

---

# ROHSTOFFE FÜR ZUKUNFTSTECHNOLOGIEN

Dr. Sabine Langkau, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI  
Sabine.Langkau@isi.fraunhofer.de

---



# Bergbau für Zukunftstechnologien

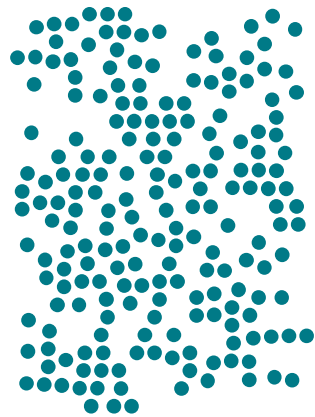


- Planung, Investitionen, Aufbau können lange Zeiträume in Anspruch nehmen

# Auswahl der Zukunftstechnologien

---

Sammlung  
neuer  
Technologien



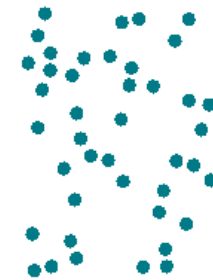
Einschätzung

Marktpotential  
Rohstoffbedarf



Wenn  
beides  
hoch

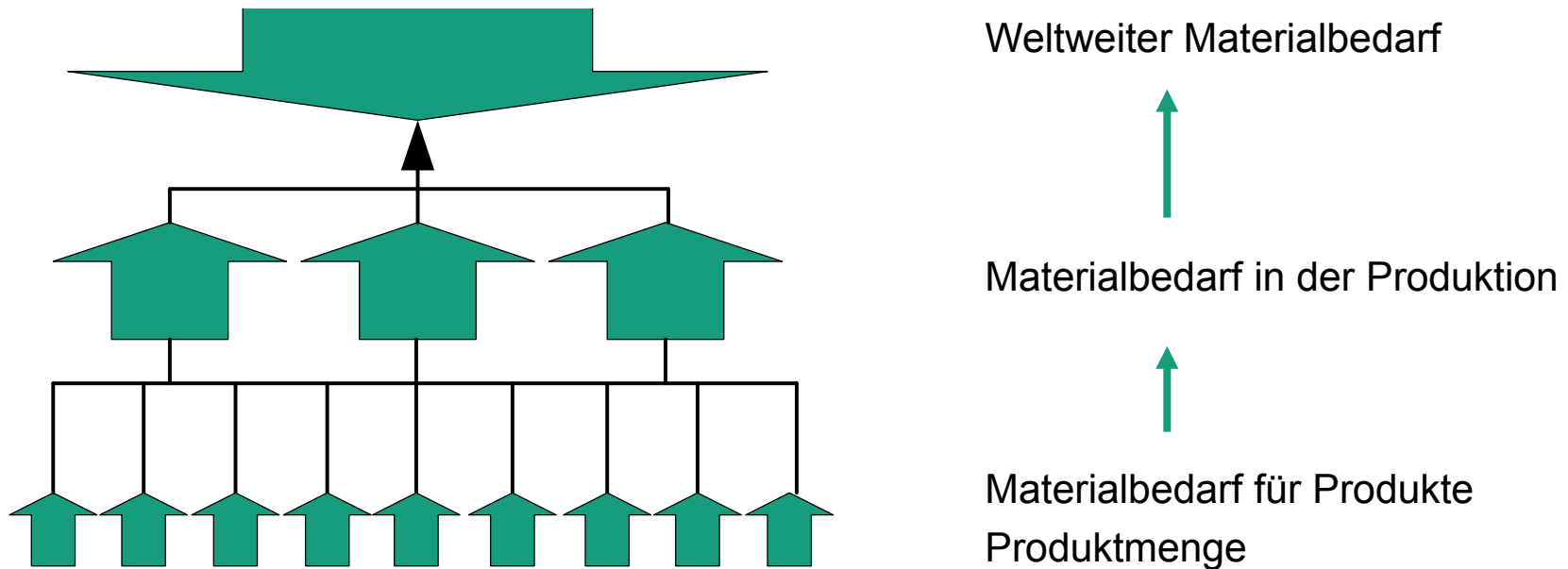
Ausgewählte  
Technologien



# Detaillierte Analyse des Materialbedarfs

---

- Bedarf und Angebot werden global betrachtet
- Bottom-up-Ansatz:



- Basierend auf Literaturrecherchen und Experteninterviews
- Szenarien zeigen plausible Zukunftsentwicklungen als Entscheidungshilfen
  - Für ökonomische und technologische Entwicklungen

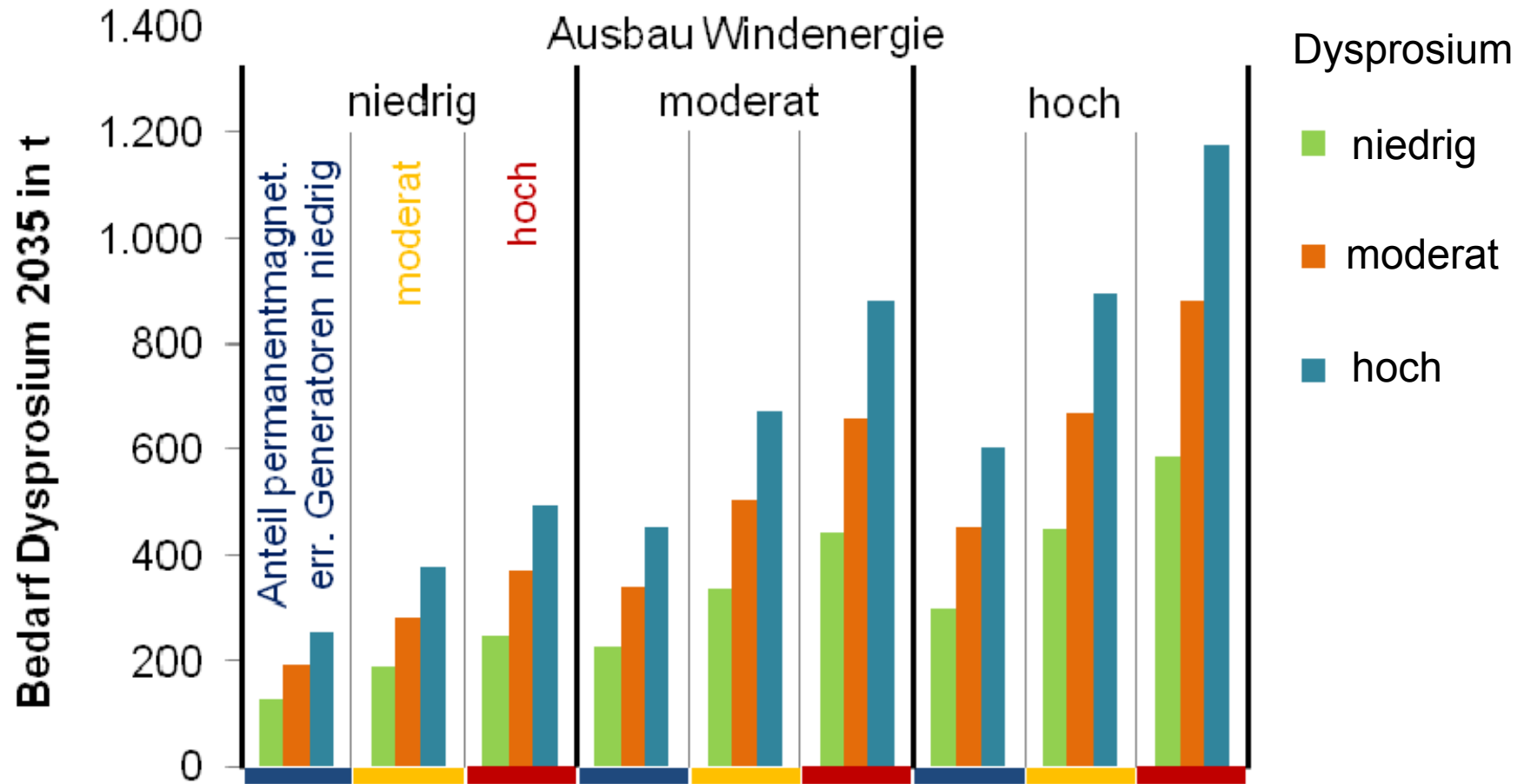
# Beispiel: Bedarf Seltener Erden für Windkraftanlagen

---



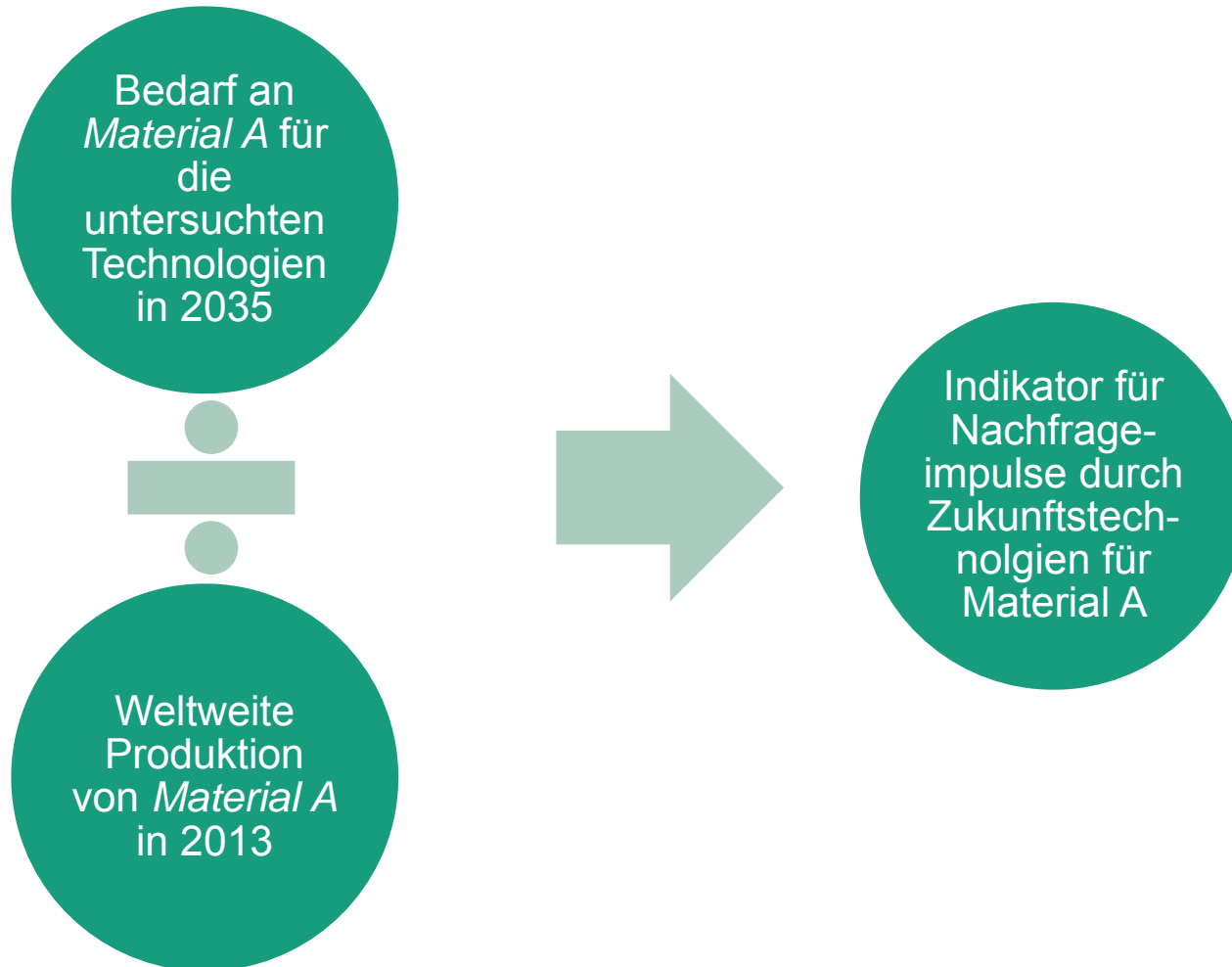
- Szenarien für
  - Anzahl Windkraftanlagen
  - Marktanteil verschiedener Generatortechnologien
  - Bedarf an Magnetmaterial und Seltenen Erden

# Beispiel: Bedarf Seltener Erden für Windkraftanlagen

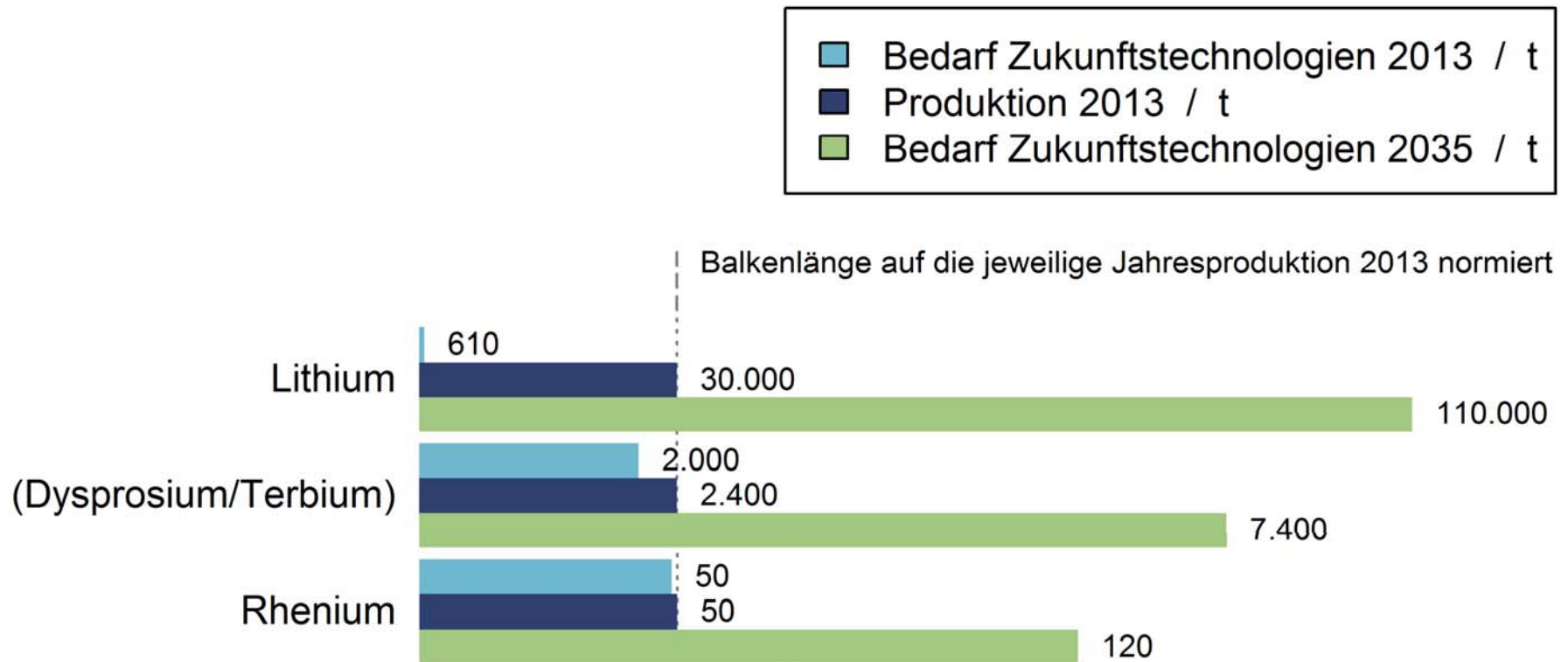


# Rohstoffindikatoren

---



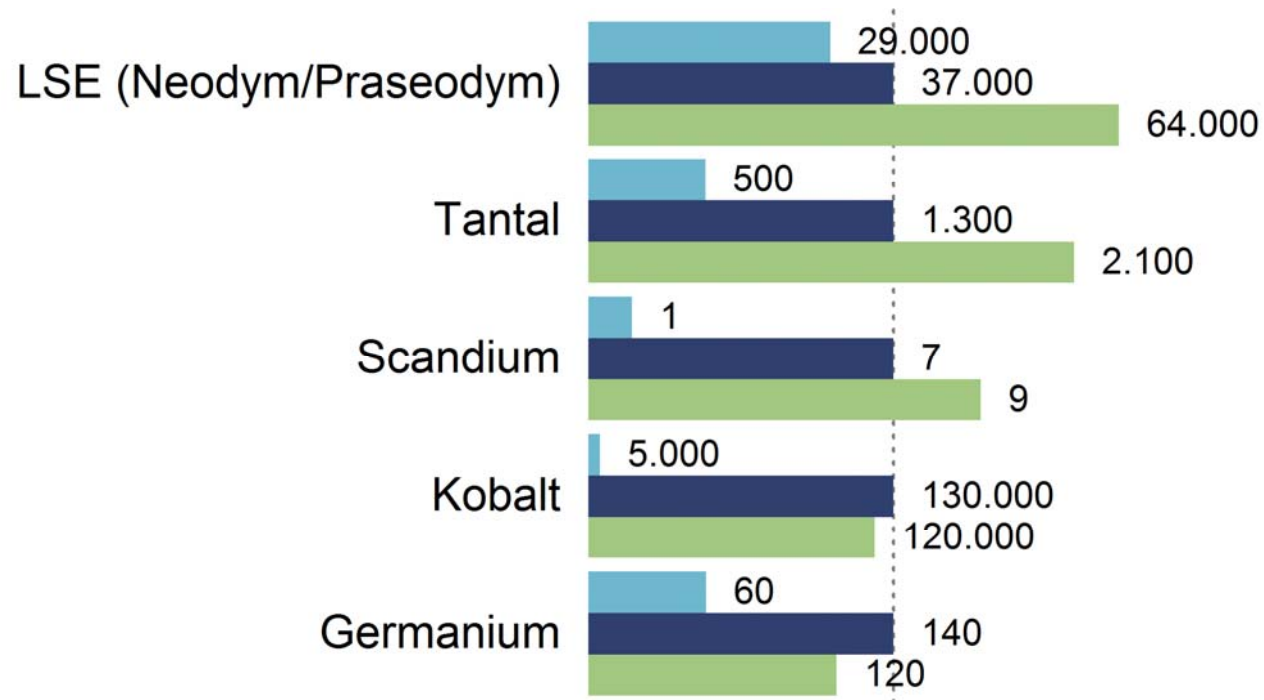
# Rohstoffindikatoren >200%



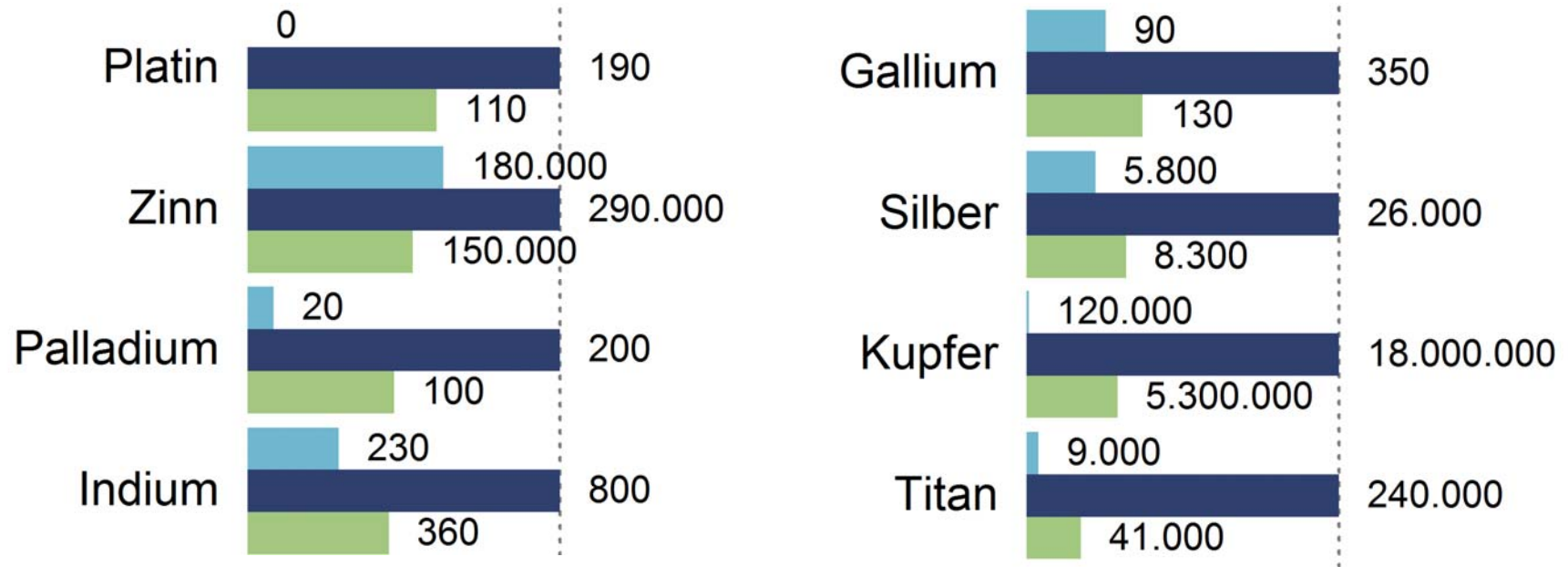


# Rohstoffindikatoren > 100 % oder ≈100%

---



# Rohstoffindikatoren <100%



- Bedarf Zukunftstechnologien 2013 / t
- Produktion 2013 / t
- Bedarf Zukunftstechnologien 2035 / t

# Heimische Rohstoffe für Zukunftstechnologien?

---

- Die meisten “Rohstoffe für Zukunftstechnologien” werden hauptsächlich im Ausland abgebaut
  - teilweise geologisch, teilweise wirtschaftlich bedingt
- Inwiefern kann heimischer Rohstoffabbau in Zukunft zur Versorgungssicherheit beitragen?
- z.B. SEE als Beifang sedimentärer Lagerstätten Südbayerns (Decker et al. 2016)



# Back Up

---

# Selected technology portfolio (42 technologies)

## Transport

- Tailored blanks (lightweight vehicles)
- Electrical traction motors (vehicles)
- PEM-Fuel cells (electric vehicles)
- Supercapacitors (for motor vehicles)
- Scandium alloys (aircraft)
- Autopilot (motor vehicles)
- Drones

## ICT & optical technologies

- Lead-free solders
- RFID – Radio Frequency Identification
- Flat panel displays (focus on ITO)
- Infrared detectors for night vision
- White LED
- Optical fibers
- Capacitors (microelectronics)
- High-performance microchips

## Electrical engineering, energy

- High-efficiency industrial electric motors
- Thermoelectric generators
- Dye-sensitized solar cells
- Thin film solar cells
- Solar thermal power stations
- SOFC- Stationary fuel cells
- CCS - Carbon capture and storage
- Lithium ion batteries (for vehicles)
- Redox-flow batteries
- Vacuum isolation
- Inductive energy transmission
- Thermal storage
- Micro-energy harvesting
- Wind power plants

## Medical technologies

- Orthopaedic implants
- Medical tomography

## Chemical, environmental & mechanical engineering

- Synthetic fuels
- Sea water desalination
- Solid-state lasers for manufacturing
- Nano-silver

## Material science & technology

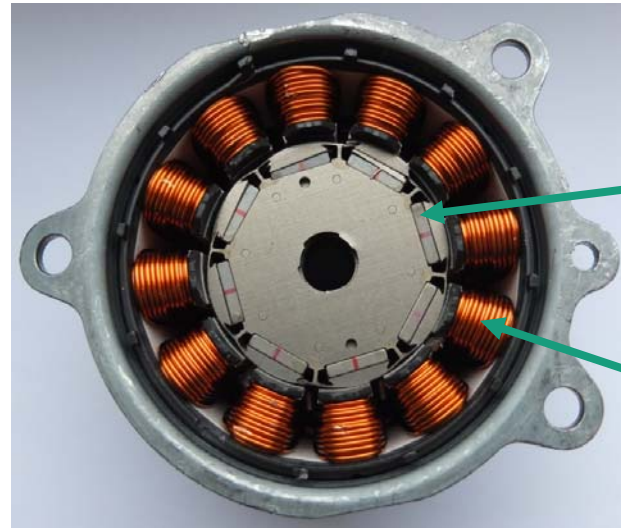
- Superalloys
- High-temperature superconductors
- High-performance permanent magnets
- Industry 4.0
- Carbon fibers (lightweighting)
- Carbon nanotubes
- Additive manufacturing („3D printing“)

# Ein Beispiel: Hochleistungspermanentelemente NdFeB

- 32 gew.-% Seltenerdelemente:
  - Leichte Seltenerdelemente: Neodym (Nd), Praseodym (Pr)
  - Schwere Seltenerdelemente: Dysprosium (Dy), Terbium (Tb)



- Dimension zweier NdFeB-Magneten, die kaum noch von Hand zu trennen sind

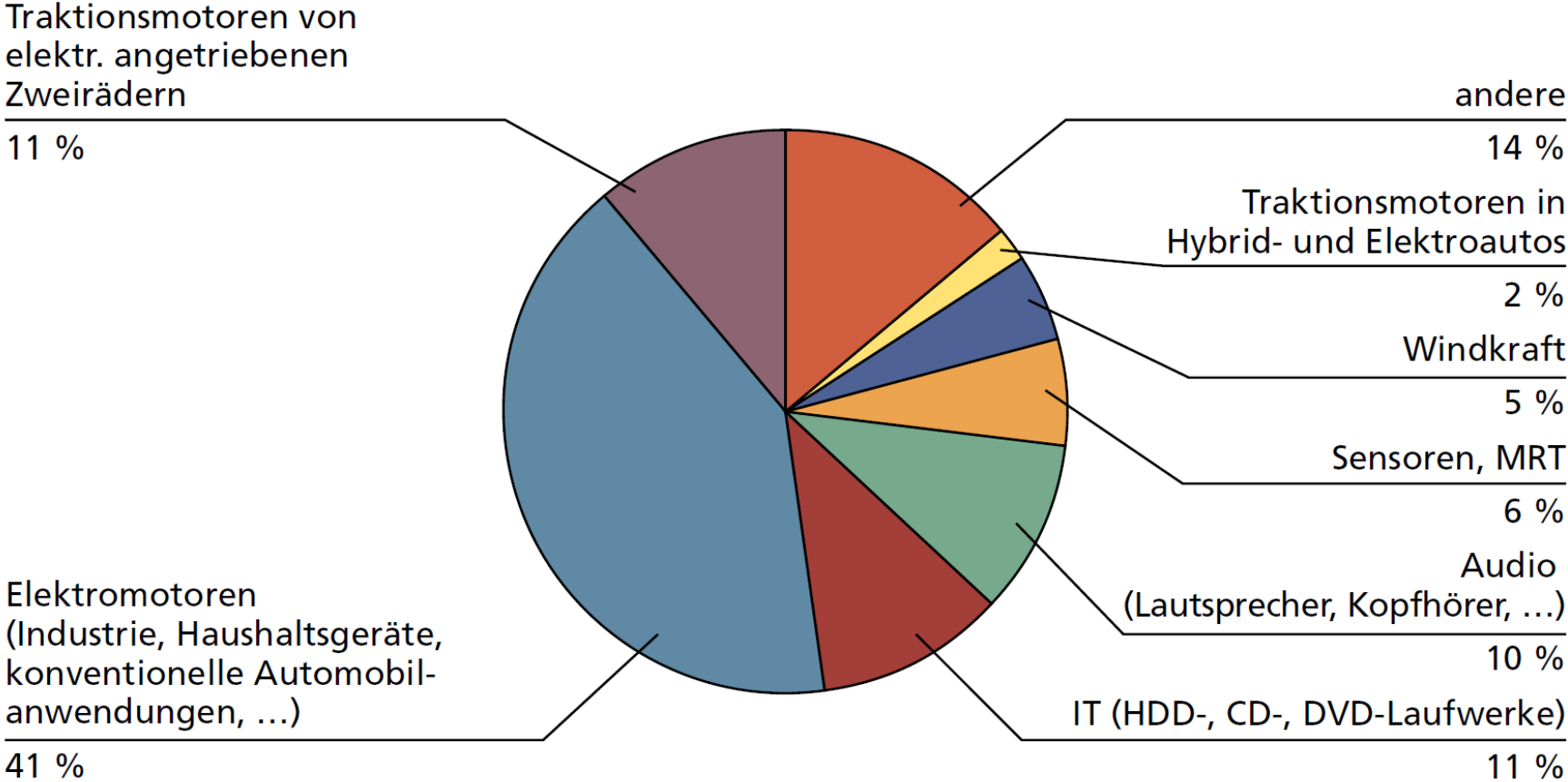


NdFeB-Magnete des Rotors

Kupfer-spulens des Stators

- Einsatz in Elektromotoren

# Hochleistungspermanente: Anwendungsfelder weltweit



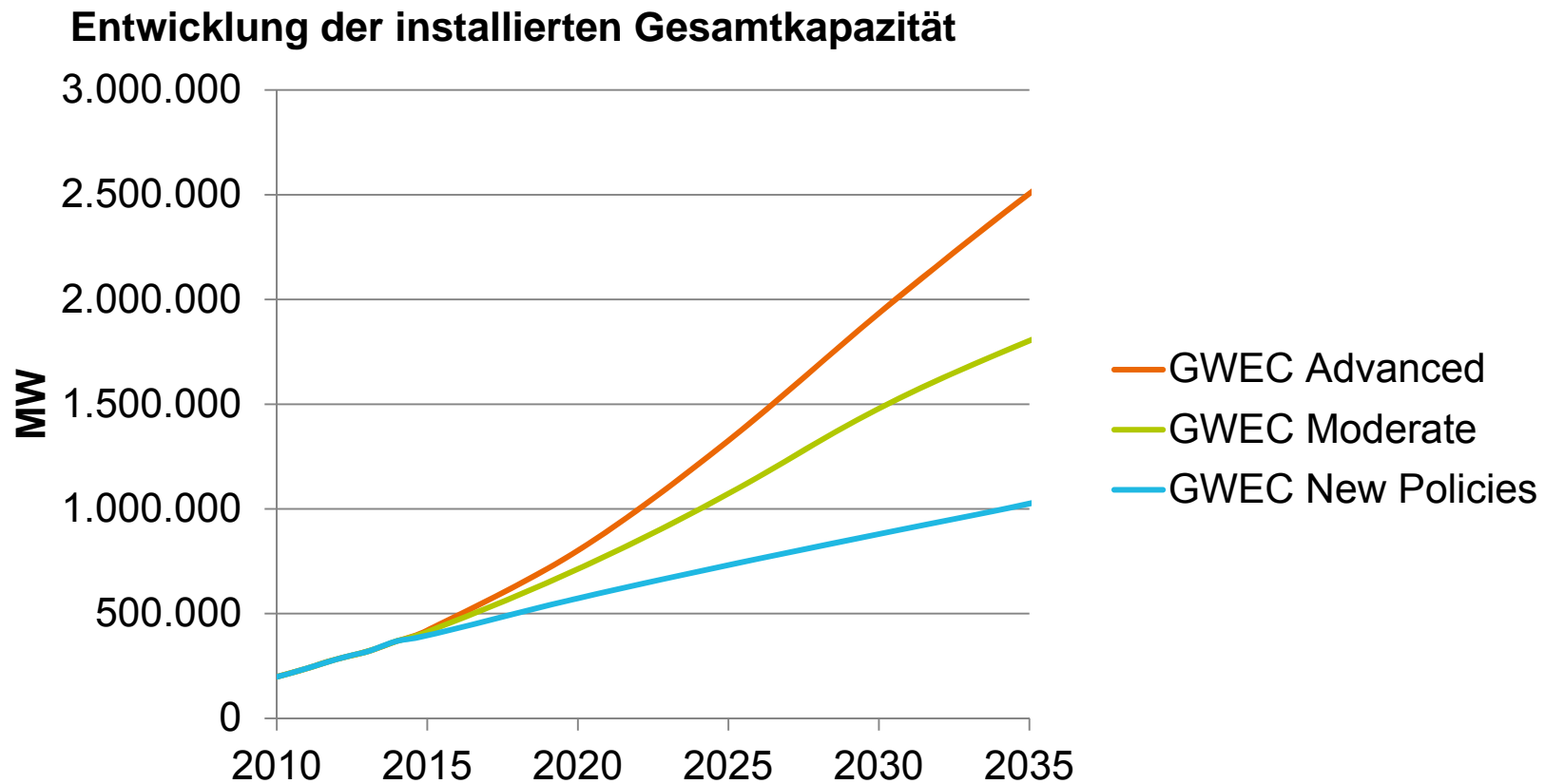
Quelle: Glöser-Chahoud, Tercero-Espinoza 2015

# Anwendungsbeispiel: Windkraftanlagen





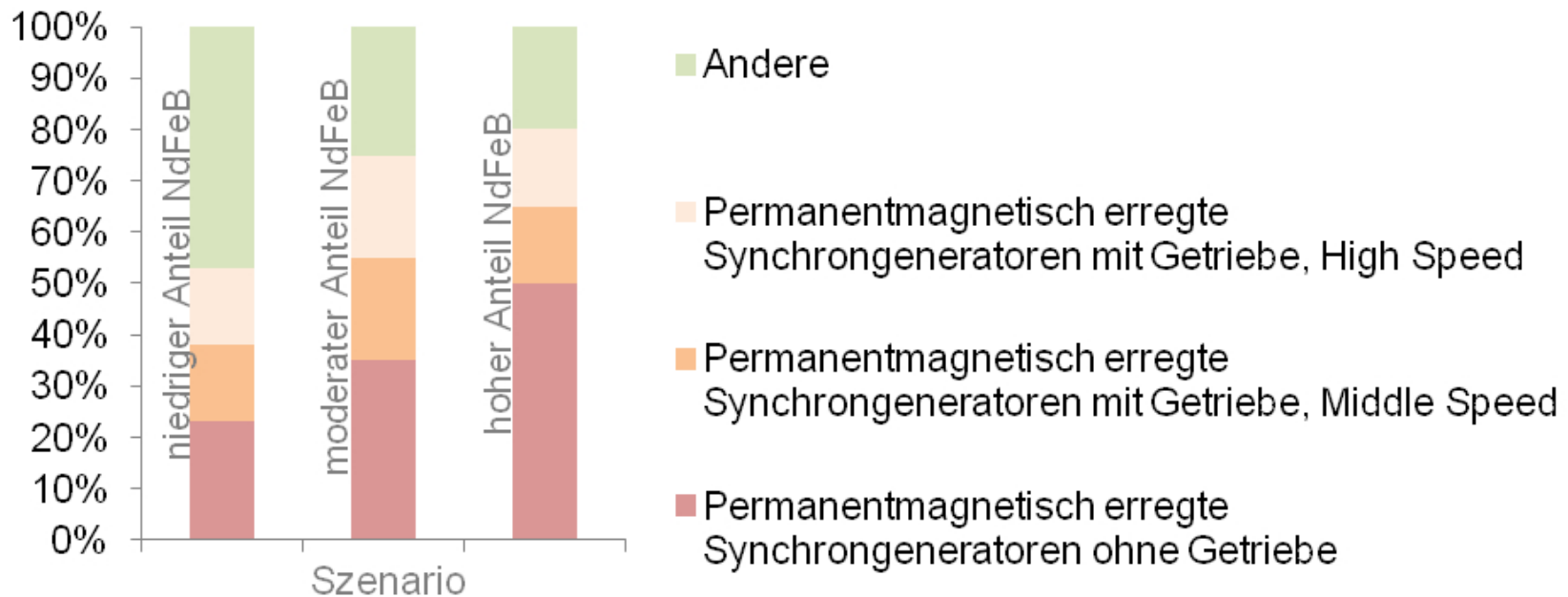
# Windkraftanlagen: Marktentwicklung bis 2035



- Global Wind Energy Outlook (*Global Wind Energy Council & Greenpeace 2014*)

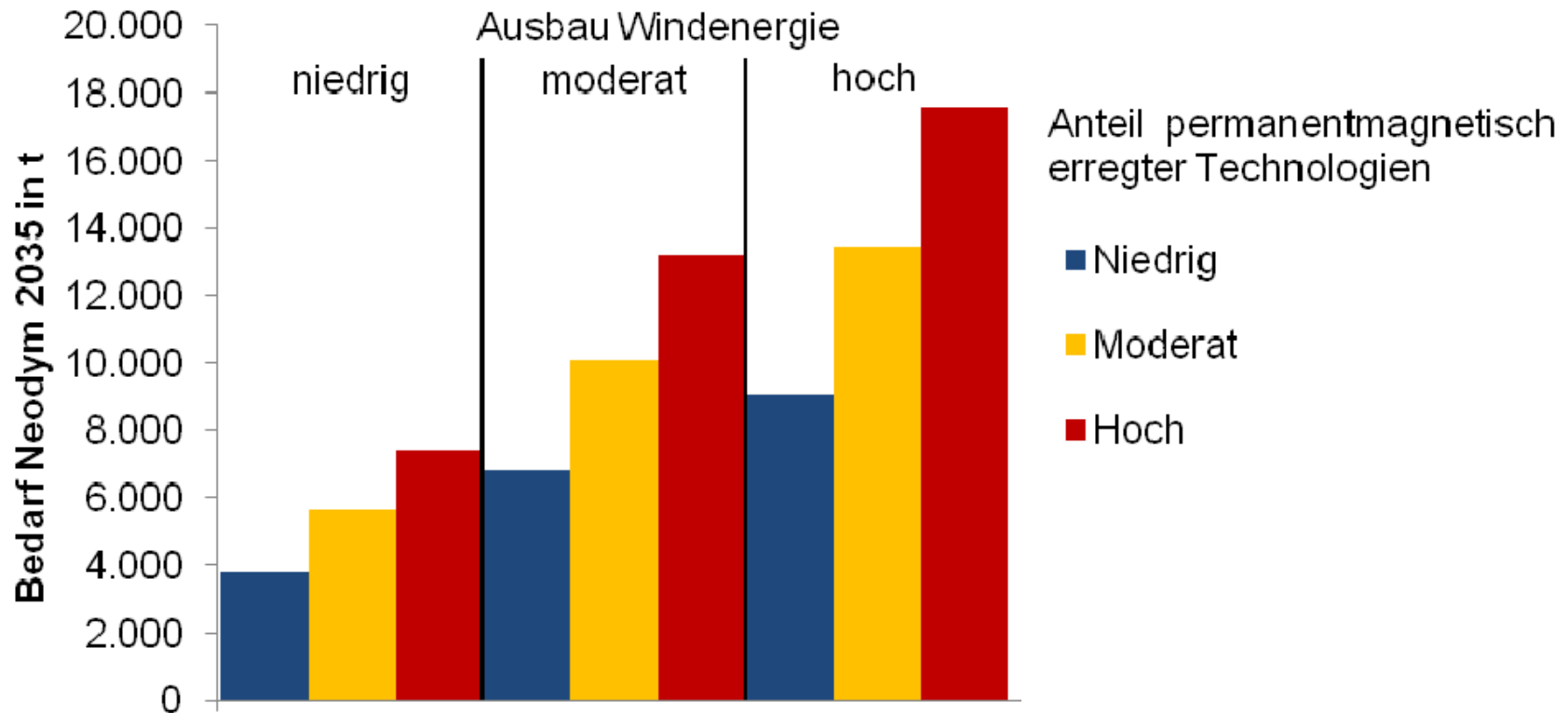
# Windkraftanlagen: Marktanteile Generatortechnologien

	Asynchrongeneratoren	Synchrongeneratoren
Elektrisch erregt	Getriebe (High Speed)	Direct Drive
Permanentmagnetisch erregt		Getriebe (High Speed)
		Getriebe (Middle Speed)
		Direct Drive

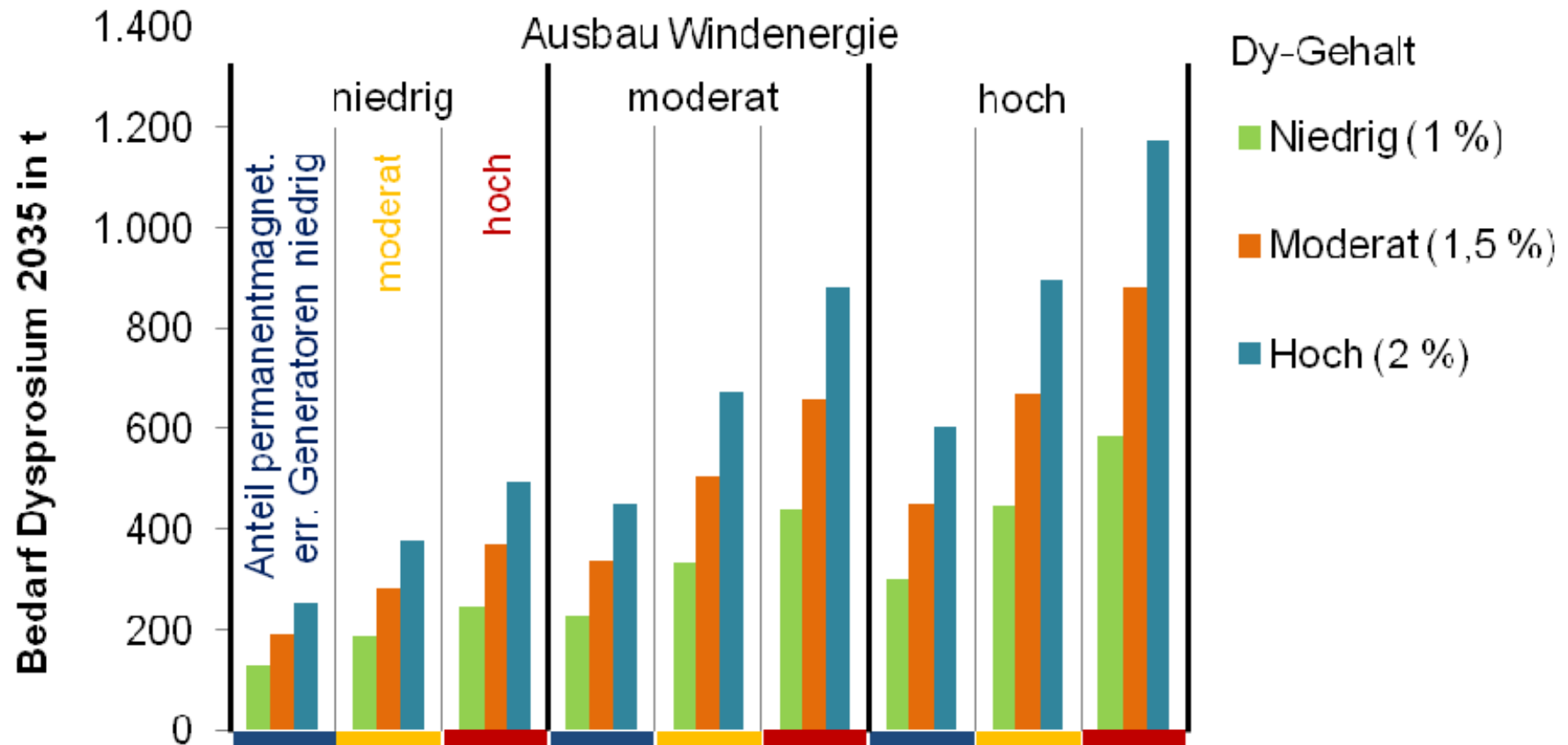


# Windkraftanlagen: Globaler Bedarf Neodym, Praseodym 2035

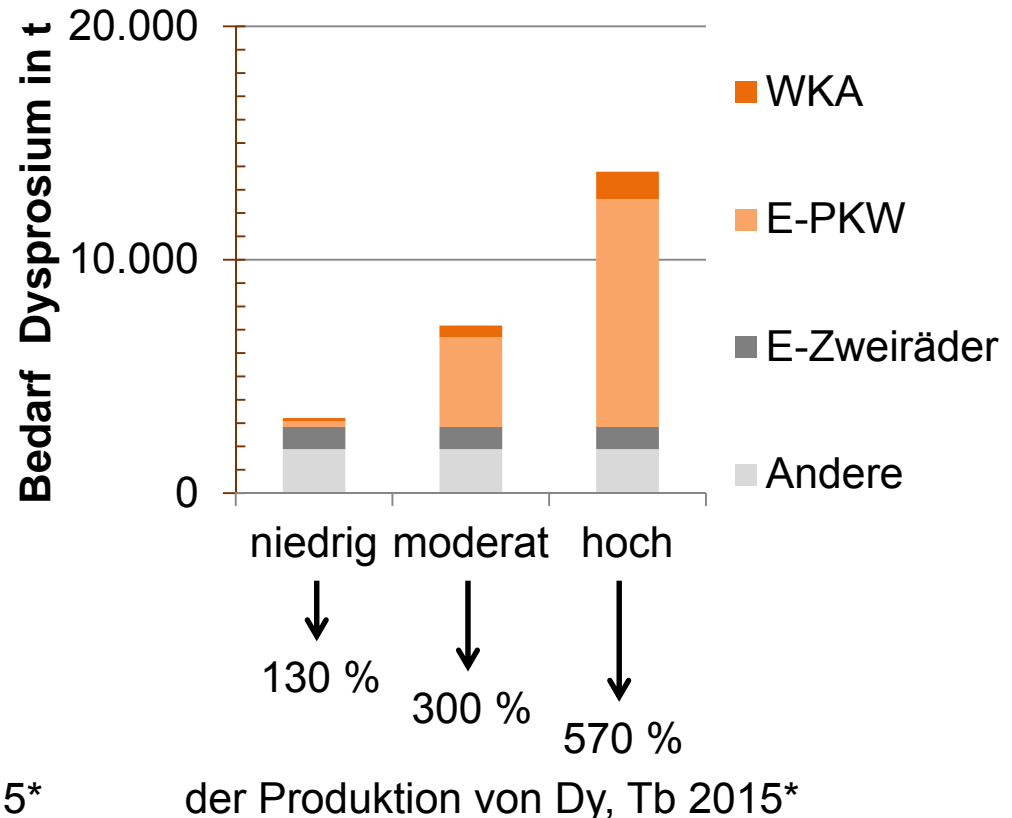
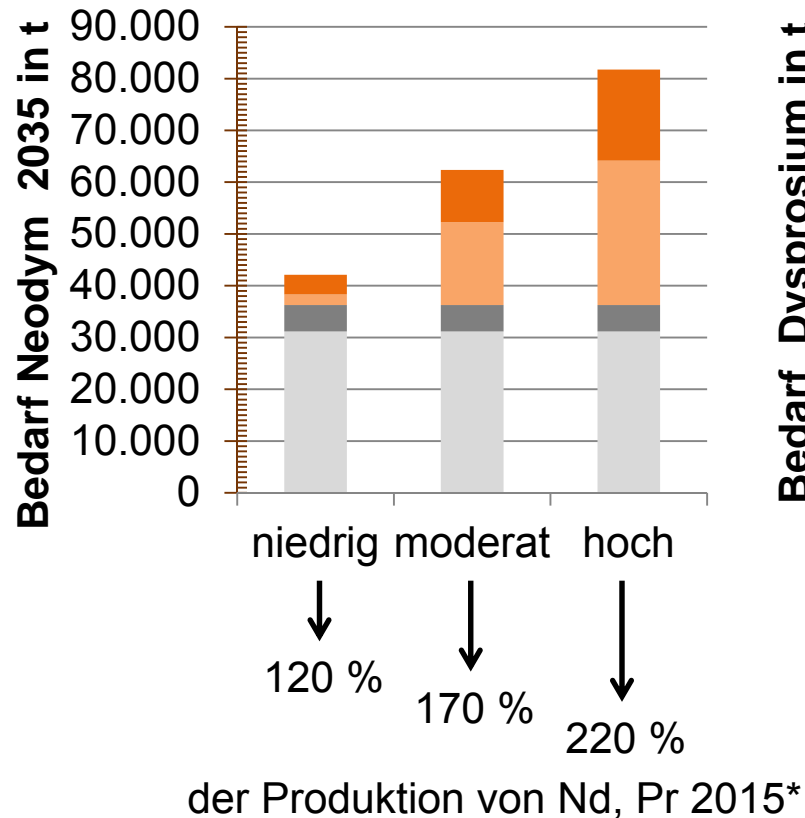
- Spezifischer Bedarf an NdFeB für magnetisch erregte Generatoren: 650 kg/MW (Direct Drive), 160 kg/MW (High-Speed), 80 kg/MW (Middle-Speed) nach *Viebahn et al. 2014, EC 2011*



# Windkraftanlagen: Globaler Bedarf Dysprosium, Terbium 2035



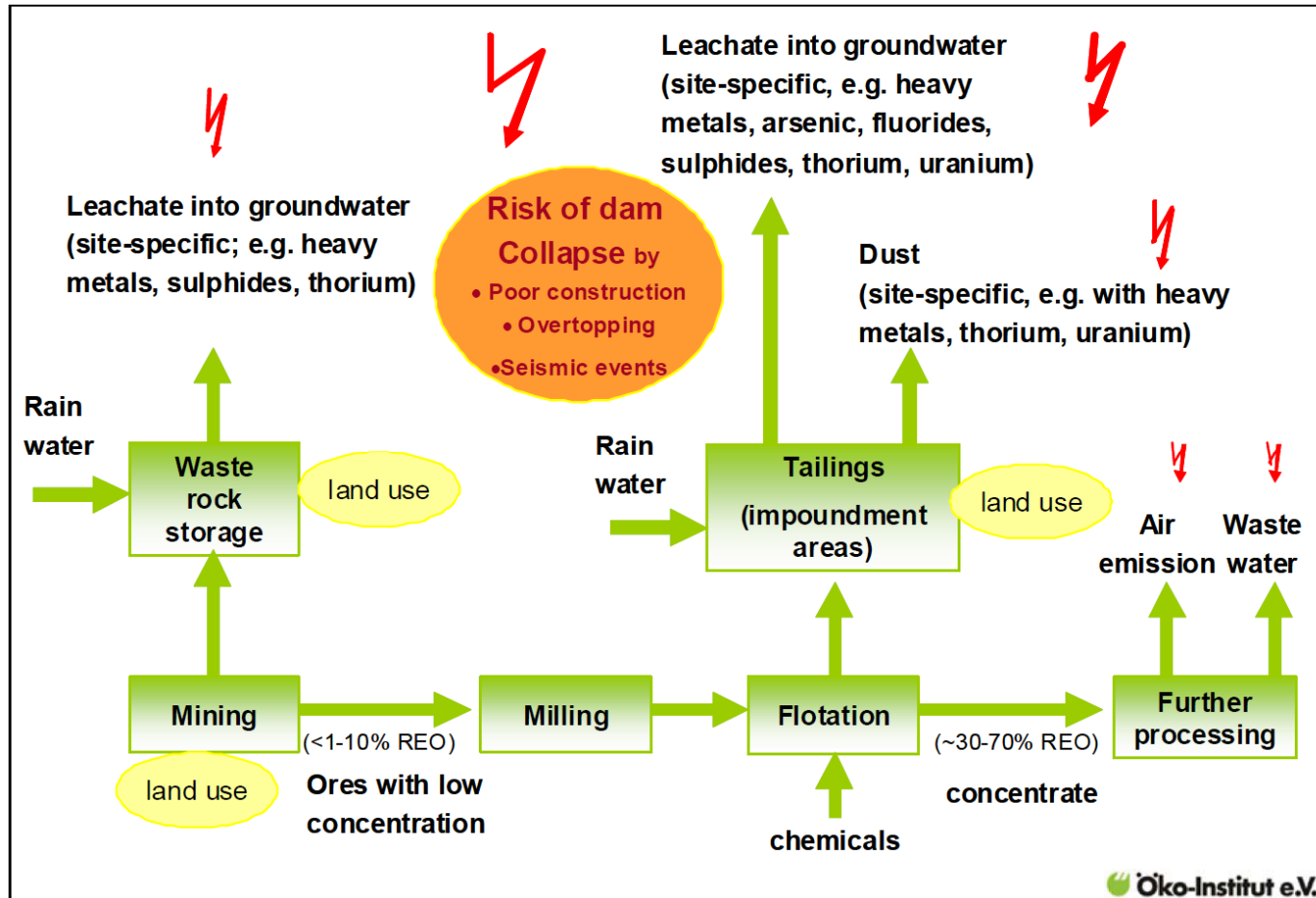
# Bedarf an Neodym und Dysprosium für Hochleistungs-Permanentmagneten 2035



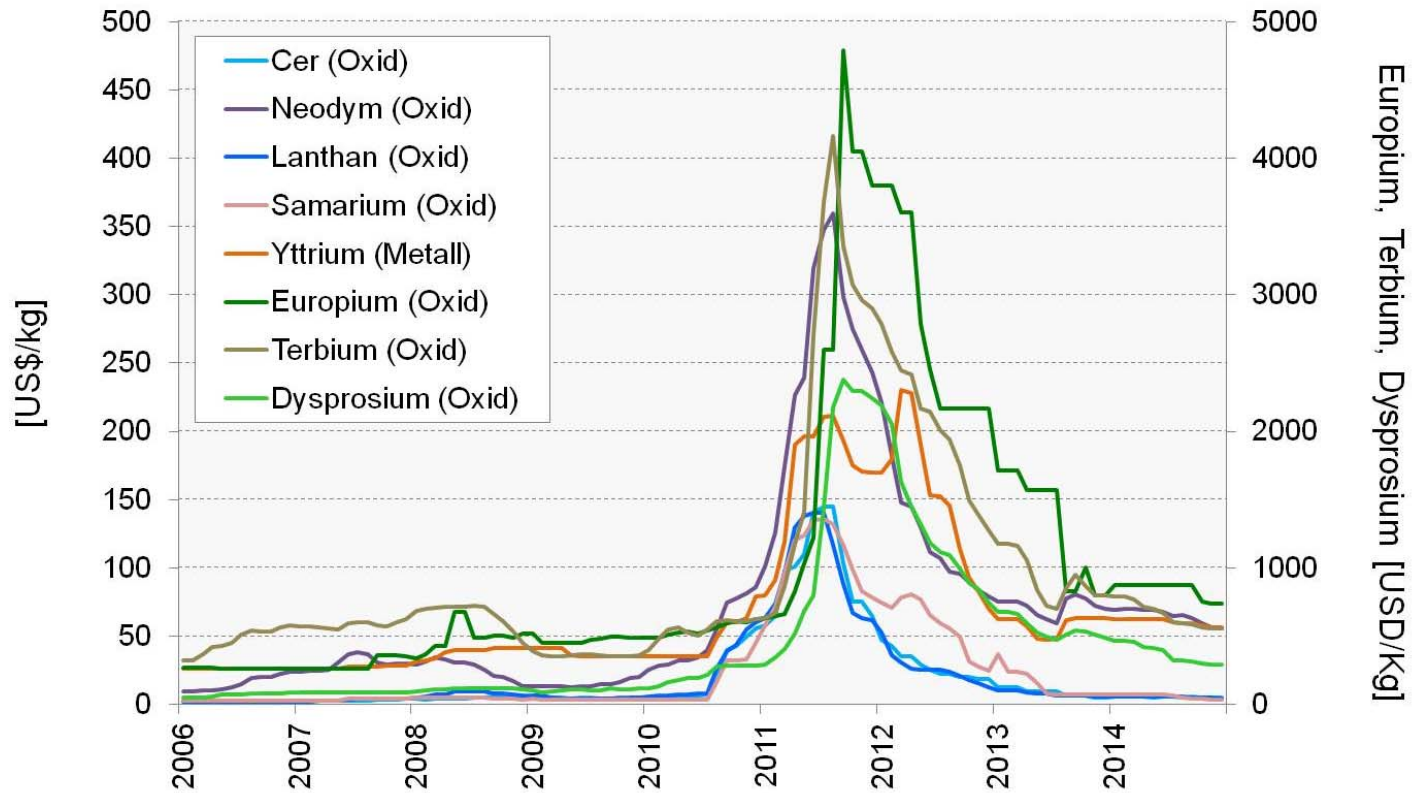
# Förderung Seltener Erden: Monopolstellung Chinas



# Förderung Seltener Erden: Umweltproblematik

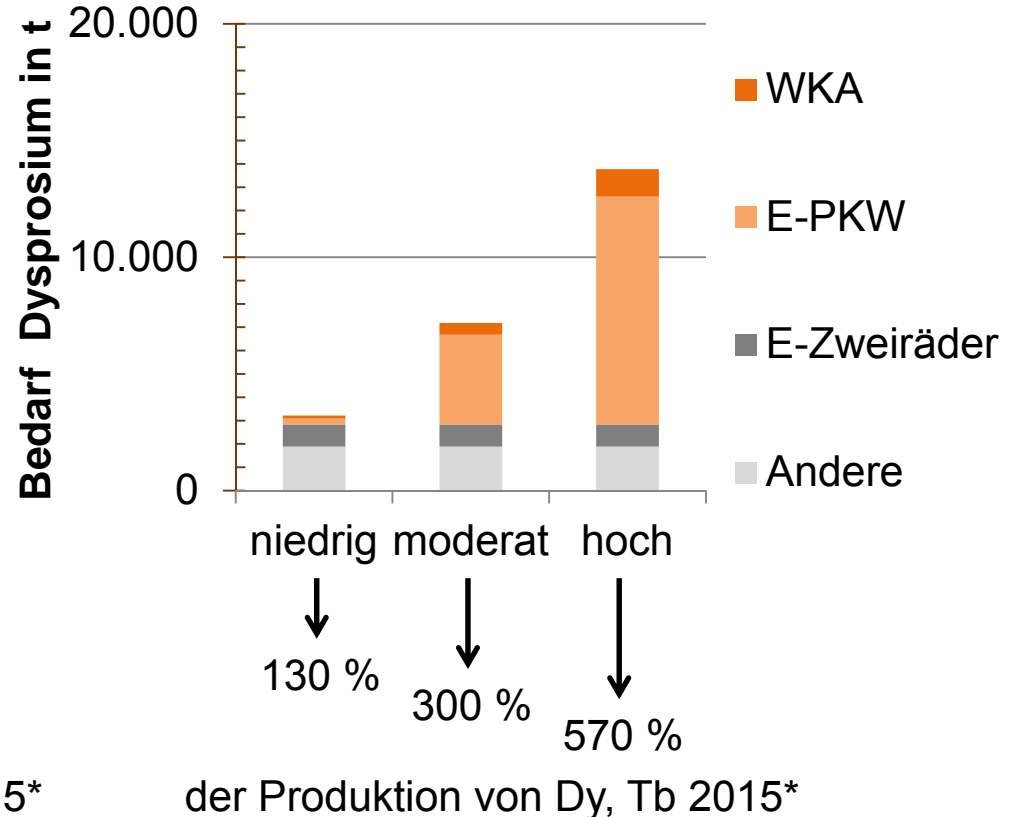
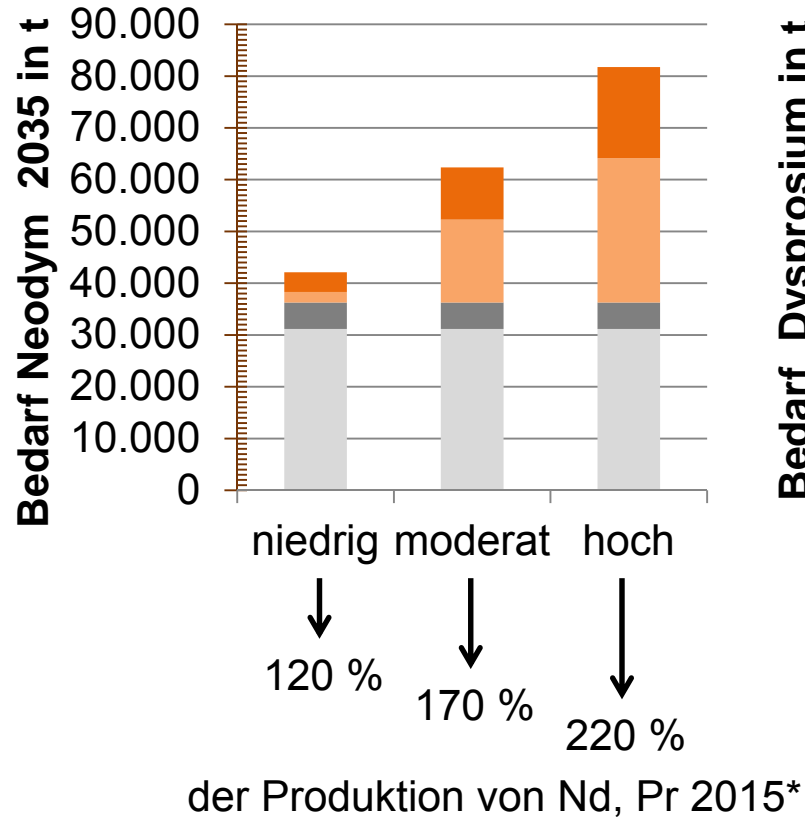


# Preisentwicklung Seltene Erden:

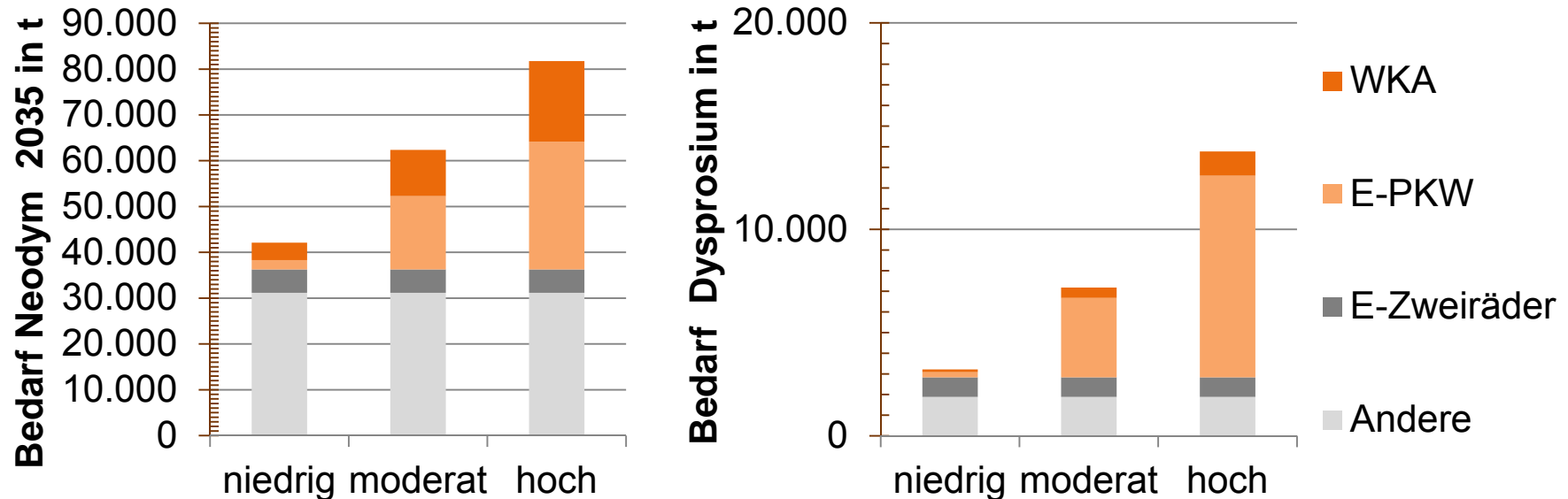




# Bedarf an Neodym und Dysprosium für Hochleistungs-Permanentmagneten 2035



# Bedarf an Neodym und Dysprosium für Hochleistungs-Permanentmagneten 2035

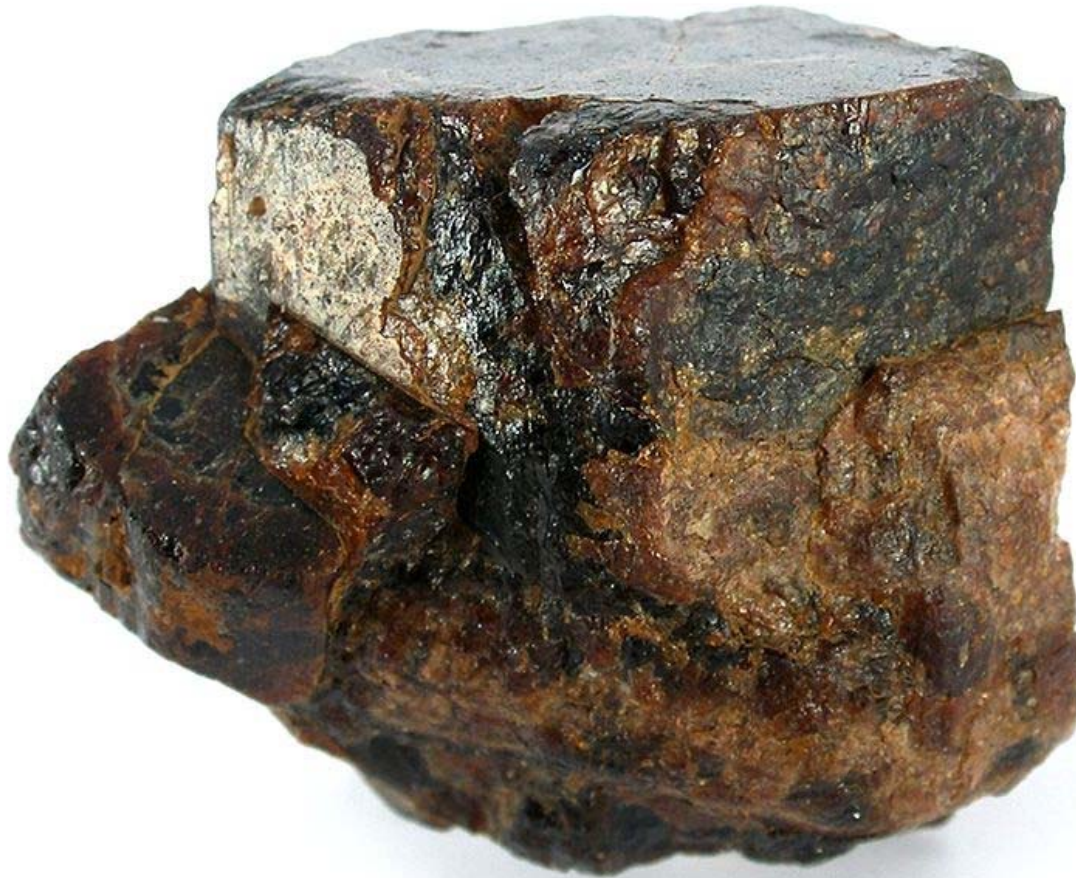


- Versorgungsrisiken bestehen → Mögliche Gegenmaßnahmen:
  - Ausbau der Förderkapazität (außerhalb Chinas)
  - Steigerung der Ressourceneffizienz (Reduktion des Anteils Schwerer Seltener Erden)
  - Substitution auf Technologieebene

- Recycling

Metall	CAGR %/a	Steigerungsfaktor von 1993 – 2013
Aluminium (R)	4,5	2,4
Eisen (B)	5,7	3,0
Germanium (R)	6,2	3,3
Indium (R)	8,9	5,5
Kobalt (B)	8,6	5,2
Kupfer (B)	3,4	2,0
Kupfer (R)	3,5	2,0
Lithium (B)	4,8	2,6
Palladium (B)	3,3	1,9
Platin (B)	1,4	1,3
Rhenium (B)	3,5	2,0
Seltene Erden (B)	2,8	1,7
Silber (B)	2,8	1,7
Tantal (B)	6,5	3,5
Titan (B)	0,7	1,1
Zinn (B)	2,2	1,5
Zinn (R)	2,6	1,7
B: Bergwerksförderung R: Raffinadeproduktion		

Bastnäsit:  $(\text{Ce,La,Nd,Y})[(\text{F,OH})|\text{CO}_3]$



Rob Lavinsky, Wikimedia, CC-BY-SA-3.0

# Bastnäsit: $\text{Ce}(\text{PO}_4)$



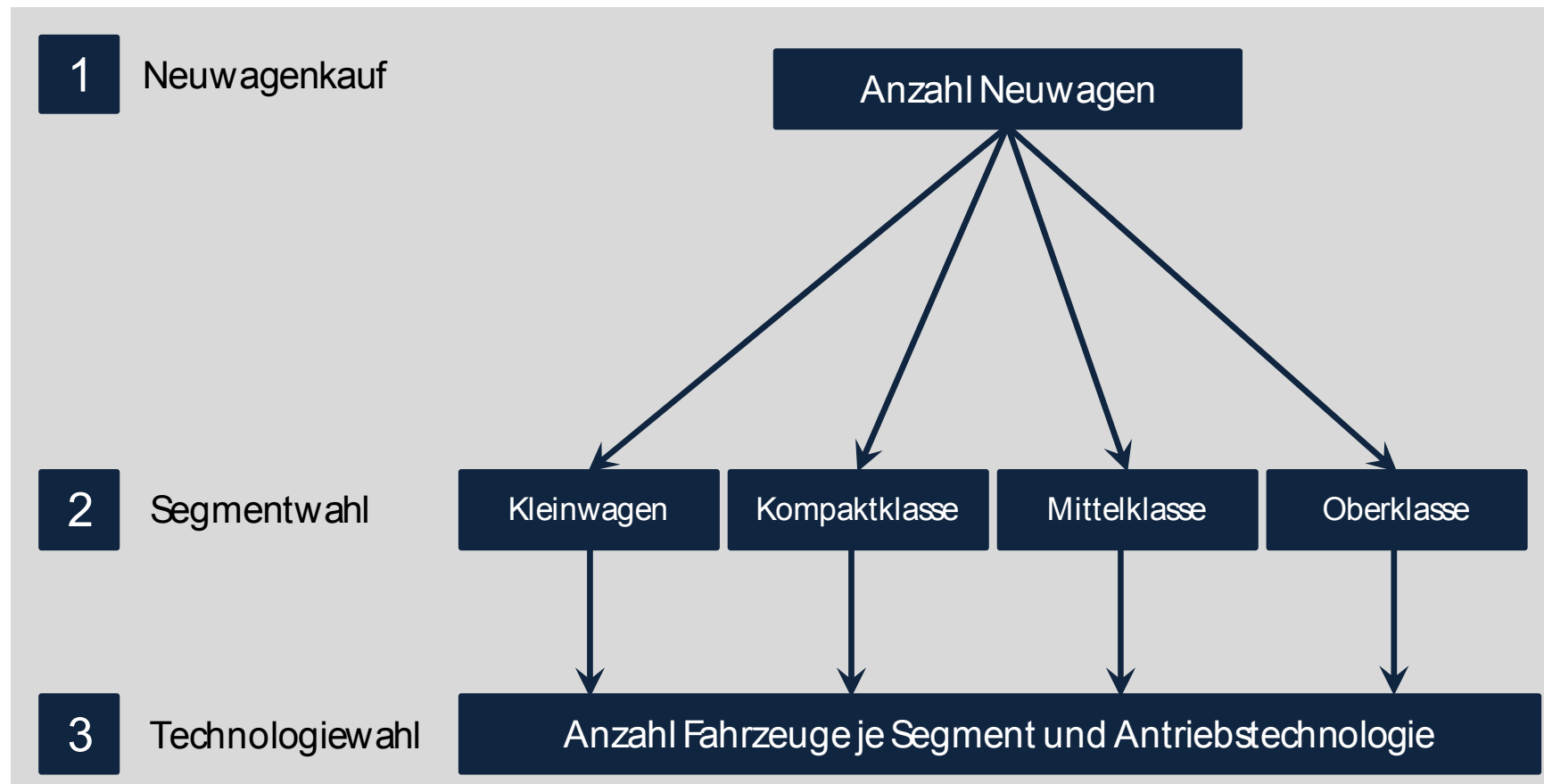
Ra'ike, Wikimedia, CC-BY-SA-3.0

# Anwendung A: Antriebsmotoren für Elektro- und Hybrid-PKW



L. Hirlimann, Wikimedia, CC BY-SA 2.0

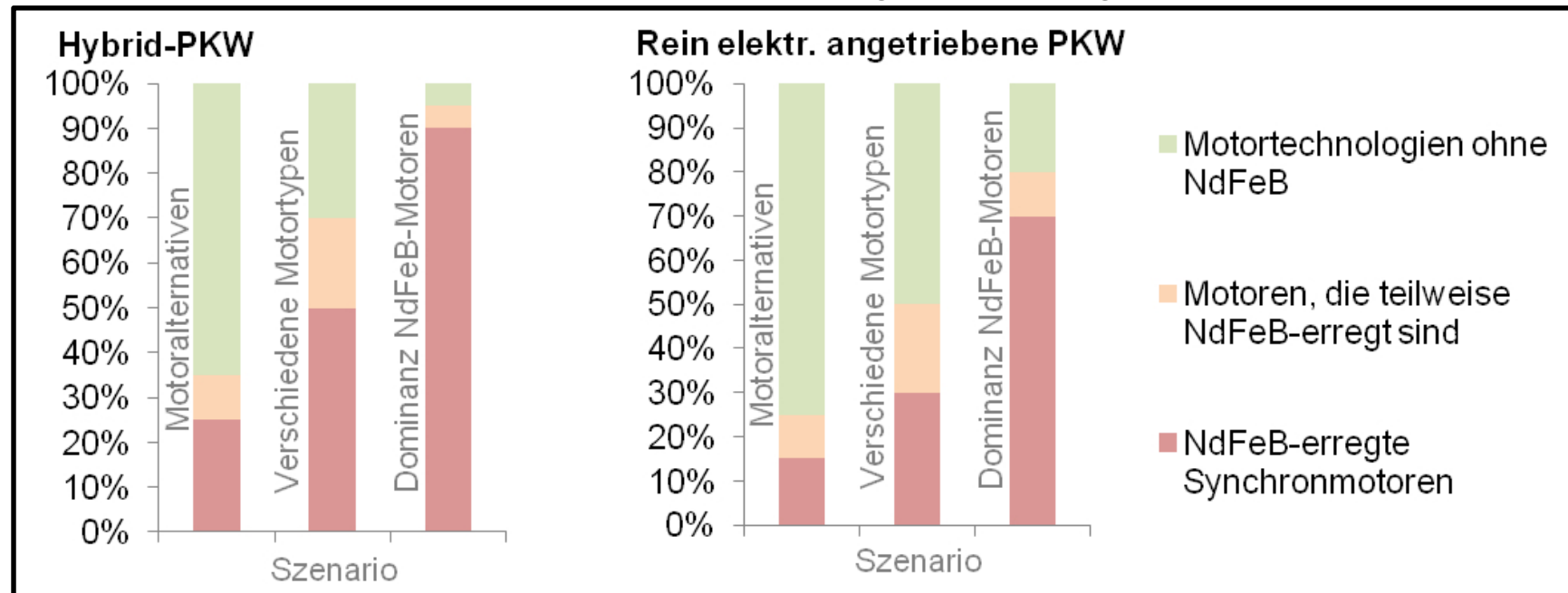
# Antriebsmotoren: Marktentwicklung Elektro- & Hybrid-PKW bis 2035



- Global Mobility Modell GLOMO (Kühn et al. 2014)

# Antriebsmotoren: Marktanteile Motortechnologien 2035

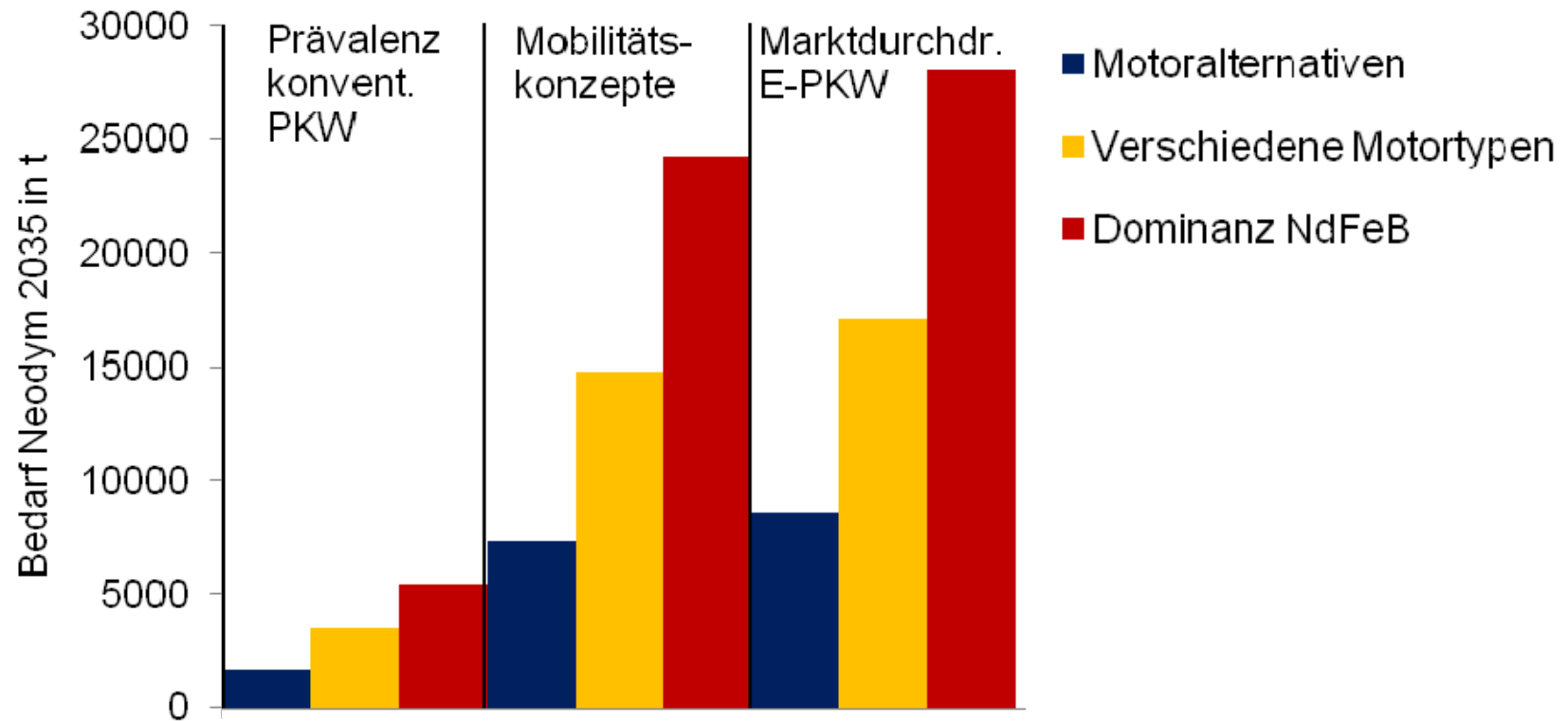
- **Motortypen:**
  - Asynchronmotoren
  - Reluktanzmotoren
  - Synchronmotoren
    - Elektrisch erregt
    - Magnetisch erregt
  - Hybride





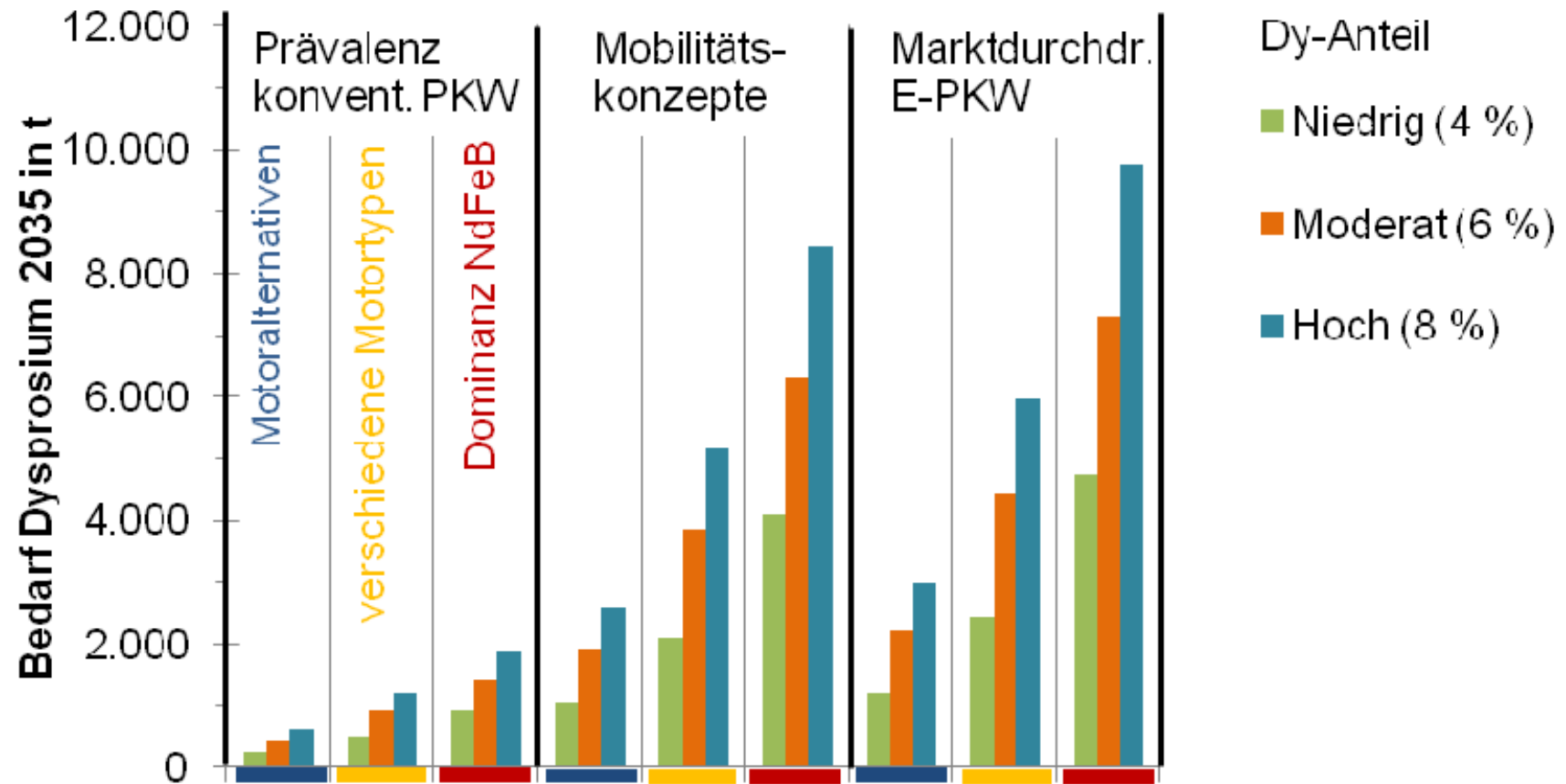
# Antriebsmotoren: Globaler Bedarf Neodym 2035

- Spezifischer Bedarf an NdFeB-Magneten je nach Größe des magnetisch-erregten Synchronmotors 1,2 - 3 kg (*Glöser-Chahoud, Tercero Espinoza 2015*)
- Anteil Seltenerdelemente an NdFeB: 32 %



# Antriebsmotoren für Elektro- und Hybrid-PKW: Globaler Bedarf Dysprosium 2035

- Forschungsprojekte zur Reduktion des spezifischen Bedarfs an Dy, z. B. Fraunhofer Leitprojekt „Kritikalität Seltener Erden“



# Zukunftsszenarien

