

科研費プロジェクト第7回研究会
2023年3月27日

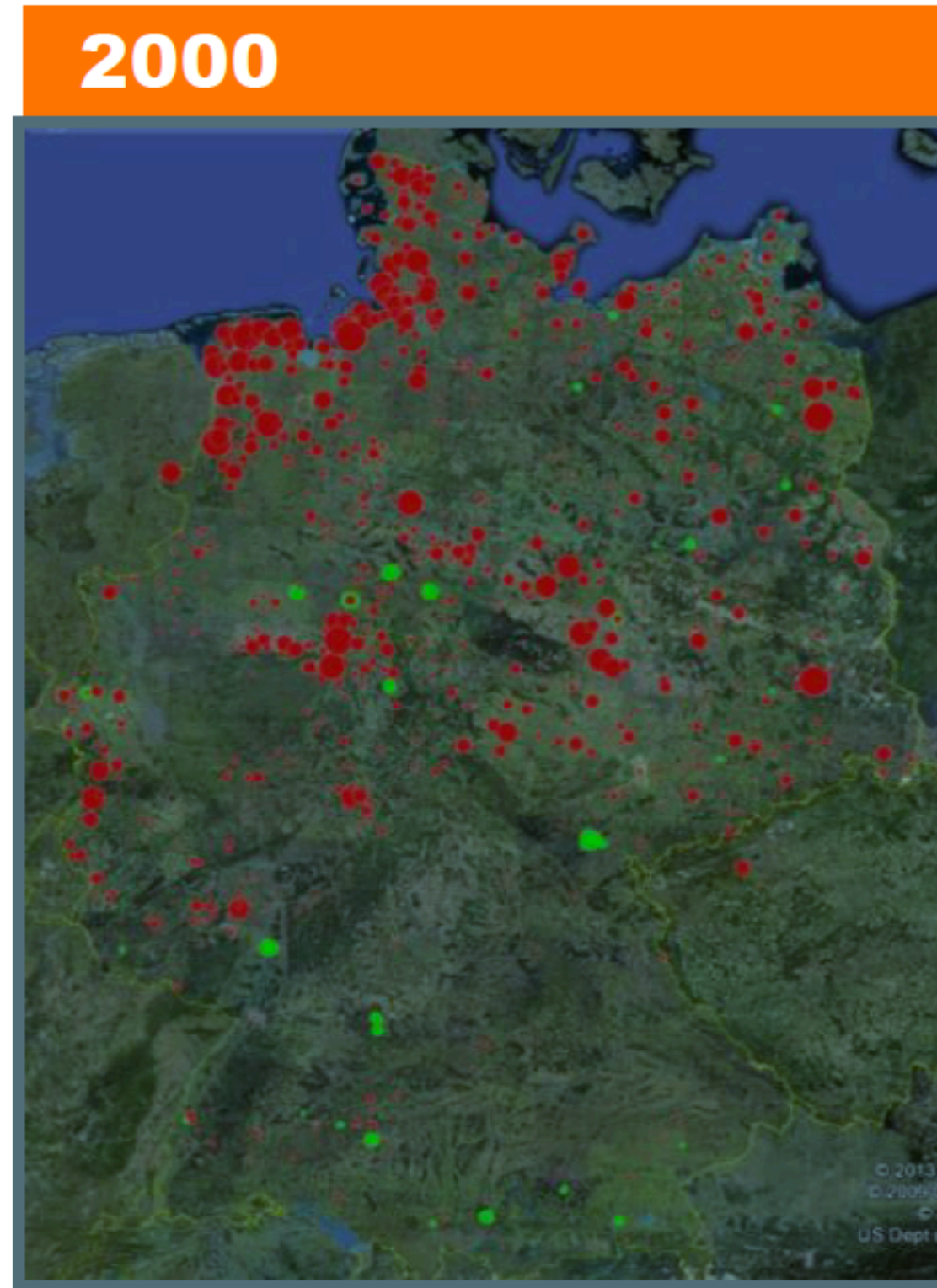
ドイツの再給電指令と 当日市場の利用について

京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座 特定講師

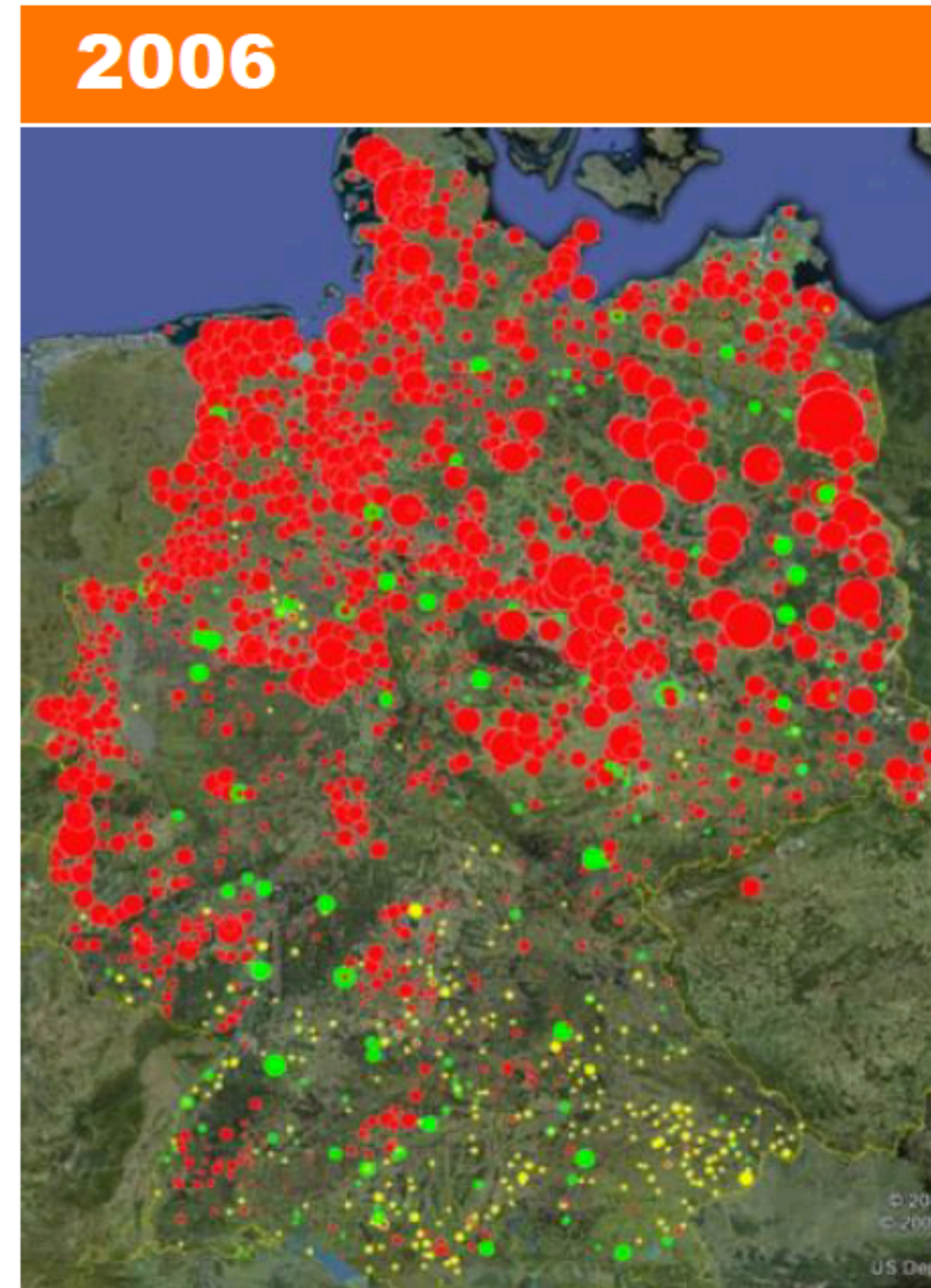
杜 依濛・馬 騰

ドイツの再エネ設備の分布

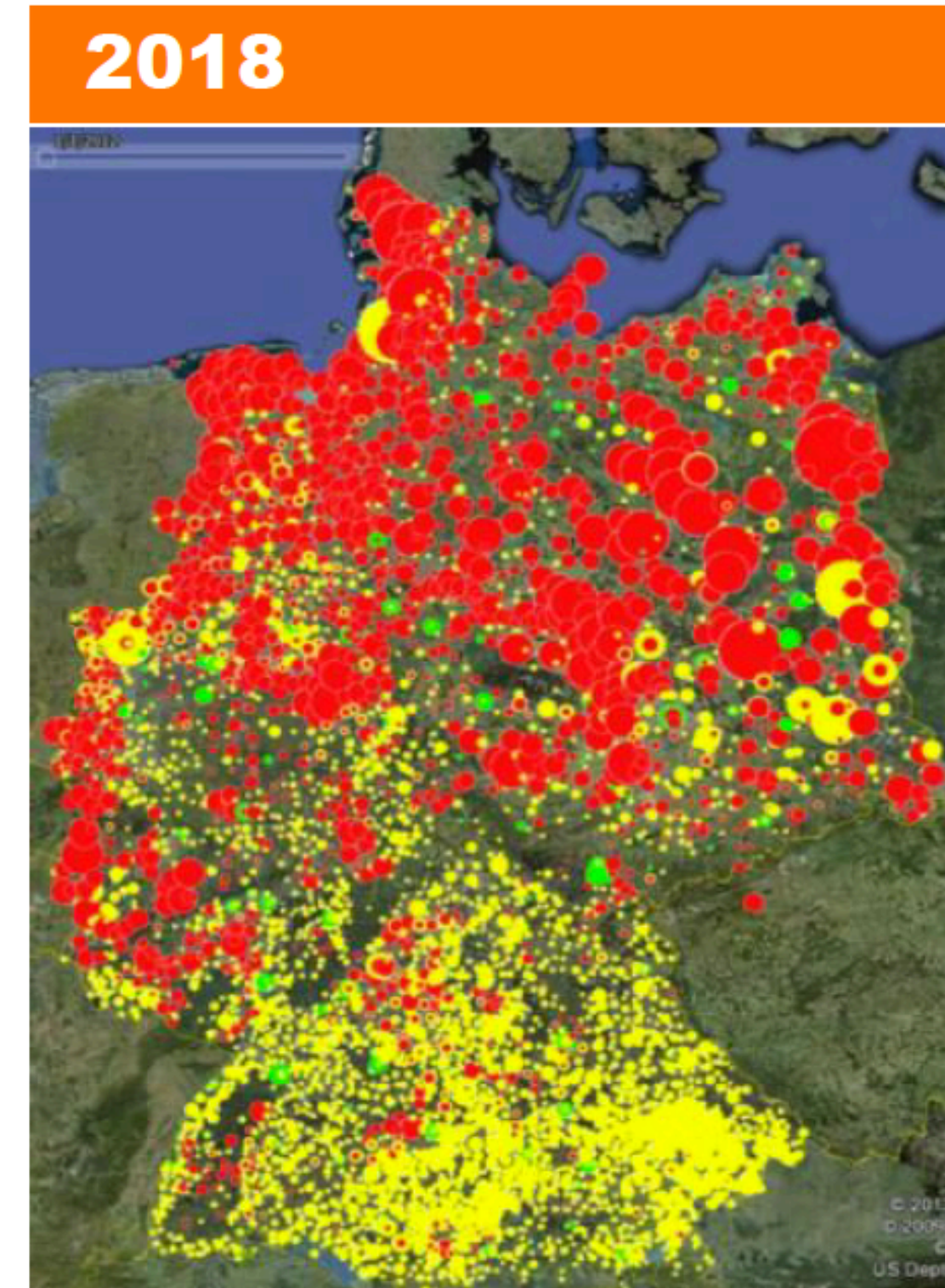
Area proportional to the installed capacities



- ~ 30,000 plants
- 1,665* MW inst. wind in Germany



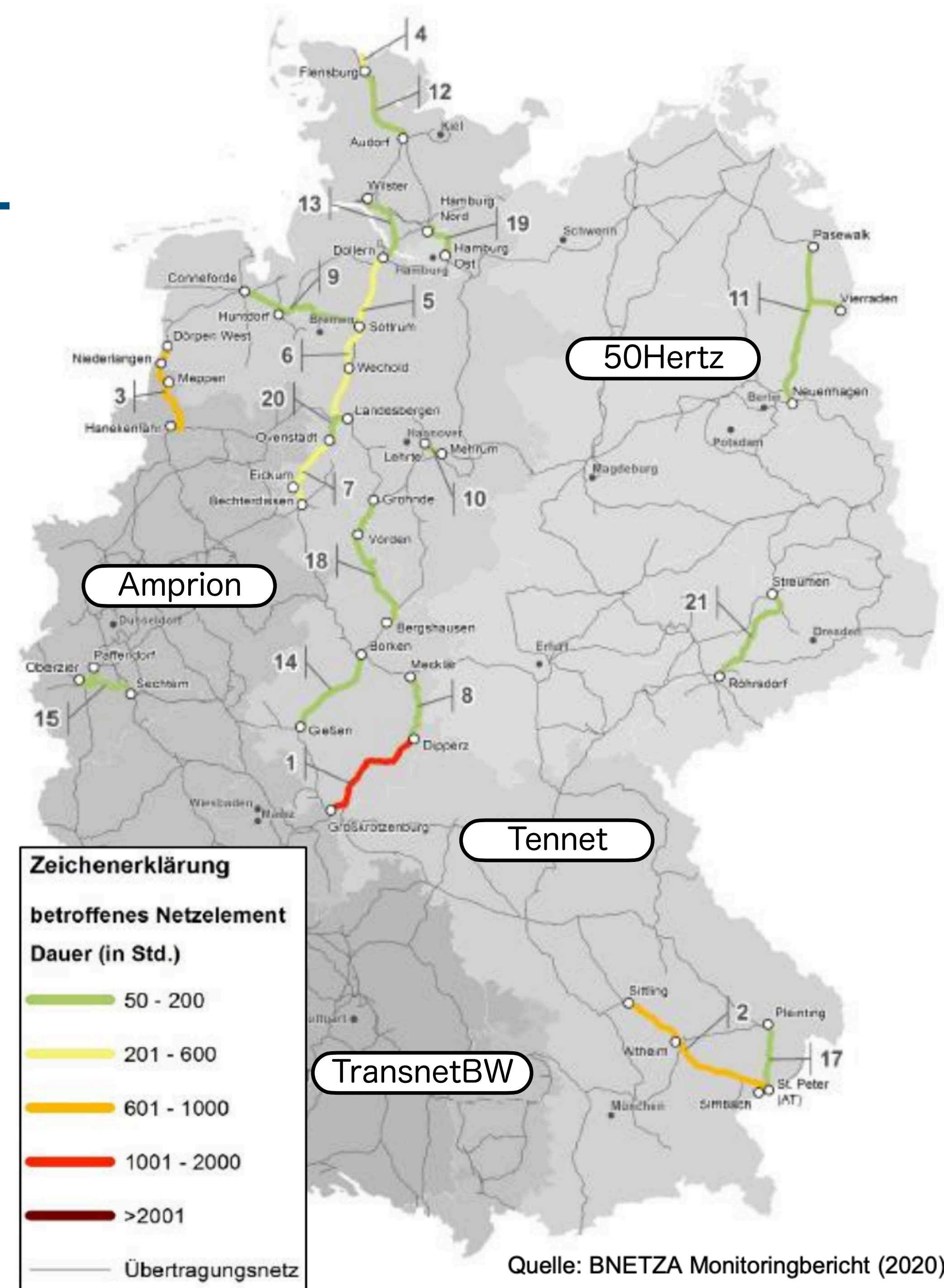
- ~ 221,000 plants
- 2,233* MW ins. wind in Germany



- > 1,600,000 plants
- 49,628* MW inst. wind in Germany
- 41,687* MW PV

系統混雑の発生

- ❖ドイツ国内の主な電力需要地は産業が集積する南部となるが、風力発電は北部での大量導入が進んでいる。
- ❖特に冬季に北部から中西部と南部に向けて送電線上の潮流量が増加し、深刻な系統混雑が発生する可能性が高い。
- ❖右図は、2020年のドイツ国内で特に系統混雑が発生した地域を示している。特にTennet社管内では、系統混雑が頻発している。



混雑処理するための系統運用措置

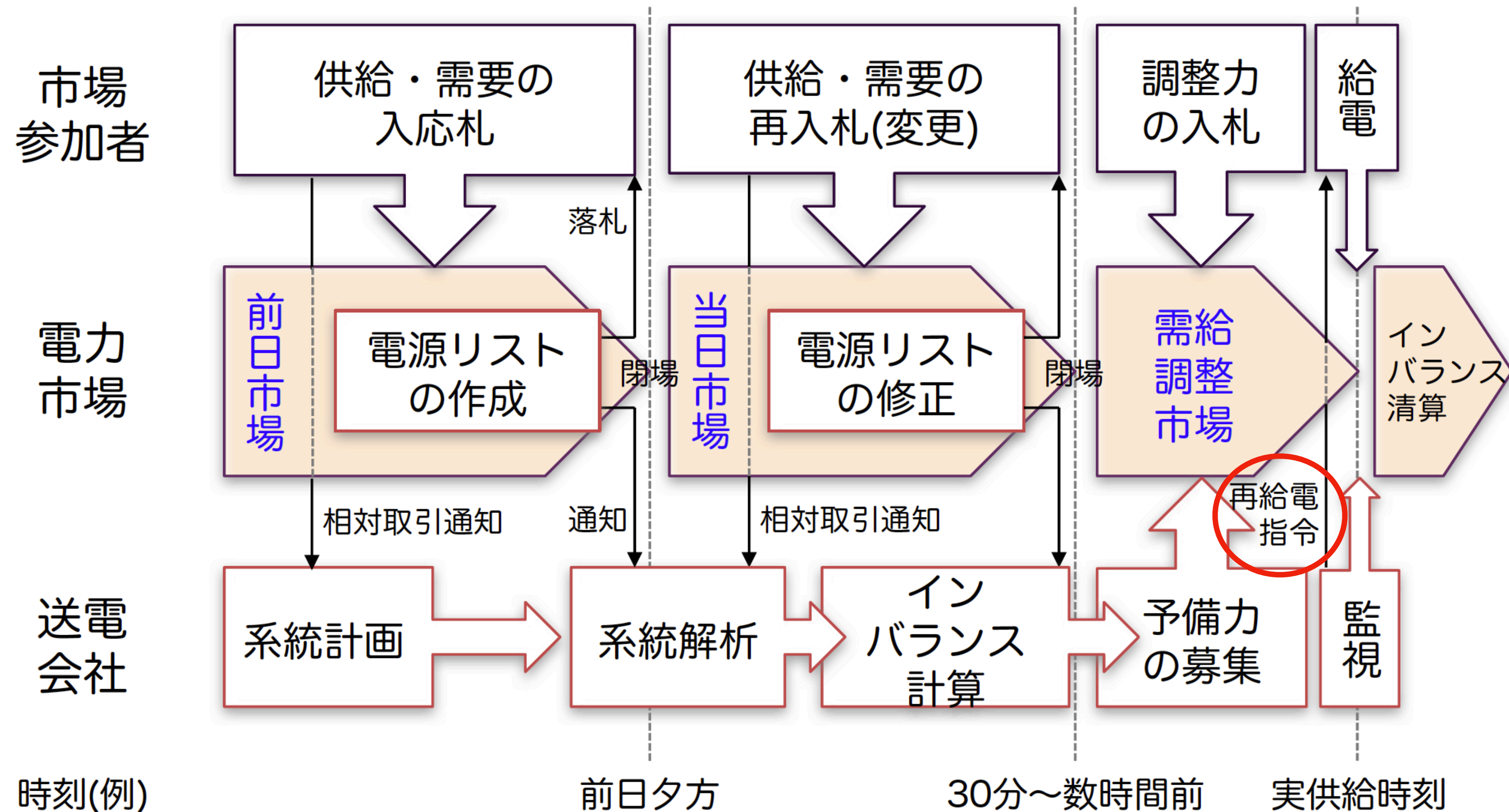
再給電指令 2021/10/1 以前

- ❖ドイツ国内の送電混雑解消は、需給調整能力確保後の残った調整電源を活用した「カウンタートレード（混雑を緩和するkWh取引）」や「再給電指令（混雑を緩和する電源出力の変更）」により実施されている。
- ❖再給電指令とは、需給調整電源よりも広範囲に長時間大規模に行われる調整を意味し、ドイツでは再エネの優先給電ルールに従って、容量が10MW以上の電源に再給電の指示が出される。

対策	内容
① カウンタートレード 再給電指令	<p>【カウンタートレード】 送電混雑が発生し得る箇所の潮流を相殺（カウンター）するような電力取引（トレード）をTSOにより促す。</p> <p>【再給電指令】 TSOからの指令により混雑を緩和するように従来電源の出力を変更させる。カウンタート</p>
② 系統リザーブ (Grid Reserve)	(1) で混雑を緩和できない場合に備えて、休止中または閉鎖申請中の電源から一定量をTSOが事前に選定しておき、混雑緩和に必要な時にはTSOの指令を受けて運転する。
③ 再エネの出力抑制	TSOからの指令により 再エネ電源 の出力を変更させる。
④ 全電源を含む再給電指令	再エネ電源を含めた 全電源 の出力を変更する。ここでも従来電源の出力抑制がまず行われ、再エネの出力抑制が最終手段となる。

市場取引の例

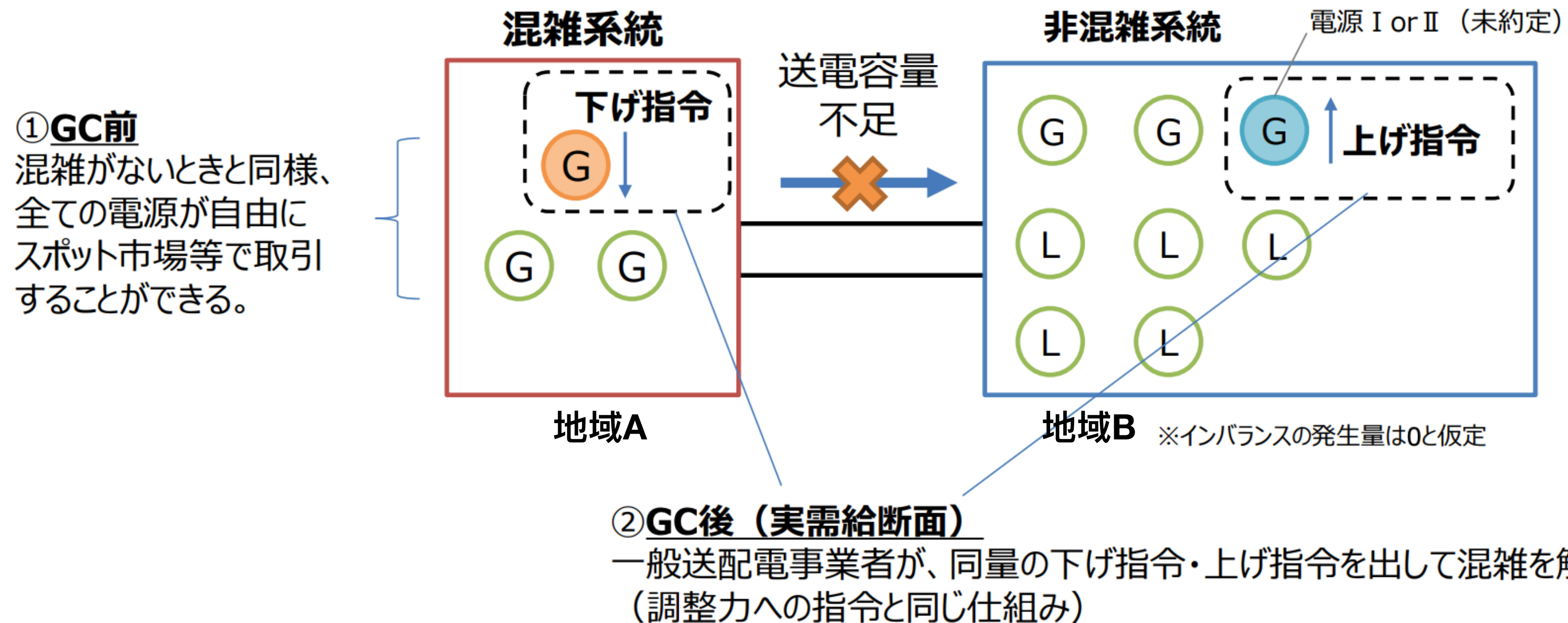
❖ 発電事業者はスポット市場などで混雑の制約を受けずに、自由に電気を売却することができる。



出典) 山家, 安田他: 再生可能エネルギー政策の国際比較, 京都大学学術出版会(2017)

再給電方式による混雑処理のイメージ

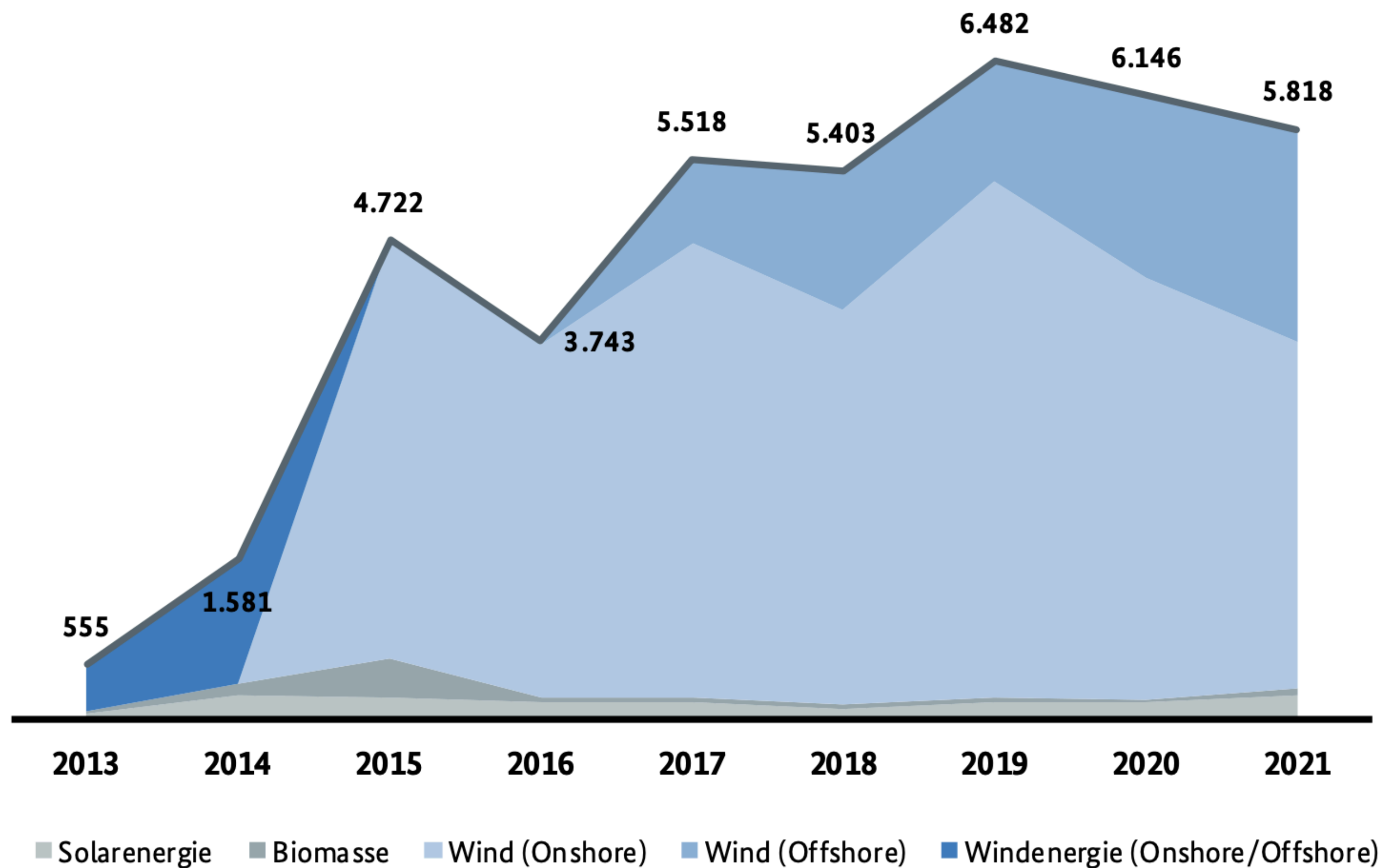
- ❖ゲートクローズ（GC）後、送電容量不足により、発電計画の一部について送電できないことが判明した場合には、調整力への指令と同じ仕組みにより、一般送配電事業者が混雑系統内外の電源に対し、同量の下げ指令・上げ指令を出して混雑を解消する。



再エネ出力抑制電力量

図. ドイツの再エネ出力抑制量の推移 (GWh)

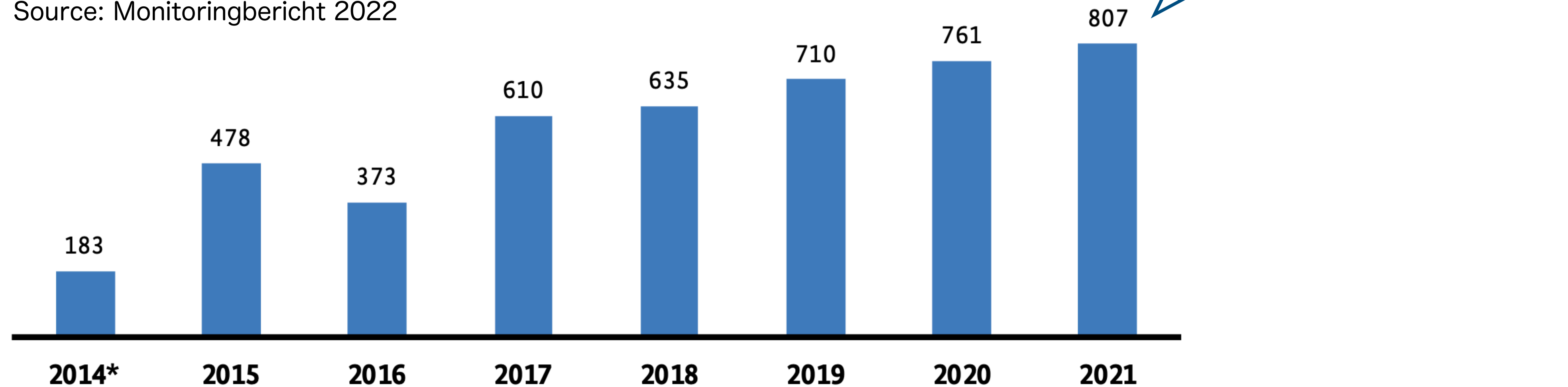
Source: Monitoringbericht 2022



出力抑制に対する補償額

図. ドイツの出力抑制に対する補償額の推移 (百万€)

Source: Monitoringbericht 2022



ドイツのFIT制度

- ❖ 系統混雑を回避するために再エネの出力抑制が行われる場合、EEGで受け取ることができるはずだった損失収入の95%はTSOが発電事業者に補償する（ただし、損失収入が年間収入の1%を上回る場合には100%補償）。
- ❖ 需給バランス調整による再エネ出力制御の場合には、補償無し。
- ❖ 再エネ出力抑制に対する補償が発生する場合、TSOが託送費を通じて回収し、最終的には電力消費者が負担している。

一般消費者の託送料負担額

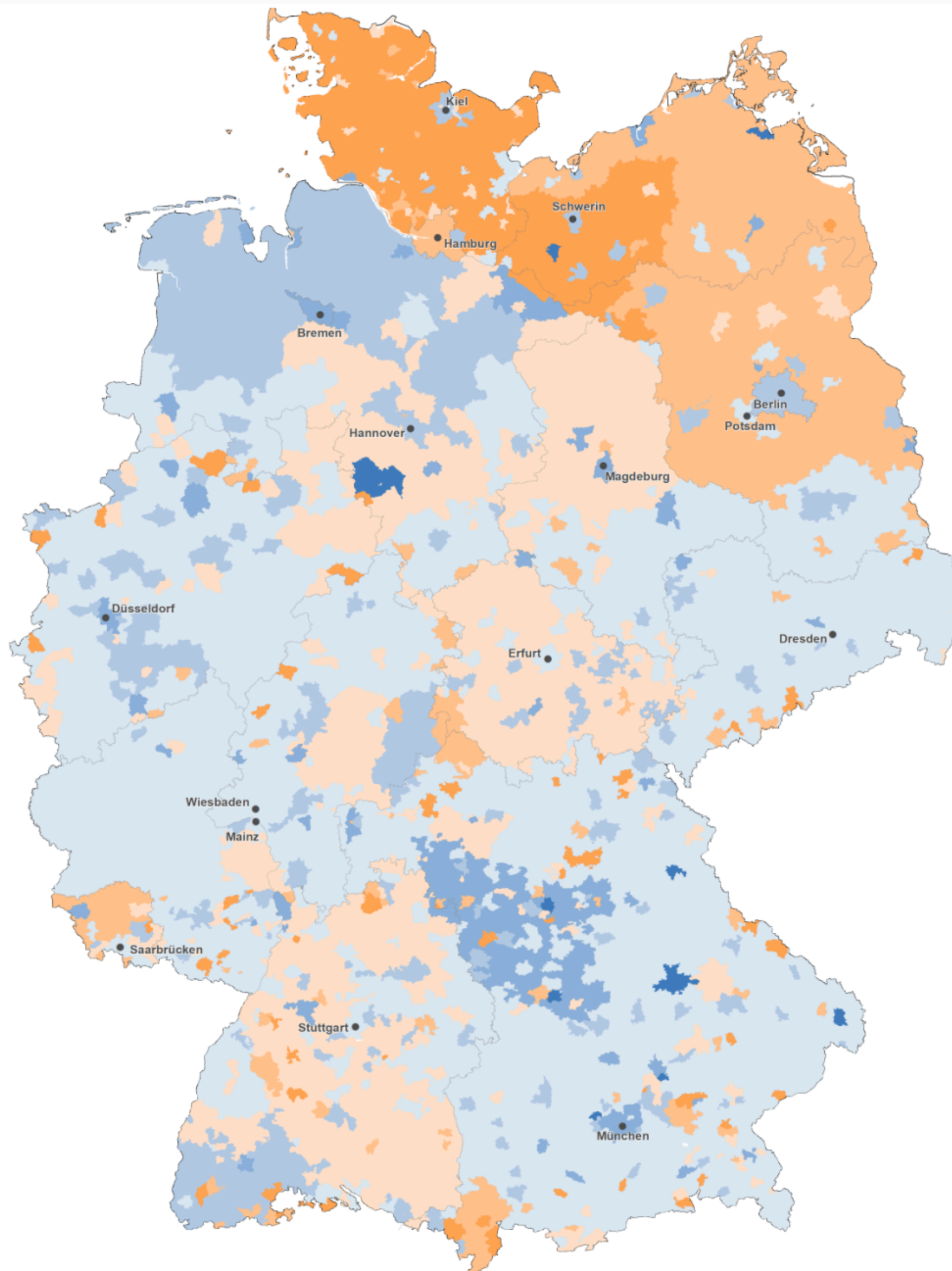
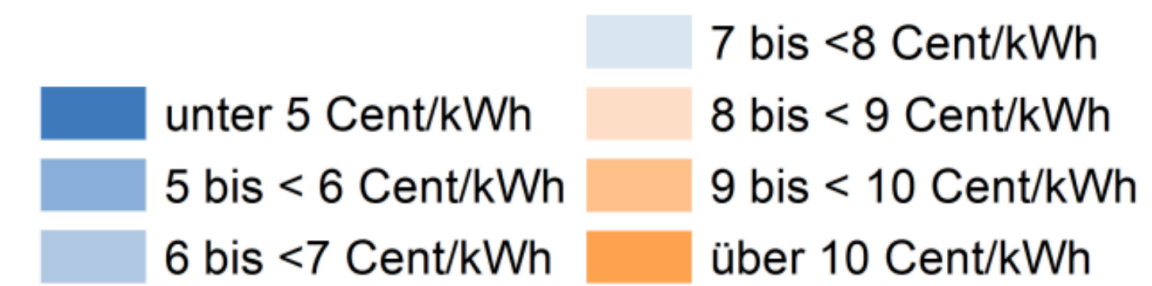


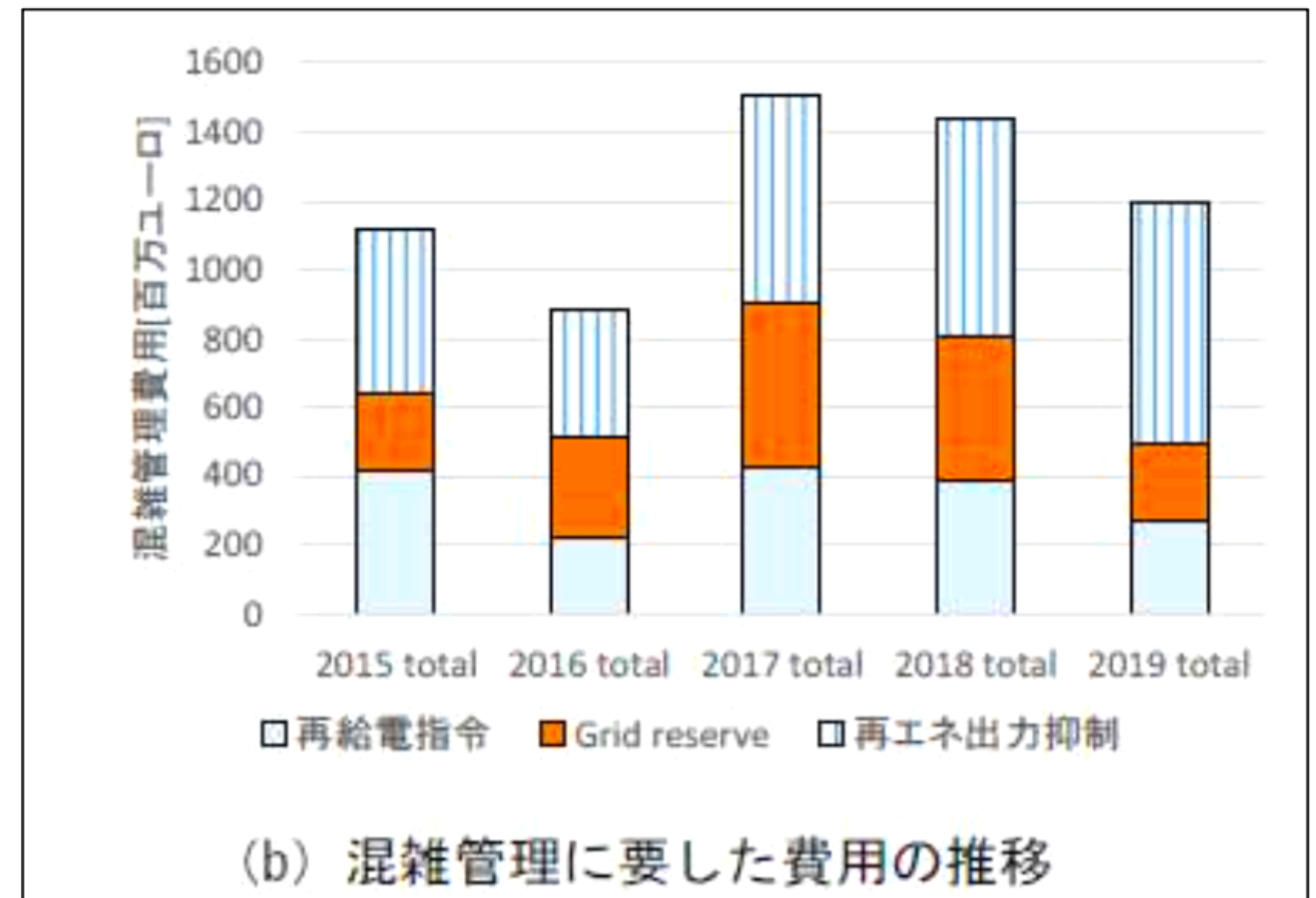
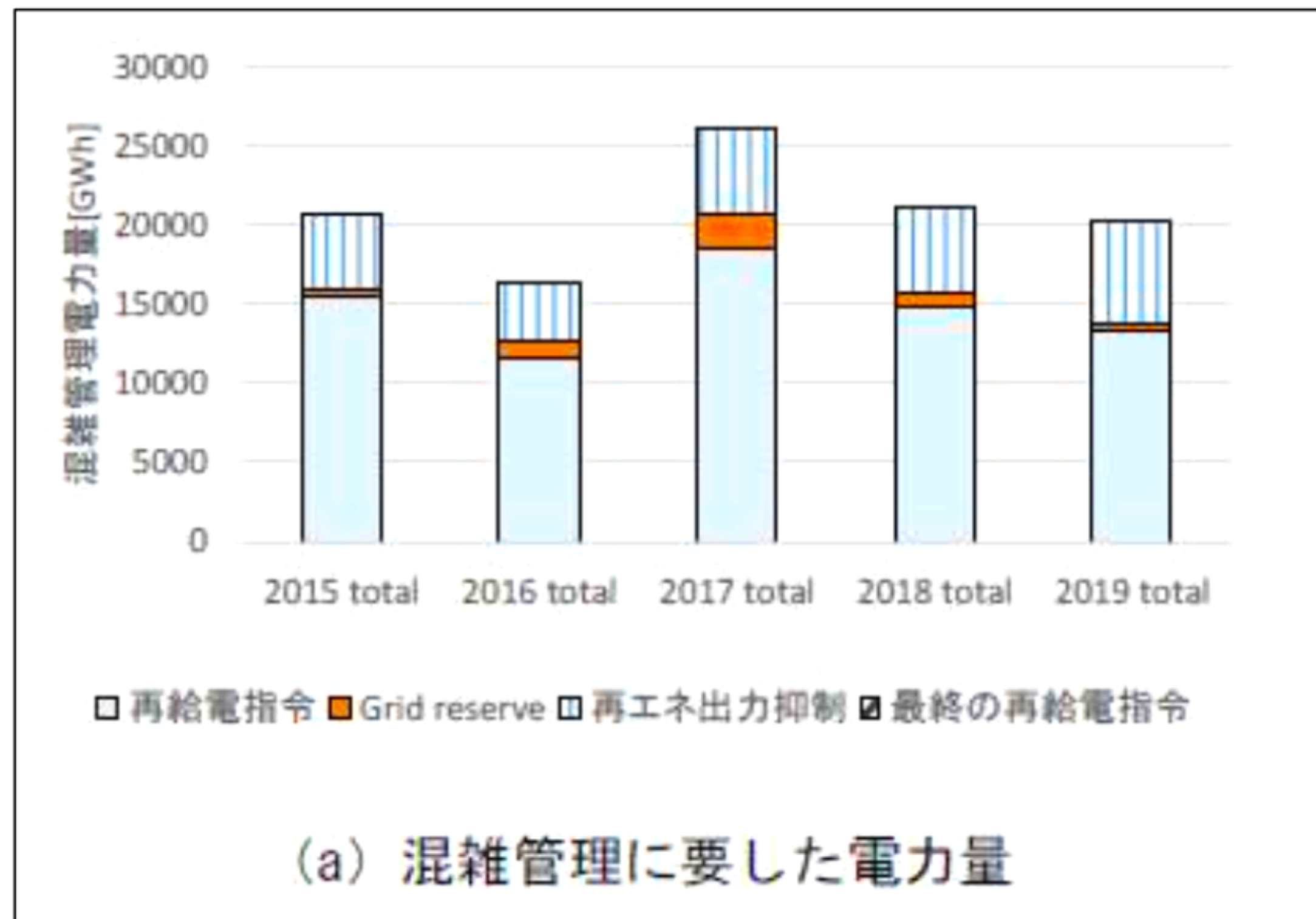
Fig. Distribution of network charges of household customers in Germany for the year 2022

Source: Monitoringbericht 2022



混雑管理電力量

- ❖ ドイツでは、混雑処理に要した電力量・費用が高止まりしている。
- ❖ これは、混雑処理に要する費用が一般負担となっている中、混雑を発生させている系統利用者に対して、混雑を緩和するインセンティブが働かなかったためと考えられる。

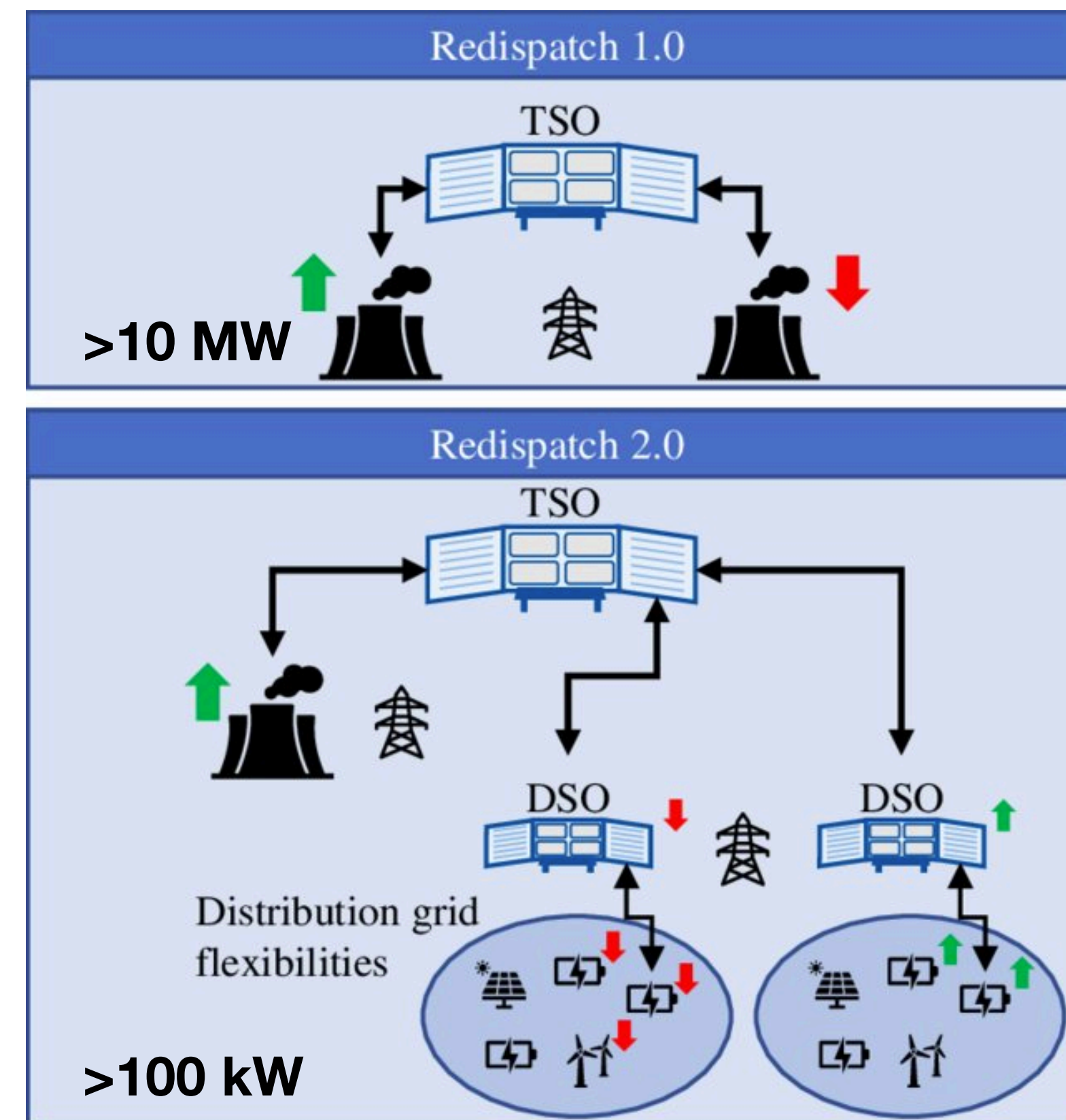


再給電指令 2.0

送電会社（TSO）が系統運用を担当するのは特別
高圧送電線のみ

Redispatch 2.0 (start from October 1st, 2021)

- ❖これまでドイツ政府は再エネの優先接続に従って、再給電指令の対象から再エネ電源を除外してきたが、2021年10月1日からは再エネ電源も対象とした新たな再給電指令「Redispatch 2.0」がスタートすることになっている。
- ❖この再給電指令2.0は、混雑緩和に対する貢献度を考慮して、容量が100kW以上の分散型電源も再給電プロセスに含まれるため、再エネ電源であっても従来火力電源と同じく出力抑制することがある。TSO以外に、DSOの再給電への積極的な参加も求められている。
- ❖今までは、再エネ出力抑制が行われた際に、TSO/DSOが直接的に再エネ事業者にFIT価格を支払う義務があった。再給電指令2.0が導入されてから、直接販売業者（Direct Marketer）が抑制された分の再エネ電力量を卸電力市場で取引を行い、卸電力取引価格を基準として再エネ事業者に補償し、さらにTSO/DSOが市場プレミアム額を支払う。

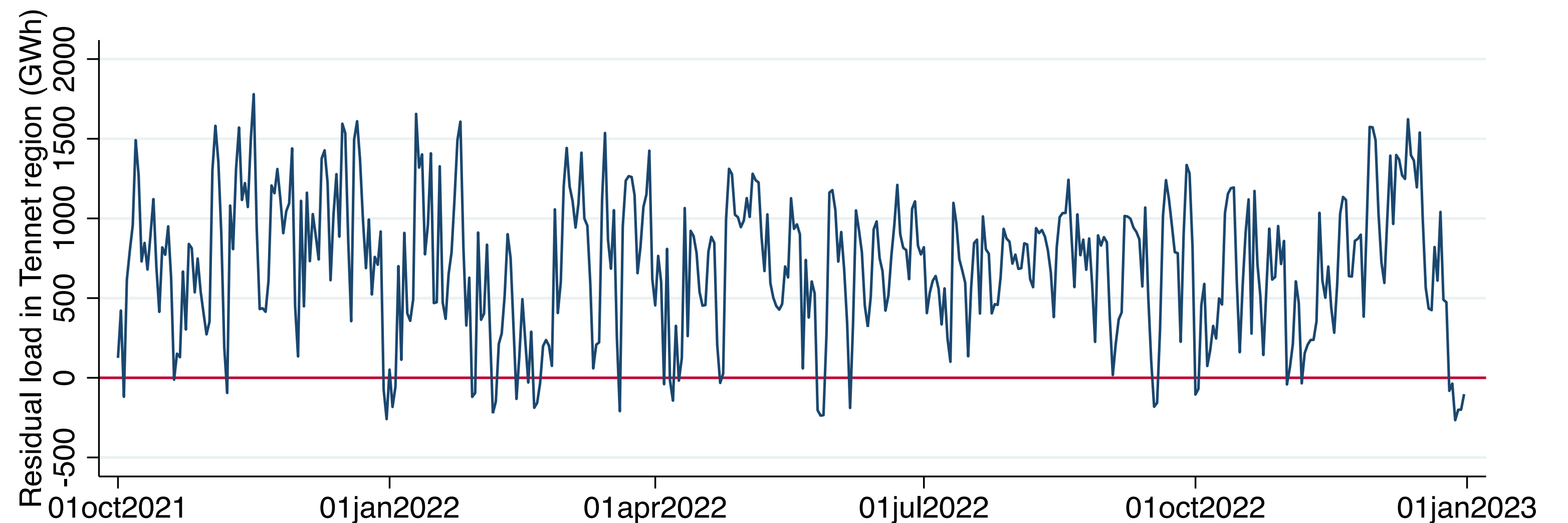
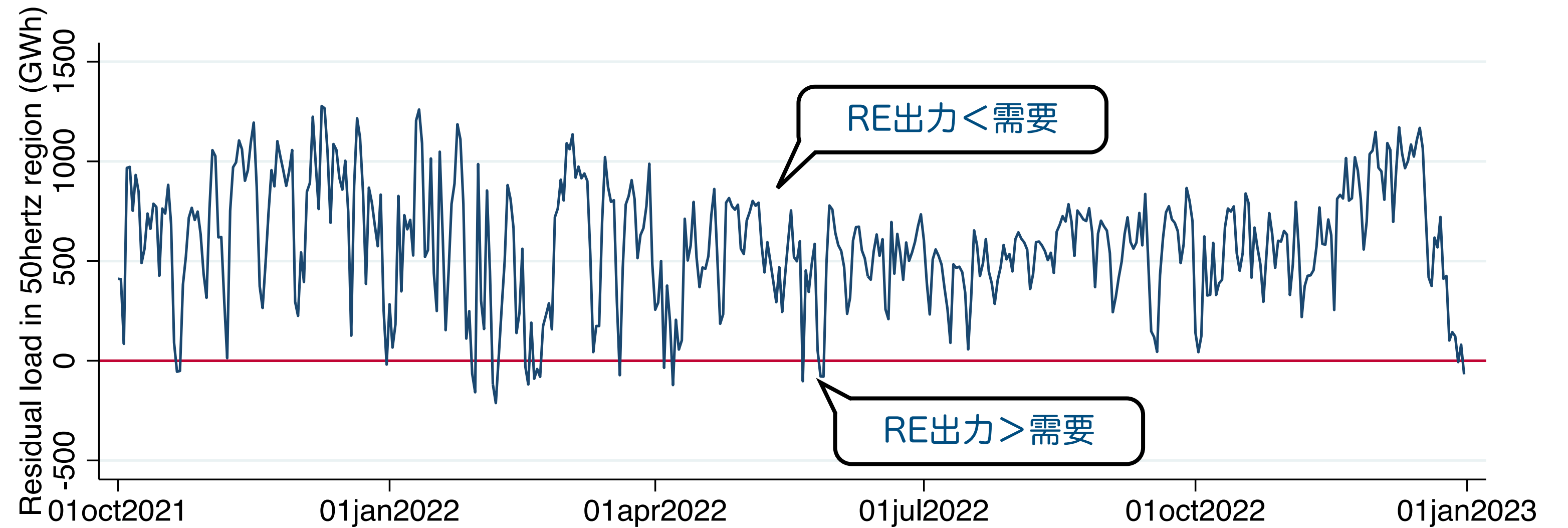


Exchange of flexibility potentials and demands
Fig. Illustration of conventional Redispatch and Redispatch 2.0 coordinating flexibilities in the bulk power system (Offergeld et al., 2022)

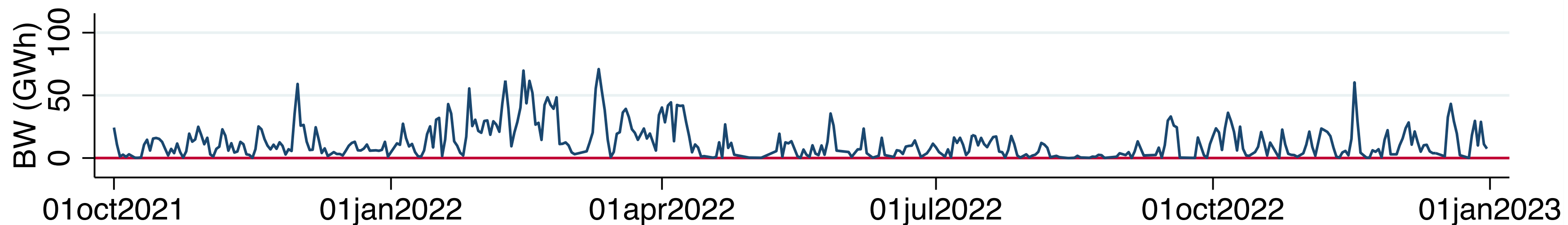
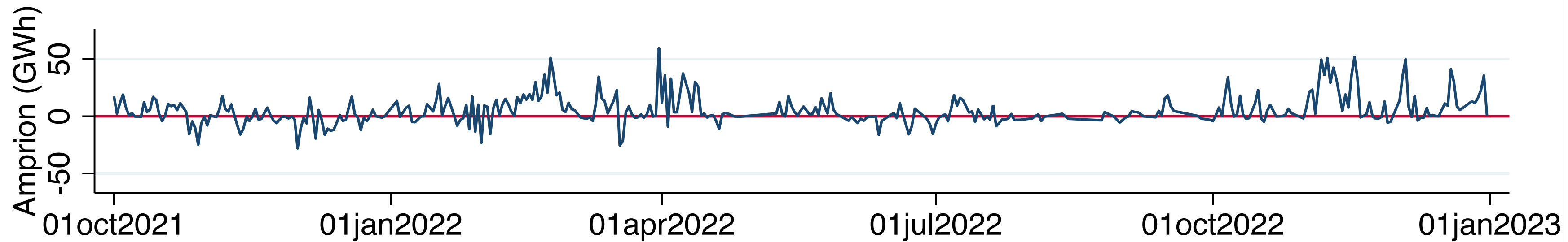
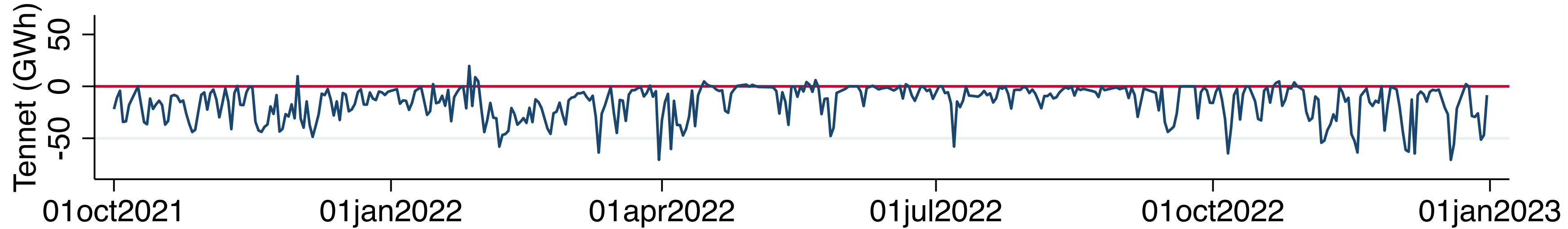
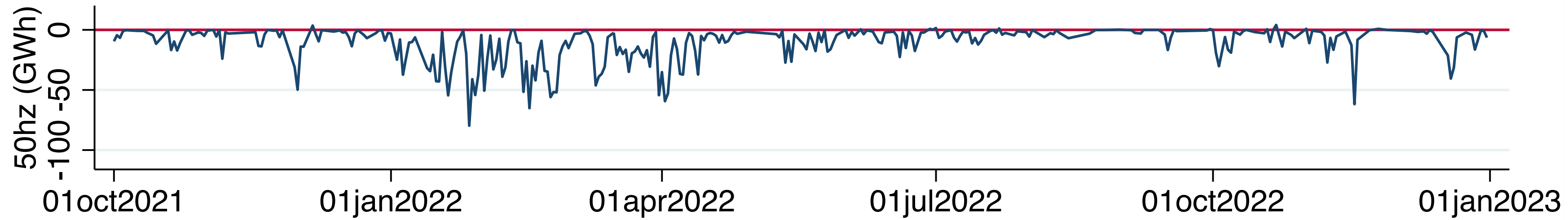
配電会社（DSO）は配電線の系統運用を担当している。ドイツでは分散型再エネ電源の大半は配電線に接続されるため、DSOが再エネの系統接続に重要な役割を果たしている。

残余需要 (Residual Load)

- ❖ 残余需要に対応することが、ドイツでは給電の中心作業となる。
- ❖ 残余需要とは、システムの総電力需要から太陽光と風力による発電を引いたもの。
- ❖ ドイツでは、太陽光と風力による発電を最優先で利用して、可能な限り需要を満たすが、太陽光と風力による発電が需要を時には下回り、時には上回ることになるため、その差を「残余需要」と呼ぶ。



「再給電指令 2.0」 電力量



下げた分だけ、出力を上げる指示

データ

❖ 日次時系列データ

- 2021年10月1日~2022年12月31日

❖ 再給電電力量 (Network Transparency Redispatch)

- NETZTRANSPARENZ.DE: targeted power balancing with feed in management & electricity related redispatch

❖ 時間前市場買い入札量

- Nord pool: intraday market trading volume_buy

❖ 再エネ発電量

- ENTSO-E: wind/solar power actual generation

❖ 再エネ発電量予測誤差

- ENTSO-E: wind/solar power actual generation - intraday forecast generation

❖ 系統混雑はどう評価するのが課題...

需給制約による再給電と系統制約による再給電が含まれる

発電実際値から当日予測値を引いた差額

	Unit	N	Mean	Std. Dev.	Min	Max
redispatch_50hertz	GWh	457	-7.966	13.29	-79.66	4.094
redispatch_tennet	GWh	457	-14.59	16.10	-70.77	19.71
redispatch_amprion	GWh	457	4.437	11.68	-28.04	59.44
redispatch_transnetbw	GWh	457	11.67	13.34	-0.0625	70.98
intraday_50hertz	GWh	457	5.886	5.318	0.466	31.88
intraday_tennet	GWh	457	11.32	6.696	1.178	46.71
forecasterror_wind_50hertz	GWh	457	-2.219	21.96	-103.9	95.16
forecasterror_solar_50hertz	GWh	457	-2.188	12.16	-56.15	39.60
forecasterror_wind_tennet	GWh	457	4.066	40.35	-209.8	117.9
forecasterror_solar_tennet	GWh	457	0.287	15.70	-55.20	46.74
generation_wind_50hertz	GWh	457	424.8	337.1	18.31	1,423
generation_solar_50hertz	GWh	457	150.2	112.8	5.055	390.2
generation_wind_tennet	GWh	457	723.4	468.2	15.47	1,828
generation_solar_tennet	GWh	457	194.6	142.7	6.512	502.7

分析結果 | 対象地域：50Hertz

2021/10/1 - 2022/12/31 秋季・冬季

❖50Hertz地域において、時間前市場の利用増加が、再給電量の引き下げに貢献できる。

- 時間前市場への入札量が1%上昇すると、再給電量が0.162%下がる。

❖TransnetBW地域の再給電行動が50Hertz地域の再給電行動と大きく関係している。系統混雑が主要因と推測できる。

- TransnetBW地域の再給電量が1%上昇すると、50Hertz地域の再給電量が0.647%上がる；Amprion地域による影響が0.128%。

❖秋季・冬季においては、風力の発電量と予測誤差が大きいほど、再給電量が上がる。

- 風力発電の予測誤差が1GWh上昇すると、再給電量が0.004GWh上がる。

- 風力発電量が1%上昇すると、再給電量が0.378%上がる。

	(1)	(2)	(3)
ln_redispatch_50hertz			
L.ln_redispatch_50hertz	0.308*** (0.046)	0.309*** (0.045)	0.273*** (0.044)
ln_intraday_50hertz_buy	0.136** (0.059)	0.162*** (0.061)	0.125** (0.058)
ln_redispatch_transnetbw	-0.652*** (0.058)	-0.647*** (0.058)	-0.532*** (0.058)
ln_redispatch_amprion	-0.132*** (0.031)	-0.128*** (0.031)	-0.084*** (0.032)
forecasterror_wind_50hertz		-0.004** (0.002)	
forecasterror_solar_50hertz		0.013** (0.005)	
ln_generation_wind_50hertz			-0.378*** (0.076)
ln_generation_solar_50hertz			-0.078 (0.060)
constant	-0.510 (0.515)	-0.704 (0.523)	4.941*** (1.353)
N	272	272	272
r2	0.618	0.630	0.650

Note: Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$. The robust option was used on all of the models.

分析結果 | 対象地域：Tennet

2021/10/1 - 2022/12/31 秋季・冬季

❖Tennet地域において、時間前市場の利用が再給電量に有意な影響を与えていない。

- Tennet地域内により多くの系統混雑が発生しているため？

連系線設備の増強をしないと、市場機能をうまく運用できない場合がある

❖TransnetBW地域の再給電行動がTennet地域の再給電行動と大きく関係している。系統混雑が主要因と推測できる。

- TransnetBW地域の再給電量が1%上昇すると、Tennet地域の再給電量が0.513%上がる；Amprion地域による影響が0.201%。

❖風力の発電量と予測誤差が大きいほど、再給電量が上がる。

- 風力発電の予測誤差が1GWh上昇すると、再給電量が0.004GWh上がる。

- 風力発電量が1%上昇すると、再給電量が0.331%上がる。

❖太陽光発電量が大きいほど、再給電量が下がる。

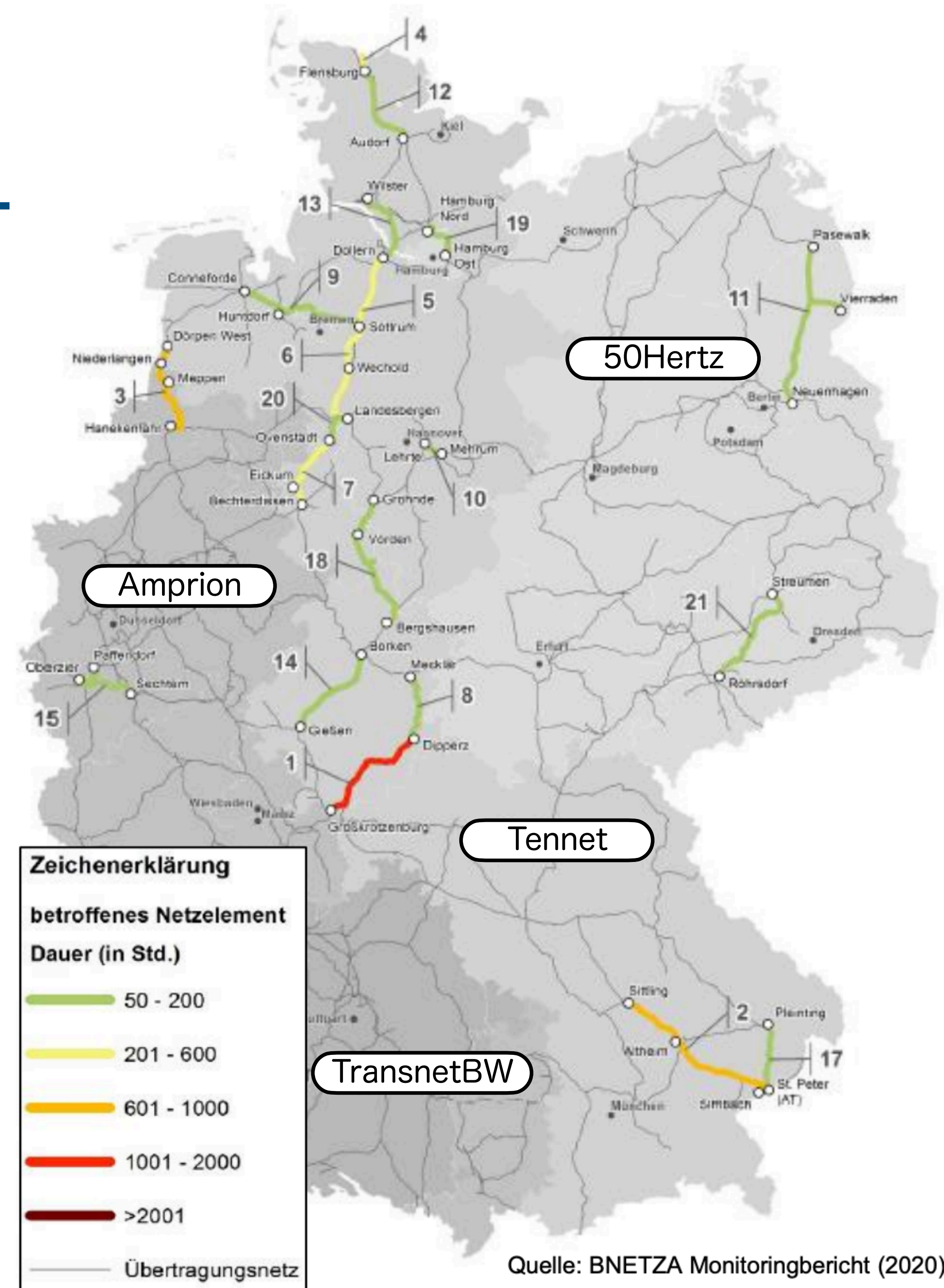
- 太陽光発電の出力が風力発電とは補完関係にあるため、風力発電が低下するときに、一部の電力需要を補填できる。

ln_redispatch_tennet	(1)	(2)	(3)
L.ln_redispatch_tennet	0.235*** (0.068)	0.227*** (0.069)	0.221*** (0.068)
ln_intraday_tennet_buy	0.032 (0.112)	-0.043 (0.093)	0.191 (0.117)
ln_generation_wind_tennet	-0.488*** (0.095)	-0.531*** (0.083)	-0.397*** (0.087)
ln_generation_solar_tennet	-0.191*** (0.057)	-0.201*** (0.060)	-0.183*** (0.067)
forecasterror_wind_tennet		-0.004* (0.003)	
forecasterror_solar_tennet		-0.003 (0.004)	
ln_generation_wind_tennet			-0.331** (0.138)
ln_generation_solar_tennet			0.183** (0.071)
	-0.846 (1.048)	-0.086 (0.841)	-0.123 (2.600)
r2	0.399	0.416	0.434

Note: Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$. The robust option was used on all of the models.

系統混雑の発生（再掲）

- ❖ ドイツ国内の主な電力需要地は産業が集積する南部となるが、風力発電は北部での大量導入が進んでいる。
- ❖ 特に冬季に北部から中西部と南部に向けて送電線上の潮流量が増加し、深刻な系統混雑が発生する可能性が高い。
- ❖ 右図は、2020年のドイツ国内で特に系統混雑が発生した地域を示している。特にTennet社管内では、系統混雑が頻発している。



分析結果 | 全期間

❖50Hertz地域では、全分析期間において、風力の予測誤差が再給電行動に有意な影響を与えていない。

ln_redispatch_50hertz	(1)	(2)	(3)	ln_redispatch_tennet	(1)	(2)	(3)
L.ln_redispatch_50hertz	0.323*** (0.039)	0.325*** (0.039)	0.280*** (0.038)	L.ln_redispatch_tennet	0.211*** (0.047)	0.211*** (0.047)	0.188*** (0.047)
ln_intraday_50hertz_buy	0.153*** (0.052)	0.162*** (0.054)	0.174*** (0.051)	ln_intraday_tennet_buy	-0.010 (0.072)	-0.054 (0.066)	0.026 (0.068)
ln_redispatch_transnetbw	-0.456*** (0.039)	-0.453*** (0.040)	-0.372*** (0.042)	ln_redispatch_transnetbw	-0.585*** (0.062)	-0.606*** (0.056)	-0.449*** (0.059)
ln_redispatch_amprion	-0.144*** (0.028)	-0.145*** (0.028)	-0.104*** (0.028)	ln_redispatch_amprion	-0.178*** (0.042)	-0.193*** (0.046)	-0.147*** (0.046)
forecasterror_wind_50hertz		-0.001 (0.002)		forecasterror_wind_tennet		-0.004* (0.002)	
forecasterror_solar_50hertz		0.003 (0.003)		forecasterror_solar_tennet		-0.001 (0.003)	
ln_generation_solar_50hertz			-0.339*** (0.062)	ln_generation_wind_tennet			-0.343*** (0.093)
ln_generation_solar_50hertz			-0.175*** (0.042)	ln_generation_solar_tennet			0.098** (0.043)
_cons	-1.168** (0.460)	-1.239*** (0.473)	4.761*** (1.057)	_cons	-0.260 (0.672)	0.206 (0.601)	2.466* (1.405)
N	456	456	456	N	456	456	456
r2	0.565	0.566	0.598	r2	0.515	0.524	0.543

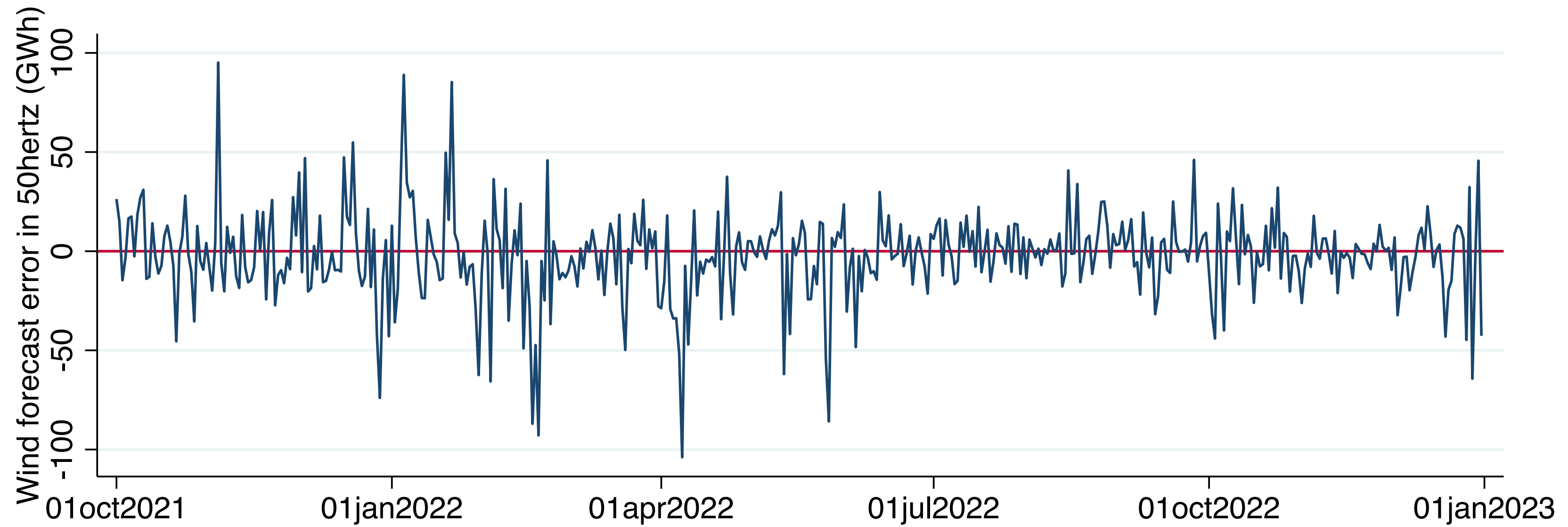
予測精度の向上は、再給電量の引き下げに貢献できる

Note: Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$. The robust option was used on all of the models.

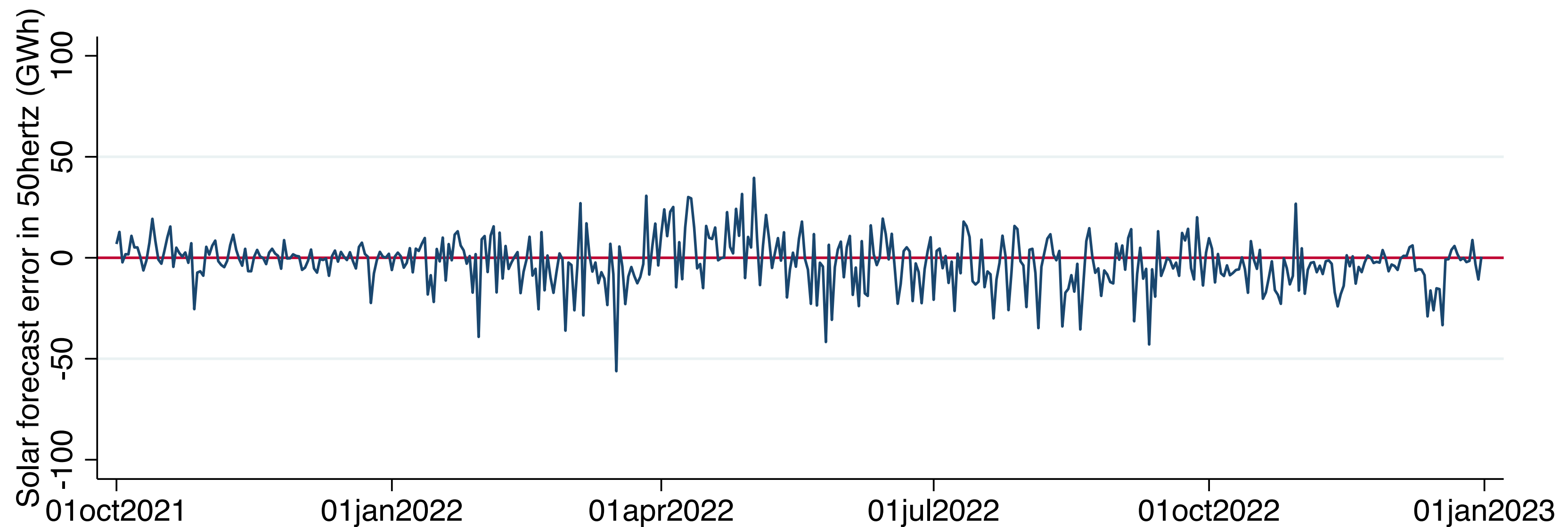
Note: Standard errors in parentheses. * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$. The robust option was used on all of the models.

再エネの予測誤差 (Forecast Error)

50Hertz
風力発電予測誤差

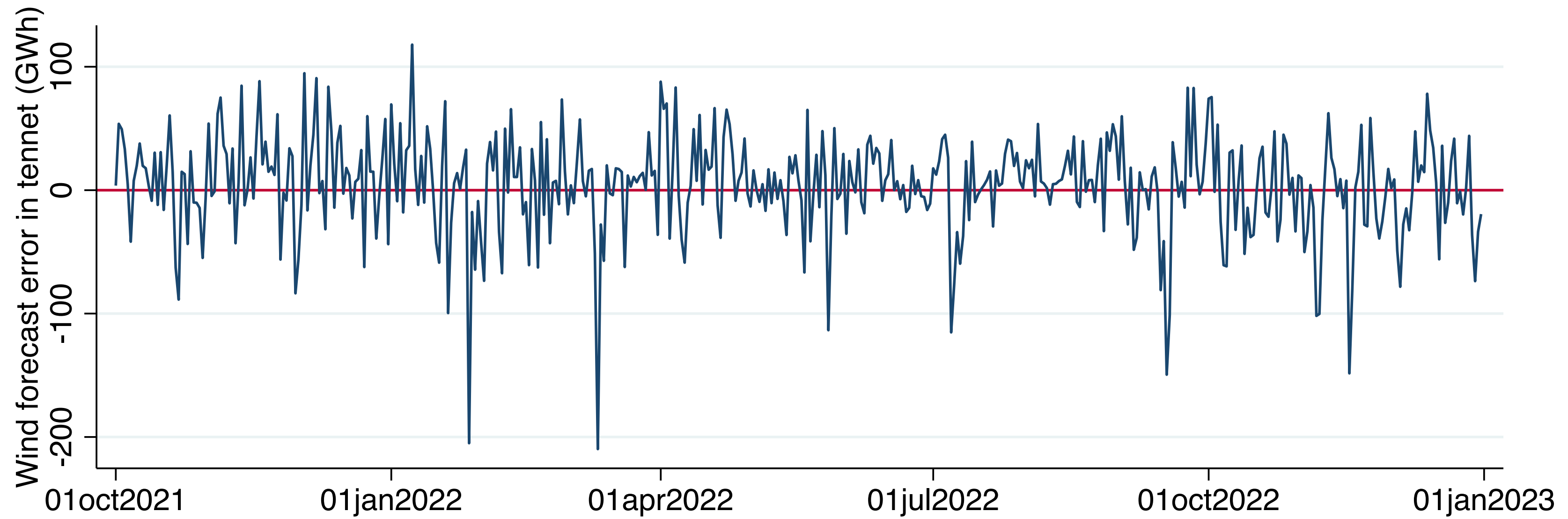


50Hertz
太陽光発電予測誤差

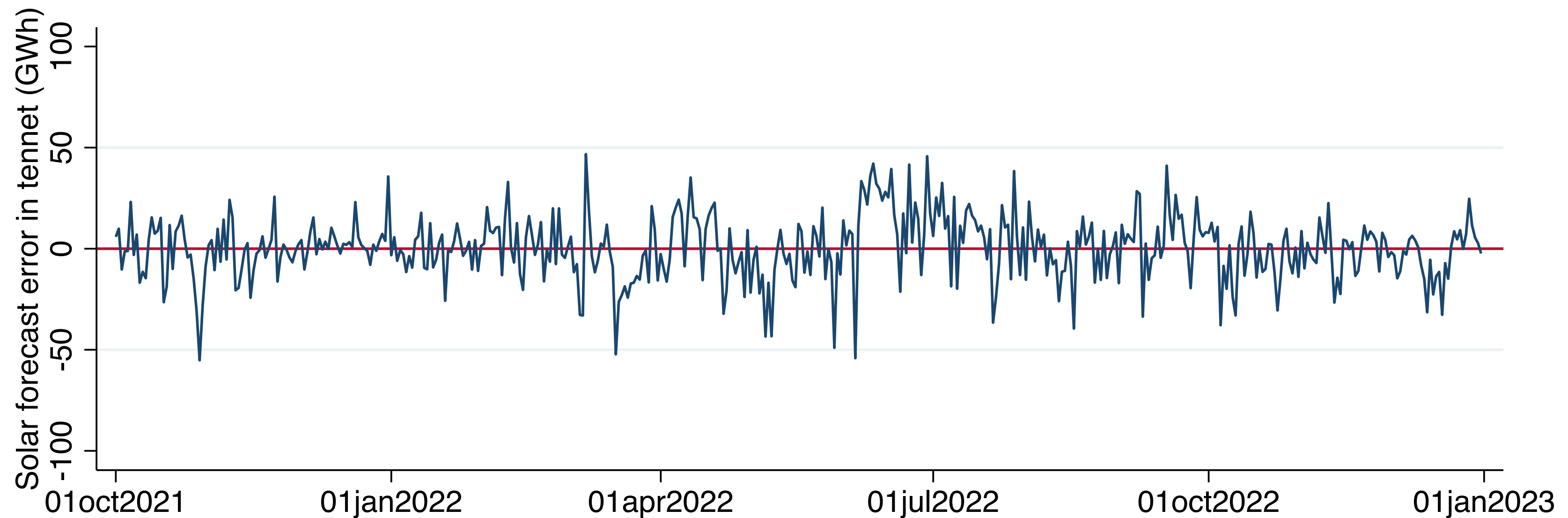


再エネの予測誤差 (Forecast Error)

Tennet
風力発電予測誤差



Tennet
太陽光発電予測誤差



これからの研究内容

❖ 系統混雑を評価する指標を使用する：

- 50Hertz社以外は、系統混雑に関するデータを公表していない；

- ドイツは単一エリア価格なので、エリア間の価格差で系統混雑を表すことができない…

- 連携線上の混雑状況をGISデータで把握し、解析する。

❖ 現段階では、50hertz管内では、時間前市場の利用により再給電量への引き下げ効果が見られたが、需給制約による再給電の部分のみ影響されるかについて確認する必要がある。

❖ なぜTennet地域では、時間前市場の利用による効果が見られなかったのかについて調べる必要がある。

❖ 外国への電力融通、揚水発電などによる効果も評価すべき。