

Abschätzung des möglichen Lastmanagementesinsatzes in Europa

Hans Christian Gils¹

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik,
Pfaffenwaldring 38-40, 70569 Stuttgart, Deutschland,
Tel: +49-(0)711-6862-477, Fax: +49-(0)711-6862-747, hans-christian.gils@dlr.de.

Zusammenfassung:

Als eine Ausgleichsoption für die schwankende Netzeinspeisung fluktuierender erneuerbarer Energien (EE) ist auch das Lastmanagement (LM) in der Diskussion. Darunter versteht man eine Anpassung des Strombedarfs an die Erzeugung durch Lastverschiebung, Lastzuschaltung oder Lastabschaltung mit dem Ziel, die Nutzung der Kraftwerks- und Netzkapazitäten zu optimieren. Grundlage einer Bewertung der möglichen Rolle des Lastmanagements in einem Energiesystem mit hohen EE- Anteilen ist die Identifizierung und Quantifizierung flexibler Lasten. In diesem Beitrag werden Vorgehensweise und Ergebnisse einer Abschätzung der theoretischen Lastmanagementpotenziale in Europa und Nordafrika (EUNA) vorgestellt. Dabei werden auch deren zeitliche Verfügbarkeit und räumliche Verteilung in Betracht gezogen. Unter den getroffenen Annahmen ergeben sich Mindestpotenziale der Lastreduktion von 59 GW und der Lasterhöhung von 73 GW. Diese verteilen sich auf alle Bedarfssektoren – Industrie, Haushalte und Tertiärsektor – und unterliegen teilweise starken jahres- und tageszeitlichen Schwankungen.

Keywords: Demand Response, Lastmanagement, Demand Side Management

1 Einleitung und Motivation

Unter Lastmanagement (Demand Side Management) versteht man das kurz- oder langfristige, ein- oder mehrmalige Anpassen des Strombedarfs an die Erzeugung durch Lastverschiebung, Lastzuschaltung oder Lastabschaltung. Dies erfolgt durch direkte oder indirekte Steuerung des Stromverbrauchs und mit dem Ziel der Optimierung der Nutzung der Kraftwerks- und Netzkapazitäten [1]. In der Vergangenheit standen beim Lastmanagement in erster Linie die Spitzenlastkappung durch Abwurf industrieller Großverbraucher und das Auffüllen der nächtlichen Lasttäler im Fokus [2]. Bewirkt wurden die Lastgangveränderungen einerseits durch das Angebot zeitvariabler Tarife und andererseits durch vereinbarte und kompensierte Nachfragesteuerung seitens des Versorgers [3]. Im Zusammenhang mit der fortschreitenden Transformation des europäischen Energiesystems hin zu einer maßgeblich auf erneuerbaren Quellen basierenden Versorgung erscheint das Lastmanagement als eine Option für den Ausgleich der fluktuierenden Netzeinspeisung aus Photovoltaikanlagen (PV) und Windkraftwerken [4]. Dabei sind jedoch weniger das regelmäßige Kappen von Lastspitzen und Auffüllen von Lasttälern gefragt, sondern vielmehr eine flexible und kurzfristige Reaktion auf das gegenwärtige Einspeiseverhalten der erneuerbaren Energien im Sinne eines Demand Response (DR) [5]. Ziel ist es, die Last je nach Verfügbarkeit von Wind- und PV-Strom

¹ Jungautor

zu erhöhen oder zu senken. Dabei sollen den Verbrauchern nach Möglichkeit weder finanzielle Verluste noch Komforteinbußen widerfahren, oder diese angemessen kompensiert werden. Technische Voraussetzung für eine Teilnahme am Lastmanagement ist die Ausstattung der Verbraucher mit einer Informations- und Kommunikationsinfrastruktur, die eine Übermittlung von Steuerungs-, Last- und Preissignalen ermöglicht. Eine Ansteuerung schaltbarer Lasten kann über verschiedene Kommunikationswege erfolgen; dazu gehört neben Rundsteuersignalen auch das Internet [6]. Die Vermarktungsmöglichkeiten flexiblen Verbrauchs sind vielfältig und reichen von der betrieblichen Reduktion der Spitzenlast und der Steigerung des PV-Eigenverbrauchs über die Teilnahme an Energiehandel, Regelenergiemarkt und dem Ausgleich von Bilanzkreisungleichgewichten bis hin zum Engpassmanagement [7]. Welche der Optionen jeweils geeignet sind, hängt nicht nur vom Verbrauchssektor, sondern auch von der Art des Stromverbrauchers ab. Der bisher relativ geringe Einsatz des Lastmanagements lässt sich auf technische, ökonomische, rechtliche und gesellschaftliche Barrieren zurückführen [2]. Für Lastmanagement in Frage kommen prinzipiell alle Verbraucher, deren Stromnachfrage für eine gewisse Zeit reduziert oder unterbrochen werden kann. Die dabei eingesparte Energiemenge kann entweder komplett wegfallen, oder zu einem anderen Zeitpunkt nachgefragt werden. Verschiedene Untersuchungen des Lastmanagements haben ein breites Spektrum an geeigneten Verbrauchern in den verschiedenen Sektoren ausgemacht [8-12]. In diesen Arbeiten wurden zudem die abwerfbaren und verschiebbaren Lasten in Deutschland bzw. Österreich quantifiziert.

Die hier vorgestellten Arbeiten sind Teil einer integrierten Untersuchung der möglichen zukünftigen Rolle verschiedener Lastausgleichsoptionen in einem europäisch-nordafrikanischen Stromverbundsystem mit hauptsächlich erneuerbaren Erzeugungskapazitäten². Dabei werden neben dem Lastmanagement auch Speicher, internationale Vernetzung und flexible Kraftwerke betrachtet. Kernstück dieser Untersuchung sind Rechnungen mit dem Modell REMix, dessen grundsätzlicher Aufbau in Abbildung 1 skizziert ist. REMix ermöglicht eine Analyse des Lastmanagementesinsatzes in Wechselwirkung mit Stromerzeugung und Bedarf, sowie in Konkurrenz zu alternativen Ausgleichsoptionen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung [13].

Basis der Bewertung des Lastmanagements mit dem REMix-Modell ist eine Abschätzung der Lastmanagementpotenziale im Untersuchungsgebiet³. In Ermangelung ausführlicher Daten müssen an einigen Punkten der Analyse Vereinfachungen und Annahmen getroffen werden. So werden beispielsweise keine Unterschiede in dem spezifischen Strombedarf lastmanagementfähiger Anwendungen, und deren Lastprofilen zwischen verschiedenen Ländern berücksichtigt. Mehr als um die Exaktheit der ermittelten Potenziale geht es um die Erarbei-

² Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Projektes „Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung“, gefördert durch das Deutsche Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), erarbeitet.

³ Untersuchungsgebiet: Ägypten, Albanien, Algerien, Belgien, Bosnien und Herzegowina, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Kosovo, Kroatien, Lettland, Libyen, Liechtenstein, Litauen, Luxemburg, Malta, Mazedonien, Marokko, Moldau, Montenegro, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowenien, Slowakische Republik, Spanien, Tschechische Republik, Tunesien, Türkei, Ungarn, Ukraine, Vereinigtes Königreich, Weißrussland, Zypern.

tung einer plausiblen Abschätzung, auf deren Grundlage der Lastmanagement-Einsatz bewertet werden kann. Die zitierten Veröffentlichungen [8-12] bilden dabei eine zentrale Grundlage. Die Methodik und Ergebnisse der Analyse werden im Rahmen dieses Beitrags dargestellt. Da für die nordafrikanischen Länder keine Daten zum Strombedarf des Tertiärsektors und der Ausstattung der Haushalte mit lastmanagementfähigen Geräten vorliegen, werden dort nur Potenziale in der energieintensiven Industrie erhoben.

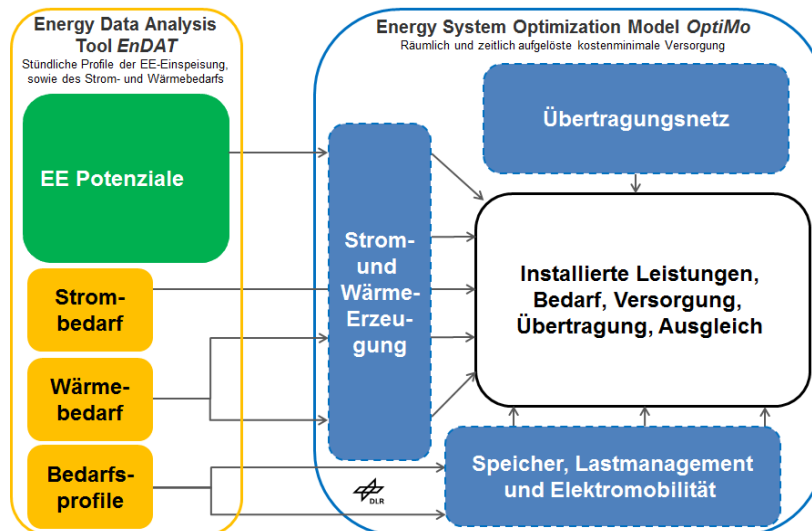


Abbildung 1: Aufbau des REMix-Modells

2 Methodik der Untersuchung

2.1 Identifizierung geeigneter Verbraucher und benötigter Parameter

Ziel dieser Analyse ist es, Stromverbraucher zu identifizieren und zu untersuchen, deren Nutzung prinzipiell für eine gewisse Zeitspanne verschoben oder unterbrochen werden kann. Es werden drei Optionen des Lastmanagements betrachtet: der Lastabwurf, das Vorziehen der Last auf einen früheren Zeitpunkt (Lasterhöhung) und das Verzögern der Last auf einen späteren Zeitpunkt (Lastabsenkung). Lastmanagementpotenziale werden in Industrie, Haushalten und Tertiärsektor ermittelt.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der im Rahmen dieser Untersuchung berücksichtigten Verbraucher, aufgeteilt nach Sektoren. Diese werden im Folgenden näher beleuchtet und die für die weitere Analyse wichtigen Parameter bestimmt. Da die weitergehende Untersuchung des Lastmanagement-Einsatzes mit dem REMix-Modell in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde durchgeführt wird, gehen nur solche Verbraucher ein, die sich für mindestens diese Dauer abwerfen oder verschieben lassen. Die zeitlich und räumlich aufgelöste Analyse des Lastmanagement-Einsatzes erfordert neben der Untersuchung der Abwurf- und Verschiebemöglichkeiten geeigneter Verbraucher auch Daten über deren Nutzungsprofil und Einsatzort. Für alle in Tabelle 1 aufgeführten Anwendungen werden daher erhoben bzw. abgeschätzt:

- Jährlicher Strombedarf
- Lastanteil, der für ein Lastmanagement genutzt werden kann
- Maximale Dauer des Eingriffes im Rahmen des Lastmanagements
- Maximale Dauer bis zum Ausgleich verschobener Last

- Maximale Anzahl der Eingriffe im Laufe eines Jahres
- Zeitlicher Verlauf des Lastprofils während eines Jahres
- Räumliche Verteilung der lastmanagementfähigen Verbraucher

Tabelle 1: Berücksichtigte Stromverbraucher mit Eignung für ein Lastmanagement

Sektoren	Einsatz	Verbraucher
Industrie	Lastabwurf	Elektrolytische Gewinnung von Primäraluminium Elektrolytische Raffination von Kupfer Elektrolytische Gewinnung von Zink Stahlerzeugung im elektrischen Lichtbogenofen Chloralkalielektrolyse im Membran- und Amalgamverfahren
	Lastverschiebung	Zementherstellung Mechanische Holzerfaserung zur Zellstoffgewinnung Altpapieraufbereitung Papierherstellung Calciumkarbidgewinnung im Lichtbogenofen Luftverflüssigung in kryogener Gegenstromdestillation Kühlung im Ernährungsgewerbe Prozessunabhängige Belüftung industrieller Gebäude
Tertiärsektor	Lastverschiebung	Lebensmittelkühlung in Handel, Gastronomie und Hotels Kühlhäuser Belüftung Klimatisierung Elektrische Warmwasserbereitstellung mit Speicher Elektrische Speicherheizung Pumpen für die Bereitstellung von Trinkwasser Abwasserbehandlung in Kläranlagen
Haushalte	Lastverschiebung	Kühl- und Gefrierschränke Waschmaschinen, Wäschetrockner, Geschirrspüler Klimatisierung Elektrische Warmwasserbereitstellung mit Speicher Elektrische Speicherheizung Heizungsumwälzpumpen

Da der Einsatz des Lastmanagements Einschränkungen unterliegt, muss eine Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe vorgenommen werden. Es wird zwischen dem theoretischen, technischen, wirtschaftlichen und praktischem Potenzial unterschieden [14]. Während unter dem theoretischen Potenzial alle Anlagen und Geräte der lastmanagementfähigen Verbrauchertypen zusammengefasst sind, enthält das technische Potenzial nur jene, die auch über eine IKT-Infrastruktur angesteuert werden können. Eine Untermenge des technischen Potenzials ist das wirtschaftliche Potenzial, also solche Geräte, deren Lastmanagementeinsatz wirtschaftlich ist. Eine weitere, davon unabhängige Untermenge des technischen Potenzials ergibt sich aus der Akzeptanz des Lastmanagementeinsatzes. Als tatsächlich nutzbares, praktisches Potenzial lässt sich dann die Schnittmenge aus wirtschaftlichem Potenzial und akzeptierter Nutzung identifizieren. Dies ist in Abbildung 2 dargestellt.

Ziel dieser Untersuchung ist es, das theoretische Potenzial des Lastmanagements abzuschätzen. Dieses wird im Rahmen der weiteren Analyse mit dem technischen Potenzial gleichgesetzt, d.h. es wird für die verfügbaren Lasten davon ausgegangen, dass alle Geräte

prinzipiell am Lastmanagement teilnehmen können. Gemäß Annahmen zu Akzeptanz und Teilnahme am Lastmanagement wird dieses Potenzial dann reduziert und auf die Wirtschaftlichkeit seiner Nutzung untersucht. Die praktischen Potenziale des Lastmanagements sind schließlich das Ergebnis der Rechnungen mit dem REMix-Modell.

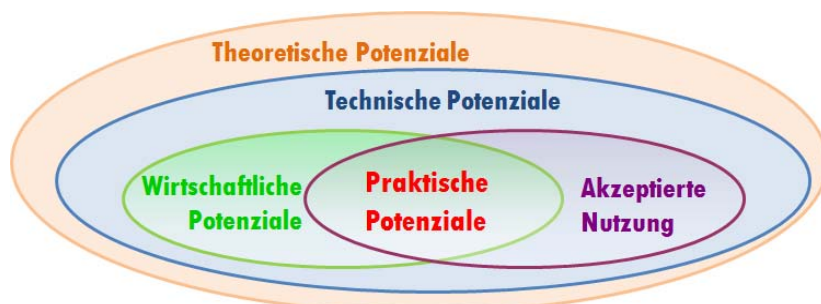


Abbildung 2: Darstellung der Potenzialbegriffe.

2.2 Lastmanagementpotenziale in der Industrie

In der Industrie wurden Lastmanagementpotenziale einerseits in den Herstellungsprozessen der stromintensiven Branchen und andererseits in den Querschnittsprozessen Kühlung und Belüftung identifiziert (siehe Tabelle 2). Bedingt durch die unterschiedlich gute Datenverfügbarkeit werden die dabei einsetzbaren Lasten unterschiedlich berechnet.

Tabelle 2: Angenommene Parameter der Lastmanagementpotenziale in der Industrie in EUNA.

Sektor/Prozess	Produktionskapazität	Strombedarf	Revision	Auslastung	Minimallast	Lastzuschaltung
	Mt	kWh/t	% d. Jahres	% Maximum	% Kapazität	% freie Leistung
Aluminiumelektrolyse	4,4	14.000	5%	100%	75%	0%
Kupferelektrolyse	3,4	350	5%	95%	75%	0%
Zinkelektrolyse	2,2	3.400	5%	100%	75%	0%
Elektrostahlherstellung	127,0	525	5%	100%	0%	0%
Chloralkalielektrolyse - Membran	6,5	2.100	5%	95%	50%	0%
Chloralkalielektrolyse - Amalgam	4,1	3.600	5%	95%	30%	0%
Mechanische Holzerfaserung	19,0	1.500	5%	80%	0%	100%
Altpapieraufbereitung	74,6	250	5%	80%	0%	100%
Papiermaschinen	122,0	425	5%	90%	70%	100%
Zementmühlen	550,0	110	5%	80%	50%	100%
Calciumcarbidherstellung	0,5	3.100	5%	80%	0%	100%
Luftzerlegung – O ₂	23,3	238	5%	80%	60%	100%
Luftzerlegung – N ₂	13,6	160	5%	80%	60%	100%
Luftzerlegung – Ar	8,0	224	5%	80%	60%	100%
Lebensmittelkühlung	-	-	0%	80%	60%	100%
Prozessunabhängige Belüftung	-	-	0%	66%	50%	90%

Grundlage der Bewertung der Potenziale in der energieintensiven Industrie sind Statistiken der Produktionskapazitäten sowie Literaturangaben des spezifischen Strombedarfs pro Tonne des Endprodukts [9,10,15-24]. Aus diesen Angaben wird unter Einbeziehung der Anlagenauslastung der maximale und tatsächliche Jahresbedarf berechnet. In die Berechnung der stündlichen Last fließen außer dem Jahresstrombedarf noch das Lastprofil und revisionsbedingte Stillstandszeiten ein (siehe Abbildung 3). Der technisch mögliche Lastabwurf entspricht in der Regel nicht der Gesamtlast, die Herstellungsprozesse werden folglich nicht vollständig heruntergefahren, sondern lediglich in ihrem Strombezug reduziert. Die ange-

nommenen Revisionsstillstandszeiten, Auslastungen, Minimallasten und maximalen Lastzuschaltungen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Die Ermittlung der verschiebbaren Lasten bei den Querschnittstechnologien Kühlung in der Lebensmittelindustrie und prozessunabhängige Belüftung werden auf Grundlage der jeweiligen Jahresstrombedarfswerte ermittelt [25,26,31]. Diese werden entsprechend dem Lastprofil auf die Stunden des Jahres verteilt.

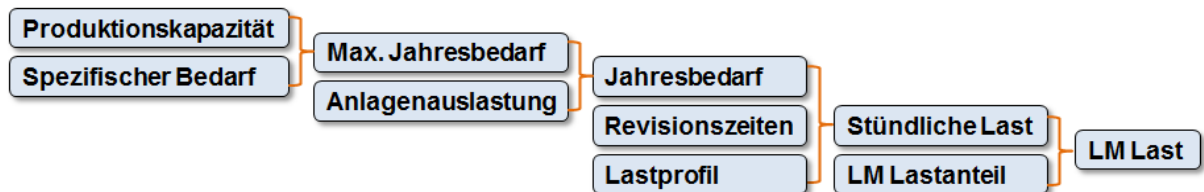


Abbildung 3: Vorgehensweise bei Ermittlung der einsetzbaren Lasten in der energieintensiven Industrie

2.3 Lastmanagementpotenziale im Tertiärsektor

Im Rahmen dieser Untersuchung umfasst der Tertiärsektor die Verbrauchergruppen Handel, private Dienstleistungen, Bildung, öffentliche Versorgung und Gesundheit. Dies entspricht der Abgrenzung des Tertiärsektors in den Statistiken der Europäischen Union. Die im Tertiärsektor vorhandenen Lastmanagementpotenziale liegen in der Bereitstellung von Kälte, Wärme, Wasser und Lüftung, sowie der Abwasserbehandlung. Im Vergleich mit der Industrie sind die verschiebbaren Lasten jedes Verbrauchers deutlich kleiner, deren Anzahl dafür jedoch wesentlich größer.



Abbildung 4: Vorgehensweise bei Ermittlung der einsetzbaren Lasten im Tertiärsektor.

Das Vorgehen bei der Abschätzung der Lastmanagementpotenziale ist in Abbildung 4 skizziert. Grundlage sind die summierten Verbrauchswerte der jeweiligen Anwendung. Diese werden aus dem Strombedarf des Tertiärsektors [27-29] und aus den Verbrauchsanteilen der Nutzungen [30] berechnet. In 2007 entfielen in der Europäischen Union 19,7% des Bedarfs an elektrischer Endenergie im Tertiärsektor auf die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser, 12,6% auf Belüftung, 5,9% auf Pumpen, 8,7% auf Kühlanwendungen und 2,8% auf Klimatisierung. Die weiteren Nutzungen sind nicht lastmanagementrelevant. Mit Ausnahme von Heizung und Klimatisierung, für die eine Abhängigkeit von der Außentemperatur angenommen wird, werden diese Anteile auf alle Länder im Untersuchungsgebiet angewendet. Der so ermittelte Jahresstrombedarf der verschiedenen Anwendungen wird unter Abschätzung der Betriebsstunden und eines Lastprofils auf die Stunden des Jahres verteilt. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 4 skizziert. Aus prozesstechnischer Sicht können die betrachteten Anwendungen für eine gewisse Zeit vom Netz genommen werden. Dagegen sprechen jedoch Einschränkungen des Nutzerkomforts und der regulären Arbeitsabläufe. Im Rahmen der Quantifizierung der theoretischen Potenziale werden derartige Aspekte zunächst nicht berücksichtigt. Die in jeder Stunde für ein Lastmanagement zur Verfügung stehende Last wird aus dem stündlichen Lastprofil ermittelt. Unter Verwendung exemplarischer

elektrischer Anschlussleistungen wird schließlich der Bedarf pro Anlage abgeschätzt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Parameter der Auslastung und Anlagenleistung im Tertiärsektor Europas.

Prozess	Volllaststunden	Anlagenbedarf	Gesamtbedarf	Mittlere Last
	h	MWh/a	TWh/a	MW
Kühlung Handel	5840	87,3	61,0	6965
Kühlhäuser	5000	1000	8,1	929
Kühlung Gastronomie	5000	7,5	12,2	1393
Belüftung Gewerbe	4380	43,8	122,5	13982
Klimatisierung	100-1070 ^a	1-11	31,9	3644
Speicherwarmwasser	175-275 ^a	1,3-2,1	13,5	1542
Speicherheizung	200-800 ^a	4,4-17,6	10,0	1141
Frischwasserversorgung	4380	87,6	29,1	3323
Abwasserbehandlung	5694	427	29,1	3323

^a Volllaststundenzahl der Anlagen abhängig vom Klima jedes Landes

2.4 Lastmanagementpotenziale in den Privathaushalten

Viele der in den meisten Haushalten vorhandenen Geräte kommen für Lastmanagement in Frage. Dabei lassen sich einerseits die thermische Trägheit im Bereich der Wärme- und Kältebereitstellung, und andererseits die zeitliche Flexibilität der Verbraucher nutzen. Während die Anzahl der Geräte im Vergleich zu den anderen Sektoren sehr hoch ist, weist jedes einzelne davon eine wesentlich geringere Last auf. Dem dadurch höheren Aufwand zur Erschließung der Potenziale steht die größere Häufigkeit der Lastverschiebung gegenüber.

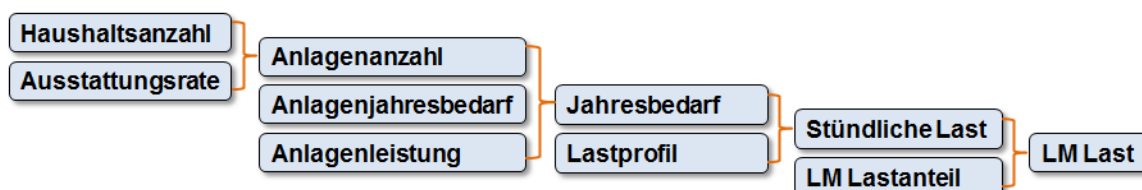


Abbildung 5: Vorgehensweise bei Ermittlung der einsetzbaren Lasten in den Privathaushalten.

Tabelle 4: Parameter der Auslastung und Jahresstrombedarf in den Haushalten Europas.

Prozess	Mittlere Ausstattung	Jahresbedarf	Gesamtbedarf	Mittlere Last
	% der Haushalte	kWh	TWh/a	MW
Gefrierschränke	45%	350	49,4	5640
Kühlschränke/-kombinationen	90%	350	98,1	11199
Waschmaschinen	77%	219	52,3	5967
Wäschetrockner	22%	307	21,1	2412
Geschirrspüler	33%	270	27,6	3154
Klimaanlagen	10%	708	39,8	4541
Speicherwarmwasser	22%	608	8,9	3608
Elektrische Speicherheizung	5%	8379 ^a	121,5	13873
Heizungsumwälzpumpen	42%	476	61,7	7045

^a Bezogen auf die gesamte Wohneinheit.

Die Vorgehensweise unterscheidet sich insofern, dass die umfangreichen Daten zu Anzahl und Ausstattung der Haushalte ein detailliertes Bottom-up-Vorgehen ermöglichen (siehe Abbildung 5). Die Anzahl der Geräte wird mit länderspezifischen Ausstattungsdaten aus [31-34] abgeschätzt, ihr Jahresstrombedarf aus den Statistiken in [30] (siehe Tabelle 4). Über die gerätespezifischen Nutzungsprofile kann dann die Last jedes Gerätetyps in jeder Stunde des Jahres bestimmt werden. Es wird angenommen, dass alle Geräte für ein Lastmanage-

ment zur Verfügung stehen, technische Einschränkungen und Teilnahmequoten werden nicht berücksichtigt.

2.5 Dauer und Häufigkeit des Lastmanagementesinsatzes

Ein Abrufen des Lastmanagements ist in Einsatzdauer und Häufigkeit begrenzt. Dies gilt sowohl für die industriellen Produktionsprozesse, als auch für die Querschnittstechnologien im Haushalts- und Tertiärsektor. Im Falle einer Lastverschiebung gibt es zudem eine maximale Verschiebedauer, innerhalb der die vorher erfolgte Lastabsenkung bzw. -erhöhung wieder ausgeglichen werden muss. Die Literaturwerte zur maximalen Dauer der Lasteingriffe weisen für einige der betrachteten Verbrauchertypen deutliche Unterschiede auf [8-12,14]. Im Rahmen dieser Untersuchung werden auf deren Grundlage möglichst vorsichtige Annahmen getroffen (siehe Tabelle 5). Einschränkungen ergeben sich dabei aus der Tatsache, dass die verschiedenen Verbrauchertypen für die Untersuchung des Lastmanagements mit REMix zu Klassen mit jeweils identischen Parametern zusammengefasst werden. Somit wird im Rahmen der Potenzialbetrachtung eine möglichst hohe Vereinheitlichung angestrebt. Dies betrifft neben der Verschiebedauer t_{shift} auch die Einsatzdauer $t_{\text{interfere}}$ und die jährliche Maximalanzahl der Lasteingriffe f_{DR} .

Tabelle 5: Art des Einsatzes, Verschiebedauern, Einsatzdauern, Maximalzahl der Einsätze, sowie Zeit- und Temperaturabhängigkeit des Bedarfsprofils der Verbraucher mit Eignung für Lastmanagement.

Verbraucher	Einsatz	t_{shift}	$t_{\text{interfere}}$	f_{DR}	$P(t)$	$P(\vartheta)$
	-	h	h	1/a	-	-
Aluminiumelektrolyse	Lastabwurf	∞^a	4	40	Nein	Nein
Kupferelektrolyse	Lastabwurf	∞	4	40	Nein	Nein
Zinkelektrolyse	Lastabwurf	∞	4	40	Nein	Nein
Chloralkalielektrolyse	Lastabwurf	∞	4	40	Nein	Nein
Elektrostahlerzeugung	Lastabwurf	∞	4	40	Nein	Nein
Zementherstellung	Vorziehen/Verzögern	24	3	365	Saison, Stunde	Nein
Zellstoff- und Papierindustrie	Vorziehen/Verzögern	24	3	365	Nein	Nein
Calciumcarbidherstellung	Vorziehen/Verzögern	24	3	365	Nein	Nein
Luftverflüssigung	Vorziehen/Verzögern	24	3	365	Nein	Nein
Lebensmittelkühlung Industrie	Vorziehen/Verzögern	24	2	1095	Saison, Stunde	Nein
Prozessunabhängige Belüftung	Verzögern	2	1	1095	Tag	Nein
Kühlung Handel	Verzögern	2	1	1095	Saison, Stunde	Nein
Kühlhäuser	Vorziehen/Verzögern	2	2	1095	Saison, Stunde	Nein
Kühlung Gastronomie	Vorziehen/Verzögern	2	2	1095	Saison, Stunde	Nein
Belüftung Gewerbe	Verzögern	2	1	1095	Tag, Stunde	Nein
Klimatisierung	Verzögern	2	1	1095	Stunde	Ja
Speicherwarmwasser	Vorziehen	12	12	1095	Stunde?	Ja
Elektrische Speicherheizungen	Vorziehen	12	12	1095	Stunde	Ja
Frischwasserversorgung	Vorziehen/Verzögern	2	2	1095	Stunde	Nein
Abwasserbehandlung	Vorziehen/Verzögern	2	2	1095	Nein	Nein
Kühl- und Gefrierschränke	Verzögern	2	1	1095	Saison, Stunde	Nein
Waschmaschinen	Vorziehen/Verzögern	6	∞^b	∞^b	Saison, Tag, Stunde	Nein
Wäschetrockner	Vorziehen/Verzögern	6	∞	∞	Saison, Tag, Stunde	Nein
Geschirrspüler	Vorziehen/Verzögern	6	∞	∞	Saison, Tag, Stunde	Nein
Heizungsumwälzpumpen	Verzögern	2	1	1095	Stunde	Ja

a Bei Abwurf ist die Verschiebedauer unendlich.

b Da in jeder Stunde andere Geräte in Betrieb sind, gibt es keine prinzipielle Beschränkung in der Dauer und Häufigkeit der Eingriffe.

2.6 Zeitliche Verfügbarkeit der Potenziale

Die zeitliche Verfügbarkeit des Lastmanagementpotenzials ist durch das Bedarfsprofil der entsprechenden Anwendungen, Prozesse und Geräte gegeben. Für eine zeitlich aufgelöste Untersuchung des Lastmanagement-Einsatzes mit REMix muss somit für jeden Verbrauchertyp ein solches Profil abgeschätzt werden. Dabei werden einerseits regelmäßig wiederkehrende Abhängigkeiten des Bedarfs von der Jahreszeit, dem Wochentag und der Stunde des Tages, und andererseits eine direkte Kopplung an den Außentemperaturverlauf angenommen (siehe Tabelle 5).

2.6.1 Konstante und periodische Bedarfsprofile

Bedingt durch die hohe Anlagenauslastung wird bei den Produktionsprozessen der energieintensiven Industrien von einem ganzjährig konstanten Lastprofil ausgegangen. Einzige Ausnahme bildet die Zementherstellung, deren Auslastung nach [23] im Jahresverlauf zwischen 40% und 100% variiert. Neben einem durch die geringere Bautätigkeit bedingten Produktionsrückgang im Winter gibt es in den Tagesstunden der Werkzeuge reduzierte Leistungsbezüge. Es wird vereinfacht angenommen, dass die Anlagenauslastung im Winter um 20 % geringer ist als im Sommer und zudem an Werktagen in den Mittagsstunden saisonunabhängig auf 2/3 der nächtlichen Last gesenkt wird. Für die prozessunabhängige Belüftung in der Industrie wird ein Wochenendrückgang des Bedarfs um 40% (Samstag) bzw. 50% (Sonntag) angenommen; die gewerbliche Lüftung wird darüber hinaus in den Nachtstunden um 50% zurückgefahren. Der Strombedarf der Kälteanwendungen wird in allen Sektoren in den Wintermonaten um 10% geringer als im Sommer angesetzt; bedingt durch die geringere Anzahl von Eingriffen von außen fällt er in den Nachtstunden zudem um 20% geringer aus als tagsüber. Die Verfügbarkeit von Wasserspeichern ermöglicht es, die Pumpen der Frischwasserversorgung verstärkt in Schwachlastzeiten zu betreiben; hier wird angenommen, dass der Strombezug in den Mittagsstunden um 2/3 geringer als nachts ist. Der Betrieb von Waschmaschinen, Wäschetrocknern und Spülmaschinen ist maßgeblich durch den Tagesablauf der Benutzer bestimmt. In [36] sind stündliche Lastprofile in Abhängigkeit von Jahreszeit und Wochentag angegeben; diese werden im Rahmen dieser Untersuchung verwendet.

2.6.2 Außentemperaturbestimmte Bedarfsprofile

Der Strombedarf für Heizung, Warmwasser und Klimatisierung ist direkt an die jeweiligen Bedarfsprofile gekoppelt. Diese werden für jedes Land aus dem Jahrestemperaturverlauf abgeschätzt. Der Raumwärmebedarf wird mit einer erweiterten Gradtagzahl-Methode, in der neben der Mitteltemperatur des aktuellen Tages auch die abnehmend gewichteten Werte der vorhergehenden sechs Tage berücksichtigt werden, auf die einzelnen Tage eines Jahres verteilt (siehe Gleichung 1). Dies erfolgt getrennt für jedes Land, wobei die verschiedenen Nuts-2-Regionen eines Landes entsprechend ihrem Anteil an der Gesamtbevölkerung gewichtet werden. Der zeitliche Verlauf des Raumwärmebedarfs innerhalb eines Tages wird anhand temperaturabhängiger Standardlastprofile abgeschätzt. Diese werden auf Grundlage eines Datensatzes der Wärmeeinspeisung in ein Fernwärmenetz ermittelt.

Der tägliche Warmwasserbedarf im Laufe eines Jahres wird als nahezu konstant abgeschätzt. Er liegt am kältesten Tag des Jahres um 20 % höher als am wärmsten Tag des Jahres. Diese Annahme ergibt sich aus der Analyse einer Fernwärmelastzeitreihe. Für den

stündlichen Warmwasserbedarf innerhalb eines Tages wird wie für den Raumwärmebedarf ein Standardlastprofil verwendet.

$$Q_t^{SH} = \frac{\sum_a \frac{1}{2^a} n_{t-a}^{HDD}}{\sum_a \frac{1}{2^a} \cdot \sum_{t=1}^{365} n_t^{HDD}} \cdot Q_{year}^{SH} \quad a = 0 \dots 6 \quad (1)$$

Q_t^{SH} – Raumwärmebedarf an Tag t

Q_{year}^{SH} – Jahresbedarf an Raumwärme

n_t^{HDD} – Gradtagzahl des Tages t

Der Klimatisierungsbedarf wird analog zum Raumwärmebedarf auf Grundlage der Gradtagzahlen berechnet. Dabei fließt jedoch neben der Mitteltemperatur des aktuellen Tages nur jene des vorhergehenden Tages ein.

2.7 Räumliche Verteilung der Potenziale

2.7.1 Industrie

Für die Lastmanagementpotenziale in der stromintensiven Industrie wurde eine Erfassung der individuellen Standorte und Produktionskapazitäten angestrebt. Die geographischen Koordinaten der Werke wurden ermittelt, wodurch eine sehr gute räumliche Zuordnung der Potenziale erreicht wird. Auf Grundlage von [16] und den Statistiken verschiedener Branchenverbände konnten die Standorte der Aluminium-, Elektro Stahl-, Kupfer-, Zink-, Chlor-, Calciumcarbid und teilweise auch der Zementindustrie ermittelt werden. Eine Zuordnung der Produktionskapazitäten war dabei jedoch nicht in allen Fällen aus den Statistiken ableitbar und wurde ggf. abgeschätzt. Grundlage der räumlichen Verteilung der weiteren industriellen Lastmanagementpotenziale sind Beschäftigungsstatistiken von Eurostat. Diese sind auch sektoral und regional aufgelöst verfügbar, was eine näherungsweise Zuordnung der Potenziale ermöglicht.

2.7.2 Tertiärsektor

Aufgrund der großen Verbraucherzahl kann eine geographische Zuordnung der Potenziale nicht für individuelle Standorte erfolgen. Sie wird vielmehr auf Grundlage hochaufgelöster GIS-Daten der Verteilung der Wohn- und Gewerbeflächen abgeschätzt. Diese sind für den überwiegenden Teil der europäischen Landfläche in einer räumlichen Auflösung von 100 m im *Corine Land Cover*-Datensatz (CLC) enthalten [37]. CLC weist jede Rasterzelle von 100 m Kantenlänge einer von insgesamt 44 Landnutzungskategorien zu. Diese enthalten neben Siedlungsgebieten unter anderem auch landwirtschaftliche Nutzung, Wald und Gewässer. Hier berücksichtigt werden die Kategorien *continuous urban fabric* (CLC Code 111), *discontinuous urban fabric* (CLC Code 112) und *industrial or commercial units* (CLC Code 121). Die Potenziale aller Verbraucher werden gleichmäßig über alle Rasterzellen, die einer dieser Kategorien zugeordnet sind, verteilt. In jenen Ländern, die nicht im Datensatz enthalten sind, erfolgt die Verteilung entsprechend der Bevölkerung (siehe dazu Abschnitt 2.7.3).

2.7.3 Haushalte

Die räumliche Zuordnung der Lastmanagementpotenziale im Haushaltssektor innerhalb der Länder im Untersuchungsgebiet erfolgt entsprechend der Bevölkerungsverteilung. Dabei wird auf die Bevölkerungsstatistiken von Eurostat, eine vom *Joint Research Center* ermittelte GIS-Karte [38], sowie den *Grump*-Datensatz des *Center for International Earth Science Information Network* (CIESIN) an der *Columbia University* [39] zurückgegriffen. Die Eurostat-Statistik beinhaltet die Bewohnerzahl jeder Nuts-3-Region für die EU-Länder, sowie Norwegen, Schweiz, Kroatien, Türkei und Liechtenstein. Innerhalb der Regionen werden die Einwohner gemäß des JRC-Rasters verteilt. Derart detaillierte Daten sind für die weiteren Länder Europas nicht vorhanden. Dort wird die Gesamtbevölkerung entsprechend des *Grump*-Datensatzes den Rasterzellen zugewiesen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Unter den getroffenen Annahmen können umfangreiche theoretische Lastmanagementpotenziale im Untersuchungsgebiet identifiziert werden (siehe Tabelle 6). In der Summe der Maximalwerte liegen ein Potenzial der Lastreduktion von knapp 250 GW und ein Potenzial der Lasterhöhung von knapp 550 GW vor. Im Vergleich dazu lag die Jahresspitzenlast im Untersuchungsgebiet in 2010 bei rund 620 GW, die Minimallast bei etwa 280 GW. Die Lastmanagementpotenziale verteilen sich relativ ungleichmäßig auf die betrachteten Verbraucher und Sektoren. In der Summe über alle Länder und Verbraucher liegen die umfangreichsten theoretischen Potenziale in den Privathaushalten mit 122 GW der Lastabschaltung und 490 GW der Lastzuschaltung, gefolgt vom Tertiärsektor mit 100 GW bzw. 48 GW und der Industrie mit 27 GW bzw. 9 GW. Die größten abschaltbaren Lasten liegen im Bereich der Klimatisierung, der Haushaltsgroßgeräte und der gewerblichen Lüftung; die größten zuschaltbaren Verbraucher sind die elektrischen Warmwasserboiler und Heizungen, sowie ebenfalls die Haushaltsgroßgeräte. Deren umfangreichen Potenziale der Lastzuschaltung ergeben sich auch aus den angenommenen Verschiebedauern von 12 bzw. 6 Stunden, die das Vorziehen der Last mehrerer Stunden ermöglichen.

Die summierten Maximalpotenziale aller Verbraucher stehen jedoch in keiner Stunde des Jahres in diesem Ausmaß zur Verfügung. Dies resultiert aus den starken Variationen der zeitlichen Verfügbarkeit der verschiedenen Verbraucher mit Eignung für ein Lastmanagement. Wie aus Tabelle 6, sowie Abbildung 6 und Abbildung 7 deutlich hervorgeht, zeigen die Potenziale gerade bei den außertemperaturabhängigen Verbrauchern zur Wärme- und Kältebereitstellung im Jahresverlauf sehr starke Unterschiede. Daraus ergibt sich, dass die über alle Stunden des Jahres gemittelten Potenziale teilweise sehr deutlich hinter den Maximalwerten zurückbleiben. Dies ist der Fall vor allem bei der Klimatisierung, bei der im Mittel nur etwa 10% der maximal reduzierbaren Last zur Verfügung stehen, aber auch der gewerblichen Belüftung oder den Waschmaschinen, Wäschetrocknern und Geschirrspülern in den Privathaushalten. Da sich die Stromverbräuche einiger betrachteter Gerätetypen bei steigender Temperatur gegensätzlich entwickelt, wie es am Beispiel der Klimaanlage und Speicherheizungen anschaulich wird, liegt die tatsächlich verfügbare Last deutlich unter dem Summenwert der einzelnen Maximalpotenziale. Berücksichtigt man alle möglichen Einschränkungen, liegen in EUNA jeder Stunde des Jahres Mindestwerte der Lastreduktion von 59 GW und der Lasterhöhung von 73 GW vor.

Die verschiedenen Entwicklungen der Tagesmittelwerte im Laufe eines Jahres werden anhand der in Abbildung 6 aufgetragenen Verbraucher verdeutlicht. Die abwerfbaren und zuschaltbaren Lasten in der Industrie liegen zwar unter den Spitzenwerten der anderen Sektoren, stehen dafür aber das ganze Jahr über nahezu konstant zur Verfügung. Geringe jahreszeitliche Schwankungen ergeben sich auch im Bereich der Lebensmittelkühlung in Haushalts- und Tertiärsektor. Die verschiebbaren Lasten in der Bereitstellung von Klimakälte und Heizwärme sind hingegen sehr stark durch die Außentemperatur beeinflusst und zeigen einen zueinander gegensätzlichen Jahresverlauf. Gerade bei der Klimatisierung, bei der sehr kurzfristige Reaktionen auf die Außentemperatur erfolgen, ergeben sich sehr große Spitzen in einzelnen Tagen und Stunden. Bei der gewerblichen Kühlung fällt in erster Linie die angenehme Wochenendabsenkung ins Auge.

Tabelle 6: Theoretische Lastmanagementpotenziale im Untersuchungsgebiet (2010).

Verbraucher	Lastabsenkung (Verzögern)			Lasterhöhung (Vorziehen)		
	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel
	MW	MW	MW	MW	MW	MW
Aluminiumelektrolyse	1488	1488	1488	0	0	0
Kupferelektrolyse	21	21	21	0	0	0
Zinkelektrolyse	179	179	179	0	0	0
Chloralkalielektrolyse	1512	1512	1512	0	0	0
Elektrostahlerzeugung	5927	5927	5927	1832	1832	1832
Zementherstellung	7945	7945	7945	0	0	0
Zellstoff- und Papierindustrie	3604	6825	5546	108	3329	1385
Calciumcarbidherstellung	28	28	28	33	33	33
Luftverflüssigung	191	191	191	227	227	227
Lebensmittelkühlung Industrie	1448	2011	1785	1247	2260	1655
Prozessunabhängige Belüftung	395	790	689	0	0	0
Kühlung Handel	5652	7850	6965	0	0	0
Kühlhäuser	754	1047	929	579	872	696
Kühlung Gastronomie	1130	1570	1393	868	1307	1045
Belüftung Gewerbe	5202	20806	13982	0	0	0
Klimatisierung Gewerbe	0	46963	3251	0	0	0
Speicherwarmwasser Gewerbe	0	0	0	16218	21023	18498
Speicherheizungen Gewerbe	0	0	0	22	18706	8833
Frischwasserversorgung	1648	4994	3323	1663	5029	2701
Abwasserbehandlung	665	665	665	895	895	895
Kühl- und Gefrierschränke	12896	17911	15892	0	0	0
Waschmaschinen	0	19742	5603	0	91207	33631
Wäschetrockner	0	20742	2387	0	86399	14345
Geschirrspüler	0	14531	3131	0	61193	18738
Klimatisierung Haushalte	0	29864	2572	0	0	0
Speicherwarmwasser Haushalte	0	0	0	36635	47705	41738
Speicherheizungen Haushalte	0	0	0	1126	202297	100231
Heizungsumwälzpumpen	3287	13147	7197	0	0	0

Betrachtet man die stündlichen Profile im Wochenverlauf (Abbildung 7), sind auch dort klare Unterschiede zwischen den verschiedenen Prozessen und Geräten zu erkennen. Entsprechend dem generell höheren Bedarf liegen in den Tagesstunden in der Regel höhere Poten-

ziale der Lastreduktion vor als in den Nachtstunden. Dies betrifft erwartungsgemäß vor allem die Verbraucher im Haushalts- und Tertiärsektor. Eine Ausnahme bilden Länder mit einem sehr großen Anteil an Nachtspeicherheizungen, wie zum Beispiel Finnland und Schweden.

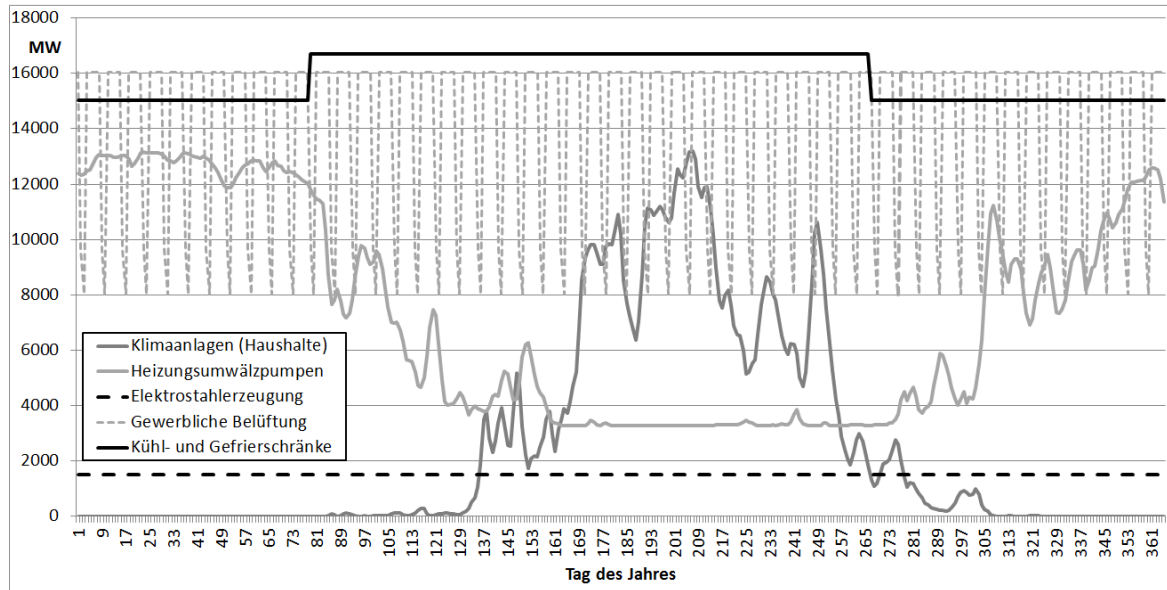


Abbildung 6: Jahreszeitlicher Verlauf der Tagesmittelwerte der potenziellen Lastreduktion verschiedener Verbraucher.

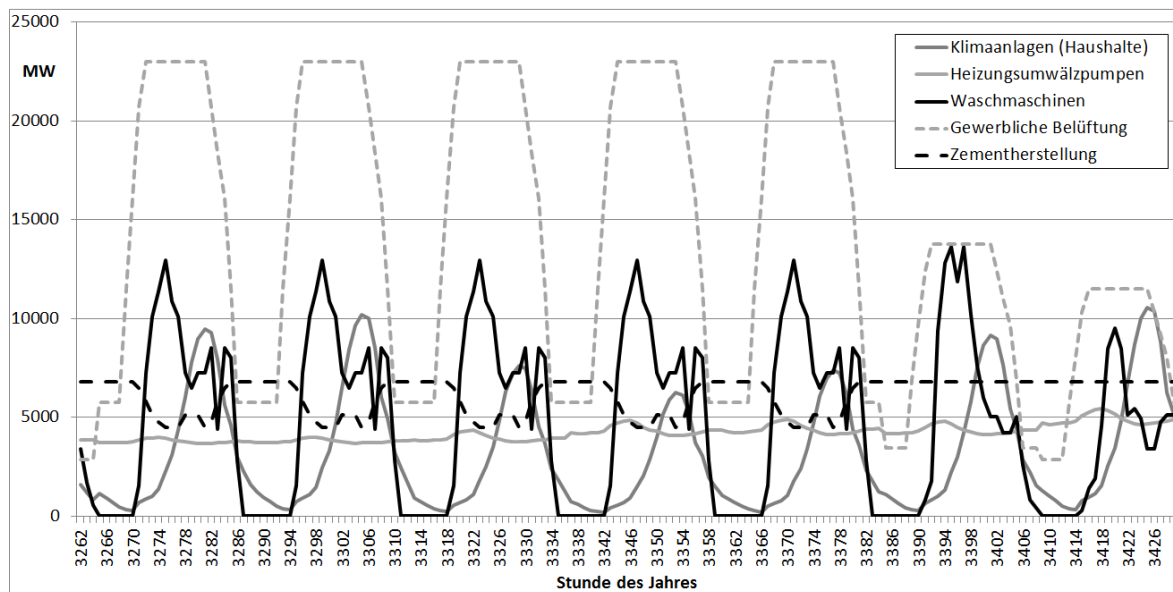


Abbildung 7: Wochenverlauf der Stundenwerte der potenziellen Lastabsenkung verschiedener Verbraucher im Frühsommer.

Wie aus Abbildung 8 beispielhaft hervorgeht, verteilt sich das Potenzial je nach Land sehr unterschiedlich auf die betrachteten Sektoren. Dies ergibt sich in erster Linie aus den klimatischen Bedingungen, aber auch aus der Industriestruktur, sowie der Verbreitung der lastmanagementfähigen Geräte in den Privathaushalten. Extreme Unterschiede beim Anteil der Industrie am mittleren Lastreduktionspotenzial liegen beispielsweise zwischen Luxemburg mit 68 % und Malta mit lediglich 2 % vor.

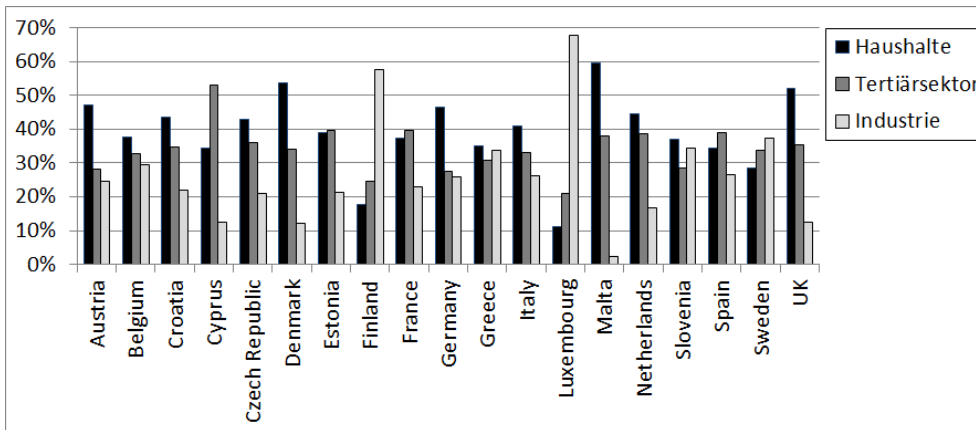


Abbildung 8: Sektorale Anteile am Potenzial der Lastabsenkung durch Verzögerung in ausgewählten Ländern des Untersuchungsgebiets.

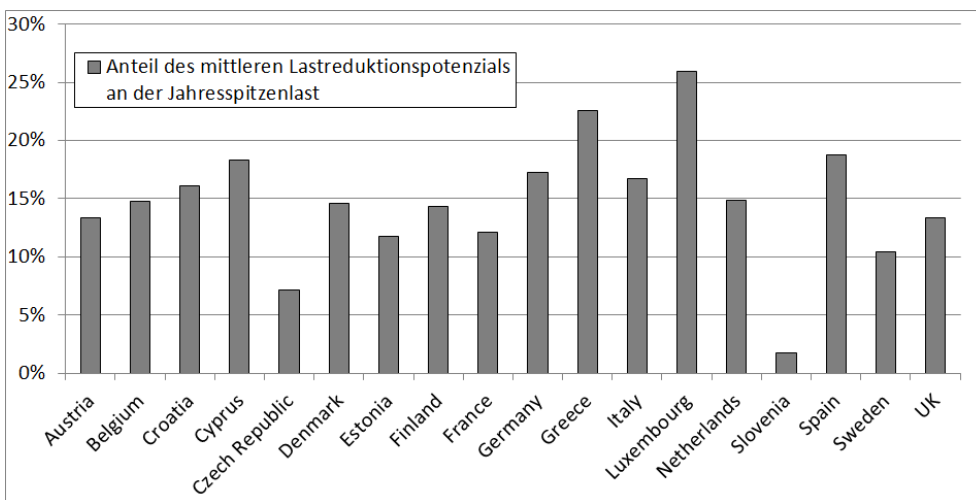


Abbildung 9: Anteil des mittleren stündlichen Lastreduktionspotenzials an der Jahresspitzenlast 2010.

In Abbildung 9 sind für ausgewählte Länder die mittleren Lastreduktionspotenziale im Vergleich zur Jahresspitzenlast 2010 aufgetragen. Diese rangieren von 2 % in Slowenien bis 26 % in Luxemburg. Große anteilige Werte liegen vor allem in wärmeren Ländern vor, in denen die Klimaanlage einen bedeutenden Anteil am Lastreduktionspotenzial ausmachen.

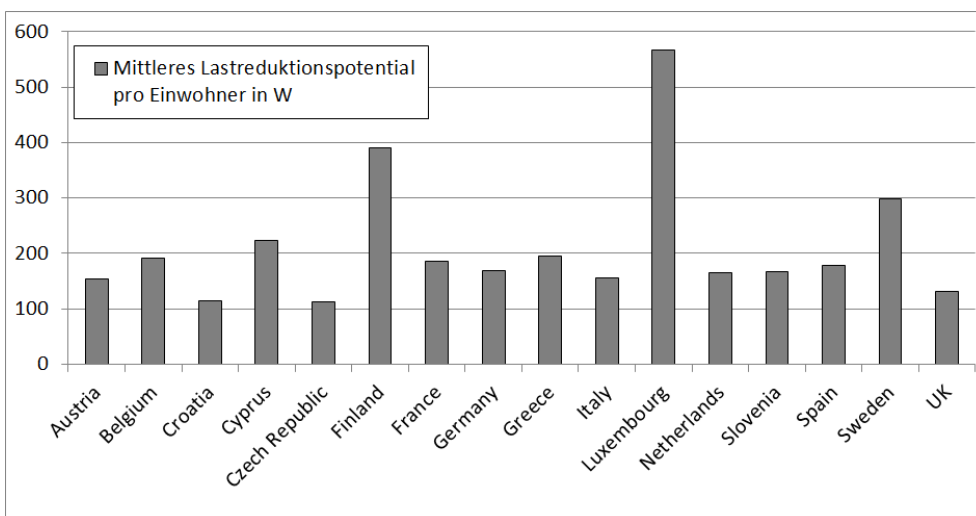


Abbildung 10: Mittleres stündliches Lastreduktionspotenzial in kW, hochgerechnet auf die Einwohner in 2010.

Deutliche Unterschiede ergeben sich auch bei einer Betrachtung des mittleren Potenzials pro Einwohner (siehe Abbildung 10). So ist beispielsweise das mittlere stündliche Lastreduktionspotenzial pro Kopf in Luxemburg über fünf Mal so hoch wie in der Tschechischen Republik. Noch niedrigere Werte ergeben sich für die nördlichen Balkanländer, in denen einerseits nur wenige energieintensive Fabriken beheimatet sind und andererseits die Ausstattung mit Haushaltsgroßgeräten und Klimaanlage etwas geringer ist als im Rest Europas. Über alle Stunden des Jahres betrachtet liegt in den Ländern Mitteleuropas im Mittel ein Lastreduktionspotenzial von 150-200 W pro Kopf vor.

Unter den getroffenen Annahmen ergibt sich eine starke Konzentration der flexiblen Lasten auf Gebiete hoher Siedlungsdichte. Eine Ausnahme bilden die industriellen Potenziale einiger energieintensiver Unternehmen, deren Werke sich teilweise außerhalb der Bevölkerungszentren befinden. Die räumliche Verteilung der Lastmanagementpotenziale ist in Abbildung 11 illustriert.

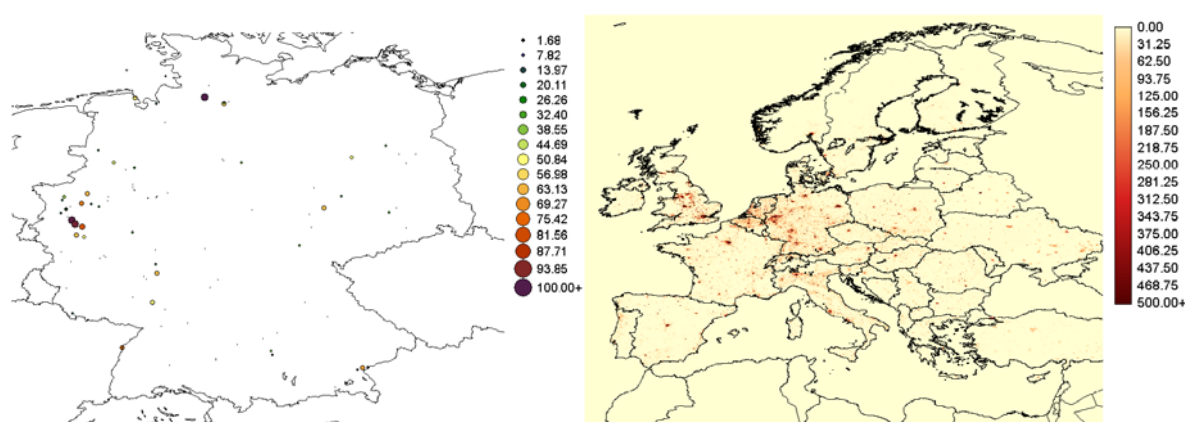


Abbildung 11: Räumlichen Zuordnung der Potenziale: links die mittlere Lastreduktion in der energieintensiven Industrie in Deutschland in MW, rechts die mittlere Lastreduktion im Haushalts- und Tertiärsektor in kW/km².

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden die mögliche Lastverschiebung und der Lastabwurf von 30 verschiedenen Verbrauchern in EUNA abgeschätzt. Das Verschiebepotenzial der identifizierten Geräte und Prozesse ergibt sich aus den folgenden Charakteristika: Wärmekapazität/thermische Trägheit (z.B. Heizung, Kühlschränke), Nutzungsflexibilität (z.B. Waschen, Spülen, Belüftung) oder physikalische Speichermöglichkeiten (z.B. Zementindustrie, Frischwasserbereitstellung). Im Gegensatz dazu bedarf es für einen Lastabwurf keiner grundlegenden Voraussetzungen. Da dieser aber in der Regel höhere Kosten verursacht, erfolgt hier eine Beschränkung auf die Industriebranchen mit dem größten spezifischen Bedarf.

Für die betrachteten Verbraucher wurden umfangreiche theoretische Potenziale für Lastmanagement identifiziert. Auf das gesamte Untersuchungsgebiet bezogen lässt sich die Verbraucherlast im Mittel um knapp 95 GW reduzieren oder um 250 GW erhöhen. Lastmanagementpotenziale finden sich in allen Sektoren, wobei die industriellen Potenziale zwar geringer sind und seltener genutzt werden können, dafür aber nahezu konstant zur Verfügung stehen. Im Gegensatz dazu sinken die Potenziale im Haushalts- und Tertiärsektor in einigen Stunden des Jahres auf wenige Prozent ihres Maximalwertes. Es wurde gezeigt,

dass die einsetzbare Last im Laufe eines Jahres sehr stark variiert. Die Berücksichtigung der zeitlichen Auflösung ist daher von zentraler Bedeutung in der Bewertung von Energiesystemen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien.

Die hier vorgestellte Analyse überschätzt die tatsächlich nutzbaren Potenziale tendenziell. Dies resultiert aus der vollständigen Ausblendung von Fragen der Komfortansprüche, Akzeptanz und Teilnahme des Haushalts- und Tertiärsektor am Lastmanagement. Um die Tatsache wider zu spiegeln, dass beispielsweise ein Abschalten der Klimatisierung oder ein Vorziehen des Waschmaschinenbetriebs nur in einem beschränkten Maße akzeptiert wird, werden die Potenziale bei weiteren Untersuchungen entsprechend reduziert. Im Rahmen einer zunehmenden Ausstattung von Kleinverbrauchern mit intelligenten Stromzählern erscheint es in Anbetracht der vorliegenden theoretischen Potenziale attraktiv, sich mit Programmen zur Laststeuerung oder Anreizen von Lastverschiebungen zu befassen.

Während sich die einsetzbaren Lasten in der Industrie auf wenige, große Verbraucher konzentrieren, verteilen sie sich im Haushalts- und Tertiärsektor auf eine große Anzahl von Geräten. Dies erschwert zum einen den Zugriff auf die Potenziale und erhöht zum anderen die pro MW aufzubringenden Kosten für die IKT-Infrastruktur. Die zentrale Frage der Wirtschaftlichkeit des Lastmanagements bleibt bei der hier dargestellten Analyse außen vor. Diese ist Teil der weiteren Untersuchung mit dem Optimierungsmodell REMix. Erst auf Grundlage der dort vollzogenen Rechnungen wird sich bewerten lassen, ob ein Einsatz des Lastmanagements ökonomische Vorteile gegenüber anderen Ausgleichsoptionen bringt.

Da beispielsweise für die Bedarfsanteile verschiedener Anwendungen im Tertiärsektor oder den spezifischen Bedarf von Elektrogroßgeräten nur für die gesamte Europäische Union (EU) berechnete Mittelwerte vorliegen, kann im Haushalts- und Tertiärsektor eine räumliche Zuordnung des Potenzials innerhalb der Länder, aber auch zwischen den Ländern nur genähert erfolgen. Die Übertragung mittlerer Strombedarfsanteile und spezifischer Strombedarfsanteile auf alle Länder im Untersuchungsgebiet, auch solche die außerhalb der EU liegen, stellt eine starke Näherung dar.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Lastmanagement einen wichtigen Beitrag zur Transformation des Energiesystems auf hauptsächlich erneuerbare Quellen darstellen kann. Zur Bestätigung werden zukünftig noch weitergehende Untersuchungen mit dem REMix-Modell unter Berücksichtigung von Lastmanagementkosten und alternativen Ausgleichsoptionen durchgeführt.

Literatur

- [1] F. Kreith, D.Y. Goswami: "Energy management and conservation handbook", CRC Press, Boca Raton, Florida, 2008.
- [2] G. Strbac: „Demand side management: benefits and challenges“, Energy Policy, Volume 36, Issue 12, December 2008, Pages 4419-4426.
- [3] U.S. Department of Energy: "Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them", A Report to the United States Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005, U.S. Department of Energy, February 2006.
- [4] B.V.Mathiesen, N. Duić, I. Stadler, G. Rizzo, Z. Guzović: "The interaction between intermittent renewable energy and the electricity, heating and transport sectors", Energy, Volume 48, Issue 1, December 2012, Pages 2-4.
- [5] Federal Energy Regulatory Commission: "2010 Assessment of Demand Response and Advanced Metering", Staff Report, U.S. Department of Energy, January 2011.
- [6] K. Kostková, L. Omelina, P. Kyčina, P. Jamrich: "An introduction to load management", Electric Power Systems Research, Volume 95, February 2013, Pages 184-191.
- [7] T. Gobmaier, D. Bernhard, S. von Roon: „Märkte für Demand Side Management“, Konferenzbeitrag zum 12. Symposium Energieinnovation 2012, Graz, Februar 2012.
- [8] M. Klobasa.: „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und der Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“, Dissertationsschrift, ETH Zürich, Zürich, 2007.
- [9] C. Gutschi, H. Stigler: "Potentiale und Hemmnisse für Power Demand Side Management in Österreich", Konferenzbeitrag zum 10. Symposium Energieinnovation 2008, Graz, Februar 2008.
- [10] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena): "dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015-2020 mit Ausblick 2025“, Berlin, November 2010.
- [11] I. Stadler: "Demand Response – Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“, Habilitation, Universität Kassel, Oktober 2005.
- [12] S. von Roon, T. Gobmaier: „Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland“, Endbericht der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München, Dezember 2010.
- [13] Y. Scholz: "Renewable energy based electricity supply at low costs - Development of the REMix model and application for Europe". Dissertation, Universität Stuttgart, 2012. http://elib.dlr.de/77976/1/REMix_Thesis_YS.pdf. Zugriff 10. Januar 2013.
- [14] A. Grein, M. Pehnt: „Load management for refrigeration systems: Potentials and barriers“, Energy Policy, 2011.
- [15] European Commission: "Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries", Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), Brussels, December 2001.
- [16] United States Geological Survey: „Minerals Yearbook Volume 3: Volumes Report International“, Separate file for each country and year, latest edition 2010. Verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/country/index.html#pubs>, Zugriff 6. August 2012.
- [17] P. Gentilhomme: "World Mining and Metals Yearbook – Zinc – 2007 Edition", Société de l'Industrie Minérale und BRGM Service des Ressources Minérales, Réf. 4B/2007/4B/2007/YC/479, Paris, Dezember 2007.
- [18] World Steel Association (Worldsteel): "Steel Statistical Yearbook 2011", Worldsteel Committee on Economic Studies, Brussels, 2011.
- [19] T. O'Brien, T. Bommaraju, F. Hine: „Handbook of Chlor-Alkali Technology“, Springer Science and Business Media Inc., Boston, 2005. ISBN: 0-306-48618-0.
- [20] Euro Chlor: "European Chlorine Industry Review 2010/2011", Brussels, 2011. Verfügbar unter www.eurochlor.org Zugriff 6. August 2012.
- [21] J. Blechschmidt (Hrsg.): "Taschenbuch der Papiertechnik", Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 2010. ISBN:978-3-446-41967-4.
- [22] Datenbank der United Nations Food and Agriculture Organization (FAO), zugänglich unter <http://data.un.org>. Zugriff 24. August 2012.
- [23] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): „Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2010“, Düsseldorf, 2011. Verfügbar unter <http://www.vdz-online.de/umweltdaten.html>. Zugang 12.09.2012.
- [24] H.-W. Häring (Hrsg.): „Industrial Gases Processing“, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2008. ISBN: 978-3527-31685-4.

- [25] P. Radgen (Hrsg.): „Market Study for Improving Energy Efficiency for Fans“, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Fraunhofer IRB Verlag, Karlsruhe, 2002. ISBN: 3-816-761-372.
- [26] F. Steimle et al.: „Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte“, Statusbericht des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins (DKV), Ausgabe 22, Hannover, 2002. ISBN 3-932-715-063.
- [27] Eurostat European Statistics Database, Abschnitt nrg_10: „Energy Statistics – Supply, transformation, consumption“, Datensatz nrg_105a. Stand 16.November 2011.
- [28] International Energy Agency: „Energy Balances of Non-OECD Countries, 2009 edition“, IEA Statistics, Paris, 2009. ISBN 978-92-64-06128-6.
- [29] International Energy Agency: „Energy Balances of OECD Countries, 2009 edition“, IEA Statistics, Paris, 2009. ISBN 978-92-64-06122-4.
- [30] P. Bertoldi, B. Atanasiu: „Electricity Consumption and Efficiency Trends in the European Union – Status Report 2009“, Joint Research Center (JRC) Institute for Energy, JRC Scientific and Technical Reports, Document EUR 24005 EN, Ispra, 2009.
- [31] Enerdata Energy Research Services: *Odysee* Datenbank (Zugang kostenpflichtig), <http://www.enerdata.net/enerdatauk/knowledge/subscriptions/database/>. Zugriff 24.04.2012.
- [32] D. Seebach, C. Timpe, D. Bauknecht: „Costs and Benefits of Smart Appliances in Europe“, Report prepared as part of the EIE project „Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy Systems (Smart-A)“, D 7.2 of Work Package 7, Öko-Institut, Freiburg, September 2009.
- [33] V.E. Letschert, M. A. McNeil: „Material World: forecasting household appliance ownership in a growing global economy“, Proceedings of the ECEEE 2009 Summer Study, S. 1881-1887.
- [34] R. Stamminger; G. Broil; C. Pakula; H. Jungbecker; M. Braun; I. Rüdener; C. Wendker: „Synergy Potential of Smart Appliances“, Report prepared as part of the EIE project „Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy Systems (Smart-A)“. D2.3 of Work Package 2. University of Bonn, November 2008.
- [35] A. von Scheven; M. Prella: „Lastmanagementpotenziale in der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix“, Konferenzband des VDE-Kongresses 2012, Stuttgart, 2012.
- [36] D. Prior: „Nachbildung der Energiebedarfsstruktur der privaten Haushalte - Werkzeug zur Bewertung von Energieeinsparmaßnahmen“, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 6: Energietechnik, Band 379, 1997.
- [37] European Environmental Agency: CORINE land cover raster data – version 13, 2010, <http://www.eea.europa.eu>. Zugriff 12.01.2012.
- [38] Joint Research Centre: *Population density disaggregated with CORINE land cover 2000*, available through the European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu>. Zugriff 12.01.2012. Data set described in F.J. Gallego (2010): *A population density grid of the European Union*, Population and Environment. 31: 460-473, September 2009.
- [39] Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University; and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 2005. Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3). Palisades, NY: Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), Columbia University. <http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw>. Zugriff 12.01.2012.