

EnInnov 2020 | 16. Symposium Energieinnovation an der TU Graz



Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland – Bestandsaufnahme und Entwicklungsprojektionen

Johannes Kochems | Fachgebiet Energie- und
Ressourcenmanagement, TU Berlin |
Graz, 14.02.2020

- 1 Methode (Metaanalyse)**
- 2 ausgewählte Ergebnisse des Methodenvergleichs**
- 3 ausgewählte Ergebnisse des Potenzialvergleichs**
- 4 Fazit und Ausblick**

Methode: Metaanalyse zu technischen Lastflexibilisierungspotenzialen in Deutschland



▪ Kriterien zur Studienauswahl

Kriterium	Ausprägung
Betrachtungsregion	Bundesrepublik Deutschland
Aktualität der Analysen	nach 2005 veröffentlicht
sektorale Abdeckung	▪ einzelne Sektoren (Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Haushalte) oder Gesamtdeutschland ▪ keine Analysen zu Einzelanwendungen und –prozessen
Potenzialbegriff und Datenverfügbarkeit	▪ mindestens technische Potenziale ▪ Angaben zu mindestens einem der analysierten Parameter verfügbar

➔ **30 Publikationen bzw. 24 Publikationsgruppen**
(s. Anhang; Folie 37)

Definition technisches Potenzial

Möglichkeit zur *Veränderung der aktuellen Lastinanspruchnahme* in positiver bzw. negativer Richtung unter Berücksichtigung prozess- bzw. anwendungsspezifischer, zeitabhängiger Mindest- bzw. Maximallasten (Steurer 2017, S. 37–38; Klobasa et al. 2013, S. 23) und *zeitlicher Verfügbarkeitsrestriktionen* (Ladwig 2018, S. 44–45)

Methodenvergleich: erfasste Methodenelemente



Kategorie	Methodenelemente
Methode i.e.S., Daten und Annahmen	▪ grundlegende Methode und Datenquellen ▪ zentrale Annahmen ▪ Folgeverwertung der technischen Potenzialabschätzung ▪ Zitationshäufigkeiten
Betrachtungsumfang	▪ industrielle Prozesse und Querschnittstechnologien ▪ Anwendungen und Branchen im GHD-Sektor ▪ Anwendungen im Haushaltssektor
Flexibilitätsparameter, Potenziale und Zeithorizont	▪ ausgewertete Flexibilitätsparameter ▪ Angaben zur Zeitverfügbarkeit ▪ verwendeter Potenzialbegriff ▪ abgedeckter Zeithorizont ▪ Basisjahr

▪ Erfassung in **dreigliedriger Abstufung**

- 0 Kriterium nicht erfüllt
- 0,5 Kriterium vereinzelt erfüllt
- 1 Kriterium erfüllt

Methodenvergleich: Fokus – Methode, Daten und Annahmen



Kategorie	Methodenelemente
Methode i.e.S., Daten und Annahmen	▪ grundlegende Methode und Datenquellen ▪ zentrale Annahmen ▪ Folgeverwertung der technischen Potenzialabschätzung ▪ Zitationshäufigkeiten
Betrachtungsumfang	▪ industrielle Prozesse und Querschnittstechnologien ▪ Anwendungen und Branchen im GHD-Sektor ▪ Anwendungen im Haushaltssektor
Flexibilitätsparameter, Potenziale und Zeithorizont	▪ ausgewertete Flexibilitätsparameter ▪ Angaben zur Zeitverfügbarkeit ▪ verwendeter Potenzialbegriff ▪ abgedeckter Zeithorizont ▪ Basisjahr

▪ Erfassung in **dreigliedriger Abstufung**

- 0 Kriterium nicht erfüllt
- 0,5 Kriterium vereinzelt erfüllt
- 1 Kriterium erfüllt

Potenzialvergleich: analysierte Parameter



Flexibilitätsparameter	Parameter
Leistungsparameter	Eignung für Lastmanagement
	positives Schaltpotenzial (Lastreduktion) in MW (min / Ø / max)
	negatives Schaltpotenzial (Lasterhöhung) in MW (min / Ø / max)
	Durchschnitts- / Mindest- / Maximalauslastung
	installierte Leistung / flexibilisierbarer Leistungsanteil
Zeitparameter	Aktivierungsdauer
	Schaltdauer
	Verschiebedauer
	Regenerationsdauer
	maximale Aktivierungen
Kostenparameter	spezifische Investitionsausgaben
	variable Kosten
	fixe Kosten

- Erfassung der **Parameterwerte**
 - je *Zeithorizont* (Status quo, 2020, 2025, ..., 2050)
 - je *Sektor* (Industrie, GHD, Haushalt)
 - je *Prozess bzw. Anwendung*

Potenzialvergleich: Fokus – Schaltleistungen, Dauern und Kosten

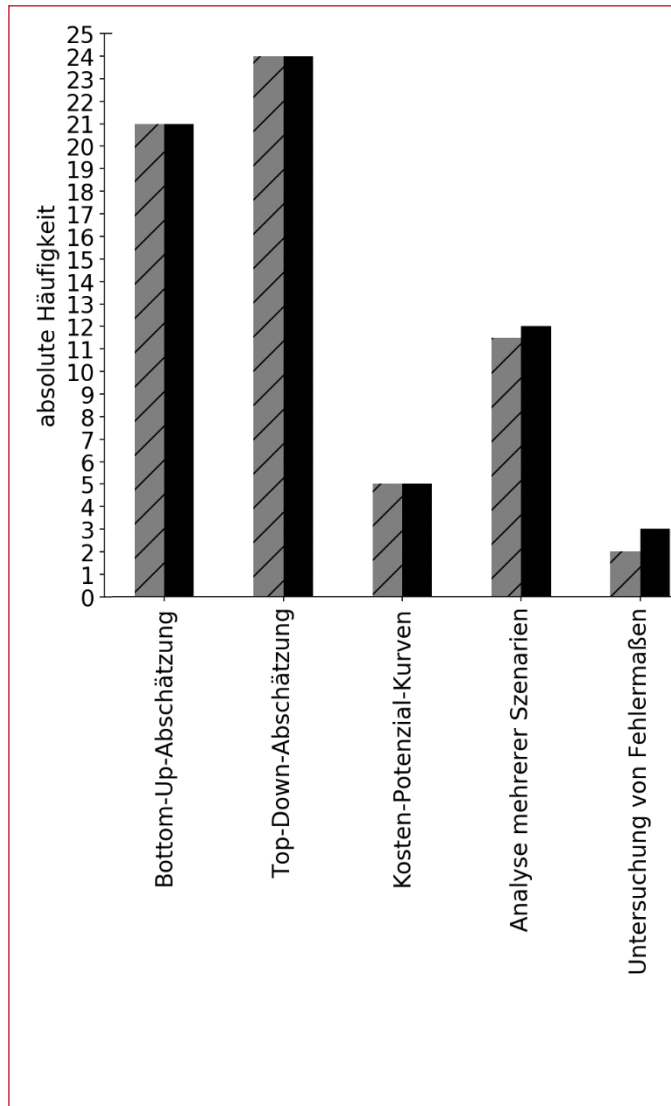


Flexibilitätsparameter	Parameter
Leistungsparameter	Eignung für Lastmanagement
	positives Schaltpotenzial (Lastreduktion) in MW (min / Ø / max)
	negatives Schaltpotenzial (Lasterhöhung) in MW (min / Ø / max)
	Durchschnitts- / Mindest- / Maximalauslastung
Zeitparameter	installierte Leistung / flexibilisierbarer Leistungsanteil
	Aktivierungsdauer
	Schaltdauer
	Verschiebedauer
	Regenerationsdauer
Kostenparameter	maximale Aktivierungen
	spezifische Investitionsausgaben
	variable Kosten
	fixe Kosten

- Erfassung der **Parameterwerte**
 - je *Zeithorizont* (Status quo, 2020, 2025, ..., 2050)
 - je *Sektor* (Industrie, GHD, Haushalt)
 - je *Prozess bzw. Anwendung*

- 1 Methode (Metaanalyse)**
- 2 ausgewählte Ergebnisse des Methodenvergleichs**
- 3 ausgewählte Ergebnisse des Potenzialvergleichs**
- 4 Fazit und Ausblick**

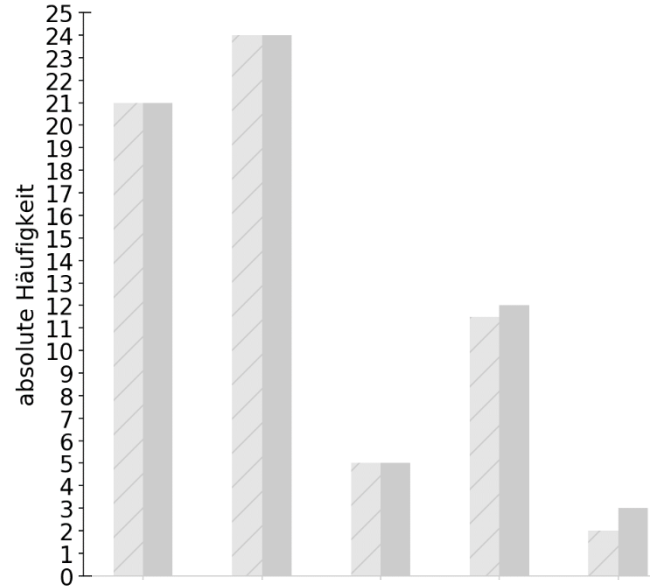
Methodenvergleich: Methode und Datenquellen



Methodischer Ansatz zur Potenzialschätzung

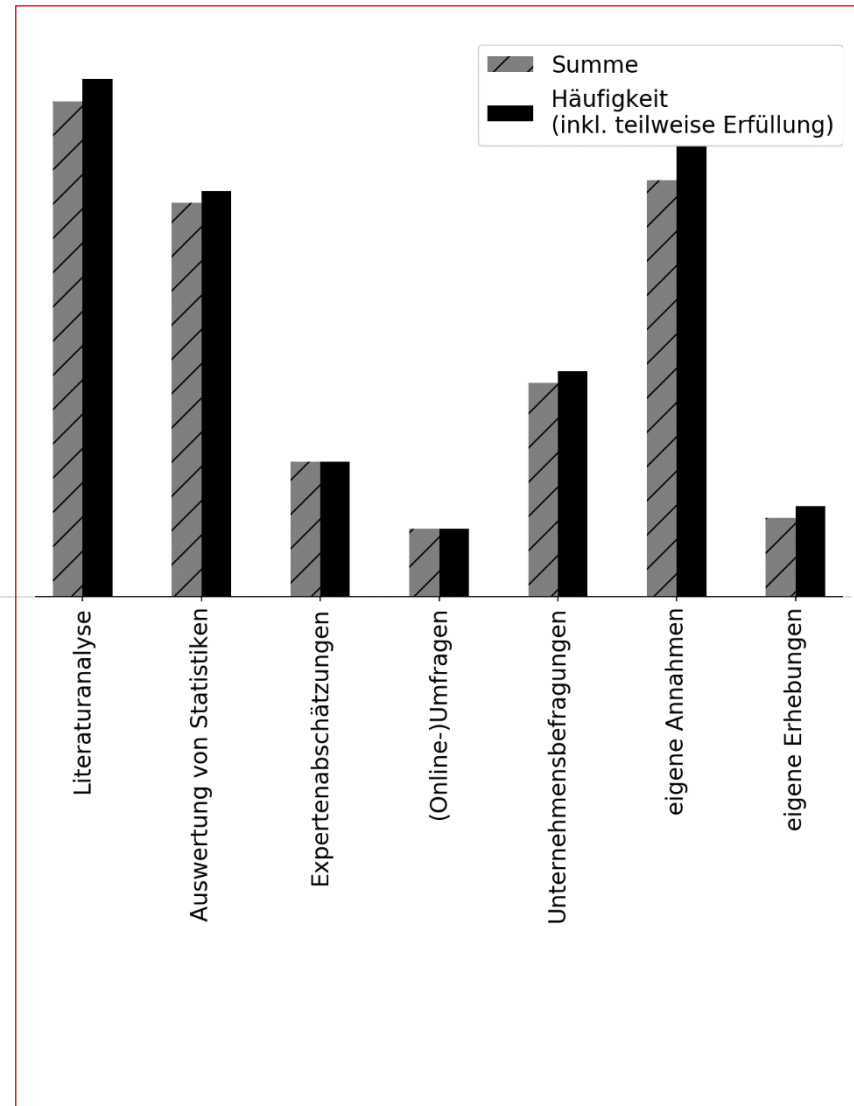
- **überwiegend hybrider Ansatz** aus Top-Down und Bottom-Up-Ansatz (21 von 24)
- Analyse **mehrerer Szenarien** in der Hälfte der Publikationsgruppen (12 von 24)
- Untersuchung von Fehlermaßen selten (systematisch nur 1 Untersuchung; thematisiert in 2 weiteren)

Methodenvergleich: Methode und Datenquellen

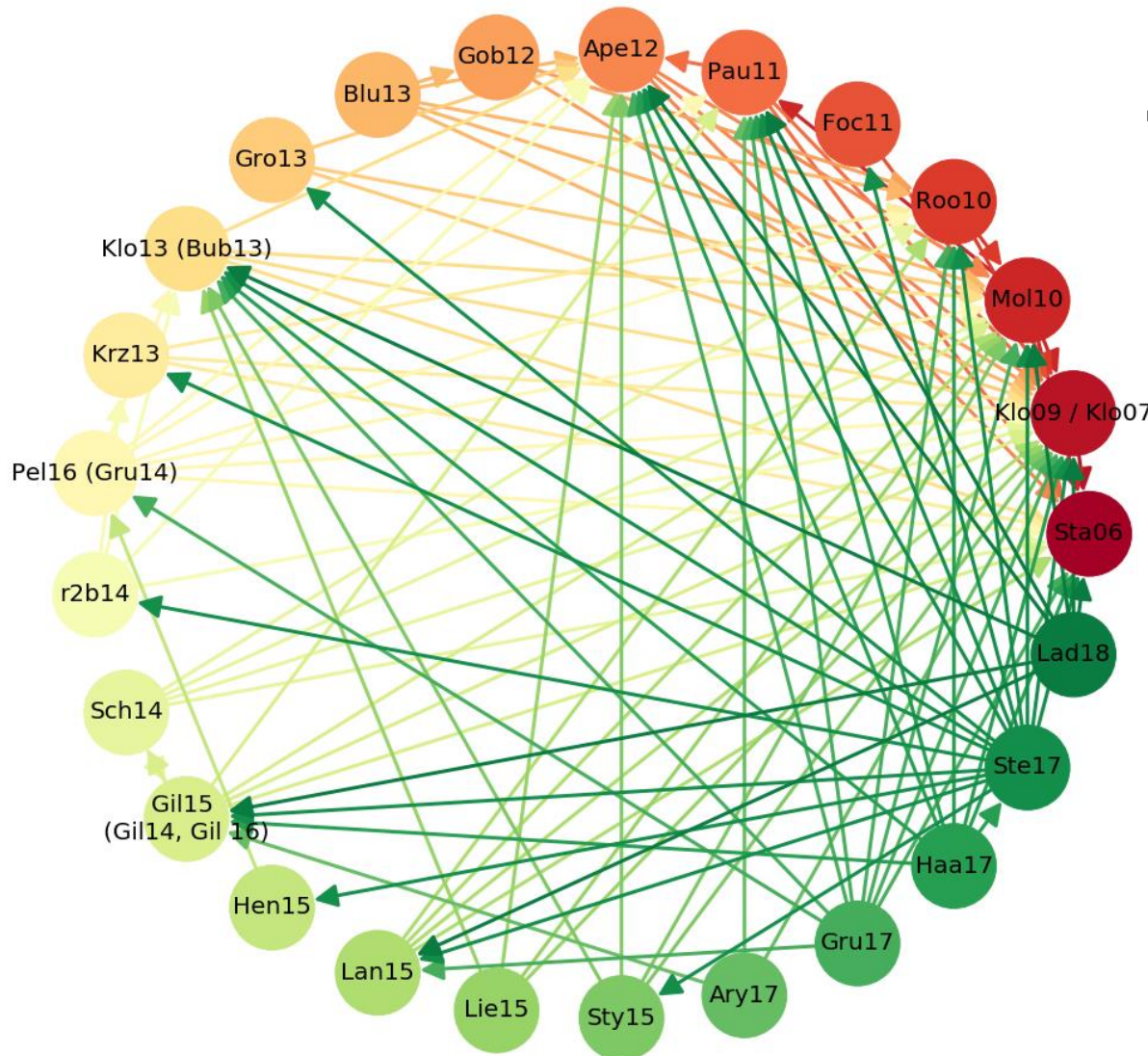


■ Datenquellen

- sehr häufig
 - vorhandene **Potenzialstudien** (23 von 24)
 - **Statistiken** öffentlicher Stellen (17 von 24) und von Verbänden (13 von 24)
 - Smart-Metering und Lastmanagement-**Feldstudien** (13 von 24)
- in Publikationen **Annahmen** v.a. zu...
 - Zeitverfügbarkeiten und Schaltzeiten
 - flexibilisierbaren Leistungsanteilen



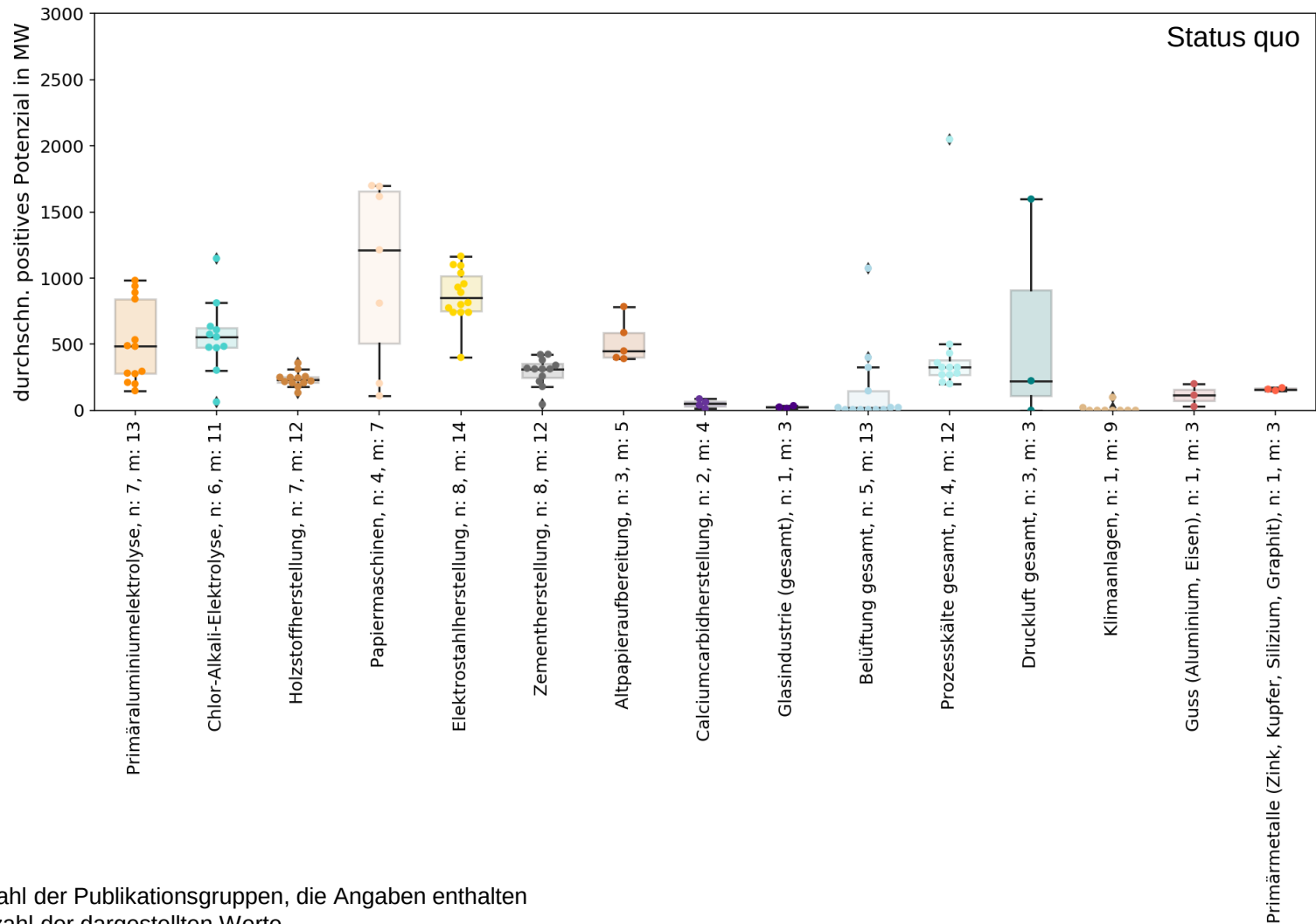
Methodenvergleich: Zitationshäufigkeiten



- **Wechselseitige Abhängigkeit des Literaturspektrums**
 - am häufigsten zitiert:
 - Klobasa 2007 / 2009 (21 von 24)
 - Molly et al. 2010 (13 von 24)
 - Stadler 2006 (13 von 24)
 - Apel et al. 2012 (11 von 24)
 - Beeinflussung der Ergebnisse der Potenzialschätzung

- 1 Methode (Metaanalyse)**
- 2 ausgewählte Ergebnisse des Methodenvergleichs**
- 3 ausgewählte Ergebnisse des Potenzialvergleichs**
- 4 Fazit und Ausblick**

Industrie: Potenziale bei energieintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien



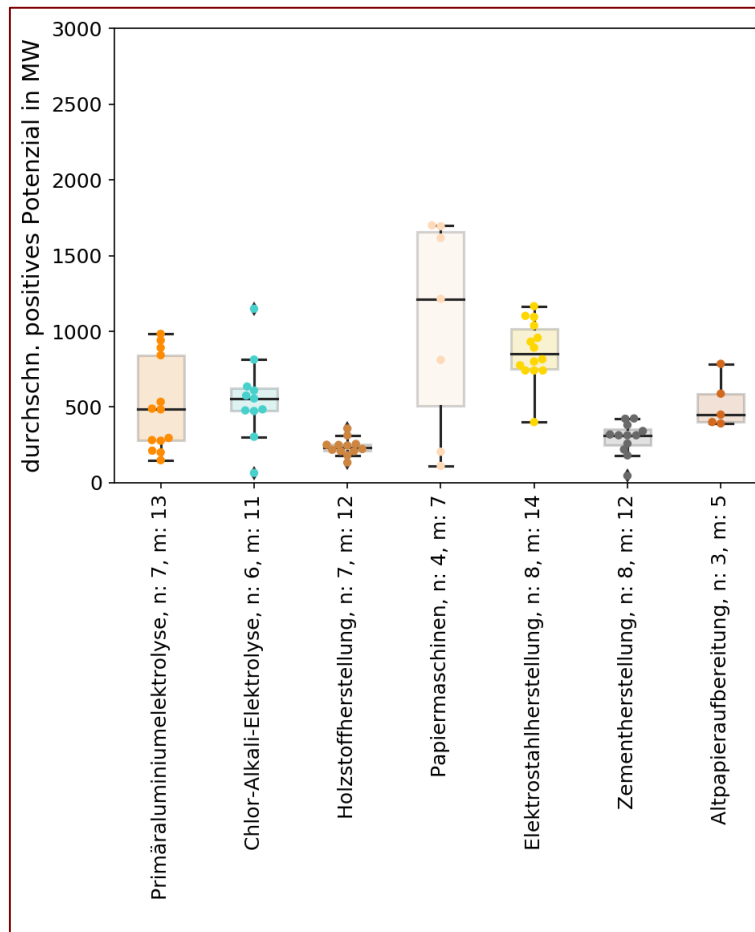
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Industrie: Potenziale bei energieintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien



■ Prozesse

- große positive Potenziale (Lastreduktion) v.a. bei **energieintensiven Prozessen**

- Primäraluminiumelektrolyse
- Chlor-Alkali-Elektrolyse
- Holzstoff (Papier)
- Elektrostahl
- Zement

- **Potenziale je Einzelprozess** im Bereich von mehreren 100 bis über 1.000 MW

- zumeist große Spannbreiten; Ausnahmen

- Holzstoff
- Zement

- überwiegend **Lastverzicht**, d. h. nur positive Potenziale (Lastreduktion)

n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

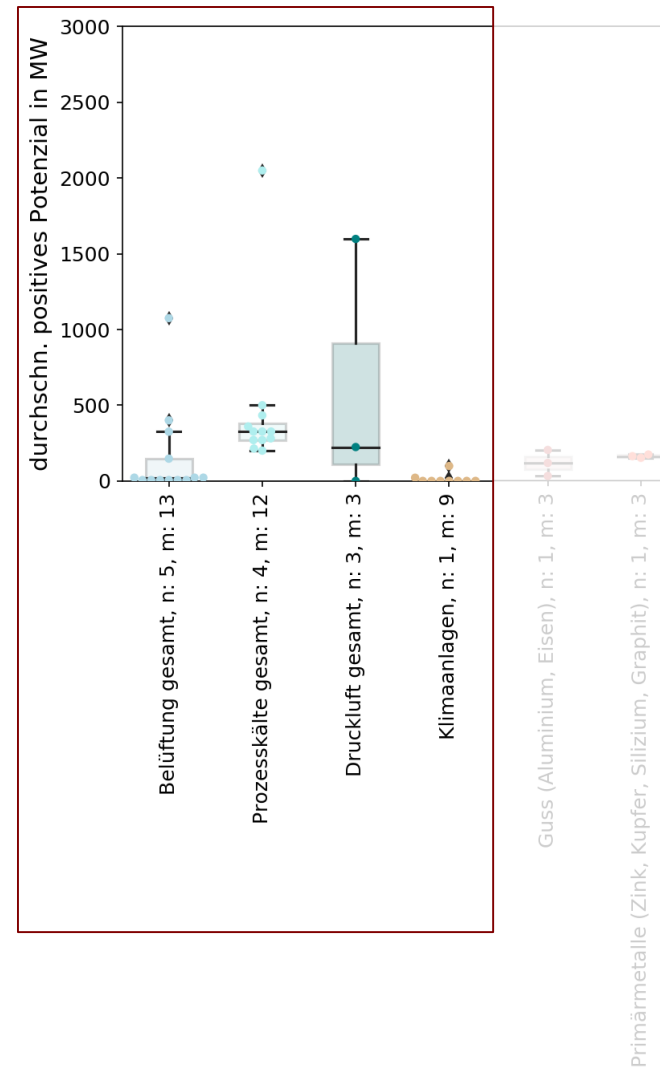
EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Industrie: Potenziale bei energieintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien



▪ Querschnittstechnologien

- große positive Potenziale in den Bereichen
 - **Belüftung**
 - **Prozesskälte**
 - **Druckluft**
- **Lastverschiebung**
→ Höhe der negativen Potenziale ähnlich
- Datenlage verbesserungswürdig



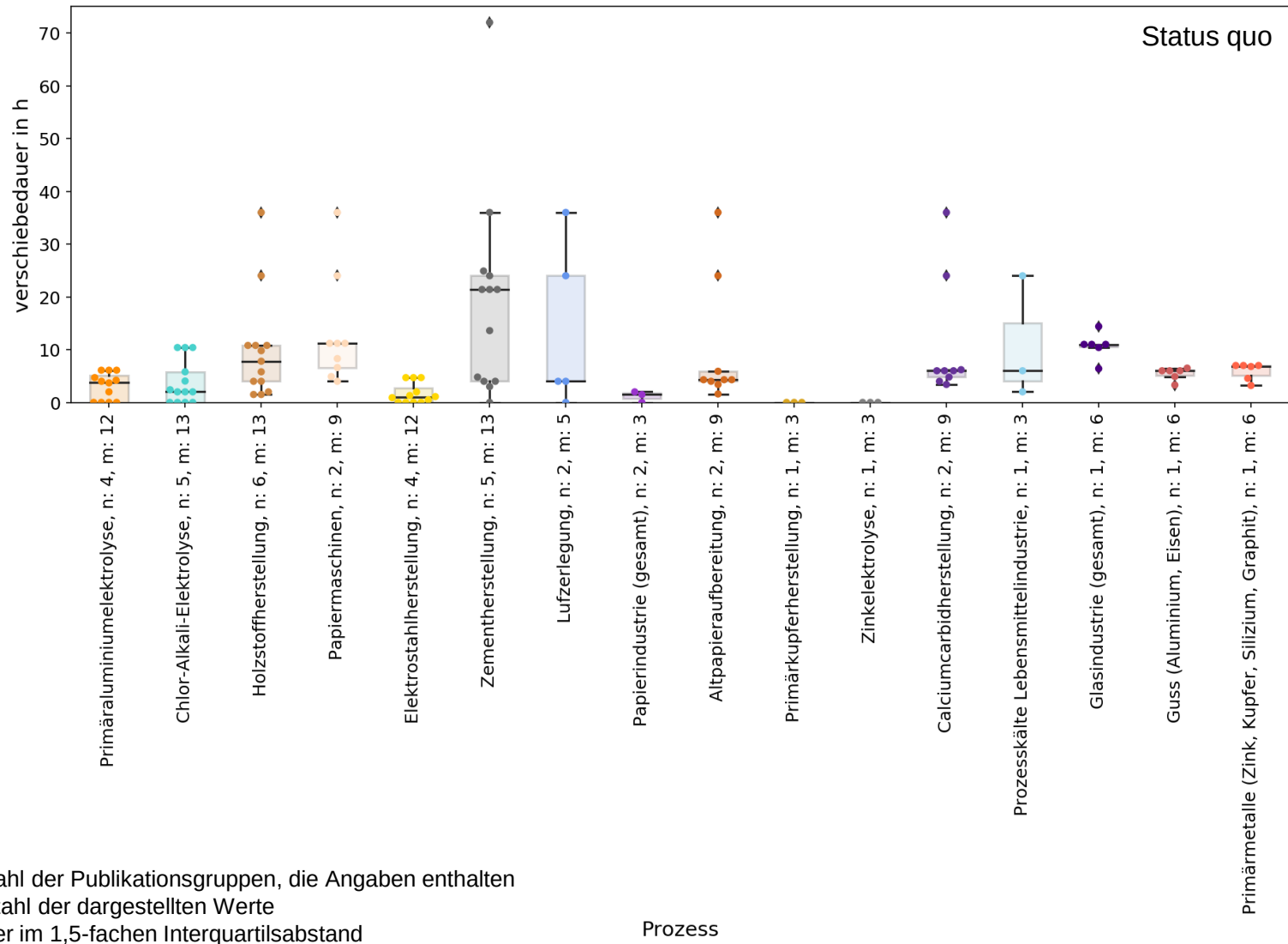
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Industrie: Schalt- und Verschiebedauern im Bereich bis etwa fünf Stunden konzentriert



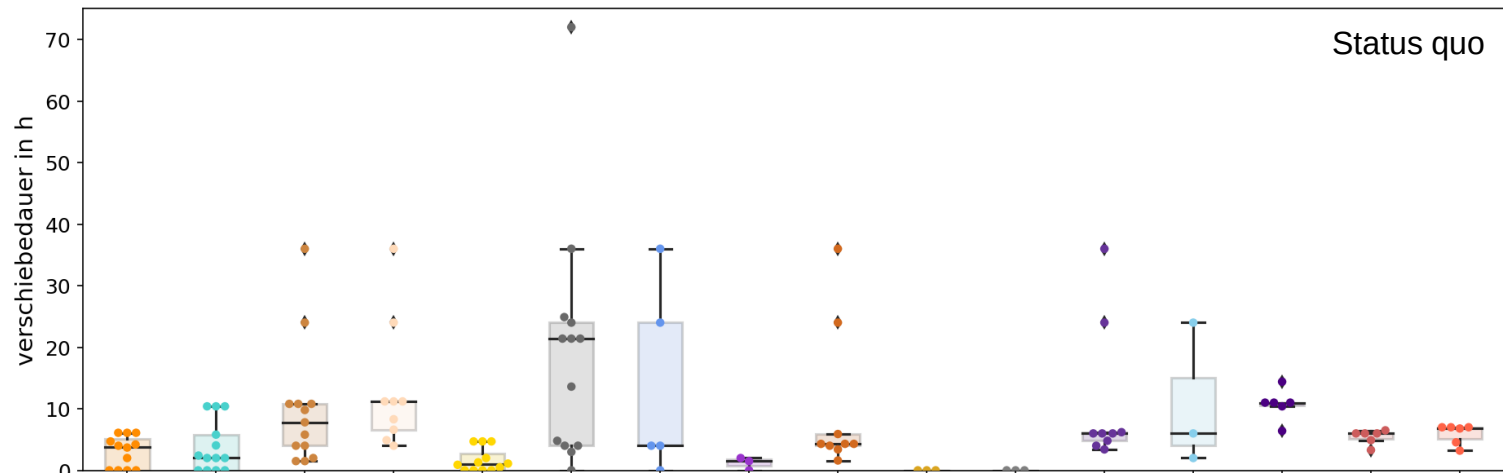
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Industrie: Schalt- und Verschiebedauern im Bereich bis etwa fünf Stunden konzentriert



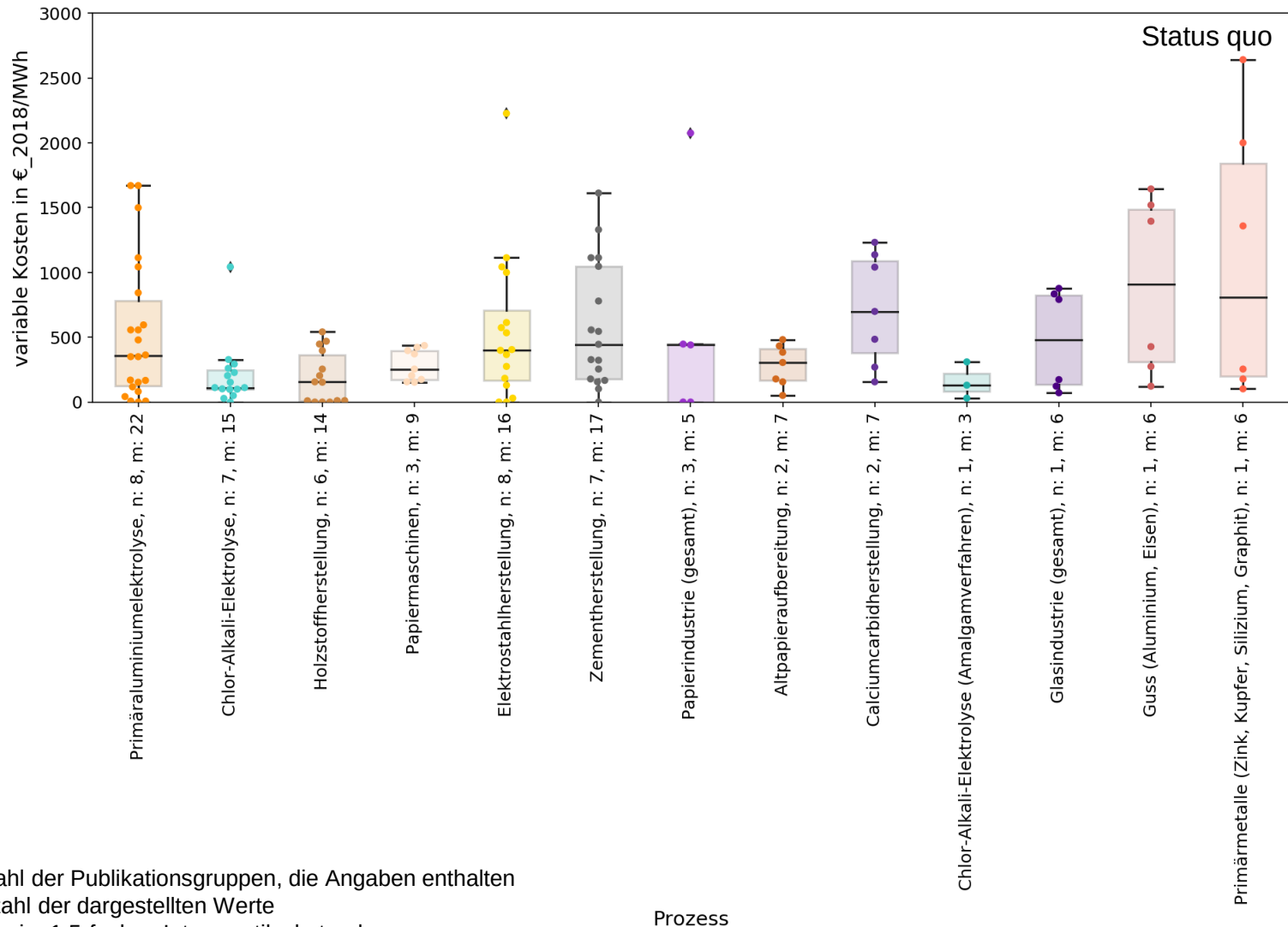
▪ Verschiebedauern

- nur relevant, wenn Publikation Möglichkeit der **Lastverschiebung** einräumt
- für einzelne Prozesse / Querschnittstechnologien **auch längere Dauern** bis ca. 40 Stunden
→ auch tagesübergreifende Verschiebemöglichkeit angenommen

▪ Schaltdauern (nicht dargestellt)

- starke Konzentration der Werte im Bereich **bis fünf Stunden**
- **überwiegend** Werte von **ein bis drei Stunden**

Industrie: variable Kosten streuen stark; spezifische Investitionen zumeist sehr gering



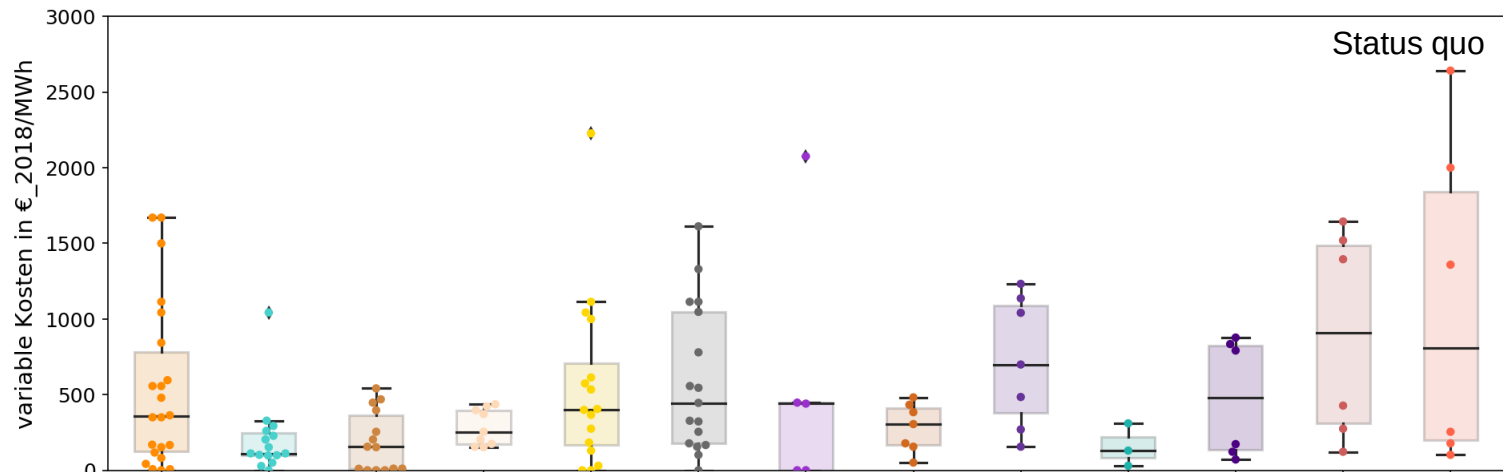
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Industrie: variable Kosten streuen stark; spezifische Investitionen zumeist sehr gering



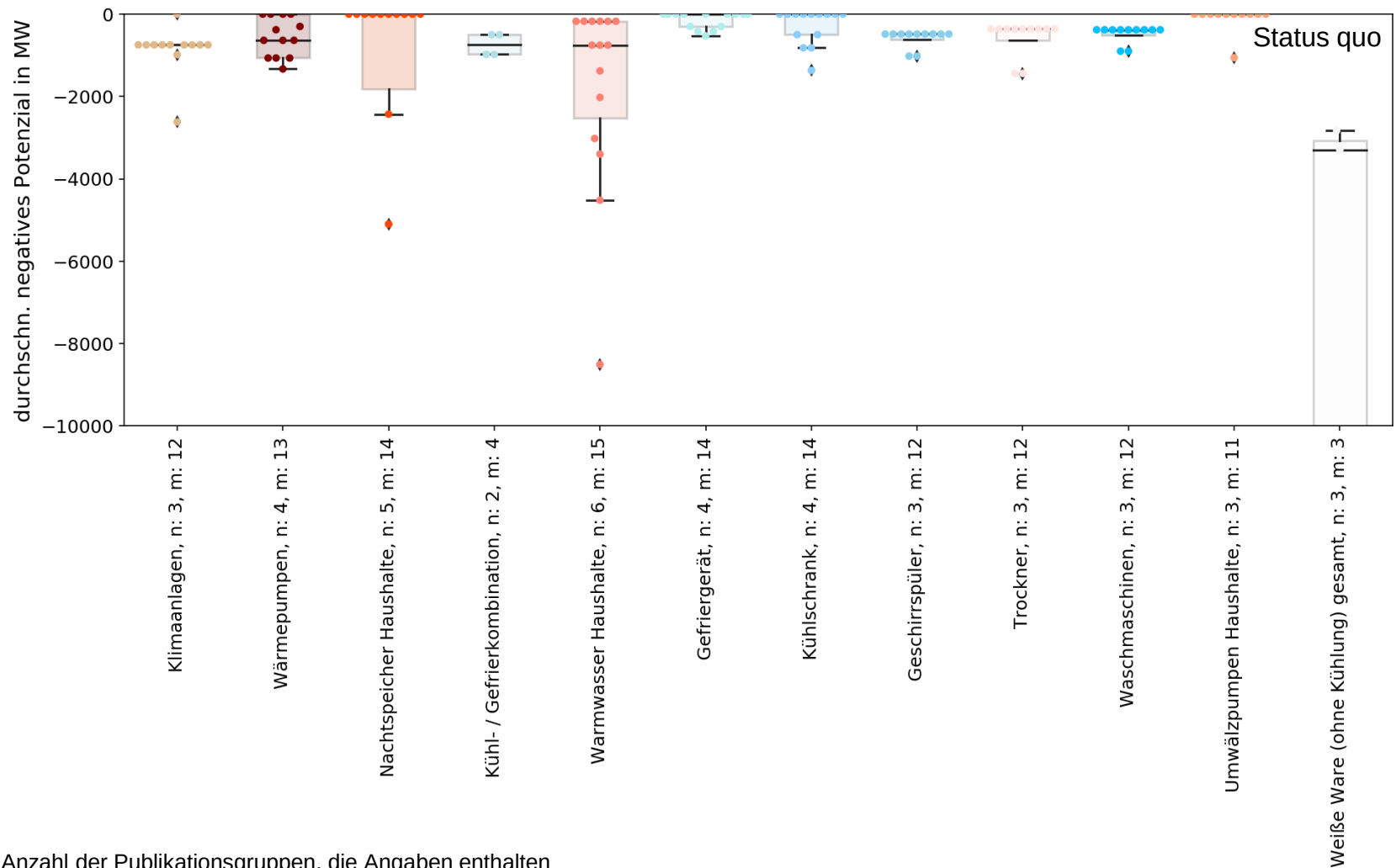
■ variable Kosten

- sehr **breite Wertespanne**
- Kosten nahe 0 für Lastverschiebungen angesetzt
- Kosten von mehreren 100 €₂₀₁₈/MWh bis deutlich > 1.000 €₂₀₁₈/MWh für **Lastverzicht**
→ **Value of Lost Load**

■ spezifische Investitionsausgaben (nicht dargestellt)

- Werte **überwiegend sehr gering** → zumeist nahe 0 €₂₀₁₈/kW
- Grund: Annahme vorhandener **Steuerungsinfrastruktur**

Haushalte: Verschiebepotenziale (binnen 24 Stunden) vor allem bei Wärme- und Kälteanwendungen



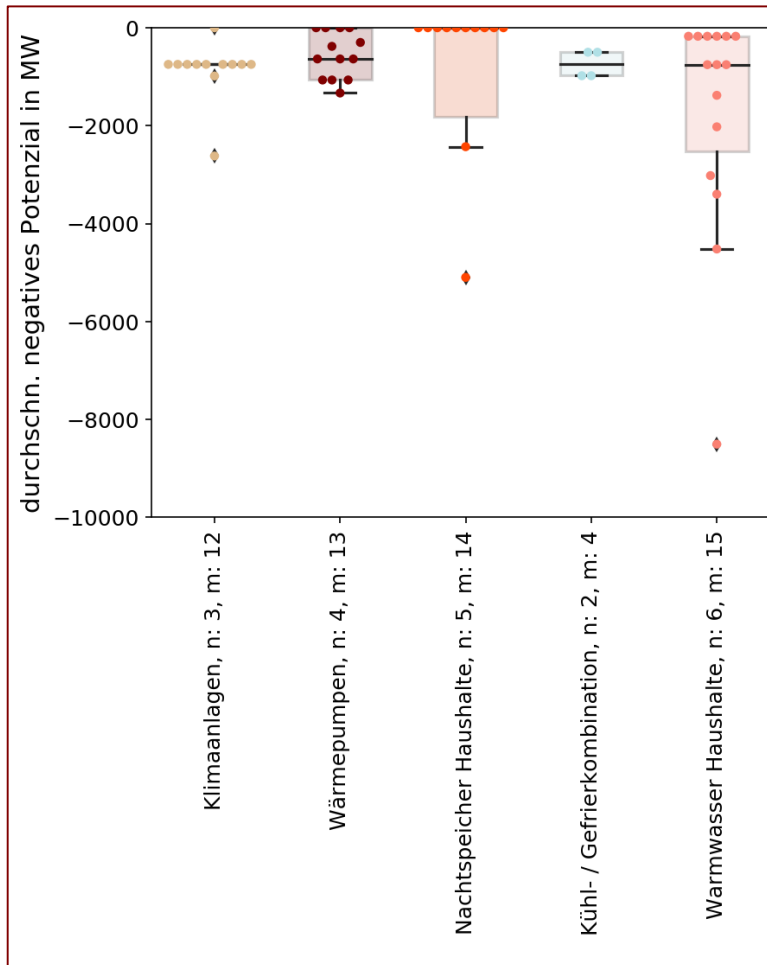
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Haushalte: Verschiebepotenziale (binnen 24 Stunden) vor allem bei Wärme- und Kälteanwendungen



■ Haushaltsanwendungen

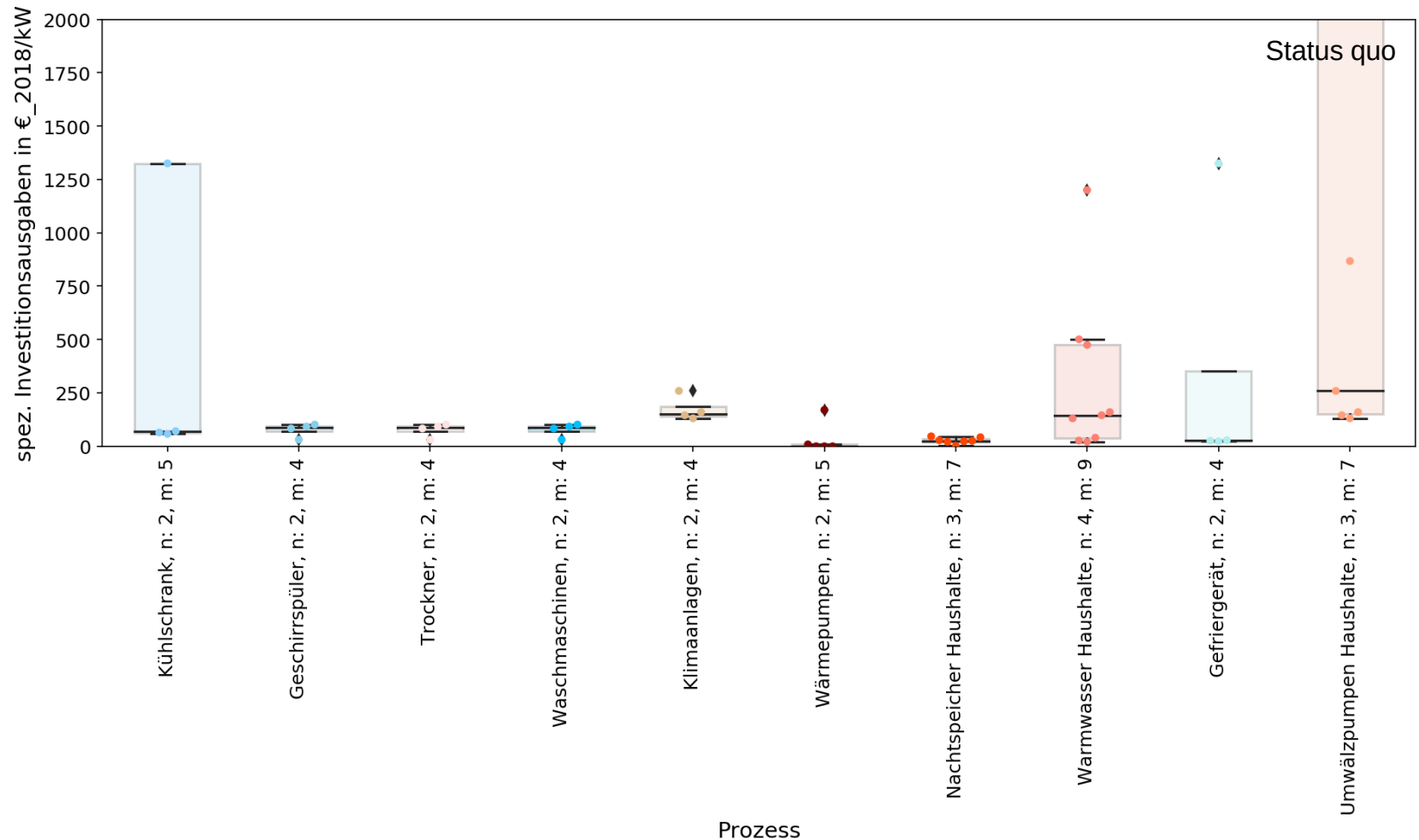
- **in Summe** erhebliches Flexibilisierungspotenzial
- **Schaltdauern (nicht dargestellt)**
 - Konzentration im Bereich bis 5 Stunden
 - Werte bis > 10 Stunden (positiv und negativ)
- **dominierende Anwendungen**
 - **Wärmebereitstellung:** Nachtspeicher, Wärmepumpen, Warmwasser (Speicher)
 - **Kältebereitstellung:** Kühl- und Gefrieranwendungen, Klimaanlage
 - zudem: Weiße Ware
- **Verschiebedauern (nicht dargestellt)**
 - alle Verschiebungen binnen 24 Stunden
- positive Potenziale weitgehend analog
→ **Lastverschiebung**

n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

Haushalte: veraltete Datenstände bei spezifischen Investitionsausgaben; variable Kosten nahe 0



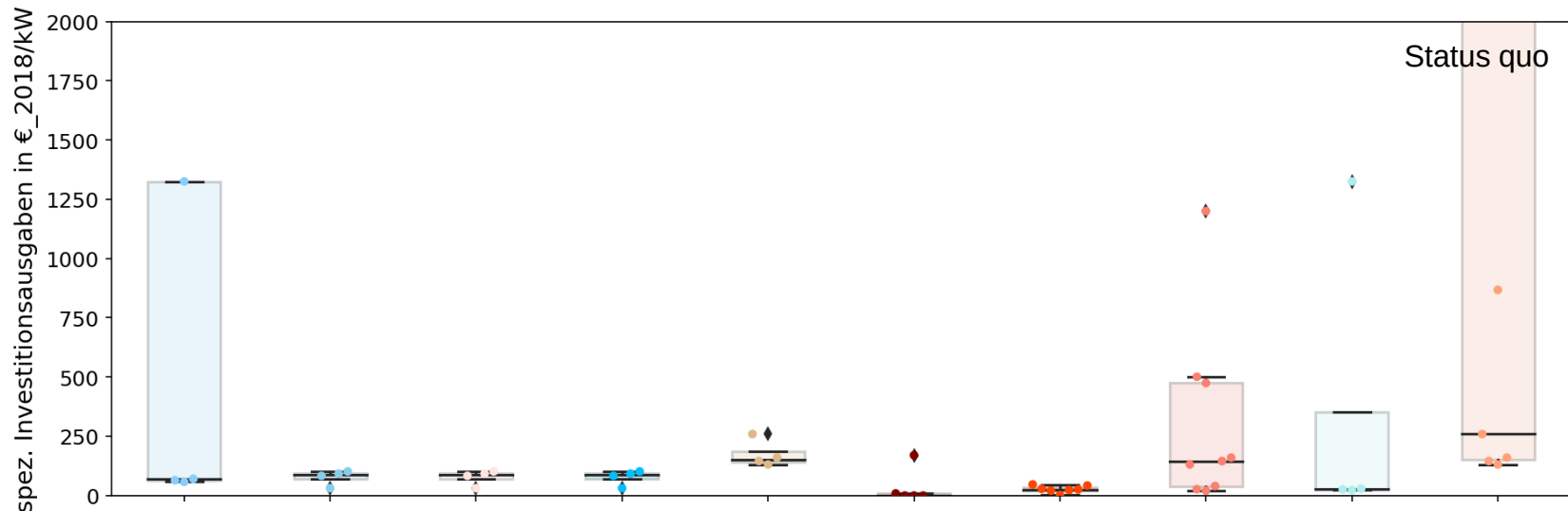
n: Anzahl der Publikationsgruppen, die Angaben enthalten

m: Anzahl der dargestellten Werte

Whisker im 1,5fachen Interquartilsabstand

EnInnov2020 | J. Kochems | Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland

Haushalte: veraltete Datenstände bei spezifischen Investitionsausgaben; variable Kosten nahe 0



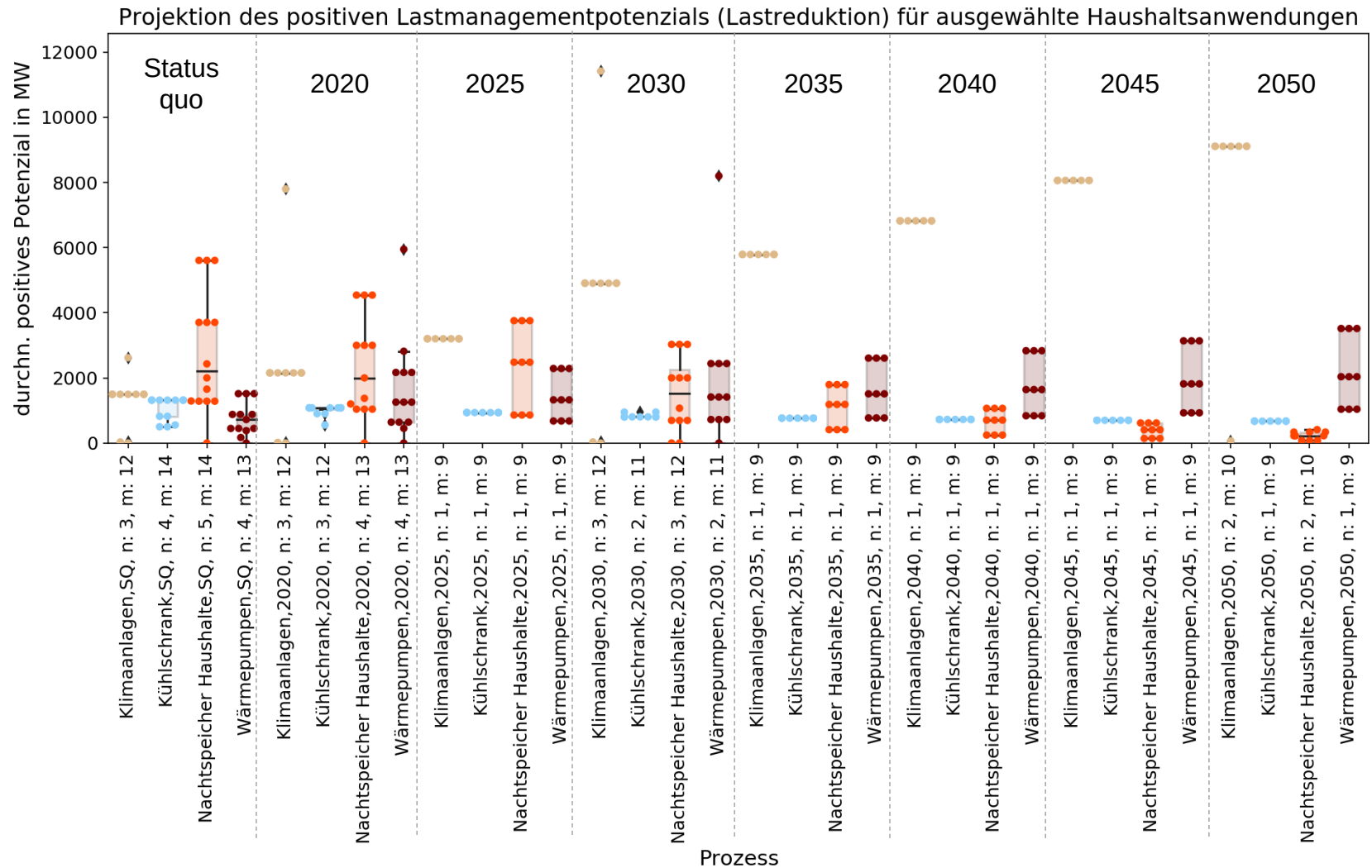
▪ spezifische Investitionsausgaben

- sehr breite Wertespanne von unter 100 €₂₀₁₈/kW (Weiße Ware) bis weit über 2.000 €₂₀₁₈/kW
- zwischenzeitlich erfolgte **Kostendegression** bei Smart Metern / Steuerboxen

▪ variable Kosten (nicht dargestellt)

- Kosten der Lastverschiebung mit ≈ 0 angesetzt
- Komforteinschränkungen für einzelne Anwendungen (?)

Ausblick: Potenzialanstieg für Wärmepumpen, Klimaanlage, Elektrostahl; sonst eher rückläufige Tendenz



- 1 Methode (Metaanalyse)**
- 2 ausgewählte Ergebnisse des Methodenvergleichs**
- 3 ausgewählte Ergebnisse des Potenzialvergleichs**
- 4 Fazit und Ausblick**

Fazit: Datenlage

I: Industrie / G: GHD / H: Haushalte
 P: Prozesse / Q: Querschnittstechnologien
 + positiv / - negativ
 Ø Durchschnitt / m: min. bzw. max.



Flexibilitätsparameter	Parameter	I		G		H	
Leistungsparameter	Eignung für Lastmanagement						
	positives Schaltpotenzial in MW (min / Ø / max)	P	Q				
	negatives Schaltpotenzial in MW (min / Ø / max)	P	Q				
	Durchschnitts- / Mindest- / Maximalauslastung	Ø	m	Ø	m	Ø	m
	installierte Leistung / flexibilisierbarer Leistungsanteil						
Zeitparameter	Aktivierungsdauer						
	Schaltdauer (pos / neg)	+	-	+	-		
	Verschiebedauer						
	Regenerationsdauer						
	maximale Aktivierungen						
Kostenparameter	spezifische Investitionsausgaben						
	variable Kosten						
	fixe Kosten						

- Datenlage im **GHD**-Sektor ausbaufähig
- Datenlage in Bezug auf **Kosten- und Zeitverfügbarkeit** verbesserungswürdig
- Beitrag zur Verbesserung der Datenlage durch **Bündelung**

	1-2 Publikationen mit 1-3 Datenpunkten je Kategorie
	1-3 Publikationen oder einstellige Anzahl Datenpunkte je Kategorie
	zweistellige Anzahl Datenpunkte für mehrere Kategorien

▪ Fazit

- Metaanalyse zu **technischen Lastmanagementpotenzialen** für breites Spektrum von Prozessen und Anwendungsbereichen
- **Status quo** und mögliche **zukünftige Potenzialentwicklung**
- breite Spannweiten bei nahezu allen Parametern
 - erhebliche **Unsicherheiten** in der Potenzialquantifizierung / **Heterogenität** der Grundgesamtheiten
- Abdeckung insbesondere bei **Kosten und Zeitverfügbarkeit** verbesserungswürdig

➔ Weitere **Forschungsbedarfe**

- prozess- und anwendungsscharfe empirische Erhebungen in hoher Detaillierung
- Studien zu den Aspekten Kosten und Zeitverfügbarkeit

▪ Fazit

- Metaanalyse zu **technischen Lastmanagementpotenzialen** für breites Spektrum von Prozessen und Anwendungsbereichen
- **Status quo** und mögliche **zukünftige Potenzialentwicklung**
- breite Spannweiten bei nahezu allen Parametern
 - erhebliche **Unsicherheiten** in der Potenzialquantifizierung / **Heterogenität** der Grundgesamtheiten
- Abdeckung insbesondere bei **Kosten und Zeitverfügbarkeit** verbesserungswürdig

➡ Weitere **Forschungsbedarfe**

- prozess- und anwendungsscharfe empirische Erhebungen in hoher Detaillierung
- Studien zu den Aspekten Kosten und Zeitverfügbarkeit

▪ Ausblick

- Ableitung von **Parametrierungen** für Fundamentalmodell des Elektrizitätsmarkts

➡ Ziel: Quantifizierung gesamtwirtschaftlicher Potenziale

- Fallstudien für **einzelwirtschaftliche Lastmanagementpotenziale**

➡ Ziel: Analyse der einzelwirtschaftlichen Rationalität

- [Ape12] Apel, Rolf; Aundrup, Thomas; Buchholz, Bernd Michael; Domels, Hans Peter; Funke, Stephan; Gesing, Thomas et al. (2012): Demand Side Integration. Lastverschiebungspotenziale in Deutschland (Gesamttext). Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG). Hg. v. VDE. Frankfurt am Main.
- [Ary17] Aryandoust, Arsam; Lilliestam, Johan (2017): The potential and usefulness of demand response to provide electricity system services. In: *Applied Energy* 204, S. 749–766. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.034.
- [Blu13] Blum, Anne-Kathrin; Braun, Marco (2013): Potentialanalyse für das Demand Side Managament im deutschen Industriesektor und die Integration in die Stromwirtschaft. In: *Karlsruher Hochschulschriften für Wirtschaftsingenieurwesen und International Management* (1).
- [Bub13] Buber, Tim; Gruber, Anna; Klobasa, Marian; Roon, Serafin von (2013): Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. In: *DIW Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung* 82 (3), S. 89–106.
- [Els15] Elsner, Peter; Erlach, Berit; Fishedick, Manfred; Lunz, Benedikt; Sauer, Dirk Uwe (2015): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge. Analyse. Hg. v. Peter Elsner, Manfred Fishedick und Dirk Uwe Sauer. Fraunhofer ICT, Wuppertal Institut, RWTH Aachen, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München (Energiesysteme der Zukunft).
- [Foc11] Focken, Ulrich; Bümmerstede, Jens; Klobasa, Marian (2011): Kurz- bis mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor. Öffentlicher Abschlussbericht. Hg. v. energy & meteo GmbH und Fraunhofer ISI. Oldenburg, Karlsruhe.
- [Gar18] Gartner, Mathias (2018): Entwicklung eines monetären Bewertungsverfahrens für Einsparungen durch Nachfrageflexibilisierung im Stromsektor, Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master of Science am Fachgebiet Energie- und Ressourcenmanagement der TU Berlin.
- [Gar19] Gartner, Mathias; Kochems, Johannes; Seim, Stephan und Müller-Kirchenbauer, Joachim (2019): Ein einzelwirtschaftliches Bewertungsmodell für Nachfrageflexibilisierung im Stromsektor, Berlin (Working Paper Energie und Ressourcen), DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3415011>.

- [Gil14] Gils, Hans Christian (2014): Assessment of the theoretical demand response potential in Europe. In: *Energy* 67, S. 1–18. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.019.
- [Gil15] Gils, Hans Christian (2015): Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [Gil16] Gils, Hans Christian (2016): Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study. In: *Applied Energy* 162, S. 401–415. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.083.
- [Gob12] Gobmaier, Thomas; Mauch, Wolfgang; Beer, Michael; Roon, Serafin von; Schmid, Tobias; Mezger, Thomás et al. (2012): Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens. im Auftrag von E.ON Energie, StMWFK und StMWIVT. Forschungsstelle für Energiewirtschaft. München.
- [Gro13] Grote, Fabian; Drees, Tim; Budke, Jan; Moser, Albert (2013): Einfluss des Demand Side Managements auf den Kraftwerkseinsatz in Europa. In: *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 63 (12), S. 32–36.
- [Gru14] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; Roon, Serafin von; Carr, Luis (2014): Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse. In: IEE TU Graz (Hg.): 13. Symposium Energieinnovation. 13. Symposium Energieinnovation. Graz, 12.-14.2.2014. Graz.
- [Gru17] Gruber, Anna-Maria (2017): Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. Dissertation. Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik.
- [Haa17] Haasz, Thomas (2017): Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell. Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. IER.
- [Hen15] Henning, Hans-Martin; Sauer, Dirk Uwe (2015): Demand-Side-Management im Wärmemarkt. Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Hg. v. acatech. Fraunhofer ISE; KIT; RWTH Aachen. München (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).

- [Klo07] Klobasa, Marian (2007): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Dissertation. ETH Zürich, Zürich.
- [Klo09] Klobasa, Marian (2009): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl. (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale").
- [Klo13] Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Lüllmann, Arne; Schleich, Joachim; Buber, Tim; Gruber, Anna; Hünecke, Marie (2013): Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Endbericht. Hg. v. Agora Energiewende. Fraunhofer ISI, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. Karlsruhe, München, Berlin.
- [Krz13] Krzikalla, Norbert; Achner, Sigggi; Brühl, Stefan (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. BET. Bochum (BEE Plattform Systemtransformation).
- [Lad18] Ladwig, Theresa (2018): Demand Side Management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.
- [Lan15] Langrock, Thomas; Achner, Sigggi; Jungbluth, Christian; Marambio, Constanze; Michels, Armin; Weinhard, Paul et al. (2015): Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. Im Auftrag des Umweltbundesamts. Hg. v. UBA. BET, Trianel. Aachen, Dessau-Roßlau.
- [Lie15] Liebe, Andrea; Wissner, Matthias (2015): Der flexible Verbraucher - Potenziale zur Lastverlagerung im Haushaltsbereich. Studie für das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. WIK. Bad Honnef.
- [Mol10] Molly, Jens Peter; Neddermann, Bernd; Schorer, Till; Callies, Doron; Knorr, Kaspar; Rohrig, Kurt et al. (2010): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Endbericht. Unter Mitarbeit von Thomas Benz, Ervin Spahic, Adrian Amelung, Fritz Crotogino, Holger Müller, Ronald Völzke et al. Hg. v. dena. EWI; 50Hertz; Amprion; DEWI; EnBW TNG; Fraunhofer IWES; TenneT; FH Köln; Uni Kassel. Berlin.
- [Pau11] Paulus, Moritz; Borggreffe, Frieder (2011): The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. In: *Applied Energy* 88 (2), S. 432–441. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.03.017.

Quellen (4/4)



- [Pel16] Peller, Christoph; Schmid, Tobias (2016): Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030. Teil 2: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher. FfE. München.
- [r2b14] r2b (2014): Endbericht Leitstudie Strommarkt. Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Köln.
- [Ren18] Renner, Lara (2018): Systematischer Vergleich von Potenzialabschätzungen für die Flexibilität der Stromnachfrage des Sektors GHD, Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades eines Bachelor of Science am Fachgebiet Energie und Ressourcenmanagement der TU Berlin.
- [Roo10] Roon, Serafin von; Gobmaier, Thomas (2010): Demand Response in der Industrie. Status und Potenziale in Deutschland. München.
- [Sch14] Scholz, Yvonne; Gils, Hans Christian; Pregger, Thomas; Heide, Dominik; Cebulla, Felix; Cao, Karl-Kiên et al. (2014): Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung. BMWI, DLR. Stuttgart.
- [Sta06] Stadler, Ingo (2006): Demand Response. Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Zugl.: Kassel, Univ., Habil., 2006. Berlin: dissertation.de (Habilitation).
- [Ste17] Steurer, Martin (2017): Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER).
- [Ste15] Steurer, Martin; Klemp, Nikolai; Hufendiek, Kai; Baumgart, Bastian; Steinhausen, Burkhard (2015): Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland. IER; Trianel. Stuttgart, Aachen.
- [Sty15] Styczynski, Zbigniew A.; Sauer, Dirk Uwe; Aundrup, Thomas; Hanson, Jutta; Madlener, Reinhard; Markowz, Georg et al. (2015): Demand-Side-Management im Strommarkt. Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Hg. v. Zbigniew A. Styczynski und Dirk Uwe Sauer. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; RWTH Aachen. München (Energiesysteme der Zukunft).
- [Vog18] Vogt, Samira (2018): Systematischer Vergleich von Potenzialabschätzungen für Nachfrageflexibilität der Industrie im deutschen Stromsektor, Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades eines Bachelor of Science am Fachgebiet Energie und Ressourcenmanagement der TU Berlin.

Kontakt

Johannes Kochems
Fachgebiet für Energie- und Ressourcenmanagement
Technische Universität Berlin
Sekretariat FH 5-3
Fraunhoferstr. 33-36
D-10587 Berlin

Fon: + 49 30 314 23297

Fax: + 49 30 314 25582

E-Mail: kochems@er.tu-berlin.de

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

EnInnov 2020 | 16. Symposium Energieinnovation an der TU Graz



BACKUP-Folien zum Vortrag Lastflexibilisierungspotenziale in Deutschland – Bestandsaufnahme und Entwicklungsprojektionen

Johannes Kochems | Fachgebiet Energie- und
Ressourcenmanagement, TU Berlin |
Graz, 14.02.2020

- 1 Überblick über die ausgewerteten Publikationen und kritische Würdigung**
- 2 Ergänzendes Material zum Methodenvergleich**
- 3 Ergänzendes Material zum Potenzialvergleich**

Autor und Jahr	Kürzel	durchführende Institution	Publikationsgruppe
Apel et al. 2012	Ape12	VDE	1
Aryandoust et al. 2017	Ary17	ETH Zürich	2
Buber et al. 2013	Bub13	ISI; FfE	3
Blum und Braun 2013	Blu13	Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft	4
Focken et al. 2011	Foc11	energy & meteo; Fraunhofer ISI	5
Gruber et al. 2014	Gru14	FfE	4
Gils 2014	Gil14	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gils 2015	Gil15	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gils 2016	Gil16	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gobmaier et al. 2012	Gob12	FfE	7
Grote et al. 2013	Gro13	IAEW (RWTH Aachen)	8
Gruber 2017	Gru17	FfE	9
Haasz 2017	Haa17	IER	10
Henning und Sauer 2015 (Elsner et al. 2015)	Hen15	Fraunhofer ISE; KIT; ISEA, RWTH Aachen	11
Klobasa 2007 / Klobasa 2009	Klo09	ISI	12
Klobasa et al. 2013	Klo13	ISI; FfE	4
Krzikalla et al. 2013	Krz13	BET	13
Ladwig 2018	Lad18	EE ² TU Dresden	14
Langrock et al. 2015	Lan15	BET; Trianel	15
Liebe und Wissner 2015	Lie15	WIK	16
Molly et al. 2010	Mol10	EWI; IWES; FH Köln; Uni Kassel	17
Paulus und Borggreffe 2011	Pau11	EWI	18
Pellinger und Schmid 2016	Pel16	FfE	19
r2b 2014	R2b14	r2b	20
Roon und Grobmaier 2010	Roo10	FfE	21
Scholz et al. 2014	Sch14	DLR	6
Stadler 2006	Sta06	Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik	22
Steurer et al. 2015	Ste15	IER; Trianel	23
Steurer 2017	Ste17	IER	23
Styczynski und Sauer 2015 (Elsner et al. 2015)	Sty15	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; ISEA, RWTH Aachen	24

- Auswahl von **30 Publikationen**
- Zusammenfassung zu **24 Publikationsgruppen**
- Kriterien für die Zusammenfassung
 - gleiches Forschungsprojekt
 - annähernd gleicher Betrachtungsumfang
 - übereinstimmende oder nur geringfügig abweichende Potenzialangaben
- Vollzitate s. Quellenfolien (Folie 29-32)

▪ Datenlage

- Interpretation des Studienmaterials erforderlich
- wenige umfassende Datenbasen; Datenlücken insbesondere im GHD-Sektor
- widersprüchliche Informationen und wechselseitige Abhängigkeit der Studien



Ziele des eigenen Ansatzes

- **Verbesserung der Datenlage durch Bündelung**
- Aufzeigen der erheblichen **Unsicherheiten** und **Heterogenität** (Spannweiten)

▪ Datenlage

- Interpretation des Studienmaterials erforderlich
- wenige umfassende Datenbasen; Datenlücken insbesondere im GHD-Sektor
- widersprüchliche Informationen und wechselseitige Abhängigkeit der Studien



Ziele des eigenen Ansatzes

- **Verbesserung der Datenlage durch Bündelung**
- Aufzeigen der erheblichen **Unsicherheiten** und **Heterogenität** (Spannweiten)

▪ Methodenvergleich

- Einordnung in Kategorien erfordert mitunter Abwägung
- individuelle Vorgehensweisen mitunter schwierig durch Kategorien zu beschreiben



Abhilfe

- Einführung einer **Zwischenabstufung**
- Volltextumriss der Methode je Publikation angefertigt

▪ Datenlage

- Interpretation des Studienmaterials erforderlich
- wenige umfassende Datenbasen; Datenlücken insbesondere im GHD-Sektor
- widersprüchliche Informationen und wechselseitige Abhängigkeit der Studien



Ziele des eigenen Ansatzes

- **Verbesserung der Datenlage durch Bündelung**
- Aufzeigen der erheblichen **Unsicherheiten** und **Heterogenität** (Spannweiten)

▪ Methodenvergleich

- Einordnung in Kategorien erfordert mitunter Abwägung
- individuelle Vorgehensweisen mitunter schwierig durch Kategorien zu beschreiben



Abhilfe

- Einführung einer **Zwischenabstufung**
- Volltextumriss der Methode je Publikation angefertigt

▪ Potenzialvergleich

- Fokus auf Potenziale im Stundenbereich, daher kurzfristigere Potenziale und Gradienten nicht erfasst



Ziele des eigenen Ansatzes

- Wahl einer geringeren Detaillierung zugunsten der **Abdeckungsbreite**
- Vorbereitung von Modellrechnungen mit Elektrizitätsmarktfundamentalmmodell

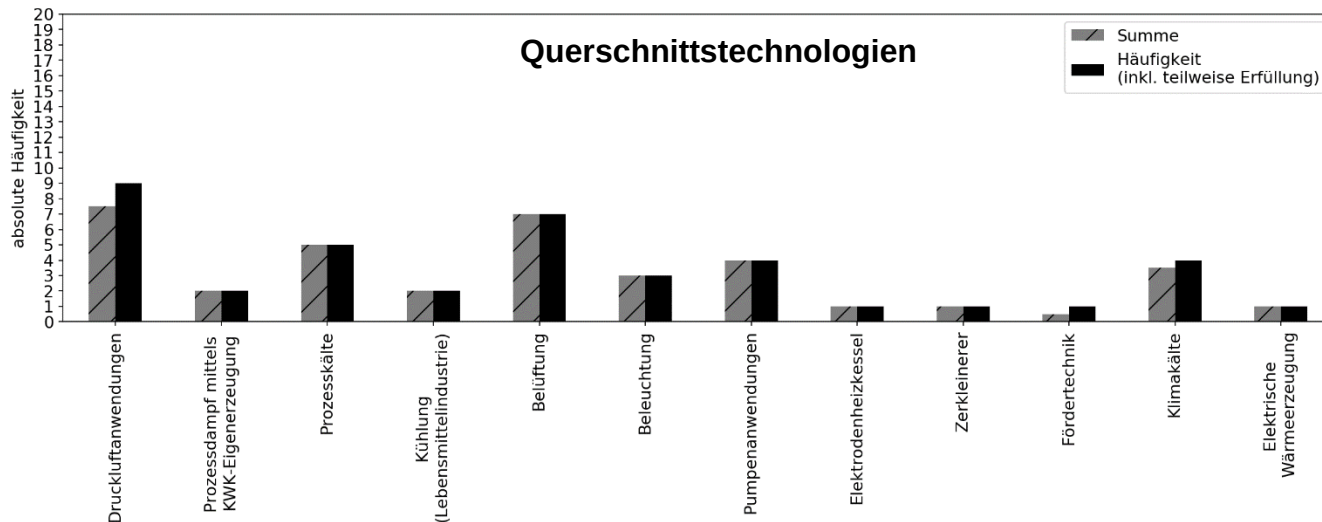
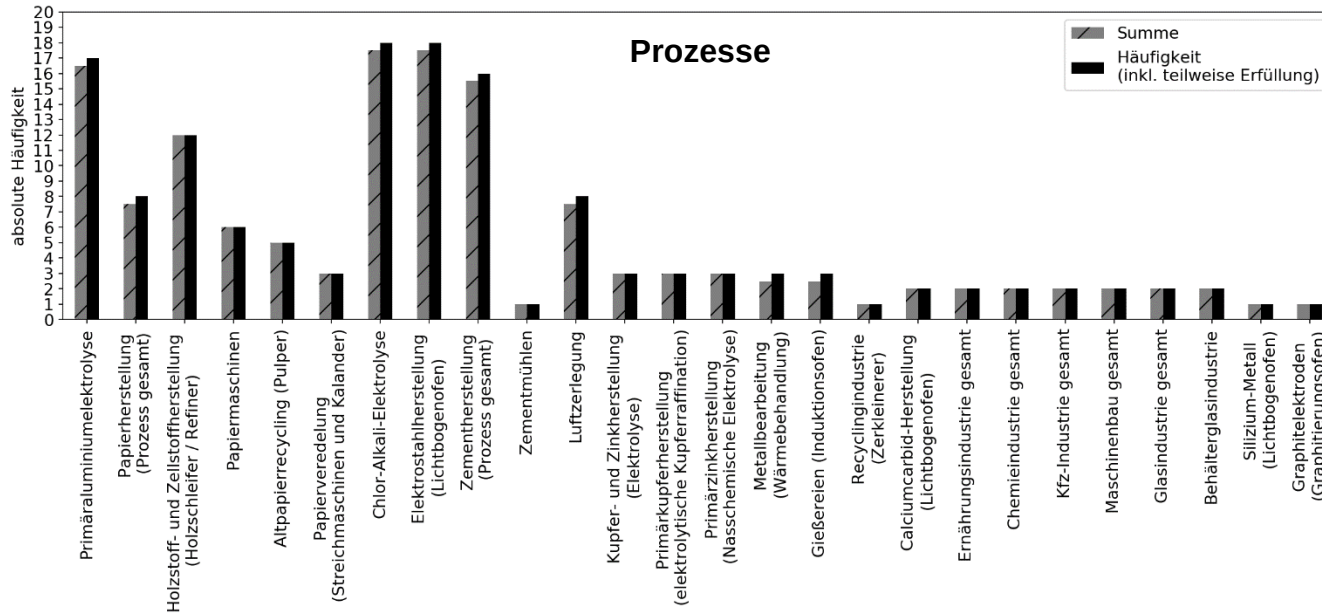
- 1 Überblick über die ausgewerteten Publikationen und kritische Würdigung
- 2 Ergänzendes Material zum Methodenvergleich
- 3 Ergänzendes Material zum Potenzialvergleich

Kernergebnisse des Methodenvergleichs



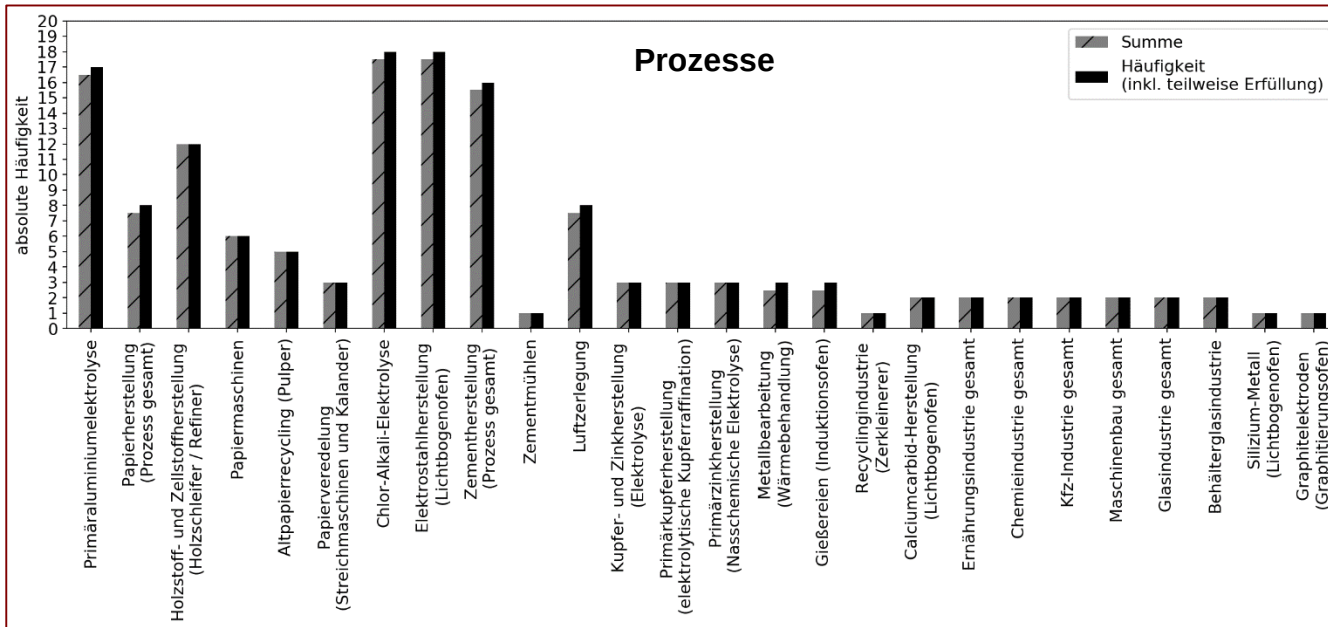
- **Methodischer Ansatz zur Potenzialquantifizierung**
 - zumeist hybrider Ansatz
 - in der Hälfte der Analysen mehrere Szenarien untersucht
- **Datenquellen**
 - überwiegend vorhandene Potenzialstudien, Statistiken und Feldstudien
 - seltener Expertenschätzungen, (Online-)Umfragen bzw. eigene Erhebungen
- **Eigene Annahmen**
 - v.a. in Bezug auf Zeitparameter und -verfügbarkeit sowie zu flexibilisierbarem Leistungsanteil
- **Zitationshäufigkeit**
 - vier Studien bilden den Kern / die Vergleichsbasis weiterer Potenzialschätzungen
- **Betrachtungsumfang**
 - Industriesektor am häufigsten (fast alle), Haushalte von 2/3, GHD von der Hälfte der Publikationen analysiert
 - Industrieprozesse: v.a. energieintensive, wie Chlor, Aluminium, Zement und Papier sehr gut abgebildet
 - industrielle Querschnittstechnologien sowie Anwendungen im GHD-Sektor weniger häufig erfasst
 - Haushaltssektor recht gut abgebildet, insbes. Weiße Ware und temperaturabhängige Lasten (Heizen / Kühlen)
- **Flexibilitätsparameter**
 - Leistungsparameter: schaltbare Leistungen von fast allen angegeben, aber nicht alle Publikationen mit (durchgängiger) Potenzialtrennung positiv / negativ
 - Zeitparameter: Schalt- und Verschiebedauern und -häufigkeiten gut abgebildet
 - Kostenparameter: Kostenangaben in etwa der Hälfte der Publikationen (spez. Invest, variable bzw. fixe Kosten)
 - Zeitverfügbarkeiten nur in knapp der Hälfte überhaupt beleuchtet, keine vollständigen Zeitverfügbarkeitszeitreihen veröffentlicht

Methodenvergleich: Betrachtungsumfang Industrie



Sektor	Abdeckung
Industrie	23 von 24
Haushalte	16 von 24
GHD	12 von 24

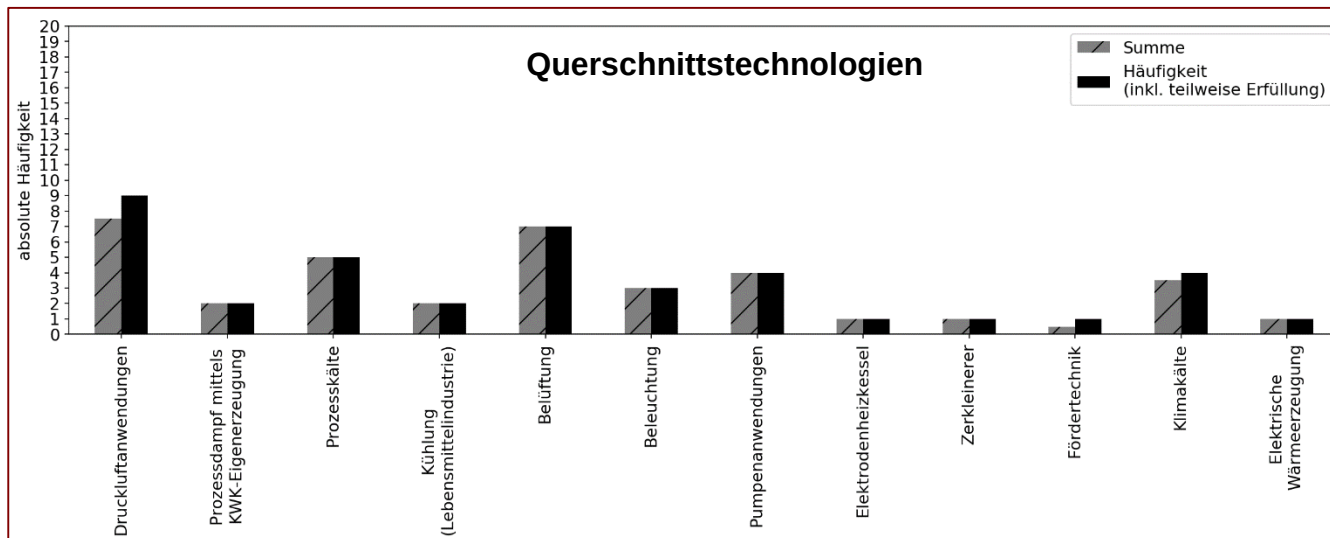
Methodenvergleich: Betrachtungsumfang Industrie



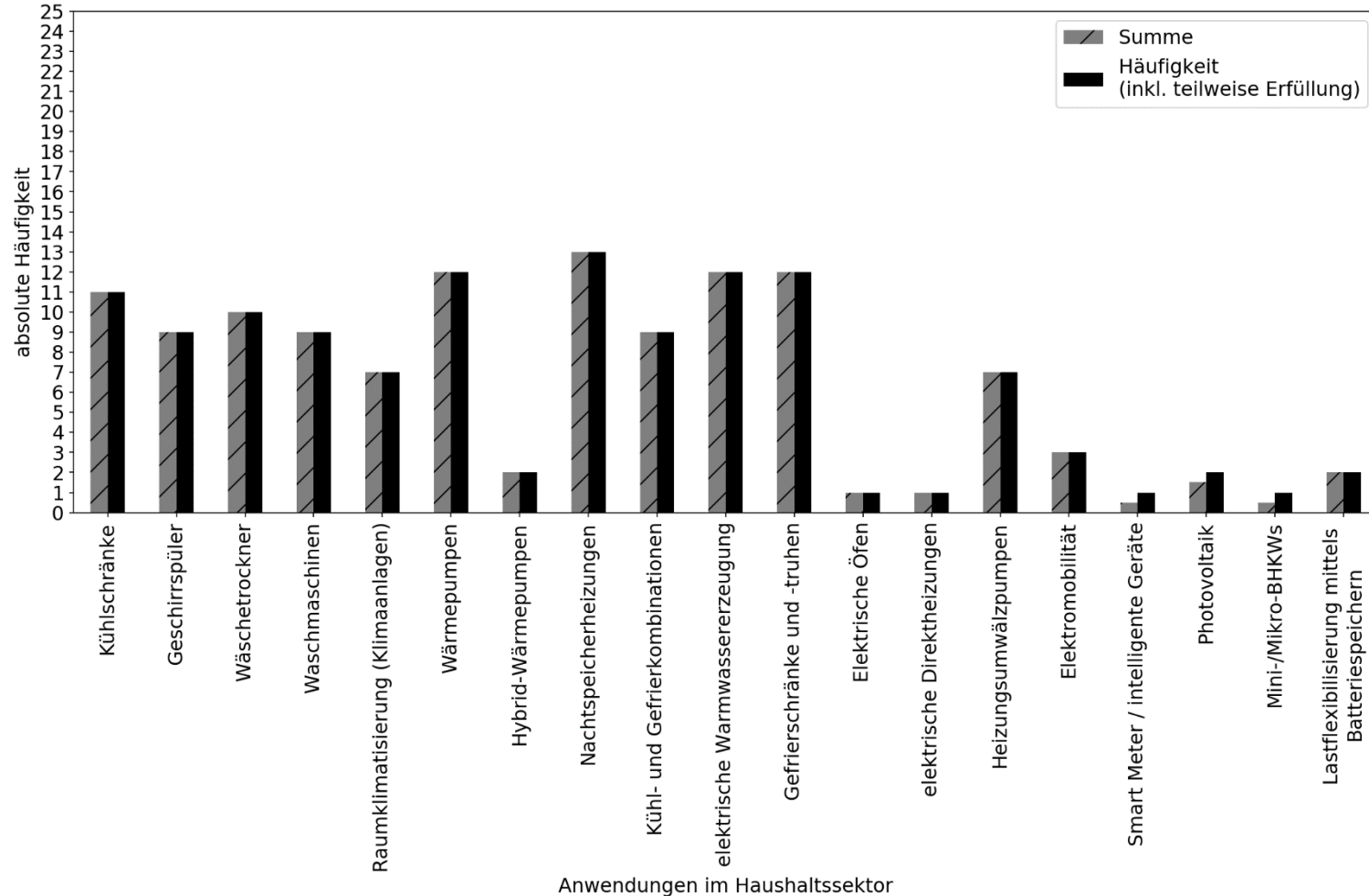
■ industrielle Prozesse

- Am häufigsten erfasst sind
 - **Chlor-Alkali-Elektrolyse und Elektrostahlherstellung** (je 18 von 24)
 - **Primäraluminiumelektrolyse** (17 von 24)
 - **Zementherstellung** (16 von 24)
 - **Holz- und Zellstoffherstellung** (12 von 24)
- weniger breit abgedeckt
 - Kupfer- und Zinkherstellung, Silizium-Metall, Metallbearbeitung und Gießereien

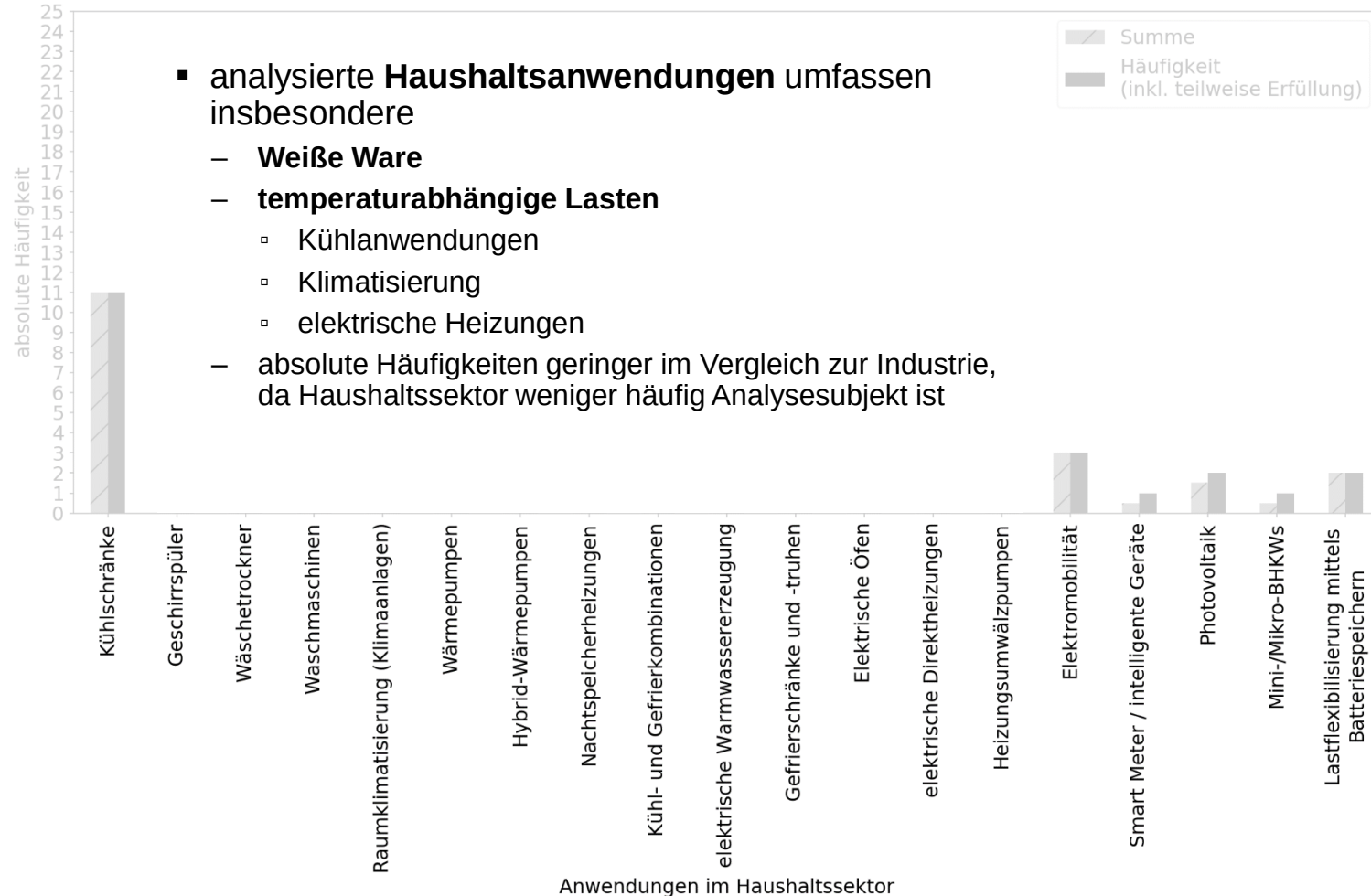
- **industrielle Querschnittstechnologien**
 - Insgesamt deutlich **weniger häufig** analysiert als Prozesse
 - Am häufigsten erfasst sind
 - **Druckluftanwendungen** (9 von 24)
 - **Belüftung** (7 von 24)
 - Pumpenanwendungen und Klimakälte (je 4 von 24)



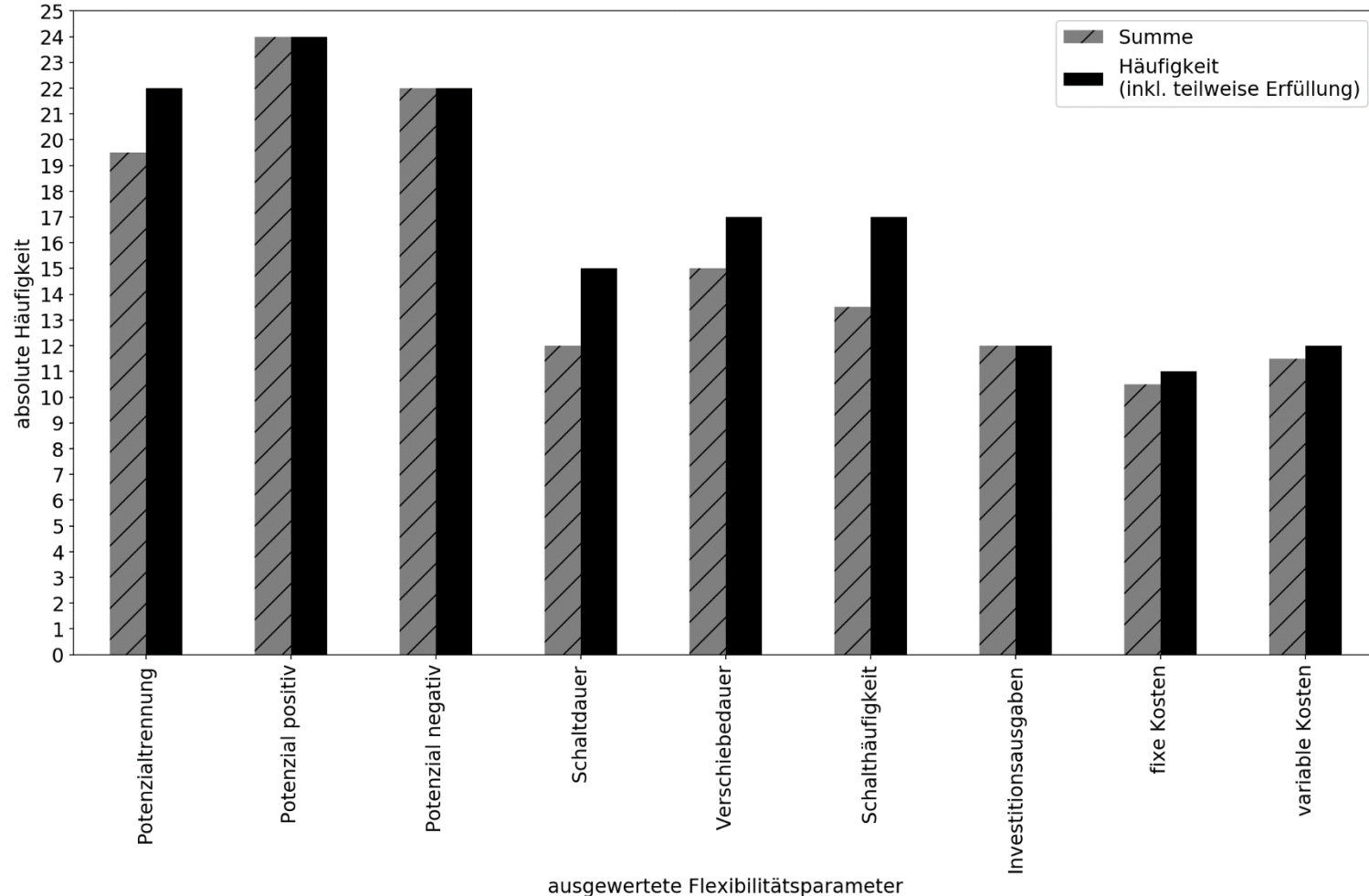
Methodenvergleich: Anwendungen im Haushaltssektor



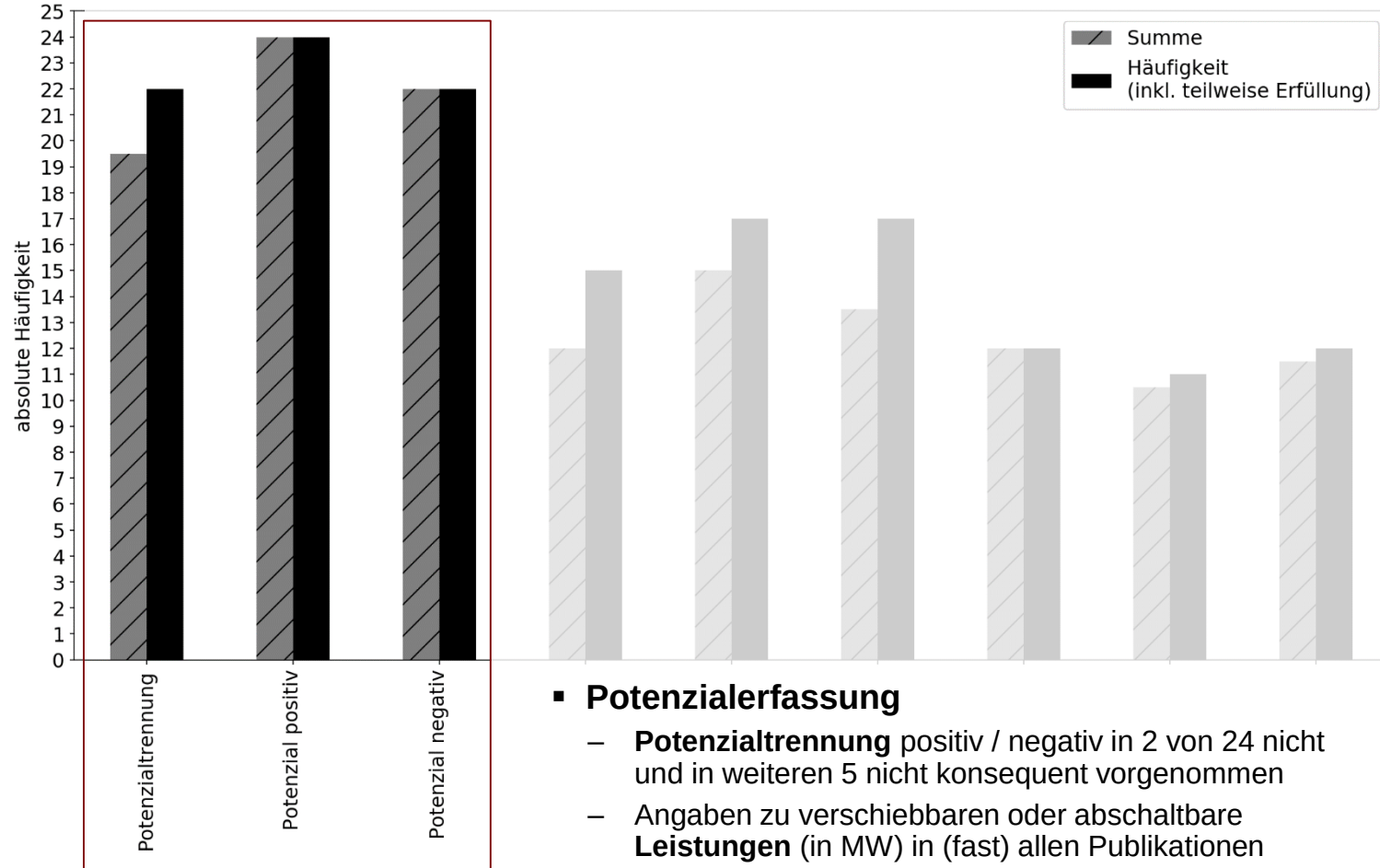
Methodenvergleich: Anwendungen im Haushaltssektor



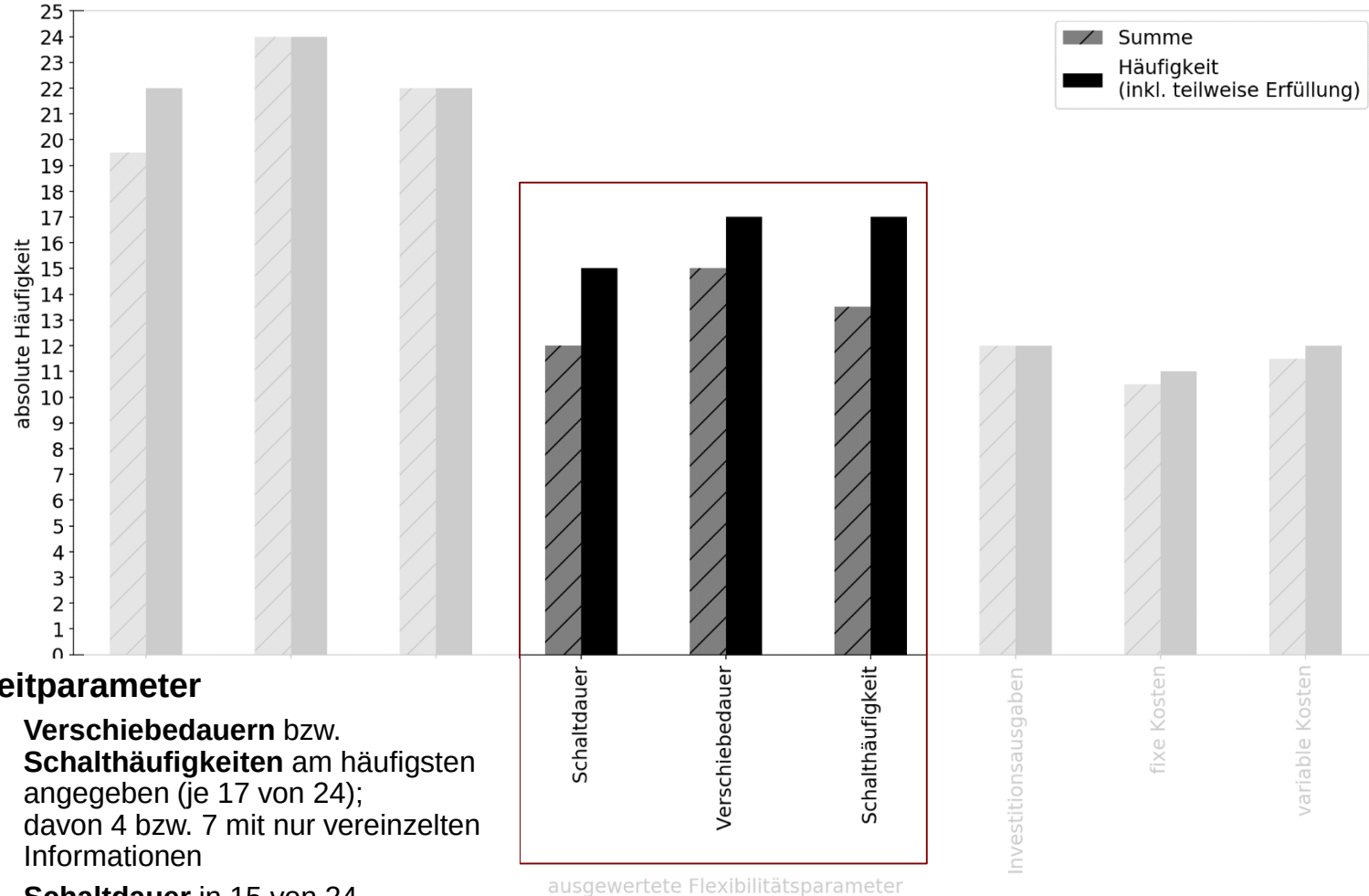
Methodenvergleich: Ausgewertete Flexibilitätsparameter



Methodenvergleich: Ausgewertete Flexibilitätsparameter



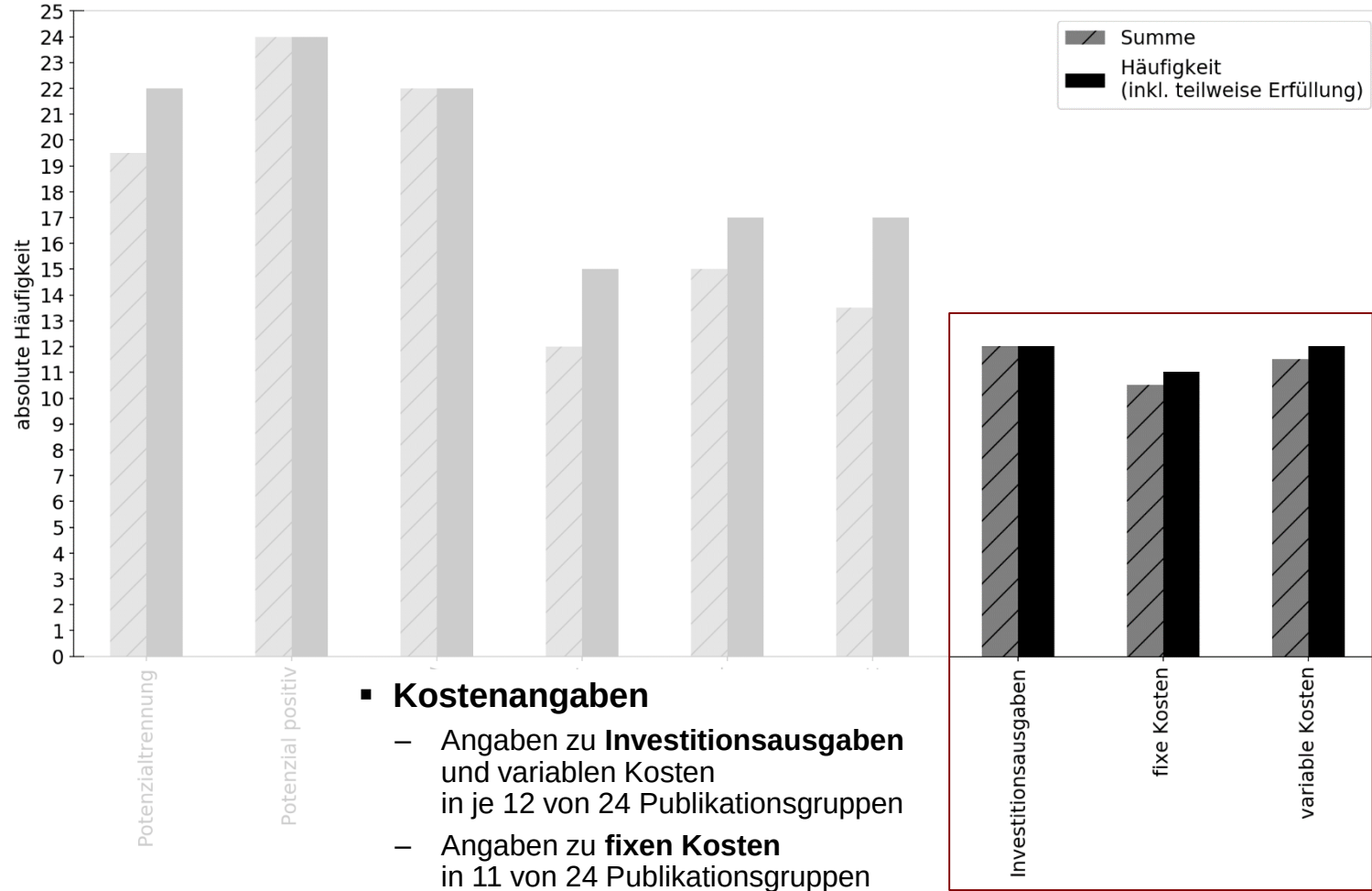
Methodenvergleich: Ausgewertete Flexibilitätsparameter



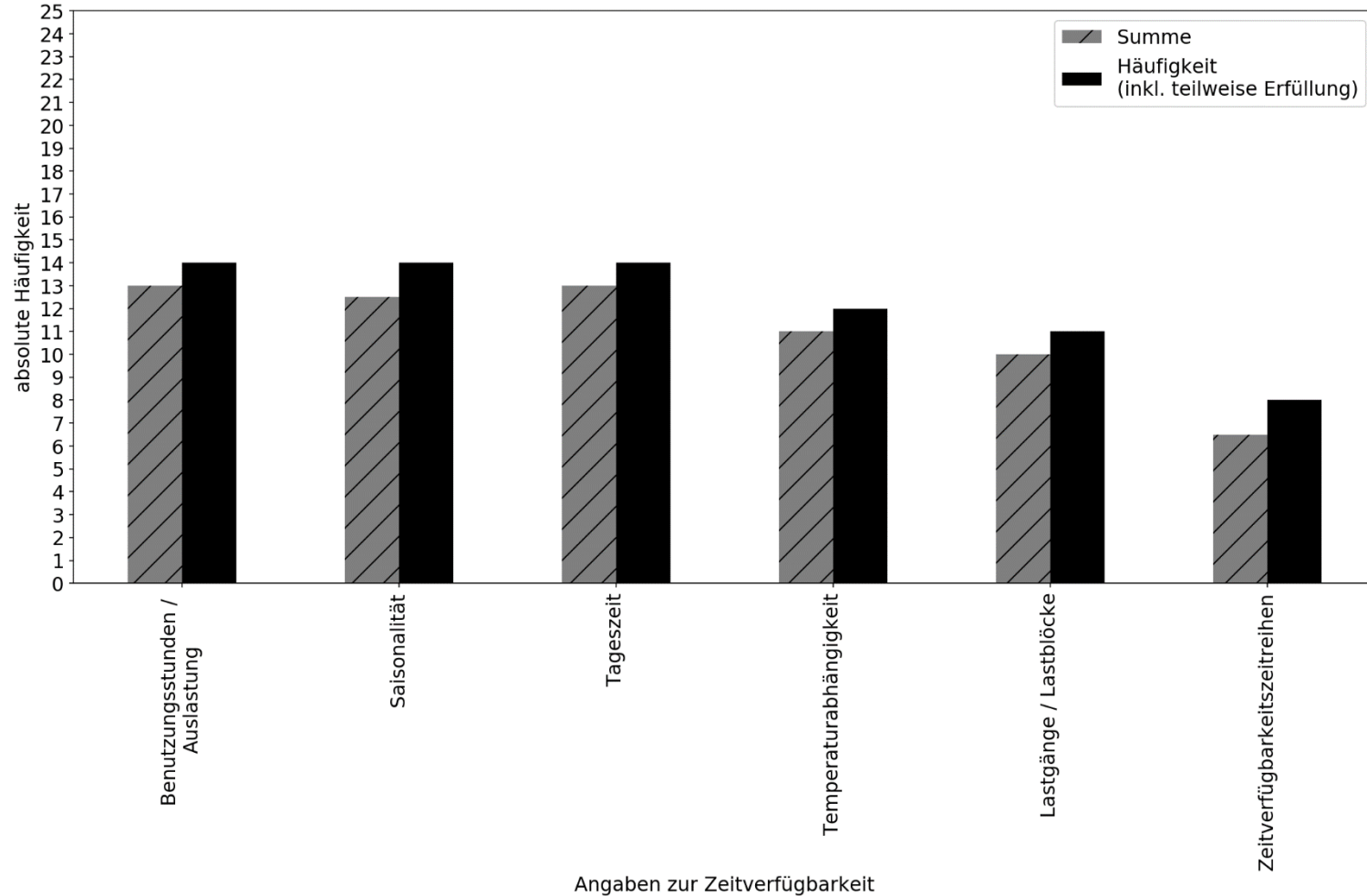
■ Zeitparameter

- **Verschiebedauern** bzw. **Schaltheufigkeiten** am häufigsten angegeben (je 17 von 24); davon 4 bzw. 7 mit nur vereinzelter Informationen
- **Schaltdauer** in 15 von 24 Publikationsgruppen angegeben; davon in 6 nur vereinzelter Informationen

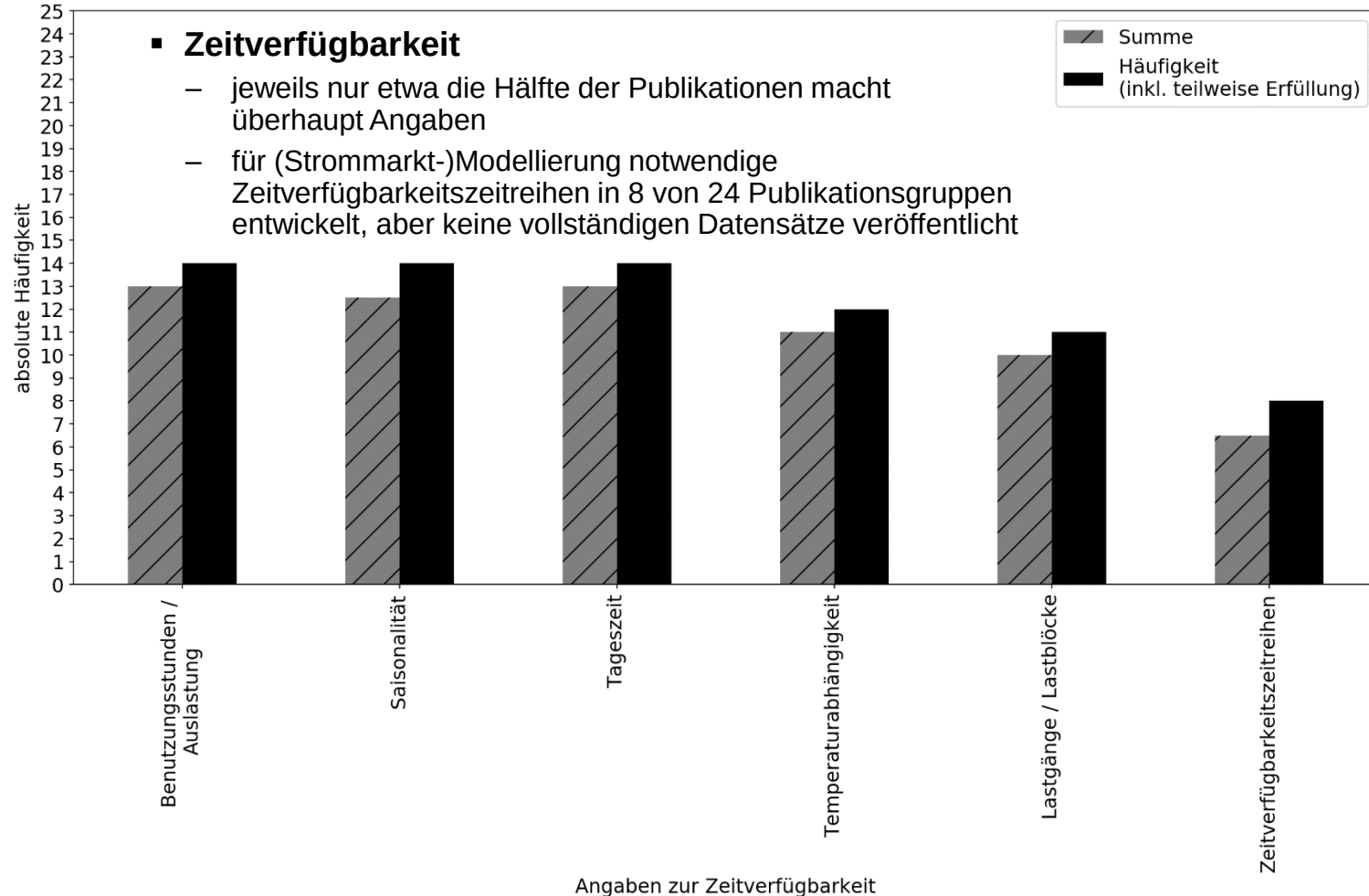
Methodenvergleich: Ausgewertete Flexibilitätsparameter



Methodenvergleich: Angaben zur Zeitverfügbarkeit



Methodenvergleich: Angaben zur Zeitverfügbarkeit



- 1 Überblick über die ausgewerteten Publikationen und kritische Würdigung**
- 2 Ergänzendes Material zum Methodenvergleich**
- 3 Ergänzendes Material zum Potenzialvergleich**

Kernergebnisse des Potenzialvergleichs: Industrie



Parameter	Ausprägung
Datenlage	▪ gute Datenlage bei Prozessen ▪ verbesserungswürdige Datenlage bei Querschnittstechnologien
Leistungsparameter	▪ hohe positive schaltbare Leistungen (Lastverzicht) bei energieintensiven Prozessen → 100 bis > 1.000 MW je Einzelanwendung ▪ symmetrische Potenziale bei Querschnittstechnologien (Lastverschiebung)
Zeitparameter	▪ positive Schaltdauern überwiegend im Bereich bis ca. 5 Stunden ▪ Konzentration der positiven Schaltdauern um 1-3 Stunden ▪ Verschiebedauern deutlich länger als Schaltdauern ▪ Konzentration der Verschiebedauern um bis 10 Stunden, aber auch Verschiebemöglichkeit um bis 40 Stunden für einzelne Prozesse / Querschnittstechnologien angegeben
Kostenparameter	▪ weitgehend keine nennenswerten spezifischen Investitionsausgaben → potenzieller Bias (?); viele Untersuchungen unterstellen bereits vorhandene Steuerungsinfrastruktur ▪ vielfach hohe variable Kosten → bei Prozessen i.d.R. Lastverzicht und entsprechend Value of Lost Load in Ansatz gebracht ▪ breite Wertespanne bei variablen Kosten → Lastverschiebung mit Kosten nahe 0

Kernergebnisse des Potenzialvergleichs: GHD-Sektor



Parameter	Ausprägung
Datenlage	▪ Datenlage durchgehend ausbaufähig ▪ sehr heterogene Kategorisierung
Leistungsparameter	▪ Potenziale zur Lastverschiebung v.a. bei Wärme- und Kälteanwendungen (Prozess- und Klimakälte) sowie Ventilation, Belüftung und Pumpen ▪ durchschnittliche schaltbare Leistungen je Kategorie meist deutlich unter 1.000 MW ▪ max. schaltbare Leistungen mit bis zu 3.000 MW deutlich höher → starke Temperatur- / Zeitabhängigkeit der Potenziale ▪ negative schaltbare Leistungen fallen in den ausgewerteten Studien für Nachtspeicher und Klimaanlage höher aus als positive
Zeitparameter	▪ Schaltdauern im Vergleich mit Haushalten kürzer angegeben ▪ Verschiebedauern vergleichbar mit Haushaltssektor
Kostenparameter	▪ Datenlage extrem schlecht ▪ spezifische Investitionen bis zu 2.000 €₂₀₁₈/kW → Bildung spezifischer Werte führt zu recht hohen Kosten im Vergleich mit (energieintensiver) Industrie; aber sehr große Spannbreiten (Unsicherheit / Heterogenität) ▪ variable Kosten für Lastverschiebungen in Studien als vernachlässigbar unterstellt

Kernergebnisse des Potenzialvergleichs: Haushalte



Parameter	Ausprägung
Datenlage	▪ Datenlage weitgehend in Ordnung ▪ kaum Aussagen zu variablen Kosten
Leistungsparameter	▪ in Summe erhebliches, nahezu symmetrisches Flexibilisierungspotenzial ▪ große schaltbare Leistungen v.a. bei – Wärmebereitstellung (Nachtspeicher, Wärmepumpen, Warmwasser) sowie – Kältebereitstellung (Kühl- und Gefrieranwendungen) ▪ Potenziale auch bei sonstiger Weißer Ware (Waschmaschine, Trockner, Geschirrspüler) angegeben
Zeitparameter	▪ positive Schaltdauern verglichen mit Industrie und GHD länger → Werte bis > 10 Stunden ▪ alle Schaltungen binnen 24 Stunden angegeben ▪ Verschiebedauern innerhalb von 24 Stunden; längste Verschiebedauern bei Wärmeanwendungen
Kostenparameter	▪ breite Wertespreizung bei spezifischen Investitionsausgaben und geringe Werte bei Weißer Ware → teilweise überholte hohe Kostenangaben für Smart Meter / Steuerungsbox ▪ variable Kosten als vernachlässigbar angenommen bei Lastverschiebungen → Komforteinschränkung (?) ▪ Datenlage bei variablen Kosten sehr schlecht

Datenanhang zu Folie 13



Lagemaße für das durchschnittliche positive Lastmanagementpotenzial im Industriesektor im Status quo (gerundete Werte in MW)

	AL	CL	HS	PA	ES	ZM	AP	BL	CaC ₂	PK	DL	GL	KA	GU	PM
Anz.	13	11	12	7	14	12	5	13	4	12	3	3	9	3	3
MW	506	558	236	1.050	871	294	523	157	50	463	607	25	13	115	160
Std.	308	274	58	688	200	107	167	306	32	507	865	10	33	86	11
Min.	148	64	133	110	400	45	391	6	12	200	0	15	0	29	149
25%	277	475	208	508	750	248	400	6	32	270	112	20	0	72	155
Med.	484	556	234	1.214	854	313	449	22	51	326	224	25	0	115	160
75%	842	622	251	1.656	1.018	351	588	147	69	378	911	30	0	158	166
Max.	983	1.149	357	1.700	1.166	424	785	1.075	87	2.050	1.598	35	99	201	171

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Prozesse und Querschnittstechnologien:

AL: Primäraluminiumelektrolyse; CL: Chlor-Alkali-Elektrolyse; HS: Holzstoffherstellung; PA: Papiermaschinen; ES: Elektrostahlherstellung; ZM: Zementherstellung; AP: Altpapieraufbereitung; BL: Belüftung gesamt; CaC₂: Calciumcarbidherstellung; PK: Prozesskälte gesamt; DL: Druckluft gesamt; GL: Glasindustrie (gesamt); KA: Klimaanlage; GU: Guss (Aluminium, Eisen); PM: Primärmetalle (Zink, Kupfer, Silizium, Graphit)

Datenanhang zu Folie 16



Lagemaße für die Verschiebedauern im Industriesektor im Status quo (gerundete Werte in h)

	AL	CL	HS	PA	ES	ZM	AP	BL	CaC ₂	PK	DL	GL	KA	GU	PM
Anz.	12	13	13	9	12	13	5	3	9	3	3	9	3	6	6
MW	3,1	3,8	9,9	13,0	1,7	19,3	13,6	1,2	9,8	0,0	0,0	10,7	10,7	10,7	5,5
Std.	2,6	4,1	9,9	10,4	1,9	19,3	15,6	1,0	11,9	0,0	0,0	11,4	11,7	2,6	1,2
Min.	0,0	0,0	1,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	3,4	2,0	6,4	3,3
25%	0,0	0,0	4,0	6,6	0,0	4,0	4,0	0,8	4,0	0,0	0,0	4,8	4,0	10,6	5,2
Med.	3,9	2,0	7,8	11,2	1,0	21,4	4,0	1,5	4,3	0,0	0,0	6,0	6,0	11,0	6,0
75%	5,1	5,8	10,8	11,2	2,7	24,0	24,0	1,8	5,9	0,0	0,0	6,2	15,0	11,0	6,0
Max.	6,1	10,4	36,0	36,0	4,7	72,0	36,0	2,0	36,0	0,0	0,0	36,0	24,0	14,4	6,5

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Prozesse und Querschnittstechnologien:

AL: Primäraluminiumelektrolyse; CL: Chlor-Alkali-Elektrolyse; HS: Holzstoffherstellung; PA: Papiermaschinen; ES: Elektrostahlherstellung; ZM: Zementherstellung; AP: Altpapieraufbereitung; BL: Belüftung gesamt; CaC₂: Calciumcarbidherstellung; PK: Prozesskälte gesamt; DL: Druckluft gesamt; GL: Glasindustrie (gesamt); KA: Klimaanlage; GU: Guss (Aluminium, Eisen); PM: Primärmetalle (Zink, Kupfer, Silizium, Graphit)

Datenanhang zu Folie 18



Lagemaße für die variablen Kosten im Industriesektor im Status quo (gerundete Werte in €₂₀₁₈/MWh)

	AL	CL	HS	PA	ES	ZM	PI	AP	CaC ₂	CL (A)	GL	GU	PM
Anz.	22	15	14	9	16	17	5	7	7	3	6	6	6
MW	538	207	190	285	556	591	593	284	717	157	478	897	1.089
Std.	543	251	200	120	573	487	858	160	431	142	392	693	1.079
Min.	0	0	0	153	0	0	0	51	156	30	71	122	102
25%	126	98	10	174	170	178	0	167	377	80	135	313	197
Med.	357	111	154	254	402	445	441	305	699	130	482	911	807
75%	781	244	361	397	710	1.047	447	409	1.089	220	824	1.489	1.840
Max.	1.671	1.043	541	436	2.227	1.613	2.076	482	1.232	310	877	1.645	2.642

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Prozesse und Querschnittstechnologien:

AL: Primäraluminiumelektrolyse; CL: Chlor-Alkali-Elektrolyse; HS: Holzstoffherstellung; PA: Papiermaschinen; ES: Elektrostahlherstellung; ZM: Zementherstellung; PI: Papierindustrie (gesamt); AP: Altpapieraufbereitung; CaC₂: Calciumcarbidherstellung; CL (A): Chlor-Alkali-Elektrolyse (Amalgamverfahren); GL: Glasindustrie (gesamt); GU: Guss (Aluminium, Eisen); PM: Primärmetalle (Zink, Kupfer, Silizium, Graphit)

Datenanhang zu Folie 20



Lagemaße für das durchschnittliche negative Lastmanagementpotenzial im Haushaltssektor im Status quo (gerundete Werte in MW)

	KS	GS	TR	WM	KA	WP	NSp	KG	WW	GG	UP	Weiß
Anz.	14	12	12	12	12	13	14	4	15	14	11	3
MW	-286	-1.856	-2.405	-2.499	-861	-548	-3.512	-740	-1.744	-141	-96	-8.401
Std.	445	4.416	6.418	7.016	600	478	7.474	277	2.326	203	319	9.243
Min.	-1.368	-15.863	-22.743	-24.770	-2.620	-1.333	-21.000	-980	-8.507	-530	-1.058	-19.070
25%	-500	-619	-629	-510	-748	-1.067	-1.823	-980	-2.522	-300	0	-11.185
Med.	0	-485	-359	-380	-748	-637	0	-740	-754	0	0	-3.300
75%	0	-485	-359	-380	-748	0	0	-500	-174	0	0	-3.066
Max.	0	-485	-359	-380	0	0	0	-500	-174	0	0	-2.832

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen:

KS: Kühlschrank; GS: Geschirrspüler; TR: Trockner; WM: Waschmaschine; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher; KG: Kühl- / Gefrierkombination; WW: Warmwasser; GG: Gefriergerät; UP: Umwälzpumpen; Weiß: Weiße Ware (ohne Kühlung) gesamt

Datenanhang zu Folie 22



Lagemaße für die spezifischen Investitionsausgaben im Haushaltssektor im Status quo (gerundete Werte in €₂₀₁₈/kW)

	KS	GS	TR	WM	KA	WP	NSp	WW	GG	UP
Anz.	5	4	4	4	4	5	7	9	4	7
MW	972	77	77	77	174	36	27	300	351	1.961
Std.	1.433	32	32	32	58	75	15	383	650	3.010
Min.	58	31	31	31	131	0	2	21	23	131
25%	64	70	70	70	142	0	22	40	25	153
Med.	71	88	88	88	153	0	26	146	27	260
75%	1.325	95	95	95	185	9	35	475	353	2.578
Max.	3.341	102	102	102	260	170	47	1.200	1.325	7.874

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen:

KS: Kühlschrank; GS: Geschirrspüler; TR: Trockner; WM: Waschmaschine; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher; WW: Warmwasser; GG: Gefriergerät; UP: Umwälzpumpen

Datenanhang zu Folie 24



Lagemaße für die Projektion der durchschnittlichen positiven schaltbaren Leistungen im Haushaltssektor (gerundete Werte in MW)

	Status quo				2020				2025			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp
Anz.	14	12	13	14	12	12	13	13	9	9	9	9
MW	1.075	1.343	754	2.797	1.006	2.267	1.647	2.332	935	3.201	1.430	2.366
Std.	350	698	510	1.865	158	1.929	1.537	1.548	0	0	703	1.257
Min.	500	0	0	0	554	0	0	0	935	3.201	676	860
25%	820	1.496	448	1.285	1.035	2.154	640	1.040	935	3.201	676	860
Med.	1.317	1.496	722	2.215	1.080	2.154	1.255	2.000	935	3.201	1.326	2.482
75%	1.317	1.496	878	3.704	1.080	2.154	2.168	3.000	935	3.201	2.289	3.757
Max.	1.317	2.620	1.516	5.607	1.080	7.800	5.950	4.542	935	3.201	2.289	3.757

	2030				2035				2040			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	KS	KA	KS	KA	KS	KA
Anz.	11	12	11	12	9	9	9	9	9	9	9	9
MW	830	4.635	1.993	1.519	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Std.	59	2.850	2.213	1.144	0	0	0	0	0	0	0	0
Min.	803	0	0	0	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
25%	803	4.907	721	693	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Med.	803	4.907	1.413	1.535	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
75%	803	4.907	2.441	2.257	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Max.	950	11.420	8.200	3.028	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790

	2045				2050			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp
Anz.	9	9	9	9	9	10	9	10
MW	698	8.063	1.961	388	672	8.206	2.197	232
Std.	0	0	963	206	0	2.860	1.080	124
Min.	698	8.063	927	141	672	66	1.039	77
25%	698	8.063	927	141	672	9.111	1.039	113
Med.	698	8.063	1.817	407	672	9.111	2.037	222
75%	698	8.063	3.138	617	672	9.111	3.517	336
Max.	698	8.063	3.138	617	672	9.111	3.517	412

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen:

KS: Kühlschranks; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher