Windenergie

Prof. Dr. Anne Kress

Haiming, 30.11.2023

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

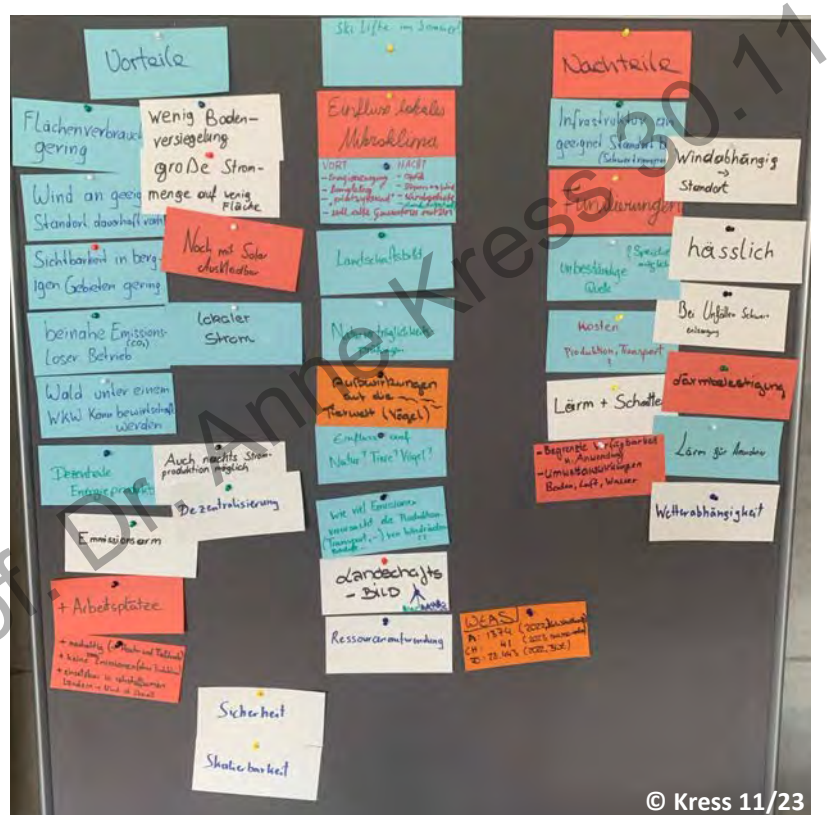
Übersicht

- Facts & Figures Windkraft
- Windkraft im Wald
- Wichtige Parameter bei Planung eines Windparks
  - Schatten
  - Schall
  - Infraschall
  - Genehmigungsverfahren

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Vor- und Nachteile Windenergie

- Dezentrale Energiequelle
- Hohe Effizienz
- Emissions- & schadstoffarm
- Wind reichlich, dauerhaft & kostenlos vorhanden
- Schaffung Arbeitsplätze

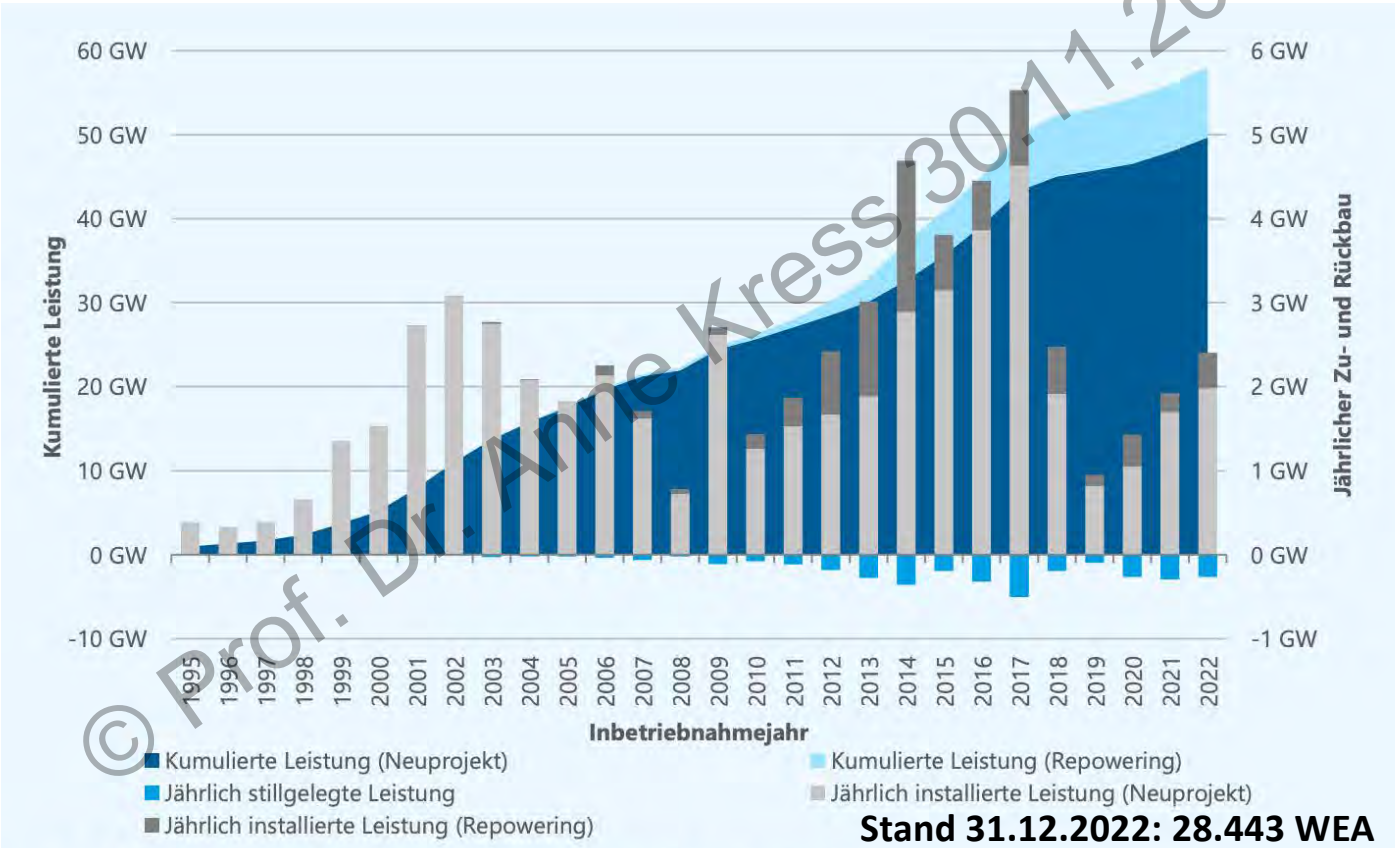


- Fluktuierende Energiequelle
- Speicherung
- Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten
- Landschaftsbild
- Infrastruktur
- Kosten

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

*Auswahl, keine vollständige Darstellung

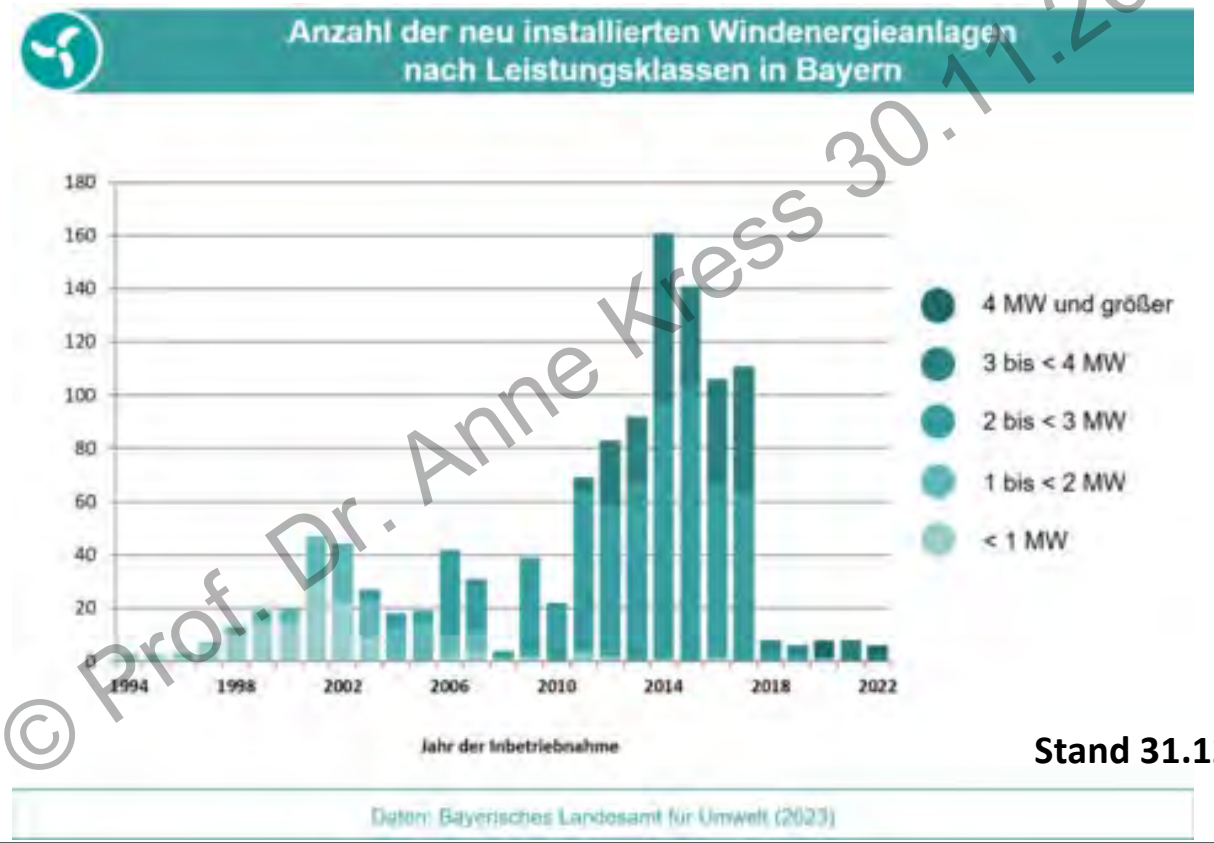
Aktuelle Situation Windenergie in Deutschland



Stand 31.12.2022: 28.443 WEA

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Aktuelle Situation Windenergie in Bayern



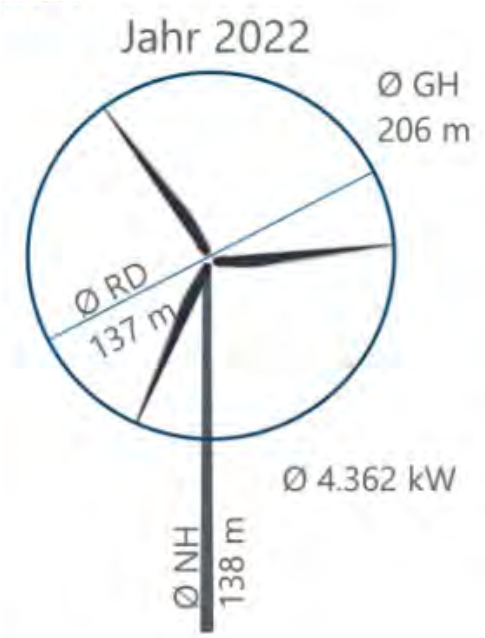
Stand 31.12.2022: 1.143 WEA

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Entwicklung der Anlagenkonfiguration 2014-2022

∅ Anlagenkonfiguration an Land	Zubau 2014	Zubau 2015	Zubau 2016	Zubau 2017	Zubau 2018	Zubau 2019	Zubau 2020	Zubau 2021	Zubau 2022
Anlagenleistung [kW]	2.690	2.727	2.848	2.976	3.233	3.317	3.407	3.978	4.362
Rotordurchmesser [m]	99	105	109	113	118	119	122	133	137
Nabenhöhe [m]	116	123	128	128	132	133	135	140	138
spezifische Flächenleistung [W/m^2]	361	326	314	309	303	302	298	285	295

[EIGENE DARSTELLUNG © Kress]
Datenquelle: BWE/Deutsche Wind Guard Status den Windenergieausbaus an Land (2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023)



BWE/Deutsche Wind Guard (2023)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Im Wind enthaltene Leistung

Wind reichlich, dauerhaft & kostenlos vorhanden

Dezentrale Energiequelle

Hohe Effizienz

Luftdichte (1,2-1,3 kg/m³)

Leistungsbeiwert der Anlage [-]

$$P_W = 0,5 \cdot \rho_L \cdot [\pi \cdot (r_R)^2] \cdot c_p \cdot (v_w)^3$$

Rotorfläche [m²]

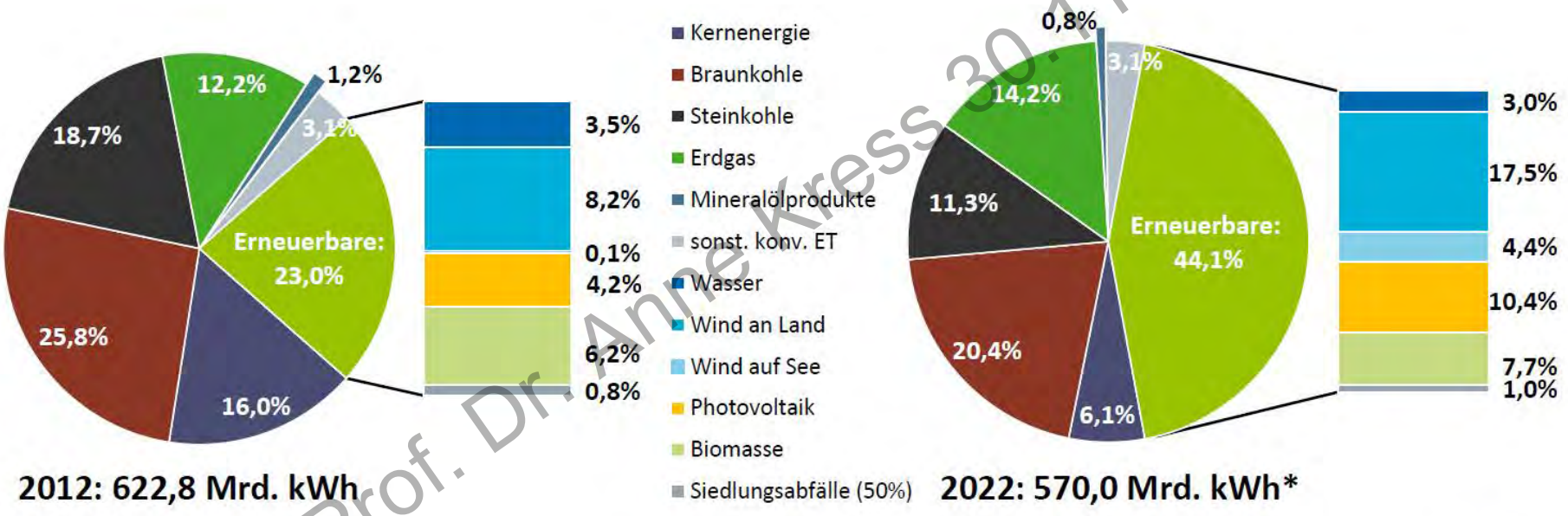
Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe [m/s]

100% Wind → P_{Wind} → P_{Rotor} → P_{mech} → P_{el} $C_{p,reell}$ ~ 0.45

41% Physikalisch nicht entnehmbare Leistung → $C_{p,max}$ = 0.59

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

BruttostromERZEUGUNG nach Energieträgern in Deutschland: 10-Jahres-Vergleich



Quellen: BDEW-Schnellstatistikerhebung, Destatis, EEX, VGB, ZSW; Stand 09/2023

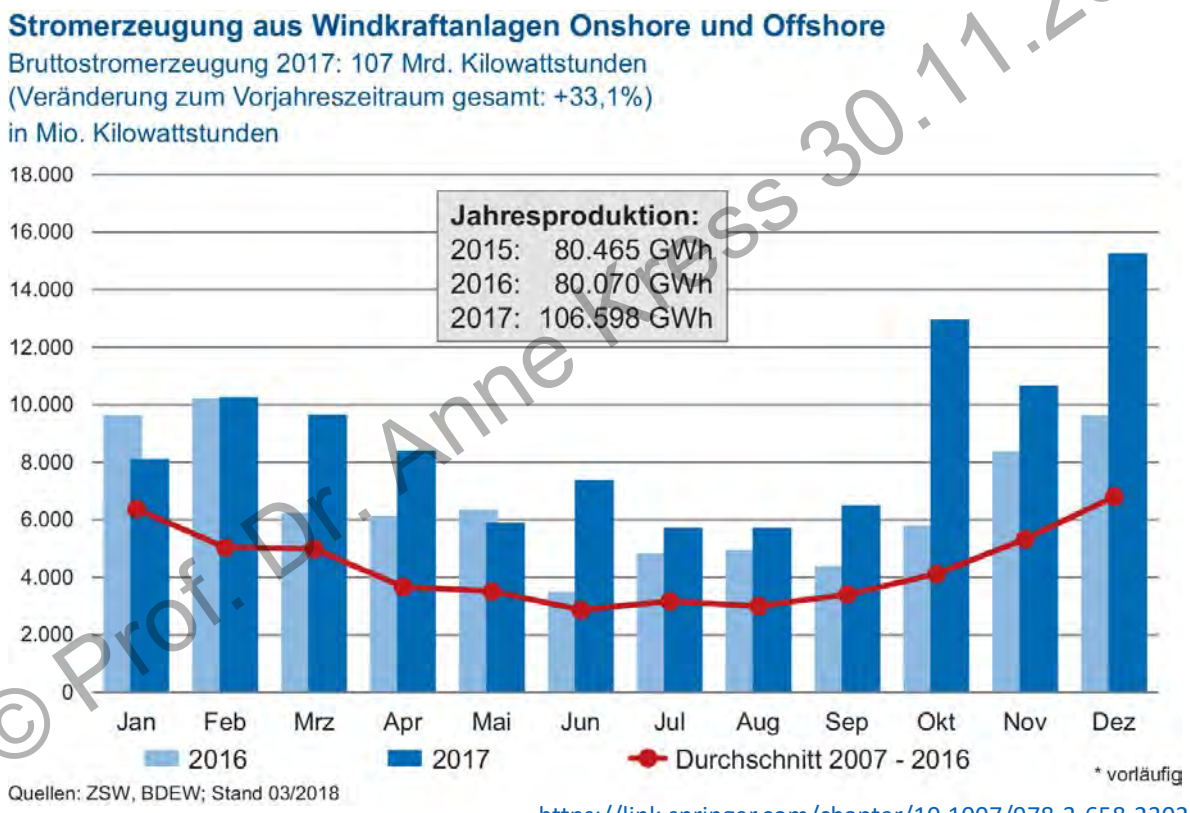
* vorläufig
Rundungsdifferenzen

https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bruttostromerzeugung-deutschland/ (25.11.2023)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Volatile Stromerzeugung aus Wind

Wind reichlich, dauerhaft & kostenlos vorhanden



Fluktuierende Energiequelle

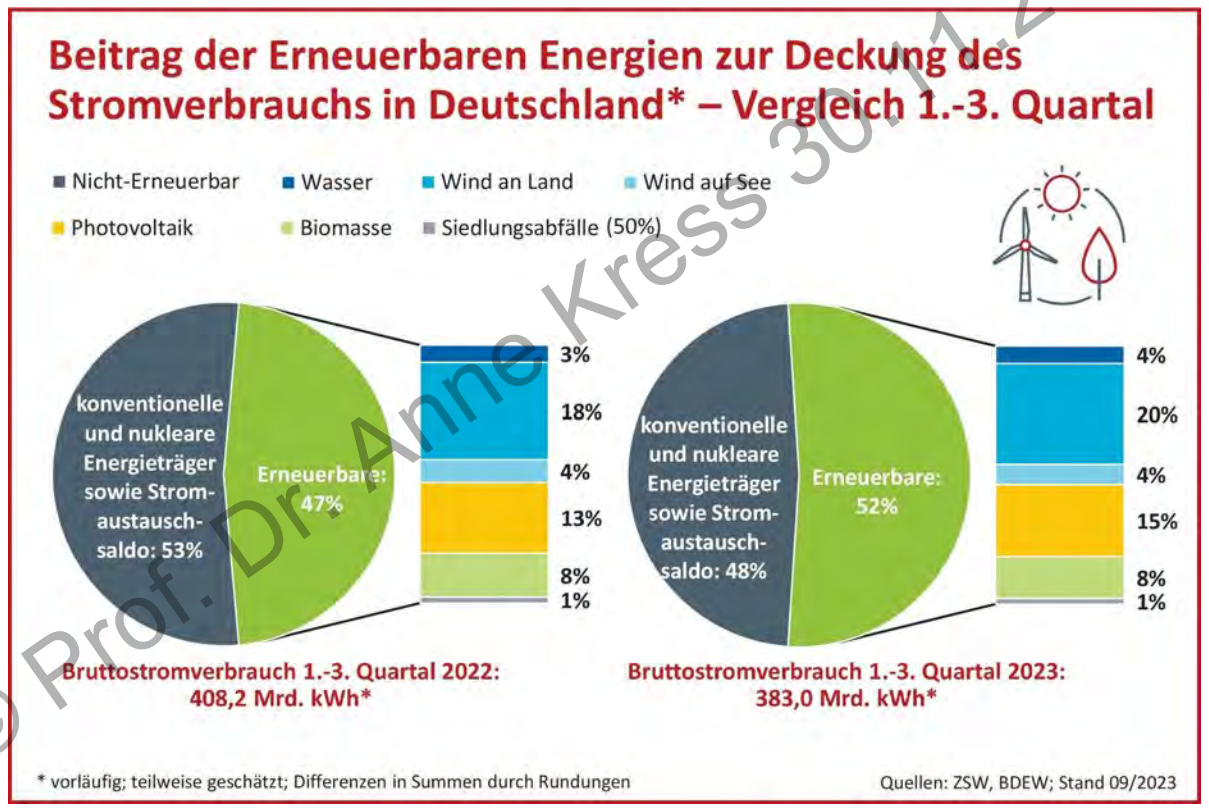
Speicherung

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-23024-1_3/figures/13 (28.11.2023)

BruttostromVERBRAUCH nach Energieträgern in Deutschland: Q1-Q3 2022 und 2023

Wind reichlich, dauerhaft & kostenlos vorhanden



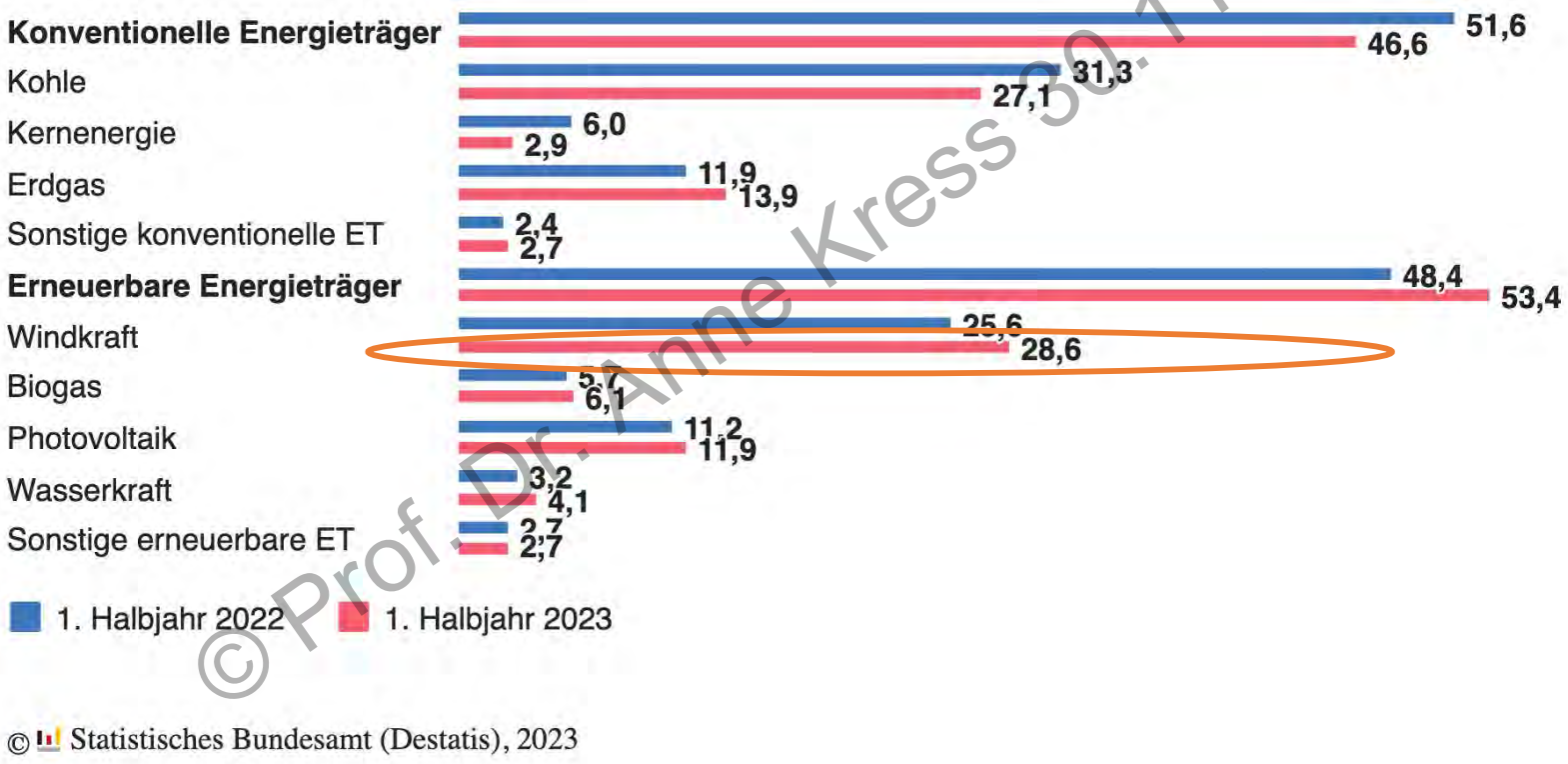
Fluktuierende Energiequelle

Speicherung

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

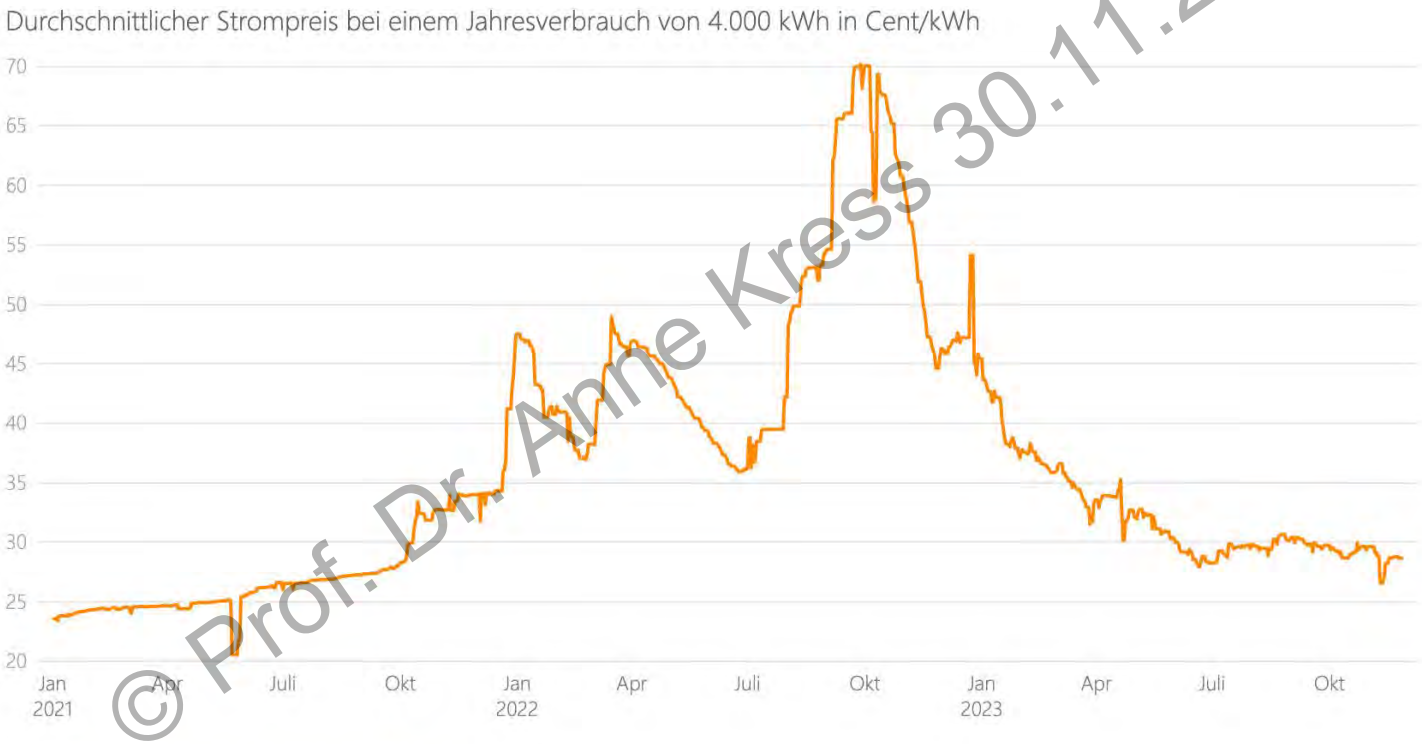
https://www.tga-fachplaner.de/sites/default/files/aurora/312909.jpeg?itok=DddQKHvB (29.11.2023)

Stromeinspeisung durch konventionelle und erneuerbare Energieträger [%]



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

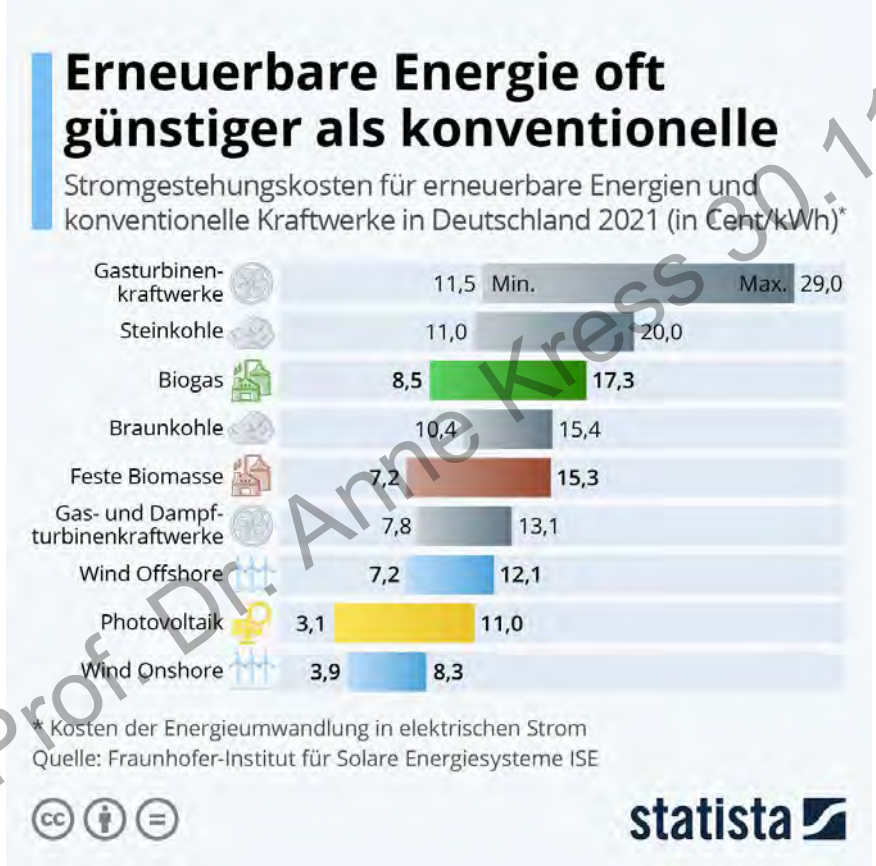
Strompreisentwicklung Neukunden



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

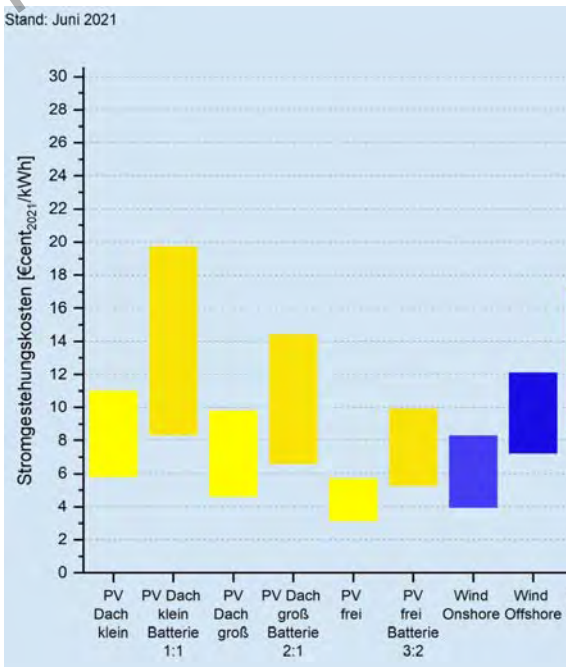
https://www.verivox.de/strom/strompreisentwicklung/ (28.11.2023)

Strom**GESTEHUNGS**kosten Deutschland [ct/kWh]



Stand Juni 2021

Kosten

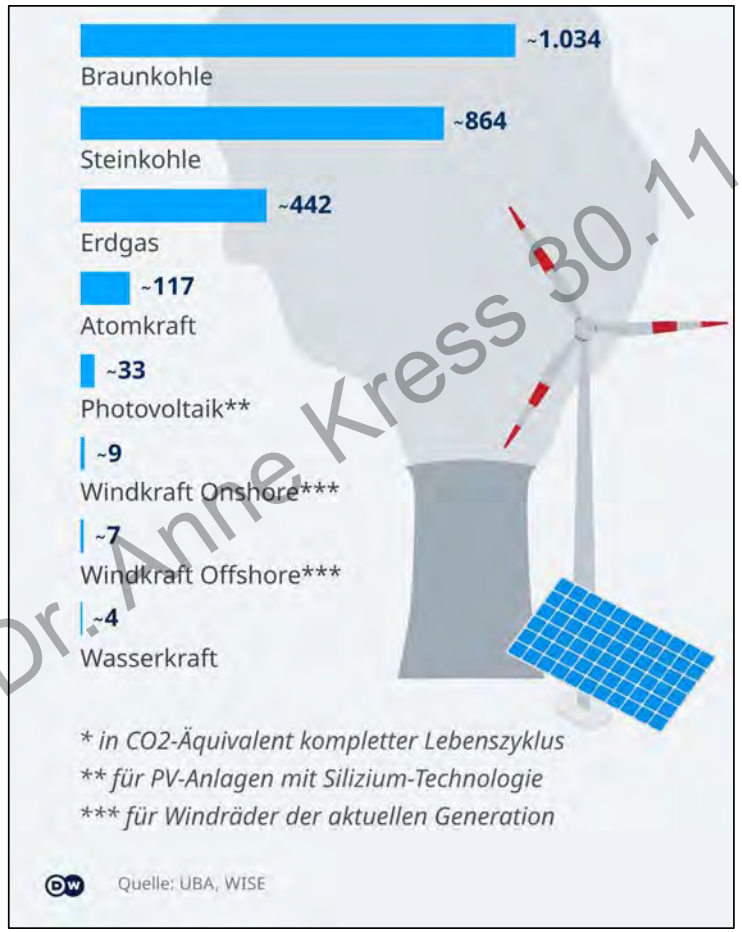


Stand Juni 2021

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Wie klimafreundlich ist welcher Strom? [CO_2-Äq./kWh]

Emissions- & schadstoffarm



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

https://www.dw.com/de/wie-nachhaltig-ist-windkraft-klimabilanz-recycling-artenschutz-erderhitzung/a-60170247 (15.11.2023)

Energy Payback Time Windkraft

Emissions- & schadstoffarm

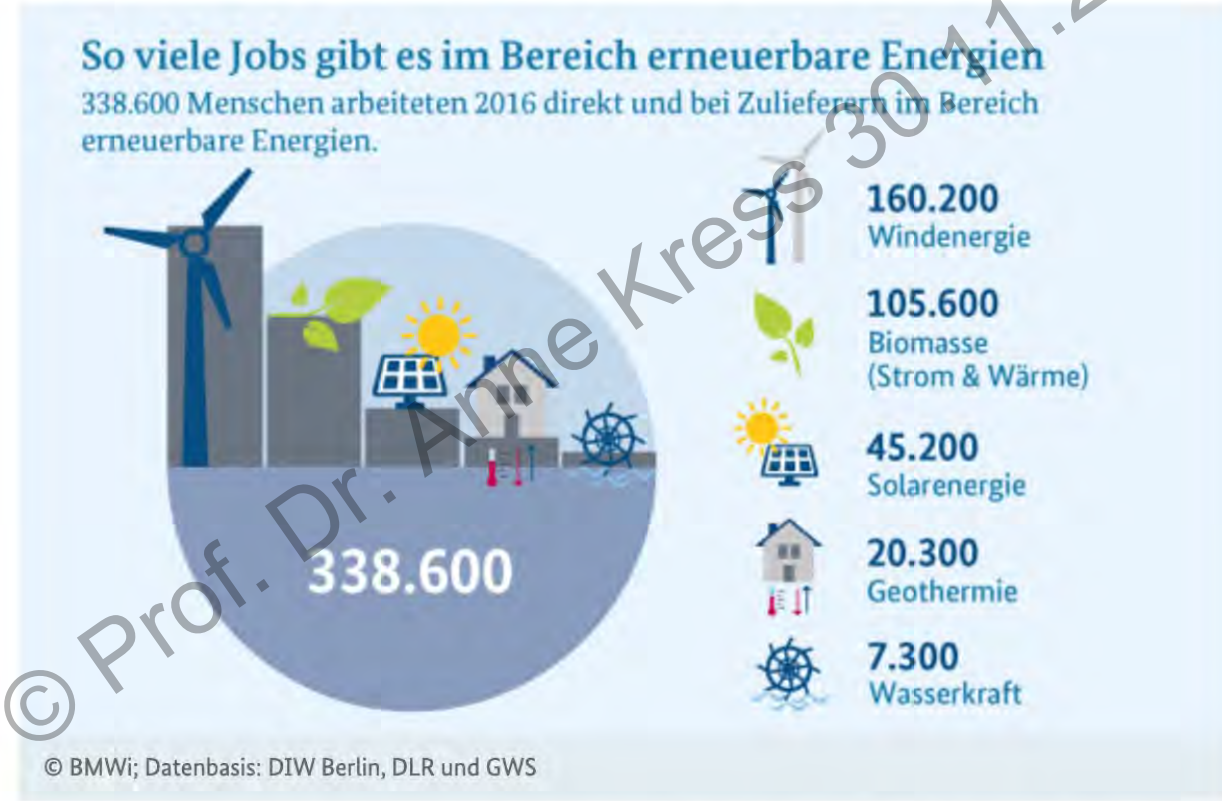
Referenzstrommix	Offshore	Onshore (Starkwind)	Onshore (Schwachwind)
Deutscher Strommix	4,5 Monate	2,5 Monate	3,2 Monate
Dänischer Strommix	10,7 Monate	5,9 Monate	7,6 Monate

Deutscher Strommix nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf 7,627 MJ/kWh (Referenzjahr 2015)
Dänischer Strommix nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf 4,071 MJ/kWh (Referenzjahr 2015)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

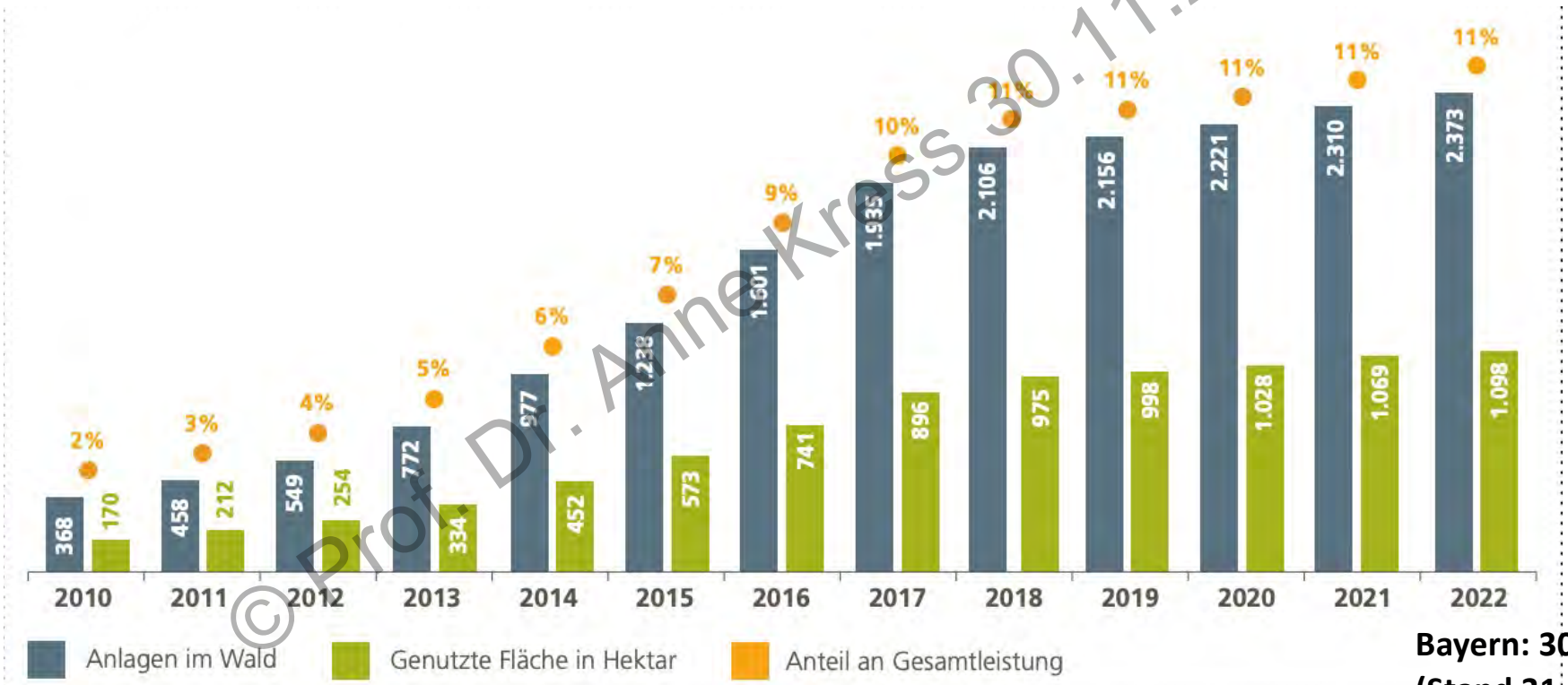
Arbeitsplätze

Schaffung Arbeitsplätze



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Wind im Wald Entwicklung & Aktueller Stand in Deutschland



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Bayern: 301 WEAs (Stand 31.12.2022)

Flächenbedarf (I)

Abbildung 4: Planzeichnung der Flächeninanspruchnahme einer Windenergieanlage (WEA); Quelle: ABO Wind/LVGL (bearbeitet)

Tabelle 2: Windenergieanlagen mit spezifischen Angaben zur Waldflächeninanspruchnahme; Datenerhebung FA Wind

Anlagenstandorte im Wald	erfasste Anlagen	Windpark-größe	Ø Waldflächen-inanspruchnahme pro Anlage [in Hektar]	
			dauerhaft	temporär
Baden-Württemberg	170	1 - 16 WEA	0,57 ha	0,34 ha
Bayern	77	1 - 16 WEA	0,35 ha	0,36 ha
Brandenburg	249	1 - 29 WEA	0,32 ha	0,66 ha
Hessen	248	1 - 18 WEA	0,51 ha	0,37 ha
Nordrhein-Westfalen	94	1 - 7 WEA	0,43 ha	0,40 ha
Rheinland-Pfalz	150	1 - 17 WEA	0,58 ha	0,40 ha
Saarland	39	2 - 5 WEA	0,54 ha	0,32 ha
Gesamt	**1.027**	**1 - 29 WEA**	**0,46 ha**	**0,44 ha**

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Ausgleichs- und Schutzmaßnahmen

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

Landschaftsbild

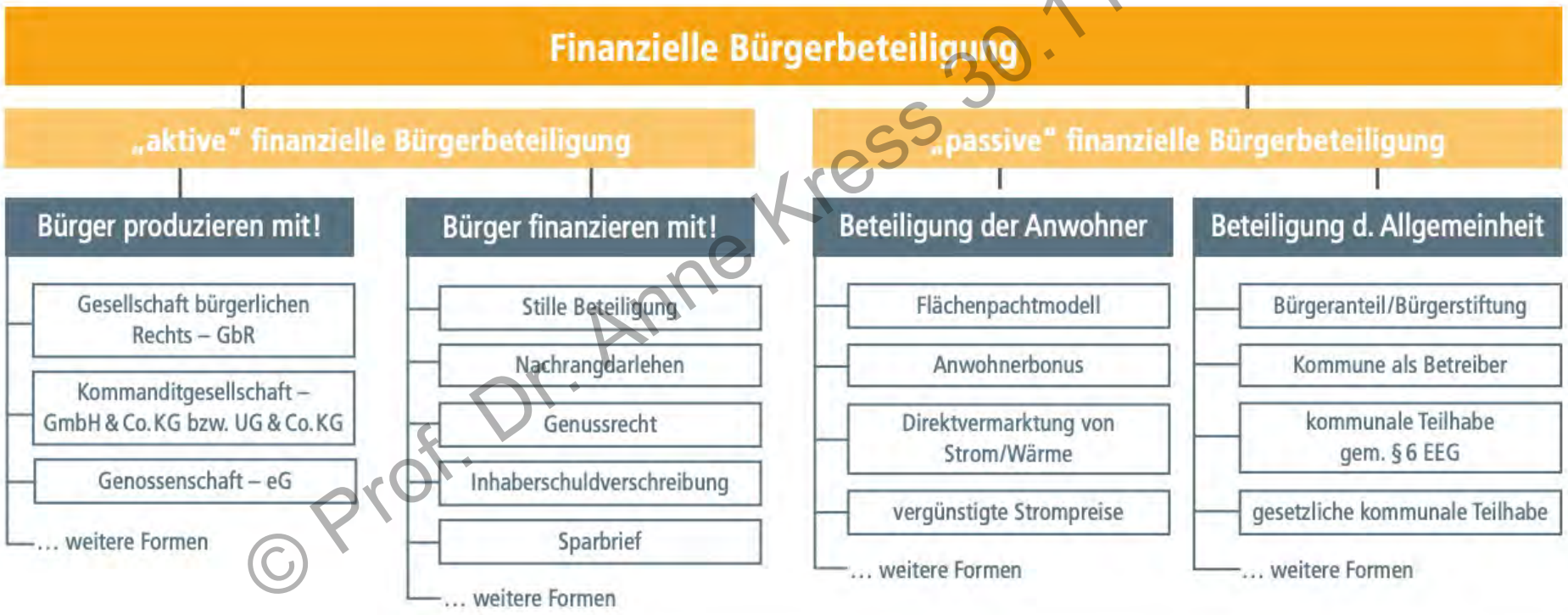
Waldrecht	Ausgleichsmaßnahmen für Waldumwandlung (temporär und dauerhaft)	z. B. Wiederaufforstung, ökologischer Waldumbau, in Nordrhein-Westfalen auch flächendeckende Entwicklung von Wald durch natürliche Ansamung von Forstpflanzen statt Ersatzpflanzungen möglich, monetär
Naturschutz/ Artenschutzrecht	Ausgleichs- und Schutzmaßnahmen (inkl. CEF-Maßnahmen) für Tiere, Pflanzen, biologische Vielfalt, Boden, Wasser, Landschaftsbild	z. B. ökologischer Waldumbau, Erhöhung der Strukturvielfalt, Flächenstilllegung, Förderung von Alt- und Totholz, künstliche Nisthilfen, monetär

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Handlungsfelder (Bund/Länder/Kommunen)

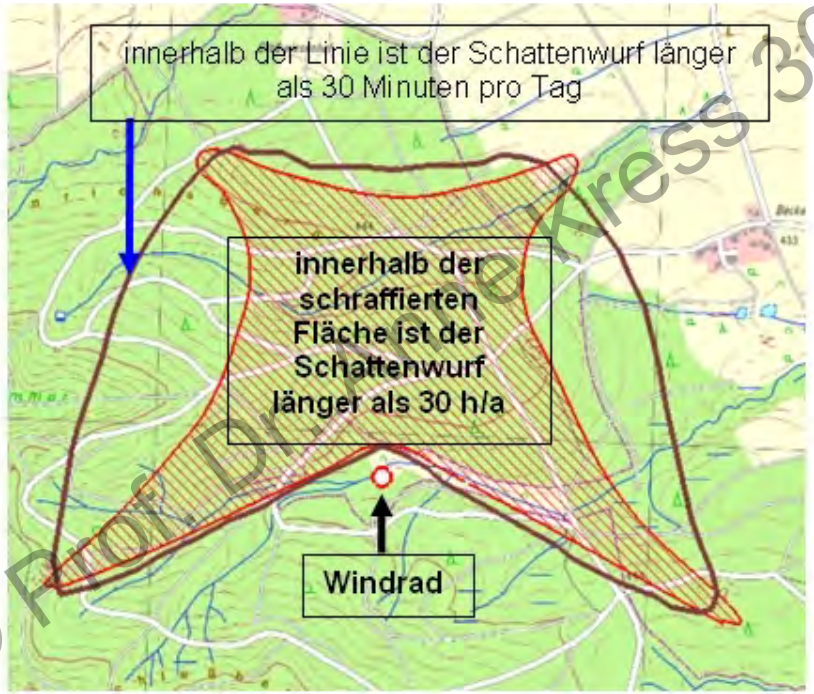
© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Beteiligungsmöglichkeiten



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schatten: Beispiel Schattenwirf einer WEA



Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schattenwurf: Definitionen

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

- **Astronomisch max. mögliche Beschattungsdauer**:
  Die Sonne scheint immer, die Anlage dreht sich immer, der WEA-Schatten hat immer maximale Größe
- **Meteorologisch wahrscheinliche Beschattungsdauer**:
  Langjähriges Mittel, berücksichtigt die mittlere Sonnenscheindauer, Windhäufigkeit und –richtung
- **Tatsächliche Beschattungsdauer**:
  Abhängig von den Wetterbedingungen in einem Jahr

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schattenwurf Berechnung

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

Nach LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz)

- Schattenwurf ist nur *innerhalb der 20%-Grenze* relevant
- Der *Rezeptor ist ein Punkt* in einer Höhe von 2m über Grund
- Zur besseren Vergleichbarkeit wird die *astronomisch maximal mögliche Beschattungsdauer* („worst-case“) berechnet:
  - Die Sonne scheint von Sonnenauf- bis –untergang ununterbrochen
  - Die WEA ist immer im Betrieb und dreht sich
  - Der Wind kommt immer aus der gleichen Richtung wie die Sonne (maximale Größe des Rotordurchmessers)

Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windkraftanlagen
Aktualisierung 2019
(WKA-Schattenwurfhinweise)
https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/wka_schattenwurfhinweise_stand_23_1588595757.01 (25.11.2023)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schattenwurf Grenzwerte

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

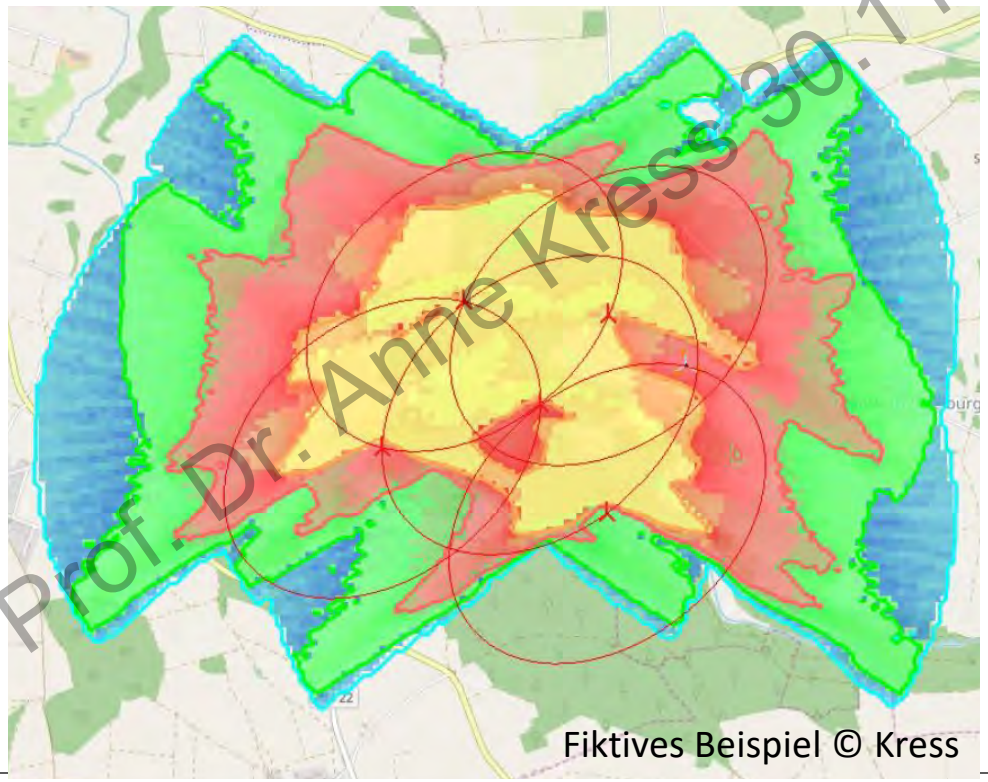
Nach LAI (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz)

- Unter diesen Umständen sollten an einem Immissionspunkt (z.B. Wohnhaus, Büro) nicht mehr auftreten als:
  - 30 Stunden Schattenwurf pro Jahr
  - 30 Minuten Schattenwurf pro Tag
- Andernfalls soll eine Abschaltautomatik in die WEA eingebaut werden, die die WEA deaktiviert wenn
  - ein Immissionspunkt mehr als 30 Minuten tatsächlich Schattenwurf an einem Tag empfängt
  - ein Immissionspunkt mehr als 8 Stunden tatsächlichen Schatten im Jahr empfängt (hier nicht „worst-case“, deshalb 8 statt 30 Stunden)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

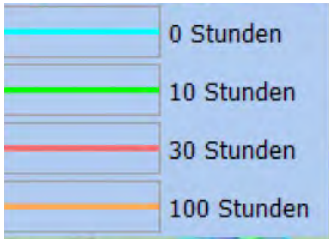
Schatten: Berechnung Windparklayout

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023



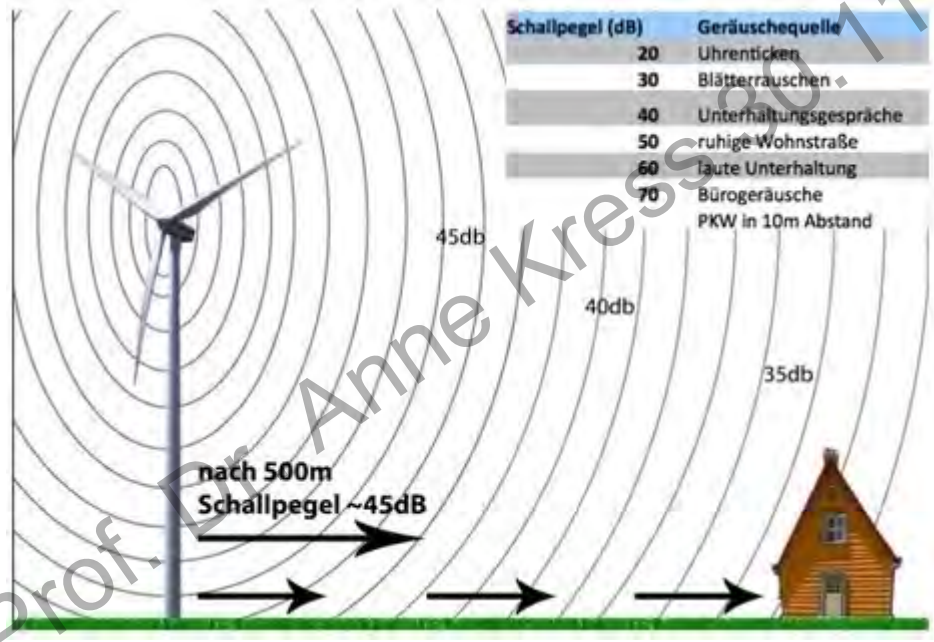
Fiktives Beispiel © Kress

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten



Schall (I)

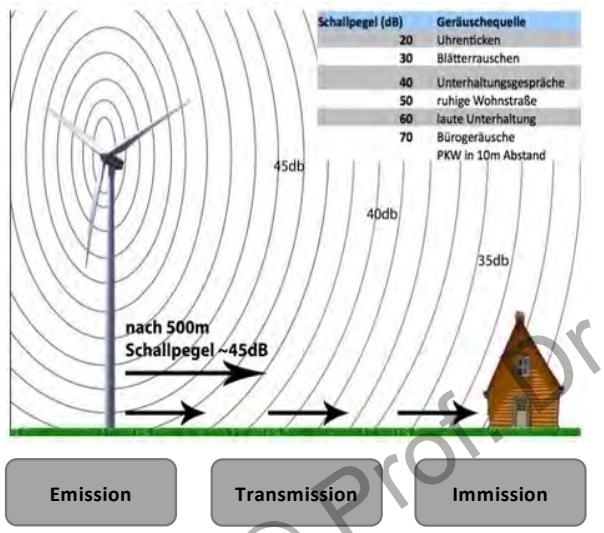
Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten



Emission **Transmission** **Immission**

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schall (II)



Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

Schallentwicklung…

… wird bei WEAs an der Nabe gemessen

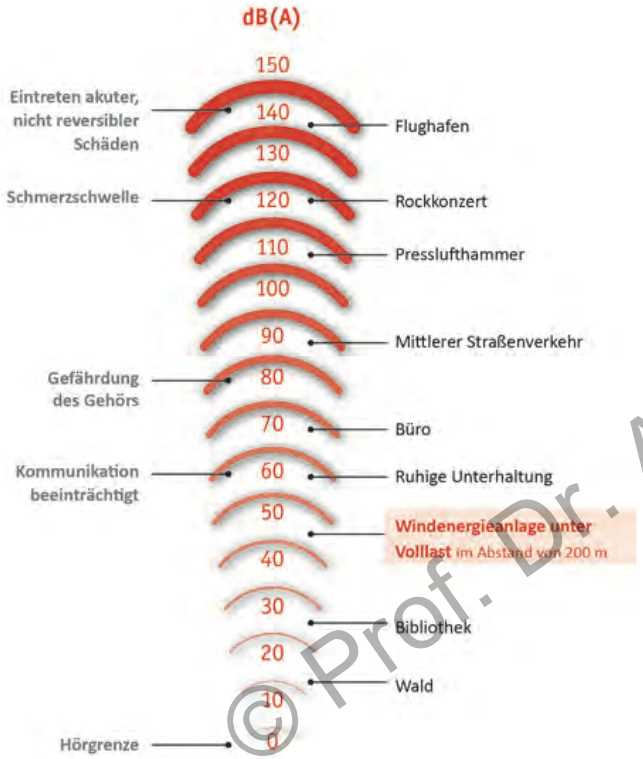
…nimmt mit der Entfernung rapide ab

… ist abhängig von der Windgeschwindigkeit

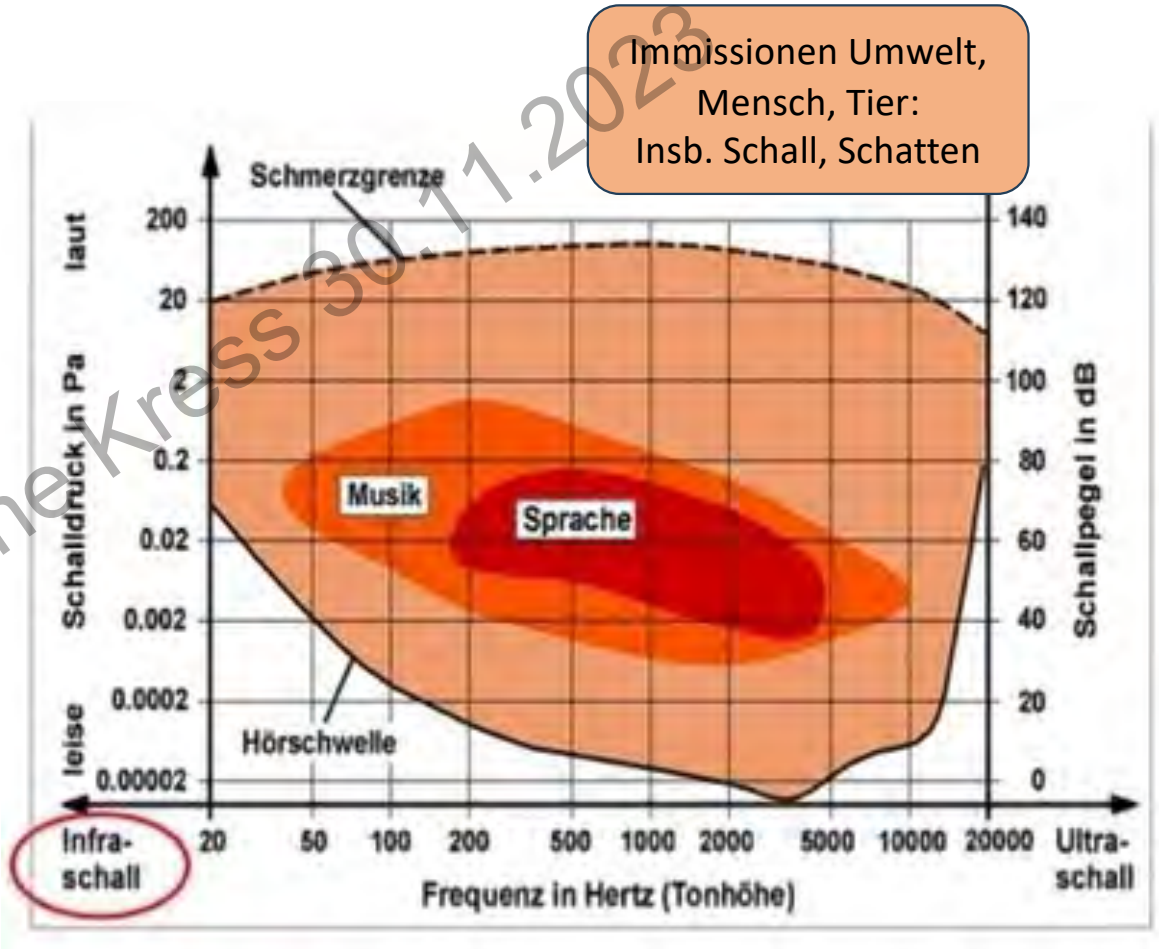
…wird rasch vom eigentlichen Windgeräusch übertönt

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schall (III)



Quelle: http://www.wind-energie.de/infocenter/planung/infraschall (05.11.2023)



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schall: Messung an WEA

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

- Das WEA-Geräusch wird als Punktschallquelle (Nabe) abgebildet, die einen *Schallleistungspegel* emittiert
- Wie wird dieser Schalleistungspegel charakterisiert?
  - In D: Summenpegel → breitbandiges WEA-Geräusch wird zu einem zusammengefasst (alternativ Oktavband-Pegel – 8 Einzelpegel für jede Frequenz)
- Bei welcher Windgeschwindigkeit?
  - In D: Lautester Betriebszustand (i.d.R. bei 95% Nennleistung)
  - In beispielsweise AT, FR, UK: mehrere Betriebszustände (von Schwach- bis Starkwind)

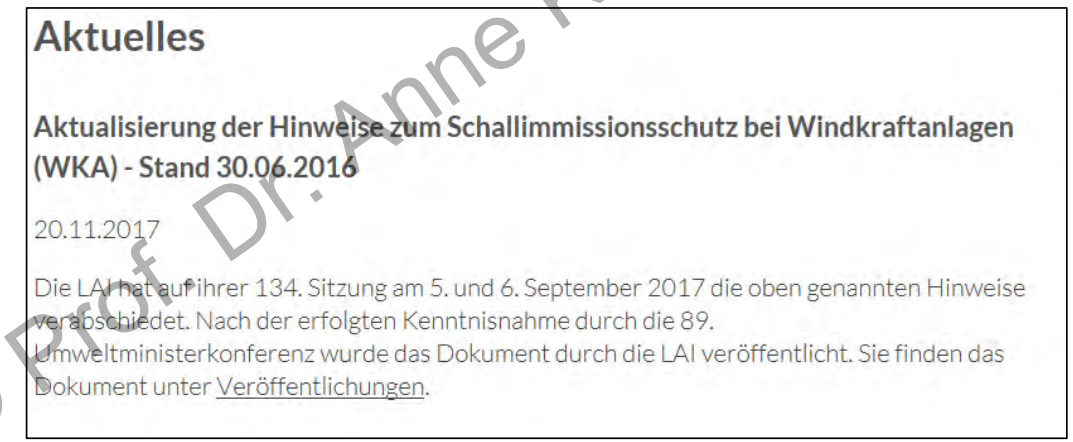
© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Schall: Umgang mit Unsicherheiten

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier: Insb. Schall, Schatten

Bei Zweifeln, welche Zuschläge angewendet werden sollen, können:

- i.d.R. die zuständigen Behörden Auskunft geben
- Die „Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windenergieanlagen“ der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) herangezogen werden



Aktuelles

Aktualisierung der Hinweise zum Schallimmissionsschutz bei Windkraftanlagen (WKA) - Stand 30.06.2016

20.11.2017

Die LAI hat auf ihrer 134. Sitzung am 5. und 6. September 2017 die oben genannten Hinweise verabschiedet. Nach der erfolgten Kenntnisnahme durch die 89. Umweltministerkonferenz wurde das Dokument durch die LAI veröffentlicht. Sie finden das Dokument unter Veröffentlichungen.

© Prof. Dr. Anne Kiess 30.11.2023

https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/20171201-top09_1_anlage_lai_hinweise_wka-_stand_2016_06_30_veroeffentlicht_2_1512116255.pdf (25.11.2023)

Schall Grenzwerte

Die TA Lärm weist folgende Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden aus:

Gebiete	Tageszeit	Immissionsrichtwert
a) in Industriegebieten		**70 dB(A)**
b) in Gewerbegebieten		
	tags	**65 dB(A)**
	nachts	**50 dB(A)**
c) in urbanen Gebieten		
	tags	**63 dB (A)**
	nachts	**45 dB (A)**
d) in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten		
	tags	**60 dB(A)**
	nachts	**45 dB(A)**
e) in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten		
	tags	**55 dB(A)**
	nachts	**40 dB(A)**
f) in reinen Wohngebieten		
	tags	**50 dB(A)**
	nachts	**35 dB(A)**
g) in Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten		
	tags	**45 dB(A)**
	nachts	**35 dB(A)**

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten

Nacht 22:00 – 06:00 Uhr

Nutzungsart: Vom Bebauungsplan übernehmen oder in Absprache mit den Behörden ermitteln

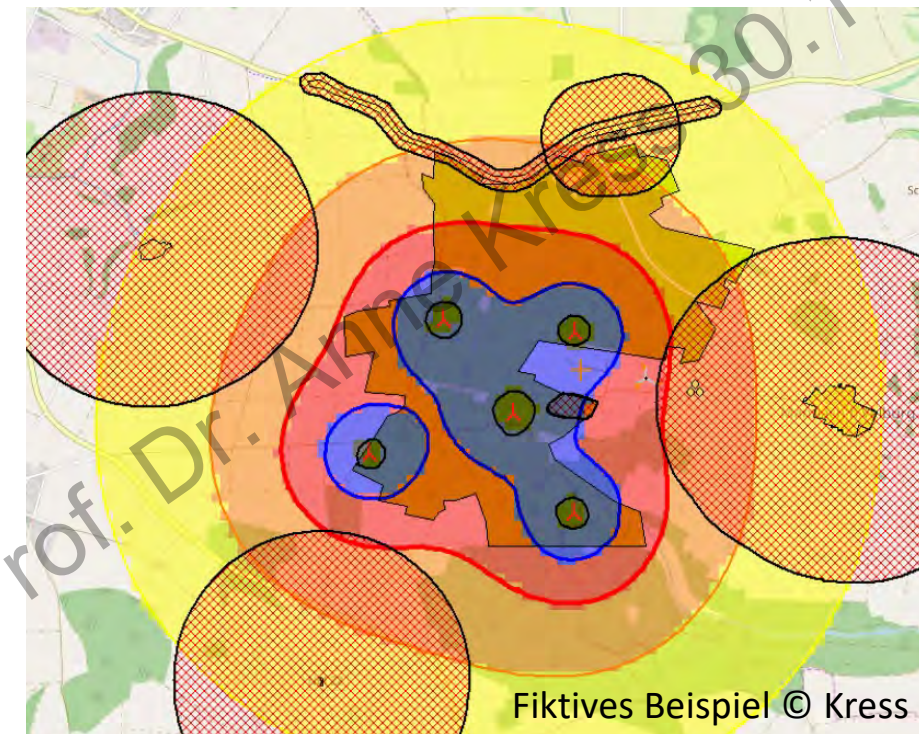
https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/05-schall/20181123_BWE_Informationspapier_Schall_und_WEA.pdf (25.11.2023)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

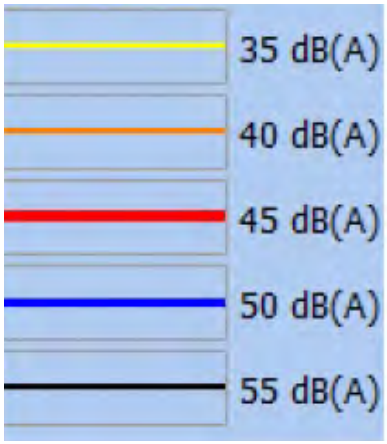
Schall: Berechnung Schallimmissionen

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten

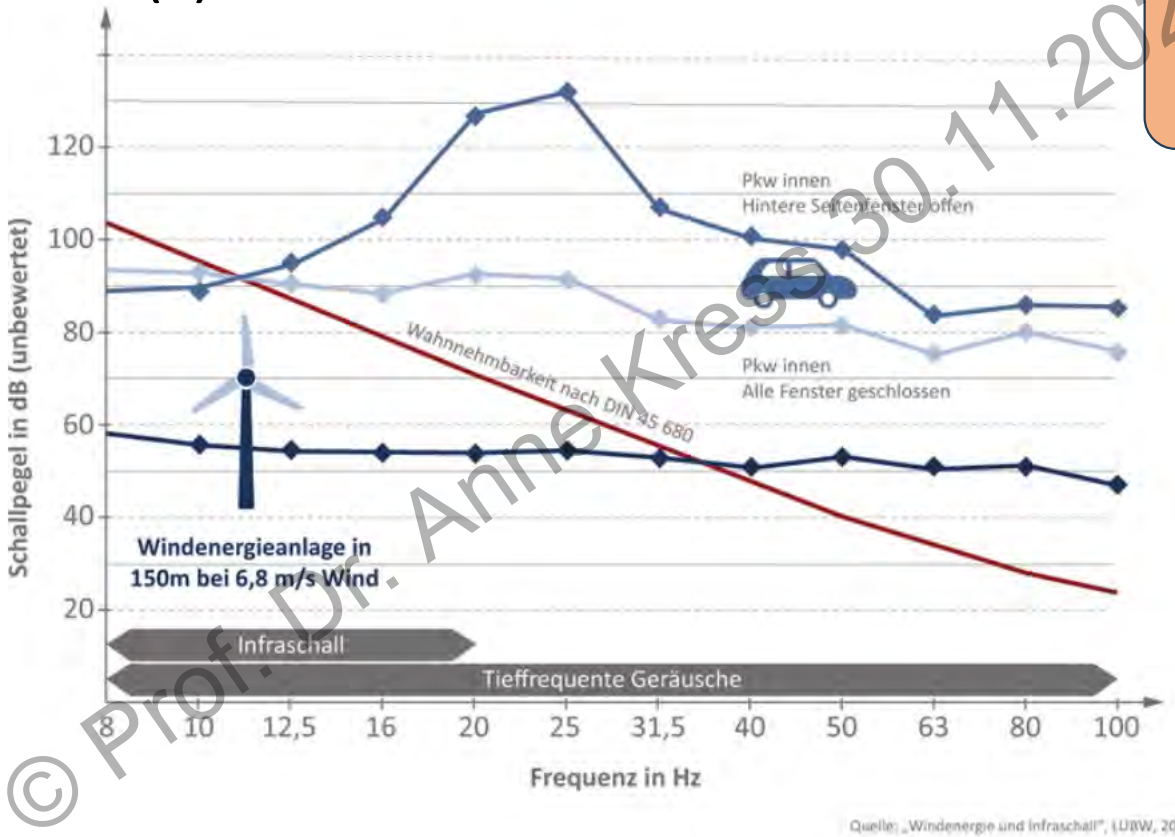


Fiktives Beispiel © Kress



Infraschall (I)

Immissionen Umwelt, Mensch, Tier:
Insb. Schall, Schatten



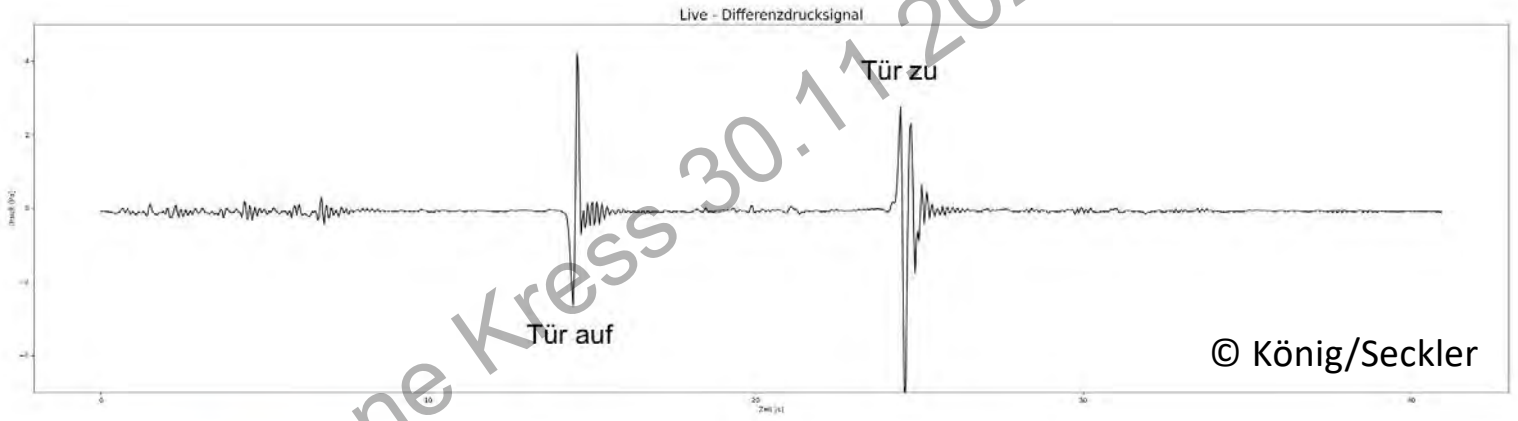
Quelle: „Windenergie und Infraschall", LUBW, 2014

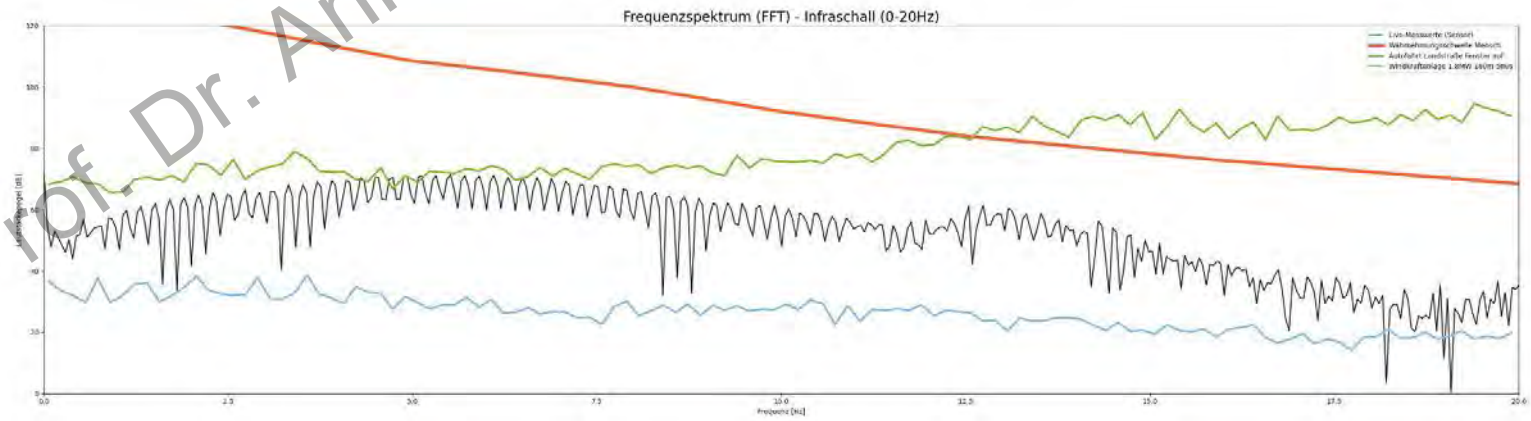
© Prof. Dr. Anne Kress - 30.11.2023

https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/01-mensch-und-umwelt/05-schall/20181123_BWE_Informationspapier_Schall_und_WEA.pdf (25.11.2023)

Infraschall (II)

© König/Seckler

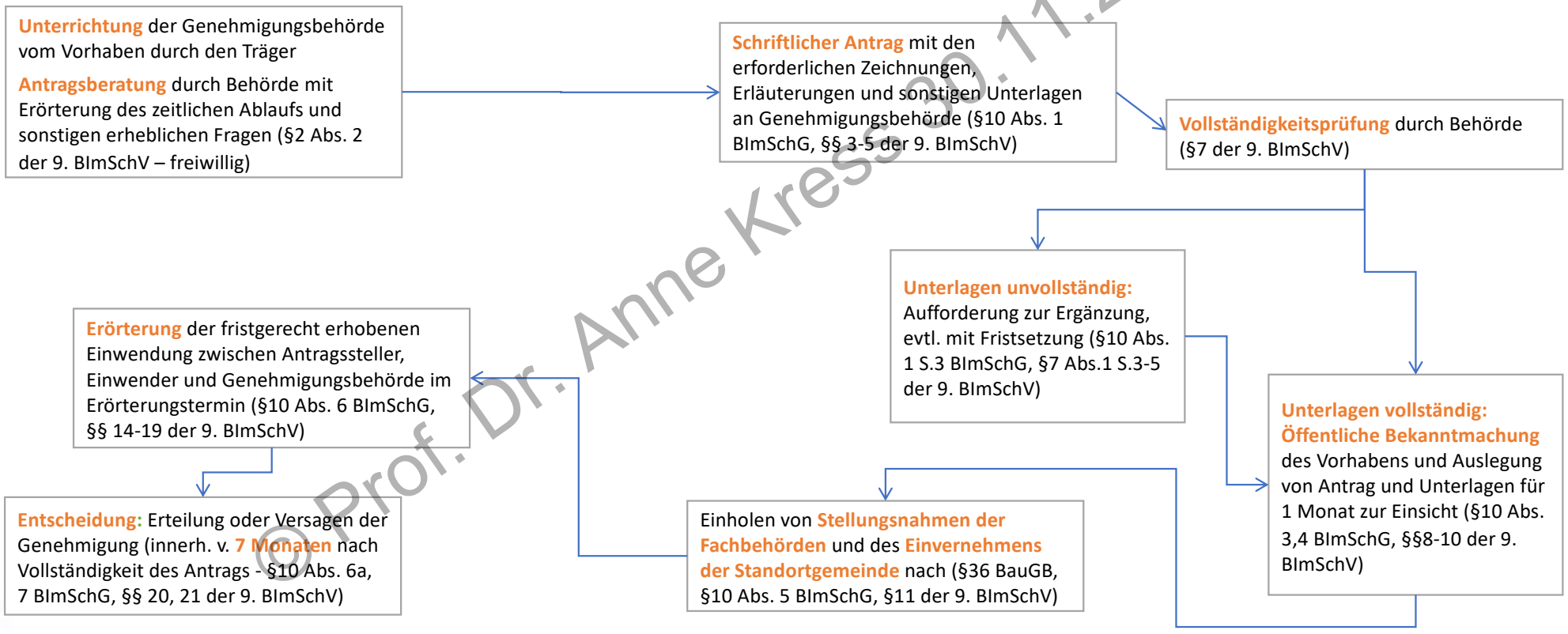




Live zu erleben am 21.01.2024 in Altötting

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Genehmigungsverfahren: Ablauf des förmlichen Verfahrens (§10 BImSchG)



© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

Literatur

- FA Wind (2023a): Ausbausituation der Windenergie an Land im Jahr 2022. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Analysen/FA_Wind_Zubauanalyse_Wind-an-Land_Gesamtjahr_2022.pdf (15.11.2023)
- FA Wind (2023b): Entwicklung der Windenergie im Wald Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern 8. Auflage. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Windenergie_im_Wald/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_8Auflage_2023.pdf (25.11.2023)
- FA Wind (2023c): Kompaktwissen Bürgerenergie. https://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/Beteiligung/FA_Wind_Kompaktwissen_Buergerwind_02-2023.pdf (25.11.2023)
- BWE/VDMA/Deutsche Wind Guard (2023): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland 2022. Varel. https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/publikationen-oeffentlich/themen/06-zahlen-und-fakten/20230118_Status_des_Windenergieausbaus_an_Land_Jahr_2022.pdf (15.11.2023)
- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. CLIMATE CHANGE 35/2021. FB000545. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35_2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf (15.11.2023)
- Fraunhofer ISE (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Juni 2021. Freiburg. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf (15.11.2023)

© Prof. Dr. Anne Kress 30.11.2023

HERZLICHEN DANK!

© Prof. Dr. Anne Kress