

KI-basiertes Geoinformationssystem

Unterstützung für die Bewertung von Windenergieflächen

Für die Erreichung der Klimaziele ist der Ausbau von Windenergie und deswegen auch die Ausweisung von geeigneten Flächen von zentraler Bedeutung. Ziel des Projekts WindGISKI ist es, eine effiziente und unterstützende Flächenidentifikation von Potenzialflächen für Windenergieprojekte automatisiert zu ermöglichen. Dafür wird ein Geoinformationssystem (GIS) entwickelt, das mithilfe von künstlicher Intelligenz (KI) Flächen bewertet und somit die Erfolgsaussichten eines Windenergieprojekts systematisch vorhersagt.

Obwohl sich die Bundesregierung den massiven Ausbau der Windenergie auf die Fahne geschrieben hat, gerät die Umsetzung ins Stocken. Hauptgründe für die mangelnde Investitionsbereitschaft von Unternehmen aus der Branche sind oft langsame Genehmigungsverfahren, aber auch gestiegene Investitionskosten, Konflikte im Natur- und Artenschutz sowie fehlende Akzeptanz der Windenergieanlagen vor Ort [3, 4]. Für die Erreichung der Klimaziele besteht die Notwendigkeit, neue Windenergieflächen zu identifizieren. Hierbei steht die Erschließung möglichst konfliktarmer und kosteneffizienter Standorte im Vordergrund.

Ziel des interdisziplinären Projekts WindGISKI ist es, Informationen für potenzielle Windenergieflächen zentral in einem Geoinformationssystem (GIS) darzustellen. Hierzu wird die Flächengüte ermittelt, die Aussagen sowohl über die Eignung für einen Ausbau der Windenergie als auch über potenzielle Konflikte gibt. Durch die Zusammenarbeit eines interdisziplinären Teams ist es möglich, die Themen Technik, Umwelt und Artenschutz, soziale Aspekte und künstliche Intelligenz zu vereinen.

Projekt WindGISKI: Unterstützung zur Flächenausweisung mit künstlicher Intelligenz

Vor diesem Hintergrund setzt das Projekt WindGISKI die Forschungsfrage: »Welche potenzielle Windenergiefläche benötigt welche Informationen?« an, um zum Beispiel eine Realisierung mit einer hohen Umsetzungswahrscheinlichkeit oder -geschwindigkeit zu erreichen. Hieraus wird die Arbeitshypothese für das Projekt abgeleitet, dass durch die Entwicklung eines KI-basierten Geoinformationssystems, das in der Lage ist,

die Erfolgsaussichten eines Windenergieprojekts systematisch vorherzusagen, das Flächenpotenzial umfangreicher und effizienter als bisher erhoben werden kann.

Das Projekt WindGISKI zielt darauf ab, ein Geoinformationssystem (GIS) zu entwickeln, das, basierend auf künstlicher Intelligenz, mit allen notwendigen Informationen (Merkmalen) für eine Identifizierung möglichst konfliktarmer oder sogar begünstigter und geeigneter Flächen für die Windenergie ausgestattet wird. Die Grundlage für das Erheben großer Datenmengen und einer Ableitung von Flächenempfehlungen bilden Flächeninformationen, die auf einer, im Rahmen des Projekts zu ermittelnden Kenntnis von einflussnehmenden Merkmalen auf die Flächengüte, basieren. Durch den interdisziplinären Ansatz werden Einflussgrößen beziehungsweise Merkmale verschiedener Fachdisziplinen erfasst und deren Bedeutung auf die jeweilige Fläche bewertet (Scoring).

Ermittlung von Merkmalen aus der Literatur und semistrukturierten Interviews

Merkmale werden durch die Eigenschaften von Flächen für Windenergieanlagen definiert, die möglicherweise einen positiven oder negativen Einfluss auf die Güte einer Fläche für Windenergieanlagen haben. Die Ergebnisse aus den semistrukturierten Interviews sind deskriptiv sowie interpretativ, geben detaillierte Einblicke in das Forschungsthema und lassen richtungsweisende Schlussfolgerungen zu. Im Rahmen der semistrukturierten Interviews sowie der Literaturrecherche wurden die ermittelten Merkmale gesammelt, charakterisiert und in einer Liste, geordnet nach zehn Merkmalskategorien, zusammengefügt

(Tabelle 1). Diese wurden eingehend auf Datenverfügbarkeit in Kombination mit dem jeweiligen Detaillierungsgrad bewertet und somit nach der Eignung zum Anlernen der KI kategorisiert.

Nach der Einteilung in die Merkmalskategorien wurden die Merkmale jeweils hinsichtlich ihrer Datenverfügbarkeit und -qualität bewertet. Diese Einteilung dient einer vorläufigen Abschätzbarkeit der Verwertbarkeit der Merkmale im Rahmen der KI. Für Merkmale, die als »quantitativ« eingestuft werden, liegt eine Datengrundlage in Form von Zahlen oder Geodaten vor, die prinzipiell für eine KI-Anwendung geeignet sein können. Bei »qualitativen« Daten ist eine Verwertung in der KI im Rahmen dieses Projekts nicht möglich. Diese fließen als Handlungsempfehlungen in das Projekt ein.

Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Online-Interviews

Zur Vorbereitung eines expertenbasierten Flächenscorings wurden Online-Interviews mit Expertengruppen zur Gewichtung der ermittelten Merkmale und Zielgrößen beziehungsweise zur Bewertung ihrer Bedeutsamkeit für die Flächengüte, über die Gesetzeslage hinaus, durchgeführt. Hierbei steht die Erschließung möglichst geeigneter, konfliktarmer Standorte im Vordergrund. Dies lässt sich nicht allein aus dem gegenwärtigen Rechtsrahmen ableiten, da dieser, vor allem aus politischen Beweggründen heraus, verändert werden kann.

Im Online-Interview wurden zunächst die übergeordneten Merkmalskategorien von den Teilnehmern hinsichtlich ihrer Relevanz sortiert, in einer Skala von 1 (geringste Relevanz) bis 10 (höchste Relevanz).

Ermittelte Merkmale	
Merkmalskategorie	ermittelte Merkmale
Siedlungsstruktur	Wohngebäude im Innenbereich/Außenbereich; sonstige Gebäude (z.B. Kirche); Wochenend-/Ferienhäuser; Campingplätze; Ressourcenabbaugebiete (z.B. Torfabbau, Flächenvorbehalte); Halden, Kleingärten; Kur-/Klinikgebiete; militärisch genutzte Flächen; Sport-/Freizeit-/Erholungsflächen; Friedhöfe; denkmalgeschützte Gebäude; Sondergebiete (z.B. inaktive Ölabbaufelder)
Luftverkehr	Flughafen und Flugplatzgelände; zivile Flugplätze (Verkehrsflughäfen und Sonderlandeplätze); Platzrunden um Segelfluggelände; zivile DVOR; zivile VOR; zivile Anlagenschutzbereiche sonstiger Flugsicherungsanlagen DFS; zivile Bauhöhenbeschränkung aus zivilen MVA-Gebieten; militärische Nachttieffluggebiete; Luftverteidigungsradare; Anlagenschutzbereiche sonstiger Flugsicherungsanlagen des Militärs, Bauhöhenbeschränkung aus militärischen MVA-Gebieten, militärisch genutzte Fliegerhorste
Infrastruktur	Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen, Kreisstraßen, Schienenwege, Freileitungen, seismologische Stationen, Wetterradare DWD, Windprofiler DWD, elektrische Anschlussfähigkeit (Netzanschluss); Zuwegung; energieintensive Standorte/Energy Hubs (Infrastrukturelle Ausstattung)
Natur- und Landschaftsschutz	Naturschutzgebiete; NATURA2000; FFH Gebiete (NATURA2000); SPA Gebiete (Vogelschutzgebiete, NATURA2000); Biosphärenreservate (Entwicklungszone); Biotopverbund; IBA Gebiete; RAMSAR-Feuchtgebiete mit internationaler Bedeutung; Nationalparke und nationale Naturmonumente; Naturdenkmale; Landschaftsschutzgebiete; Naturparks, Wald, Waldschutzgebiete, gesetzlich geschützte Biotop
Artenschutz	Vorkommen kollisionsgefährdeter Arten (Brutvögel/Fledermäuse); Vorkommen störungsempfindlicher Arten (Brutvögel/Rastvögel); Tötungs- und Verletzungsverbot während der Bauphase (Vögel/Fledermäuse/ sonstige Arten); vom Bau betroffene Fortpflanzungs- oder Ruhestätten
Gewässerschutz	Stehende Gewässer >1 ha; Trinkwasser-/Heilquellenschutzgebiete (Zone I: Schutz vor jeglicher Verunreinigung); Trinkwasser-/Heilquellenschutzgebiete (Zone II: Schutz vor Verunreinigungen mit pathogenen Mikroorganismen); Trinkwasser-/Heilquellenschutzgebiete (Zone III: Schutz vor nicht oder schwer abbaubaren chemischen oder radioaktiven Verunreinigungen); Überschwemmungsgebiete; Gewässer 1. Ordnung (inkl. Bundeswasserstraßen)
Immissionsschutz	Lärm; Schattenwurf; Vorbelastung Schall; Infraschall; Schallimmission im Bereich des Hörschalls; Schallimmission im Bereich des Infraschalls
Technische/ Naturbedingte Aspekte	Nähe zu bestehenden Windparks/Nachluffeffekte; Topografie (Fläche besonders starker Neigung >30 %); Windgeschwindigkeit/Windpotenzial; Größe der Anlage und Rotordurchmesser; Geologie/ Bodenbeschaffenheit (z.B. Böden mit geringer Tragfähigkeit)
Regionale (wirtschaftliche) Rahmenbedingungen	Gewerbesteuer; tendenziell niedriger Hebesatz zur Gewerbesteuer; tendenziell hoher Hebesatz zur Gewerbesteuer; tendenziell hoher kumulierter Gesamtbestand von Windenergieanlagen; tendenziell niedriger kumulierter Gesamtbestand von Windenergieanlagen; Anlagenkonfiguration; tendenziell niedrige Zuschläge in den Ausschreibungen; tendenziell hohe Zuschläge in den Ausschreibungen; Niedrige Anzahl der Eigentümer pro Potenzialfläche; große Anzahl der Eigentümer je Potenzialfläche
Soziologische Faktoren	Touristengeprägte Region (ländlich); aktive Bürgerinitiativen für Windenergie; aktive Bürgerinitiativen gegen Windenergie; regionale Verankerung/Bekanntheitsgrad der Projektentwickler; Nachbarschaftsschutz (optisch bedrängende Wirkung auf Anwohner); industriegeprägte Region; Einwohnerdichte (Einzelsiedlung); Einwohnerdichte (größere Siedlungen, geschlossene Ortschaften); Region mit tendenziell höherem Durchschnittsalter; Region mit tendenziell niedrigerem Durchschnittsalter; Eigentumsverhältnis der Fläche: privat; Eigentumsverhältnis der Fläche: öffentlich; bestehende Konkurrenz zur Flächennutzung (hohe Pachtpreise); Tendenziell niedrigeres Durchschnittseinkommen der Anwohner; regionale Einstellung zu EE allgemein (positiv); regionale Einstellung zu EE allgemein (negativ); Erfahrungsgrad der Region mit Windenergie; Vertrauen in die Genehmigungsbehörden und Planer der Region; Verbundenheit zur Region und Sozialkapital (Place Attachment)

Tabelle 1. Ermittelte Merkmale und Einteilung in Merkmalskategorien aus den semistrukturierten Interviews

Die Ergebnisse sind in Bild 1 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Merkmalskategorie »Siedlungsstrukturen« mit der höchsten Relevanz eingestuft wird, gefolgt vom »Artenschutz« und »Natur-/Landschaftsschutz«. Die geringste Relevanz wird, in der betrachteten Gegenüberstellung, den soziologischen Faktoren zugesprochen.

Einhergehend mit den Aussagen der befragten Experten aus den semistrukturierten Interviews lassen sich die hohen Bedeutungen der Merkmalskategorien »Siedlungsstruktur« und »Artenschutz« sowie »Natur-/Landschaftsschutz« durch die verhältnismäßig hohe Anzahl an Klagen aus der Bevölkerung erklären. Die Merkmalskategorie »Soziologische

Faktoren« spielt, obwohl dieser die geringste Relevanz zugesprochen wurde, trotzdem eine nennenswerte Rolle, da sie im Rahmen der semistrukturierten Interviews per se als bedeutend benannt wurde. Dennoch wurden die »Soziologischen Faktoren«, einhergehend mit der entsprechenden Einstufung in der Online-Umfrage, nicht an erster Stelle ge-

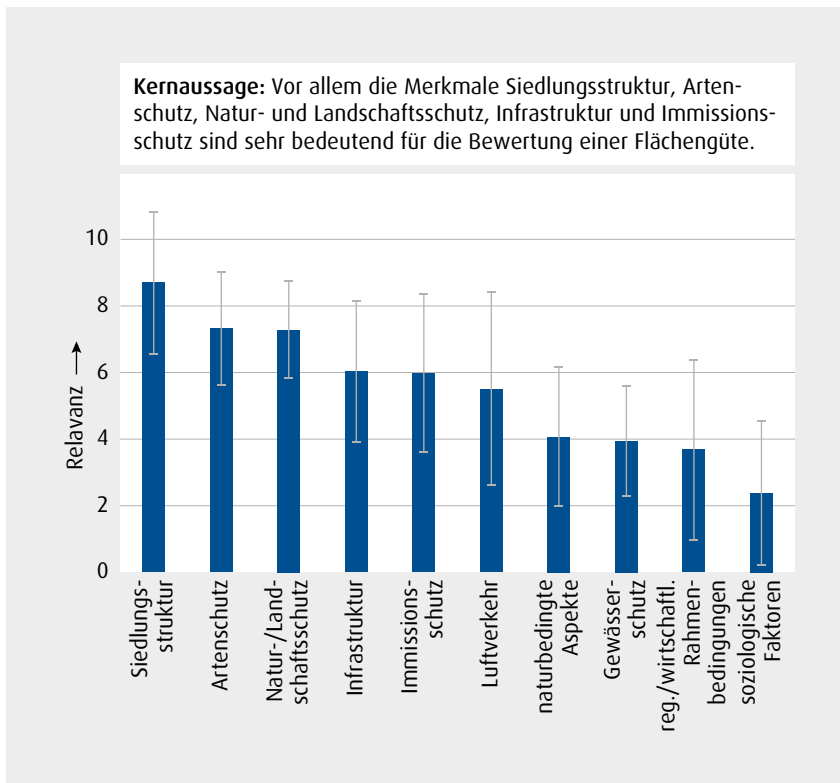


Bild 1. Umfrageergebnisse zur Relevanz von Merkmalskategorien auf einer Skala von 1 (geringste Relevanz) bis 10 (höchste Relevanz); n = 66 Teilnehmende
Hinweis: Die blauen Säulen entsprechen den absoluten Werten, die schwarzen senkrechten Klammern am Kopf einer Säule stellen die Standardabweichungen dar.

nannt. Die Experten legen bei der Planung und Umsetzung von Windenergieprojekten ihr Hauptaugenmerk in erster Linie auf finanzielle und technische Aspekte, während soziologische Faktoren eher zweitrangig, aber dennoch mit Nachdruck, genannt werden.

Es wird ersichtlich, dass im Rahmen der Merkmale zur Kategorie Siedlungsstrukturen (Bild 2), auch über den gesetzlichen Rahmen hinaus, vor allem Wohngebäude im Innen- sowie Außenbereich, Infrastrukturen zu Freizeit und Erholung sowie militärische Flächen negativ für die Chancen zur entsprechenden Flächenausweisung behaftet sind. Wie erwähnt, kann die Umsetzung von Windenergieanlagen in der Nähe militärischer Flächen durch Geheimhaltungen, die in speziellen Situationen greifen, gestört oder verzögert werden. Was die Merkmale zu Wohngebieten und Infrastrukturen für Freizeit und Erholung angeht, so geben Experten an, dass in diesen Bereichen oft geklagt wird, obwohl hier bereits viele gesetzliche Regelungen existieren.

Dagegen stellen Halden und Industrie-/Gewerbegebiete oft sogar begünstigte Gebiete zur Ansiedlung von Windenergie

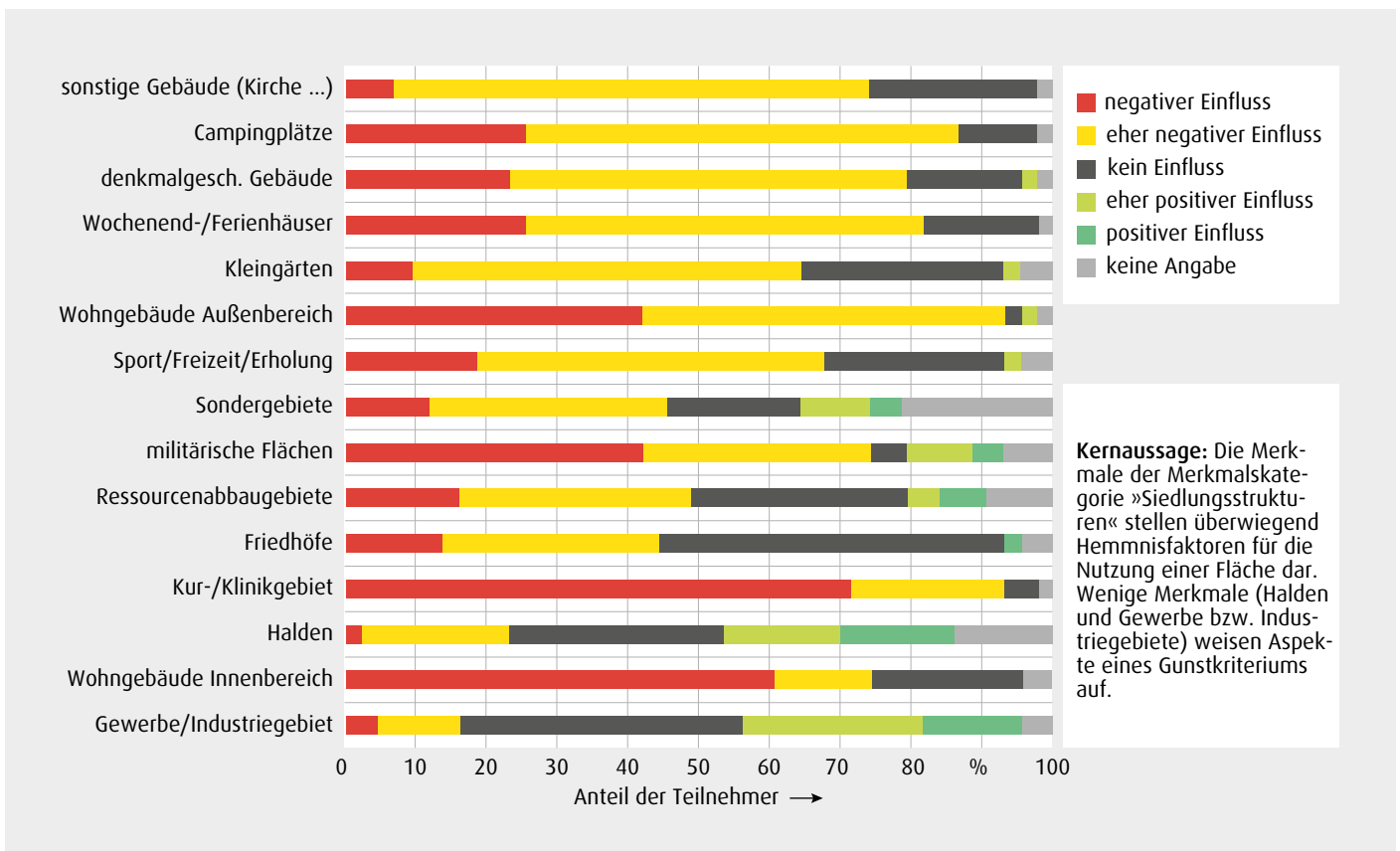


Bild 2. Umfrageergebnisse zu einzelnen Merkmalen der Merkmalskategorie »Siedlungsstruktur«, n = 66 Teilnehmende

gieanlagen dar. Es wird angegeben, dass Windenergieanlagen in solchen Gebieten in vielen Fällen besser in die Landschaft/Umgebung integriert werden können, da Besiedelungen weniger dicht und/oder in größeren Entfernungen vorliegen. Des Weiteren verfügen diese Gebiete in der Regel über vorhandene Infrastruktur (Zuwegene, Stromleitungen etc.), die den Bau von Windenergieanlagen erleichtern.

Die im Rahmen der expertenbasierten Online-Umfrage ermittelten Merkmale sind insgesamt richtungweisend sowohl für das Training der KI als auch für die Aufstellung von Handlungsempfehlungen, die zum Projektende formuliert werden.

Methodik zum Prozess des Lernens der KI zur Bewertung von Windenergieflächen

Die Fläche von Deutschland wird für die Entwicklung eines KI-Modells in 50 m x 50 m Kacheln aufgeteilt. Das Modell erhält als Eingabe eine Liste aus Merkmalsausprägungen, die genau eine dieser Kacheln beschreibt. Einträge in so einer Liste sind beispielsweise der Abstand zum nächsten Wohngebäude (Bild 3), ob die Kachel Teil eines Naturschutzgebietes ist oder nicht beziehungsweise ob in dem Gebiet, das durch die Kachel abgedeckt wird, Rotmilane vorkommen. Die KI lernt aus solchen Listen von Merkmalsausprägungen die Güte von Kacheln vorherzusagen.

Damit die KI trainiert werden kann, ist es nötig, positive Beispiele, also Kacheln, die für Windenergieanlagen geeignet sind, und negative Beispiele, also ungeeignete Kacheln zu kennen. Als positive Beispiele wurden die Kacheln verwendet, die zu bestehenden Windparks gehören. Dafür wurden eng zusammenstehende Windenergieanlagen zu Windparks zusammengefasst. Um zu vermeiden, dass Windparks, die unter veralteten gesetzlichen Rahmenbedingungen gebaut wurden beziehungsweise die nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik und Wirtschaftlichkeit entsprechen, zum Training verwendet werden, wurde der Bestand an Windenergieanlagen in Deutschland zunächst gefiltert, bevor daraus Windparks bestimmt wurden. Anlagen, die vor dem 1. Januar 2010 in Betrieb genommen wurden, und Anlagen, die kleiner als 150 m Gesamthöhe sind, wurden ignoriert.

Das Ableiten der negativen Beispiele erforderte allerdings einen größeren Aufwand, da Kacheln, die nicht Teil eines Windparks sind, nicht automatisch ungeeignet sind. In der Tat ist, wie bereits erwähnt, die Prämisse von WindGISKI, dass noch viele für Windenergieanlagen geeignete, aber noch unbebaute Kacheln existieren. Diese sollte die KI identifizieren. Basierend auf dem vorgestellten Online-Survey wurde ein grobes Scoring aller Kacheln vorgenommen. Dafür wurde, basierend auf den Expertenantworten, jeder Merkmalskategorie ein Relevanzfaktor und jedem Merkmal ein Einflussfaktor, das heißt, wie negativ oder positiv sich das Vorhandensein eines Merkmals auf die Güte einer Kachel auswirkt, zugewiesen. Der tatsächliche Einflussfaktor eines Merkmals war das Produkt aus dem Relevanzfaktor der Kategorie, der das Merkmal angehört, und dem ihm zugewiesenen Einflussfaktor. Die grobe Güte einer Kachel war dann die Summe aller tatsächlichen Einflussfaktoren der Merkmale, die in der Fläche der Kachel vorliegen.

Als KI-Modell wurde ein Multilayer-Perzeption (MLP) ([5]) verwendet, das als Eingabe neben der bereits erwähnten Liste von Merkmalsausprägungen auch Kontextinformationen erhielt. Diese Kontextinformationen beschreiben, wie die Umgebung einer zu beurteilenden Kachel aussieht, zum Beispiel,



07.–09.
MAI
2025

MESSE MÜNCHEN

Die internationale Fachmesse für Energiemanagement und vernetzte Energielösungen

- **Jeder zählt:** Prosumer als Schlüssel für eine erneuerbare Energieversorgung 24/7
- **Das Optimale herausholen:** Netzintegration und Energiemanagement dezentraler Anlagen
- **Erlöse statt Ausgaben:** Energie teilen, Flexibilität vermarkten, Kosten reduzieren
- **Branchentreffpunkt:** 110.000+ Energieexperten und 3.000+ Aussteller auf vier parallelen Fachmessen

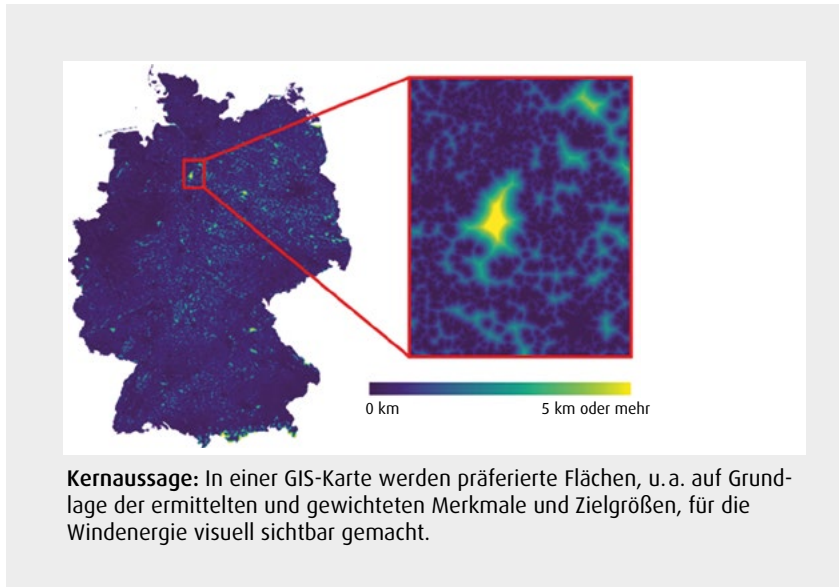


Bild 3. Abstände zu Wohngebäuden (im Innen- und Außenbereich), exemplarischer Gebietsausschnitt zum Heidekreis (Lüneburger Heide) in Niedersachsen

ob in der näheren Umgebung geschützte Tierarten vorkommen. Diese Kontextinformationen wurden durch ein Convolutional Neural Network (CNN), das parallel zum MLP trainiert wurde, generiert. Ein trainiertes KI-Modell kann anschließend dazu genutzt werden, um die Güte aller Kacheln zu bestimmen.

Zusammenfassung und Ausblick

Für die Erreichung der Klimaziele ist der Ausbau von Windenergie und deswegen auch die Ausweisung von geeigneten Flächen von zentraler Bedeutung.

Das Ziel im Projekt WindGISKI besteht darin, eine effiziente und unterstützende Flächenidentifikation von Potenzialflächen für Windenergieprojekte automatisiert zu ermöglichen. Dafür wird im Rahmen des Projekts ein Geoinformationssystem (GIS) entwickelt, das mithilfe von künstlicher Intelligenz (KI) Flächen bewertet und somit die Erfolgsaussichten eines Windenergieprojekts systematisch vorhersagt. Demnach wird nicht nur betrachtet, wo es Platz für den Bau von neuen Windenergieanlagen gibt, sondern auch, welche Hemmnisse und Gunstkriterien mit dieser Potenzialfläche einhergehen.

Die KI bewertet die Flächen anhand bestimmter Merkmale hinsichtlich ihrer Eignung für Windenergie. Die Flächenmerkmale, die in der KI berücksichtigt werden, wurden anhand einer Literaturrecherche ermittelt und unter Einbezug zentraler Akteure aus der Windenergiebranche mittels einer Durchführung semistrukturierter Interviews sowie eines Online-Surveys ergänzt und

in ihrer Bedeutung für die Beurteilung zur Flächengüte gewichtet.

Partner des Projekts WindGISKI

- Institut für Statik und Dynamik der Leibniz Universität Hannover
- Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) gGmbH
- Institut für Sozialwissenschaften (UOL) der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Nefino GmbH
- LEE Landesverband Erneuerbare Energien Niedersachsen | Bremen e. V.
- ARSU-Arbeitsgruppe für regionale Struktur- und Umweltforschung GmbH
- Institut für Informationsverarbeitung der Leibniz Universität Hannover
- fk-wind: Institut für Windenergie der Hochschule Bremerhaven

Projektträger und Projektförderer

- Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur, Ausschreibung Windenergie an Land. 08/2023. www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Wind_Onshore/Gebotstermin1082023/artikel.html
- [2] BWK Energie, VDI Fachmedien. 11/2023. Projekt WindGISKI – KI-basiertes Geoinformationssystem zur Auswahl von Windenergiepotenzialflächen. <https://elibrary.vdi-verlag.de/10.37544/1618-193X-2023-11-12/bwk-energie-volume-75-2023-issue-11-12>

- [3] Fachagentur Wind. 06/2022. Hemmnisse beim Ausbau der Windenergie an Land – Ergebnisse einer Branchenbefragung. www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Genehmigung/FA_Wind_Ergebnisse_Branchenumfrage_06-2022.pdf
- [4] Bund-Länder-Kooperationsausschuss, Bericht des Bund-Länder-Kooperationsausschusses zum Stand des Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie zu Flächen. 22.10.2021. Planungen und Genehmigungen für die Windenergienutzung an Land, an die Bundesregierung, gemäß §98 EEG 2021. www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/EEG-Kooperationsausschuss/2021/bericht-bund-laender-kooperationsausschuss-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=4>
- [5] Gritzner, D. et al: WindGISKI: Using AI to Propose Areas Suitable for Building New Wind Turbines. Proceedings of the 3rd DHBW AI Transfer Congress 2024.

>> **Carsten Fichter,**
Hochschule Bremerhaven/fkwind

Sandra Peters-Erjawetz,
Hochschule Bremerhaven/fkwind

Daniel Gritzner,
Leibniz Universität Hannover/TNT

Nele Uhlenwinkel,
Hochschule Bremerhaven

Jörn Ostermann,
Leibniz Universität Hannover/TNT

>> cfichter@hs-bremerhaven.de
speters@hs-bremerhaven.de
gritzner@tnt.uni-hannover.de
ostermann@tnt.uni-hannover.de

>> www.hs-bremerhaven.de/de/forschung/projekte/windgiski

>> www.tnt.uni-hannover.de