

# Systemintegrierte Analyse konkurrierender Energieversorgungsoptionen auf kommunaler Ebene

**Maria Gröger und Thomas Bruckner**

Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement, Universität Leipzig, Grimmaische Straße 12, 04109 Leipzig, Tel: +49 (0)341-97-33522, [mgroeger@wifa.uni-leipzig.de](mailto:mgroeger@wifa.uni-leipzig.de), <http://www.wifa.uni-leipzig.de/iirm/energiemanagement>

## **Kurzfassung:**

Der Gebäudesektor stellt mit 40 % des Gesamtenergieverbrauchs den größten Energieverbraucher der Europäischen Union dar [EC, 2013]. Somit nimmt, vor dem Hintergrund der angestrebten Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die Schaffung eines energieeffizienten Gebäudebestandes eine Schlüsselrolle in der europäischen Klimaschutzpolitik ein. Die notwendige Transformation des kommunalen Energiesystems unterliegt starken Interdependenzen von Gebäude, Quartier und Energieversorgungstechnologien, die deren simultane Betrachtung erfordern. Dieses Paper liefert mit der Entwicklung und Anwendung des Modells DESCoM (De-Centralized Energy Supply Conception Model) einen methodischen Beitrag, um die Synergie von Klimaschutz, Energieeffizienz und Stadtentwicklung zu stärken. Der detaillierte bottom-up engineering Modellansatz vereint die Anforderungen der Energiesimulation, der ökologischen Bewertung sowie der Wirtschaftlichkeitsanalyse und erlaubt es, die Wechselwirkungen zwischen dem umfangreichen Angebot der Energieversorgungsoptionen unter Berücksichtigung der Heterogenität des Gebäudebestands zu analysieren. Anhand einer Fallstudie für drei Siedlungsgebiete repräsentativen Charakters, die sich hinsichtlich ihrer Gebäudestruktur und Wärmedichte deutlich voneinander unterscheiden, wird der Beitrag verschiedener Versorgungskonzepte zum kommunalen Klimaschutz evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wärmeversorgung in Quartieren mit geringer Wärmedichte kostenoptimal durch Erdgas-Brennwertkessel erfolgt, während Versorgungsgebiete höherer Wärmedichte am wirtschaftlichsten durch Fernwärme versorgt werden. Aus klimapolitischer Sicht generiert der Einsatz dezentraler Biomassekessel die höchste Emissionseinsparung bei gleichzeitig höchstem Kostenaufwand. Anhand von Energieträgerpreisvariationen konnte zudem gezeigt werden, dass effiziente Versorgungssysteme aufgrund ihres geringeren Energieaufwands robuster gegenüber Preisschwankungen sind als konventionelle Systeme. Die Ex-post Evaluation der deutschen Förderpolitik zeigt, dass das Förderdesign des KWKG von entscheidender Bedeutung für die betriebswirtschaftliche Rentabilität der zentralen Wärmeversorgung ist. Im Gegensatz dazu können die Investitionsanreize im Bereich der dezentralen Energieversorgung nicht dazu beitragen, die wirtschaftlichen Nachteile der erneuerbaren Energien zu kompensieren. Die Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Versorgungssystemen und der energetischen Gebäudesanierung hat gezeigt, dass deren Kombination zu einer Emissionsreduktion führt, die teilweise erheblich von der Summe der Emissionsreduktionswerte der Simulationen abweicht, in denen die Maßnahmen getrennt voneinander betrachtet werden.

**Keywords:** Energiesimulation, Energieeffizienz, Sanierung, Quartiersansatz

## 1 Motivation

Der Gebäudesektor stellt mit 40 % des Gesamtenergieverbrauchs den größten Energieverbraucher der Europäischen Union dar und zählt zu den Hauptemittenten von Treibhausgasen. Aufgrund geringer Neu- und Rückbauraten ist zu erwarten, dass mindestens die Hälfte des heutigen Gebäudebestandes auch im Jahr 2050 noch genutzt sein wird [EC, 2013]. Somit nimmt die energetische Sanierung und die Erhöhung der Energieeffizienz des Gebäudebestandes eine Schlüsselrolle in der europäischen Klimaschutzpolitik ein. Interdependenzen zwischen den Gebäuden und Energieversorgungsnetzen erhöhen die Komplexität der Transformation des städtischen Energiesystems und erfordern daher die Integration verschiedener räumlicher Dimensionen (*multi scale*) in der Modellierung von Energieversorgungssystemen. Daraus resultiert der Anspruch, die Anforderungen einer hinreichend genauen Modellierung auf Gebäudeebene und der notwendigen Aggregation auf Stadtebene in einem dynamischen Systemmodell zu vereinen. Dieses Paper stellt einen mehrskaligen Modellansatz vor und liefert damit einen methodischen Beitrag um die Synergie von Klimaschutz, Energieeffizienz und Stadtentwicklung nachhaltig zu stärken.

## 2 Methodik

Das Modell DESCoM (De-Centralized Energy Supply Conception Model) bildet die Grundlage für die Betrachtung der Gesamtenergieeffizienz des Wohngebäudesektors [Gröger et al., 2014; Gröger et al., 2013]. Der detaillierte bottom-up engineering Modellansatz erlaubt eine hollistische Analyse der Wechselwirkungen zwischen der Gebäudestruktur, der Durchführung energetischer Gebäudesanierungen und dem umfassenden Angebot erneuerbarer und konventioneller Energieversorgungstechnologien. Der modulare Aufbau des Modells ist in Abbildung 1 dargestellt.

DESCoM erfasst den deutschen Wohngebäudebestand durch Referenzierung auf die deutsche Gebäudetypologie [Loga et al., 2011]. Durch die Typologisierung des Gebäudebestandes können energierelevante Kriterien von Einzelgebäuden auf den Gebäudebestand einer Stadt übertragen werden. Das Modul A beschreibt die thermischen Eigenschaften der Wohngebäude anhand ihrer baulich-konstruktiven Eigenschaften in Abhängigkeit des Baualters und der Nutzungsart. Die Bilanzierung des Nutzwärmebedarfs erfolgt gemäß den Vorschriften der DIN V 4108-6, DIN V 4701-10 und DIN EN 832. Empirische Untersuchungen haben gezeigt [Osterhage et al., 2015; Loga et al., 2003], dass die Berechnung des Nutzwärmebedarfs signifikant vom tatsächlichen Wärmeverbrauch eines Gebäudes abweichen kann. Deshalb werden in DESCoM zusätzlich zu den Gebäudeeigenschaften auch die Merkmale der Nutzung, z. B. das Heiz- und Lüftungsverhalten der Nutzer in die Energiebilanzierung einbezogen. Die Variation der Bilanzparameter (z. B. der U-Werte der Gebäudehülle) erlaubt es, verschiedene Sanierungsstandards in der Energiebilanzierung abzubilden.

Das Modul B dient der Modellierung der dezentralen Energieversorgung. Die Dimensionierung und ökologische Bewertung der Versorgungstechnologien basiert auf zeitlich hoch aufgelösten Last- und Bedarfsprofilen [Hellwig, 2003; Meier et al., 1999] unter Heranziehung meteorologischer Daten. Die ökologische Bewertung von KWK-Anlagen erfolgt nach der Wärme-Restwertmethode. Dabei werden die errechneten CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten im KWK-System eingesetzten Brennstoffs um eine Stromgutschrift reduziert, deren Höhe den CO<sub>2</sub>-

Emissionen der Stromerzeugung entspricht, die durch die KWK-Anlage substituiert werden. Aufgrund der energiepolitischen Ziele der Bundesregierung wird der Anteil regenerativer Energieträger im deutschen Kraftwerkspark zukünftig steigen und der Emissionsfaktor der verdrängten Stromerzeugung abnehmen. Die Bewertung von KWK-Anlagen muss daher die Dynamik des Stromreferenzsystems antizipieren und die zeitliche Veränderung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Kraftwerkspark berücksichtigen.<sup>1</sup>

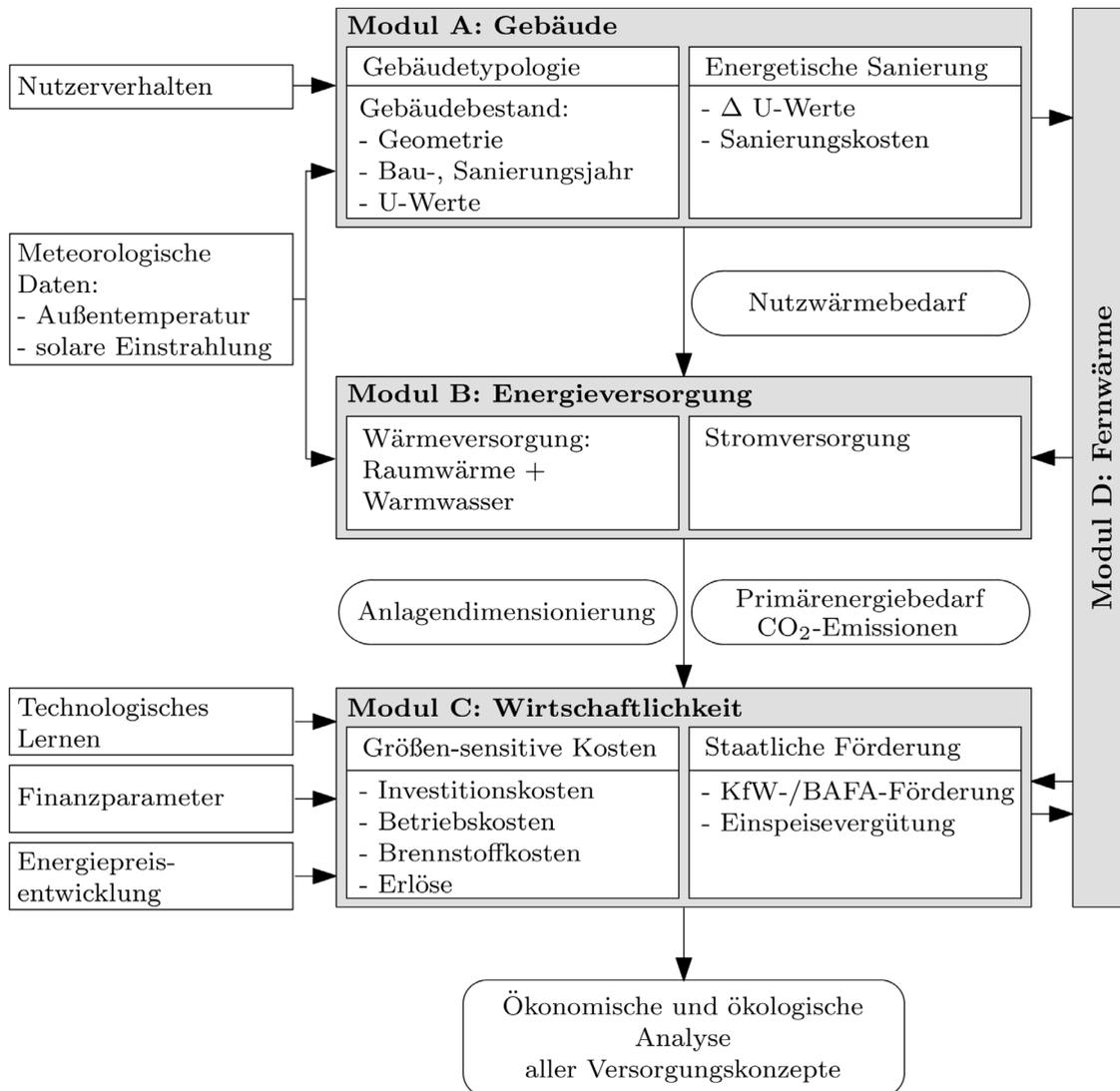


Abbildung 1: Modularer Modellaufbau von DESCoM.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Energieversorgungsoptionen im Modul C werden die Vollkosten (bestehend aus den Kostengruppen kapital-, betriebs-, bedarfsgebundene und sonstige Kosten sowie ggf. Erlöse aus der Stromerzeugung) auf Basis der annuitätischen Betrachtungsweise der VDI-Richtlinie 2067 berechnet. Eine der Haupteinflussgrößen der Wirtschaftlichkeit stellen die Investitionskosten der Systemkomponenten der einzelnen Versorgungstechnologien dar. Durch die Verwendung von Kostenfunktionen werden systemische Zusammenhänge zwischen Gebäudeheizlast und Kosten erfasst,

<sup>1</sup> Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Äquivalente des deutschen Strommix erfolgt mit dem fundamentalen europäischen Strommarktmodell MICOES-Europe (s. Abschnitt 3.2).

wodurch die von der Anlagengröße abhängige Degression der spezifischen Investitionskosten in der Modellierung berücksichtigt wird. In die Kostenermittlung werden die Systemkomponenten Wärmeerzeuger, Wärmequellenanlagen, Speicher, Tanks, Lagerräume und Anschlusskosten an externe Netze sowie das Wärmeverteilsystem im Gebäude und die Übertragungs- und Zubehörkomponenten einbezogen.

Die zentrale Lösung zur Wärmeversorgung über thermische Netze wird im Modul D abgebildet. Die technische und wirtschaftliche Modellierung der zentralen Wärmeversorgung hängt von der Gesamtwärmeleistung des Versorgungsnetzes ab, abgeleitet aus dem bilanzierten Nutzwärmebedarf in Modul A. Durch die Kopplung des Gebäudemoduls mit dem Leitungsnetz entsteht ein integrales Systemmodell zur Erfassung von Stadtquartieren. Die Auslegung der Erzeugungseinheiten und die Dimensionierung der Versorgungstrassen erfolgt stets für den Auslegungszustand. Die Struktur des Wärmeverteilungsnetzes wird durch die Straßenführung, die räumliche Anordnung der Verbraucher und die Einbindung der Wärmeerzeuger im Untersuchungsgebiet bestimmt. Leitungsnetze werden im Modell als Strahlennetze mit monozentrischer Wärmeeinspeisung ausgeführt.<sup>2</sup> Durch den Endverbraucher sind neben den Investitions- und Betriebskosten für die Hausübergabestation auch die Kosten für den Bezug von Fernwärme zu tragen (analog den Brennstoffkosten der dezentralen Versorgungssysteme). Der Fernwärmepreis wird in Modul D auf Basis des Vollkostenansatzes aus den kapital-, betriebs- und bedarfsgebundenen Kosten der Erzeugung (BHKW, Spitzenlastkessel, Umwälzpumpen) und des Wärmenetzes sowie den Erlösen aus dem KWK-Stromverkauf berechnet.

Das Zusammenspiel der vier beschriebenen Module ermöglicht schließlich die angestrebte automatisierte systemintegrierte Analyse konkurrierender Energieversorgungsoptionen auf kommunaler Ebene.

### **3 Fallstudie**

Die Fallstudie wird für drei Siedlungsgebiete mit repräsentativem Charakter durchgeführt, die sich mit Hilfe der Siedlungstypmethode nach Roth [Roth, 1980] Siedlungsformen gleicher Merkmalsausprägung (Siedlungstypen) zuordnen lassen. Die betrachteten Modellquartiere (MQ) entsprechen sog. Siedlungszellen, d. h. Versorgungsgebieten, in denen ein einzelner Siedlungstyp vorherrscht. Die siedlungsstrukturellen Merkmale der Modellquartiere beruhen auf Daten der Großen Kreisstadt Delitzsch im Nordwesten des Freistaates Sachsen, deren Bevölkerungszahl zum 30.06.2015 24.889 Einwohner umfasste [StaLA Sachsen, 2015]. Die Ergebnisse der Fallstudie lassen sich somit auf kleine Mittelstädte mit mindestens 20.000 und unter 50.000 Einwohnern übertragen.

#### **3.1 Beschreibung der Modellquartiere**

MQ 1 repräsentiert den Siedlungstyp 1, eine klassische Einfamilienhaussiedlung am Stadtrand mit dichtem geometrisch angelegtem Erschließungsnetz. MQ 2 kann dem Siedlungstyp 8

---

<sup>2</sup> Randbedingungen der Modellierung: Heißwassernetz mit Zweileitersystem, kanalfreie Verlegung, Kunststoffmantelrohrsystem, konstanter Volumenstrom, gleitende Vorlauftemperatur zur Bedarfsanpassung, Temperaturspreizung: 90/70 °C

zugeordnet werden, der mittelalterlichen Altstadt in zentraler Lage mit hoher Bebauungsdichte, geschlossener Bebauung und verwinkelten Straßen. MQ 3 entspricht dem Siedlungstyp 5, der meist in Randlage von Städten angeordnet ist und sich aus großen Mehrfamilienhäusern mit großen Gebäudeabständen und grobmaschigem Erschließungsnetz zusammensetzt.

Ausgangspunkt der räumlich hochaufgelösten Wärmebedarfsermittlung in den Quartieren bilden Gemeindedaten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK); diese Grunddaten werden zur Bestimmung der Gebäudevolumina um Orthofotos und dreidimensionale LIDAR-Daten<sup>3</sup> ergänzt. Unvollständige Eingangsdaten wurden durch eigene Annahmen vervollständigt, somit stellen die Modellergebnisse Näherungswerte der Ist-Situation vor Ort dar. Durch das Zusammenführen der Kenndaten der Gebäudetypologie mit den Gebäudevolumina aus dem Laserscanning-Verfahren und den Attributdaten zum Gebäudebestand kann der Nutzwärmebedarf für jedes Gebäude im Untersuchungsgebiet berechnet werden. Dieser stellt einen wichtigen Parameter zur Bestimmung der Vollkosten der Energieversorgungskonzepte dar. Die Abbildung 2 zeigt die Verteilung des spezifischen Nutzwärmebedarfs in den Modellquartieren. Aufgrund der Heterogenität der Baualtersklassen und des Sanierungsstandes einzelner Gebäude variiert  $Q_{Nutz}$  innerhalb der Gebäudetypen.

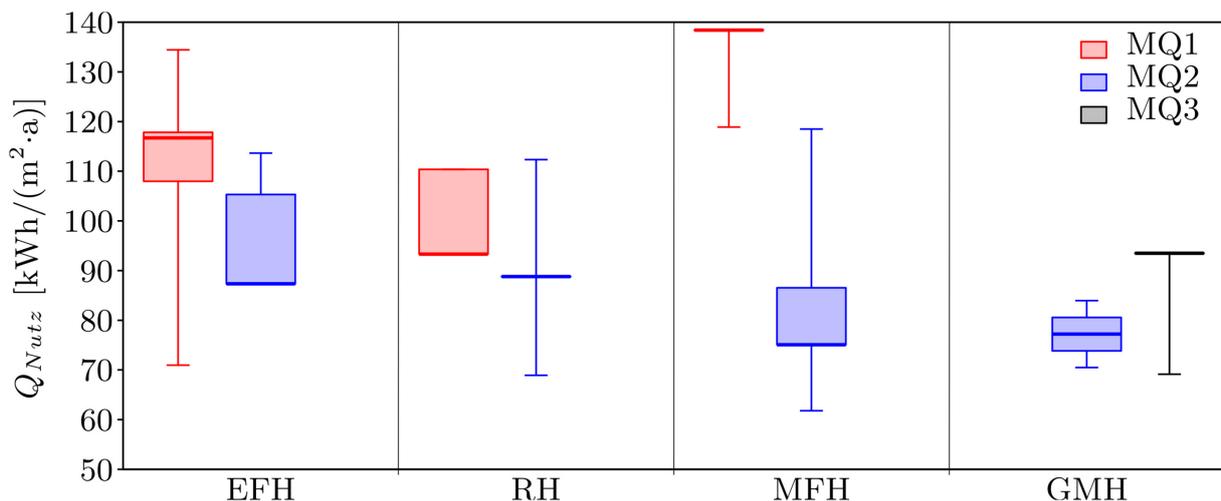


Abbildung 2: Verteilung des spezifischen Nutzwärmebedarfs in den Modellquartieren (Abk.: EFH = Einfamilienhaus, RH = Reihenhaus, MFH = Mehrfamilienhaus, GMH = großes Mehrfamilienhaus).

In die Modellierung der Wärmenetze auf Quartiersebene gehen zudem Daten aus dem Amtlichen Topografisch-Kartografischen Informationssystem (ATKIS) zur Land- und Flächennutzung und zu Verkehrswegen<sup>4</sup> ein.

<sup>3</sup> Entfernungs- bzw. Höhendaten, die bei einem Überflug mithilfe eines laserbasierten LIDAR-Systems (Light detection and ranging) erhoben wurden.

<sup>4</sup> Der Annahme folgend, dass die Hauptverteilungsleitungen des Wärmenetzes entlang des Straßennetzes verlegt werden, bilden die kartografisch dokumentierten Verkehrswege die Grundlage zur Berechnung der Netzbaukosten.

### 3.2 Rahmenannahmen der Szenariendefinition

Die ökonomische und ökologische Bewertung der in Tabelle 1 zusammengefassten Versorgungskonzepte unterliegt verschiedenen sensitiven Einflussfaktoren, deren Einflussgröße in vier Szenarien untersucht wird. Dabei definiert das Szenario 1 den Benchmark der Einsparpotenziale der Modellquartiere.

Tabelle 1: Betrachtete Versorgungskonzepte.

Variante	Wärmeversorgung	Stromversorgung
Ref	Erdgas-Niedertemperaturkessel	Stromnetz
BW HO	Heizöl-Brennwertkessel	Stromnetz
BW EG	Erdgas-Brennwertkessel	Stromnetz
BW EG sWW	Erdgas-Brennwertkessel mit solarer Warmwasserbereitung	Stromnetz
BW EG sWW+H	Erdgas-Brennwertkessel mit solarer Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung	Stromnetz
BHKW	Mikro-/Mini-KWK	Stromnetz
FW	Fernwärme	Stromnetz
LWW	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Stromnetz
SWW	Sole-Wasser-Wärmepumpe	Stromnetz
HP	Holzpelletkessel	Stromnetz
HS	Hackschnitzelkessel	Stromnetz
NSO	Nachtstromspeicherofen	Stromnetz
PV+Ref	Erdgas-Niedertemperaturkessel	netzgekoppelte PV-Anlage

Die annuitätische Berechnung erfolgt für einen Betrachtungszeitraum von 25 Jahren (2015-2039), einen Kalkulationszinssatz von 6,0 % nominal und eine Inflationsrate von 2 %. Die zugrunde liegende Energieträgerpreisentwicklung orientiert sich an der BMU-Leitstudie (mäßig=Preispfad B, deutlich=Preispfad A). Die Haushaltsstrompreise basieren auf einer Projektion der Spotmarktpreise, welche mit dem fundamentalen europäischen Strommarktmodell MICOES-Europe<sup>5</sup> ermittelt wurden. Im Rahmen eines gemischt-ganzzahligen Lösungsansatzes liefert das Modell die an der European Energy Exchange zu erwartenden Spotmarktpreise sowie die stündlichen Betriebsprofile der Kraftwerke und deren CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Ein wichtiger Einflussfaktor für die Wirtschaftlichkeit der Versorgungsoptionen ist der energetische Gebäudezustand. Daher werden neben dem Ist-Zustand in Abhängigkeit des Bau- und ggf. Sanierungsjahres auch die Auswirkungen einer Vollsanierung gemäß dem

---

<sup>5</sup> Eine ausführliche Modellbeschreibung zu MICOES-Europe (Mixed Integer Cost Optimization Electricity System for Europe) findet sich in [Böttger et al., 2015].

Effizienzniveau der Energieeinsparverordnung EnEV 2014 betrachtet. Durch die Möglichkeit Fördermaßnahmen in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einzubeziehen, kann zusätzlich zur volkswirtschaftlichen Analyse auch die betriebswirtschaftliche Perspektive eingenommen werden, welche die Auswirkungen politisch bedingter Rahmensetzungen als Folge der aktuellen Energie- und Klimapolitik berücksichtigt. Folgende Förderinstrumente werden in das Szenario 3 einbezogen:

- Fördermaßnahmen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt für Solarthermie-, Biomasseanlagen und Wärmepumpen,
- BAFA-Investitionszuschüsse für KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung bis 20 kW<sub>el</sub>,
- Förderdesign des KWKG (arbeitsseitige Förderung der KWK-Stromerzeugung sowie Investitionszuschüsse für den Neubau von Wärmenetzen),
- EEG-Vergütung für PV-Stromerzeugung.

Tabelle 2: Rahmenannahmen der Szenarioanalyse.

Szenario	Energiepreis-entwicklung	Staatliche Förderinstrumente	Gebäude-Effizienzstandard
1	mäßig	nein	Ist-Zustand
2	deutlich	nein	Ist-Zustand
3	mäßig	ja	Ist-Zustand
4	mäßig	nein	Vollsanierung EnEV 2014

## 4 Ergebnisse

Zwischen den Zielen Kosteneinsparung und kommunaler Klimaschutz besteht ein sogenannter Trade-off, der im Kontext der Umweltökonomie eine wechselseitig negative Beziehung zwischen den Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Versorgungsoptionen beschreibt. Die Abbildung 3 zeigt die Trade-off-Beziehungen der untersuchten Versorgungskonzepte in den Modellquartieren.<sup>6</sup> Der Trade-off der dezentralen Technologien ergibt in allen drei Quartieren ein ähnliches Bild, da hierbei nur gebäudespezifische Eigenschaften nicht aber siedlungsstrukturelle Merkmale zum Tragen kommen. Eine Verschlechterung ggü. dem Referenzsystem resultiert aus den Optionen BW HO und NSO, weil deren Einsatz eine Kostensteigerung bei gleichzeitigem Mehrausstoß an CO<sub>2</sub>-Emissionen generiert. Der BW EG erzielt in allen Quartieren vergleichbar hohe Einsparungen hinsichtlich Kosten (3-4 %) und Emissionen (ca. 9 %). Durch den bivalenten Betrieb mit einer Solarthermieanlage kann die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes mehr als verdoppelt werden, die Kosteneinsparung wird jedoch reduziert und sinkt für den Anwendungsfall BW EG+sWW+H in MQ 2 sogar in den negativen Bereich (-1,7 %).

---

<sup>6</sup> Dargestellt ist die jeweilige Einsparung in Bezug auf das Gesamtquartier, wobei unterstellt wird, dass das entsprechende Versorgungskonzept in allen Gebäuden des Quartiers zum Einsatz kommt.

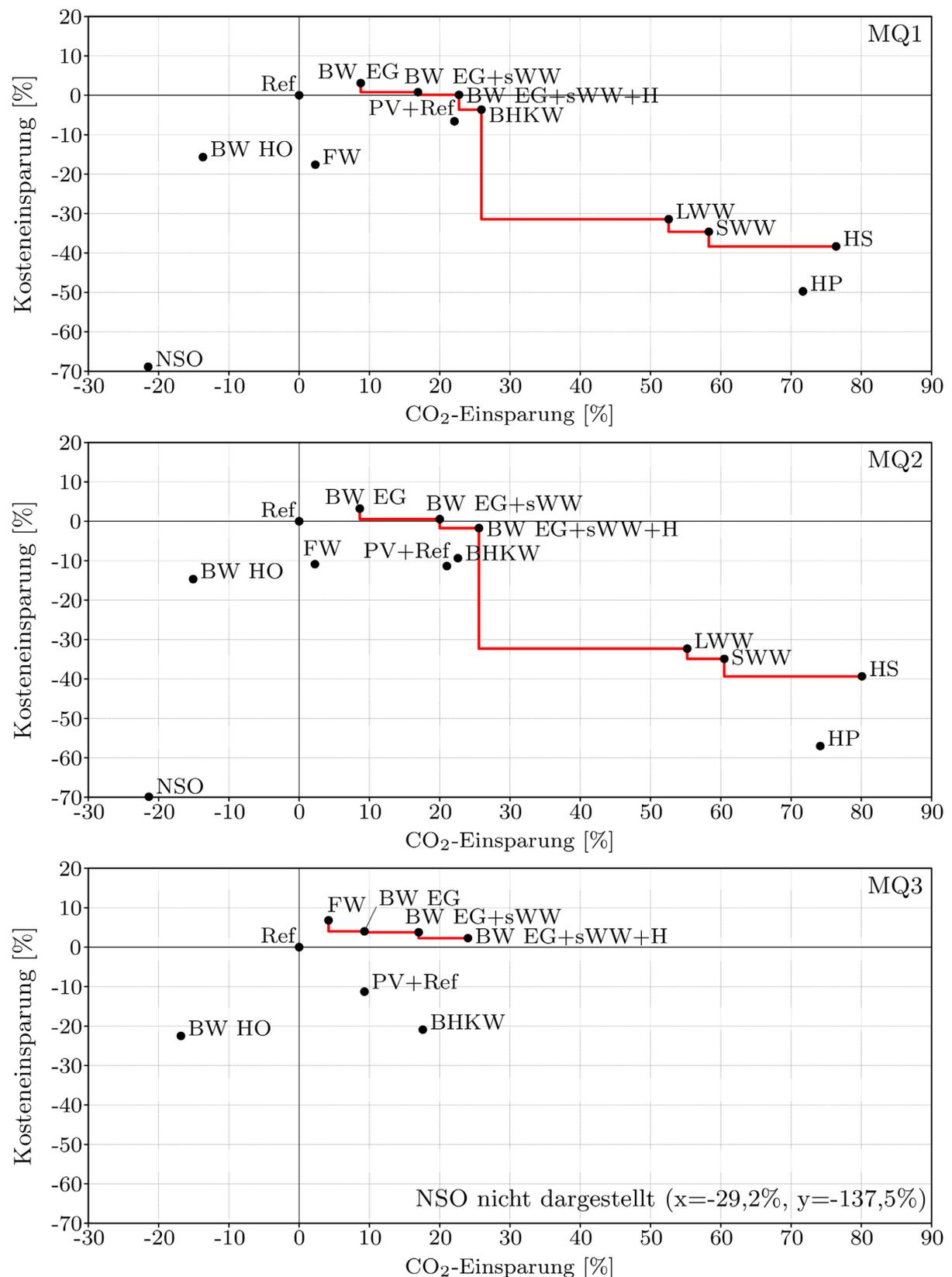


Abbildung 3: Trade-off der Kosten- und Emissionseinsparung im Szenario 1.

Die Schwankungsbreite der Trade-off-Beziehung der PV-Anlage wird durch die unterschiedliche Gebäudestruktur der Quartiere begründet. MQ 1 besitzt mit rund 94 % den höchsten Anteil der Gebäudetypen EFH und RH, während sich MQ 3 nur aus großen

Mehrfamilienhäusern zusammensetzt. Der elektrische Energieertrag und somit die mögliche CO<sub>2</sub>-Einsparung durch die PV-Anlage hängt von der nutzbaren Dachfläche ab. Je geringer das Verhältnis von Dachfläche zu Gebäudenutzfläche ausfällt, desto geringer ist auch der Beitrag, den die PV-Anlage zur Reduktion der Gesamtemissionen des Versorgungskonzeptes leisten kann. Für die Wirtschaftlichkeit der dezentralen BHKW spielt die Höhe der Eigenstromnutzung eine wichtige Rolle. Je höher die Eigennutzungsquote, desto ausgeprägter ist die ökonomische Konkurrenzfähigkeit der BHKH. Somit zeigt die Einzelobjektversorgung durch KWK-Anlagen aufgrund der gebäudetypabhängigen Stromnutzungsvarianten<sup>7</sup> und dem hohen Anteil an EFH und RH die besten Einsparpotenziale in MQ 1. Die höchsten Emissionseinsparungen werden durch die Wärmepumpen und die biogenen Festbrennstoffe erzielt, gleichzeitig erfordern diese Versorgungsoptionen die höchsten Kostensteigerungen.<sup>8</sup> Die beste Klimaschutzmaßnahme stellt die Wärmeversorgung mit einem Holzhackschnitzelkessel dar.

Im Gegensatz zu den dezentralen Maßnahmen zeigt die Trade-off-Beziehung der Fernwärmeversorgung wegen des Zusammenhangs zwischen Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystem ein deutlich differenziertes Bild in den Modellquartieren. Die Konkurrenzfähigkeit der Fernwärme ist von der Wärmedichte des untersuchten Quartiers abhängig.<sup>9</sup>

Zur Ableitung wirtschafts- bzw. umweltpolitischer Empfehlungen wird an dieser Stelle das mikroökonomische Konzept der Pareto-Effizienz herangezogen. Im Sinne der Umweltökonomie gilt ein Zustand als pareto-effizient, wenn der Grenznutzen der Umweltbelastungen in Form eingesparter Kosten gerade den erwarteten Grenzschäden entspricht [Feess und Seeliger, 2013]. Der Zustand aus Kosten- und Emissionseinsparung heißt pareto-effiziente Lösung, wenn keine der beiden Eigenschaften verbessert werden kann, ohne zugleich die andere zu verschlechtern. Die Menge pareto-optimaler Lösungen wird in Abbildung 3 durch die pareto-optimale Front (rote Linie) visualisiert. In MQ 1 und 2, deren Wärmedichte < 18 MW/km<sup>2</sup> beträgt, wird das Maximum der Kosteneinsparung durch den Erdgas-Brennwertkessel generiert, wohingegen in MQ 3 die Versorgung mit Fernwärme die pareto-effiziente Lösung hinsichtlich Kosteneinsparung darstellt. Eine Verbesserung der Emissionseinsparung geht nur mit einer Verschlechterung der Kosteneinsparung einher. Relevanz haben dabei nur die auf der pareto-optimalen Front liegenden Versorgungsoptionen, alle anderen Maßnahmen stellen pareto-ineffiziente Zustände dar.

Die ökonomischen Auswirkungen der in Abschnitt 3.2 definierten Einflussgrößen sind zusammenfassend in Abbildung 4 dargestellt. Die angegebenen prozentualen Änderungen beziehen sich auf die Ergebnisse im Szenario 1, das als Basisszenario den Benchmark der Einsparpotenziale der Modellquartiere definiert. Energiepreissteigerungen und die kombinierte Durchführung der energetischen Sanierung (Vollsanierung) wirken sich grundsätzlich negativ auf die Vollkosten der verschiedenen Energieversorgungsoptionen aus, während staatliche

---

<sup>7</sup> Es werden zwei Nutzungsvarianten im Modell unterschieden: 1) die Eigennutzung mit Rückspeisung und Restbezug im Einfamilien- bzw. Reihenhauser und 2) die Volleinspeisung im Bereich der Mehrfamilienhäuser.

<sup>8</sup> Diese Versorgungsoptionen stehen nur in Gebäuden mit Heizlasten  $\leq 100$  kW zur Auswahl, daher werden sie in MQ 3 nicht betrachtet.

<sup>9</sup> MQ 1: 13,2 MW/km<sup>2</sup>, MQ 2: 17,4 MW/km<sup>2</sup>, MQ 3: 32,0 MW/km<sup>2</sup>

Fördermittel einen positiven Effekt ausüben. Hinsichtlich der Intensität der Auswirkungen der Einflussfaktoren zeigt Abbildung 4 jedoch technologiespezifische Unterschiede.

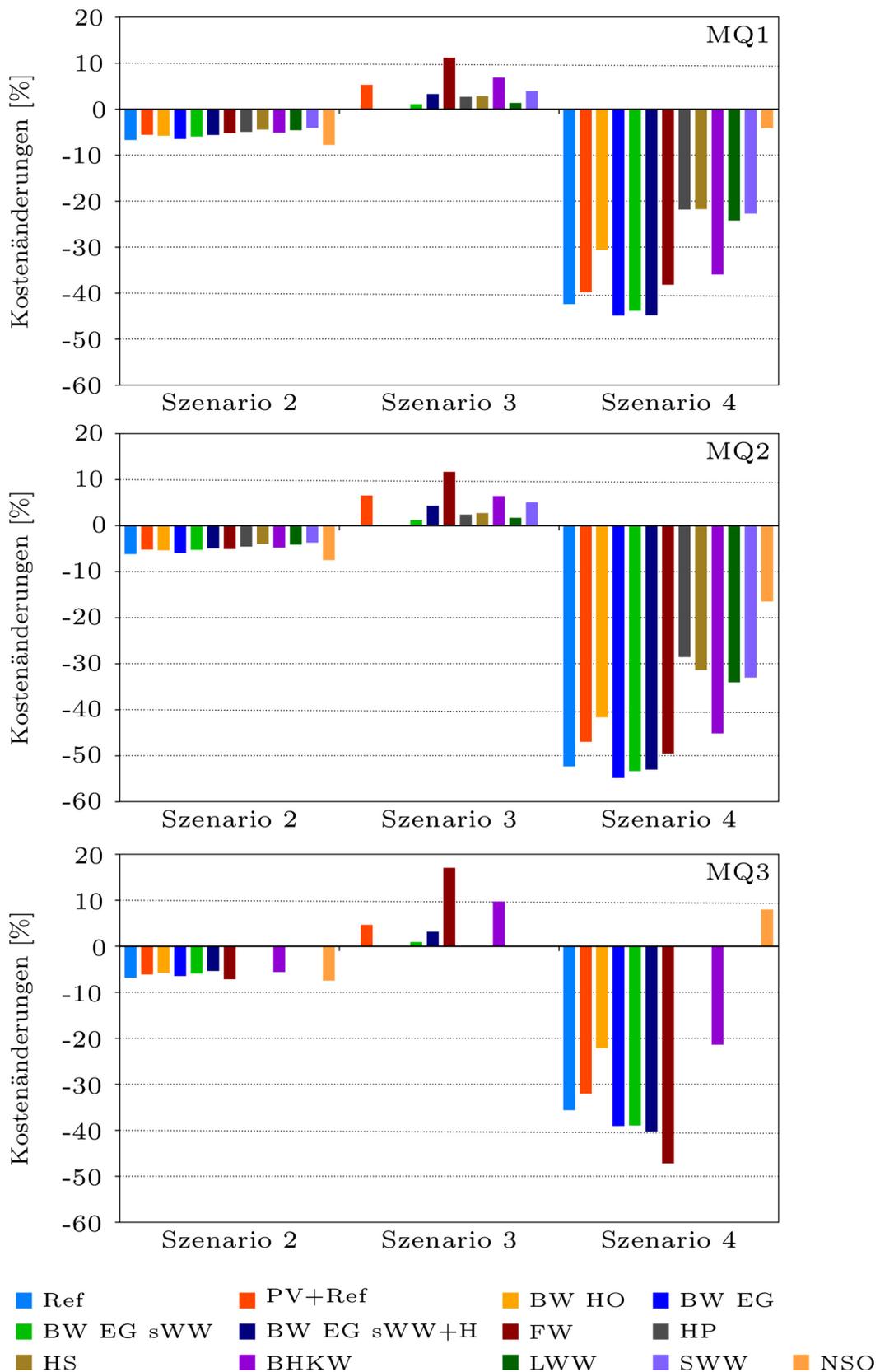


Abbildung 4: Einfluss der Szenariodefinition auf die Vollkosten der Versorgungsoptionen.

## 5 Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die Wärmeversorgung in Quartieren mit geringer Wärmedichte kostenoptimal durch Erdgas-Brennwertkessel erfolgt. Wie zu erwarten war, stellt in Versorgungsgebieten höherer Wärmedichte die zentrale Wärmeversorgung die wirtschaftlichste Alternative dar. Aus klimapolitischer Sicht generiert der Einsatz dezentraler Biomassekessel die höchste Emissionseinsparung bei gleichzeitig höchstem Kostenaufwand. Anhand der Energieträgerpreisvariationen konnte zudem gezeigt werden, dass effiziente Versorgungssysteme aufgrund ihres geringeren Energieaufwands robuster gegenüber Preisschwankungen sind als konventionelle Systeme.

Die Ergebnisse der Ex-post Evaluation der deutschen Förderpolitik deuten an, dass das Förderdesign des KWKG, das sowohl die arbeitsseitige Förderung der KWK-Stromerzeugung als auch die Investitionszuschüsse für den Neubau von Wärmenetzen beinhaltet, von entscheidender Bedeutung für die betriebswirtschaftliche Rentabilität der zentralen Wärmeversorgung ist. Im Gegensatz dazu können die Investitionsanreize im Bereich der dezentralen Energieversorgung nicht dazu beitragen, die wirtschaftlichen Nachteile der erneuerbaren Energien zu kompensieren.

Aus der Analyse der Wechselwirkungen zwischen den Versorgungssystemen und der energetischen Gebäudesanierung resultiert, dass trotz des hohen Kostenmehraufwands deren Kombination zu einer Emissionsreduktion führt, die teilweise erheblich von der Summe der Emissionsreduktionswerte der Simulationen abweicht, in denen die Maßnahmen getrennt voneinander betrachtet werden.

Die Modellergebnisse zeigen auf, dass zur Identifizierung kostenoptimaler Emissionsminderungspfade nicht auf die integrierte Analyse der verschiedenen Energieversorgungsoptionen verzichtet werden kann.

## Literatur

- [Böttger et al., 2015] Böttger, D., Götz, M., Theofilidi, M., Bruckner, T.: Control power provision with power-to-heat plants in systems with high shares of renewable energy sources - An illustrative analysis for Germany based on the use of electric boilers in district heating grids. In: *Energy* 82 (2015), S. 157–167.
- [EC, 2013] European Commission: Energy-efficient buildings. Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020 – ISBN: 978-92-79-31239-7
- [Feess und Seeliger, 2013] Feess, E., Seeliger, A.: Umweltökonomie und Umweltpolitik. 4. Auflage, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 2013
- [Gröger et al., 2014] Gröger, M., Verhoog, M., Weinsziehr, T., Buchmann, C., Grunert, P., Bruckner, T.: Integrierte Modellierung urbaner Energiesysteme. In: Christen, G., Hamman, P., Jehling, M., Wintz, M. (Hrsg.): *Systèmes énergétiques renouvelables en*

- France et en Allemagne, analyse socio-économique, synergies et divergences. Editions Orizons, Paris, 2014, S. 253–275.
- [Gröger et al., 2013] Gröger M., Koepke M., Bruckner T.: End use energy efficiency in residential buildings: Modeling decentralized solutions for the energy supply of private households, Energy for Sustainability 2013, “Sustainable Cities: Designing for People and the Planet”, Coimbra University, 8.-10.09.2013, Coimbra, Portugal.
- [Hellwig, 2003] Hellwig, M.: Entwicklung und Anwendung parametrisierter Standard-Lastprofile. Technische Universität München, 2003 Dissertation.
- [Loga et al., 2011] Loga, T., Diefenbach, N., Born, R.: Deutsche Gebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut für Wohnen und Umwelt (IWU), 2011, Darmstadt.
- [Loga et al., 2003] Loga, T., Großklos, M., Knissel, J.: Der Einfluss des Gebäudestandards und des Nutzerverhaltens auf die Heizkosten – Konsequenzen für die verbrauchsabhängige Abrechnung. Institut Wohnen und Umwelt GmbH (IWU), 2003, Darmstadt.
- [Meier et al., 1999] Meier, H.; Fünfgeld, C., Adam, T.; Schieferdecker, B.: Repräsentative VDEW-Lastprofile. Brandenburgische Technische Universität Cottbus; 1999.
- [Osterhage et al., 2015] Osterhage, T., Cali, D., Streblow, R., Müller, D.: Ergebnisse einer energetischen Sanierung: Abweichung zwischen Energiebedarf und Verbrauch – ist nur der Nutzer Schuld? In: *Bauphysik* 37 (2015), Nr. 2, S. 100–104.
- [Roth, 1980] Roth, U.: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen. Schriftenreihe des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 1980.
- [StaLA Sachsen, 2015] Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen (Hrsg.): Bevölkerungsstand des Freistaates Sachsen nach Kreisfreien Städten und Landkreisen, 2015. [https://www.statistik.sachsen.de/download/010\\_GB-Bev/Bev\\_Z\\_Gemeinde\\_akt.pdf](https://www.statistik.sachsen.de/download/010_GB-Bev/Bev_Z_Gemeinde_akt.pdf)