersuchungsgebietes und Übersicht über die Kanalstauhaltungen und Pumpwerke. MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal.

det das westdeutsche Kanalsystem im Ruhrgebiet mit der Weser und Elbe und hat mit über 380 km Kanalstrecke eine überregionale Bedeutung sowie mit einem Höhenunterschied von bis zu 61 m einen signifikanten Energiebedarf (Daten zu den Haltungen siehe Tabelle 1). Die Bewirtschaftung in diesem Gebiet lässt sich gut isoliert betrachten, da der Einfluss der angrenzenden Gebiete als Randbedingung abbildbar ist. Ein weiterer Grund für die Auswahl dieses Gebietes ist die gute Datenverfügbarkeit und das bestehende Kanalbilanzmodell BEWASYS (Bewirtschaftung wasserwirtschaftlicher Systeme) Rhein-Oder (BfG-1730, 2011) zur Simulation der Wassermengenbewirtschaftung.

Im Westen des betrachteten Gebietes liegt die Westhaltung des Mittellandkanals (MLK), die ohne Trennung mit dem Dortmund-Ems-Kanal (DEK) zwischen den Schleusen Münster und Bevergern verbunden ist. Sie verläuft in Ostwestrichtung und endet an der Schleuse Anderten im Osten. Südlich von der Westhaltung zweigen die Stichkanäle Osnabrück und Linden ab, an denen weitere Schleusen und Pumpwerke vorhanden sind, die als Randbedingung in die Berechnung eingehen. In Minden befinden sich Schleusenanlagen zum Abstieg in die Weser und ein Pumpwerk zur Wasserversorgung der Haltung aus der Weser (eine Übersicht zu allen Pumpwerken befindet sich in Tabelle 2). Östlich der Westhaltung schließt sich mit einem ca. 15 m höheren Wasserspiegel die Scheitelhaltung des MLK und ESK an. Ebenso wie in der Westhaltung gibt es in der Scheitelhaltung zwei Stichkanäle (Hildesheim und Salzgitter), die als Randbedingung berücksichtigt werden. Insgesamt besitzt die Scheitelhaltung von MLK und ESK eine Kanalstrecke von 123 km, zur Wasserversorgung sind Pumpwerke in Anderten, Sülfeld und Uelzen in Betrieb. Östlich der Scheitelhaltung schließt sich mit der Schleuse Sülfeld die Osthaltung des MLK an, die auf 9 m niedrigerem Höhenniveau liegt und sich bereits außerhalb des Untersuchungsgebietes befindet. Der ESK zweigt nach Norden aus dem MLK ab. Seine Scheitelhaltung endet in Uelzen, wo der Abstieg in die mittlere Haltung über eine Schleuse mit 23 m Hubhöhe führt. Auch ein Pumpwerk ist dort zur Versorgung der Scheitelhaltung vorhanden. Nach Norden setzt sich die mittlere Haltung bis zum Schiffshebewerk Lüneburg über 46 km fort. Dort befindet sich ebenfalls ein Pumpwerk, das Wasser aus der unteren Haltung des ESK entnimmt, die nach wenigen Kilometern ohne bauliche Trennung auf die Elbe trifft. Der Höhenunterschied beträgt hier je nach Was-

Tabelle 1: Übersicht über die Kanalhaltungen im Untersuchungsgebiet und ausgewählte angrenzende Haltungen (GDWS, 2015; GDWS, o. J.). MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal, DEK Dortmund-Ems-Kanal.

Haltung	Normalwasserstand [mNN]	Länge [km]
<b>Westhaltung MLK</b> (inkl. DEK zwischen Münster und Bevergern)	50,30	212
<b>Scheitelhaltung MLK/ESK</b>	65,00	123
<b>Osthaltung MLK</b>	56,00	87
<b>Mittlere Haltung ESK</b>	42,00	46
<b>Untere Haltung ESK</b>	4,00-8,00 <sup>1</sup>	9

Tabelle 2: Übersicht über die Pumpwerke im Untersuchungsgebiet.

Pumpwerk	Hubhöhe [m]	Anzahl Pumpen [-]	Kapazität jeder Einzelpumpe [m <sup>3</sup> /s]
<b>Anderten</b>	14,7	5	1,92
<b>Lüneburg</b>	34,2-37,9 (Mittelwert 37,3) <sup>2</sup>	4	2,25
<b>Minden</b>	9,4-13,3 (Mittelwert 12,8) <sup>3</sup>	4	4
<b>Sülfeld</b>	9	4	6
<b>Uelzen</b>	23	5	5,6

<sup>1</sup> Stauregelung auf Zielwasserstand 4,00 m durch die Wehranlage Geesthacht; bei Hochwasser der Elbe Begrenzung des Kanalwasserstandes auf 8,00 m durch das Hochwassersperrtor Artlenburg.

<sup>2</sup> Je nach Wasserstand der Elbe an der Mündung des ESK (angegebene Werte sind Minimum, Maximum und Mittelwert der hydrologischen Jahre 2001–2015 als BEWASYS-Modellergebnis).

<sup>3</sup> Je nach Wasserstand der Weser in Minden (angegebene Werte sind Minimum, Maximum und Mittelwert der hydrologischen Jahre 2001–2015 als BEWASYS-Modellergebnis).

serstand der Elbe bis zu 38 m. Im Vergleich zu den anderen Pumpwerken im betrachteten Gebiet ist dieser Höhenunterschied als besonders hoch zu bewerten.

## Methodik

Der Stromverbrauch der einzelnen Pumpen wird nicht in allen Pumpwerken erfasst, sondern liegt größtenteils nur für das ganze Pumpwerksgebäude in monatlicher oder jährlicher Auflösung vor. Daher muss er über andere Größen, die zeitlich feiner erfasst werden, abgeschätzt werden. Dazu werden die gepumpte Wassermenge, der Höhenunterschied zwischen Ober- und Unterwasser sowie der Jahresstromverbrauch der Pumpwerke verwendet, die als Messdaten oder als Modellergebnisse vorliegen. So ist eine tagessgenaue Abschätzung des Stromverbrauchs möglich.

## Ergebnisse

Der mittlere Leistungsbedarf der fünf betrachteten Pumpwerke Anderten, Lüneburg, Minden, Sülfeld und Uelzen im Untersuchungszeitraum 01.11.2000–31.10.2015 (entspricht den hydrologischen Jahren<sup>4</sup> 2001–2015) beträgt 2440 kW. Dies entspricht einem mittleren Jahresverbrauch von 21,37 GWh und einem CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 10.390 t, wenn der deutsche Strommix aus dem Jahr 2017 mit 486 g/kWh CO<sub>2</sub>-Emissionen zugrunde gelegt wird (Umweltbundesamt (2019). Zum Vergleich: Die gesamte Energiewirtschaft emittierte im Jahr 2016 332 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Umweltbundesamt, 2016).

Der mittlere Strombedarf schwankt in den einzelnen Jahren zwischen 1813 kW (2002) und 2907 kW (2009, vgl. Abbildung 13).

Den größten Anteil am Strombedarf im Untersuchungsgebiet hat das Pumpwerk Uelzen mit 1114 kW im vieljährigen Mittel von 11/2000 bis 10/2015 (Abbildung 14). Es besitzt zum einen eine mit ca. 23 m vergleichsweise große Hubhöhe, zum anderen gibt es in seinem Unterwasser (mittlere Haltung des ESK) keine Schleusungsverluste. Das bedeutet, dass in dieser Haltung oftmals Reserven verfügbar sind, mit denen die Scheitelhaltung des MLK/ESK aufgefüllt werden

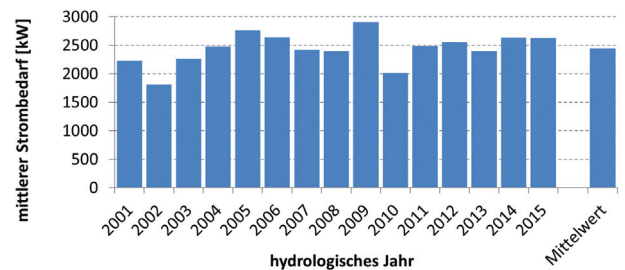


Abbildung 13: Mittlerer Stromverbrauch der Pumpwerke Anderten, Lüneburg, Minden, Sülfeld und Uelzen für die hydrologischen Jahre 2001–2015<sup>5</sup> und als Mittelwert über den gesamten Zeitraum.

kann. Es folgt in der Rangfolge das Pumpwerk Anderten mit im Mittel 663 kW. Die geringere Hubhöhe im Vergleich zum Pumpwerk Uelzen lässt auch den Energiebedarf sinken. Das Pumpwerk Minden benötigt im Mittel 331 kW Leistung. Der Energiebedarf ist geringer als in den Pumpwerken Anderten oder Uelzen, weil die MLK-Westhaltung vor allem im Winterhalbjahr Wasser durch oberirdische Zuflüsse erhält und daher in Minden weniger Pumpleistung gebraucht wird. Im Pumpwerk Sülfeld wird eine mittlere Leistung von 261 kW benötigt. Die Energiemenge wird hier zum einen von der vergleichsweise geringen Hubhöhe von 9 m bestimmt, zum anderen wird die gepumpte Wassermenge durch das Schleusungswasser in Sülfeld und den Wasseraustausch mit dem Feuchtgebiet Drömling begrenzt, aus dem saisonal Grundwasser in die MLK-Osthaltung strömt. Am wenigsten Energie im Untersuchungsgebiet benötigt das Pumpwerk Lüneburg mit im Mittel 71 kW. Aufgrund der enormen Hubhöhe von 34–38 m und einem dementsprechend hohen Energieverbrauch wird versucht,

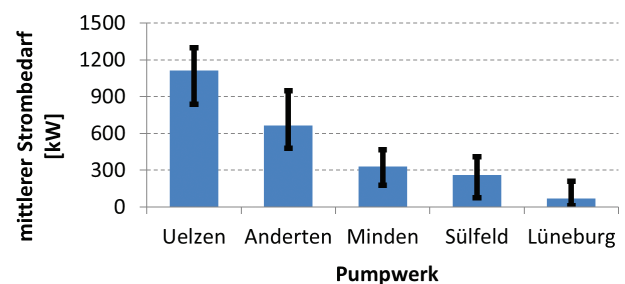


Abbildung 14: Mittlerer Stromverbrauch der einzelnen Pumpwerke für die hydrologischen Jahre 2001–2015. Die Balken zeigen die Schwankungsbreite des Verbrauchs einzelner hydrologischer Jahre an.

<sup>4</sup> Hydrologische Jahre dauern vom 01.11. des Vorjahres bis zum 31.10.

dort möglichst geringe Wassermengen zu pumpen. Dies wird dadurch begünstigt, dass am Standort Lüneburg ein Schiffshebewerk existiert, das keine Wasserverluste aus der mittleren Haltung des ESK hervorruft. Weitere Verluste in der mittleren Haltung des ESK, beispielsweise landwirtschaftliche Entnahmen, müssen dennoch durch das Pumpwerk Lüneburg ausgeglichen werden.

Bei Betrachtung der einzelnen Kanalstauhaltungen wird zur Bewirtschaftung der Scheitelhaltung 83,5 % der gesamten Energie im Untersuchungsgebiet benötigt. Auf die Westhaltung des MLK entfallen 13,6 %, auf die mittlere Haltung des ESK 2,9 %.

Der jährliche Verlauf des Energieverbrauchs (Abbildung 15) zeigt ein ausgeprägtes Maximum in den Sommermonaten. Die monatlichen Unterschiede sind durch Unterschiede in den Schleusungszahlen und im natürlichen Wasserdargebot, das für die Kanäle zur Verfügung steht, zu erklären.

Bei Betrachtung der kanalhaltungsspezifischen Jahresverläufe lässt sich dies genauer zeigen (Abbildung 16). Der Strombedarf der Pumpen an der Scheitelhaltung MLK/ESK (Abbildung 16 (1)) bildet ein Plateau von ca. Juni bis Oktober aus, in denen der mittlere Strombedarf durchgehend über 2200 kW liegt. In den restlichen Monaten sinkt

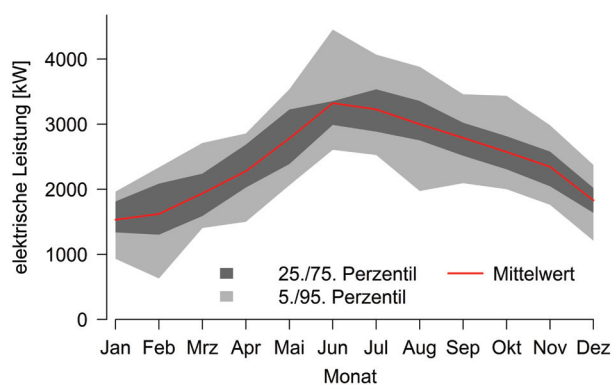


Abbildung 15: Jahresgang des Strombedarfs der fünf Pumpwerke im Untersuchungsgebiet. Dargestellt sind als rote Linie die Mittelwerte für jeden Kalendermonat. Im dunkelgrauen Bereich zwischen dem 25. und 75. Perzentil liegt die Hälfte aller Monatsmittelwerte, 25 % der Werte sind kleiner und 25 % sind größer. Im hellgrauen Bereich, zwischen dem 5. und 95. Perzentil, liegen 90 % aller Monatsmittelwerte, 5 % sind jeweils kleiner und größer. Der Untersuchungszeitraum ist 01.11.2000–31.10.2015.

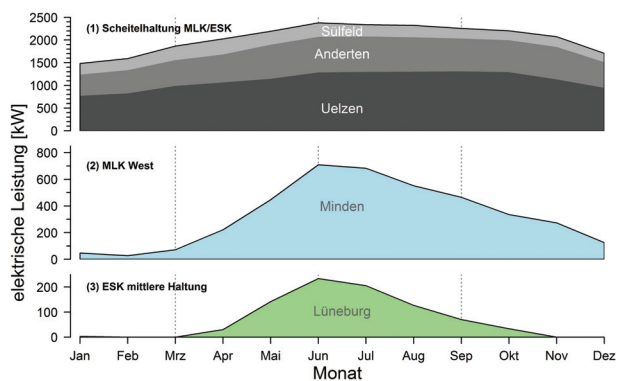


Abbildung 16: Mittlerer Jahresgang des Strombedarfs in monatlicher Auflösung, aufgeteilt nach Kanalhaltungen, für den Zeitraum 01.11.2000–31.10.2015. MLK Mittellandkanal, ESK Elbe-Seitenkanal. Unterschiedliche Skalierung der y-Achse zur Erhöhung der Sichtbarkeit.

der Stromverbrauch unter diesen Wert. Im Januar beträgt er mit 1482 kW nur 62 % des Maximalwerts im Juni. Hier ist der Einfluss der Schleusungen erkennbar, die einen großen Teil der Wasserverluste der Scheitelhaltung ausmachen und im Mittel einen ähnlichen Jahresverlauf aufweisen. Bei der Versorgung des MLK-West (Abbildung 16 (2)) ist der Jahresgang ausgeprägter. Die Spitzenmonate Juni und Juli verzeichnen mit 709 bzw. 683 kW den größten mittleren Strombedarf. Im restlichen Jahr sinkt der Strombedarf jedoch teils stark ab, zwischen Dezember und April beträgt er weniger als ein Drittel des verbrauchsintensivsten Monats Juni. Im Februar wird knapp 4 % des im Juni verbrauchten Stroms benötigt. Die Ursache dafür sind oberflächliche Zuflüsse in den Kanal aus kleinen Gewässern wie dem Warber-Graben. Diese besitzen in den Winter- und Frühjahrsmonaten ein größeres Wasserdargebot als in den restlichen Monaten und können einen großen Teil der Verluste der Westhaltung decken. Hinzu kommen, wie auch in der Scheitelhaltung, geringere Schleusungsverluste im Winter in Minden und Bevergern, die die Wasserbilanz positiv beeinflussen. Der Strombedarf des Pumpwerks Lüneburg (Abbildung 16 (3)) ist zwischen November und März annähernd null, steigt aber während der Jahresmitte auf bis zu 234 kW an (mittlerer Juniverbrauch). Dies ist dadurch erklärbar, dass die mittlere Haltung des ESK für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen genutzt wird. Diese Entnahmen sorgen für erhöhte Wasserverluste aus der Haltung im Sommer.



Neben den jährlichen, monatlichen und täglichen Schwankungen im Strombedarf gibt es auch innertägliche. Die technischen Gegebenheiten erlauben keinen stufenlosen Betrieb der Pumpen, sondern nur bestimmte Betriebspunkte mit konstanter Pumpmenge. Die zu pumpende Wassermenge wird über die Betriebsdauer reguliert. In der Regel werden die Pumpen täglich an- und abgeschaltet, da es nicht notwendig ist, die Pumpen über den ganzen Tag laufen zu lassen. Aufgrund des im Vergleich zu einem durchschnittlichen Haushalt sehr hohen Strombedarfs schließt die WSV regelmäßig spezielle Verträge mit den Stromversorgern ab. Bestandteil dieser Verträge sind, zumindest für die Pumpen im Untersuchungsgebiet, Hochlastzeiten, zu denen nicht gepumpt werden sollte. Bei Verletzung dieser Zeiten werden die Preise für den nächsten Vertragszeitraum erhöht. Durch solche vertraglichen Bedingungen, die nicht durch eine wasserwirtschaftliche Notwendigkeit bedingt sind, bilden sich tageszeitliche Schwankungen beim Pumpbetrieb aus, beispielsweise ein regelmäßiges nächtliches Pumpen.

### Kraftstoffbedarf der WSV-Fahrzeugflotte

Die WSV besitzt im gesamten Bundesgebiet 3246 Landfahrzeuge (Stand: 15.02.2017) und 1321 Wasserfahrzeuge (Stand: 20.03.2018) sowohl mit als auch ohne eigenen Antrieb (GDWS, 2019c). Als Kraftstoffkosten verbucht wurden im Jahr 2018 für die Landfahrzeuge rund 3,7 Mio. € und für die Wasserfahrzeuge rund 17,4 Mio. €. Werden durchschnittliche Preise für die Kraftstoffe im Jahr 2018 zugrunde gelegt, ergeben sich Kraftstoffmengen von rund 32 Mio. l (3 Mio. l für Land-, 29 Mio. l für Wasserfahrzeuge; (GDWS, 2019a). Die verwendeten Kraftstoffe sind bei den Wasserfahrzeugen Marinediesel und bei den Landfahrzeugen überwiegend Diesel (GDWS, 2019b). Daraus ergeben sich Treibhausgasemissionen von 112.800 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent für die Fahrzeugflotte der WSV (ermittelt nach EN 16258 mit Werten für "Well-to-Wheel" aus: (Deutscher Spedition- und Logistikverband e.V., 2013). Zum Vergleich: Der gesamte Verkehr in Deutschland emittierte 2016 167 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent (Umweltbundesamt, 2016). Im Hinblick auf die Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Handlungsfeld Verkehr wird somit deutlich, dass emissionsmindernde Maßnahmen bzw. neue Antriebstechnologien sich nicht auf die WSV-Flotte beschränken, sondern auf den gesam-

ten Verkehr ausgeweitet werden sollten, um einen wirksamen Emissionsminderung zu erreichen.

### Wärmebedarf der WSV-Gebäude

Ein großer Bedarf an Energie besteht durch die Wärmebereitstellung in Gebäuden. In einer Studie der BAW (2017) wurden Daten von 350 Gebäuden von Außenbezirken und Bauhöfen der WSV erfasst und ausgewertet. Zum Zeitpunkt der Datenerfassung 2012 wurden dabei in über 90 % der Gebäude Öl oder Gas zur Wärmeerzeugung verwendet, andere Energieträger wie Fernwärme, Strom oder Holz machten nur einen geringen Anteil aus. EE wurden nur in 2 % der erfassten Heizanlagen genutzt. Der Primärenergieverbrauch für die Wärmeversorgung liegt im Mittel bei 250 kWh/m<sup>2</sup>a, was in etwa dem Doppelten des in der Energieeinsparverordnung 2014 für diese Gebäudegruppe angegebenen üblichen Wertes entspricht.

Durch die Altersstruktur der Heizanlagen besteht laut der genannten Studie in naher Zukunft ein großes Potenzial zur Erhöhung des Anteils der EE und generell zur Modernisierung der Anlagen. Durch den ohnehin notwendigen Austausch vieler Anlagen aufgrund ihres Alters könnte bei konsequenter Umstellung auf erneuerbare Energieträger deren Anteil auf 48 % im Jahr 2020 ansteigen.

Für weitere Details sei auf die Studie der BAW (2017) verwiesen, die neben der Zustandserfassung auch umfangreiche Empfehlungen zur Umsetzung energetischer Sanierungen oder anderer Energieeinsparmaßnahmen enthält. Die Erkenntnisse aus der Studie können eine hilfreiche Unterstützung bei der Umsetzung des Erlasses zur klimaneutralen WSV vom 22.11.2018 (BMVI, 2018) sein. Der genannte Erlass hat unter anderem das Ziel, den Gebäudebestand der WSV, als Vorbild für andere Bundesverwaltungen, klimaneutral zu gestalten.

## 2.2 Stromerzeugung für den Eigenverbrauch

Entsprechend der aktuellen Ausbauziele der Bundesregierung und dem Bestreben, die Klimaschutzziele einzuhalten, müssen zwei Schritte gleichermaßen verfolgt werden: Zum einen muss der Energieverbrauch durch Effizienzsteige-

zung und Systemoptimierung gesenkt werden. Für dieses Bestreben wurde in Kapitel 2.1 der anfallende Energiebedarf der verschiedenen Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße analysiert. Zum anderen muss ein Systemwechsel von einem konventionellen Energiesystem zu einem Stromsystem, das zunehmend auf volatile Erzeugung setzt, verfolgt werden. Als erneuerbare Quellen zählen neben Windenergie und PV auch die Solar- und Geothermie, die Wasserkraft oder die Nutzung von Biomasse. Im Jahr 2018 betrug der Anteil EE an der Nettostromerzeugung in Deutschland ca. 40,6 % (Fraunhofer ISE, o. J.). Dabei entfielen 20,4 % auf Windenergie (onshore und offshore), 8,4 % auf Solarenergie, 8,2 % auf Biomasse und 3,6 % auf Wasserkraft.

Die meteorologischen Hintergründe sowie neue Technologien zur Erzeugung von EE-Strom im Allgemeinen und an der Verkehrsinfrastruktur im Speziellen werden im Folgenden aufgezeigt. Der Fokus liegt hierbei ausschließlich auf der Stromerzeugung für den Eigenverbrauch der Verkehrsinfrastruktur. Der Begriff "Eigenverbrauch" bzw. "Eigenstromverbrauch" bezeichnet in dieser Untersuchung die Strommenge, die an der Verkehrsinfrastruktur erzeugt und am Ort der Erzeugung oder an einer beliebigen anderen Anlage der Verkehrsinfrastruktur zum gleichen Zeitpunkt verbraucht wird. Dafür kann ein Stromtransport durch ein Elektrizitätsversorgungsnetz notwendig sein, was jedoch bei den folgenden Überlegungen vernachlässigt wird. Der Aspekt der Interaktion mit einem Elektrizitätsversorgungsnetz wird bei den folgenden Überlegungen zunächst vernachlässigt. In der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks (Expertenetzwerk 1.0) findet zudem eine Konzentration auf die PV-Technik statt. Diese scheint durch geringere technische und rechtliche Rahmenbedingungen sowie Genehmigungen an den Verkehrswegen integrierbar, was durch einzelne bereits existierende und betriebene Demonstratoren bestätigt werden kann.

Zudem wird im Expertenetzwerk 1.0 ein Portfolio erneuerbarer Technologien vorgestellt, die in der Verkehrsinfrastruktur zum Einsatz kommen können oder bereits in ersten Demonstratoren getestet werden. Durch die Verbindung meteorologischer Informationen und standortspezifischer Gegebenheiten der Verkehrsträger sollen erste Abschätzungen zur möglichen Stromerzeugung mittels PV an den verschiedenen Verkehrsträgern erfolgen.

## 2.2.1 Meteorologische Grundlagen

Das Energiesystem ist an vielen Stellen direkt oder indirekt vom aktuellen atmosphärischen Zustand abhängig. Dies gilt für die Teilsektoren Energiewirtschaft, Gebäude (Wärme/Kälte) und Mobilität gleichermaßen, wobei sich die hier präsentierten Arbeiten auf die meteorologischen Aspekte der Stromerzeugung fokussieren. Die verschiedenen Bereiche des Stromsystems (Erzeugung, Verteilung, Verbrauch) werden von Wetterinformationen auf variierenden Zeit- und Raumskalen beeinflusst. Durch den zunehmenden Ausbau volatiler EE-Anlagen (Solar und Wind) werden immer größere Herausforderungen an Elektrizitätsnetzbetreiber gestellt, da sowohl Einspeise- als auch Lastflussprognosen größeren Unsicherheiten unterworfen sind. Dies führt zu höheren Ansprüchen der Elektrizitätsnetzbetreiber an zeitlich hochaufgelöste Wettervorhersagen, um eine gleichbleibende Netzstabilität zu gewährleisten.

### Energierrelevante meteorologische Parameter

Durch die vielfältigen Anknüpfungspunkte zwischen Energiesystem und Meteorologie ergibt sich ein großes Portfolio energierelevanter meteorologischer Parameter. Diese variieren je nach Einsatzgebiet (Erzeugung, Stromhandel, Netzbetrieb oder Vertrieb) und reichen von erhöhten raumzeitlichen Auflösungen, Punkt- oder flächengemittelten Prognosen hin zu Vorhersagen von Minuten bis Tagen (Schroedter-Homscheidt et al., 2015). Unter anderem werden Temperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Verdunstung, Windrichtung, solare Einstrahlung und deren direkte und diffuse Komponenten in Bodenhöhe benötigt. Zudem ist auch die vertikale Verteilung einiger Größen von Interesse, beispielsweise Aerosolkonzentrationen, Feuchteprofile oder Windfelder. Aerosol- und Wasserdampfkonzentrationen dienen vor allem der genaueren Bestimmung des Strahlungstransfers in der Atmosphäre und damit der am Boden ankommenden Solarstrahlung, während Windgeschwindigkeiten zur Potenzialanalyse von neueren und größeren Windenergieanlagen (WEA) zunehmend auch in Höhen über 100 m angefordert werden.

Durch die Fokussierung der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks auf die Stromerzeugung aus PV werden zunächst Qualitätsabschätzungen der für PV relevanten Parameter erarbeitet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Untersuchte meteorologische Parameter mit Einfluss auf den PV-Ertrag sowie untersuchte Datensätze.

Parameter	Bedeutung im Energiesektor	Untersuchte Datensätze
<b>10-m-Wind</b>	Durch Kühlungseffekte entstehen Einflüsse auf die Temperatur von PV-Modulen ( $T_{mod}$ ).	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ COSMO-REA6</li> <li>■ ERA5</li> <li>■ Bodenstationen</li> </ul>
<b>10-m-Windspitzen</b>	Bestimmung des Schadenspotenzials von PV-Anlagen.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ COSMO-REA6</li> <li>■ Bodenstationen</li> </ul>
<b>Globalstrahlung</b>	Direkter und über $T_{mod}$ auch indirekter Einfluss auf PV-Ertrag.	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ COSMO-REA6</li> <li>■ SARAH-2</li> <li>■ Bodenstationen</li> <li>■ TRY</li> </ul>

Die Eigenschaften und Qualitäten der in Tabelle 3 genannten Datensätze werden im nächsten Abschnitt eingehend erläutert.

## Meteorologische Datensätze

### Reanalysen

Im Bereich der Stromerzeugung aus EE-Anlagen ist die Verwendung atmosphärischer Reanalysen bereits sehr verbreitet, wie eine Vielzahl von Veröffentlichungen zeigt. Beispielsweise beschreiben Staffell and Pfenninger (2016) die Nutzung von Reanalysen zur Simulation zukünftiger Windenergie und Pfenninger and Staffell (2016) die Analyse zur Langzeitentwicklung des Energieoutputs aus PV. Insbesondere zur Modellierung langer Zeitreihen der Stromerzeugung als auch zur Langzeitkorrektur von Messungen der Windgeschwindigkeit werden sie erfolgreich eingesetzt. Die Weiterentwicklung globaler hin zu regionalen Reanalysen mit deutlich höheren zeitlichen und räumlichen Auflösungen hat die Anwendung solcher Datensätze noch einmal verstärkt.

Reanalysen überzeugen durch konsistente, lückenlose und lange Zeitreihen und decken in den meisten Fällen ein gro-

Tabelle 4: Räumliche und zeitliche Auflösung/Abdeckung der meteorologischen Datenprodukte.

Produkt	Räumliche/ Zeitliche Auflösung	Räumliche/ Zeitliche Abdeckung
<b>COSMO-REA6</b>	~ 6 km/ stündlich	Europa + Nordafrika/ 1995-2018
<b>ERA5</b>	~ 31 km/ stündlich	Global/ 1979-heute
<b>ERA-I</b>	~ 79 km/ 6-stündlich	Global/ 1979-2019
<b>SARAH-2</b>	~ 5,5 km/ 30-minütig	± 60°O und ± 60°N/ 1983-2017
<b>TRY</b>	1 km/ stündlich	Deutschland 1995-2012

ßes räumliches Gebiet ab. Verschiedene Produkte können in ihrer zeitlichen (Jahrzehnte oder ganze Jahrhunderte) als auch räumlichen (regional bis global) Verfügbarkeit jedoch stark variieren. Reanalysen vereinen jahrzehntelange Forschung im Bereich der numerischen Wettervorhersage (NWV) mit gesammelten Beobachtungen und meteorologischen Messungen aus mehreren Jahrhunderten. Mithilfe eines gewählten Datenassimilationsschemas werden Beobachtungen mit dem Modelloutput von NWV-Modellen vereint, um den atmosphärischen Zustand des vergangenen Zeitschritts bestmöglich abzubilden. Im Unterschied zur operationellen Wettervorhersage wird bei der Erstellung einer Reanalyse jedoch stets die gleiche Modellversion benutzt, um die Konsistenz der Daten über einen langen Zeitraum aufrecht zu erhalten. Im Folgenden werden die regionalen Reanalysen COSMO-REA6 (Bollmeyer et al., 2015), entwickelt im Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung (HErZ) von der Universität Bonn und dem DWD, und die globalen Reanalyseprodukte ERA-Interim und ERA5, entwickelt am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW), verwendet und die Qualität der drei Datensätze analysiert. Die räumliche und zeitliche Auflösung, sowie die räumliche und zeitliche Abdeckung der verschiedenen Reanalysen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

## Satellitendatensätze

Für stromerzeugungsrelevante Fragestellungen im Bereich PV werden neben Einstrahlungsdaten aus Reanalysen auch Satellitenprodukte ausgewertet. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf dem vom Satellite Application Facility of Climate Monitoring (CM SAF) produzierten Datensatz Surface solar radiation data records – Heliosat – 2. Generation (SARAH-2). SARAH-2 basiert auf den Beobachtungen der Meteorat-visible-and-infrared-imager-(MVIRI)- und spinning-enhanced-visible-infrared-imager-(SEVIRI)-Instrumente der Meteorat-Satellitenreihe (Meteorat-2 bis Meteorat-10) und bietet Datensätze für eine Vielzahl abgeleiteter Größen (Pfeifroth et al., 2019). In der folgenden Auswertung werden die Globalstrahlung an der Oberfläche (Surface incoming shortwave radiation) als Summe aus direktem und diffusem Strahlungsanteil untersucht.

## Beobachtungen und Rasterdatensätze

Der DWD unterhält ein dichtes Messnetz von Bodenbeobachtungen, das eine Vielzahl meteorologischer Variablen umfasst. Im Jahr 2019 verfügt der DWD insgesamt über 182 hauptamtliche Stationen sowie über 800 weitere nebenamtliche Online Stationen (DWD, o. J.-b). Die Anzahl der Stationen, die in die Auswertungen eingehen, variieren je nach Parameter und Vergleich. Für den Parameter Wind stehen über 200 Stationen zur Verfügung, während die Zeitreihen der Globalstrahlung an 38 Stationen verglichen werden. Messungen und Metainformationen wie Gerätewechsel oder Standortänderungen sind im Datenportal des DWD abrufbar (Opendata, o. J.).

Zusätzlich zu den Punktmessungen bietet der DWD zahlreiche Rasterdaten an, die meteorologische Informationen in die Fläche bringen. Der sogenannte Test-Reference-Year-(TRY)-Basisdatensatz verfügt über Felder von 12 verschiedenen Variablen und ist im DWD-Datenangebot verfügbar (TRY, o. J.). Motivation hinter dem hier verwendeten 18-jährigen TRY Basisdatensatz ist die Erstellung eines Referenzdatensatzes für die technische Klimatologie, dem sogenannten Testreferenzjahr, das bei technischen Fragestellungen, insbesondere im Baugewerbe, zur Anwendung kommt. Beispielsweise sollen die meteorologischen Informationen zur Berechnung von Heiz- und Kühlsystemen in

der Gebäudeklimatisierung dienen. Für die TRY Variablen werden verschiedene Interpolationsverfahren und Datengrundlagen benutzt, siehe auch Krähenmann et al. (2018). Gegenüber Reanalysen sind diese Methoden weitaus weniger rechenintensiv, sodass höhere zeitliche und räumliche Auflösungen möglich sind.

## Qualität der Windfelder

### Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe

Die Windgeschwindigkeit der Grenzschicht, des unteren Teils der Atmosphäre, der von der Erdoberfläche beeinflusst wird (Kraus, 2008), ist eine räumlich stark variable Größe. Diese ist von vielen lokalen Gegebenheiten abhängig wie Landnutzung, Bebauung und Bewuchs sowie Orografie. Daher sind Interpolationsverfahren auf Basis von Stationsbeobachtungen in den meisten Fällen nur sehr unbefriedigend, da die Erdoberfläche extrem inhomogen ist. Modellbasierte Daten wie Reanalysen bieten eine gute Alternative. Da sie durch ihre festgelegte räumliche Auflösung keine Punktinformationen liefern können, sondern nur Aussagen über eine Fläche geben, können jedoch an einzelnen Standorten große Abweichungen zwischen Modell und Realität auftreten. Sowohl der mittlere Fehler (engl. mean error, ME), oft auch als Bias bezeichnet, sowie der absolute mittlere Fehler (engl. mean absolute error, MAE) und die Korrelation zwischen Beobachtungsdaten und Reanalysen werden im Folgenden gemäß (Damrath, 2002) berechnet und in Tabelle 5 dargestellt. Während der ME über positive und negative Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung hinweg mittelt und so das gegenseitige Aufheben mehrerer Fehler ermöglicht, berücksichtigt der MAE nur die absoluten Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung.

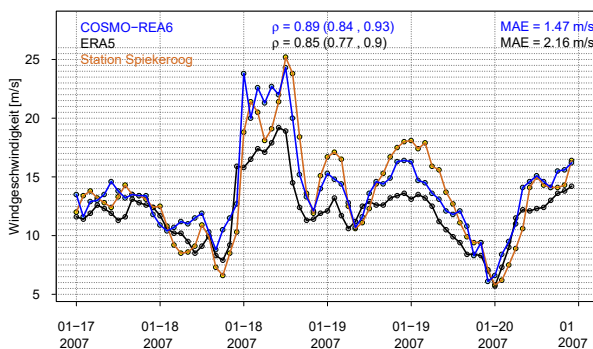
Während COSMO-REA6 gegenüber ERA-Interim noch einen signifikanten Vorteil aufweisen kann, zeigt ERA5 trotz der deutlich gröberen Auflösung gegenüber COSMO-REA6 ähnliche Übereinstimmungen mit den Beobachtungen. Während 90 % der Stationen in COSMO-REA6 ein Bias kleiner als 0,68 m/s haben, liegt der Schwellwert in ERA5 geringfügig höher bei 0,72 m/s, in ERA-Interim jedoch bei 1,31 m/s. Im Vergleich mit anderen regionalen Produkten mit ähnlicher räumlicher Auflösung kann COSMO-REA6 ebenfalls überzeugen (Niermann et al., 2019). Große Unter-

Tabelle 5: Korrelation, mittlerer Fehler (Bias) und absoluter mittlerer Fehler (MAE) zwischen 10-m-Wind-Messungen und den drei ausgewählten Reanalysen COSMO-REA6, ERA5 und ERA-Interim. Als Datengrundlage dienen 209 Stationen und die Auswertungsperiode 1995–2015.

Alle Stationen/ unter 500 m	Korrelation [0,1-Quantil]	MAE [0,9-Quantil] [m/s]	Bias [0,9-Quantil] [m/s]
<b>C-REA6</b>	0,82 [0,74] <b>0,84 [0,78]</b>	1,14 [1,49] <b>0,97 [1,25]</b>	-0,21 [0,68] <b>0,004 [0,69]</b>
<b>ERA5</b>	0,81 [0,72] <b>0,83 [0,75]</b>	1,21 [1,56] <b>1,01 [1,32]</b>	-0,24 [0,72] <b>0,05 [0,75]</b>
<b>ERA-I</b>	0,78 [0,67] <b>0,79 [0,71]</b>	1,40 [1,86] <b>1,26 [1,63]</b>	0,27 [1,31] <b>0,59 [1,38]</b>

schiede lassen sich an Stationen erkennen, die nicht repräsentativ für eine größere Umgebung erscheinen, beispielsweise Berg- und Talstationen, (Abbildung 17, rechts). Hier führt die grobe Auflösung in ERA5 zu einer starken Unterschätzung der wahren Stationshöhe, sodass auch der wahre Wind im Modell am Standort Hohenpeissenberg deutlich unterschätzt wird.

In den meisten Fällen können die Modelle den Zeitpunkt des Sturmevents richtig wiedergeben, beispielhaft für den Orkan Kyrill in Abbildung 17. Die Stärke wird in einigen Fällen jedoch unterschätzt. Oft zeigen die Reanalysen untereinander eine stärkere Ähnlichkeit als zu den entsprechenden Beobachtungen.



## Windspitzen in 10 m Höhe

Neben der mittleren Windgeschwindigkeit gibt COSMO-REA6 auch sogenannte Windspitzen (VMAX) aus, die dem maximalen Wert innerhalb einer gegebenen Zeitperiode entsprechen. Maximale Böen sind für Lastabschätzungen und Baufestigkeiten von Windenergieanlagen wichtig, aber auch zur Abschätzung des Schadenspotenzials bei Solarparks. Hierbei bieten Reanalysen eine solide Datengrundlage. VMAX wird über einen Parametrisierungsansatz abgeleitet, der als Ursache für Windböen sowohl Turbulenzen als auch Konvektionen betrachtet, siehe Schulz and Heise (2003).

Die Qualitätsbewertung wurde auf Basis von Tagesmaxima an 207 Stationen in Deutschland durchgeführt, an denen qualitätsgeprüfte Daten für den Zeitraum 1995 bis 2015 vorliegen. Im Stationsmittel beträgt der mittlere Fehler 0,03 m/s, der absolute Fehler liegt bei 1,87 m/s und die Korrelation bei 0,86. Werden ausschließlich Stationen unterhalb von 500 m (169 Stück) betrachtet, reduziert sich der MAE, wie beim mittleren Wind, um etwa 10 %.

Die Korrelation zeigt ein deutliches Nord-Süd-Gefälle. An den Küsten liegen die Korrelationen fast überall höher als 0,9, während sie in den Alpen unter 0,6 fallen (Abbildung 18). Das Bias ist zum Teil durch die Orografie bedingt. In komplexen Topografien gibt es sowohl negative (bspw. Zugspitze) als auch positive (bspw. Garmisch-Partenkirchen) Abweichungen, obwohl die Stationen nur 10 km auseinanderliegen. Die Messstation Zugspitze befindet sich jedoch auf 2964 m Höhe, im Modell wird die Höhe lediglich

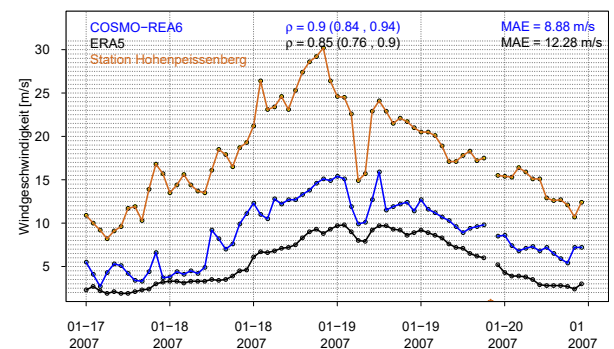


Abbildung 17: Zeitreihen der 10-m-Windgeschwindigkeiten während des Kyrill-Sturms an den Stationen Spiekerroog (links) und Hohenpeissenberg (rechts) für Messungen, COSMO-REA6 und ERA5. MAE absoluter mittlerer Fehler.

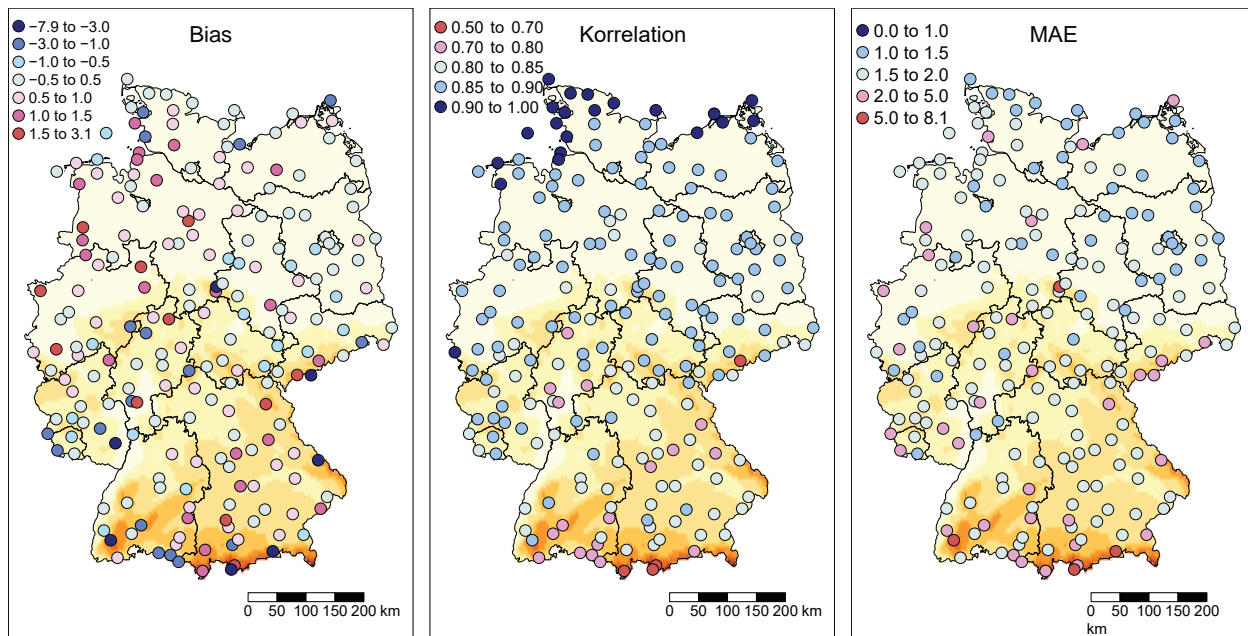


Abbildung 18: Bias (links), Korrelation (Mitte) und absoluter mittlerer Fehler (MAE, rechts) zwischen COSMO-REA6 und Stationsmessungen für VMAX im Mittel über die Jahre 1995–2015 an den ausgewählten 207 Stationen.

mit 1613 m angenommen. Die Messstation Garmisch-Partenkirchen liegt im Tal bei 719 m Höhe, im Modell wird das entsprechende Pixel jedoch einer Höhe von 1200 m zugeordnet.

Da insbesondere die extremen Windböen großes Schadenpotenzial für die Windenergie- und Photovoltaikanlagen bieten, werden die Windgeschwindigkeiten im Modell und an den Stationen im Hinblick auf die Häufigkeiten verschiedener Windklassen untersucht. Die Klassenunterteilung findet in Anlehnung an die vom DWD herausgegebenen Warnstufen (WS) statt (DWD, o. J.-a). Abbildung 19 zeigt die absoluten und relativen Häufigkeiten der sechs verschiedenen WS in den Messungen (grau) und den Reanalysedaten (blau).

Hierbei wurden die 207 Stationen in Küstenstationen (näher als 6 km zur Küstenlinie), Bergstationen (oberhalb von 500 m NN) und Inlandstationen (weder Küsten- noch Bergstationen) unterteilt. In der ersten WS (14–17 m/s) zeigt sich eine nahezu perfekte Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtungen. WS2 (18–24 m/s und 25–28 m/s) wird im Modell hingegen leicht unterschätzt. WS3 (29–32 m/s

und 33–40 m/s) und WS4 (>40 m/s) werden noch stärker unterschätzt, wobei sich ein starker Unterschied zwischen den Stationsregionen zeigt: Während an der Küste zum Teil auch noch die extremsten Windgeschwindigkeiten in der Reanalyse abgebildet werden können, werden diese an den Inlandstationen deutlich unterschätzt. Insbesondere Windgeschwindigkeiten über 40 m/s werden in COSMO-REA6 nahezu nicht abgebildet. Weitere Auswertungen lassen zudem vermuten, dass beim Auftreten von sehr hohen Windgeschwindigkeiten in COSMO-REA6 beim Übergang von Meer zu Land die Windgeschwindigkeit zu schnell absinkt. Ursachen wie eine zu schwach ausgeprägte Land Seewind-Zirkulation müssen weiter untersucht werden. An den Bergstationen ist die Unterschätzung der Extremwinde im Vergleich zu den Beobachtungen noch deutlicher. Dies liegt jedoch erneut an der Unterschätzung der Orografie der Bergstationen im Modell. Im Vergleich zwischen regionalen und globalen Produkten zeichnet sich ein leichter Vorteil des regionalen, hoch aufgelösten Modells ab, sodass für die Bereitstellung von Windgeschwindigkeiten, insbesondere in Höhen über 10 m, auf COSMO-REA6 zurückgegriffen wird.

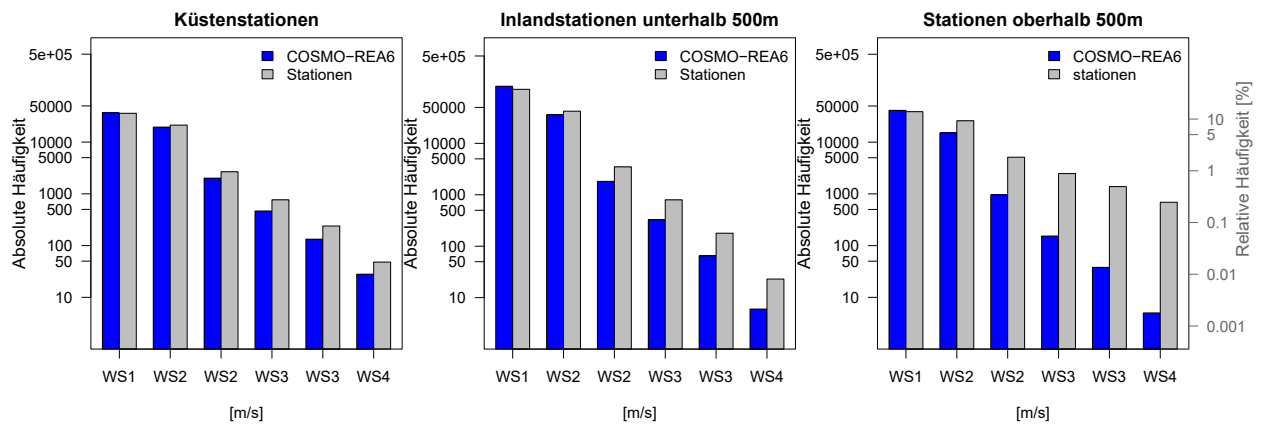


Abbildung 19: Häufigkeiten verschiedener Windklassen in Beobachtungen und COSMO-REA6 an Küstenstationen (links), Inlandstationen unter 500 m (Mitte) und Bergstationen (rechts).

### Qualität der Strahlungsdaten

Zur Bewertung der verschiedenen Strahlungsdatensätze (COSMO-REA6, TRY und SARA-2) wurden Messungen von 38 Bodenstationen des DWD-Messnetzes als Referenz ausgewählt, die nicht bei der Produktion der drei Strahlungsdatensätze berücksichtigt worden sind und somit unabhängig sind. Aus den 10 Minuten-Messungen wurden Stundenmittel für den Auswertungszeitraum 2008–2012 gebildet.

Zu Anfang kann die Darstellung der Datensätze über Scatterplots erste Eindrücke über systematische Merkmale, Ausreißer und Größenordnungen der Daten liefern (Ab-

bildung 20). Die Datenpaare von COSMO-REA6 und den Bodenmessungen zeigen eine deutlich erhöhte Variation um die Winkelhalbierende, was stärkere Abweichungen zwischen diesen beiden Datensätzen indiziert. TRY und auch SARA-2 sind hingegen sehr gleichmäßig und näher um die Winkelhalbierende platziert, was zunächst für eine bessere Übereinstimmung dieser Datensätze mit den Beobachtungen spricht. SARA-2 scheint jedoch eine Häufung an 0 Werten bzw. Fehlwerten zu besitzen, die in TRY korrigiert wurden. Das Auffüllen und Bereinigen von Fehlwerten in Satellitendatensätzen wird auch bereits in Pfeningner and Staffell (2016) thematisiert und gleichzeitig als Vorteil von Reanalysedaten gesehen, die, da modellbasiert, ohne Fehlwerte existieren. COSMO-REA6 erreicht Maxi-

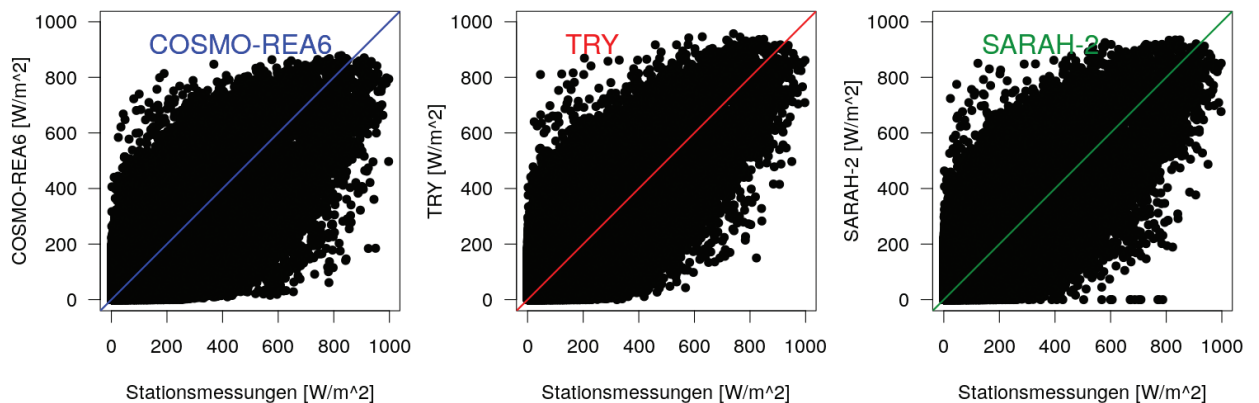


Abbildung 20: Scatterplot der solaren Einstrahlung für COSMO-REA6 (links), TRY (Mitte) und SARA-2 (rechts) im Vergleich zu Messungen an der Station Bamberg für die zeitliche Periode 2008–2012.

malwerte um  $850 \text{ W/m}^2$ , während die Satellitendaten bis zu  $900 \text{ W/m}^2$  erreichen und die Messungen bis zu  $980 \text{ W/m}^2$  betragen können. Diese Unterschätzung der maximalen Werte in COSMO-REA6 stimmt mit (Frank et al., 2018) überein, wo die Verwendung einer veralteten Aerosolklimatologie in COSMO-REA6 als Grund beschrieben wird. Die zu hohen Aerosolkonzentrationen führen insbesondere an unbewölkten Tagen zu einer Unterschätzung der am Boden ankommenden Strahlung im Modell. Dieser Effekt ist auch im Mittel über mehrere Stationen erkennbar und führt besonders im Sommer, wenn eine Häufung intensiver Strahlungstage mit Werten über  $800 \text{ W/m}^2$  zu erwarten ist, zu einem negativen Bias von  $6,23 \text{ W/m}^2$  (Tabelle 6).

TRY zeigt in Bezug auf die drei ausgewählten Maßzahlen in Tabelle 6 die besten Ergebnisse, sowohl im Sommer als auch im Winter. Insbesondere kann durch die Anwendung der in TRY verwendeten Korrekturverfahren der mittlere Fehler im Winter im Vergleich zu SARAH-2 beinahe halbiert werden. Im Sommer ist die Verbesserung zwar geringer, jedoch weiterhin signifikant. Anhand der hier gewählten, jedoch nur beschränkten Qualitätsmaße zeigt sich ein besseres Verhalten des TRY-Datensatzes gegenüber SARAH-2 und COSMO-REA6 und auch ein Vorteil von SARAH-2 gegenüber COSMO-REA6.

Diese erste Auswertung als Mittel über einen längeren Zeitraum und mehrere Standorte kann jedoch nur systematische und großräumige Fehler identifizieren. Um eine detailliertere Auskunft über das Verhalten der Datensätze in ausgewählten Situationen zu erhalten, werden einzelne Zeitreihen untersucht. Ausgewählt werden zum einen eine Periode vom 21.–24.07.2010 an der Station Genthin in Sachsen-Anhalt (Abbildung 21) sowie der Zeitraum 07.–11.02.2010 an der Station Oberstdorf in Südbayern (Abbildung 22). Im ersten Fall zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen TRY, SARAH-2 und der Bodenstation. COSMO-REA6 unterschätzt die Einstrahlung am 23.07.2010 jedoch deutlich, was sich auch in der reduzierten Korrelation und dem erhöhten MAE widerspiegelt. Bei Betrachtung des zugehörigen Satellitenbilds, das die Wolkenstruktur am gewählten Zeitpunkt darstellt, zeigt sich eine Erklärung: Über Mittel- und Osteuropa sowie der Ostsee befand sich zum gewählten Zeitpunkt eine nahezu geschlossene Wolkendecke, die an den Rändern nach Osten hin zerfetzt. Im nördlichen Ostdeutschland reißt die Decke jedoch teilweise

auf und bringt kleinräumige Auflockerungen. COSMO-REA6 modelliert zu diesem Zeitpunkt jedoch eine komplett geschlossene Wolkendecke, wodurch die Einstrahlung am Boden unter  $200 \text{ W/m}^2$  bleibt.

Im zweiten Beispiel hingegen (Abbildung 22) zeigt sich insbesondere am 08. und 09.02.2010 eine gute Übereinstimmung des Tagesgangs zwischen COSMO-REA6 und der Bodenstation, während SARAH-2 und TRY die Einstrahlung deutlich unterschätzen. Dies liegt an den Wetterbedingungen des ausgewählten Zeitpunkts: Zum einen war das Gebiet während des gesamten Zeitraums von einer mindestens 30 cm hohen Schneedecke bedeckt, zum anderen war es am 07.02.2010 nahezu komplett bewölkt, während die Wolkendecke am 08.02.2010 mit ca. 2/8 angegeben war. Da Wolken und Schnee vom Satelliten nur schwer zu unterscheiden sind, gehen die satellitenbasierten Datensätze SARAH-2 und TRY trotz fehlender Wolken am 08.02.2010 von einer geschlossenen Wolkendecke aus und unterschätzen die tatsächliche Einstrahlung am Boden. Das Korrekturverfahren in TRY mittels Bodenstationen kann die Unterschätzung zwar mildern, dies reicht jedoch nicht aus.

Diese wetterlagenspezifische Abhängigkeit der Datenqualität führt zu einer weiteren Auswertung zur Übereinstimmung der Datensätze mit entsprechenden Boden-

Tabelle 6: Korrelation, mittlerer Fehler (Bias) und absoluter mittlerer Fehler (MAE) zwischen Bodenmessungen und den drei ausgewählten Strahlungsdatensätzen COSMO-REA6, TRY und SARAH-2. Als Datengrundlage dienen 38 Stationen, sowie der Auswertungszeitraum 2008–2012.

Stationsmittel	Korrelation	MAE [W/m <sup>2</sup> ]	Bias [W/m <sup>2</sup> ]
<b>C-REA6 Winter</b>	0,92	12,27	5,36
<b>TRY Winter</b>	0,95	10,02	1,87
<b>SARAH-2 Winter</b>	0,93	11,99	3,63
<b>C-REA6 Sommer</b>	0,91	54,07	-6,23
<b>TRY Sommer</b>	0,97	33,69	6,78
<b>SARAH-2 Sommer</b>	0,97	34,8	7,14



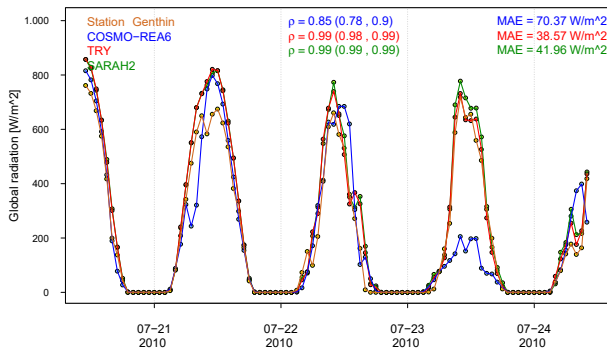


Abbildung 21: Globalstrahlung an der Station Genthin für eine Periode im Juli 2010. Dargestellt sind sowohl DWD-Messungen (orange) als auch COSMO-REA6 (blau), TRY (rot) und SARA2 (grün). MAE absoluter mittlerer Fehler.

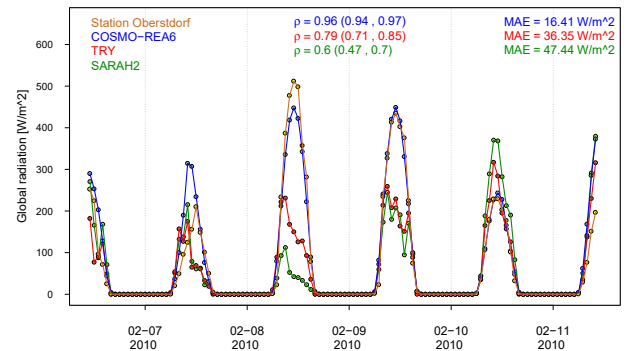


Abbildung 22: Globalstrahlung an der Station Oberstdorf für eine Periode im Februar 2010. Dargestellt sind sowohl DWD-Messungen (orange) als auch COSMO-REA6 (blau), TRY (rot) und SARA2 (grün). MAE absoluter mittlerer Fehler.

messungen, in Abhängigkeit der vorliegenden Bewölkung (Abbildung 23). Im Allgemeinen nimmt die Korrelation zwischen allen drei Datensätzen und den entsprechenden Messungen mit zunehmender Bewölkung ab. An den meisten Stationen zeigen TRY und SARA2 gegenüber COSMO-REA6 einen signifikanten Vorteil, der mit zunehmendem Bewölkungsgrad steigt. In zeitweise schneebedeckten Gebieten, Beispiel Oberstdorf, zeigt COSMO-REA6 jedoch einen signifikanten Vorteil bei wolkenfreien, aber nicht bei stark bewölkten Situationen, wie auch schon Abbildung 22 für einen gewählten Einzelfall verdeutlichte.

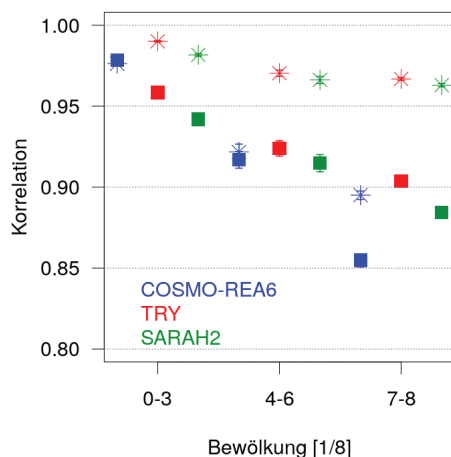


Abbildung 23: Korrelation zwischen Bodenmessungen der Stationen Soltau (Stern) sowie Oberstdorf (Quadrat) und COSMO-REA6, TRY und SARA2 in Abhängigkeit des Bewölkungsgrads. Datengrundlage sind Stundenwerte des Zeitraums 2008–2012.

In Schneegebieten lässt sich zudem ein deutlich größerer Vorteil des TRY-Datensatzes gegenüber den Satellitendaten erkennen.

Auf Basis der ausgewählten Auswertungsmethoden ist die Übereinstimmung des TRY Datensatzes mit ausgewählten Messungen am größten, sodass dieser auch aufgrund seiner höheren Auflösung von 1 km<sup>2</sup> zur Erstellung mittlerer PV-Prognosen am besten geeignet scheint. Die zeitliche und räumliche Verfügbarkeit ist jedoch begrenzt, sodass der TRY Datensatz für einige Anwendungen nicht infrage kommt. Daher wird auch im Themenfeld 5 für die weitere Erarbeitung von PV-Prognosen auf den SARA2-Datensatz zurückgegriffen, der die zweitbeste Performance bei der obigen Auswertung lieferte. COSMO-REA6 ist für den Parameter Einstrahlung in den meisten Fällen den satellitengestützten Datensätzen unterlegen, kann jedoch in schneebedeckten Gebieten und in den hohen nördlichen Breiten (>60° N) eine gute Ergänzung bieten, in denen die Unsicherheiten in den Satellitendaten durch den schrägen Blickwinkel deutlich zunehmen (Pfeifroth et al., 2019).

## 2.2.2 Sensitivitätsstudien zum PV-Ertrag

Nachdem die zur Verfügung stehenden meteorologischen Datensätze analysiert wurden und deren Qualität verglichen wurde, sollen nun auf Basis der ausgewählten Datensätze Erzeugungsprognosen im Bereich Photovoltaik angefertigt werden. Im Folgenden wird das ausgewählte Modell

zur Erstellung der Erzeugungsprognosen sowie dessen Sensitivität gegenüber den Eingangsgrößen untersucht.

## Modellbeschreibung

Die Effizienz und somit der Stromertrag aus PV-Modulen hängt von einer Vielzahl verschiedener Faktoren ab, die zur Erstellung einer Strommengenprognose über mehrere Eingangsdaten und physikalische Berechnungsverfahren abgebildet werden müssen. Diese Faktoren umschließen zum Teil technische Gegebenheiten (Modultyp, Auswahl des Wechselrichters, Alter der Module), zum Teil werden sie durch äußere Rahmenbedingungen festgesetzt (Verschattung, Ausrichtung und Neigung der Dachflächen bzw. Module), zum größten Teil sind die Effekte jedoch wetterbedingt und somit stark geografisch und zeitlich flexibel (Modultemperatur, solare Einstrahlung und spektrale Verteilung, Reflexionsanteil am Modul durch Einfallswinkel); (Huld and Amillo, 2015). Je mehr Faktoren berücksichtigt werden, desto komplexer wird auch das Modell zur Ermittlung der tatsächlichen Stromerzeugung. In der Literatur findet sich bereits eine Vielzahl von Modellen und Softwaretools mit variierender Detailtiefe, beispielsweise in Kenny et al. (2003) oder King et al. (2004).

Für diese Studie greifen wir auf ein Modell zurück, das die Leistung des PV-Moduls lediglich in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Modultemperatur ausdrückt (Huld and Amillo, 2015). Insgesamt werden die Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur auf Modulhöhe, die diffuse und direkte Sonneneinstrahlung sowie die Modulausrichtung und Modulneigung als Inputvariablen in das Modell gespeist. Als Output wird der sogenannte Kapazitätsfaktor für einen bestimmten Ort und Zeitpunkt errechnet. Er gibt das Verhältnis zwischen erzeugter Leistung und installierter Nennleistung an. Bei einem berechneten Kapazitätsfaktor von 0.2 und einer installierten Nennleistung von 10 kW<sub>p</sub> können so beispielsweise bei den gegebenen meteorologischen Rahmenbedingungen 2 kW elektrische Energie verfügbar gemacht werden. Auf Basis dieses vereinfachten Modells werden an den ausgewählten Standorten der Verkehrsinfrastruktur Zeitreihen des Kapazitätsfaktors erstellt. Von großem Interesse ist hierbei sowohl die räumliche als auch die zeitliche Variabilität auf verschiedenen Skalen. Um einen ersten Eindruck über die räumlichen Unterschiede des potenziellen PV-Ertrags zu erhalten, liefert (Kaspar

et al., 2019) eine Prognose des PV-Ertrags über Europa, basierend auf dem oben vorgestellten Modell. In dieser Arbeit wird der Fokus jedoch auf das Untersuchungsgebiet rund um den ESK und MLK gelegt, siehe Abschnitt 2.2.5.

## Zeitliche Variabilität

Sowohl durch natürliche kurzfristige Wetterschwankungen als auch durch langfristige Klimasignale zeigen sich zeitliche Muster im Kapazitätsfaktor. Insbesondere die Ausprägung von Tages- und Jahresgang dominiert den zeitlichen Verlauf. Abbildung 24 zeigt den mittleren Jahresgang der Jahre 2001–2015 auf Basis täglicher Mittelwerte des Kapazitätsfaktors. Die saisonalen Unterschiede der solaren Einstrahlung führen im Vergleich zum Jahresmittel zur Verdopplung der Werte im Sommer und Halbierung im Winter. Die starke Streuung der täglichen Kapazitätsfaktoren um das 7-tägige gleitende Mittel indiziert zudem eine ausgeprägte Tag-zu-Tag-Variabilität. Diese ist in Abbildung 25 (unten) für den Untersuchungsraum (Abbildung 29, Seite 42) dargestellt. Sie wird aus den um den Jahresgang bereinigten Tageswerten analog zur Jahr-zu-Jahr-Variabilität nach (Kariuki and Sato, 2018) berechnet.

Im Sommer kann die Tag-zu-Tag-Variabilität auf bis zu 40 % steigen, im Winter sogar auf über 100 %, was hauptsächlich den geringen Absolutwerten geschuldet ist. Über

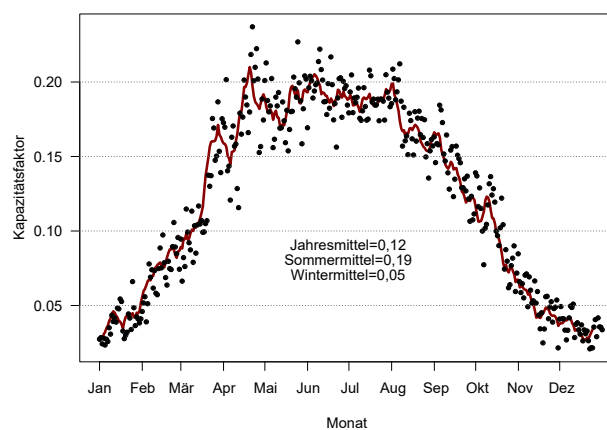
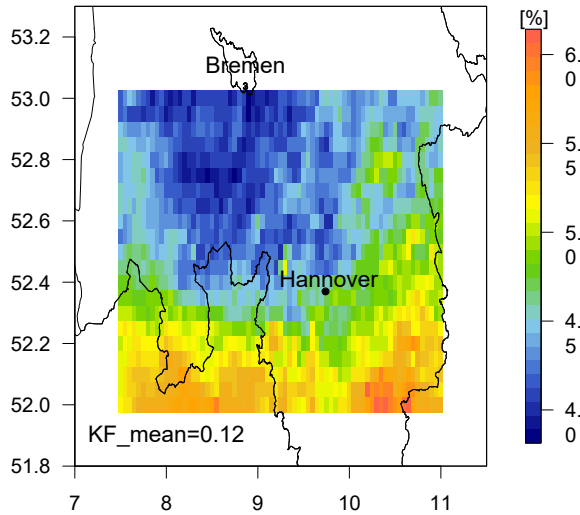
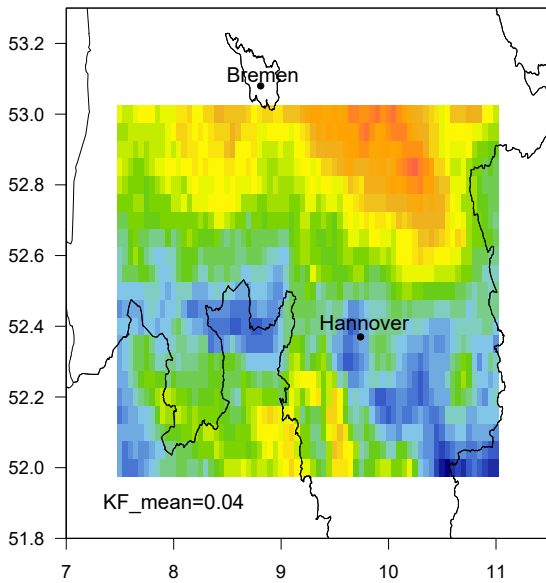


Abbildung 24: Mittlerer Kapazitätsfaktor eines südlich ausgerichteten Moduls mit 30° Neigung im Untersuchungsgebiet Elbe-Seitenkanal (ESK) und Mittellandkanal (MLK) unter Berücksichtigung der Jahre 2001–2015. Die rote Linie markiert ein 7-tägiges gleitendes Mittel, während die schwarzen Punkte den Kapazitätsfaktor einzelner Tage ausdrücken.

### Jahr-zu-Jahr-Variabilität 2001–2015



### Tag-zu-Tag-Variabilität Januar 2001–2015



### Tag-zu-Tag-Variabilität Juli 2001–2015

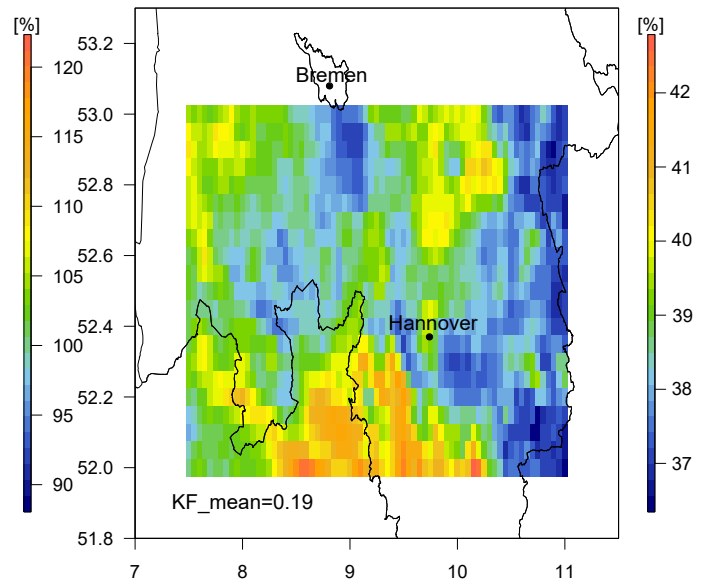


Abbildung 25: Jahr-zu-Jahr-Variabilität (oben), Tag-zu-Tag-Variabilität im Juli (links unten) und Januar (rechts unten). Es werden die Kapazitätsfaktoren für südliche Ausrichtung und 40° Neigung aus den Jahren 2001–2015 berücksichtigt.

das ganze Jahr hinweg zeigt sich im Untersuchungsraum ein räumliches Muster, das eine stärkere Variabilität Richtung Teutoburger Wald und Lüneburger Heide aufweist. Die Auswertung der Jahr-zu-Jahr-Variabilität in Abbildung 25 (oben) identifiziert größere Schwankungen im

südlichen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes von bis zu 6 %. Die Zahlen zeigen, dass zur Potenzialabschätzung eine Datengrundlage von mehreren Jahren vorliegen sollte, um mögliche Reduktionen in schwächeren Strahlungsjahren mit einzubeziehen.

## Ausrichtung und Neigung der Module

Um ein Maß für die Sensitivität der errechneten Energieerzeugung gegenüber den Eingangsdaten zu erhalten, werden Sensitivitätsstudien für Modulausrichtung und -neigung durchgeführt. Weitere Faktoren wurden bereits in (Huld and Amillo, 2015) untersucht. Es zeigt sich, dass die größten Effekte Temperatur und Einstrahlung sind, wohingegen sich die Windgeschwindigkeit nur in sehr heißen und windigen Gegenden durch Kühlung der Module signifikant auf die Performance der PV-Module auswirkt.

Im Weiteren wird der Schwerpunkt zunächst auf die Parameter "Ausrichtungswinkel"  $\beta$  und "Neigungswinkel"  $\alpha$  der PV-Module gelegt, da diese für die im Themenfeld erfolgten verkehrsträgerübergreifenden Auswertungen zur Energieerzeugung an den Verkehrswegen teilweise auf Annahmen, statt auf konkrete Standortdaten beruhen. Daher ist die Abschätzung der Unsicherheit des Ertrags von Interesse.

Abbildung 26 zeigt die Ausprägung des Kapazitätsfaktors bei festem Neigungswinkel und variierender Ausrichtung. Wie zu erwarten ergeben sich maximale Werte um die

Mittagsstunde bei südlicher Ausrichtung. Bei östlicher und südöstlicher Ausrichtung zeigt sich ein in die Morgenstunden verschobener Tagesgang, analog bei westlicher und südwestlicher Ausrichtung in die Abendstunden. Bei West-/Südwest-Ausrichtung fällt der Ertrag gegenüber Ost- bzw. Südost-Ausrichtung um 7 bzw. 5 % geringer aus. Bei Nordausrichtung reduziert sich der tägliche Ertrag gegenüber einer optimalen Ausrichtung nach Süden um 55 %.

Zur Bestimmung der optimalen Modulneigung zeigen sich deutliche saisonale Unterschiede, die in Abbildung 27 dargestellt werden. Da die Effizienz der Module immer dann am größten ist, wenn die Einstrahlung senkrecht zum Modul einfällt, müssen im Winter bei einer deutlich tiefer stehenden Sonne höhere Neigungswinkel gewählt werden. So wird der maximale Kapazitätsfaktor in den Wintermonaten (Dez., Jan., Feb.) bei  $68^\circ$  erreicht, in den Sommermonaten jedoch bei  $20^\circ$ . Im Jahresmittel ergibt sich ein optimaler Neigungswinkel von  $40^\circ$ . Kleine bis mittlere Abweichungen von diesen optimalen Bedingungen wirken sich absolut gesehen nur sehr geringfügig auf den Wirkungsgrad der PV-Module aus. So ergibt sich bei einer Änderung von  $\pm 20^\circ$  vom jährlichen Optimum eine Reduktion des mittleren Ka-

Mittlerer Tagesgang (2001–2015) am Standort Minden

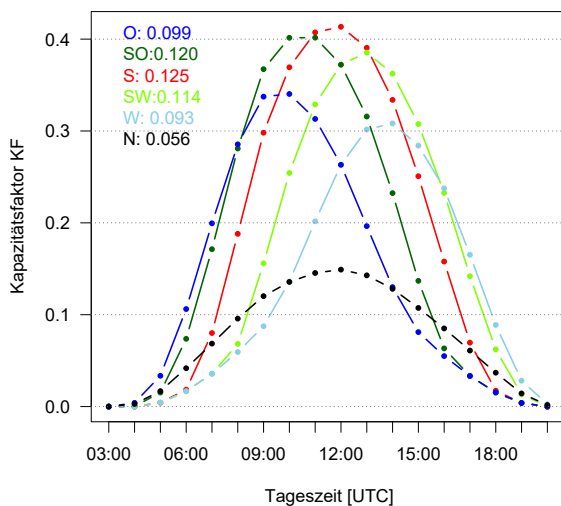


Abbildung 26: Mittlerer Tagesgang des Kapazitätsfaktors am Pumpstandort Minden bei  $40^\circ$  Modulneigung und wahlweise Ausrichtung nach Osten (blau), Südosten (dunkelgrün), Süden (rot), Südwesten (hellgrün), Westen (hellblau) und Norden (schwarz). Es werden stündliche Daten der Jahre 2001–2015 einbezogen.

Kapazitätsfaktor an Station Minden bei südlicher Ausrichtung

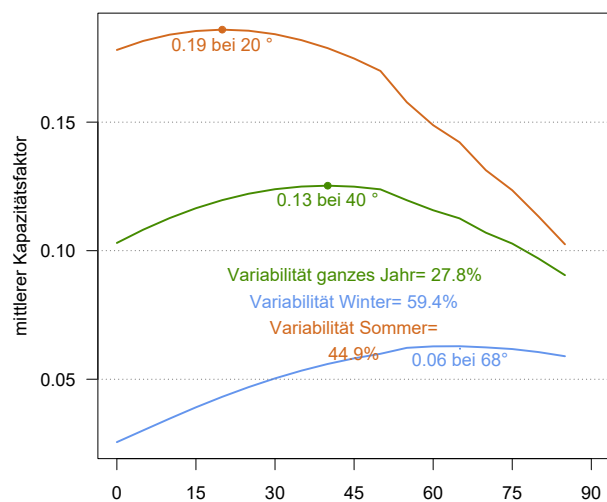


Abbildung 27: Mittlerer Kapazitätsfaktor an der Station Minden bei südlicher Ausrichtung in Abhängigkeit der Modulneigung für die Sommermonate (orange), Wintermonate (blau) und das gesamte Jahr (grün). Es werden stündliche Daten der Jahre 2001–2015 einbezogen.

pazitätsfaktors von 5 %. Wird jedoch die gesamte mögliche Bandbreite von senkrechten (90°) bis waagerechten Modulen (0°) betrachtet, so schwanken die Werte um 30 %, in den Wintermonaten sogar um 60 %.

### 2.2.3 Pilotanlagen und neue Technologien

Inwiefern die Verkehrsflächen beziehungsweise die Verkehrsnebenflächen Potenziale zur Energieerzeugung besitzen, wird und wurde bereits in unterschiedlichen Projekten untersucht. Um einen groben Überblick zu gewähren, wird eine Auswahl der Projekte für Straße und Schiene vorgestellt. Für die Wasserstraße sind ebenfalls Energieerzeugungsanlagen vereinzelt in Betrieb, beispielsweise Strömungsturbinen. Die Potenzialabschätzung der verschiedenen Technologien im Bereich Wasserstraße war jedoch nicht Teil der Forschung in der ersten Phase des BMVI-Expertennetzwerks.

Im Rahmen des Themenfelds 5 wurden sowohl die Möglichkeit der Installation von Solarpaneelen in die Straßenoberfläche im Weiteren als "Solarstraße" bezeichnet als auch die Möglichkeit, vorhandene Lärmschutzwälle an Bundesfernstraßen mit Solarzellen zu bestücken, analysiert. Im Bereich Schiene wurde zudem die Installation von PV-Anlagen an LSW untersucht. Weitere Erzeugungstechnologien wurden im Rahmen von Literaturanalysen bereits bestehender Studien zusammengetragen.

#### Straße

##### Energy Harvesting mit Piezo-Generatoren

In diesem Projekt wurden von der Fa. Innowattech eigens für die Überrollung durch Lkw und Pkw entwickelte piezoelektrische Generatoren, die mechanische in elektrische Energie wandeln, im Labor auf ihre mechanische Belastbarkeit und die elektrische Leistungsabgabe bei sinusförmigen mechanischen Belastungen verschiedener Frequenzen, wie sie bei der Überrollung durch Lkw oder Pkw entstehen, hin untersucht. Zusätzlich wurde das Verhalten der Elemente auf Basis der gewonnenen Daten mit Finite-Elemente-Simulationen unter 5 cm Asphalt bzw. Beton berechnet.

Ein Generator für Lkw mit den Maßen 44 × 35 cm erzeugt bei einer Überrollfrequenz von 5 Hz eine Ausgangsleistung von max. 9 W bei einer Belastung von 50 kN, was einem schweren Lkw (40 t) entspricht, bei Überrollung durch einen Pkw sinkt die Leistung auf unter 1 W. Die Leistungsabgabe scheint in einem weiten Bereich relativ temperaturunabhängig zu sein. Die Zyklusfestigkeit, getestet bis zu 1 Mio. Überrollungen, scheint ebenfalls sehr gut zu sein. Um auch nur die sehr geringe Leistungsabgabe zu erreichen, müssen Blei-Zirkonium-Titanate eingesetzt werden, die umwelt- und entsorgungstechnisch als sehr problematisch angesehen werden.

Es wurde im Projekt keinerlei Kostenschätzung für die Systeme abgegeben, die tatsächlichen Ausgaben dürften sich allerdings auf einem hohen Kostenniveau bewegen, wobei zu den finanziellen Aufwendungen für die Piezo-Generatoren aufgrund der impulsartigen Leistungsabgabe immer noch eine Zwischenspeicherung (Akku und Peripherie) hinzukommen muss.

Für die Energieversorgung wäre ein Einsatz von Sensoren mit sehr niedrigem Leistungsbedarf denkbar, für eine wirkliche Energieproduktion im relevanten Leistungsbereich sind Piezo-Generatoren nicht geeignet (BASt, 2012).

##### Demonstrator einer temperierten Straße

Die Zielsetzungen der folgenden vier analysierten Projekte sind dahingehend ähnlich, dass nicht primär die Energiegewinnung im Vordergrund steht, sondern die Erhöhung der Sicherheit und Dauerhaftigkeit der Straße/Brücke. Es muss jeweils zusätzliche Energie eingesetzt werden, um die zur Temperierung benötigten Temperaturniveaus zu erreichen.

Ziel des Forschungsvorhabens "Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBASt-Testgelände" (BASt, 2016b) war die Entwicklung eines Konzepts eines Straßentemperierungssystems mit verschiedenen Varianten zur Temperierung der Straßenoberfläche (Rohrregister, offenporige Zwischenschicht) und der Nutzung eines erdwärmebasierten Wärmepumpensystems bei allen Varianten. Die Wärmepumpensysteme wurden dabei pro 10 m × 5 m großem Testfeld für eine thermische Leistung von 8 kW und eine Jahresproduktion von

ca. 13 MWh ausgelegt, was bedeutet, dass ca. ein Viertel (ca. 3,25 MWh) der Elektrizität zur Produktion dieser Wärmemenge zur Verfügung gestellt werden muss. Aussagen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Sicherheit der Oberfläche werden erst nach Ende der Testphase, frühestens 2020, vorliegen, eine Abschätzung der realen Bau- und Betriebskosten ebenso.

### **Temperierte Brücke Berkenthin**

Auch hier wurde eine Rohrregisteranlage mit einer Wärmepumpe eingesetzt, bei Bedarf gespeist aus einem Tiefbrunnen. Die technische Machbarkeit wurde in mehrjährigem Betrieb nachgewiesen. Zum Energieverbrauch und der Gesamtenergieproduktion liegen noch keine Auswertungen vor, ebenso zur Kostenabschätzung, es gibt aber eine Kostenabschätzung aus (BASt, 2011). Daraus geht hervor, dass bei großen zu temperierenden Flächen eine Taumittelsprühanlage die kostengünstigere Lösung ist, bei kleineren Flächen und guten Randbedingungen aber die Temperierung durchaus kostengünstiger sein könnte.

### **Wärmeenergie aus drainierten Bergwässern von Straßentunneln**

Bei Straßentunneln mit Drainagesystem kann anfallendes Bergwasser, bevor es in die Vorflut eingeleitet wird, zur Gewinnung von Wärmeenergie (durch Wärmepumpen) genutzt werden. Eine Analyse von 15 Straßentunneln und einem Erkundungsstollen ergab ein Gesamtpotenzial von 2300 kW, bezogen auf meist einmalig gemessene Volumenströme (Schüttungen). Das heißt, die Konstanz dieser Gesamtleistung basierend auf Einzelwerten konnte nicht bestimmt werden. In der Schweiz wurde – bei sehr unterschiedlicher geologischer und hydrologischer Situation – ein mehr als zehnfach höheres Potenzial errechnet. Es wird keine breite Anwendung der Technologie in Deutschland erwartet (BASt, 2014).

### **SEDa**

Die "Untersuchung multifunktionaler Straßenbaumaterialien und Verbundwerkstoffe zur Nutzung solarer Energie und Verbesserung der Dauerhaftigkeit", kurz SEDa, ist ein Forschungsprojekt der TU Dresden, das das Potenzial

von Straßenbefestigungen als Energiequelle untersucht. Die Umsetzung des Forschungsprojektes erfolgt auf dem Gelände der duraBASt unter Federführung des Referats "Internationale Forschungsaufgaben im Straßenbau". Daneben sind die Unternehmen Triple S-GmbH, DeVéTec GmbH, F. Winkler GmbH & Co. KG und WÄTAS Wärmetauscher Sachsen GmbH beteiligt. Neben der erhöhten Dauerhaftigkeit der Straßenkonstruktion durch Abfuhr der Wärme wird insbesondere das Verstromungspotenzial der in der Straße durch Sonneneinstrahlung gespeicherten thermischen Energie betrachtet. Es kommen neue Materialien und Verbundwerkstoffe zum Einsatz, die die entsprechenden Wärmetransporteigenschaften (hohe Wärmeleitfähigkeit, großer Absorptionsgrad) mit den bestehenden Anforderungen an das mechanische Verhalten verbinden. Ziel ist es, neuartige Kollektorvarianten bereitzustellen – als Ergänzung zu den bisher in anderen Projekten verwendeten Kollektorsystemen mit einfachen Rohrleitungen. Getestet werden wasserdurchlässige Asphaltsschichten, die Verwendung von Drainagematten (Geotextilien) und die Einbettung eines metallischen Wärmeleitgitters. Um das Verstromungspotenzial der thermischen Energie aus den Asphaltflächen zu analysieren, werden verschiedene Transformationsvarianten getestet, insbesondere Organic-Rancine Cycles-Prozesse und der Seebeck-Effekt. Geeignete Stoffe oder Stoffgemische als Arbeitsfluide konnten bereits identifiziert werden. Das übergeordnete Ziel von SEDa ist es, die entzogene Energie primär in Form elektrischer Energie zur Verfügung zu stellen und dadurch Verkehrsflächen, die als Infrastruktursystem ohnehin vorhanden sind, zur Energienutzung zu verwenden, um zusätzliche ökologische Schädwirkungen (z. B. Flächenversiegelung, Zerschneidung von Lebensräumen/Ökosystemen) zu vermeiden. Die Untersuchungen wurden im September 2018 abgeschlossen. Der Schlussbericht (Clauß et al., 2019) ist bereits veröffentlicht worden, eine Auswertung war noch nicht möglich.

### **Solarstraße**

In den Niederlanden hat das Unternehmen SolaRoad BV eine Fahrradstraße mit Solarpaneelen als Fahrbahnoberfläche realisiert. Hier wurden die Solarpaneele in ein Betonfertigteil montiert. Der bisherige Fahrbahnbelag wurde entfernt und das neue Fertigteil samt Solarpaneel an der entsprechenden Stelle eingesetzt. Die Oberfläche der So-

larpaneele ist mit einer lichtdurchlässigen Beschichtung versehen, die gleichzeitig eine ausreichende Griffigkeit gewährt. In 2014 wurde im niederländischen Krommnie der 70 m lange und 1,7 m breite Radweg eröffnet. Die Kosten beliefen sich auf 3,5 Mio. €. Zu Beginn wurde ein Ertrag zwischen 50–70 kWh pro Quadratmeter und Jahr angesetzt (Deutsche BauZeitschrift, o. J.).

Das französische Unternehmen Colas SA hat in Frankreich nahe dem Ort Tourouvre-au-Perche in der Normandie einen 1000 m langen Fahrstreifen mit Solarpaneelen versehen. Insgesamt ergibt sich eine Fläche von 2800 m<sup>2</sup>. Der Kostenpunkt lag bei 5 Mio. €, das entspricht einem Quadratmeterpreis von ca. 2000 €. Die PV-Schicht ist nur wenige Millimeter dick und soll auch das Gewicht eines Lkw aushalten. Angegeben wurde ein Achsgewicht von 13 t, dem der PV Aufbau standhalten soll (PlasticsEurope, o. J.). Die installierten Solarpaneele haben eine Leistung von 420 kW und sollen knapp 770 kWh/Tag erzeugen. Erste Messungen zeigten, dass die Solarpaneele 409 kWh/Tag erzeugen.

In Erfstadt wurde am 12. November 2018 der erste Solarradweg Deutschlands eröffnet. Dieser ist 90 m lang und 2,5 m breit. Es wird von einer jährlichen Leistung zwischen 60 und 80 kWh/m<sup>2</sup> ausgegangen. Dies entspricht einer jährlichen Stromproduktion von 12 bis 16 MWh. Die Module werden auf die vorhandene Fläche "geklebt", sodass ein Neubau der vorhandenen asphaltierten Fläche nicht notwendig ist. Aktuell kam es im März zu Schmelbränden. Als Grund hierfür wird eindringende Feuchtigkeit und daraus resultierend ein Kurzschluss vermutet (Kölner Stadtanzeiger, o.J.).

### Lärmschutzwände

Im Bereich der Lärmschutzwände wurde 2015 die Studie "Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen" von der BASt veröffentlicht. Hierbei wurden die jährlichen Ertragspotenziale in GWh bzw. die potenzielle Leistung in MW nach Bundesländern berechnet. Hiernach hat Nordrhein-Westfalen ein jährliches Ertragspotenzial von ca. 5.650 GWh, gefolgt von Bayern mit ca. 3.000 GWh. Im gesamten Bundesgebiet liegt das jährliche Ertragspotenzial bei ca. 14.400 GWh (Gündra et al., 2015).

### Lärmschutzwälle

Gegenüber der Installation an oder auf LSW haben Lärmschutzwälle in der Regel keine aufwändigen statischen Einzelbetrachtungen. Deshalb wird deren Potenzial hier beispielhaft betrachtet. Im Jahr 2016 waren an Bundesfernstraßen Lärmschutzwälle in einer Gesamtlänge von ca. 1.200 km installiert. Um das Flächenpotenzial zur Erzeugung von EE berechnen zu können, wird in verschiedenen Szenarien angenommen, dass in jedem Bundesland 50, 40, 30, 20 bzw. 10 % der vorhandenen Lärmschutzwallfläche unverschattet zur Verfügung stehen. Es wird vereinfacht angenommen, dass für alle Lärmschutzwälle eine Höhe von 5 m gilt. Die straßenseitige Böschungsneigung wird mit 1:1,5 angenommen, was einem Steigungswinkel von  $\alpha_{\text{Böschung}} = 33,69^\circ$  entspricht. In den Berechnungen wird ein Winkel von  $\alpha_{\text{Böschung}} = 30^\circ$  angenommen. Durch die Annahme, dass für 1 kW<sub>p</sub> 8 m<sup>2</sup> Fläche benötigt werden, kann die Leistung in kW<sub>p</sub> berechnet werden. Die Werte sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Für die Ausrichtung der Wallflächen wird dieselbe Verteilung angenommen, die Gündra et al. (2015) für die LSW an deutschen Fernstraßen ermittelt hat. Hier liegt die Exposition der LSW prozentual bei 11 % Ost, 20 % Südost, 32 % Süd, 26 % Südwest und 11 % West. Mithilfe des Tools "Photovoltaic Geographical Information System" (PVGIS, o. J.) kann der jährliche Stromertrag pro kW<sub>p</sub> in Abhängigkeit des Azimuts berechnet werden. Die zu erwartenden Erträge in Abhängigkeit der nutzbaren Fläche (Szenarien) und der Exposition der Wälle sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 7: PV-Ertragspotenzial Autobahnwälle: Annahmen für die Szenarien-Berechnung.

Szenario	Verfügbare Fläche DE [%]	Verfügbare Fläche DE [m <sup>2</sup> ]	Leistung [kWp]
1	50	5.472.360	547.236,0
2	40	4.377.888	437.788,8
3	30	3.283.416	328.341,6
4	20	2.118.971	211.897,1
5	10	1.094.472	109.447,2

Wie zu erwarten nimmt der Ertrag von Szenario 1 hin zu Szenario 5 aufgrund der geringeren Flächenverfügbarkeit ab. Unter den getroffenen Annahmen ist in Szenario 1 mit einem Ertrag von 604,29 GWh pro Jahr zu rechnen. Stehen noch 40 % der Fläche zur Verfügung (Szenario 2), kann mit 483,43 GWh gerechnet werden. In Szenario 5 werden 120,86 GWh auf der vorhandenen Fläche durch PV Module erzeugt. Durch die Stromerzeugung aus PV-Anlagen können 295.498 t CO<sub>2</sub> (Szenario 1) und 59.101 t CO<sub>2</sub> (Szenario 5) pro Jahr eingespart werden.

## Schiene

Nachfolgend sollen ausgewählte Technologien zur Energieerzeugung aus EE und Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgeführt werden, die teilweise bereits im Schienensystem Anwendung finden, sich in der Pilotphase oder Vorstudie befinden.

### Weichenheizung mit Erdwärme

Um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten, sind allein bei der DB etwa 48.000 der 72.000 Weichen beheizt – in der Regel mit elektrischen Widerstands- oder Gasheizungen. Diese Systeme erfordern einen geringen Investitionsaufwand und arbeiten auch bei extremen Witterungsbedingungen zuverlässig. Der Energieaufwand ist beträchtlich, 90 % der verbauten Weichenheizungen arbeiten mit einer elektrischen Heizung. Elektrische Weichenheizungen leisten in der Regel zwischen 18 und 20 kW. Somit verbrauchen diese in Deutschland jährlich rund 230 GWh Strom, bei einer installierten Gesamtleistung von ca. 820 MW. Deutliche Energieeinsparungen von mehr als

40 % gegenüber den elektrisch verbauten Weichenheizungen erzielen geothermische Weichenheizungen. Sie nutzen die Wärme aus dem Erdreich (bis zu 100 m) oder dem Grundwasser. Dabei hebt eine elektrische Wärmepumpe das Temperaturniveau je nach Bedarf auf bis zu 65 °C. Je nach Weichengeometrie werden die Kosten pro Weichenheizung zwischen 30.000 und 40.000 € angegeben. Durch minimierten Wartungsaufwand und entfallende Energiekosten ergibt sich eine Amortisationszeit von 8 bis 10 Jahren. Eine Weiterentwicklung in diesem Bereich ist ein von PINTSCH ABEN geotherm GmbH und ZAE Bayern entwickeltes Heizsystem, das außer dem Erdreich als Wärmereservoir keine weitere Energiequelle benötigt. Kernstück einer solchen Anlage ist ein sogenanntes CO<sub>2</sub>-Wärmerohr, das auch bei geringen Temperaturdifferenzen Niedertemperaturwärme mit hoher Leistung aus dem Boden zur Weiche transportiert. Neben dem systembedingten Verzicht auf bewegende Komponenten und aufwendige Steuerung ergibt sich für den Betrieb ein minimaler Wartungsaufwand, der zusammen mit der hohen technischen Zuverlässigkeit niedrige Lebenszykluskosten verursacht.

### Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen

Besondere Teile der Netzinfrastruktur werden als kritische Infrastruktur eingestuft, insbesondere die Verkehrsleittechnik (Stellwerke und Signalsysteme). Für eine dauerhafte und unterbrechungsfreie Stromversorgung stehen derzeit Dieselaggregate als Netzersatzanlage zur Verfügung. Eine wartungs- und CO<sub>2</sub>-ärmere Alternative ergibt sich durch den Einsatz von Brennstoffzellentechnik. In Abhängigkeit von den Randbedingungen ist als Brennstoff Wasserstoff, Methanol oder Propan/Butan einsetzbar. Die DB Bahn

Tabelle 8: Ertragsprognosen für PV auf Lärmschutzwällen an Bundesfernstraßen.

Szenario	Exposition					
	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Gesamt
	<b>Ertrag [GWh]</b>					
<b>1</b>	59,97	123,40	204,67	157,93	58,31	604,29
<b>2</b>	47,98	98,72	163,73	126,35	46,65	483,43
<b>3</b>	35,98	74,04	122,80	94,76	34,99	362,57
<b>4</b>	23,22	47,78	79,25	61,15	22,58	233,99
<b>5</b>	11,99	24,68	40,93	31,59	11,66	120,86



Gruppe hat mit Stand Juni 2016 drei Brennstoffzellensysteme konzipiert, die auf bahnspezifische Anforderungen abgestimmt sind. Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (engl. polymer electrolyte fuel cell, PEMFC) ist wasserstoffbetrieben, bildet Leistungsklassen von 2 bis 100 kW ab und erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 54 %. Die Direktmethanol-Brennstoffzelle (engl. direct methanol fuel cell, DMFC) ist für kleinere Bereiche bis 500 W geeignet und erreicht einen Wirkungsgrad von 40 %. Die oxidkeramische Brennstoffzelle (engl. solid oxide fuel cell, SOFC) wird mit Flüssiggas, Propan oder Butan betrieben. Bei einem Wirkungsgrad von ca. 35 % kann sie eine Leistung bis 1 kW abbilden. Üblicherweise wird Wasserstoff in Druckgasflaschen à 50 l und 300 bar abgefüllt. Seit 2016 wird eine 20 kW PEMFC als Netzersatzanlage verwendet. Die vorgesehenen 15 Druckgasflaschen Wasserstoff können bei voller Leistungsabnahme einen Netzausfall von ca. 25 h puffern. Des Weiteren kann die PEMFC zur Stromversorgung von einzeln stehenden Formsignalen, Geschwindigkeitsprüfeinrichtungen und temporären Bauwerkskontrollen eingesetzt werden.

### **PV-Frei- und Dachflächennutzung**

Die DB kontrahiert den Großteil ihrer selbst erzeugten PV-Strommengen mittel- und langfristig. Geeignete Frei- und Dachflächen werden an Investoren verpachtet, die die PV-Anlagen auf den Flächen errichten und betreiben. Die verpachteten Freiflächen beliefen sich im Jahr 2018 auf 250.000 m<sup>2</sup> Bruttofreifläche, die der Dachflächen betragen insgesamt 84.000 m<sup>2</sup>. Auf den Freiflächen sind PV-Anlagen mit einer Leistung von ca. 16 MWp installiert. Die von den Pächtern erzeugten PV-Strommengen werden durch die DB AG nicht erfasst. Unter Bezugnahme der installierten Leistungen lässt sich im deutschen Durchschnitt (850 Vollbenutzungsstunden) eine produzierte Strommenge von ca. 14 GWh abschätzen.

### **PV-Nutzung im Gleisbett**

Bei einer Potenzialbewertung der Fa. Solmove und dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) wurde die Einsatzmöglichkeit von PV-Modulen in das Gleis auf der festen Fahrbahn untersucht. Die PV Module werden mittig zwischen den Schienen montiert. Die Modulgeometrie wird dafür speziell an die Geometrie des Zwischen-

schienenbereiches angepasst. Dabei wird die Positionierung der Module unterhalb des Lichttraumprofils und möglichst oberkantengleich zu den Schienen sichergestellt, um eine Verschattung zu vermeiden. Die betrachtete Schnellfahrstrecke Köln–Rhein/Main hat unter Abzug nicht nutzbarer Anteile eine nutzbare Gesamtlänge von 244,46 km. Die Potenzialbewertung nimmt eine Modulleistung von rund 155 kW<sub>p</sub>/km an, so entsteht bei Belegung der Teststrecke eine Nennleistung von rund 37 MWp. Der erzielbare Energieertrag wird im Mittel mit 783 kWh/kW angegeben. Nach derzeitigem Stand sind in Deutschland 1300 km feste Fahrbahn verbaut. Abzüglich des nicht nutzbaren Anteils der Strecke (dauerhafte Verschattung, Tunnel, Weichenübergänge, Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik) ergibt sich ein theoretisches Gesamtpotenzial von 124 MWp, das einem erzielbaren Energieertrag von 103 GWh entspricht.

### **PV-Anlagen auf Lärmschutzwällen**

PV-Stromerzeugung auf Lärmschutzwällen am Streckennetz der DB bilden die Ausnahme. Ein PV-Lärmschutzwall existiert neben der ICE-Bahnstrecke 5850 (Nürnberg–Regensburg) in Neumarkt-Bühl in der Oberpfalz. Die Kreisstadt selbst tritt hierbei als Investor auf, die 744 m lange PV-Anlage hat eine Nennleistung von 1,2 MWp. Lärmschutzwälle entlang der Schienenstrecke werden entweder aufgrund einer Lärmsanierung oder der Lärmvorsorge errichtet, jedoch nicht systematisch von der DB erfasst. Eine Abschätzung des nutzbaren Flächenanteils gestaltet sich bei 33.000 km Schienennetz als schwierig.

### **PV-Anlagen an Lärmschutzwänden**

Zur Erprobung von PV-Anlagen zur Stromerzeugung an LSW existieren aus dem Jahr 2011 zwei Pilotanlagen. In Duisburg (166 kW<sub>p</sub>) sind 382 Module auf einer 430 m langen Gabionenwand sowie weitere 249 Module auf einer 500 m langen Alu-Wand aufgeständert, d. h. mit Anstellwinkel errichtet. Eine weitere Pilotanlage ist mit 178,7 kW<sub>p</sub> in Nürnberg installiert. Zusammen erbringen die Anlagen einen jährlichen Energieertrag von ca. 300 MWh. Die wesentliche Herausforderung bei der Errichtung der Anlagen besteht in den Anforderungen zur Eisenbahnsicherheit. Es gibt erhöhte Anforderungen an die Statik sowie an die Befestigung der Module infolge der dynamischen Beanspruchungen durch hohe Geschwindigkeiten bei Vorbeifahrten

der Züge. Des Weiteren ist eine erhöhte Verschmutzung der PV-Module an den LSW festzustellen (Dt. Bundestag, 2019). Aufgrund der seit 2006 fallenden PV-Modulpreise von bis zu 75 % (Fraunhofer ISE, 2019) sowie geringerer mechanischer Belastungen und Verschmutzungen könnte sich durch vertikale Integration in LSW, trotz geringerem Energieertrag, die Wirtschaftlichkeit überprüfen lassen.

Um ein mögliches Gesamtpotenzial abzuschätzen, wurde das Schienenstreckennetz hinsichtlich des LSW Bestandes im Rahmen der Arbeiten des Pilotprojekts untersucht. Derzeit befinden sich im deutschen Schienennetz rund 1652,1 km installierte LSW von DB Netze, die den Schienenverkehrslärm an hochbelasteten Streckenabschnitten im bestehenden Streckennetz deutlich reduzieren. Allein im Jahr 2018 konnten durch das Investitionsprogramm "Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen des Bundes" rund 45 km neue LSW fertiggestellt werden. Das BMVI und die DB AG haben ein neues Gesamtkonzept zur Lärmsanierung erarbeitet, das seit Anfang 2019 gültig ist. Mit dem neuen Gesamtkonzept hat sich der Gesamtbedarf der zu sanierenden Strecken um rund 2800 km auf 6500 km erhöht – damit steigt der Umfang der Lärmsanierung im Vergleich zum vorherigen Gesamtkonzept (2013) um ca. 75 %. Die Lärmsanierung umfasst jedoch auch weitere Maßnahmen, z. B. passive Maßnahmen wie Lärmschutzfenster, sodass davon auszugehen ist, dass nicht die gesamten Streckenkilometer mit LSW ausgestattet werden. Zu den deutschlandweiten 1652,1 km LSW der DB Netze summieren sich weitere LSW aus dem Bestand der Kommunen und

Kreise hinzu, die derzeit nicht erfasst sind. Eine bundesweite Abfrage wurde gestartet. Die Ergebnisse werden im 1. Quartal 2020 erwartet.

Wird das zu untersuchende Gebiet im Pilotprojekt des Themenfelds 5 um ESK und MLK betrachtet (Abbildung 29), fallen auf 2.239,6 km Schienenstreckennetz 187,04 km LSW mit einer durchschnittlichen baulichen Höhe von 2,24 m an. Die zur Verfügung gestellten Daten sind hinsichtlich der verwendeten Wandbaumaterialien unvollständig. Größtenteils wurden hier Aluminiumprofile verbaut. Die Tragfähigkeit muss vor Ort individuell geprüft werden. Die LSW im betroffenen Gebiet wurden nach ihrer Exposition unterteilt (Abbildung 28).

Die am Streckenverlauf orientierten LSW lassen sich nach ihrer Exposition einteilen. Es ergeben sich 218,1 km bzw. eine nutzbare Fläche von ca. 87.200 m<sup>2</sup>. Diese Fläche errechnet sich aus einer angenommenen vertikal angebrachten Modulbreite von einem Meter abzüglich einer nicht nutzbaren Fläche durch dauerhafte Verschattung (z. B. durch Gebäude) oder fehlende Standsicherheit durch zusätzliches Gewicht oder Pflanzenbewuchs. Für die Berechnung wird die Annahme von 8 m<sup>2</sup> (Verbraucherzentrale, 2016) für den installierten kW<sub>p</sub> gemacht. Mithilfe des Tools PVGIS (PVGIS, o. J.) kann der jährliche Stromertrag pro kW<sub>p</sub> in Abhängigkeit des Azimuts berechnet werden. Somit ergibt sich aus dem betrachteten Gebiet eine theoretisch erzeugbare Energiemenge von 6,68 GWh durch vertikale integrierte PV-Nutzung in LSW.

Tabelle 9: Potenzielle Energieerzeugung an Lärmschutzwänden (LSW) in Abhängigkeit ihrer Ausrichtung im Pilotareal.

	Exposition					
	Ost	Südost	Süd	Südwest	West	Gesamt
<b>LSW [km]</b>	31,05	36,7	74,38	44,89	31,05	218,07
<b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>	12.420	14.680	29.752	17.956	12.420	87.228
<b>Inst. Leistung [kW<sub>p</sub>]</b>	1.552,5	1.835	3.719	2.244,5	1.552,5	10.903,5
<b>Ertrag [MWh]</b>	796	1.200	2.540	1.400	744	6.680

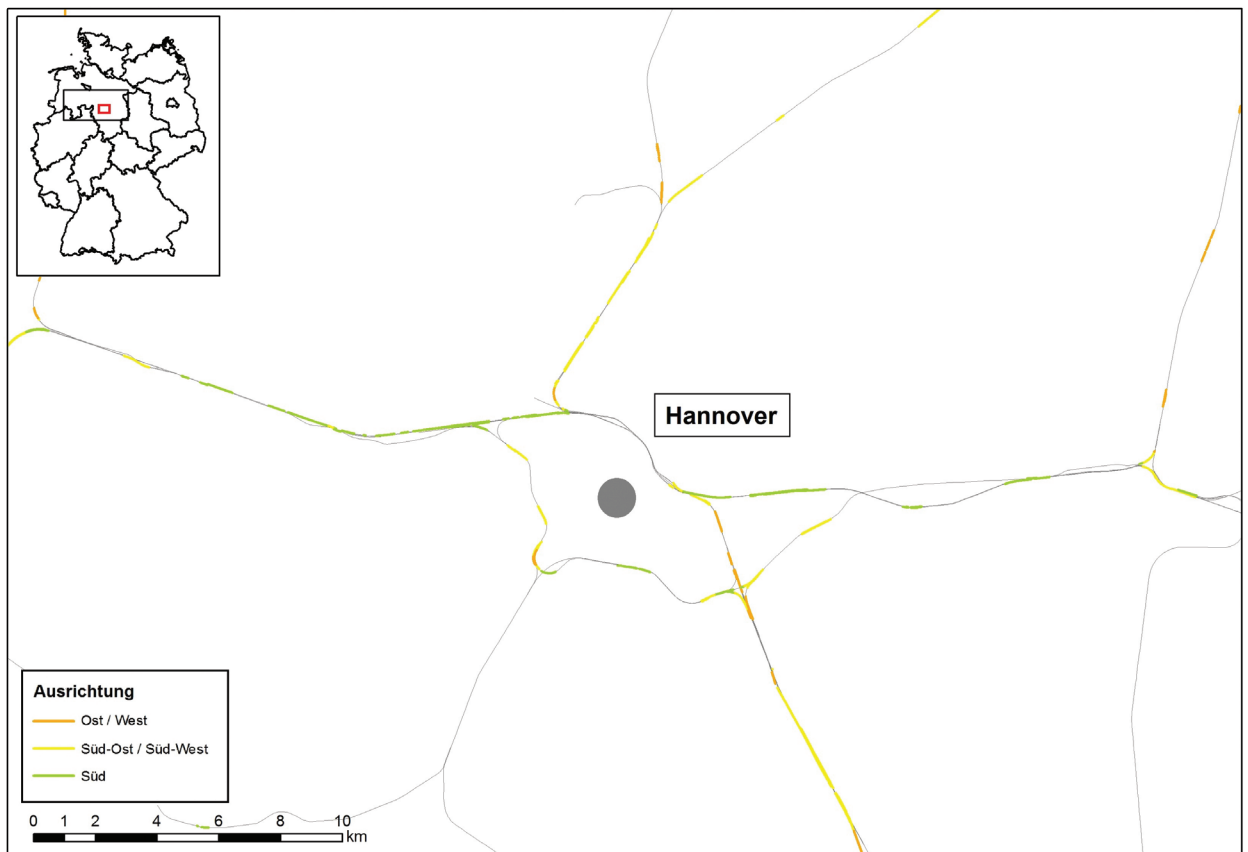


Abbildung 28: Ausschnitt aus dem im Pilotprojekt gewählten Untersuchungsgebiet, Exposition der LSW am Schienenstreckennetz.

### 2.2.4 Bahnspezifische Regelwerke

Die im Schienenverkehr hohen baulichen Anforderungen hinsichtlich Errichtung, Betrieb und Wartung von Infrastruktur im Oberbau werden durch technische Regelwerke und DB-Richtlinien definiert. Von Bedeutung sind hierbei in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich insbesondere für Stromerzeugungsanlagen im Gleis oder in Gleisnähe die elektromagnetische Verträglichkeit bzw. dass keine elektromagnetische Unverträglichkeit mit Signal-, Beleuchtungs- oder Fahrleitungsanlagen gegeben ist. Für die PV-Anlagen im Schienenbereich muss dahingegen der technische Aufbau wie Auswirkungen der Umrichter überprüft und geplant werden. Die Nachweisführung erfolgt durch Beachtung der Technischen Regelung zur elektromagnetischen Verträglichkeit Teil 2 und Teil 3.

Bei PV-Anlagen im Gleisbett oder bei vertikaler Installation an LSW muss der grundlegende akustische Effekt auf die Umgebung verifiziert sein und eine negative Auswirkung durch erhöhte Reflexion wie glattere Oberflächen ausgeschlossen sein. Im Bahnbereich wird die Richtlinie (RIL) zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen (kurz Schall 03) als festgelegtes Verfahren zur Prognose der Geräuschimmissionen angewendet und ist Bestandteil des 16. Bundes-Immissionsschutzgesetzes (16. BImSchV).

Hinsichtlich der mit PV-Modulen genutzten Bauwerksstrukturen (LSW) müssen durch die geringen Abstände zum Fahrweg und hohen Zuggeschwindigkeiten hohe dynamische Beanspruchungen aufgenommen und die dauerhafte Festigkeit bzw. Standsicherheit nachgewiesen werden (RIL 804.5501 – LSW, Dynamische Analyse für Druck-Sog-Wirkungen). Durch den nachträglichen Aufbau ergeben

sich zusätzliche statische Belastungen, die die Gründungen aufnehmen müssen und im Anwendungsfall einzeln zu prüfen sind (RIL 804.5601 – Verankerung).

Insbesondere für die PV-Anwendung ergibt sich somit im Vergleich zu den anderen Verkehrsträgern ein erhöhter Prüf- und Zulassungsaufwand.

### 2.2.5 Stromerzeugungsszenarien

Zur Analyse einer verkehrsträgerübergreifenden Energieerzeugung für den Eigenverbrauch wird die Möglichkeit der Stromerzeugung mittels PV-Anlagen an Wasserstraße und Straße in einem ausgewählten Untersuchungsgebiet (Abbildung 29) für den Zeitraum November 2000 bis Oktober 2015 untersucht. Der erzeugte Strom soll zum Betrieb der Pumpwerke der WSV genutzt werden, wobei von den "Puffereigenschaften" der Kanäle profitiert werden soll. Damit ist gemeint, dass die Stromaufnahme aus den vo-

latischen Quellen zu einem gewissen Maße flexibel gestaltet und somit an den Zeitpunkt der Stromerzeugung angepasst werden kann. Aufgrund des hohen Gesamtbedarfs an elektrischer Energie für den Verkehrsträger Schiene wird dieser bei der Betrachtung der möglichen Energieweiterleitung aus eigenen regenerativen Erzeugungsanlagen an die Wasserstraße nicht mitbetrachtet. Aspekte des Stromtransfers (bspw. Steuern, Netzgebühren und sonstige Abgaben) zwischen den jeweiligen Standorten der Verkehrsträger werden in dieser theoretischen Betrachtung nicht berücksichtigt.

Eine Bandbreite von möglichen Anlagengrößen und unterschiedlichen Installationsbedingungen der PV-Module wird in den Untersuchungen durch vier Szenarien abgedeckt (Abbildung 30):

1. Ohne eine bestimmte zugrunde gelegte Fläche wird in diesem Szenario die Anlagengröße so gewählt, dass im vieljährigen Mittel (hydrologische Jahre 2001 bis 2015) die erzeugte Strommenge genau dem modellierten Strombedarf der Pumpwerke im gleichen Zeitraum entspricht (20,6 GWh/Jahr entspricht im vieljährigen Mittel einer erzeugten Leistung von 2.357 kW). Dabei wird von einer optimalen Modulausrichtung und -neigung mit der größten Erzeugungsmenge im Gesamtzeitraum ausgegangen, was 40° Neigung (gegenüber einer horizontalen Ebene) und südlicher Ausrichtung entspricht (vgl. Abschn. 2.2.2). Die geografischen Orte, die der Abschätzung zugrunde liegen, sind die Standorte der Pumpwerke im Untersuchungsgebiet. Die mögliche Stromerzeugung an den einzelnen Pumpstandorten wird gemittelt, sodass die räumlichen

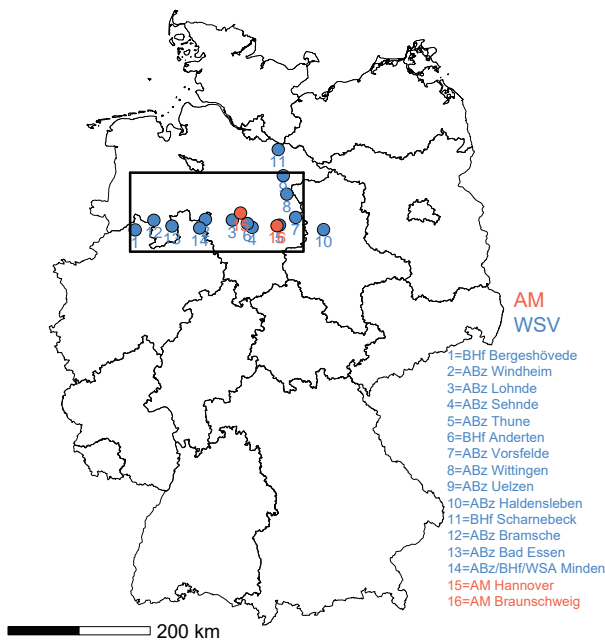


Abbildung 29: Standorte der WSV-Dienstgebäude sowie Autobahnmeistereien (AM) im gewählten Untersuchungsgebiet. Das Rechteck symbolisiert den Bereich zur Ausweisung der Flächen der LSW und Lärmschutzwälle an den Straßen sowie zur Ermittlung der Kapazitätsfaktoren. ABz Außenbezirk, BHf Bauhof, WSA Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt.

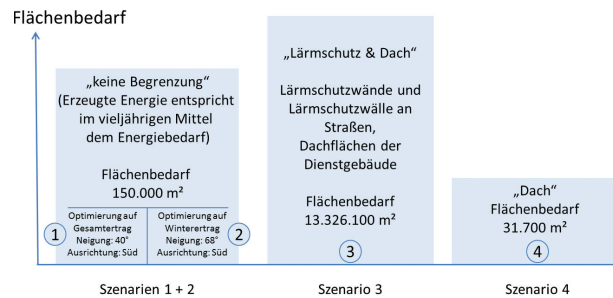


Abbildung 30: Szenarien zur angenommenen Energieerzeugung mit jeweiligem Flächenbedarf.

Schwankungen im Untersuchungsgebiet (beispielsweise durch lokale Bewölkung) entsprechend berücksichtigt sind. Mit dem ermittelten Kapazitätsfaktor wird für die Stromerzeugung eine Nennleistung von 18.808 kW<sub>p</sub> benötigt, was einem geschätzten<sup>5</sup> Flächenbedarf von ca. 150.000 m<sup>2</sup> entspricht.

Durch die strategische Wahl der erzeugten Strommenge, die sich am Bedarf orientiert, ist der Anteil des gedeckten Strombedarfs ein Maß für die zeitliche Übereinstimmung von Stromerzeugung und -bedarf. Falls Erzeugung und Bedarf zeitlich genau übereinstimmen, kann theoretisch der gesamte Bedarf mit dem selbst erzeugten Strom gedeckt werden. Je geringer die zeitliche Übereinstimmung ist, desto geringer fällt auch der Anteil des gedeckten Strombedarfs aus.

2. Im zweiten Szenario sollen die PV-Module aus Szenario 1 (Flächenbedarf 150.000 m<sup>2</sup>) so geneigt werden, dass die Stromerzeugung im Winter optimiert wird ( $\alpha = 68^\circ$ ), da der Jahresgang der Stromerzeugung eine stärkere Amplitude aufweist als der Jahresgang des Strombedarfs (vgl. Abbildung 15, Seite 22 und Abbildung 24, Seite 33). Durch die Erhöhung der Stromerzeugung im Winter soll so der jährliche Verlauf von Erzeugung und Bedarf besser aneinander angepasst werden. Dies bedeutet jedoch gleichzeitig eine Ertrags einbuße in den Sommermonaten (Abbildung 29), sodass die mittlere erzeugte Leistung auf 2147 kW (bzw. 18,8 GWh/Jahr) sinkt.
3. Im dritten Szenario werden Flächen abgeschätzt, die tatsächlich zur Stromerzeugung verwendet werden könnten. Dabei werden LSW und Lärmschutzwälle an Straßen und Dachflächen von Dienstgebäuden der Verkehrsinfrastruktur berücksichtigt, jeweils mit individueller Neigung und Ausrichtung. Zur Abschätzung der möglichen Fläche der LSW und Lärmschutzwälle wird zunächst der prozentuale Flächenanteil der Bundesländer Niedersachsen (48 %) und Nordrhein-Westfalen (13 %) im Untersuchungsgebiet bestimmt (Abbildung 29). Als vereinfachte Annahme wird eine flächenmäßige Gleichverteilung der Bundesautobahnen

und deren Lärmschutzbauten angenommen, sodass eine Umrechnung des ermittelten Ertragspotenzials aus PV an LSW (Gündra et al., 2015) auf den Untersuchungsraum stattfindet. Für die Lärmschutzwälle wird mithilfe von BASt (2016a) die Länge und schlussendlich die zur Verfügung stehende Fläche der Wälle im Untersuchungsgebiet geschätzt, unter Annahme der Wallneigung von 30° und Wallhöhe von 5 m. Für die Ausrichtung der Module auf den Wällen und Wänden werden die Ausrichtungen der LSW aus Gündra et al. (2015) angenommen.

Die berücksichtigten Gebäude bestehen aus 16 Außenbezirken oder Bauhöfen und einer Amtszentrale der WSV (mit insgesamt 26.500 m<sup>2</sup> Dachfläche) sowie aus zwei Autobahnmeistereien (Dachfläche 5200 m<sup>2</sup>) im erweiterten Kanalumfeld. Bei Flachdächern werden aufgeständerte Module mit einer Neigung von 40° und Ausrichtung nach Süden angenommen. Die belegte Fläche beträgt hierbei nur ein Drittel der Dachfläche, um Ertragsverluste durch Verschattung zu minimieren (Quaschning and Hanitsch, 1998).

4. Es wird angenommen, dass die Dachflächen die statischen Vorgaben erfüllen und keine Ertragsminderungen durch Verschattung auftreten. Das 4. Szenario berücksichtigt im Gegensatz zu Szenario 3 ausschließlich die Dachflächen mit jeweils individueller geografischer Lage, Neigung und Ausrichtung.

Tabelle 10 zeigt zusammenfassend die angenommenen Flächen, Nennleistungen, Kapazitätsfaktoren und Leistungsprognosen der vier Szenarien. Durch die große Flächenverfügbarkeit liegt die Prognose in Szenario 3 um ein Vielfaches höher als in den anderen Szenarien. Der Kapazitätsfaktor ist erwartungsgemäß in Szenario 1 am größten, da hierfür die im Mittel optimale Ausrichtung und Neigung gewählt wurden. Für Szenario 2 wurde die günstigste Ausrichtung (südlich) und für die Lärmschutzanlagen in Szenario 3 ein ertragreicher Neigungswinkel von 30° angenommen, daher sind diese beiden Kapazitätsfaktoren ebenfalls relativ hoch. Szenario 4 liegen die tatsächlichen Dachgegebenheiten zugrunde, darunter auch einige nördlich ausgerichtete Flächen, daher fällt der Kapazitätsfaktor geringer aus.

<sup>5</sup> Mit angenommenen 8 m<sup>2</sup> Flächenbedarf pro kW<sub>p</sub> Modul-Nennleistung (Verbraucherzentrale, 2016).

Tabelle 10: Kennzahlen der unterschiedlichen Szenarien zur Stromerzeugungsprognose.

Szenario	1	2	3	4
<b>Modulfläche [m<sup>2</sup>]</b>	150.464	150.464	13.326.116	31.744
<b>Nennleistung [kW<sub>p</sub>]</b>	18.808	18.808	1.665.087	3.290
<b>Kapazitätsfaktor Mittelwert 11/2000–10/2015</b>	0,125	0,114	0,114	0,102
<b>Prognose erzeugte Leistung [kW] in Klammern Stromertrag [GWh/a] Mittelwert 11/2000–10/2015</b>	2.357 (20,65)	2.147 (18,81)	189.870 (1.663.26)	335 (2,93)

Ein genaueres Bild liefert Abbildung 31, die den jährlichen Verlauf der Kapazitätsfaktoren für die Szenarien darstellt. Beim Vergleich der Szenarien 1 und 2, bei denen der Neigungswinkel der Module unterschiedlich ist, fällt auf, dass die leicht höhere Erzeugung in Szenario 2 in den Wintermonaten eine deutliche Verringerung im Sommer mit sich bringt. Den Monat mit dem größten Kapazitätsfaktor liefert Szenario 3 im Juni. Das zeigt, dass die Module an den Lärmschutzanlagen mit 30° Neigung trotz nicht immer optimaler Ausrichtung im Sommer eine bessere Leistungsausbeute besitzen als die optimal ausgerichteten Module (mit im Sommer nicht optimaler Neigung) aus Szenario 1.

### 2.3 Energienutzung und -management

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 wurden der bestehende Energiebedarf zum Betrieb der Verkehrsinfrastruktur und der theoretisch erzeugbare EE-Strom beschrieben und quantifiziert. Mit einer Betrachtung von vieljährigen Mittelwerten kann jedoch noch keine Aussage über die tatsächliche Nutzbarkeit des erzeugten Stroms getroffen werden. Diese ist gegeben, wenn der Strom zum richtigen Zeitpunkt am benötigten Ort und in der benötigten Menge zur Verfügung gestellt werden kann. Andernfalls sind Zwischenspeicher notwendig, um Erzeugung und Verbrauch in Einklang zu bringen. Für eine in Zukunft angestrebte Versorgung mit EE verbunden mit einem starken Ausbau von Windkraft- und PV-Anlagen wie in (Umweltbundesamt, 2014) und (BMWi, 2017) beschrieben, wird die erzeugte Strommenge stärker fluktuieren und im Gegensatz zur Strommenge aus konventionellen Technologien, die auf der bedarfsori-

entierten Verbrennung von Energieträgern basieren, nur eingeschränkt steuerbar sein. Mit zunehmendem Anteil der fluktuierenden EE an der Stromerzeugung steigt daher die Notwendigkeit von steuerbaren Verbrauchern wie Energiespeichern zum Ausgleich der Strombilanz. Sie können zusätzlich dazu beitragen, die Kapazität der Netze nicht zu überlasten, Abschaltungen von beispielsweise WEA zu vermeiden und als Anbieter von Regelenergie zur Netzstabilisierung beitragen (EFZN, 2013). Mögliche "steuerbare" und flexible Verbraucher können die Pumpwerke an den Kanälen der Wasserstraßen sein. Der Wasserstand eines Kanals kann innerhalb bestimmter Grenzen schwanken, daher muss nicht jeder Wasserverlust sofort wieder ausgeglichen werden, sondern kann für einen gewissen Zeitraum als Puffer für Zeiten mit geringem Stromangebot dienen. Im entgegengesetzten Fall (Stromüberschuss) können aber auch Stromspitzen aufgenommen werden, falls der Kanal

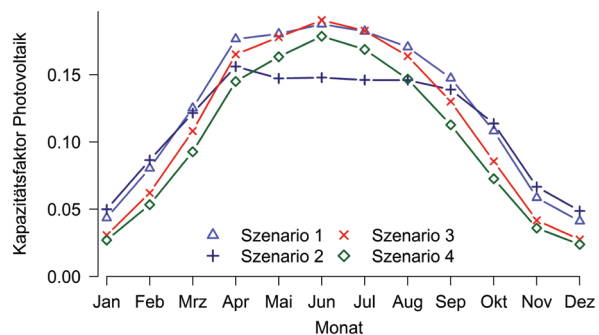


Abbildung 31: Den Szenarien 1 bis 4 zugrunde liegende Kapazitätsfaktoren der Stromerzeugung im mittleren Jahresverlauf (11/2000–10/2015).

noch nicht den höchsten Wasserstand erreicht hat. Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Modelluntersuchungen sollen die Abnahmemöglichkeit des EE-Stroms quantifizieren und somit einen Ansatz zum Nachfragemanagement zur besseren Ausnutzung von Stromspitzen verfolgen. Neue Antriebstechnologien (Abschnitt 2.3.2) müssen ebenfalls eng verzahnt mit der zukünftigen Energieerzeugung betrachtet werden, damit eine erfolgreiche Umsetzung gelingen kann.

### 2.3.1 Bewirtschaftung der Wasserstraßen

#### Ziel der Untersuchung und Vorgehensweise

Die vorliegende Untersuchung behandelt die Fragestellung, ob bzw. zu welchem Anteil die Pumpwerke an der Wasserstraße mit dem an der Verkehrsinfrastruktur erzeugten Strom versorgt werden können. Dies wird im Weiteren auch als "Eigenverbrauch" oder "Eigenstromverbrauch" bezeichnet, gemäß der in Kapitel 2.2 eingeführten Begriffsdefinition.

Die Vorgehensweise kann in zwei Schritte gegliedert werden:

#### 1. Modellentwicklung und -plausibilisierung

Zur Berechnung des Stromverbrauchs der Pumpwerke müssen die nötigen Pumpwassermengen und dafür wiederum die Wasserbilanz der kompletten Kanalhaltung berechnet werden. Dies wird mit mehreren Modellen durchgeführt:

- Die überregionale Wassermengenbewirtschaftung zwischen Rhein und Elbe wird mit dem von 2005 bis 2011 aufgebauten und plausibilisierten Wasserbewirtschaftungsmodell BEWASYS (BfG-1730, 2011) im Tageszeitschritt simuliert. Einige Teilergebnisse daraus, nämlich die Pumpwassermengen in Münster und die Wasserstände der Weser in Minden und der Elbe an der Einmündung des ESK, werden als Randbedingung für die im Pilotprojekt des Themenfelds 5 entwickelten Mo-

delle WabEE-T<sup>6</sup> und WabEE-S<sup>7</sup> (WabEE = Wasserbewirtschaftung mit erneuerbaren Energien) benötigt.

- WabEE-T und WabEE-S wurden für das eigentliche Untersuchungsgebiet aufgebaut. Beide simulieren die Wassermengenbewirtschaftung unter Berücksichtigung von EE. Je nach Steuerungsstrategie kommt dabei die Modellversion WabEE-T oder WabEE-S zum Einsatz. Eine Beschreibung der Modelle befindet sich in BfG (2020).

Die drei genannten Modelle rechnen nicht hydrodynamisch, das bedeutet, jede Kanalstauhaltung wird als Einheit mit in der kompletten Haltung einheitlichem Wasserstand betrachtet. Zu Beginn jedes Zeitschritts werden zunächst die Zu- und Abflüsse jeder Kanalhaltung (schematisch in Abbildung 32 dargestellt) bilanziert und eine Prognose über die zu erwartende Veränderung des Wasserstands während des aktuellen Zeitschritts aufgestellt. In den Modellen wird anschließend nach einer im Vorfeld festgelegten generalisierten Reihenfolge ermittelt, welche Pumpen oder Entlastungsorgane im nächsten Zeitschritt angesprochen werden müssen, um einen gewünschten Wasserstand am Ende des Zeitschritts zu erreichen. Im nächsten Schritt erfolgt die tatsächliche Zuweisung der Pump- und Entlastungsmengen und der sich dann einstellende Wasserstand wird berechnet. Als Ausgangsgrößen werden Zeitreihen der Wasserstände in den Haltungen sowie der Pump- und Entlastungswassermengen je Pumpwerk bzw. Entlastungsorgan erstellt.

In den Modellen WabEE-T und WabEE-S werden zusätzlich zur Wassermengenbewirtschaftung der Energieverbrauch und der Anteil, der mittels EE gedeckt werden kann, als Ergebnis ausgegeben. Dabei kommt je nach Steuerungsstrategie der Pumpwerke entweder WabEE-T (Strategie "Referenz"/"Ref") oder WabEE-S (Strategie "energieorientiert"/"EO") zum Einsatz:

- Referenz: Mit dieser Steuerstrategie wird versucht, die tatsächliche Bewirtschaftungspraxis idealisiert abzubilden. In der Praxis wird auf einen Zielwasserstand gesteuert, der innerhalb bestimmter Grenzen, der "Be-

<sup>6</sup> T = Tageszeitschritt.

<sup>7</sup> S = Stundenzeitschritt.

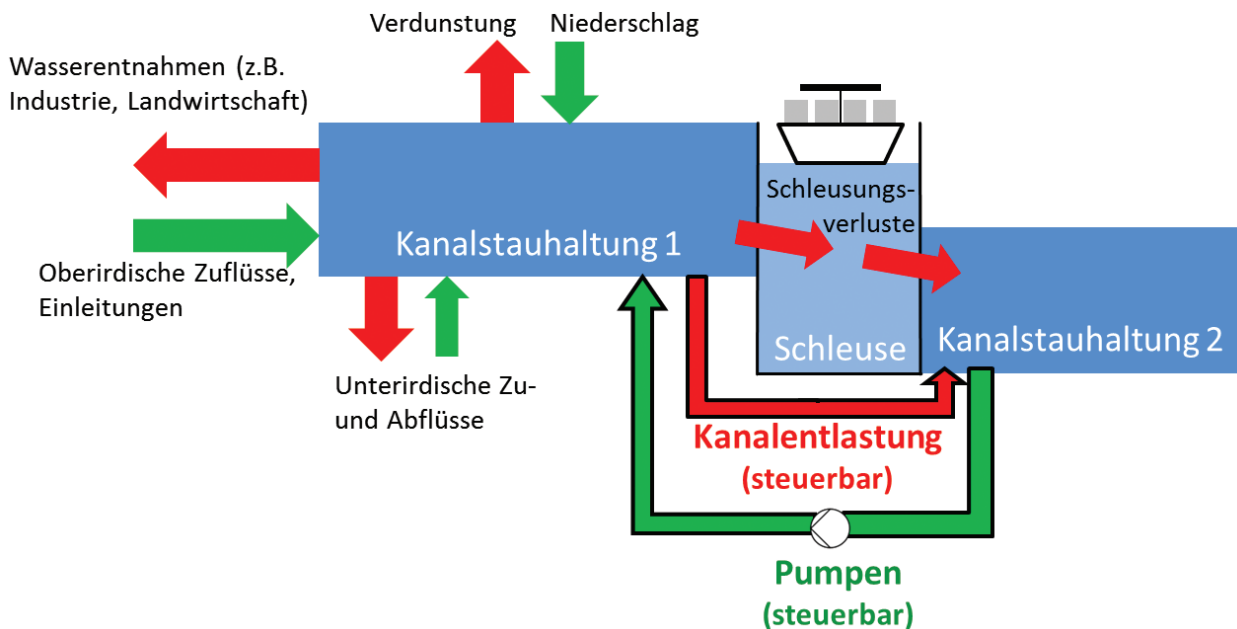


Abbildung 32: Schematische Abbildung der berücksichtigten Bilanzgrößen im Kanalmodell (rot: Verluste, grün: Zuflüsse, jeweils bezogen auf Kanalstauhaltung 1). Die Kanalentlastung und die Pumpen sind keine Eingangsgrößen des Modells, sondern werden von diesem gesteuert.

wirtschaftungslamelle", variieren kann. Dies geschieht energieoptimiert, indem Pumpen mit geringer Hubhöhe bevorzugt angesteuert werden. Im Modell WabEE-T ist dies so umgesetzt, dass an jedem Tag die Wasserbilanz jeder Kanalhaltung ausgeglichen wird, wobei die Reihenfolge der benutzten Pumpen festgelegt ist. Damit sind für jeden Tag die Pumpmenge und der entsprechende Energieverbrauch je Pumpwerk bestimmt.

- Für die Nutzbarkeit der EE wird nun in WabEE-T für jeden Tag ermittelt, wie viele Einzelpumpen für welche Dauer aktiv sind (pro Pumpwerk gibt es bis zu fünf einzelne Pumpen). Die erforderlichen täglichen Pumpdauern werden dann mit einem Algorithmus auf die Zeiten verteilt, in denen EE-Strom erzeugt wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass die am Tag erzeugte und verbrauchte Strommenge im Voraus bekannt ist. Eine wichtige Bedingung ist weiterhin, dass keine Pumpe kürzer als 5 h in Betrieb sein darf, da ansonsten ein erhöhter Verschleiß an den Pumpen stattfindet (WSA Minden, 2018).

- Energieorientiert: Die zweite Steuerungsvariante, implementiert in WabEE-S, ist gezielt darauf ausgelegt, die selbst erzeugte EE-Strommenge bestmöglich auszunutzen, indem zunächst diese Strommenge beim Ansteuern der Pumpen bezogen wird. Im Gegensatz zu WabEE-T, bei dem die Wasserbilanzen innerhalb eines Tages ausgeglichen werden, sind hierbei unausgeglichene Bilanzen erlaubt, solange die Wasserstände in den Kanälen innerhalb der "Bewirtschaftungslamelle" bleiben. Dies ermöglicht mehr Flexibilität in der Stromnutzung, wodurch Stromüberschüsse besser ausgenutzt und Stromdefizite besser überbrückt werden können. Ein weiterer Unterschied ist, dass durch den stündlichen Zeitschritt in WabEE-S die Bilanzprognose nur für die nächste Stunde berechnet wird. Dadurch liegen hierbei weniger Informationen über die Zukunft vor als in WabEE-T, bei dem die Bilanzprognose über den nächsten Tag erfolgt. Weiterhin erfolgt die zeitliche Verteilung der Pumpennutzung direkt in jedem Zeitschritt und kann nicht nachträglich angepasst werden. Einmal angestellt, müssen auch hier die Pumpen mindestens für 5 h in Betrieb sein. Die Reihenfolge der Pumpenan-



steuerung erfolgt dabei nach aufsteigendem Höhenunterschied, den das gepumpte Wasser überwinden muss.

Im Anschluss an die Bilanzmodellierung wurde in einer weiteren Untersuchung mit dem hydrodynamischen Modell SOBEK-EE geprüft, inwieweit der Wasserspiegel innerhalb einer Kanalhaltung räumlich variieren kann. Dies ist für den Betrieb der Schifffahrt wichtig, da gewisse Mindestbrückendurchfahrtshöhen und Mindestwassertiefen eingehalten werden müssen. Die Betrachtung eines einzelnen mittleren Wasserstandes pro Haltung wie in WabEE-T und WabEE-S berücksichtigt nicht die dynamischen Wasserstandsänderungen, die im Kanal durch den Schwall und Sunk von Schleusungs- und Pumpwassermengen auftreten können.

Die drei im Rahmen des Projektes aufgebauten Modelle (WabEE-T, WabEE-S und SOBEK-EE) wurden plausibilisiert. Es lässt sich festhalten, dass die Bewirtschaftungsmodelle WabEE-T und WabEE-S über den Untersuchungszeitraum im Mittel eine zufriedenstellende Modellgüte aufweisen, wohingegen die großen Unterschiede zwischen den mit SOBEK-EE simulierten und den beobachteten Wasserständen nicht abschließend geklärt werden konnten. Das bedeutet, dass die mit SOBEK-EE erzielten Ergebnisse nur einen Anhaltspunkt zur Schwankungsbreite des Wasserstands geben können. Für eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse wird auf den Bericht BfG (2020) verwiesen.

## 2. Ergebnisse der Szenarienrechnungen

Für die in Abschnitt 2.2.5 beschriebenen Stromerzeugungsszenarien werden Berechnungen zum Eigenstromverbrauch der Pumpwerke durchgeführt. Als vereinfachende Annahme werden die von der Bundesverwaltung betriebenen Anlagen isoliert betrachtet, also ohne die Beachtung von Strommärkten oder externer Stromspeicher. Daraus ergeben sich folgende vereinfachende Annahmen:

- Der erzeugte Strom wird lediglich zur Deckung des Eigenverbrauchs verwendet, er steht also nur zum Zeitpunkt der Erzeugung zur Verfügung. Erzeugter EE-Strom, der über den Eigenverbrauch hinausgeht, wird nicht in die Betrachtung einbezogen.

- Der Transport des Stroms zwischen den Erzeugungs- und Verbrauchsstellen wird nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass der erzeugte EE-Strom unmittelbar von den Verbrauchern genutzt werden kann.
- Eine autarke Versorgung der Pumpwerke mit selbst erzeugtem EE-Strom wird in dieser Untersuchung nicht angestrebt. Zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit und letztendlich der Schifffahrt kann daher jederzeit Strom aus dem öffentlichen Versorgungsnetz bezogen werden.

Abbildung 33 zeigt die wichtigsten Ergebnisse für die beiden auf Seite 45 f. beschriebenen Steuerstrategien ("Referenz" und "Energieorientiert") für die Szenarien 1 bis 4. Folgende Erkenntnisse lassen sich daraus ziehen:

- In den Szenarien 1 und 2 steht im Mittel ungefähr die gleiche selbst erzeugte Strommenge zur Verfügung, die auch für die Pumpen benötigt wird. Allerdings ist diese saisonal unterschiedlich verteilt. Das heißt, es gibt Zeitpunkte, in denen nicht genügend Energie erzeugt wird und ein Teil des Bedarfs aus anderen Quellen gedeckt werden muss (roter Anteil). In Szenario 2 (optimierte

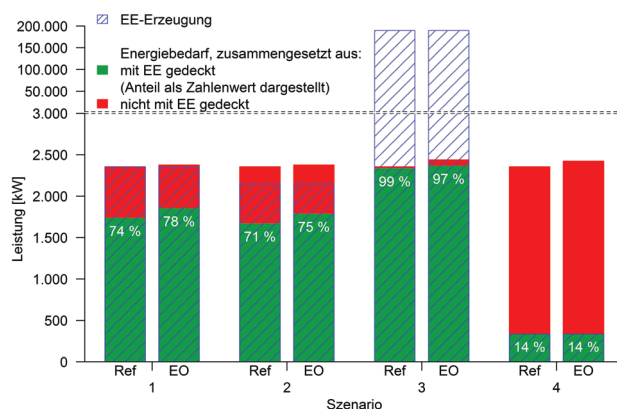


Abbildung 33: Zusammensetzung der verbrauchten Energie für die Pumpwerke in verschiedenen Stromerzeugungsszenarien. Dargestellt sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Steuerstrategien (Ref: Referenzsteuerung, Abbildung der bisherigen Praxis, Modell WabEE-T; EO: energieorientierte Steuerung, ausgerichtet auf die Nutzung des selbst erzeugten Stroms, Modell WabEE-S). Grundlage sind Modellrechnungen für den Zeitraum 11/2000–10/2015. Bitte geteilte Skalierung der y-Achse beachten. EE: erneuerbare Energien.

Ausrichtung der PV-Anlage auf Winterertrag) steht im Winter im Vergleich zu Szenario 1 etwas mehr Strom zur Verfügung, dafür jedoch im Sommer deutlich weniger (wie bereits in Abschnitt 2.2.5 erläutert). Im Vergleich zu einer auf den Gesamtertrag ausgelegten PV-Anlage kann insgesamt ein geringerer Anteil mit EE-Strom gedeckt werden. Sichtbar ist in den Szenarien 1 und 2 der Vorteil der geänderten Steuerungsstrategie (Spalte "EO"). Durch die Möglichkeit, die Pumpenlaufzeiten verstärkt an das Energieangebot anzupassen, können Zeiten mit Energiedefizit überbrückt werden und der Anteil des EE-Stroms erhöht sich in beiden Szenarien um 4 %. Dennoch verbleibt eine gewisse Strommenge, die aus dem Netz bezogen werden muss bzw. die erzeugt wird, aber nicht genutzt werden kann. Dies liegt am saisonalen Verlauf von Erzeugung und Bedarf. Im Sommer wird durchschnittlich über mehrere Monate hinweg mehr Energie erzeugt als benötigt und die Kapazitäten des Kanals reichen nicht aus, um den gesamten Überschuss aufzunehmen. Im Winter steht dauerhaft zu wenig Energie zur Verfügung, was die zuvor im Kanal gespeicherten Wassermengen nicht ausgleichen können. In den Szenarien 1 bzw. 2 könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Pumpwerke von 10.030 t/a (Modellergebnis ohne Nutzung der EE) auf 2250 t/a bzw. 2530 t/a gesenkt werden.<sup>8</sup>

- In Szenario 3 ist schließlich eine ganz andere Situation vorherrschend. Hierbei wird das 80-Fache der benötigten Energie erzeugt. Mit der aktuellen Bewirtschaftungspraxis könnten in diesem Fall 99 % der Energie daraus gedeckt werden. Damit könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen der betrachteten Pumpwerke von 10.030 t/a auf 110 t/a gesenkt werden.<sup>6</sup> Einzelne Tage oder Stunden mit zu geringer Energieerzeugung vor allem von November bis Januar verhindern eine 100 %ige Deckung. Weitere Details hierzu sind dem Bericht BfG (2020) zu entnehmen.
- In Szenario 4 wird nur ein kleiner Teil der benötigten Energiemenge erzeugt. Dadurch kann der Bedarf zu 14 % gedeckt werden. Damit könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen

<sup>8</sup> Annahmen: Emissionen für die Netznutzung nach deutschem Strommix 2017; produktions-, wartungs- und entsorgungsbedingte Emissionen der Module nicht berücksichtigt.

onen der betrachteten Pumpwerke von 10.030 t/a auf 8610 t/a gesenkt werden.<sup>9</sup> Beachtlich ist, dass dabei der selbst erzeugte EE-Strom fast vollständig genutzt werden kann.

Weiterhin fällt auf, dass der Gesamtenergiebedarf (Summe aus roten und grünen Säulen in Abbildung 33) bei der EO-Strategie geringfügig höher ist als bei der Referenzsteuerung. Dies liegt an der unterschiedlichen Ansteuerung der einzelnen Pumpen. Neben anderen Zielwasserständen ist ein weiterer Grund, dass die EO mit kürzerem Zeitschritt modelliert wird und dadurch weniger Informationen über zukünftige Wasserbilanzgrößen hat. Dadurch kann es vorkommen, dass unnötig viel Wasser im Voraus in den Kanal gepumpt wird, das später aufgrund eines Überschusses ungenutzt entlastet werden muss.

Die hydrodynamische Modellierung mit SOBEK-EE, die exemplarisch für das Szenario 1 "EO" für die Scheitelhaltung MLK/ESK durchgeführt wurde, steht nicht im Fokus der Fragestellung, sodass für die Diskussion der Ergebnisse auf den Bericht BfG (2020) verwiesen wird.

### 2.3.2 Neue Antriebstechnologien

#### Straße

Für die Instandhaltung des Verkehrsträgers Straße werden verschiedene Fahrzeugtypen in den Meistereien benötigt. Wie in Abschnitt 2.1.1 bereits dargelegt, sind aktuell bis auf wenige Ausnahmen in allen Fahrzeugklassen Fahrzeuge mit Dieselantrieb der Standard. Aktuell sind im Marktsegment der MZGT ausschließlich Dieselfahrzeuge vorhanden. MZGT mit batterieelektrischem, Gas- (CNG/LNG) oder Wasserstoffantrieb sind zurzeit nicht am Markt erhältlich.

Die Umrüstung des Fuhrparks einer Meisterei auf alternative Antriebe wird ausschließlich bezüglich der Kosten für die Antriebsenergie einer Wirtschaftlichkeitsanalyse unterzogen. Für die Umrüstung auf Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb fallen Investitionskosten für die Fahrzeuge

<sup>9</sup> Annahmen: Emissionen für die Netznutzung nach deutschem Strommix 2017; produktions-, wartungs- und entsorgungsbedingte Emissionen der Module nicht berücksichtigt.

und die Ladeinfrastruktur an. Ebenfalls können Investitionen für eine PV Anlage mit dazugehörigem Speicher anfallen. Diese finanziellen Ausgaben werden hier jedoch nicht berücksichtigt, unter anderem da die Investitionskosten eines batterieelektrischen Demonstrators mit denen eines Serienfahrzeugs nicht vergleichbar sind. Sowohl die Kosten für die Installation der Ladeinfrastruktur als auch die Auslegung eines Batteriespeichers hängen von dem jeweiligen Standort der Meisterei ab und können daher nicht pauschal berücksichtigt werden. Die unter Umständen geringeren Betriebskosten (z. B. Werkstattkosten) und bestehende Steuervorteile von Elektrofahrzeugen gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen werden nicht berücksichtigt (ADAC, o. J.-b). Des Weiteren wird angenommen, dass die direkte Nutzung von eigenem EE-Strom uneingeschränkt möglich ist, ohne dass Netznutzungsentgelte, netzentgeltgekoppelte Abgaben und Umlagen sowie u. U. die Stromsteuer anfallen. Es werden pro kWh erzeugter und verbrauchter Energie 0,08 € berechnet (Quaschnig and Hanitsch, 1998). Ob zusätzliche Fahrzeuge aufgrund von Ausfallzeiten der batterieelektrischen Alternativen z. B. aufgrund von Ladevorgängen benötigt werden, muss betrachtet werden. Dies ist jedoch für die folgende Berechnung der Kraftstoffkosten nicht relevant.

Die Kraftstoffkosten lassen sich aus dem durchschnittlichen Verbrauch und der jährlich zurückgelegten Kilometeranzahl berechnen. Es wird angenommen, dass der Liter Diesel 1,283 € kostet, bei einer jährlichen Preissteigerung von 2,43 %. Für 1 kWh Strom wird ein Strompreis von 0,22 € angenommen, bei einer jährlichen Preissteigerung von 3 %. Die Preissteigerungen für Diesel und Strom orientieren sich an den Auswertungen der durchschnittlichen Preissteigerungswerte von Diesel zwischen den Jahren 2010 und 2018 (ADAC, o. J.-a) bzw. Haushaltstrom zwischen 2008 und 2018 (Statistisches Bundesamt, 2019). Hierfür wurden die Daten des Statistischen Bundesamtes ausgewertet. Ferner wird aufgrund der Analyse der Fragebögen (siehe Anhang) angenommen, dass die MZGT pro Jahr 13.000 km bei einem Kraftstoffverbrauch von 67 l pro 100 km zurücklegen, die schweren Lkw 24.000 km pro Jahr (43 l/100 km), die leichten Lkw (12 l/100 km) sowie die Pkw (7 l/100 km) jeweils 20.000 km pro Jahr. Für die batterieelektrischen MZGT wird ein Verbrauch von 300 kWh/100 km, für die schweren Lkw ein Verbrauch von 200 kWh/100 km, für die Lkw < 3,5 t ein Verbrauch von 30 kWh/100 km und für die

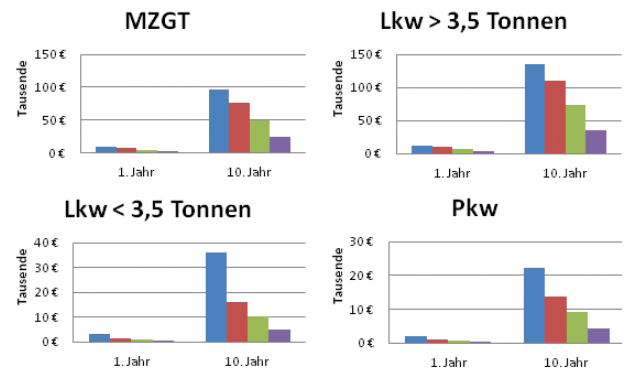


Abbildung 34: Kraftstoffkosten im ersten und zehnten Jahr (akkumuliert) nach Anschaffung (blau: Dieselfahrzeug; rot: battery electric vehicle (BEV) mit 100 % Strombezug aus dem öffentlichen Netz; grün: 50 % Strombezug öffentliches Netz, 50 % Eigenstromverbrauch; lila: 100 % Eigenstromverbrauch). MZGT Mehrzweckgeräteträger.

Pkw ein Verbrauch von 25 kWh/100 km angenommen. In Abbildung 34 sind die berechneten Kraftstoffkosten dargestellt.

Es fallen in 10 Jahren für einen batterieelektrischen MZGT Kosten in Höhe von ca. 75.000 € für das Aufladen des Fahrzeugs an (100 % Netzstrombezug), während im gleichen Zeitraum Diesel für 96.000 € getankt werden müsste. Dies entspricht einer Einsparung von 21.000 €. Würden 50 % des Stroms für den batterieelektrischen MZGT aus einer PV Anlage generiert werden und direkt genutzt werden, würden die Kosten auf ca. 50.000 € in 10 Jahren sinken. Damit würde sich die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs gegenüber dem Dieselpendant um 25.000 € auf 46.000 € erhöhen.

Bei den Lkw über 3,5 t Gesamtgewicht würden in 10 Jahren Kraftstoffkosten in Höhe von 136.000 € anfallen, gegenüber Kosten für den Ladestrom in Höhe von 111.000 €. Dies entspricht einem wirtschaftlichen Vorteil des batterieelektrischen Fahrzeugs in Höhe von 25.000 €. Bei direkter Nutzung von eigenem EE-Strom in Höhe von 50 %, ließen sich die Kosten des battery electric vehicle (BEV) auf 73.000 € senken. Würde das BEV nur mit eigen produzierter Energie geladen, könnten die Kosten auf 35.000 € in 10 Jahren gesenkt werden. Dies entspricht ca. einem Viertel der Dieselpendanten, die in 10 Jahren anfallen.

Fallen für den leichten Lkw 36.000 € an Dieselpendanten in 10 Jahren an (Pkw: 22.000 €), so sind es für einen batterie-

elektrischen Lkw < 3,5 t 16.000 € bei hundertprozentigem Strombezug aus dem Netz (11.000 €: 50 %; 5000 €: 0 %) und für den Pkw 14.000 € bei hundertprozentigem Netzbezug (9000 € bei 50 %; 4400 € bei 0 %).

Abbildung 34 verdeutlicht, dass unter den getroffenen Annahmen batterieelektrische Fahrzeuge nach 10 Jahren geringere Kraftstoffkosten aufweisen als die jeweiligen Pendanten mit entsprechendem Dieselantrieb. Weiterhin ist deutlich zu erkennen, dass die Kosten weiter sinken, wenn der Eigenstromanteil pro Ladevorgang zunimmt.

Durch Sensitivitätsanalysen wird überprüft, inwieweit eine Veränderung der Ergebnisse bei sich ändernden Eingangsgrößen festzustellen ist. Hierzu werden die in Tabelle 11 genannten Randbedingungen geändert. In Szenario 1 wird eine jährliche Preissteigerungsrate für den Kraftstoff in Höhe von 2,43 % und eine jährliche Preissteigerungsrate für Strom in Höhe von 3 % angenommen. Der Verbrauch der Elektrofahrzeuge verändert sich um + 50 %, + 20 % bzw.

– 20 %. Der Bezug elektrischer Energie von einem Energieversorgungsunternehmen wird in den Sensitivitätsanalysen einmal zu 100 % und einmal zu 50 % angenommen. Im dritten Fall wird 100 % des Elektrizitätsbedarfs der Fahrzeuge aus eigenen EE Anlagen gedeckt. Somit ergeben sich neun Ergebnisse für Szenario 1. Für die Szenarien 2 und 3 erfolgt die Berechnung der Ergebnisse analog.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen der verschiedenen Fahrzeugtypen sind in den Tabellen 11 – 14 dargestellt. Ist die Wirtschaftlichkeit bei veränderten Eingangsgrößen weiterhin gegeben, ist das zu erwartende Ergebnis in grün in € dargestellt. Bei einer nicht vorhandenen Wirtschaftlichkeit ist das Ergebnis in rot dargestellt.

Auffällig ist, dass in 101 von 108 Möglichkeiten die Wirtschaftlichkeit trotz sich ändernder Eingangsgrößen weiterhin gegeben ist, wobei Kosten durch Anschaffung und Installation nicht berücksichtigt werden, sondern ausschließlich die Betriebskosten der verschiedenen Systeme

Tabelle 11: Eingangsdaten der Sensitivitätsanalysen.

Randbedingungen	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3		
Jährliche Preissteigerung Kraftstoff	+ 2,43 %			+ 1 %			+ 5 %		
Jährliche Preissteigerung Strom	+ 3 %			+ 5 %			+ 1 %		
Verbrauch Elektrofahrzeuge	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	+ 50 %	+ 20 %	- 20 %	+ 50 %	+ 20 %	- 20 %	+ 50 %	+ 20 %	- 20 %
Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz	a	b	c	a	b	c	a	b	c
	100 %	50 %	0 %	100 %	50 %	0 %	100 %	50 %	0 %

Tabelle 12: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen MZGT gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.

	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
a	22.745	-6.764	-46.108	50.128	17.753	-25.415	-5.908	-32.838	-68.744
b	-27.626	-47.060	-72.972	-7.411	-28.278	-56.102	-49.833	-67.978	-92.171
c	-77.996	-87.356	-99.836	-64.949	-74.309	-86.789	-93.757	-103.117	-115.597

Tabelle 13: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen Lkw > 3,5 t gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.

	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	33.724	-2.593	-51.017	66.828	26.981	-26.148	-817	-33.961	-78.154
2	-28.270	-52.188	-84.080	-3.989	-29.672	-63.917	-54.878	-77.210	-106.986
3	-90.263	-101.783	-117.143	-74.806	-86.326	-101.686	-108.938	-120.458	-135.818

Tabelle 14: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrischen Lkw < 3,5 t gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.

	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	-11.688	-16.228	-22.281	-5.888	-10.869	-17.510	-18.015	-22.158	-27.682
2	-19.438	-22.427	-26.414	-14.740	-17.950	-22.231	-24.772	-27.564	-31.286
3	-27.187	-28.627	-30.547	-23.592	-25.032	-26.952	-31.530	-32.970	-34.890

Tabelle 15: Kraftstoffkosten [€] für einen batterieelektrisch betriebenen Pkw gegenüber einem Dieselfahrzeug nach 10 Jahren.

	Szenario 1			Szenario 2			Szenario 3		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	-1.144	-4.927	-9.971	2.792	-1.359	-6.893	-5.330	-8.782	-13.386
2	-7.601	-10.093	-13.415	-4.585	-7.261	-10.828	-10.961	-13.287	-16.389
3	-14.059	-15.259	-16.859	-11.962	-13.162	-14.762	-16.592	-17.792	-19.392

verglichen werden. Das entspricht einem Anteil von 93,5 %. Lediglich in sieben von 108 Fällen wäre die Wirtschaftlichkeit nicht mehr gegeben. In den Fällen, in denen eine Wirtschaftlichkeitslücke des batterieelektrischen Fahrzeugs gegenüber dem dieselbetriebenen Fahrzeug auftritt, sind die Änderungen der Eingangsgrößen extrem. Das bedeutet, dass hier entweder der Verbrauch der Elektrofahrzeuge um 50 bzw. 20 % erhöht ist und/oder die jährlichen Stromkosten um 5 % steigen, während der Dieselpreis jährlich um 1 % zunimmt. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Kos-

ten für die Antriebsenergie unter den genannten Bedingungen für ein batterieelektrisches Fahrzeug unterhalb der Kosten eines dieselbetriebenen Fahrzeugs liegen. Dies gilt für alle hier untersuchten Fahrzeugklassen.

Die Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ist ebenfalls denkbar. Hierfür sprechen die höhere Reichweite und die schnellere Betankung der Fahrzeuge, die mit einem Dieselfahrzeug gleichzusetzen ist. Wasserstofffahrzeuge sind aktuell noch sehr kostenintensiv. Sollte noch keine

Tankinfrastruktur in der Nähe der Meistereien vorhanden sein, müsste diese erst noch aufgebaut werden. Aufgrund geringer Erfahrungen mit wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen soll hier auf eine ausführliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verzichtet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Technologie gerade für Nutzfahrzeuge eine interessante CO<sub>2</sub>-emissionsfreie Alternative zu den Diesel- und den rein batterieelektrischen Fahrzeugen darstellt. Daher sollte, wenn möglich, mit Herstellern ein Demonstrator geplant und in den Meistereibetrieb integriert werden, um vergleichende Daten zum batterieelektrischen Fahrzeug zu bekommen. Auch ein Refurbishment, die Entnahme des vorhandenen Dieselstrangs und anschließende Einsetzen eines batterieelektrischen Antriebsstrangs, wäre in die Überlegungen mit einzubeziehen.

Fahrzeuge mit CNG-Antrieb, die die speziellen Anforderungen der Meistereifahrzeuge erfüllen, sind ebenfalls noch nicht auf dem Markt verfügbar. Generell ist eine Tankinfrastruktur vorhanden, diese ist jedoch nicht flächendeckend verfügbar. Sollte eine Tankinfrastruktur in der Nähe der Meistereien vorhanden sein, könnte ein Demonstrator geplant werden, der aus dem Vegetationsrückschnitt entstandenes Biogas wieder als Kraftstoff verwendet. Inwieweit die Tanks für das CNG volumemäßig in das Fahrzeugchassis integriert werden können, gilt es zu untersuchen. Die Integration von Wasserstofftanks und Batterien in die Fahrzeuge gilt es ebenso zu analysieren. Ebenfalls ist in dem Demonstrator zu planen, ob das potenziell zu installierende Tankvolumen ausreicht, um alle Tätigkeiten der Meistereien vollumfänglich abzudecken. Alternativ müsste die entsprechende Tankinfrastruktur zum Demonstrator mit aufgebaut werden.

## Schiene

In Anbetracht neuer Antriebstechnologien, die sich derzeit für den Personennahverkehr im Probetrieb (Wasserstoffbrennstoffzellenzug iLint oder Batterietriebzug FLIRT) befinden, werden ebendiese mit dem technologischen Fortschritt für die Wartungs- und Instandhaltungsfahrzeuge adaptiert. Mit dem primären Ziel, durch die neuen Antriebstechnologien CO<sub>2</sub> einzusparen, ist die Verminderung der Geräuschemissionen ein weiterer Vorteil, insbesondere in Verbindung mit den nächtlichen Einsatzzeiten und dem Beitrag, Baulärm zu mindern.

Die größte Verbreitung bei Nebenfahrzeugen im Bahnbereich haben die Dieselmotoren aufgrund ihrer autarken Nutzung unabhängig vom Zustand der Oberleitung. Ebenfalls im Einsatz sind derzeit sogenannte Zweikraftlokomotiven. Zweikraftfahrzeuge können mit zwei unterschiedlichen Energiequellen betrieben werden. Meistens handelt es sich um elektrisch angetriebene Fahrzeuge, deren Fahrstrom wahlweise aus der Oberleitung oder Stromschiene entnommen oder alternativ mit einem Dieselmotor, der einen Generator antreibt, auf dem Fahrzeug selbst erzeugt werden kann. Durch diese Technik sind die Fahrzeuge flexibel einsetzbar, da sie als Fahrzeuge mit Stromabnehmern einerseits auch auf nicht elektrifizierten Bahnen fahren können und andererseits ihre Verbrennungsmotoren auf elektrifizierten Strecken nicht einsetzen müssen. Nachteilig ist die hohe Masse aufgrund der zwei Antriebssysteme.

Neben den Einsatzfahrzeugen mit reinen Verbrennungsmaschinen sind derzeit sogenannte Hybrid-Lokomotiven im Einsatz. Hybrid-Lokomotiven verfügen neben einem Elektromotor über einen Stromgenerator und eine Batterie als Energiespeicher. Bei Teillast fährt die Lok mit Batteriestrom. Nur wenn mehr Leistung benötigt wird, hilft ein Dieselmotor mit. Der Motor dient auch als Stromgenerator zum Nachladen der Batterie. Anders als bei herkömmlichen Dieselloks läuft der Motor auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten immer im optimalen Drehzahlbereich und lädt die Batterie. Dadurch können bis zu 50 % Treibstoff eingespart werden, der Schadstoffausstoß sinkt sogar um bis zu 70 %. Hybridloks eignen sich besonders für häufiges Anfahren und Anhalten.

Am Markt existieren erste Vorstudien zum Betrieb von Bahndienstfahrzeugen mit Wasserstoffantrieb. Hierbei erzeugt eine Brennstoffzelle Strom aus Wasserstoff. Die Energie wird in Batterien gespeichert. Angetrieben wird der Zug von Elektromotoren. Das Fahrzeug kann so vollkommen unabhängig von der Oberleitung elektrisch fahren, benötigt aber eine Wasserstoff-Tankinfrastruktur. Da die Leistungsaufnahme diverser Nebenfahrzeuge zum Teil sehr hoch ist, ist die Verwendung derzeit nur eingeschränkt möglich. Dies betrifft ebenfalls Nebenfahrzeuge, die nur batterieelektrisch betrieben werden.

## 3 Fazit und Ausblick

### 3.1 Wesentlicher Erkenntnisgewinn

Im Kontext des BMVI-Expertenetzwerks wurde die Einrichtung des Themenfelds 5 genutzt, um an der aktuellen Thematik "Energiewende im Verkehrssystem" zu forschen. Vielseitige Ansätze zur Verwendung von EE im Verkehrssektor sind bereits vorhanden, werden momentan jedoch oft nur pilothaft eingesetzt. Daher ist eine Abschätzung des Gesamtpotenzials auch bei großflächigem Einsatz verschiedener Technologien zur Erzeugung und Verwendung von EE an den Standorten der Verkehrswege notwendig. Aufgabe des Themenfelds 5 ist daher nicht die Erforschung und Entwicklung neuer Technologien, sondern die Abschätzung der Praxistauglichkeit und der Größenordnung des jeweiligen Beitrags zum Klimaschutz der zu untersuchenden Technologien. Deshalb hat das Themenfeld 5 des BMVI-Expertenetzwerks in einem Pilotprojekt die Potenziale einer energieeffizienteren Verkehrsinfrastruktur für Straße, Schiene und Wasserstraße untersucht und deren Rahmenbedingungen ansatzweise aufgezeigt. Für einzelne Beispiele wird demonstriert, wie verstärkt EE bei Bau, Instandhaltung und Betrieb der Verkehrsinfrastruktur eingesetzt und überschüssige EE-Strommengen gepuffert werden können. Die Ergebnisse der ersten Phase in den Teilprojekten Landverkehr, Wasserstraße und Reanalyse werden dazu im Folgenden zusammengefasst.

#### 3.1.1 Teilprojekt 1: Landverkehr

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße an gleichen Problemstellungen arbeiten. Insgesamt zeigt sich ein heterogenes Bild des Energiebedarfs in Abhängigkeit vom Verkehrsträger. Beim Verkehrsträger Schiene dominiert in erster Linie der Energiebedarf an elektrischer Energie durch Aufnahme von Traktionsenergie oder Beleuchtung an Bahnhöfen, beim Verkehrsträger Straße hingegen ist der Energiebedarf diversifiziert und besteht aus einem dominierenden Kraftstoffbedarf, gefolgt vom Wärmeenergiebedarf und dem Bedarf an elektrischer Energie. Hierbei sind die Energieverbräuche der Verkehrsträger Schiene und Straße nicht zu vergleichen, da beim Verkehrsträger Straße der allgemeine Verkehr nicht betrachtet wird.

Die viertelstundengenaue Analyse des Lastgangprofils der AM Hannover hat gezeigt, dass der Bedarf an elektrischer Energie der Meistereien in den Wintermonaten erhöht ist. Es hat sich herausgestellt, dass der produzierte Strom nicht gänzlich zum Eigenverbrauch genutzt werden kann. Hier wäre es möglich, den günstig produzierten Strom direkt an nahe gelegene Verbraucher abzugeben, die sich in öffentlicher Hand befinden. Somit können das öffentliche Netz entlastet und die Kosten für die Allgemeinheit gesenkt werden, da z. B. die Pumpwerke der WSV weniger Strom vom Energieversorger beziehen müssen. Ebenfalls als Stromsenke zu sehen ist die DB, deren Bedarf an elektrischer Energie deutlich über dem Bedarf der Straßeninfrastruktur liegt.

Das Pilotprojekt hat deutlich gemacht, dass verschiedenste Arten der Energiegewinnung in oder an der Verkehrsinfrastruktur möglich sind und wissenschaftlich analysiert werden und wurden. Vielversprechend könnte die Möglichkeit der Energiegewinnung an LSW und Lärmschutzwällen sein. Durch Belegung der genannten Flächen mit PV könnte ein erheblicher Beitrag dazu geleistet werden, an dieser Infrastruktur gelegene Verbraucher direkt mit dem vor Ort produziertem mit Strom zu versorgen und so deren Kosten zu senken. Auch wird das öffentliche Stromnetz bei direktem Verbrauch entlastet.

Für den Verkehrsträger Straße haben die Auswertungen im Pilotprojekt ferner gezeigt, dass die Grundstücke der Meistereien oftmals so gelegen sind, dass auch hier die Dachflächen mit PV belegt werden können. Dies kann dazu beitragen, die Energiekosten der Gebäude zu senken und die Treibhausgasbilanz der Standorte zu verbessern. Eine Installation stationärer Speicher ist je nach Bedarf zu prüfen. Bei den Meistereien trägt jedoch ganz erheblich der Fuhrpark zu den Emissionen bei. Die Auswertungen haben erwiesen, dass über alle Fahrzeugklassen und Fahrzeugtypen hinweg bis auf sehr wenige Ausnahmen Dieselfahrzeuge zum Einsatz kommen. Die hieraus resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen erheblich über den Emissionen, die durch die Bereitstellung von Wärme und Strom freigesetzt werden. Das Pilotprojekt konnte zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit batterieelektrischer Fahrzeuge in Hinblick auf den ausschließlichen Vergleich der Kraftstoffkosten mit einem identischen Dieselfahrzeug durchaus gegeben sein kann. Eine Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle analysis,

LCA) wurde nicht durchgeführt. Die Sensitivitätsanalysen illustrieren, dass die sogenannte Eigenstromnutzung erheblich die Wirtschaftlichkeit beeinflusst. Je höher dieser Anteil ist, desto unwirtschaftlicher wird das Fahrzeug mit Dieselantrieb bezogen auf die Kraftstoffkosten im Vergleich zu einem batterieelektrischen Pendant.

Die Umstellung auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge ist ebenfalls denkbar. Hierfür sprechen die höhere Reichweite und die schnellere Betankung der Fahrzeuge, die mit einem Dieselfahrzeug gleichzusetzen ist. Wasserstofffahrzeuge sind aktuell noch sehr kostenintensiv. Sollte noch keine Tankinfrastruktur in der Nähe der Meisterei vorhanden sein, müsste diese erst noch aufgebaut werden. Diese Technologie stellt gerade für Nutzfahrzeuge eine interessante emissionsfreie Alternative zu den Diesel- und den rein batterieelektrischen Fahrzeugen dar. Daher sollte, wenn möglich, mit Herstellern ein Demonstrator geplant und in den Meistereibetrieb integriert werden, um vergleichende Daten zum batterieelektrischen Fahrzeug zu erhalten. Auch ein Refurbishment wäre in die Überlegungen mit einzu beziehen. Die Wirtschaftlichkeit des Wasserstofffahrzeugs sollte während des Projekts laufend untersucht werden. Für den Verkehrsträger Schiene wurde bei der Untersuchung deutlich, dass durch das in weiten Teilen des DB-Konzerns eingeführte Energiemanagement Einsparpotenziale durch kontinuierliche Erfassung und Auswertung aufgedeckt werden und somit zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. CO<sub>2</sub>-Minderung führen.

Der hohe Anteil der EE am eigenen Bahnstrommix basiert jedoch nicht auf den eigenen Bahnkraftwerken (u. a. Wasserkraftwerke) und der Einbindung dezentraler regenerativer Erzeugungsanlagen an der Schieneninfrastruktur oder an den Betriebsgebäuden. Der größte Teil der bilanziellen Grünstrommenge wird über das 50-Hz-Elektrizitätsversorgungsnetz mit Herkunftsnachweisen erworben.

### 3.1.2 Teilprojekt 2: Wasserstraße

Im Teilprojekt 2 des Pilotprojekts wurden anhand der Beispiele Kanalpumpwerke, Fahrzeugflotte und Wärmeversorgung der Gebäude verschiedene Arten des Energiebedarfs der WSV aufgezeigt und dargestellt, wie die Bedarfe aktuell gedeckt werden. Tiefer gehende Auswertungen des Strom-

bedarfs der Kanalpumpwerke am MLK und ESK zeigen in der Summe einen typischen saisonalen Verlauf mit einem Maximum in den Sommermonaten, der jedoch nicht bei jedem Pumpwerk gleich stark ausgeprägt ist. Die Fahrzeugflotte wird mit fossilen Kraftstoffen betrieben, die Gebäude werden zum Großteil ebenfalls mit fossilen Energieträgern beheizt.

Die Eignung von selbst erzeugtem, regenerativem Strom wurde für die Stromversorgung der Pumpwerke abgeschätzt. Dazu wurden für PV-Anlagen geeignete Flächen an der Infrastruktur von Straße und Wasserstraße (Gebäude der WSV, AM, Lärmschutzeinrichtungen) identifiziert und anschließend Stromerzeugungsszenarien erstellt. Unter Berücksichtigung der Szenarien erfolgte dann eine Modellierung des Pumpenbetriebs zur Kanalwasserbewirtschaftung unter Nutzung von erneuerbarem Strom.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Stromerzeugung auf Gebäudedächern von WSV-Außenbezirken und AM in der Umgebung des Kanals 14 % des Strombedarfs der Pumpwerke gedeckt werden können. Dabei wird nahezu der gesamte erzeugte Strom ausgenutzt. Können zusätzlich Lärmschutzeinrichtungen an umliegenden Straßen genutzt werden, wird das 80-Fache der benötigten Strommenge erzeugt. Es können damit 99 % des Bedarfs gedeckt werden. Zu bestimmten Zeiten (für das restliche 1 % des Bedarfs) muss auf eine externe Stromversorgung zurückgegriffen werden. Bei einer theoretischen Erzeugungsmenge von 100 % des Strombedarfs können davon 74–78 % genutzt werden, je nach Steuerungsstrategie der Pumpen. Der restliche Anteil steht für andere Verbraucher zur Verfügung, da er zu Zeiten erzeugt wird, an denen kein Strom benötigt wird bzw. genutzt werden kann.

In den Modellen wurde eine Steuerungsstrategie entwickelt, die die aktuelle Energieverfügbarkeit aus EE berücksichtigt. Diese kann im Vergleich zur aktuellen Steuerungspraxis den genutzten Anteil des erzeugten Stroms geringfügig erhöhen (maximal 4 % in den untersuchten Szenarien). Bei sehr geringen oder sehr hohen Erzeugungsmengen, im Vergleich zum Bedarf, bringt die entwickelte Steuerungsstrategie keine nennenswerten Vorteile.

Insgesamt hat die Untersuchung gezeigt, dass PV-Anlagen – ohne Betrachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte – eine



sinnvolle Ergänzung zur Stromversorgung der Pumpwerke sein können. Je kleiner die PV-Anlagengröße ist, desto besser kann der erzeugte Strom genutzt werden, bei größeren Anlagen sollte über eine anderweitige Verwertungsmöglichkeit in Spitzenzeiten nachgedacht werden.

### 3.1.3 Teilprojekt 3: Hochauflösende Reanalysen

Im Hinblick auf die Benutzung atmosphärischer Reanalysen zur Untersuchung des EE-Potenzials an den Verkehrswegen wurde deren Qualität durch Vergleiche mit weiteren meteorologischen Datensätzen bestimmt. Dabei ließen sich parameterspezifisch sowohl Vor- als auch Nachteile der regionalen Reanalysen erkennen. Im Bereich Windenergie bieten Reanalysen eine gute und oft auch alternativlose Datengrundlage zur Bewertung von standortspezifischen Ertragsabschätzungen. Dabei zeigen regionale Reanalysen mit höherer räumlicher und oft auch zeitlicher Auflösung signifikante Verbesserungen gegenüber etablierten globalen Modellen. Jedoch führen anwachsende Rechenkapazitäten und ständige Weiterentwicklungen auch bei globalen Produkten zu einer stetig steigenden Performance, was der Vergleich zu den globalen Produkten ERA-Interim (alt) und ERA5 (neu) eindeutig zeigt. Detailliertere Evaluierungen zeigen Schwächen in COSMO-REA6 in höheren Lagen und Gegenden stark variierender Orografie. Zudem werden Extremereignisse wie tägliche Windmaxima mit zunehmender Intensität stärker unterschätzt. In den Küstenbereichen, die vor allem im Windenergiesektor von Interesse sind, überzeugt die Reanalyse im Vergleich zu Stationsbeobachtungen.

Bei der Auswertung der Globalstrahlung zeigt sich die regionale Reanalyse satellitengestützten Datensätzen unterlegen. Hierfür ist insbesondere die oft fehlerhafte Wiedergabe von konvektiver und kleinskaliger Bewölkung verantwortlich. Bei bekannten Schwachpunkten der Satellitendatensätze können Reanalysen jedoch einen guten Ersatz bieten. Dazu zählen sowohl die Gebiete nördlich 60° Breite als auch Gegenden mit häufiger Schneebedeckung.

Das Erzeugungspotenzial aus PV wird mithilfe der vorgestellten Datensätze des DWD und eines bestehenden Prognosetools ermittelt. Saisonale und jährliche Schwankungen

lassen sich analysieren. Zudem findet im Untersuchungsgebiet eine Bestimmung der optimalen Modulausrichtung und Modulneigung statt, die im Sommer bei ca. 20° Neigung und im Winter bei 68° liegt.

## 3.2 Verwertung der Ergebnisse

Die im Themenfeld 5 gewonnenen Erkenntnisse sind insbesondere für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) sowie die direkt im Themenfeld beteiligten Behörden und Anwender (z. B. die WSV) relevant. Durch den Erlass zum Pilotprojekt klimaneutrale WSV (BMVI, 2018) sind die Untersuchungen auch für die Praxis relevant und können die Grundlage für weitere Arbeiten in diesem Bereich bilden. Beispielsweise kann die Analyse der Einsatzzeiten verschiedener Betriebsfahrzeuge Hinweise auf die Tauglichkeit oder Untauglichkeit alternativer Antriebskonzepte geben. Diese Erkenntnisse sind unter Umständen sogar auf andere Verkehrsträger übertragbar, da auch bei der Wasserstraße ein Fuhrpark aus Landfahrzeugen unterhalten werden muss.

In Phase 1 standen die grundlegende Generierung von Wissen hinsichtlich der Einsatzmöglichkeiten von EE und die Aneignung eines verkehrsträgerübergreifenden Prozess- und Systemverständnisses im Vordergrund, um ein gutes Fundament für alle weiteren Arbeiten, insbesondere in Phase 2, schaffen zu können.

Die verhältnismäßig kurze Bearbeitungszeit des Pilotprojekts von annähernd zwei Jahren führte dazu, dass die in der Pilotstudie getroffenen Annahmen Ergebnisse mit eingeschränkter Aussagekraft für spezifische Gegebenheiten entstehen ließen. Diese Annahmen betrafen zum Beispiel die Eignung der gewählten Standorte, technische Details zu Solarpanels, Repräsentativität und Übertragbarkeit der Informationen zum Energieverbrauch auf andere Zeiten und Standorte. Daher sind die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Verwertung insbesondere als Vorbereitung auf die zweite Phase zu verstehen.

Mit den noch offenen Forschungsfragen wurden die nächsten Schritte auf dem Weg zur konkreten Umsetzung identifiziert, auf dieser Basis können die erforderli-

chen Arbeitspakete präzisiert werden. Zudem können die in Phase 2 geschaffenen internen Vernetzungen zu einem kontinuierlichen Datenaustausch bezüglich der Energiekennzahlen weitergenutzt und ausgebaut werden. Des Weiteren dienen die Arbeiten dem besseren Verständnis der verwendeten Daten und Modelle. Dieses Wissen kann an andere potenzielle Nutzer der Datenquellen weitergegeben werden. Beispielsweise sind zusätzliche Qualitätsbewertungen für die offen zugänglichen Datensätze des DWD in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht worden, womit auch andere Anwendungsfälle unterstützt wurden.

### 3.3 Offene Forschungsfragen

Das Pilotprojekt des BMVI-Expertennetzwerks hat zum einen erste Erkenntnisse auf dem Gebiet der verkehrsträgerübergreifenden Nutzung von EE geliefert und zum anderen an vielen Stellen weiteren Forschungsbedarf offengelegt. Einige der aufgetauchten Fragen sollen in Phase 2 tiefer untersucht werden. Die Fragestellungen variieren zwischen den verschiedenen Handlungsfeldern und Verkehrsträgern:

- die Analyse des Lastgangs einer Meisterei,
- die Analyse der fahrzeugspezifischen Fahrprofile, daraus resultierend die Auslegung der benötigten Batteriekapazität,
- die Analyse des Standorts bezüglich PV-Nutzung,
- die Auslegung eines stationären/virtuellen Speichers,
- die Abschätzung der Möglichkeit des bidirektionalen Ladens zur Vermeidung von Lastspitzen,
- die Analyse bezüglich der Installation eines Lastgangmanagements,
- die Analyse möglicher Änderungen bzw. Anpassung der Arbeitsabläufe sowie
- die Frage des Energiemixes beim Strombezug.

#### Umstellung des Fuhrparks mittels Refurbishment

Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass in einer Straßen-/Autobahn-Meisterei die höchsten Emissionen durch den Fahrzeugsektor verursacht werden. Durch Umstellung der Fuhrparks auf emissionsfreie Fahrzeuge können hohe Einsparpotenziale erschlossen werden. Hier sind vor allem die schweren Nutzfahrzeuge die Hauptemittenten. Diese könnten durch Umstellung auf wasserstoffbetriebene oder batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge ersetzt werden. Alle Fahrzeuge einer Meisterei weisen ihr spezifisches Fahrprofil auf. Hier gilt es, mit Herstellern zu diskutieren und je nach Fahrzeugtyp und Fahrprofil die Auslegung der Batteriegröße zu bestimmen, um so eine optimale wirtschaftliche Lösung zu gewährleisten. Es sind vor allem die besonderen Randbedingungen der Meistereifahrzeuge zu beachten. Hier ist u. a. der Einsatz im Winterdienst zu nennen, bei dem es zu sehr langen und andauernden Einsätzen kommen kann. Die Integration der Fahrzeuge kann dann optimal gelingen, wenn die Gesamtsituation vor Ort analysiert wird. Hierzu zählt u. a.

Fahrzeuge, die aus einem bestehenden Fuhrpark aus z. B. Altersgründen ausgegliedert werden sollen, können durch das sogenannte Refurbishment wieder instand gesetzt werden. Dabei wird der bestehende Dieselstrang entfernt und durch einen emissionsfreien Antrieb ersetzt. Durch die Einbindung der Demonstratoren in einen Meistereifuhrpark können wichtige Informationen bezüglich der Verfügbarkeit, der Anzahl der Ladezyklen und der Wirtschaftlichkeit gewonnen werden. Ebenso kann eine Aussage über die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen getroffen werden. Es können weiterhin wichtige Faktoren bezüglich der Batteriekapazität in den Sommer- und Wintermonaten gewonnen werden. Diese Informationen können dann genutzt werden, um die Fuhrparks weiterer Autobahnmeistereien und Straßenmeistereien zu ergänzen bzw. umzustellen. Weiterhin können von den Ergebnissen die kommunalen Betriebshöfe profitieren. Hier sind ebenfalls schwere und leichte Nutzfahrzeuge vorhanden, die entsprechend umgerüstet, zum Klimaschutz beitragen können.

Das Refurbishment bietet den Vorteil, dass das bestehende Fahrzeug weiter im Fuhrpark verbleiben kann und so die Emissionen für die Herstellung eines neuen Fahrzeugs entfallen. Hierzu sollte dementsprechend eine LCA durchgeführt werden. Die LCA sollte auf die komplette Instandhaltung des Verkehrsträgers Straße ausgeweitet werden, um so

die wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale benennen zu können.

### **PV an Lärmschutzwällen/LSW**

Im Bereich der Energieerzeugung gilt es, für LSW und Lärmschutzwälle die vorhandenen Potenziale noch detaillierter zu benennen und Vorschläge zum Heben dieser Potenziale zu erarbeiten. Befinden sich diese Wallflächen in der Nähe eigener Infrastrukturen mit Energiebedarf, könnten der Strom vor Ort verbraucht und die Kosten der Liegenschaften gesenkt werden. Weiterhin müssen die rechtlichen Anforderungen weitergehend untersucht werden, da die Abnahme des Stroms eine Hürde darstellt. Aktuell werden Steuern und Gebühren fällig, sobald der Strom durch das öffentliche Netz geleitet wird. Ebenso fallen Gebühren an, wenn der Stromabnehmer nicht gleich dem Stromerzeuger ist. Auch die Eigenstromversorgung ist aktuell rechtlich gedeckelt. Um jedoch den Strom von einem Verkehrsträger, z. B. der Straße, an nahe gelegene Verbraucher lokal abzugeben (z. B. Wasserstraße, Schiene), ist eine Einspeisung in das öffentliche Netz oftmals unumgänglich. Auch stellt sich hier die Frage nach der Personengleichheit. Die rechtlichen Aspekte sollen im Rahmen eines externen Vergabeprojekts untersucht und Änderungsvorschläge erarbeitet werden.

### **Ausweitung der Energiebedarfsanalysen**

Die Verbrauchsanalyse der Verkehrsleitzentrale Leverkusen hat gezeigt, dass diese im Jahr 2016 993,89 MWh verbraucht hat. Hierbei gilt es, den Anteil der jeweiligen Verbraucher am Gesamtverbrauch zu analysieren und so Potenziale zur Einsparung ermitteln zu können. Durch die Bereitstellung von Daten des Regierungspräsidiums Stuttgart konnten erste Verbraucher ermittelt werden. Die Analyse soll auf die weiteren Verkehrsleitzentralen ausgeweitet und die entsprechenden Verbraucher ermittelt und benannt werden. Gleichzeitig liegt in der weiteren Analyse der Tunnelstromversorgung ein weiterer wichtiger Faktor. Für den Betrieb des Tunnels Allach wurden im Jahr 2018 1186 MWh Strom verbraucht. Auch hier sollen durch tiefer gehende Analysen weitere Einsparpotenziale benannt werden. Die Bereitstellung der benötigten Energie für den Tunnelbetrieb durch EE soll analysiert und detailliert dargestellt werden, damit

auch die Tunnelinfrastruktur zur Energiewende beitragen kann.

### **Integration von EE in die Tankinfrastruktur**

Durch eine Umstellung des Fahrzeugbestandes bzw. Änderung des Kraftstoffbedarfs wie durch die Bereitstellung von Wasserstoff oder Biogas sollte das Potenzial für den zukünftigen Bedarf abgeschätzt werden. Aufgrund der Fluktuation und damit wechselhaften Energiedargebots der EE ergibt sich für alle drei Verkehrsträger Forschungsbedarf hinsichtlich der Speichermöglichkeit der vorhandenen elektrischen Energie, sei es mithilfe eines Energiemanagement mit z. B. Batteriekapazitäten oder mittels chemischer Speicherung durch Umwandlung per Elektrolyse zu Wasserstoff. Fahrzeuge mit CNG Antrieb, die die speziellen Anforderungen der Meistereifahrzeuge erfüllen, sind ebenfalls noch nicht auf dem Markt verfügbar. Hier wäre es interessant, einen Demonstrator zu planen, der aus dem Vegetationsrückschnitt entstandenes Biogas wieder als Kraftstoff verwendet. Inwieweit die Tanks für das CNG volumenmäßig in das Fahrzeugchassis integriert werden können, gilt es zu untersuchen. Ebenfalls ist in dem Demonstrator zu planen, ob das potenziell zu installierende Tankvolumen ausreicht, um alle Tätigkeiten der Meisterei vollumfänglich abzudecken.

Durch die Vernetzung der Verkehrsträger ist eine gemeinsame wirtschaftlich sinnvolle Tankinfrastrukturnutzung an Knotenpunkten denkbar, diese müssten lokalisiert sowie der Gesamtbedarf abgeschätzt werden.

Sektorenkopplung der Betriebs- und Verwaltungsgebäude Neben der oben erwähnten Möglichkeit des Lastmanagements durch die Umwandlung vorhandener oder überschüssiger elektrischer Energie in Speichermedien ist die Sektorenkopplung ein wichtiger Baustein der Energiewende. Dabei kann Strom aus dem öffentlichen Versorgungsnetz aufgenommen werden (oder der eigens erzeugte Strom) und z. B. für die Wärmebereitstellung über Wärmepumpen (Power-to-Heat) der Betriebsgebäude oder Werkshallen eingesetzt werden. In Situationen, in denen das Netz zu überlasten droht, befinden sich regelmäßig größere EE-Strommengen im Versorgungsnetz. Unter dieser Annahme weist der Netzstrom einen im Vergleich zum durchschnittlichen deutschen Strommix zumindest erhöhten

Anteil bilanzieller EE-Strommengen auf. Unter dem Begriff "Demand-Side-Management" als Teil des Energiemanagements, also einer intelligent gesteuerten Lastaufnahme bzw. Nicht-Aufnahme, ergibt sich Potenzial zur Erhöhung des bilanziellen Verbrauchs von EE. Der Strombezug in diesen Situationen kann eine gewisse Netzdienlichkeit aufweisen.

### **Weiterentwicklung der energieorientierten Pumpensteuerung**

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die bestmögliche Ausnutzung des erzeugten Stroms zu implementieren. Bei der im Modell WabEE-S verwendeten Strategie wird bei vorhandenen Pump- und Platzkapazitäten immer etwas mehr Strom verwendet als erzeugt, damit nichts ungenutzt bleibt. Diese Strategie ist sinnvoll bei erwarteten Erzeugungsmengen, die im Mittel geringer sind als der Bedarf. Denkbar wäre auch beispielsweise eine saisonal unterschiedliche Strategie, die bei erwarteter Überproduktion anders reagiert, was hier jedoch nicht gemacht wurde.

### **Ausweitung der Untersuchungen an der Wasserstraße auf ganz Deutschland**

Die für das Gebiet am MLK/ESK durchgeführten Untersuchungen zum Eigenverbrauch von EE sollen auf alle Bundeswasserstraßen übertragen werden. Durch deren heterogene Verteilung und unterschiedlichen Randbedingungen ist der Energiebedarf zur Wasserbewirtschaftung regional stark divergent. Es ist unklar, ob die Verwertbarkeit des selbst erzeugten Stroms von den hier untersuchten Wasserstraßen auf andere übertragbar ist.

### **Erweiterung und Update der meteorologischen Datenverfügbarkeit**

Insbesondere die stetig steigende Zahl von Datennutzern aus dem Energiesektor führt zu neuen Anforderungen an das DWD-Datenangebot. Das Pilotprojekt hat in diesem Zusammenhang erneut bewiesen, dass vor allem die Sparte der EE intensiv auf hochwertige Wetter- und Klimadaten angewiesen ist, auch für Anwendungsfragen im Zuständigkeitsbereich des BMVI. Die Auswertungen der ersten Phase des BMVI-Expertenetzwerks zeigen dazu Vor- und

Nachteile der aktuell verfügbaren Datensätze im Hinblick auf energierelevante Parameter auf. In der zweiten Phase soll die Weiterentwicklung einer neuen Reanalyse mit aktuellerer Modellversion und veränderter Parametrisierung vorangetrieben werden und erneut hinsichtlich ihrer Anwendungstauglichkeit bei energierelevanten Fragestellungen untersucht werden. In erster Linie werden mögliche Fortschritte in neuen Reanalyseversionen von Interesse sein. Zudem bieten sich weitere Anknüpfungspunkte an die gewonnenen Erkenntnisse, wie die genauere Untersuchung der Windverhältnisse in COSMO-REA6 im Übergangsbereich von Meer zu Küste und Inland, da diese Regionen insbesondere für die Windenergie von hoher Relevanz sind. Die Verfügbarkeit hochaufgelöster Information für beide Bereiche, Wind und Sonne, erlaubt detaillierte Untersuchungen zu Ausgleichseffekten und Abgleich des zeitlichen Verhaltens von Energieerzeugung und -nutzung.

### **3.4 Schwerpunkte der nächsten Bearbeitungsphase ab 2020**

Das Pilotprojekt des Themenfeldes 5 hat gezeigt, dass die Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasserstraße an gleichen Problemstellungen arbeiten. Die nächste Phase (2020-2025) wird jedoch voraussichtlich ohne Beteiligung der BfG stattfinden.

Hinsichtlich der Nutzung der Verkehrsinfrastruktur zur Energieerzeugung gibt es vielfache innovative Ansätze, die teilweise auch schon die Marktreife erreicht haben (PV an LSW) oder im Pilotprojekt erprobt werden. Die Potenziale zur Nutzung der EE, die verkehrsseitig vorhanden sind, können bei der derzeitigen Gesetzeslage allerdings nur von privaten Unternehmen gehoben werden. Die Ermittlung dieser Potenziale wurde u. a. im Rahmen des Themenfelds 5 des BMVI-Expertenetzwerks vorangetrieben und auch hier ist für eine Umsetzung die Kopplung der Sektoren Verkehr und Energie z. B. durch Energiecontracting oder durch Power Purchase Agreements nötig. Die Chancen zum Austausch von EE zwischen den Verkehrsträgern sollen daher in der zweiten Phase des BMVI-Expertenetzwerks (2020-2025) genauer analysiert werden. Insbesondere sollen die Barrieren für den gegenseitigen Austausch von EE zwischen Verkehrsträgern bzw. zwischen öffentlichen und

privaten Produzenten/Verbrauchern thematisiert und Lösungsvorschläge aufgezeigt werden.

Der Energiebedarf der unterschiedlichen Verkehrsträger gestaltet sich als heterogen, zeichnet sich jedoch insgesamt durch einen hohen Endenergiebedarf aus. Durch die Umstellung auf alternative Antriebe wie wasserstoffbetriebene, batterieelektrische oder mit Biogas angetriebene Fahrzeuge ergeben sich hohe Einsparpotenziale. Mit der Verschiebung des Betrachtungsschwerpunktes von der Infrastruktur hin zum Verkehr eröffnen sich weitere Untersuchungsgebiete: Identifikation und Validierung neuer Antriebs- und Energieversorgungstechnologien, Untersuchungen zur Auswir-

kung der Änderung des Fahrzeugbestandes, Integration von EE in die Ladeinfrastrukturen.

In der zweiten Phase des BMVI-ExpertenNetzwerks sind mehrere Demonstratoren geplant, u. a. zur Gewinnung von Biogas zum Antrieb von MZGT aus dem Grünschnitt des Straßenseitenraums und der Umbau (Refurbishing) ausgemusterter konventioneller Fahrzeuge mit batterieelektrischem Antrieb, was unter dem Aspekt der Gesamtlebenszyklusbetrachtung, die einen weiteren Schwerpunkt in der zweiten Phase des Themenfelds 5 bilden soll, besonders vorteilhaft ist.

## 4 Literatur

- ADAC, o. J.-a. Entwicklung der Spritpreise. <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoffpreisentwicklung/> . Letzter Aufruf: 23.01.2020.
- ADAC, o. J.-b. Kostenvergleich Elektroautos. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/e-mobilitaet/kaufen/elektroauto-kostenvergleich/> . Aufruf: 03.09.2019.
- Autobahndirektion Südbayern, 2019. Persönliche Korrespondenz zwischen Autobahndirektion Südbayern, München (Herr M. Lenghauer) und der Bundesanstalt für Straßenwesen (Herr F. Gersdorf).
- BAST, 2011. Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B87.
- BAST, 2012. Energy Harvesting with Piezoelectric Generators. FE089.0268/2011.
- BAST, 2014. Wärmeenergie aus dränierten Bergwässern von Straßentunneln. F1100.2310018.
- BAST, 2016a. Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen. BMVI. <https://www.bmvi.de/goto?id=372110>.
- BAST, 2016b. Temperierte Straße – Untersuchungen zur Realisation eines Demonstrators auf dem duraBAST-Testgelände. FE05.0196/2016/ARB.
- BAW, 2017. Energetische Optimierung der Gebäude der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV). BAW-Nr. B3951.04.04.70001.
- BfG-1730, 2011. BEWASYS Rhein-Oder - Tageswertmodell zur Simulation der Wasserbewirtschaftung der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein und Oder. Autoren: Ebner von Eschenbach, A.-D.; Hohenrainer, J.; Richter, K.; Oppermann, R.; Krause, S.. Im Auftrag der GDWS Standorte Mitte, West und Ost. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bericht.
- BfG, 2020. Wassermengenbewirtschaftung von Elbe-Seitenkanal und Mittellandkanal unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien. Untersuchung im Rahmen des BMVI-Expertennetzwerks, Pilotprojekt Themenfeld 5: Einsatz erneuerbarer Energien im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Autoren: Benjamin Schima, Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach. BfG-Bericht (in Erstellung).
- BMU, 2016. Der Klimaschutzplan 2050. <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/> . Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- BMVI, 2018. Erlass: Klimaneutrale Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV); Ausrüstung der WSV-Liegenschaften mit Anlagen zum Laden von Elektroautos und zur Erzeugung sowie Speicherung von grünem Strom. An: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben. BfNa-392.1/2. Berlin, 22.11.2018.
- BMVI, o. J. Straßenbetriebsdienst. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/strassenbetriebsdienst.html>. Letzter Aufruf: 09.07.2019.
- BMVI-Expertennetzwerk, 2018. Forschungsstrategie des BMVI-Expertennetzwerks Wissen – Können – Handeln, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Bonn. [https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Forschungsstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmvi-expertennetzwerk.de/DE/Publikationen/Medien/Forschungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2).

- BMWi, 2017. Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 0: Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- Bollmeyer, C. et al., 2015. Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(686): 1-15.
- Clauß, M. et al., 2019. Untersuchung multifunktionaler Straßenbaumaterialien und Verbundwerkstoffe zur Nutzung solarer Energie und Verbesserung der Dauerhaftigkeit: Schlussbericht, Förderkennzeichen BMBF 13N13610. - Verbund-Nummer 01158764.
- Damrath, U., 2002. Verifikation von Wettervorhersagen. Promet: Die neue Modellkette des DWD II, 28: 8.
- DB Netze, 2018. Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, Infraktur- und Zustandsbericht.
- Deutsche Bahn AG, 2018. Integrierter Bericht, <https://www.deutschebahn.com/resource/blob/4045194/462384b76cf49fe8ec715f41e4a3202a/19-03-IB-data.pdf>. Letzter Aufruf: 16.09.2019.
- Deutsche BauZeitschrift, o. J. Befahrbares Photovoltaikmodul. [https://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Befahrbares\\_Photovoltaikmodul\\_LEhttp\\_www.solaroad.nl\\_en\\_www.solaroad\\_2306286.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz_Befahrbares_Photovoltaikmodul_LEhttp_www.solaroad.nl_en_www.solaroad_2306286.html). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- Deutscher Speditions- und Logistikverband e.V., 2013. Berechnung von Treibhausgasemissionen in Spedition und Logistik gemäß DIN EN 16258. Begriffe, Methoden, Beispiele, 2. Aktualisierte Auflage.
- Dt. Bundestag, 2019. Kleine Anfrage Deutscher Bundestag, Drucksache 19/11384. <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/113/1911384.pdf>.
- DWD, o. J.-a. Warnkriterien. [https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen\\_aktuell/kriterien/warnkriterien.html](https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- DWD, o. J.-b. Zahlen und Fakten zum Deutschen Wetterdienst 2019. [https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/allgemein/zahlen\\_und\\_fakten.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.dwd.de/SharedDocs/downloads/DE/allgemein/zahlen_und_fakten.pdf?__blob=publicationFile&v=12). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- EFZN, 2013. Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, Energie-Forschungszentrum Niedersachsen.
- Frank, C.W. et al., 2018. Bias correction of a novel European reanalysis data set for solar energy applications. Solar Energy, 164: 12-24.
- Fraunhofer ISE, 2019. Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>. Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- Fraunhofer ISE, o. J. Energy Charts. [https://www.energy-charts.de/ren\\_share\\_de.htm?source=ren-share&period=annual&year=all](https://www.energy-charts.de/ren_share_de.htm?source=ren-share&period=annual&year=all). Letzter Aufruf: 16.09.2019.

- GDWS, 2015. Festlegung der Wasserspiegellagen im Bereich der GDWS-Außenstelle Mitte, Festlegung der Betriebs- und Grenzwasserstände an den Kanälen. GDWS - ASt Mitte. Az: 3300-231.2:M-T5.0012.
- GDWS, 2019a. Kraftstoffkostenerfassung 2018 WSV. Zusammenstellung der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Dezernat W26, vom 10.04.2019. Unveröffentlicht.
- GDWS, 2019b. Persönliche Korrespondenz zwischen der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (Dez. W26, Herr Oeverdieck) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Ref. M2, Herr Schima) vom 10.04.2019.
- GDWS, 2019c. Zusammenstellungen der Wasserfahrzeuge (Stand 20.03.2018) sowie Landfahrzeuge der WSV (Stand 15.02.2017). Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Dezernat W12, 11.01.2019. Unveröffentlicht.
- GDWS, o. J. Das Westdeutsche Kanalnetz zwischen Rhein, Weser und Elbe, [https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/01\\_bundeswasserstrassen/05\\_westdeutsches\\_Kanalnetz/Kanalnetz.html?nn=1214418](https://www.gdws.wsv.bund.de/DE/wasserstrassen/01_bundeswasserstrassen/05_westdeutsches_Kanalnetz/Kanalnetz.html?nn=1214418). Letzter Aufruf: 18.07.2019.
- Gündra, H. et al., 2015. Standortkataster für Lärmschutzanlagen mit Ertragsprognose für potenzielle Photovoltaik-Anwendungen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 252.
- Huld, T. und Amillo, A., 2015. Estimating PV module performance over large geographical regions: The role of irradiance, air temperature, wind speed and solar spectrum. *Energies*, 8(6): 5159-5181.
- Kariuki, B.W. und Sato, T., 2018. Interannual and spatial variability of solar radiation energy potential in Kenya using Meteosat satellite. *Renewable energy*, 116: 88-96.
- Kaspar, F. et al., 2019. A climatological assessment of balancing effects and shortfall risks of photovoltaics and wind energy in Germany and Europe. *Advances in Science and Research*, 16: 119-128.
- Kenny, R.P. et al., 2003. Energy rating of PV modules: comparison of methods and approach, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of. IEEE, pp. 2015-2018.
- King, D.L., Kratochvil, J.A. und Boyson, W.E., 2004. Photovoltaic array performance model. United States. Department of Energy.
- Kölner Stadtanzeiger, o.J. Solarradweg in Erftstadt. [www.ksta.de/region/rhein-erft/erftstadt/feuerwehr-musste-erneut-anruecken-solarradweg-in-erftstadt-gesperrt-und-zugedeckt-32277516](http://www.ksta.de/region/rhein-erft/erftstadt/feuerwehr-musste-erneut-anruecken-solarradweg-in-erftstadt-gesperrt-und-zugedeckt-32277516). Letzter Aufruf: 26.03.2019.
- Krähenmann, S. et al., 2018. High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany. "Theoretical and Applied Climatology", 131(3-4): 899-926.
- Kraus, H., 2008. Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie: Einführung in die Physik der atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie. Springer-Verlag.
- Niermann, D., Borsche, M., Kaiser-Weiss, A. und Kaspar, F., 2019. Evaluating renewable energy relevant parameters of COSMO-REA6 by comparing against station observations, satellites and other reanalyses. *Meteorologische Zeitschrift*, 28 (4): 347 - 360. <https://doi.org/10.1127/metz/2019/0945>.



- Opendata, o. J. CDC DWD Opendata Portal. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- Pfeifroth, U., Trentmann, J. und Kothe, S., 2019. Product user manual: Meteosat solar surface radiation and effective cloud albedo climate data record, EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring.
- Pfenninger, S. und Staffell, I., 2016. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*, 114: 1251-1265.
- PlasticsEurope, o. J. Erste Solarstraße der Welt in Frankreich eröffnet. <https://www.plasticseurope.org/de/newsroom/neuigkeiten/archive-news-2017/erste-solarstrasse-der-welt-frankreich-eroeffnet>. Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- PVGIS, o. J. Photovoltaic Geographical Information System. [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- Quaschnig, V. und Hanitsch, R., 1998. Höhere Flächenausbeute durch Optimierung bei aufgeständerten Modulen, Proceedings of the Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, Germany, pp. 11-13.
- Regierungspräsidium Stuttgart, 2019. Persönliche Korrespondenz zwischen Regierungspräsidium Stuttgart (Frau I. Kühne) und Bundesanstalt für Straßenwesen (Herr F. Gersdorf).
- Schroedter-Homscheidt, M., Deifel, H. und Heinemann, D., 2015. Grundlagen des Energiesystems für Energiemeteorologen. Promet: Meteorologische Fortbildung. Meteorologische Aspekte der Nutzung erneuerbarer Energien, 39: 138-150.
- Schulz, J.P. und Heise, E., 2003. A new scheme for diagnosing near-surface convective gusts. *COSMO Newsletter*, 3: 221-225.
- Staffell, I. und Pfenninger, S., 2016. Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *J. Energy*, 114: 1224-1239.
- Statistisches Bundesamt, 2019. Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihen von Januar 2005 bis Oktober 2019.
- Straßenbau.NRW, 2018. Persönliche Korrespondenz zwischen Landesbetrieb Straßenbau.NRW. Leverkusen (Herr M. Remiger) und Bundesanstalt für Straßenwesen (Frau S. Freudenstein).
- TRY, o. J. Test Reference Years. [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/hourly/Project\\_TRY/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/Project_TRY/). Letzter Aufruf: 03.09.2019.
- Umweltbundesamt, 2014. Windenergie. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie#textpart-1>. Letzter Aufruf: 17.07.2019.
- Umweltbundesamt, 2016. Emissionsquellen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1>. Letzter Aufruf: 06.09.2019.

Umweltbundesamt, 2019. Strom- und Wärmeversorgung in Zahlen, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energieversorgung/strom-waermeversorgung-in-zahlen#Kraftwerke>. Letzter Aufruf: 05.09.2019.

Verbraucherzentrale, 2016. Photovoltaik für Privathaushalte. [https://www.verbraucherzentrale-rlp.de/sites/default/files/migration\\_files/media226239A.pdf](https://www.verbraucherzentrale-rlp.de/sites/default/files/migration_files/media226239A.pdf). Letzter Aufruf: 16.09.2019.

WSA Minden, 2018. Persönliche Korrespondenz zwischen dem WSA Minden (Frau Tiegel) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Herr Schima) vom 23.10.2018.

# 5 Anhang

Themenfeld 5:

Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen

## Fragebogen zum Energieverbrauch

### Teil I: Fahrzeuge

Hinweis: Die folgenden Fragen dienen dazu, die Nutzungsanforderungen an Straßenbetriebsdienstfahrzeuge zu identifizieren. Ziel dabei ist es, abzuleiten, ob eine Umstellung der Fahrzeuge des Straßenbetriebsdienstes auf alternative Antriebstechnologien in naher Zukunft möglich sein kann. Unter dem Begriff "alternative Antriebstechnologien" werden im Folgenden Fahrzeuge mit Erdgasantrieb, Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-/Wasserstoffantrieb und reine Elektrofahrzeuge verstanden.

Für welchen Bereich ist die Autobahnmeisterei zuständig?

Streckenlänge [Kilometer]:	
zzgl. Astlängen [Kilometer]:	
Verkehrsanlagen:	
Ingenieurbauwerke:	

Welche Fahrzeuge sind für den Betrieb der Bundesfernstraßen im Einsatz?

Fahrzeugtyp	Anzahl der Fahrzeuge	Jährliche Kilometerleistung summiert	Jährliche Treibstoffmenge summiert	Art des Treibstoffs
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.

Fahrzeugtyp	Anzahl der Fahrzeuge	Jährliche Kilometerleistung summiert	Jährliche Treibstoffmenge summiert	Art des Treibstoffs
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.
Wählen Sie ein Element aus.				Wählen Sie ein Element aus.

**Wie sieht ein tägliches Nutzungsprofil der verschiedenen Fahrzeugtypen aus?**

Zur Ermittlung eines Nutzungsprofils bitten wir Sie, die **Detailfragen (DF)** der nachstehenden Tabelle zu beantworten. Sämtliche Detailfragen beziehen sich auf ein Szenario mit intensivem Fahrzeugeinsatz (z. B. bedingt durch lang anhaltenden Schneefall). Zwei der Detailfragen bedürfen dabei einer detaillierteren Erläuterung der Fragestellung:

**DF7** fragt nach der zeitkritischen Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten, die an dem Tag mit intensivem Fahrzeugeinsatz stattgefunden haben. Sofern Alternativen durch andere zur Verfügung stehender Fahrzeuge zur Durchführung der Arbeiten denkbar gewesen wären, bitten wir Sie, diese hier zu beschreiben. Andernfalls genügt die Angabe "keine Alternative vorhanden".

**DF8** fragt, ob für ein Fahrzeug < 7,5 t (bzw. ein Fahrzeug > 7,5 t) ein Ladevorgang mit einer Dauer von 30 min (bzw. 120 min) für eine Reichweite von 200 km zeitlich denkbar gewesen wäre – trotz des intensiven Fahrzeugeinsatzes. Bitte versuchen Sie, dieses Szenario einzuschätzen.

DF 1: Fahrzeugtyp	DF 2: Maximale tägliche Fahrtstrecke [Kilometer]	DF 3: Maximale tägliche Einsatzzeit [Minuten]	DF 4: Spannweite der längsten täglichen Pausenzeit im Gehöft, Angabe bitte je Schicht [Minuten]	DF 5: Minimale tägliche Anzahl an Pausen	DF 6: Durchgeführte Arbeiten	DF 7: Einschätzung des Einsatzes möglicher Fahrzeugalternativen	DF 8: Einschätzung, ob längere Batterie-Ladevorgänge zeitlich hätten integriert werden können
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie in Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							

DF 1: Fahrzeugtyp	DF 2: Maximale tägliche Fahrtstrecke [Kilometer]	DF 3: Maximale tägliche Einsatzzeit [Minuten]	DF 4: Spannweite der längsten täglichen Pausenzeit im Gehöft, Angabe bitte je Schicht [Minuten]	DF 5: Minimale tägliche Anzahl an Pausen	DF 6: Durchgeführte Arbeiten	DF 7: Einschätzung des Einsatzes möglicher Fahrzeug- alternativen	DF 8: Einschätzung, ob längere Batterie- Ladevorgänge zeitlich hätten integriert werden können
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							
Wählen Sie ein Element aus.							

Ließe sich ein erweiterter Strombezug mit hohen kurzzeitigen Verbräuchen realisieren?

ja     nein     nicht bekannt

## Teil II: Salzmanagement

**Hinweis:** Die folgenden Angaben werden zur Analyse des Energiebedarfs benötigt, der für die Herstellung und den Transport des Salzes bzw. der Salzlösung aufgewendet wird. Bitte beziehen Sie sich bei Ihren Angaben auf die letzten drei Winter.

Wie hoch ist der saisonale Trockensalzverbrauch? Bei eigener Lösungsherstellung ist der dafür genutzte Trockenstoffanteil einzubeziehen.

Wintersaison	Salzmenge [Tonnen]	Lagerstätte, aus der das Salz stammt – Falls verschiedene Lagerstätten gegeben sind, bitte die Mengenangaben je Lagerstätte benennen.

Wie hoch ist der saisonale Bezug von extern hergestellten Lösungsmengen?

Wintersaison	Lösungsmenge [Liter]	Produktionsstätte, aus der die Lösung stammt – Falls verschiedene Lagerstätten gegeben sind, bitte die Mengenangaben je Lagerstätte benennen.

### Teil III: Gebäudeinformationen

Hinweis: Die folgenden Angaben werden zur Analyse des Energiebedarfs benötigt, der für die Heizung, Kühlung oder Lüftung der Gebäude aufgewendet wird. Bitte beziehen Sie Ihre Angaben auf die drei wichtigsten Gebäudeteile.

Bestehen unterschiedliche Gebäudeteile auf dem Gelände?

Nr. des Gebäudeteils:	G1	G2	G3
Name des Gebäudeteils:			
Baujahr:			
Nettogrundfläche:			

Wurden in den vergangenen 25 Jahren Sanierungen, Instandsetzungen oder Modernisierungen durchgeführt? Hierbei sind ausschließlich energetische Optimierungen von Interesse. Bitte beschreiben Sie diese.

Nr.	Datum von	Datum bis	Art der energetischen Optimierung	Unterlagen und Dokumentation
G1:				
G2:				
G3:				

## Teil IV: Verbrauchserfassung Heizung

**Hinweis:** Die folgenden Daten können den letzten Heizkostenabrechnungen entnommen werden (sowie dem Schornsteinfegerprotokoll). Falls die Heizung während eines Abrechnungszeitraumes erneuert wurde, geben Sie bitte auch die Werte der alten Heizung und das Datum des Austausches an.

Wie hoch ist der jährliche Energiebedarf für die Heizung?

Nr.	Datum von	Datum bis	Verbrauch inkl. Einheit	Faktor kWh	Art der Anlage	Art des Brennstoffs	Anmerkung
G1:							
G2:							
G3:							

Gab es während der genannten Zeiträume Leerstände in den Gebäudeteilen?

Für die genannten Zeiträume sind

keine Leerstände zu berücksichtigen.

Leerstände zu berücksichtigen, und zwar für folgende Gebäudeteile:  G1  G2  G3

Von:	Bis:	Geschätzter Flächenanteil [%]:

Enthalten oben genannte Angaben zur Heizungsanlage den Energiebedarf für die Warmwasseraufbereitung?

Der Energiebedarf für die Warmwasserbereitung ist in den Verbrauchswerten

enthalten.

nicht enthalten.

teilweise enthalten, und zwar für folgende Gebäudeteile:  G1  G2  G3

Die Warmwasserbereitung erfolgt

zentral über Heizkessel.  über Sonnenkollektoren und Heizung.  dezentral.



## Teil V: Verbrauchserfassung Strom

Hinweis: Die folgenden Daten können den letzten Stromabrechnungen entnommen werden.

Wie hoch ist der jährliche Strombedarf?

Nr.	Datum von	Datum bis	Verbrauch [kWh]	Einschätzung des Strombedarfs in Abhängigkeit der Tages- und Jahreszeit
G1:				
G2:				
G3:				

Wird das Gebäude klimatisiert und/oder belüftet?

Eine Kälteanlage ist

vorhanden.

nicht vorhanden.

teilweise vorhanden, und zwar in folgenden Gebäudeteilen:  G1  G2  G3

Eine Lüftungsanlage ist

vorhanden.

nicht vorhanden.

teilweise vorhanden, und zwar in folgenden Gebäudeteilen:  G1  G2  G3

Sofern eine Lüftungsanlage vorhanden ist, handelt es sich um folgende Art einer Lüftungsanlage:

nur Abluft

ohne Wärmerückgewinnung

nur Zuluft

mit Wärmerückgewinnung

Zu- und Abluft

## Teil VI: Bauliche Voraussetzungen für eine Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage)

**Hinweis:** Die folgenden Fragen beziehen sich auf den Gebäudeteil, der für eine PV-Anlage am ehesten geeignet erscheint.

Um welche Dachkonstruktion handelt es sich bei dem Gebäudeteil?

- Flachdach       Tonnen- oder Bogendach       Satteldach
- Sonstiges Schrägdach: \_\_\_\_\_

Wie groß ist die Dachfläche in m<sup>2</sup>?: \_\_\_\_\_

Falls es sich um ein Schrägdach handelt: Welche Dachneigung liegt vor?

- genaue Angabe möglich:
- Angabe kann nur geschätzt werden. Bitte in diesem Fall den Neigungswinkel schätzen:
- 10° bis 20°       21° bis 30°       31° bis 40°
- 41° bis 50°       51° bis 60°       > 60°

Welche Ausrichtung der Dachfläche liegt vor?

- Ost       Südost       Süd       Südwest
- West       Nordwest       Nord       Nordost

Ist eine Verschattung durch andere Gebäude oder Bäume gegeben?

- ja       nein

Bemerkung: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Das zusätzliche Gewicht, das durch eine PV-Anlage herbeigeführt wird, beträgt ca. 25 kg/m<sup>2</sup>. Wie schätzen Sie die Statik des Dachs ein: Ist das Dach geeignet, eine PV-Anlage darauf zu installieren?

- ja       nein       keine Aussage möglich

Bemerkung: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## Teil VII: Rückmeldung

Wir interessieren uns für sämtliche Energieverbrauchsdaten. Gibt es zu diesem Thema etwas, das Sie uns über die bisherigen Fragen hinaus mitteilen möchten? Oder möchten Sie zu einer bestimmten Frage weitere Ergänzungen machen? Wir freuen uns über weitere Mitteilungen und Feedback:

---

---

---

---

---

---

---

---



## **Impressum**

### **Herausgeber**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin  
Internet: [www.bmvi.de](http://www.bmvi.de)  
E-Mail: [poststelle@bmvi.bund.de](mailto:poststelle@bmvi.bund.de)

### **Autoren**

Markus Auerbach (BASt), Anna-Dorothea Ebner von Eschenbach (BfG), Dörthe Eichler (WSV), Felix Gersdorf (BASt), Frank Kaspar (DWD), Detlev Majewski (DWD), Deborah Niermann (DWD), Benjamin Schima (BfG), Philipp Streek (DZSF/EBA)

### **Stand**

September 2020, 3. Auflage

### **Gestaltung | Druck**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  
Referat Z 32, Druckvorstufe | Hausdruckerei

### **Bildnachweis**

Titelseite: Ulrike Vorwerk  
Abbildungsverzeichnis

Diese Broschüre ist Teil der Öffentlichkeitsarbeit der Bundesregierung.  
Sie wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt.

BMVI-Expertennetzwerk (2020) Einsatzpotenziale erneuerbarer Energien für Verkehr und Infrastruktur verstärkt erschließen.  
Ergebnisbericht des Themenfeldes 5 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019,  
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin. DOI: 10.5675/ExpNBMVI2020.2020.16

