Die deutsche Stromnachfrage im Jahr 2050: Strukturelle Änderungen der Lastkurve und ihre Auswirkungen auf die Angebotsseite

8. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien

13. Februar 2013

Tobias Boßmann, Rainer Elsland, Fridolin Lickert, Martin Wietschel

©Klaus Meilenthin

Fraunhofer ISI

© Fraunhofer ISI

Motivation
Kontext

Ausgangslage

Diverse Studien bestimmen **langfristige Transformationspfade** hin zu einem **nachhaltigen Energiesystem**

- Formulierung von Zielvorgaben und Maßnahmenpaketen auf der Angebots- und Nachfrageseite
- Auswirkungen von Politikmaßnahmen auf Nachfragemuster und deren Effekte auf Stromerzeugungsmix bleiben meist unberücksichtigt

Herausforderung

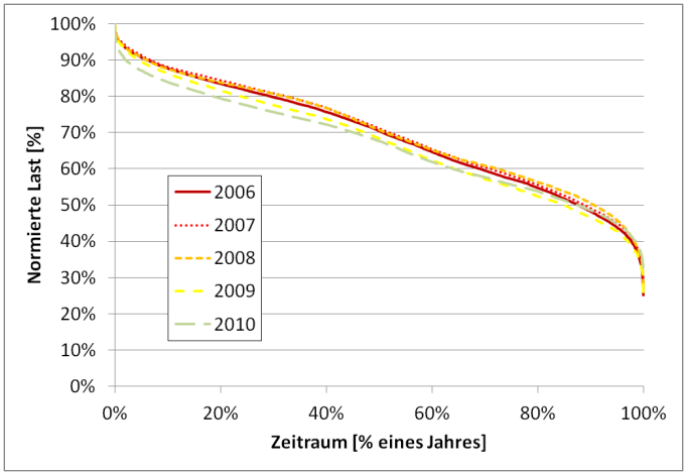
- Lastkurve unterliegt Veränderungen

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Motivation
Historische Lastkurven

		2006	2008	2010
Lastdauerlinie	*cf*	69,0%	69,9%	66,6%
	P_{min}/P_{max}	25,1%	27,7%	31,6%
Stündliche Laständerungen	*rrf*	0,90%	0,83%	0,76%
Stabile Lastsituationen	$\mu_{\Delta t,0\%-30\%}$ [h]	84,7	84,6	48,7
	$\mu_{\Delta t,90\%-100\%}$ [h]	2,8	2,8	2,3
Kontinuierliche Laständerungen	$\mu_{\Delta P}$ [GW]	17,6	15,7	14,3
	n_{altern}	1591	1636	1677



Fraunhofer ISI

Motivation
Kontext

Ausgangslage

Diverse Studien bestimmen **langfristige Transformationspfade** hin zu einem **nachhaltigen Energiesystem**

- Formulierung von Zielvorgaben und Maßnahmenpaketen auf der Angebots- und Nachfrageseite
- Auswirkungen von nachfrageseitigen Politikmaßnahmen auf Nachfragemuster und die Angebotsseite bleiben meist unberücksichtigt

Herausforderung

- Lastkurve unterliegt Veränderungen
- Häufiger Ansatz: Skalierung historischer Lastkurven

Ziel

- Bestimmung **nationaler Lastkurven für Langfristprojektionen** unter Berückischtigung struktureller Veränderungen in der Jahresstromnachfrage

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Agenda

1. Motivation
2. **Methodik**
3. Fallstudie
4. Schlussfolgerung

© Fraunhofer ISI

Methodik
Ansatz der partiellen Dekomposition

INPUT: Jahresstromnachfrageprojektion, aufgeschlüsselt nach Land, Sektor, Anwendung, Technologie

1 Unterscheidung in relevante und weniger relevante Anwendungen, entsprechend Verhältnis aus spezifischer Nachfrage- und Summe aller Änderungen (zwischen Basis- und Projektionsjahr)

© Fraunhofer ISI

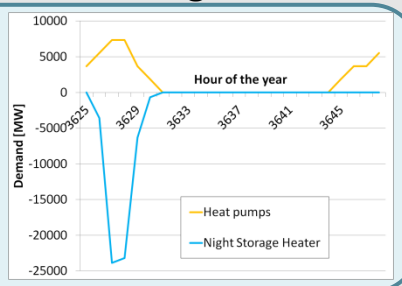
Fraunhofer ISI

INPUT: Jahresstromnachfrageprojektion, aufgeschlüsselt nach Land, Sektor, Anwendung, Technologie

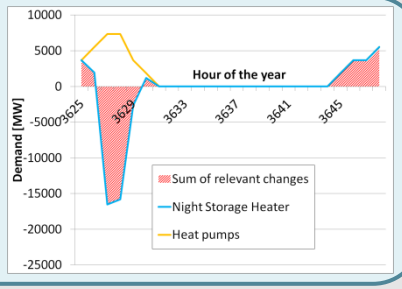
1 Unterscheidung in relevante und weniger relevante Anwendungen, entsprechend Verhältnis aus spezifischer Nachfrage- und Summe aller Änderungen (zwischen Basis- und Projektionsjahr)

Relevante Anwendungen

2 Bestimmung anwendungsspezifischer Lastkurven zwecks Abbildung der Änderung zwischen Basis- und Projektionsjahr

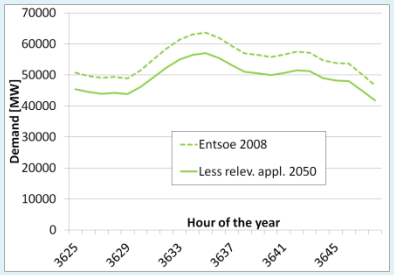


3 Aufsummieren aller anwendungsspezifischen Lastkurven



Weniger relevante Anwendungen

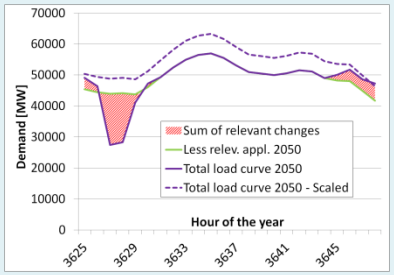
4 Skalierung der historischen Lastkurve entsprechend der kumulativen Nachfrageänderung zwischen Basis- und Projektionsjahr



Datenbank:

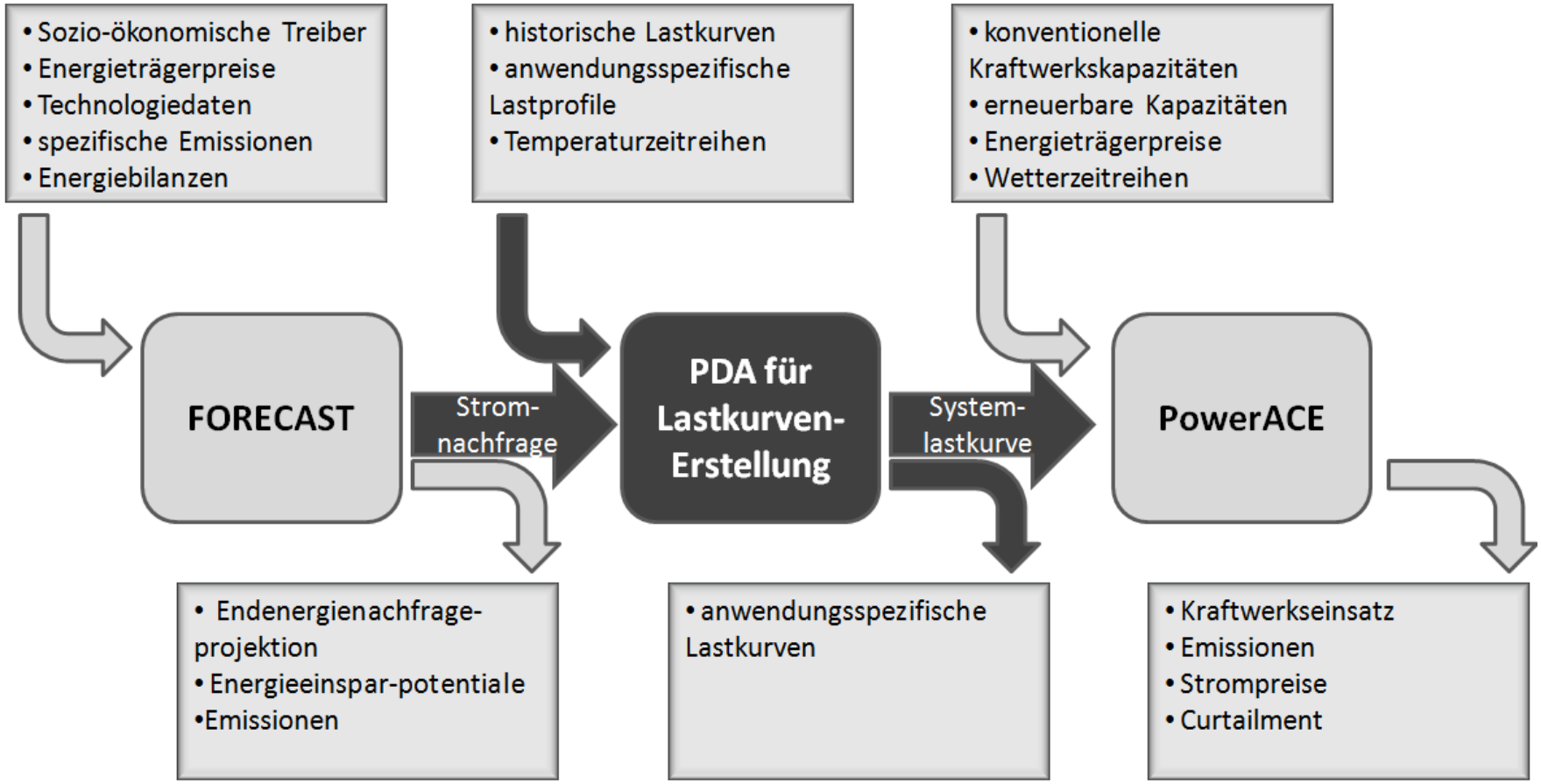
- Lastprofile
- Historische Lastkurven
- Temperatur-Zeitreihen

5 Aufsummieren der skalierten Lastkurve sowie der Lastkurve der relevanten Anwendungen



OUTPUT: Systemlastkurve für ein Projektionsjahr und ein Land

Methodik
Modellumgebung



Fraunhofer ISI

Agenda

1. Motivation
2. Methodik
3. **Fallstudie**
4. Schlussfolgerung

© Fraunhofer ISI

Fallstudie
Rahmendaten

Ziel

- **Evaluation des Ansatzes** (PDA) gegenüber der Lastkurvenerstellung mittels Skalierung (SKA)
- **Untersuchung der Auswirkungen** von Energieeinsparmaßnahmen auf die Form der Lastkurve und die Angebotsseite

Szenariorahmen

- Geographischer Rahmen: Deutschland
- Basisjahr: 2008
- Projektionsjahr: 2050

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Fallstudie
Szenarioausgestaltung

Sozio-ökonomische Treiber aus EU Energy Roadmap 2050

- Stetiges BIP-Wachstum (+1,1% p.a.)
- Bevölkerungsrückgang 2008 – 2050: -12%
- Pro-Kopf-BIP-Wachstum.: +1,4% p.a.
- Anstieg der Energieträgerpreise bis 2030, dann Rückgang
- Endverbraucherpreise für Energie steigen kontinuierlich bis 2050
- EUA-Preise steigen bis auf ca. 450 €/t_{CO2} in 2050

Klimaschutzszenario

- Politisches Ziel: Ausschöpfung von Energieeinsparpotentialen sowie Dekarbonisierung der Stromerzeugung

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Fallstudie
Szenarioausgestaltung

Nachfrageseitig

- Diffusion von Energieeinspartechnologien (z.B. effiziente Haushaltsgeräte, Isolation von Bestandsgebäuden, effiziente Industrieprozesse)
- Anstieg der Recyclingrate (z.B. in Papier- und Aluminiumproduktion)
- Erhöhte Sanierungsrate von Bestandsgebäuden
- Flächendeckender Einsatz neuer Technologien (Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge)

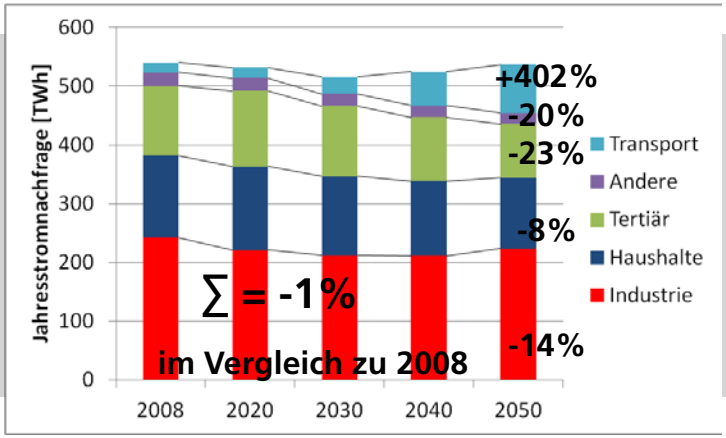
Angebotsseitig

- 65% EE-Anteil an Gesamtkapazität
- Ausstattung von Grund- und Mittellastkraftwerken mit CCS-Technologie

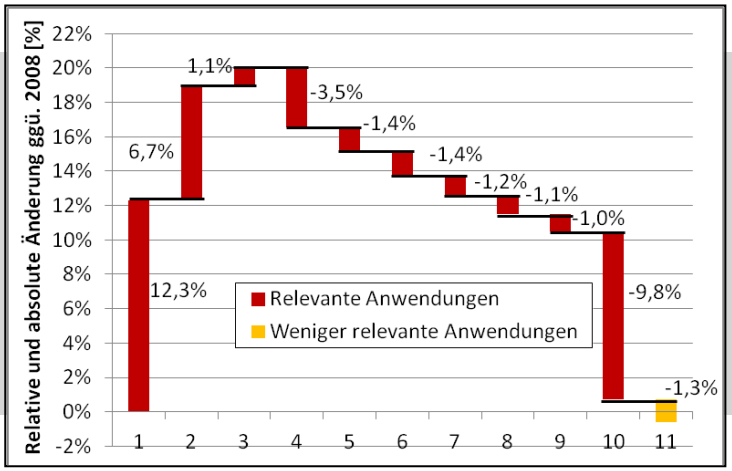
© Fraunhofer ISI

Case study
Ergebnisse FORECAST

Jahresnachfrage



Veränd. ggü. 2008



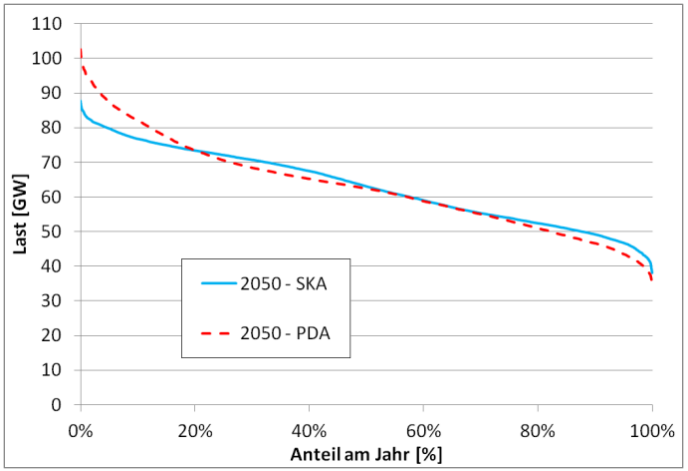
#	Maßnahme	$\Delta_{a,abs}$ [TWh]	$\Delta_{a,abs}$/ $d_{total,2008}$	$\lvert\Delta_{a,abs}\rvert$/ $\Sigma\lvert\Delta_{a,abs}\rvert$
1	TR-Elektromobilität	+68,5	+12,3%	23,0%
2	HH-Wärmepumpen	+37,5	+6,7%	12,6%
3	IN-Membrantechn.	+5,9	+1,1%	2,0%
4	TE-Beleuchtung	-19,6	-3,5%	6,6%
5	HH-Nachtspeicher	-7,7	-1,4%	2,6%
6	HH-Direktheizung	-7,7	-1,4%	2,6%
7	HH-Beleuchtung	-6,7	-1,2%	2,2%
8	TE-Direktheizung	-6,1	-1,1%	2,0%
9	IN-Primäraluminium	-5,7	-1,0%	1,9%
Σ_{relev}	Alle relev. Anw.	+3,9	+0,7%	84,1%

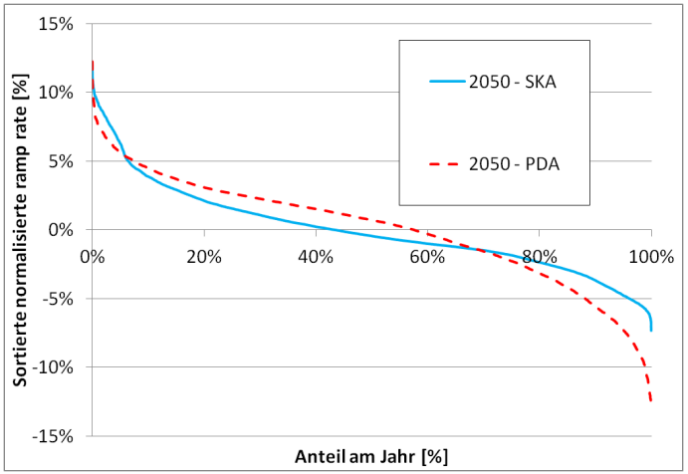
© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse Lastkurven

		SKA	PDA
Lastdauerlinie	*cf*	71,9%	61,4%
	P_{max} [GW]	87,7	102,7
	P_{min} [GW]	38,1	31,6
	P_{min}/P_{max}	43,4%	32,7%
Stündliche Laständerungen	*rrf*	0,58%	0,78%
Stabile Lastsituationen	$\mu_{\Delta t,0\%-30\%}$ [h]	64,0	35,7
	$\mu_{\Delta t,90\%-100\%}$ [h]	2,2	1,6
Kontinuierliche Laständerungen	$\mu_{\Delta P}$ [GW]	9,2	14,0
	n_{altern}	1759	2138





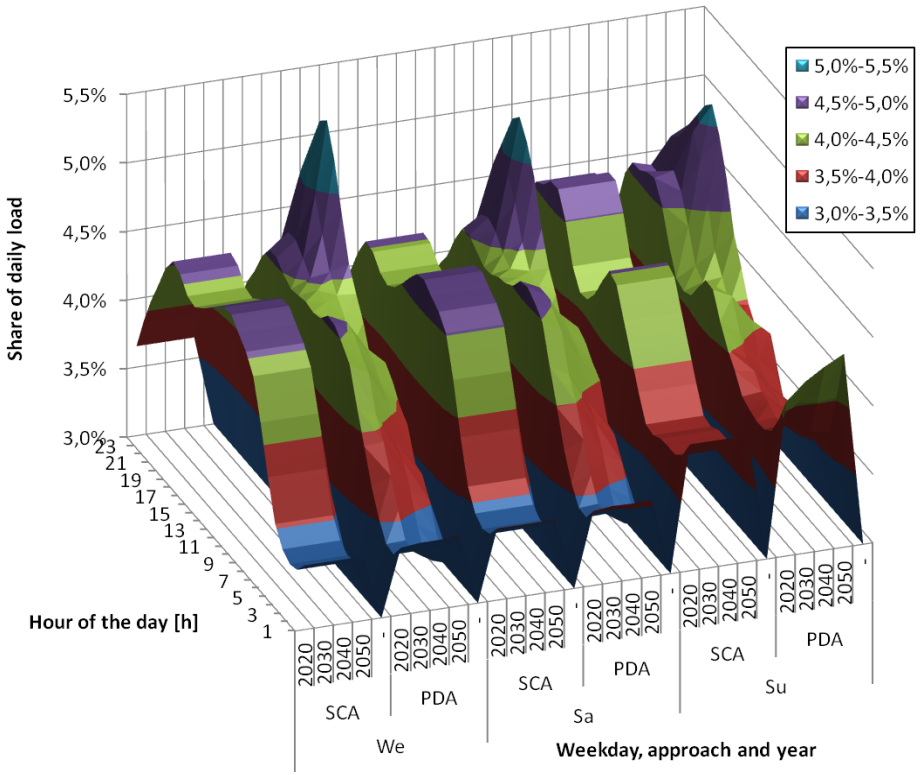
Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse Lastkurven

Lastverteilung auf die Typtage:

- Lastabweichung in PDA relativ zu SKA

	Sommer			Übergangszeit			Winter		
Stunde	We	Sa	So	We	Sa	So	We	Sa	So
1	3,3%	7,8%	5,5%	3,9%	5,0%	12,4%	-1,7%	0,6%	7,2%
2	-2,2%	-0,7%	2,2%	-2,7%	-2,4%	8,0%	-4,7%	-4,5%	-1,2%
3	-6,9%	-7,4%	-1,0%	-2,4%	-2,9%	-3,8%	-2,8%	-4,0%	-7,4%
4	-5,9%	-6,5%	-4,4%	0,9%	1,2%	-7,7%	1,3%	-0,2%	-9,7%
5	-5,1%	-5,6%	-8,8%	3,0%	3,9%	-7,1%	3,9%	3,0%	-7,2%
6	-9,8%	-8,1%	-10,6%	-1,5%	1,8%	-3,8%	-0,4%	2,7%	-2,8%
7	-15,8%	-12,9%	-14,0%	-8,5%	-4,4%	-5,8%	-9,9%	-2,5%	-1,5%
8	-14,8%	-15,2%	-16,4%	-9,1%	-8,8%	-9,6%	-10,3%	-7,8%	-5,6%
9	-14,4%	-17,4%	-18,8%	-10,3%	-13,2%	-14,8%	-10,0%	-13,5%	-14,5%
10	-12,8%	-15,3%	-18,6%	-9,8%	-12,7%	-15,9%	-8,8%	-13,1%	-16,4%
11	-11,1%	-12,6%	-16,9%	-10,2%	-10,7%	-15,4%	-10,6%	-9,2%	-13,8%
12	-11,9%	-12,3%	-18,8%	-12,6%	-11,0%	-17,9%	-15,7%	-10,5%	-15,4%
13	-11,7%	-12,7%	-16,9%	-11,0%	-11,3%	-16,3%	-12,2%	-9,2%	-13,1%
14	-8,4%	-6,5%	-11,5%	-5,8%	-4,3%	-10,5%	-3,4%	-4,0%	-7,6%
15	-4,7%	-1,6%	-5,2%	-1,7%	1,3%	-3,7%	1,7%	4,8%	0,4%
16	-0,3%	3,1%	-1,7%	3,9%	7,7%	2,0%	6,9%	9,4%	4,9%
17	7,3%	6,9%	3,0%	12,0%	11,9%	7,5%	12,8%	12,1%	8,6%
18	15,5%	11,7%	6,3%	19,3%	15,5%	9,8%	13,5%	9,6%	2,4%
19	22,5%	12,4%	9,0%	25,8%	16,2%	11,4%	15,6%	5,1%	-1,2%
20	25,6%	12,8%	8,1%	29,0%	16,7%	10,3%	16,2%	1,8%	-3,2%
21	17,5%	5,0%	3,5%	22,3%	10,5%	8,6%	14,0%	0,3%	-2,0%
22	10,2%	-1,3%	-0,9%	16,4%	5,5%	5,5%	13,1%	1,3%	0,6%
23	7,2%	-3,0%	-2,7%	13,7%	4,9%	3,9%	10,5%	2,2%	0,7%
24	5,3%	2,4%	-1,1%	9,2%	9,4%	3,7%	2,7%	4,7%	-2,5%



Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse Lastkurven

Lastverteilung auf die Typtage:

- Lastabweichung in PDA relativ zu SKA
- Mittlere Residuallast im PDA-Fall

	Sommer			Übergangszeit			Winter		
Stunde	We	Sa	So	We	Sa	So	We	Sa	So
1	3,3%	7,8%	5,5%	3,9%	5,0%	12,4%	-1,7%	0,6%	7,2%
2	-2,2%	-0,7%	2,2%	-2,7%	-2,4%	8,0%	-4,7%	-4,5%	-1,2%
3	-6,9%	-7,4%	-1,0%	-2,4%	-2,9%	-3,8%	-2,8%	-4,0%	-7,4%
4	-5,9%	-6,5%	-4,4%	0,9%	1,2%	-7,7%	1,3%	-0,2%	-9,7%
5	-5,1%	-5,6%	-8,8%	3,0%	3,9%	-7,1%	3,9%	3,0%	-7,2%
6	-9,8%	-8,1%	-10,6%	-1,5%	1,8%	-3,8%	-0,4%	2,7%	-2,8%
7	-15,8%	-12,9%	-14,0%	-8,5%	-4,4%	-5,8%	-9,9%	-2,5%	-1,5%
8	-14,8%	-15,2%	-16,4%	-9,1%	-8,8%	-9,6%	-10,3%	-7,8%	-5,6%
9	-14,4%	-17,4%	-18,8%	-10,3%	-13,2%	-14,8%	-10,0%	-13,5%	-14,5%
10	-12,8%	-15,3%	-18,6%	-9,8%	-12,7%	-15,9%	-8,8%	-13,1%	-16,4%
11	-11,1%	-12,6%	-16,9%	-10,2%	-10,7%	-15,4%	-10,6%	-9,2%	-13,8%
12	-11,9%	-12,3%	-18,8%	-12,6%	-11,0%	-17,9%	-15,7%	-10,5%	-15,4%
13	-11,7%	-12,7%	-16,9%	-11,0%	-11,3%	-16,3%	-12,2%	-9,2%	-13,1%
14	-8,4%	-6,5%	-11,5%	-5,8%	-4,3%	-10,5%	-3,4%	-4,0%	-7,6%
15	-4,7%	-1,6%	-5,2%	-1,7%	1,3%	-3,7%	1,7%	4,8%	0,4%
16	-0,3%	3,1%	-1,7%	3,9%	7,7%	2,0%	6,9%	9,4%	4,9%
17	7,3%	6,9%	3,0%	12,0%	11,9%	7,5%	12,8%	12,1%	8,6%
18	15,5%	11,7%	6,3%	19,3%	15,5%	9,8%	13,5%	9,6%	2,4%
19	22,5%	12,4%	9,0%	25,8%	16,2%	11,4%	15,6%	5,1%	-1,2%
20	25,6%	12,8%	8,1%	29,0%	16,7%	10,3%	16,2%	1,8%	-3,2%
21	17,5%	5,0%	3,5%	22,3%	10,5%	8,6%	14,0%	0,3%	-2,0%
22	10,2%	-1,3%	-0,9%	16,4%	5,5%	5,5%	13,1%	1,3%	0,6%
23	7,2%	-3,0%	-2,7%	13,7%	4,9%	3,9%	10,5%	2,2%	0,7%
24	5,3%	2,4%	-1,1%	9,2%	9,4%	3,7%	2,7%	4,7%	-2,5%

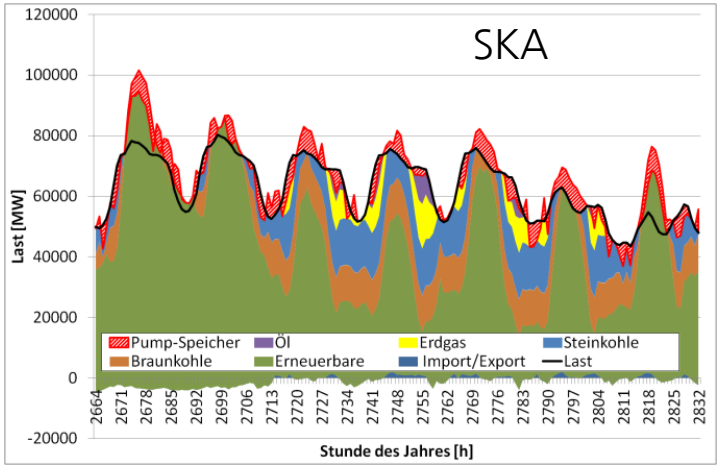
[GW]	Sommer			Übergangszeit			Winter		
Stunde	We	Sa	So	We	Sa	So	We	Sa	So
1	20,79	21,79	15,77	21,14	20,87	19,78	9,63	11,49	9,76
2	16,93	16,53	13,00	17,11	16,19	16,74	6,28	6,68	3,07
3	14,67	12,80	10,96	17,30	15,80	11,09	6,91	6,20	-0,75
4	16,12	13,34	9,34	20,81	18,57	10,04	9,57	8,05	-2,03
5	21,40	15,85	9,21	26,16	21,13	11,37	12,50	9,99	-0,46
6	25,63	16,57	8,92	31,27	21,63	13,28	12,50	9,11	0,87
7	24,42	13,97	6,51	30,88	19,55	12,27	14,55	7,32	1,51
8	18,94	6,62	-1,57	28,93	16,28	8,80	20,14	7,08	0,76
9	8,33	-3,82	-12,52	20,89	8,57	0,35	20,72	5,31	-2,90
10	1,75	-10,09	-19,57	12,54	0,56	-8,05	18,08	4,21	-5,33
11	0,57	-11,24	-20,20	8,25	-2,55	-10,90	12,77	3,64	-6,39
12	-2,55	-14,07	-23,80	2,63	-7,17	-16,33	4,78	-1,18	-9,66
13	-4,36	-17,48	-25,69	2,54	-9,62	-17,84	4,61	-3,57	-11,24
14	-1,80	-14,49	-23,14	6,66	-5,77	-15,08	12,36	-0,29	-8,36
15	3,17	-9,21	-17,45	12,29	0,09	-8,91	18,98	7,44	-1,85
16	9,93	-2,16	-10,64	20,87	9,25	-0,28	26,49	14,00	4,18
17	18,44	4,33	-3,32	33,15	19,61	11,05	34,27	19,96	10,79
18	31,56	15,47	8,26	46,31	30,73	22,45	39,08	23,61	13,16
19	45,05	25,14	20,26	55,95	36,60	29,79	41,52	22,26	13,75
20	49,47	28,52	24,96	57,20	36,68	30,64	39,95	18,02	11,95
21	43,70	24,92	24,31	48,55	30,22	28,26	33,45	13,17	10,35
22	35,01	19,56	21,03	41,02	26,26	26,10	29,61	11,97	11,05
23	28,31	15,29	16,50	34,11	22,37	21,55	25,97	12,82	12,02
24	24,18	15,54	15,18	27,75	21,35	18,75	15,83	11,28	6,79

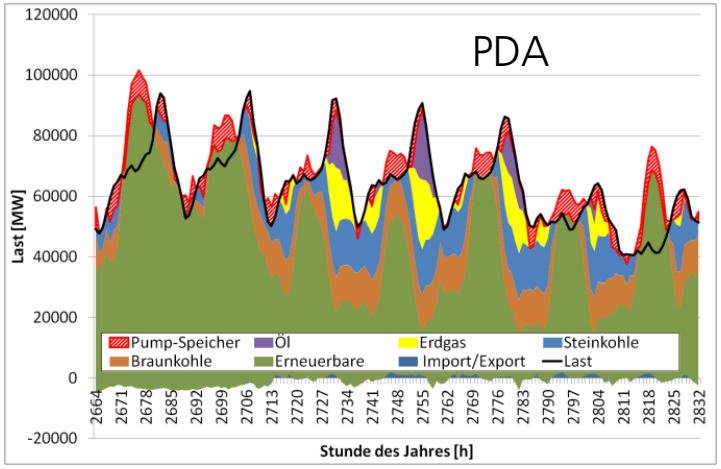
© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse PowerACE

		SKA	PDA vs. SKA
Gesamtstromnachfrage		537 TWh	±0%
Erzeugung [TWh] / Volllast-stunden [h]	**Braunkohle CCS**	71,1 TWh / 5744 h	-4,6%
	Steinkohle CCS	77,5 TWh / 4589 h	-1,7%
	Erdgas CCS	18,1 TWh / 2430 h	+6,5%
	Erdgas ohne CCS	7,5 TWh / 341 h	+48,8%
	Öl	10,5 TWh / 340 h	+49,2 %
	Erneuerbare Energien	390,6 TWh / 2364 h	-1,2%
Strominput in Pumpspeicher		15,7 TWh	+14,8%
Anzahl der Stunden mit negativer Residuallast		1771	+13,0%
Anteil der abgeschalteten erneuerbaren Energien am Gesamtpotential		3,1%	+39,5%
CO_2-Emissionen [Mt]		19,9	+29,1%





© Fraunhofer ISI

Agenda

1. Motivation
2. Methodik
3. Fallstudie
4. **Schlussfolgerung**

© Fraunhofer ISI

Schlussfolgerung

Zukünftige Veränderungen in der anwendungesspezifischen Jahresstromnachfrage haben direkte Auswirkungen auf die **Form der Lastkurve**.

Diese Veränderungen müssen beim Entwurf von **Energieeinsparmaßnahmen** und der **Gestaltung des zukünftigen Stromversorgungssystems**.

Methodisch

- Der Ansatz **der einfachen Skalierung greift** bei langfristigen Projektionen und insbesondere bei Markteintritt neuer Anwendungen **zu kurz**.
- Sowohl Lastextrema als auch Volatilität werden bei der Skalierung **unterschätzt**.
- Die **zeitliche Verteilung** der Lastpunkte wird falsch widergegeben.
- Der Ansatz der partiellen Aufschlüsselung gestattet die Abbildung der **charakteristischen Ausreißer und Unregelmäßigkeiten** historischer Lastkurven.

© Fraunhofer ISI

Schlussfolgerung

Inhaltlich

- **Ohne** den Einsatz von **Lastmanagement-Maßnahmen** ist bis 2050 ein deutlicher Anstieg der **Lastextrema** zu verzeichnen.
- **Stündliche Lastsprünge** werden in ihrer Ausprägung und Häufigkeit steigen.
- Die Mittagsspitze verschwindet auf Kosten der stärkeren Ausprägung der **Abendspitze**.
- **Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen** sind hauptverantwortlich für den Lastanstieg.
- Der zeitliche Versatz zwischen maximaler Einspeisung aus EE und maximaler Last führt zu einer **verminderten Nutzung von EE-Strom** und einem erhöhten Bedarf an Spitzenlast-Strom.
- Grundlastkraftwerke verzeichnen einen **Rückgang der Volllaststunden**.

➢ Es besteht ein gesteigerter Bedarf von **Lastmanagement-Maßnahmen** zwecks Glättung der Lastkurve.

➢ **Kurzzeitspeicher** oder ein verstärkter Netzausbau erleichtern den Ausgleich von Angebot und Nachfrage.

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

VIELEN DANK
FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

Tobias Boßmann
Fraunhofer ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe, GERMANY
Tobias.Bossmann@isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

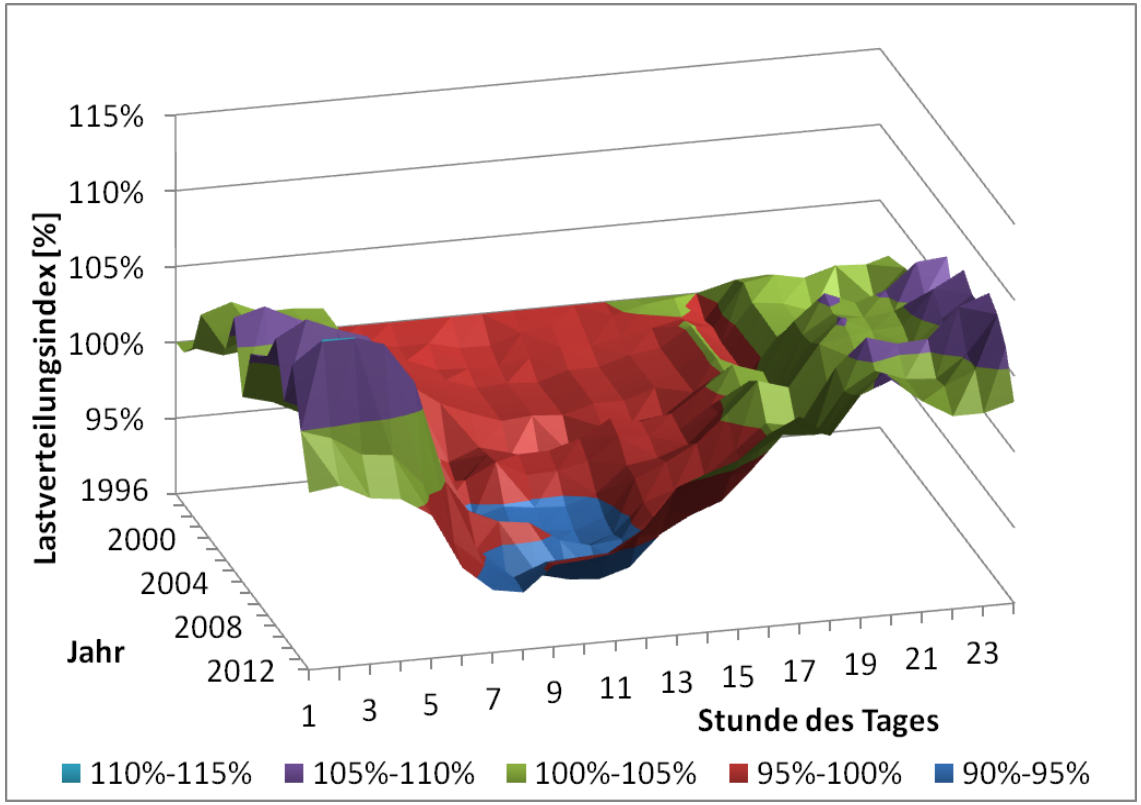
BACKUP

Tobias Boßmann
Fraunhofer ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe, GERMANY
Tobias.Bossmann@isi.fraunhofer.de

© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Motivation
Historische Lastkurven

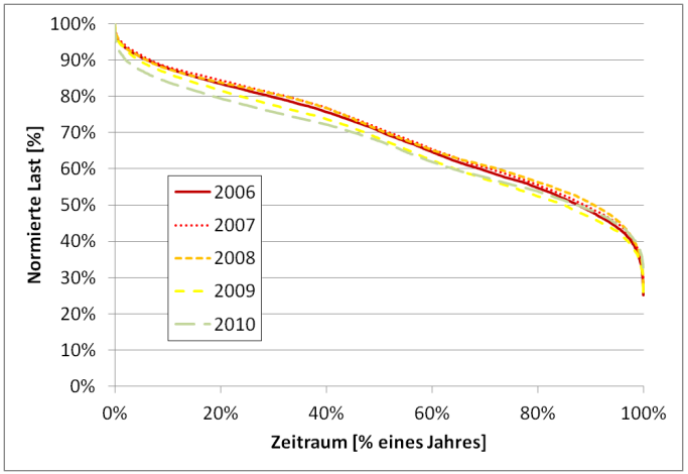


© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

Motivation
Historische Lastkurven

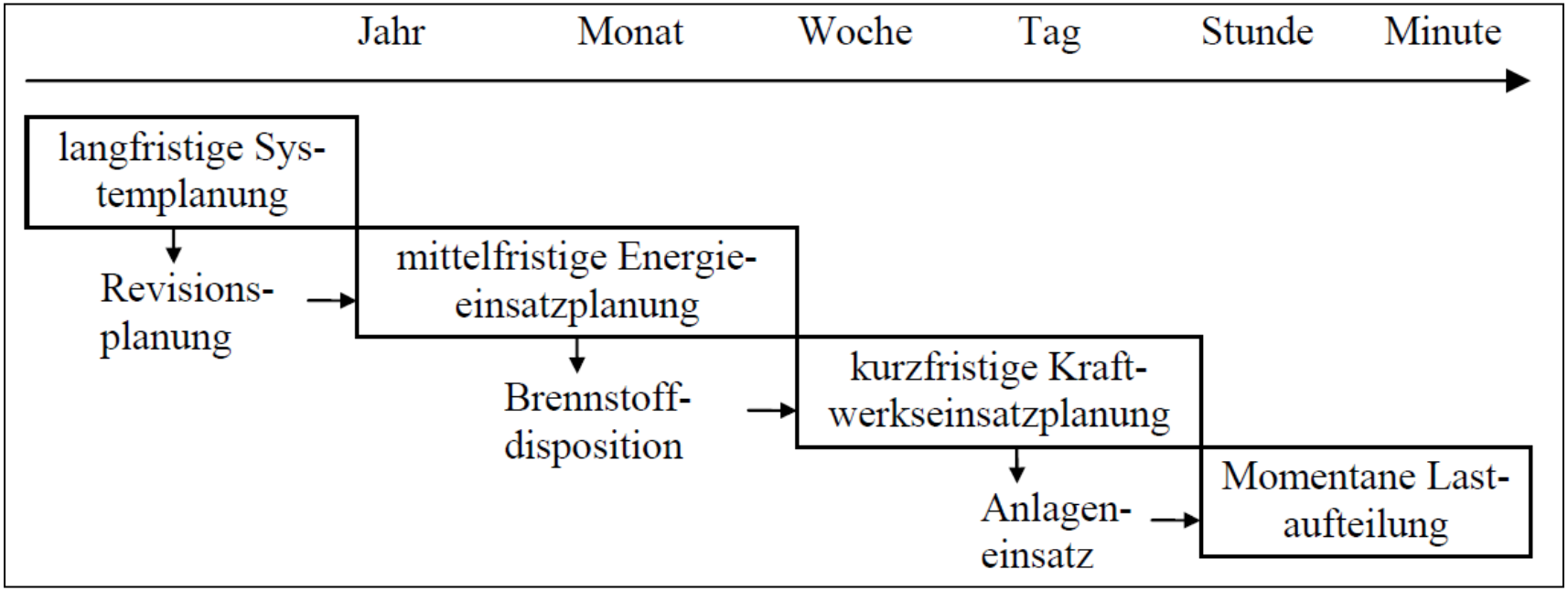
		2006	2007	2008	2010
Lastdauerlinie	*cf*	69,0%	69,9%	69,9%	66,6%
	P_{min}/P_{max}	25,1%	28,1%	27,7%	31,6%
Stündliche Laständerungen	*rrf*	0,90%	0,88%	0,83%	0,76%
	$\mu_{rr,pos}$	4,06%	3,89%	3,64%	3,24%
	$\mu_{rr,neg}$	-3,23%	-3,23%	-3,08%	-2,84%
Stabile Lastsituationen	$\mu_{\Delta t,0\%-30\%}$ [h]	84,7	71,3	84,6	48,7
	$\mu_{\Delta t,30\%-60\%}$ [h]	18,7	17,3	18,4	15,0
	$\mu_{\Delta t,60\%-90\%}$ [h]	6,0	6,1	6,0	4,6
	$\mu_{\Delta t,90\%-100\%}$ [h]	2,8	3,1	2,8	2,3
Kontinuierliche Laständerungen	$\mu_{\Delta P}$ [GW]	17,6	17,1	15,7	14,3
	n_{altern}	1591	1590	1636	1677



© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI

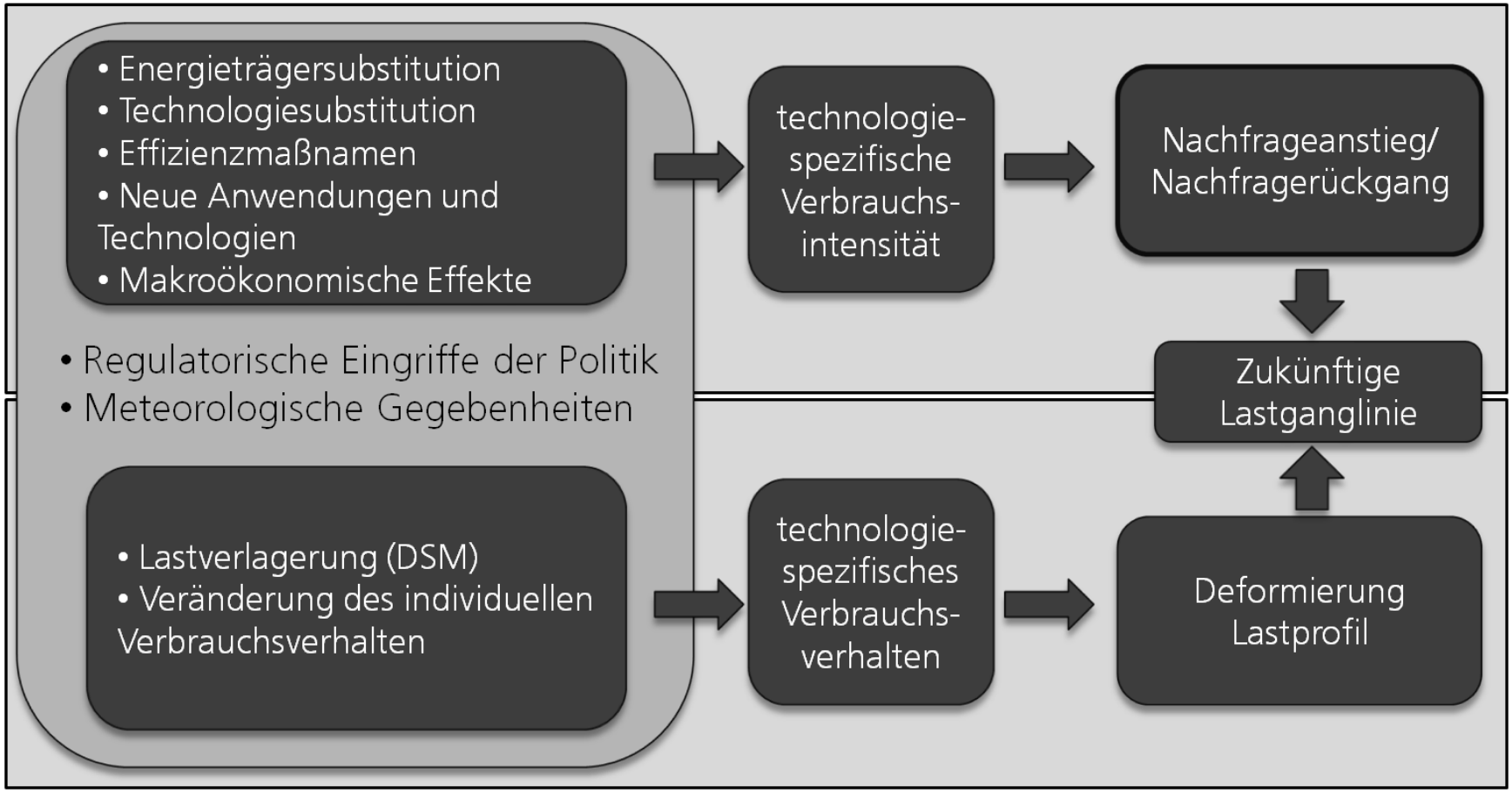
Methodik
Übersicht über Arten der Lastprojektion



Quelle: Verstege et al., 1997

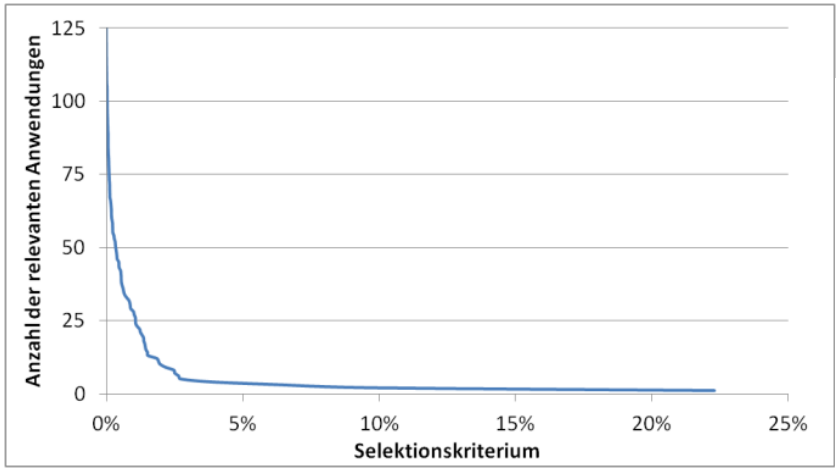
Fraunhofer ISI

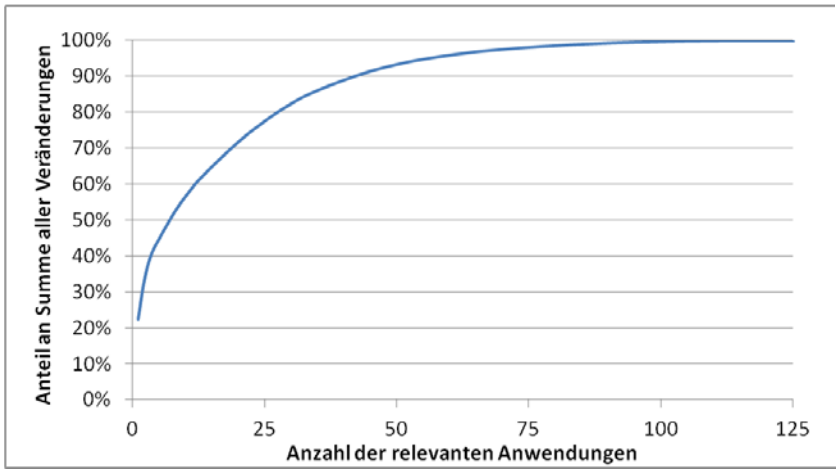
Motivation
Gründe für die Deformation der Lastkurve

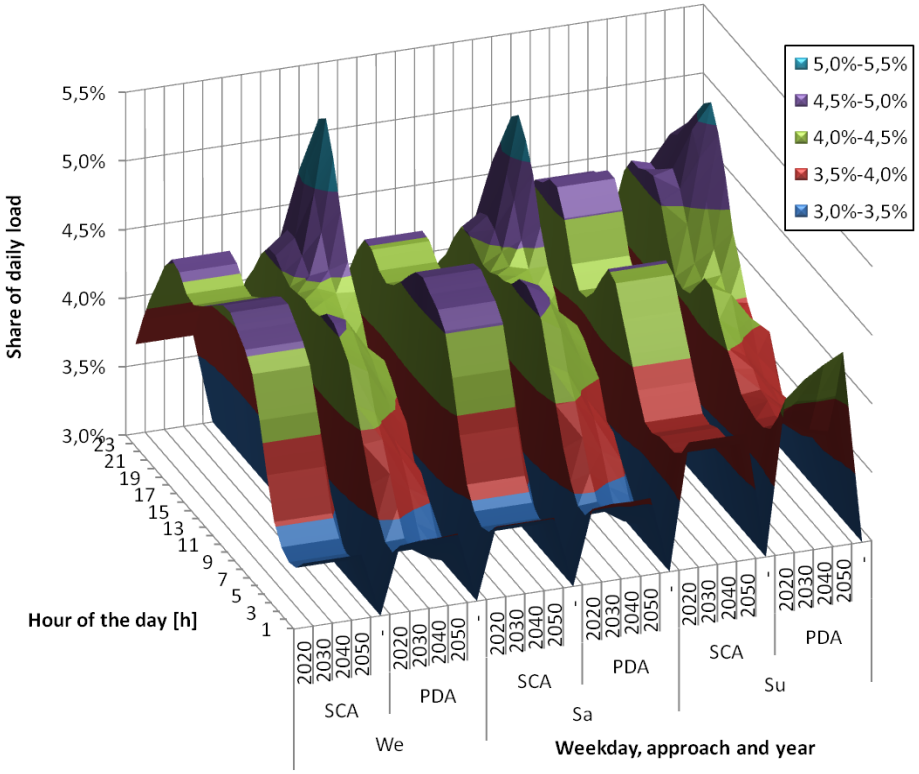


Fraunhofer ISI

Fallstudie
Festlegung des Auswahlkriteriums







Fraunhofer ISI

Methodik
Ansatz der partiellen Dekomposition

Allgemeine Anmerkungen

- Für Basis- und Projektionsjahr gilt:
  - Tagesstruktur identisch
  - Außentemperaturzeitreihe i.d.R. identisch, kann aber angepasst werden
  - Anwendungsspezifisches Verbrauchsverhalten identisch

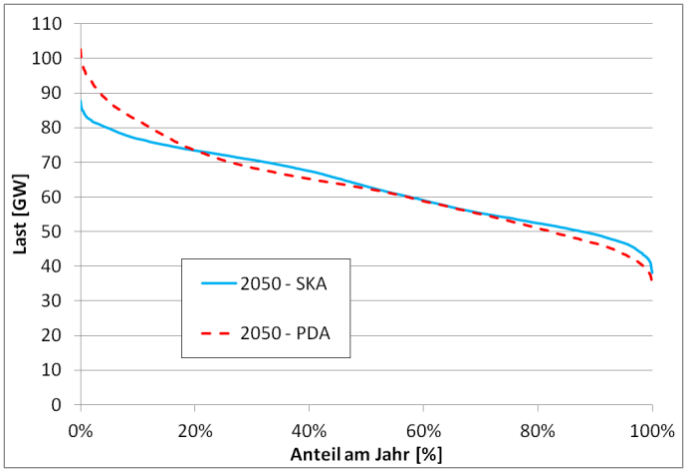
Vorteile des Ansatzes

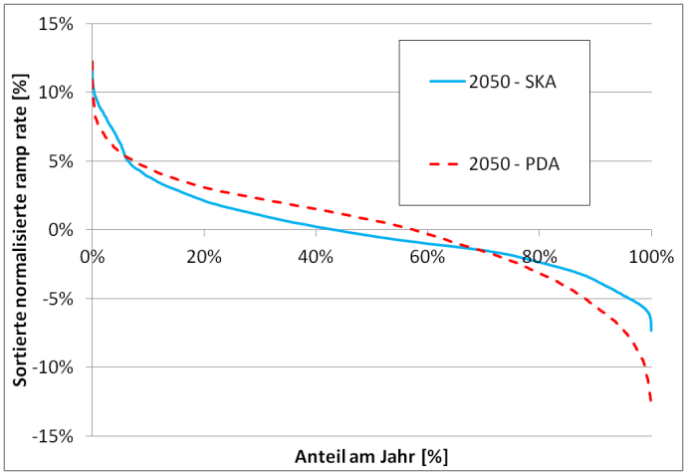
- Berücksichtigung charakteristischer Ausreißer und Unregelmäßigkeiten
- Bestimmung anwendungsspezifischer Lastprofile kann auf ein Minimum reduziert werden
- Vorteile der Bottom-up-Nachfragemodellierung finden Eingang in die Berechnungen

© Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse Lastkurven

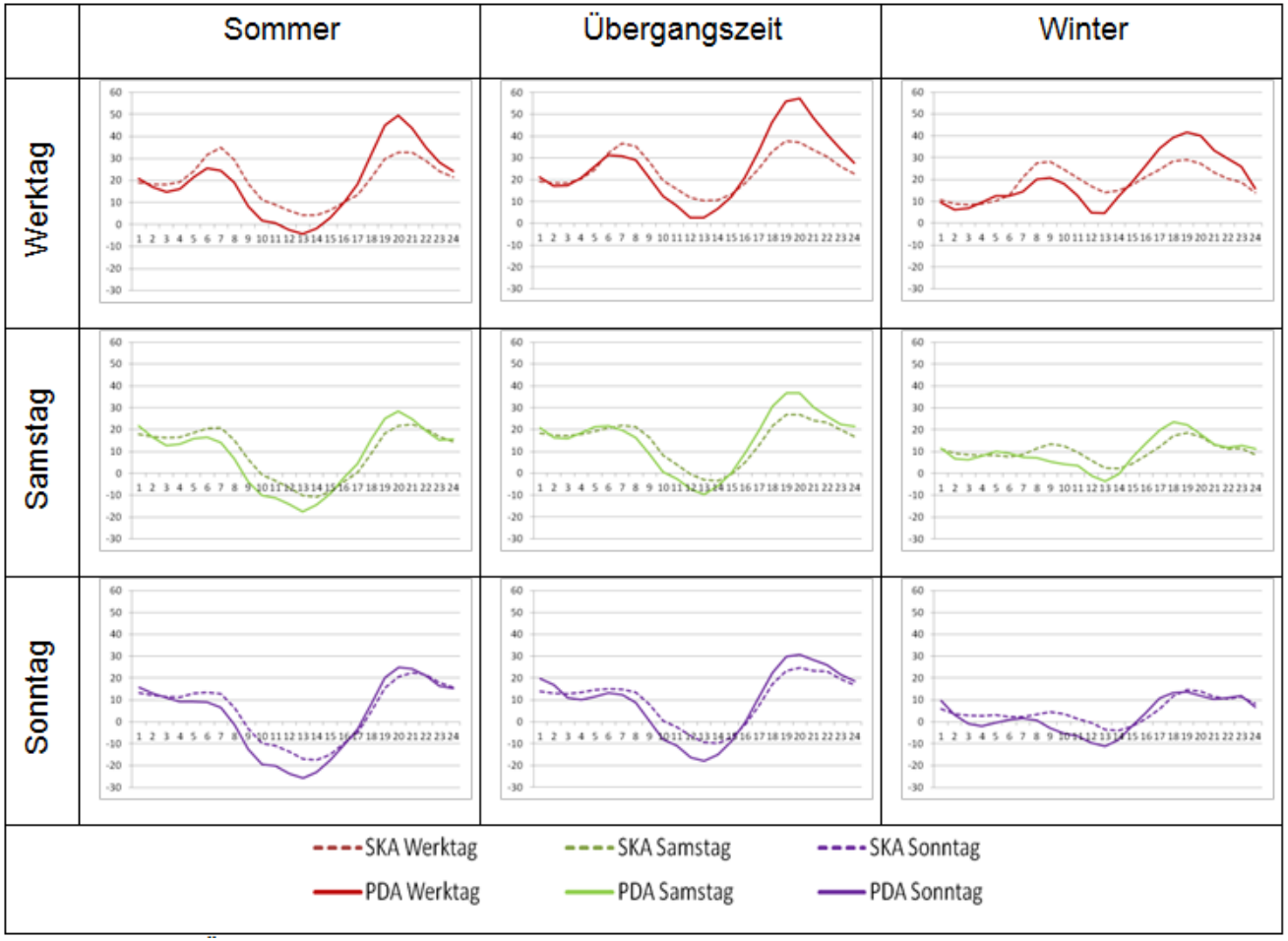
		SKA	PDA
Lastdauerlinie	*cf*	71,9%	61,4%
	P_{max} [GW]	87,7	102,7
	P_{min} [GW]	38,1	31,6
	P_{min}/P_{max}	43,4%	32,7%
Stündliche Laständerungen	*rrf*	0,58%	0,78%
	$\mu_{rr,pos}$	2,67%	2,71%
	$\mu_{rr,neg}$	-2,07%	-3,65%
Stabile Lastsituationen	$\mu_{\Delta t,0\%-30\%}$ [h]	64,0	35,7
	$\mu_{\Delta t,30\%-60\%}$ [h]	17,6	12,9
	$\mu_{\Delta t,60\%-90\%}$ [h]	5,5	2,8
	$\mu_{\Delta t,90\%-100\%}$ [h]	2,2	1,6
Kontinuierliche Laständerungen	$\mu_{\Delta P}$ [GW]	9,2	14,0
	n_{altern}	1759	2138





© Fraunhofer ISI

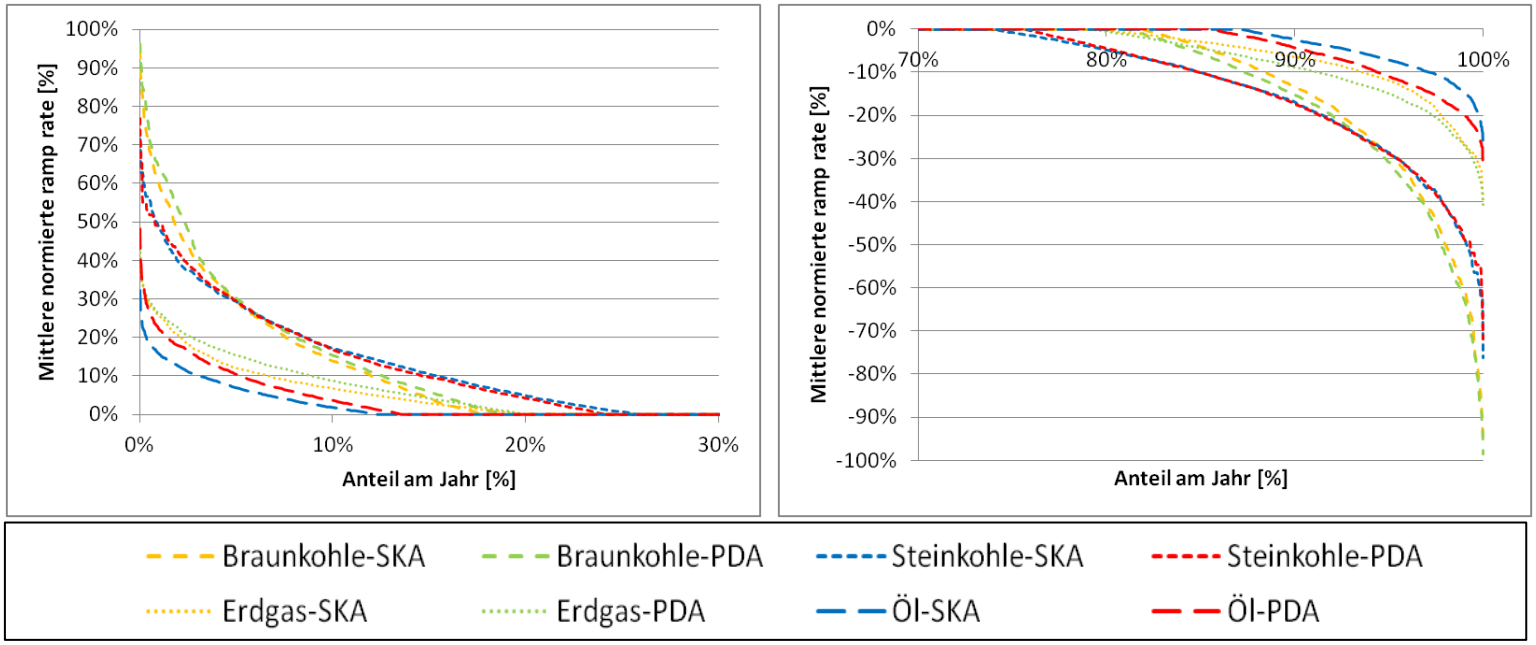
Fallstudie
Entwicklung der Residuallast



© Fraunhofer ISI

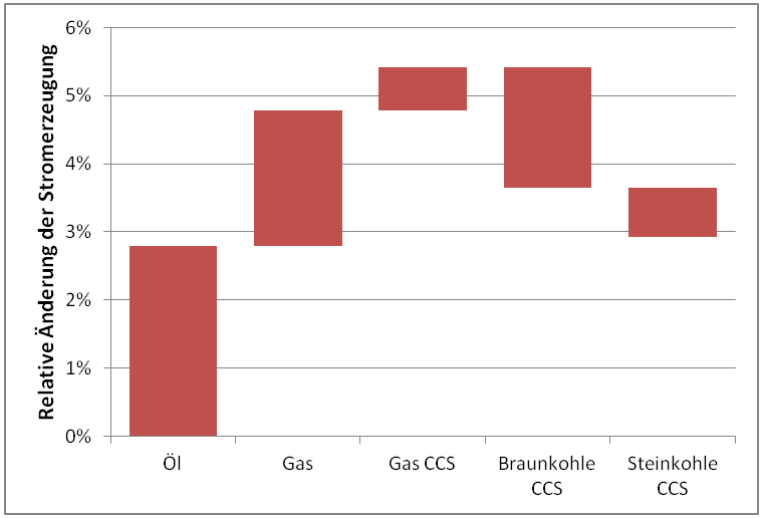
Fraunhofer ISI

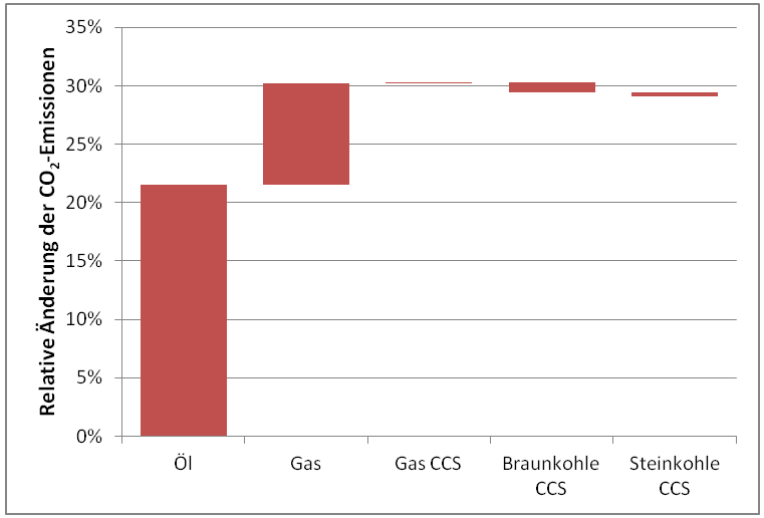
Fallstudie
Ergebnisse PowerACE



Fraunhofer ISI

Fallstudie
Ergebnisse PowerACE





© Fraunhofer ISI

Fraunhofer ISI