



# Auswirkungen der Windkraft auf Mensch und Umwelt - eine wissenschaftliche Bestandesaufnahme

Peter Burgherr, Head Technology Assessment, PSI  
aeebern Sessionsveranstaltung, Bern, 10.09.2025

# Systemauswirkungen der Windenergieentwicklung: zentrale Forschungsherausforderungen und Chancen



**Joule** CellPress  
OPEN ACCESS

Review  
**System impacts of wind energy developments:  
Key research challenges and opportunities**

Russell McKenna,<sup>1,2,3,4</sup> Johan Lilliestam,<sup>4</sup> Heidi U. Heinrichs,<sup>5</sup> Jann Weinand,<sup>6</sup> Johannes Schmidt,<sup>6</sup> Iain Staffell,<sup>7</sup> Andrea N. Hahmann,<sup>8</sup> Peter Burgherr,<sup>9</sup> Ame Burdack,<sup>10</sup> Monika Bucha,<sup>11</sup> Ruihong Chen,<sup>12</sup> Michael Klingler,<sup>13</sup> Paul Lehmann,<sup>14,15</sup> Jens Lowitzsch,<sup>16</sup> Riccardo Novo,<sup>17</sup> James Price,<sup>18</sup> Romsin Sacchi,<sup>19</sup> Patrick Scherhauer,<sup>14</sup> Eva M. Schöll,<sup>19</sup> Piero Visconti,<sup>19</sup> Paola Velasco-Herrejón,<sup>17</sup> Marianne Zeyringer,<sup>17</sup> and Luis Ramirez Camargo<sup>19</sup>

<sup>1</sup>Chair of Energy System Analysis, ETH Zurich, Zurich, Switzerland  
<sup>2</sup>Laboratory for Energy Systems Analysis, Centers for Nuclear Engineering & Sciences and Energy & Environment, Paul Scherrer Institute, Villigen, Switzerland  
<sup>3</sup>School of Engineering, University of Aberdeen, Aberdeen, UK  
<sup>4</sup>Sustainability Transition Policy, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, Germany  
<sup>5</sup>Institute of Climate and Energy Systems, Jülich Systems Analysis (ICE-2), Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany  
<sup>6</sup>Institute of Sustainable Economic Development, BOKU University, Vienna, Austria  
<sup>7</sup>Centre for Environmental Policy, Imperial College London, London, UK  
<sup>8</sup>Department of Wind and Energy Systems, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark  
<sup>9</sup>Kelso Institute Europe, Berlin, Germany  
<sup>10</sup>Department of Economics, Helmholtz Centre for Environmental Research, UFZ, Leipzig, Germany  
<sup>11</sup>Faculty of Economics and Management Science, University of Leipzig, Leipzig, Germany  
<sup>12</sup>European University Viadrina, Frankfurt (Oder), Germany  
<sup>13</sup>UCL Energy Institute, University College London, London, UK  
<sup>14</sup>Institute of Forest, Environment, and Natural Resource Policy, BOKU University, Vienna, Austria  
<sup>15</sup>Institute of Wildlife Biology and Game Management, BOKU University, Vienna, Austria  
<sup>16</sup>Biodiversity, Ecology, and Conservation Research Group, IASA, Laxenburg, Austria  
<sup>17</sup>Department of Technology Systems, University of Oslo, Oslo, Norway  
<sup>18</sup>Copernicus Institute of Sustainable Development, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands  
<sup>19</sup>Correspondence: russell.mckenna@psi.ch  
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.11.016>

**CONTEXT & SCALE** Wind energy is currently one of the cheapest renewable energy technologies and plays a central role in many countries' climate and energy strategies. However, like any electricity-generation technology, wind energy affects and interacts with the broader environmental, social, economic, technical, and legal systems it integrates with. These impacts can potentially slow its deployment, delaying progress on essential decarbonization and energy security objectives. Solutions often exist, but challenges remain due to fundamental research gaps and limited understanding of the true scale of impacts. This article identifies four broad impact categories and fourteen individual impacts, which we systematically analyze through a review of over 400 scientific articles. We qualitatively assess these impacts in terms of importance and spatial diversity, proposing concrete solutions where possible, and suggesting directions for future research. We also demonstrate that some recurring issues are actually not substantial, such as bird and bat collisions, noise and health impacts, local weather changes, and market price impacts at low penetration levels. However, we identify several genuine issues that are currently hard to solve, such as lengthy planning and permitting processes, rare earth material dependency, the recycling of blades, visual impacts on landscapes, and integration into power systems at high penetration levels.

**SUMMARY**  
Wind power accounted for 8% of global electricity generation in 2023 and is one of the cheapest forms of low-carbon electricity. Although fully commercial, many challenges remain in achieving the required scale-up, relating to integrating wind farms into wider technical, economic, social, and natural systems. We review the main challenges, outline existing solutions, and propose future research needed to overcome existing problems. Although the techno-economic challenges of grid and market integration are seen as significant obstacles to scaling up wind power, the field is replete with solutions. In many countries, planning and

Joule, January 15, 2025 © 2024 The Author(s). Published by Elsevier Inc. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

R. McKenna, J. Lilliestam, H. Heinrichs, J. Weinand, J. Schmidt, I. Staffell, A. Hahmann, P. Burgherr, A. Burdack, M. Bucha, R. Chen, M. Klingler, P. Lehmann, J. Lowitzsch, R. Novo, J. Price, R. Sacchi, P. Scherhauer, E. Schöll, P. Visconti, P. Velasco-Herrejón, M. Zeyringer, L. Camargo



Funded by the European Union



PSI



UNIVERSITY OF ABERDEEN



UNIVERSITÄT LEIPZIG



EUROPA-UNIVERSITÄT VIADRINA FRANKFURT (ODER)



Utrecht University

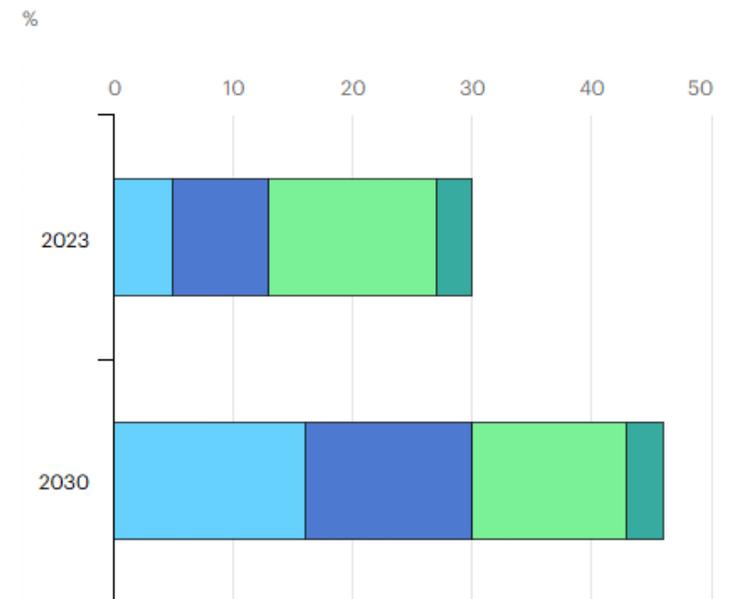


<https://wimby.eu/>

# Die Bedeutung der Windenergie nimmt zu, doch die Herausforderungen bei der Skalierung bleiben bestehen.



- **Wind** ist eine der **günstigsten** und am **schnellsten wachsenden Energiequellen**.
- **8% der weltweiten Stromerzeugung im Jahr 2023, Verdopplung bis 2030 erwartet.**
- **Muss erfolgreich in menschliche und natürliche Systeme integriert werden.**
- **Welche Auswirkungen hat Windkraft auf ökologische, soziale, technische, politische und wirtschaftliche Systeme?**
- **Was ist das Ausmass dieser Auswirkungen?**
- 23 Mitarbeiter aus 16 Universitäten
- Experten haben die Literatur in ihren Fachgebieten geprüft

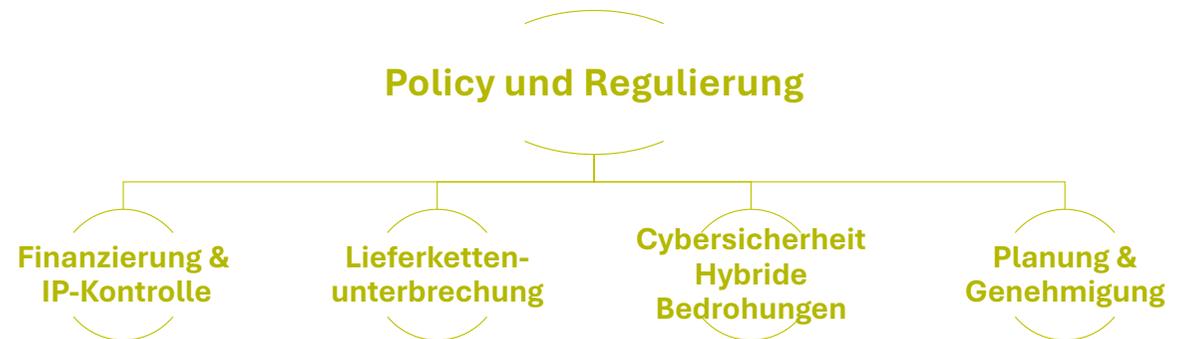
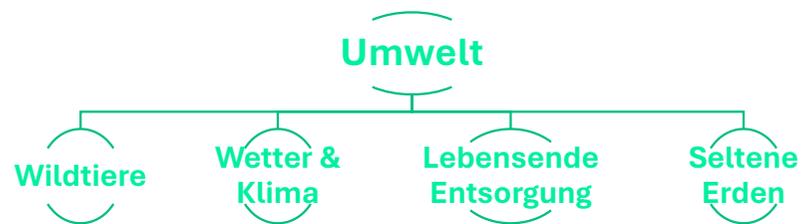


IEA. Licence: CC BY 4.0

● Solar PV ● Wind ● Hydropower ● Other renewables

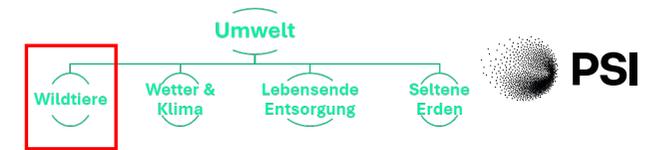
# Auswirkungen von Windenergie

4 Kategorien – 14 Themen



# Auswirkungen auf die Tierwelt

## → Standortwahl & Einschränkungen



### Auswirkungen:

- **Kollisionen von Vögeln und Fledermäusen**  
(jedoch seltener als bei anderen Infrastrukturen)
- **Störung des Lebensraums**  
→ **Verdrängung von Arten**  
(Tiere meiden Schattenflackern)
- **«Sie machen die Wale verrückt»**  
(töten sie jedoch nicht)
- **Seevögel profitieren von Ruhe- und Futterplätzen**

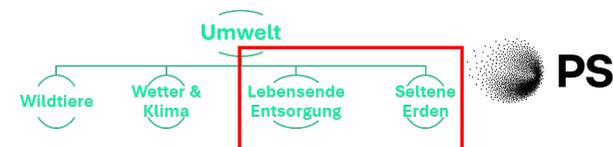
### Insgesamt besteht grosse Unsicherheit:

- **Die Reaktionen der einzelnen Arten variieren**
- **Es fehlen Langzeitstudien**

### Abhilfemassnahmen:

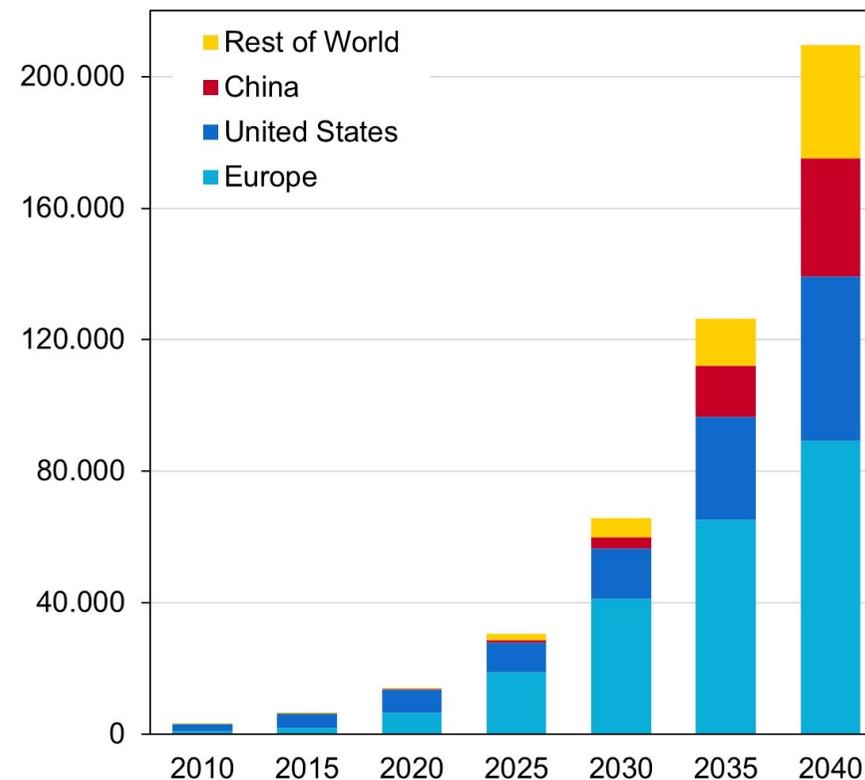
- **Bessere Standortwahl für Windparks**
- **Erhöhung der Einschaltgeschwindigkeit zur Verringerung von Kollisionen**
- **Vorübergehende Abschaltung aufgrund visueller oder radarbasierter Beobachtungen**
- **Visuelle Hinweise wie die Lackierung von Rotorblättern**
- **Ultraschall-Abschreckungssysteme**

# Recycling von Magneten und Rotorblättern

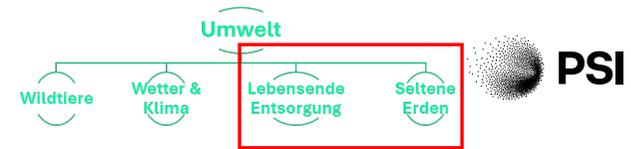


## Auswirkungen:

- **Bis 2030 werden 60'000 Windkraftanlagen das Ende ihrer Lebensdauer erreichen.**  
(Die Rotorblätter werden nicht recycelt, sondern auf Deponien entsorgt.)
- **Seltene Erden für Permanentmagnete geben Anlass zur Sorge.**  
(Neodym, Praseodym, Dysprosium)
- **Engpässe in der Lieferkette schränken die Branche ein.**



# Recycling von Magneten und Rotorblättern



## Auswirkungen:

- **Bis 2030 werden 60'000 Windkraftanlagen das Ende ihrer Lebensdauer erreichen.**  
(Die Rotorblätter werden nicht recycelt, sondern auf Deponien entsorgt.)
- **Seltene Erden für Permanentmagnete geben Anlass zur Sorge.**  
(Neodym, Praseodym, Dysprosium)
- **Engpässe in der Lieferkette schränken die Branche ein.**

## Abhilfemassnahmen:

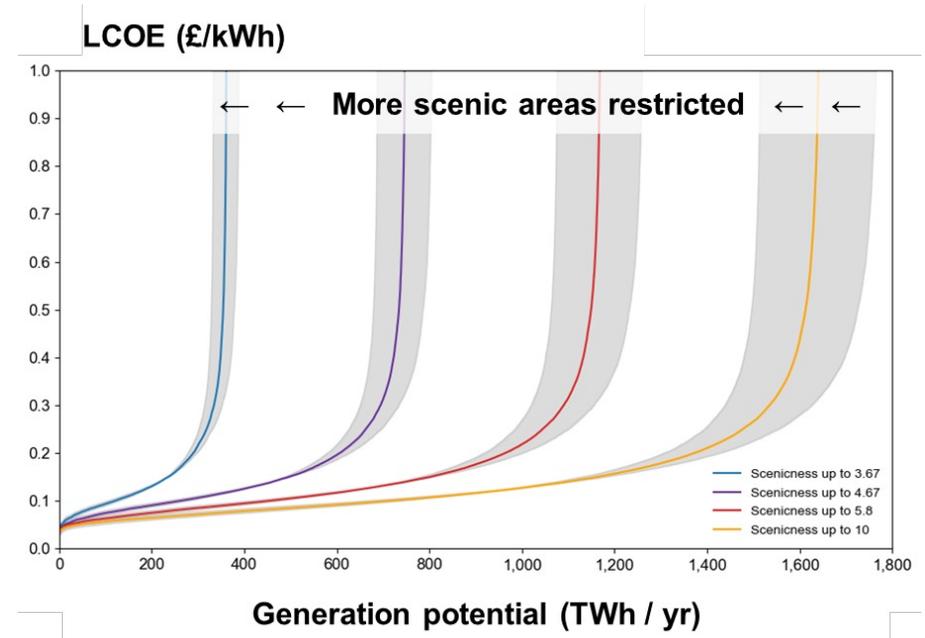
- **Entwicklung und Skalierung von Recyclingmethoden**
- **Alternativen für Permanentmagnete**
- **Diversifizierung der Lieferketten**
- **Lebensdauererlängerung, Aufarbeitung und andere Formen der Wiederverwendung**  
(z. B. Umnutzung von Rotorblättern für Zement)

# Auswirkungen auf Immobilienpreise und Ästhetik: Sichtbarkeit & Vorteile



## Auswirkungen:

- Immobilienwerte können sinken oder steigen...
- Der Tourismus kann beeinträchtigt oder gefördert werden...
- Die Öffentlichkeit ist weitgehend besorgt über die visuellen Auswirkungen (auch hier zeigen Studien gemischte Auswirkungen)
- Höhere Akzeptanz, wenn Windkraftanlagen an «unattraktiven Orten» errichtet werden



# Auswirkungen auf Immobilienpreise und Ästhetik: Sichtbarkeit & Vorteile



## Auswirkungen:

- Immobilienwerte können sinken oder steigen...
- Der Tourismus kann beeinträchtigt oder gefördert werden...
- Die Öffentlichkeit ist weitgehend besorgt über die visuellen Auswirkungen (auch hier zeigen Studien gemischte Auswirkungen)
- Höhere Akzeptanz, wenn Windkraftanlagen an «unattraktiven Orten» errichtet werden

## Abhilfemassnahmen:

- Beteiligung der Gemeinschaft ab den ersten Planungsphasen
- Eigentümerschaft und Einkommen mit den betroffenen Menschen teilen
- Quantitative Sichtbarkeit und Landschaftsbewertung

# Hohe Windenergieanteile erfordern stärkere Netze, Speicherkapazitäten und eine flexible Nachfrage

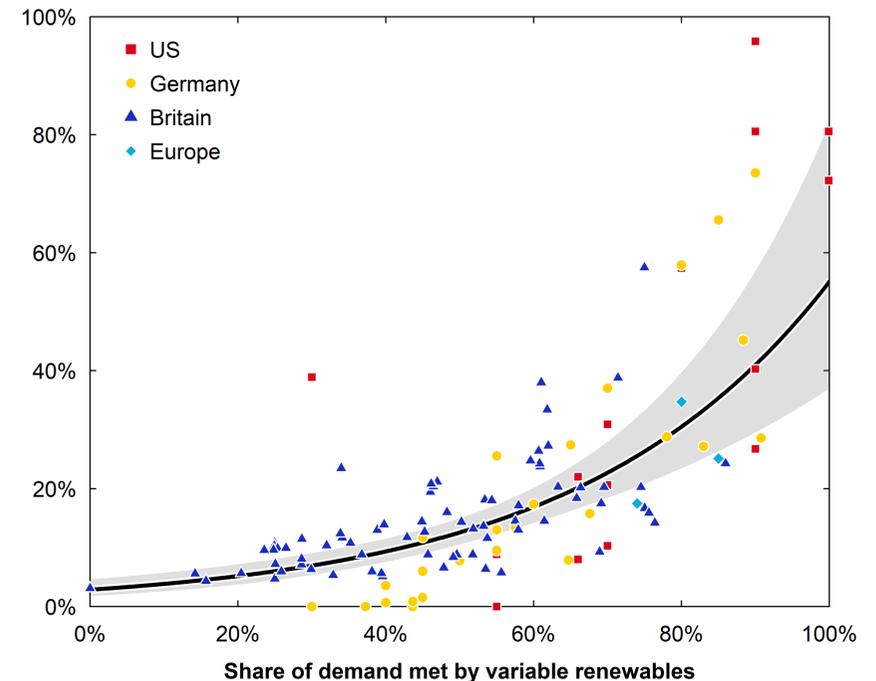


## Auswirkungen:

- **Wetterabhängig und nicht vollständig vorhersehbar**  
(mehr Reservekapazität erforderlich)
- **Verdrängt regelbare, thermische Generatoren**  
(Trägheit und Systemdienstleistungen nehmen ab, geringere Netzstabilität)

## Abhilfemassnahmen:

- **Netzausbau und -verstärkung**
- **Investitionen in Speicher**  
(kurze und mittlere Dauer)
- **Sektorkopplung, Lastmanagement, intelligente Stromnetze**



Source: [Monetizing Energy Storage](#)

# Diversifizierte Lieferketten und Sicherheitsmassnahmen gegen neue Bedrohungen

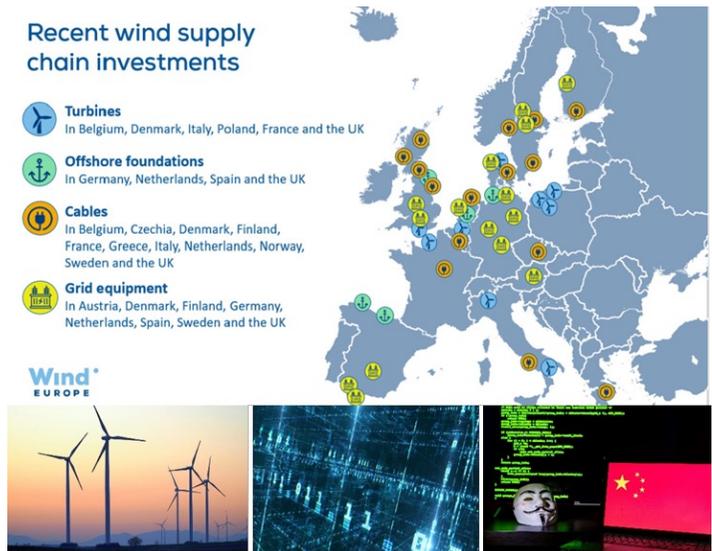


## Auswirkungen:

- Abhängigkeiten bei kritischen Materialien
- Geopolitik der Energiewende
- Instrumentalisierung von Energie als Waffe
- Zunehmende Cyberangriffe auf den Energiesektor
- Veraltete Überwachungssysteme von Windparks
- Desinformation beeinträchtigt die Glaubwürdigkeit

## Abhilfemassnahmen:

- Erhöhung der inländischen Exploration & Produktion, um Lieferketten zurückzuholen oder in die Nähe zu verlagern
- Diversifizierung der Lieferanten
- Sichere Technologien und widerstandsfähige Designs
- Öffentliches Bewusstsein und faktenbasierte Informationen



# Langwierige und mangelhafte Planung ist das grösste Hindernis für Windenergie

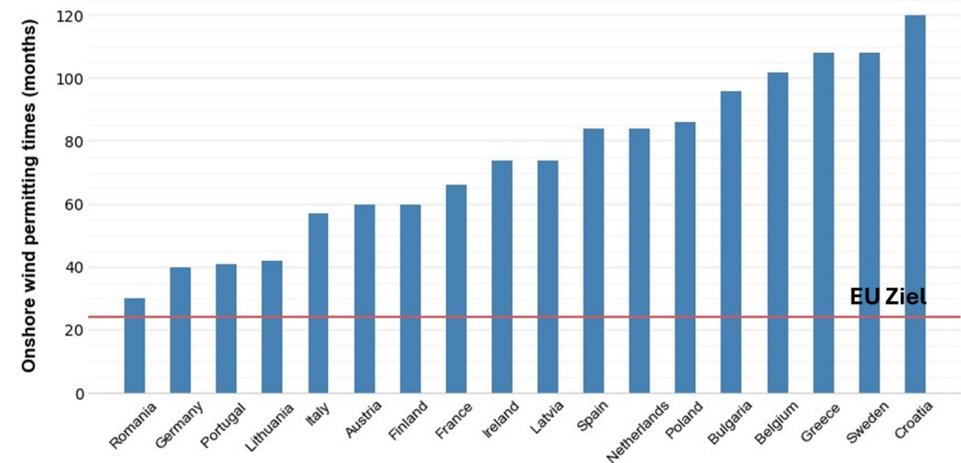


## Auswirkungen:

- Komplexe und unspezifische rechtliche Anforderungen
- Unterbesetzte Behörden und Justizsysteme
- Zunehmender juristischer Widerstand von Windkraftgegnern

## Abhilfemassnahmen:

- Regulierte «Vorranggebiete» für die Planung
- Lokale Akzeptanz und finanzielle Beteiligung
- Bessere Finanzierung



# Schliessen dieser Forschungslücken könnte die zukünftige Windkraftnutzung beschleunigen



	kurzfristig	langfristig
Sozio-ökonomisch	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b>Akzeptanz</b> und <b>Zahlungsbereitschaft</b></li><li>▪ Modelle mit <b>empirischen Daten</b> abgleichen</li><li>▪ <b>Modelle</b> von Marktakteuren &amp; Speichersystemen <b>verbessern</b></li><li>▪ <b>Gesamtsystemkosten</b> der <b>Windenergieintegration</b></li><li>▪ <b>«Best Practices»</b> für die Planung bestimmen</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b>Verlaufsstudien</b> der <b>lokalen</b> wirtschaftlichen <b>Auswirkungen</b></li><li>▪ Verbesserung der <b>techno-ökonomischen Modellierung</b></li><li>▪ Auswirkungen <b>regulatorischer Änderungen</b> und deren Einfluss auf die <b>Akzeptanz</b></li><li>▪ Verstehen und Bekämpfen von <b>Desinformation</b></li></ul>
Umwelt & Technologie	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Auswirkungen in <b>Wäldern</b></li><li>▪ Roadmap für den <b>Aufbau inländischer Lieferketten</b></li><li>▪ <b>Verständnis</b> der Verwundbarkeit und Angriffslandschaft von <b>Wind-IKT-Systemen</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ <b>Mehrjährige Verlaufsstudien</b> zu den <b>Auswirkungen auf Ökosysteme</b></li><li>▪ Entwicklung <b>widerstandsfähigerer Lieferketten</b></li><li>▪ Entwicklung eines <b>End-of-Life-Managements</b> für Turbinen</li></ul>

## Herausforderung

- Diskrepanz zwischen geringer allgemeiner Unterstützung und starker lokaler Opposition
- Spannung zwischen beschleunigter Umsetzung und partizipativen Mechanismen

## Konsens und Dissens

- Techno-ökonomische Auswirkungen sind gut verstanden
- Widersprüchliche Ergebnisse zu lokalen wirtschaftlichen Auswirkungen
- Viele Forderungen nach weiterer Forschung: ökologische Auswirkungen, Lebensende, Marktdesign,...

## Medienberichterstattung

- Viele Auswirkungen werden in den Medien falsch oder verzerrt dargestellt  
Vibrationen, ökologische Auswirkungen, Gesundheit, usw.

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

## Fragen?

**If it not be now, yet it will come – the readiness is all.**  
*(W. Shakespeare, Hamlet)*

Diese Arbeit wurde unterstützt von:

- The HE Project WIMBY [grant number 101083460].
- The State Secretariat for Education, Research and Innovation (SERI) of the Swiss Confederation, SERI No. 22.00340.



Laboratory for Energy Systems Analysis (LEA)  
Technology Assessment Group (TAG)  
<http://www.psi.ch/ta>  
[peter.burgherr@psi.ch](mailto:peter.burgherr@psi.ch)