

# Potenzialabschätzung für Geothermie und Kleinwindkraftanlagen entlang der Verkehrswege Schiene und Straße

Bär, F.<sup>1</sup> | Rieck, D.<sup>2</sup> | Kaspar, F.<sup>2</sup> | Auerbach, M.<sup>3</sup> | Streek, P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>: Deutscher Wetterdienst, <sup>2</sup>: Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung, <sup>3</sup>: Bundesanstalt für Straßenwesen

## 1. Einleitung

Das Themenfeld „Erneuerbare Energien“ des BMDV-Expertennetzwerk untersucht u.a. die Möglichkeiten zur Nutzung erneuerbarer Energien in der Verkehrsinfrastruktur. Die Nutzungsmöglichkeiten von Photovoltaik an Lärmschutzeinrichtungen wurden in einem separaten Dokument bewertet (Bär et al. 2022). In diesem Dokument werden die Potenziale für Geothermie und Kleinwindkraftanlagen bewertet. Im Fall der Windenergie sind die Untersuchungen auf Kleinwindkraftanlagen beschränkt, da größere Anlagen in direkter Nachbarschaft zu den Verkehrswegen nicht in Betracht kommen.

## 2. Geothermie

Geothermie zählt als erneuerbare Energie, solange die Wärme-Entnahmerate nicht die Erneuerungsrate der Erdschicht überschreitet. Häufig werden jedoch mit starken Wärmepumpen große Wärmemengen gefördert, welche die Replikationsrate überschreiten (Barbier 2002). Die Folge davon ist eine notwendige tiefere Bohrung nach kurzer Zeit, um neuere Wärmereservoirs zu erschließen. Eine Speicherung der Wärmeenergie der Sommersonne in Gesteinsschichten und deren Wärmeentnahme im Winter wäre eine nachhaltige Lösung zur Nutzung der Geothermie als erneuerbare Energie und würde auf diesem Weg die Sonne als erneuerbare Wärmequelle nutzen.

### 2.1. Aktueller Stand

Die aktuelle Nutzung der Geothermie entlang der Verkehrsinfrastruktur beschränkt sich auf einige Pilotprojekte der Deutschen Bahn AG und einiger Städte und Träger (Deutsche Bahn AG 2022, geoKOAX 2015, Triples-Systems 2020).

Von Seiten des Verkehrsträgers Schiene wird die Beheizung von Bahnhöfen und Weichen durch Geothermie mit Hilfe verschiedener Methoden realisiert. Erdkollektoren, Erdwärmesonden und hydrothermale Geothermie werden von der Deutschen Bahn AG als Beispiel genannt. Die Methoden unterscheiden sich in der horizontalen und vertikalen Ausdehnung der Anlagen, sowie darin, ob thermisches Grundwasser für das Verfahren nötig ist oder nicht (Bundesverband Geothermie 2020). Letzteres ist

deutschlandweit nur in Regionen möglich, in denen ausreichend hydrothermales Potenzial verfügbar ist (siehe Schulz et al. (2013)).

Im Bereich des Verkehrsträgers Straße untersuchte die BAST bereits 2011 das Potenzial der Geothermie für die Beheizung von Brücken (Feldmann et al. 2011). Sie weisen auf eine aus ingenieurtechnischer Sicht mögliche Nutzung der Geothermie zur Verhinderung von Glättebildung auf Brücken hin. Die Wirtschaftlichkeit einer Brückenbeheizung durch Geothermie ist wesentlich von den Gegebenheiten vor Ort abhängig. Sowohl von dem Grundwasserspiegel, als auch von der Bodenbeschaffenheit. Die Stadt Marktdredwitz hat eine erste Konzeptstudie zu einem temperierten Straßenabschnitt 2012 veröffentlicht (Uwe et al. 2012). Dieses Projekt wurde jedoch aufgrund veränderter politischer Rahmenbedingungen der Gemeinde nicht weiterverfolgt und umgesetzt. Neben dem sicherheitstechnischen Vorteil einer Fahrbahntemperierung, ist die Vermeidung von Streusalzbenutzung eine ökonomische Entlastung für den Winterdienst sowie eine ökologische Entlastung für die Umwelt. Ein Pilotprojekt der BAST einer temperierten Brücke in Berkenthin bestätigte den Wegfall der Streunotwendigkeit (Eilers et al. 2020). In zehn Jahren Betriebszeit war kein Einsatz von Streusalz notwendig. Eine weitere Verwendbarkeit der Temperierungseinrichtungen könnte die Kühlung des Straßenbelags im Sommer darstellen, welche Spurrinnenbildung in der Fahrbahndecke vermeiden kann. Die Verlängerung der Lebensdauer des Straßenbelags durch Glätte- und Spurrinnenvermeidung wird in einigen Studien angeführt, konnte jedoch noch nicht quantitativ bestätigt werden. Eine Untersuchung der BAST zur Realisierung eines Demonstrators eines temperierten Straßenabschnitts auf dem duraBAST zeigt des Weiteren auch Nachteile einer in das Straßenbett eingebrachten geothermischen Anlage auf (Oeser et al. 2019). Die nicht-abschätzbare Dauerhaftigkeit einer Anlage, die hohen Kosten hitzebeständiger Rohrsysteme, die problematische Handhabung beim Einbau als auch der erhöhte Fremdkörperanteil in der Straßenbefestigung bergen Risiken und Probleme. Daher untersucht die BAST aktuell eine mögliche Lösung der Problematiken, indem an Stelle von Rohrleitungen eine großporige PU-Zwischenschicht in die Straßenbedeckung eingebracht wird, über welche der Straßenbelag temperiert werden soll. Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen zu diesem Thema auf dem duraBAST stehen noch aus.

Weitere Projekte wie zum Beispiel die Autobahnbrücke bei Därlingen in der Schweiz setzen auf Erdwärmesondenfelder. Dabei wird dem Belag im Sommer Wärme entzogen, was zu einer Abkühlung des Straßenbelags führt. Die Wärme wird in einem Speicher im natürlichen Felsen gespeichert und im Winter bei Glättegefahr dem Straßenbelag zugeführt (Schweizerische Vereinigung für Geothermie 2009). Sind in der Umgebung passende Gegebenheiten wie die natürliche Speichermöglichkeit und ein langlebiges geothermisches System vorhanden, kann diese Methode eine nachhaltige geothermische Temperierung der Straße ermöglichen.

Ein weiteres geothermisches Anwendungsbeispiel in der Verkehrsinfrastruktur aus der Schweiz ist die Nutzung von Tunnelwasser als geothermische Wärmequelle (Link 2021). Die Tunnelwasser-Nutzung kann auch in Sommermonaten zur Kühlung von Gebäuden oder Tunnelanlagen dienen. Das Konzept ist jedoch in Deutschland aufgrund weniger vorhandener Tunnel nicht im großen Maßstab relevant.

---

## 2.2. Ausblick und Fazit

Geothermische Wärmegewinnung ist dann sinnvoll, wenn die Wärmebedarf an spezifischen Anlagen oder Gebäuden gefragt ist. Die Einsatzfelder sind daher Weichenheizung, Gebäudeheizung und Straßenbelagsbeheizung von thermisch exponierten Abschnitten, wie zum Beispiel Brücken.

Eine deutschlandweite Potenzialanalyse ist aufgrund der lokalen Gegebenheiten nicht sinnvoll. Für die geothermische Temperierung müssen sinnvolle Positionen entlang der Verkehrsinfrastruktur wie Weichen oder glatteisgefährdete Brücken lokal analysiert werden. So sind die Bodenbeschaffenheit, die Speichermöglichkeit und das geothermische Potenzial vor Ort wichtige Bestandteile einer Standortanalyse. Für jede Temperierungsanlage muss auf diese Weise individuell eine Abschätzung getroffen werden.

Von Seiten der Deutschen Bahn konnte das Expertennetzwerk keinen aktuellen wissenschaftlichen Stand ihrer Pilotprojekte erlangen. Die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der geothermischen Wärmenutzung der Pilotprojekte bleibt daher vorerst ungeklärt.

Für den Verkehrsträger Straße stehen die Ergebnisse einiger Pilotprojekte noch aus. Die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Straßentemperierung sprechen für eine standortspezifische Analyse lokaler Projekte.

Für eine nachhaltige und klimaneutrale Ausrichtung der Verkehrsinfrastruktur besteht nach Einschätzung der Beteiligten des Themenfeldes ein Interesse daran, die Pilotprojekte der Geothermie weiter zu verfolgen und Geothermie weiterhin als Möglichkeit zur Heizung spezifischer Anlagen zu sehen.

### 3. Kleinwindkraftanlagen

Windkraft im Allgemeinen kann im Zusammenspiel mit anderer erneuerbarer Energie wie der Sonnenenergie einen Beitrag zu einer ganzjährigen ausgeglichenen Energieversorgung leisten. Dabei spielen Kleinwindkraftanlagen bisweilen allerdings eine untergeordnete Stelle. Ihre Anwendung beschränkte sich bis vor wenigen Jahren vorwiegend auf den urbanen Raum. Die Nutzung von Energie aus Kleinwindkraftanlagen entlang der Verkehrsinfrastruktur wird aktuell zunehmend in verschiedenen Pilotprojekten getestet und könnte zukünftig auch in Deutschland interessant sein.

#### 3.1. Allgemeines

Der Begriff der „Kleinwindkraftanlage“ ist nicht einheitlich durch eine Definition festgelegt. Verschiedene Akteure benutzen verschiedene Schwellenwerte, um die Kleinwindkraftanlagen von den großen Windkraftanlagen zu unterscheiden. So benutzt das Fraunhofer IWES als Maximalgrenze für Kleinwindkraftanlagen eine maximale Rotorfläche von 200 m<sup>2</sup> und eine Nennleistung von 75 kW (Bundesverband Kleinwindanlagen 2021). Der Bundesverband WindEnergie e.V. hingegen zählt alle Windkraftanlagen bis zu einer Nennleistung von 100 kW als Kleinwindkraftanlage. Das EEG beschreibt in manchen Textpassagen verschiedene Schwellenwerte für Kleinwindkraftanlagen. Der unterste Schwellenwert davon liegt bei 50 kW. Die geläufigen Kleinwindkraftanlagen weisen Nennleistungen deutlich unter 50 kW auf und Rotorflächen, die kleiner als 200 m<sup>2</sup> sind. Die meisten Akteure der Branche geben 50 m als Maximalhöhe für Kleinwindkraftanlagen an. In dieser Potenzialabschätzung werden keine Kleinwindkraftanlagen mit größeren Maßen betrachtet.

Als Kategorisierung nach Anwendungsgebieten und Leistung der Kleinwindkraftanlagen wird häufig auf die Aufteilung des Bundesverbands WindEnergie e.V. zurückgegriffen, wie in Tabelle 2-1 dargestellt:

Tabelle 2-1 | Kategorisierung des Bundesverbands WindEnergie e.V. für Kleinwindkraftanlagen (Twele et al. 2011).

Nennleistung	Bezeichnung	Einsatzgebiet		Einspeisungsnetz
Bis 5 kW	Mikrowindkraftanlage	Gebäudeintegrierte Installation, Batteriegestützte Inselsysteme, freie Aufstellung		dezentralen Anwendungen oder Niederspannungsnetz
5–30 kW	Miniwindkraftanlage	Gewerbegebiete, Landwirtschaft	Landwirtschaft	Niederspannungsnetz
30–100 kW	Mittelwindkraftanlage	Gewerbegebiete, Landwirtschaft	Landwirtschaft	Mittelspannungsebene oder Niederspannungsnetz

Überwiegend werden Kleinwindkraftanlagen zum Eigenverbrauch errichtet. Die Anlage wird in der Nähe des Verbrauchers installiert und die erzeugte Energie größtenteils vor Ort verbraucht. Daher ist eine Netzinfrastruktur in den meisten Fällen nicht notwendig.

## 3.2. Anlagentypen

Bei Kleinwindkraftanlagen gibt es vielfältige Konstruktionen wie horizontale und vertikale Rotorachsen. Die Stellung der Rotorachse beeinflusst maßgeblich die Form des Rotors und die Rotationsebene sowie die Fähigkeit des Rotors, Windenergie in Strom umzuwandeln <sup>1</sup>.

Die Effizienz der Kleinwindkraftanlagen kann aufgrund der unterschiedlichen Bauformen und deren Aerodynamik stark variieren. Im Allgemeinen haben Kleinwindkraftanlagen einen niedrigeren Wirkungsgrad als großen Windenergieanlagen. Der Wirkungsgrad vertikaler Kleinwindkraftanlagen beträgt zwischen 10–40 %, bei horizontalen Kleinwindkraftanlagen bis zu 45 %, wohingegen der Wirkungsgrad konventioneller Windenergieanlagen bei knapp 50 % liegt (Thüring et al. 2013).

Im Vergleich zu vertikalen Anlagen basieren horizontale Anlagen auf einem technisch ausgereiften Konzept und haben damit gewöhnlich höhere Wirkungsgrade. Die horizontalen Anlagen sind größtenteils mit drei Rotorblättern ausgestattet, obwohl es auch Modelle mit zwei, fünf oder mehr Rotorblättern gibt. Bei den vertikalen Bauformen existieren unterschiedliche Bauformen wie der Darrieus-, H-Darrieusrotor, die anlagentechnisch als Auftriebsläufer ausgeführt sind und der Savoniusrotor, der ein Widerstandsläufer ist. Vertikale Kleinwindkraftanlagen sind allgemein robuster gegenüber Windrichtungswechseln, Windturbulenzen und Schrägströmungen im Vergleich zu den horizontalen Anlagen. Dabei können diese Anlagen bei rauerer Windbedingungen weiter betrieben werden, bei welchen horizontalen Anlagen bereits abgeschaltet werden müssen (Thüring et al. 2013). Die vertikalen Anlagen beweisen häufig niedrigere Schallemissionen, weshalb Anlagen dieser Art vorteilhaft für die Anwendungen im Wohngebieten sein können. Ein anderer Vorteil ist, dass die vertikalen Anlagen auch bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten Energie erzeugen können. Demgegenüber haben die vertikalen Anlagen höheren Kosten, höheres Gewicht und zum Teil Eigenstrombedarf zum Anlaufen als Nachteil. Des Weiteren können vertikale Anlagen aufgrund von hohen Schwingungen und damit einhergehenden Belastungen keine großen Bauhöhen erreichen. Windstarke Standorte mit bodennahen hohen Windgeschwindigkeiten sind daher für vertikale Kleinwindkraftanlagen gut geeignet.

Zusammenfassend existieren viele unterschiedliche Modelle, mit unterschiedlichem Wirkungsgrad und damit variierendem Ertragspotenzial für Kleinwindkraftanlagen. Um eine für den Standort passende Kleinwindkraftanlage auszuwählen, liefern die Anbieter Angaben zur Nennleistung, Nennwindgeschwindigkeit, Leistungskurven und Einschaltgeschwindigkeit. Allerdings dienen die Angaben der Hersteller als Orientierungshilfe und bieten keine ausreichende Basis für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse. Um die Kleinwindkraftanlagen vergleichbar zu machen, können drei Leistungsbeiwerte ( $c_p$ ) für jeweils 4 m/s, 5 m/s und 11 m/s jährliche Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet werden. Die Ergebnisse sind potenzielle Jahreserträge für die jeweiligen Geschwindigkeiten (Thüring et al. 2013).

Ein weiterer Kleinwindkraftanlagentyp ist aktuell noch in der Testphase. Rotorblattfreie elastische Windturbinen können durch aeroelastische Resonanz in Schwingung gebracht werden und erzeugen auf diese Weise Strom. Erste Anlagen mit 85 cm Höhe sollen in wenigen Jahren Strom für das Aufladen

---

<sup>1</sup> Eine Übersicht verschiedener Anlagentypen ist in Twele et al. (2011) zu finden.

einer Powerbank liefern können. Die Nutzung der Anlagen entlang der Verkehrsinfrastruktur kann in einigen Jahren interessant sein (Francis et al. 2021).

### 3.3. Erprobte Anwendungsfälle

Verkehrsflächen und deren Nebenflächen können aufgrund der Verkehrsströmung und der geringen Bebauung Anwendungsmöglichkeiten für Kleinwindkraftanlagen bieten. Weltweit entstehen aktuell Pilotprojekte bzw. erste Inbetriebnahme für Anwendungen entlang der Verkehrswege. Alpha 311, ein Unternehmen aus Großbritannien, hat Kleinwindkraftanlagen entwickelt, die an den Beleuchtungsmasten entlang der Verkehrsstrassen integriert werden können. Die Anlagen sollen die Luftströmung aus dem Verkehr nutzen und daraus Energie für die Verkehrsweg-Beleuchtung und das öffentliche Netz produzieren. Die Gemeinden, die die Beleuchtungsmasten betreiben, benötigen keine Planungsgenehmigung, um eine schnelle Integration der Technologie zu gewährleisten. Der Generator der Anlage kann ab einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s Strom produzieren. (Alpha 311 Limited 2022)

Ein anderes Beispiel aus der Schweiz ist noch in der Erprobungsphase. Swiss Energy Pier hat ein Konzept mit einer Kombination aus Photovoltaikanlagen und vertikalen Kleinwindkraftanlagen entwickelt, das zunächst an einem Autobahnabschnitt in der Schweiz erprobt werden soll. Laut der Angaben des Unternehmens werden dabei 794 vertikale Anlagen entlang eines 2500 m langen Autobahnabschnitts installiert. Die prognostizierte jährliche Windenergieerzeugung beträgt etwa 47 GWh. (EnergyPier AG 2021)

Beide oben genannten Beispiele befinden sich in Pilotphasen. Eine genauere Analyse des tatsächlichen Ertragspotenzials und der Wirtschaftlichkeit kann erst nach der Inbetriebnahme durchgeführt werden. Es wäre auch wichtig den optimalen Standort mit Stromabnehmern in der Nähe zu finden und auf diese Weise die Kosten für die Netzinfrastruktur minimieren. Kleinwindkraftanlagen können auch für Ladestationen an der Verkehrsinfrastruktur in Betracht gezogen werden. Je nach Anwendungsfall können dabei Netzentgelte vermieden werden, wenn zum Beispiel die Kleinwindkraftanlagen direkt mit dem Energiespeicher oder der Ladestation gekoppelt sind. Projekte für gleichartige Installationen mit PV-Anlagen und Ladestationen existieren bereits.

In Deutschland bestehen für eine Bebauung entlang der Verkehrsinfrastruktur partiell Richtlinien. Im Allgemeinen sieht das Baurecht für Kleinwindkraftanlagen über 10 Meter Höhe in allen Bundesländern eine Baugenehmigung vor. Eine einheitliche spezifischere Regelung für die Baugenehmigung von Kleinwindkraftanlagen entlang des Verkehrsträgers Schiene ist auf Bundesebene nicht vorhanden. Durch die Landesverordnungen bestehen Abstandsempfehlungen und Vorgaben für Windkraftanlagen. Dabei sind diese Vorgaben jedoch nicht auf Kleinwindkraftanlagen spezifiziert, sondern gelten für jede Art der Windkraftanlagen. Für den Bau entlang der Schienentrassen können die Regelungen von Landesverordnungen berücksichtigt werden. Beispielsweise wird in Baden-Württemberg ein Abstand von 50- 500 m von Bahnlinien empfohlen (Fachagentur Windenergie an Land 2022). Das Eisenbahn-Bundesamt empfiehlt bestimmte Sicherheitsabstände, um die Auswirkungen auf die Sicherheit des Bahnbetriebs zuverlässig ausschließen zu können. Eine verbindliche Abstandsregelung dazu existiert nicht.

Vielmehr müssen die Abstände und Maßnahmen im Einzelfall betrachtet werden. Grundlegend existiert nach Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung der Lichtraum als freizuhaltender Raum, damit der für die Fahrt der Schienenfahrzeuge erforderliche Raum sichergestellt werden kann.

Die Abstandsregeln des Verkehrsträgers Straße sind spezifischer formuliert. Entlang der Bundesautobahnen existieren durch die Vorgaben des Bundesfernstraßengesetzes eine 40 m breite, entlang der Bundesstraßen eine 20 m breite Anbauverbotszonen. In dieser Zone, gemessen vom äußeren Rand der befestigten Fahrbahn, dürfen keine Hochbauten (inklusive Windkraftanlagen) errichtet werden. Des Weiteren existiert entlang der Fernbundesstraßen eine Beschränkungszone, die 40–100 m längs der Bundesautobahnen bzw. 20–40 m entlang der Bundesstraßen beträgt. Der Bebau in dieser Zone bedarf der Zustimmung der Landesbaubehörden. Deren Zustimmung kann aufgrund der Verkehrssicherheit, der Ausbauabsichten oder der Straßenbaugestaltung verwehrt werden. (Bund-Länder-Initiative Windenergie 2012)

### 3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Der Markt für Kleinwindkraftanlagen ist heterogen und bietet eine große Anzahl an Anlagenkonstruktionen und Anbietern. Dies führt zu hohen Qualitätsunterschieden bei der Anlagentechnik. Dabei bleibt der Markt für Kleinwindkraftanlagen relativ dynamisch mit neuen Anbietern, die auf den Markt treten. Laut World Wind Energy Association (Welt-Windenergie Verband) treten weltweit über 330 Hersteller auf, die Kleinwindkraftanlagen Technologien anbieten. (Jüttemann 2020)

Laut dem Marktreport für Kleinwindkraftanlagen dominieren Kleinwindkraftanlagen mit horizontalen Rotorachsen den Markt. Allerdings existieren Hersteller, die den erfolgreichen Zertifizierungsprozess für ihre vertikalen Anlagen durchgeführt haben und diese Modelle für den gewerblichen Einsatz anbieten können. (Jüttemann 2020)

Die Investitionskosten für die Kleinwindkraftanlagen haben sich in den letzten Jahren im Vergleich zu konventioneller Windkraftanlagen wenig geändert. Die Preise für Kleinwindkraftanlagen betragen im Durchschnitt zwischen 2000 bis 10.000 € je kW Nennleistung. Die spezifischen Anlagenkosten für große Windkraftanlagen an Land betragen 1400 bis 2000 € je kW Leistung und die Stromgestehungskosten für Windkraftanlagen an Land 3,94 bis 8,29 Cent/kWh (Fraunhofer ISE 2021). Um Stromgestehungskosten zu berechnen, werden die Gesamtkosten für die Installation und den Betrieb durch den Energieertrag über die gesamte Laufzeit dividiert. Eine Angabe zur Stromgestehungskosten spezifisch für Kleinwindkraftanlagen wurde in dem vorliegenden Bericht nicht genannt. Der ‚Distributed Wind Market Report‘ für die Vereinigte Staaten von Amerika benennt 23 \$Cent/kWh für die dokumentierten Kleinwindkraftanlagen Projekte in den Vereinigte Staaten von Amerika im Jahr 2018 (Orrell et al. 2018). Höhere Jahreserträge durch bessere Windverhältnisse am Standort und höhere Rotorhöhe können zur Senkung der Stromgestehungskosten für Kleinwindkraftanlagen führen.

Eine eigene Förderung durch die Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)-Vergütung für Kleinwindkraftanlagen ist nicht spezifiziert. Für Kleinwindkraftanlagen ist der gleiche Einspeisetarif vorgesehen wie für große Windkraftanlagen. Daher bieten die Anlagen keine Attraktivität für Betreiber, die den Strom in



das öffentliche Netz einspeisen möchten. Eine leistungsabhängige spezielle Vergütung nach EEG für unterschiedliche Leistungsklassen von Kleinwindkraftanlagen könnte als Anreiz für Betreiber angeboten werden, um die Investition in Kleinwindkraftanlagen zu fördern. (Liersch 2010)

### 3.5. Meteorologische Grundlagen

Für eine Potenzialabschätzung von Kleinwindkraftanlagen entlang der Verkehrsinfrastruktur wird der meteorologische Parameter der Windgeschwindigkeit betrachtet. Die Leistung einer Windkraftanlage und der daraus resultierende Energieertrag ist von der Windgeschwindigkeit  $v$  zur dritten Potenz ( $v^3$ ) abhängig. Das führt dazu, dass eine um 50 % reduzierte Windgeschwindigkeit unterhalb der Nenngeschwindigkeit zu einem Achtel der Nennleistung führt. Windkraftanlagenanbieter geben, wie zuvor erwähnt, häufig den potenziellen Jahresertrag der Anlagen bei einer bestimmten jährlichen durchschnittlichen Windgeschwindigkeit an. Da diese Abschätzung jedoch sehr grob ist, werden im Folgenden spezifische Berechnungen der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit Deutschlands und der Häufigkeitsverteilung von Windgeschwindigkeiten an potenziellen Standorten durchgeführt.

Zunächst wird die jährliche mittlere Windgeschwindigkeit in Deutschland betrachtet. Dafür werden die Reanalysedaten „COSMO-REA6“ des DWD herangezogen (Bollmeyer et al. 2015), für die in mehreren Studien eine hohe Qualität für Anwendungen im Bereich der Windenergie bestätigt wurde (Kaspar et al. 2020). Die deutschlandweiten Windgeschwindigkeitsdaten liegen in 10 m, 40 m und 60 m Höhe als monatliche und stündliche Mittelwerte der Jahre 1995 bis 2018 vor. Die Daten besitzen eine deutschlandweite Rasterauflösung von 6 km x 6 km.

In der Literatur wird häufig über die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit als erster Anhaltspunkt für einen gut oder schlecht geeigneten Standort für Windkraftanlagen gesprochen. Besonders bei Kleinwindkraftanlagen sind lokale Windschneisen, Hindernisse und Turbulenzen wichtig für die Standortanalyse und weitergehend für den Energieertrag. Die räumliche Auflösung der Daten kann diese individuellen Gegebenheiten in geringer Höhe nicht wiedergeben. Sie ermöglicht jedoch eine grobe deutschlandweite Abschätzung des potenziellen Energieertrags. Die notwendige durchschnittliche Windgeschwindigkeit für eine wirtschaftliche Installation einer Anlage wird in der Literatur mit 4–5 m/s angegeben. Die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe beträgt deutschlandweit fast flächendeckend weniger als 4 m/s (Abbildung 2-1, links). Lediglich die Küstenregionen und Inseln weisen höhere Durchschnittswerte auf. In 40 m Höhe ist ein Nord-Süd-Gradient der mittleren Windgeschwindigkeit erkennbar. So weht in Süddeutschland, ungefähr südlich der Main-Grenze (circa 50° n. Br.), weniger als 4 m/s mittlerer Wind, während nördlich davon mehr als 4 m/s mittlerer Wind vorliegen (Abbildung 2-1 Mitte). Auch in einer Höhe von 60 m, 10 m höher als einige Institutionen die Maximalhöhe von Anlagen angeben, ist dieser Gradient weiterhin erkennbar (Abbildung 2-1, rechts). Einige Regionen in Baden-Württemberg und Bayern haben auch in dieser Höhe eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit unter 4 m/s.



Durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeitsdifferenz zu 4m/s

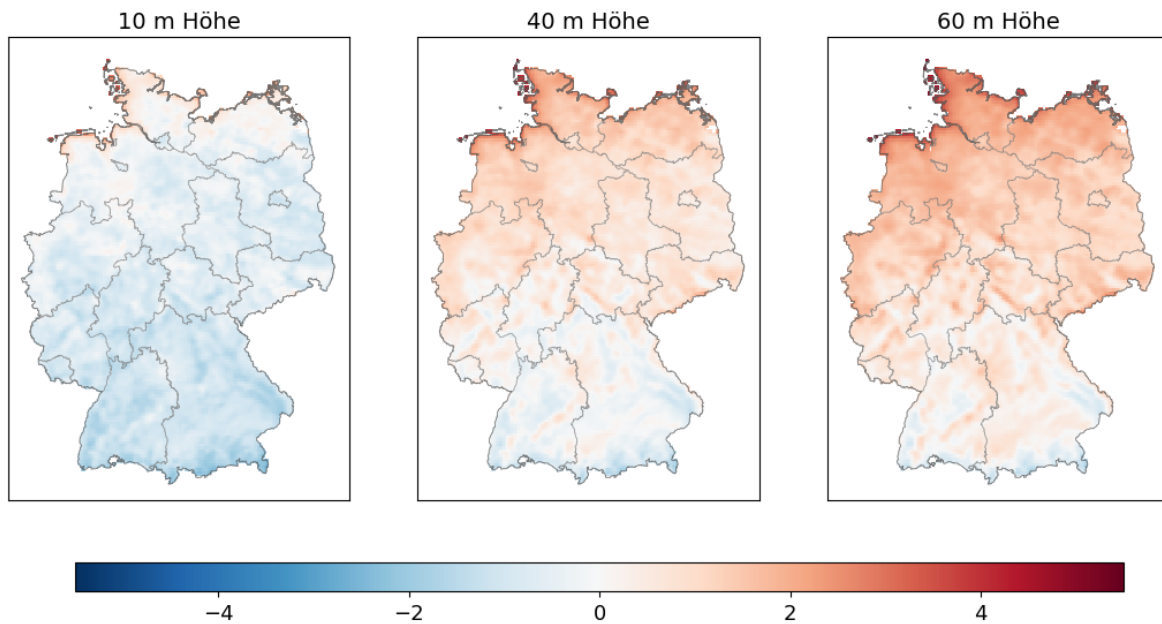


Abbildung 2-1 | Differenzenplot der deutschlandweiten mittleren Windgeschwindigkeit in 10 m (links), 40 m (Mitte) und 60 m (rechts) Höhe. Eine positive Abweichung zu den mindestens benötigten 4 m/s (rot) bedeutet eine höhere durchschnittliche Windgeschwindigkeit. Blaue Flächen zeigen eine niedrigere Windgeschwindigkeit als 4 m/s.

Neben der jährlichen mittleren Windgeschwindigkeit spielt die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten bei der Standortanalyse eine entscheidende Rolle. Die Frage, wie viele Stunden im Jahr welche Windgeschwindigkeit unterschritten, erreicht oder überschritten wird, ist für die Ertragsberechnung unabdingbar. Aus voriger Untersuchung ist der Nord-Süd-Gradient der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in Deutschland bekannt, was auch in der Häufigkeit der aufgetretenen monatlichen mittleren Windgeschwindigkeiten von 1995–2018 in Nord- und Süddeutschland sichtbar ist (siehe Abbildung 2-2).

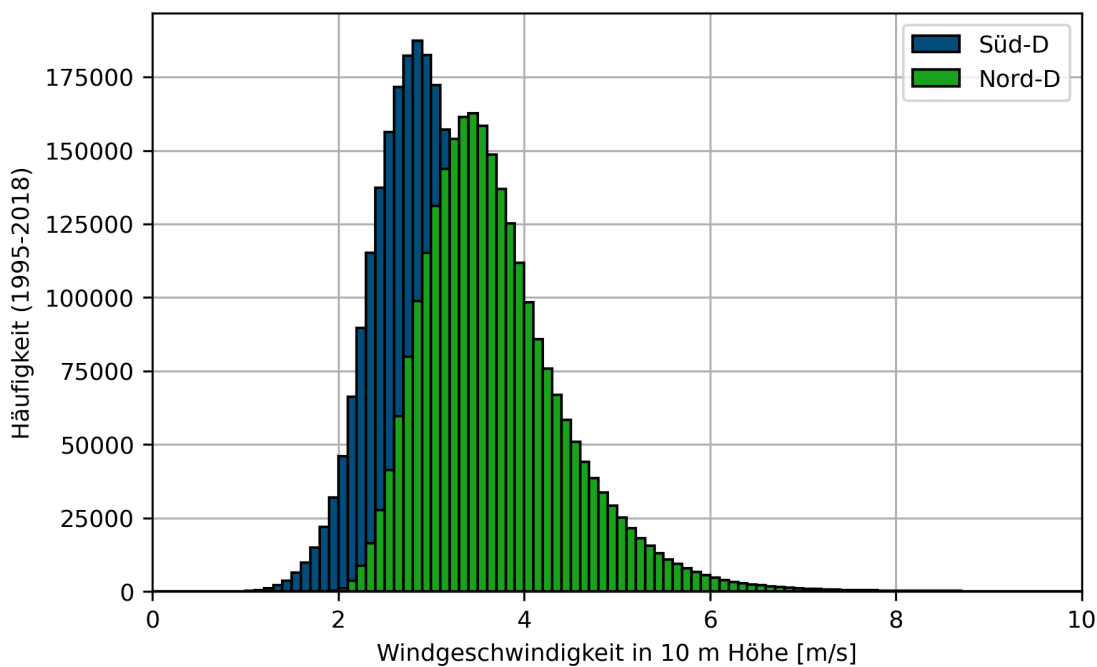


Abbildung 2-2 | Häufigkeitsverteilung der deutschlandweiten monatlichen mittleren 10 m-Windgeschwindigkeit von 1995 bis 2018 in Süddeutschland (blau) und Norddeutschland (grün) Höhe. Die Grenze zwischen Nord- und Süddeutschland wurde dafür bei 51,2° n. Br. gelegt.

Für exemplarische Leistungsabschätzungen wurden drei Kleinwindkraftanlagen aus Franken und Hallenga (2013) ausgewählt, die auf vielfältige Art den Markt der geeigneten Kleinwindkraftanlagen repräsentieren (siehe Tabelle 2-2). Dabei wurde besonderer Wert daraufgelegt, dass die Einschaltgeschwindigkeit der Turbinen kleiner oder gleich 2 m/s ist. Laut dem Bundesverband WindEnergie e.V. soll die Einschaltgeschwindigkeit der Kleinwindkraftanlage erfahrungsgemäß größer als die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit sein (Thüning et al. 2013). Des Weiteren wurden keine Kleinwindkraftanlagen mit einem geringeren Wirkungsgrad als 20 % ausgewählt, welcher analog zur Vorgehensweise von Drücke et al. (2021) berechnet wurde. Die Höhe sollte außerdem nicht zu hoch sein, um eine realistische Bebauung entlang der Verkehrsinfrastruktur nachahmen zu können. Daher beträgt die Nabenhöhe der gewählten Anlagen nicht mehr als 25 m. Bei einer der ausgewählten Anlagen handelt es sich zudem um eine vertikale Kleinwindkraftanlage (KWA 3). Es ist zu beachten, dass es sich bei den technischen Angaben in Tabelle 2-2 um Angaben der Kleinwindkraftanlagenproduzenten selbst handelt. In

der Realität kann es zu Abweichungen der angegebenen Werten und den tatsächlich erreichten Werten kommen (Thüring et al. 2013).

Tabelle 2-2 | Übersicht über drei für die Potenzialstudie ausgewählte Kleinwindkraftanlagen (Franken und Hallenga 2013).

Bezeichnung	KWA 1	KWA 2	KWA 3
Name	AV-7	CF20	Vata H5
Firma	Aventa AG	C&F Green Energy	Neuhäuser Windtec
Standort	Winterthur, Schweiz	Athenry, Irland	Lünen, Deutschland
Nennleistung	6,5 kW	20,0 kW	5,0 kW
Nenngeschwindigkeit	6,0 m/s	9,0 m/s	10,9 m/s
Narbenhöhe	18 m	20 m	10 m
Anlagentyp	Horizontal, 3-blättrig	Horizontal, 3-blättrig	Vertikal, 3-blättrig
Überstrichene Rotorfl.	129,00 m <sup>2</sup>	134,78 m <sup>2</sup>	17,20 m <sup>2</sup>
Wirkungsgrad	0,38	0,33	0,36
Einschaltgeschwindigkeit	2,0 m/s	1,5 m/s	0,5 m/s
∅ Jahresertrag bei 4 m/s	19.441 kWh/a	32.730 kWh/a	4270 kWh/a

Aus diesen Parametern kann für jede Kleinwindkraftanlage eine Kennlinie nach Drücke et al. (2021) berechnet werden. Mit den berechneten Kennlinien der ausgewählten Windkraftanlagen lässt sich der potenzielle Jahresertrag einer Anlage an einem Standort berechnen. Dafür wird die Windgeschwindigkeit in Narbenhöhe am potenziellen Standort nach Tennekes (1973) aus den 10 m-Winddaten berechnet. Abbildung 1-3 zeigt anschaulich die Kennlinien der drei Kleinwindkraftanlagen. Dabei ist jedoch zu

beachten, dass aus Darstellungsgründen hier die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und nicht in der jeweiligen Narbenhöhe zu sehen ist.

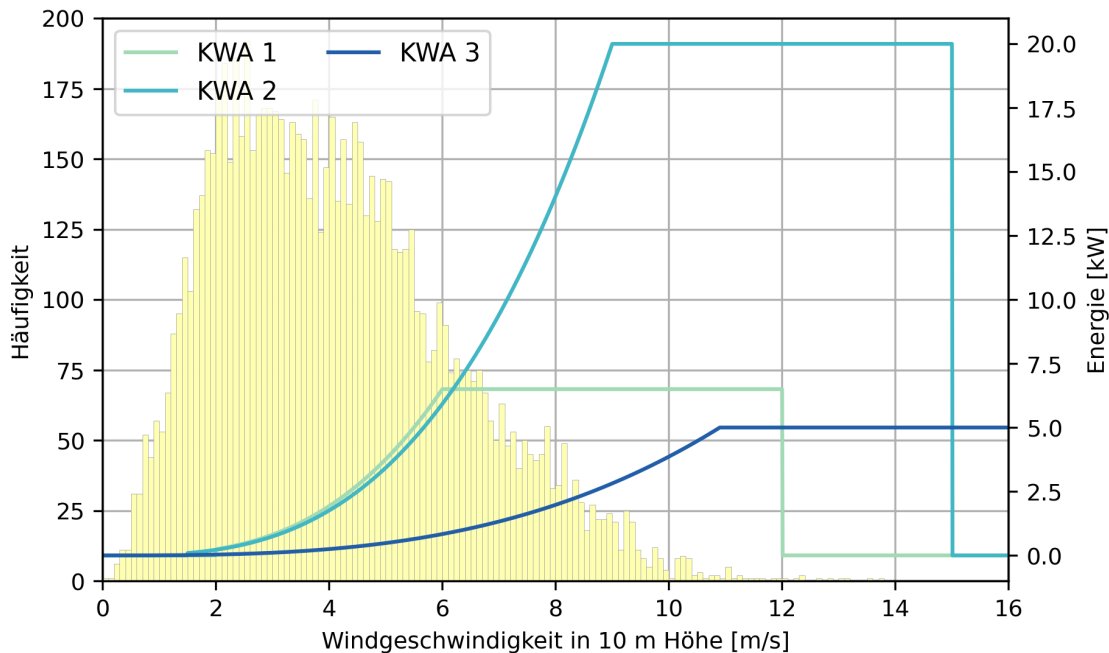


Abbildung 1-3 | Histogramm der stündlichen Windgeschwindigkeiten 2015 am fiktiven Standort Kiel (gelb) mit den Leistungskennlinie der Beispielanlagen: KWA 1 (hellgrün), KWA 2 (türkis), KWA 3 (blau).

Aufgrund des Nord-Süd Gradienten der Windgeschwindigkeit in Deutschland wird ein potenzieller fiktiver Standort in Nord-, Mittel-, und Süddeutschland ausgewählt. Eine Übersicht der drei ausgewählten Standorte und deren Koordinaten ist in Tabelle 2-3 gegeben.

Tabelle 2-3 | Übersicht der gewählten fiktiven potenzielle Standorte.

Name	Kiel, Autobahnkreuz West	Leipzig, Autobahnkreuz Ost	München, Autobahnkreuz Nord
n. Br. [°]	54,31	51,35	48,22
w. Läng. [°]	10,06	12,50	11,63
	Norddeutschland	Mitteldeutschland	Süddeutschland

Die Winddaten werden für die Ertragsberechnung nicht gemittelt, da Extremwerte durch das Mittel nicht ausreichend berücksichtigt werden. Daher werden zwei Jahre gewählt, für welche jeweils eine Ertragsberechnung durchgeführt wird. Als repräsentative Jahre wurden die Jahre 2015 und 2016 ausgewählt. Die Energieproduktion beider Jahre war ein präsent Thema der Nachrichten, da das wind-schwache Jahr 2016 auf ein windstarkes Jahr 2015 folgte. Es ist dabei allerdings zu beachten, dass es sich bei der Auswahl nicht um ein jeweils absolut windstärkstes oder windschwächstes Jahr handelte

(siehe auch Abbildung 1 in Bär und Kaspar (2022)). Die deutschlandweite Durchschnittsgeschwindigkeit lag 2016 im 10 %-Perzentil und 2015 im 80 %-Perzentil der Jahre 1950–2021 (Datengrundlage ERA5-Daten (Bell et al. 2021)).

Für jeden der fiktiven Standorte kann nun ein potenzieller jährlicher Energieertrag der drei ausgewählten Kleinwindkraftanlagen berechnet werden. Dabei wird sowohl der Ertrag des windstarken und des windschwachen Jahrs berechnet. Hierzu wird die Häufigkeit der aufgetretenen stündlichen Windgeschwindigkeiten mit der Leistungskennlinie der Kleinwindkraftanlage verrechnet (siehe Abbildung 1-3).

Nachfolgend sind in Tabelle 2-4 die potenziellen Jahreserträge in MWh an den Standorten anhand der Winddaten der Jahre 2015 (windstark, 80 %-Perzentil) bzw. 2016 (windschwach, 10 %-Perzentil) Jahr aufgetragen.

Tabelle 2-4 | Potenzielle Jahreserträge in MWh der ausgewählten Kleinwindkraftanlagen an den unterschiedlichen Standorten.

Jahresertrag [MWh]	Kiel		Leipzig		München	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Jahr	2015	2016	2015	2016	2015	2016
KWA 1	27,24	23,88	19,63	17,43	12,38	12,05
KWA 2	42,80	33,61	26,40	22,33	17,86	15,49
KWA 3	4,44	3,42	2,62	2,16	2,02	1,54

Die potenziellen Jahreserträge in Tabelle 2-4 verdeutlichen unter anderem die hohe Standortabhängigkeit der Kleinwindkraftanlagen. Auch die Diskrepanz zwischen einem windschwachen und einem windstarken Jahr, zeichnet sich als standort- und anlagenabhängig ab. Die potenziellen Jahreserträge reichen von 1,5 MWh der KWA 3 am Standort München bis etwa 43 MWh der KWA 2 am Standort Kiel.

Die jährliche CO<sub>2</sub>-Einsparung einer Kleinwindkraftanlage berechnet sich mit 754,35 g/kWh (Lauf et al. 2021). Der Betrieb der KWA 2 in einem windstarken Jahr am fiktiven Standort am Autobahnkreuz Kiel würde damit beispielsweise zu einer CO<sub>2</sub>-Einsparung von 32.286 kg führen. Die vertikale Kleinwindkraftanlage KWA 3 am fiktiven Standort München bringt bei dieser Studie hingegen in einem windschwachen Jahr eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von etwa 1162 kg.

### 3.6. Fazit

Kleinwindkraftanlagen bieten durch eigene Stromerzeugung Unabhängigkeit für zahlreiche Anwendungsfälle im urbanen Raum und auf dem Land für nahe gelegene Stromabnehmer. Wichtigste Grundlage ist die Bestimmung der örtlichen Windverhältnisse, um eine realistische Ertragsanalyse und Wirtschaftlichkeitsabschätzung durchzuführen.

Die Ertragsanalyse an drei fiktiven Standorten für ein windstarkes und ein windschwaches Jahr, zeigen Potenzial für den Einsatz von Kleinwindkraftanlagen unterschiedlicher Bauarten. Eine ausgewählte Anlage am Standort Kiel könnte in einem windstarken Jahr (85 %-Perzentil) etwa 43 MWh Energie erzeugen. Dies entspricht etwa beispielsweise dem Strombedarf von 13 Zweipersonenhaushalten (Statistisches Bundesamt 2021).

Eine ausführliche Analyse des Ertragspotenzials an der Verkehrsinfrastruktur kann sinnvoll werden, sofern standortgerechter Bedarf und Vor-Ort-Nutzung nachgewiesen werden können. Straßenmeistereien entlang der Verkehrswege und Gebäude des Verkehrsträgers Schiene könnten mögliche Standorte für Kleinwindkraftanlagen bieten. Die Realisierbarkeit an Verkehrsseitenflächen müsste am Verkehrsträger Schiene von Standort zu Standort neu eingeschätzt werden und als Einzelfallentscheidung getroffen werden. Entlang der Bundesfernstraßen bestehen die Hürden der Anbauverbots-, und Beschränkungszone. Abstandsgerechte Bauten könnten auch hier als Einzelfallentscheidung geprüft werden. Nach Austausch mit Vertretern der Wasserstraße wäre eine Analyse zur Nutzung von Kleinwindkraftanlagen an Schleusenanlagen sinnvoll. Diese könnten durch die Wasserstraßen als Windschneisen, die baulichen Gegebenheiten und den erhöhten Strombedarf ein Potenzial zur Windkraftnutzung darstellen.

Dennoch ist es wichtig, die genehmigungsrechtlichen und wirtschaftlichen Hürden für den flächendeckenden Einsatz von Kleinwindkraftanlagen zu berücksichtigen. Es besteht an viele Stellen keine Spezifizierung für die Installation von Kleinwindkraftanlagen. Sie werden rechtlich wie Großwindkraftanlagen betrachtet. Dieser Zustand schafft wenig Anreize für potenzielle Anwender.

Für eine nachhaltige und klimaneutrale Ausrichtung der Verkehrsinfrastruktur ist es nach Expertenmeinung des Themenfeldes 5 sinnvoll, die Potenzialanalyse von Kleinwindkraftanlagen an der Verkehrsinfrastruktur durchzuführen und evtl. auch auf größere Windkraftanlagen auszudehnen. Die Windkraftanlagen können im Zusammenspiel mit Photovoltaikanlagen eine Lösung für ein standortspezifisches kontinuierlicheres Energieangebot bieten. In Deutschland ergänzen sich Sonnenenergie und Windkraft im Jahresverlauf gut, wie beispielsweise in Abbildung 5 in Bär und Kaspar (2022) und Abbildung 4 in Kaspar et al. (2019) illustriert ist.

---

Stand: 04. Juli 2022

Zitiervorschlag:

Bär, F., Rieck, D., Kaspar, F., Auerbach, M., Streek, P: Potenzialabschätzung für Geothermie und Kleinwindkraftanlagen entlang der Verkehrswege Schiene und Straße. BMDV-Expertennetzwerk, 2022.

Nutzungsbedingungen:

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz:



Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. dieser Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden. Mit der Verwendung dieses Dokumentes erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Danksagung:

Die Arbeiten des BMDV-Expertennetzwerks „Wissen – Können – Handeln“ wurden durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert.



---

## Literaturverzeichnis

- Alpha 311 Limited. (2022). *What is the Alpha 311 turbine?* Retrieved Juni 14, 2022, from <https://alpha-311.com/#how-it-works>
- Bär, F., & Kaspar, F. (2022). *Meteorologischer Jahresrückblick energierelevanter Wetterelemente für das Jahr 2021*. Deutscher Wetterdienst / BMDV- Expertennetzwerk.
- Bär, F., Kaspar, F., Streek, P., Gersdorf, F., Auerbach, M., & Rieck, D. (2022). *Abschätzung des potenziellen jährlichen Energieertrags von PV-Anlagen an Lärmschutzeinrichtungen der Verkehrswege*. BMDV-Expertennetzwerk.
- Barbier, E. (2002). Barbier, Enrico. "Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6.1-2, pp. 3-65.
- Bell, B., Hersbach, H., Simmons, A., Berrisford, P., Dahlgren, P., Horányi, A., . . . Thépaut, J.-N. (2021). The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 147(741), 4186-4227.
- Bollmeyer, C., Keller, J., Ohlwein, C., Wahl, S., Crewell, S., Friederichs, P., . . . Pscheidt, I. (2015). Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. (W. O. Library, Ed.) *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, pp. 1-15.
- Bundesverband Geothermie. (2020). *Lexikon der Geothermie*. Retrieved April 28, 2022, from <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie.html>
- Bundesverband Kleinwindanlagen. (n.d.). Retrieved März 18, 2022, from Definition von Kleinwindanlagen: <https://bundesverband-kleinwindanlagen.de/definition-kleinwindanlagen/>
- Bundesverband Kleinwindanlagen. (2021). Retrieved März 18, 2022, from Definition von Kleinwindanlagen: <https://bundesverband-kleinwindanlagen.de/definition-kleinwindanlagen/>
- Bund-Länder-Initiative Windenergie. (2012). *Handreichung zu Windenergieanlagen an Infrastrukturtrassen*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Retrieved April 8, 2022, from [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Hintergrundinformationen/handreichung-windenergieanlagen-infrastrukturtrassen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Hintergrundinformationen/handreichung-windenergieanlagen-infrastrukturtrassen.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- Deutsche Bahn AG. (2022). *Wärme aus der Erde*. Retrieved April 28, 2022, from <https://gruen.deutschebahn.com/de/massnahmen/geothermie>
- Drücke, J., Borsche, M., James, P., Kaspar, F., Pfeifroth, U., Ahrens, B., & Trentmann, J. (2021). Climatological analysis of solar and wind energy in Germany using the Grosswetterlagen classification. (Elsevier, Ed.) *Renewable Energy*, 164, pp. 1254-1266.
- Eilers, M., Friedrich, H., Quaas, B., & Rogalski, E. (2020). *Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn*. Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG.

- EnergyPier AG,. (2021). Retrieved Juni 14, 2022, from Swiss EnergyPier: <https://energypier.ch>
- Fachagentur Windenergie an Land. (2022). *Abstandsempfehlungen und Vorgaben zur Ausweisung von Windenergiegebieten in den Bundesländern*. Retrieved Mai 19, 2022, from [https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/PlanungGenehmigung/FA\\_Wind\\_Abstandsempfehlungen\\_Laender.pdf](https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/PlanungGenehmigung/FA_Wind_Abstandsempfehlungen_Laender.pdf)
- Feldmann, M., Döring, B., Hellberg, J., Kuhnhenne, M., & Pak, D. (2011). *Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch Nutzung der Geothermie*. Bremerhaven: Verlag für die neue Wissenschaft GmbH.
- Francis, S., Umesh, V., & Shivakumar, S. (2021). Design and Analysis of Vortex Bladeless Wind Turbine. *Materials Today: Proceedings*, 47, 5584-5588.
- Franken, M., & Hallenga, U. (2013). *Kleinwindanlagen : Handbuch der Technik. Genehmigung und Wirtschaftlichkeit kleiner Windräder*. Berlin.
- Fraunhofer ISE. (2021). *Levelized Cost Of Electricity Renewable Energy Technology*.
- geoKOAX. (2015). *Geothermische Weichenheizung in Farchant am Fuße der Zugspitze* .
- Jüttemann, P. (2020). *Kleinwind-Marktreport*.
- Kaspar, F., Borsche, M., Pfeifroth, U., Trentmann, U., Drücke, J., & Becker, P. (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, pp. 119-128. doi:10.5194/asr-16-119-2019
- Kaspar, F., Niermann, D., Borsche, M., Fiedler, S., Keller, J., Potthast, R., . . . Tinz, B. (2020). Regional atmospheric reanalysis activities at Deutscher Wetterdienst: review of evaluation results and application examples with a focus on renewable energy. (C. GmbH, Ed.) *Advances in Science and Research*, 17, pp. 115-128.
- Lauf, T., Memmler, M., & Schneider, S. (2021). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2020*. Umweltbundesamt. Retrieved Februar 2, 2022, from <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2020>
- Liersch, J. (2010). *Wirtschaftlichkeit und Vergütung von Kleinwindenergieanlagen*. Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.
- Link, D. (2021). *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz (Ausgabe 2020)*. Bern.
- Oeser, M., Carreño, N., Renken, L., & Kemper, D. (2019). *Temperierte Straße - Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST*. Bergisch Gladbach: Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG.

- 
- Orrell, A., Forster, N., Homer, J., & Morris, S. (2018). *Distributed Wind Market Report*. U.S. Department of Energy.
- Schulz, R., Suchi, E., Öhlschläger, D., Dittmann, J., Knopf, S., & Müller, C. (2013). *Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CCS und Tiefer Geothermie*. Hannover. Schweizerische Vereinigung für Geothermie. (2009). *Exkursionsführer Geothermie*. Zürich.
- Statistisches Bundesamt. (2021, Juli 15). *Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen*. Retrieved Mai 2022, 31, from <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html>
- Tennekes, H. (1973). The logarithmic wind profile. *Journal of Atmospheric sciences*, 30(2), 234-238.
- Thüring, H., Franken, M., Trechow, U., Hallenga, U., Jensen, D., Jüttemann, P., . . . Thomas, T. (2013). *Kleinwindanlagen Handbuch der Technik, Genehmigung und Wirtschaftlichkeit kleiner Windräder*. Bundesverband WindEnergie e.V.
- Triples-Systems. (2020). *Übersicht der Projekte*. Retrieved April 28, 2022, from <https://www.triples-systeme.com/projekte/>
- Twele, J., Burkam, S., Schömann, O., & Witt, C. (2011). *Qualitätssicherung im Sektor der Kleinwindenergieanlagen*. Bundesverband WindEnergie e.V.
- Uwe, T., Ruckdeschel, M., & Burkel, A. (2012). *Konzeptstudie Straßentemperierung Wunsiedler Straße, Stadt Marktredwitz*. Nürnberg.