

Arbeitspapier

Einordnung des Potentials von Demand Response in privaten Haushalten

Autoren: Lydia Weygoldt, Albert Hoffrichter

Technische Universität Berlin

Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik (WIP)

Bereich Infrastrukturmanagement und Verkehrspolitik (IM-VP)

Erstellt im Rahmen des Kopernikus-Projektes „Energiewende-Navigationssystem zur Erfassung, Analyse und Simulation der systemischen Vernetzungen“ (ENavi), gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Berlin, Juli 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Technisch-systemische Grundlagen für den Einsatz von DR.....	3
2.1.1	Bilanzierung des Stromverbrauchs in Deutschland.....	3
2.1.2	Begrifflichkeiten: DSM, DR und Energieeffizienzmaßnahmen.....	4
2.1.3	Zuordnungsmöglichkeiten der Steuerungskompetenz für DR-Maßnahmen.....	6
2.1.4	Mögliche Einsatzfelder für DR im Stromsystem.....	7
2.2	Grundlagen für die ökonomische Einordnung von DR.....	12
3	Aktueller Wissensstand zur technisch-systemischen Bedeutung von DR im Haushaltsbereich	15
3.1	Analysierte Aspekte in den Studien und zu beachtende Punkte bei der Ergebnisinterpretation.....	15
3.2	Analyse der einzelnen Studien.....	16
3.2.1	Stadler (2005): „Demand Response – Nichtelektrische Speicher für Energieversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“.....	16
3.2.2	Klobasa (2007): „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“.....	19
3.2.3	Dena (2010): „Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 - 2020 mit Ausblick 2025“.....	21
3.2.4	Gils (2014): „Assessment of the theoretical demand response potential in Europe“.....	23
3.3	Vergleichende Zusammenfassung der Studien.....	25
4	Zu klärende Fragen bei der Einordnung des DR-Potentials	27
5	Fazit und Ausblick	29
	Literaturverzeichnis	30

1 Einleitung

Mit dem Ausbau der erneuerbaren Energien befindet sich Deutschland inmitten eines Prozesses der grundlegenden Veränderung des Stromversorgungssystems.¹ In Zukunft werden Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen den wichtigsten Bestandteil der Stromerzeugung darstellen. Da Strom nicht im Netz gespeichert werden kann, müssen Einspeisung und Entnahme zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein. Die Einspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien ist deshalb durch sogenannte Flexibilitätsoptionen auszugleichen, zu denen insbesondere flexibel steuerbare Erzeugung, Speicher sowie Demand-Response-Maßnahmen (DR, d. h. eine reagible Nachfrage) zählen.² Nachfrageflexibilisierung im Bereich von Industriekunden wird in der Literatur häufig diskutiert und in der Praxis bereits zunehmend (und teilweise schon seit längerem) durchgeführt. Lastflexibilisierungsmöglichkeiten im tertiären Sektor und im Haushaltsbereich werden bislang hingegen seltener und weniger ausführlich thematisiert sowie in deutlich geringerem Umfang umgesetzt. Speziell im Bereich privater Haushalte stand der Durchführung von DR-Maßnahmen in der Vergangenheit die fehlende Erfüllung gewisser Voraussetzungen im Weg. Dies gilt erstens für technische Voraussetzungen in Form des Vorhandenseins einer Steuerungsinfrastruktur, die kurzfristige Reaktionen zulässt; durch die zunehmende Verbreitung von „Smart Metern“³ und ein wachsendes Interesse an „Smart Home“-Anwendungen ändert sich die Situation hier indes allmählich. Zweitens wurden die Einsatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Lastflexibilisierungsmaßnahmen in Haushalten durch den institutionellen Rahmen beschränkt, etwa in Form der Präqualifikationsanforderungen für den Regelleistungsmarkt. Doch auch abgesehen davon scheint die Frage, inwieweit DR-Maßnahmen in privaten Haushalten derzeit und in Zukunft generell sinnvolle Beiträge zur Verbesserung der Kosteneffizienz der Stromversorgung leisten können, noch nicht zufriedenstellend beantwortet.

Das vorliegende Arbeitspapier beschäftigt sich vor diesem Hintergrund mit den Möglichkeiten zu kurzfristigen Lastanpassungen bei privaten Haushalten in Deutschland. Der Analyse wird das Ziel zugrunde gelegt, dass eine kosteneffiziente Bereitstellung von DR-Kapazität zur Förderung der Integration fluktuierender erneuerbarer Energien erfolgen soll.⁴ DR wird in diesem Zusammenhang als eine von verschiedenen möglichen Flexibilitätsoptionen betrachtet, die zum Einsatz kommen können. Der gesamtwirtschaftlich sinnvoll erschließbare Flexibilitätsbeitrag von privaten Haushalten hängt somit von den Kosten der Bereitstellung von DR-Kapazität und dem entsprechenden Potential sowie von den

¹ Das Arbeitspapier wurde federführend von Lydia Weygoldt angefertigt. Albert Hoffrichter hat die Konzeption und Erstellung unterstützt sowie einzelne Textpassagen verfasst.

² Vgl. etwa MÜLLER / MÖST (2018, S. 182) und DENA (2010, S. 2 f.).

³ Die wachsende Ausbreitung von „Smart Metern“ lässt sich insbesondere auf die Vorgaben aus § 29 MsbG zurückführen.

⁴ Durch die Erreichung des Ziels der kosteneffizienten Bereitstellung von Flexibilitätsoptionen zur Unterstützung der Integration erneuerbarer Energien ins Stromnetz sollen mittelbar auch die Ziele Umwelt- und Klimaschutz sowie Versorgungssicherheit realisiert werden. Diese Ziele finden sich im Übrigen auch in § 1 Abs. 1 EnWG wieder und entsprechen sinngemäß dem sogenannten „energiewirtschaftlichen Zieldreieck“, das ein traditionelles Leitbild für die Beurteilung energiewirtschaftlicher Maßnahmen darstellt.

Kosten von anderen Flexibilitätsoptionen ab, die substitutiv zum Einsatz kommen können. Demgemäß werden in der hier dargestellten Analyse mögliche Einsatzbereiche für DR privater Haushalte aufgezeigt sowie verschiedene Aspekte diskutiert, die Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit der Nachfrageflexibilisierung von Haushalten gegenüber alternativen Flexibilitätsoptionen haben.

Die Analyse beginnt in Abschnitt 2, zur Vorbereitung der anschließenden Betrachtungen, zunächst mit einer überblicksartigen Darstellung der technisch-systemischen Grundlagen für den Einsatz von DR sowie der Grundlage für die ökonomische Einordnung des DR-Potentials. In Abschnitt 3 werden Studien verglichen, die das DR-Potential von in privaten Haushalten quantitativ bestimmen. Abschnitt 4 befasst sich daran anschließend mit der Einordnung der Ergebnisse der betrachteten Studien, wobei insbesondere bislang unterbeleuchtete Aspekte aufgezeigt werden, die grundsätzlich bedeutenden Einfluss auf die mögliche Rolle von DR-Maßnahmen privater Haushalte im Stromsystem haben und die Ausgangspunkt für weitergehende Forschungsarbeiten darstellen könnten. In Abschnitt 5 wird schließlich ein Fazit gezogen.

2 Grundlagen

In diesem Abschnitt werden zunächst die technisch-systemischen Grundlagen der Lastflexibilisierung privater Haushalte vorgestellt. Dabei werden in Abschnitt 2.1 die wichtigsten Zusammenhänge bei der Bilanzierung im deutschen Stromsystem dargestellt, die unterschiedlichen Begrifflichkeiten im Bereich der Laststeuerung abgegrenzt, die Bedeutung der verschiedenen Zuordnungsmöglichkeiten der Steuerungskompetenz thematisiert sowie die möglichen Einsatzfelder für DR aufgezeigt. In Abschnitt 2.2 erfolgt anschließend die Darstellung der Grundlagen für eine ökonomische Einordnung von DR.

2.1 Technisch-systemische Grundlagen für den Einsatz von DR

2.1.1 Bilanzierung des Stromverbrauchs in Deutschland

Wie bereits in der Einleitung beschrieben müssen die Einspeisung und die Entnahme im Stromsystem jederzeit ausgeglichen sein. In Deutschland sind für die Wahrung dieses Gleichgewichts die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) verantwortlich, deren Netzgebiete sich räumlich mit jeweils einer der vier Regelzonen decken. Bilanzkreise sind virtuelle Gebilde innerhalb von Regelzonen, in denen Einspeisung und Entnahme zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein muss, und die von Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) bewirtschaftet werden. Die BKV werden dabei von den ÜNB überwacht.⁵ Einspeisungen bzw. Entnahmen können dabei sowohl physische Leistungsflüsse über Zählpunkte als auch Handelsgeschäfte mit anderen Bilanzkreisen und damit Marktteilnehmern sein.⁶ Die BKV erstellen für die physischen Leistungsflüsse und die abzuwickelnden Handelsgeschäfte am Vortag eine Prognose auf Viertelstundenbasis (auch als „Fahrplan“ bezeichnet) und übermitteln diese an die ÜNB. Die ÜNB gleichen diese Prognose mit ihren eigenen Lastflussberechnungen ab.⁷ Die Erstellung der Prognosen wird durch den steigenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien komplizierter, da die Erzeugung damit zunehmend von wetterspezifischen und saisonalen Effekten beeinflusst wird. Bei einem Ungleichgewicht zwischen fahrplanmäßigen und realen Strommengen müssen die ÜNB in zweierlei Hinsicht aktiv werden: Zum einen müssen sie fehlende oder überschüssige Strommengen physisch in Form von positiver bzw. negativer Regelenergie ausgleichen, um eine konstante Netzfrequenz zu gewährleisten. Das bedeutet, dass im Vorfeld dazu verpflichtete Stromerzeuger oder -nachfrager (die folglich Regelleistung bereitstellen) auf Geheiß des ÜNB ihre Ein- bzw. Ausspeiseleistung kurzfristig anpassen. Während positive Regelenergie erbracht wird, indem Erzeuger ihre Einspeiseleistung erhöhen oder indem Verbraucher ihren Lastbezug senken, erfolgt der Einsatz von negativer Regelenergie anhand der jeweils umgekehrten Leistungsanpassungen. Zum anderen müssen sie die Abweichungen bilanziell ausgleichen, wofür der Bilanzkreiskoordinator (BIKO), der beim ÜNB angesiedelt ist, die individuellen Bilanzkreisabweichungen ermitteln muss. Die Kosten

⁵ Vgl. KONSTANTIN (2009, S. 406).

⁶ Vgl. KIPPELT (2018, S. 8).

⁷ Vgl. KONSTANTIN (2009, S. 406).

des Einsatzes von Regelernergie werden den für die Abweichungen verantwortlichen BKV in Rechnung gestellt (es handelt sich dabei um sogenannte „Ausgleichsenergiezahlungen“).⁸

Während großen Endverbrauchern Fahrplanabweichungen individuell zugerechnet werden, findet bei Stromabnehmern mit vergleichsweise geringem Bedarf in aller Regel keine separate Erfassung statt. Stattdessen kommen bei Endkunden mit einem Jahresverbrauch unter 100.000 kWh und ohne registrierende Leistungsmessung (RLM) nach § 12 Abs. 2 StromNZV Standardlastprofile (SLP) zur Anwendung; in diese Kategorie fällt derzeit der Großteil der privaten Haushalte in Deutschland. Die SLP, die von Verteilnetzbetreibern (VNB) für ihr jeweiliges Netzgebiet vorgegeben werden, sollen das typische Verbrauchsverhalten unterschiedlicher Kundengruppen je Viertelstunde abbilden. Auf diese Weise wird die nicht vorhandene Lastganglinie der Letztverbraucher ohne registrierende Leistungsmessung ersetzt.⁹ Grundsätzlich kann alternativ auch bei Kunden mit einem Jahresverbrauch unter 100.000 kWh das individuelle Lastprofil ermittelt werden, soweit die entsprechende Messinfrastruktur (in diesem Zusammenhang wird oft von „intelligenten Zählern“ gesprochen) vorhanden ist.¹⁰

2.1.2 Begrifflichkeiten: DSM, DR und Energieeffizienzmaßnahmen

Bezüglich der Begrifflichkeiten „Demand Side Management“ (DSM) und „Demand Response“ (DR) haben sich bislang noch keine durchgängig einheitlich verwendeten Definitionen etabliert. In der internationalen Fachliteratur zielt der Begriff „DSM“ i. d. R. auf sämtliche Anpassungen ab, die auf der Nachfrageseite des Stromsystems vorgenommen werden; also alles von Energieeffizienzmaßnahmen, über manuelle Verbrauchssteuerung bis hin zum Einbau automatisierter Lastmanagementsysteme. Mit „DR“ werden hingegen alle freiwilligen Anpassungen des Elektrizitätskonsums durch den Letztverbraucher oder einen anderen Akteur in Bezug auf den Zeitpunkt des Strombezugs, die Höhe des gleichzeitigen Strombezuges (Last) oder die Gesamtmenge des Strombezuges bezeichnet. In Deutschland wird „DSM“ unterdessen häufig synonym zum Begriff „DR“ verwendet.¹¹ Dieses Arbeitspapier widmet sich ausschließlich der Untersuchung von DR-Maßnahmen im Sinne der international verwendeten Begrifflichkeit. Das bedeutet, dass Energieeffizienzmaßnahmen – zu denen sowohl der Austausch ineffizienterer alter Geräte gegen neue, energieeffizientere Geräte als auch Verbesserungen der physischen Eigenschaften des Systems, wie bspw. die Dämmung eines Hauses zählen – nicht betrachtet werden.¹²

⁸ Die Kosten der Vorhaltung von Kraftwerken für den Regelernergieeinsatz werden hingegen über die Netzentgelte auf die Endkunden gewälzt.

⁹ Vgl. KONSTANTIN (2009, S. 406 f.).

¹⁰ § 12 StromNZV in Verb. mit § 10 MessZV.

¹¹ Vgl. STEDE (2016, S. 1 f.).

¹² Vgl. bzgl. der Definition von Energieeffizienzmaßnahmen PALENSKY / DIETRICH (2011, S. 381 f.).

Voraussetzung für DR ist eine Kommunikationsinfrastruktur, welche die Übertragung von Preis- und Kontrollsignalen sowie entsprechende Reaktionen darauf ermöglicht.¹³ Bei DR-Maßnahmen unterscheidet man zwischen Load Shedding und Load Shifting:

- Als Load Shedding werden Verbrauchsanpassungen eingeordnet, durch die der Gesamtstromverbrauch reduziert wird. Soweit DR-Maßnahmen von Stromkonsumenten gesteuert werden, reduzieren diese Verbraucher ihren Stromkonsum, wenn ihre einzelwirtschaftlichen Kosten des Konsums zu einem bestimmten Zeitpunkt den persönlichen Nutzen aus diesem Konsum übersteigen.¹⁴ Das bedeutet, dass die Opportunitätskosten des Strombezugs und der damit verbundenen Anwendungen eine maßgebliche Rolle spielen. In diesem Zusammenhang ist weiterhin zu beachten, dass einem Verbraucher auch dadurch Kosten entstehen, dass er von seinem eigentlichen Strombezugsverhalten abweicht. Wie im weiteren Verlauf dieses Arbeitspapiers näher erläutert, handelt es sich bei diesen Kosten um Transaktionskosten¹⁵, insbesondere in Form von Zeit- und Informationskosten.
- Im Gegensatz zum Lastverzicht wird der Konsum beim Load Shifting nur zeitlich verschoben. D. h., er wird entweder vorgezogen oder nachgeholt, sodass die Höhe des Strombezugs insgesamt annähernd gleich bleibt; durch das veränderte Bezugsverhalten kann es mitunter zu einem insgesamt höheren Strombedarf kommen, wenn zu anderen Zeiten mehr Strom bezogen werden muss, als in einem bestimmten Zeitraum reduziert wurde.¹⁶ Im Gegensatz zum Load Shedding entstehen die Opportunitätskosten bei einer Lastverschiebung nicht durch den Verzicht auf den Nutzen aus Strombezug, sondern aus der zeitlichen Verlagerung des Strombezugs. Die Lastverschiebung seitens des Verbrauchers erfordert zusätzliche Flexibilität, da bspw. Speichermöglichkeiten (z. B. Warmwasserspeicher, Speicherheizungen, etc.) vorhanden sein müssen.¹⁷ Die Schaffung von Speichermöglichkeiten kann Investitionskosten verursachen, bspw. durch Investitionen in Dämmung oder größere Heizkessel. Zusätzlich zu den Investitionskosten fallen auch hier Transaktionskosten an, sowohl als Fixkosten in der Investitionsphase als auch während der Lastverschiebung.¹⁸

Load Shedding und Load Shifting unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Kostenstrukturen. Es ist zu vermuten, dass beim Load Shifting höhere Fixkosten anfallen, wohingegen die variablen Kosten beim Load Shedding in den meisten Fällen höher ausfallen könnten. Lastverzicht erfordert keine Speichermöglichkeiten (z. B. für Warmwasser) mit entsprechenden Investitionskosten; dennoch fallen auch hier Investitionskosten für die Kommunikationsinfrastruktur und in Form von Transaktionskosten (bspw. durch Komforteinschränkungen oder Zeitkosten für die Steuerung) an. Bei der Lastverschiebung

¹³ Vgl. KLIMA / WINKELMANN (2015, S. 985).

¹⁴ Vgl. AGORA ENERGIEWENDE (2015, S. 18 f.).

¹⁵ Unter Transaktionskosten werden Kosten verstanden, die im Rahmen der Anbahnung und Durchführung von Transaktionen entstehen. Transaktionen selbst werden von WILLIAMSON (1985) wie folgt definiert: „Eine Transaktion findet statt, wenn ein Gut oder eine Leistung über eine technisch trennbare Schnittstelle hinweg übertragen wird. Eine Tätigkeitsphase wird beendet; eine andere beginnt.“ Ebenda, S. 1).

¹⁶ Sogenannter „Rebound Effekt“. Vgl. PALENSKY / DIETRICH (2011, S. 382).

¹⁷ Vgl. AGORA ENERGIEWENDE (2015, S. 19 f.).

¹⁸ Siehe auch Abschnitt 2.2 zur Unterteilung verschiedener Kostenkategorien.

fallen durch die Installation von Speichermöglichkeiten zusätzliche Fixkosten an. Die Höhe der einzelnen Kostenkomponenten unterscheidet sich je nach spezieller Anwendung und Gegebenheiten der einzelnen Haushalte.

2.1.3 Zuordnungsmöglichkeiten der Steuerungskompetenz für DR-Maßnahmen

Sowohl beim Load Shedding als auch beim Load Shifting stellt sich die Frage, wer die Steuerung der DR-Maßnahmen übernimmt. Die gewählte Lösung hat unter anderem einen großen Einfluss auf die Höhe der einzelnen Kostenkomponenten, insbesondere auf die Höhe der Transaktionskosten.¹⁹ Der Haushalt kann entweder selbst steuern, und dies wiederum entweder manuell oder mithilfe einer von ihm eingesetzten Automatisierungssoftware tun, oder die Steuerungskompetenz an einen anderen Akteur abgeben. Steuert der Haushalt selbst, wird für DR ein Anreizmechanismus benötigt. D. h. es bedarf eines vorherigen Signals, durch das der Haushalt erfährt, zu welchen Zeiten er seine Last erhöhen oder senken sollte. Häufig wird davon ausgegangen, dass in diesem Zusammenhang preisbasierte Anreize zum Einsatz kommen, theoretisch sind aber auch einfache Aufforderungen zu Verbrauchsanpassungen durch einen dritten Akteur denkbar. In den meisten Studien zu DR werden dynamische Tarife als Anreizsystem angenommen, über die erzeugungs- oder netzseitige Preissignale an die Kunden weitergegeben werden.²⁰ Im Vergleich zu anderen Gütern wird die Preiselastizität der Stromnachfrage zwar allgemein als vergleichsweise gering eingeschätzt; dennoch wird zumeist davon ausgegangen, dass Haushalte in gewissem Umfang preissensibel sind.²¹ Vor diesem Hintergrund ist die grundlegende Annahme zu DR in Verbindung mit dynamischen Tarifen, dass Preisänderungen Änderungen der Nachfragemengen auslösen.

Haushalte können die Steuerungskompetenz grundsätzlich auch an einen anderen Akteur²² abgeben (und zwar entweder nur für einen gewissen Zeitraum oder langfristig sowie entweder lediglich für bestimmte Anwendungen oder für sämtliche sich im Haushalt befindlichen Geräte).²³ Eine Übertragung der Steuerungskompetenz hat Auswirkungen auf die Kosten, die der Haushalt zu tragen hat, und zwar sowohl auf die Steuerungskosten als auch auf die Investitionskosten, da andere Steuerungskanäle für eine Steuerung von außen installiert werden müssen. Auch die Transaktionskosten, die sowohl bei Investitionskosten als auch variablen Kosten anfallen, sind von der Lokalisierung der Steuerungskompetenz betroffen. Ob diese durch eine externe Steuerung höher oder niedriger ausfallen, lässt sich jedoch nicht allgemein sagen. Soweit nicht anders verlautet, wird im Folgenden implizit

¹⁹ Hier sollen lediglich einige Möglichkeiten aufgezeigt werden. Aufgrund des großen Einflusses, den diese Frage auf viele Aspekte hat, die mit DR zusammenhängen, kann hier keine allgemeingültige Aussage getroffen oder auch nur alle denkbaren Möglichkeiten einbezogen werden.

²⁰ Das bedeutet, dass die Haushaltskunden – im Gegensatz zur Situation mit konstanten Endnachfragerpreisen für Strommengen – mit Veränderungen der relativen Knappheiten von Produktionsfaktoren im Stromversorgungssystem konfrontiert werden.

²¹ Vgl. ERDMANN / ZWEIFEL (2008, S. 103).

²² Bei diesem Akteur kann es sich beispielsweise um einen Vertriebspartner handeln. Welche weiterführenden Fragen sich in Bezug auf die Zuordnung der Steuerungskompetenz ergeben wird in Abschnitt 4 angesprochen. Darüber hinaus wird dieser Aspekt hier nicht näher betrachtet.

²³ Vgl. PALENSKY / DIETRICH (2011, S. 381 f.) und ALBADI / EL-SAADANI (2008, S. 1990).

angenommen, dass die Steuerungskompetenz für DR-Maßnahmen den privaten Haushalten zugeordnet ist.

2.1.4 Mögliche Einsatzfelder für DR im Stromsystem

Um die Relevanz von DR im Bereich privater Haushalte für das (zukünftige) Stromsystem in Deutschland einordnen zu können, ist zunächst die Ausgangslage hinsichtlich der in diesem Zusammenhang wesentlichen Faktoren zu betrachten. Dazu zählen insbesondere der Anteil von Haushalten am gesamten Stromverbrauch in Deutschland, das Stromverhaltensverhalten der Haushalte sowie die Eigenschaften der infrage kommenden Haushaltsgeräte.

2015 betrug der gesamte Stromverbrauch in Deutschland 515 TWh, davon entfielen 128,6 TWh auf private Haushalte.²⁴ Die Bereiche Kühlen und Gefrieren sowie Waschen, Trocknen und Spülen stellen mit 17 Prozent bzw. 9 Prozent bedeutende Anteil des Stromverbrauchs im Haushaltsbereich dar. Der Verbrauch einzelner Geräte lässt sich schwer allgemein beziffern, da es große Unterschiede zwischen dem Energieverbrauch von alten und neuen Geräten gibt; derzeit sind Haushalte oft noch mit älteren Geräten ausgestattet. Zudem hängt der Stromverbrauch von spezifischen Eigenschaften der Geräte ab, wie z. B. dem Volumen von Kühl- und Gefriergeräten.²⁵ Strombasierte Wärmeanwendungen, wie Wärmepumpen und Nachtspeicher, machen einen Anteil von ca. 28 Prozent am Stromverbrauch von Haushalten aus.²⁶ In Zukunft ist mit einer weiteren Verbreitung von Wärmepumpen zu rechnen; gleiches gilt für die Elektromobilität. Aufgrund des relativ hohen Stromverbrauchs und der integrierten Speicher ist theoretisch eine hohe DR-Eignung gegeben.²⁷ Haushaltsgeräte und damit verbundene Anwendungen unterscheiden sich teilweise erheblich bezüglich der DR-Einsatzmöglichkeiten. Für Load Shifting kommen grundsätzlich Geräte in Frage, die mit einem Speicher ausgestattet sind oder bei denen es mit hinnehmbarem Komfortverlust²⁸ möglich ist, den Prozess zeitlich zu verschieben.²⁹ Eine detailliertere diesbezügliche Unterteilung von Haushaltsgeräten ist in Kasten 1 dargestellt.

Eine mögliche Anwendung von DR besteht im Ausgleich fluktuierender Einspeisung erneuerbarer Energien, also in der Funktion als Flexibilitätsoption. Der Bedarf nach Flexibilität besteht insbesondere aufgrund des stochastischen Charakters von Einspeisern und Lasten, der sich bspw. aus Prognosefehlern, dem Ausfall konventioneller Kraftwerks- und Übertragungskapazitäten und fluktuierender erneuerbarer Einspeisung ergibt.³⁰ Flexible Lasten könnten dazu geeignet sein, das Stromversorgungssystem kostengünstig zu organisieren.³¹ Ein positiver Beitrag durch DR zur

²⁴ Der Anteil der Industrie lag bei 225 TWh. Vgl. AGE (2017, S. 17 ff.).

²⁵ Vgl. FRONDEL ET AL. (2015, S. 17).

²⁶ Vgl. KLOBASA (2007, S. 5).

²⁷ Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 5).

²⁸ Hierbei handelt es sich auch um Transaktionskosten, die beim Haushalt anfallen.

²⁹ Vgl. MOSER ET AL. (2015, S. 5). In der Studie wird davon ausgegangen, dass es diverse Prozesse gibt, die gänzlich ohne Komfortverlust zeitlich verschoben werden können, was in Anbetracht von auftretenden Transaktionskosten als fragwürdig eingestuft werden könnte.

³⁰ Vgl. KIPPELT (2008, S. 8).

³¹ Vgl. DENA (2010, S. 406) und AGORA ENERGIEWENDE (2015, S. 18).

Erreichung des Kostenziels wird nur dann geleistet, wenn das gesamtgesellschaftliche Kosten-Nutzen-Verhältnis besser ist, als das der zur Verfügung stehenden Alternativen.³² Mögliche Alternativen zu DR sind Speichertechnologien und steuerbare Kraftwerke. Zu Speichertechnologien, die als Flexibilitätsoption genutzt werden können, zählen sowohl Stromspeicher, die elektrische Energie beziehen und sie in derselben oder einer anderen Energieform speichern und diese später wieder in Form von elektrischer Energie abgeben können (bspw. Pumpspeicherwerke, Druckluftspeicher oder Batteriespeicher), als auch sektorübergreifende Energiespeicher. Bei diesen wird elektrische Energie in einem anderen Sektor genutzt oder temporär dort gespeichert (dazu gehören bspw. die Technologien Power-to-Gas, Power-to-Heat und Power-to-Liquid). Steuerbare Kraftwerke können grundsätzlich ebenfalls als Flexibilitätsoption genutzt werden; unter den fossilen Kraftwerken bieten sich hierfür vor allem Gaskraftwerke an, da sie über geringe Must-run-Kapazitäten verfügen und relativ schnell hochgefahren werden können.³³ Allerdings ist das Festhalten an fossilen Kraftwerkstechnologien und insbesondere der Neubau solcher Anlagen in Hinblick auf das Umweltziel (und mindestens mittelbar auch in Hinblick auf das Kostenziel) als äußerst kritisch einzustufen. Die möglichen Beiträge zur Systemsicherheit, die die verschiedenen Technologien leisten können, unterscheiden sich stark zwischen den Technologien, aber auch je nach Einsatzfall. Daher stellen die verschiedenen Flexibilitätsoptionen keine perfekten Substitute zueinander dar und es bedarf einer detaillierten Systemanalyse mit einer konkreten Flexibilitätsanforderung. Diese Abwägung wird im Folgenden nicht weiter thematisiert.

Der Einsatzzweck von DR kann also sein, dass ein Beitrag in Form der Beseitigung von Ungleichgewichten der Leistungsbilanz im Gesamtsystem geleistet wird. Dies kann zum einen über die Bereitstellung von Nachfrageflexibilität auf dem Spotmarkt und zum anderen über Regelleistungsbereitstellung erfolgen. Im Zusammenhang mit dem Ausgleich von Ungleichgewichten kann der Nutzen von DR möglicherweise auch darin bestehen, dass die vorzuhaltende Kapazität an gesicherter Leistung gegebenenfalls gesenkt werden kann und somit auch die entsprechenden Bereitstellungskosten entfallen würden. Daneben kann der Einsatzzweck auch sein, Überlastungen im Verteilnetz zu vermeiden. Außerdem könnte DR in bilanziell oder sogar physisch eigenständigen Systemen eingesetzt werden, um die fluktuierende Einspeisung einzelner Anlagen bzw. Anlagenparks dezentral auszuregeln.

Durch die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten von DR ist es nicht möglich, allgemeingültige Aussagen in Bezug auf die Kosten und das Potential zu treffen. In diesem Arbeitspapier werden daher vor allem Fragen aufgezeigt, die bei der Beschäftigung mit einer bestimmten Konstellation zu beachten wären, sowie der Stand der Forschung bezüglich der Abschätzung von Potentialen dargestellt.

³² Dieser Aspekt wird im folgenden Abschnitt 2.2 näher betrachtet.

³³ Vgl. KIPPELT (2018, S. 10 f.).

Ein Vorschlag aus der Literatur sieht vor, Geräte und Anwendungen im Haushalt in Abhängigkeit ihrer Lastverschiebungseigenschaften in drei Klassen einzuteilen:³⁴

- **Klasse I:** Geräte und Anwendungen der ersten Klasse verfügen erstens über keinen Speicher, d. h., sie beziehen zu dem Zeitpunkt Strom, in dem sie benutzt werden; zweitens ist davon auszugehen, dass sich ihre Nutzung aufgrund der Präferenzen der Personen im Haushalt nicht verschieben lässt. Zu diesen Geräten und Anwendungen werden die Wohnraumbelichtung, Multimediaanwendungen ohne Speicher (wie bspw. Fernseher), Herd, Backofen und sonstige Küchengeräte sowie Haartrockner etc. gezählt. Diese Geräte und Anwendungen sind folglich nicht für DR geeignet. In Anlehnung an diese Einordnung werden sie auch in diesem Arbeitspapier nicht weiter betrachtet.
- **Klasse II:** Bei Anwendungen der zweiten Klasse, zu der Geräte wie Geschirrspüler, Trockner und Waschmaschinen gezählt werden, kann theoretisch der gesamte Prozess zeitlich verschoben werden. Allerdings ist ein Abschalten während des Nutzungsprozesses aufgrund der Anwendungseigenschaften nicht möglich. Auch eine Vorverschiebung der Last ist oft nicht oder nur begrenzt möglich, da eine vorherige Aktion des Nutzers (wie etwa das Einräumen der Wasch- oder Geschirrspülmaschine) oder das Vorausgehen eines anderen Prozesses (Waschen vor dem Trocknen) erforderlich ist, damit der Prozess (sinnvoll) starten kann. Waschmaschinen, bei denen das Aufheizen der Waschlauge zu Beginn des Waschvorgangs den energieintensivsten Teil des Prozesses darstellt, eignen sich theoretisch für DR. Jedoch wird diese Eignung durch mehrere Aspekte begrenzt. Dazu gehört, dass es im verdichteten Wohnungsbau aufgrund von Lärmschutzbestimmungen Beschränkungen gibt, wann eine Waschmaschine laufen darf; eine Verschiebung in die Nachtstunden ist deshalb nicht immer möglich. Weiterhin haben die Nutzer gewisse Präferenzen oder unterliegen bestimmten Restriktionen, wann sie selbst Tätigkeiten verrichten wollen bzw. können, die mit dem Waschprozess zusammenhängen (Befüllen der Waschmaschine, Aufhängen der Wäsche). Bei Wäschetrocknern ist der Energiebedarf über den gesamten Prozess nahezu konstant. Auch hier ist zwar keine Unterbrechung des gesamten Prozesses möglich, jedoch eine Verschiebung des Startzeitpunktes. Diese Verschiebung unterliegt ähnlichen Restriktionen wie die Verschiebung des Waschvorgangs. Spülmaschinen haben ebenfalls einen festen Programmablauf, der tendenziell nicht unterbrochen werden sollte, aber insgesamt zeitlich verschoben werden kann. Der Stromverbrauch ist während der beiden Heizphasen am höchsten, die zu Beginn des Spülvorgangs und später beim Klarspülgang und Trocknen stattfinden. Wegen der im Vergleich zu Waschmaschinen und Trocknern geringeren Lärmentwicklung kann der Spülvorgang auch in die Nachtstunden verschoben werden.³⁵ Auch die Restriktionen seitens der Nutzer, dass nicht zu viel Zeit zwischen Beendigung des Spülvorgangs und dem Ausräumen vergehen soll, ist hier vermutlich geringer, als bei Waschmaschine und Trockner.

³⁴ Vgl. MOSER ET AL. (2015) und ZEILINGER / EINFALT (2011).

³⁵ Vgl. ebenda, S. 12 ff.

- **Klasse III:** Geräte, die über einen Speicher verfügen, werden in Klasse 3 eingeordnet. Zu diesen gehören Geräte zur Lebensmittelkühlung, Heizanwendungen (sowohl zur Raumwärme als auch zur Bereitstellung von Warmwasser), Klimaanlage sowie Elektroautos. Bei Kühl- und Gefriergeräten wechseln sich Phasen der Abkühlung des Innenraums, in denen das Kühlaggregat in Betrieb ist, mit Ruhephasen ab. Dabei dienen die thermische Kapazität des Geräts sowie die Lebensmittel im Inneren des Kühl- bzw. Gefriergeräts als Speicher. Die Dauer der Phasen ist abhängig von der Speicherkapazität, also von den Eigenschaften und der Menge des Kühl- bzw. Gefrierguts, der Isolierung und der Außentemperatur sowie von den technischen Eigenschaften des Kühl- bzw. Gefrierschranks. Die Ruhephase von Kühlschränken kann bis zu einer Stunde oder sogar länger sein.³⁶ Im Durchschnitt beträgt die Dauer des Einschaltzyklus, also die Zeit, in der das Kühlaggregat in Betrieb ist, etwa 25-40 Prozent des Gesamtzyklus.³⁷ Bei Wärmepumpen hängt die zeitliche Verschiebbarkeit von der Größe des thermischen Speichers ab.³⁸ Eine Abschaltung ist für ein bis zwei Stunden am Tag möglich; die reduzierte Last muss dann nachgeholt werden, bevor eine erneute Abschaltung erfolgen kann.³⁹ Das Lastverlagerungspotential von Wärmepumpen steht, wie bei allen Heizanwendungen, hauptsächlich im Winterhalbjahr zur Verfügung. Auch bei elektrischen Speicherheizungen hängt das Lastverlagerungspotential zunächst von der Speicherkapazität ab. Diese ist bei elektrischen Speicherheizungen tendenziell sehr hoch, da der thermische Speicher auf Temperaturen über 500 Grad Celsius erhitzt wird.⁴⁰ Eine gewisse Lastverlagerung mithilfe eines gesonderten Zählers und eines HT/NT-Tarifes⁴¹ erfolgt teilweise bereits, jedoch finden derzeit kaum Neuinstallationen statt, weshalb sich der Bestand und somit auch das Lastverlagerungspotential tendenziell verringern werden.⁴² Die Lastverschiebungsmöglichkeit von Umwälzpumpen, die die erwärmte Trägerflüssigkeit des Wärmekreislaufs zu den Heizkörpern und wieder zurück zum Heizkessel befördern, besteht darin, Heizungen vorübergehend auszuschalten und den Wohnraum als Wärmespeicher zu nutzen. Wie lange Heizungen ausgeschaltet bleiben können, ohne dass ein zu großer Komfortverlust eintritt, hängt von den Präferenzen der Personen im Haushalt sowie von den Eigenschaften und der Dämmung der Räume ab. In Deutschland existieren in

³⁶ Bezüglich Gefriergeräten gibt es in der Literatur widersprüchliche Aussagen bzw. Annahmen: Laut MOSER ET AL. (2015, S. 16) sind bei Gefriergeräten längere Ruhephasen als bei Kühlgeräten möglich, wohingegen laut DENA (2010, S. 417) sowie STADLER (2005, S. 115) aufgrund der höheren Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraum und der reduzierten Wärmekapazität von gefrorenen Lebensmitteln nur kürzere Ruhephasen möglich sind.

³⁷ Vgl. MOSER ET AL. (2015, S. 16).

³⁸ Vgl. DENA (2010, S. 415) und MOSER ET AL. (2015, S. 21).

³⁹ Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 23).

⁴⁰ Vgl. MOSER ET AL. (2015, S. 7).

⁴¹ Bei HT/NT-Tarifen wird der Stromverbrauch für zwei Zeitabschnitte getrennt erfasst. Es gibt einen Hochtarif (HT), der meistens in den Tagesstunden liegt, und einen Niedertarif (NT), der meistens in den Nachtstunden zur Anwendung kommt. Zweck solcher Tarife ist die gleichmäßige Auslastung schlecht regelbarer konventioneller Kraftwerke.

⁴² Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 26 f.).

Wohngebäuden ca. 25.000 Umwälzpumpen.⁴³ Bei Klimaanlage besteht derzeit aufgrund der geringen Verbreitung in Deutschland noch kein großes Lastverlagerungspotential, was sich jedoch aufgrund gestiegener Verkaufszahlen in Zukunft ändern könnte.⁴⁴ Neben Raumwärmeanwendungen eignet sich auch die elektrische Warmwasserbereitstellung zur Lastverschiebung. Auch hier hängt das Lastverschiebungspotential von der Speicherkapazität, also von der Größe und Dämmung des Wasserbehälters, ab. Außerdem hat das Wasserverbrauchsverhalten des Haushalts einen entscheidenden Einfluss auf die Möglichkeiten der Lastverschiebung.⁴⁵ Neben den bereits beschriebenen Geräten fallen auch Elektroautos, die über den Haushaltsanschluss geladen werden, in die Klasse der steuerbaren Geräte mit Speichermöglichkeit. Theoretisch kann die Beladung eines Elektroautos sowohl zeitlich verschoben bzw. unterbrochen als auch hinsichtlich der Ladegeschwindigkeit und Ladeleistung gesteuert werden. Das Verlagerungspotential ist von vielen Aspekten abhängig, bspw. von der Netzanschlussleistung und der Nennenergie des Fahrzeuges, aber auch von der Außentemperatur.⁴⁶ Einschränkungen ergeben sich daraus, dass der Nutzer zu bestimmten Zeiten bestimmte Anforderungen an den Ladestand der Fahrzeugbatterie stellt, sowie daraus, dass das Fahrzeug nicht jederzeit an das Netz angeschlossen ist und der Netzanschluss durch den Nutzer aktiv herbeigeführt werden muss.⁴⁷ Am 1. Januar 2018 gab es 53.861 Elektroautos in Deutschland.⁴⁸ Im Jahr 2013 wurde in einer Studie des Fraunhofer ISI für das Jahr 2020 im mittleren Szenario (hinsichtlich des Zuwachses an Fahrzeugen) ein Elektroautobestand von 400.000 bis 700.000 Elektrofahrzeugen prognostiziert.⁴⁹ In diesem Zusammenhang ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Zuwächse der vergangenen Jahre deutlich geringer ausfielen, als erwartet, und so das politische Ziel von einer Million Elektrofahrzeuge bis 2020 vermutlich nicht erreicht werden kann.⁵⁰

Kasten 1: Lastverschiebungspotential verschiedener Haushaltsgeräte/-anwendungen

⁴³ Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 23).

⁴⁴ Vgl. ebenda, S. 26.

⁴⁵ Vgl. DENA (2010, S. 415 f.).

⁴⁶ Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 20).

⁴⁷ Vgl. MOSER ET AL. (2015, S. 46).

⁴⁸ Vgl. STATISTA (2018).

⁴⁹ Vgl. WIETSCHER ET AL. (2013, S. 19).

⁵⁰ Vgl. BUNDESREGIERUNG (2017, S. 2).

2.2 Grundlagen für die ökonomische Einordnung von DR

Wie im Einleitungskapitel beschrieben, erfolgt die Einordnung von DR im Bereich privater Haushalte in diesem Arbeitspapier aus einer gesamtwirtschaftlichen Perspektive. D. h., es wird untersucht, inwiefern potentiell Beiträge zur Senkung der Gesamtkosten der Stromversorgung in Deutschland geleistet werden können.⁵¹ Daneben spielt die Verteilung von Renten zwischen Akteuren eine Rolle, wobei in dieser Studie vom Ziel möglichst geringer Konsumentenzahlungen ausgegangen wird.⁵²

Die Analyse in diesem Arbeitspapier erfolgt unter Rückgriff auf verschiedene Theorien aus dem Bereich der Mikroökonomik, wobei ein besonderes Gewicht auf Erkenntnisse der Neuen Institutionenökonomik gelegt wird. Für eine auf mikroökonomischen Theorien basierende Einordnung von Maßnahmen in Hinblick auf deren gesamtwirtschaftliche Wirkung ist die Betrachtung der einzelwirtschaftlichen Perspektive der wesentlichen Entscheidungsträger unerlässlich. Wird davon ausgegangen, dass sämtliche Steuerungskompetenzen den privaten Haushalten selbst zugeordnet werden (wie es in dieser Analyse grundsätzlich der Fall ist, siehe Abschnitt 2.1.3), ist die Anreizkonstellation dieser Akteure entscheidend dafür, inwieweit DR-Maßnahmen tatsächlich durchgeführt werden. Folglich besteht das Ziel bei der Gestaltung des Anreizsystems darin, Haushalte dazu zu bewegen, DR-Maßnahmen durchzuführen, wenn sich Kostenvorteile aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive ergeben.⁵³

In diesem Zusammenhang ist es von großer Bedeutung, dass die Bewertung von Maßnahmen aus einzel- und gesamtwirtschaftlicher Perspektive häufig auseinanderfällt. So ist es möglich, dass aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive sinnvolle Maßnahmen auf dezentraler Ebene nicht umgesetzt werden, da sie sich aus Sicht der Haushalte nicht rentieren. Ebenso kann es sein, dass die Haushalte einzelwirtschaftlich rentable Maßnahmen umsetzen, die allerdings aus gesamtwirtschaftlicher Sicht kein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweisen.⁵⁴ Die Gründe für solche Divergenzen liegen darin, dass nicht sämtliche mit der Durchführung einer Maßnahme verbundenen Kosten und Nutzen beim entsprechenden Haushalt selbst anfallen. Solche Umstände lassen sich oft auf Probleme bzw. beschränkte Möglichkeiten der Koordination zwischen dezentralen Akteuren (über Märkte) zurückführen. Ein typisches Beispiel stellen etwa technologische oder pekuniäre externe Effekte dar, deren Internalisierung aufgrund von Transaktionskosten nicht (vollständig) möglich ist.⁵⁵ Weiterhin kann

⁵¹ Grundsätzlich ist es denkbar, dass im Zusammenhang mit dem Einsatz von DR auch zusätzlicher Nutzen generiert wird. In diesem Arbeitspapier werden etwaige Nutzeneffekte der Einfachheit halber ausgeblendet. Für eine abschließende Bewertung der Gesamtwirkung von DR auf die Wohlfahrt – die hier nicht vorgenommen wird – sind sie indes zu berücksichtigen.

⁵² Langfristige geringe Konsumentenzahlungen (und somit hohe Konsumentenrenten) bedeuten keine Minimierung der Produzentenrente, sondern risikoadäquate Renditen für Investoren.

⁵³ D. h., es geht explizit nicht darum, die Menge an umgesetzten DR-Maßnahmen zu maximieren, da Maßnahmen, deren Kosten den Nutzen überschreiten, der Erreichung der zugrunde gelegten Ziele abträglich sind.

⁵⁴ So kann es beispielsweise sein, dass die Gewinne von Haushalten vornehmlich aus einer Umverteilung von Renten herrühren, während die Kosten der Maßnahme ihren Nutzen übersteigen. Ebenfalls könnte es sein, dass eine DR-Maßnahme zwar für sich betrachtet ein positives Nutzen-Kosten-Verhältnis aufweist, dass aber substitutive Flexibilitätsoptionen, die im Falle der Durchführung der DR-Maßnahme nicht umgesetzt werden, eine noch bessere Wohlfahrtswirkung entfalten würden.

⁵⁵ Wenn Entscheidungen eines Akteurs als Folge von Marktbeziehungen die Einkommenssituation anderer Akteure beeinflussen, werden die Renteneffekte, die bei den anderen Akteuren entstehen, als pekuniäre externe Effekte bezeichnet. Im Falle von technologischen externen Effekten ergeben sich Auswirkungen auf andere Akteure unterdessen jenseits der Marktmechanismen.

eine ungünstige Ausgestaltung des institutionellen Regelwerks – welches ebenfalls häufig und regelmäßig bewusst die Zuordnung von Renten beeinflusst – dazu führen, dass die beiden Perspektiven auseinanderfallen.

Bei der Analyse der Anreizkonstellation für private Haushalte kann es sich anbieten, die Kosten, die bei der Durchführung von DR-Maßnahmen anfallen, grob zu kategorisieren, da Kosten je nach Kategorie unterschiedliche Relevanz für verschiedene Entscheidungen (im Rahmen der Investition in DR-Maßnahmen sowie im Rahmen von deren Einsatz) aufweisen. Hierzu wird im Folgenden auf die drei Kategorien Fixkosten, betriebsfixe Kosten sowie variable Kosten zurückgegriffen:

- Fixkosten entstehen dem Haushalt bspw. durch Anfangsinvestitionen in die technische Infrastruktur, die nötig ist, damit der Verbraucher an der Nachfragesteuerung teilnehmen kann. Dazu zählen messtechnische Geräte wie „Smart Meter“, bestimmte regelungstechnische Installationen wie Energiemanagementsysteme und zentrale Steuerungssysteme sowie Installationskosten für die Datenübertragungstechnik.⁵⁶ Gegebenenfalls fallen auch Investitionen im Zusammenhang mit der Schaffung von Speichermöglichkeiten an. Neben der technischen Ausstattung muss für die automatisierte Steuerung ein Steuerungsplan erstellt werden.⁵⁷ Mit allen Anfangsinvestitionen, insbesondere mit letzterem Punkt, gehen zudem Transaktionskosten für den Verbraucher (und potentiell auch für weitere an den DR-Maßnahmen beteiligte Akteure) einher.
- Betriebsfixe Kosten sind unabhängig vom tatsächlichen Einsatz der Lastverschiebung, fallen jedoch regelmäßig an. Es handelt sich dabei vor allem um die Kosten für den Datenaustausch zwischen dem „Smart Meter“ und der DR-Leitzentrale über ein Datenübertragungssystem.⁵⁸ Daneben entstehen möglicherweise Transaktionskosten in Verbindung mit der Aufrechterhaltung der Einsatzbereitschaft der DR-Maßnahme (bspw. dadurch, dass der Haushalt sich über die aktuellen Stromkostenstrukturen informieren muss).
- Während der Teilnahme an der Nachfragesteuerung fallen bei den Haushalten variable Kosten, insbesondere in Form von Zeitopportunitätskosten und Kosten von Verhaltensanpassungen, an. Auch Komfortverluste, bspw. durch eine zu niedrige Innenraumtemperatur oder Lärmbelästigung, sind möglich.⁵⁹

Transaktionskosten, die wie beschrieben in allen drei Kostenkategorien auftreten, spielen bei der Durchführung von DR-Maßnahmen im Bereich privater Haushalte eine besondere Rolle. Inwieweit sie bei der Einordnung des Potentials berücksichtigt werden können und sollten, wird in Abschnitt 4 näher thematisiert.

Aus einzelwirtschaftlicher Perspektive der Haushalte stehen den Kosten beim Load Shedding Einsparungen aufgrund eines verringerten Strombezugs gegenüber; beim Load Shifting entstehen

⁵⁶ Vgl. DENA (2010, S. 425 f.).

⁵⁷ Vgl. ALBADI / EL-SAADANI (2008, S. 1992).

⁵⁸ Vgl. DENA (2010, S. 426).

⁵⁹ Vgl. ALBADI / EL-SAADANI (2008, S. 1992) und MOSER ET AL. (2015, S. 34).

Einsparungen durch Strombezug zu Zeiten günstigerer Preise. Daneben erhalten die Haushalte gegebenenfalls anderweitige Vergütungen für die Zurverfügungstellung von Flexibilität.⁶⁰ Entscheidungen von Haushalten müssen jedoch nicht notwendigerweise unter rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten getroffen werden, sondern können bspw. durch Interesse an neuen Technologien („Smart Home“), durch ein „grünes Gewissen“ und durch sozialpsychologische Aspekte beeinflusst werden.⁶¹

⁶⁰ Vgl. ALBADI / EL-SAADANI (2008, S. 1991).

⁶¹ Vgl. LIEBE / WISSNER (2015, S. 10).

3 Aktueller Wissensstand zur technisch-systemischen Bedeutung von DR im Haushaltsbereich

In diesem Abschnitt werden Studien verglichen, die zum Ziel haben, das DR- Potential in Deutschland zu berechnen. Dazu werden im folgenden Abschnitt 3.1 zunächst die Aspekte vorgestellt, die bei der Untersuchung der Studien betrachtet werden. Anschließend erfolgt in Abschnitt 3.2 eine Darstellung der einzelnen Studien. Die Ergebnisse und das Vorgehen der Studien werden abschließend in Abschnitt 3.3 verglichen. In diesem Zusammenhang wird auch hinterfragt, wie aussagekräftig das in den jeweiligen Studien berechnete Potential ist und – in Vorbereitung auf den nachfolgenden Abschnitt 4 – thematisiert, welche weiteren Aspekte gegebenenfalls einbezogen werden sollten und welche Schlüsse sich daraus ziehen lassen.

3.1 Analytierte Aspekte in den Studien und zu beachtende Punkte bei der Ergebnisinterpretation

- **Grundlegende Konzeption der Studie:**⁶² In Anlehnung an Abschnitt 2.1.4 wird zunächst dargestellt welche gesamtsystemische Rolle die jeweilige Studie DR zuspricht und welchen Beitrag DR dementsprechend in einem Stromsystem mit zunehmendem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung spielen kann. Konkret geht es darum, in welchen Anwendungsbereichen DR betrachtet wird, da dies Einfluss auf die Berechnung des Potentials hat. Da in diesem Arbeitspapier Einsatzfelder von DR im Zusammenhang mit der Vermeidung von Netzengpässen sowie mit der eigenständigen Ausregelung dezentraler Systeme nicht im Detail betrachtet werden, kommen entweder die Vermarktung von Flexibilität am Spotmarkt oder die Bereitstellung von Regelleistung in Frage. Anschließend wird der Untersuchungsgegenstand der jeweiligen Studie beschrieben. Dazu gehört das Gebiet, auf das sich die Untersuchung bezieht und aus dem Daten erhoben werden, sowie die Geräte und Anwendungen im Haushalt, die in die Berechnung einbezogen wurden. Bezüglich des Gebietes werden zugunsten der Vergleichbarkeit nur Studien einbezogen, die ihre Berechnungen auf Deutschland beziehen. Darauf folgend wird die in den Studien verwendete Methode zur Berechnung des Potentials dargestellt. Wichtig dabei ist zu unterscheiden, welches Potential konkret betrachtet wird. Nach den gängigen Potentialdefinitionen⁶³ beinhaltet das theoretische Potential alle Anwendungen und Geräte im Haushalt, die DR-geeignet sind. Das technische Potential ist eine Teilmenge des theoretischen Potentials und beinhaltet nur jene Geräte und Anwendungen, die bei derzeitigen Informationen und mithilfe der existierenden Kommunikationsinfrastruktur für DR nutzbar sind. Hierbei werden technische Restriktionen, wie die Anzahl und Dauer von DR-Interventionen, einbezogen. Das sogenannte (einzelwirtschaftlich) ökonomische Potential umfasst den Anteil der Geräte und Anwendungen am technischen Potential, deren Nutzung aus Perspektive der Anwender wirtschaftlich darstellbar ist. Das ökonomische Potential hängt somit von Anreizstrukturen ab und verändert sich deshalb bspw. mit schwankenden

⁶² Um die Darstellung des Vorgehens in den anschließenden Abschnitten zu den jeweiligen Studien möglichst knapp halten zu können, erfolgt die Darstellung dieses Unterpunkts ausführlicher.

⁶³ Vgl. beispielsweise GILS (2014, S. 2) und MÜLLER / MÖST (2018, S. 182 f.).

Preisen. Das realisierbare, praktische Potential ist wiederum eine Teilmenge des ökonomischen Potentials und hängt zusätzlich unter anderem von der Akzeptanz von DR-Maßnahmen ab. Sowohl Transaktionskosten als auch die Abhängigkeit der Kosten vom institutionellen Rahmen werden im Übrigen in keiner der Definitionen explizit berücksichtigt, obwohl sie großen Einfluss auf die Höhe des zur Verfügung stehenden Potentials haben. Diese Thematik wird der Studienvorstellung nachgestellt in Abschnitt 4 näher beleuchtet.

- **Berechnungen zum Potential von DR-Anwendungen:** Im zweiten Unterabschnitt werden die berechneten DR-Potentiale von Haushalten sowie von einzelnen Haushaltsgeräten und -anwendungen dargestellt und das Vorgehen bei der Berechnung näher untersucht.
- **Quantitative Ergebnisse:** Anschließend werden die wesentlichen Berechnungsergebnisse der jeweiligen Studie knapp zusammengefasst.
- **Betrachtete Kosten und Einschränkungen bezüglich der Durchführung von DR-Maßnahmen:** Abschließend wird nochmals zusammengefasst, welche Kosten und Einschränkungen für DR konkret beachtet werden. In diesem Kontext wird auch darauf verwiesen, inwieweit (prinzipiell für die Bewertung von DR aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive relevante) Kosten, die nicht in die Berechnung einfließen, in der Diskussion der Ergebnisse thematisiert werden. Wesentliche Kostenfaktoren, die bei der Berechnung berücksichtigt werden sollten, sind beispielsweise Abhängigkeiten von der Tageszeit, der Außentemperatur und der Jahreszeit.⁶⁴ Des Weiteren spielen vor allem Geräte- und Steuerungskosten, Automatisierungskosten und Meteringkosten sowie Transaktionskosten (insbesondere Zeit- und Informationskosten) für das in Hinblick auf die Kosteneffizienz des Stromversorgungssystems sinnvoll erschließbare DR-Potential eine Rolle.⁶⁵

3.2 Analyse der einzelnen Studien

3.2.1 Stadler (2005): „Demand Response – Nichtelektrische Speicher für Energieversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“

GRUNDLEGENDE KONZEPTION DER STUDIE

In der Untersuchung von Stadler (2005) – die allgemein im Lichte ihres mittlerweile recht weit zurückliegenden Erstellungszeitpunkts zu interpretieren ist – wird die Verschiebung von Lasten im Haushaltsbereich sowie in der Industrie betrachtet und das Lastverschiebungspotential für Deutschland berechnet. In Bezug auf die mögliche Bedeutung von DR wird in Stadler (2005) zunächst angeführt, dass durch DR die Jahreshöchstlast gesenkt und so die Vorhaltung von Regelleistung durch konventionelle Kraftwerke verringert werden kann. Daneben wird DR auch selbst als Option für die Zurverfügungstellung von Regelleistung genannt. Von dieser Überlegung ausgehend befassen sich die weitergehenden Untersuchungen ausdrücklich lediglich mit dem Regelleistungspotential von DR. In diesem Zusammenhang wird bei den Geräten und Anwendungen jeweils auf die Eignung für bestimmte Regelleistungsarten verwiesen.

⁶⁴ Vgl. MÜLLER / MÖST (2018, S. 182).

⁶⁵ Vgl. auch KLIMA / WINKELMANN (2015, S. 985).

Auch wenn die Bezeichnung „technisches Potential“ selbst in Stadler (2005) nicht explizit verwendet wird, zielen die Berechnungen offenbar auf das zum Erstellungszeitpunkt der Studie bestehende technische Potential ab. Dies ist unter anderem daran erkennbar, dass mögliche technische Erweiterungen nicht Teil der Untersuchung sind. Dementsprechend gehen nur Geräte in die Berechnung ein, die bereits über einen steuerbaren Speicher verfügen bzw., im Falle von Haushaltsgeräten, die durch den Nutzer gesteuert werden können. Das Potential wird jeweils in Abhängigkeit der Zeit und (soweit für Anwendungen relevant) der Außentemperatur angegeben. Ein durchschnittliches Potential wird nicht berechnet.

BERECHNUNGEN ZUM POTENTIAL VON DR-ANWENDUNGEN

Die Bemessung der Regelleistung, die potentiell durch DR zur Verfügung gestellt werden kann, erfolgt in Stadler (2005) jeweils für einzelne Gerätegruppen. Neben der jeweils vorhandenen Gesamtleistung in Deutschland werden dabei Untersuchungen zum Betriebsverhalten einbezogen. In diesem Zusammenhang müssen zahlreiche Annahmen zu technischen Faktoren (wie spezielle Gerätetypen, Speichergröße, Dämmung usw.) getroffen werden, die jeweils detailliert dargestellt sind. So erfolgt die Berechnung des negativen Regelleistungspotentials von Speicherheizungen zum Beispiel als Differenz aus Anschlussleistung und Leistungsbezug von Elektrodirektheizungen (die ebenfalls mit Strom betrieben werden aber nicht über Speicher verfügen). Das positive Regelleistungspotential wird ebenso in Bezug zu einer vergleichbaren Elektrodirektheizung berechnet, mit der Begründung, dass das Entladen des Speichers ohne gleichzeitigen Strombezug bei der Speicherheizung gerade dem vermiedenen Leistungsbezug einer Elektrodirektheizung entspricht.

Bei der elektrischen Warmwasserbereitung ist das Regelleistungspotential stark von individuellen Verbrauchsgewohnheiten abhängig, weshalb den Annahmen für die Berechnung eine Häufigkeitsverteilung des Warmwasserverbrauchs pro Person und Tag zugrunde gelegt wird. Insbesondere ist das Verhältnis von Höchstbedarf zu Durchschnittsbedarf entscheidend, da dies Auswirkungen auf die Dimensionierung des Speichers hat. Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass ein Viertel des Stromverbrauchs, der für die Warmwasserbereitung verwendet wird, verschiebbar ist, was damit begründet wird, dass etwa ein Viertel der Haushalte in Deutschland über eine zentrale elektrische Warmwasserbereitung verfügen. Wie bei den Berechnungen zu Speicherheizungen, werden auch bei der Berechnung des DR-Potentials von Umwälzpumpen Annahmen zur Gebäudebeschaffenheit und -dämmung getroffen. Die mögliche Dauer der Regelleistungsbereitstellung durch Umwälzpumpen hängt maßgeblich von diesen Faktoren ab. Bei Umwälzpumpen in Warmwasserheizungsanlagen wird, ebenso wie bei der elektrischen Warmwasserbereitung, vereinfachend davon ausgegangen, dass die Warmwassernachfrage nicht von der Außentemperatur abhängig ist.

Für die Berechnung des DR-Potentials von elektrischen Kühl- und Gefriergeräten werden Annahmen zu üblichen Betriebsbedingungen, wie der Häufigkeit der Türöffnung, der Umgebungstemperatur und der relativen Feuchte getroffen. Zur Berechnung des potentiellen Beitrags zu DR wird ein Modell entwickelt, das einige Vereinfachungen beinhaltet, wie die örtliche Konstanz der Umgebungs- und Innenraumtemperatur sowie die Abstraktion von Wärmebrücken und Undichtigkeiten. Außerdem müssen Annahmen zum Füllgrad des Kühl- bzw. Gefrierschranks getroffen werden.

Die Ermittlung des DR-Potentials verbrauchsbedingter Lastverschiebungen erfolgt auf Basis von Lastprofilen aus der Literatur und dem Anteil der jeweiligen Geräte am Haushaltsstromverbrauch. Vereinfachend wird angenommen, dass alle Haushaltsprozesse jeweils zwei Stunden dauern und dass die Anwendungen zwar maximal flexibilisiert sind, also dass die Geräte jederzeit betriebsbereit sind und in jeden Zeitraum verschoben werden können, eine Verschiebung jedoch nur einmal innerhalb von 24 Stunden möglich ist.

QUANTITATIVE ERGEBNISSE

Für Speicherheizungen wird ein mit ansteigender Außentemperatur zunehmendes negatives Regelleistungspotential von ca. 26.000 bis 36.000 MW berechnet.⁶⁶ Das positive Regelleistungspotential, das bei sehr geringer Außentemperatur am höchsten ist, liegt demgegenüber zwischen ca. 2.500 und 14.000 MW.⁶⁷ Bei der elektrischen Warmwasserbereitung kann positive Regelleistung zur Verfügung gestellt werden, wenn kein Strombezug stattfindet und der Warmwasserbedarf aus dem Speicher gedeckt wird. Die positive Regelleistung wird hier mit ca. 760 MW berechnet. Die Bereitstellung von negativer Regelleistung ist hingegen möglich, wenn der Warmwasserspeicher nicht komplett gefüllt ist und dann Strom bezogen wird, um Wasser zu erwärmen und zu speichern. Für die negative Regelleistung werden hier 4.900 MW errechnet. Bei Kühlgeräten werden für das negative und positive Regelleistungspotential 4.250 MW bzw. 1.500 MW angegeben, im Falle von Gefrierschränken 3.500 MW bzw. 1.400 MW. Bei Warmwasserheizungen gibt es nur positives Regelleistungspotential, da die Umwälzpumpe nur dann in Betrieb ist, wenn die Heizungsanlage läuft. Das Potential hängt auch hier von den aktuellen Außentemperaturen ab und sinkt mit steigenden Graden; laut der Berechnungen liegt es bei maximal 2.260 MW. Bei den Geräten, die aktiv vom Verbraucher gesteuert werden müssen, wie Waschmaschine, Trockner und Spülmaschine, wird das maximale positive Regelleistungspotential mit ca. 3.600 MW und das negative Regelleistungspotential mit 20.800 MW angegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Haushaltsgeräte, selbst bei einer potentiellen Automatisierung der Lastverschiebung, nicht für die Primärregelleistung geeignet sind, da die Arbeitsprozesse der Geräte während des Betriebs nicht unterbrochen werden sollten.

BETRACHTETE KOSTEN UND EINSCHRÄNKUNGEN BEZÜGLICH DER DURCHFÜHRUNG VON DR-MABNAHMEN

Wie zuvor beschrieben, wird in Stadler (2005) bei den Anwendungen, bei denen dies eine Rolle spielt, die Abhängigkeit von der Außentemperatur einbezogen; bei den Berechnungen für Warmwasser- und Speicherheizungen sowie Kühl- und Gefriergeräte wird außerdem der Temperaturverlauf in den Wänden in die Berechnung einbezogen. Ebenfalls spielt es eine erhebliche Rolle für die Bemessung des Potentials, dass bei der Untersuchung ausdrücklich keine technischen Erweiterungen zur Herstellung der Steuerbarkeit betrachtet werden, sondern nur Geräte, die bereits über einen Speicher verfügen. Dementsprechend werden die Kosten für Informations- und Kommunikationstechnologien lediglich erwähnt und es wird angemerkt, dass in diesem Bereich eine Weiterentwicklung stattfinden

⁶⁶ Bei niedrigeren Temperaturen findet eine höhere Speicherentladung zur Raumerwärmung statt.

⁶⁷ Das positive Regelleistungspotential nimmt bis zu der Außentemperatur ab, bei der keine Raumheizung mehr stattfindet

müsste. Die Zurechnung der Kosten sollte dabei allerdings nicht ausschließlich auf DR erfolgen, da bspw. bei der (als eine wesentliche Voraussetzung angesehenen) Breitbandtechnologie die anfallenden Kosten mit anderen Anwendungen geteilt werden könnten.

Einschränkungen des DR-Potentials durch Transaktionskosten beim Nutzer werden in der Untersuchung im Rahmen der Diskussion von erforderlichen Verhaltensanpassungen der Haushalte erwähnt. Es wird darauf verwiesen, dass die Verschiebung von Tätigkeiten wie Kochen, Waschen und Spülen mit einer „erheblichen Beeinträchtigung der Nutzer“ verbunden ist und dass selbst mit einer Automatisierung die Steuerung von Haushaltsgeräten, wie Waschmaschinen, Trocknern und Geschirrspülmaschinen, aufgrund von Nutzerbeeinträchtigungen eventuell nicht realisiert werden kann. Bei der Berechnung des Potentials von Geräten, für die eine Verhaltensanpassung notwendig ist, wird allerdings von einer maximal möglichen Flexibilisierung ausgegangen. D. h., Einschränkungen und Kosten für den Nutzer (bspw. durch die Verschiebung von geräuschintensiven Anwendungen in die Nachtstunden) werden nicht in die quantitative Analyse einbezogen. Bei der Berechnung des Lastverschiebungspotentials aller anderen Geräte wird somit die vereinfachende Annahme getroffen, dass der Verbraucher keine Beeinträchtigungen erfährt oder Transaktionskosten zu tragen hat.

3.2.2 Klobasa (2007): „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“

GRUNDLEGENDE KONZEPTION DER STUDIE

Die ebenfalls aus der Mitte des zurückliegenden Jahrzehnts datierende Untersuchung von Klobasa (2007) beschäftigt sich damit, wie die wachsenden Flexibilitätsanforderungen in Zukunft mithilfe steuerbarer flexibler Nachfrager erfüllt werden können und betrachtet deshalb das DR-Potential sowohl von Industrie- als auch von Haushaltskunden. In Bezug auf die Bedeutung von DR nennt die Arbeit von Klobasa (2007) die Unterstützung der Integration von Windenergie, die Steigerung der Gesamteffizienz des Stromsystems sowie die Vermeidung von hohen Investitionen in Speichertechnologien. Der Autor weist speziell darauf hin, dass, nachdem die Nachfragesteuerung von Industriekunden bereits häufig untersucht wurde, auch die Steuerung von Haushaltskunden betrachtet werden sollte. Unter dem Lastverlagerungspotential, das hier berechnet wird, werden alle Aktivitäten verstanden, die eine Anpassung der Stromnachfrage an die Stromerzeugungs- und Netzbedingungen ermöglichen. Ermittelt wird das technische Potential, d. h. es werden keine Veränderungen an der technischen Geräteausstattung oder sich in Zukunft verändernde Anwendungen betrachtet. Es wird jeweils das maximale Verlagerungspotential der Anwendungen angegeben, lediglich beim gesamten Verschiebepotential handelt es sich um den Durchschnittswert. Es scheint lediglich das negative Lastverlagerungspotential betrachtet zu werden, also die Möglichkeit der Reduktion der Stromnachfrage.

BERECHNUNGEN ZUM POTENTIAL VON DR-ANWENDUNGEN

Die Berechnung des technischen Verlagerungspotentials erfolgt in mehreren Schritten: zunächst wird der gesamte Strombedarf der wichtigsten Anwendungen dargestellt, anschließend identifiziert, welche Anwendungen und Geräte für das Lastmanagement geeignet sind, sowie letztendlich die nötigen

Vorankündigungszeiten und die saisonalen und tageszeitlichen Verfügbarkeiten einbezogen. Indem die Untersuchung nicht nur das Lastmanagement im Haushaltsbereich, sondern auch in der Industrie und im tertiären Sektor betrachtet, führt die Analyse auf einen Vergleich der lastseitigen und erzeugungsseitigen Flexibilitätsoptionen hin. Die Berechnung des DR-Potentials für den Haushaltsbereich erfolgt in der Untersuchung auf Grundlage der Verbreitung der jeweiligen Geräte, der Anwendungshäufigkeit und der mittleren Leistung. Bezüglich der Spitzenleistung der Geräte wird von typischen Kennwerten von handelsüblichen Produkten ausgegangen. Ob dies dem tatsächlichen Anlagenbestand in deutschen Haushalten entspricht oder ob dort teilweise von älteren Geräten ausgegangen werden muss, wird nicht weiter thematisiert. Auch wird nicht darauf eingegangen, welche Annahmen bezüglich der Raum- und Dämmeigenschaften, der Speichergröße, der Außentemperatur und weiterer Aspekte getroffen wurden. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass für Umwälzpumpen und Klimaanlage ein gleichmäßiger Verbrauch über den Tag unterstellt wird.

QUANTITATIVE ERGEBNISSE

Insgesamt wird in der Untersuchung von Klobasa (2007) ein durchschnittliches negatives Verschiebungspotential von 5.500 MW berechnet. Bei verschiebbaren Anwendungen wie Waschen, Trocknen oder Spülen liegt das berechnete negative Potential bei 1.400 MW und bei Anwendungen mit einem Wärme- oder Kältespeicher bei 2.700 MW. Das Potential von Nachtspeicherheizungen und Wärmepumpen ist hauptsächlich im Winter verfügbar und liegt laut den Berechnungen bei bis zu 17.000 MW. Die maximale verschiebbare Leistung von Waschanwendungen wird mit 580 MW, von Wäschetrocknern mit 630 MW und von Geschirrspülmaschinen mit 600 MW angegeben. Für Kühl- und Gefriergeräte wird eine maximale verschiebbare Leistung von 620 bzw. 600 MW berechnet. Bei Wärmepumpen ist laut den Berechnungen eine Verschiebung von maximal 880 MW möglich, bei der Warmwasserbereitung von 675 MW und bei Nachtspeichern von 16.000 MW.

BETRACHTETE KOSTEN UND EINSCHRÄNKUNGEN BEZÜGLICH DER DURCHFÜHRUNG VON DR-MABNAHMEN

Die Abhängigkeit von saisonalen Schwankungen wird in Klobasa (2007) lediglich bei der Berechnung des durchschnittlichen Verschiebungspotentials über alle Anwendungen berücksichtigt. Hierbei finden zwei separate Berechnungen für Sommer und Winter statt, aus denen anschließend der Mittelwert gebildet wird. Bei den anderen Berechnungen wird nicht das durchschnittliche, sondern das maximale Potential berechnet, weshalb dort keine Berücksichtigung saisonaler Schwankungen erfolgt. Geräte-, Steuerungs- und Automatisierungskosten werden in der Untersuchung diskutiert, fließen jedoch explizit nicht in die Berechnung ein, da das technische Potential berechnet wird und dort nur die vorhandenen Geräte betrachtet werden. In der Diskussion wird jedoch darauf hingewiesen, dass zusätzliche Investitionen und Arbeitskosten durch den Einsatz von DR auch im Haushaltsbereich anfallen können und dass diese insbesondere aus Komforteinschränkungen bestehen. Es wird außerdem erwähnt, dass bei Stromkunden Anfangsinvestitionen sowohl in Form von Investitionen in Steuerungs- und Kommunikationsgeräte als auch in Form von Kosten für die Identifikation von Potentialen und Entwicklung von Strategien für die Teilnahme an DR anfallen. Zusätzlich wird auf Kosten bei der Aktivierung von Lastverschiebungspotentialen hingewiesen. Zumindest in der Diskussion werden auch Transaktionskosten, sowohl in der Investitions- als auch in der Betriebsphase erkannt. In die anschließende Berechnung fließen sie indes nicht ein. Bei der Beschreibung des Vorgehens zur

Ableitung der künftig realisierbaren Potentiale wird darauf hingewiesen, dass der Unterschied zwischen ökonomischen und realisierbaren Potentialen in der Einbeziehung von Informationsdefiziten und Unsicherheiten liegt bzw. in der fehlenden Zeitverfügbarkeit der relevanten Akteure.

3.2.3 Dena (2010): „Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 - 2020 mit Ausblick 2025“

GRUNDLEGENDE KONZEPTION DER STUDIE

Die „Dena-Netzstudie II“ aus dem Jahr 2010 untersucht Systemlösungen für das Elektrizitätsversorgungssystem um die Integration eines steigenden Anteils erneuerbarer Energien in das Stromnetz zu ermöglichen. Neben nachfrageseitigen Lastverlagerungspotentialen werden dafür der Netzausbaubedarf und Speichertechnologien untersucht. Untersucht wird das gesamte DSM-Potential (also Load Shedding und Load Shifting) in den verschiedenen Vermarktungsformen und Einsatzgebieten Spotmarkt, Reservemarkt und Bilanzkreisausgleich. Für den Haushaltsbereich wird jedoch nur das Regelleistungspotential berechnet. Eine Annäherung an das ökonomisch nutzbare Potential erfolgt durch Überlegungen zu Fixkosten, betriebsfixen und variablen Kosten.

BERECHNUNGEN ZUM POTENTIAL VON DR-ANWENDUNGEN

Die Modellierung der Anwendungen und Geräte, die als für den DR-Einsatz geeignet angenommen werden, erfolgt in Anlehnung an Stadler (2005)⁶⁸. Für die Berechnung wird auf Daten über die Speicherkapazität und die verfügbare Leistung von Geräten in Haushalten zurückgegriffen sowie vereinfachte Zeitprofile der einzelnen Anwendungen erstellt. Ebenso wie in Stadler (2005) werden Lastprofile für den Haushaltsbereich aus der Literatur verwendet. Das Modell, mithilfe dessen die Berechnungen durchgeführt werden, wird nicht näher dargestellt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass saisonale und tageszeitabhängige Lastschwankungen berücksichtigt werden. Bei Speicherheizungen wird aus der installierten Leistung und dem Betriebsverhalten das DR-Potential ermittelt. Es wird außerdem davon ausgegangen, dass im Sommer aufgrund der Gefahr von Überhitzung und da Haushalte ihre Speicher ohnehin nicht anbieten, keine Speicherpotentiale vorliegen. Außerdem wird angemerkt, dass Nachtspeicher zwar zur Lastverschiebung, aber nicht zur Lastreduktion geeignet sind. Die Berechnung des Verlagerungspotentials von Umwälzpumpen, bei denen das einzige Lastverschiebungspotential von Warmwasserheizungssystemen liegt, erfolgt auf Basis ihrer Anzahl, ihrer Anschlussleistung und ihrer mittleren Nutzungsdauer. Es wird angenommen, dass Umwälzpumpen nur über positives DR-Potential verfügen, da nur die Abschaltung von aktiven Heizungspumpen als wirtschaftlich sinnvoll angenommen wird. Außerdem wird davon ausgegangen, dass Umwälzpumpen im Winter durchgängig in Betrieb sind und sich die restlichen Betriebsstunden gleichmäßig auf Frühling und Herbst verteilen. Bei allen Wärmeanwendungen müssen Annahmen zu den Gebäudeeigenschaften und Speichergößen getroffen werden, auf die jedoch nicht näher eingegangen wird. Bei der elektrischen Warmwasserbereitung wird die Annahme getroffen, dass nur Geräte über 30 Liter Fassungsvermögen für DSM in Frage kommen, da bei kleineren Geräten zum einen aufgrund des Oberflächen-Volumen-Verhältnisses größere Speicherverluste zu erwarten sind und

⁶⁸ Siehe auch Abschnitt 3.2.1.

zum anderen die Installationskosten von Steuerungstechnik an kleineren Speichern als zu hoch angesehen werden. Das Lastverlagerungspotential wird mithilfe der installierten Leistung und den typischen Lastprofilen errechnet. Bei Kühl- und Gefriergeräten wird darauf hingewiesen, dass das Lastverlagerungspotential von der Wärmekapazität des Kühlguts und der Dämmung des Geräts abhängig ist; welche Annahmen diesbezüglich für die Berechnung getroffen werden, wird jedoch nicht beschrieben. Als das maximale negative Verlagerungspotential wird der Strombedarf des gleichzeitigen Betriebes aller Kompressoren bei einer Kühlguttemperatur von +7 Grad Celsius angenommen. Die Höhe des positiven Verlagerungspotentials wird aus der Abhängigkeit der Ausschaltzeit vom Füllgrad bestimmt. Für Gefrierschränke wird aufgrund des höheren Temperaturunterschieds zwischen Innen- und Außentemperatur und der geringeren Wärmekapazität des gefrorenen Kühlguts ein deutlich geringeres Lastverschiebungspotential angenommen. Eine aktive Steuerung durch den Verbraucher wird nur bei Haushaltsgeräten ohne Speicher angenommen. Für die Berechnung des Verschiebungspotentials werden Kapazität der Geräte und die aggregierten täglichen Lastkurven herangezogen. Die Lastprofile werden von Stadler (2005) übernommen. Ebenso wie bei Stadler (2005) wird deshalb auch davon ausgegangen, dass alle Prozesse jeweils zwei Stunden dauern. Anders als in Stadler (2005) werden jedoch zusätzlich die Annahmen getroffen, dass die Last nur einmal innerhalb von 24 Stunden verschiebbar ist und dass eine Nutzung der Geräte während der Nachtstunden nicht möglich ist.

QUANTITATIVE ERGEBNISSE

Für die einzelnen Anwendungen werden teilweise das maximale und teilweise das durchschnittliche Potential angegeben und über alle Geräte hinweg das durchschnittliche Potential. Die maximalen Potentiale der einzelnen Geräte weichen aufgrund saisonaler und tageszeitlicher Schwankungen teilweise stark davon ab. Das durchschnittliche positive Potential über alle Geräte hinweg wird mit 6.732 MW und das durchschnittliche negative Potential mit 35.278 MW angegeben. Nachtspeicherheizungen weisen ein positives DSM-Potential von 5.864 MW im Winter und ein negatives Potential von 25.692 MW zu bestimmten Stunden während der Heizperiode auf. Für Umwälzpumpen wird ein maximales positives DSM-Potential von rund 2.316 MW im Winter berechnet und für Wärmepumpen ein maximales positives DSM-Potential von 722 MW im Winter und ein negatives Potential von 1.333 MW im Sommer. Die elektrische Warmwasserbereitung verfügt laut den Berechnungen über ein durchschnittliches positives DSM-Potential von 669 MW und ein negatives Potential von 2.024 MW. Bei den Kälteanwendungen wird jeweils das maximale und das in Verbindung mit möglichen Verschiebedauern errechnete durchschnittliche Potential angegeben. Für Kühlschränke liegt die berechnete maximale negative Leistung von 4.240 MW in den ersten Stunden und die maximale positive Leistung von 1.500 MW erstreckt sich über einen längeren Zeitraum. Die durchschnittlichen Potentiale liegen daher bei 554 MW positiv und 1.368 MW negativ. Bei den Gefrierschränken wird die maximale negative Leistung mit 3.500 MW für die ersten 90 Minuten berechnet und die maximale positive Leistung mit 1.500 MW für die ersten 200 Minuten. Hieraus werden durchschnittliche DSM-Potentiale von 571 MW positiv und 530 MW negativ errechnet. Für Waschmaschinen, Wäschetrockner und Spülmaschinen wird ein maximales positives Potential von 3.800 MW zwischen 11 und 14 Uhr errechnet und ein durchschnittliches positives Potential von 1.621 MW, von dem aufgrund nicht näher

erläuterter technischer Restriktionen nur 212 MW genutzt werden können. Das maximale negative DSM-Potential entspricht der berechneten installierten Kapazität von 20.800 MW. Daraus wird ein durchschnittliches negatives Potential von 2.832 MW errechnet.

BETRACHTETE KOSTEN UND EINSCHRÄNKUNGEN BEZÜGLICH DER DURCHFÜHRUNG VON DR-MABNAHMEN

Sowohl bei Heizungssystemen als auch bei Kälteanwendungen wird die Abhängigkeit des Potentials von Außen- und Innenraumtemperatur sowie Dämmeigenschaften angesprochen. Welche expliziten Annahmen für die Berechnungen getroffen werden, wird jedoch nicht erwähnt. Geräte-, Steuerungs- und Automatisierungskosten fließen zwar nicht in die Berechnungen ein, da das technische Potential berechnet wird; sie werden jedoch im Anschluss an die Berechnung des technischen Potentials diskutiert. Neben der Installation von messtechnischen Einrichtungen und automatischer Regelungstechnik werden dort zudem explizit Informationskosten, Transaktionskosten und Steuerungskosten bei den betriebsfixen Kosten genannt. Variable Transaktions- und Informationskosten bzw. generell variable Kosten im Haushaltsbereich werden jedoch nicht angesprochen.⁶⁹

3.2.4 Gils (2014): „Assessment of the theoretical demand response potential in Europe“

GRUNDLEGENDE KONZEPTION DER STUDIE

Als neueste in diesem Arbeitspapier betrachtete Studie untersucht das Forschungspapier von Gils (2014) das DR-Potential in Europa und Nordafrika. Es wird die Bedeutung von DR für ein funktionierendes und günstigeres Energiesystem, speziell bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien, betont. Durch die Betrachtung der DR-Potentiale der einzelnen Sektoren und dem Vergleich mit Alternativen zu DR, wie Speichern oder Netzausbau, wird auch die gesamtsystemische Relevanz von DR in Haushalten herausgestellt. Betrachtet wird die Vermarktung des DR-Potentials auf verschiedenen Märkten für flexible Lasten. Im Gegensatz zu den anderen betrachteten Studien wird hier das theoretische DR-Potential untersucht, das im Gegensatz zum technischen Potential alle Bereiche und Geräte einbezieht, die theoretisch für DR genutzt werden können und nicht nur solche, die mit heutigen Informationen und Steuerungskanälen steuerbar sind.

BERECHNUNGEN ZUM POTENTIAL VON DR-ANWENDUNGEN

Anders als für die anderen Sektoren wird das DR-Potential von Haushalten mithilfe eines Bottom-up-Ansatzes berechnet. Dabei wird die Anzahl von Haushalten und die Ausstattung der Haushalte mit DR-geeigneten Geräten aus der Literatur herangezogen. Die Anzahl der Geräte wird dann (je Gerätetyp) mit der spezifischen Kapazität und dem Energieverbrauch multipliziert um die Ländersummen für die verschiedenen Gerätetypen zu erhalten. In die Betrachtung werden nur Geräte einbezogen, die sich für mindestens eine Stunde verschieben lassen. Für alle Waschgeräte, also Waschmaschinen, Wäschetrockner und Geschirrspülmaschinen, wird für die Berechnung der jährlichen Stromnachfrage der Stromverbrauch während der Benutzung sowie die Benutzungsdauer und die Benutzungshäufigkeit

⁶⁹ Siehe zu den verschiedenen Kostenkategorien auch Abschnitt 2.2.

einbezogen. Bei der Berechnung des DR-Potentials von Heizanwendungen, Warmwassererzeugung und Klimatisierung erfolgt die Berechnung der jährlichen Stromnachfrage mithilfe der Gerätekapazitäten und der geschätzten Volllaststunden. In Bezug auf Umwälzpumpen wird angenommen, dass über alle Länder hinweg 25 Prozent der installierten Leistung als Grundlast das gesamte Jahr über in Betrieb sind. Generell wird bei der Verschiebung von Lasten angenommen, dass bei Verschiebungszeiten von über einer Stunde die Nachfrage mehrerer Stunden in einer Stunde nachgeholt werden kann, wofür die Voraussetzung erfüllt sein muss, dass die betreffenden Geräte in den nachfolgenden Stunden laufen und dass ausreichend freie Kapazität vorhanden ist. Bezüglich der räumlichen Verteilung des DR-Potentials wird angenommen, dass dieses der Bevölkerungsverteilung entspricht.

Laut den Berechnungen für alle betrachteten Länder wird das höchste Lastreduktionspotential mit einem Anteil von fast 50 Prozent bei Kühl- und Gefrierschränken festgestellt, jeweils fast ein Fünftel wird durch Waschmaschinen und Umwälzpumpen bereitgestellt und ein geringerer, aber ebenfalls deutlicher Beitrag wird durch Wäschetrockner, Klimaanlage und Geschirrspülmaschinen geleistet. Das höchste Lasterhöhungspotential weisen Heizungsanwendungen mit 45 Prozent, Warmwasserbereiter mit 25 Prozent und Waschgeräte mit 27 Prozent des gesamten Lasterhöhungspotentials in Haushalten auf. Bezugnehmend auf das DR-Potential für Haushalte, das über alle betrachteten Länder berechnet wird, wird auf die teilweise großen Schwankungen zwischen minimalem und maximalem Potential einzelner Anwendungen und somit auf das saisonal bzw. von Tageszeiten abhängige DR-Potential hingewiesen. Diese Schwankungen sind besonders stark bei Heizanwendungen, Klimaanlage und Waschanwendungen. Heizanwendungen und Klimaanlage hängen dabei besonders von der Außentemperatur ab. Bei Waschanwendungen ist das höchste Potential tagsüber verfügbar.

QUANTITATIVE ERGEBNISSE

Als durchschnittliches Potential für temporäre Lastreduzierung durch Verschiebung der Last auf einen späteren Zeitpunkt werden für Deutschland 2.885 MW für Kühl- und Gefrierschränke, 854 MW für Waschmaschinen, 543 MW für Trockner, 791 MW für Geschirrspüler, 32 MW für Klimaanlage und 1.330 MW für Umwälzpumpen berechnet. Für das durchschnittliche Lastverschiebungspotential auf einen früheren Zeitpunkt ergeben die Berechnungen für Deutschland 3.869 MW für Waschmaschinen, 1.757 MW für Trockner, 2.500 MW für Geschirrspüler, 7.424 MW für Warmwasserspeicher und 8.842 MW für Speicherheizungen.

BETRACHTETE KOSTEN UND EINSCHRÄNKUNGEN BEZÜGLICH DER DURCHFÜHRUNG VON DR-MABNAHMEN

In Gils (2014) wird deutlich auf die saisonale und tageszeitliche Abhängigkeit von DR hingewiesen. Diese Schwankungen zwischen minimalem und maximalem Potential werden jedoch nicht für die einzelnen Anwendungen und Länder angegeben, sondern dort wird das durchschnittliche theoretische Potential berechnet. Auch wird darauf hingewiesen, dass für die Teilnahme an DR bestimmte Geräte und Kommunikationswege benötigt werden, um Reaktionen auf Preis- und Kontrollsignale zu ermöglichen. Es wird jedoch nicht auf die Höhe dieser Kosten eingegangen und diese, da ausdrücklich das theoretische Potential berechnet wird, auch nicht in die Berechnungen aufgenommen. Auch zusätzliche Kosten für den Nutzer, wie Transaktionskosten oder Zeitkosten, werden ausdrücklich nicht in die Berechnung des Potentials aufgenommen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die

Benutzung von Geräten wie Waschmaschine, Trockner und Geschirrspülmaschine von den Routinen der Nutzer getrieben ist, und das Verschiebungspotential für diese Geräte auf Basis der typischen Lastganglinien von Haushalten berechnet.

3.3 Vergleichende Zusammenfassung der Studien

Alle Studien verfolgen ein ähnliches Vorgehen bezüglich der generellen Berechnungsmethode. So erfolgt die Bemessung des Potentials in allen Studien anhand der insgesamt installierten Leistung, also der Anzahl der Geräte und deren mittlerer Leistung, sowie der Betrachtung des Betriebsverhaltens, also der Anwendungshäufigkeit und dem dabei entstehenden Energieverbrauch.

Bezüglich der Definition des Potentials, das betrachtet wird, der getroffenen Annahmen und der Thematisierung und Berücksichtigung einzelner Kostenkomponenten von DR weisen die Studien jedoch teilweise große Unterschiede auf.

- **Unterschiede hinsichtlich der Definition des Potentials:** Stadler (2005), Klobasa (2007) und Dena (2010) berechnen das technische Potential, wohingegen Gils (2014) auf das theoretische Potential abstellt. Im Gegensatz zu den drei anderen Studien wird in Dena (2010) nicht nur das Potential von Load Shifting, sondern auch das Potential von Load Shedding einbezogen. Stadler (2005) berechnet wiederum nur das technische Potential für den Einsatz im Rahmen der Regelleistungsbereitstellung und bezieht sich, im Gegensatz zu den anderen Studien, nicht auf andere Anwendungsgebiete der DR-Leistung.
- **Unterschiede hinsichtlich der getroffenen Annahmen:** Die Studien unterscheiden sich teilweise in Bezug auf die Geräte, die als DR-geeignet angesehen und deshalb in die Berechnung einbezogen wurden sowie hinsichtlich der getroffenen Annahmen zu den technischen Eigenschaften der Geräte, der Gebäudebeschaffenheit und der zeitlichen Verschiebbarkeit von Anwendungen. Zu den Hauptunterschieden zählt hier, dass in Gils (2014), im Gegensatz zu den anderen Studien, nur Geräte betrachtet werden, die sich für mindestens eine Stunde verschieben lassen. Ein weiterer Aspekt ist die Auswahl der betrachteten Geräte: so werden Klimaanlage in Klobasa (2007) und Gils (2014) einbezogen, in Stadler (2005) und Dena (2010) hingegen nicht. Auch die unterschiedlichen Annahmen in Stadler (2005) und Dena (2010) bezüglich Waschanwendungen führen vermutlich zu den beträchtlichen Abweichungen zwischen den errechneten Potentialen. Bezüglich Spülmaschine, Waschmaschine und Trockner wird bei Stadler (2005) vereinfachend angenommen, dass alle Prozesse zwei Stunden dauern und sich ohne Einschränkungen flexibel verschieben lassen. Eine Prozessdauer von zwei Stunden wird ebenfalls in Dena (2010) angenommen. Dort wird jedoch eine Lastverschiebung nur innerhalb von 24 Stunden zugelassen, wobei die Nachtstunden ausgeschlossen sind. Insgesamt werden Annahmen speziell in Stadler (2005) aber auch in Dena (2010) vergleichsweise detailliert präsentiert, wodurch eine recht hohe Transparenz geschaffen wird. Insbesondere werden explizite Annahmen zu Gebäudebeschaffenheit, zur Dämmung bei Wärmeanwendungen sowie bei der Warmwasserbereitung und zu den üblichen Betriebsbedingungen von Kühl- und Gefriergeräten

diskutiert. In Klobasa (2007) und Gils (2014) wird demgegenüber nicht darauf hingewiesen, welche Annahmen bezüglich dieser und weiterer Parameter getroffen werden.

- **Unterschiede hinsichtlich der Berücksichtigung von DR-Kostenkomponenten:** In sämtlichen betrachteten Studien wird auf die Wichtigkeit von Steuerungs- und Automatisierungskosten hingewiesen. In die Berechnung fließen diese Kosten allerdings in keiner der Studien ein, da entweder das theoretische oder das technische Potential ermittelt wird, und dabei per Definition⁷⁰ technische Weiterentwicklungen nicht betrachtet werden. Auch weitere Quellen für Transaktionskosten gehen nicht in die Berechnungen der Studien ein. In Stadler (2005) wird darauf hingewiesen, dass die Verschiebung von Lasten im Haushaltsbereich, wie Kochen, Waschen und Spülen mit einer „erheblichen Beeinträchtigung der Nutzer“ verbunden ist und dass selbst mit einer Automatisierung die Steuerung von Haushaltsgeräten wie Waschmaschinen, Trocknern und Geschirrspülmaschinen aufgrund von Nutzerbeeinträchtigungen eventuell nicht realisiert werden kann. In Klobasa (2007) wird auf Komfortverluste für Haushalte sowie auf Transaktionskosten in der Investitionsphase hingewiesen. Auch in Dena (2010) werden Transaktionskosten im Anschluss an die Berechnung des technischen Potentials thematisiert. Lediglich in Gils (2014) findet eine Thematisierung von Transaktionskosten nur sehr indirekt statt, indem auf feste Routinen der Nutzer bei der Benutzung von verschiebbaren Prozessen (in Bezug auf die Geräte Waschmaschine, Trockner und Spülmaschine) verwiesen wird. Die Kostenkomponenten, die in den Studien diskutiert werden, weisen darauf hin, dass teilweise eine Betrachtung aus einzelwirtschaftlicher Perspektive stattfindet. Dabei ist das Problem, dass der beobachtete vermeintliche Nutzen von DR eventuell nur auf eine Rentenverteilung zurückzuführen und die Aussagekraft hinsichtlich der Eignung aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive fraglich ist.⁷¹

Aus den unterschiedlichen Annahmen und Datengrundlagen ergeben sich enorme Bandbreiten für das berechnete DR-Potential von Haushalten. In Bezug auf negatives Verschiebungspotential, d. h. Lastreduktionen, bewegt sich die Spanne von 5.500 MW in Klobasa (2007) bis hin zu maximal 69.450 MW in Stadler (2005). Beim positiven Verschiebungspotential, also Lasterhöhungen, reichen die Werte von minimal 3.660 MW in Stadler (2005) bis 24.392 MW in Gils (2014). Diese extremen Divergenzen suggerieren bereits deutlich, welchen Einfluss die Wahl von Annahmen auf die Ergebnisse hat. Der folgende Abschnitt 4 beschäftigt sich mit der Frage, welche weitergehenden Aspekte darüber hinaus grundsätzlich bei der Einordnung des DR-Potentials berücksichtigt werden sollten.

⁷⁰ Siehe hierzu Abschnitt 3.1.

⁷¹ Siehe dazu auch Abschnitt 2.2.

4 Zu klärende Fragen bei der Einordnung des DR-Potentials

Wie in Abschnitt 3 thematisiert, können quantitative Analysen wichtige Beiträge zur Einordnung des DR-Potentials im Bereich privater Haushalte leisten, die Interpretation der Ergebnisse sollte allerdings sehr vorsichtig erfolgen. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass das DR-Potential in hohem Maße vom Anwendungszweck abhängt. Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, gibt es verschiedene Einsatzfelder für DR; in den Studien wird indes i. d. R. ein bestimmter Anwendungsbereich, wie der Einsatz als Flexibilitätsoption zum Ausgleich von Erzeugung und Last oder gar lediglich der Einsatz als Regelleistungskapazität, unterstellt. Da DR grundsätzlich auch anderen Zielen dienen kann, ist es letztendlich Voraussetzung für eine umfassende Potentialabschätzung zu klären, für welche Zwecke DR in privaten Haushalten in Zukunft sinnvoll einsetzbar sein könnte.

Der jeweilige Einsatzzweck hat zudem Implikationen für weitergehende Fragestellungen. Sollte DR bspw. zum Einsatz kommen, um Netzüberlastungen auf der Verteilnetzebene entgegenzuwirken, erscheinen gegebenenfalls andere Lösungen bezüglich der – allgemein wichtigen und zu klärenden – Frage, welchem Akteur die Steuerungskompetenz für DR-Maßnahmen zugeordnet werden sollte, vorzugswürdig. Daran schließt sich wiederum die Frage an, inwieweit bestimmte technische und prozessuale Standardisierungen sinnvoll sein könnten, um (teilweise oder vollständig) zentralisierte Steuerungslösungen zu ermöglichen.

Als weiterer wichtiger Aspekt bei der Einordnung des DR-Potentials sei erneut auf die bereits angeführten Transaktionskosten verwiesen. Bei der Gegenüberstellung von Kosten und Nutzen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive sind sie ebenso einzubeziehen, wie alle weiteren Kostenarten. In allen besprochenen Studien wird (teils mehr, teils weniger deutlich und umfassend) auf die Existenz von Transaktionskosten hingewiesen. In die Berechnung der quantitativen Potentiale gehen sie allerdings nur teilweise und indirekt sowie kaum vollumfänglich ein. Dies bedeutet keineswegs, dass bei den Berechnungen fahrlässig entscheidende Faktoren vernachlässigt wurden, allerdings ist dieser Umstand zwingend bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Messung von Transaktionskosten ist im Gegensatz zu anderen Kosten, die häufig bereits in monetarisierter Form vorliegen, alles andere als trivial. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass sich ihre Höhe je nach Haushalt sowie in Abhängigkeit des Zeitpunktes, zu dem sie anfallen, erheblich unterscheiden kann. Weiterhin spielt der Automatisierungsgrad der Nachfragesteuerung eine bedeutende Rolle (bzw. inwiefern Steuerungskompetenzen bei dritten Akteuren gebündelt werden). Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Transaktionskosten für die Gesamtbewertung von DR-Prozessen in privaten Haushalten von entscheidender Bedeutung sind. Dies gilt insbesondere, da die Einsparungspotentiale je Einsatzfall einer einzelnen DR-Anwendung relativ gering sind. Daher ist anzunehmen, dass sie bei manueller Betätigung der entsprechenden Prozesse durch Haushalte in vielen Fällen von Transaktionskosten überkompensiert werden. Vor diesem Hintergrund lässt sich sogar die Vermutung rechtfertigen, dass die Automatisierung von DR-Prozessen, durch die sich die bei Haushalten anfallenden variablen Transaktionskosten deutlich senken lassen dürften, einen entscheidenden Punkt in Hinblick auf die einzel- und gesamtwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von DR im Haushaltsbereich darstellen dürfte. Auch die bei automatisierten DR-Lösungen anfallenden Kosten

(insbesondere Investitionskosten, aber auch Kosten im Zusammenhang mit der Anpassung von Prozessen im Haushalt etc.) werden die durch DR-Anwendungen erzielbaren Nutzen letztlich oft übersteigen. Insofern liegen gewisse Indizien dafür vor, dass ein Einsatz von DR-Maßnahmen in Haushalten vor allem dann sinnvoll sein könnte, wenn die erforderlichen Investitionen in die benötigte technische Infrastruktur bereits aus anderen Motiven bzw. mit Blick auf andere erzielbare Nutzen (vor allem in Verbindung mit „Smart Home“-Anwendungen) getätigt wurden.

Auch die Ausgestaltung des institutionellen Rahmens für die Bereitstellung von DR-Maßnahmen stellt einen wesentlichen Aspekt dar, der in der Literatur bislang eine untergeordnete Rolle spielt. Derweil ist der institutionelle Rahmen von hoher Bedeutung, da er unmittelbar die Kosten der Bereitstellung sowie die Verteilung von Kosten und Nutzen zwischen Akteuren beeinflusst. Zumeist wird in Studien zur Berechnung des Potentials – teilweise implizit – davon ausgegangen, dass DR-Maßnahmen innerhalb des aktuell gültigen Regelrahmens durchgeführt werden (wobei gewisse Unterschiede in Abhängigkeit des jeweiligen Erstellungsdatums bestehen). Mitunter wird auch darauf hingewiesen, dass geringfügige Änderungen am Regelrahmen notwendig sind, um den Einsatz von DR zu bestimmten Zwecken (bspw. die Bereitstellung von Regelleistung) zu ermöglichen. Inwiefern es sinnvoll sein könnte, spezielle Instrumente für die Umsetzung von DR-Maßnahmen zu etablieren, wird hingegen kaum diskutiert. Durch eine gezielte Zuordnung von Kosten und Nutzen (und in diesem Zusammenhang auch von Risiken) auf die Akteure im Rahmen solcher Instrumente, ließe sich prinzipiell ein Umfeld für die Durchführung von DR-Maßnahmen im Haushaltsbereich schaffen, das an deren spezifische Eigenschaften angepasst ist. So könnten grundsätzlich maßgeschneiderte Anreizstrukturen für Investitions- und Betriebsentscheidungen etabliert werden. Durch eine gezielte Risikoanordnung sind weiterhin signifikante Senkungen der Kosten im Zusammenhang mit der Anschaffung der technischen Infrastruktur sowie dem Aufbau von Wissen in Haushalten denkbar. Vor allem wenn diese Investitionen vornehmlich in Hinblick auf die Durchführung von DR-Maßnahmen getätigt werden (und nicht etwa im breiten Kontext des Aufbaus einer „Smart Home“-Infrastruktur), liegt eine hohe Spezifität vor.⁷² Sollte auf Seiten der öffentlichen Hand eine verfestigte Ansicht bestehen, dass die Durchführung von DR-Maßnahmen (in vielen Fällen) aus gesamtwirtschaftlicher Sicht wünschenswert ist, könnte es als nachteilig angesehen werden, wenn Haushalte einerseits die vollen Investitionskosten tragen und die erfolgreiche Amortisierung andererseits maßgeblich von unsicheren zukünftigen Entwicklungen auf Märkten abhängt. Bei dieser Thematik liegen grundsätzlich deutliche Parallelen zu der Frage vor, welcher institutionelle Rahmen der Bereitstellung von Kraftwerkskapazitäten zugrunde gelegt werden sollte.⁷³ Allerdings stellen sich aufgrund der speziellen Eigenschaften von DR-Maßnahmen im Haushaltsbereich diverse Ausgestaltungsfragen als besonders kompliziert dar, weshalb an dieser Stelle noch Bedarf für weitergehende Analysen besteht.

⁷² Das bedeutet, dass die Amortisation der Investitionen aus Sicht des Haushalts weitestgehend davon abhängt, inwiefern im Rahmen des Betriebs von DR-Maßnahmen Deckungsbeiträge bzw. anderweitige Nutzen generiert werden können.

⁷³ Vgl. HOFFRICHTER / BECKERS (2017).

5 Fazit und Ausblick

In diesem Arbeitspapier wurde DR in privaten Haushalten als Flexibilitätsoption zur Integration des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien ins Stromnetz betrachtet. Grundsätzlich ist es durchaus denkbar, dass dezentrale DR-Maßnahmen gewisse Beiträge zur Senkung der Gesamtkosten der Stromversorgung leisten können. Bezüglich der Höhe des sinnvoll erschließbaren Potentials liegen derzeit indes noch keine verfestigten Erkenntnisse vor. Dies lässt sich auch an der großen Bandbreite der quantitativen Ergebnisse der vier in diesem Arbeitspapier verglichenen Studien erkennen. Neben der Tatsache, dass sich die Studien sowohl in Hinblick auf das Erstellungsdatum als auch bezüglich der Analysetiefe teils erheblich voneinander unterscheiden, lassen sich die Divergenzen auf verschiedene Berechnungsmethoden sowie deutlich abweichende Annahmen zurückführen. Dennoch kann resümiert werden, dass gerade in Bezug auf das technische Potential für Lastreduktionen zumindest durchgängig von signifikanten Größenordnungen ausgegangen wird (der geringste berechnete Wert liegt hier bei 5.500 MW; bezüglich gezielter Lasterhöhungen werden Potentiale von immerhin mindestens 3.660 MW prognostiziert). Bei der Interpretation der Ergebnisse sind – jenseits der üblichen bei der Einordnung von Modellrechnungen zu beachtenden Aspekte – eine Reihe besonderer Faktoren zu berücksichtigen. Unter anderem wurde in den Studien jeweils angenommen, dass der Einsatz von DR-Maßnahmen in Reaktion auf die Angebots- und Nachfrage- bzw. Erzeugungs- und Lastsituation im Gesamtsystem erfolgt; andere theoretisch mögliche Einsatzfelder (insbesondere die Reaktion auf dezentrale Netzenspässe) wurden somit ausgeblendet. Daneben wurde die Existenz von Transaktionskosten, die im Zusammenhang mit Lastanpassungen in Haushalten anfallen, zwar in den Studien angeführt, die Beantwortung der Frage, inwieweit sich dadurch Einschränkungen des in Hinblick auf die Kosteneffizienz sinnvoll realisierbaren Potentials ergeben steht unterdessen noch aus. Generell liegen gewisse Gründe zu der Annahme vor, dass eine weiträumige Erschließung von DR-Potentialen in Haushalten erst möglich sein wird, wenn die technischen Voraussetzungen für eine Automatisierung der entsprechenden Prozesse bereits erfüllt sind („Smart Home“), was ihre Durchführung potentiell zu vergleichsweise geringen Transaktionskosten erlaubt. Weiterhin kann eine abschließende Beurteilung von DR-Maßnahmen aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive nicht isoliert, sondern nur unter Einbezug der Kosten und Nutzen anderer Flexibilitätsoptionen erfolgen, die Substitute zum Einsatz von DR in Haushalten darstellen. Letztendlich geht es darum, die gesamtsystemisch sinnvollste Zusammensetzung von Flexibilitätsoptionen zu identifizieren bzw. welche Rolle DR hierbei spielen kann. Zu guter Letzt ist zu beachten, dass der institutionelle Rahmen, auf dessen Basis DR-Maßnahmen durchgeführt werden, zum einen von erheblicher Bedeutung für die Kosten der Bereitstellung sowie für die Verteilung von Kosten und Nutzen zwischen den (direkt und indirekt) beteiligten Akteuren ist. Zum anderen ist er grundsätzlich veränderlich. Daher sollte untersucht werden, inwiefern Modifikationen an den jetzigen Regelungen zu Verbesserungen des Umfelds für die Durchführung von DR-Maßnahmen (einschließlich sinnvoller Anreizkonstellationen und gerechter Rentenaufteilungsmechanismen) führen können. Sollte die Durchführung von DR-Maßnahmen in Haushalten als grundsätzlich sinnvoll eingestuft werden, ist insbesondere auch die Option der Einführung gezielter Instrumente für deren Umsetzung in Erwägung zu ziehen.

Literaturverzeichnis

- AGEB – Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2017):** Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990-2016, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausw_24juli2017_ov.pdf.
- Agora Energiewende (2015):** Aktionsplan Lastmanagement. Endbericht einer Studie von Connect Energy Economics. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2014/aktionsplan-lastmanagement/Agora_Aktionsplan_Lastmanagement_web.pdf.
- Albadi, M. H. / El-Saadani, E. F. (2008):** A summary of demand response in electricity markets, in: *Electric Power Systems Research*, 78. Jg., S. 1989-1996.
- Bundesregierung (2017):** Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Krischer, Cem Özdemir, Stephan Kühn (Dresden), weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN, Drucksache 18/12670.
- Dena – Deutsche Energie-Agentur GmbH (2010):** dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 - 2020 mit Ausblick 2025, zuletzt abgerufen im Internet am 27.07.2018 unter: https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF.
- Erdmann, G. / Zweifel, P. (2008):** Energieökonomik: Theorie und Anwendungen, Berlin: Springer.
- Frondel, M. / Ritter, N. / Sommer, S. (2015):** Stromverbrauch privater Haushalte in Deutschland: Eine ökonometrische Analyse, in: *rwi Materialien*, Heft 92, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-materialien/rwi-materialien_92.pdf.
- Gils, H. C. (2014):** Assessment of the theoretical demand response potential in Europe, in: *Energy*, 67. Jg., S. 1-18.
- Hoffrichter, A. / Beckers, T. (2017):** Perspektiven für die Bereitstellung und Refinanzierung von Windkraft- und PV-Anlagen – Eine Analyse von Weiterentwicklungsoptionen des institutionellen Rahmens unter Einbezug institutionenökonomischer Erkenntnisse. Arbeitspapier. Online verfügbar unter: https://www.wip.tu-berlin.de/fileadmin/fg280/forschung/publikationen/2016/hoffrichter_beckers_2016-perspektiven_fuer_die_bereitstellung_und_refinanzierung_von_windkraft-_und_pv-anlagen-v20.pdf.
- Kippelt, S. (2018):** Dezentrale Flexibilitätsoptionen und ihr Beitrag zum Ausgleich der fluktuierenden Stromerzeugung Erneuerbarer Energien, in: Rehtanz, C. / Myrzik, J. (Hrsg.): Dortmunder Beiträge zu Energiesystemen, Energieeffizienz und Energiewirtschaft, Band 3, Aachen: Shaker Verlag.

- Klima, C. / Winkelmann, A. (2015):** Anforderungen an Endkunden-Demand-Response-Informationssysteme, in: Thomas, O.; Teuteberg, F. (Hrsg.): Proceedings der 12. Internationalen Tagung Wirtschaftsinformatik (WI 2015), Osnabrück, S. 978-992.
- Klobasa, M. (2007):** Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten, Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag.
- Konstantin, P. (2009):** Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt, 2. Auflage, Berlin: Springer.
- Liebe, A. / Wissner, M. (2015):** Der flexible Verbraucher – Potentiale zur Lastverlagerung im Haushaltsbereich, Studie des Wissenschaftlichen Instituts für Infrastruktur und Kommunikationsdienste im Auftrag des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg und des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, zuletzt aufgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: https://mlr.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-mlr/intern/dateien/PDFs/Verbraucherschutz/Der_flexible_Verbraucher_WIK_Endbericht_03-15_.pdf.
- Moser, S. / Elbe, C. / Schmutzner, E. / Frank, F. / Muggenheimer, G. (2015):** LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potentialanalyse für Smart Grids, Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie, zuletzt abgerufen im internet am 29.07.2018 unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/e2050_pdf/reports/endbericht_201507g_loadshift_haushalte.pdf.
- Müller, T. / Möst, D. (2018):** Demand Response Potential: Available when Needed?, in: *Energy Policy*, 115. Jg., S. 181-198.
- Palensky, P. / Dietrich, D. (2011):** Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, in: *IEEE transactions on industrial informatics*, 7. Jg., Nr. 3, S. 381-388, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: https://www.researchgate.net/profile/Peter_Palensky/publication/224243498_Demand_Side_Management_Demand_Response_Intelligent_Energy_Systems_and_Smart_Loads/links/09e41514348f6ac4aa000000/Demand-Side-Management-Demand-Response-Intelligent-Energy-Systems-and-Smart-Loads.pdf.
- Stadler, I. (2005):** Demand Response – Nicht elektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, zuletzt abgerufen im Internet am 27.07.2018 unter: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/digital/2/869.pdf>.
- Statista (2018):** Anzahl der Elektroautos in Deutschland von 2006 bis 2018, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/265995/umfrage/anzahl-der-elektroautos-in-deutschland/>.
- Stede, J. (2016):** Demand response in Germany: Technical potential, benefits and regulatory challenges, in: DIW Roundup: Politik im Fokus, Nr. 96, zuletzt abgerufen im Internet am

29.07.2018 unter: https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.532827.de/diw_roundup_96_en.pdf.

Wietschel, M. / Plötz, P. / Kühn, A. / Gnann, T. (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Kurzfassung, Studie des Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI im Auftrag der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Arbeitsgruppe 7 der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE), zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2013/Fraunhofer-ISI-Markthochlaufszszenarien-Elektrofahrzeuge-Zusammenfassung.pdf>.

Williamson, O. E. (1985): The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting, New York: Macmillan USA.

Zeilinger, A. / Einfalt, H. (2011): Simulation der Auswirkung von Demand Side Management auf die Leistungsaufnahme von Haushalten, 7. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien, zuletzt abgerufen im Internet am 29.07.2018 unter: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_197164.pdf.