

16. Symposium Energieinnovationen  
12. – 14. Februar 2020  
Technische Universität Graz

# Systemeffizienz der regenerativen Energieversorgung

**Günther Brauner, TU Wien**

# Herausforderungen der Energiewende

- Das wirtschaftliche und ökologische Potenzial der regenerativen Energie ist begrenzt
- Der Bedarf muss an das Potenzial angepasst werden durch neue Technologien, Effizienz und Suffizienz:  
*Die fossil orientierte Mehrerzeugungsgesellschaft konvertiert zur nachhaltigen Minderbedarfsgesellschaft.*
- Der volatile Charakter der regenerativen Energiequellen erfordert flexible Verbraucher, Sektorenkopplung und Speicherung.
- Versorgungssicherheit erfordert Backup-Versorgung für „Dunkelflauten“.

# Systemeffizienz und Sektorenkopplung

Das Energiesystem muss gesamtheitlich betrachtet werden

## Systemeffizienz:

- Erzeugungseffizienz: hohe Volllaststunden bei begrenzter Leistung
- Verteilungsnetz-Effizienz: PV-Leistungsbegrenzung entsprechend dem lokalen Bedarf
- Übertragungsnetz-Effizienz: Schwachwindanlagen
- Sektorenkopplung: Power-to-X
- Wirtschaftlichkeit: minimale Gesamtkosten aus Erzeugung, Netz, Speicher und Backup-Versorgung
- Umweltfreundlich: begrenzte Raumwirkung für hohe Akzeptanz

# Sektorenkopplung

Gas-to-Power: klassisch = Stromerzeugung mit GuD

Power-to-X

Power-to-Gas: Wasserstoffelektrolyse, Methanisierung

Power-to-Mobility: Elektromobilität

Power-to-Heat: Wärmepumpe, Direktheizung, Prozesswärme

Begrenzte Erzeugungs-Potenziale:

Zukünftig sind Umwandlungswirkungsgrade von Bedeutung

# Methodisches Vorgehen: Meta-Analyse

- Analyse der regenerativen Potenziale in AT, DE & EU-28  
(*Meta-Analyse*)
- Realisierbare Potenziale: wirtschaftlich und umweltfreundlich
- Deckungsrate: Erzeugungsmix, Leistungen & Speicher  
(*Zeitreihenanalyse aus Potenzialen und Lastprofilen*)
- Systemeffizienz der Sektorenkopplung
  - Power-to-Mobility
  - Power-to-Heat
  - Power-to-Gas

# Analyse bis 2050

- Regenerative Zielerreichung 2050
  - Regenerative Roh-Potenziale
  - Umsetzbarkeit: Kosten, Umwelt, Versorgungssicherheit
- Meta-Analyse: alle Potenzialstudien EU-28
- Effizienzpotenziale: technologisch, human
- Regenerative Vollversorgung versus Versorgungssicherheit

# Ausgangssituation 2016

	Österreich	Deutschland	EU-28
Einwohner EW Mio.	8,773	82,522	511,800
Fläche km <sup>2</sup>	83.879	357.386	4.381.324
Einwohnerdichte EW/km <sup>2</sup>	105	231	117
Endenergiebedarf TWh/a	327	2.517	12.883
Erneuerbare Energie am Endenergiebedarf	33,5 %	14,8 %	17,0 %
Endenergiebedarf pro EW in MWh/a	37,30	30,5	25,2
Elektrizitätsbedarf TWh/a	68	611	3.070
Elektrizitätsbedarf je EW in MWh/a	7,8	7,4	6,0
Elektrizität / Endenergie % 2016	20,8 %	24,3 %	23,8 %
<b>Endenergiebedarfsanteile 2015</b>			
Haushalt	25 %	25 %	25,4 %
Verkehr	33 %	31 %	33,1 %
Industrie	26 %	29 %	25,3 %
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, GHD	16 %	15 %	16,2 %

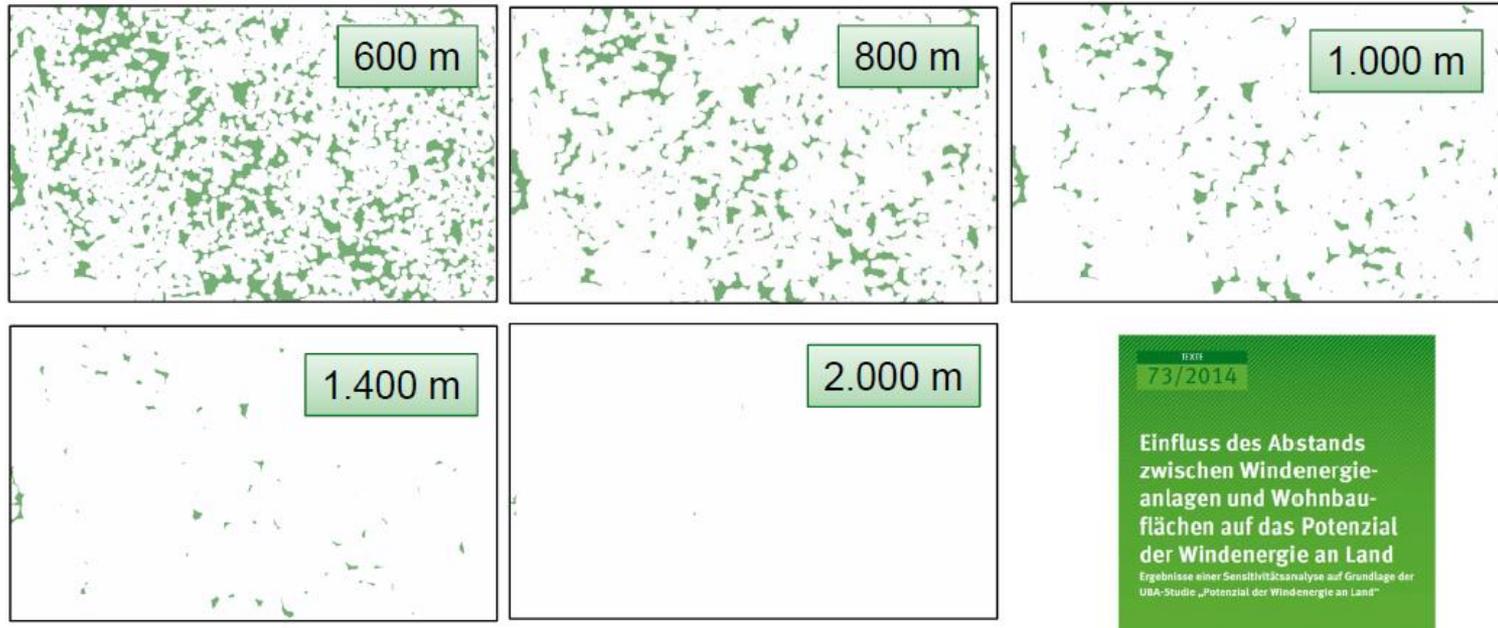
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Bewertung der Potenziale

- Theoretisches Potenzial
- Technisches Potenzial: Wirkungsgrad & Flächennutzung
- Wirtschaftliches Potenzial
- Ökologisches Potenzial
- **Realisierbares Potenzial = Minimum aller Potenziale**

# Windenergiepotenzial und Siedlungsabstand

Hanno Salecker: Einflussfaktoren auf das bundesweiter Potenzial an Land.



BfE  
 73/2014  
 Einfluss des Abstands  
 zwischen Windenergie-  
 anlagen und Wohnbau-  
 flächen auf das Potenzial  
 der Windenergie an Land  
 Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse auf Grundlage der  
 UBA-Studie „Potenzial der Windenergie an Land“

Siedlungsabstand	600 m	800 m	1.000 m	1.200 m	2.000 m
Flächenpotenzial	13,8 %	9,1 %	5,6 %	3,4 %	0,4 %
Anteil an Referenzpotenzial	100 %	66,3 %	40,9 %	24,8 %	2,8 %



Referenz



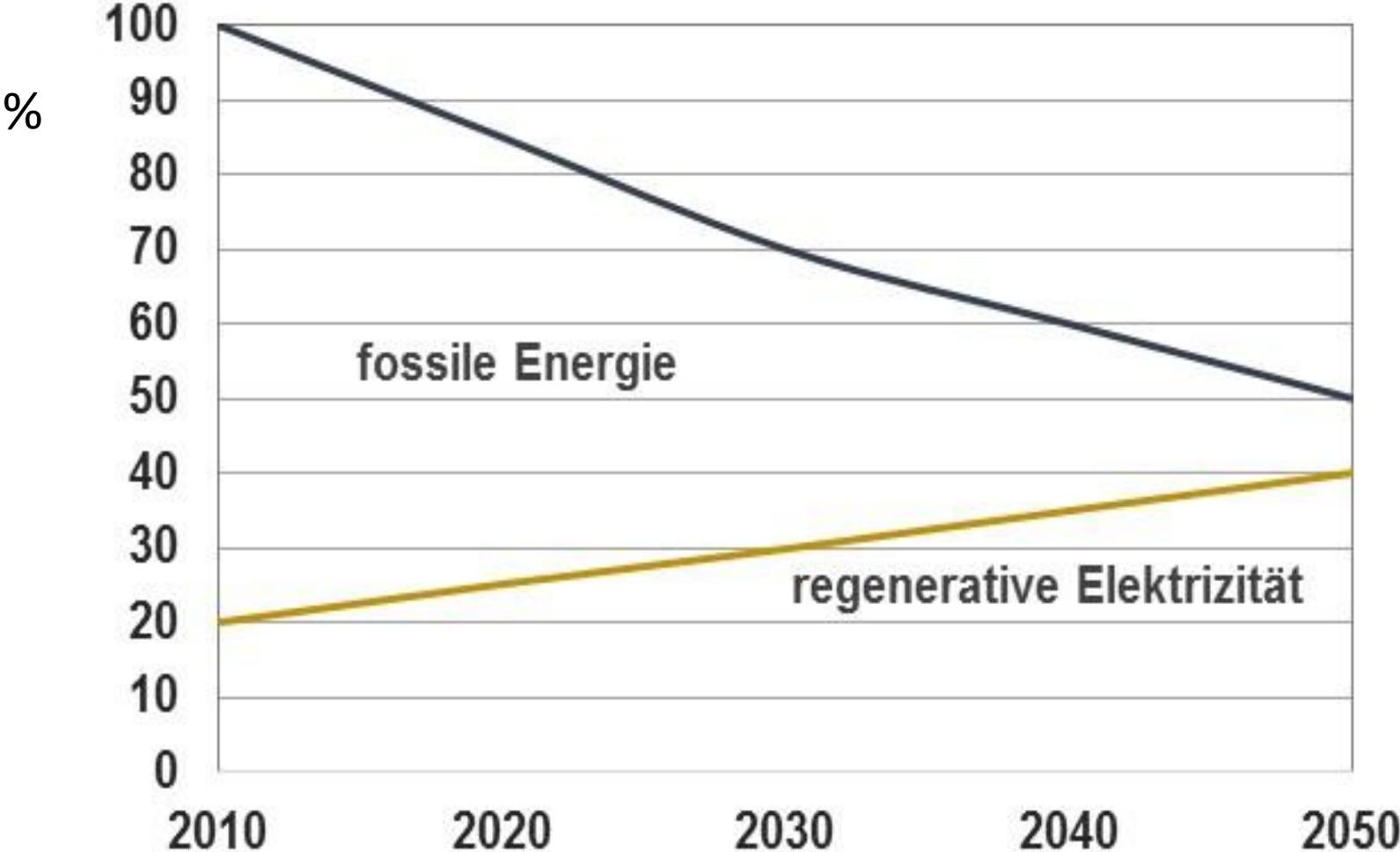
DE 2050 erforderlich

# Meta-Analyse der regenerativen Potenziale

TWh/a	Österreich		Deutschland		EU-28	
	2016	2050	2016	2050	2016	2050
Wasserkraft	39,3	<b>42</b>	20,6	22	340	500
Windenergie onshore	5,2	20	66,3	<b>400</b>	237	<b>2.000</b>
Windenergie offshore	-	-	12,3	<b>200</b>	47	<b>700</b>
Photovoltaik	0,5	30	38,1	250	102	1.500
Biomasse	2,5	20	50,8	60	169	300
Geothermie	0	0	0,16	20		60
Erneuerbare Elektrizität (EE)	47,5	112	188,2	952	895	5.060
Endelektrizitätsbedarf	68	140	611	1.200	3.070	6.200
% EE von Endelektrizitätsbedarf	70 %	80 %	31 %	79 %	29,2 %	82 %

© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Nachhaltige Energieversorgung bis 2050

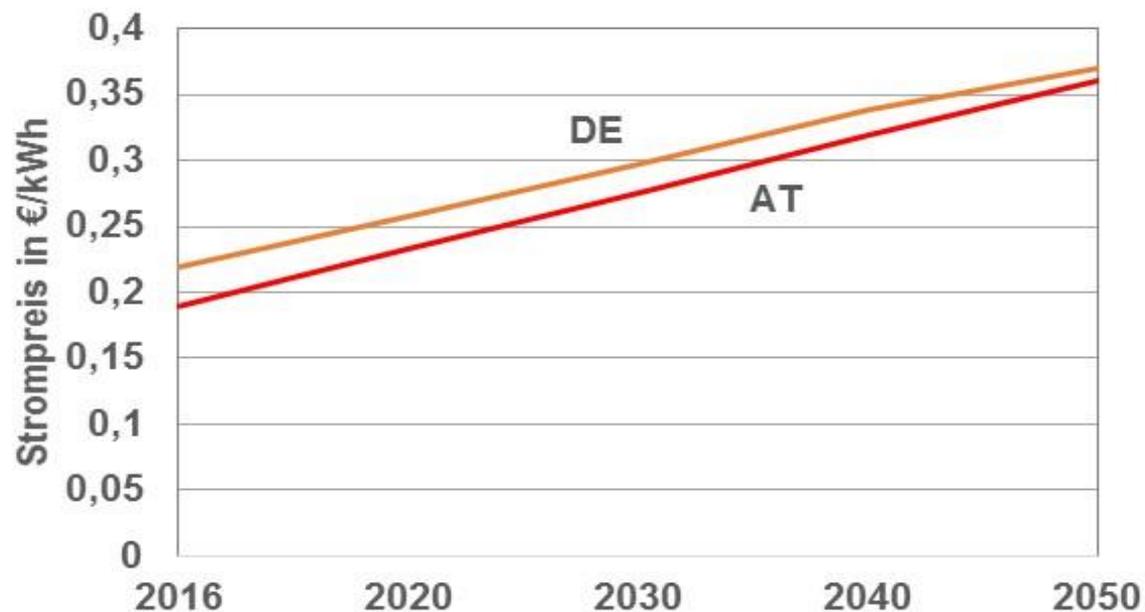


© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Veränderung der Energieversorgung bis 2050 (Basis 2050)

- Energieanteil der thermischen Kraftwerke sinkt auf 20 %
- Der Leistungsanteil der Kraftwerke bleibt bei 100 %
- Windenergie und PV dominieren
- Leistung von Wind und PV = 4- bis 8-fache Spitzenlast
- Kraftwerkseinsatz nicht mehr für Grundlast sondern für Ausgleichsenergie
- Grenzen der thermischen Kraftwerke: hohe Leistungsgradienten, häufiges An- und Abfahren
- Kurzzeitspeicher notwendig: Pumpspeicher, Akku
- Ungelöstes Problem: Langzeitspeicher

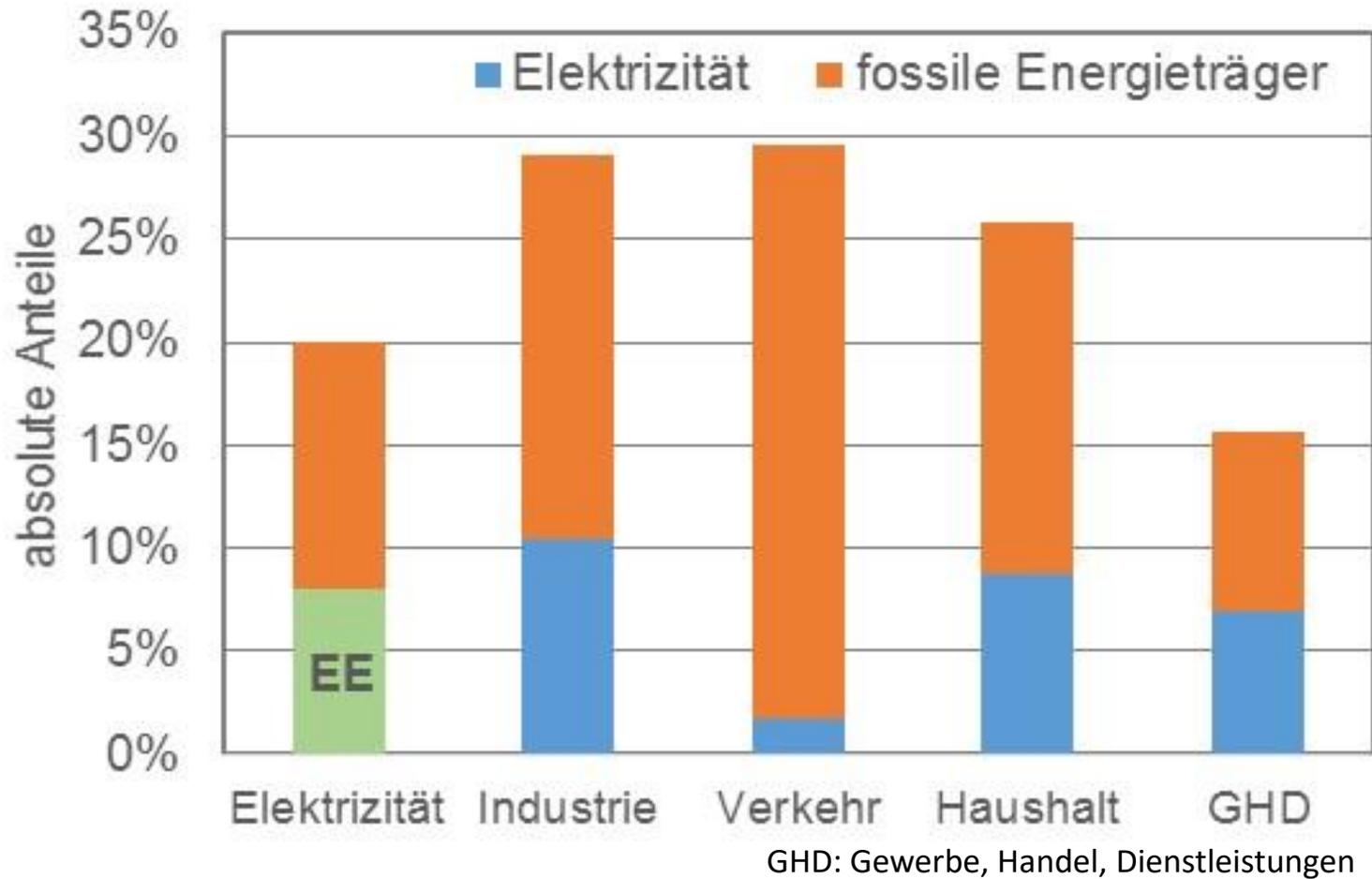
# Entwicklung der Strompreise bis 2050



€/kWh	2010	2020	2030	2040	2050
Photovoltaik	16,8	8,5	6,2	4,9	3,9
Wind onshore	5,1	4,8	4,4	4,1	3,9
Wind offshore	11,7	10,7	9,7	8,8	7,7
Wasserkraft	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Biomasse	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Geothermie	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0

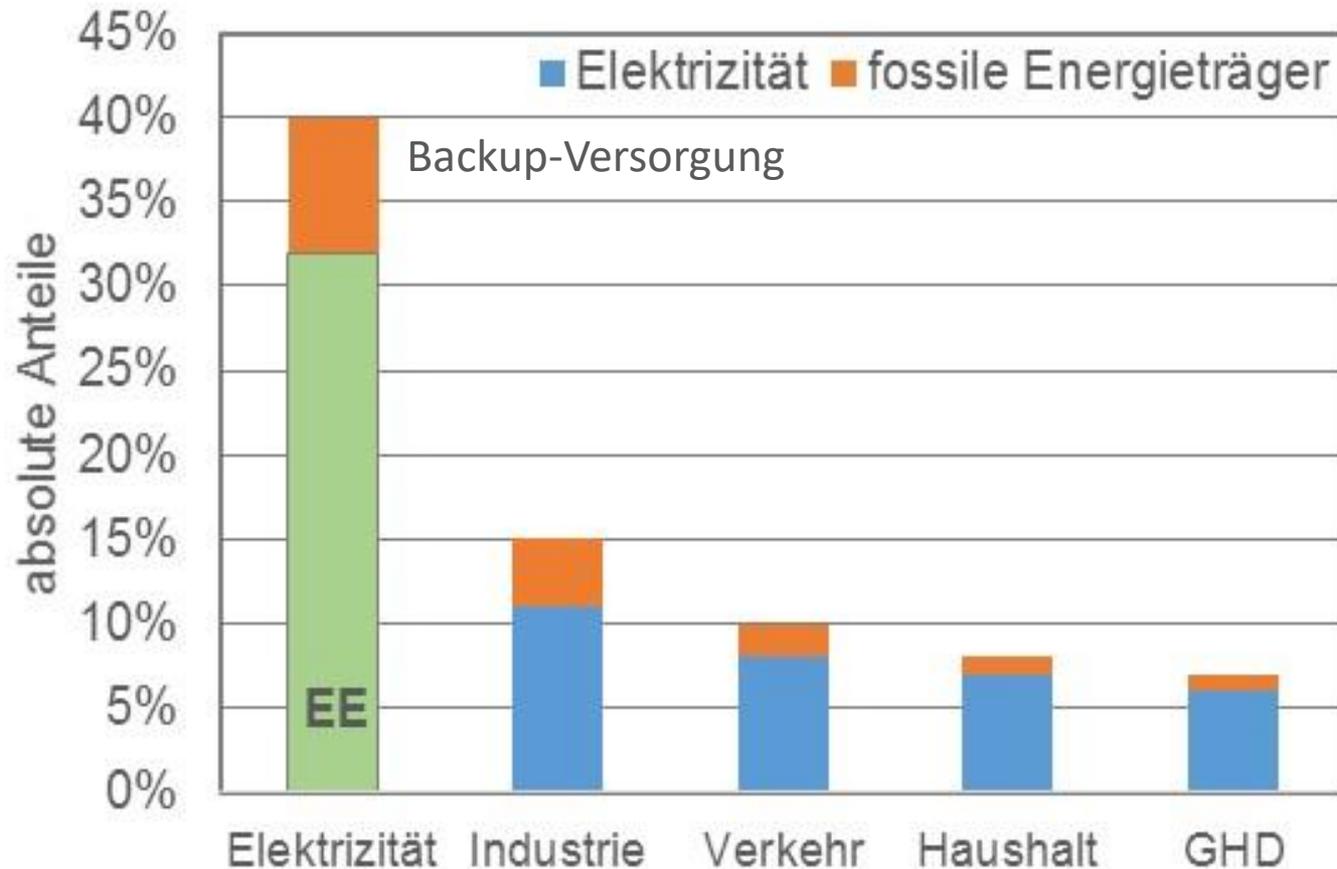
© Brauner 2018, All Rights Reserved

# Anteil der Sektoren mit Energieträgern in DE



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Zielmodell 2050 in Absolutwerten von 2016

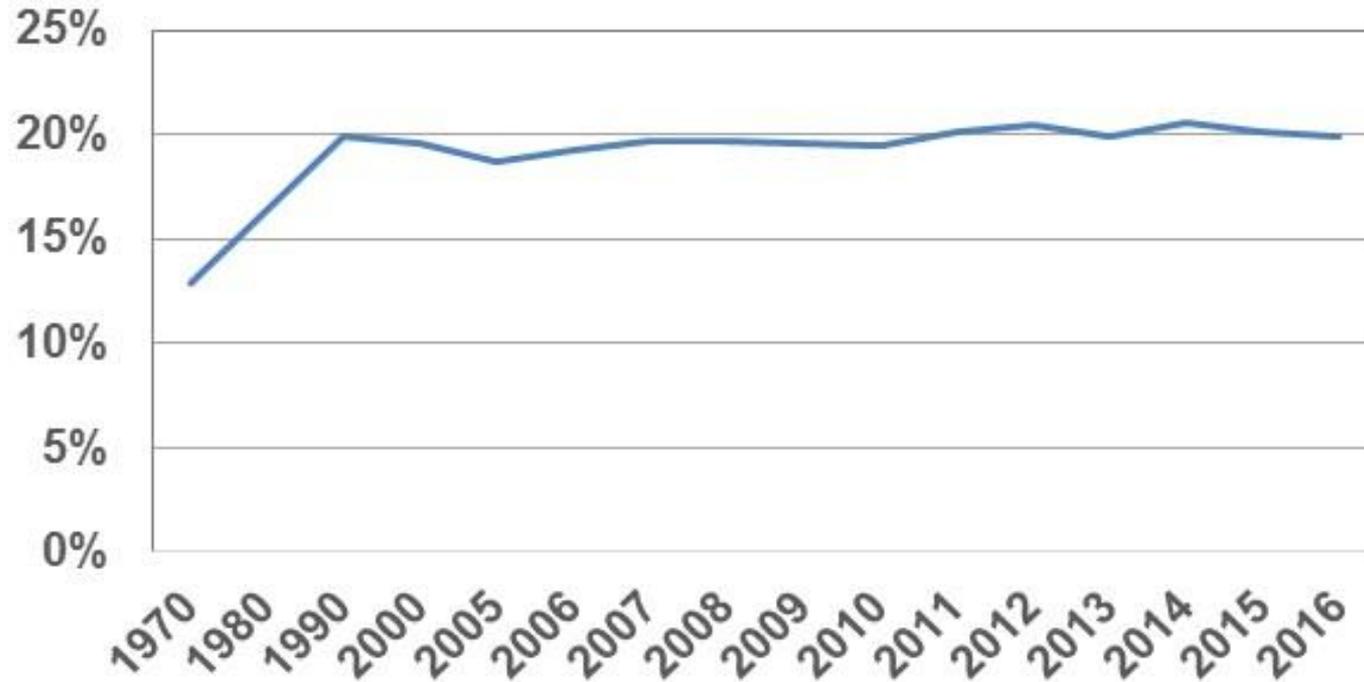


© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Die Sektorenkopplung ist bisher in AT kaum entwickelt

Sektorenkopplung: fossile Energie wird durch nachhaltig Elektrizität substituiert

## Elektrizität zu Gesamtendenergie



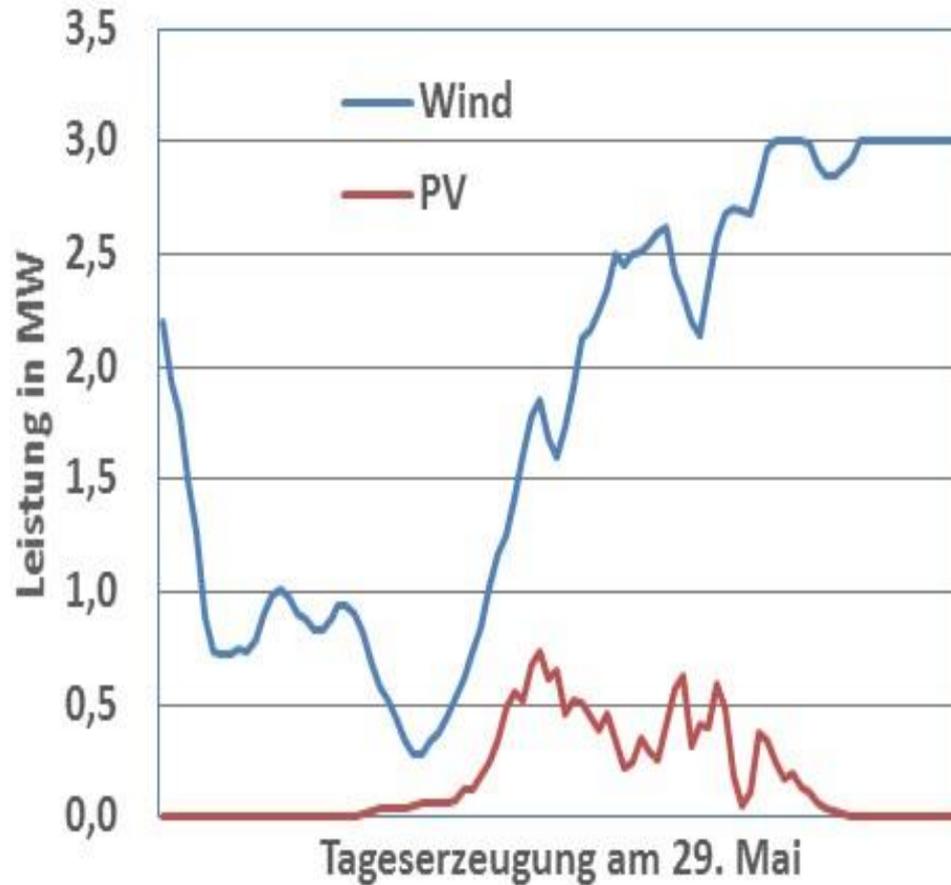
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Optimale Energieversorgung von Siedlungen

Voraussetzung:

- PV und Wind bilden Erzeugungskollektive
- Haushalte bilden Verbrauchskollektive
  - Spitzenlast Einzelhaushalt: 15 kW
  - Spitzenlast im Kollektiv mit Elektromobilität wenige kW
- Zeitreihenanalyse zur Analyse der jährlichen Deckungsrate (1/4 h-Erzeugungs- und Lastprofile)
- Wasserkraft hat in DE nur noch 2,3 %-Anteil in 2050 daher nur Windenergie, PV und thermischer Backup = worst case Szenario

# Ausschnitt Zeitreihe Wind & PV



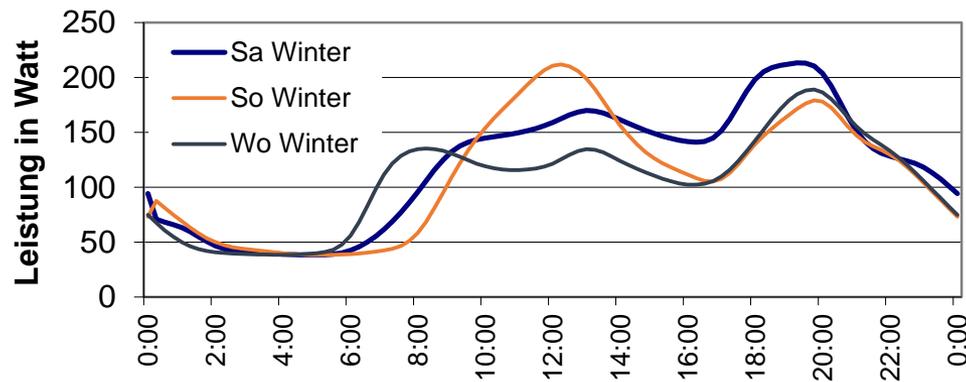
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Lastprofil H0 und E-Mobilty

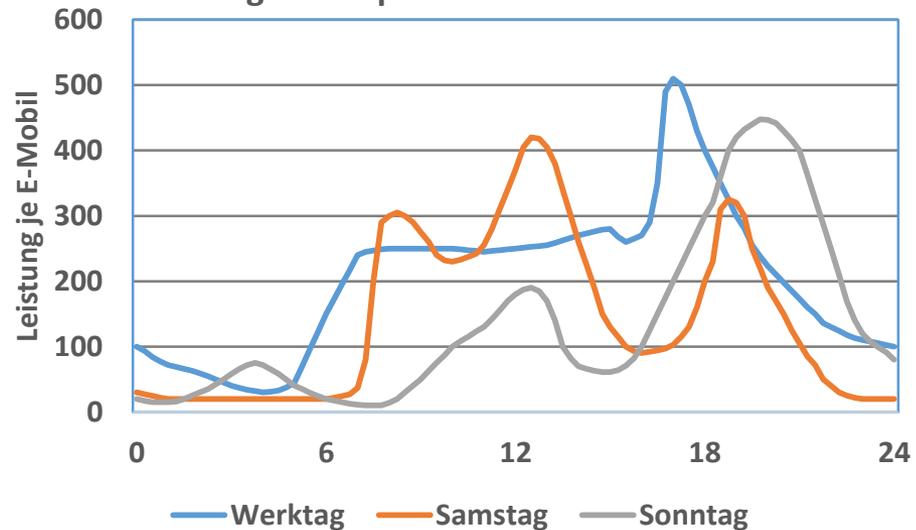
## H0-Normhaushalt: 4,0 MWh/a, 1 kW Spitzenlast

VDEW / BDEW

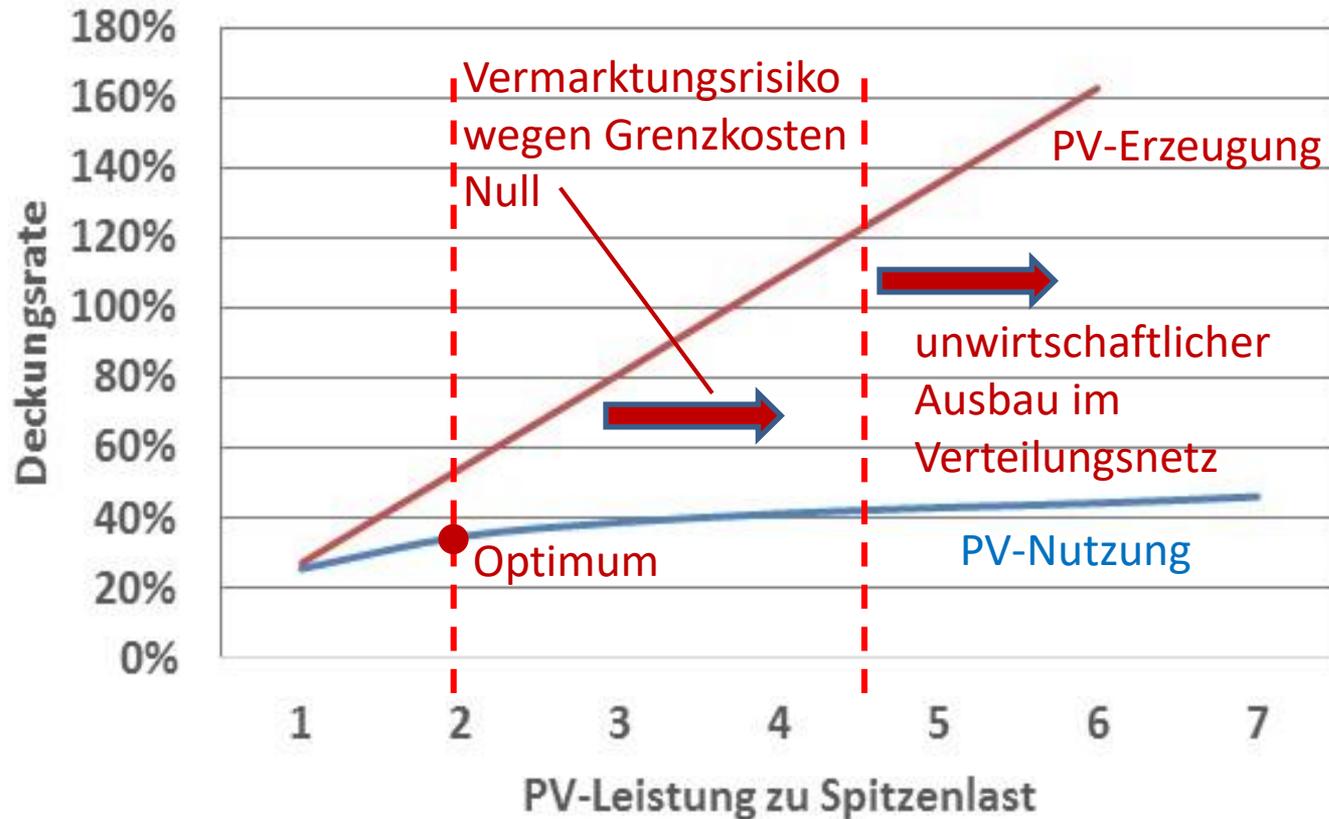
Haushaltslastprofil H0 Winter für 1,0 MWh/a



Leitinger: Lastprofil Elektromobilität

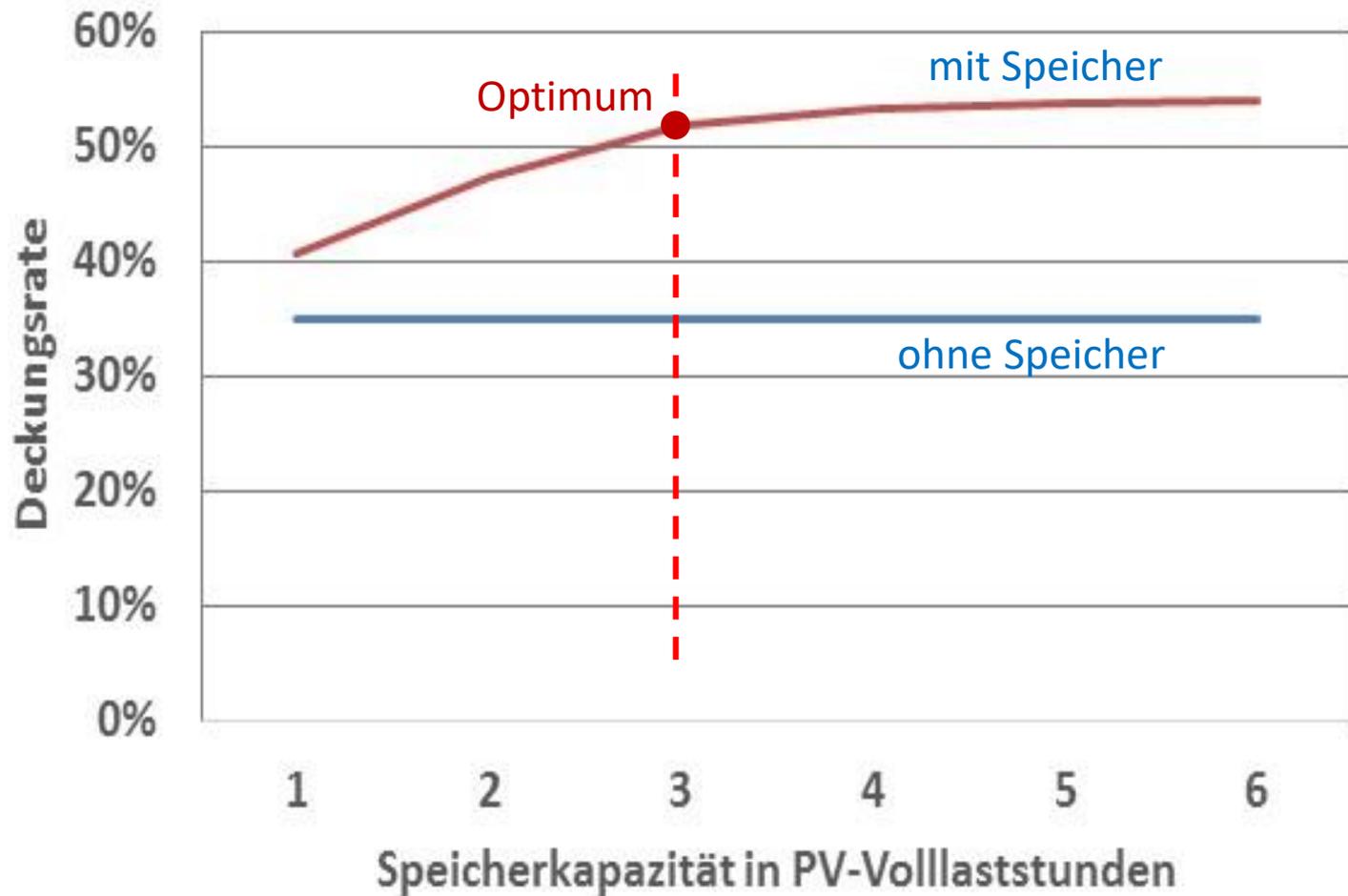


# Zeitreihenanalyse Erzeugung und Last: jährliche PV-Deckungsrate im Haushalt ohne Speicher



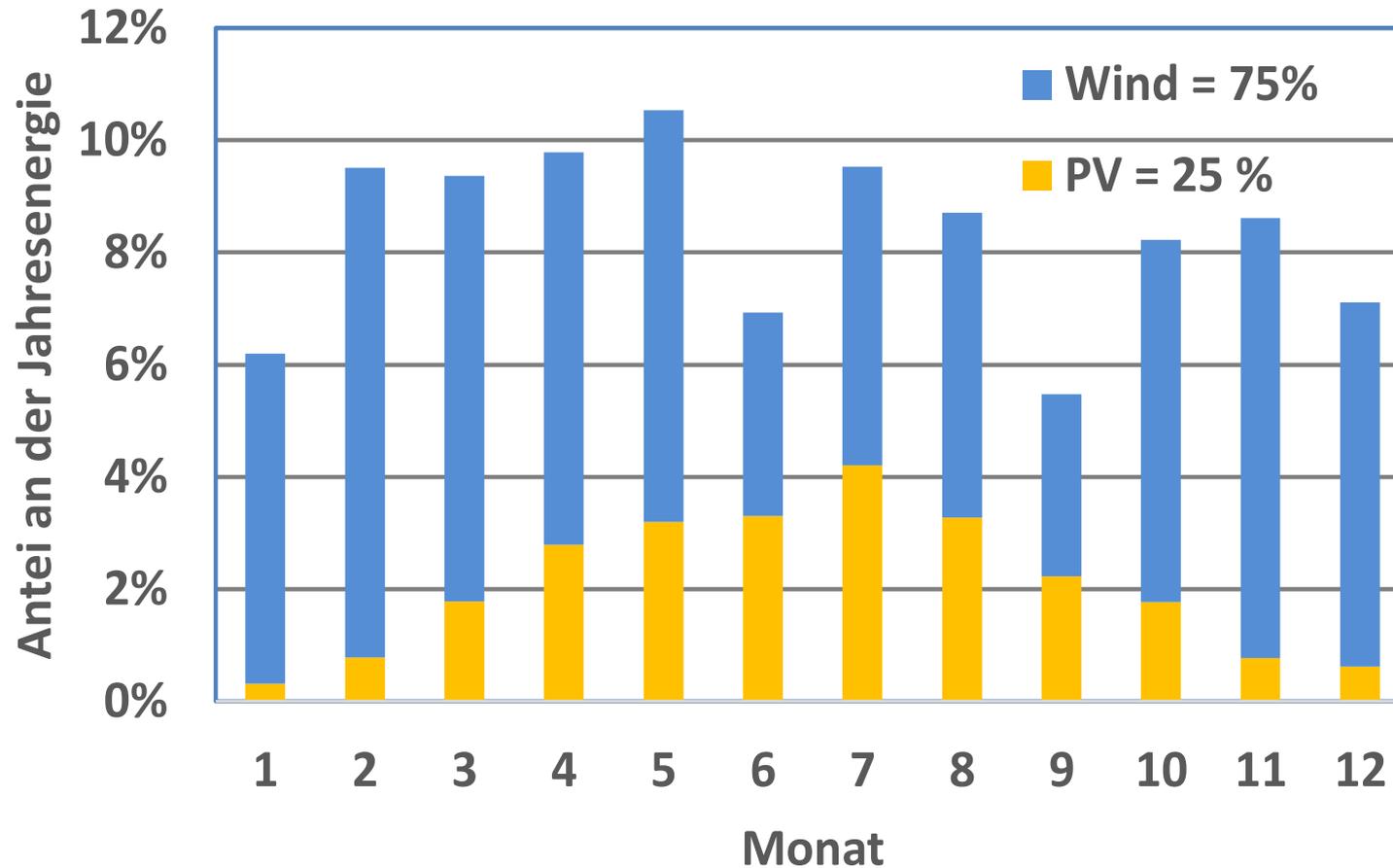
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Deckungsrate im Haushalt mit Speicher



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# monatliche Energieanteile aus Wind und PV



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Optimaler Erzeugungsmix

Jahresenergieanteile	Jahres- energie	Jahres- energie	Jahres- energie
Windenergieanteil	75 %	100 %	100 %
PV-Anteil Energie	25 %	0 %	0 %
Erzeugung/Last (Jahresenergie)	130 %	130 %	130 %
Speicher in h der Wind- und PV-Leistung	1 h	1 h	0 h
Jahres-Deckungsrate	81,7 %	69,2	64,4 %

© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Neue Aufgaben der Pumpspeicher

- Hohe Leistungsgradienten für Ausgleichsenergie
- Größere Speicherkapazitäten: Tagesspeicher werden zu Wochenspeichern umgebaut
- Aufgabenteilung:
  - Pumpspeicher als zentrale Wochen-Großspeicher
  - Akkumulatoren als dezentrale Tages-Kleinspeicher
- Möglichkeit und Grenzen von Wasserstoff
- Kapazität und Wirtschaftlichkeit der Speicher
- Kombination von thermischen Kraftwerken und Pumpspeichern (Gradientenablösung)

# Erforderlicher Um- bzw. Neubau

Pumpspeicher bisher für hydrothermischen Verbund optimiert:

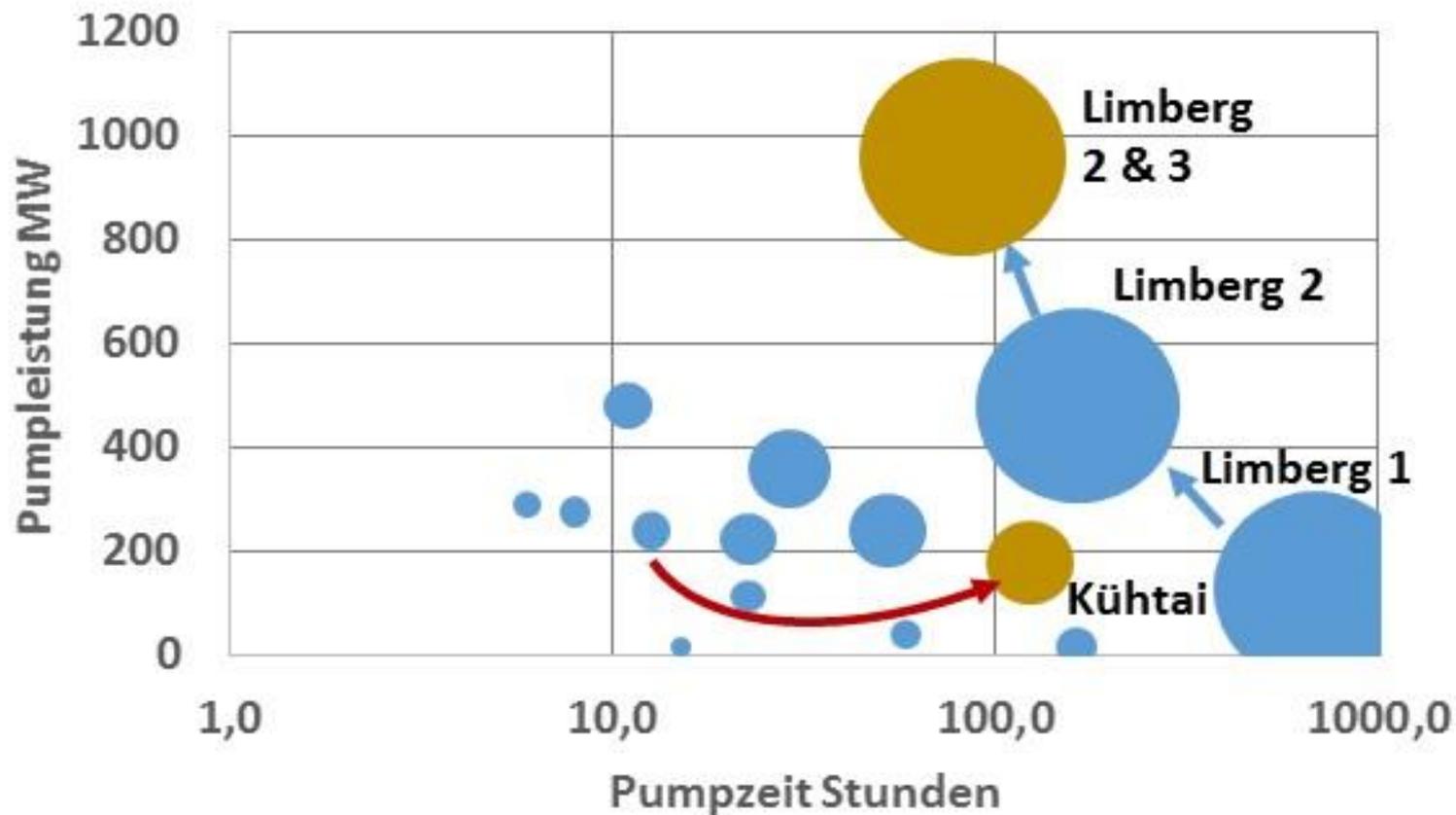
- kleiner unterer Speicher
- Tagesspeicher für Spitzenlast

Zukunft: flexible Ausgleichsenergie

- Pumpvermögen für ca. eine Woche
- mehrtägige Ausgleichsenergie für Dunkelflaute
- Grenzkostender regenerativen Energie 0 €/ct/kWh
- Regelenergie teuer: GUD-Kraftwerk 10 – 15 €/ct/kWh
- Pumpspeicher werden wirtschaftlich ab 2020

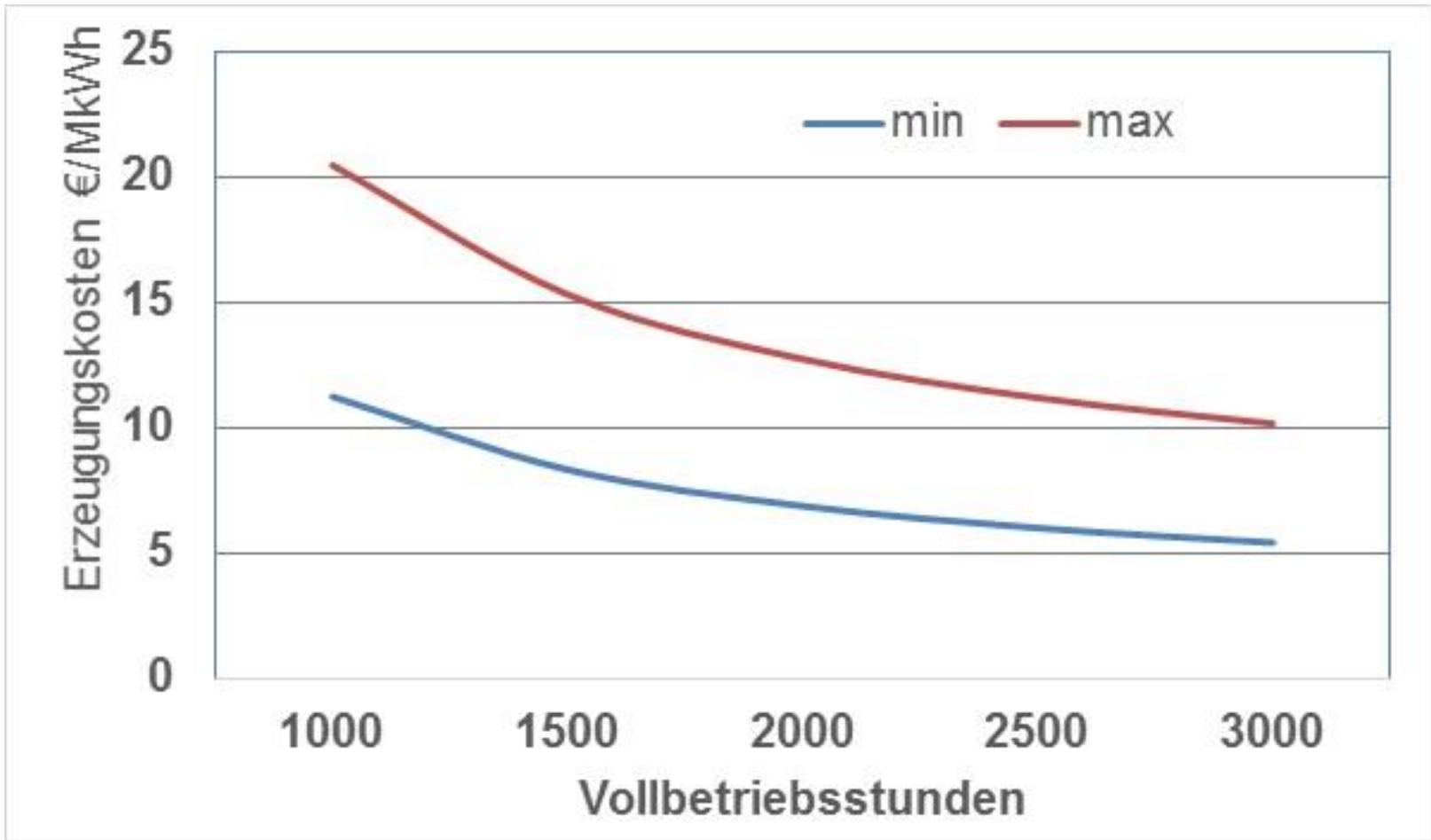
# Strategien für Pumpspeicher in Österreich

Jahres- und Tagesspeicher werden zu Wochenspeichern



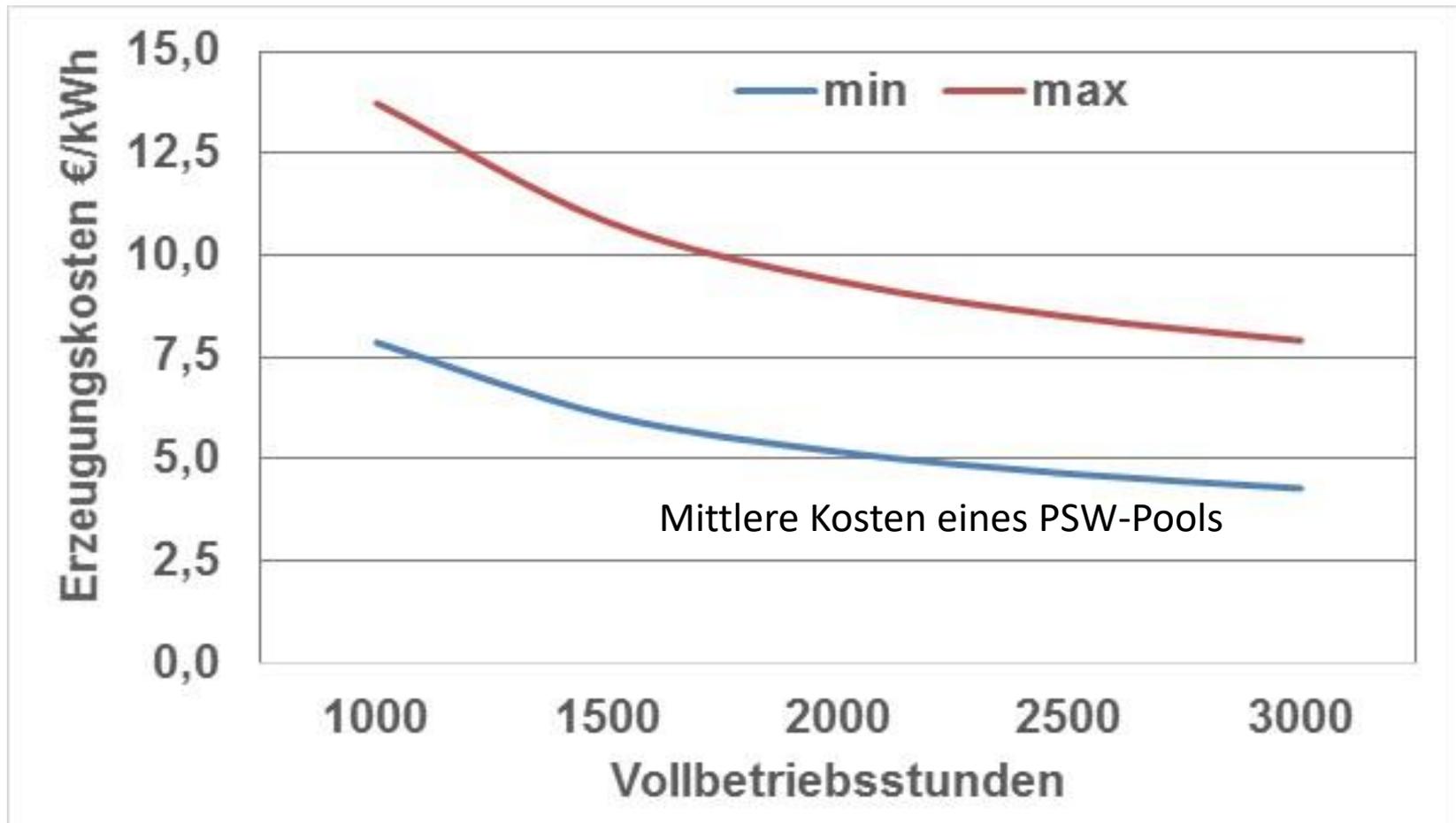
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Erzeugungskosten von neuen Pumpspeichern



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Erzeugungskosten bei Umbau von PSW



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Entwicklung der Erzeugungskosten bis 2050

## GuD-Kraftwerke 2050

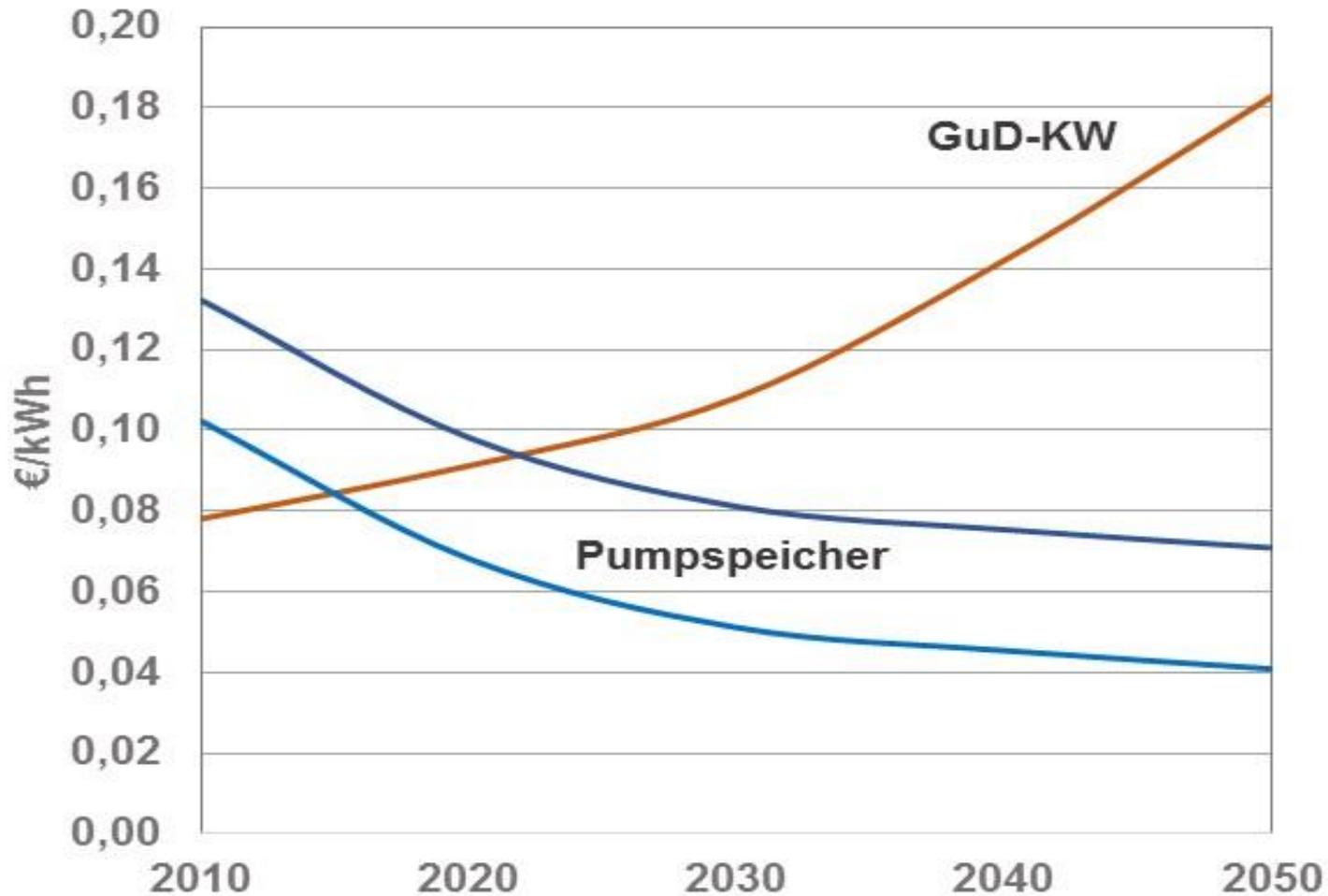
- Vollaststunden 2020: 2.500 h/a; 2050; 1.000 h/a
- Nutzungsdauer ca. 20 Jahre
- Gaspreis wird sich bis 2050 verdoppeln

## Pumpspeicher 2050

- Vollaststunden 2050: bis 3.000 h/a
- Nutzungsdauer ca. 50 Jahre
- Bezugspreis Überschussenergie: 1 bis 3 ct/kWh

# Erzeugungskosten bis 2050

Pumpspeicher als Pool aus Bestand und Neu-/Um-Bau



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Alternative Speichertechnologien

## Li-Ion-Speicher

- Dezentrale Speicher für PV im Gebäude
- Je Haushalt ca. 2 bis 5 kWh
- Export über Niederspannungsnetze nur bedingt möglich (Netzkapazität, Marktmodell)

## Druckluftspeicher

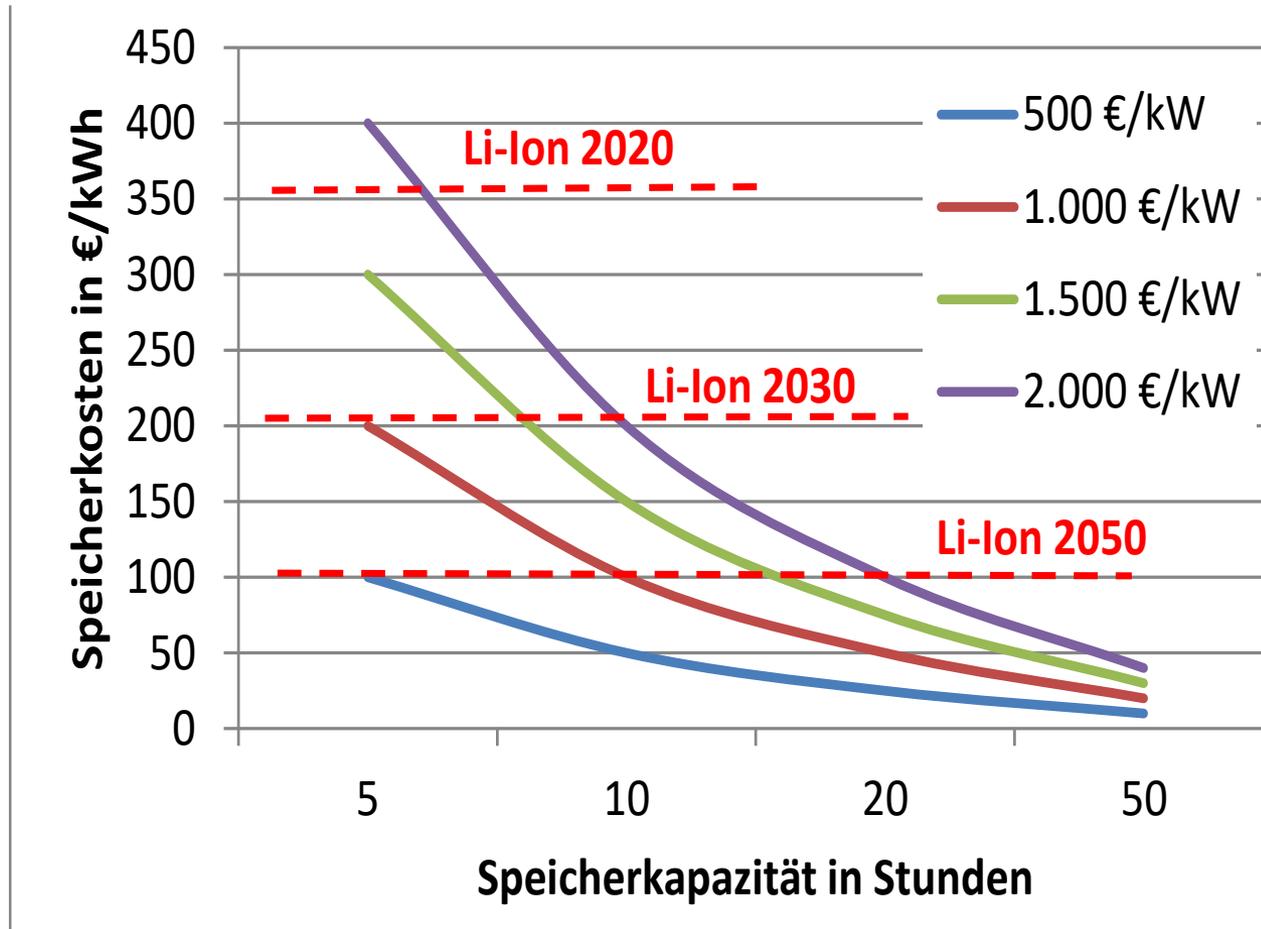
- hybride oder adiabatische Speicher
- Begrenzung in Leistung und Kapazität
- Speicher Kaprun = 150 Druckluftspeicher
- Aussohlung von Salzstöcken problematisch:  
Wasserrahmenrichtlinie, Risiko Erdbeben

# Pumpspeicher sind gegenüber Batterien wirtschaftlich

Investitionskosten je kWh

PHS:  $i=2\%$ ,  $n=30a$ ; Lilon:  $i=3\%$ ,  $n=10a$ .

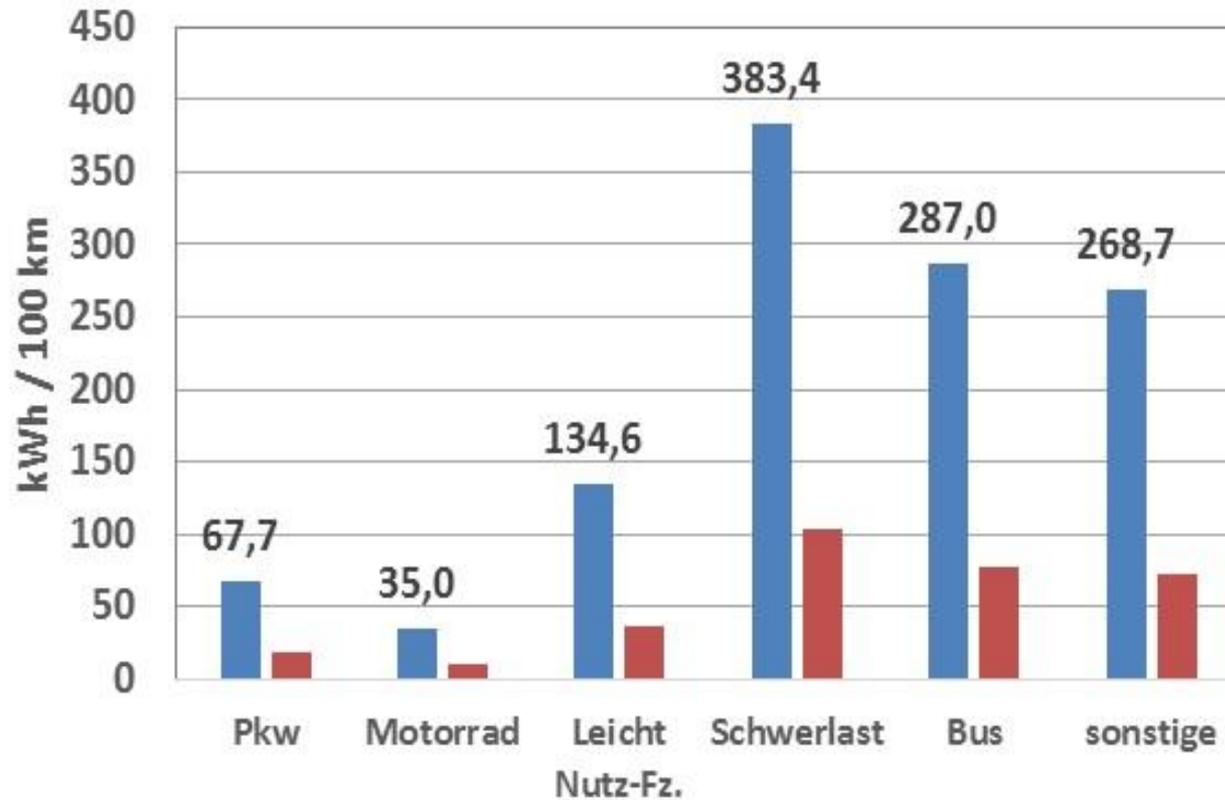
Pumpspeicher: spez. Investitionen in €/kW, Akkumulatoren: €/kWh



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Sektorenkopplung Power-to-Mobility

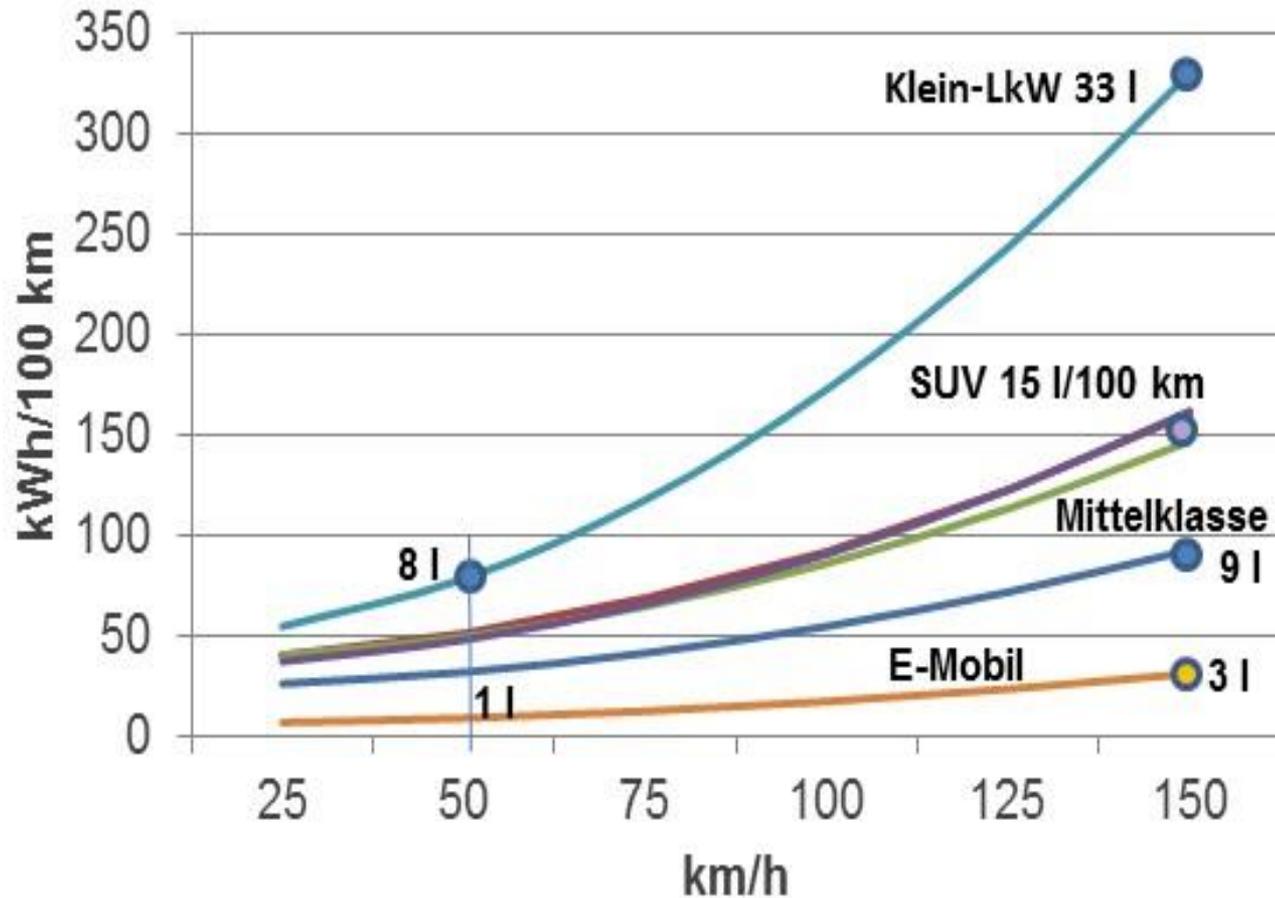
blau: heutiger spezifischer Energiebedarf rot: Effizienzpotenzial E-Mobility



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Systemeffizienz: Power-to-Mobility

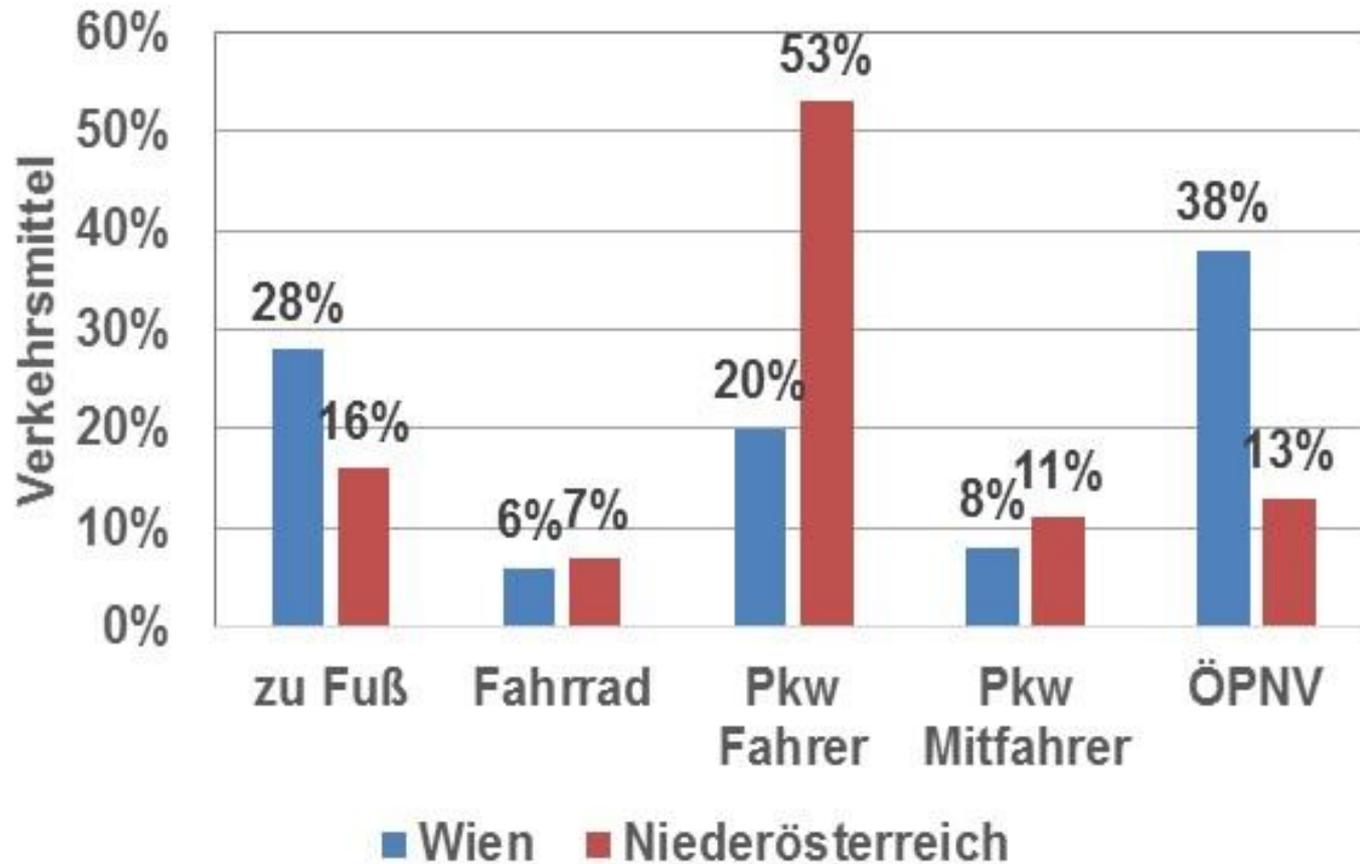
(Angaben in Liter Benzinäquivalent: 1 l = 8,8 kWh)



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Sektorenkopplung: Power-to-Mobility

## Stadt versus Land

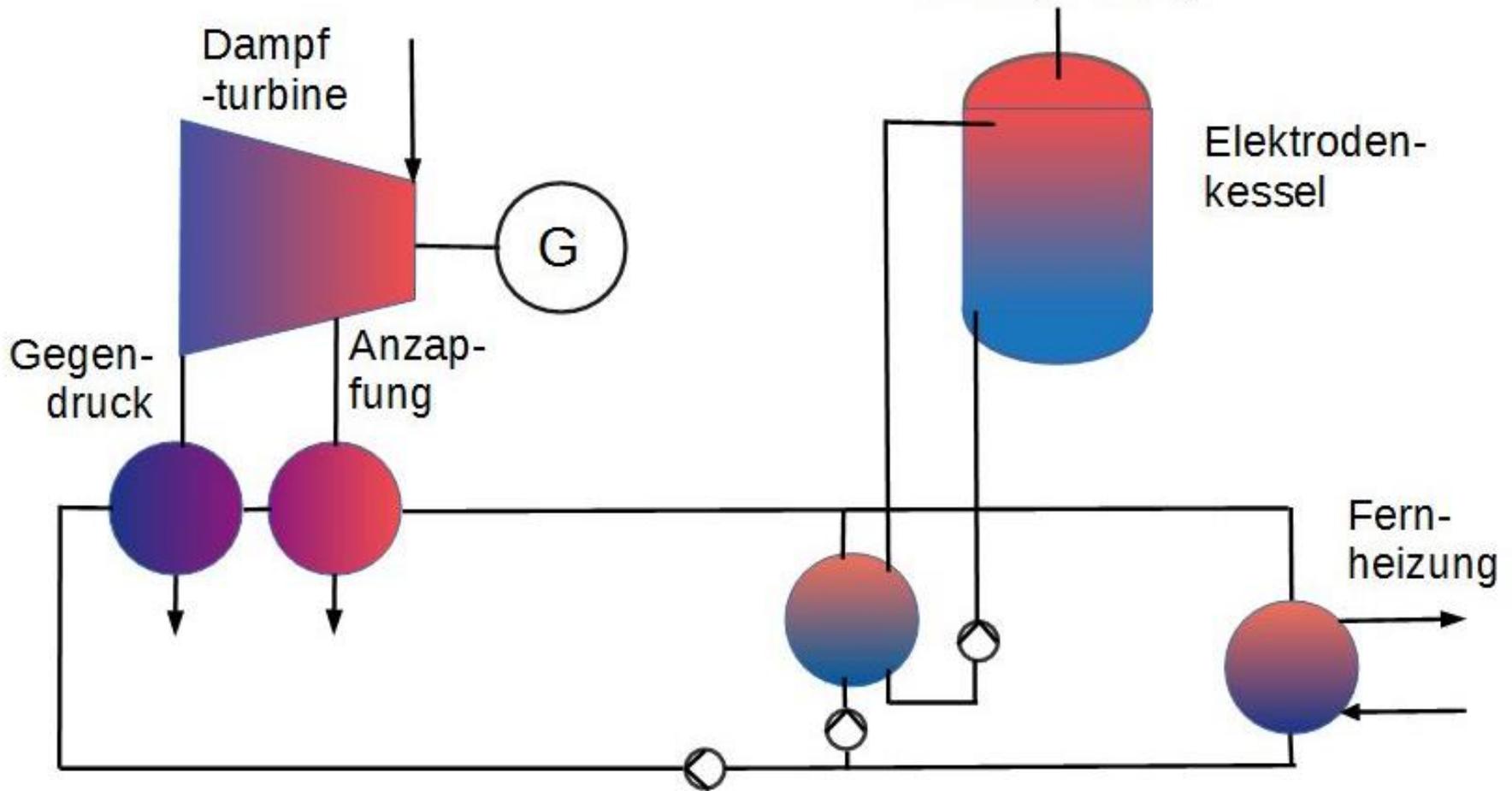


© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Power-to-Heat in der Fernwärme

## Regenerative Überschuss-Elektrizität

## Fernwärme



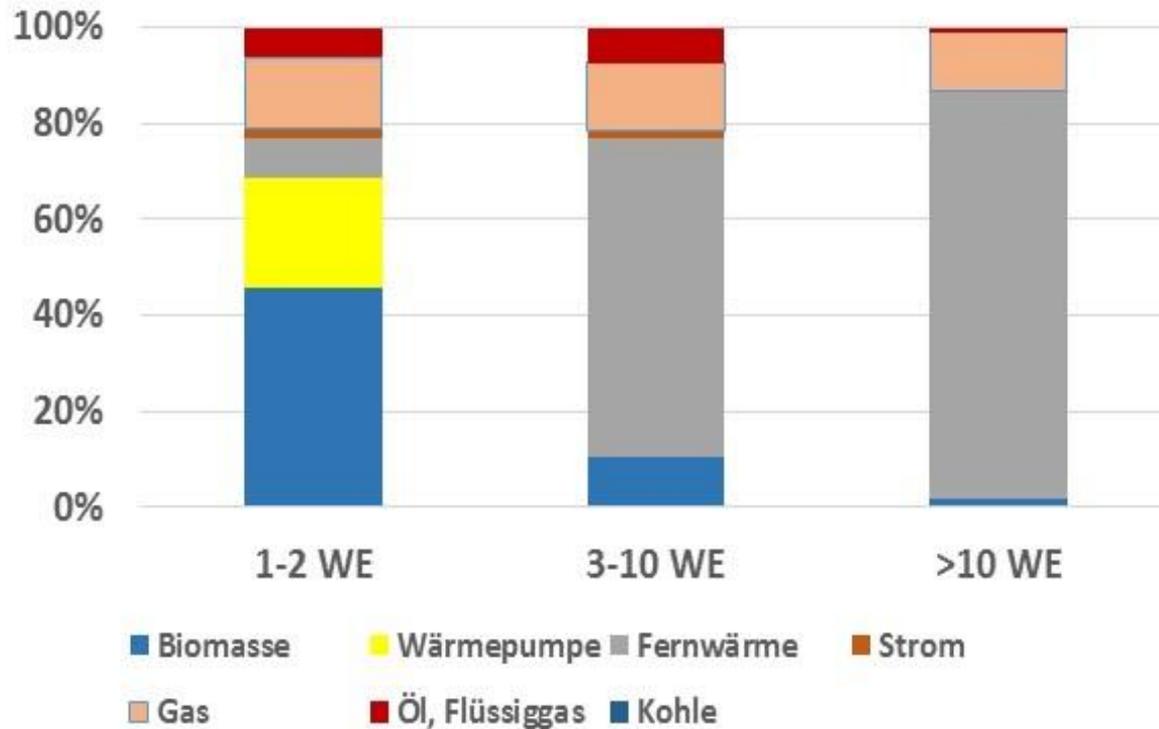
© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Power-to-Heat im Gebäude

- Thermische Sanierung der Gebäude kann den Wärmebedarf auf 10 % des heutige Bedarfs absenken
- Elektrische Speicherheizungen und Wärmepumpen sind Lösungen
- Speicherheizungen müssen thermische Superisolierung aufweisen, um ein Überheizen zu vermeiden
- Aus bisherigen Baugrößen als Tagesspeicher werden dann Wochenspeicher

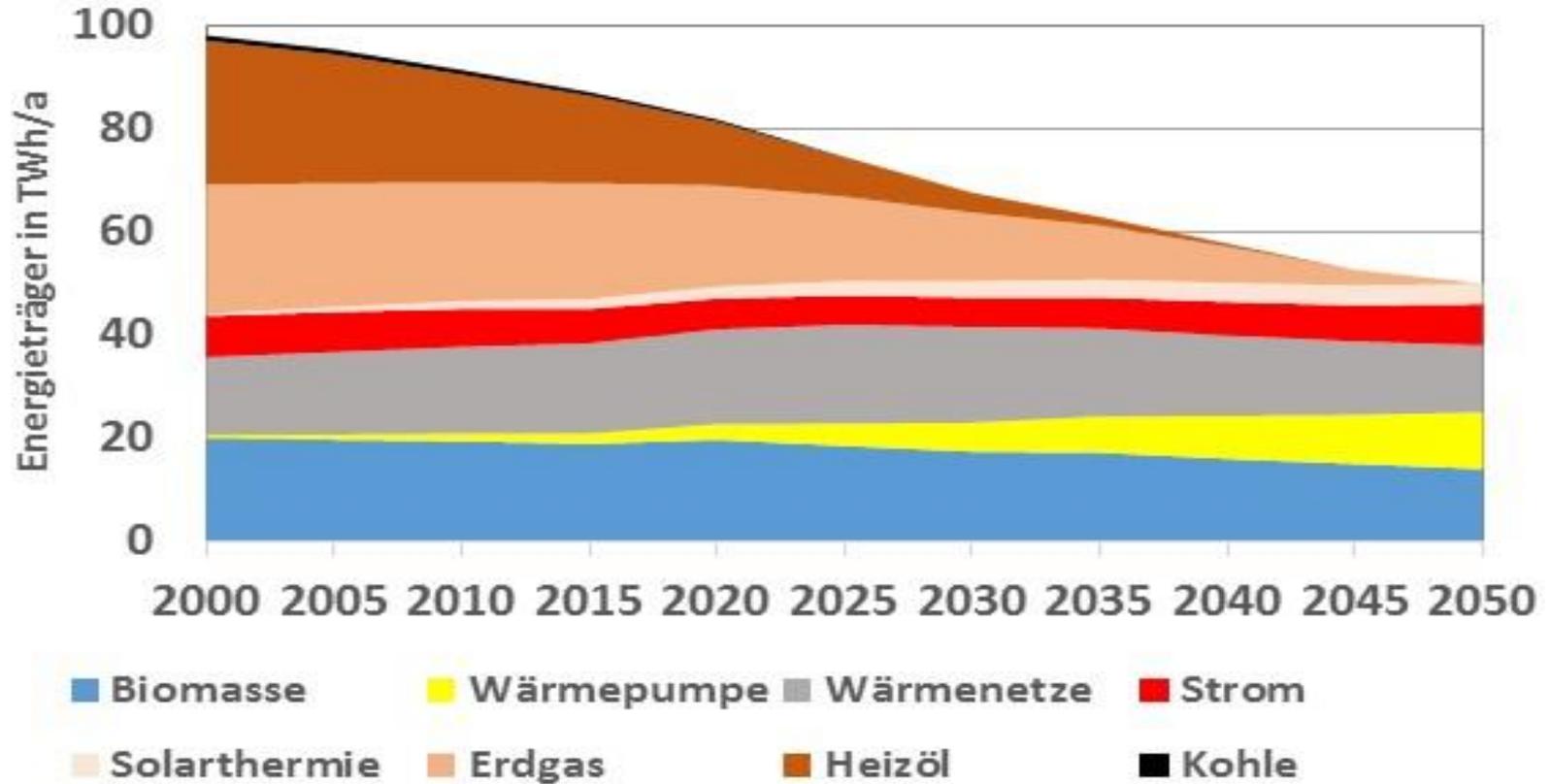
# Heizungsanlagen nach Wohnungszahl in Neubauten 2001 – 2013

Erster nationaler Energieeffizienzaktionsplan der Republik Österreich 2014 gemäß Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Heizungsenergiebedarf in Österreich bis 2050



© Quelle: Brauner, G.: Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung, Springer Verlag 2019

# Bedeutung der Sektorenkopplung

- Sektorenkopplung ermöglicht fossile Endenergie durch erneuerbare Elektrizität mit hoher Effizienz zu ersetzen
- Die verfügbaren regenerativen Potenziale erfordern eine Minderung des Endenergiebedarfs auf 40 - 50 %
- Hohe Effizienz mit geringen Umwandlungsverlusten ist notwendig
- Elektromobilität mit Akkumulator oder Oberleitung
- Wärmepumpe oder Speicherheizung
- Effizientere industrielle Prozesswärme mit Elektrodenkesseln, Elektrokesseln oder biogenen Energieträgern



Günther Brauner

# Systemeffizienz bei regenerativer Stromerzeugung

Strategien für effiziente  
Energieversorgung bis 2050

**EBOOK INSIDE**

 Springer Vieweg

Neuerscheinung  
Juni 2019

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

**em. Univ.-Prof. Dr. Günther Brauner**

**TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe**

**Gusshausstrasse 25/370-1, 1040 Wien**

**Tel.: +43 1 58801 37001**

**e-mail: [guenther.brauner@tuwien.ac.at](mailto:guenther.brauner@tuwien.ac.at)**