



Technische Universität Berlin
Institut für Energietechnik



Fundamentale Regelleistungspreisprognosen

Wert von Flexibilität im zukünftigen Regelleistungsmarkt 2035

Strommarkttreffen: 2. September 2016

Dipl.-Ing. Sebastian Spieker
FG Energietechnik und Umweltschutz
Prof. G. Tsatsaronis • TU Berlin

*sebastian.spieker@iet.tu-berlin.de
<http://www.energietechnik.tu-berlin.de/>*

Fragestellungen

► Wert von Flexibilität im zukünftigen Regelenenergiemarkt

I. Wie werden sich die Regelleleistungspreise langfristig entwickeln?

Zu welchen Kosten kann zukünftig Flexibilität bereitgestellt werden?

II. Welchen Einfluss hat die Erschließung weiterer Flexibilitätsoptionen?

III. Wie hoch ist die wirtschaftliche Bedeutung des Regelenenergiemarkts für thermische Kraftwerke, Pumpspeicher und Flexibilitätsoptionen wie P2H?



<http://kraftwerke.vattenfall.de>



www.siemens.com



<http://kraftwerke.vattenfall.de>



www.siemens.com

MODELLÜBERBLICK

Modellbeschreibung

Kriterium	Einsatz
Modelltyp	Fundamentalmodell Bestimmung des kostenoptimalen Kraftwerkseinsatzes (MILP / CPLEX, Gurobi / GAMS)
Sektoren	Strom und Fernwärme
Märkte	Spotmarkt (Day-Ahead) Regelleistungsmärkte (PRL, SRL, MR)
Technologien	thermische und hydraulische Kraftwerke, erneuerbare Energien, KWK, P2H, Elektromobilität, Lastmanagement
Auflösung	stündlich (rollierender Zeithorizont) blockscharf (>75 MW)
Modell-Fokus	Preisprognosen für den Spot- und Regelenenergiemarkt Kraftwerkstechnik
Region	Deutschland zukünftige Strom-Importe/Exporte: Regressionsmodell

Kraftwerkspark und Brennstoffpreise

Installierte Kraftwerkskapazität [GW]

	2014	2035 (NEP2025/B1) ¹
Kernenergie	12,1	-
Braunkohle	20,9	9,1
Steinkohle	25,8	11,0
Gaskraftwerke	23,0	40,7
Ölkraftwerke	2,2	0,4
Pumpspeicher ²	9,2	14,5
Biomasse	5,5	8,4
Wind Onshore	37,1	88,8
Wind Offshore	1,0	18,5
PV	38,3	59,9

¹ geringfügige Unterschiede gegenüber NEP 2025 (aufgrund blockscharfer Betrachtung erfolgen sowohl Zubau als auch Stilllegung in diskreten Leistungsschritten)

² inkl. Pumpspeicher in AT, die an das deutsche Stromnetz angeschlossen sind

Brennstoffkosten [€/MWh_{Hi}]

	2014	2035 (NEP2025/B1)
Uran	3,2	-
Braunkohle	1,5	1,5
Steinkohle	9,1	10,4
Erdgas	25,5	37,3
Heizöl (leicht)	63,1	87,4
CO ₂ -Zertifikate [€/t]	6,1	31,0



<http://corporate.vattenfall.de>



George Shuklin
Wikimedia Commons



Amiralis
Wikimedia Commons



<http://www.flickr.com/photos/19616008@N00> Petteri
Wikimedia Commons

Regelenergiemarkt

► Marktbedingungen 2035

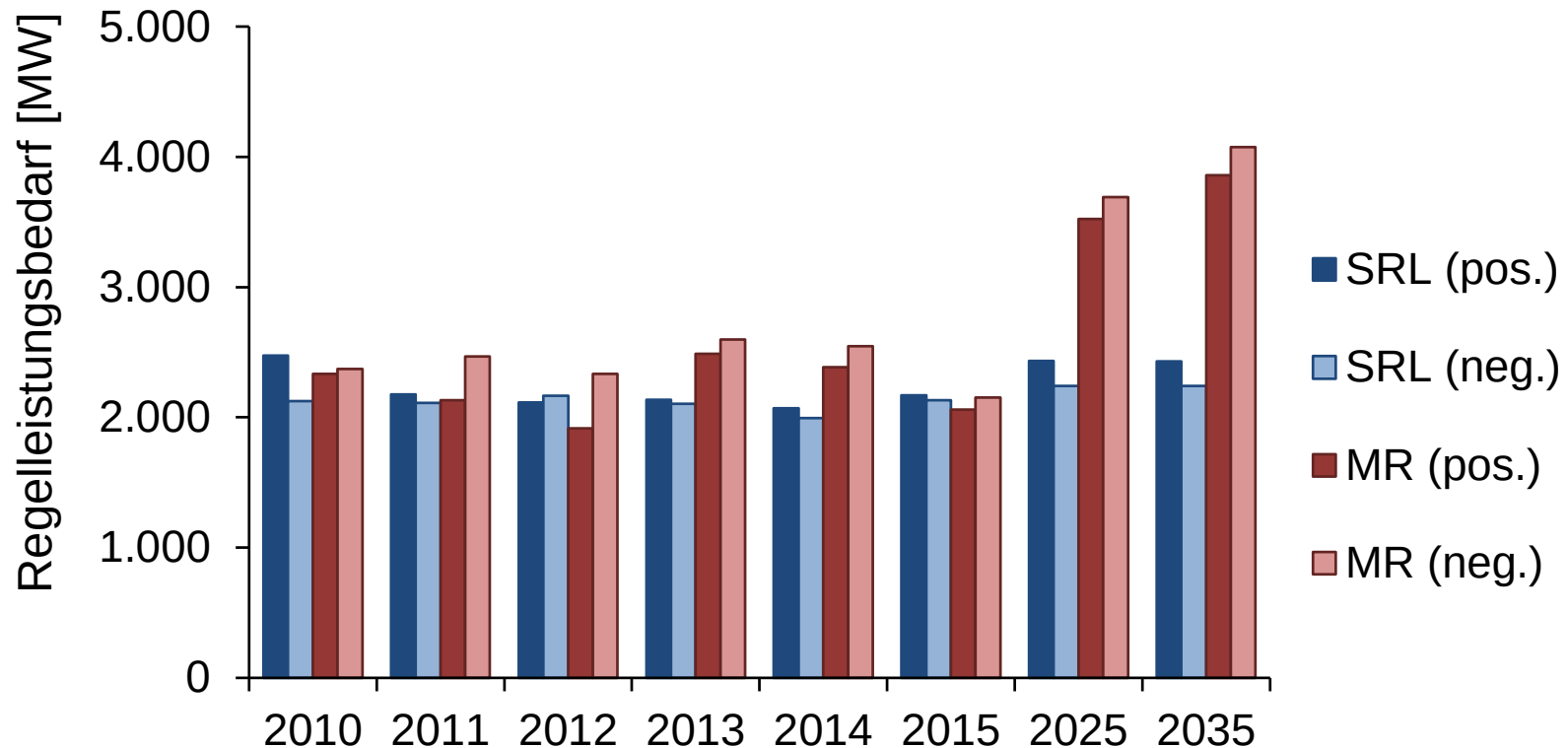
- kalendertägliche Ausschreibung, Produktlänge: 4-Stunden, Bemessungsverfahren: statisch

► Flexibilitätsangebot

	2014	2035		
		LowFlex	Base	HighFlex
therm. Kraftwerkspark				
Laständerungsgeschwindigkeit	-	+10%	+20%	+30%
Mindestlast	-	-15%	-30%	-45%
sonst. Flexibilitätsoptionen				
Batterien (nur PRL)	10 MW _{el}	100 MW _{el}	200 MW _{el}	300 MW _{el}
P2H				
E-Heizer	300 MW _{el}	500 MW _{el}	700 MW _{el}	1000 MW _{el}
Wärmepumpen	-	750 MW _{el} (PQ ³ : 150 MW _{el})	1.500 MW _{el} (PQ ³ : 300 MW _{el})	2.250 MW _{el} (PQ ³ : 450 MW _{el})
Biomasse (flexibel: $P_{BHKW,el} \times 1,5$)	0 MW _{el} (PQ ³ : 1.000 MW _{el})	3.000 MW _{el} (PQ ³ : 2.000 MW _{el})	6.000 MW _{el} (PQ ³ : 4.000 MW _{el})	7.500 MW _{el} (PQ ³ : 6.000 MW _{el})
Windenergie	-	0% ^{1,2}	10% ^{1,2}	20% ^{1,2}
Photovoltaik	-	0% ^{1,2}	10% ^{1,2}	20% ^{1,2}
Elektromobilität (Anzahl Fahrzeuge)	-	0	0	4.500.000

¹ präqualifizierter Anteil der installierten Leistung; ² Sicherheitsfaktor PV =2; Sicherheitsfaktor Wind =3 (Sicherheitsfaktor zur Berücksichtigung kurzfristiger Prognoseunsicherheiten); ³ präqualifizierte Leistung

RegelleLeistungsbedarf



Eigene Berechnung basierend auf dena Studie „Systemdienstleistungen 2030“

Modellierung

Thermische Kraftwerke



<http://kraftwerke.vattenfall.de>

Allg. technische Kraftwerksparameter

Laständerungsgeschwindigkeit, Teillastverhalten, Mindestlast,...

Anfahrkosten

Brennstoffmehrbedarf (abhängig von der Kraftwerksstillstandszeit),...

KWK

Fernwärmenetze, PQ-Diagramme, P2H,...

Pumpspeicher/ Energiespeicher



<http://kraftwerke.vattenfall.de>

Speicherkapazität

Volumina Oberbecken/Unterbecken, Speicherkaskaden,...

Regelfähigkeit

hydraulischer Kurzschluss,...

Leistung

Verhältnis von Be- zu Entladeleistung

Strommarkt



<https://www.eex.com>

Märkte

Day-Ahead-Spotmarkt & Regelleistungsmarkt

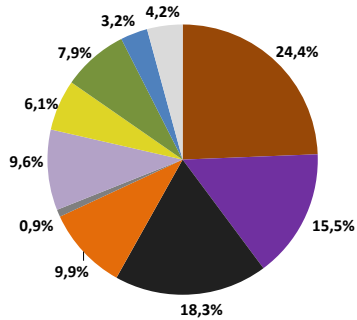
Preise

modellendogene Preisbestimmung mit Berücksichtigung von Anfahrkosten bzw. vermiedenen Anfahrkosten, Opportunitätskosten,...

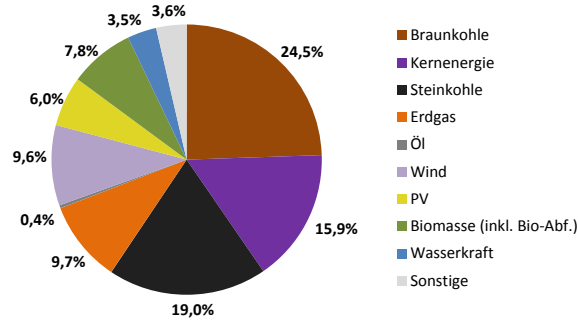
Modellvalidierung für 2014

► Stromerzeugung

AG-Energiebilanzen

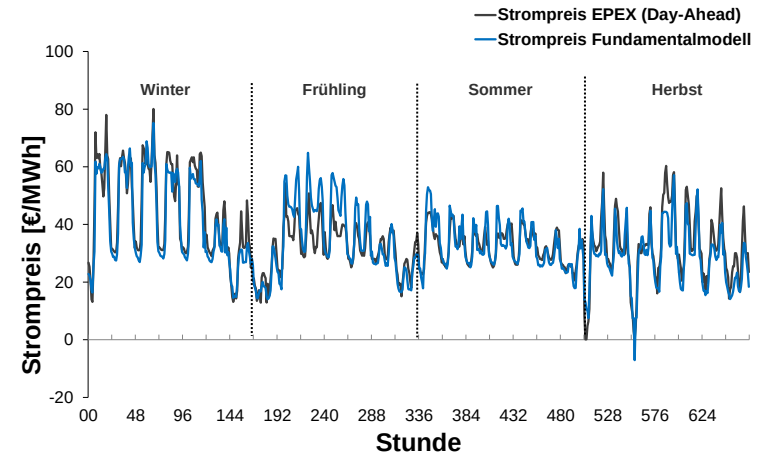


Modell



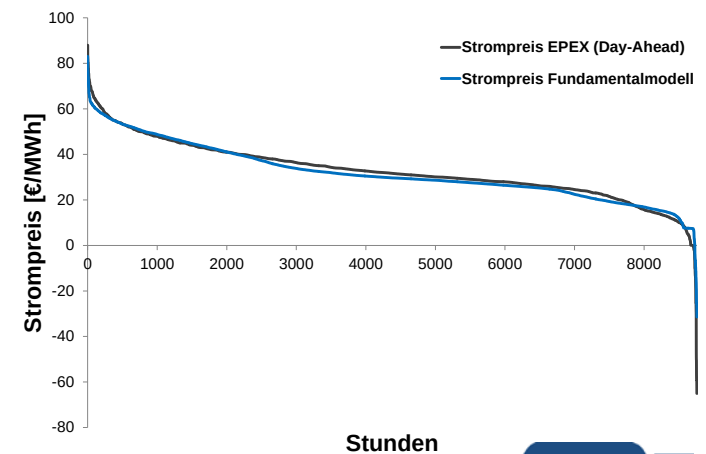
■ Braunkohle
 ■ Kernenergie
 ■ Steinkohle
 ■ Erdgas
 ■ Öl
 ■ Wind
 ■ PV
 ■ Biomasse (inkl. Bio-Abf.)
 ■ Wasserkraft
 ■ Sonstige

► Day-Ahead-Spotpreise



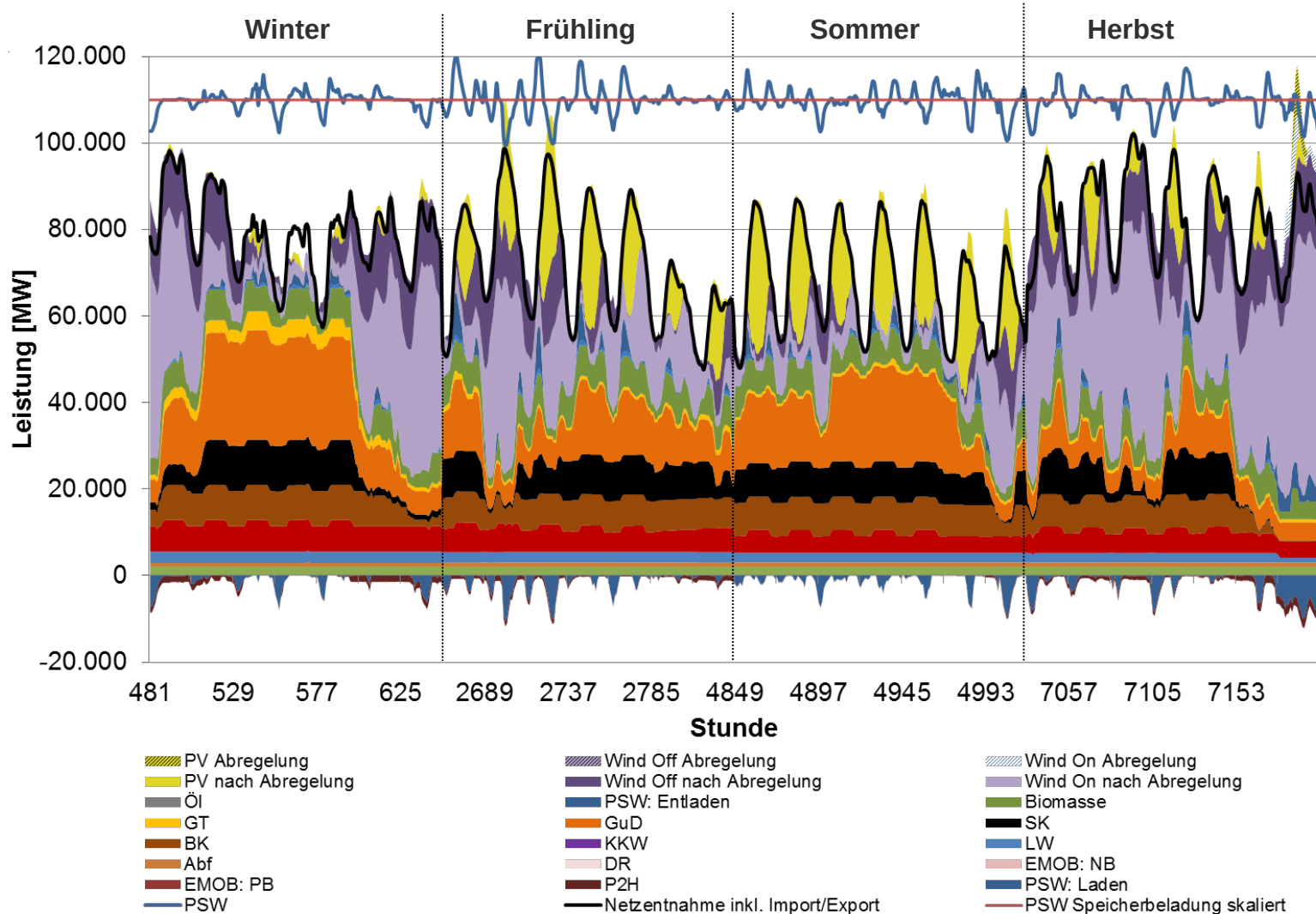
► RegelleLeistungspreise

		Preise [€/MW h]	
		Real	Modell
PRL		20,9	17,1
SRL	pos.	7,5	6,8
	neg.	5,0	5,8
MR	pos.	0,5	0,4
	neg.	3,8	2,4

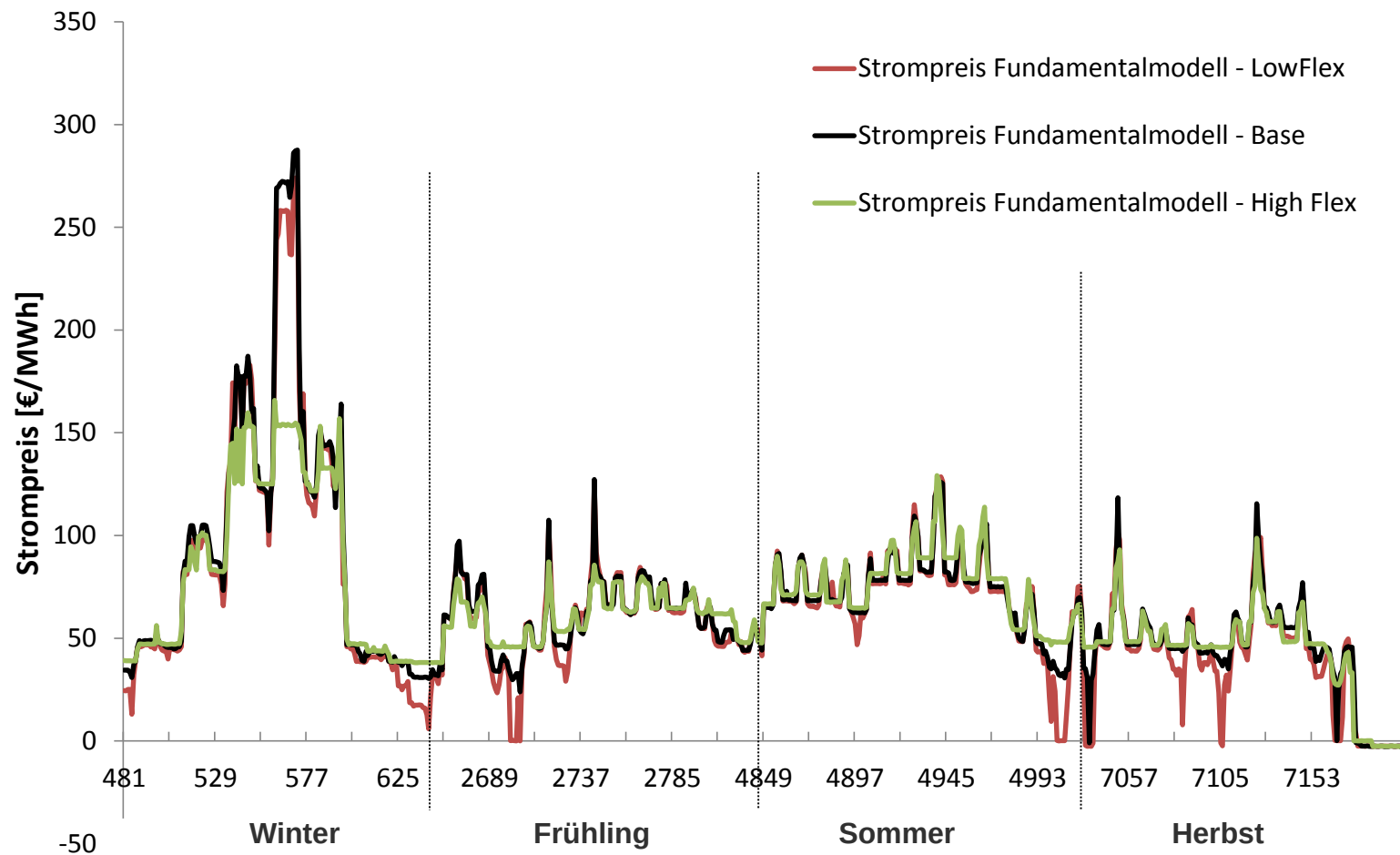


STROMMARKT 2035

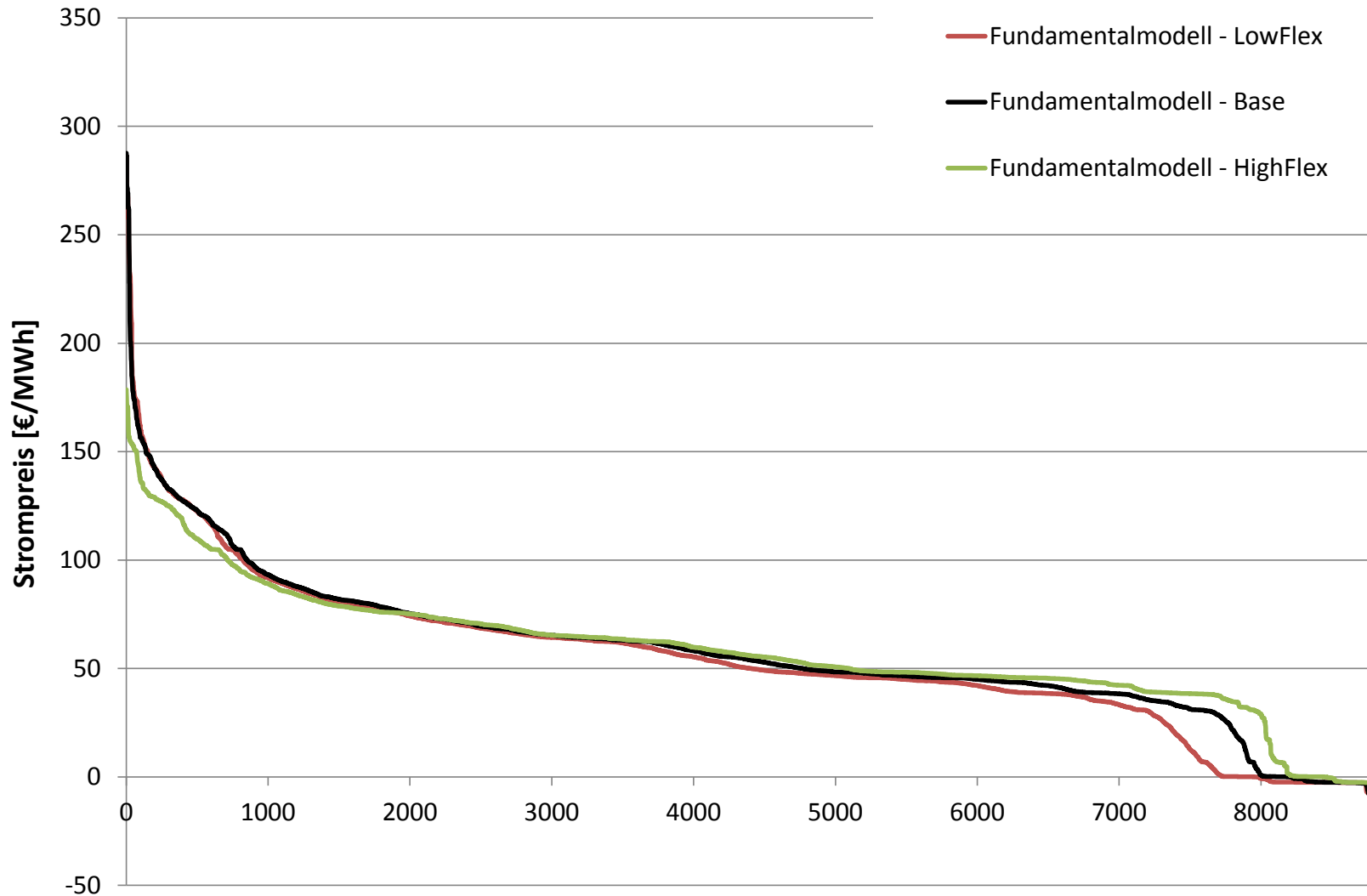
Stromerzeugung 2035 (4 Wochen)



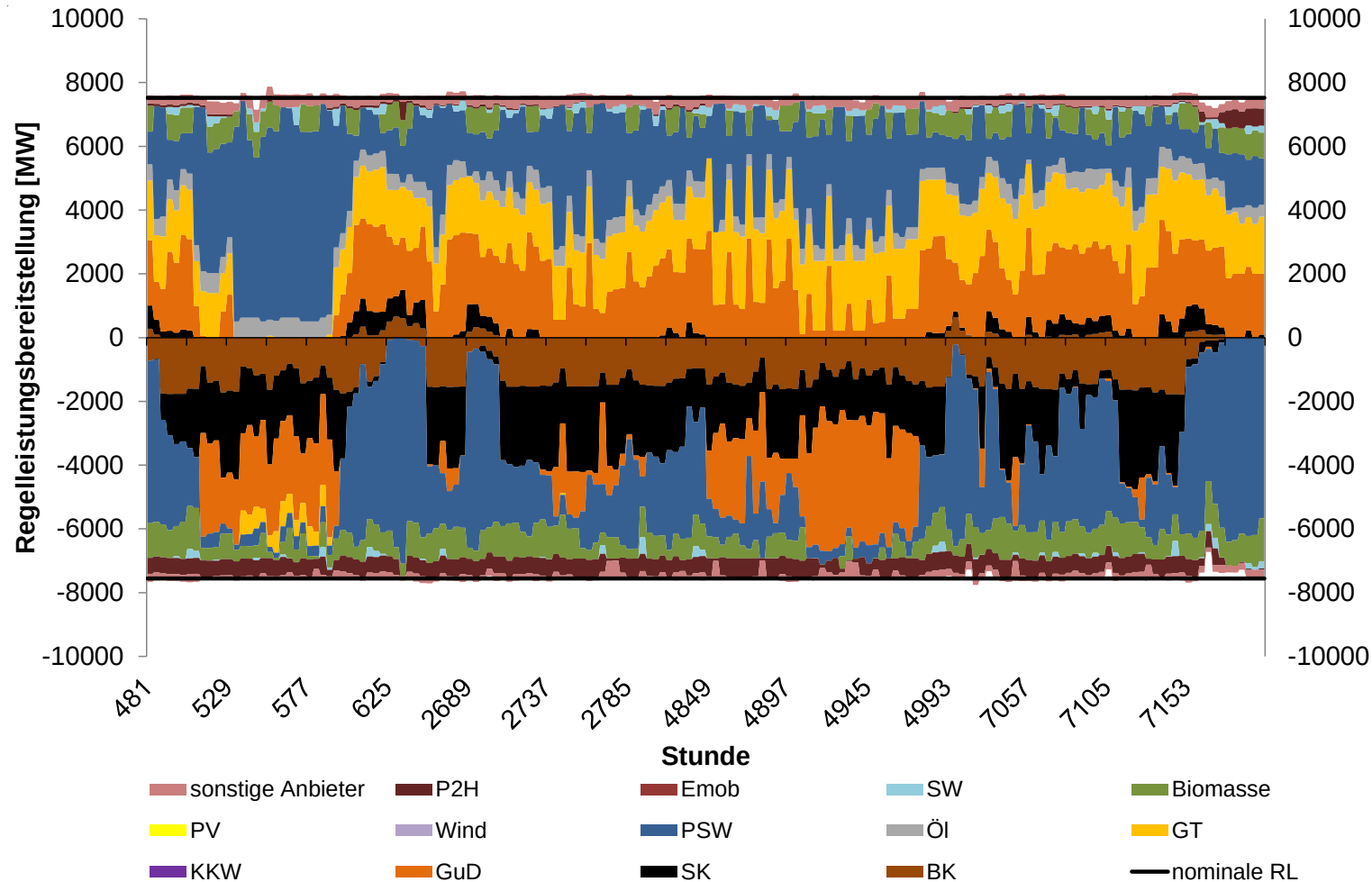
Strompreise 2035 (4 Wochen)



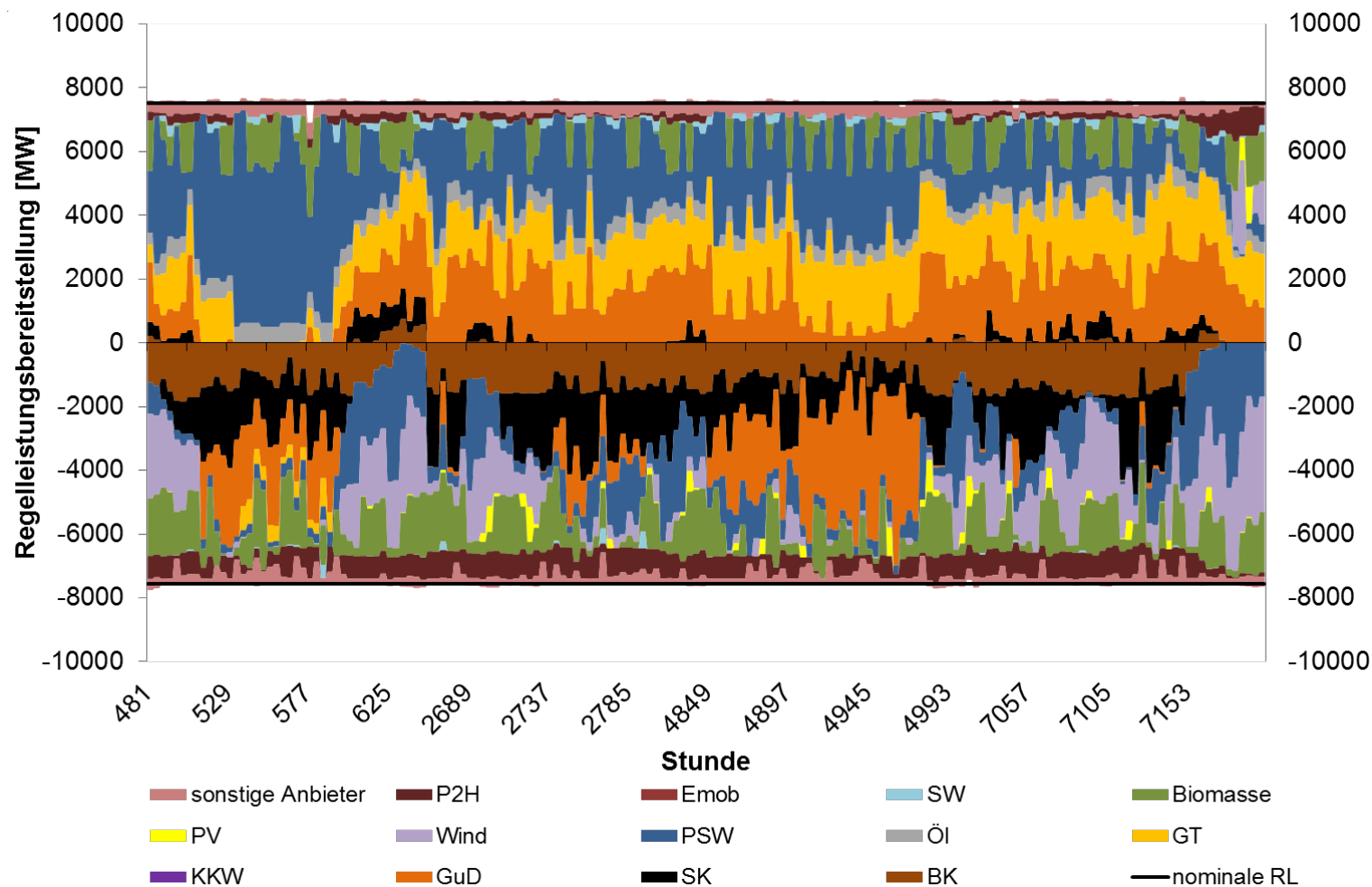
Preisdauerlinie 2035



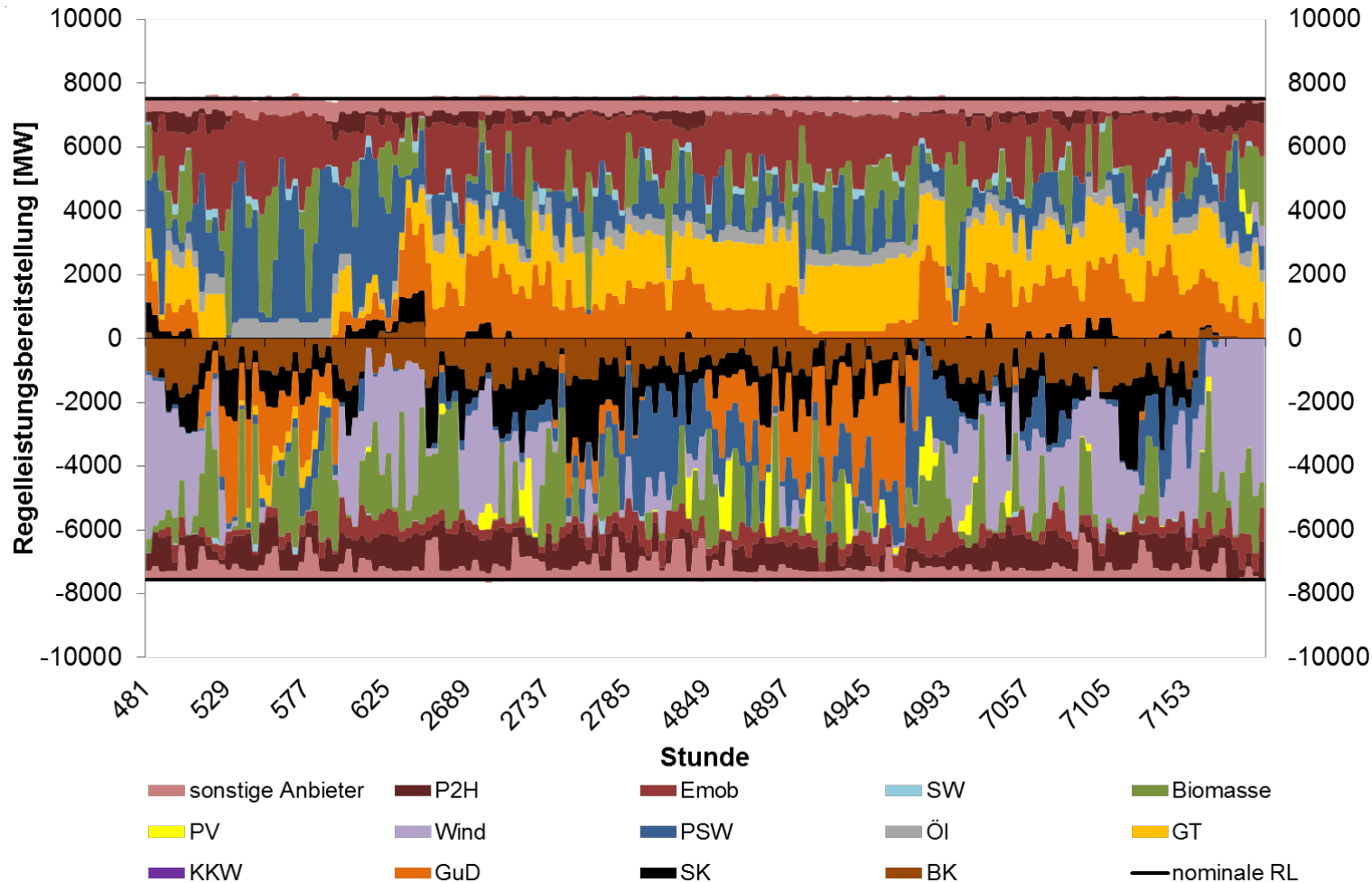
Regelleistungsvorhaltung: 2035 (Low Flex)



Regelleistungsvorhaltung: 2035 (Base)

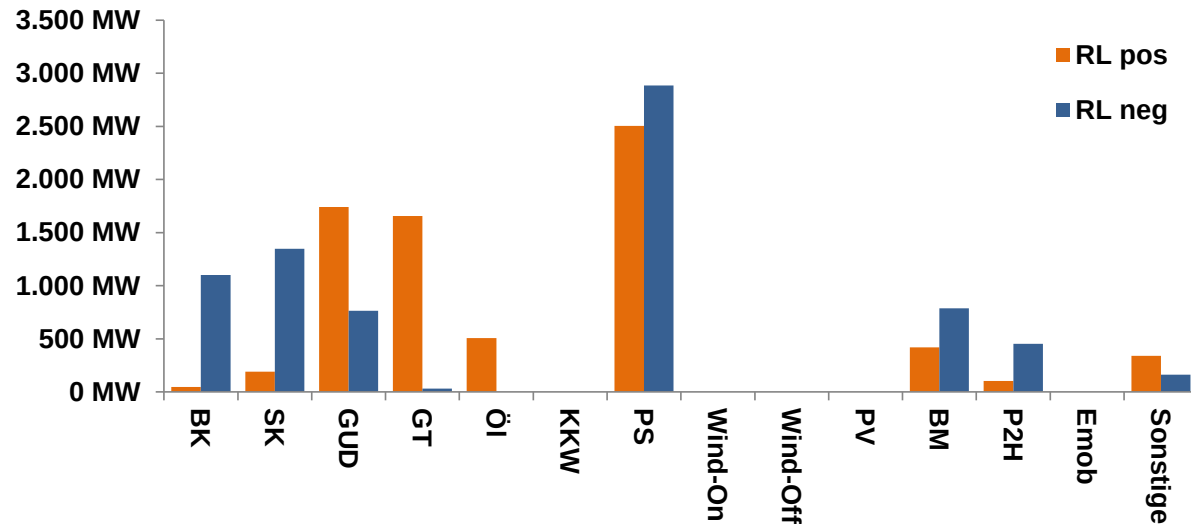


Regelleistungsvorhaltung: 2035 (High Flex)

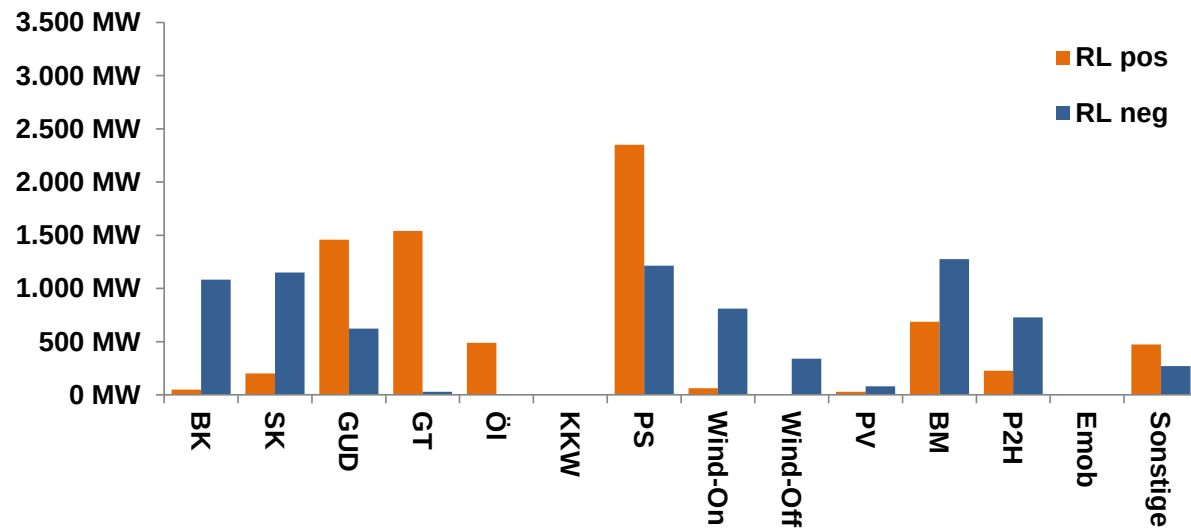


Vergleich: RL-Vorhaltung 2035

► 2035 LowFlex

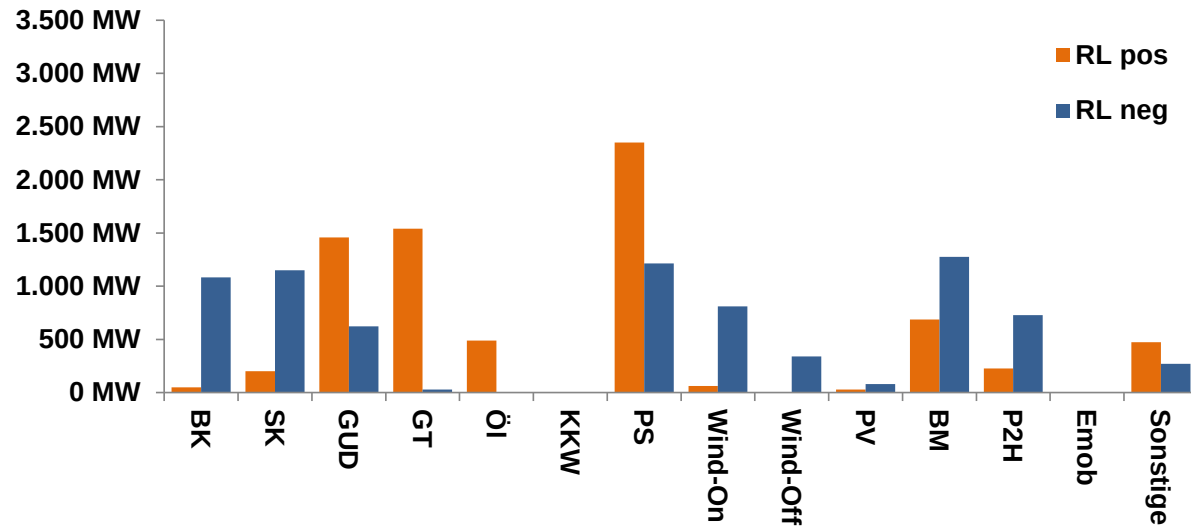


► 2035 Base

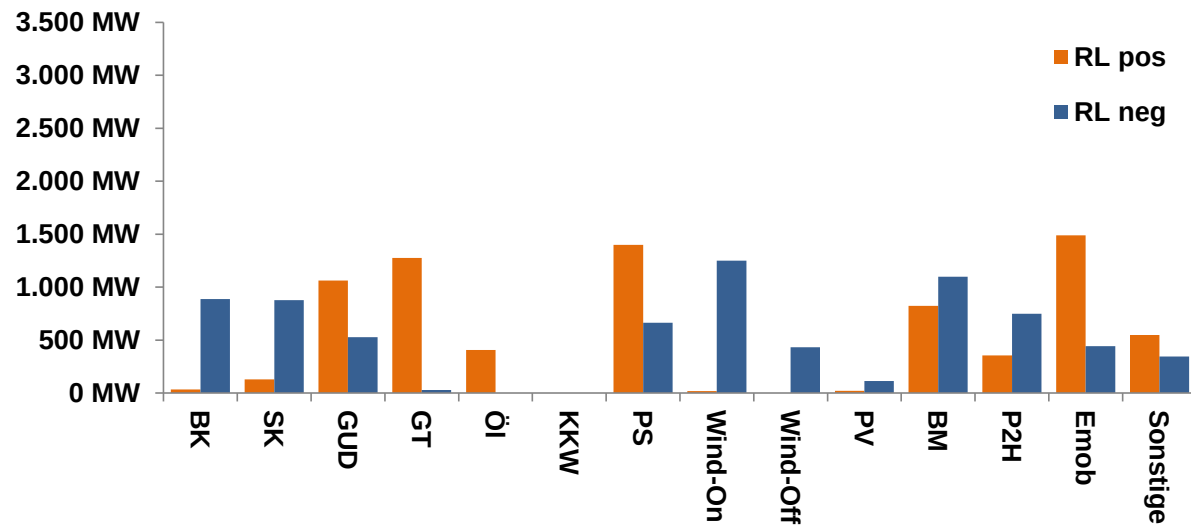


Vergleich: RL-Vorhaltung 2035

► 2035 Base



► 2035 HighFlex



RegelleLeistungspreise: 2035

		Preise [€/MW*h]			
		2014	2035	2035	2035
		historisch	Low Flex	Base	High Flex
PRL		20,9	19,27	11,11	3,87
SRL	pos.	7,5	12,13	7,86	2,87
	neg.	5,0	10,15	2,60	0,18
MR	pos.	0,5	4,42	3,69	1,25
	neg.	3,9	5,89	1,69	0,13



Regelleistung: Erlöse 2035

	<u>Erlöse</u> aus Regelleistungsbereitstellung [€/MW*a]										
	BK	SK	GuD	GT	PSW	Wind onshore offshore		PV	BM	P2H (Eheizer)	E-Mobility (€ pro Fahrzeug und Jahr)
LowFlex	3.984	3.814	3.139	21.453	34.499	-	-	-	37.573	70.901	-
Base	1.032	653	1.893	16.182	14.743	3.089	5.642	425	10.957	17.376	-
HighFlex	85	52	300	4.837	2.764	183	327	6	810	939	12

	jährliche <u>Erlöse</u> als Anteil der Investitionsaufwendungen										
LowFlex	0,3%	0,3%	0,4%	5,4%	2,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	23,6%	-
Base	0,1%	0,1%	0,3%	4,0%	1,0%	0,3%	0,2%	0,1%	0,3%	5,8%	-
HighFlex	0,0%	0,0%	0,2%	3,2%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,8%	-

	spez. Investitionskosten 2035 [€/kW]										
	1.500	1.200	750	400	1.500	1.000	2.500	800	4.000	300	-

Veröffentlichung der Ergebnisse

Szenarien basierend auf dem NEP 2025

- ▶ 2025: LowFlex, Base, HighFlex
- ▶ 2035: LowFlex, Base, HighFlex

Datenumfang: stündliche Preiszeitreihen

- ▶ Spotpreise (Day-Ahead)
- ▶ Preis Primärregelenergie (PRL)
- ▶ Leistungspreis Sekundärregelenergie (SRL)
- ▶ Leistungspreis Minutenreserve (MR)

Lizenz

- ▶ voraussichtlich: CC-BY-NC (Namensnennung, nicht kommerziell, bearbeitbar)

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Institut für Energietechnik

Dipl.-Ing. Sebastian Spieker
spieker@iet.tu-berlin.de

<http://www.energietechnik.tu-berlin.de>

Institut für Energietechnik
Fachgebiet Energietechnik und Umweltschutz
Technische Universität Berlin
Marchstraße 18, 10587 Berlin
Tel.: ++49 (0)30 314-24763
Fax: ++49 (0)30 314-21683