

Analyse des intelligenten Lastmanagements (demand side integration) im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung

Martin Steurer, Dipl.-Ing.

Stipendiat an der Graduierten- und Forschungsschule Effiziente Energienutzung Stuttgart (GREES) sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) an der Universität Stuttgart

Fachrichtung: energiewirtschaftliche Systemanalyse

Heißbrühlstr. 49a, 70565 Stuttgart

ms@ier.uni-stuttgart.de

+49/711685878-14

Analyse des intelligenten Lastmanagements (demand side integration) im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung

1. Klimaschutz durch Wind und PV braucht Flexibilisierung

Auf dem Transformationspfad hin zu einer weitgehend dekarbonisierten Energieversorgung in Deutschland spielt die zunehmende Nutzung der Stromerzeugung aus Windkraft und Photovoltaik (PV) unumstritten eine prägende Rolle. Dabei ist eine zentrale Frage, wie hohe Anteile verteilter und dargebotsabhängiger Einspeisung, unter Berücksichtigung der gesellschaftlichen Akzeptanz und der Versorgungssicherheit, möglichst effizient in das bestehende System integriert werden können. Entscheidend ist dabei ein sinnvoller Mix verschiedener technologischer Optionen zur Systemflexibilisierung, der im Einzelnen durch Leitungsausbau, Flexibilisierung von Erzeugungsanlagen, Speicherung, sektorübergreifenden Stromeinsatz (Power-to-X) sowie die Flexibilisierung der Verbraucherseite (demand side integration, DSI) erreicht werden kann.

DSI stellt hierbei aufgrund des sehr hohen technischen Potenzials sowie des häufig geringen Erschließungsaufwands mit lediglich anfallenden Investitionen in Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) eine besonders vielversprechende Option dar. Weitere Vorteile ergeben sich aus der großen regionalen Verteilung von DSI-Potenzialen. Somit können sowohl auf lokaler als auch auf systemweiter Ebene Bilanzausgleiche zwischen Stromangebot und -nachfrage erfolgen sowie Systemdienstleistungen wie Regelleistung bereitgestellt werden.

Das im Juli 2015 erschienene Weißbuch „Ein Strommarkt für die Energiewende“ der Bundesregierung zeigt, dass in der aktuellen öffentlichen Debatte zur Energiewende das Thema DSI eine wichtige Rolle einnimmt, jedoch noch Bedarf für eine genauere Analyse der vorhandenen Potenziale und ihrer Nutzungsmöglichkeiten gesehen wird. Bestehenden Untersuchungen zu DSI in Deutschland basieren weitgehend auf theoretischen Ansätzen und erscheinen daher nur bedingt geeignet, eine belastbare Analyse zum Potenzial von DSI im Rahmen der weiteren Entwicklung des Energiesystems in Deutschland zu ermöglichen.

2. Zielsetzung

Das vorliegende Promotionsvorhaben verfolgt vor diesem Hintergrund zwei wesentliche Ziele. Zum einen soll mit Hilfe intensiver empirischer Erhebungen zu Potenzial und Charakteristik von DSI die Datengrundlage hinsichtlich der realen Nutzbarkeit von DSI-Potenzialen deutlich verbessert werden. Zum anderen sollen valide Aussagen getroffen werden, welchen Beitrag DSI zum Systemnutzen im Hinblick auf eine energieeffiziente, kostenoptimale und versorgungssichere zukünftige Energieversorgung in Deutschland leisten kann. Dazu erfolgt die Integration von DSI-Optionen in ein umfassendes europäisches Strommarktmodell mit Berücksichtigung von Interferenzen und alternativen Potenzialen anderer Flexibilisierungsoptionen.

3. Charakterisierung nachfrageseitiger Flexibilisierung

In der Literatur und in der öffentlichen Diskussion werden im Kontext von DSI-Potenzialen häufig reine Leistungswerte angegeben, ohne diese näher zu charakterisieren. Zur Bewertung der nachfrageseitigen Flexibilisierung zu energiewirtschaftlichen Einsatzzwecken sind DSI-Potenziale

detaillierter zu beschreiben. Dies kann anhand der Charakteristika schaltbare Kapazität (Lastreduktion und -erhöhung), Verfügbarkeit, Zeitrestriktionen (mögliche Schaltgeschwindigkeit, -dauer und -häufigkeit), Erschließungs- und Nutzungsaufwand geschehen. Tabelle 1 zeigt eine qualitative Einordnung typischer Stromanwendungen in Bezug auf die DSI-Eignung entsprechend dieser Kriterien, wobei Zeitrestriktionen aufgrund ihrer Heterogenität innerhalb der Anwendungsbereiche nicht dargestellt sind.

Tabelle 1: Qualitative Einordnung von Stromanwendungen hinsichtlich ihrer DSI-Eignung

	Anwendungsbereich	Schaltb. Kapazität je Standort	Verfügbarkeit	Spez. Erschließungsaufwand	Nutzungsaufwand
Produktionsprozesse	Stromintensive Industrie	Sehr hoch	Sehr hoch (nur Lastreduktion)	Gering / bereits erschlossen	Prozessbeeinträchtigung
	Sonstige Industrie	Hoch	Je nach Betriebsweise	Relativ gering	
Querschnittstechnologien	Große Betriebe (Industrie, GHD)	Hoch	Je nach Betriebsweise / Witterung	Relativ gering	Idealerweise keine Beeinträchtigung
	Mittelgroße Betriebe	Relativ gering		Relativ hoch (Stand heute)	
	Kleine Betriebe, Haushalte	Gering		Hoch (Stand heute)	

Grün – günstig; Orange – bedingt günstig; Rot – ungünstig für DSI-Nutzung

Basierend auf der qualitativen Einordnung erfolgt eine möglichst anwendungsnahe und vollständige quantitative Analyse für alle DSI-relevanten Stromanwendungen in Deutschland. Bild 1 gibt einen Überblick über das angewendete Vorgehen.

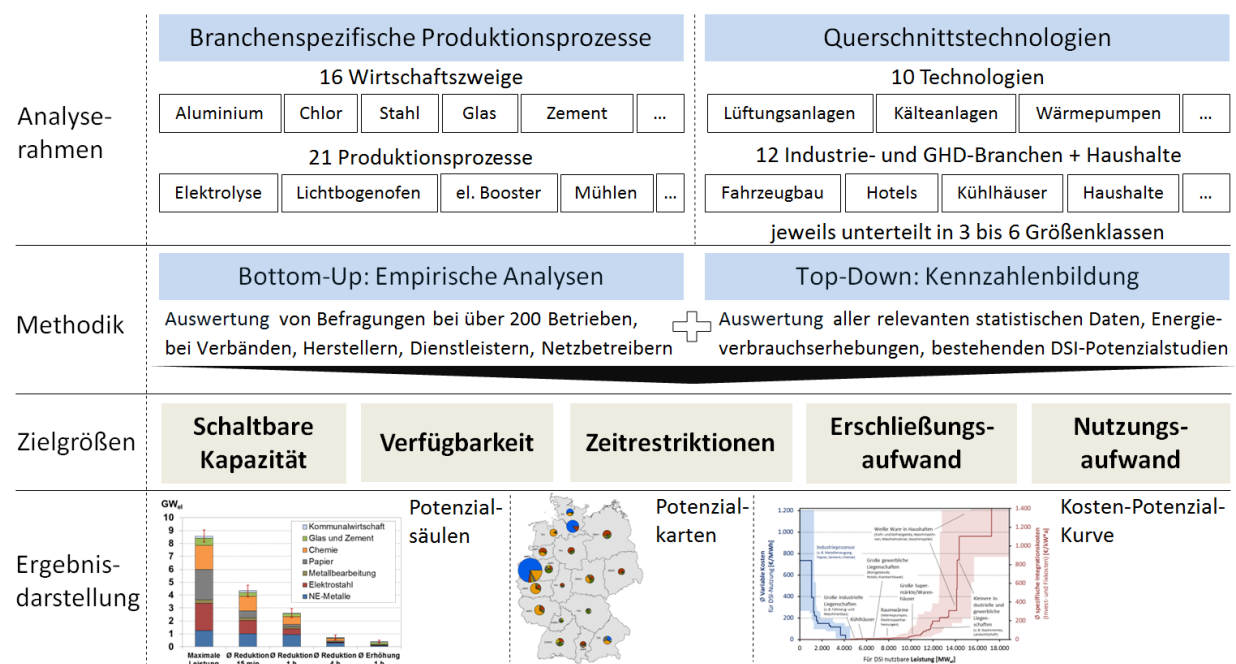


Bild 1: Vorgehen bei der quantitativen Charakterisierung von DSI-Potenzialen

Bei den 21 analysierten industriellen Produktionsprozessen wurden umfangreiche empirische Analysen mit über 200 Unternehmensbefragungen durchgeführt. Durch die Erfassung spezifischer Daten von im Schnitt zwei Drittel aller Standorte der betrachteten Branchen wurden bestehende, weitgehend theoretisch erhobene Literaturangaben validiert, detailliert und um die weiteren benötigten Parameter ergänzt. Für die Branchen Behälterglaserzeugung, Gießereien, Zink-, Kuper- und Siliziummetallerzeugung sowie Wasserversorgung wurde erstmals ein detailliertes Potenzial dargestellt.

Bei den Querschnittstechnologien wurden zehn Technologien in zwölf Branchen der Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) sowie in Haushalten betrachtet. Dabei wurden je Branche drei bis sechs Größenklassen differenziert und für jede Branchen-Größenklassen-Kombination neben dem verfügbaren DSI-Potenzial notwendige IKT-Komponenten für die Potenzialerschließung ermittelt. Somit konnte der spezifische Erschließungsaufwand quantifiziert werden. Kenngrößen zur Nutzbarkeit der DSI-Potenziale beruhen neben Literaturrecherchen auf Befragungen von Komponentenherstellern und Dienstleistern.

Als zusammenfassende Ergebnisdarstellung der Potenzialcharakterisierung zeigt Bild 2 eine Kosten-Potenzial-Kurve aller DSI-relevanten Anwendungen in Deutschland. Dargestellt ist die für DSI nutzbare Leistung mit dem dazugehörigen Nutzungsaufwand (dunkelblaue Kurve/Primärachse) und Erschließungsaufwand (dunkelrote Kurve/Sekundärachse), jeweils als Durchschnittswerte. Die hellblauen bzw. -roten Bereiche um die beiden Kurven kennzeichnen das ermittelte Fehlermaß bei DSI-Potenzialen und -Kosten.

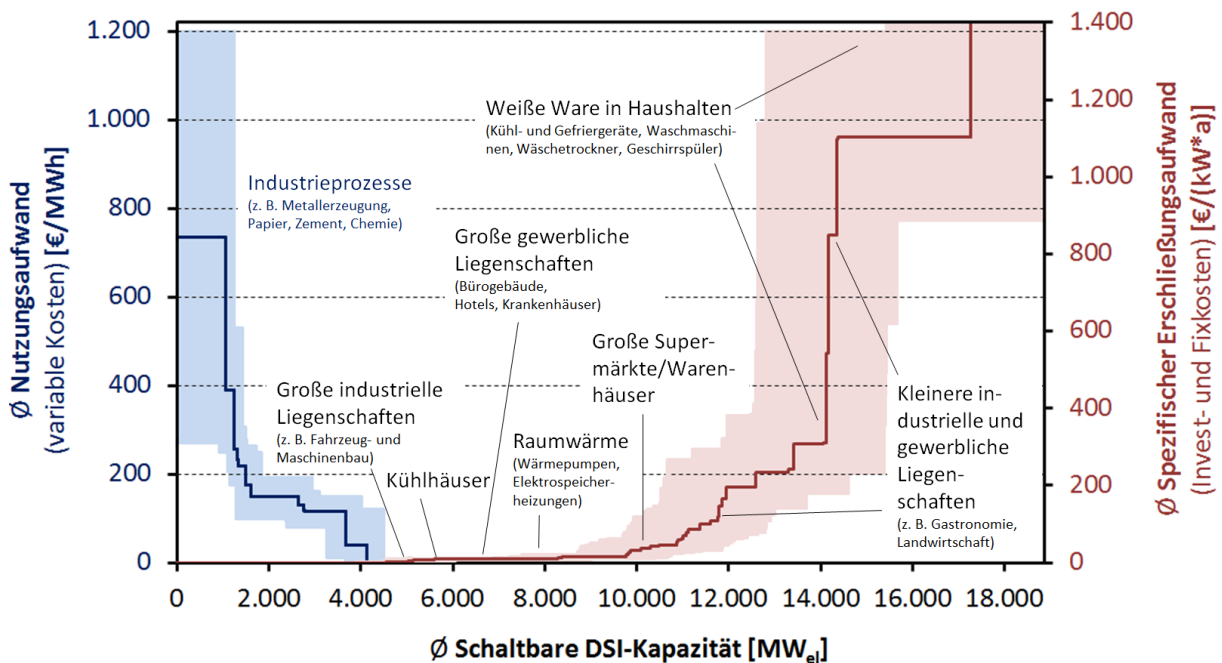


Bild 2: Kosten-Potenzial-Kurve für Demand Side Integration in Deutschland

Mit besonders günstigem Erschließungsaufwand (<12 €/kW*a) kann eine für DSI nutzbare elektrische Leistung von etwa 10 GW_{el} erschlossen werden. Für eine konkrete Flexibilitätsnutzung steht, abhängig von der nachgefragten Schaltrichtung (Ab- oder Zuschaltung), dem Zeitpunkt und der Zeitdauer, jedoch in der Regel ein wesentlich kleineres Potenzial zur Verfügung. Für die

angeschlossene Modellrechnung wird mittels empirisch ermittelter Verfügbarkeitsfaktoren auf die tatsächlich im Mittel erwartbare Leistung skaliert.

Industrielle Produktionsprozesse machen etwa 4 GW_{el} der für DSI nutzbaren Leistung aus. Sie haben in der Regel einen vernachlässigbaren Erschließungsaufwand, dafür je nach Wertschöpfungsbeeinträchtigung einen signifikanten Nutzungsaufwand, der häufig über 100 €/MWh liegt. Sie eignen sich daher insbesondere für die zuverlässige Vorhaltung von Notfallreserve (z. B. positive Regelleistung), was auch das beobachtbare Marktverhalten zeigt.

Bei Querschnittstechnologien steht insgesamt ein deutlich höheres technisches DSI-Potenzial zur Verfügung, das aber zu einem guten Teil noch mit sehr hohem Erschließungsaufwand verbunden ist. Günstig erschließbar sind beispielsweise flexibilisierbare Lüftungs- und Klimatisierungsanlagen in großen industriellen oder gewerblichen Liegenschaften, große Kälteanlagen in Kühlhäusern oder Warenhäusern sowie elektrische Raumwärmeanwendungen.

4. Einfluss von DSI auf die Strombereitstellungskosten bei hohem EE-Anteil

Zur Bewertung des möglichen Systemnutzens von DSI wird das fundamentale lineare europäische Strommarktmodell E2M2s um die Abbildung von DSI erweitert. Das Modell optimiert simultan den Einsatz von und Investitionen in Kraftwerke, Speicher, vereinfacht abgebildete Übertragungsnetze, DSI, Power-to-Heat, Power-to-Gas und Einspeisemanagement. Bei hoher zeitlicher Auflösung wird Deutschland in drei Regionen sowie die direkten Nachbarländer zuzüglich Italien, Schweden und Norwegen abgebildet. Es erfolgt eine myopische Optimierung für die Jahre bis 2050.

Bei DSI-Anwendungen wird im Modell zwischen Lastabschaltung ohne späteres Nachholen der Last sowie Lastverschiebung differenziert. Lastabschaltung ist als Fall-Back-Option mit Strafkosten in Höhe des Wertes der nichtgedeckten Nachfrage (Value of Lost Load, VoLL) hinterlegt. DSI-Anwendungen, die sich für Lastverschiebung eignen, werden im Modell ähnlich zu Stromspeichern, jedoch mit umgekehrtem Vorzeichen („negative Speicher“) und mit spezifischen intertemporalen Restriktionen abgebildet (Bild 3). Dabei kommt der möglichen Verschiebedauer d_v eine wesentliche Bedeutung zu. Um eine adäquate Abbildung der DSI-Optionen zu gewährleisten, wurden umfangreiche Sensitivitätstests durchgeführt und sowohl die Abbildungsmethodik als auch die Parametrisierung in einem fortlaufenden Prozess anhand von Literaturvergleichen und wissenschaftlichem Austausch validiert.

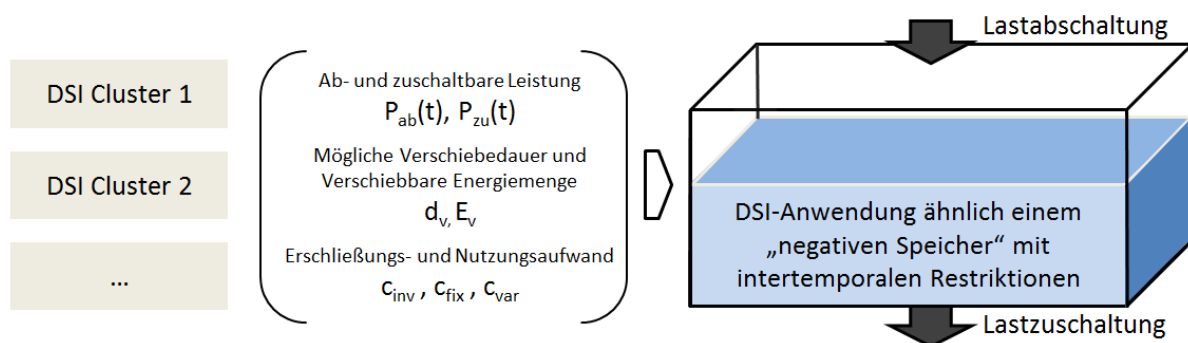


Bild 3: Methodischer Ansatz zur Abbildung von Lastverschiebung im Strommarktmodell

Die Analyse zeigt, dass nachfrageseitige Flexibilitätsressourcen insbesondere durch die Einsparung notwendiger Erzeugungskapazität, aber auch durch einen effizienteren Kraftwerksbetrieb einen

signifikanten Beitrag zu einer kosteneffizienten Integration hoher Anteile erneuerbarer Energien leisten können. Bei 80 % Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch, entsprechend der energiepolitischen Zielsetzung für das Jahr 2050, liegt die mögliche Systemkosteneinsparung durch den Einsatz von DSI in einer Größenordnung von 385 Mio. €₂₀₁₅ oder etwa 2 % der Erzeugungskosten jährlich (Bild 4). Dabei leisten industrielle Produktionsprozesse einen relevanten Beitrag zur Vorhaltung von Reserveleistung. Querschnittstechnologien werden dagegen deutlich häufiger für den Bilanzausgleich zwischen Angebot und Nachfrage genutzt.

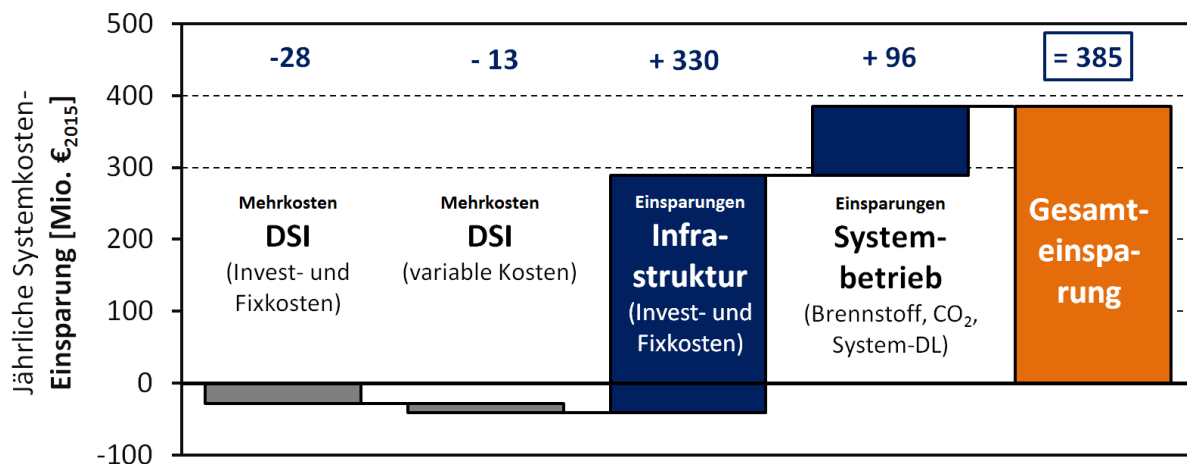


Bild 4: Mögliche jährliche Einsparungen bei den Strombereitstellungskosten in Deutschland in einem System mit 80 % Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch

Aufgrund der Abbildungsmethodik sind Verteilnetzaspekte im oben angegebenen Wert noch nicht enthalten. Bestehende Studien kommen zu dem Ergebnis, dass netzgetriebene Laststeuerung zu Einsparungen bei den Strombereitstellungskosten durch reduzierten Verteilnetzausbau in vergleichbarer Größenordnung wie bei den gezeigten marktseitigen Effekten führen kann. Rein marktgetriebene Laststeuerung könnte hingegen sogar zu einem erhöhten Ausbaubedarf im Verteilnetz führen. Dies wäre in zukünftigen Arbeiten noch zu untersuchen.

5. Zusammenfassung und Fazit

Der Ausbau erneuerbarer Energien wird weltweit als wesentlicher Baustein für die Transformation hin zu einer dekarbonisierten Energieversorgung gesehen. Um zunehmende Anteile verteilter und dargebotsabhängiger Stromerzeugung möglichst kosteneffizient in das bestehende Energiesystem zu integrieren, wird ein effizienter Mix aller zur Verfügung stehenden Flexibilisierungsoptionen benötigt. Die vorliegende Arbeit konnte mit Hilfe einer hochdetaillierten empirischen Potenzialcharakterisierung und Analysen mit einem umfassenden Strommarktmodell erstmals realitätsnah den möglichen Beitrag bestimmen, den die Flexibilisierung der Nachfrageseite in diesem Kontext zu einer erfolgreichen Transformation des deutschen Energiesystems leisten kann. Klar erkennbar wird aus den Analysen der Bedarf nach einem Marktdesign, in dem nutzengerechte Erlösquellen sowohl für marktgetriebene als auch für netzgetriebene Laststeuerung ohne wesentliche gegenseitige Beeinträchtigung bestehen. Dieser und weitere Aspekte hinsichtlich der Realisierung sinnvoller DSI-Potenziale sind aktuell für den laufenden Konsultationsprozess zum Strommarktgesetz von hoher Relevanz, wofür die vorliegende Arbeit als Beitrag angesehen werden kann.