

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die gegenwärtige europäische und zunehmend auch die weltweite Umweltpolitik ist geprägt von dem Bestreben, geeignete Strategien zum Klimaschutz zu entwickeln. Mit der Unterzeichnung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997 verpflichtete sich die Europäische Union zur Reduktion der Treibhausgasemissionen um 8 % gegenüber dem Jahr 1990 bis zum Ende der ersten Verpflichtungsperiode im Jahr 2012. Derzeit scheitern jedoch die Bemühungen um ein Nachfolgeprotokoll auf politischer Ebene, weshalb kein weltweit koordiniertes Vorgehen erkennbar ist. Deutschland versucht dennoch durch weitere Selbstverpflichtungen international eine Vorreiterrolle beim Klimaschutz einzunehmen. Die hoch gesteckten Ziele äußern sich in einer Reihe regulatorischer Maßnahmen wie bspw. dem Gesetz für den Vorrang erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) oder dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung, besser bekannt unter dem Namen KWK-Gesetz (KWKG). Beide Gesetze adressieren je eine der Säulen zur Entwicklung einer nachhaltigeren Energiewirtschaft: die Erschließung alternativer, möglichst CO₂-neutraler Energiequellen sowie die Maximierung der Effizienz bei der Nutzung fossiler Energieträger.

Ein wesentlicher Baustein für den letztgenannten Aspekt ist das Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). In Prozessen, die ausschließlich der Stromproduktion dienen, wird ein Großteil der im Brennstoff gebundenen chemischen Energie in Form von Abwärme ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Im Fall reiner Heizprozesse wird ausschließlich Wärme als Produkt bereitgestellt, wodurch der hohe Exergiegehalt von Brennstoffen wie bspw. Erdgas ungenutzt bleibt. KWK-Technologien nutzen hingegen beide der genannten Produkte, indem neben der erzeugten elektrischen Energie auch das Kuppelprodukt Wärme der Nutzung zugeführt wird. Da daraus hohe Brennstoffausnutzungsgrade resultieren, ist es ein politisches Ziel, den Anteil der KWK-Stromerzeugung bis zum Jahr 2020 auf 25 % zu erhöhen. Dies macht, angesichts des heutigen Anteils von etwa 12,5 %, auch die Nutzung wirtschaftlich schwer erschließbarer Potenziale wünschenswert (AGEB, 2012; BRD, 2012b).

Das KWK-Prinzip findet bereits in vielen Bereichen Anwendung. Neben Großkraftwerken, die Prozesswärme für die Industrie bereitstellen oder große Fernwärmenetze versorgen, etablieren sich zunehmend auch sogenannte Mikro-KWK-Anlagen zur Versorgung von Nahwärmenetzen, Krankenhäusern, Bürogebäuden oder Mehrfamilien- bis hin zu Einfamilienhäusern und einzelnen Haushalten. Verbreiteten Definitionen und den Abgrenzungen des KWKG folgend erstreckt sich der Leistungsbereich von Mikro-KWK-Anlagen etwa von 1-50 Kilowatt elektrischer Leistung. Allerdings leiden insbesondere sehr kleine Anlagen im niedrigen einstelligen Leistungsbereich unter einer heute noch mangelhaften Wirtschaftlichkeit, was sich in ihrer derzeit geringen Verbreitung widerspiegelt. Andererseits ist eben dieser Sektor von besonderem Interesse, da für kleine Anlagen, bspw. zur Versorgung von Einzelhaushalten, ein erhebliches technisches Potenzial besteht (Horst et al., 2011; Droste-Franke et al., 2009; Jungbluth, 2006).

Der Anteil des Haushaltssektors am Endenergieverbrauch Deutschlands betrug im Jahr 2010 ca. 28,5 %. Er bewegt sich somit in der Größenordnung des Anteils des gesamten Verkehrssektors, der mit etwa 28 % ebenfalls eine wesentliche Rolle einnimmt (AGEB, 2012). Der Straßenverkehr hat wiederum einen Anteil von ca. 80 %, bezogen auf den Endenergieverbrauch im Verkehrssektor (BMVBS, 2011). Entsprechend trägt auch der motorisierte Individualverkehr (MIV) einen signifikanten Teil zur Gesamtenergiebilanz einzelner Haushalte bei.

Die benötigte Endenergie im Haushaltssektor teilt sich auf die beiden Endenergieformen thermischer und elektrischer Energie auf. Während etwa 75-80 % der Endenergie auf die Deckung der Wärmenachfrage entfallen, beträgt der Anteil des Stroms ca. 20-25 % (AGEB, 2012). Hierbei ist bemerkenswert, dass die Stromversorgung weiterhin vor allem zentralisiert erfolgt, während die Wärmeversorgung stark dezentralisiert ausgeführt ist. Im Gegensatz zur verlustarmen Transportfähigkeit elektrischer Energie ist die Verteilung von Wärme mit hohen Übertragungsverlusten behaftet. Infolgedessen hat sich für den Betrieb dezentraler Heizungsanlagen neben der lokalen Lagerung großer Brennstoffmengen die leitungsgebundene Verteilung von Erdgas durchgesetzt. Allerdings gehen mit der ungekoppelten Versorgung von Haushalten mit thermischer und elektrischer Energie hohe Effizienzverluste einher. Hier setzt das Prinzip von Mikro-KWK-Anlagen an, die direkt im Haushalt thermische und elektrische Energie in einem gekoppelten Prozess bereitstellen. Dies führt zur angestrebten Steigerung des Brennstoffausnutzungsgrads und dadurch auch zu reduzierten Emissionen im Vergleich zur ungekoppelten Versorgung (Pehnt u. Colijn, 2006).

Andererseits deutet sich auch im Bereich des MIV seit einigen Jahren ein Umbruch von großer Tragweite an. Während seit vielen Jahrzehnten die Bereitstellung der Energie im Verkehrssektor fast ausschließlich aus Mineralölen erfolgte, zeichnet es sich nunmehr ab, dass zukünftig gewisse Teile des MIV und des Wirtschaftsverkehrs durch Elektrofahrzeuge abgedeckt werden. Dieser Wandel hat großen Einfluss auf die Versorgungssituation von Haushalten, da bei der Nutzung eines Elektrofahrzeugs zukünftig ein Teil der Energie für die individuelle Mobilität direkt im Haushalt in Form elektrischer Energie nachgefragt wird.

Heute werden Mikro-KWK-Anlagen nahezu ausschließlich wärmegeführt betrieben, was bedeutet, dass sich die Zeiträume des Betriebs ausschließlich am lokalen Wärmebedarf des versorgten Haushalts bzw. am Speicherstand des thermischen Pufferspeichers orientieren. Um ökonomische Vorteile zu generieren, wäre es jedoch wünschenswert, den Anlagenbetrieb unter Einbezug der gesamten Nachfragestruktur des versorgten Haushalts, also auch inklusive der Elektrizitätsnachfrage, im Voraus zu planen. Neben der Möglichkeit einer zeitlichen Verschiebung des Mikro-KWK-Anlagenbetriebs, sollten bei einer entsprechenden Planung auch nachfrageseitige Flexibilitätspotenziale berücksichtigt werden, die zukünftig in besonderem Maß durch die Möglichkeit des gesteuerten Ladens eines Elektrofahrzeugs entstehen könnten. Ein entsprechender Planungsansatz ist im Detail besonders durch folgende Punkte motiviert:

- Der Eigenverbrauch lokal erzeugter elektrischer Energie ist aus Sicht des Anlagenbetreibers nach heutiger Gesetzgebung der Einspeisung vorzuziehen. Da die Anlagenbetriebsdauer jedoch durch den Wärmebedarf des Haushaltes gedeckelt ist, stellt sich die Frage, zu welchen Zeiten die Anlage optimal eingesetzt werden sollte (BRD, 2012b).
- Viele Mikro-KWK-Anlagen sind aufgrund technischer Restriktionen (möglichst geringe Taktzahl, feste Betriebspunkte, Mindestbetriebsdauer, ...) nicht ausreichend flexibel für einen Lastfolgebetrieb. Dies gilt besonders für zukunftssträchtige und hocheffiziente brennstoffzellenbasierte Anlagen. Heute werden die Anlagen deshalb nahezu ausschließlich wärmegeführt und ohne Berücksichtigung der lokalen Stromnachfragestruktur betrieben. Aus ökonomischer Sicht ist jedoch eine Betriebsweise anzustreben, welche sicherstellt, dass der Betrieb bevorzugt dann erfolgt, wenn die elektrische Last im Haushalt einen möglichst hohen Eigenverbrauch der vor Ort erzeugten Elektrizität erlaubt.
- Zur Ableitung eines dahingehend optimierten Fahrplans ist die kurzfristige Kenntnis zukünftiger haushaltsindividueller elektrischer und thermischer Lastgänge notwendig. Einzelhaushalte sind jedoch vor allem in Hinblick auf ihre elektrischen Lastgänge aufgrund des starken Einflusses individuellen Bewohnerverhaltens nicht hinreichend standardisierbar. Es werden deshalb besondere Methoden benötigt, um der Unsicherheit der zukünftigen Nachfragestruktur für jeden untersuchten Haushalt individuell zu begegnen.
- Die erwartete zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen hat einen signifikanten Einfluss auf die Energiebedarfsstruktur betroffener Einzelhaushalte. Sowohl die Höhe der Stromnachfrage als auch deren zeitlicher Verlauf wird durch das heimische Laden eines Elektrofahrzeugs maßgeblich beeinflusst. Andererseits bietet die Steuerung des Ladevorgangs im Rahmen seiner zeitlichen und technischen Restriktionen ein hohes Flexibilitätspotenzial auf der Nachfrageseite, das in enger Wechselwirkung mit dem Fahrplan einer Mikro-KWK-Anlage steht. Dieses Potenzial ist besonders von Interesse, da dessen Nutzung im Gegensatz zur Steuerung von Haushaltsgeräten nur geringe Komforteinbußen verursacht und gleichzeitig ein hohes energetisches Verschiebepotenzial bietet.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung eines in der Realität einsetzbaren Modellsystems zur täglichen haushaltsindividuellen ökonomischen Optimierung des Fahrplans hocheffizienter brennstoffzellenbasierter Mikro-KWK-Anlagen unter Einbezug des gesteuerten Ladens eines eventuell vorhandenen Elektrofahrzeugs. Hierzu sind zunächst alle relevanten techno-ökonomischen Charakteristika des gesamten Hausenergiesystems in die Modellierung des Planungsproblems zu integrieren sowie geeignete Methoden für dessen Lösung zu identifizieren. Da darüber hinaus der kurzfristige zukünftige Verlauf der Haushaltsnachfrage nach Strom und Wärme entscheidend für die Fahrplan- und Ladeoptimierung ist, soll der diesbezüglich in der Realität herrschenden Unsicherheit mit Hilfe eines prädiktiven Optimierungsansatzes besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Ein weiterer Fokus liegt darüber hinaus auf der stringenten Einordnung der erzielten Ergebnisse einerseits gegenüber dem Referenzfall des wärmegeführten Anlagenbetriebs und gleichverteilten Ladens des Elektrofahrzeugs und andererseits dem, aufgrund der genannten Unsicherheiten, nur theoretisch erreichbaren optimalen Betrieb.

Für hocheffiziente brennstoffzellenbasierte Anlagen, die in ihrem Betriebsverhalten aufgrund technischer Restriktionen nicht flexibel genug sind, um der auftretenden Haushaltslast in Echtzeit zu folgen, ist die möglichst genaue Kenntnis der zukünftigen Nachfragestruktur, welche durch die sogenannten elektrischen und thermischen Lastgänge charakterisiert ist, besonders entscheidend. Da die Bedarfsstruktur individueller Einzelhaushalte jedoch nicht hinreichend standardisierbar ist, soll der dahingehenden Unsicherheit mittels einer kurzfristigen haushaltsindividuellen Lastprognose begegnet werden. Entsprechend besteht ein weiteres Ziel der Arbeit in der Untersuchung und Auswahl dazu geeigneter Methoden.

Um dem Ziel der realistischen Einsetzbarkeit des Modellsystems gerecht zu werden, soll die Komplexität der Fahrplanoptimierung begrenzt und gleichzeitig das im Zeitverlauf wiederholte Trainieren der Lastprognosealgorithmen ermöglicht werden. Deshalb sollen Lastprognose und Fahrplanoptimierung in täglicher Iteration mit aktuellen Daten und begrenztem Zeithorizont durchgeführt werden. Darüber hinaus soll neben der Verwendung eines exakten Optimierungsverfahrens eine problemspezifische Heuristik entwickelt werden, die in der Lage ist, schnell gute Lösungen für das Planungsproblem zu berechnen ohne auf leistungsfähige und entsprechend teure Hardware oder kommerzielle Solver Software angewiesen zu sein.

Um die Bewertung der prognosebasiert optimierten Fahrpläne zu ermöglichen, muss der Anlagenbetrieb abschließend unter Zuhilfenahme der tatsächlich eingetretenen Lastgänge simuliert werden. Diese ex-post Simulation repräsentiert dann den Betrieb, der in der Realität umsetzbar gewesen wäre und bildet damit die Grundlage für alle ausgewiesenen technischen und ökonomischen Kennzahlen.

Zunächst widmet sich Kapitel 2 heutigen und zukünftigen energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Rahmenbedingungen, beginnend mit einer Charakterisierung genereller Entwicklungstendenzen auf der Energieangebots- und -nachfrageseite. Auch wenn diese teilweise zunächst nur geringe Berührungspunkte mit dem Betrieb von Mikro-KWK-Anlagen aufzuweisen scheinen, ist deren Beschreibung notwendig für das Verständnis der derzeitigen Dezentralisierungstendenz im Energiesystem. Gemeinsam mit der Bewertung der ebenfalls detailliert beschriebenen gesetzlichen Rahmenbedingungen schließt Kapitel 2 mit der Ableitung von Implikationen für den Mikro-KWK-Anlagenbetrieb.

Kapitel 3 widmet sich anschließend dem Themenkomplex kleiner KWK-Anlagen für Einzelhaushalte. Neben der Definition des KWK-Prinzips sowie der Analyse der Verbreitung und des Potenzials entsprechender Anlagen erfolgt insbesondere die Einführung verschiedener technologischer Konzepte mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen sowie die Begründung der Auswahl der im weiteren Verlauf betrachteten Technologie. Aufbauend auf der technischen Charakterisierung werden verschiedene Betriebsführungskonzepte für Mikro-KWK-Anlagen sowie die Wechselwirkungen mit dem heimischen Laden eines Elektrofahrzeugs beschrieben. Das Kapitel enthält darüber hinaus die Definition energetischer und betriebsbezogener Kennzahlen, mit deren Hilfe einerseits unterschiedliche Technologien generell gegeneinander abgegrenzt, und andererseits die später erzielten Optimierungsergebnisse bewertet werden können.

Das darauf folgende Kapitel 4 führt in unterschiedliche methodische Konzepte zur modellgestützten Optimierung des Mikro-KWK-Betriebs ein. Mittels einer ausführlichen Literaturstudie erfolgt darauf aufbauend die Ableitung bisheriger methodischer Lücken, die mit dem in dieser Arbeit entwickelten Modellsystem geschlossen werden sollen. Entsprechend der Analyse werden die methodischen Konzepte ausgewählt, die in der Folge umgesetzt werden.

Aus der charakterisierten Entwicklungsaufgabe ergibt sich die Notwendigkeit eines Moduls zur haushaltsindividuellen thermischen und elektrischen Lastprognose, um die nachfrageseitige Unsicherheit bei der Fahrplanoptimierung zu adressieren. Zwar stellt v. a. die Prognose elektrischer Lasten ein bereits intensiv beforschtes Gebiet dar, doch beziehen sich die meisten der bisher veröffentlichten Arbeiten auf eine höher aggregierte Ebene, wie bspw. ganze Netzabschnitte. Hingegen ist die Prognose individueller Haushaltslastgänge ein bisher nur wenig erforschtes Gebiet. Aus diesem Grund widmet sich Kapitel 5 zunächst einer allgemeinen Beschreibung methodischer Ansätze, die genutzt werden könnten, um die haushaltsindividuelle kurzfristige Lastprognose zu realisieren. Basierend auf methodischen Eigenschaften sowie einem Literaturüberblick zu existierenden Arbeiten, erfolgt anschließend eine Vorauswahl mehrerer Methoden, die im Rahmen der weiteren Entwicklung näher untersucht werden.

Den methodischen Kern der Arbeit bildet Kapitel 6. Es beschreibt die Implementierung der ausgewählten Methoden im Rahmen des modularen Modellsystems *P-OPT*. Ein Fokus des Kapitels liegt auf der mathematischen Beschreibung einer exakt lösbaren und einer heuristischen Optimierungsmethode sowie der Auswahl der am besten geeigneten Modellvarianten für die haushaltsindividuelle Lastprognose. Darüber hinaus dienen verschiedene beispielhafte Anwen-

dungen der Optimierungsmethoden sowie Sensitivitätsanalysen einerseits der Komplexitätsbewertung und andererseits der Auswahl wichtiger Modellparameter, die in der anschließenden Fallstudie Verwendung finden. Da zur Optimierung deterministische Methoden auf Basis der erstellten Lastprognose verwendet werden, müssen die bestimmten Fahrpläne in einem weiteren Schritt auf Abweichungen überprüft werden, die beim Eintreten der realen Lastgänge auftreten. Daraufhin notwendige kurzfristige Kompensationshandlungen werden bestimmt, indem die Fahrplanumsetzung in regelbasierter Form und unter Zuhilfenahme der realen Lastgänge simuliert wird, was die Grundlage für den Ausweis betriebsbezogener und ökonomischer Ergebnisse schafft.

Im Rahmen einer umfangreichen Fallstudie werden anschließend in Kapitel 7 die implementierten Methoden angewendet und hinsichtlich ihrer Ergebnisse bewertet. Nach der Anlagenauslegung für fünf Wärmebedarfsklassen erfolgt dabei die detaillierte Betrachtung von vier Beispielhaushalten in unterschiedlichen Szenarios hinsichtlich der jeweils gültigen Rahmendingungen, der Haushaltsausstattung mit oder ohne Elektrofahrzeug und der zur Analyse verwendeten Methode. Mit Hilfe stringenter Bewertungsmetriken werden alle Ergebnisse gegenüber dem nur theoretisch erreichbaren globalen Optimum eingeordnet sowie methoden- und unsicherheitsbedingte Abweichungen charakterisiert. Darüber hinaus dienen saisonale Betrachtungen sowie die Analyse einzelner Beispieldtage der Ableitung weiterer Ergebnisse mit höherem Detailgrad.

Kapitel 8 fasst die erlangten Erkenntnisse in Form prinzipieller Schlussfolgerungen und Empfehlungen zusammen. Insbesondere erfolgt dabei die Beschreibung und die Analyse der in der Fallstudie durchschnittlich erreichten Ergebnisse, woraus unter anderem Rückschlüsse auf weiteren Forschungsbedarf abgeleitet werden können. Darüber hinaus erfolgt eine umfassende kritische Reflexion des gewählten Vorgehens.

Kapitel 9 schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse ab.

Kapitel 2

Energiewirtschaftlicher und energiepolitischer Rahmen

Dieses Kapitel widmet sich den energiewirtschaftlichen und energiepolitischen Rahmenbedingungen in Deutschland. Zunächst charakterisiert Abschnitt 2.1 den derzeit zu beobachtenden technologischen Wandel auf der Energieangebots- und Nachfrageseite, der maßgeblich durch Klimaschutzbemühungen motiviert ist. Die Beschreibung ist dabei bewusst weit gefasst und beschränkt sich nicht ausschließlich auf unmittelbar mit Mikro-KWK-Anlagen in Verbindung stehende Bereiche. Letzteres ist notwendig für das Verständnis der zunehmenden Tendenz zur Dezentralisierung des Energiesystems. Aufbauend auf der Beschreibung und Interpretation weiterer politischer und rechtlicher Rahmenbedingungen in Abschnitt 2.2 fasst Abschnitt 2.3 die Implikationen des systemischen Wandels und der regulatorischen Rahmenbedingungen für Mikro-KWK-Anlagen allgemein sowie für deren Betrieb im Speziellen zusammen.

2.1 Strukturwandel auf der Angebots- und Nachfrageseite

Getrieben durch politische Zielsetzungen und der entsprechenden Gestaltung rechtlicher Rahmenbedingungen durchläuft das Energiesystem seit mehreren Jahren einen tiefgreifenden strukturellen Wandel. Dieser äußert sich zunächst auf der Angebotsseite, insbesondere hinsichtlich der Bereitstellung elektrischer Energie. Das jahrzehntelang gültige Paradigma der zentralen Erzeugung in Großkraftwerken und der damit verbundenen Ausnutzung von Skaleneffekten beherrscht zwar weiterhin große Teile des Energiesystems, doch steigt der Anteil dezentraler Erzeugung elektrischer Energie stetig an (BMU, 2013). Gleichzeitig erfordert die zunehmende Integration erneuerbarer Energien, mit Anlagen in allen Leistungsklassen, auch ein Umdenken auf der Nachfrageseite. Neben dem Einsatz von Großspeichertechnologien (z. B. Pumpspeicherwerken) konzentriert sich die Forschung und Entwicklung hierbei auf die Flexibilisierung der Nachfrage in Industrie und Haushalt, insbesondere mit Hilfe von Lastverschiebemaßnahmen wie bspw. dem gesteuerten Laden von Elektrofahrzeugen. Diese sogenannten Demand

Side Management (DSM) Maßnahmen sollen dazu beitragen, dem fluktuierenden Charakter der vorherrschenden Formen erneuerbarer Energien gerecht zu werden. Allerdings bedingen sie teilweise auch Komforteinbußen für den Endkunden, weshalb immer dann Akzeptanzprobleme zu erwarten sind, wenn keine signifikanten ökonomischen Vorteile generiert werden können (Paetz et al., 2011).

Die folgenden Abschnitte widmen sich jeweils Teilbereichen des angedeuteten Strukturwandels. Der Fokus liegt auf der Darstellung der wichtigsten Trends auf Angebots- und Nachfrageseite elektrischer Energie sowie der Entwicklung der Energienachfrage in Haushalten. Um der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit gerecht zu werden, blendet die Diskussion Industrie- und andere Großkunden hingegen weitgehend aus. Trotzdem ist eine isolierte Betrachtung der untersten Ebenen des Energiesystems nicht ausreichend, da auf allen Ebenen verschiedene, teilweise stark interdependente Problemstellungen vorliegen, welche letztlich Auswirkungen auf die Verbreitung und Wirkungsweise dezentraler Mikro-KWK-Anlagen haben.

2.1.1 Zur Integration erneuerbarer Energien

Dem im Jahr 2010 verabschiedeten Energiekonzept der Bundesregierung zufolge wird bis zum Jahr 2050 eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes in Deutschland um 80 - 95 % gegenüber dem Basisjahr 1990 angestrebt (BMW i. u. BMU, 2010). Die Elektrizitätswirtschaft soll einen entscheidenden Anteil haben, indem der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 80 % betragen soll. Hierzu werden die Notwendigkeit sogenannter *intelligenter Netze* sowie der Ausbau von Stromspeicherkapazitäten explizit genannt. Des Weiteren führte auch die erst nach dem Energiekonzept verabschiedete Stilllegung aller deutschen Kernkraftwerke bis zum Jahr 2022 zu keiner Abschwächung der gesteckten Ziele.

Um den Ausbau der erneuerbaren Energien zu forcieren, wurden verschiedene gesetzliche Regelungen geschaffen (vgl. Abschnitt 2.2). Deren Effektivität ist durch den starken Kapazitätswachstum der vergangenen Jahre dokumentiert, während über die Effizienz der Regelungen kontrovers diskutiert wird (Mennel, 2012; Weber u. Hey, 2012; Erdmann et al., 2010). Insbesondere der im Jahr 2005 eingeführte CO₂-Emissionshandel ist bei wirksamer Implementierung nach Auffassung einiger Kritiker bereits ein ausreichendes Förderungsinstrument für erneuerbare Energien, weshalb zusätzliche Anreize grundlegend überarbeitet oder ganz abgeschafft werden sollten (Monopolkommission, 2009; Frondel et al., 2011).

Der Kapazitätzzubau erneuerbarer Energien wird dominiert vom Zubau von Windenergie (WEA) und Photovoltaikanlagen (PV), doch auch die Nutzung biogener Brennstoffe steigt stetig an. Insgesamt beträgt der Anteil am gesamten Primärenergieverbrauch Deutschlands derzeit knapp 12 %, wobei der Anteil am stromseitigen Endenergieverbrauch (EEV) mit ca. 20 % am höchsten ausfällt und im Wärme- (11 %) und Kraftstoffbereich (6 %) niedrigere Anteile am jeweiligen EEV zu verzeichnen waren (BMU, 2013).

Notwendigkeit der Flexibilisierung des Kraftwerksparks

Über die ökonomisch und ökologisch motivierte Diskussion um erneuerbare Energien hinaus schlägt sich deren Kapazitätsausbau zunehmend auch im technischen Bereich des Energiesystems nieder. Gesetzliche Vorrangregelungen, fluktuierende Einspeisung und fehlerbehaftete Einspeiseprognosen führen zu der Notwendigkeit eines tiefgreifenden Wandels auch im konventionellen Kraftwerkspark. Neben Prognoseabweichungen, die manchmal im Bereich mehrerer Gigawatt liegen, können auch langanhaltende Täler in der Einspeisung aus WEA und PV auftreten (TenneT, 2012). Letztere sind vergleichsweise gut zu prognostizieren und heute mit Hilfe des konventionellen Kraftwerksparks kompensierbar. Andererseits treten Spitzen der Einspeisung aus erneuerbaren Energien nicht notwendigerweise zu Zeiten einer hohen Netzlast auf, was im Umkehrschluss dazu führt, dass möglicherweise zu viel elektrische Energie zur Verfügung steht, die beim aktuellen Marktdesign in großen Mengen nur in Pumpspeicherwerken wirtschaftlich gespeichert werden kann (VDE, 2009; Ehlers u. Erdmann, 2011). Dies kann durch die sogenannte Vorrangregelung erneuerbarer Energien, im Zusammenwirken mit geringer Nachfrage und weiteren Mechanismen, zu negativen Strompreisen führen, wie sie bereits in den letzten Jahren vermehrt zu beobachten waren (Andor et al., 2010). Aktuelle Studien zeigen außerdem, dass bis zu einem Anteil erneuerbarer Energien von 40 % Speicher aus ökonomischen Gründen überwiegend zur Einsatzoptimierung thermischer Kraftwerke genutzt werden und weniger zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Quellen (VDE, 2012a).

Neben dem Problem temporärer Über- und Unterdeckung zeichnen sich die beiden dominierenden erneuerbaren Energieträger Wind und Sonne durch hohe Leistungsgradienten in ihrer Einspeisung aus. Darüber hinaus sind auch aufgrund von Prognoseabweichungen hohe Gradienten zu beobachten. Bezogen auf Deutschland, sind tägliche Leistungsschwankungen im Bereich zwischen 0 und 85 % der installierten Kapazität fluktuierender erneuerbarer Energien in Höhe von ca. 64 GW Anfang des Jahres 2013 nicht außergewöhnlich, sondern an vielen Tagen der Regelfall (vgl. z. B. EEX, 2013). Auch im jahresübergreifenden Vergleich zeigen sich erhebliche Schwankungen, welche entsprechende Auswirkungen auf den Betrieb konventioneller Kraftwerke haben werden (VDE, 2012b). Die umfassende Analyse in VDE (2012b) zeigt, dass bezüglich der heute (erzeugungsbezogen) dominierenden erneuerbaren Energie aus Windkraft innerhalb einer Stunde Leistungsschwankungen von +12/-8 GW auftreten können. Stündliche Änderungen von +/- 2 GW treten ca. 100 mal pro Jahr auf. Diese Zahlen verdeutlichen die Anforderungen an den steuerbaren Kraftwerkspark, selbst wenn alle Schwankungen korrekt prognostiziert werden können. Es wird weiterhin angenommen, dass nach dem Jahr 2020 aufgrund der zunehmenden Gesamtleistung von Windenergieanlagen ein weiterer Anstieg der Leistungsgradienten zu beobachten sein wird. Zwar können zwischen Windenergie und der Erzeugung aus PV-Anlagen ausgleichende Effekte entstehen, doch ist auch der umgekehrte, additive Fall möglich.

Bedingt durch die Struktur der Gesetzgebung werden die erneuerbaren Energien, soweit netzseitig möglich, vorrangig und unabhängig von der aktuellen Nachfrage ins elektrische Netz eingespeist (BRD, 2012a). Die sogenannte Residuallast, also die verbleibende Nachfrage nach Abzug der Leistung aus erneuerbaren Energien muss durch konventionelle Kraftwerke oder Importe gedeckt werden. Entsprechend ist im konventionellen Kraftwerkspark eine verstärkte Lastfolgefahrweise notwendig, die von unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien unterschiedlich gut erfüllt werden kann (VDE, 2012b; dena, 2010a; Balling et al., 2011; VDI u. VDE, 2003; Voß et al., 2011). Gleichzeitig ist abzusehen, dass Regelleistung häufiger in Anspruch genommen werden muss, auch wenn heute die Annahme gilt, dass zumindest bis zum Jahr 2020 das derzeitige Niveau der Primär- und Sekundärregelung ausreichen wird (dena, 2010a). Eine unmittelbare Folge für den Endkunden im Haushaltsbereich könnten vermehrt zeitvariable Stromtarife sein, mit deren Hilfe Energieversorger Anreize zur Lastverschiebung schaffen wollen, und die sich auch in einem ökonomisch optimierten Einsatz dezentraler Mikro-KWK-Anlagen widerspiegeln würden.

Ergebnisse aktueller Studien wie beispielsweise VDE (2012b) oder Bode u. Groscurth (2011) zeigen, dass neben der Durchführung anderer Maßnahmen wie Speicherzu- und Netzausbau insbesondere die Flexibilisierung des Erzeugungssystems notwendig ist, um einen weiter steigenden Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung zu beherrschen, ohne die Versorgungssicherheit zu gefährden. Thermische Großkraftwerke und auch dezentrale Kleinanlagen werden demnach eine tragende Rolle zur Beherrschbarkeit ausgeprägter Fluktuationen einnehmen. Gleichzeitig sinkt jedoch die zeitliche Auslastung von Großkraftwerken bei steigender Anzahl von An- und Abfahrvorgängen, was einen wirtschaftlichen Betrieb bei derzeitigen Marktbedingungen erschwert und bereits heute ein Investitionshemmnis darstellt. Dementsprechend empfiehlt VDE (2012b) zur Sicherung der notwendigen Kapazitäten und zur Überbrückung der Transformationsphase neue Marktmechanismen, sodass bspw. Rampenfahrweise oder Systemdienstleistungen auch in Zukunft wirtschaftlich umsetzbar sind und die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleistet werden kann. Weitere Möglichkeiten sind die Einführung von Kapazitätsprämien oder eine Pflicht zur Reservehaltung auf Ebene der Netzbetreiber (Bode u. Groscurth, 2011). Andererseits könnte auch die zunehmende Verbreitung steuerbarer dezentraler Energieanlagen mit bedarfsgerechter Erzeugung einen Teil zur Problemlösung beitragen (VDE, 2007).

Notwendigkeit der Anpassung von Stromübertragungs- und Verteilungsnetzen

Mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung fällt dem elektrischen Netz eine immer größer werdende Bedeutung zu. Dies ist vor allem auf deren regional stark unterschiedlich verteilten Potenziale zurückzuführen. Für Deutschland gilt, dass die größten erschließbaren Potenziale in der Windenergie gesehen werden, aber auch PV wird in großem Umfang zugebaut. Da die größten Windenergiepotenziale im Norden liegen, während die Re-

gionen mit der stärksten Nachfrage im Süden und Westen des Landes zu finden sind, werden zunehmend Transporte elektrischer Energie über große Entfernungen notwendig. Zwar sind derzeit noch keine strukturellen Engpässe im elektrischen Netz zu beobachten, doch treten in Zeiten niedriger Nachfrage und hoher Windeinspeisung bereits temporäre Engpässe, vor allem in Nord-Süd Richtung, auf. Die daraus folgende Notwendigkeit eines raschen Netzausbaus zur Vermeidung zukünftiger struktureller Engpässe wurde mehrfach in umfangreichen Studien belegt (Consentec et al., 2008; Bundesnetzagentur, 2011; dena, 2010a). Zwar haben die vier Übertragungsnetzbetreiber entsprechende Ausbauprojekte angekündigt, doch trotz der Unterstützung durch das Gesetz zur Beschleunigung des Ausbaus der Höchstspannungsnetze vom 21. August 2009 (BRD, 2009b) sind weiterhin Verzögerungen im Netzausbau zu beobachten, nicht zuletzt aufgrund wachsenden Widerstandes der Bevölkerung gegen große Infrastrukturprojekte. Der steigenden technischen Bedeutung des Übertragungsnetzes für das Energiesystem trägt auch die Forschung zunehmend Rechnung. Optimierende Energiesystemmodelle, welche häufig im Rahmen der Politikberatung oder als Grundlage für strategische Entscheidungen bei Energieversorgern eingesetzt werden, berücksichtigen zunehmend das elektrische Netz als wesentliche Restriktion für zukünftige Planungsaufgaben (Eßer-Frey, 2012; Schönfelder et al., 2012; Apfelbeck, 2009; Dietrich et al., 2010).

Auch auf Ebene der Verteilungsnetze sind tiefgreifende Entwicklungen zu beobachten bzw. abzusehen. Neben der zunehmenden Dezentralisierung der Energiebereitstellung, auf die der folgende Abschnitt 2.1.2 ausführlich eingeht, könnte zukünftig insbesondere die Elektrifizierung der Individualmobilität Auswirkungen auf den Betrieb der Verteilungsnetze haben (Kaschub et al., 2010; Reiner et al., 2009). Theoretisch sind zukünftig mehrere Extreme im Verteilungsnetz möglich. Neben dem Auftreten hoher Lastspitzen bspw. durch ungesteuertes Laden vieler Elektrofahrzeuge kann es bei hoher gleichzeitiger Einspeisung vieler PV- und KWK-Anlagen auch zu einer Lastflussumkehr in Richtung höhergelagerter Netzabschnitte kommen. Da Teile der Netzbetriebsmittel für diesen Fall nicht ausgelegt sind, kann die Lastflussumkehr in Extremfällen die Netzstabilität gefährden (Pollok et al., 2011; Shustov, 2009).

2.1.2 Zur Dezentralisierung der Stromversorgung

Die klassische Versorgung von Haushalten und großen Teilen der Industrie mit elektrischer Energie erfolgt heute über ein stark zentralisiertes System. Große Kraftwerke, deren Standorte wesentlich durch die Möglichkeit der Kühlung und die Brennstoffverfügbarkeit determiniert sind, versorgen große Gebiete mit Elektrizität. Der Anschluss von Großkraftwerken an das elektrische Netz erfolgt stets in der höchsten Spannungsebene (380 kV), mittelgroße Kraftwerke speisen in der Regel in das Hochspannungsnetz (110 kV) ein. Unter dem Begriff der Dezentralisierung versteht man hingegen die Installation einer Vielzahl kleiner Energieanlagen, nahe oder direkt beim Verbraucher (VDE, 2007). Die Gründe für die zunehmende Dezentralisierung sind vielfältig und werden im Folgenden strukturiert dargestellt.

Effiziente Nutzung fossiler Energieträger

Zwar werden auch in Zukunft zentral gelegene Großkraftwerke in Deutschland einen großen Anteil der Versorgung übernehmen, jedoch ist es im Zuge des Ziels einer effizienten Nutzung fossiler Energieträger besonders sinnvoll, gleichzeitig Strom und Wärme aus den Prozessen zur Stromerzeugung auszukoppeln. Da im Unterschied zum Transport elektrischer Energie der Transport thermischer Energie über weite Strecken nicht wirtschaftlich ist (VDE, 2007), bietet sich die Nutzung dezentraler KWK-Anlagen an. Diese können in unterschiedlichen Größen ausgeführt sein. Neben größeren Anlagen im Megawatt-Bereich, die ganze Fernwärmenetze versorgen, werden zunehmend auch Mikro-KWK-Anlagen installiert, die Mehrfamilienhäuser bis hin zu Einfamilienhäuser und einzelne Wohneinheiten anteilig mit Strom und Wärme versorgen. Arbeiten wie bspw. die von Bianchi et al. (2011) zeigen, dass technologieabhängig 15 bis 45 % Primärenergieeinsparungen durch die Nutzung von KWK-Technologien möglich sind. Des Weiteren sind für die Wirtschaftlichkeit neben der optimalen Auslegung bzw. Leistung der Anlage insbesondere die Größe des Wärmespeichers sowie die Eigennutzungsrate des lokal erzeugten Stroms entscheidend. Mit Mikro-KWK-Anlagen versorgte Gebäude sind stets weiterhin an das elektrische Netz angeschlossen, um die Einspeisung lokal erzeugten Stroms zu ermöglichen, und zum anderen, um der zeitlich stark variierenden lokalen Stromnachfrage von Haushalten stets gerecht werden zu können.

Nutzung verteilter Potenziale erneuerbarer Energien

Die Nutzung solarer Strahlung zur Stromerzeugung mit Hilfe von PV-Anlagen erfolgt zu großen Teilen durch kleine, dezentrale Anlagen, insbesondere auf Hausdächern. Da Dachflächen meist ungenutzte Flächen darstellen, und die Stromerzeugung über PV-Anlagen bei gleicher Ausrichtung proportional zur bebauten Fläche ist, eignen sich die Dächer von Einfamilienhäusern aus technischer Sicht gut für die Installation. Gleichzeitig herrscht jedoch eine Kontroverse über die Effizienz der Förderung von PV-Anlagen in Deutschland, da meteorologisch bedingt nur vergleichsweise niedrige jährliche Volllaststundenzahlen erreichbar sind. Dennoch können, bedingt durch die starke Förderung durch das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG, vgl. Abschnitt 2.2.1), hohe Zubauraten an PV-Kapazität in den vergangenen Jahren beobachtet werden. Weitere räumlich verteilte Potenziale erneuerbarer Energien werden vor allem mit Windenergieanlagen (WEA) genutzt. Hierbei haben sich jedoch Mikro-WEA für Haushalte noch nicht durchgesetzt, was vor allem deren Wirtschaftlichkeit, ästhetischen Vorbehalten und ihrem ausgeprägten Lärmemissionsverhalten zuzurechnen ist (Wosnitza u. Hilgers, 2012).

Erhöhung der Versorgungssicherheit

Die häufig getroffene Aussage, dass dezentrale Versorgungsstrukturen die Versorgungssicherheit erhöhen, bedarf einer differenzierten Betrachtung unter Berücksichtigung der eingesetzten

Technologien. In von Roon (2009) wird beschrieben, wie sich steuerbare dezentrale Anlagen auf die Versorgungssicherheit auswirken. Um die Effekte zu analysieren, wird eine Rekursiv-Formel gemäß Billinton u. Allan (1996) verwendet, die dazu dient, das Zuverlässigkeitsniveau eines Kraftwerksparks zu berechnen. Das Zuverlässigkeitsniveau ist dabei definiert als die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als 90 % der insgesamt installierten Leistung zur Verfügung stehen. Für jede im Kraftwerkspark enthaltene Technologie wird eine spezifische nicht disponible Arbeitsnichtverfügbarkeit angenommen. Anschließend werden iterativ Großkraftwerke durch mehrere kleine, dezentrale Anlagen ersetzt und unter Variation der Arbeitsnichtverfügbarkeit dieser dezentralen Anlagen berechnet, wie sich das Zuverlässigkeitsniveau des gesamten Kraftwerksparks verhält. Falls die Zeitverfügbarkeit der dezentralen Anlagen gleichgroß oder größer als die der Großkraftwerke ist, steigt das Zuverlässigkeitsniveau mit zunehmendem Grad der Dezentralisierung. Liegt die Verfügbarkeit dezentraler Anlagen hingegen unter der zentraler Kraftwerke, steigt die Zuverlässigkeit mit wachsendem Dezentralisierungsgrad zunächst an, und fällt nach dem Erreichen eines optimalen Dezentralisierungsgrads wieder ab.

Die in dena (2010b) ausgewiesenen Zahlen zeigen, dass speziell kleine KWK-Anlagen mit 86 % zwar weniger gesicherte Leistung bieten als typische Großkraftwerke (durchschnittlich ca. 91 %), doch kann entsprechend der obigen Ausführung bei moderatem Ausbau von einem zunächst steigenden Zuverlässigkeitsniveau insgesamt ausgegangen werden. Allerdings stellt sich in Bezug auf Mikro-KWK-Anlagen eine ausgeprägte saisonale Problematik, da die Anlagen in Zeiten niedrigen Wärmebedarfs nur einen geringen Beitrag zur allgemeinen Versorgung leisten können. Anhand der Angaben in dena (2010b) wird darüber hinaus ebenfalls deutlich, dass dezentrale Windenergieanlagen (gesicherte Leistung 5-10 %) und PV-Anlagen (gesicherte Leistung ca. 1 %) ohne angeschlossene Speichertechnologien nur bedingt geeignet sind, um die Versorgungssicherheit zu unterstützen.

In einer speziell auf dezentrale Versorgungsstrukturen mit vielen Brennstoffzellenanlagen ausgerichteten Arbeit zeigt Asmuth (2007), dass die Versorgungssicherheit gegenüber einem (teil-) zentralisierten System vor allem bei der gebäudebasierten Installation dezentraler Energieanlagen stark ansteigt. Die Arbeit zeigt darüber hinaus, dass sich die Auslegung von Netzbetriebsmitteln im Niederspannungsnetz bei hohem Dezentralisierungsgrad am Maximum der Leistungsrückspeisung in höher gelagerte Netzebenen orientieren muss, während im Falle eines niedrigen Dezentralisierungsgrades weiterhin der maximale Leistungsbezug als Kriterium herangezogen werden sollte, um Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Transportverluste und sonstige Netzzrückwirkungen

Die Untersuchung von Arndt (2004) zeigt, dass der Einsatz dezentraler Erzeugungssysteme zu einer Reduktion der Netzbelastung um etwa 50 % sowie zu einem Rückgang der vom betrachteten Versorgungsgebiet bezogenen elektrischen Energie um bis zu zwei Drittel führen kann. Dies bezieht sich jedoch ausdrücklich auf eine Neubausiedlung mit hoher Ausstattung an brennstoff-

zellenbasierten Mikro-KWK-Anlagen. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe einer Netzsimulation bestimmt. Die Arbeit von Pielke (2010) zeigt, dass sich insbesondere eine netzlastorientierte Betriebsweise von Mikro-KWK-Anlagen eignet, um Transportverluste zu minimieren. Dennoch kann auch so bei einem hohem Durchdringungsgrad in einem Netzabschnitt nicht zu jedem Zeitpunkt eine Lastflussumkehr in Richtung der übergelagerten Netzebene verhindert werden. Des Weiteren zeigt die Untersuchung, dass bezogen auf einen Netzabschnitt bereits bei wärmegeführtem Betrieb Lastspitzen reduziert werden können. Andererseits erhöht sich die Lastgangspreizung zwischen minimaler und maximaler Netzlast. Dies kann durch die in Pielke (2010) vorgeschlagene netzorientierte Betriebsweise verhindert, oder gar ins Gegenteil umgekehrt werden. Die Auswirkungen dezentraler Anlagen zur Nutzung dargebotsabhängiger erneuerbarer Energien sind hingegen, aufgrund der hohen Gleichzeitigkeit, insbesondere bei PV-Anlagen eher negativ zu bewerten (Pollok et al., 2011). Bei hohem Durchdringungsgrad stellen sich bspw. schnell Situationen einer Lastflussumkehr ein (Shustov, 2009).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass insbesondere die effiziente Nutzung fossiler Energieträger sowie die Ausnutzung verteilter Potenziale erneuerbarer Energien für eine weiter fortschreitende Dezentralisierung sprechen. Auch die Versorgungssicherheit kann bis zu einem gewissen Anteil dezentraler KWK-Anlagen verbessert werden. Dieser Vorteil kehrt sich allerdings bei starker Substitution von Großkraftwerken ggf. ins Negative um. Zwiespältig fällt die Bilanz hinsichtlich Transportverlusten und sonstigen Netzzrückwirkungen aus. Steuerbare Anlagen sollten, soweit möglich, auf netzschonende Art betrieben werden. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Betriebsweise genügt diesem Anspruch aufgrund der Maximierung der lokalen Nutzung bzw. der bevorzugten Einspeisung zu Zeiten hoher Preise. Dezentrale Anlagen zur Nutzung dargebotsabhängiger erneuerbarer Energien, und hierbei besonders PV-Anlagen ohne elektrischen Pufferspeicher, sind hingegen aus Netzsicht kritisch zu betrachten, insbesondere dann, wenn eine hohe Marktdurchdringung in einem Netzabschnitt erreicht wird.

2.1.3 Strom- und Wärmenachfrage in Haushalten

Die Haushaltsnachfrage nach den Endenergieformen Strom und Wärme stellt eine wesentliche Rahmenbedingung für den Einsatz von Mikro-KWK-Anlagen in Haushalten dar. Gleichzeitig rücken Haushalte zunehmend in den Fokus aktueller Forschungsarbeiten, da sie einerseits einen relevanten Anteil an der Gesamtnachfrage Deutschlands verantworten, und andererseits bestehende Flexibilisierungspotenziale auf der Nachfrageseite noch nicht ausgeschöpft wurden. Im Folgenden soll kurz auf den Stand und die zu erwartende Entwicklung der Haushaltsnachfrage nach Strom und Wärme eingegangen werden. Neben einer sektoral aggregierten Betrachtung ist hierbei, im Sinne der Zielstellung der Arbeit, vor allem auch die Ebene des individuellen Haushalts von Interesse.

Stromnachfrage in Haushalten

Im Haushaltssektor Deutschlands sind zwei, hinsichtlich der resultierenden Gesamtnachfrage nach Elektrizität gegenläufige Effekte zu beobachten. Einerseits steigt die Ausstattungsrate mit bestimmten Gruppen moderner elektrischer Geräte kontinuierlich an, andererseits steigt jedoch auch die Energieeffizienz von Geräten, die bereits eine hohe (und zukünftig stagnierende) Marktdurchdringung erreicht haben (Destatis, 2012b; Hansen u. Matthes, 2010). Die erste Entwicklung wirkt treibend auf die Nachfrage, die zweite Tendenz wirkt, unter der Annahme konstanter Erneuerungsraten, dämpfend auf die Nachfrageentwicklung. Um die ungewisse Entwicklung der sektoralen Nachfrage hinreichend abzubilden, führen Hansen u. Matthes (2010) drei Szenarios ein. Neben einem fiktiven Referenzszenario, in dem keinerlei Maßnahmen durchgeführt werden (auch nicht jene, die bereits beschlossen wurden), handelt es sich dabei um das *Mit Maßnahmen Szenario* sowie das *Strukturwandel Szenario*. Die beiden letzteren Szenarios umfassen jeweils die energierelevanten Maßnahmen, die mindestens beschlossen oder aber bereits eingeführt wurden. Das Szenario *Strukturwandel* umfasst darüber hinaus weitere, verschärfte oder ausgeweitete Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bzw. Energieeinsparung sowohl im Wärme- als auch im Strombereich. Allen Szenarios liegen identische Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Bevölkerung und der Haushalte zugrunde, die besagen, dass es bis zum Jahr 2030 zu einer leichten Abnahme der absoluten Bevölkerungszahl bei gleichzeitig steigender Anzahl kleiner und mittlerer Haushalte kommen wird. Bei den jeweiligen Annahmen ergeben sich eine leicht (ca. - 3 %) oder eine stark (ca. - 35 %) fallende elektrische Nachfrage im Haushaltssektor bis zum Jahr 2030. Lediglich im fiktiven Referenzszenario kommt es zu einem weiteren Anstieg (ca. + 9 %). Letzteres ist allerdings als theoretische Obergrenze zu interpretieren, da für die Berechnungen sogar bereits umgesetzte Effizienzmaßnahmen ausgeschlossen wurden.

Bezogen auf den heute durchschnittlichen jährlichen Strombedarf von Einzelhaushalten belegen Statistiken als wesentlichen Einflussfaktor vor allem die Anzahl der Bewohner. Jedoch unterscheiden sich die absoluten Werte verschiedener Quellen. Beispielsweise geht Pielke (2010) von niedrigeren Werten aus als der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW, 2010). Die VDI Richtlinie 4655 (VDI, 2008) nimmt nochmals deutlich höhere Werte an (vgl. Tabelle 2.1).

Insgesamt kann für den Haushaltsstrombedarf aus heutiger Sicht aufgrund der steigenden Effizienz elektrischer Großgeräte von einer leicht sinkenden Tendenz ausgegangen werden. Diese wird sich jedoch je Haushalt, in Anbetracht der ebenfalls steigenden Ausstattungsrate mit elektrischen Geräten, v. a. im Bereich der Unterhaltungselektronik, stark unterschiedlich auswirken. Bei der Betrachtung einzelner Haushalte ist entsprechend davon auszugehen, dass individuelle Einflüsse generelle Entwicklungstendenzen überlagern und die derzeit gültigen Werte aus Tabelle 2.1 auch zukünftig zu einer ersten groben Einordnung ausreichen.