

GEFÖRDERT VOM



EINE METASTUDIE  
**ENERGIEFLEXIBILITÄT  
IN DER INDUSTRIE**





# Energieflexibilität in der Industrie

*Eine Metastudie*

Die nachfolgend dargestellten Inhalte und Ergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, BMBF, geförderten und durch den Projektträger Jülich, PTJ, koordinierten Verbundforschungsvorhabens SynErgie mit dem Förderkennzeichen 03SFK3G 1 erarbeitet.

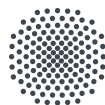
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**Herausgeber:**



**Universität Stuttgart**

Institut für Energieeffizienz  
in der Produktion EEP

Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP  
Universität Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
[www.eep.uni-stuttgart.de](http://www.eep.uni-stuttgart.de)

Autoren: Stefan Eisenhauer, M.Sc.; Markus Reichart, M.Sc.; Prof. Dr.-Ing. Dipl. Kfm. Alexander Sauer; Sebastian Weckmann, M.Sc.; Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Fabian Zimmermann;

Mai 2018

# MANAGEMENT SUMMARY

---

Die vorliegende Metastudie analysiert das Potenzial der deutschen Industrie hinsichtlich Energieflexibilität. Dabei konnten 13 aus 47 Studien identifiziert werden, die quantifizierbare Daten für eine Potenzialanalyse bereitstellen. Bei der Analyse der Studien wurde insbesondere auf die Dimensionen Leistung, Energiemenge, Abrufdauer und Abrufhäufigkeit sowie die durch energetische Flexibilität entstehenden Kosten, aufgeschlüsselt nach den Kostenarten, zur Beschreibung von Energieflexibilität, geachtet.

Die Dimension Leistung beinhaltet unterschiedliche Laständerungen (Lastverzicht, Lasterhöhung, Lastverschiebung). Die Analyse der Arten der Laständerung zeigt, dass die Studien ein weitaus größeres Potenzial für den Lastverzicht, als für die Lasterhöhung ausweisen. Summiert man die Durchschnittswerte, der in den einzelnen Branchen ausgewiesenen Flexibilitätspotenziale, ergibt sich eine maximale Lasterhöhung von 600 MW und maximale Lastreduzierung von -1630 MW. In den einzelnen Branchen liegen diese zu knapp 90 % im Intervall von +250 MW (Lasterhöhung) bis -750 MW (Lastverzicht). Im Bereich Glas liegt der Großteil der angegebenen energetischen Flexibilitätspotenziale zwischen -250 und +250 MW. Für die Chemiebranche und die Papierindustrie ist das dominierende Intervall der energetischen Flexibilitätspotenziale von 0 bis +250 MW. Lediglich in der Metallindustrie ist das größte energetische Flexibilitätspotenzial im Lastverzicht. Dort liegen die energetischen Flexibilitätspotenziale im Intervall zwischen -500 bis -250 MW.

Bei der Abrufdauer ergeben sich die größten Potenziale energetischer Flexibilität im Intervall von ein bis zwei Stunden und vier bis fünf Stunden. Für eine Abrufdauer größer als fünf Stunden werden kaum Potenziale ausgewiesen. Bezüglich der maximal möglichen Abrufhäufigkeit wird potenziell ungefähr die Hälfte der energetischen Flexibilitätspotenziale maximal 4-mal pro Monat zur Verfügung gestellt.

Aus den analysierten Studien ergibt sich, dass die Abrufdauer mit zunehmender flexibilisierbarer Leistung (positiv oder negativ) nicht zwingend größer oder kleiner wird. Die aus Laständerung und Abrufdauer bestehende flexibilisierbare Energie wird daher primär durch die Änderung der Leistung dominiert und nicht durch die Abrufdauer.

Bei der Analyse der Kosten zeigt sich, dass primär Investitionen in Mess- Regel- und Steuerungstechnik ausgewiesen werden. Dies macht deutlich, dass bisher der Fokus auf der Realisierung bereits vorhandener Flexibilitätspotenziale liegt. Eine Beschreibung der Flexibilitätsperspektive, also die zukünftig mögliche Flexibilität, wurde bislang nur qualitativ durch Angabe von Zukunftstendenzen abgebildet. Die technologische Weiterentwicklung hinsichtlich einer flexiblen Fahrweise von Prozessen, dynamischen Energieträgerwechseln und Querschnittstechnologien wurde bisher nur vereinzelt oder gar nicht betrachtet. Der Fokus der analysierten Studien liegt daher auf der Realisierung von technologisch vorhandener energetischer Flexibilität und weniger auf deren technologischer Weiterentwicklung.





**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer**

Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion EEP, Universität Stuttgart

Leiter des Bereichs Ressourceneffiziente Produktion, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

**Liebe Leserin, lieber Leser,**

eine ereignisreiche und durch intensive Zusammenarbeit geprägte Zeit im Kopernikus-Projekt SynErgie liegt hinter uns. Die Bilanz zur Projekthalbzeit fällt durchweg positiv aus. So haben wir viel erreicht aber auch festgestellt, dass vor uns noch ein langer Weg liegt.

Die mittlerweile über 100 Projektpartner mit namhaften Vertretern aus Industrie, Wissenschaft und Gesellschaft eint unser gemeinsames Ziel: Die „Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“.

Überzeugt davon, dass wir hierdurch einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Energiewende beitragen können und den Grundstein für eine bessere und saubere Zukunft legen, forscht deutschlandweit eine ganze Generation an hochmotivierten Wissenschaftlern an der Entwicklung von Möglichkeiten, den industriellen Energieverbrauch zeitlich zu variieren. Hierdurch soll ein Beitrag geleistet werden, der die langfristige Umstellung des deutschen Energiesystems auf volatile erneuerbare Energien ermöglicht.

Um einen festen und soliden Ausgangspunkt unserer gemeinsamen Forschungsbemühungen zu definieren, war es essentiell, alle bisherigen Studien im Bereich der Energieflexibilität zu analysieren und bisherige Ergebnisse durch geeignete Vergleiche auf Abhängigkeiten und deren Bedeutungen zu bewerten.

Nachfolgend möchten wir Ihnen einen Einblick in unsere wichtigsten Ergebnisse aufzeigen und wünschen Ihnen hierbei viel Freude beim Lesen!

Es grüßt Sie herzlichst, Ihr Alexander Sauer



# Inhaltsverzeichnis

---

|                                                                                                         |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Energieflexibilität im industriellen Kontext</b>                                                  | <b>1</b>  |
| <b>2. Zielsetzung und Methodisches Vorgehen</b>                                                         | <b>3</b>  |
| 2.1. Studienrecherche . . . . .                                                                         | 3         |
| 2.2. Relevanzanalyse . . . . .                                                                          | 3         |
| 2.3. Aufbereitung der studienspezifischen Daten . . . . .                                               | 4         |
| 2.3.1. Leistung . . . . .                                                                               | 4         |
| 2.3.2. Zeit . . . . .                                                                                   | 4         |
| 2.3.3. Kosten . . . . .                                                                                 | 5         |
| 2.4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen . . . . .                                              | 5         |
| <b>3. Studienrecherche und Relevanzanalyse</b>                                                          | <b>7</b>  |
| 3.1. Betrachtung des Bilanzraums der Untersuchten Studien . . . . .                                     | 7         |
| 3.2. Betrachtung der ausgewiesenen Wirtschaftszweige der untersuchten Studien . . . . .                 | 9         |
| 3.3. Betrachtung der drei Flexibilitätsdimensionen in den untersuchten Studien . . . . .                | 9         |
| <b>4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen</b>                                                   | <b>11</b> |
| 4.1. Eindimensionale Analysen . . . . .                                                                 | 11        |
| 4.2. Mehrdimensionale Analysen . . . . .                                                                | 19        |
| 4.2.1. Leistungsorientierte Analyse . . . . .                                                           | 19        |
| 4.2.2. Kostenorientierte Analyse . . . . .                                                              | 22        |
| 4.3. Wirtschaftliche Betrachtung . . . . .                                                              | 25        |
| 4.4. Perspektive energetischer Flexibilität . . . . .                                                   | 25        |
| 4.5. Mehrdimensionale Darstellung von Energieflexibilität . . . . .                                     | 26        |
| <b>5. Fazit und Ausblick</b>                                                                            | <b>27</b> |
| <b>A. Anhang</b>                                                                                        | <b>35</b> |
| A.1. Auflistung der untersuchten Studien . . . . .                                                      | 35        |
| A.2. Einzelauswertungen nach Wirtschaftszweigen . . . . .                                               | 39        |
| A.2.1. Laständerung zu Abrufdauer auf Ebene 4 . . . . .                                                 | 39        |
| A.2.2. Flexibilisierbare Energie zu Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .          | 40        |
| A.2.3. Flexibilisierbare Energie zu Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .            | 42        |
| A.2.4. Laständerung zu absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .       | 44        |
| A.2.5. Laständerung zu spezifischen Investitionskosten auf Ebene 4 . . . . .                            | 46        |
| A.2.6. Laständerung zu absolute Fixkosten auf Ebene 4 . . . . .                                         | 49        |
| A.2.7. Laständerung zu spezifische Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .              | 51        |
| A.2.8. Laständerung zu absolute variable Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .        | 53        |
| A.2.9. Laständerung zu spezifische variable Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 . . . . .     | 55        |
| A.2.10. Abrufhäufigkeit pro Jahr zu spezifische Fixkosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4 . . . . . | 57        |



# Abbildungsverzeichnis

---

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens in vier Schritten . . . . .                                                                                                 | 3  |
| 2.2. Filtermodell zur Datenselektion . . . . .                                                                                                                                       | 4  |
| 2.3. Arten der Laständerung nach Weckmann u. Eisenhauer (2017) . . . . .                                                                                                             | 4  |
| 2.4. Zeitintervalle zur zeitlichen Beschreibung der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (Weckmann u. Eisenhauer 2017) . . . . .                                              | 5  |
| 3.1. Relevanzanalyse hinsichtlich des Energieflexibilitätspotenzials der deutschen Industrie auf Basis mehrerer Filterstufen . . . . .                                               | 7  |
| 3.2. Bilanzräume auf Datenebene 2 . . . . .                                                                                                                                          | 9  |
| 4.1. Häufigkeitsverteilung der Laständerung, differenziert nach Wirtschaftszweigen (135 Datensätze aus 13 Studien) . . . . .                                                         | 12 |
| 4.2. Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der Laständerung als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweigen (135 Datensätze aus 13 Studien) . . . . .                 | 12 |
| 4.3. Häufigkeitsverteilung der Abrufdauer, differenziert nach Wirtschaftszweig (115 Datensätze aus 9 Studien) . . . . .                                                              | 13 |
| 4.4. Häufigkeitsverteilung der Abrufhäufigkeit pro Jahr, differenziert nach Wirtschaftszweig (35 Datensätze aus 6 Studien) . . . . .                                                 | 14 |
| 4.5. Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen Investitionskosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (113 Datensätze aus 6 Studien) . . . . . | 15 |
| 4.6. Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen Fixkosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (100 Datensätze aus 5 Studien) . . . . .          | 16 |
| 4.7. Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen variablen Kosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (38 Datensätze aus 7 Studien) . . . . .    | 16 |
| 4.8. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                                              | 19 |
| 4.9. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig Metall . . . . .                                                                    | 20 |
| 4.10. Darstellung des Zusammenhangs zwischen flexibilisierbarer Energie und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                             | 21 |
| 4.11. Darstellung des Zusammenhangs zwischen flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                               | 22 |
| 4.12. Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten Investitionskosten und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                           | 23 |
| 4.13. Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten Fixkosten pro Jahr und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                           | 23 |
| 4.14. Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten variablen Kosten und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .                             | 24 |

|                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.15. Laständerung in Abhängigkeit der absoluten Investitionskosten und der Abrufdauer für das verarbeitende Gewerbe . . . . .                                                                                                                               | 26 |
| A.1. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .                                                                        | 39 |
| A.2. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.23 Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .                                | 39 |
| A.3. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                                                | 40 |
| A.4. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                            | 40 |
| A.5. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .    | 41 |
| A.6. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                     | 41 |
| A.7. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 33 Datenpunkte aus 8 Studien . . . . .                                                   | 42 |
| A.8. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                              | 42 |
| A.9. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .      | 43 |
| A.10. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                      | 43 |
| A.11. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 33 Datenpunkte aus 8 Studien . . . . .                                                    | 44 |
| A.12. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                         | 44 |
| A.13. Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . . | 45 |

|                                                                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.14.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 24 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                           | 45 |
| A.15.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 30 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                         | 46 |
| A.16.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige (C.20, C.23, C17, C24), 97 Datenpunkte aus 7 Studien .                                                                        | 46 |
| A.17.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                         | 47 |
| A.18.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden,12 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .  | 47 |
| A.19.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 24 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                  | 48 |
| A.20.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 30 Datenpunkte aus 6 Studien . . . . .                                                | 48 |
| A.21.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                           | 49 |
| A.22.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .   | 49 |
| A.23.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 17 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .                                    | 50 |
| A.24.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 29 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                                  | 50 |
| A.25.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 (C.20, C.23, C17, C24), 89 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                                               | 51 |
| A.26.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                        | 51 |
| A.27.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . . | 52 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.28.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 17 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .                                           | 52 |
| A.29.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 29 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                                         | 53 |
| A.30.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 5 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .                                            | 53 |
| A.31.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 5 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .    | 54 |
| A.32.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 6 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .                                     | 54 |
| A.33.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 9 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                                   | 55 |
| A.34.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 5 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .                                         | 55 |
| A.35.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 5 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . . | 56 |
| A.36.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 6 Datenpunkte aus 4 Studien . . . . .                                  | 56 |
| A.37.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 9 Datenpunkte aus 5 Studien . . . . .                                                | 57 |
| A.38.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Abrufhäufigkeit pro Jahr und spezifischen Fixkosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4, 16 Datenpunkte aus 2 Studien . . . . .                                                                                    | 57 |
| A.39.Darstellung des Zusammenhangs zwischen Abrufhäufigkeit pro Jahr und spezifischen Investitionskosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4, 22 Datenpunkte aus 3 Studien . . . . .                                                                           | 58 |

# Tabellenverzeichnis

---

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Interpretation des Pearson-Koeffizienten nach Büchter u. Henn (2007) . . . . .                                                   | 6  |
| 3.1. Liste der 13 identifizierten Studien der Datenebene 4 . . . . .                                                                  | 8  |
| 3.2. Einteilung der Studien mit Bilanzraum Deutschland hinsichtlich der Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes . . . . .       | 10 |
| 3.3. Ausgewiesene Flexibilitätsdimensionen auf Datenebene 4 . . . . .                                                                 | 10 |
| 3.4. Aufschlüsselung der Dimension Kosten nach Investitionskosten, Fixkosten und variable Kosten auf Datenebene 4 . . . . .           | 10 |
| 4.1. Auflistung von Median, Minimal- und Maximalwerte der untersuchten Größen, differenziert nach Wirtschaftszweig . . . . .          | 18 |
| 4.2. Korrelationskoeffizienten von Laständerung zu Abrufdauer, aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig . . . . .                        | 20 |
| 4.3. Korrelationsanalyse von Flexibilisierbare Energie zu Laständerung und Abrufdauer aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig . . . . . | 22 |
| 4.4. Prognosen ausgewählter Studien zu zukünftigen Flexibilitätspotenzialen . . . . .                                                 | 25 |
| A.1. Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 1 von 4 . . . . .                                                | 35 |
| A.2. Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 2 von 4 . . . . .                                                | 36 |
| A.3. Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 3 von 4 . . . . .                                                | 37 |
| A.4. Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 4 von 4 . . . . .                                                | 38 |



# 1. Energieflexibilität im industriellen Kontext

---

Mit der Abschaltung aller Kernkraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2022 und spätestens seit der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 sieht sich nicht nur Deutschland sondern auch der Rest der Welt mit der Frage konfrontiert, wie die Zukunft der Energieversorgung aussehen kann (United Nations 2015, BMUB 2018). Im Fokus steht die Suche nach möglichen Alternativen, welche die Auswirkungen von klimafeindlichen Technologien, wie etwa der Braunkohleverstromung, eindämmen und gänzlich substituieren können. So wird der Ausbau an erneuerbaren Energiequellen fortlaufend vorangetrieben. Deutschland ist auf diesem Gebiet führend: Im Jahr 2017 deckten erneuerbare Energien 36,1 % des deutschen Bruttostromverbrauchs und erreichten damit einen neuen Rekordwert (Agora Energiewende 2018). Im gleichen Jahr lag erstmals die Stromproduktion der Windenergie über der Kernenergie und der Steinkohle (Agora Energiewende 2018).

Wenn die Stromversorgung – wie im Energiekonzept der Bundesregierung vorgesehen – bis 2050 überwiegend auf erneuerbare Energien umgestellt werden soll, muss ein System geschaffen werden, welches an die damit einhergehende Fluktuationszunahme der Energieverfügbarkeit angepasst ist (Elsner u. a. 2015). Die grundsätzliche gesellschaftliche Zustimmung zu dieser Entwicklung scheint gegeben, jedoch mangelt es unter anderem noch an Konzepten zur technischen und wirtschaftlichen Realisierung dieses volkswirtschaftlichen Großprojekts. Um diese Hürden zu überwinden initiierte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2015 mit „Kopernikus“ die bisher größte Forschungsinitiative zur Energiewende, um gemeinsam mit Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau des Energiesystems zu entwickeln (BMBF 2016).

Die Kopernikus-Projekte unterteilen sich in vier Forschungsvorhaben mit den folgenden Schwerpunkten:

- ENSURE – Weiterentwicklung der Stromnetze
- P2X – Speicherung überschüssiger erneuerbarer Energie durch Umwandlung in andere Energieträger
- SynErgie – Neuausrichtung von Industrieprozessen auf eine schwankende Energieversorgung
- ENavi – Verbesserung des Zusammenspiels aller Sektoren des Energiesystems

Eine der großen Herausforderungen in der Etablierung einer nachhaltigen und regenerativen Energieversorgung für die Zukunft, liegt in der schwankenden Energieproduktion der neuen Erzeugertechnologien. Windturbinen sowie Solaranlagen fluktuieren in verschiedenen Zeitintervallen, wie zu Beispiel durch kurzfristige Wind-Turbulenzeffekte, mehrtägige Wetteränderungen oder saisonale, jahreszeitliche Wetterveränderungen (Heide u. a. 2010). Um das Energiesystem bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energiequellen in einem ständigen Gleichgewicht zu halten, bedarf es zum einen großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten und zum anderen einer steigenden Anzahl von Regelungseingriffen auf der Erzeugerseite – im ersten Quartal 2017 stieg die Gesamtmenge der Redispatcheinsätze um über 40 % gegenüber dem Vorjahresquartal an (BNetzA 2017).

Die aus heutiger Sicht erforderlichen massiven Investitionen in die Energieerzeugungs- und Energieverteilnetzinfrastuktur können reduziert werden, indem sich die Entwicklung weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung, hin zu einer dezentralen, erzeugungsorientierten Verbrauchsmentalität ändert (Raquet u. Liotta 2013, dena 2017).

## *1. Energieflexibilität im industriellen Kontext*

Innerhalb dieses Paradigmenwechsels wird die Industrie mehr und mehr dazu übergehen müssen, sich dem Energieangebot flexibel anzupassen. Der Faktor Energie wird somit zu einer variablen Planungsgröße im Produktionsbetrieb. Hier setzt das Kopernikus-Projekt SynErgie an und untersucht die energetische Flexibilisierbarkeit der deutschen Industrie.

Die Flexibilisierung des Energieverbrauchs wurde unter dem Begriff des Demand Side Management Anfang der 1980er-Jahre in den USA ge-

prägt und findet im Zuge der Energiewende auch im deutschsprachigen Raum zunehmend Relevanz. Die Potenziale hinsichtlich einer Flexibilisierung der energetischen Nachfrage in der Industrie wurden bisweilen in unterschiedlichen Studien untersucht. In der vorliegenden Metastudie werden die Ergebnisse der einzelnen Potenzialstudien hinsichtlich der Flexibilisierbarkeit der industriellen Energienachfrage analysiert und verglichen, um den Wissenstransfer in das Kopernikus-Projekt SynErgie zu ermöglichen.

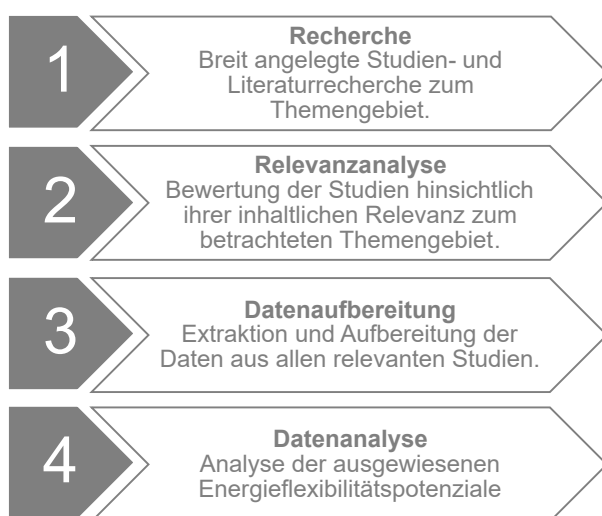
## 2. Zielsetzung und Methodisches Vorgehen

---

Ziel der Metastudie ist es, eine einheitliche Basis, sowohl der bereits verwendeten Methoden zur Ermittlung von energetischer Flexibilität, als auch der bereits ermittelten Potenziale zu schaffen. Die vorliegende Studie orientiert sich dabei an folgenden Fragestellungen:

- Wie groß ist nach aktuellem Kenntnisstand das energetische Flexibilitätspotenzial der deutschen Industrie?
- Wie groß ist nach aktuellem Kenntnisstand die Flexibilitätsperspektive der deutschen Industrie?
- Welche technischen und betriebswirtschaftlichen Hürden sind zu überwinden?
- Welche relevanten Dimensionen gibt es zur Identifikation des energetischen Flexibilitätspotenzials?

Vor dem Hintergrund der Erfassung von energetischen Flexibilitätspotenzialen ist das methodische Vorgehen dieser Metastudie darauf ausgelegt, eine möglichst breite und detaillierte Datenbasis aller bisher, bekannten Arbeiten zu schaffen. Hierzu ist das methodische Vorgehen wie in Abbildung 2.1 dargestellt in vier Schritte untergliedert.



**Abbildung 2.1.:** Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens in vier Schritten

### 2.1. Studienrecherche

---

Im Rahmen der Studien- und Literaturrecherche wurde eine breit angelegte Suche zu Arbeiten in den Themengebieten

- Lastmanagement,
- Demand Site Management (DSM),
- abschaltbare Lasten und
- Energieflexibilität

durchgeführt. Hierfür wurde eine Recherchematrix erstellt und in nationalen Bibliothekskatalogen, wissenschaftlichen Datenbanken sowie im Internet systematisch nach entsprechenden Arbeiten gesucht. Das einzige Auswahlkriterium des ersten Schrittes war, dass die Studien und Veröffentlichungen Erkenntnisse oder Aussagen zu einem der genannten Themengebiete im Kern oder am Rande behandeln müssen.

### 2.2. Relevanzanalyse

---

Für die Relevanzanalyse der Studien wurde ein Filtermodell entwickelt, welches die Studien nach thematischen Inhalten und Daten selektiert (Abbildung 2.2). Dabei werden die durch die Literaturrecherche identifizierten Studien auf quantifizierbare Aussagen über ein energetisches Flexibilitätspotenzial hin untersucht. Im zweiten Schritt erfolgt die Beschränkung auf Studien, die Aussagen für den Bilanzraum der Bundesrepublik Deutschland treffen. Zuletzt werden die extrahierten Daten, sofern möglich, den Wirtschaftszweigen des Statistischen Bundesamtes zugeordnet (Statistisches Bundesamt 2008).

## 2. Zielsetzung und Methodisches Vorgehen

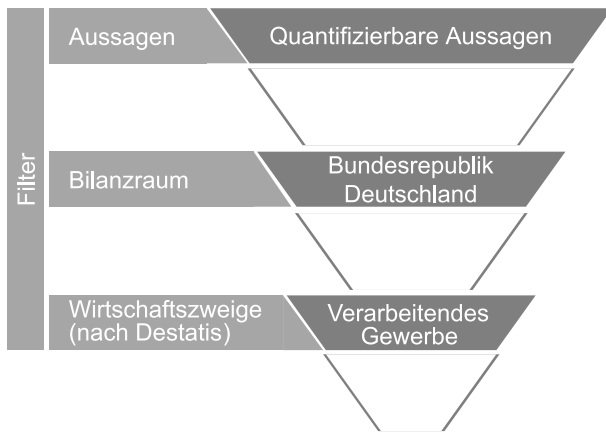


Abbildung 2.2.: Filtermodell zur Datenselektion

### 2.3. Aufbereitung der studienspezifischen Daten

Vor dem Hintergrund der Datenaufbereitung müssen alle relevanten Parameter zur Beschreibung von Energieflexibilität einheitlich definiert werden. Eine energetische Flexibilitätsmaßnahme ist definiert als eine „bewusste Aktion zur Durchführung eines definierten Zustandswechsels“ (Graßl 2015) in einem Produktionssystem. Diese umfasst den Zustandswechsel einer Produktionsstation und die damit verbundenen Wechselwirkungen im Produktionssystem (Reinhart u. a. 2014). Die Flexibilitätsmaßnahme enthält unter anderem Informationen über die

- Leistung,
- Zeit und
- Kosten der Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme.

Da diese Parameter in den relevanten Studien unterschiedlich definiert werden, wurden in der vorliegenden Metastudie die Definitionen der folgenden Unterkapitel verwendet und die Studiendaten entsprechend zugeordnet.

#### 2.3.1. Leistung

Die Arten der Laständerung orientieren sich an den regelbaren Lasten. Hierbei wird unterschieden zwischen den Begriffen Lastmanagement

und Lastabwurf (UBA 2015). Letzteres ist nach §13 Abs. 2 EnWG eine Notmaßnahme des Übertragungsnetzbetreibers (BMJV 2017). Ein Unternehmen ist auf einen Lastabwurf normalerweise nicht vorbereitet. Aus diesem Grund wird der Begriff in diesem Forschungsprojekt nicht weiter berücksichtigt. Die flexible Leistung  $\Delta P_{\text{flex}}$  kann sowohl positiv sein, was aus Sicht des Energienetzes negativer Regelleistung entspricht, als auch negativ, was aus Sicht des Energienetzes positiver Regelleistung entspricht. Lastmanagement ist ein Mechanismus für die Verwaltung des Kundenenergieverbrauchs als Reaktion auf die Versorgungssituation aus der Sicht des Energieversorgers. Aus Unternehmenssicht lassen sich die Begriffe des Lastmanagements übertragen (Abbildung 2.3).

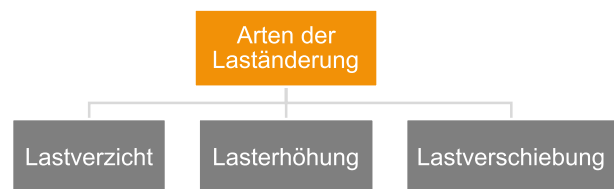
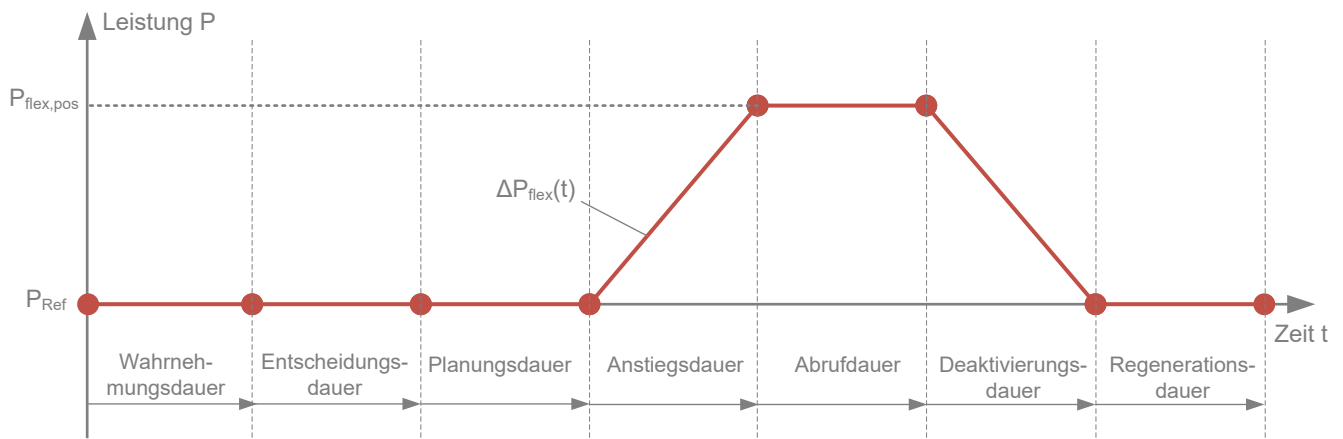


Abbildung 2.3.: Arten der Laständerung nach Weckmann u. Eisenhauer (2017)

Dabei ist der Lastverzicht eine Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb (UBA 2015). Lastverzicht kann sowohl eine verringerte Leistungsaufnahme sowie das vollständige Ausschalten sein, bei dem es keinen Lastnachholbedarf gibt. Die Lasterhöhung entspricht einer Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb ohne Lastnachholbedarf (Langrock 2014). Bei der Lastverschiebung ist eine temporäre erhöhte oder verringerte Leistungsaufnahme mit jeweiligem Lastnachholbedarf gegeben.

#### 2.3.2. Zeit

Die zeitlichen Eigenschaften einer Laständerung im Sinne der Energieflexibilität sind für eine vollständige Beschreibung essentiell. Obwohl eine Vielzahl von Zeitintervallen zur Beschreibung von Energieflexibilität differenziert werden kann (Weckmann u. Eisenhauer 2017), fokussiert sich die vorliegende Metastudie aufgrund der Datenbasis auf die Abrufdauer (Abbildung 2.4).



**Abbildung 2.4.:** Zeitintervalle zur zeitlichen Beschreibung der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (Weckmann u. Eisenhauer 2017)

Die Abrufdauer wird im Folgenden als minimale und maximale Zeitspanne von der vollständig ausgebildeten Laständerung bis zum Beginn der Deaktivierung der Flexibilitätsmaßnahme definiert (UBA 2015).

Zusätzlich zu den Zeitparametern sollte die zugelassene Abrufhäufigkeit (der Nutzung) einer Flexibilitätsmaßnahme pro Jahr erfasst werden (Weckmann u. Eisenhauer 2017). Die Abrufhäufigkeit ist zusammen mit der Abrufdauer und der flexibilisierbaren Leistung ausschlaggebend für die Ermittlung der flexibilisierbaren Energie für einen gewählten Betrachtungszeitraum. Weiterhin ermöglicht die Kenntnis der Abrufhäufigkeit eine Umlage von Investitionskosten auf die einzelne Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme.

### 2.3.3. Kosten

Als Kosten sind in diesem Kontext alle zusätzlichen Aufwendungen zu sehen, welche durch die Bereitstellung oder Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme entstehen. Die im regulären Betrieb anfallenden Kosten werden hierbei nicht berücksichtigt.

Die Kosten der Energieflexibilität gliedern sich in Anlehnung an Graßl (2015) in zwei Bereiche. Einerseits müssen Ausgaben für Investitionen zur Erhöhung des Flexibilitätspotenzials getätigt werden. Diese meist einmaligen Ausgaben befähigen das vorhandene Produktionssystem, bei Bedarf

die Leistungsaufnahme gezielt zu verändern und ermöglichen damit eine energetische Flexibilität abzurufen. Andererseits entstehen Kosten bei der Durchführung der Flexibilitätsmaßnahme. Diese sind stets der jeweiligen Flexibilitätsmaßnahme zugeordnet. Sie müssen zeitlich und organisatorisch in direktem Zusammenhang zu einer Flexibilitätsmaßnahme stehen und können daher einem Zeitparameter zugeordnet werden. (Weckmann u. Eisenhauer 2017)

## 2.4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen

Im Rahmen der Datenanalyse der Energieflexibilitätsdimensionen werden alle Studien mit quantifizierbaren Aussagen zu Energieflexibilitätspotenzialen untersucht. Hierbei werden sowohl die energetischen Flexibilitätspotenziale in Abhängigkeit der beschriebenen Dimensionen (Abrufdauer, abrufbare Leistung und Kosten), als auch in Bezug auf die Wirtschaftszweige ausgewertet.

Die Datenanalyse ist in zwei Schritte aufgeteilt. Zuerst werden die Häufigkeitsverteilung und statistische Lageparameter der identifizierbaren Einzeldaten aller Studien betrachtet. Im Sinne der deskriptiven Statistik können somit die einzelnen untersuchten Größen betrachtet und in einen Gesamtzusammenhang eingeordnet werden. Zusätzlich werden so häufig oder selten untersuchte

## 2. Zielsetzung und Methodisches Vorgehen

Datenbereiche aufgezeigt. Im zweiten Schritt werden die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Größen betrachtet.

Die Wechselbeziehungen der Dimensionen zu einander werden mittels Korrelationsanalyse untersucht. Um das lineare Korrelationsverhalten von Wertepaaren zu beschreiben wird der Pearson-Koeffizient (Formel 2.1) herangezogen (Büchter u. Henn 2007).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.1)$$

Hierbei ist:

- $r$  = Pearson-Koeffizient
- $n$  = Anzahl der zu vergleichenden Datenpunkte
- $x$  = Variable 1
- $y$  = Variable 2
- $i$  = Laufvariable, Natürliche Zahl

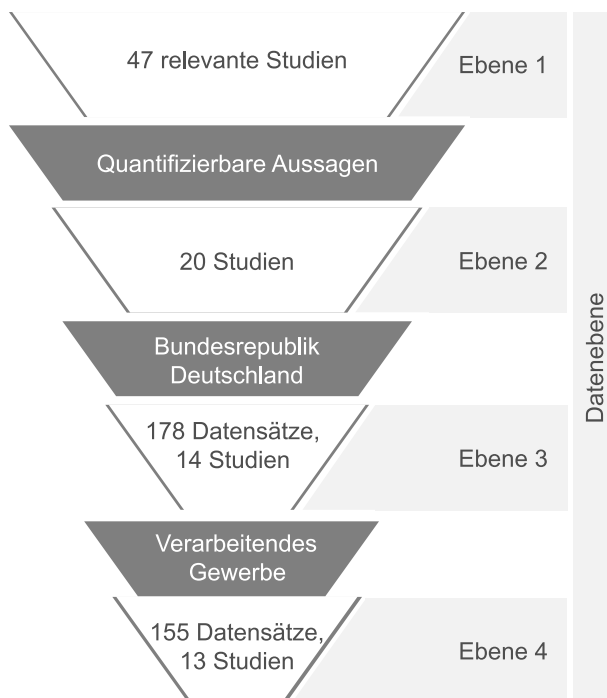
Der Pearson-Koeffizient  $r$  liegt im Bereich zwischen -1 und 1. Die Interpretation des Pearson-Koeffizienten kann dabei analog zur Tabelle 2.1 vorgenommen werden. Dabei entspricht der Betrag dieses Koeffizienten dem Grad der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Variablen und das Vorzeichen unterscheidet in eine positive und negative Korrelation.

**Tabelle 2.1.:** Interpretation des Pearson-Koeffizienten nach Büchter u. Henn (2007)

| Wert des Pearson-Koeffizienten | Interpretation           |
|--------------------------------|--------------------------|
| Bis  0,2                       | Sehr geringe Korrelation |
| Bis  0,5                       | Geringe Korrelation      |
| Bis  0,7                       | Mittlere Korrelation     |
| Bis  0,9                       | Hohe Korrelation         |
| Über  0,9                      | Sehr hohe Korrelation    |

### 3. Studienrecherche und Relevanzanalyse

Insgesamt konnten im Rahmen der Literaturrecherche 47 Studien zum Thema Energieflexibilität bzw. der in Abschnitt 2.1 genannten Themen identifiziert werden (siehe Anhang, Tabelle A.1). Bezüglich der inhaltlichen Relevanz kann zwischen vier Datenebenen unterschieden werden (Abbildung 3.1).



**Abbildung 3.1.:** Relevanzanalyse hinsichtlich des Energieflexibilitätspotenzials der deutschen Industrie auf Basis mehrerer Filterstufen

Die Datenebene 1 beschreibt die Grundgesamtheit aller identifizierten Studien. Durch Filterung der Studien nach jenen Arbeiten, welche quantifizierbare Aussagen hinsichtlich Energieflexibilität treffen, reduziert sich die Gesamtheit auf der Datenebene 2 auf 20 Studien. Bei der Untersu-

chung des Bilanzraums, für den die Daten ausgewiesen werden, treffen 14 Studien Aussagen für die Bundesrepublik Deutschland. Auf Ebene 3 lassen sich dabei 178 Datensätze mit Bezug zu mindestens einer der drei Flexibilitätsdimensionen (Abrufdauer, abrufbare Leistung und Kosten) extrahieren. Durch weitere Selektion bezüglich des Wirtschaftszweiges *C verarbeitendes Gewerbe* können der Datenebene 4 insgesamt 13 Studien mit 155 Datensätzen zugeordnet werden, vgl. Tabelle 3.1. Insgesamt ist auf der Datenebene 4 eine Grundgesamtheit von 155 Datensätzen vorhanden. Als ein Datensatz wird jeweils eine quantifizierbare Information zu den Dimensionen Zeit, Leistung, Kosten aus einer der 47 Studien verstanden.

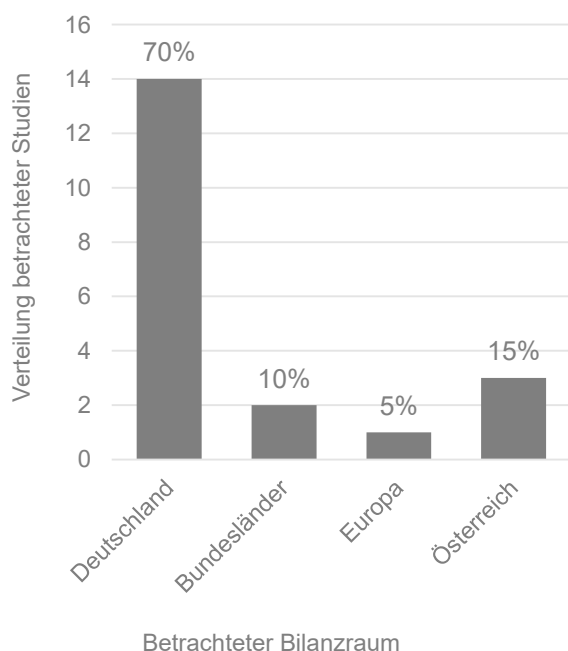
#### 3.1. Betrachtung des Bilanzraums der Untersuchten Studien

In Datenebene 2 werden die Bilanzräume in die Gruppen einzelne Bundesländer, Deutschland, Österreich und Europa unterteilt, vgl. Abbildung 3.2. Studien, welche eine Teilmenge eines größeren Bilanzraumes betrachten, sind in der Abbildung nicht nochmals im größeren Bilanzraum mitgezählt. Der überwiegende Teil der Studien legt den Bilanzraum Deutschland zugrunde. Der Bilanzraum einzelne Bundesländer stellt nur eine Teilmenge des Bilanzraumes Deutschland dar und wird somit in der weiterführenden Betrachtung nicht weiter mit einbezogen. Demnach werden 14 Studien, die den Bilanzraum Deutschland ausweisen, der Datenebene 3 zugeordnet.

### 3. Studienrecherche und Relevanzanalyse

**Tabelle 3.1.: Liste der 13 identifizierten Studien der Datenebene 4**

| Titel                                                                                                                                                                     | Kurzbeleg                   | Leistung | Zeit | Invest | Fix-kosten | Variable Kosten |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|------|--------|------------|-----------------|
| Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten | (Klobasa 2007)              | ●        | ●    |        |            |                 |
| dena-Netzstudie II                                                                                                                                                        | (dena 2010)                 | ●        | ●    | ●      | ●          | ●               |
| Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor                                                        | (Focken u. Klobasa 2011)    | ●        |      |        |            | ●               |
| The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany                                                                 | (Paulus u. Borggreffe 2010) | ●        | ●    | ●      | ●          | ●               |
| Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland                                                                                                       | (VDE 2012)                  | ●        | ●    | ●      |            |                 |
| Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast                                                                                               | (Buber u. a. 2013b)         | ●        | ●    |        |            |                 |
| Lastflexibilisierungspotenziale industrieller Querschnittstechnologien unter Berücksichtigung zunehmender Energieeffizienz                                                | (Gruber u. a. 2013)         | ●        |      |        |            |                 |
| Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge                                                                        | (Elsner u. a. 2015a)        | ●        | ●    |        |            | ●               |
| Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland                                                   | (Steurer u. a. 2015)        | ●        |      |        |            |                 |
| Potenziale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien                                                                | (UBA 2015)                  | ●        | ●    | ●      | ●          | ●               |
| Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030, Teil 2: Technoökonomische Analyse funktionaler Energiespeicher                                 | (Pellinger u. Schmid 2016b) | ●        | ●    | ●      | ●          | ●               |
| Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study                                                                               | (Gils 2016)                 | ●        | ●    | ●      |            | ●               |
| Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung                                                               | (Steurer 2017)              |          |      |        |            |                 |



**Abbildung 3.2.:** Bilanzräume auf Datenebene 2

### 3.2. Betrachtung der ausgewiesenen Wirtschaftszweige der untersuchten Studien

Die ausgewiesenen Daten der 14 Studien, die den Bilanzraum Deutschland betrachten, lassen sich anhand der Wirtschaftszweige weiter differenzieren. Diese Differenzierung ist jedoch in der Studie von Stede (2016) nicht möglich, da hier lediglich Aussagen für die gesamte deutsche Industrie getroffen werden. Die Daten der übrigen 13 Studien können auf die Wirtschaftszweige aufgeteilt werden (Tabelle 3.2). Die Aufteilung erfolgt anhand der zweiten Ebene der Wirtschaftszweige (WZ-2) nach (Statistisches Bundesamt 2008).

Hierbei fällt auf, dass alle Studien den Wirtschaftszweig *C.24: Metallerzeugung und bearbeitung* betrachten. Die *Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus* (WZ-2: C.17) zeigt eine hohe Abdeckung und wird lediglich von Gils (2016) nicht betrachtet. Der Wirtschaftszweig *C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden* zeigt ebenfalls eine hohe Abdeckung und wird von Gils (2016)

und UBA (2015) nicht betrachtet. Die Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ-2: C.20) zeigt die geringste Abdeckung. Diese wird von 9 der 13 Studien ausgewiesen.

Der Fokus im Projekt SynErgie liegt auf der produzierenden Industrie bzw. dem verarbeitenden Gewerbe (WZ-1: C). Daher werden die Bereiche der Wasserversorgung (WZ-2: D.36) und der Energieversorgung (WZ-2: D.35) in dieser Metastudie nicht weiter betrachtet.

### 3.3. Betrachtung der drei Flexibilitätsdimensionen in den untersuchten Studien

Bei der Betrachtung der untersuchten Flexibilitätsdimensionen Kosten, Abrufdauer und Leistung aller Studien auf Datenebene 4 lässt sich eine vollständige Abdeckung für die Dimension Leistung identifizieren (Tabelle 3.3). Für die Flexibilitätsdimensionen Abrufdauer sowie Kosten weisen 9 der 13 Studien quantifizierbare Aussagen aus.

Für eine detaillierte Betrachtung der Kosten-Dimension können diese in Investitionskosten, Fixkosten und variable Kosten untergliedert werden (Tabelle 3.4). Die Investitionskosten und variable Kosten werden dabei in sieben der neun Studien ausgewiesen, welche eine Kostenbetrachtung vornehmen. Fixkosten werden lediglich von fünf der neun Studien abgedeckt. Angaben zu allen drei Kostendimensionen machen vier der betrachteten neun Studien.

Bei der Ausweisung quantifizierter Angaben wird in den Studien teilweise auf andere in dieser Arbeit analysierte Studien verwiesen. Dabei wird jedoch oft nicht deutlich, inwiefern Daten nur wiedergegeben werden, oder eine weitere Verarbeitung erfolgt. Im Zuge der Datenextraktion zeigte sich bei keiner Studie eine klare Differenzierung in Werte, die bereits in anderen Studien ausgewiesen werden und zusätzliche erhobene Werte. Daher werden für die folgende Analyse die gesamten Daten jeder Studie verwendet.

### 3. Studienrecherche und Relevanzanalyse

**Tabelle 3.2.:** Einteilung der Studien mit Bilanzraum Deutschland hinsichtlich der Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

[illegible]

**Tabelle 3.3.:** Ausgewiesene Flexibilitätsdimensionen auf Datenebene 4

|                             | Leistung | Abrufdauer | Kosten |
|-----------------------------|----------|------------|--------|
| Buber u. a. (2013a)         | ●        | ●          |        |
| dena (2010)                 | ●        | ●          | ●      |
| Elsner u. a. (2015)         | ●        | ●          | ●      |
| Pellinger u. Schmid (2016b) | ●        | ●          | ●      |
| Focken u. Klobasa (2011)    | ●        |            | ●      |
| Gils (2016)                 | ●        | ●          | ●      |
| Gruber u. a. (2013)         | ●        |            |        |
| Klobasa (2007)              | ●        | ●          |        |
| Paulus u. Borggrefe (2010)  | ●        |            | ●      |
| Steurer (2017)              | ●        | ●          | ●      |
| Steurer u. a. (2015)        | ●        |            |        |
| UBA (2015)                  | ●        | ●          | ●      |
| VDE (2012)                  | ●        | ●          | ●      |

**Tabelle 3.4.:** Aufschlüsselung der Dimension Kosten nach Investitionskosten, Fixkosten und variable Kosten auf Datenebene 4

|                             | Variable Kosten | Fixkosten | Investitionskosten |
|-----------------------------|-----------------|-----------|--------------------|
| dena (2010)                 | ●               | ●         | ●                  |
| Elsner u. a. (2015)         | ●               |           |                    |
| Pellinger u. Schmid (2016b) | ●               | ●         | ●                  |
| Focken u. Klobasa (2011)    | ●               |           |                    |
| Gils (2016)                 | ●               |           | ●                  |
| Paulus u. Borggreffe (2010) | ●               | ●         | ●                  |
| Steurer (2017)              |                 | ●         | ●                  |
| UBA (2015)                  | ●               | ●         | ●                  |
| VDE (2012)                  |                 |           | ●                  |

## 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen

---

Im Folgenden werden die ausgewiesenen Daten der 13 Studien der Datenebene 4 detaillierter analysiert (Abbildung 3.1). Initial wird die Verfügbarkeit der einzelnen Flexibilitätsdimensionen betrachtet und darauffolgend eine dimensionsübergreifende Analyse durchgeführt.

### 4.1. Eindimensionale Analysen

---

Die Datenverteilung der drei Flexibilitätsdimensionen in den unterschiedlichen Studien und Wirtschaftszweigen lässt sich durch Histogramme oder Boxplots darstellen. Vor dem Hintergrund einer Metaanalyse ist zu beachten, dass die statistische Häufung der ausgewiesenen Daten in einem gewissen Wertebereich mehrere Ursachen haben kann. Eine mögliche Ursache kann darin liegen, dass diese Bereiche relativ leicht zu untersuchen sind und daher bevorzugter Gegenstand von Analysen sind. Es liegt für diesen Fall eine methodisch bedingte Häufung vor. Ebenso ist es möglich, dass in selbigen Bereichen energetische Flexibilität in vielen Fällen realisierbar und nutzbar ist. Umgekehrt können Bereiche mit wenigen Werten auf eine Forschungslücke oder ein in geringem Maße flexibilisierbaren Bereich hinweisen. Es liegt in diesem Fall eine Häufung mit Realbezug vor.

Der Verteilung der Lastveränderung ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Zu sehen ist die relative Anzahl der Datenpunkte mit konstanter Klassenbreite von 250 MW. Differenziert wird dabei nach den Wirtschaftszweigen C.24, C.17, C.23 und C.20. Der Lastverzicht und die Lasterhöhung sind gemeinsam auf der Abszisse dargestellt. 30 % der insgesamt ausgewiesenen Datenpunkte liegen dabei im Intervall von 0 bis 250 MW. Insgesamt jedoch gibt es mehr Angaben zum Lastverzicht (61 %) als zur Lasterhöhung. Der Großteil der Datenpunkte (89 %) verteilt sich auf den Bereich zwischen -750 MW (Lastverzicht) und +250 MW (Lasterhöhung). Bei der Untersuchung der einzel-

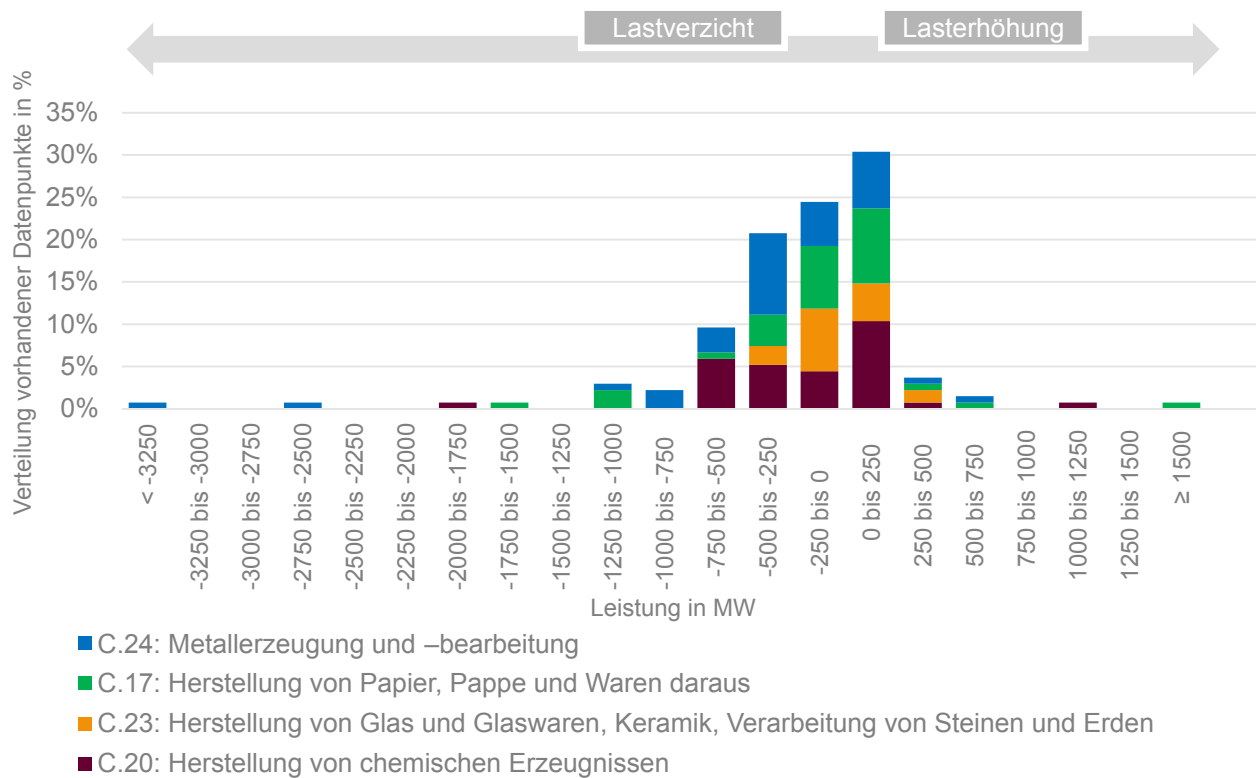
nen Wirtschaftszweige ergeben sich ähnliche Verteilungen im Vergleich zur Gesamtmenge. Lediglich der Bereich Glas (C.23) weist eine schmale Bandbreite (-250 bis +250 MW) auf. Dominierend für den Bereich 0 bis 250 MW ist die Chemiebranche (C.20), gefolgt von der Papierindustrie (C.17) mit 9 %. Im Bereich Lastverzicht findet sich die größte Häufung in der Metallerzeugung und -bearbeitung (C.24) im Intervall von 500 bis 250 MW.

Bei der Untersuchung der ausgewiesenen Daten lässt sich die Lastveränderung für die einzelnen Wirtschaftszweige mithilfe von Boxplots darstellen (Abbildung 4.2). Analog zum Histogramm zeigt sich, dass wenige Ausreißer, sowohl bei Lastverzicht als auch bei Lasterhöhung, auftreten. Die kleinsten Absolutwerte der Laständerung liegen sowohl für den Lastverzicht als auch für die Lasterhöhung nahe null.

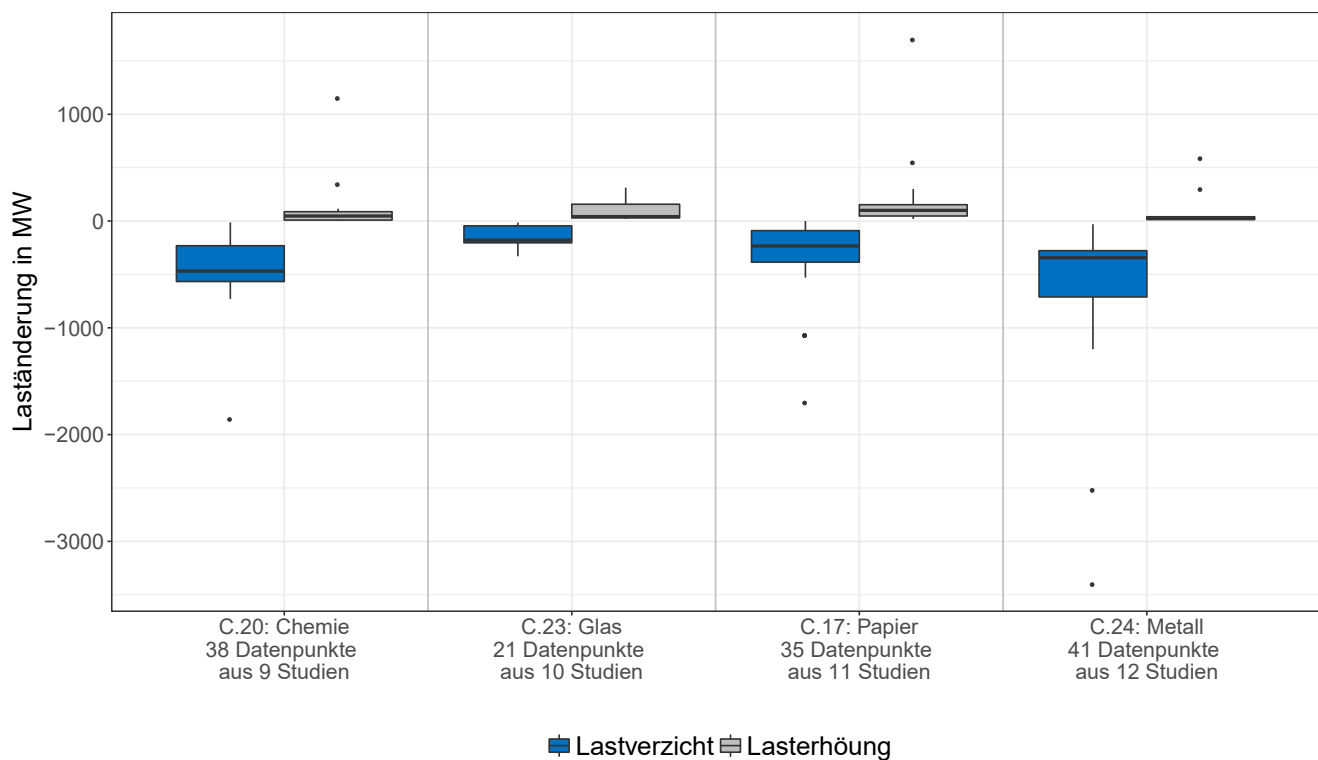
Die Angaben bezüglich des Lastverzichts variieren am stärksten im Metallerzeugung und -bearbeitung (C.24) von -30 bis -3400 MW und bei der Lasterhöhung im Papierbereich (C.17) von 0 bis 1700 MW. Zu beachten ist, dass die Spannweite dabei alle Werte umfasst, jedoch in der Darstellung die Ausreißer mit dem Kriterium des maximal 1,5-fachen des Interquartilsabstand definiert sind (Mcgill u. a. 1978). Für die Glasbranche (C.23) sind keine Ausreißer vorhanden. Dies lässt den Schluss zu, dass die Werte der Laständerung für diesen Wirtschaftszweig mit einer kleineren Streuung zu ermitteln sind. Die Summe der Mittelwerte der einzelnen Flexibilitätspotenziale in den Wirtschaftszweigen ergibt ein Gesamtpotenzial für die Lasterhöhung von 600 GW und für den Lastverzicht von -1630 GW.

Bei Vernachlässigung der Ausreißer zeigt sich, dass die vier Branchen bei der Lasterhöhung geringere Werte gegenüber dem Lastverzicht ausweisen. Für die Glasbranche (C.23) trifft dies nur minimal zu mit -330 MW zu +313 MW. Im Metallbereich (C.24) hingegen beträgt der Lastverzicht das 30-fache der Lasterhöhung mit -1200 zu 40 MW.

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen



**Abbildung 4.1.:** Häufigkeitsverteilung der Laständerung, differenziert nach Wirtschaftszweigen (135 Datensätze aus 13 Studien)



**Abbildung 4.2.:** Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der Laständerung als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweigen (135 Datensätze aus 13 Studien)

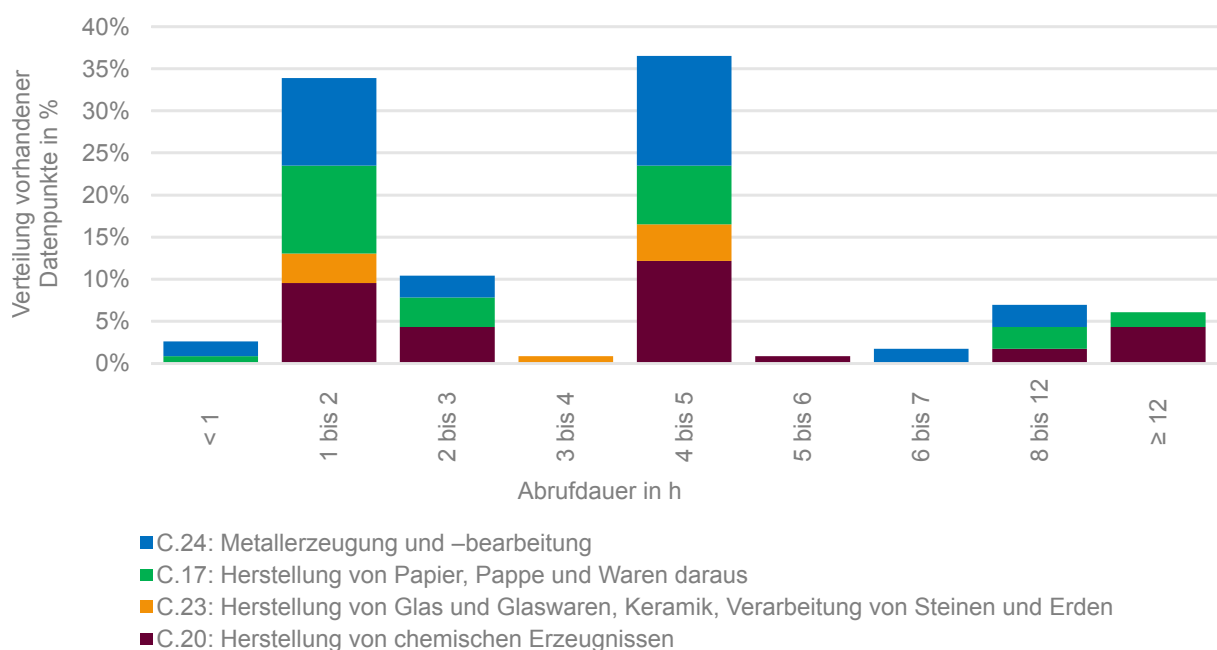
In Abbildung 4.3 ist das Histogramm der Abrufdauer nach Wirtschaftszweigen differenziert abgebildet. Hierbei wurde eine konstante Klassenbreite von einer Stunde gewählt. Klassen ohne Werte sind auf der Ordinate ausgeblendet. Für die Abrufdauer von einer bis zwei Stunden und vier bis fünf Stunden sind deutliche Häufungen zu erkennen. Bei höheren Abrufdauern weist die Klasse acht bis zwölf Stunden eine weitere lokale Häufung aus. 94 % aller Werte weisen eine Abrufdauer kleiner neun Stunden und 84 % der Werte weisen eine Abrufdauer kleiner fünf Stunden aus. Als mögliche Ursache kann die Fokussierung der bisherigen Studien auf fixe Abrufdauern von einer, zwei, vier oder acht Stunden hindeuten. In der Klasse mit Abrufdauern größer zwölf Stunden sind anteilig zur Gesamtwertemenge 3 % mit einer unendlichen Abrufdauer angegeben. Diese lassen sich den Wirtschaftszweigen Chemie (C.20) und Papier (C.17) zuordnen.

Bei der Betrachtung aller untersuchten Wirtschaftszweige wird deutlich, dass die meisten Angaben bezüglich der Abrufdauer in den Branchen Chemie (C.20) mit 33 % und Metall (C.24) mit 32 % der Gesamtdatenmenge gemacht wurden. Die Häufigkeitsverteilung der Abrufdauer bezo-

gen auf die Wirtschaftszweige weist eine ähnliche Verteilung wie die kumulierte Gesamtverteilung auf. Für die Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (C.23) wird keine Abrufdauer größer fünf Stunden ausgewiesen.

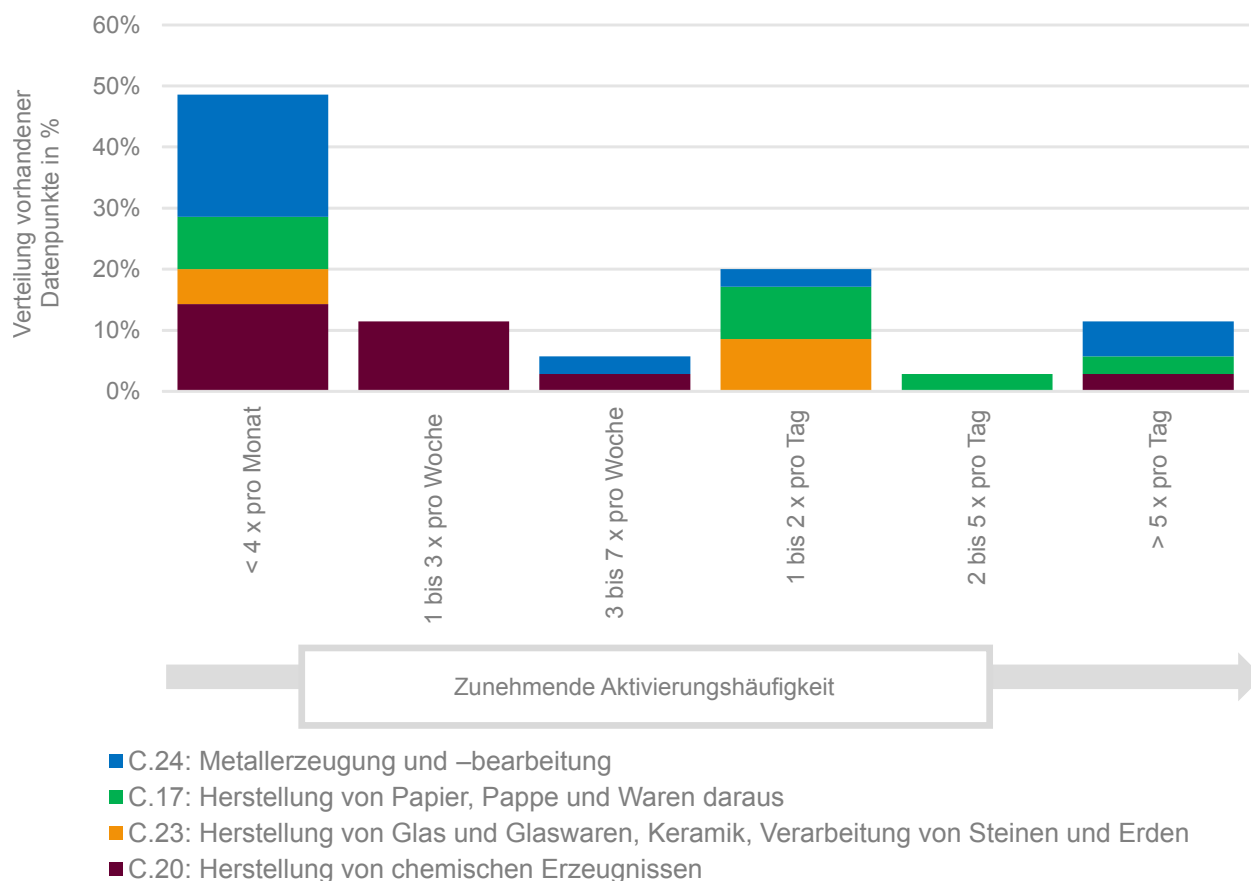
Unter Abrufhäufigkeit wird verstanden, wie oft die Bereitstellung der Flexibilität pro Jahr erfolgen kann. Diese wird ebenfalls in Form eines Histogramms dargestellt (Abbildung 4.4). Lediglich 46 % der Studien in der Datenebene 4 weisen Angaben zur Abrufhäufigkeit aus.

Mit 49 % aller Datenpunkte ist die Klasse mit Abrufhäufigkeiten von 4 mal pro Monat oder seltener die größte, der in Abbildung 4.4 dargestellten Klassen. Dies lässt sich dadurch begründen, dass fast die Hälfte aller Datenpunkte (46 %) eine Abrufdauer von 40- bzw. 50-mal pro Jahr angeben. Diese Werte weisen auf eine wöchentliche Durchführung unter Berücksichtigung von Betriebsurlaub oder Ähnlichem hin. In selbigem Intervall sind gemessen an der Gesamtverteilung über alle Klassen die Wirtschaftszweige der Chemiebranche (C.20) mit 20 % und der Metallbranche (C.24) mit 14 % dominierend.



**Abbildung 4.3.:** Häufigkeitsverteilung der Abrufdauer, differenziert nach Wirtschaftszweig (115 Datensätze aus 9 Studien)

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen



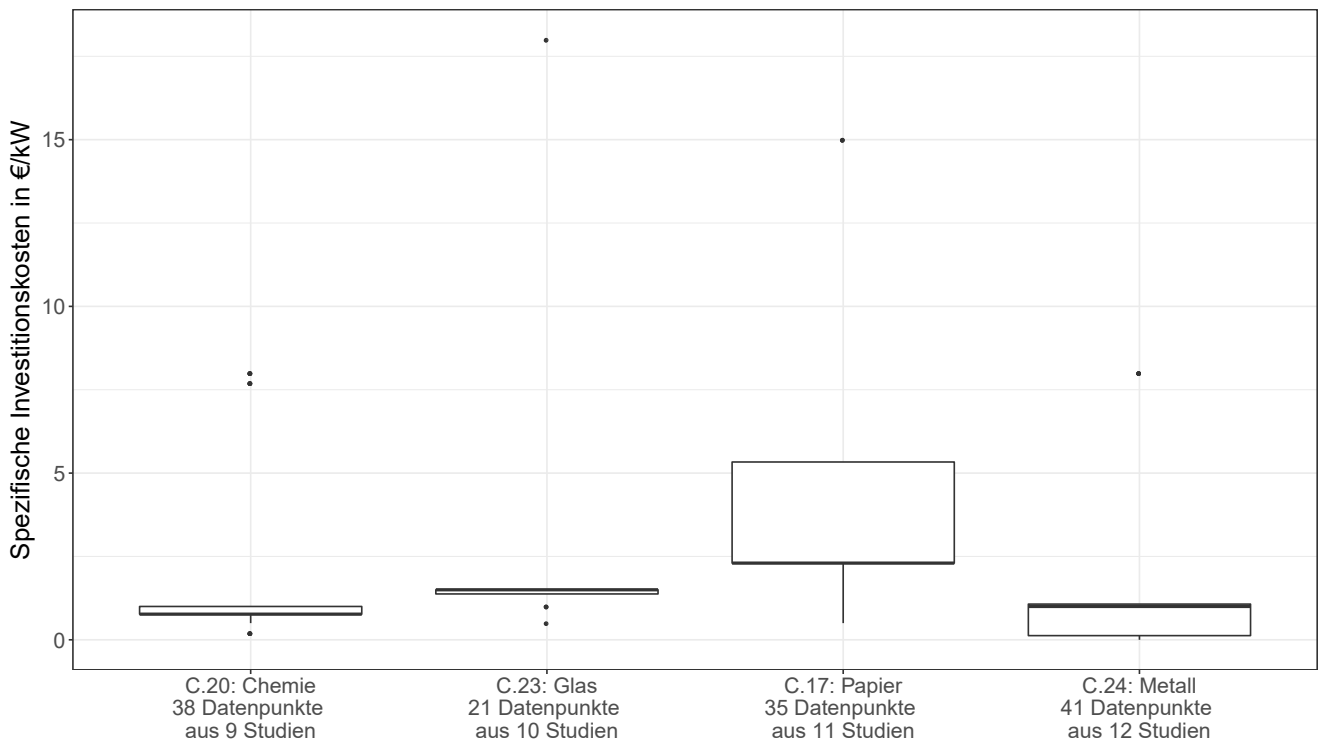
**Abbildung 4.4.:** Häufigkeitsverteilung der Abrufhäufigkeit pro Jahr, differenziert nach Wirtschaftszweig (35 Datensätze aus 6 Studien)

Ein zweiter Schwerpunkt ist für das Intervall 1 bis 2-mal pro Tag zu erkennen. Dabei entfallen 9 % jeweils auf die Bereiche Glas (C.23) und Papier (C.17).

Die Investitionskosten, die zur Bereitstellung von Energieflexibilität erforderlich sind, werden in den analysierten Studien spezifisch anhand der möglichen Laständerung in €/kW angegeben. Bei der Analyse der Angaben fällt auf, dass alle Datenpunkte im Bereich von 0 bis 18 €/kW liegen, ein einzelner Wert jedoch mit 1000 €/kW deutlich erhöht ist. Grund ist, dass 7 der 8 Studien, die Angaben hierzu tätigen, die Investitionskosten explizit mit Mess- Steuer und Regelungstechnik, Informations- und Kommunikationstechnik oder Präqualifizierungsmaßnahmen für den Marktzugang begründen. Der einzelne, deutlich erhöhte Wert von 1000 €/kW ergibt sich durch „Neuinvestitionen in den Ausbau von Produktionskapazität bzw. Speichern“ (VDE 2012). Dadurch, dass dieser Wert bei allen untersuchten Studien der ein-

zige mit dieser Annahme ist, wird er für die folgenden Untersuchungen exkludiert, um somit eine einheitliche Basis zur Betrachtung der Investitionskosten zu schaffen.

Die Verteilung der spezifischen Investitionskosten der unterschiedlichen Wirtschaftszweige ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Der Median der spezifischen Investitionskosten liegt dabei für alle Wirtschaftszweige unter 2,50 €/kW. Pro Branche sind maximal zwei Ausreißer vorhanden. Der Interquartilsabstand von Papier (C.17) ist deutlich erhöht in Bezug zu den anderen drei Branchen. Dies kann zum einen auf eine hohe Heterogenität hinsichtlich der Anlagen und Prozesse hindeuten, da diese einen unterschiedlichen Aufwand für die Anbindung der technisch möglichen Potenziale aufweisen. Zum anderen kann hier auch ein breiteres Meinungsspektrum vorhanden sein, was die Kosten zur Erschließung der Flexibilität angeht.



**Abbildung 4.5.:** Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen Investitionskosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (113 Datensätze aus 6 Studien)

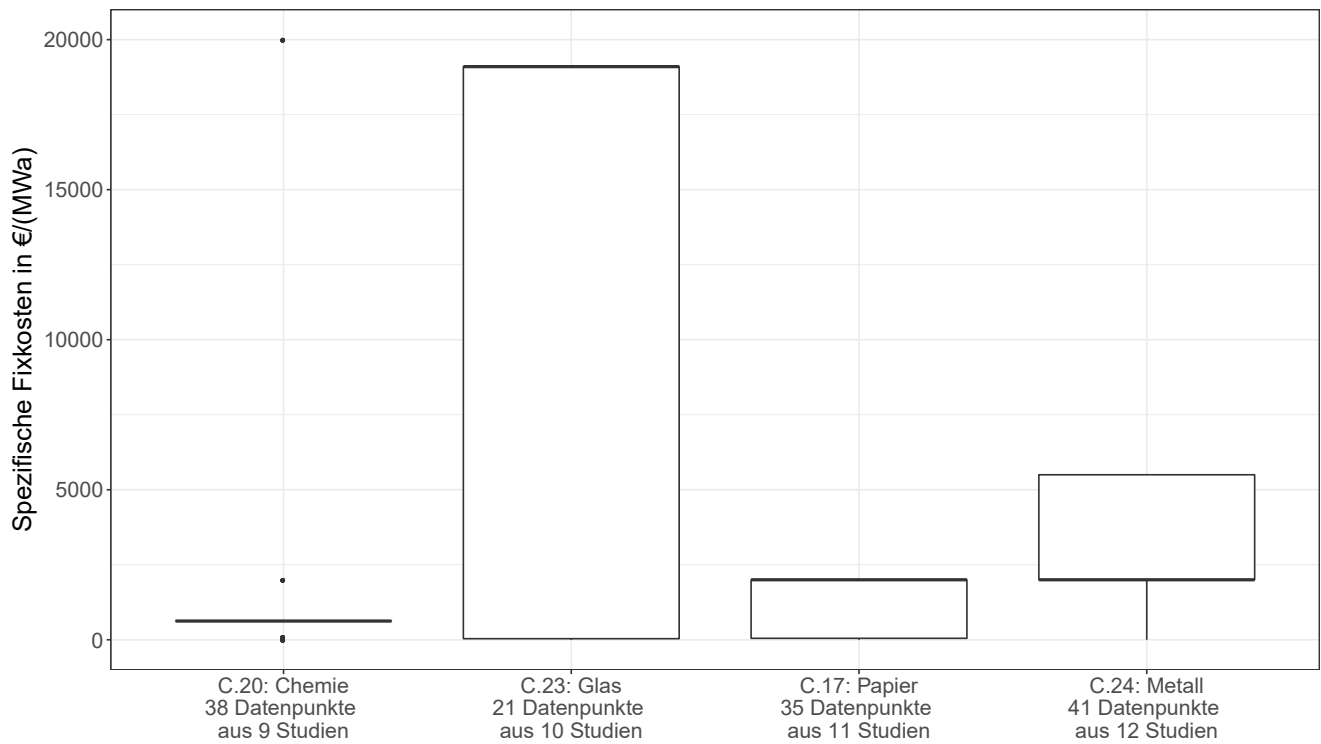
Die Investitionskosten für Chemie (C.20) und Glas (C.23) weisen unter Vernachlässigung der Ausreißer eine geringe Spannweite auf (0,50 bis 1,00 €/kW für Chemie (C.20) und 1 bis 1,50 €/kW bei Glas (C.23). Dies kann auf einen hohen und homogen verteilten Automatisierungsgrad der Anlagen in der Branche hinweisen. Entsprechende Anlagensteuerung ermöglicht es flexibilisierbare Prozesse auch flexibel zu fahren und so das bereits vorhandene Energieflexibilitätspotential ohne zusätzlich Investitionskosten in Mess-Steuer- und Regelungstechnik oder Informations- und Kommunikationstechnik zu realisieren. Dies könnte bei der Datenerhebung zu sehr ähnlichen Investitionskosten geführt haben.

Als weitere monetäre Größe werden in den Studien spezifische Fixkosten aufgeführt. Dies sind Kosten, welche unabhängig von der Bereitstellung energetischer Flexibilität anfallen und mit €/MW pro Jahr (€/MWa) ausgewiesen werden. Die Verteilung über die Wirtschaftszweige ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die vergleichsweise hohe

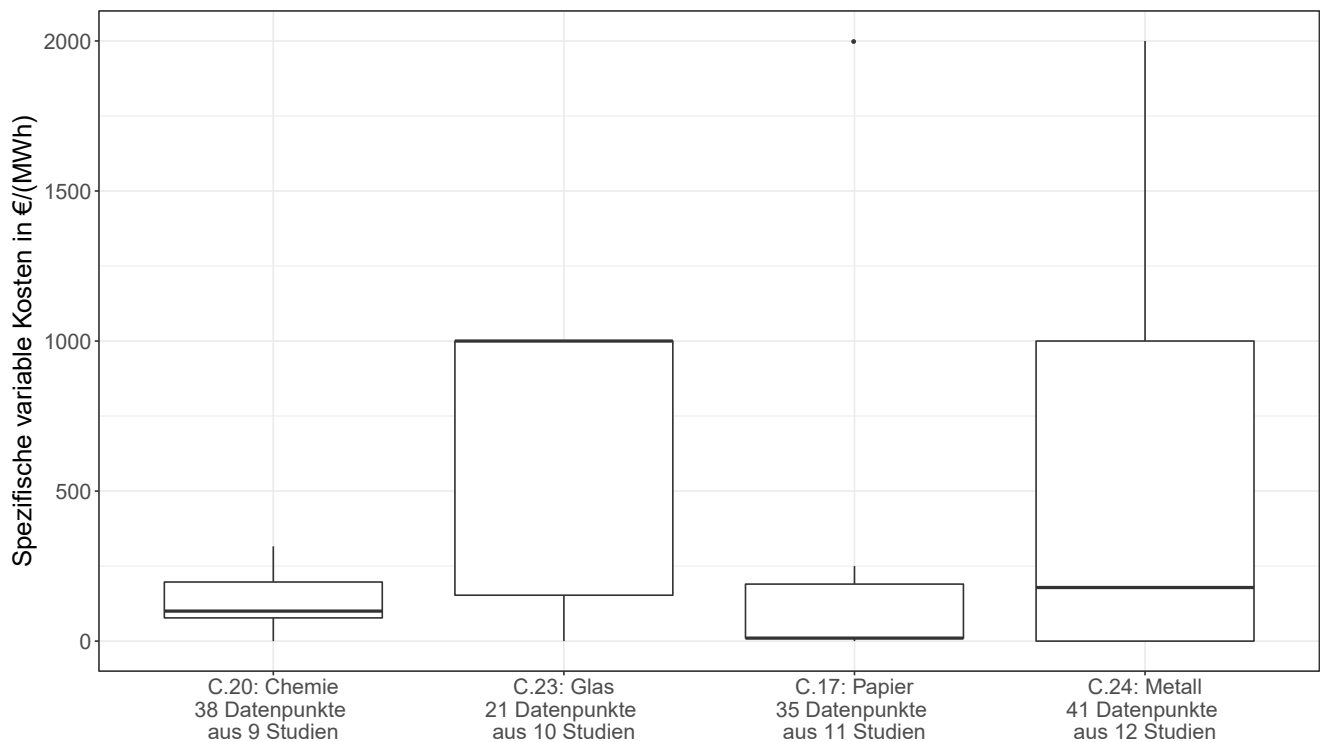
Spreizung in der Glasbranche (C.23) resultiert daraus, dass zwei Drittel der Angaben einen Wert von 19100 €/a angeben. Demgegenüber weist die Branche Chemie (C.20) trotz einer Anzahl von 38 Datenpunkten aus 5 Studien unter Vernachlässigung der Ausreißer eine deutlich geringe Spannweite von €/MW auf.

Sieben Studien geben variable Kosten an, welche bei der Bereitstellung von energetischer Flexibilität anfallen. Diese Kosten werden spezifisch anhand der Laständerung und der Abrufdauer in €/MWh ausgewiesen. Für die Dimension der Kosten sind die Anzahl der ausgewiesenen variablen Kosten (38 Datenpunkte) im Vergleich zu den Investitionskosten (113 Datenpunkte) und den Fixkosten (100 Datenpunkte) deutlich geringer. Dabei sind bei den Nennungen in den einzelnen Wirtschaftszweigen insbesondere in der Glasbranche (C.23) lediglich 5 Datenpunkte aus 4 Studien vorhanden. Die Verteilung der spezifischen variablen Kosten ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen



**Abbildung 4.6.:** Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen Fixkosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (100 Datensätze aus 5 Studien)



**Abbildung 4.7.:** Darstellung statistischer Streuungs- und Lagemaße der spezifischen variablen Kosten als Boxplot, differenziert nach Wirtschaftszweig (38 Datensätze aus 7 Studien)

Die Interquartilsabstände in den Branchen Chemie (C.20) und Papier (C.17) sind im Vergleich zu den Branchen Glas (C.23) und Metall (C.24) vergleichsweise gering. Die größten Werte finden sich in der Papierbranche (C.17) in Form eines Ausreißers und in der Metallerzeugung und -bearbeitung (C.24). In letzterem liegt der Median in einem ähnlichen Bereich, wie bei Chemie (C.20) und Papier (C.17). Die Signifikanz des Medians ist insbesondere im Wirtschaftszweig Glas (C.23) aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten problematisch.

Zusammenfassend sind in Tabelle 4.1 der Median, sowie die Minimal- und Maximalwerte der einzelnen erhobenen Größen, differenziert nach Wirtschaftszweig aufgezeigt. Zusätzlich ist der Quotient aus Maximalwert und Median berechnet. Diese Kennzahl zeigt im Sinne der deskriptiven Statistik die Unterschiede der Verteilung der erhobenen Parameter. Deutlich wird, dass diese Kennzahl für die Größen Lastverzicht (1,84 bis 9,88) und Lasterhöhung (1,84 bis 9,88) die geringste Spreizung annimmt. Für die Größen Abrufdauer (1,14 bis 24), Fixkosten (1 bis 32) und Investitionskosten (6 bis 12) liegt sie in einem mittleren Bereich. Die variablen Kosten nehmen hierbei die größte Spreizung mit Werten von 1 bis 200 an. Bei der Erhebung der Quotienten wurde die Abrufhäufigkeit nicht betrachtet, da diese auf einer nichtlinearen Einteilung in kalendarische Größen (Woche/Monat/Jahr/Tag) basiert und daher der gebildete Quotient nicht aussagekräftig ist.

Basierend auf den vorgenommenen Untersuchungen lässt sich der Schluss ableiten, dass sich Größen wie Lastverzicht, Lasterhöhung mit der geringsten Unsicherheit erheben lassen. Dies liegt nahe, da diese eng mit den jeweiligen untersuchten Prozessen und deren vorhandener Leistungsaufnahme verbunden sind.

Die Abrufdauer beruht hingegen meist auf hypothetischen Schätzungen und hängt zudem stark von den unterschiedlichen untersuchten Prozessen und deren Verkettung im Produktionsbetrieb, sowie der allgemeinen Auslastung ab. Mit Bezug auf die erfassten Kostenparameter sind die Investitionskosten am sichersten prognostizierbar. Investitionen sind oft aufgrund von Erfahrungswerten und klar definierten Investitionsgütern in den Studien gut quantifizierbar. Zudem wurde in den analysierten Studien, bis auf die oben erläuterte Ausnahme, durchweg keine Investitionskosten für Veränderungen am Prozess, der Anlagentechnik oder ähnlichem betrachtet. Somit beruhen die Analysen bezüglich den Investitionskosten auf marktverfügbaren Technologien zur informationstechnischen Anbindung.

Variable Kosten hingegen sind in den betrachteten Studien oft nicht quantifiziert beziehungsweise weist deren Nennungen die größte Streuung auf. Dies deutet darauf hin, dass sich für diesen Parameter aktuell keine Bezugsgröße im Produktionssystem aufgrund des bisher oftmals hypothetischen Charakters von energetischer Flexibilität finden lässt.

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen

**Tabelle 4.1.:** Auflistung von Median, Minimal- und Maximalwerte der untersuchten Größen, differenziert nach Wirtschaftszweig

| Wirtschaftszweig | Min.                                       | Median   | Max.     | Max.<br>/Median |
|------------------|--------------------------------------------|----------|----------|-----------------|
|                  | <b>Lastverzicht in MW (absolute Werte)</b> |          |          |                 |
| C.20             | 13                                         | 469      | 1853     | 4               |
| C.23             | 14                                         | 179      | 330      | 2               |
| C.17             | 18                                         | 251      | 1700     | 7               |
| C.24             | 30                                         | 344      | 3400     | 10              |
|                  | <b>Lasterhöhung in MW</b>                  |          |          |                 |
| C.20             | 3                                          | 47       | 1153     | 25              |
| C.23             | 20                                         | 42       | 313      | 8               |
| C.17             | 0                                          | 94       | 1700     | 18              |
| C.24             | 10                                         | 25       | 589      | 24              |
|                  | <b>Abrufdauer in h</b>                     |          |          |                 |
| C.20             | 1,0                                        | 4,0      | 12,0     | 3,0             |
| C.23             | 1,0                                        | 3,5      | 4,0      | 1,1             |
| C.17             | 0,7                                        | 2,0      | 48,0     | 24,0            |
| C.24             | 0,1                                        | 4,0      | 8,0      | 2,0             |
|                  | <b>Variable Kosten in €/MWh</b>            |          |          |                 |
| C.20             | 0,00                                       | 100,00   | 316,00   | 3,16            |
| C.23             | 0,00                                       | 1000,00  | 1000,00  | 1,00            |
| C.17             | 0,00                                       | 10,00    | 2000,00  | 200,00          |
| C.24             | 0,00                                       | 178,60   | 2000,00  | 11,20           |
|                  | <b>Fixkosten in €/MW a</b>                 |          |          |                 |
| C.20             | 0,00                                       | 625,00   | 20000,00 | 32,00           |
| C.23             | 0,00                                       | 19100,00 | 19100,00 | 1,00            |
| C.17             | 0,00                                       | 2000,00  | 2000,00  | 1,00            |
| C.24             | 0,00                                       | 2000,00  | 5500,00  | 2,75            |
|                  | <b>Investitionskosten in €/kW</b>          |          |          |                 |
| C.20             | 0,20                                       | 0,77     | 8,00     | 10,40           |
| C.23             | 0,50                                       | 1,50     | 18,00    | 12,00           |
| C.17             | 0,50                                       | 2,30     | 15,00    | 6,52            |
| C.24             | 0,00                                       | 1,00     | 8,00     | 8,00            |

## 4.2. Mehrdimensionale Analysen

In der mehrdimensionalen Analyse werden die Flexibilitätsdimensionen – Zeit, Leistung und Kosten – zueinander in Bezug gesetzt und analysiert. Dabei werden im ersten Schritt die Abrufdauer und die flexibilisierbare Energie mit der Laständerung in Bezug gesetzt. Im zweiten Schritt werden die Kostendimensionen in Abhängigkeit der Laständerung, Abrufdauer und Abrufhäufigkeit untersucht.

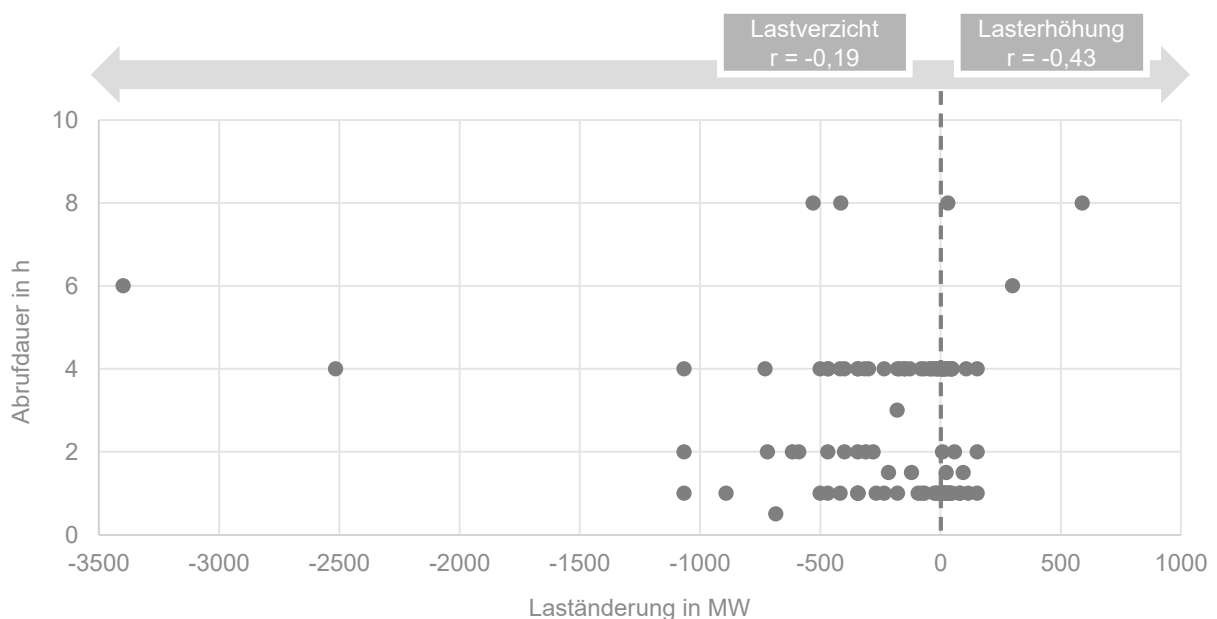
Die bei der mehrdimensionalen Analyse durchgeführten Untersuchungen lassen sich mit den Daten des gesamten verarbeitenden Gewerbes sowie mit den einzelnen Wirtschaftszweigen durchführen. In Abschnitt 4.2 sind hierzu ausgewählte Abbildungen aufgeführt. Die Abbildungen der übrigen Wirtschaftszweige bzw. des gesamten verarbeitenden Gewerbes sind im Anhang in Abschnitt A.2 ergänzend abgebildet.

### 4.2.1. Leistungsorientierte Analyse

Bei Betrachtung der Laständerung in Abhängigkeit zu der jeweiligen Abrufdauer ergibt sich ein Muster, dass stark durch die abgefragten Zeithorizonte der verschiedenen Studien geprägt ist (Abbildung 4.8). Dabei werden Angaben für die Abrufdauern von einer, zwei, vier, sechs und acht Stunden ausgewiesen.

Die Leistungsangaben variieren dabei in der Regel zwischen einer Lasterhöhung von 300 MW und einer Lastreduktion von -1500 MW. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass weder der Lastverzicht noch die Lasterhöhung mit der Abrufdauer korrelieren (Abbildung 4.8). Die Laständerung ist also unabhängig von der Abrufdauer.

Betrachtet man die Korrelationskoeffizienten, vgl. Abschnitt 2.4, aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig, ergibt sich ein ähnliches Bild, vgl. Tabelle 4.2.



**Abbildung 4.8.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

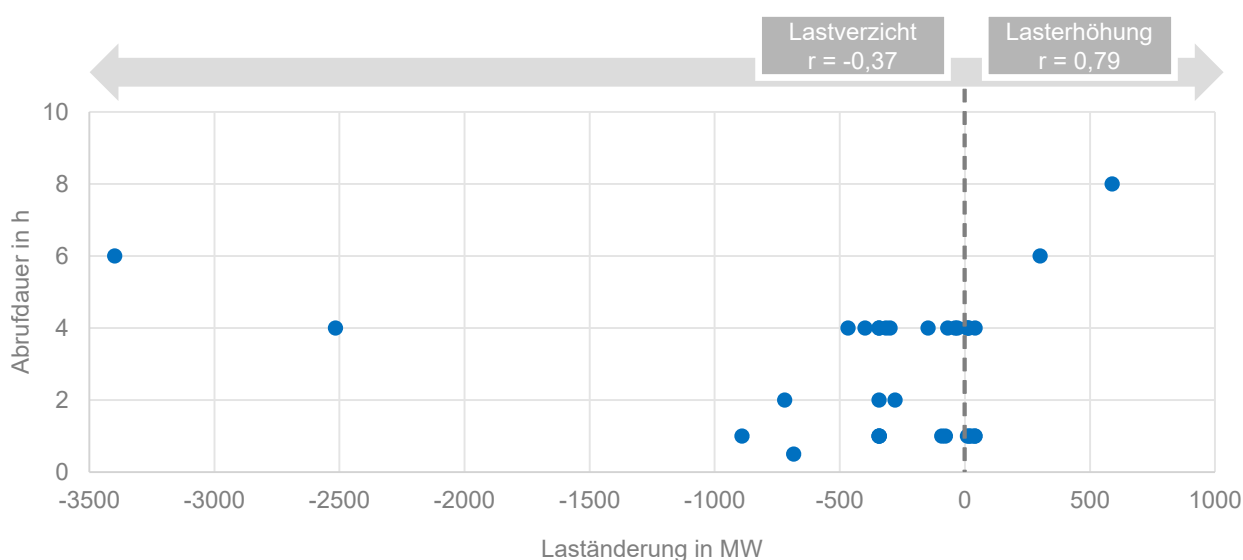
**Tabelle 4.2.:** Korrelationskoeffizienten von Laständerung zu Abrufdauer, aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig

|        | P- / $\Delta t$ | P+ / $\Delta t$ |                                                                                       |
|--------|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| C.20   | 0,01            | -0,23           | Mittlere Korrelation:<br>$ r  > 0,6$                                                  |
| C.23   | -0,13           | 0,00            | Hohe Korrelation:<br>$ r  > 0,8$                                                      |
| C.17   | -0,06           | -0,02           | C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen                                         |
| C.24   | -0,37           | 0,79            | C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden |
| Gesamt | -0,19           | 0,43            | C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus                                  |
|        |                 |                 | C.24: Metallherzeugung und -bearbeitung                                               |

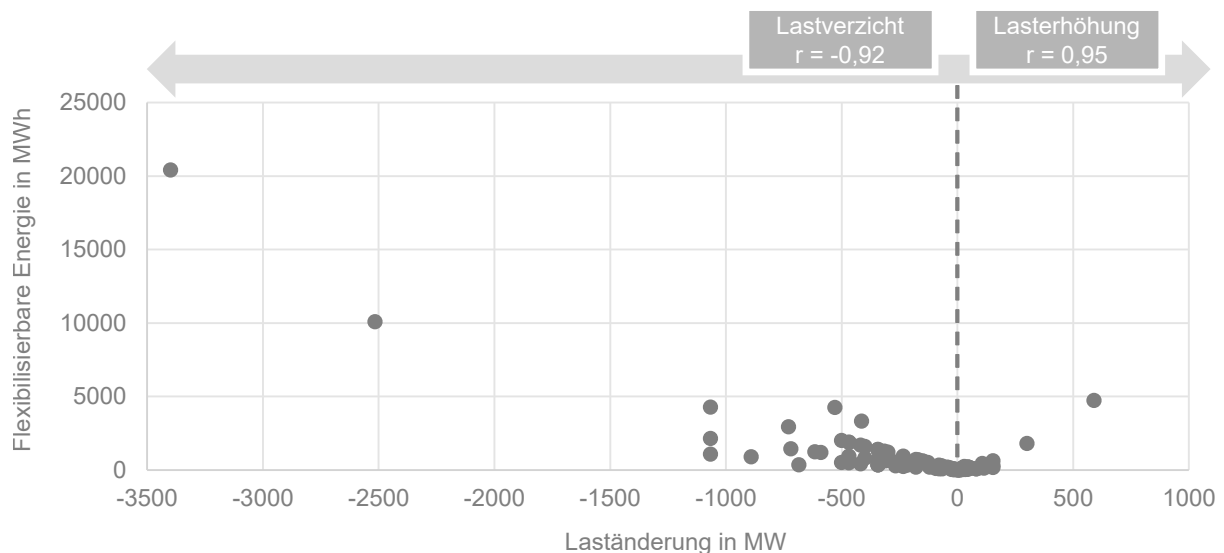
Lediglich für die Metallbranche (C.24) ergibt sich für den Fall der Lasterhöhung eine mittlere Korrelation. Bei der Untersuchung selbiger hinsichtlich ihrer Aussagekraft, ist festzustellen, dass für den Bereich der Lasterhöhung nur einzelne wenige Datenpunkte vorliegen (Abbildung 4.9). In diesem Fall ist von einer Interpretation des Korrelationskoeffizienten abzuraten. Somit kann auch, aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweigen, keine Korrelation zwischen Lastverzicht und Abrufdauer sowie Lasterhöhung und Abrufdauer festgestellt werden. Die Daten der unterschiedlichen Studien

weisen darauf hin, dass die Laständerung unabhängig von der Abrufdauer ist.

Nachfolgend wird der Zusammenhang zwischen der flexibilisierbaren Energie und der Laständerung untersucht (Abbildung 4.10). Hier kann sowohl für den Lastverzicht als auch für die Lasterhöhung eine starke Korrelation festgestellt werden. Dies bedeutet, dass die flexibilisierbare Energie mit zunehmenden Lastverzicht, als auch zunehmender Lasterhöhung, steigt.



**Abbildung 4.9.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig Metall



**Abbildung 4.10.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen flexibilisierbarer Energie und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

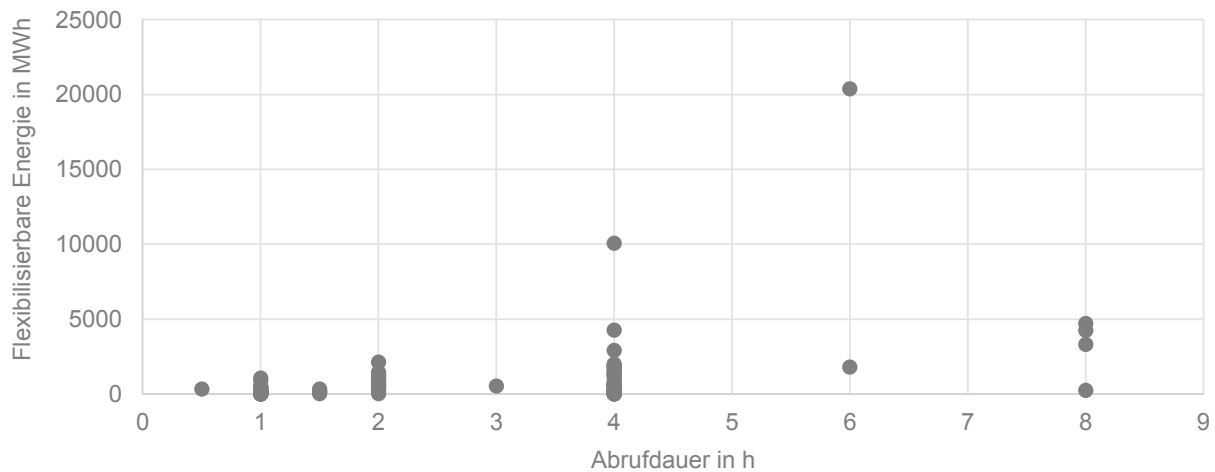
Bei Betrachtung der flexibilisierbaren Energie in Abhängigkeit der Abrufdauer lässt sich keine Korrelation feststellen, vgl. Abbildung 4.11. Dies bedeutet, dass die flexibilisierbare Energie nicht mit zunehmender Abrufdauer steigt. Daraus lässt sich ableiten, dass die flexibilisierbare Energie primär durch die Leistung dominiert wird und sekundär durch die Dauer der Laständerung. So kann unterstellt werden, dass es eher möglich ist, bei einer höheren Anzahl an Prozessen bzw. Anlagen den elektrischen Energieverbrauch zu verändern, als die Dauer dieser Veränderung zu erhöhen.

Bei Betrachtung der Pearson-Korrelationskoeffizienten, aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweigen, ergibt sich im Vergleich zu den oben erläuterten Zusammenhängen der branchenübergrei-

fenden Daten ein ähnliches Verhältnis zwischen der Leistung und der Abrufdauer, jeweils bezogen auf die flexibilisierbare Energie (Tabelle 4.3). Die Metallbranche (C.24) weist eine ebenso starke Korrelation wie die gesamten Daten der Ebene 4 auf. Dabei ist die Anzahl der ausgewiesenen Daten in Tabelle 4.3 für den Wirtschaftszweig Metall (C.24) lediglich ein Drittel der branchenübergreifenden Betrachtung mit 99 Datensätzen.

Somit kann eine Dominanz des Gesamtergebnisses durch die Metallbranche ausgeschlossen werden. Die hohe Korrelation der Gesamtdaten ergibt sich vielmehr aus der Kombination der einzelnen Datenpunkte, welche keinen linearen Zusammenhang zu den Teilmengen besitzt.

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen



**Abbildung 4.11.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

**Tabelle 4.3.:** Korrelationsanalyse von Flexibilisierbare Energie zu Laständerung und Abrufdauer aufgeschlüsselt nach Wirtschaftszweig

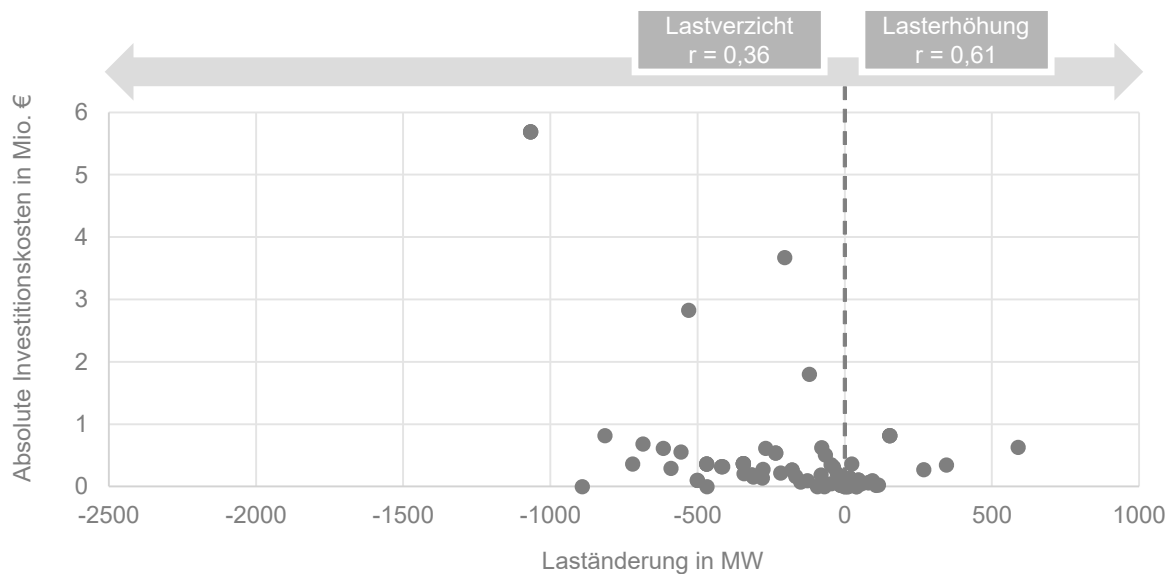
|        | E / P- | E / P+ | E / Δt |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| C.20   | -0,66  | 0,61   | 0,44   | <div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #90EE90; margin-right: 5px;"></div> Mittlere Korrelation:<br>$ r  > 0,6$<br><div style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008000; margin-right: 5px; margin-top: 5px;"></div> Hohe Korrelation:<br>$ r  > 0,8$ |
| C.23   | -0,78  | 0,37   | 0,49   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| C.17   | -0,69  | 0,73   | 0,58   | C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| C.24   | -0,96  | 0,99   | 0,45   | C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden                                                                                                                                                                                                                                             |
| Gesamt | -0,92  | 0,95   | 0,38   | C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|        |        |        |        | C.24: Metallerzeugung und -bearbeitung                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

#### 4.2.2. Kostenorientierte Analyse

Die kostenorientierte Analyse hat den Fokus auf den drei Kostenparametern Investitionskosten, variable Kosten und Fixkosten. Dabei werden jeweils die absoluten Kosten analysiert, vgl. Abschnitt 3.3.

Bei Betrachtung der absoluten Investitionskosten in Abhängigkeit der Laständerung lässt sich erkennen, dass der überwiegende Anteil unter dem Wert von einer Millionen Euro liegt (Abbildung 4.12). Einzelne hohe absolute Investitionskosten sind den Wirtschaftszweigen Glas (C.23)

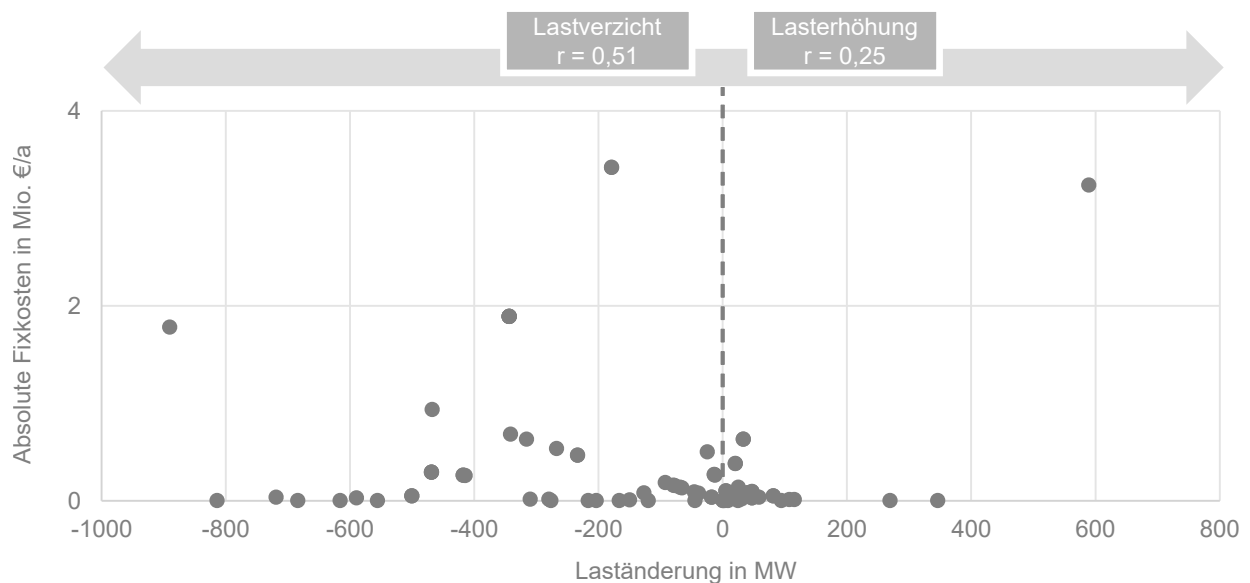
und Papier (C.17) zuzuordnen. Die Korrelation der absoluten Investitionskosten mit dem Lastverzicht ist bei einem Wert von 0,36 unspezifisch. Für die Lasterhöhung hingegen ergibt sich eine mittlere Korrelation zu 0,61. Die Ursache dieser – besonders beim Lastverzicht – hohen Streuung der absoluten Investitionskosten kann in den unterschiedlichen betrachteten Technologien der verschiedenen Wirtschaftszweige vermutet werden. Die Differenzierung in die einzelnen Wirtschaftszweige ist im Anhang in Abschnitt A.2 dargestellt. Dabei ist aufgrund der geringen Datenmenge in den einzelnen Wirtschaftszweigen eine fundierte Aussage nicht möglich.



**Abbildung 4.12.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten Investitionskosten und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

Nachfolgend wird der Zusammenhang zwischen den absoluten Fixkosten und der Laständerung untersucht (Abbildung 4.13). Die absoluten Fixkosten pro Jahr bleiben dabei bis auf zwei Ausreißer unter der Grenze von zwei Millionen Euro. Hierbei kann sowohl für den Lastverzicht als auch für die Lasterhöhung keine Korrelation festgestellt werden. Bei Vernachlässigung der Ausreißer zeigt

sich, dass die Hypothese, wonach mit zunehmender Laständerung die Fixkosten proportional steigen müssten, nicht bestätigt werden kann. Unter der Annahme einer proportional mit der Laständerung steigenden Vergütung, ist aus Sicht der Fixkosten einer möglichst hohen Laständerung den Vorzug zu geben.

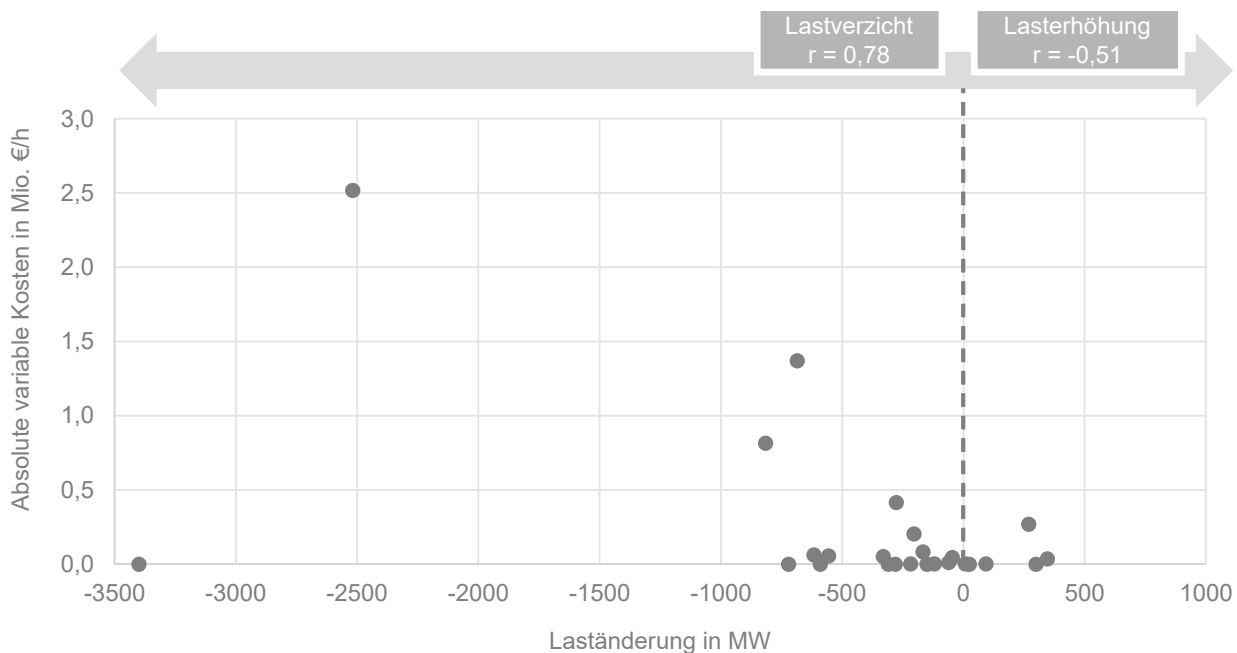


**Abbildung 4.13.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten Fixkosten pro Jahr und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

#### 4. Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen

Bei Betrachtung der absoluten variablen Kosten in Abhängigkeit der Laständerung lässt sich eine Korrelation hinsichtlich des Lastverzichts feststellen, vgl. Abbildung 4.14. Auf Seiten der Lasterhöhung ist diese Korrelation weniger stark ausgeprägt. Dies bedeutet, dass die absoluten variablen Kosten tendenziell mit einer zunehmenden Laständerung steigen. Aufgrund der bereits erwähnten geringen Anzahl der ausgewiesenen variablen Kosten sind hierbei weitere signifikante Aussagen nicht möglich.

Abschließend ist festzuhalten, dass in Abhängigkeit der Laständerung lediglich die absoluten variablen Kosten und die Investitionskosten eine Korrelation aufweisen. Eine Analyse der Kosten in Abhängigkeit der Abrufdauer bzw. der flexibilisierbaren Energie ist aufgrund einer zu geringen Datenbasis an dieser Stelle nicht sinnvoll.



**Abbildung 4.14.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen absoluten variablen Kosten und Laständerung für die Wirtschaftszweige des verarbeitenden Gewerbes

### 4.3. Wirtschaftliche Betrachtung

In Abschnitt 4.2.2 wurden die einzelnen ausgewiesenen Kosten betrachtet. Diese beziehen sich zum einen auf die Kosten der direkten Bereitstellung von energetischer Flexibilität, der jährlich anfallenden Fixkosten, und der einmalig zu tätigen Investitionskosten.

Ein Ansatz zur Kombination zu einer einzigen kostenausweisenden Kennzahl kann unter Einbeziehung der Abrufhäufigkeit und einer festen Nutzungsdauer (nach Abschreibungstabelle für allgemein verwendbare Anlagegüter, AfA-Tabelle) erfolgen. Mit dem Ziel alle spezifischen Kosten auf die einzelne Bereitstellung der energetischen Flexibilität zu beziehen, ergibt sich die Berechnung nach

$$K_{\text{ges}} = K_{\text{fix}}^s \cdot \frac{\Delta P_{\text{flex}}}{N_{\text{Abruf}}} + K_{\text{var}}^s \cdot \Delta P_{\text{flex}} \cdot \Delta t_{\text{Abruf}} + K_{\text{Inv}}^s \cdot \Delta P_{\text{flex}} \cdot \frac{1}{N_{\text{Nutzung}} \cdot N_{\text{Abruf}}} \quad (4.1)$$

mit den spezifischen Fixkosten  $K_{\text{fix}}^s$ , den spezifischen variablen Kosten  $K_{\text{var}}^s$  und den spezifischen Investitionskosten  $K_{\text{Inv}}^s$ . Diese werden mit der Laständerung  $\Delta P_{\text{flex}}$ , der Abrufdauer  $\Delta t_{\text{Abruf}}$ , der Abrufhäufigkeit  $N_{\text{Abruf}}$  und der Nutzungsdauer  $N_{\text{Nutzung}}$  verrechnet. Die dabei erforderlichen Annahmen sind die tatsächliche Durchführung der maximal möglichen Abrufhäufigkeit und eine lineare Abschreibung der Investitionsgüter.

Der Ansatz der auf die einzelne Durchführung umgelegten Kosten wurde bei den ausgewiesenen Daten angewandt. Dabei geben lediglich fünf Datensätze alle notwendigen Parameter an. Die ausgewiesenen Gesamtkosten spannen dabei einen Bereich von 650 € bis 3120 € pro Bereitstellung der energetischen Flexibilität auf. Jede weitere Analyse ist jedoch aufgrund der geringen Datenbasis nicht aussagekräftig.

### 4.4. Perspektive energetischer Flexibilität

Die quantifizierbaren Aussagen hinsichtlich Energieflexibilität der untersuchten Studien orientierten sich bei der Potenzialerhebung bis auf einzelne Ausnahmen an bereits in der Industrie eingesetzten Technologien. Dies zeigt sich insbesondere bei der Investitionskosten. Wie bereits erläutert, werden dabei fast ausschließlich die Erschließung bereits vorhandener Potenziale und nur in einem Fall die Weiterentwicklung der Prozesse bzw. Anlagen analysiert.

Sieben der untersuchten Studien prognostizieren die relative Entwicklung der Energieflexibilitätspotenziale. Die Aussagen basieren dabei auf Abschätzungen der technologischen Entwicklung bzw. auf Simulationsmodellen. In Tabelle 4.4 ist die erwartete Entwicklung der Flexibilitätspotenziale für die Jahre 2020, 2030 und 2050 dargestellt.

| Studie                      | 2020 | 2030 | 2050 |
|-----------------------------|------|------|------|
| (Pellinger u. Schmid 2016b) | ↓    | ↑    | ↓    |
| (Paulus u. Borggrefe 2010)  | ↓    | -    | -    |
| (VDE 2012)                  | →    | →    | -    |
| (Gruber u. a. 2013)         | ↑    | -    | -    |
| (Klobasa 2007)              | ↓    | -    | -    |
| (dena 2010)                 | →    | -    | -    |
| (UBA 2015)                  | ↑    | ↑    | -    |

**Tabelle 4.4.:** Prognosen ausgewählter Studien zu zukünftigen Flexibilitätspotenzialen

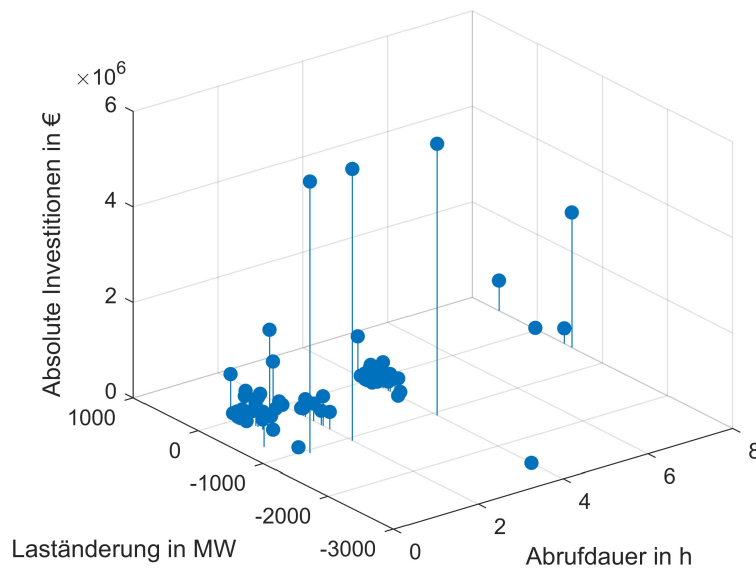
Als einzige von vier Studien macht (Pellinger u. Schmid 2016b) eine Angabe zur Perspektive im Jahr 2050. Darin wird erwartet, dass nach einer Steigerung der Potenziale zum Jahre 2030 diese wieder fallen werden. Anhand des Jahres 2020 ist ersichtlich, wie unterschiedlich die Prognosen für die nahe Zukunft sind. Die energetischen Flexibilitätspotenziale können steigen, fallen oder konstant bleiben, ohne dass eine mehrheitliche Tendenz in den Studien festzustellen ist.

## 4.5. Mehrdimensionale Darstellung von Energieflexibilität

Die Darstellung energetischer Flexibilität findet in den untersuchten Studien auf unterschiedliche Weise statt. Vorwiegend werden ausweisbare Daten in Tabellen explizit aufgelistet. Die graphische Darstellung wird meist durch Säulen- oder Balkendiagramme realisiert. Weiterhin werden vereinzelt zwei Parameter in Relation zueinander dargestellt. Für die gemeinsame Darstellung der drei in Abschnitt 2.3 erläuterten Dimensionen der Energieflexibilität bietet sich eine dreidimensionale Darstellung an. Diese kombiniert wie in Abbildung 4.15 dargestellt die Angaben zu Laständerung, Abrufdauer und den Kosten. In der Abbildung sind alle Daten der Datenebene 4<sup>1</sup> mit dem Kostenfaktor der absoluten Investitionskosten dargestellt.

Die Grafik enthält aufgrund der dritten Größe gegenüber zweidimensionalen Darstellungen einen Mehrwert. So ist beispielsweise bezüglich der Größe Abrufdauer eine Clusterung zu erkennen. Bezüglich der Größe Laständerung ist eine deutliche höhere Anzahl an Datenpunkten im Bereich negativer Laständerung (Lastverzicht) ersichtlich. Dies wurde bereits bei der eindimensionalen Analyse in Abschnitt 4.1 deutlich. Die Verteilung der absoluten Investitionskosten in Relation zur Laständerung und Abrufdauer zeigt, dass die höchsten absoluten Investitionskosten insbesondere im Bereich von -1000 MW Laständerung auftreten.

Die mehrdimensionale Darstellung der Flexibilitätspotenziale beschreibt den komplexen Potenzialraum der Energieflexibilität der deutschen Industrie und zeigt dabei sowohl bereits erschlossene Potenziale als auch Potenziallücken auf.



**Abbildung 4.15.:** Laständerung in Abhängigkeit der absoluten Investitionskosten und der Abrufdauer für das verarbeitende Gewerbe

<sup>1</sup> 155 Datensätze aus 13 Studien, die Daten bezüglich einzelner Wirtschaftszweige ausweisen

## 5. Fazit und Ausblick

---

Energieflexibilität in der Industrie ist ein wichtiger und zentraler Baustein, der zum Gelingen der Energiewende notwendig sein wird. Im Zuge der in dieser Metastudie durchgeführten Literaturrecherche und Relevanzanalyse konnte gezeigt werden, dass in den vorhandenen Studien quantifizierbare Daten hinsichtlich Energieflexibilität der deutschen Industrie vorhanden sind. Die Daten lassen sich in eine einheitliche Beschreibung von energetischer Flexibilität und deren Dimensionen einordnen. Aufgrund der Heterogenität in den Studien bezüglich des betrachteten Bilanzraumes und der Wirtschaftszweige ist eine Selektion der Daten anhand einheitlicher Kriterien erforderlich. In einem ersten Schritt wurden relevante Dimensionen für eine methodische Weiterentwicklung zur Darstellung von Energieflexibilität identifiziert und die entsprechenden Studien hinsichtlich dieser Dimensionen analysiert. Im zweiten Schritt wurden die Dimensionen zueinander in Beziehung gesetzt.

Mit Bezug auf die eindimensionale Analyse ist die übergreifende Betrachtung der Streuung der einzelnen Größen in den verschiedenen Wirtschaftszweigen von hoher Bedeutung. Hieraus ergeben sich Hinweise auf die Präzision der Datenerhebung. Die mehrdimensionale Analyse lässt sich in eine leistungsorientierte und eine kostenorientierte Betrachtung einteilen. Anhand der Zusammenhänge zwischen Laständerung, Abrufdauer und flexibilisierbarer Energie lassen sich Rückschlüsse auf die bisher verwendeten Methoden und Annahmen der Datenerhebung ziehen. Die Kostenparameter konnten aufgrund der geringen Datenbasis nur bezüglich der Abhängigkeit zur Lastveränderung untersucht werden. Durch die schrittweise Analyse konnte das in den Studien beschriebene energetische Flexibilitätspotenzial identifiziert, aufbereitet und ausgewertet werden.

Zur Einschätzung insbesondere der betriebswirtschaftlichen Hürden bei der Implementierung von Energieflexibilität sind die in den Studien ausgewiesenen Kosten ein erster Schritt. Dabei ist jedoch eine vollumfassende Beschreibung der Kosten energetischer Flexibilität nur bei einer geringen Anzahl von Datensätzen realisiert. Somit ist die Bildung eines durchführungsbezogenen Gesamtkostensatzes nicht möglich.

Da in den vorliegenden Studien nur die energieintensive Industrie analysiert wurde, existiert noch keine Datengrundlage für andere Wirtschaftszweige und deren mögliche Beiträge zur Flexibilität der industriellen Energienachfrage. Hierzu zählen vor allem Wirtschaftszweige, bei denen die einzelnen energetischen Verbraucher meist eine geringere elektrische Anschlussleistung haben, jedoch durch ihre hohe Anzahl einen entsprechenden Skaleneffekt und somit großen Stellhebel zur Erweiterung des energetischen Flexibilitätspotenzials erwarten lassen.

Neben dem Lastverzicht, der sich bei den bisherigen Untersuchungen als dominierend herausstellt, sollte auch die Lasterhöhung zur Bereitstellung von Energieflexibilität weiterentwickelt werden. Flexibilitätspotenziale werden aktuell primär im Bereich kleiner fünf Stunden gesehen. Neben der grundsätzlichen Entwicklung zusätzlicher Maßnahmen zur Vergrößerung der Flexibilitätsperspektive besteht daher scheinbar eine besondere Herausforderung in der Bereitstellung von energetischer Flexibilität im Bereich jenseits einer Dauer von fünf Stunden.



# Literaturverzeichnis

---

- [Agora Energiewende 2018] Agora Energiewende (Hrsg.): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2017: Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2018. [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung\\_2017/Agora\\_Jahresauswertung-2017.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Jahresauswertung_2017/Agora_Jahresauswertung-2017.pdf). Version:2018
- [Ammon u. a. 2014] Ammon, M. ; Leiss, A. ; Kleinschmidt, L. ; Schmickler, P. ; Graus, M. ; EuPD Research, DCTI Deutsches CleanTech Institut (Hrsg.): Studie zur Optimierung des Gesamtsystems der Flexibilitätsoptionen im Energiesektor in Sachsen-Anhalt unter besonderer Berücksichtigung von Speichern. [http://www.lee-lsa.de/uploads/media/EuPD\\_DCTI\\_Entwurf\\_Speicherstudie\\_26062014.pdf](http://www.lee-lsa.de/uploads/media/EuPD_DCTI_Entwurf_Speicherstudie_26062014.pdf). Version:2014
- [Apel u. a. 2012] Apel, R. ; Aundrup, T. ; Buchholz, B. M. ; Domels, H. P. ; Funke, S. ; Gesing, T. ; Glaunsinger, W. ; Gronstedt, P. ; Heins, F. ; Hösle, A. ; Knack, V. ; Küter, T. ; Stötzer, M. ; Struwe, C. ; Styczynski, Z. A. ; Schweven, A. von ; Seidl, H. ; Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V. (Hrsg.): Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Frankfurt am Main, 2012
- [BDEW 2011] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (Hrsg.) ; Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen (Hrsg.) ; CONSENTEC Consulting für Energiewirtschaft und -technik GmbH (Hrsg.): Bewertung der Flexibilitäten von Stromerzeugungs- und KWK-Anlagen. [http://www.consentec.de/wp-content/uploads/2011/12/Gutachten\\_Flexibilisierung\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.consentec.de/wp-content/uploads/2011/12/Gutachten_Flexibilisierung_Abschlussbericht.pdf). Version:2011
- [Berger u. a. 2011] Berger, H. ; Eisenhut, T. ; Polak, S. ; Hinterberger, R. ; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector: Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/e2050\\_pdf/reports/endbericht\\_201165\\_demand\\_response\\_potential\\_of\\_austrian\\_industrial\\_and\\_commerce\\_sector.pdf](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/e2050_pdf/reports/endbericht_201165_demand_response_potential_of_austrian_industrial_and_commerce_sector.pdf). Version:2011
- [BMBF 2016] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Kopernikus-Projekte. <https://www.kopernikus-projekte.de/>. Version:2016
- [BMJV 2017] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG): EnWG. [https://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/BJNR197010005.html](https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html). Version:2017
- [BMUB 2018] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Atomkraftwerke in Deutschland: Abschaltung der noch betriebenen Reaktoren gemäß Atomgesetz (AtG). <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland/>. Version:2018

- [BNetzA 2017] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hrsg.): Quartalsbericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen: Erstes Quartal 2017. [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Quartalsbericht\\_Q1\\_2017.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2017/Quartalsbericht_Q1_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=2). Version: 2017
- [Buber u. a. 2013a] Buber, T. ; Gruber, A. ; Klobasa, M. ; Roon, S. von: Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. 82 (2013), Nr. 3, 89–106. <http://dx.doi.org/10.3790/vjh.82.3.89>
- [Buber u. a. 2013b] Buber, T. ; Gruber, A. ; Roon, S. von ; Hüneke, M. ; Klobasa, M. ; Angerer, G. ; Schleich, J. ; Friedrichsen, N. ; Lüllmann, A. ; Agora Energiewende (Hrsg.): Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland: Zusammenfassung der Zwischenergebnisse einer Studie von Fraunhofer ISI und der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2012/Lastmanagement-als-Beitrag-zur-Versorgungssicherheit/Agora\\_Studie\\_Lastmanagement\\_Sueddeutschland\\_Endbericht\\_web.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2012/Lastmanagement-als-Beitrag-zur-Versorgungssicherheit/Agora_Studie_Lastmanagement_Sueddeutschland_Endbericht_web.pdf). Version: 2013
- [Büchter u. Henn 2007] Büchter, A. ; Henn, H.-W.: Mathematik für das Lehramt. Bd. vol. 9: *Elementare Stochastik: Eine Einführung in die Mathematik der Daten und des Zufalls*. 2., überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.] : Springer, 2007. – ISBN 978–3–540–45381–9
- [dena 2010] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025. [https://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Studien\\_\\_\\_Umfragen/Endbericht\\_dena-Netzstudie\\_II.PDF](https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF). Version: 2010
- [dena 2013a] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): Die Entwicklung der Märkte für Flexibilität in der Stromversorgung: dena Ergebnispapier. [https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/Whitepaper\\_2013-12-19\\_dena\\_Ergebnispapier\\_M%C3%A4rkte\\_f%C3%BCr\\_Flexibilit%C3%A4t.pdf](https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/Whitepaper_2013-12-19_dena_Ergebnispapier_M%C3%A4rkte_f%C3%BCr_Flexibilit%C3%A4t.pdf). Version: 2013
- [dena 2013b] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): Marktrollen und Prozesse beim Einsatz von flexiblen Stromlasten im Energiesystem: dena Ergebnispapier. [https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/Whitepaper\\_2013-12-19\\_dena\\_Ergebnispapier\\_M%C3%A4rkte\\_f%C3%BCr\\_Flexibilit%C3%A4t.pdf](https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Whitepapers/Whitepaper_2013-12-19_dena_Ergebnispapier_M%C3%A4rkte_f%C3%BCr_Flexibilit%C3%A4t.pdf). Version: 2013
- [dena 2014] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030: Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. [https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/esd/9094\\_dena-Studie\\_Systemdienstleistungen\\_2030.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9094_dena-Studie_Systemdienstleistungen_2030.pdf). Version: 2014
- [dena 2017] Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess: Zwischenfazit. [https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads\\_Dateien/esd/9214\\_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende\\_Zwischenfazit.pdf](https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9214_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende_Zwischenfazit.pdf). Version: 2017
- [Dyson u. a. 2014] Dyson, M. E. ; Borgeson, S. D. ; Tabone, M. D. ; Callaway, D. S.: Using smart meter data to estimate demand response potential, with application to solar energy integration. 73 (2014), 607–619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2014.05.053>

- [Elberg u. a. 2012] Elberg, C. ; Growitsch, C. ; Höffler, F. ; Richter, J.: Untersuchungen zu einem zukunftsfähigen Stromdesign: Endbericht. [http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/Studien/Politik\\_und\\_Gesellschaft/2012/EWI\\_Studie\\_Strommarktdesign\\_Endbericht\\_April\\_2012.pdf](http://www.ewi.uni-koeln.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Studien/Politik_und_Gesellschaft/2012/EWI_Studie_Strommarktdesign_Endbericht_April_2012.pdf). Version:2012
- [Elsner u. a. 2015] Elsner, P. (Hrsg.) ; Fishedick, M. (Hrsg.) ; Sauer, M. U. (Hrsg.) ; Sauer, D. U. (Hrsg.): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge: Analyse. München : acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V, 2015 (Energiesysteme der Zukunft). – ISBN 978–3–9817048–5–3
- [Faruqui u. a. 2010] Faruqui, A. ; Harris, D. ; Hledik, R.: Unlocking the €53 billion savings from smart meters in the EU: How increasing the adoption of dynamic tariffs could make or break the EU's smart grid investment. In: Energy Policy 38 (2010), Nr. 10, 6222–6231. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.010>. – ISSN 0301–4215
- [Fichtner u. a. 2012] Fichtner, W. ; Genoese, M. ; McKenna, R. ; Schäfer, S. ; Büchelmaier, A. ; Ringler, P. ; Cail, S. ; Ziegahn, F. ; Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.): Die Weiterentwicklung der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg bis 2025 unter Berücksichtigung der Liefer- und Preissicherheit: im Auftrag des Baden-Württembergischen Industrie- und Handelskammertags. [http://www.heilbronn.ihk.de/ximages/1429965\\_energiewir.pdf](http://www.heilbronn.ihk.de/ximages/1429965_energiewir.pdf). Version:2012
- [Focken u. Klobasa 2011] Focken, U. ; Klobasa, M. ; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor: Öffentlicher Abschlussbericht. <http://dx.doi.org/10.2314/GBV:726677981>. Version:2011
- [Frank u. a. 2016] Frank, P. ; Wunsch, M. ; Falkenberg, H. ; Grimm, V. ; Zöttl, G. ; Ambrosius, M. ; Rückel, B. ; Sölch, C.: Dezentralität und zellulare Optimierung - Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf. [https://www.fau.de/files/2016/10/Energiestudie\\_Studie.pdf](https://www.fau.de/files/2016/10/Energiestudie_Studie.pdf). Version:2016
- [Frontier Economics Europe 2014] Frontier Economics Europe (Hrsg.): Strommarkt in Deutschland - Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit? Bericht für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/strommarkt-in-deutschland-gewaehrleistung-das-derzeitige-marktdesign-versorgungssicherheit.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/strommarkt-in-deutschland-gewaehrleistung-das-derzeitige-marktdesign-versorgungssicherheit.pdf?__blob=publicationFile&v=5). Version:2014
- [Gils 2014] Gils, H. C.: Assessment of the theoretical demand response potential in Europe. 67 (2014), 1–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.019>
- [Gils 2015] Gils, H. C.: Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage. Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss., 2015. <http://dx.doi.org/10.18419/opus-6888>
- [Gils 2016] Gils, H. C.: Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study. In: Applied Energy 162 (2016), 401–415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.083>. – ISSN 0306–2619
- [Graßl 2015] Graßl, M.: Forschungsberichte IWB. Bd. 300: *Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion: Dissertation*. München : Utz, 2015. – ISBN 978–3–8316–4476–6

- [Gruber u. a. 2015] Gruber, A. ; Biedermann, F. ; Roon, S. von: Industrielles Power-to-Heat Potenzial. [https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/517\\_iewt15\\_ag\\_p2h\\_ind/FfE\\_AG\\_ind\\_p2h\\_potenzial\\_IEWT2015\\_lang.pdf](https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/517_iewt15_ag_p2h_ind/FfE_AG_ind_p2h_potenzial_IEWT2015_lang.pdf). Version:2015
- [Gruber u. a. 2016] Gruber, A. ; Roon, S. von ; Fattler ; Steffen: Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern. [https://www.ffegmbh.de/images/stories/Berichte/456\\_dsm-in-bayern/160809\\_Wissenschaftliche\\_Projektbegleitung\\_DSM-Bayern\\_final.pdf](https://www.ffegmbh.de/images/stories/Berichte/456_dsm-in-bayern/160809_Wissenschaftliche_Projektbegleitung_DSM-Bayern_final.pdf). Version:2016
- [Gruber u. a. 2013] Gruber, A. ; Roon, S. von ; Peraus, S. ; Buber, T. ; Gobmaier, T.: Lastflexibilisierungspotenziale industrieller Querschnittstechnologien unter Berücksichtigung zunehmender Energieeffizienz. [https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/330\\_IEWT\\_lastflexibilisierung/langfassung\\_iewt\\_lastflexibilisierung.pdf](https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/330_IEWT_lastflexibilisierung/langfassung_iewt_lastflexibilisierung.pdf). Version:2013
- [Gutschi u. Stigler 2008] Gutschi, C. ; Stigler, H. ; Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation, TU Graz (Hrsg.): Potenziale und Hemmnisse für Power Demand Side Management in Österreich. [https://online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getvolltext?pCurrPk=35775](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=35775). Version:2008
- [Heide u. a. 2010] Heide, D. ; Bremen, L. von ; Greiner, M. ; Hoffmann, C. ; Speckmann, M. ; Bofinger, S.: Seasonal optimal mix of wind and solar power in a future, highly renewable Europe. In: Renewable Energy 35 (2010), Nr. 11, 2483–2489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.03.012>
- [International Energy Agency 2014] International Energy Agency (Hrsg.): The power of transformation: Wind, sun and the economics of flexible power systems. Paris : OECD Publishing, 2014. – ISBN 9789264208032
- [Klobasa 2007] Klobasa, M.: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2007
- [Klobasa u. Erge 2009] Klobasa, M. ; Erge, T.: Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement: Endbericht. <https://www.wind-last.de/downloads/Endbericht-Wind-Last-ISI-2009.pdf>. Version:2009
- [Krzikalla u. a. 2013] Krzikalla, N. ; Achner, S. ; Brühl, S.: Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien: Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. <https://www.wind-last.de/downloads/Endbericht-Wind-Last-ISI-2009.pdf>. Version:2013
- [Langrock 2014] Langrock, T.: Potential der Laststeuerung. [https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Pr%C3%A4sentationen/Hannover\\_Messe\\_2014/20140409\\_Potential\\_der\\_Laststeuerung\\_Thomas\\_Langrock.pdf](https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Pr%C3%A4sentationen/Hannover_Messe_2014/20140409_Potential_der_Laststeuerung_Thomas_Langrock.pdf). Version:2014 (Forum Erneuerbare Energien, Hannover Messe)
- [Langrock u. a. 2016] Langrock, T. ; Brühl, S. ; Michels, A. ; El-Bahay, A. ; Litzenburger, J. ; Schindler, J. ; EnergieAgentur.NRW (Hrsg.): Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. <https://www.bet-energie.de/uploads/media/Lastenmanagement-NRW.pdf>. Version:2016
- [Mcgill u. a. 1978] McGill, R. ; Tukey, J. W. ; Larsen, W. A.: Variations of Box Plots. In: The American Statistician 32 (1978), Nr. 1, S. 12–16. <http://dx.doi.org/10.1080/00031305.1978.10479236>. – ISSN 0003–1305

- [Nabe 2016] Nabe, C. ; Agora Energiewende (Hrsg.): Flex-Efficiency: Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. [https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Flex-Efficiency/Agora\\_Flex-Efficiency\\_WEB.pdf](https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2015/Flex-Efficiency/Agora_Flex-Efficiency_WEB.pdf). Version:2016
- [Nabe u. a. 2011] Nabe, C. ; Hasche, B. ; Offermann, M. ; Papaefthymiou, G. ; Seefeldt, F. ; Thamling, N. ; Dziomba, H.: Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien: BMWi Vorhaben Nr. 50/10. [https://www.ecofys.com/files/files/ecofys\\_2011\\_potenziale\\_der\\_waermepumpe.pdf](https://www.ecofys.com/files/files/ecofys_2011_potenziale_der_waermepumpe.pdf). Version:2011
- [Papaefthymiou u.a. 2014] Papaefthymiou, G. ; Grave, K. ; Dragoon, K. ; Ecofys Germany GmbH (Hrsg.): Flexibility options in electricity systems. <https://www.ecofys.com/files/files/ecofys-eci-2014-flexibility-options-in-electricity-systems.pdf>. Version:2014
- [Paulus u. Borggreffe 2010] Paulus, M. ; Borggreffe, F.: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.017>. Version:2010
- [Pellinger u. Schmid 2016a] Pellinger, C. ; Schmid, T.: Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030: Teil 1: Hauptbericht. 2016. – ISBN 978–3–941802–31–5
- [Pellinger u. Schmid 2016b] Pellinger, C. ; Schmid, T.: Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030: Teil 2: Technoökonomische Analyse funktionaler Energiespeicher. 2016. – ISBN 978–3–941802–32–2
- [Raquet u. Liotta 2013] Raquet, C. ; Liotta, G.: Datenübertragungstechnologien in Smart Metering und Smart Grids. In: Aichele, C. (Hrsg.) ; Doleski, O. D. (Hrsg.): Smart Meter Rollout. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 978–3–8348–2439–4, S. 389–402
- [Reinhart u. a. 2014] Reinhart, G. ; Graßl, M. ; Datzmann, S.: Methode zur Bewertung der Energieflexibilität. In: wt Werkstattstechnik online 104 (2014), Nr. 5. [https://www.werkstattstechnik.de/wt/get\\_article.php?data\[article\\_id\]=78898](https://www.werkstattstechnik.de/wt/get_article.php?data[article_id]=78898). – ISSN 1436–4980
- [von Roon u. Gobmaier 2010] Roon, S. von ; Gobmaier, T.: Demand Response in der Industrie: Status und Potenziale in Deutschland. München : FfE Forschungsstelle für Energiewirtschaft, 2010. – ISBN 978–3–941802–21–6
- [Schmidthaler u.a. 2014] Schmidthaler, M. ; Andrea, K. ; Steinmüller, H. ; Frank, F. ; Rebhandl, L. ; Elbe, C. ; Schmutzner, E. ; Kraussler, A. ; Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.): Loadshift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids: Lastverschiebung in der Industrie. [https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/e2050\\_pdf/reports/endbericht\\_201507e\\_loadshift\\_industrie.pdf](https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/e2050_pdf/reports/endbericht_201507e_loadshift_industrie.pdf). Version:2014 (Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids)
- [Scholz u. a. 2014] Scholz, Y. ; Gils, H. C. ; Pregger T. ; Heide D. ; Cebulla F. ; Cao, K. K. ; Hess, D. ; Borggreffe, F. ; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.): Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung: Schlussbericht-BMWI - FKZ 0328009. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/792483081.pdf>. Version:2014

- [Schulz u. Brandstätt 2013] Schulz, W. ; Brandstätt, C.: Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE), Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (AGFW), 2013. – ISBN 978–3–920328–66–9
- [SEDC 2015] Smart Energy Demand Coalition (Hrsg.): Mapping Demand Response in Europe Today: 2015. <http://www.smartenergy.eu/wp-content/uploads/2015/09/Mapping-Demand-Response-in-Europe-Today-2015.pdf>. Version:2015
- [Statistisches Bundesamt 2008] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen: Ausgabe 2008: Mit Erläuterungen. [https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008\\_erl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftsklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile). Version:2008
- [Stede 2016] Stede, J.: Demand Response in Germany: Technical Potential, Benefits and Regulatory Challenges. [http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw\\_01.c.532827.de/DIW-Roundup\\_96\\_en.pdf](http://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.532827.de/DIW-Roundup_96_en.pdf). Version:2016
- [Steurer 2017] Steurer, M.: Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2017
- [Steurer u. a. 2015] Steurer, M. ; Klemp, N. ; Hufendiek, K. ; Baumgart, B. ; Steinhausen, B.: Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland: MANAGEMENT SUMMARY. [http://www.ier.uni-stuttgart.de/img/pdf\\_link/DSI\\_Summary.pdf](http://www.ier.uni-stuttgart.de/img/pdf_link/DSI_Summary.pdf). Version:2015
- [Stötzer u. a. 2015] Stötzer, M. ; Hauer, I. ; Richter, M. ; Styczynski, Z. A.: Potential of demand side integration to maximize use of renewable energy sources in Germany. In: Applied Energy 146 (2015), 344–352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.015>. – ISSN 0306–2619
- [Strbac 2008] Strbac, G.: Demand side management: Benefits and challenges. In: Energy Policy 36 (2008), Nr. 12, 4419–4426. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.030>. – ISSN 0301–4215
- [UBA 2015] Umweltbundesamt (Hrsg.): Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate\\_change\\_19\\_2015\\_potentiale\\_regelbarer\\_lasten.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_19_2015_potentiale_regelbarer_lasten.pdf). Version:2015 (Climate Change)
- [United Nations 2015] United Nations (Hrsg.): UN Climate Change Conference Paris 2015. <http://www.un.org/sustainabledevelopment/cop21/>. Version:2015
- [VDE 2012] Verband der Elektrotechnik (Hrsg.): Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland: Gesamttext. Frankfurt am Main, 2012
- [Weckmann u. Eisenhauer 2017] Weckmann, S. ; Eisenhauer, S.: SynErgie - Glossar: Einheitliche und clusterübergreifende Definition von Begrifflichkeiten im Kontext der Energieflexibilität. 2017

# A.Anhang

## A.1. Auflistung der untersuchten Studien

**Tabelle A.1.:** Liste der identifizierten Studien zum Thema *Energieflexibilität* 1 von 4

| Nr.: | Titel                                                                                                                                                                     | Kurzbeleg                   | Bilanzraum  | Leistung | Zeit | Kosten<br>(Investitionen,<br>Fix, Variabel) |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|----------|------|---------------------------------------------|
| 1    | Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten | (Klobasa 2007)              | Deutschland | ●        | ●    |                                             |
| 2    | dena-Netzstudie II                                                                                                                                                        | (dena 2010)                 | Deutschland | ●        | ●    | I,F,V                                       |
| 3    | Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor                                                        | (Focken u. Klobasa 2011)    | Deutschland | ●        |      | V                                           |
| 4    | The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany                                                                 | (Paulus u. Borggreffe 2010) | Deutschland | ●        | ●    | I,F,V                                       |
| 5    | Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland                                                                                                       | (VDE 2012)                  | Deutschland | ●        | ●    | I                                           |
| 6    | Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast                                                                                               | (Buber u. a. 2013b)         | Deutschland | ●        | ●    |                                             |
| 7    | Lastflexibilisierungspotenziale industrieller Querschnittstechnologien unter Berücksichtigung zunehmender Energieeffizienz                                                | (Gruber u. a. 2013)         | Deutschland | ●        |      |                                             |
| 8    | Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge                                                                        | (Elsner u. a. 2015a)        | Deutschland | ●        | ●    | V                                           |

**Tabelle A.2.: Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 2 von 4**

| Nr.: | Titel                                                                                                                                                                      | Kurzbeleg                   | Bilanzraum            | Leistung | Zeit | Kosten<br>(Investitionen,<br>Fix, Variabel) |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------|------|---------------------------------------------|
| 9    | Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland                                                    | (Steurer u. a. 2015)        | Deutschland           | ●        |      |                                             |
| 10   | Potenziale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien                                                                 | (UBA 2015)                  | Deutschland           | ●        | ●    | I,F,V                                       |
| 11   | Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern                                                                                                               | (Gruber u. a. 2016)         | Einzelne Bundesländer | ●        | ●    |                                             |
| 12   | Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030, Teil 2: Technoökonomische Analyse funktionaler Energiespeicher                                  | (Pellinger u. Schmid 2016b) | Deutschland           | ●        | ●    | I,F,V                                       |
| 13   | Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study                                                                                | (Gils 2016)                 | Deutschland           | ●        | ●    | I,V                                         |
| 14   | Demand Response in Germany: Technical Potential, Benefits and Regulatory Challenges                                                                                        | (Stede 2016)                | Deutschland           | ●        |      | I,F,V                                       |
| 15   | Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen:                                                                                                                                     | (Langrock u. a. 2016)       | Einzelne Bundesländer | ●        | ●    | I,F,V                                       |
| 16   | Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung                                                                | (Steurer u. Hufendiek 2017) | Deutschland           | ●        | ●    | I,F                                         |
| 17   | Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland                                                                                            | (Buber u. a. 2013a)         | Europa                | ●        | ●    |                                             |
| 18   | Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector                                                                                                   | (Berger u. a. 2011)         | Österreich            | ●        | ●    | I,V                                         |
| 19   | Loadshift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids                                                  | (Schmidthaler u. a. 2014)   | Österreich            | ●        |      | V                                           |
| 20   | Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung | (Scholz u. a. 2014)         | Einzelne Bundesländer | ●        | ●    |                                             |

**Tabelle A.3.: Liste der identifizierten Studien zum Thema Energieflexibilität 3 von 4**

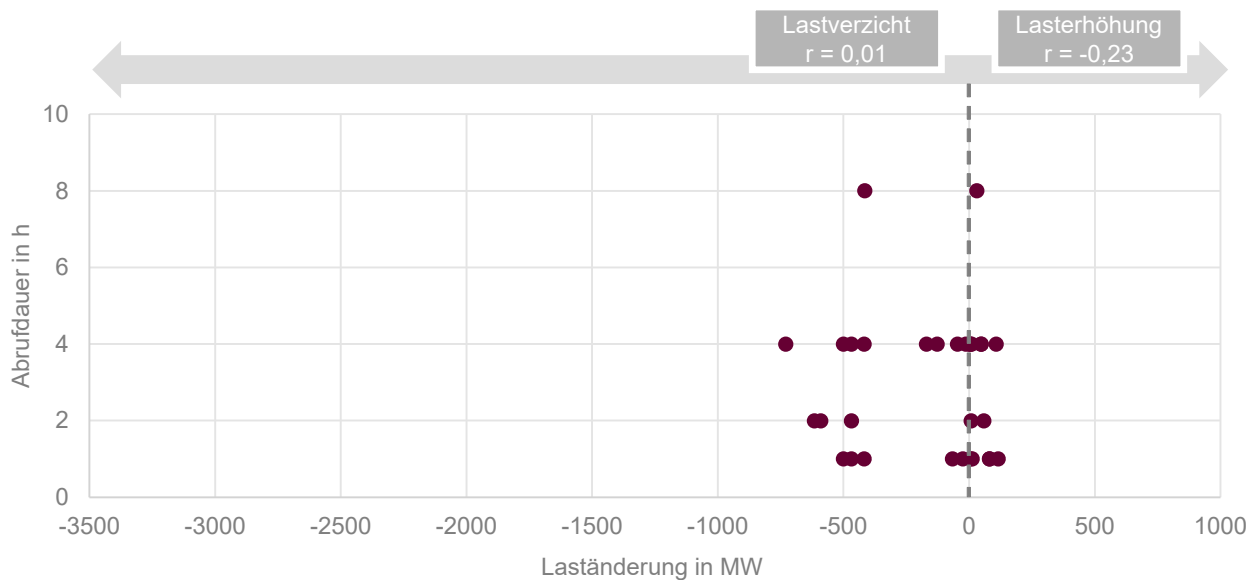
| Nr.: | Titel                                                                                                                                                 | Kurzbeleg                    | Bilanzraum | Leistung | Zeit | Kosten<br>(Investitionen,<br>Fix, Variabel) |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------|----------|------|---------------------------------------------|
| 21   | Potenziale und Hemmnisse für Power Demand Side Management in Österreich                                                                               | (Gutschi u. Stigler 2008)    |            |          |      |                                             |
| 22   | Demand side management                                                                                                                                | (Strbac 2008)                |            |          |      |                                             |
| 23   | Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement                                                         | (Klobasa u. Erge 2009)       |            |          |      |                                             |
| 24   | Demand Response in der Industrie                                                                                                                      | (von Roon u. Gobmaier 2010 ) |            |          |      |                                             |
| 26   | Bewertung der Flexibilität von Stromerzeugungs- und KWK-Anlagen                                                                                       | (BDEW 2011)                  |            |          |      |                                             |
| 27   | Potenziale der Wärmepumpe zum Lastmanagement im Strom und zur Netzintegration erneuerbarer Energien                                                   | (Nabe u. a. 2011)            |            |          |      |                                             |
| 28   | Untersuchungen zu einem zukunftsfähigen Stromdesign                                                                                                   | (Elberg u. a. 2012)          |            |          |      |                                             |
| 29   | Die Weiterentwicklung der Energiewirtschaft in Baden-Württemberg bis 2025 unter Berücksichtigung der Liefer- und Preissicherheit                      | (Fichtner u. a. 2012)        |            |          |      |                                             |
| 30   | Die Entwicklung der Märkte für Flexibilität in der Stromversorgung                                                                                    | (dena 2013a)                 |            |          |      |                                             |
| 31   | Marktrollen und Prozesse beim Einsatz von flexiblen Stromlasten im Energiesystem                                                                      | (dena 2013b)                 |            |          |      |                                             |
| 32   | Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien                                                                    | (Krzikalla u. a. 2013)       |            |          |      |                                             |
| 33   | Flexibilitätsreserven aus dem Wärmemarkt                                                                                                              | (Schulz u. Brandstät 2013)   |            |          |      |                                             |
| 34   | Studie zur Optimierung des Gesamtsystems der Flexibilitätsoptionen im Energiesektor in Sachsen-Anhalt unter besonderer Berücksichtigung von Speichern | (Ammon u. a. 2014)           |            |          |      |                                             |
| 35   | dena-Studie Systemdienstleistungen 2030: Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien                  | (dena 2014)                  |            |          |      |                                             |

**Tabelle A.4.:** Liste der identifizierten Studien zum Thema *Energieflexibilität* 4 von 4

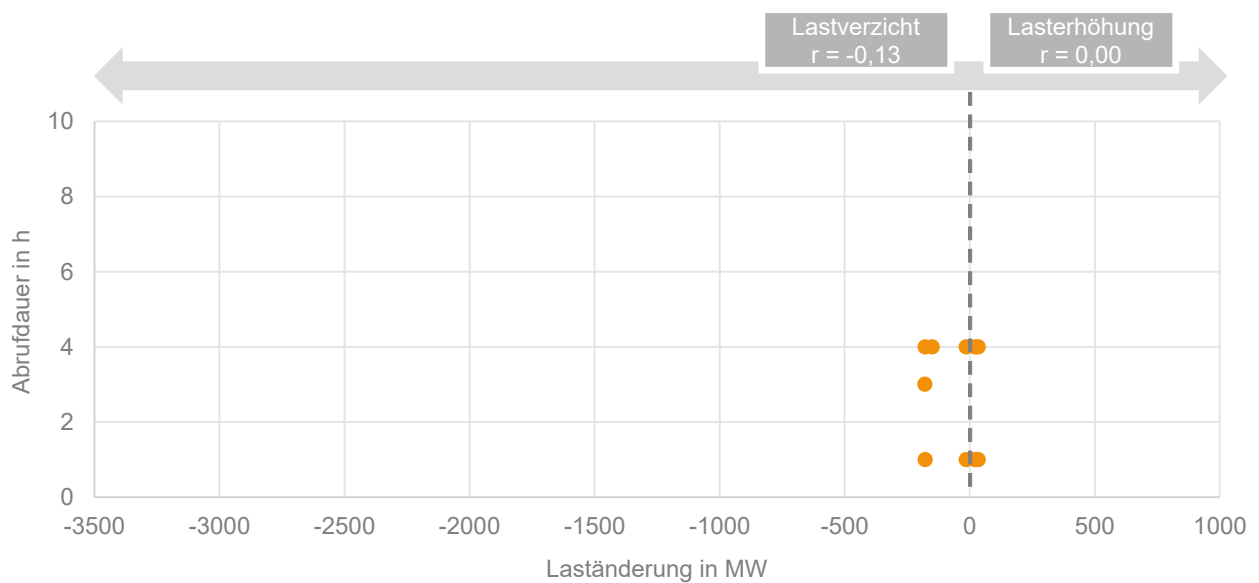
| Nr.: | Titel                                                                                                      | Kurzbeleg                        | Bilanzraum | Leistung | Zeit | Kosten<br>(Investitionen,<br>Fix, Variabel) |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------|----------|------|---------------------------------------------|
| 36   | Using smart meter data to estimate demand response potential, with application to solar energy integration | (Dyson u. a. 2014)               |            |          |      |                                             |
| 37   | Strommarkt in Deutschland - Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?                | (Frontier Economics Europe 2014) |            |          |      |                                             |
| 38   | Assessment of the theoretical demand response potential in Europe                                          | (Gils 2014)                      |            |          |      |                                             |
| 39   | The power of transformation                                                                                | (IEA 2014)                       |            |          |      |                                             |
| 40   | Flexibility options in electricity systems                                                                 | (Papaefthymiou u. a. 2014)       |            |          |      |                                             |
| 41   | Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage         | (Gils 2015)                      |            |          |      |                                             |
| 42   | Industrielles Power-to-Heat Potenzial                                                                      | (Gruber u. a. 2015)              |            |          |      |                                             |
| 43   | Mapping Demand Response in Europe Today                                                                    | (SEDC 2015)                      |            |          |      |                                             |
| 44   | Potential of demand side integration to maximize use of renewable energy sources in Germany                | (Stötzer u. a. 2015)             |            |          |      |                                             |
| 45   | Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung 2030, Teil 1: Hauptbericht                    | (Pellinger u. Schmid 2016a)      |            |          |      |                                             |
| 46   | Dezentralität und zellulare Optimierung - Auswirkungen auf den Netzausbaubedarf                            | (Frank u. a. 2016)               |            |          |      |                                             |
| 47   | Flex-Efficiency. Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern | (Nabe 2016)                      |            |          |      |                                             |

## A.2. Einzelauswertungen nach Wirtschaftszweigen

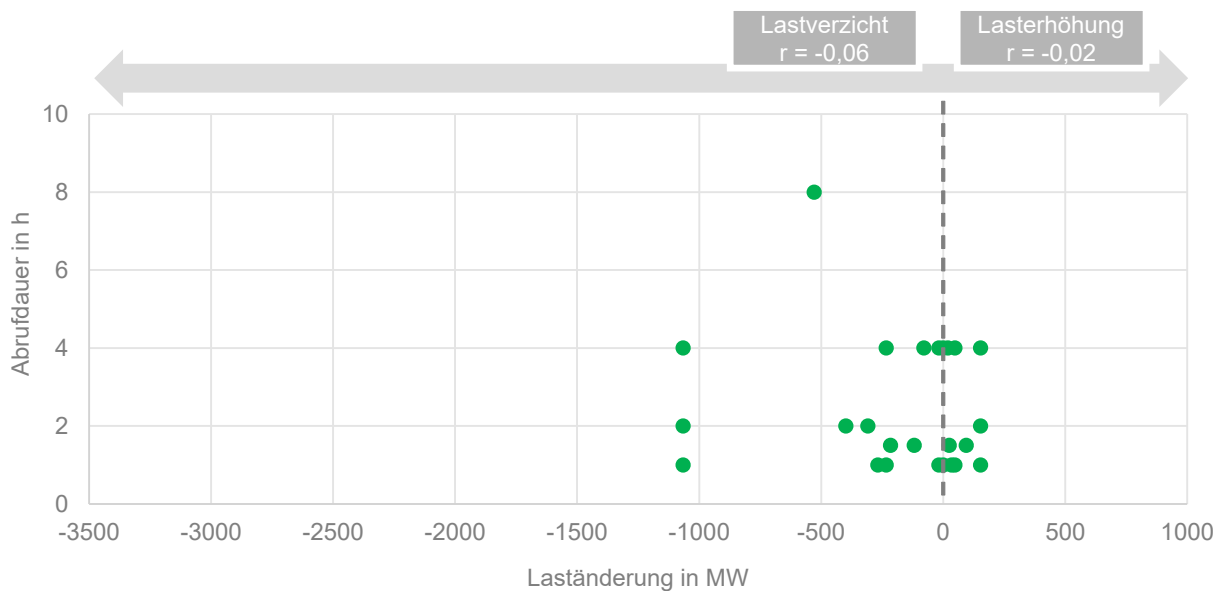
### A.2.1. Laständerung zu Abrufdauer auf Ebene 4



**Abbildung A.1.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.20 Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 4 Studien

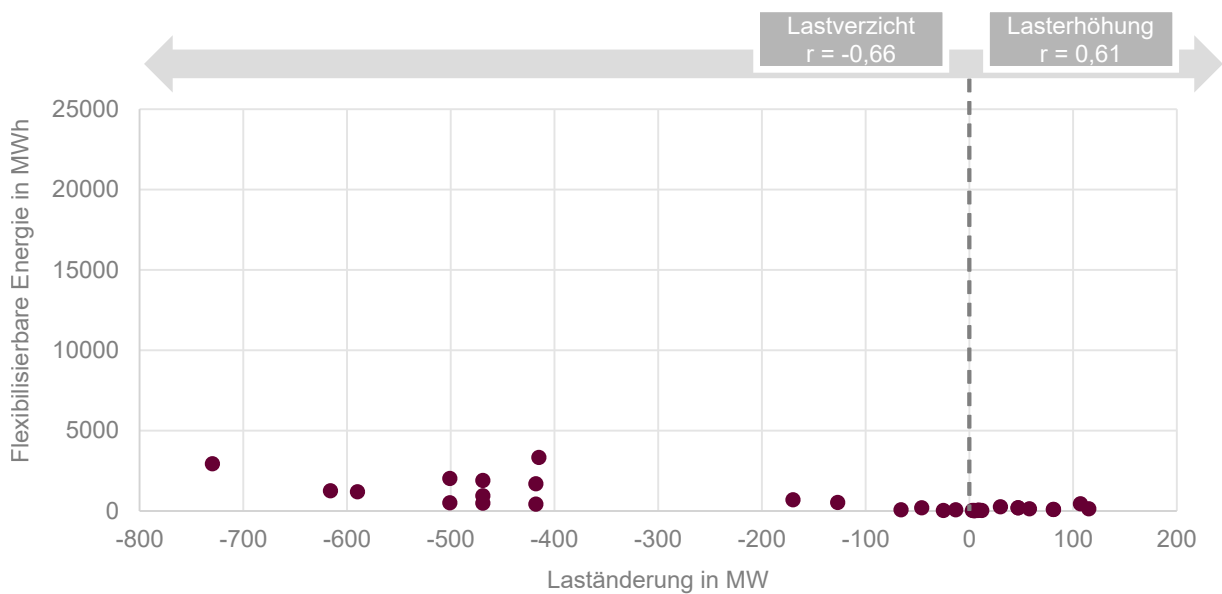


**Abbildung A.2.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.23 Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien

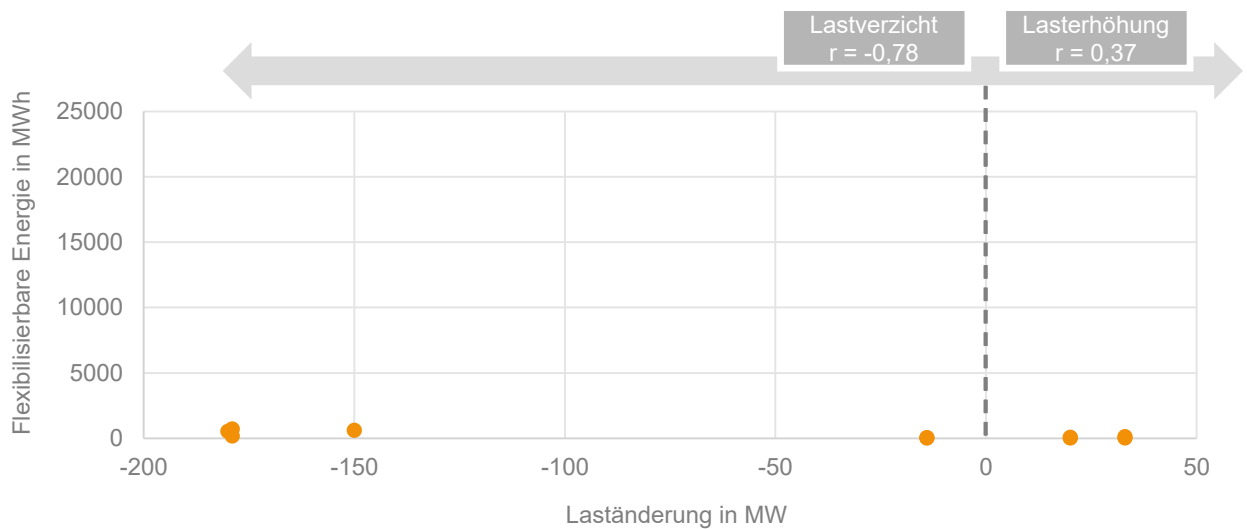


**Abbildung A.3.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und Abrufdauer für den Wirtschaftszweig C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien

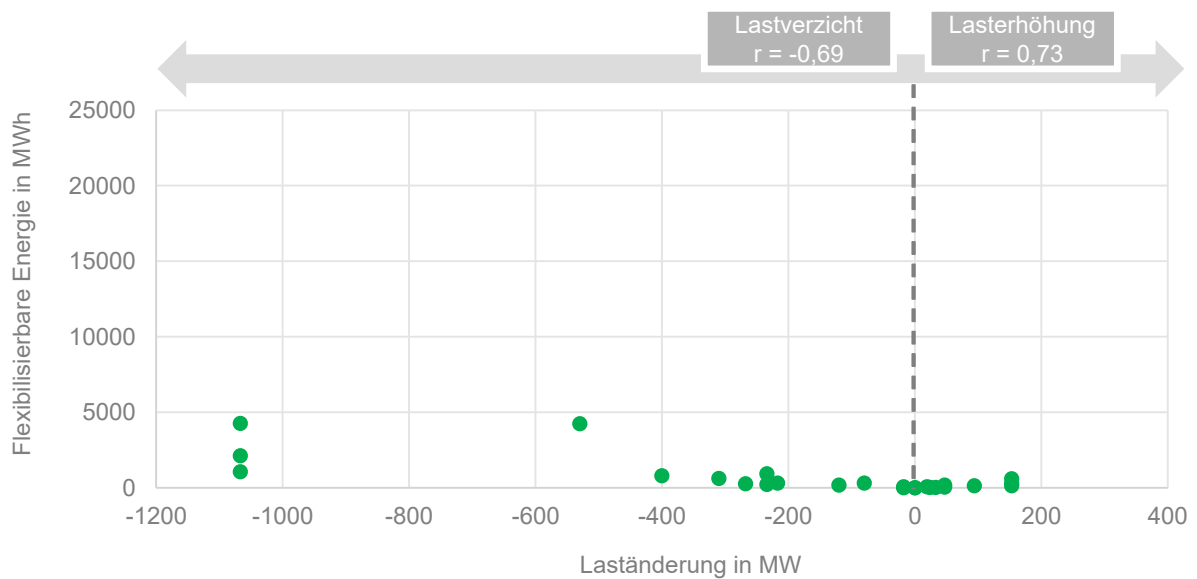
#### A.2.2. Flexibilisierbare Energie zu Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



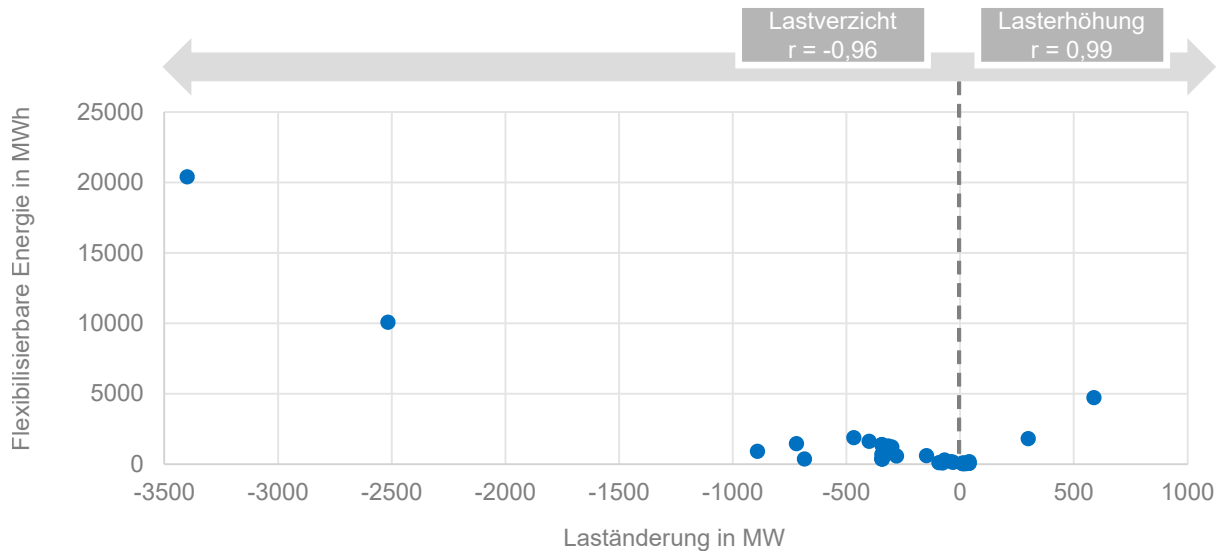
**Abbildung A.4.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien



**Abbildung A.5.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien

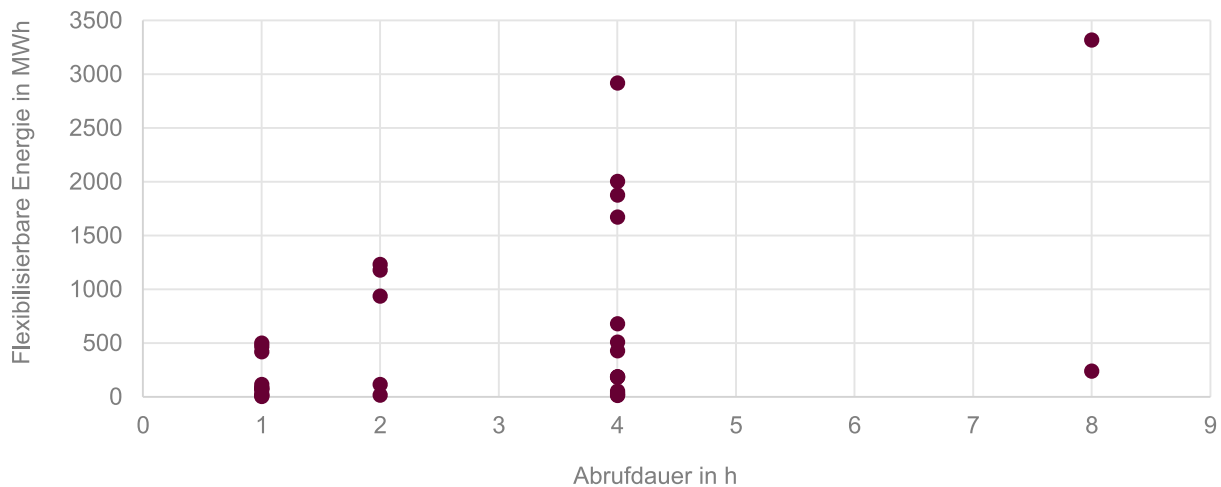


**Abbildung A.6.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien

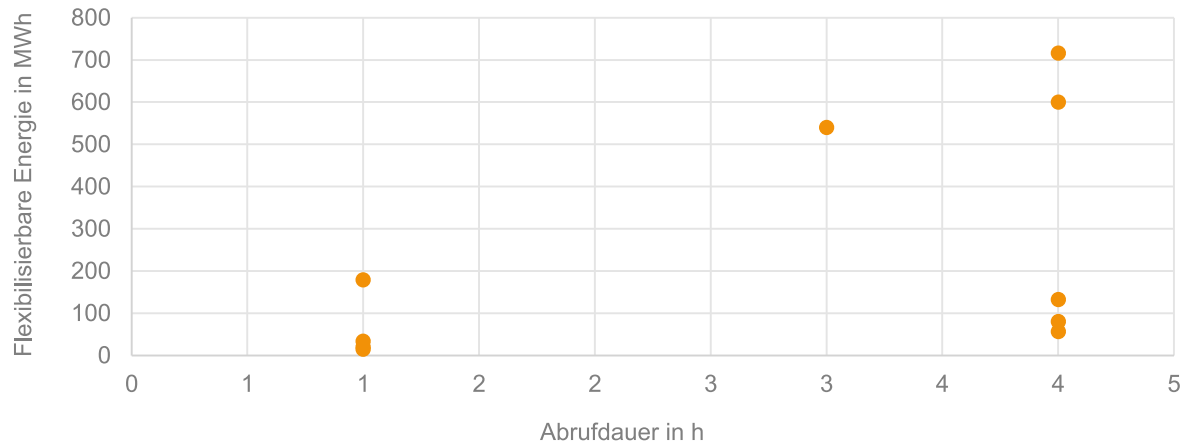


**Abbildung A.7.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Laständerung eines Wirtschaftszweigs auf Ebene C.24: Metallherzeugung und -bearbeitung, 33 Datenpunkte aus 8 Studien

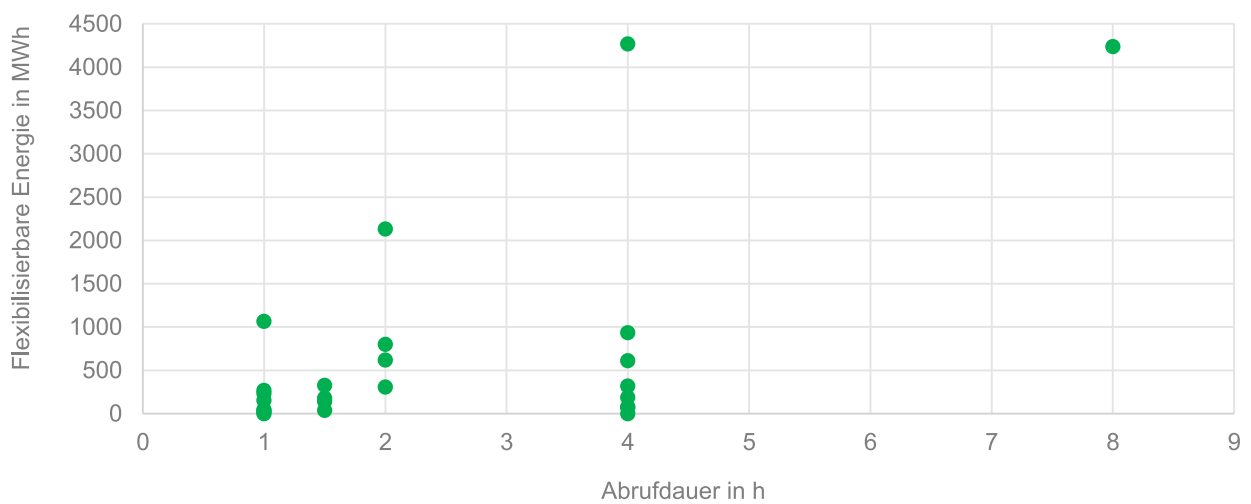
#### A.2.3. Flexibilisierbare Energie zu Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



**Abbildung A.8.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien

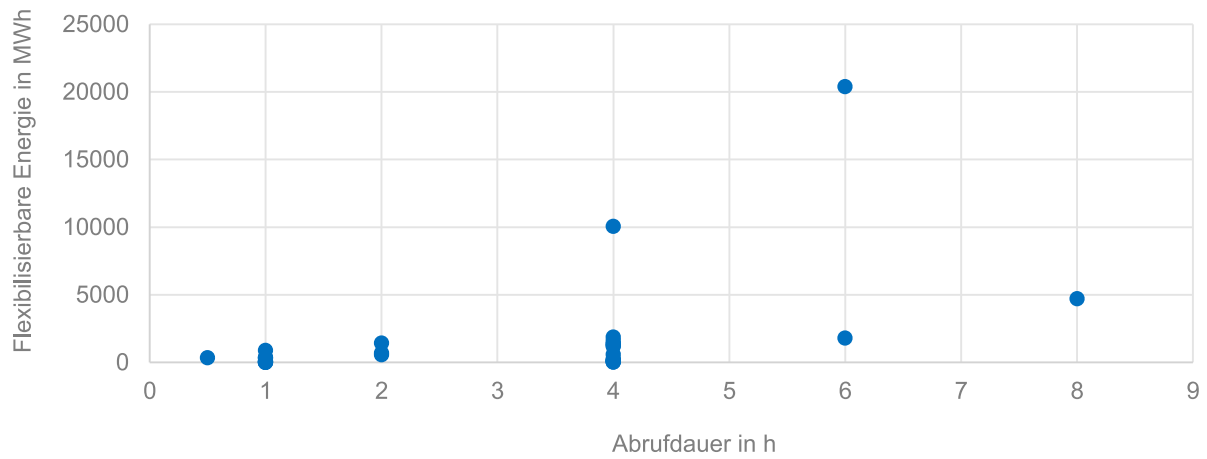


**Abbildung A.9.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 44 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 10 Datenpunkte aus 3 Studien



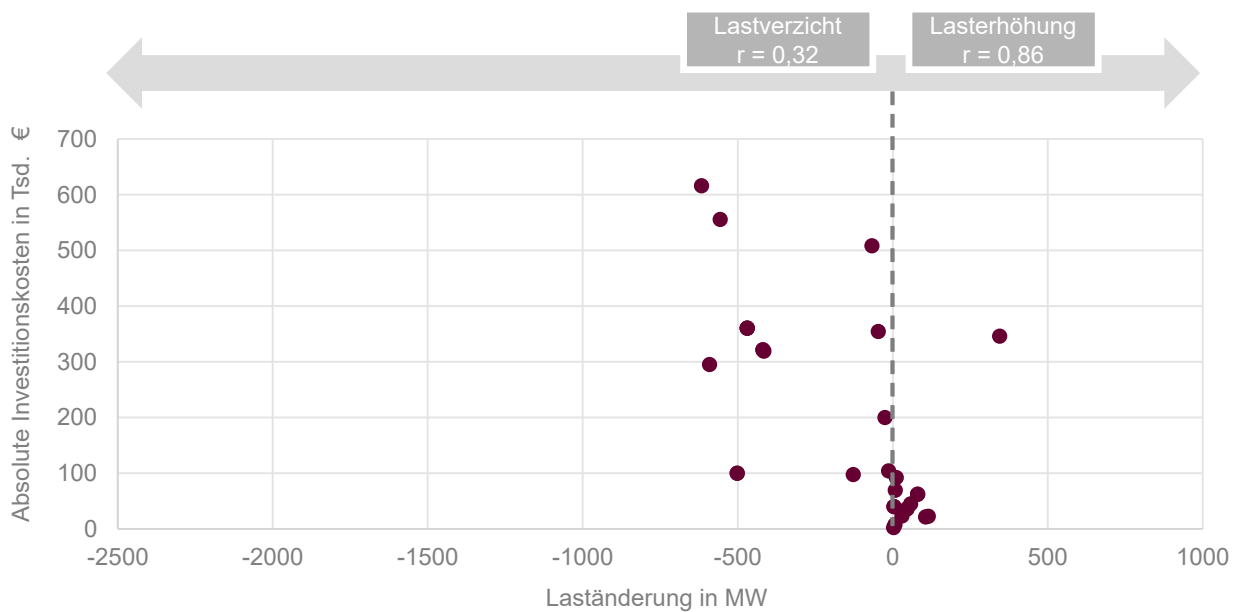
**Abbildung A.10.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 25 Datenpunkte aus 6 Studien

## A. Anhang

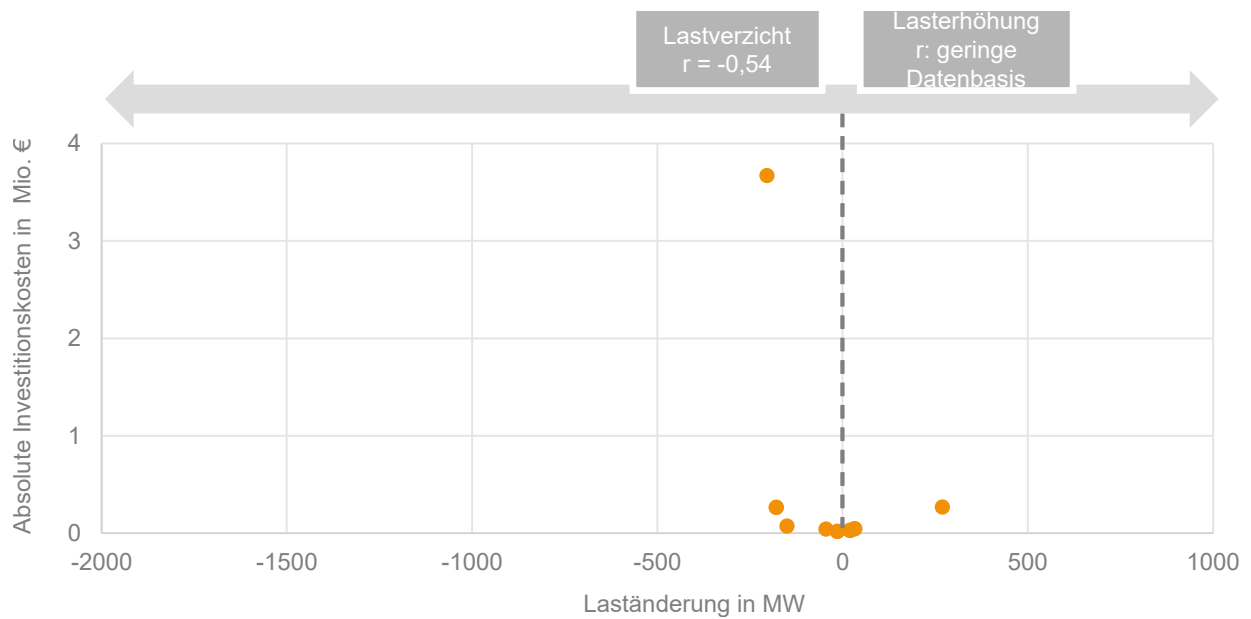


**Abbildung A.11.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Flexibilisierbarer Energie und Abrufdauer eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 33 Datenpunkte aus 8 Studien

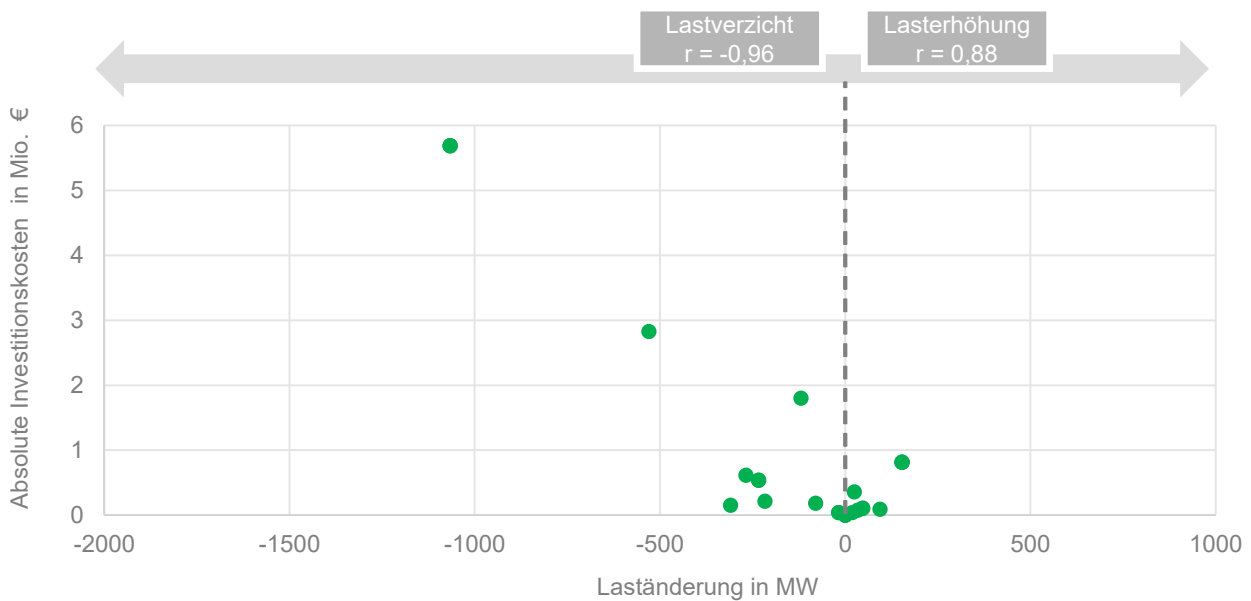
### A.2.4. Laständerung zu absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



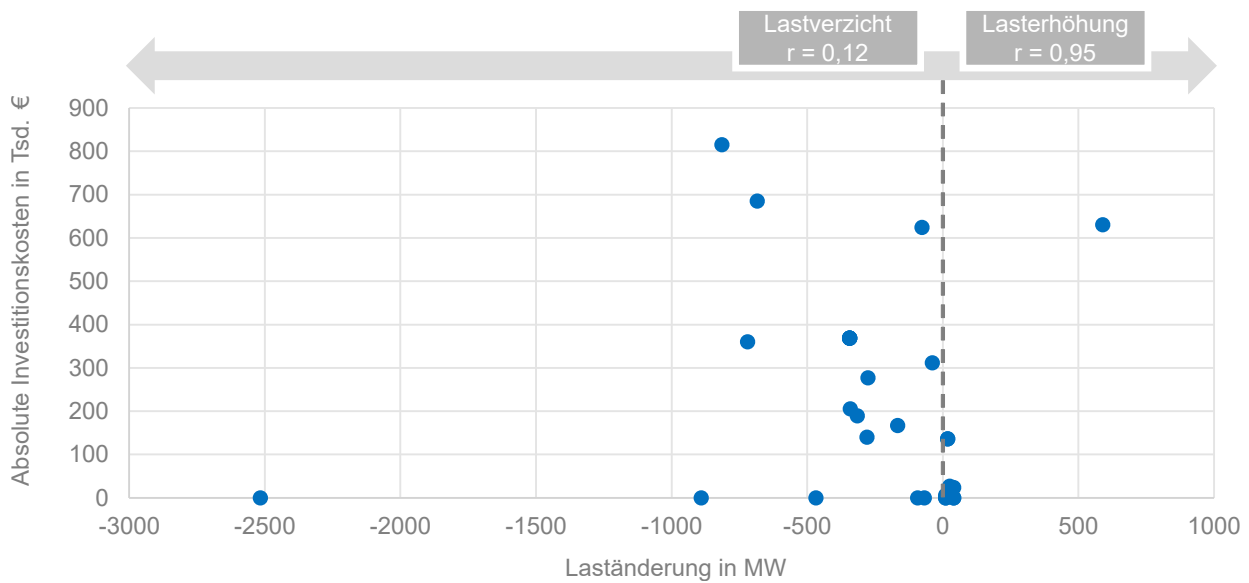
**Abbildung A.12.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 6 Studien



**Abbildung A.13.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien

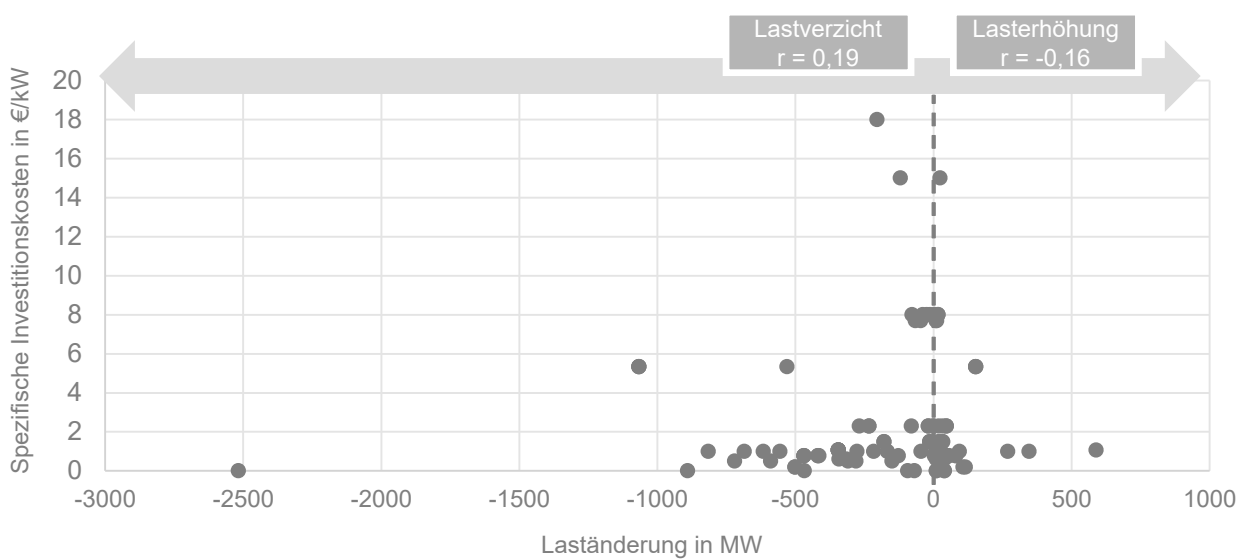


**Abbildung A.14.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 24 Datenpunkte aus 5 Studien

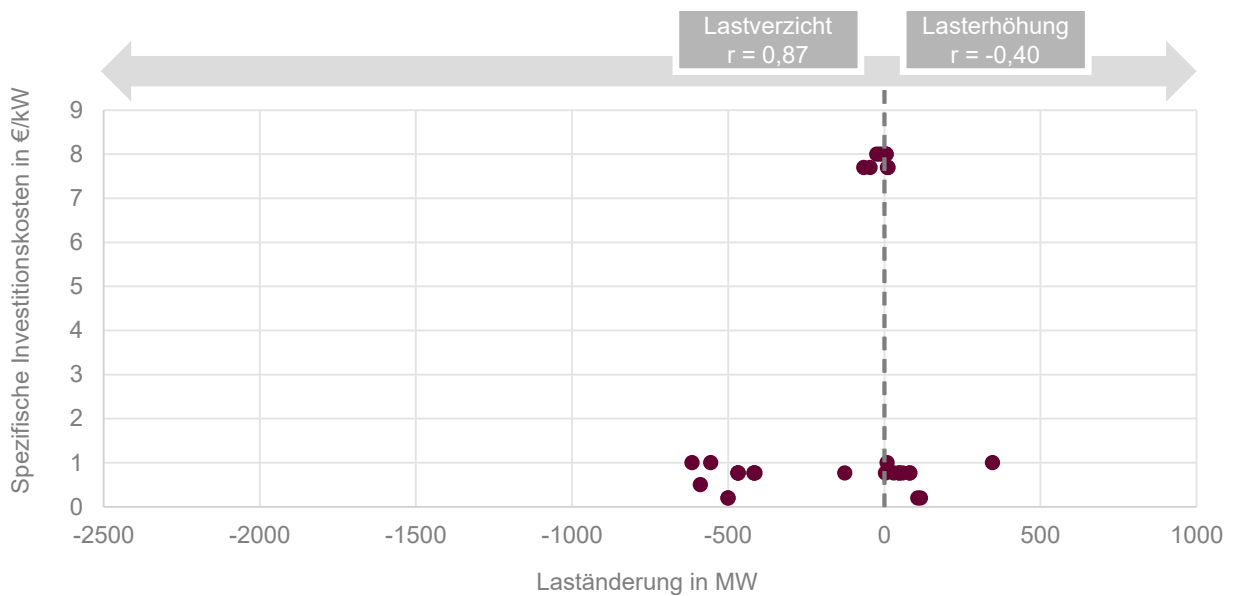


**Abbildung A.15.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Investitionskosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 30 Datenpunkte aus 6 Studien

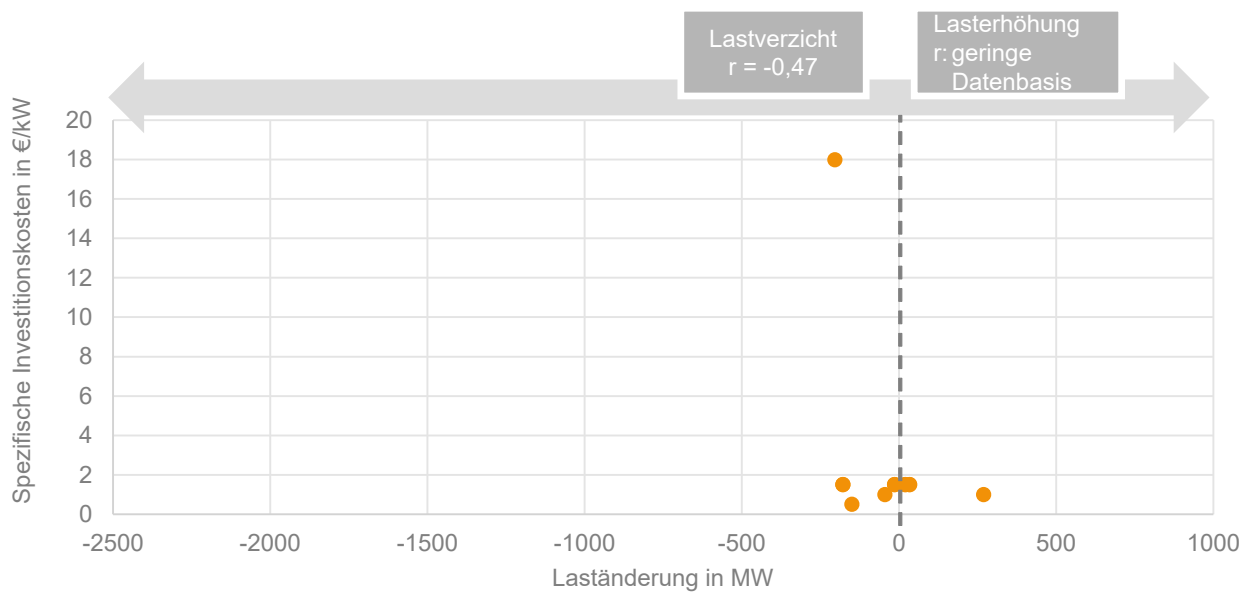
#### A.2.5. Laständerung zu spezifischen Investitionskosten auf Ebene 4



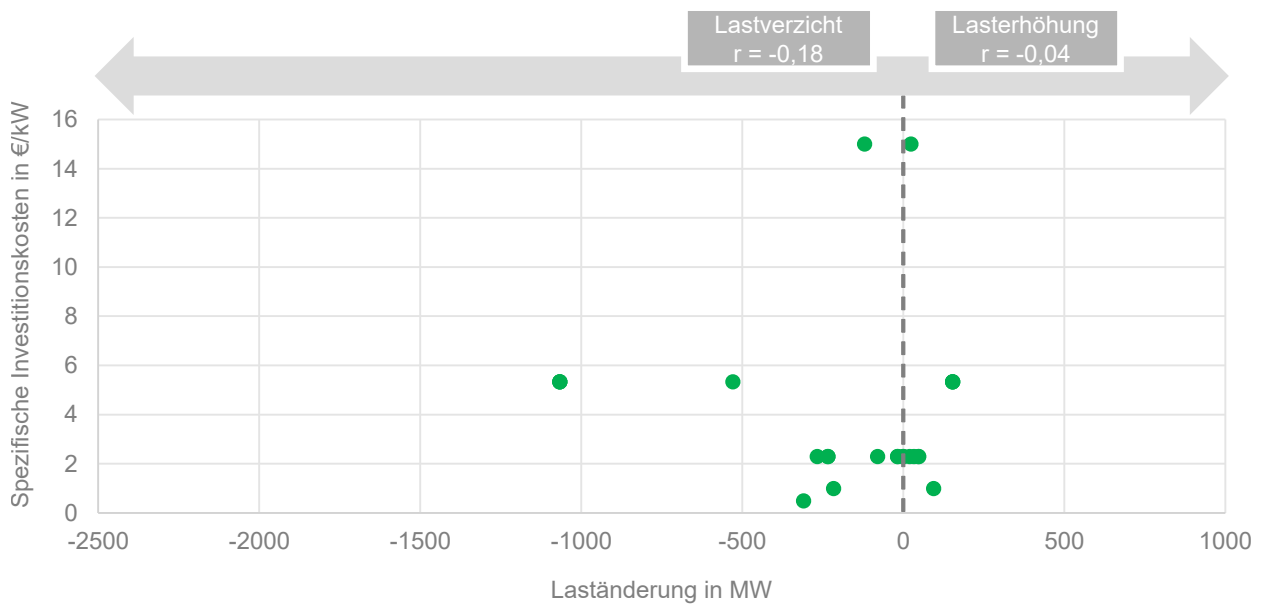
**Abbildung A.16.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige (C.20, C.23, C17, C24), 97 Datenpunkte aus 7 Studien



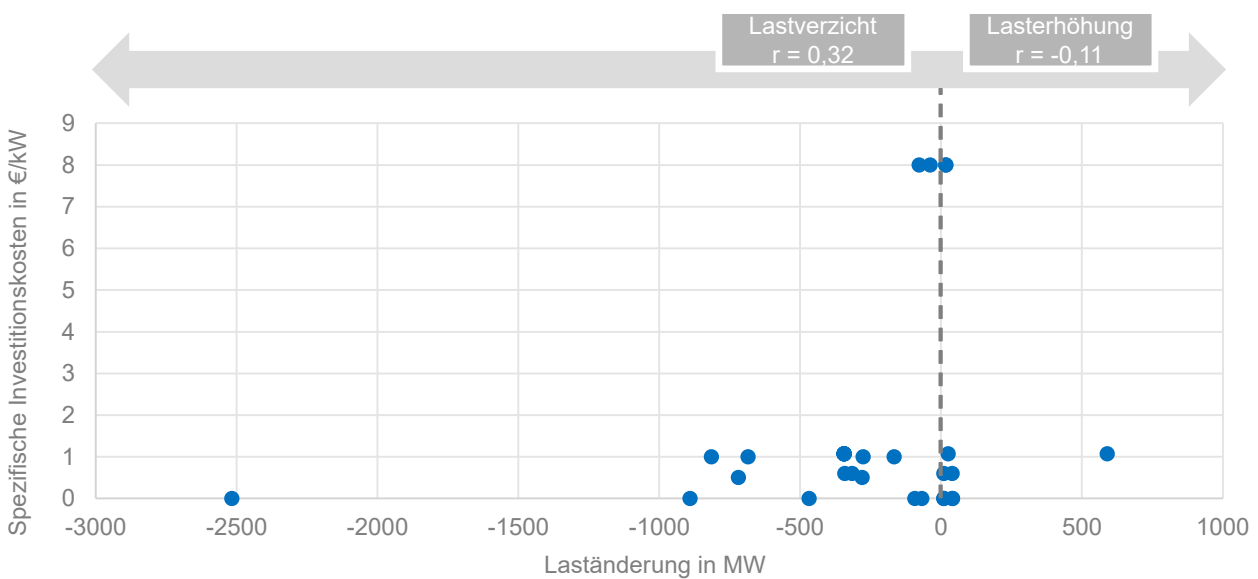
**Abbildung A.17.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 6 Studien



**Abbildung A.18.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien

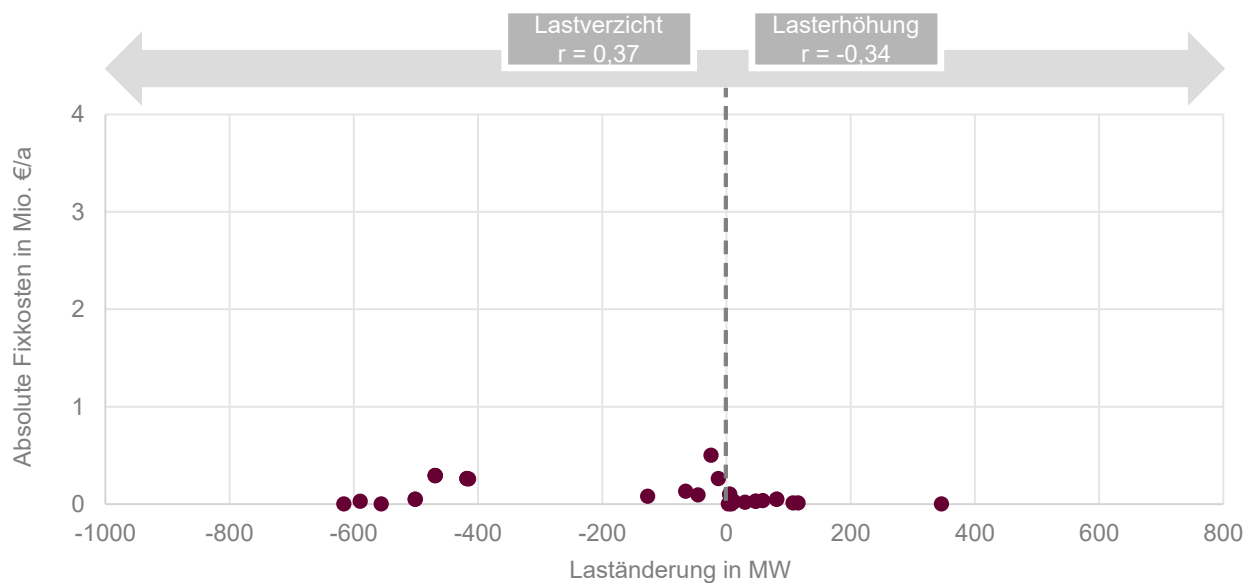


**Abbildung A.19.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 24 Datenpunkte aus 5 Studien

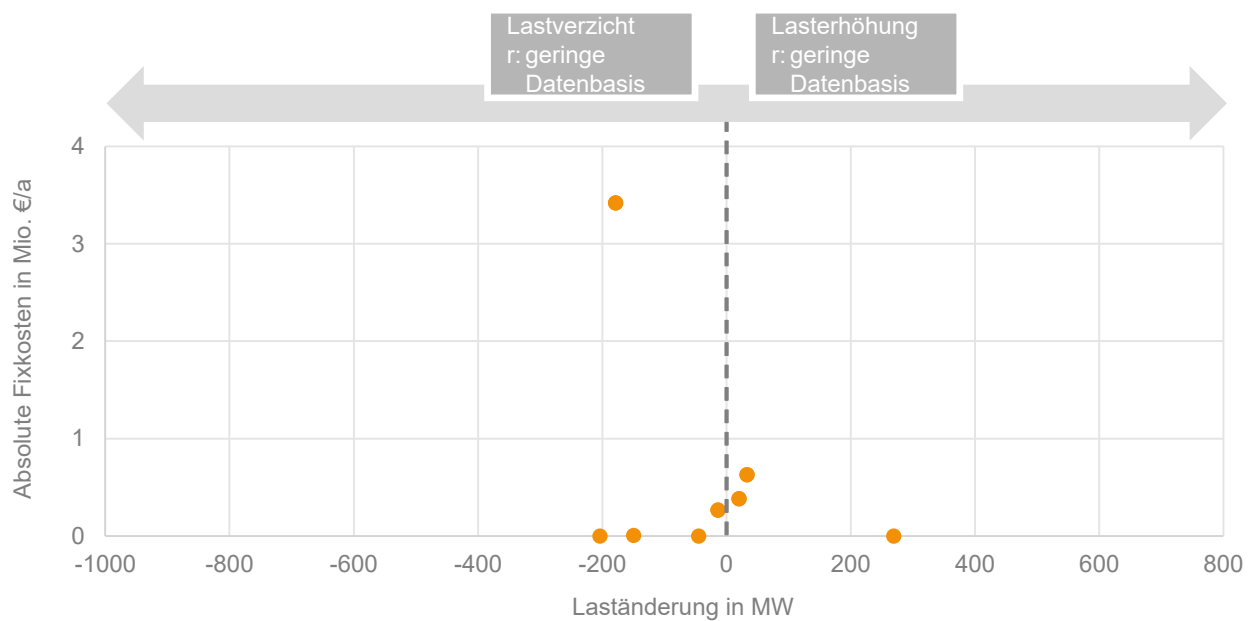


**Abbildung A.20.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Investitionskosten für die Wirtschaftszweige C.24: Metallerzeugung und -bearbeitung, 30 Datenpunkte aus 6 Studien

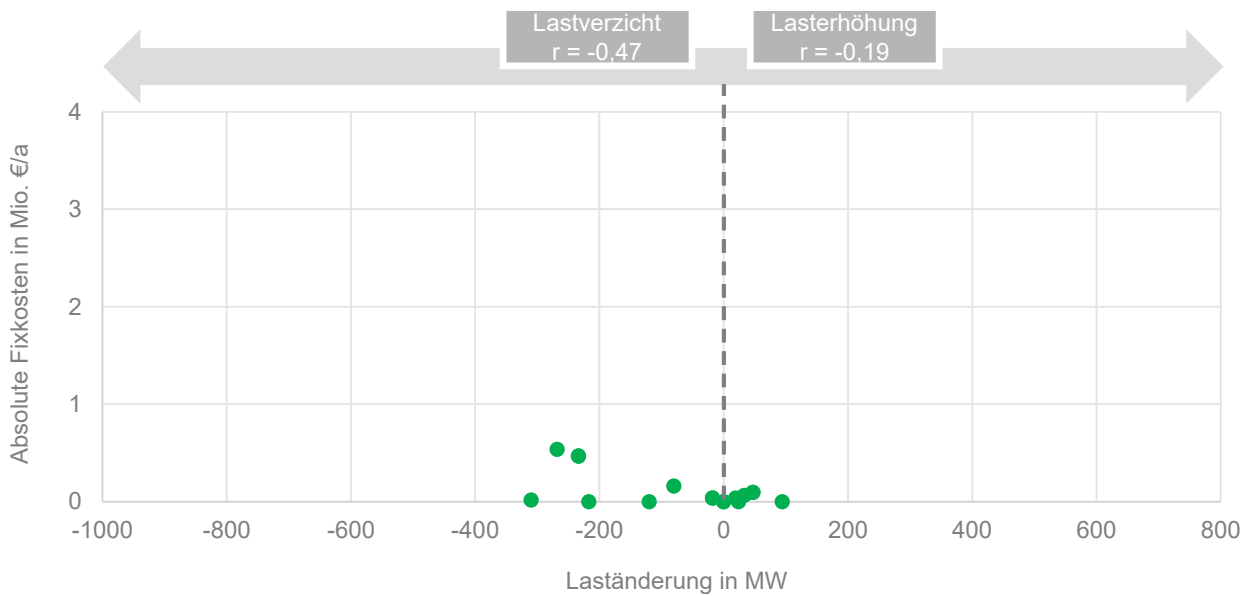
## A.2.6. Laständerung zu absolute Fixkosten auf Ebene 4



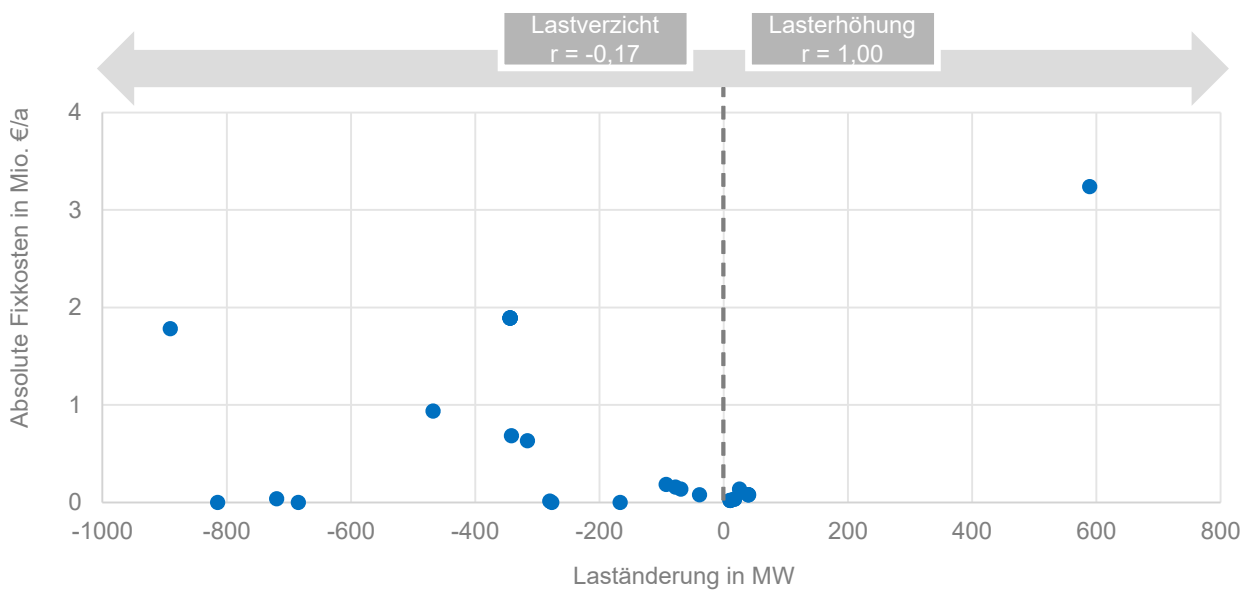
**Abbildung A.21.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien



**Abbildung A.22.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien

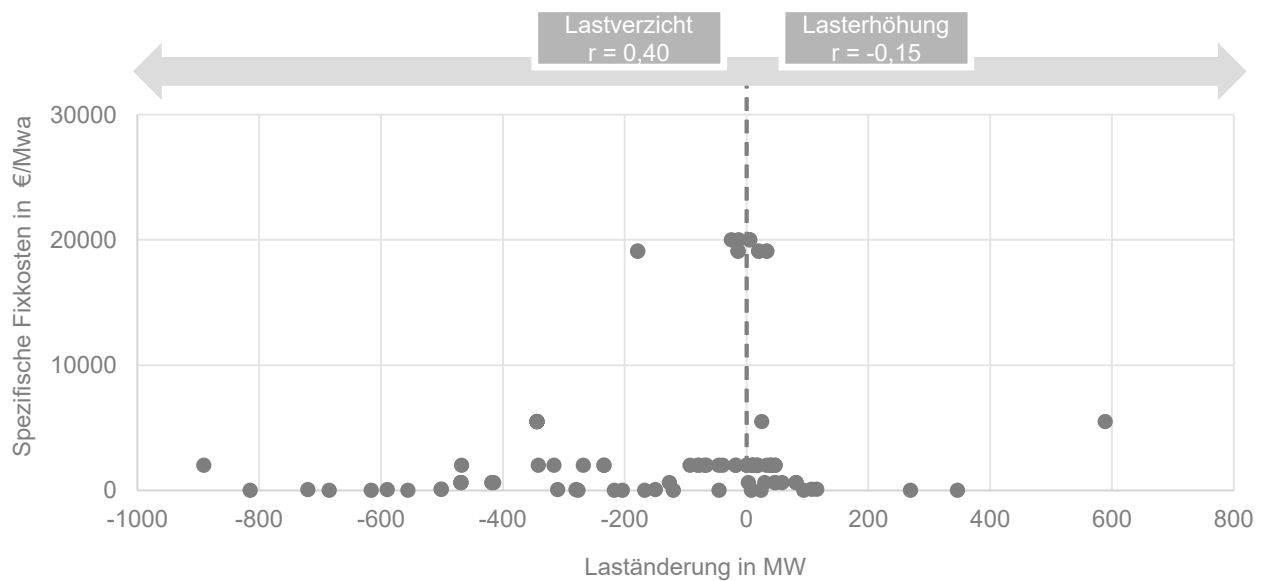


**Abbildung A.23.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 17 Datenpunkte aus 4 Studien

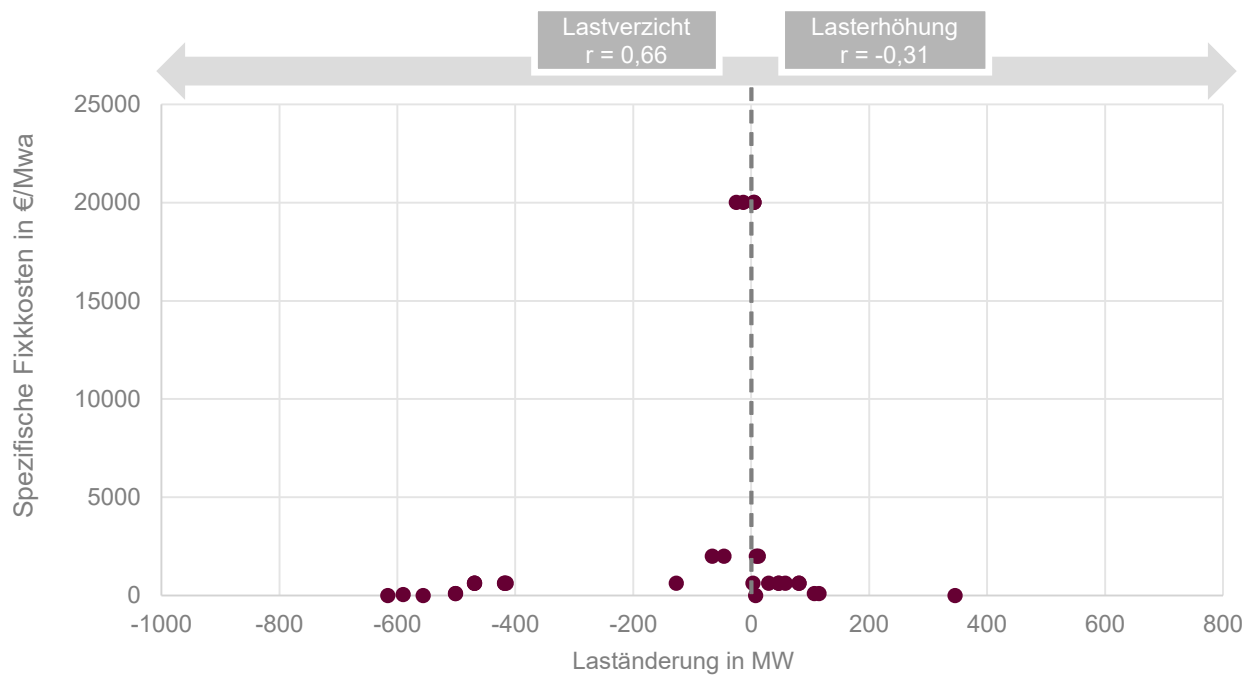


**Abbildung A.24.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 29 Datenpunkte aus 5 Studien

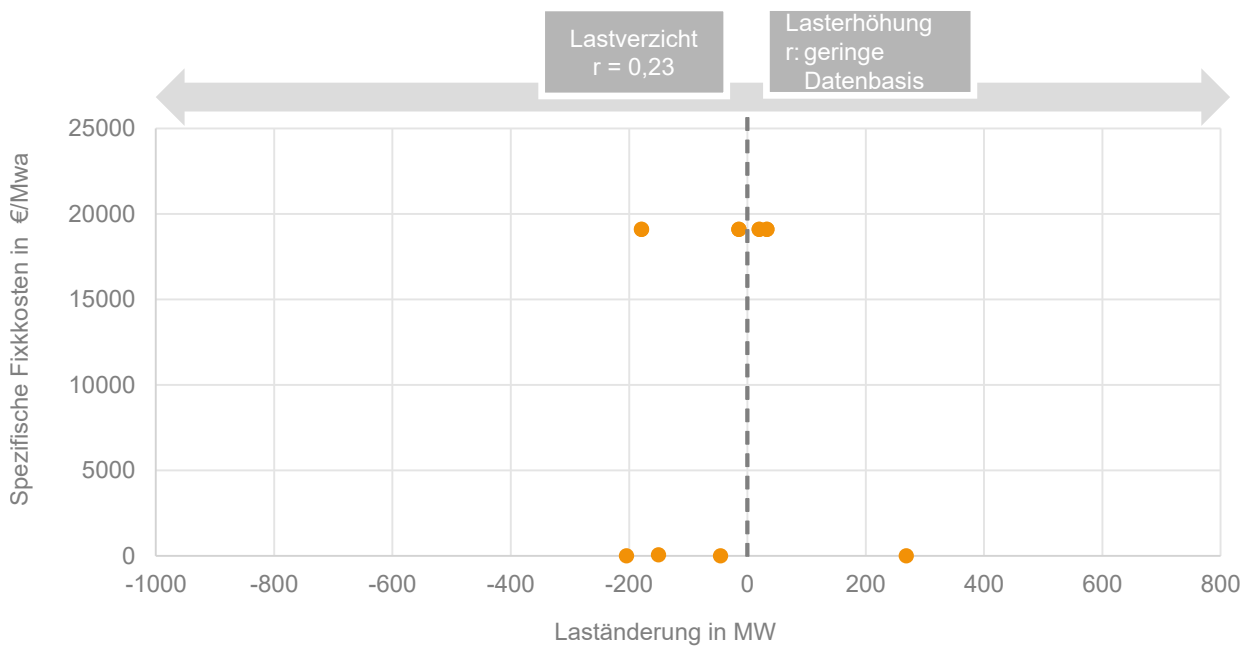
### A.2.7. Laständerung zu spezifische Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



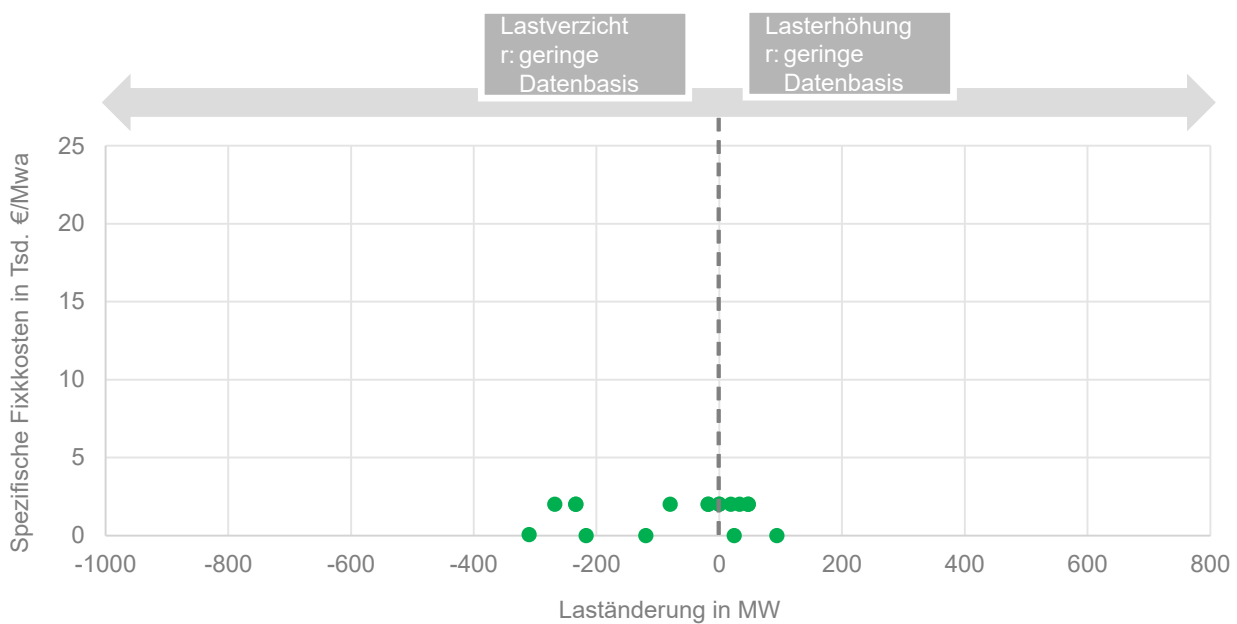
**Abbildung A.25.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 (C.20, C.23, C17, C24), 89 Datenpunkte aus 5 Studien



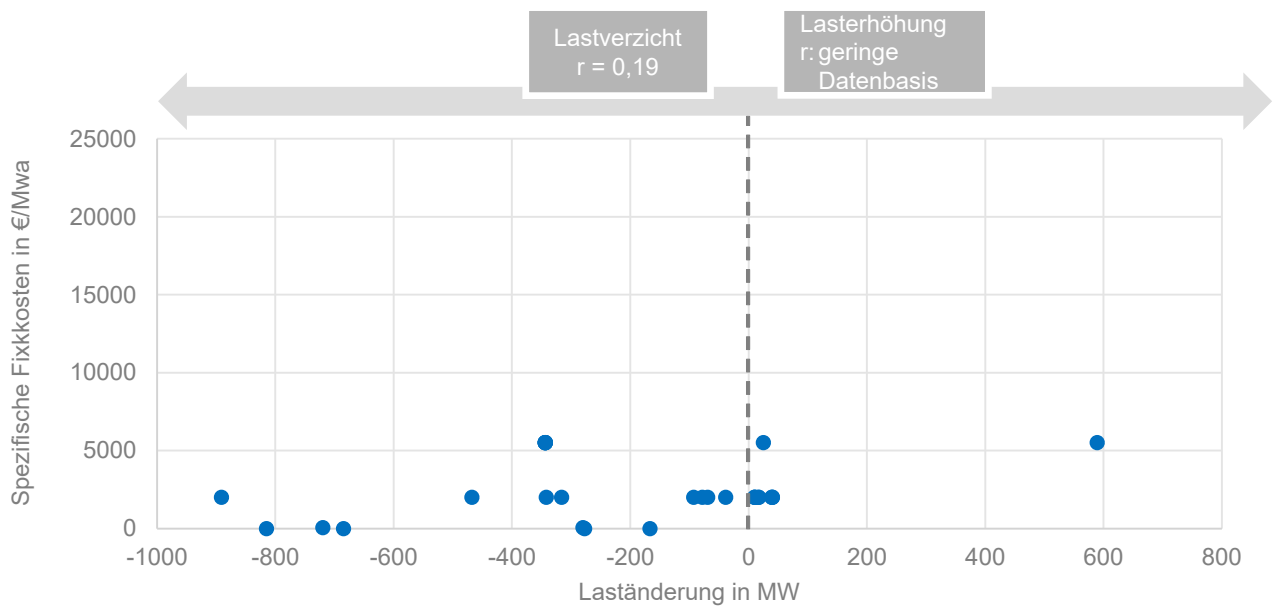
**Abbildung A.26.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 31 Datenpunkte aus 5 Studien



**Abbildung A.27.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 12 Datenpunkte aus 4 Studien

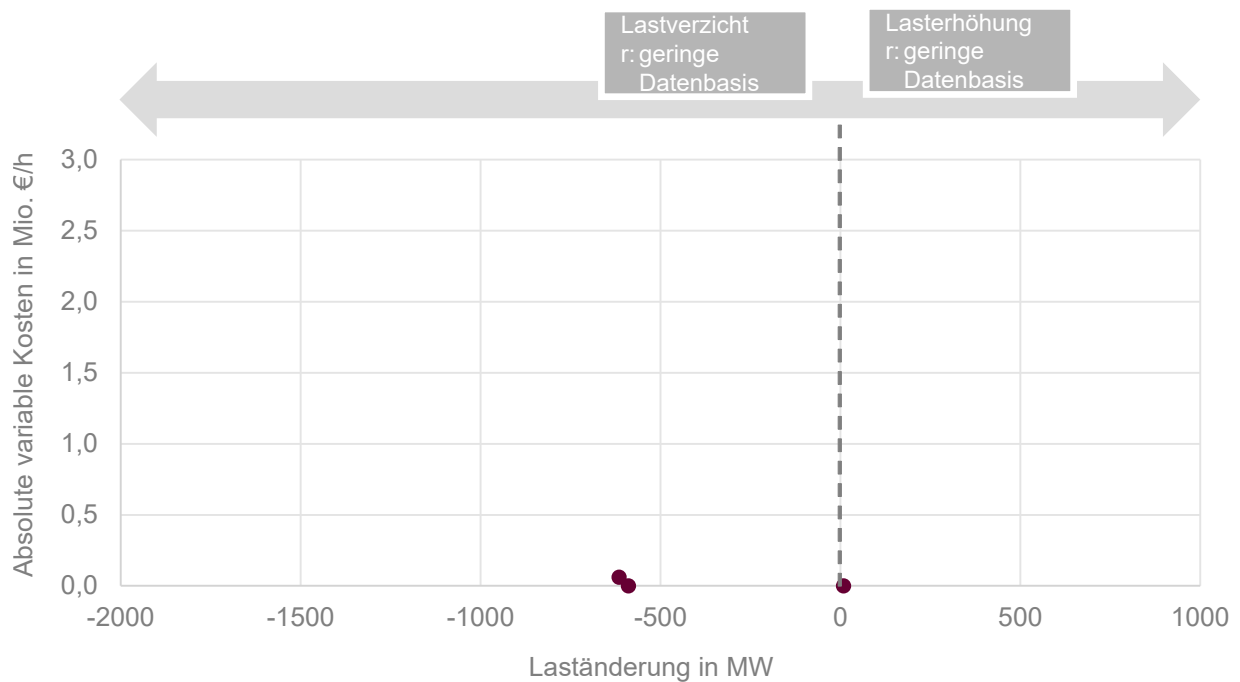


**Abbildung A.28.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 17 Datenpunkte aus 4 Studien

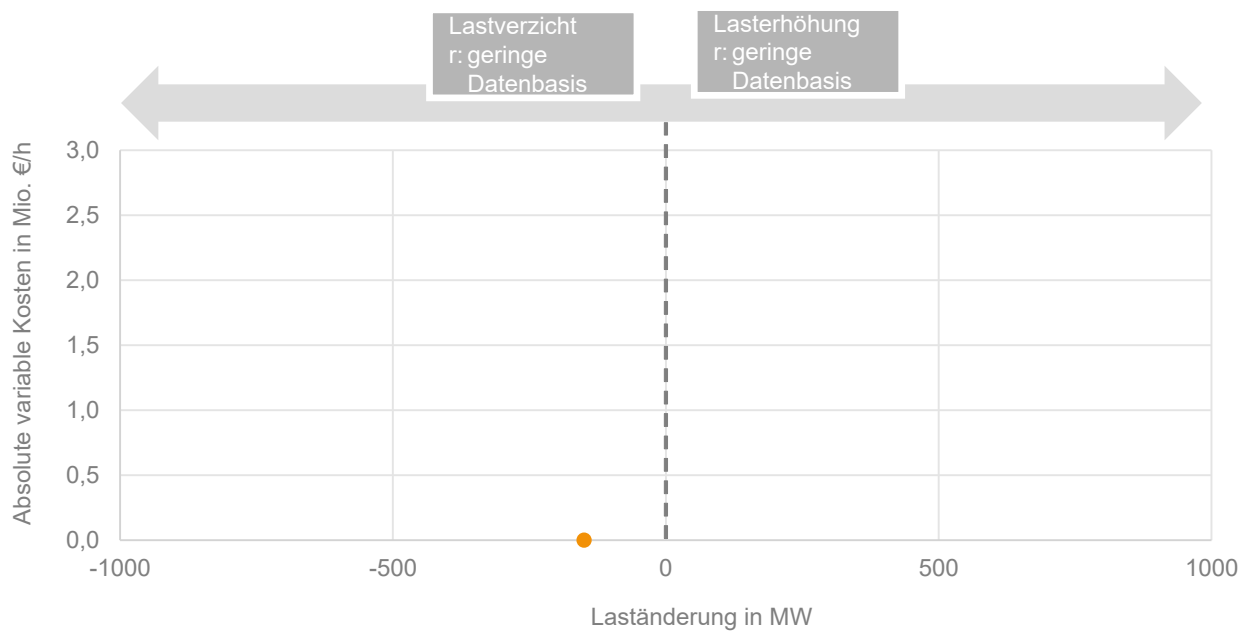


**Abbildung A.29.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallherzeugung und –bearbeitung, 29 Datenpunkte aus 5 Studien

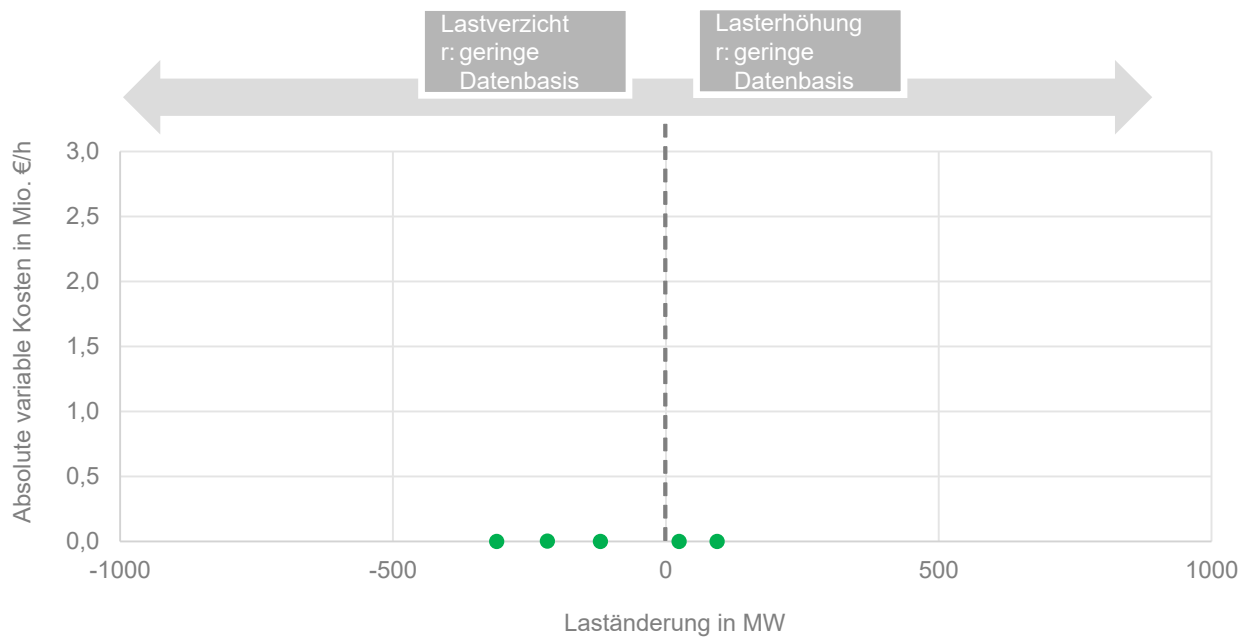
#### A.2.8. Laständerung zu absolute variable Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



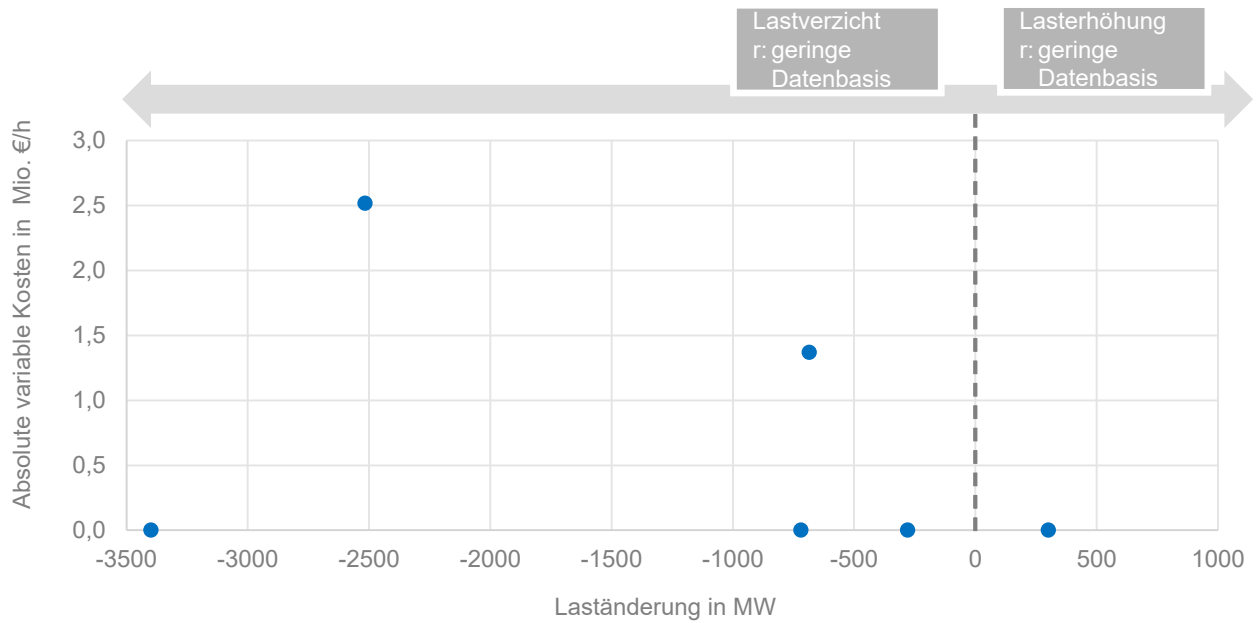
**Abbildung A.30.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 5 Datenpunkte aus 3 Studien



**Abbildung A.31.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 5 Datenpunkte aus 4 Studien

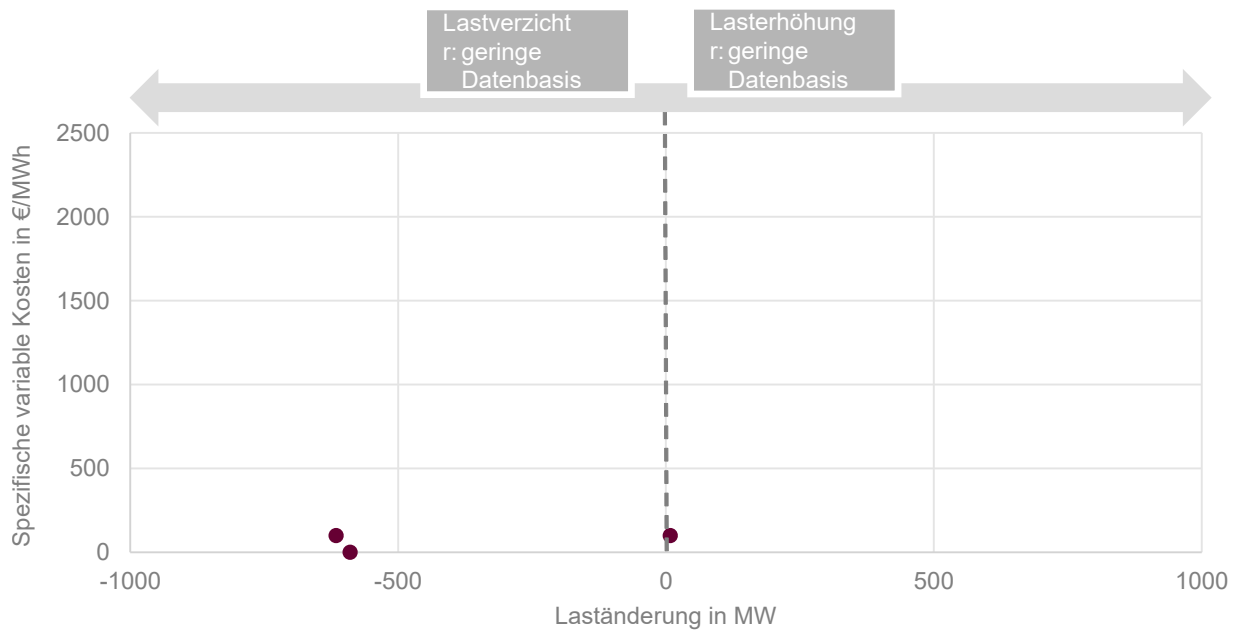


**Abbildung A.32.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 6 Datenpunkte aus 4 Studien

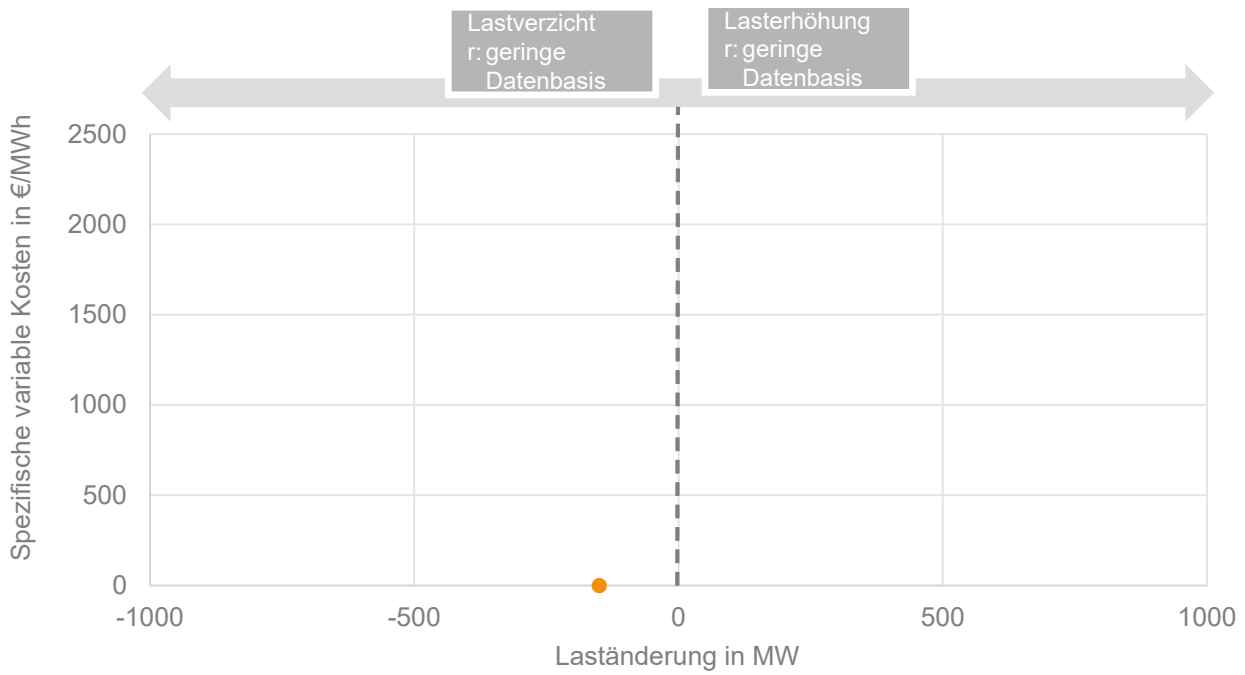


**Abbildung A.33.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und absoluten variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 9 Datenpunkte aus 5 Studien

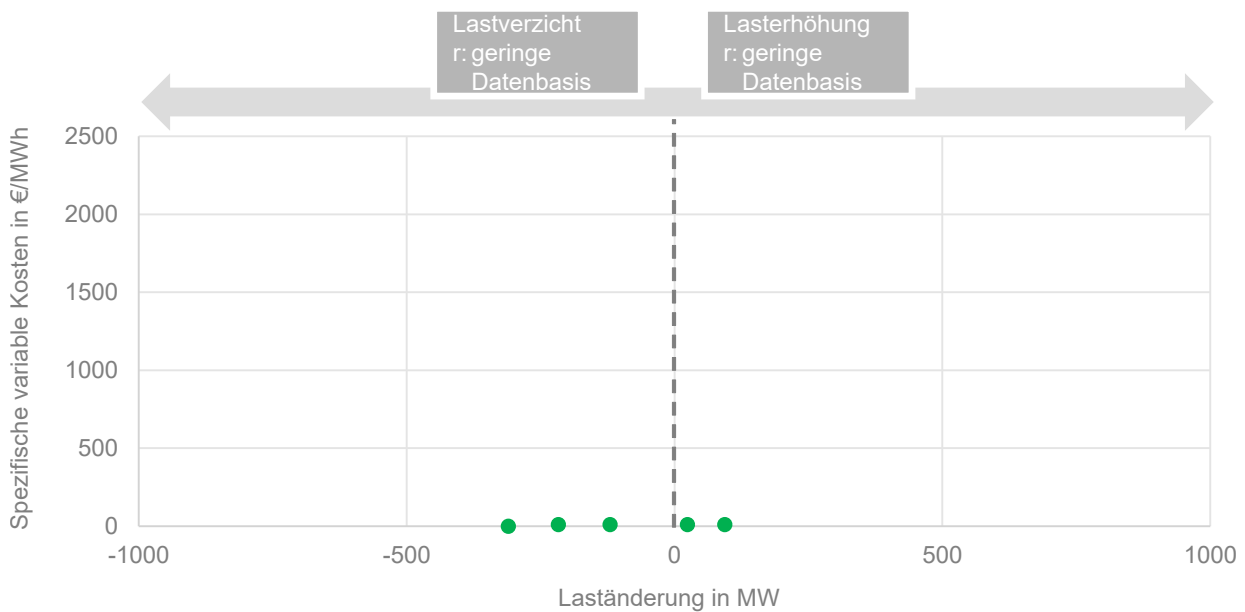
#### A.2.9. Laständerung zu spezifische variable Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4



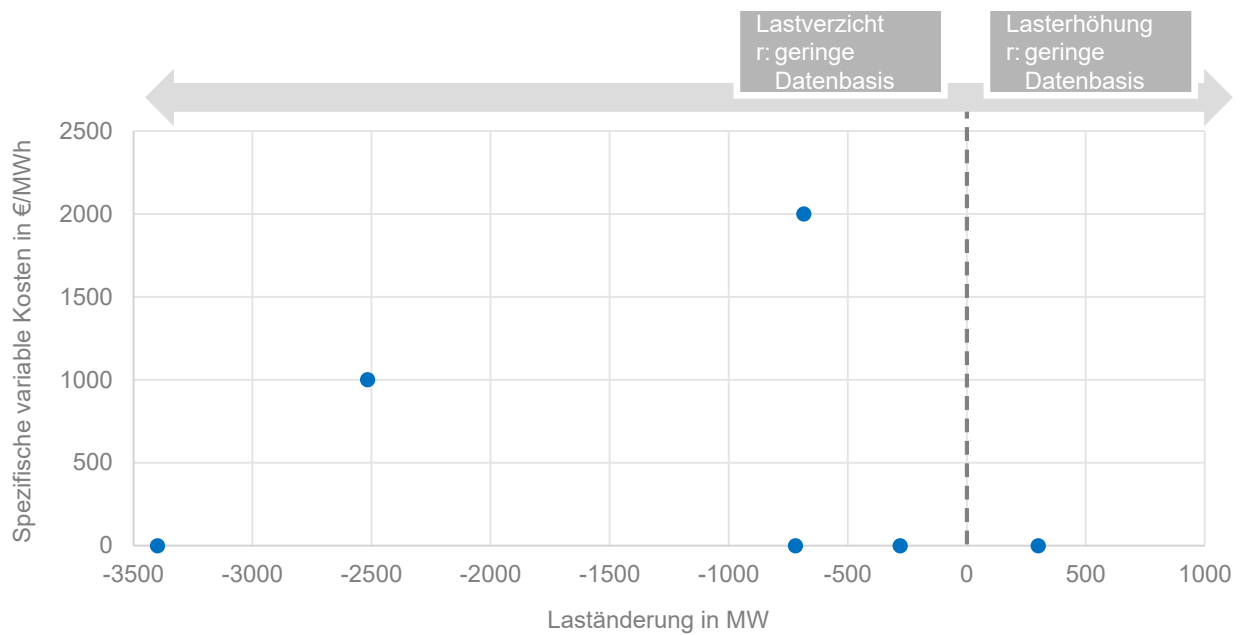
**Abbildung A.34.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.20: Herstellung von chemischen Erzeugnissen, 5 Datenpunkte aus 3 Studien



**Abbildung A.35.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.23: Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, 5 Datenpunkte aus 4 Studien

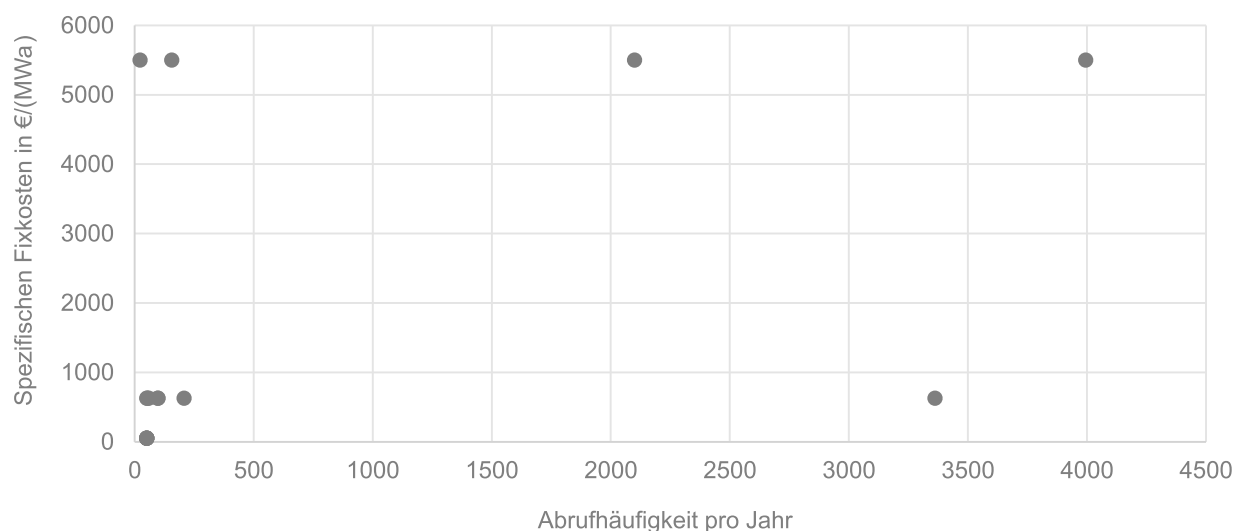


**Abbildung A.36.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.17: Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus, 6 Datenpunkte aus 4 Studien



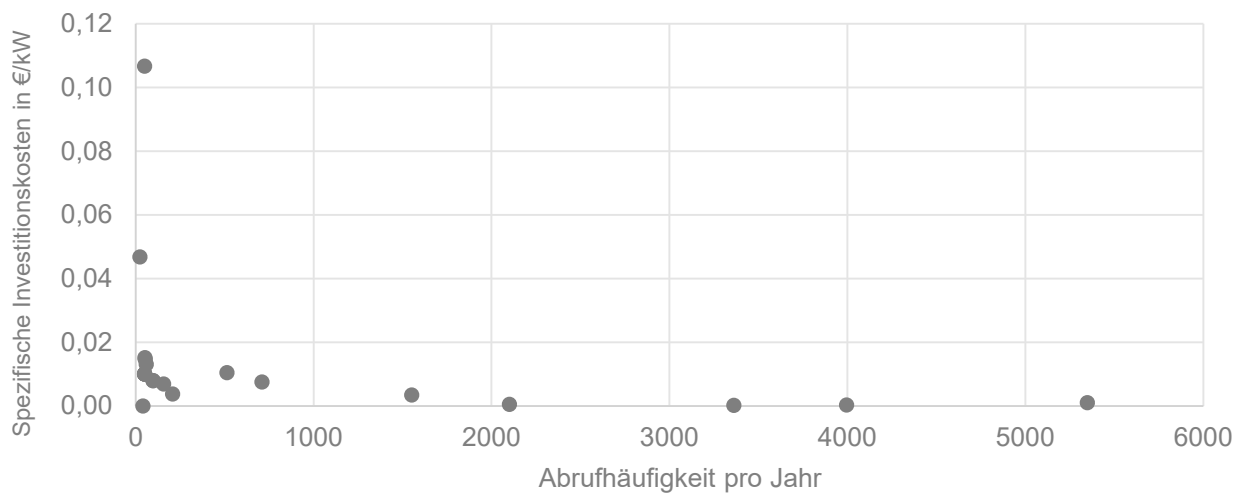
**Abbildung A.37.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Laständerung und spezifischen variablen Fixkosten eines Wirtschaftszweigs auf Ebene 4 C.24: Metallerzeugung und –bearbeitung, 9 Datenpunkte aus 5 Studien

#### A.2.10. Abrufhäufigkeit pro Jahr zu spezifische Fixkosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4



**Abbildung A.38.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Abrufhäufigkeit pro Jahr und spezifischen Fixkosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4, 16 Datenpunkte aus 2 Studien

## A. Anhang



**Abbildung A.39.:** Darstellung des Zusammenhangs zwischen Abrufhäufigkeit pro Jahr und spezifischen Investitionskosten aller Wirtschaftszweige auf Ebene 4, 22 Datenpunkte aus 3 Studien



