



Hochschule **RheinMain**
University of Applied Sciences
Wiesbaden Rüsselsheim Geisenheim

Prof. Dr. Lorenz JARASS, M.S. (Stanford. Univ. / USA)
FB DCSM - Business Administration

L:\2009\Energie\FB-Tag DCSM, 03.11.2009, Folien, v1.0.doc

Wiesbaden, 24. September 2009

1

2

3

4

5

6

7

Fachbereichstag des FB DCSM am 27.10.2009

Optimierung der Stromversorgung bei hohen Windenergieanteilen

1

2 Die Forschungsarbeiten wurden zusammen mit Prof. Dr. G.M. OBERMAIR, Universität Regensburg
3 und Staatssekretär a.D. W. VOIGT, Kiel durchgeführt. Die Ergebnisse sind mittlerweile auch als wis-
4 senschaftliches Fachbuch verfügbar:

5 **Jarass/Obermair/Voigt:**

6 **Windenergie - Zuverlässige Integration in die Energieversorgung.**

7 **Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, Juni 2009.**

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15

Gliederung

1. System von Stromnachfrage und Stromerzeugung	4
1.1. Ausgangssituation: Installierte Leistung und Stromerzeugung 2007	4
1.2. Zielvorgaben der Bundesregierung für die deutsche Kraftwerksstruktur ab 2020	9
2. Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage bei hohen Windenergieanteilen	12
2.1. Schwankungen von Stromangebot und von Stromnachfrage	12
2.2. Ausgleich von Windenergieschwankungen	13
2.3. Speicher für elektrische Energie.....	16
3. Entwicklung des Kraftwerkssystems bei über 50 GW Windleistung	17
3.1. Nachfragedeckung bei hohem Windenergieanteil: Welche konventionellen Kraftwerke werden zukünftig noch gebraucht?.....	17
3.2. Windenergieanlagen versus Grundlastkraftwerke: ein Entweder-Oder	21
4. Zusammenfassung	25

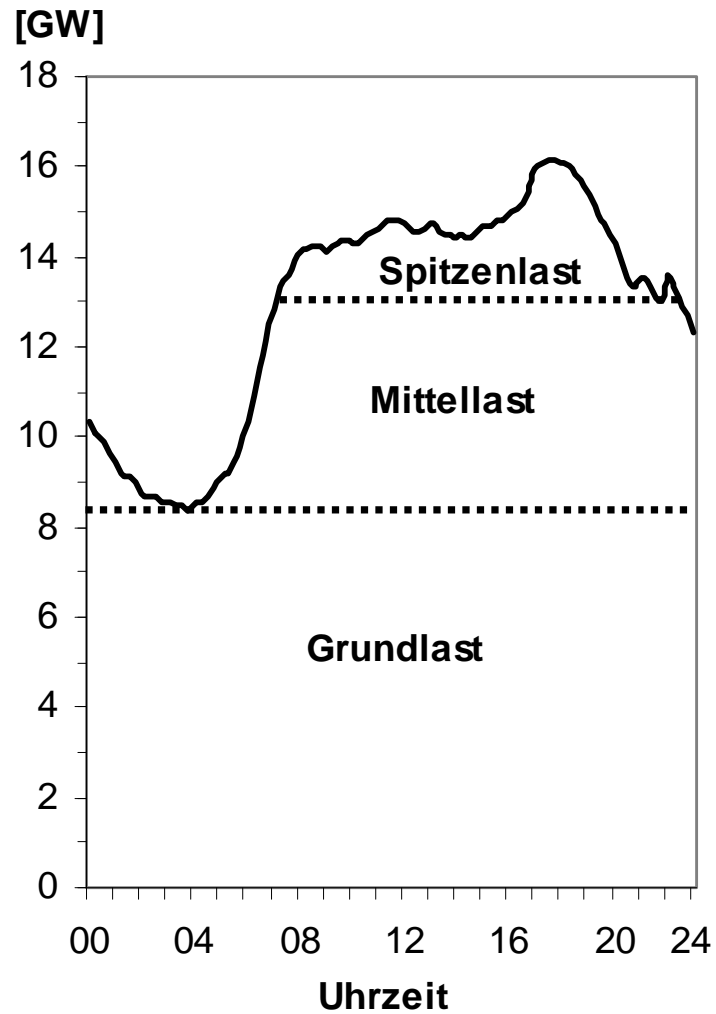
1. System von Stromnachfrage und Stromerzeugung

1.1. Ausgangssituation: Installierte Leistung und Stromerzeugung 2007

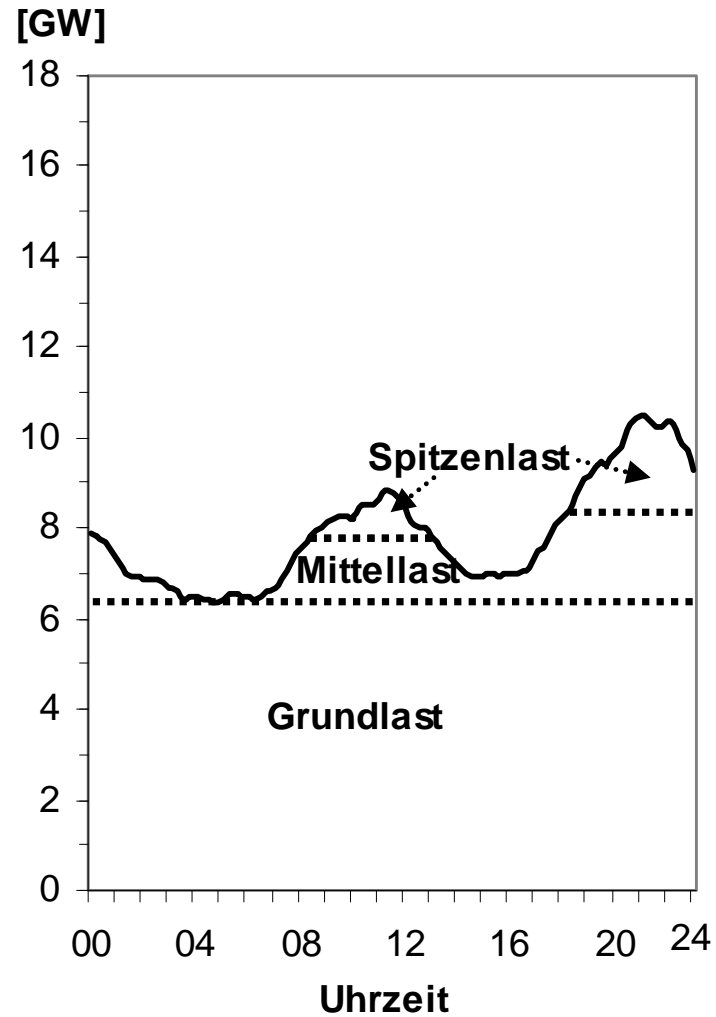
Tab. 1.1 zeigt einen Vergleich der jeweiligen Anteile an der installierten Nennleistung (GW) und an der jeweils erzeugten Energie (TWh) für 2007.

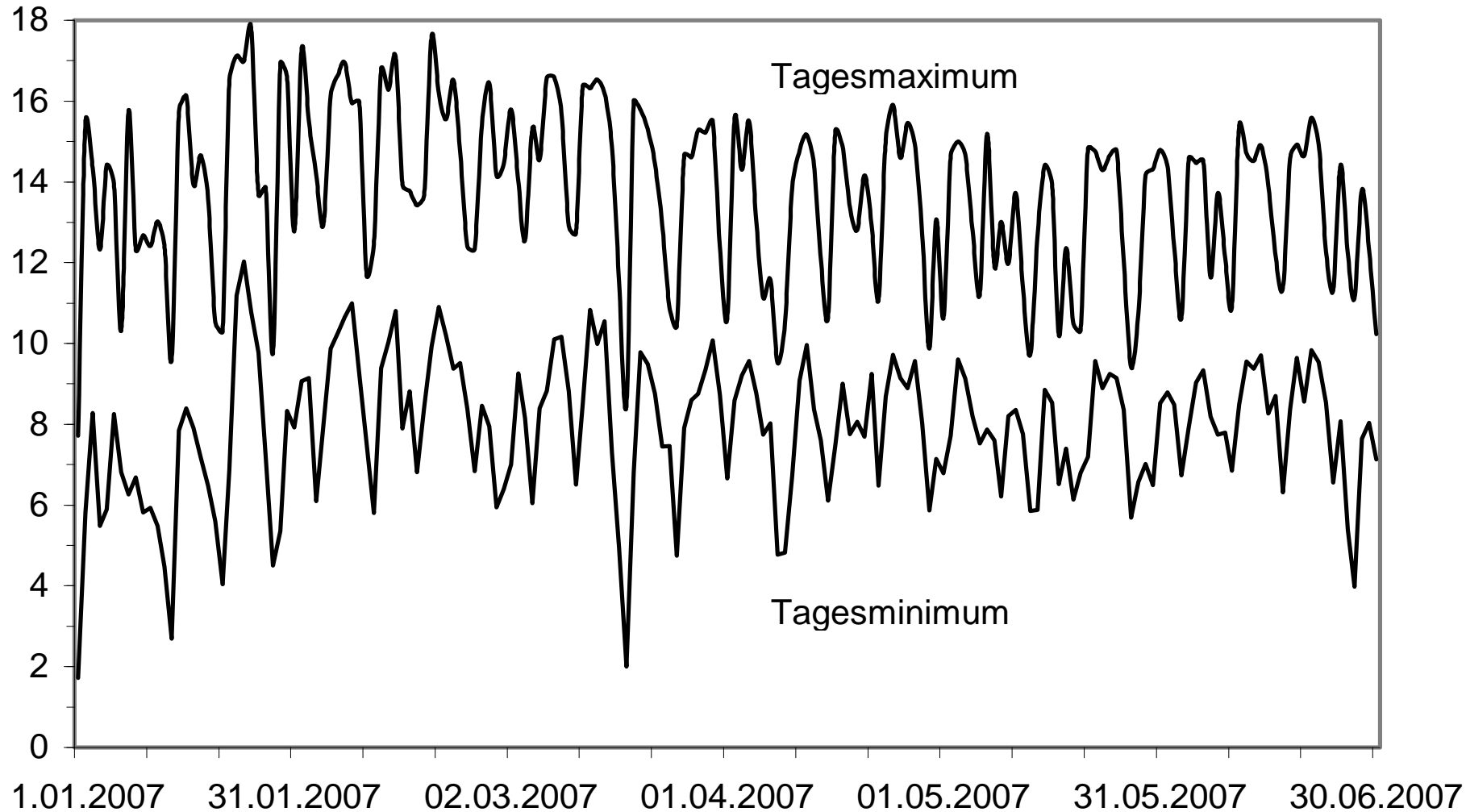
Tabelle 1.1 : Anteile einzelner Energieträger 2007

	(1) Installierte Leistung	(2) Stromer- zeugung
(1) Kernenergie	15%	22%
(2) Fossile Energieträger	54%	60%
(2.1) Braunkohle	15,3%	24,7%
(2.2) Steinkohle	20,0%	22,3%
(2.3) Mineralöl	3,8%	1,3%
(2.4) Gase	15,5%	11,6%
(3) Erneuerbare Energieträger	31%	18%
(3.1) Wind	15,5%	6,4%
(3.2) Sonne	2,7%	0,6%
(3.3) Wasser (inkl. Pumpsp.)	7,1%	4,3%
(3.4) Biomasse	2,3%	3,1%
(3.5) Müll	3,0%	1,3%
(3.6) Sonstige in Z. 3.5 enthalten		2,3%
(4) Gesamt	100%	100%

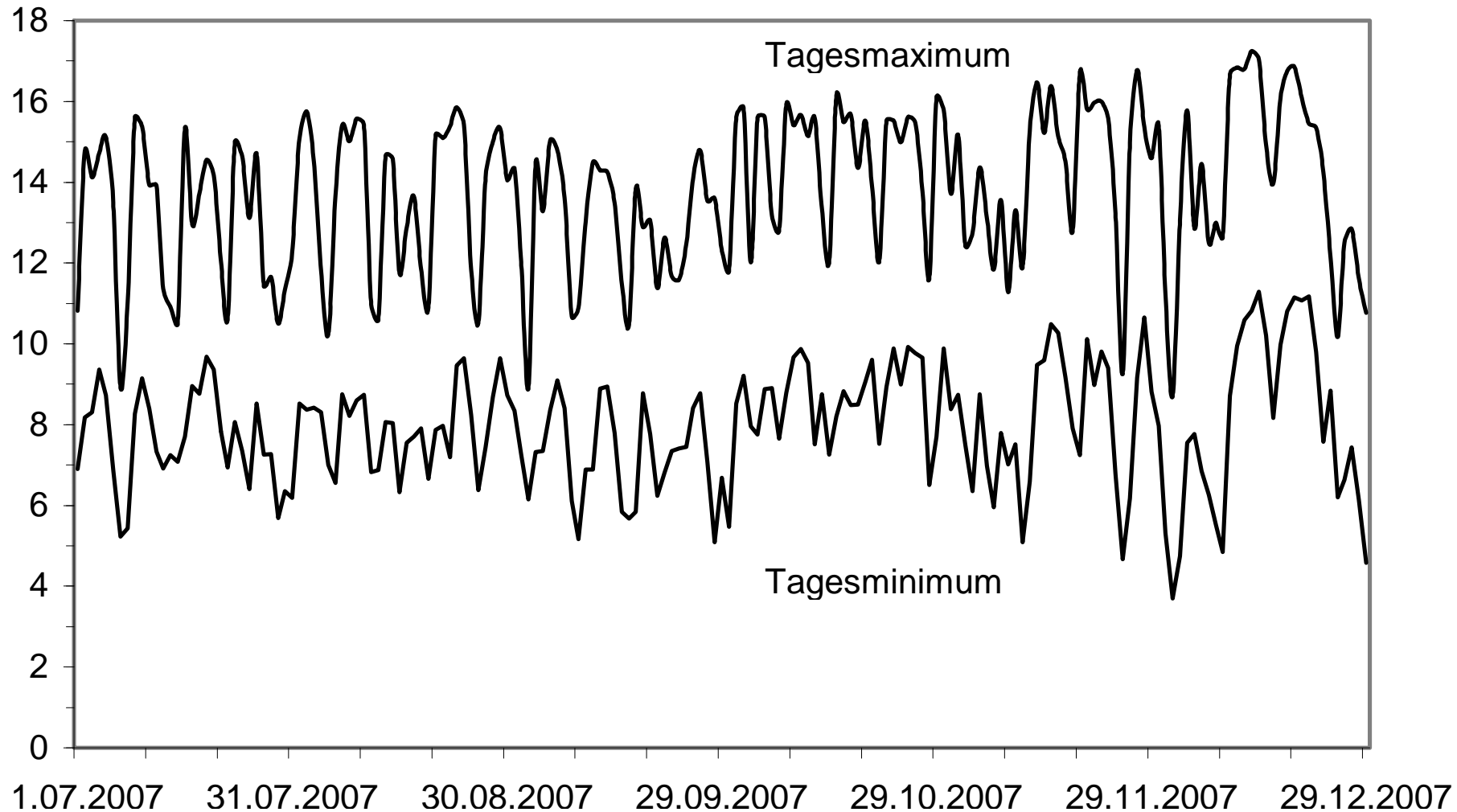
1 **Abbildung 1.1 : Tagesgang der Stromnachfrage – Beispiel E.ON-Regelzone 2007**2 **a) Werktag, Winter**

b) Wochenende, Sommer



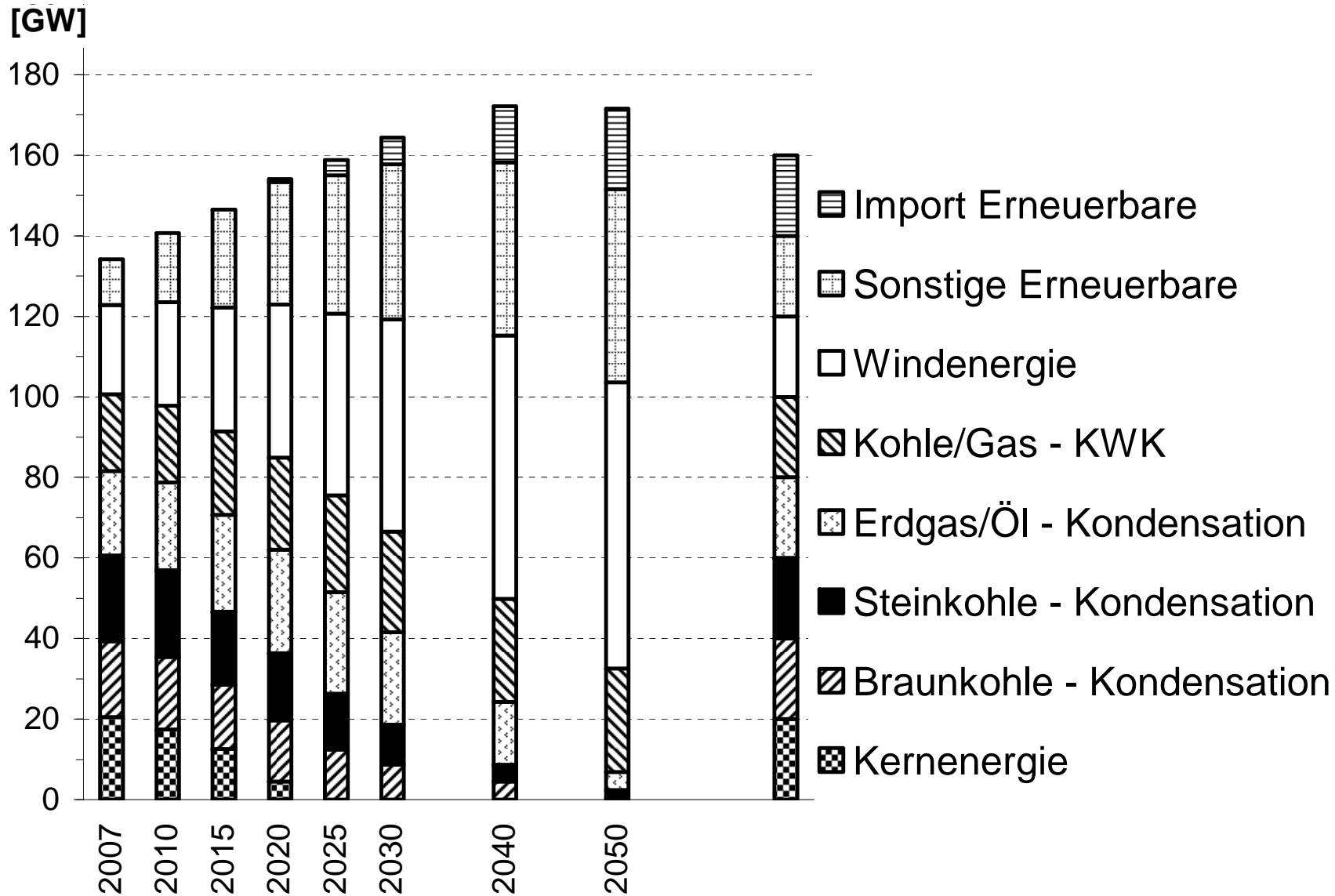
1 **Abbildung 1.2 : Jahresgang der Stromnachfrage – Beispiel E.ON-Regelzone 2007**2 **a) Januar bis Juni 2007****[GW]**

3 1.01.2007 31.01.2007 02.03.2007 01.04.2007 01.05.2007 31.05.2007 30.06.2007

1 **Abbildung 1.2 : Jahresgang der Stromnachfrage – Beispiel E.ON-Regelzone 2007**2 **b) Juli bis Dezember 2007****[GW]**

1 **1.2. Zielvorgaben der Bundesregierung für die deutsche Kraftwerksstruktur**
2 **ab 2020**

Abbildung 1.3 : Installierte Leistungen zur Stromerzeugung für Deutschland [GW]



1 **Tabelle 1.2 : Außerbetriebnahme von Kernkraftwerken in Deutschland**
 2 **bis zum Jahr 2023**

3	Biblis A	2008	Grohnde	2018
4	Brunsbüttel	2009	Gundremmingen B	2018
5	Neckarwestheim 1	2009	Philippsburg 2	2018
6	Isar 1	2011	Brokdorf	2019
7	Biblis B	2012	Isar2	2019
8	Philippsburg 1	2012	Gundremmingen C	2020
9	Unterweser	2012	Neckarwestheim 2	2022
10	Grafenrheinfeld	2015	Emsland	2023
11	Krümmel	2011		

12

13 Biblis A und Brunsbüttel haben wegen einer Vielzahl von Störfällen in 2007/2008 und dadurch be-
 14 dingten Stillständen noch Restlaufzeiten bis 2009/2010.

15

2. Ausgleich von Stromangebot und Stromnachfrage bei hohen Windenergieanteilen

2.1. Schwankungen von Stromangebot und von Stromnachfrage

Das Angebot von elektrischer Energie im Verbundnetz unterliegt schon heute, mehr noch bei massiv erhöhtem Anteil von erneuerbarer Energie sehr starken Schwankungen:

- Die größte nicht prognostizierbare Schwankung besteht im ungeplanten Ausfall eines Großkraftwerks der Grundlastversorgung, ein Abfall von bis zu 1,5 GW innerhalb weniger Sekunden.
- Schwankungen der Windenergieerzeugung, verursacht von großräumigen Flauten und großräumigen Starkwindfronten erreichen in ihrer Amplitude bis etwa die Hälfte der insgesamt in einer Regelzone installierten Windleistung, also in 2008 schon bis zu etwa 5 GW, die allerdings, im Gegensatz zu den ungeplanten Ausfällen eines Kraftwerks, für einige Stunden bis zu etwa einem Tag ziemlich genau prognostizierbar und damit einplanbar sind.

Auch die Stromnachfrage weist starke zeitliche Variationen im Tages-, Wochen- und Jahresrhythmus auf, vgl. Abb. 1.2. Aufgrund langjähriger, gesicherter Erfahrungswerte sind diese Variationen jedoch – im Gegensatz zum Windenergieaufkommen – relativ genau prognostizierbar.

2.2. Ausgleich von Windenergieschwankungen

Die Energieerzeugung nicht etwa nur einzelner Windenergieanlagen, sondern aller in eine Regelzone des Netzes (etwa die Vattenfall-Regelzone, die die neuen Bundesländer umfasst) einspeisenden Windparks ist zwar im Minuten- und Stundenbereich durch die Zusammenschaltung vergleichmäßig, steigt aber häufig von Tag zu Tag rasch von geringen Werten auf hohe Werte, etwa bis zur halben insgesamt installierten Windleistung; Werte darüber werden nur in Ausnahmefällen erreicht, um dann innerhalb weniger Stunden wieder auf deutlich geringere Werte zu sinken, vgl. Abb. 1.4. Diese für Nordeuropa charakteristischen Schwankungen entstehen beim Durchzug großräumiger Wetterfronten.

1 **Abbildung 1.4 : Stündliche Mittelwerte aller deutschen Windkraftwerke –**
2 **Beispiel Mai 2008**

[GW]

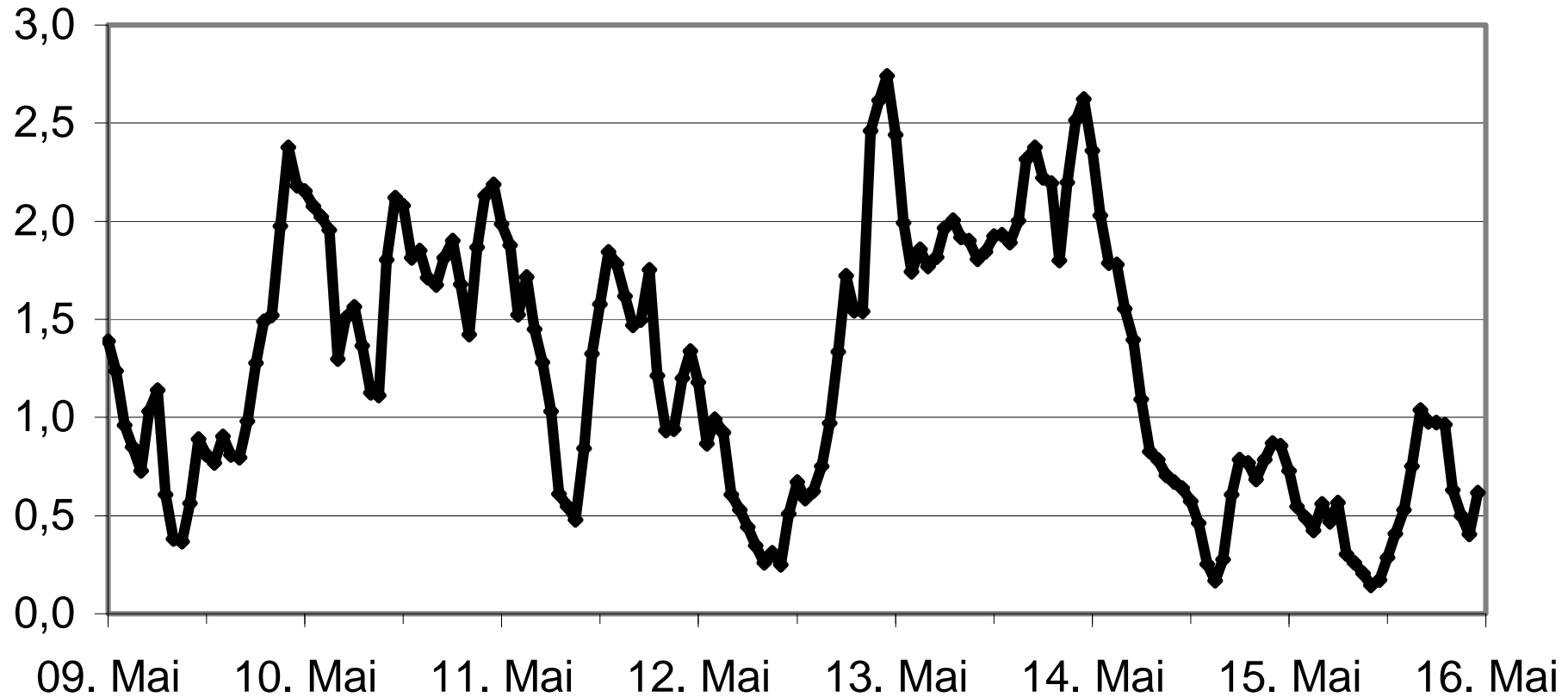


Tabelle 2.1 : Schwankungen des natürlichen Windenergieangebots und Maßnahmen zum Ausgleich

(1) Kurzfristige Schwankungen: Sekunden bis Minuten

Automatischer Ausgleich kleinerer Schwankungen durch Spannungsänderung im Netz; Schwungradeneffekt der Einzelanlage; Zusammenschaltung von vielen Einzelanlagen zu Windparks oder Gruppen von Windparks.

(2) Mittelfristige Schwankungen: Stunden bis zu 1 Tag

Windangebotsschwankungen in einer gesamten Regelzone mitteln sich für mehrere Stunden teilweise gegenseitig aus; Windangebot ist für maximal 1 Tag noch annähernd prognostizierbar; für die verbleibenden Schwankungen müssen Regelkraftwerke eingesetzt werden, wofür Bereitstellungskosten für potenziell notwendige Regelenergie anfallen.

(3) Langfristige Schwankungen: Mehrere Tage bis Wochen

Großräumige Starkwind- und Flautenfronten kaum prognostizierbar; erheblicher Aufwand für Reserveenergie.

(4) Sehr langfristige Schwankungen: Monate und Jahre

Schwankungen von Monat zu Monat und von Jahr zu Jahr; erheblicher Aufwand für Reserveenergie.

2.3. Speicher für elektrische Energie

Speicher für elektrische Energie sind sehr teuer und deshalb, wenn überhaupt, nur bei hohen Benutzungsdauern wirtschaftlich, zudem gehen zwischen 20% und 50% des eingespeicherten Stroms durch physikalisch bedingte Umwandlungsverluste verloren.

Im großtechnischen Einsatz werden als Speicher für elektrische Energie fast ausschließlich hydraulische Pumpspeicher genutzt.

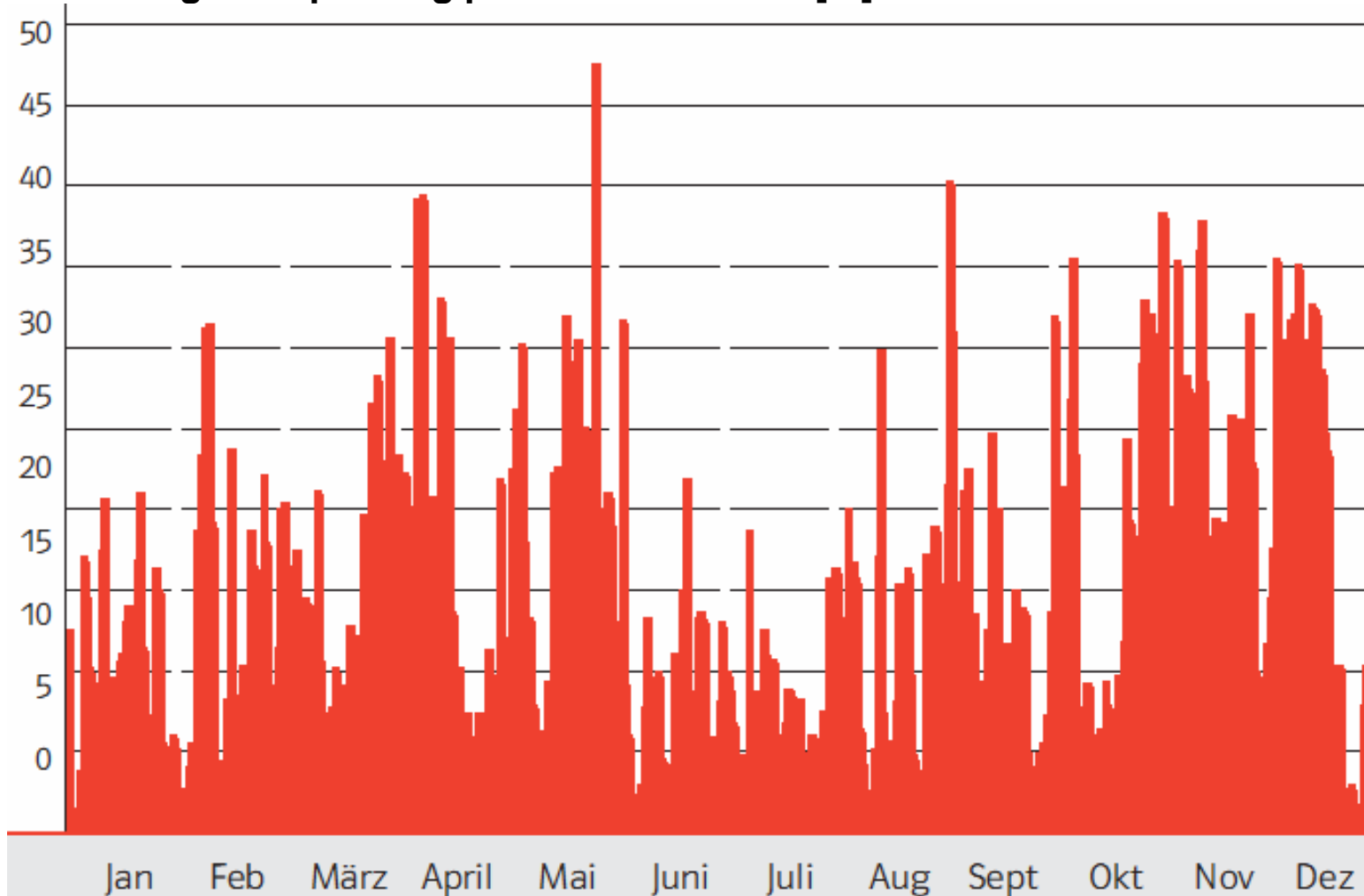
Als Batteriespeicher stand bis vor Kurzem nur der althergebrachte Bleiakkumulator zur Verfügung, der in jedem Automobil seine Dienste tut, aber im elektrischen Energieversorgungssektor wegen hoher Kosten und hohem Wartungsaufwand nur für kleine Anlagen im reinen Inselbetrieb Anwendung findet, z.B. auf Berghütten, dort neuerdings häufig in Kombination mit photovoltaischen Anlagen.

Erst in jüngster Zeit beginnt sich das zu ändern mit der Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie, die zunächst in Laptops und Handys Verwendung fand, nun aber in den ersten Großserien von Hybrid-Automobilen ihre Dienste tut. Große Flotten von Hybrid-Automobilen könnten zukünftig eine Rolle als Stromspeicher spielen. Allerdings gibt es nach wie vor keine langlebigen Batterien mit ausreichend hoher Kapazität. Der Toyota Prius z.B. hat nur eine Batteriekapazität von 1,3 kWh für den Ausgleich kurzzeitiger Leistungsüberschüsse und kann rein elektrisch nur 3 km weit fahren.

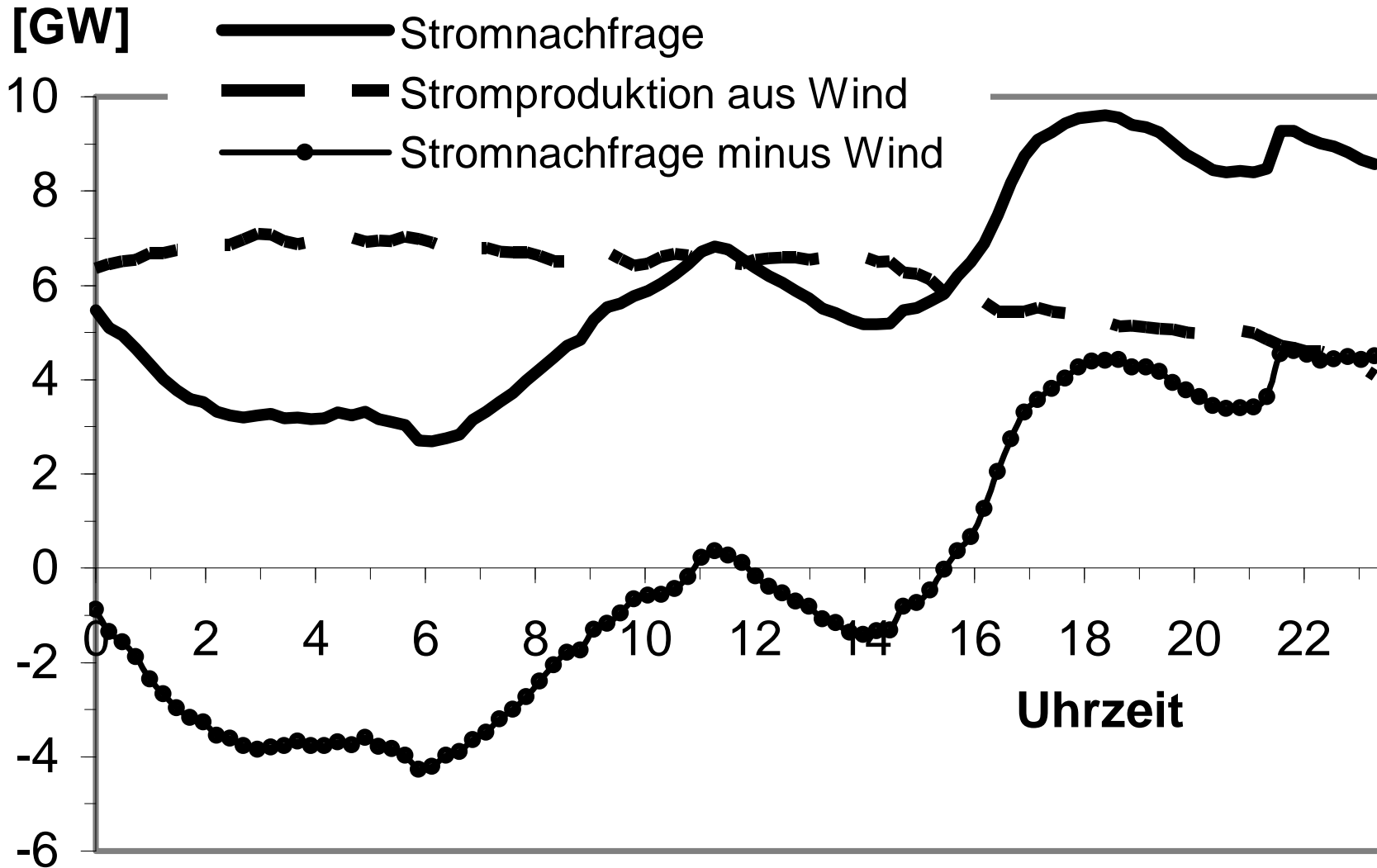
- 1 **3. Entwicklung des Kraftwerkssystems bei über 50 GW Windleistung**
- 2 **3.1. Nachfragedeckung bei hohem Windenergieanteil:**
- 3 **Welche konventionellen Kraftwerke werden zukünftig noch gebraucht?**

1 **Abbildung 3.1 : Windenergieeinspeisung als Prozentsatz der Netzhöchstlast in der**
2 **E.ON-Regelzone in 2006, gemittelt über 1 Stunde**

3 **Windenergieeinspeisung pro Netzhöchstlast [%]**



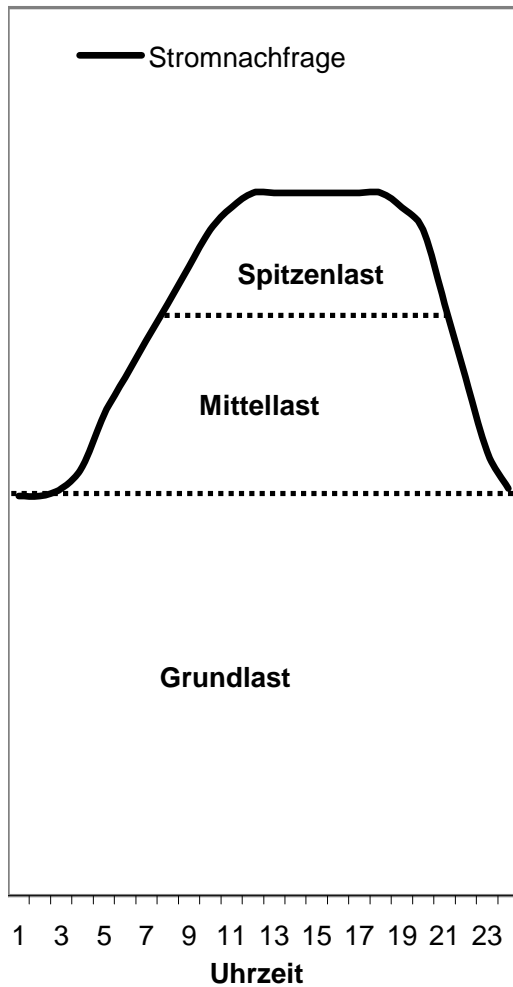
1 **Abbildung 3.2 : Windenergieeinspeisung und Nachfrage in der E.ON-Regelzone am**
2 **Extremtag 14. Januar 2007, viertelstündliche Werte**



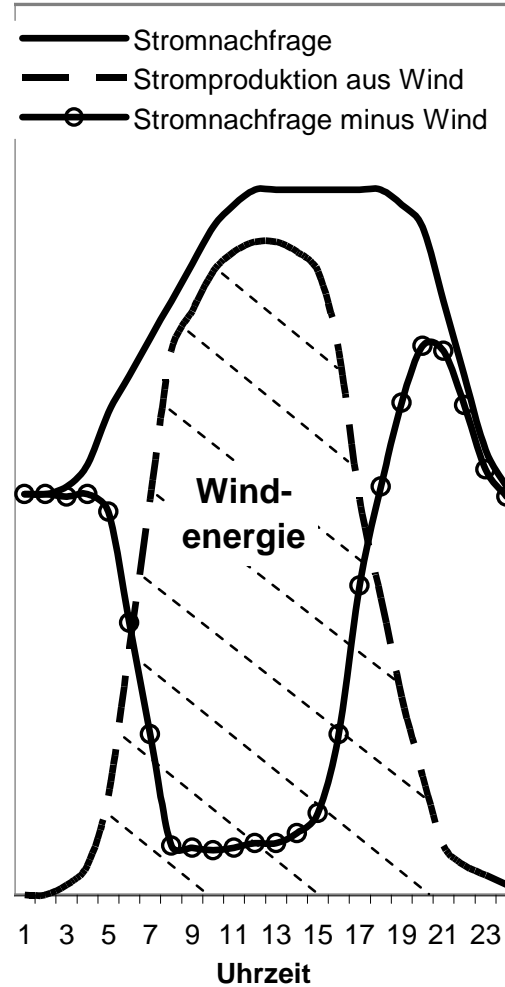
3

Abbildung 3.3 : Tagesgang der Stromnachfrage und ihre Deckung ohne und mit Windenergie

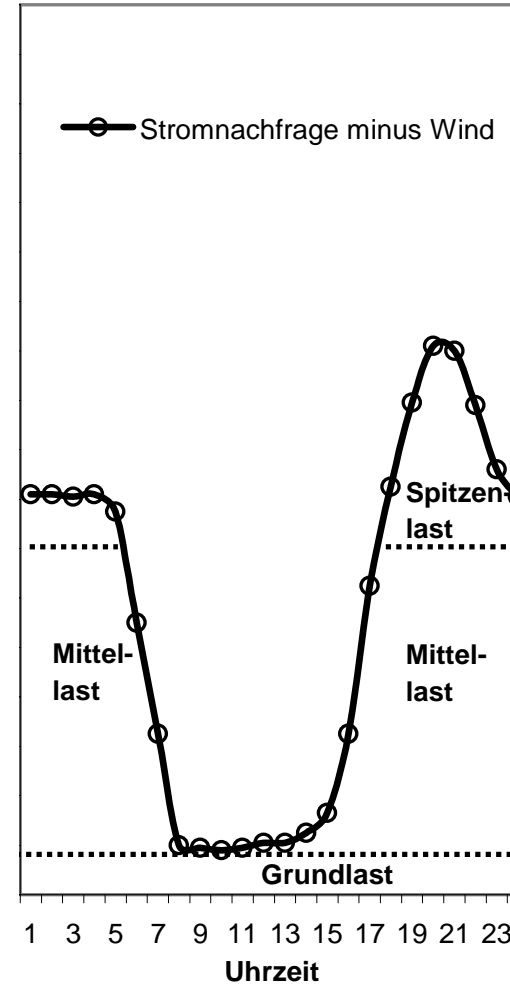
a) Vor 2000, ohne Wind



b) 2030 guter Windtag



c) 2030, nach Abzug von Wind noch benötigte Kraftwerksleistung

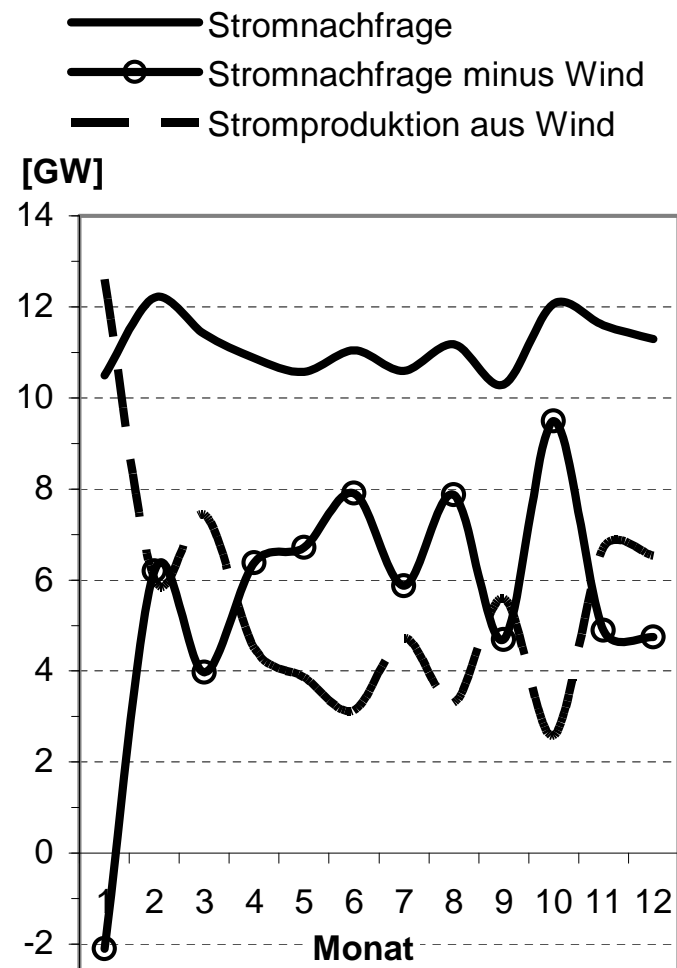
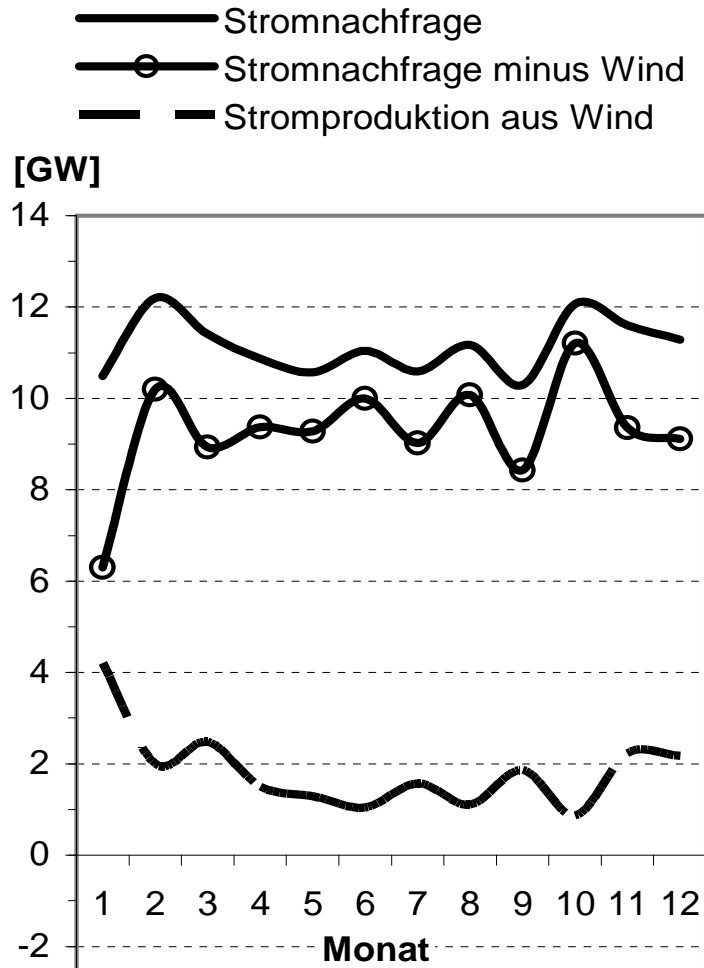


1 3.2. Windenergieanlagen versus Grundlastkraftwerke: ein Entweder-Oder

Abbildung 3.4 : Jahresgang der Stromnachfrage und der Windenergieproduktion

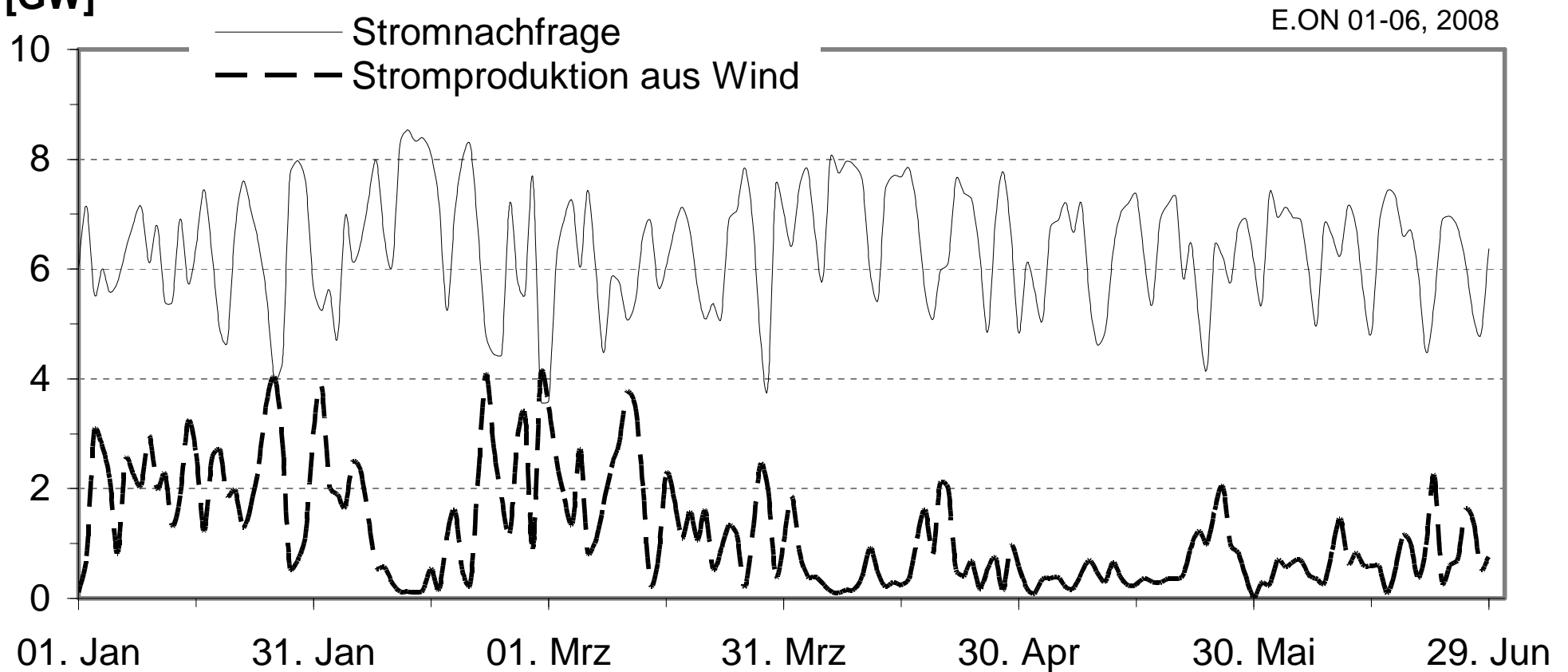
a) E.ON 2007

b) Projektion 2030:
Windenergieproduktion verdreifacht



1 **Abbildung 3.5 : Tagesgang der Stromnachfrage und ihre Deckung ohne und mit**
2 **Windenergie in der E.ON-Regelzone,**
3 **durchschnittliche Tagesleistung, Januar - Juni 2008**

4 **a) Stromnachfrage und Stromproduktion aus Wind**
[GW]

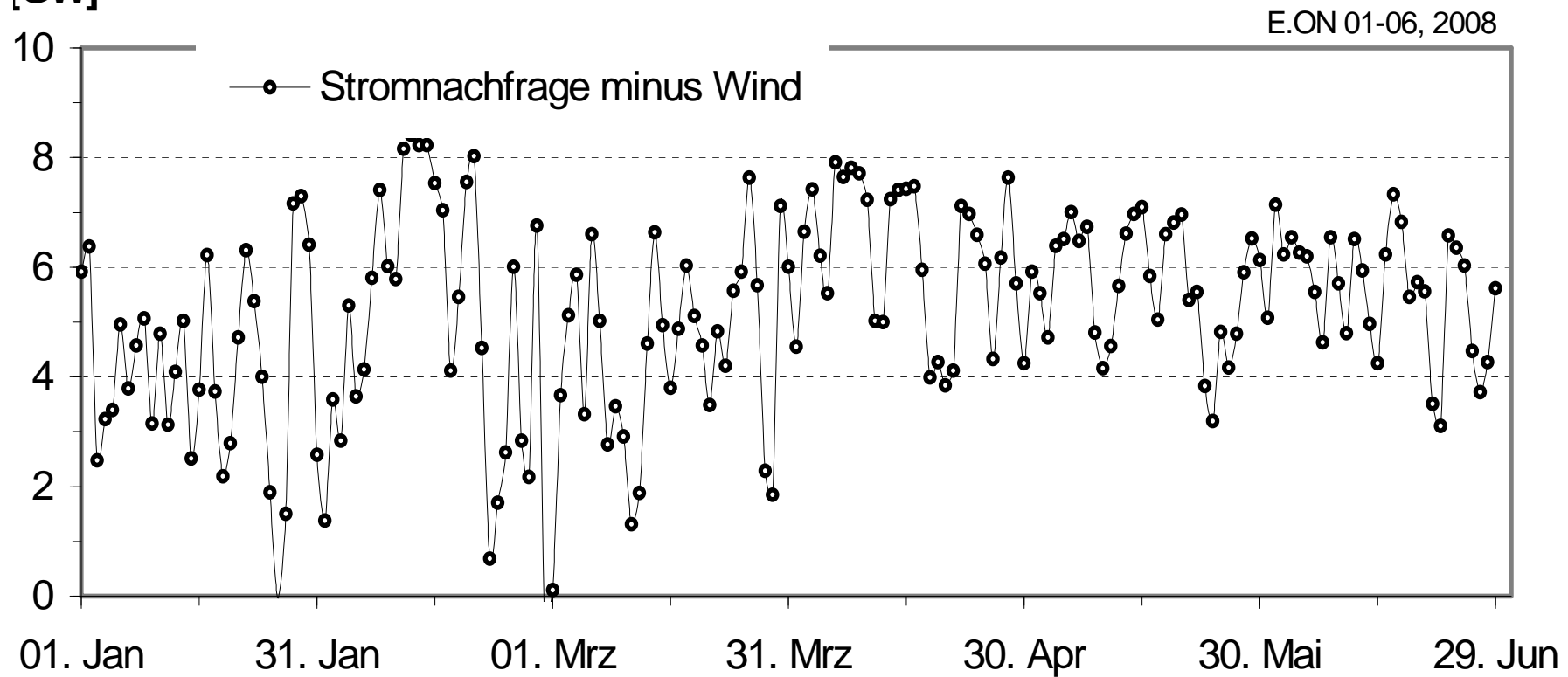


5

1 **Abbildung 3.5 : Tagesgang der Stromnachfrage und ihre Deckung ohne und mit**
2 **Windenergie in der E.ON-Regelzone,**
3 **durchschnittliche Tagesleistung, Januar - Juni 2008**

4 **b) Stromnachfrage minus Stromproduktion aus Wind**

[GW]



4. Zusammenfassung

Bis etwa 2000 bestand in Deutschland eine Dominanz von Großkraftwerken auf Kohle- und Uranbasis. Die von der Bundesregierung vorgegebenen, großteils gesetzlich festgeschriebenen Ziele des Klimaschutzes und einer verringerten Abhängigkeit von fossilen und nuklearen Brennstoffen sehen schon für die nächsten 20 Jahre schrittweise einen drastischen Wandel vor:

Bis 2023 soll das letzte Kernkraftwerk abgeschaltet sein, Erzeuger erneuerbarer Energien sollen bis 2025 die Hälfte der installierten Generatorleistung ausmachen (davon wiederum die Hälfte Windenergie), in 2050 über 80%, weitere 15% sollen dann auf dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung entfallen.

Im Energieprogramm der Bundesregierung ist eine Erhöhung der installierten Leistung von Windenergieanlagen von rund 25 GW in 2008 auf knapp 50 GW in 2025 und bis zu 70 GW in 2040 festgeschrieben. Dadurch wird Zug um Zug eine durchgreifende Änderung des gesamten Kraftwerksystems notwendig. Erforderlich ist v.a. der Ausgleich der raschen und starken Schwankungen des Windenergieangebots durch Nachfrage- und Angebotssteuerung und den Einsatz einer großen Anzahl von kleinen und mittelgroßen rasch regelbaren neuen Reserve-Kraftwerken, zu deren Betrieb neben Erdgas zunehmend auch ins Gasnetz eingespeistes Biogas beitragen kann. Bewährte und neue Speicher für elektrische Energie werden dabei eine wachsende Rolle spielen.

1 Erneuerbare Energien können zusammen mit dem vorgesehenen hohen Anteil an Kraft-Wärme-
2 Kopplung schon ab 2025 häufig für Stunden oder gar Tage annähernd die gesamte Stromnachfrage
3 in Deutschland abdecken. Insbesondere das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und die CO₂-
4 Zertifikate werden dafür sorgen, dass der Markt die notwendige Umwandlung des gesamten Kraft-
5 werkssystems in den nächsten 20 Jahren vorantreiben wird.

6 Als Folge dieser notwendigen Entwicklung wird für große Grundlastkraftwerke nur noch ein sehr ge-
7 ringer Bedarf – etwa zur Frequenzstabilisierung – bestehen. Wegen der daraus resultierenden im-
8 mer kürzeren Nutzungsdauern werden die derzeit geplanten Neubauten von Grundlastkraftwerken
9 unwirtschaftlich und zu großen betriebswirtschaftlichen Verlusten für die Investoren führen.

10

1

2 Sehr geehrter Herr Dekan, sehr geehrte Kolleginnen und Kollegen!

3 Haben Sie nochmals herzlichen Dank für Ihre großzügige Unterstützung meiner Forschungsarbeiten,
4 die zusammen mit Prof. Dr. G.M. OBERMAIR, Universität Regensburg und Staatssekretär a.D. W.
5 VOIGT, Kiel durchgeführt wurden.

6 Die Ergebnisse sind mittlerweile auch als wissenschaftliches Fachbuch verfügbar:

7 **Jarass/Obermair/Voigt:**

8 **Windenergie - Zuverlässige Integration in die Energieversorgung.**

9 **Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, Juni 2009.**

10