# Energiewirtschaftliche Typregionen auf Basis von Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur

**Christa Dufter[1(1)], Michael Hinterstocker[(1)], Serafin von Roon[(1)], Tobias Schmid[(2)]**

[(1)] Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München, +49 89 158121-37, cdufter@ffe.de, www.ffegmbh.de

[(2)] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Am Blütenanger 71, 80995 München, +49 89 158121-0, info@ffe.de, www.ffe.de

**Kurzfassung:**

Durch den kontinuierlich steigenden Anteil Erneuerbarer Energien gewinnt die Flexibilisierung der Verbrauchsseite zunehmend an Bedeutung. Welche Art von Flexibilität zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch erforderlich ist und wie die verfügbaren Optionen bestmöglich eingesetzt werden können, hängt von der jeweiligen Erzeugungs- und Verbrauchssituation vor Ort ab.

Ziel dieser Studie ist es, auf Basis von Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur repräsentative Typregionen für Deutschland abzuleiten. Regionen der gleichen Typregion stehen dabei einerseits vor ähnlichen Herausforderungen bei der Integration der Erneuerbaren. Andererseits können beispielsweise bereits erfolgreich umgesetzte Lösungsansätze zwischen diesen Regionen übertragen werden. Die Ausgangsbasis für die Untersuchungen bilden der Stromverbrauch nach Sektor sowie die installierten Leistungen von Photovoltaik- und Windenergieanlagen auf Landkreisebene. Die entwickelte Methodik setzt sich aus den beiden folgenden Bestandteilen zusammen: der Clusterung und der Aggregation von Landkreisen zu Typregionen. Es werden verschiedene Ansätze erarbeitet und hinsichtlich ihrer Eignung für die weitere Verwendung bewertet.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SFK3O0 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**Keywords:** Kopernikus, SynErgie, Typregionen, Flexibilität, Clusteranalyse, Erneuerbare Erzeugung, Verbrauchsstruktur

[1] Jungautor

# 1 Motivation und zentrale Fragestellung

Durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien gewinnt die Flexibilisierung des Verbrauchs zunehmend an Bedeutung. Ausgangsbasis für die Integration verschiedener Flexibilitätsoptionen ist dabei eine Analyse der Erzeugungs- und Verbrauchssituation vor Ort. Ziel der vorliegenden Studie ist es, für Deutschland charakteristische Typregionen abzuleiten. Regionen, welche derselben Typregion zugeordnet sind, weisen dabei eine ähnliche Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur auf und stehen somit vergleichbaren Herausforderungen bei der Integration von Erneuerbaren Energien und Flexibilität gegenüber. Zum einen wird hierdurch deutlich, welche Erzeugungs- und Verbrauchssituationen in Deutschland relevant sind. Zum anderen können Erkenntnisse und Lösungsansätze zwischen verschiedenen Regionen einer Typregion übertragen werden.

# 2 Methodische Vorgehensweise

Ausgangsbasis für die Analyse sind der flächenspezifische Stromverbrauch der Sektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und private Haushalte (aufgrund der starken Korrelation werden die beiden Letzteren zusammengefasst) sowie die flächenspezifischen installierten Leistungen von Photovoltaik- und Windenergieanalgen auf Landkreisebene [1], [2], [3]. Erste Auswertungen zeigten, dass die Verwendung von Erzeugungsmengen im Vergleich zu installierten Leistungen auf Landkreisebene nur zu geringfügig abweichenden Ergebnissen führen. Da installierte Leistungen in der Regel besser verfügbar und darüber hinaus unabhängig von der Wahl eines Wetterjahres sind, wurden diese verwendet. Auf Basis dieser vier Parameter werden Regionen gebildet. Die Methodik setzt sich dabei aus zwei Bestandteilen zusammen: Clusterung und Aggregation von Landkreisen zu Typregionen. Für die Umsetzung werden verschiedene Vorgehensweisen entwickelt, welche zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Zunächst werden die beiden Bestandteile der Methode näher erläutert.

## 2.1 Clusterung

Für die Clusterung der Landkreise bzw. Regionen werden zwei Ansätze verwendet:

- Hierarchische Clusteranalyse
- Clusterung auf Basis der Mediane der vier Parameter

Erstens wird die hierarchische Clusteranalyse untersucht [4]. Diese ist als agglomeratives Verfahren implementiert, das bedeutet, dass ausgehend von einzelnen Objekten (in diesem Fall Landkreisen) iterativ die ähnlichsten zu Regionen zusammengefasst werden. Die Parameter, welche dazu herangezogen werden, werden normiert, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Als Fusionierungsalgorithmus wird das Ward-Verfahren eingesetzt, welches tendenziell gleich große Cluster erzeugt; die Distanz (also die Ähnlichkeit) wird euklidisch bestimmt. Dieses Verfahren ermöglicht, Landkreise bis zu einer definierten Ähnlichkeit zusammenzufassen, woraus sich schließlich die Anzahl der resultierenden Cluster ergibt.

Zweitens wird eine Clusterung auf Basis der Mediane der vier Parameter durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die Ausprägungen jedes Parameters in zwei Gruppen geteilt: „+“ für Werte oberhalb des Medians und „-“ für Werte unterhalb des Medians. Es ergeben sich

demnach $2^4 = 16$ Kombinationen, die als mögliche Cluster festgelegt werden. Die Mediane und somit die resultierenden Cluster werden basierend auf den Daten auf Landkreisebene gebildet, d. h. auch wenn in einem Ansatz bereits aggregierte Landkreise – also Regionen – geclustert werden, so basiert die Einteilung der Cluster weiterhin auf den Daten auf Landkreisebene. So kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet werden.

### 2.2 Aggregation

Bei der Aggregation werden aus den Landkreisen Regionen gebildet. Eine Region kann dabei aus einem oder mehreren, räumlich zusammenhängenden Landkreisen bestehen. Gleichartige Regionen bilden Typregionen. Die Aggregation der Landkreise erfolgt dabei auf drei Arten:

- Zuordnung von kreisfreien Städten zu umliegenden Landkreisen
- Aggregation ähnlicher Landkreise auf Basis der Ausprägungen der vier Parameter
- Aggregation der Landkreise zu Raumordnungsregionen des BBSR [5]

Die ersten Ergebnisse zeigten, dass sich kreisfreie Städte in ihrer Erzeugungs- und Verbrauchscharakteristik wie zu erwarten deutlich von den umliegenden Landkreisen unterscheiden und sich ihre Zuordnung zu Regionen daher entsprechend schwierig gestaltet. Aus diesem Grund werden in einzelnen Ansätzen vor der weiteren Analyse entsprechende kreisfreie Städte zu umliegenden Landkreisen zugeordnet und im weiteren Verlauf die resultierenden Regionen verwendet.

Im zweiten Ansatz erfolgt die Aggregation der Landkreise iterativ, d.h. in jeder Iteration werden die beiden ähnlichsten Landkreise bzw. Regionen zu einer größeren Region aggregiert und die vier Parameter dieser neuen Region entsprechend berechnet. Die Ähnlichkeit wird hierbei angelehnt an das zuvor beschriebene hierarchische Clusterverfahren mittels des euklidischen Distanzmaßes aus den normierten Parametern berechnet, im Gegensatz zur vorherigen Anwendung wird allerdings hier das Complete-Linkage-Verfahren zur Fusionierung verwendet. Dies bedeutet, dass zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Regionen der maximale Abstand aller Landkreispaare dieser beiden Cluster verwendet wird. Damit wird also sichergestellt, dass die resultierenden Regionen in sich möglichst homogen sind.

Schließlich werden die Raumordnungsregionen des BBSR genutzt [5]. Diese entsprechen mit Ausnahme von Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen den Planungsregionen der Bundesländer. Es werden zusätzlich weitere Raumabgrenzungen des BBSR betrachtet, welche sich jedoch als wenig geeignet für die Ableitung von energiewirtschaftlichen Regionen erweisen.

## 3 Ergebnisse

#### 1a. Hierarchische Clusteranalyse

Bei der hier dargestellten Anwendung der hierarchischen Clusterung wurde die maximale Ähnlichkeit, bis zu der Landkreise ins selbe Cluster fallen, so gewählt, dass sich eine plausible Verteilung ergibt. Dies zeigt aber bereits eine Schwierigkeit in der Anwendung der

Methode, da dieser Wert quasi willkürlich gesetzt wird und so die Aussagekraft der Ergebnisse schwer zu bewerten ist.

Wie Abbildung 1 zu entnehmen, ergeben sich elf Cluster. Zu erkennen sind deutlich die verbrauchsstarken und durch eine hohe installierte Leistung von Photovoltaikanlagen charakterisierten kreisfreien Städte im Süden Deutschlands sowie in der Gegend des Ruhrgebiets (Cluster 11). Die ländlicheren Landkreise sind im Süden (primär Cluster 4 und 7) ebenfalls durch eine hohe Durchdringung mit Photovoltaikanlagen und im Norden mit Windenergieanlagen (primär Cluster 5, 9 und 10) geprägt. Das Ergebnis dieses Ansatzes erscheint somit plausibel.

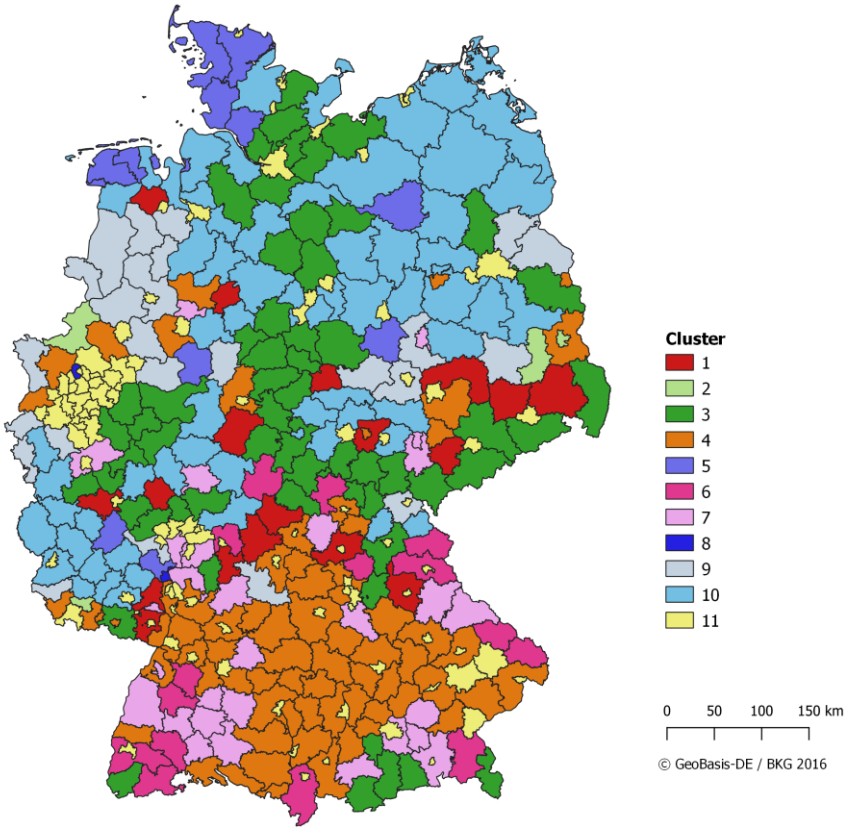


*Abbildung 1: Clusterung der Landkreise bei Anwendung der hierarchischen Clusteranalyse*

Es stellt sich jedoch die Frage, wie die Landkreise nun weiter zu Regionen aggregiert werden können. Erstens könnten benachbarte Landkreise, die dem selben Cluster angehören, zusammengefasst werden. Allerdings liefert das Resultat nicht das, was im Allgemeinen unter einer Region verstanden wird, nämlich ein flächiges Gebiet. Betrachtet man beispielsweise die Landkreise des Cluster 3, welche sich vom Südosten Sachsens über den Süden Thüringens bis in den Süden Niedersachsens erstrecken, so erscheint diese schmale, gebogene Zusammenfassung von Landkreisen nicht als sinnvolle Region. Zweitens könnten kreisfreie Städte und ihr Umland zusammengefasst werden. Dies betrifft primär im Süden Landkreise der Cluster 11 und 4 und im Norden der Cluster 11 und 10. Allerdings stellt sich hier die Frage, welche Landkreise noch als Umland einer kreisfreien Stadt zu bezeichnen sind. Drittens könnten benachbarte Landkreise, die zu verschiedenen Clustern gehören, sich allerdings dennoch ähneln, aggregiert werden. Beispielsweise könnten benachbarte Landkreise zu Regionen zusammengefasst werden, wenn die

resultierende Region das Cluster des flächenmäßig größeren Landkreises ergibt. Auf diese Art könnten dann auch die sich ergebenden Regionen weiter aggregiert werden. Dies erfordert jedoch in jeder Iteration eine erneute Durchführung der hierarchischen Clusteranalyse. In jedem Schritt würde sich somit die Anzahl der Cluster und auch die Zuordnung der Landkreise zu diesen Clustern ändern. Aus den genannten Gründen, erscheint eine Aggregation der Landkreise ausgehend von dieser Clusterung nicht sinnvoll und wird daher nicht weiter verfolgt.

**1b. Clusterung der Landkreise nach Median**

Wie unter 1a. erläutert, bilden kreisfreie Städte einen Sonderfall, da sie sich in ihrer Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur signifikant von ihrem Umland unterscheiden. Bei einer iterativen Aggregation auf Basis der Ähnlichkeit in den vier Parametern können sie nur schwer zu Regionen zugeordnet werden. Um dieses Problem zumindest teilweise lösen zu können, werden kreisfreie Städte mit nur einem Nachbarlandkreis – also solche, die sich innerhalb eines Landkreises befinden – diesem Landkreis zugeordnet. Dies trifft auf 26 der insgesamt 107 kreisfreien Städte zu. Somit ergeben sich durch die Zuordnung 376 Regionen. Zum besseren Verständnis werden diese im Folgenden jedoch als Landkreise* bezeichnet, um die Abgrenzung zu den eigentlichen Typregionen sicherzustellen.

Um die in 1a. dargelegten Herausforderungen bei der iterativen Durchführung der hierarchischen Clusteranalyse zu umgehen, erfolgt die Clusterung der Landkreise* in diesem Ansatz auf Basis der Mediane der vier Parameter. Wie in Kapitel 2.1 erläutert, führt dies zu 16 Clustern. Das Ergebnis dieser Herangehensweise ist in Abbildung 2 dargestellt.

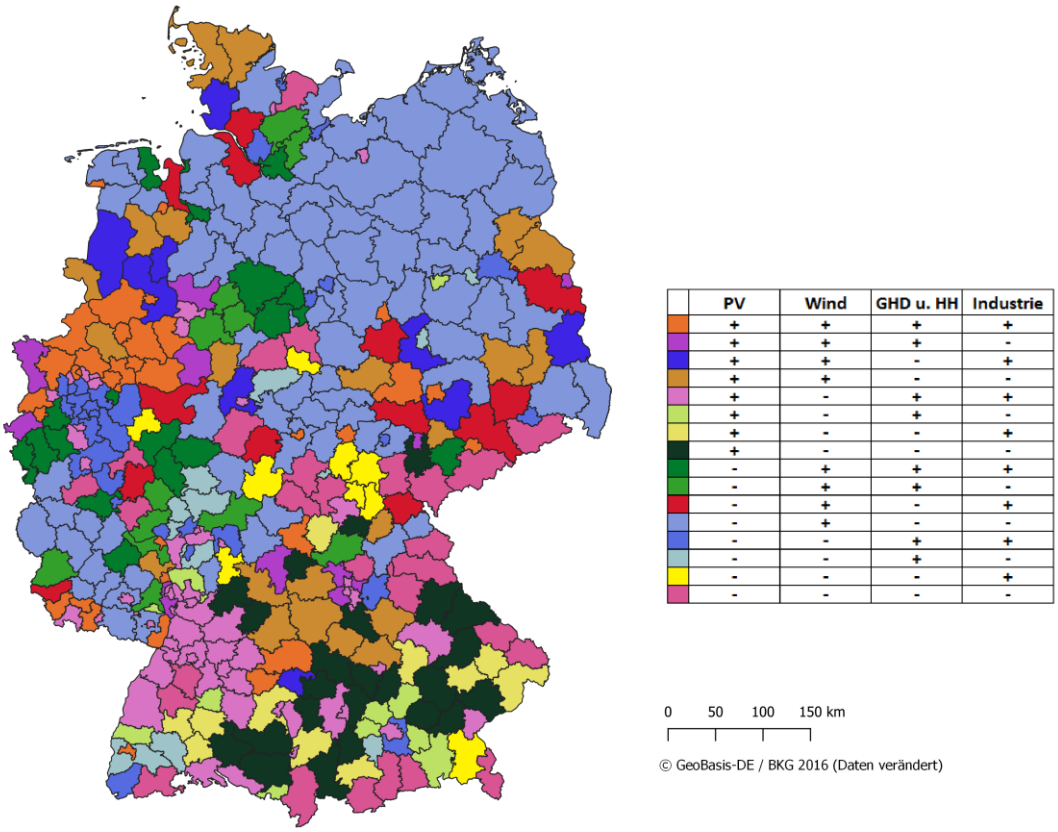


*Abbildung 2: Clusterung der Landkreise nach Median (kreisfreie Städte mit nur einem Nachbarlandkreis zugeordnet)*

Ähnlich zur hierarchischen Clusteranalyse wird auch mit diesem Ansatz ein plausibles Ergebnis erzielt. Sowohl durch Photovoltaik- bzw. Windenergieanlagen geprägte Landkreise als auch Verbrauchszentren können aus dem Ergebnis abgeleitet werden. Die Aggregation der geclusterten Landkreise* zu Regionen wird in Ansatz 4. erläutert.

### 2a. Aggregation von ähnlichen Landkreisen und anschließende Clusterung nach Median

Im ersten Schritt werden die Landkreise* entsprechend ihrer Ähnlichkeit in den vier Parametern iterativ aggregiert. Die Iteration wird abgebrochen sobald die Anzahl der resultierenden Regionen 100 erreicht. Diese Regionen werden dann wiederum entsprechend der 16 Kombinationen geclustert. Abbildung 3 zeigt das Resultat dieses Ansatzes.

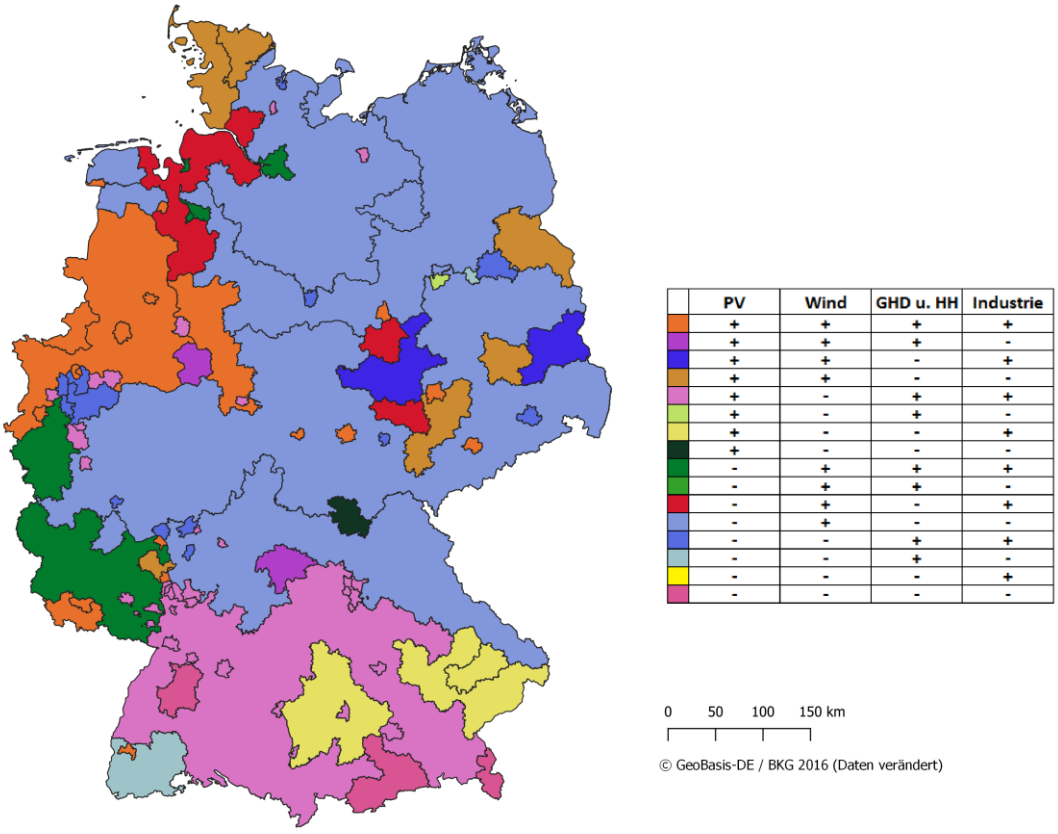


*Abbildung 3: Aggregation von ähnlichen Landkreisen und anschließende Clusterung nach Median*

Diese Vorgehensweise liefert wenige sehr große und sehr viele kleine – teilweise nur aus einem Landkreis* bestehende – Regionen. Im Wesentlichen könnten aus dem Ergebnis vier Typregionen abgeleitet werden: Photovoltaik und hoher Stromverbrauch im Süden, Wind und vergleichsweise niedriger Stromverbrauch im Norden bis in den Norden Bayerns und Baden-Württembergs, Photovoltaik, Wind und hoher Stromverbrauch in Nordrhein-Westfalen sowie Photovoltaik und niedriger Stromverbrauch im Saarland. Ferner werden Regionen ersichtlich, die sich signifikant von ihrem Umland unterscheiden und daher nicht diesen Regionen zugeordnet werden (beispielsweise Städte wie Wolfsburg, Berlin, Augsburg sowie Regionen des westlichen Niedersachsens und Teile Bayerisch-Schwabens). Auch dieses Ergebnis erscheint plausibel.

Dennoch sind diese Regionen nur bedingt für eine Weiterverwendung geeignet. Wie bereits genannt ist die Größe der abgeleiteten Regionen sehr ungleich verteilt – wenige große und sehr viele sehr kleine Regionen. Einzelne Regionen weisen auch nicht die angestrebte flächige Form von Regionen auf, z. B. das rosa Cluster in Bayern und Baden-Württemberg. Aus diesen Gründen wird im nächsten Schritt die Größe der Regionen begrenzt.

### 2b. Aggregation von ähnlichen Landkreisen und anschließende Clusterung nach Median mit Größenbegrenzung

Die Fläche der Regionen wird auf die Fläche von fünf durchschnittlichen Landkreisen begrenzt. Die Anzahl von fünf Landkreisen wird gewählt, da sich so eine ähnliche Anzahl von Regionen (107) wie in Ansatz 2a. ergibt. Unter Anwendung der ursprünglichen Anzahl von 402[2] Landkreisen (also ohne die Zuordnung einzelner kreisfreier Städte) wird die maximale Größe der resultierenden Regionen somit auf 4.443 km$^2$ festgelegt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 veranschaulicht.

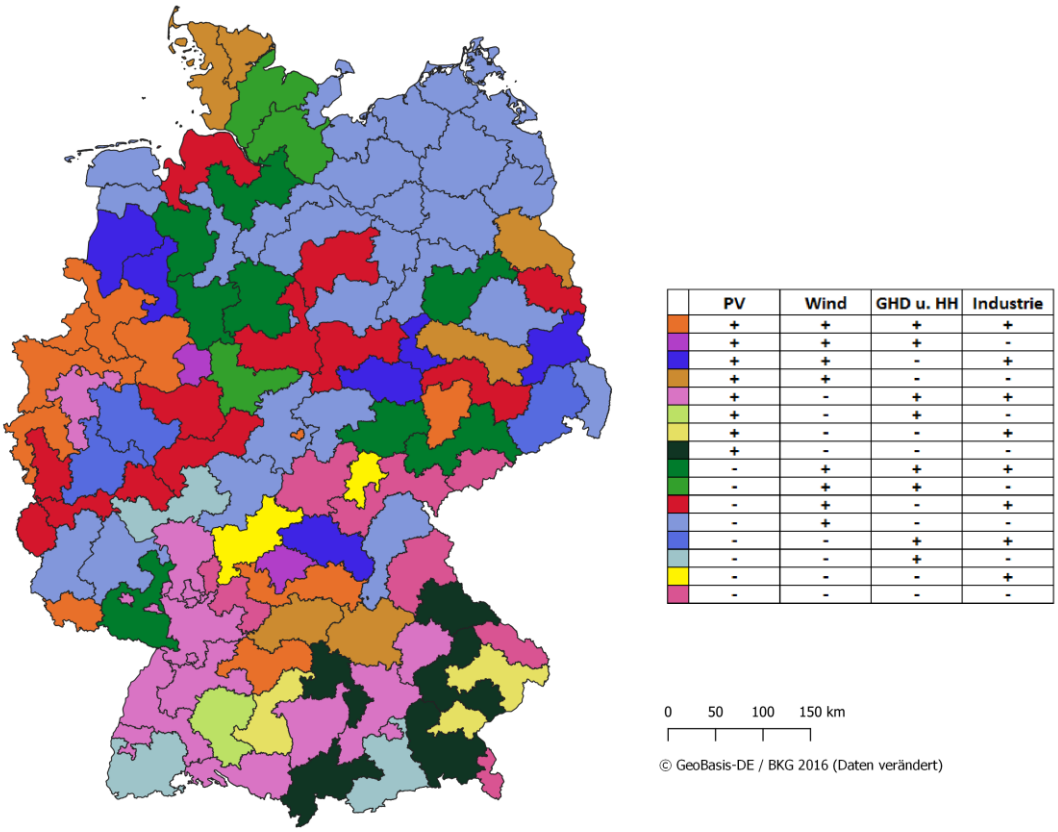


*Abbildung 4: Aggregation von ähnlichen Landkreisen und anschließende Clusterung nach Median mit Größenbegrenzung*

Auch hier können plausible Regionen abgeleitet werden. Regionen im Süden gehören zu den Clustern mit hoher Photovoltaik-, Regionen im Norden zu Clustern mit hoher Winddurchdringung. Auch verbrauchsstarke Regionen sind zu erkennen. Darüber hinaus weisen die Regionen eine sinnvolle und ähnliche Größe auf. Einen Nachteil bringt die Größenbegrenzung jedoch mit sich. Vergleicht man verschiedene Regionen, so sind sich die

[2] Zum Gebietsstand Januar 2016.

zugehörigen Landkreise* unterschiedlich ähnlich. Bei einzelnen Regionen würden noch weitere Landkreise* bzw. Regionen hinzugefügt werden. Aufgrund der Größenbegrenzung geschieht dies jedoch nicht und es werden stattdessen andere Landkreise* bzw. Regionen, welche sich weniger ähnlich sind, aggregiert. Dennoch sind die Ergebnisse dieses Ansatzes insgesamt gut für weitere Analysen geeignet.

### 3. Aggregation zu Raumordnungsregionen und Clusterung nach Median

Die Landkreise (ohne Zuordnung der kreisfreien Städte) werden gemäß den Raumordnungsregionen des BBSR [5] zu 96 Regionen aggregiert und die entsprechenden flächenspezifischen Parameter für diese Regionen berechnet. Anschließend erfolgt eine Clusterung auf Basis der Mediane der vier Parameter. Abbildung 5 zeigt die entsprechende Clusterung.

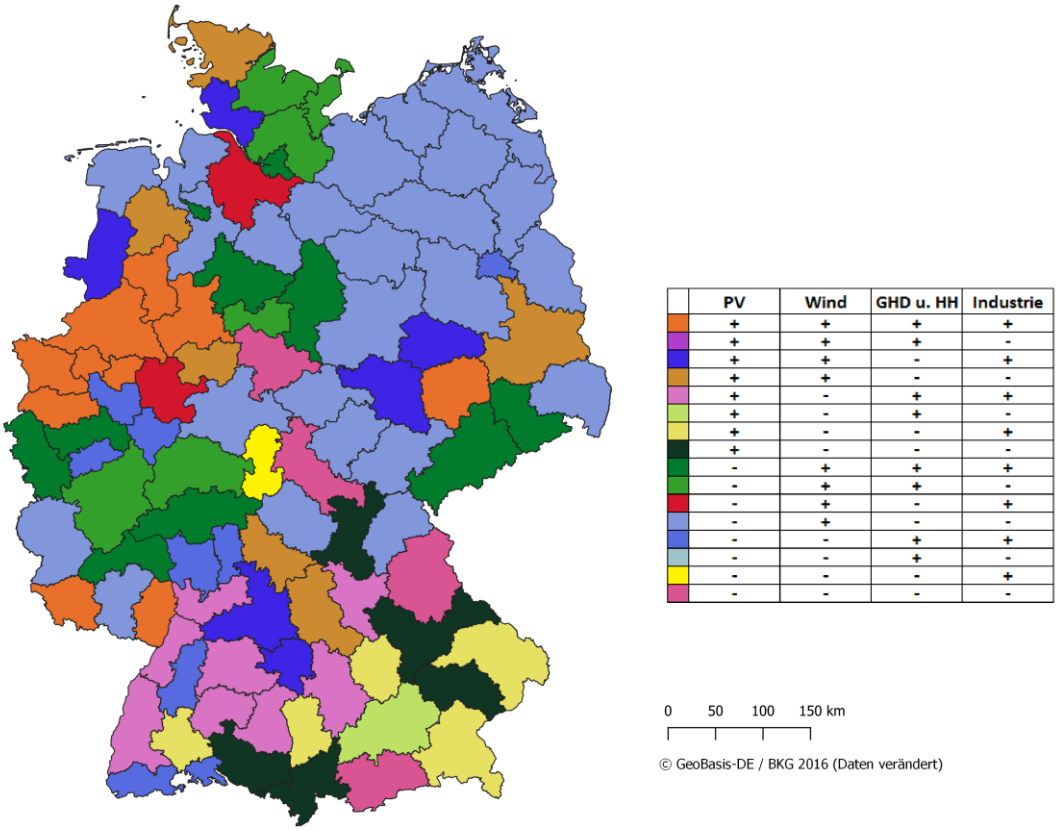


*Abbildung 5: Aggregation zu Raumordnungsregionen und Clusterung nach Median*

Obwohl die Einteilung in Raumordnungsregionen auf siedlungsstrukturellen Kriterien beruht und daher keine energiewirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt, scheint dieser Ansatz dennoch nicht gänzlich ungeeignet für die Ableitung von Typregionen zu sein. Das Ergebnis ist ähnlich dem Ansatz 2b.

### 4. Clusterung und Aggregation nach Median mit Größenbegrenzung

Ausgangspunkt ist die Clusterung der Landkreise* aus 1b. Es werden nun benachbarte Landkreise* bzw. Regionen aggregiert, wenn die Parameter der resultierenden Region eine Einordnung in das Cluster des größeren Landkreises* bzw. der größeren Region ergibt.

Die Reihenfolge der betrachteten Paare von Landkreisen* bzw. Regionen erfolgt dabei wie zuvor erläutert nach der Ähnlichkeit in den vier Parametern. Auch hier wird die Fläche der Regionen auf die Fläche von fünf durchschnittlichen Landkreisen (4.443 km$^2$) begrenzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6 dargestellt.

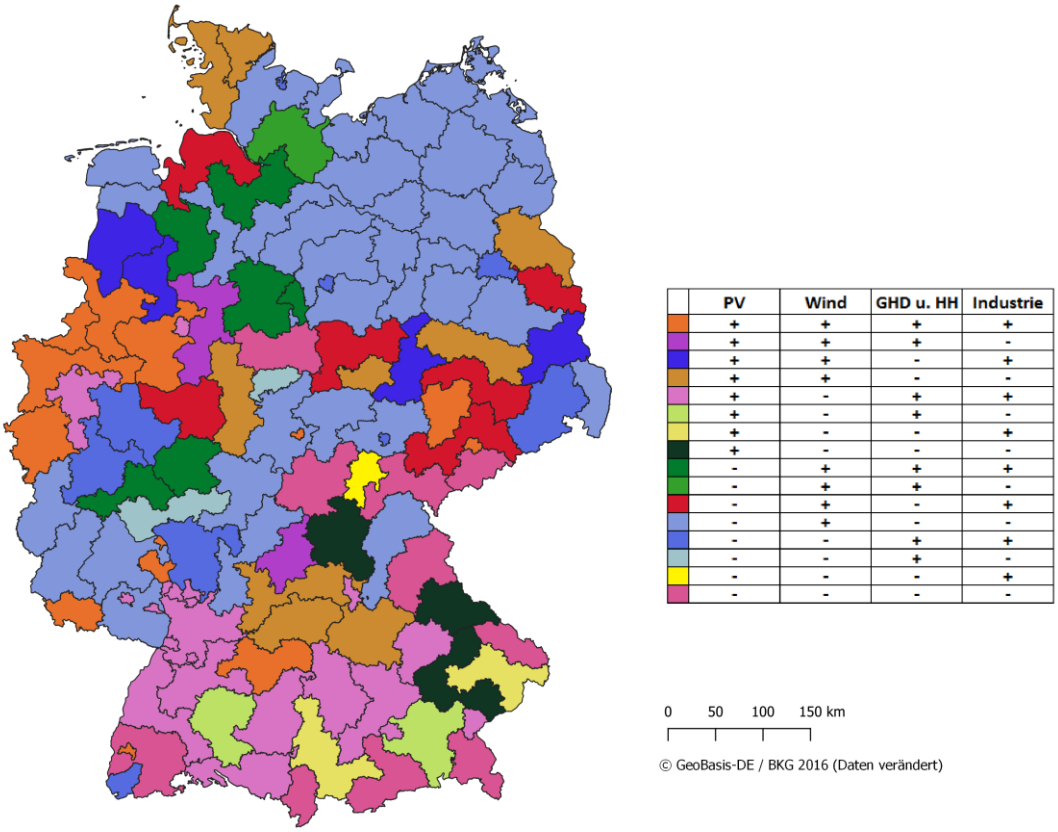


*Abbildung 6: Clusterung und Aggregation nach Median mit Größenbegrenzung*

Die abgeleiteten Regionen und damit auch deren Clusterung sind sehr ähnlich zu Ansatz 2b. Lediglich einzelne kreisfreie Städte, welche bei 2b. den umliegenden Regionen zugeordnet werden, bleiben bei Anwendung des Medians als eigene Region bestehen. Daher ist die Anzahl an Regionen hier mit 119 auch etwas höher. Auch hier besteht der unter 2b. beschriebene Nachteil durch die Größenbegrenzung, d.h. vergleicht man verschiedene Regionen, so sind sich die zugehörigen Landkreise* unterschiedlich ähnlich. Nichtsdestotrotz ist auch dieser Ansatz für weitere Untersuchungen geeignet.

# 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden verschiedene Methoden entwickelt, mit denen Deutschlands Landkreise basierend auf ihrer Erzeugungs- und Verbrauchsstruktur zu Regionen aggregiert und geclustert werden können. Die Ergebnisse unterscheiden sich hinsichtlich der Zuordnung einzelner Landkreise und damit auch in der Anzahl der resultierenden Regionen und Typregionen. Sie widersprechen sich jedoch nicht. Somit konnten für Deutschland relevante Typregionen abgeleitet und zugehörige Landkreise und Regionen entsprechend verortet werden. Lösungsansätze zur Integration von Erneuerbaren und Flexibilität können nun zwischen Regionen der gleichen Typregion übertragen werden. Die Ansätze 2b und 4 erweisen sich dabei als am besten geeignet. Zum einen sind die Resultate sehr ähnlich und

damit als robust zu betrachten. Zum anderen sind sie aufgrund der moderaten Anzahl abgeleiteter Regionen für die weitere Verwendung geeignet.

Zu beachten ist, dass die Netzsituation in den vorgestellten Verfahren nicht berücksichtigt wird. Viele der Flexibilitätsvermarktungsansätze sind netzgetrieben; für diese ist die gewählte Vorgehensweise daher nur begrenzt geeignet. Zukünftig können die entwickelten Methoden für die Ableitung von Typregionen in weiteren Ländern eingesetzt werden. Darüber hinaus können durch die Anwendung auf verschiedene Jahre Entwicklungstendenzen für die Regionen abgeschätzt werden. Die Verwendung von Regionen anstelle von Landkreisen liefert dabei im zeitlichen Verlauf robustere Ergebnisse, da extreme Entwicklungen in einzelnen Landkreisen hier weniger ins Gewicht fallen.

**Literatur**

[1] Genehmigung des Szenariorahmens für die Netzentwicklungsplanung 2019-2030. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), 2018.

[2] Corradini, Roger; Gallet, Marc; Conrad, Jochen; Schmid, Tobias: Globale Herausforderungen, regionale Lösungen - FfE-Regionalisiertes-Energiesystem-Model (FREM): Flächendeckendes, räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Energiesystemmodell. In: BWK Ausgabe 12/2014, S. 28-33. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2014.

[3] Köppl, Simon; Samweber, Florian; Bruckmeier, Andreas; Böing, Felix; Hinterstocker, Michael; Kleinertz, Britta; Konetschny, Claudia; Müller, Mathias; Schmid, Tobias; Zeiselmair, Andreas: Projekt MONA 2030: Grundlage für die Bewertung von Netzoptimierenden Maßnahmen - Teilbericht Basisdaten. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2017.

[4] Bacher, Johann; Pöge, Andreas; Wenzig, Knut: Clusteranalyse - Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. München: Oldenbourg-Verlag, 2010.

[5] Raumordnungsregionen: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/ Raumabgrenzungen/ Raumordnungsregionen/downloadangebote.html;jsessionid=80A87C0ED0C2221EB7E5B26C949465CE.live21303; Bonn: Bauinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2015.