



京都大学
KYOTO UNIVERSITY

再生可能エネルギーの
電力市場化の段階論
-ドイツにおけるVPPの
ビジネスモデルを中心に-

【部門B】研究会

2017年5月30日（火）

於：京都大学

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

中山 琢夫

目次

1. はじめに
2. ドイツにおける再生可能エネルギー市場取引の変化
3. VPPのビジネスモデル-Next Kraftwerkeを中心に-
4. まとめ

1.はじめに

ドイツの再生可能エネルギー法 (EEG : Erneuerbare Energien Gesetz)

- 気候変動および環境保護の観点から、再生可能エネルギーを大幅に増やす
 - 2000年に制定
 - EEGのもとでは、発電施設の運転開始から20年間、固定価格によって買い取り
- EEG (FIT) の導入成果
 - その目的どおり、大幅に増える
 - 電力総消費量における再生可能エネルギーの割合
 - 2000年：6%
 - 2016年：33%

EEG改正

- 2004年、2009年、2012年、2014年、2017年
- オークション（入札）制度
 - EEG2014：平地の太陽光発電施設からスタート
 - EEG2017：本格導入
- 市場プレミアム制度（FIP：Feed in Premium）
 - EEG2012で開始
 - このときは、FIT（Feed in Tariff）とFIP、どちらかを選ぶことができた
 - EEG2014で義務化（第2条および第37条）
 - 再生可能エネルギーの電力市場への統合
 - 2014年8月1日以降：500kW以上の新規発電設備
 - 2016年1月1日以降：200kW以上の新規発電設備
 - 2017年1月1日以降：100kW以上の新規発電設備
 - 電力市場に卸売りしなければならない

Direct marketing without a market premium model

Direktvermarktung ohne Marktprämienmodell



FIT、オークション時代の再生 可能エネルギー発電

- FIT時代のドイツの再生可能エネルギー発電事業者
 - 組合や市民、農家が多数派
 - エネルギーの民主化と言われた
- FIT時代のドイツの再生可能エネルギー発電事業
 - 小規模事業者の参入が困難
- オークション時代の再生可能エネルギー発電
 - EEG2017によるオークション制度の本格導入
 - 大規模事業者しか落札できない

再生可能エネルギー大量導入時代 (市場化時代) の新たな課題

- 電力供給の安定、とりわけ調整力（予備力）は確保できるのか
 - 変動性電源の大量導入
- 民主的な小規模発電事業者は、生き残れないのか？
 - 小規模発電事業を集めれば（アグリゲートすれば）まとまった規模で市場参入できるのではないか
 - 実際の発電量（kWh）だけでなく、柔軟性・フレキシビリティ（kW）を売ることができれば、さらに高付加価値を生むのではないか
- VPP（Virtual Power Plant）の出現

2. ドイツにおける再生 可能エネルギーの市場 取引の変化

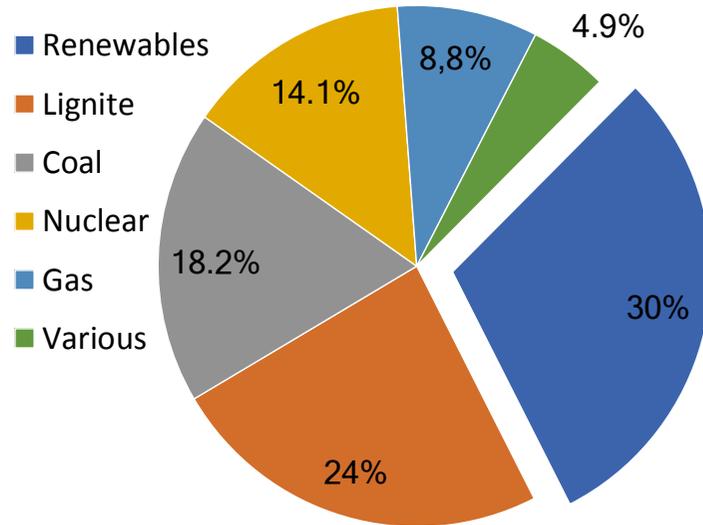
ドイツの発電所の数 (1995年→2016年)

- 1995年
 - ドイツには約800の発電所
 - 石炭・褐炭・水力などの従来型発電所を含む
 - 大規模集中型の電源
- 2016年
 - ドイツ国内に150万以上の発電設備
 - 多くは小さな太陽光発電
 - 小規模分散型電源の急激な増加

ENERGIEWENDE MEANS DECENTRALIZATION

Energiewende increases need for aggregation

Decentralization means the world needs Virtual Power Plants



As the share of non-adjustable renewables grows, the need for players who can quickly and flexibly balance their fluctuation grows, too.

2000: 1,000 renewable energy power plants

2016: >1.5 million renewable energy power plants

Almost 50 % are owned by (groups of) individuals!



A VPP provides energy security most efficiently:

- ✓ It digitally aggregates the capacity of distributed units,
- ✓ controls them smartly
- ✓ and ensures that supply and demand are met at all times.

Source:NXK(2017)

再エネ取引市場の変化

- 2012年以前（FIT時代）
 - TSOによる全量買取
 - 前日SPOT市場（Day-Ahead-Market）で全量取引
- 2012年（市場プレミアム制度の導入）
 - TSOは電力取引から撤退
 - 調整電源市場（TSO）へフレキシビリティの販売
 - VPPが再エネ電気を集めて当日SPOT市場（Intraday-Market）で販売
 - これまで独占的な市場で行われてきた、調整電源市場（アンシラリーサービス）と、SPOT市場での取引の競争が激化

取引方法の変化

- 2010年

- TSOとその中にいるアナリスト（一部取引を行う人）が、翌日の発電量を、15分毎のメッシュで予測
- 前日市場で、前日12時までに、全量取引

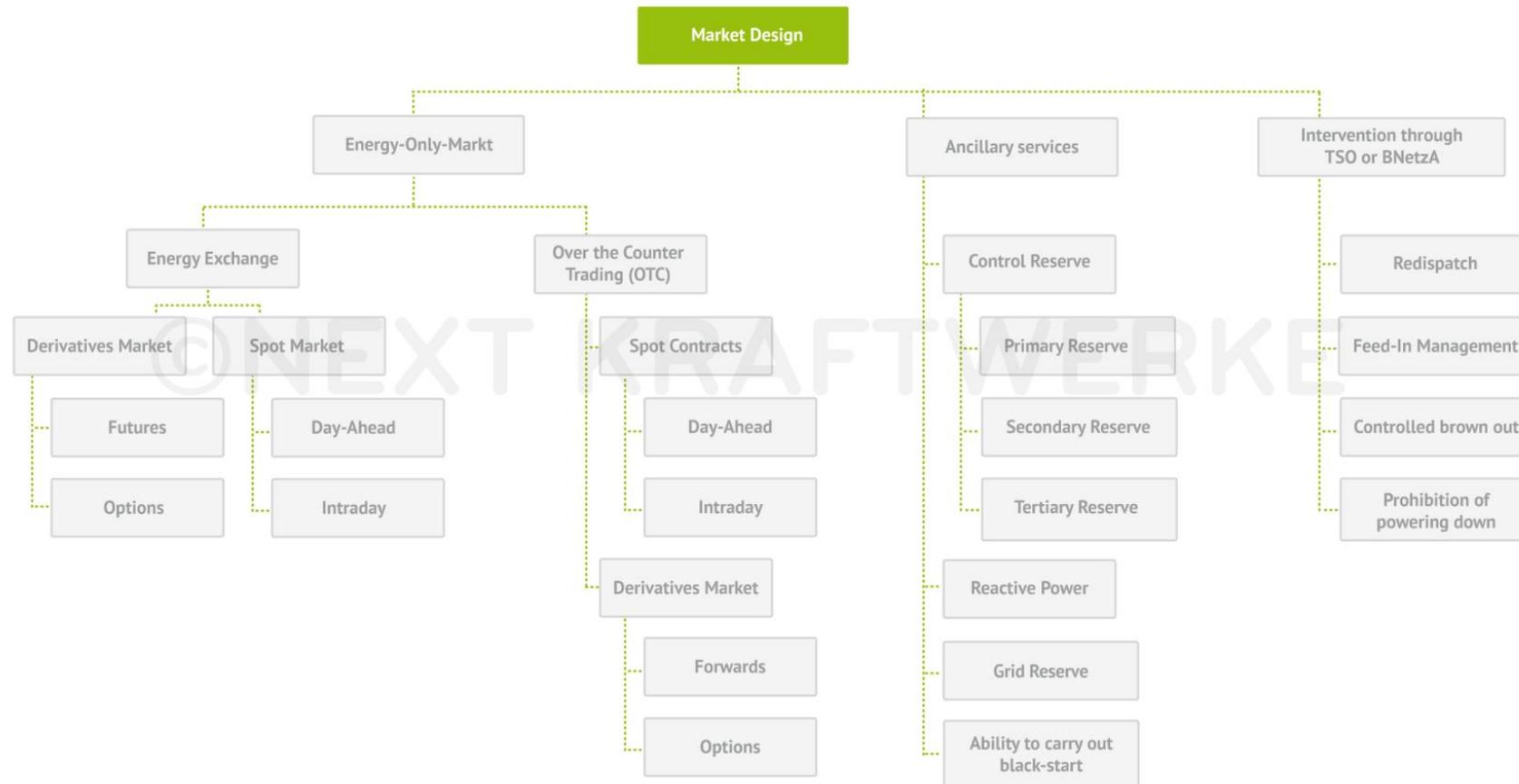
- 2015年

- VPP内で、2時間前まで予測
- 気象予報士による判断
- 以前に予測したよりも、わずかな余剰分まで、当日SPOT市場で販売

ドイツの電力市場デザイン

Energy Market Design

Energy Market Design



電力取引市場の時系列

Energy Market Design

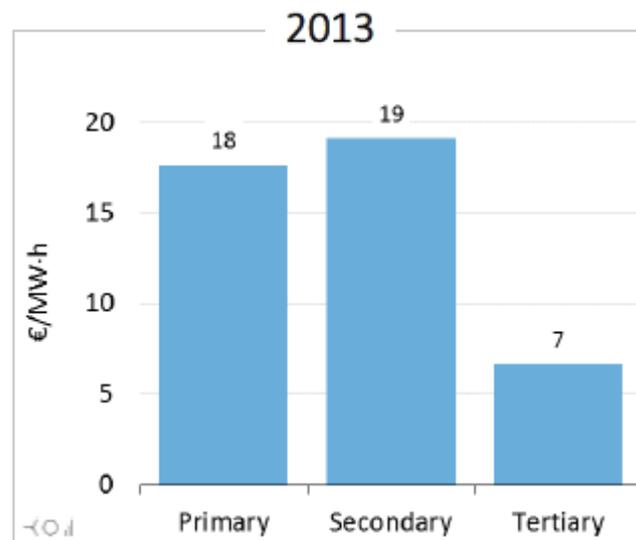
Dealing deadlines at the various power exchanges



コントロールリザーブの市場 価格

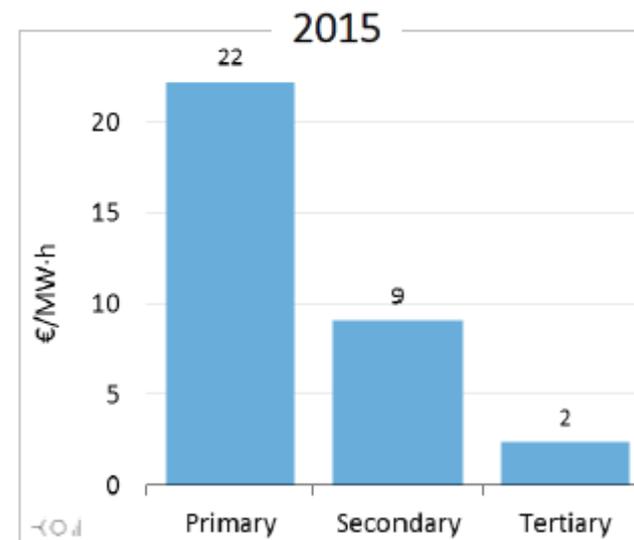


Performance of the balancing reserves market: prices in different market segments



Neon analysis. Based on data from Bundesnetzagentur, Regelleistung.net, TSO websites. Power (capacity) payments only.

Two years ago, secondary balancing was more expensive than primary.



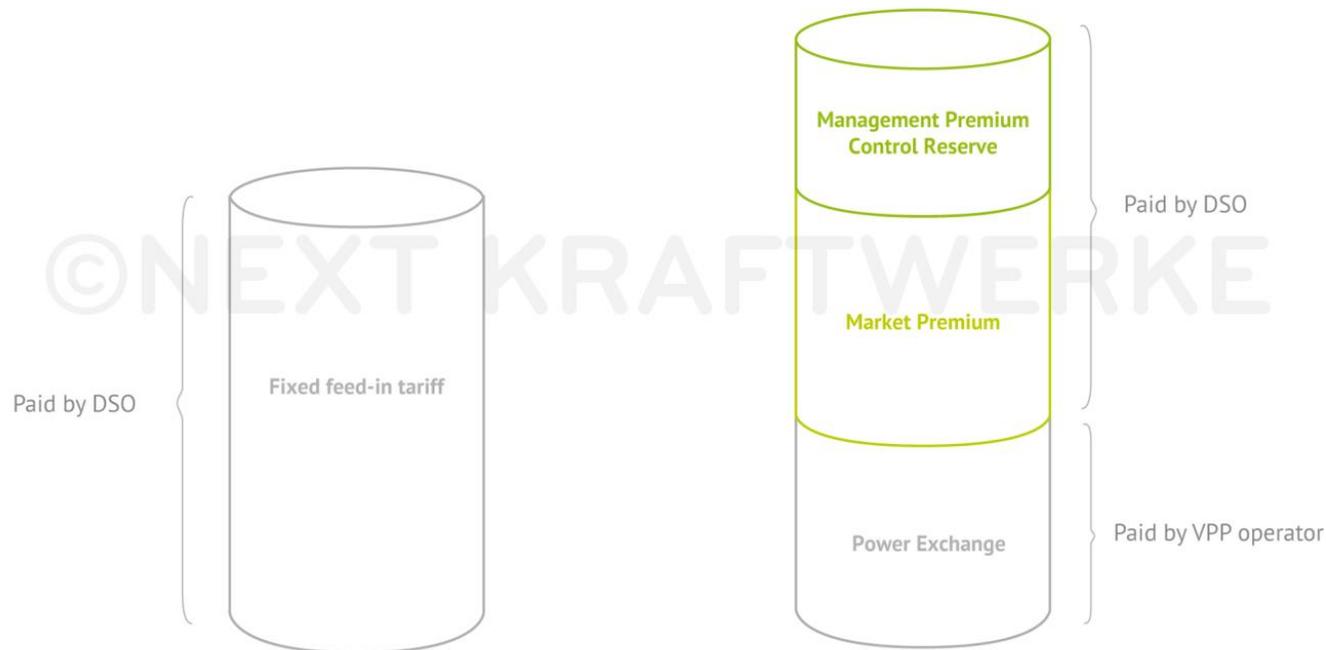
Neon analysis. Based on data from Bundesnetzagentur, Regelleistung.net, TSO websites. Power (capacity) payments only.

In 2015, primary balancing was by far the priciest product.

Source: Lion Hirth, neon neue energieökonomik

MARKET PREMIUM MODEL in Case of Flexible Power Plant

Market premium model compared to the fixed feed-in tariff



バイオガス発電（CHP）によるフレキシビリティ（柔軟性）の供給

- ドイツで多く普及しているバイオガス（CHP）
500kW
 - 通常、400kWで運転している
 - 上げ100kW、下げ200kW、合計300kWのフレキシビリティ（柔軟性）を供給できる
 - 投資は、コントロールボックスユニットをつけて、インターネットにつなぐだけ
 - 新しい発電所を作るよりもはるかに安い
 - 現在約800MWの容量
 - フレキシビリティとして十分取引できる部分
 - 調整電源（コントロールリザーブ）のセカンダリリザーブに販売

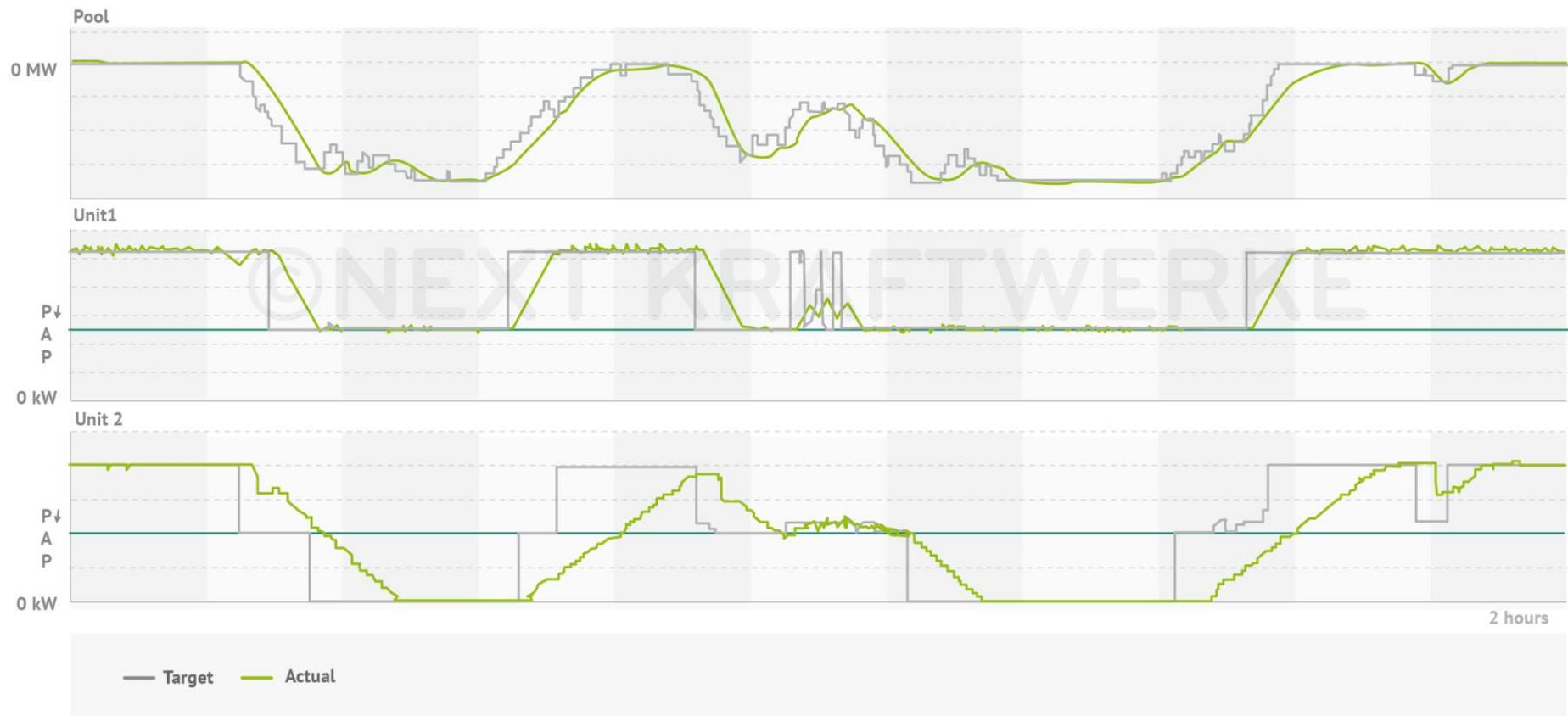
コントロールリザーブの種類



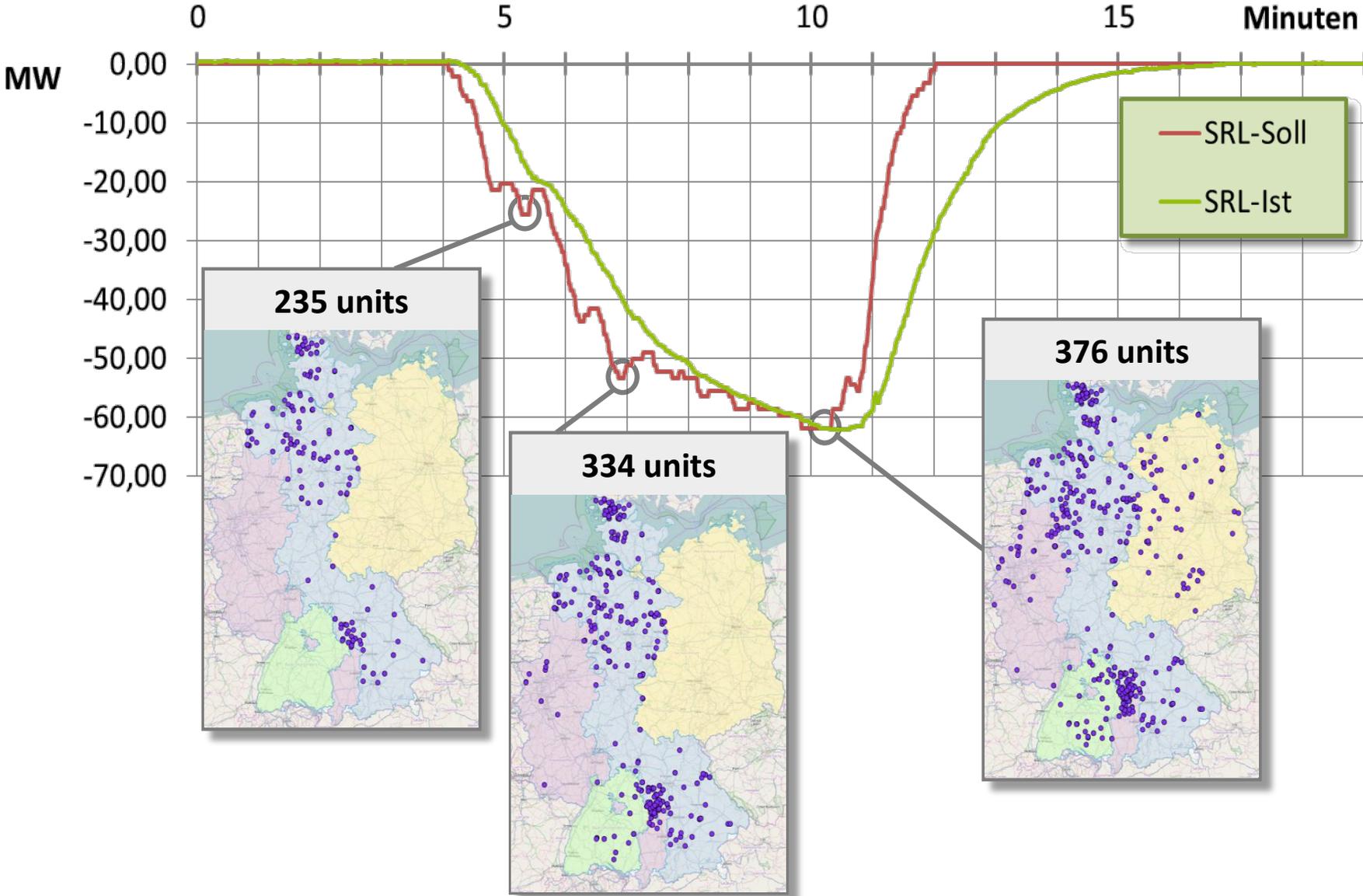
CONTROL RESERVEの概念図

Make use of the aggregated flexibility to stabilize the grid

Delivery of Control Reserve



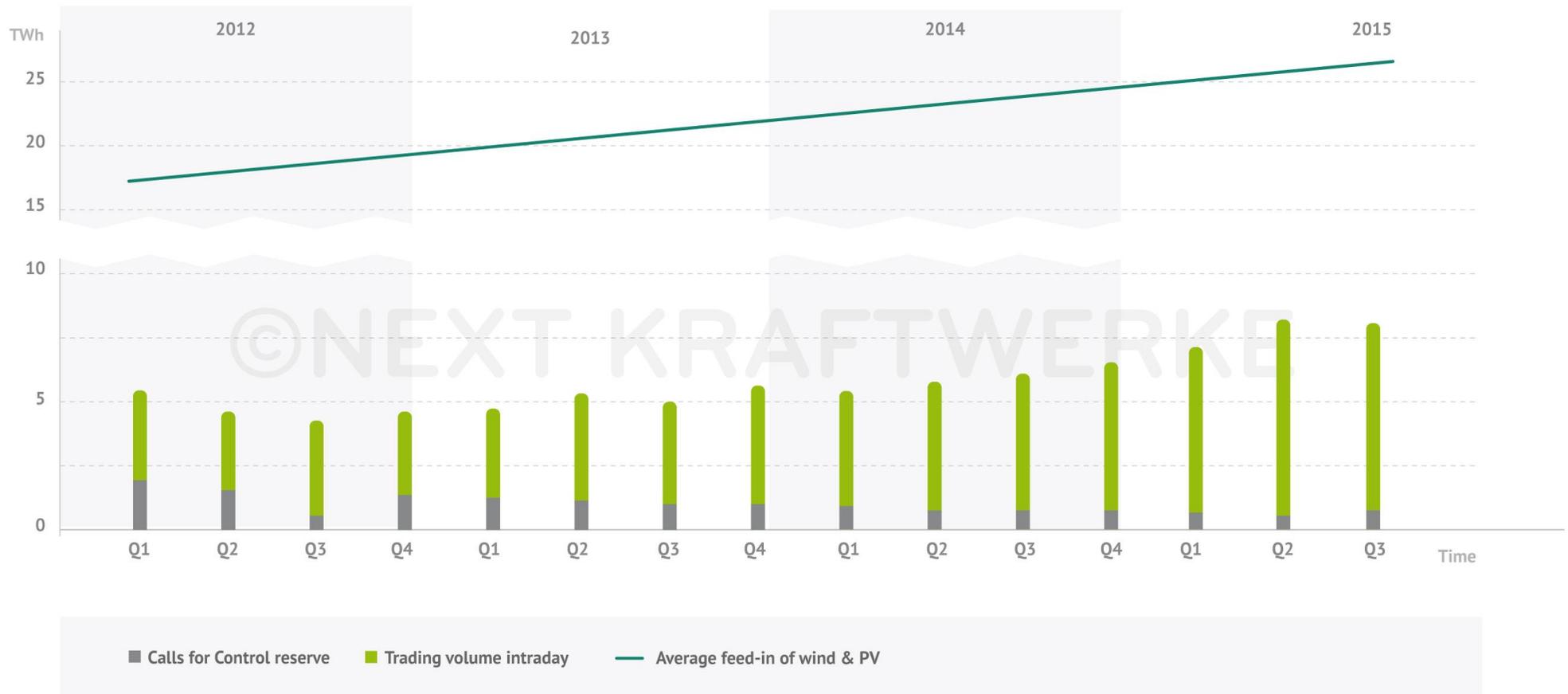
CONTROL RESERVEの運用形態



CHALLENGES TODAY

Energy Market Prices for Flexibility

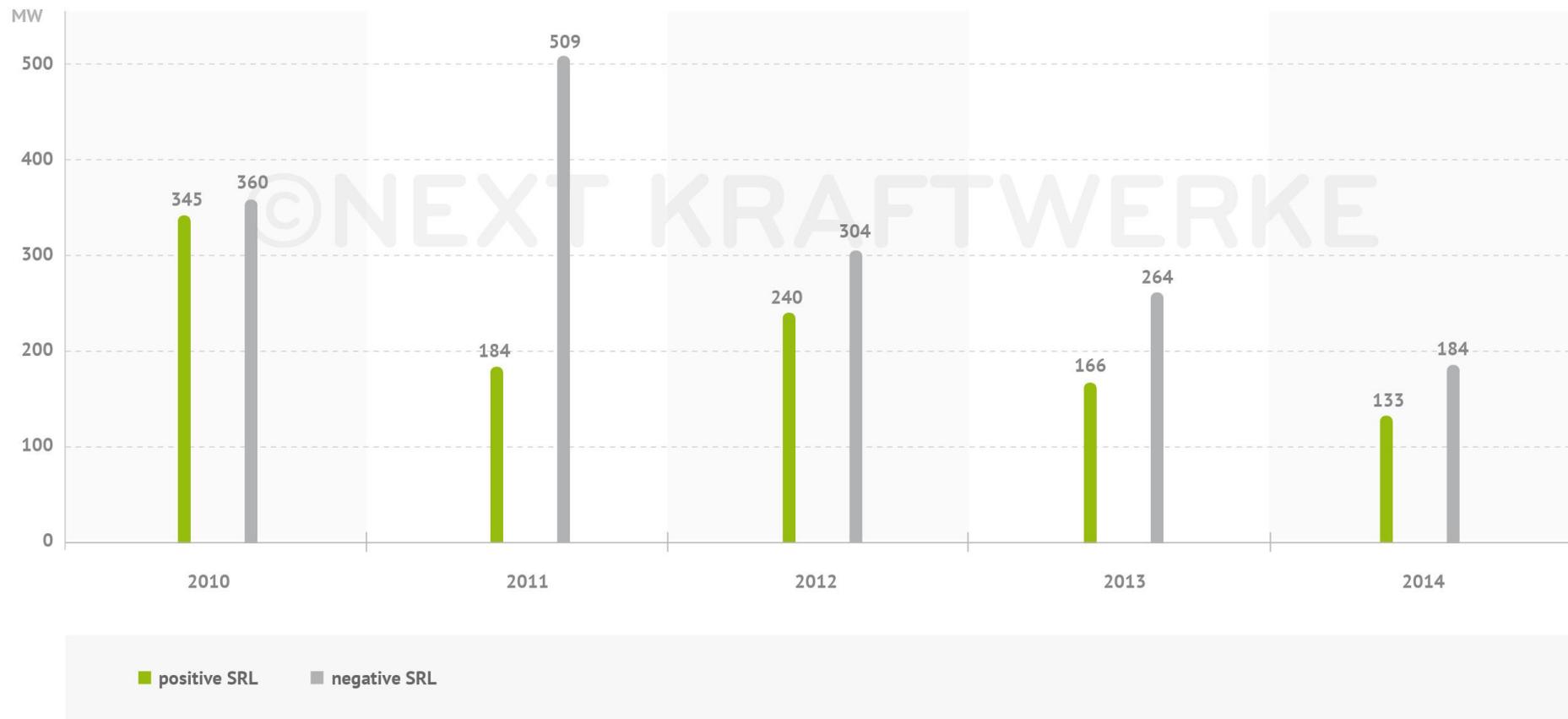
Development of demand for flexibility



調整電力必要量の減少

Durchschnittlicher Einsatz von Sekundärregelleistung in MW

Average use of secondary control performance in MW

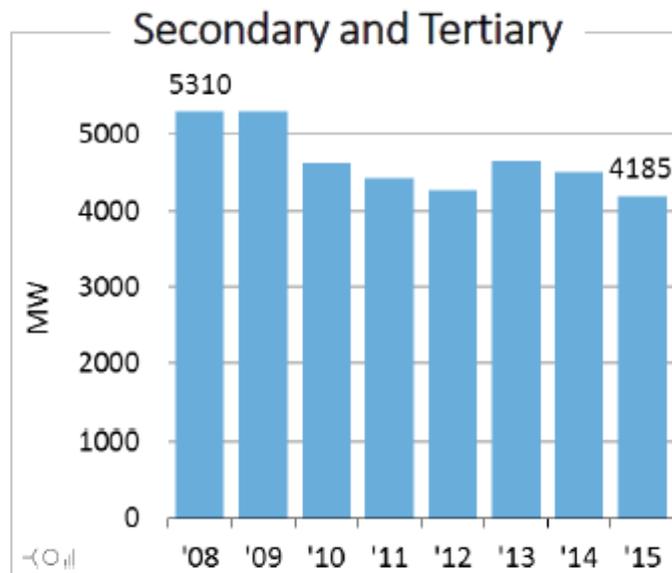


Quelle: Monitoringbericht 2015 der Bundesnetzagentur

要求されるリザーブの量

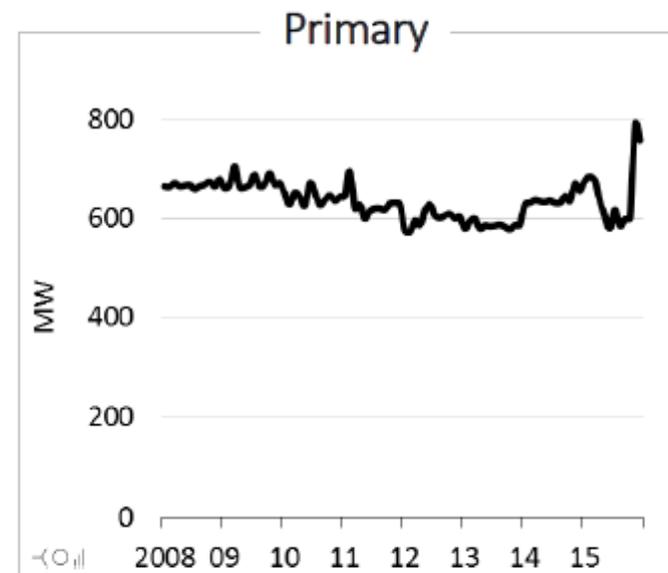


Performance of the balancing reserves market: procured volume



Neon analysis. Based on data from Bundesnetzagentur, Regelleistung.net, TSO websites. Power (capacity) payments only.

The requirement for secondary and tertiary balancing, determined by the TSOs, declined further.



Neon analysis. Based on data from Bundesnetzagentur, Regelleistung.net, TSO websites. Power (capacity) payments only.

Primary reserve is set commonly by European TSOs. (Includes 25 MW for CH and 35 MW for NL.)

Source: Lion Hirth, neon neue energieökonomik

当日SPOT市場での取引の活性化

- VPPをはじめとするトレーダーへのインセンティブ
 - インバランス料金（罰則）の強化
 - バランシンググループの信頼性が厳格に管理されるようになった（FIP導入後）
 - トレーダーは、バランシング口座にやりとりを記録
 - 15分毎の需給バランスを取らなければならない
 - 外した場合には、厳格に罰金（インバランス料金）を支払わなければならない
 - 直前の当日市場で、できる限り短期で、できる限り正確に、余剰電力や付属する電力を取引したい
- TSOによる調整電源市場の縮小

再エネ取引データの向上

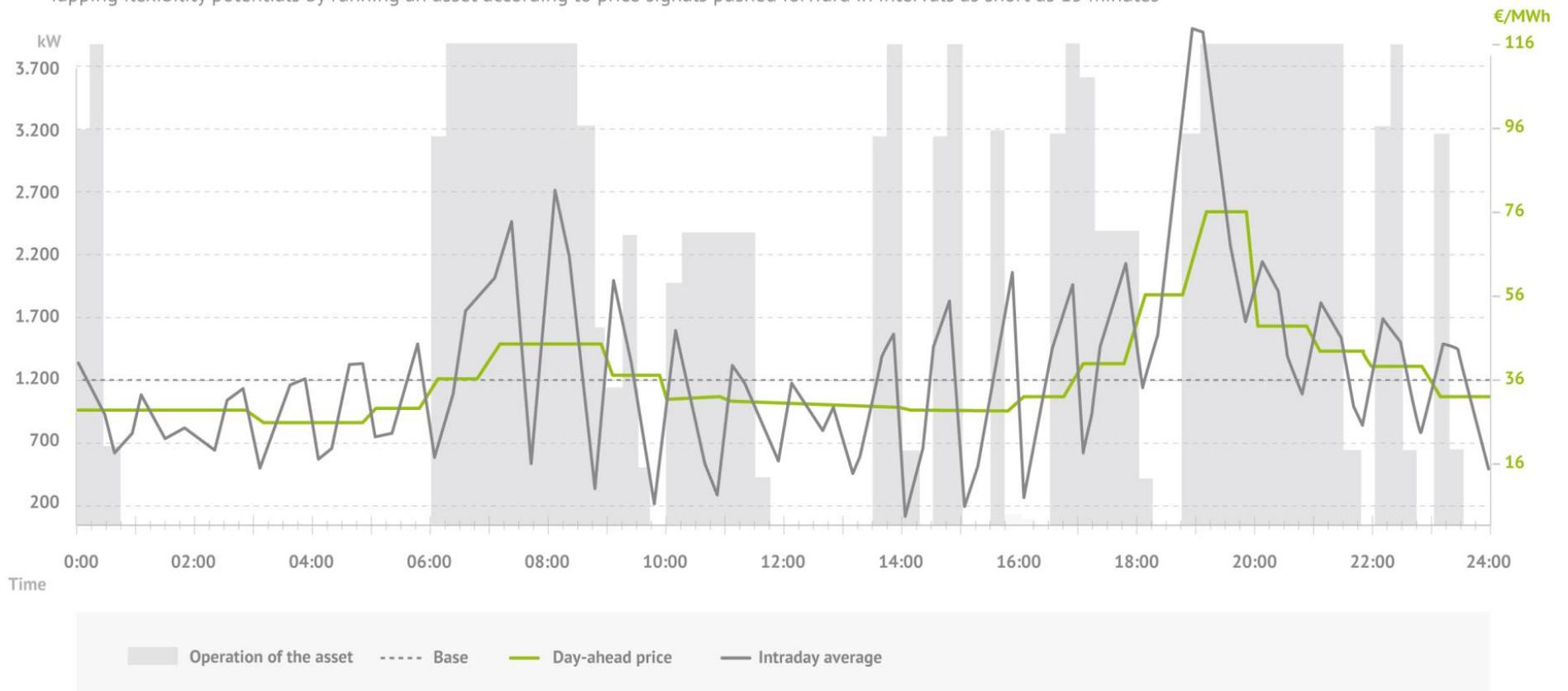
- リアルタイムの発電データ、給電データを使った取引
 - 2012年以前は、あいまいに処理されていた
- 天気予報ビジネスの発展
 - 発電予測の劇的な向上
- 当日市場での取引が活発化

当日SPOT市場での取引

Smart Power Production

INTRADAY TRADING: forecasting errors of wind and solar power influx cause fluctuating intraday prices

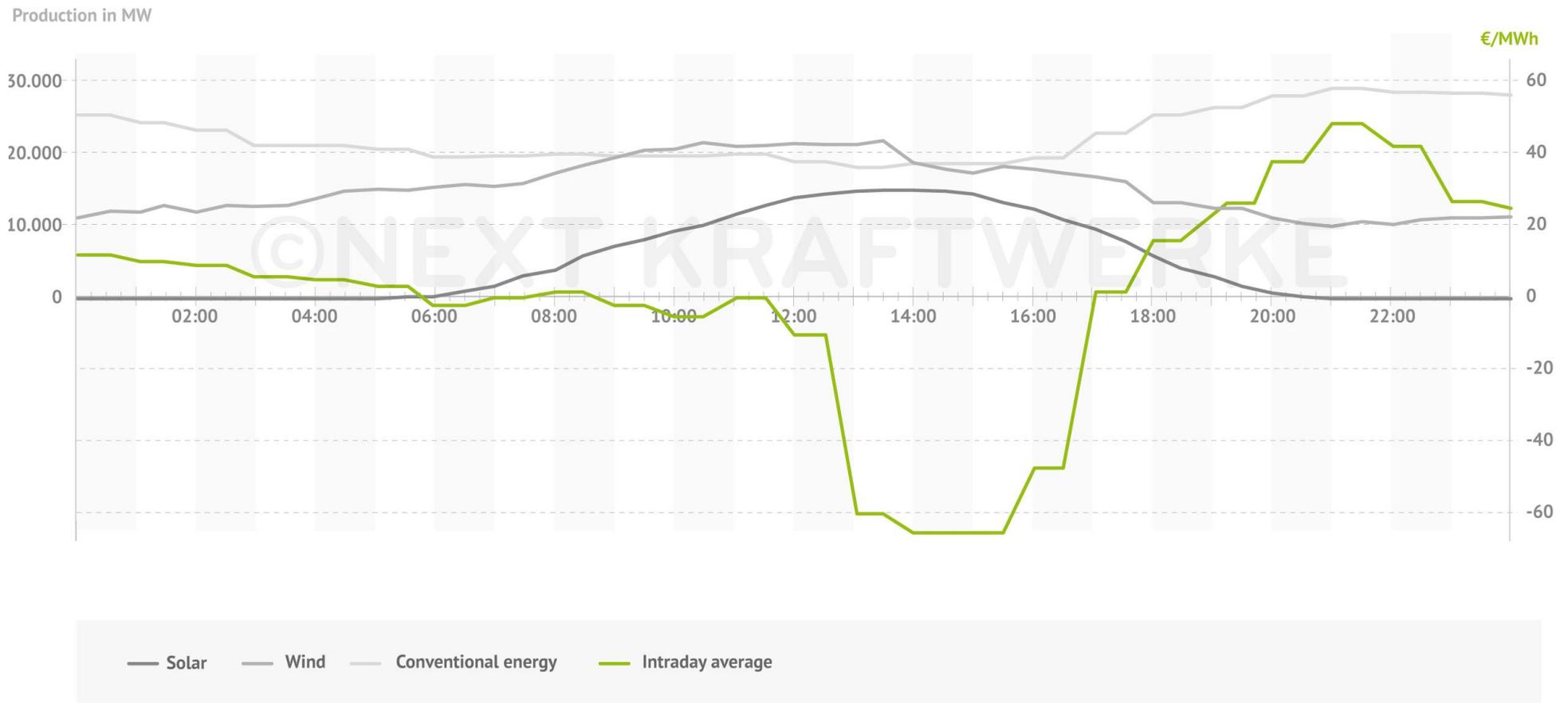
Tapping flexibility potentials by running an asset according to price signals pushed forward in intervals as short as 15 minutes



ネガティブプライスの発生

Price Spreads as Incentives for smarter Dispatch

Intraday profile with high wind feed-in & negative exchange prices (11. April 2014)



3.VPPのビジネスモデル
ル-Next Kraftwerkeを中
心に

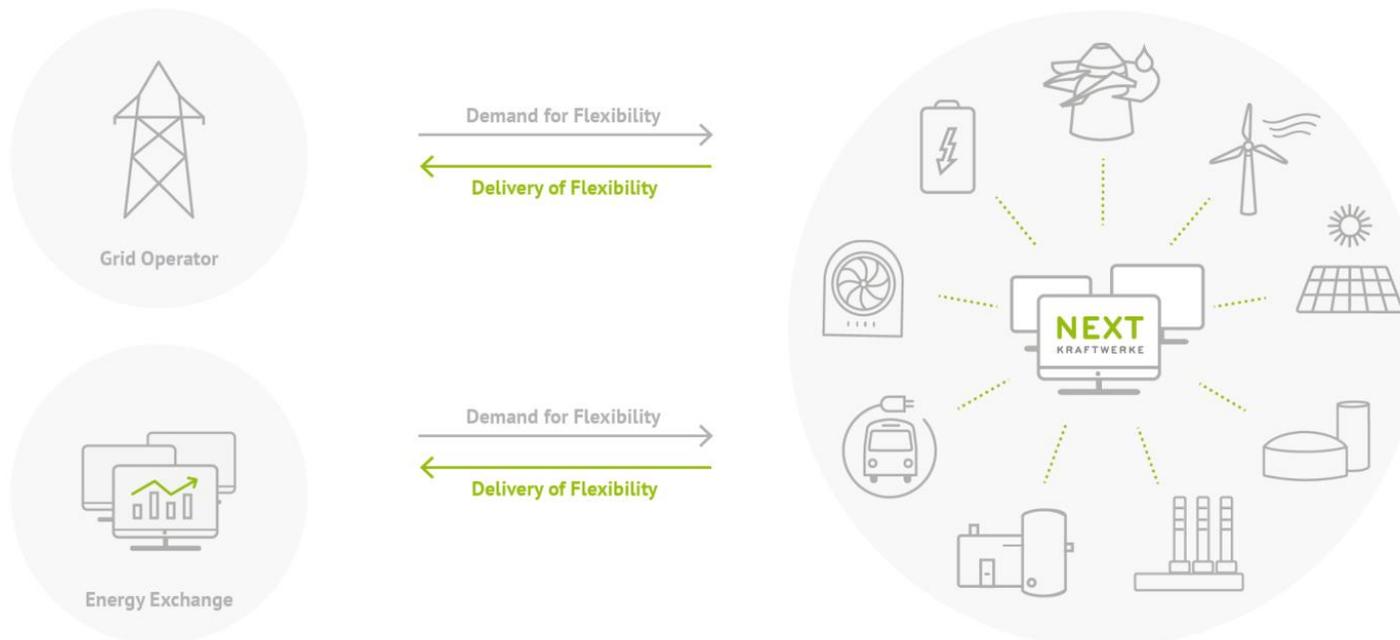
(VPP : Virtual Power Plant)

- 2009年設立
 - ケルン大学エネルギー経済研究所で研究員をしていた2人の博士課程の院生
 - 再生可能エネルギーがSPOT市場における電力取引に与える影響について、情報工学の視点から研究
- SPOT（短期）の取引市場におけるバーチャル発電所（VPP : Virtual Power Plant）
 - 発想はシンプル
 - 再生可能エネルギーの導入によって分散化されていく発電所を、再度集中させる
 - アグリゲートする

WHAT IS A VPP?

Basic Idea: Deliver Flexibility to Energy Markets and Grid Operators

Virtual Power Plant



VPP (Next Kraftwerke社) の立ち位置



Asset-light like airbnb, uber, facebook. As a **digital utility** we operate a power plant without owning any power plants! We are a platform for connecting independent producers & consumers to grid operators & markets.

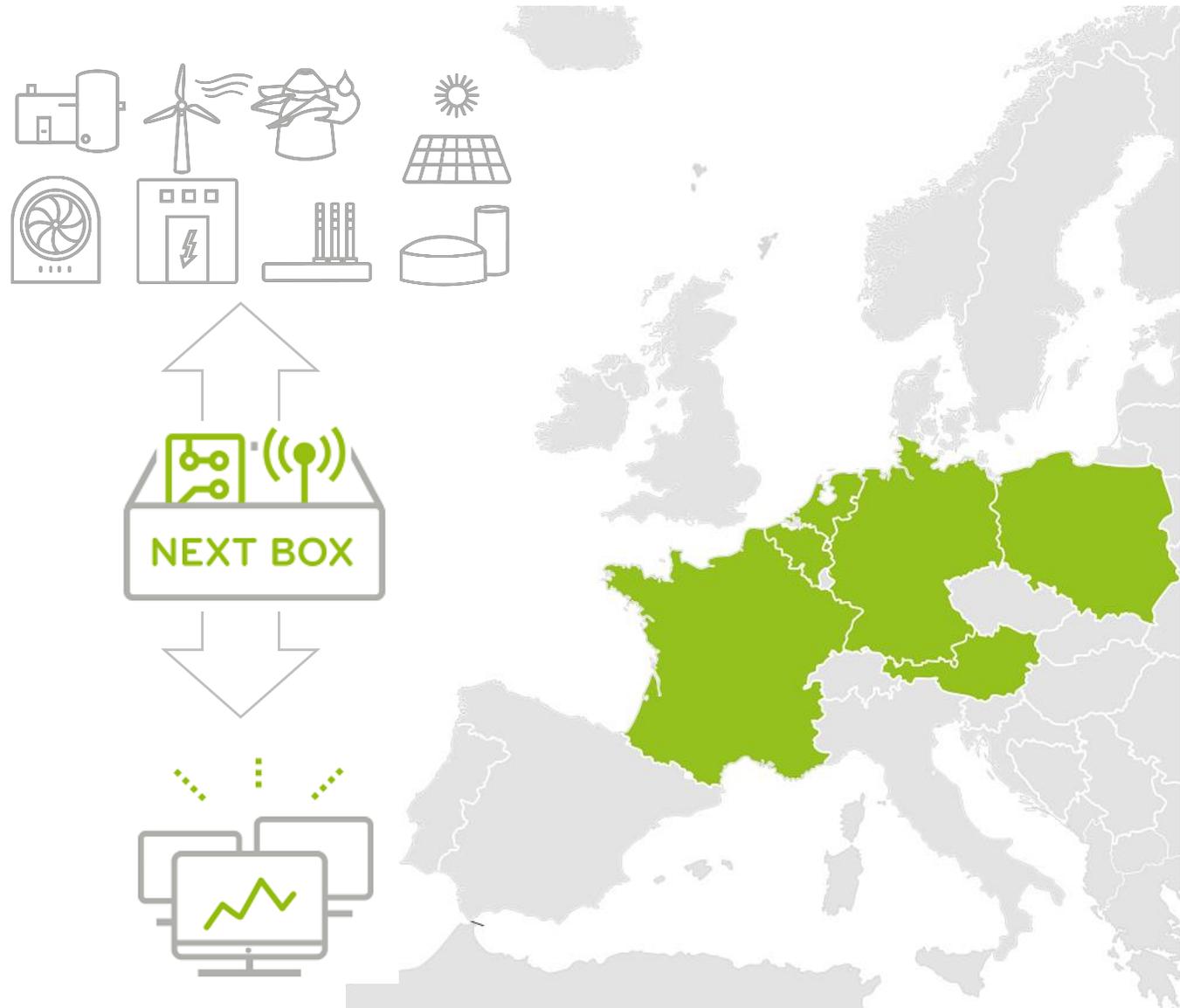
THE NEXT BIG THING WILL BE A LOT OF SMALL THINGS*

We are a digital aggregator of decentralized power producers & consumers through M2M communication

4,000 UNITS IN SIX COUNTRIES, OVER 2,700 MEGAWATTS

LINKED VIA THE REMOTE CONTROL UNIT NEXT BOX

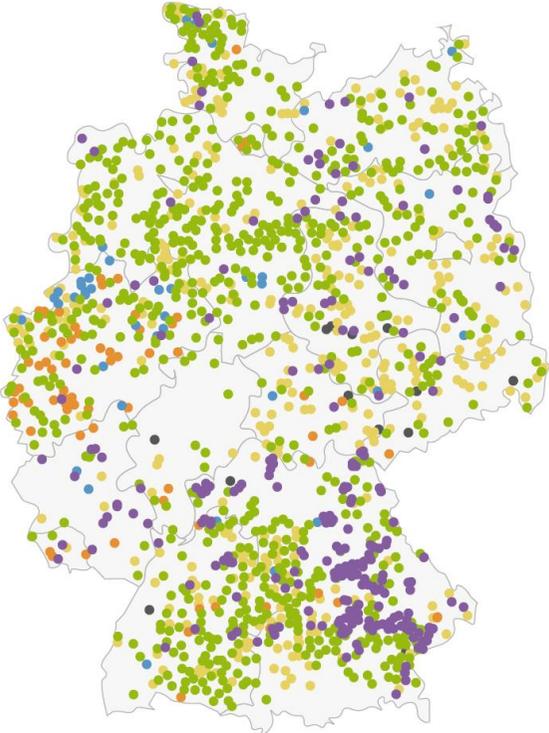
CONTROLLED BY THE CENTRAL CONTROL SYSTEM



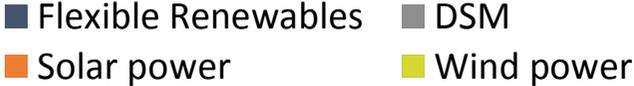
*Thomas Lomme

WHERE DOES THE POWER COME FROM?

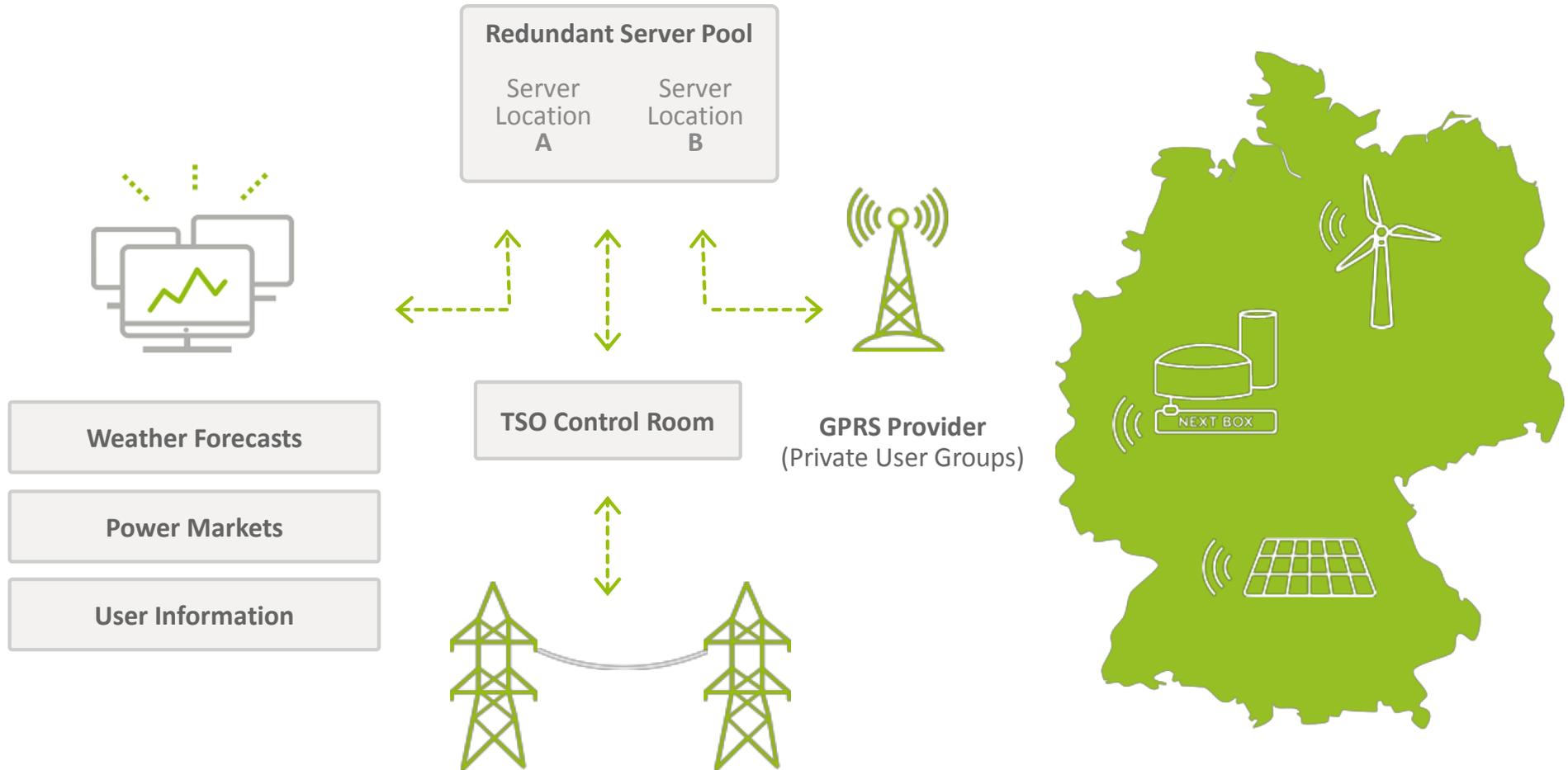
Assets in Germany



Total portfolio



TECHNOLOGY



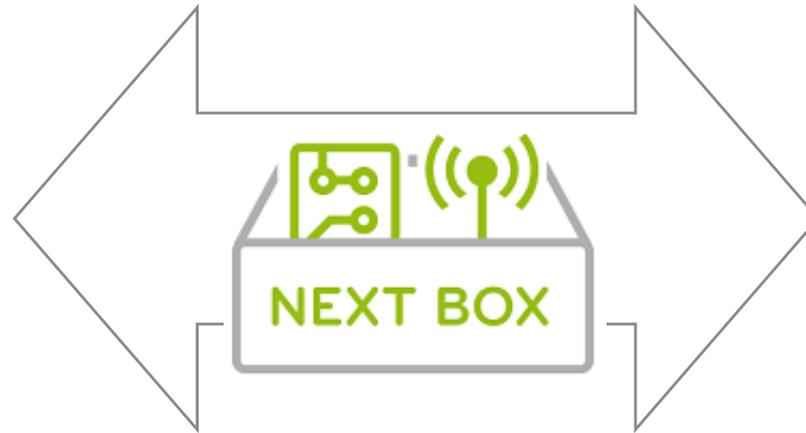
TECHNICAL REQUIREMENTS

Interfacing power plants is not a matter of simple plug & play

INDIVIDUAL CONTROL INTERFACE AT EACH STATION



STANDARDIZED INTERFACE TO THE VIRTUAL POWER PLANT



INTEGRATING DECENTRALIZED STATIONS

- > High variation of control interfaces used
- > No standardized interface for connecting a power plant

ROLE OF THE NEXT-BOX

- > Standardized interface between power plant & control system
- > Follows IT security regulations of the transmission code
- > Defined protocol for connection errors, etc ...

CONTROL SYSTEM

- > Collector of all the information transmitted via machine-to-machine communication by the Next Boxes and the electricity system.
- > Through the central control system, the units are controlled, started up and shut down.

Technical requirements

Interfacing power plants is not a matter of simple plug & play



The Next Box is individually configured for the type of unit: district heating, gas or water storage, and any timetable restrictions are programmed, so the unit can always operate under optimal conditions, technically and economically.

Next Box

- Bidirectional connection between the units and NXK control system.
- Data communication takes place over a GPRS connection, established via a SIM card.
- The data is encrypted directly in the Next box.
- At the access point, the SIM cards must be authenticated so that they can join the closed user group.
- The SIM cards do not have any access to the Internet, which makes data transmission even more secure.
- Once it is in our control system, the data is decrypted.

NEXT KRAFTWERKE'S SERVICES

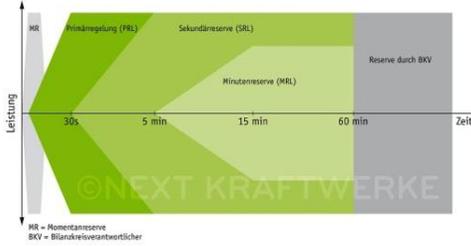
Utilizing the full potential of flexibility



The diagram shows two vertical bars representing revenue models. The left bar is a single grey rectangle labeled 'Fixed feed-in tariff'. The right bar is a stack of three rectangles: a grey bottom section labeled 'Power Exchange', a larger grey middle section labeled 'Market Premium', and a green top section labeled 'Management Premium Control Reserve'.

SERVICES

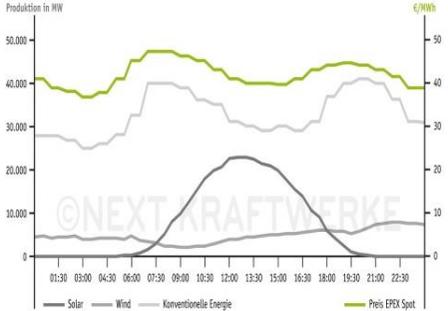
- › Optimized trading with remote-controlled units within the Market Premium Model



The diagram shows a graph of 'Leistung' (Power) on the y-axis and 'Zeit' (Time) on the x-axis. The x-axis is marked with 30s, 5 min, 15 min, and 60 min. A green shaded area represents the control reserve, divided into 'Primärregelung (PR1)', 'Sekundärreserve (SR1)', and 'Hilfsreserve (MR1)'. A grey shaded area at the end of the graph is labeled 'Reserve durch BKV'. A legend at the bottom indicates 'MR = Momentanreserve' and 'BKV = Bilanzkreisverantwortlicher'.

CONTROL RESERVE

- › Stabilizing the grid and keeping the grid frequency at 50 Hertz

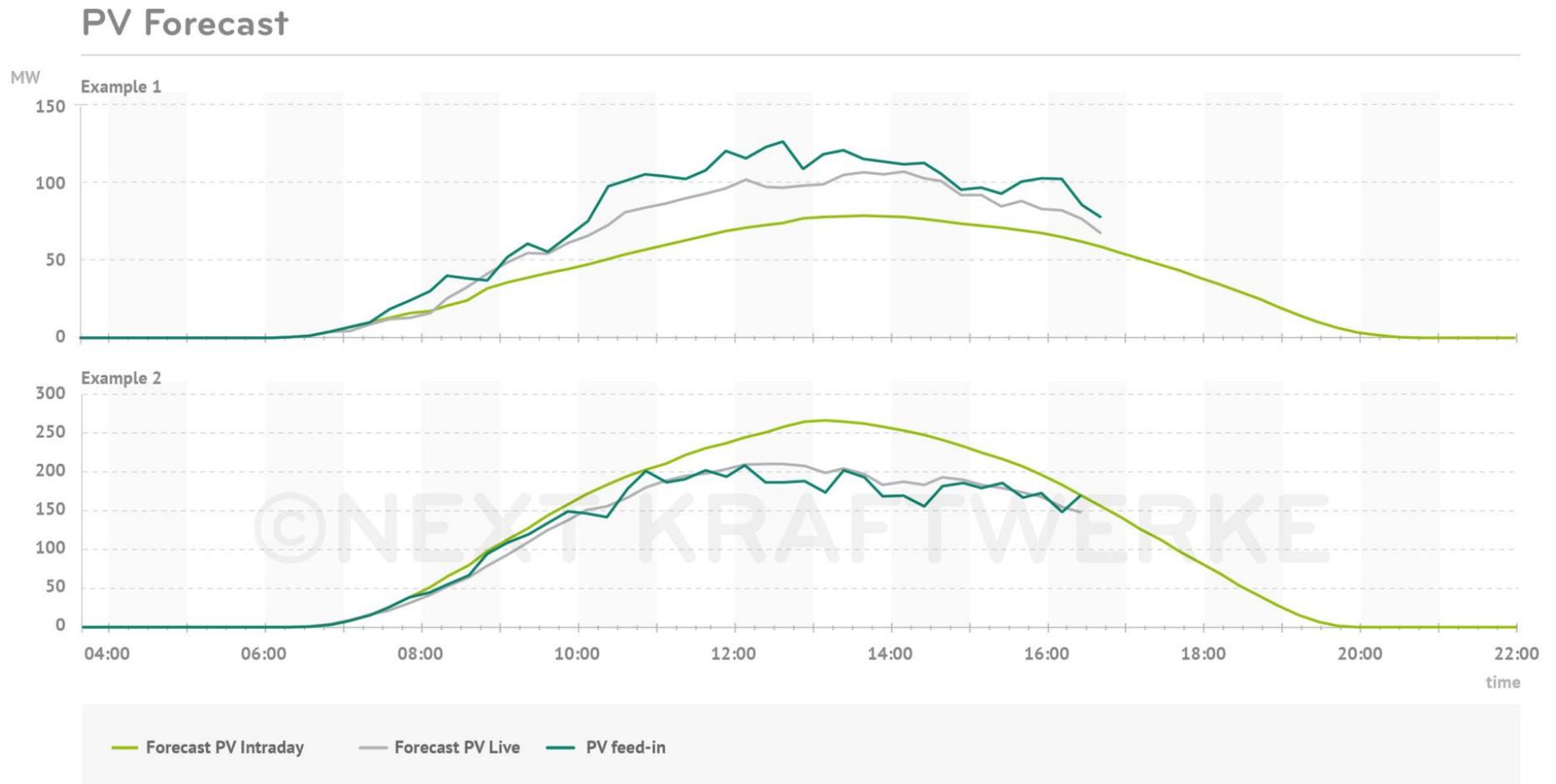


The graph plots 'Produktion in MW' (Production in MW) on the left y-axis (0 to 50,000) and '€/MWh' (€/MWh) on the right y-axis (0 to 50). The x-axis shows time from 01:30 to 22:30. Four lines are shown: 'Solar' (black), 'Wind' (grey), 'Konventionelle Energie' (light grey), and 'Preis EPEX Spot' (green). The spot price line shows significant volatility, peaking around 45 €/MWh.

POWER TRADING

- › (Short term) trading of power to use the units' flexibility profitably

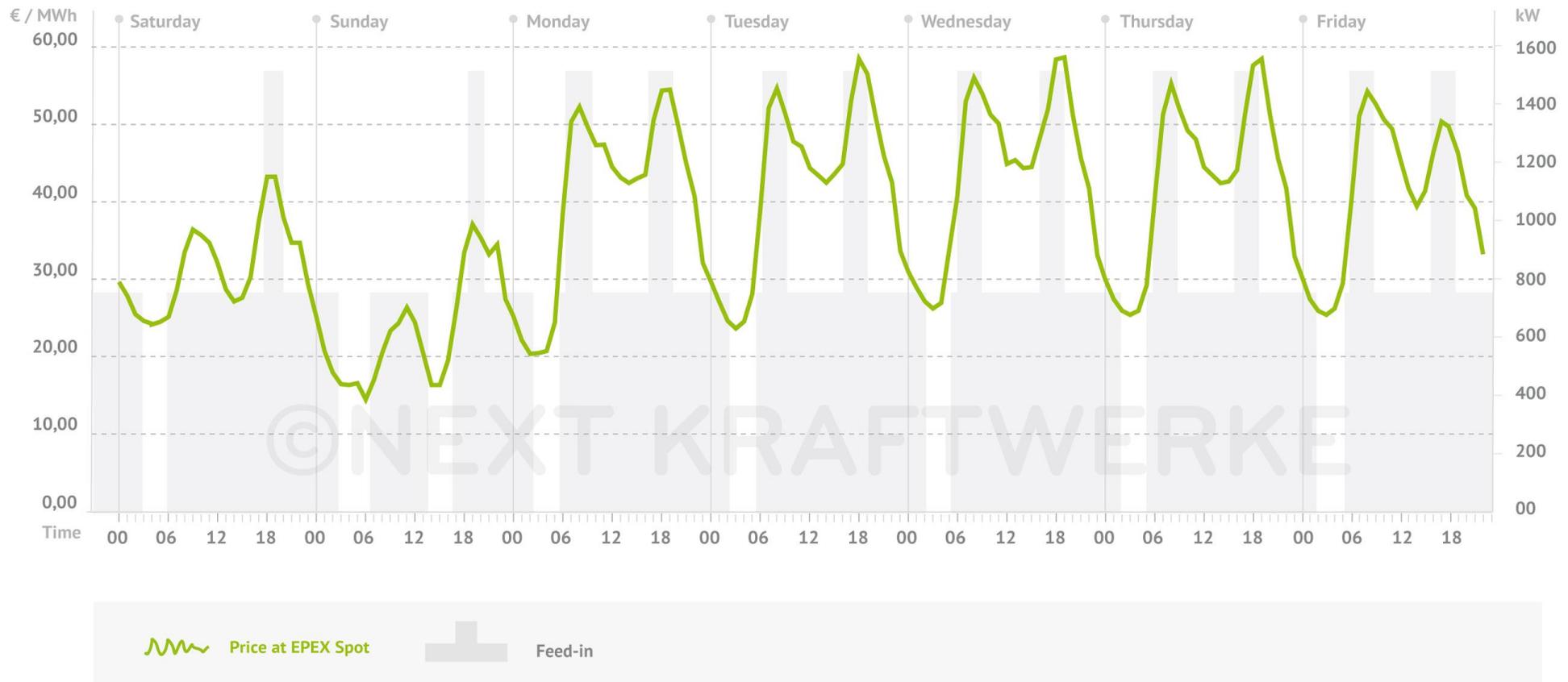
PVの天気予報精度(直前予報の優位性)



SPOT市場での取引

Smart Power Production

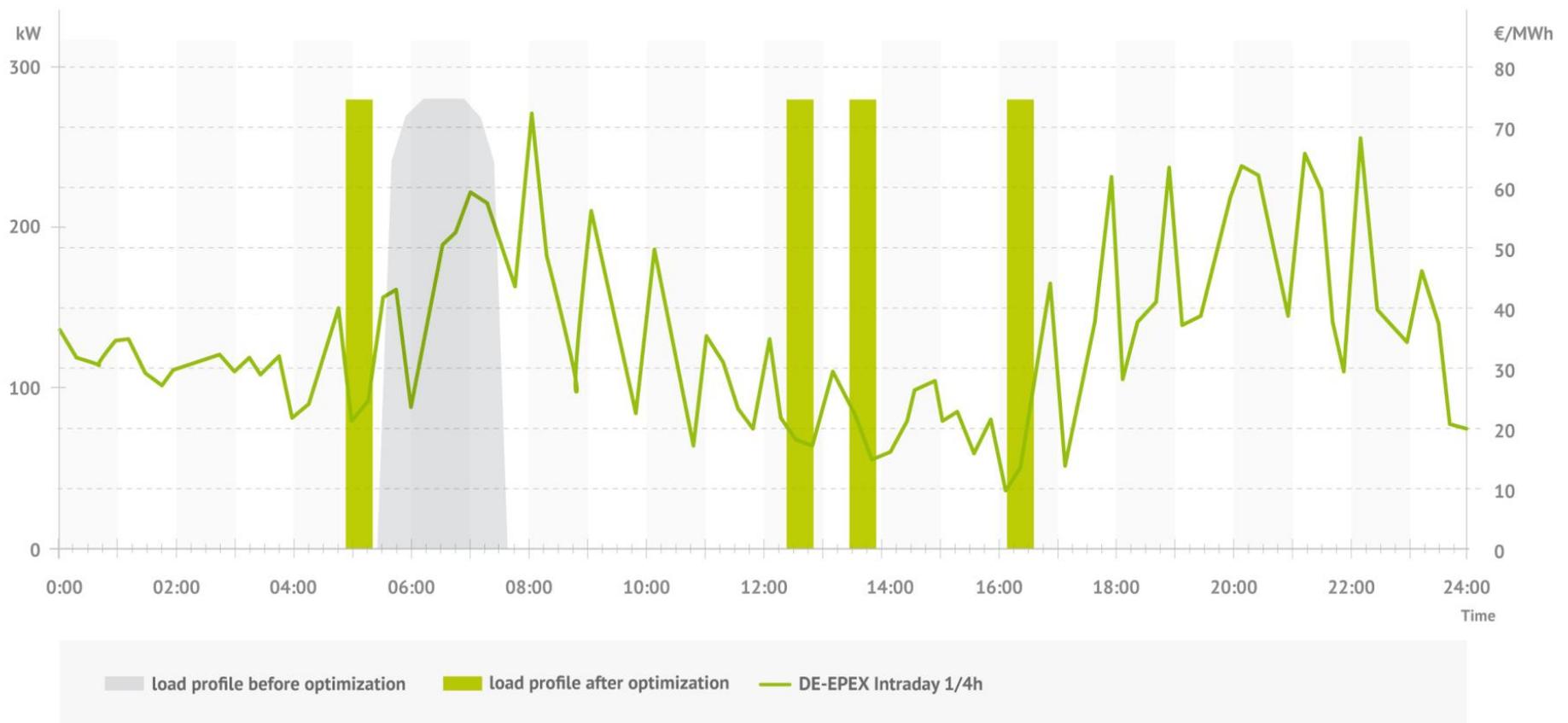
Peak load operation of a biogas unit – example



DSM (Demand Side Management)

Smart Power Consumption

Load management with variable power rate



需要家側のマネジメント

- 大きな電力を使う需要家
 - 精度の高いメーターを持っているので、これを使って、需要家側の柔軟性を取引できる
 - 一番安い時間も設備を動かすことで、トータルの電力消費を抑える
 - 最低限動かさなければならない時間・消費量等をアルゴリズムに組み込んで、必要な場所・必要な時間・必要な量を調整
- 系統安定性の確保にも意味がある
 - 価格が安い時には電力供給量が多くなっているので、これに合わせて電力需要の負荷を上げる

VPPにとってのSPOT市場の優位性

- 調整電源市場（TSO）に売る場合と違って、売る量とタイミング、価格を、VPP側で調整できる
- 調整電源では、TSO側から指示が出る
 - いったい、いつ、どのように運用するかのスケジュールが立て辛い
- SPOT市場であれば、一週間単位でほぼ正確に、だいたいどのくらいの稼ぎになるのかを、発電事業者の開示できる
 - とりわけ、バイオガス発電
 - 発電事業者は、そのスケジュールに沿って運用できる
 - 発電事業者は、利潤を最大化できるVPP事業者を選ぶ

VPPの将来の電力市場の見通し

- 現在、ドイツ国内は供給過剰
 - 新しい蓄電池などの、Power to Xはほとんど必要ない
- 現在ある、発電施設のフレキシビリティを十分に活用することで対応できる
 - 短期で市場運用することで、効率的、安価にできる
- 問題は、2020年中盤以降、約20GWの発電容量が撤退すること
 - その後は、現在ほとんど使われていない揚水発電施設などが再び競争力を持って活用されていくだろう
- ドイツ全体で35%が再エネなので、これが進展していくことは間違いない

4.まとめ

結論

- **FIP**導入後、再生可能エネルギーの市場取引が義務化された
 - **FIT**時代とは、プレーヤーも取引市場も取引形態も、大きく変わっている
 - **TSO**や大手電力会社が変わって、**VPP**をはじめとするトレーダーが、当日**SPOT**市場を活性化している
- **TSO**による調整電源（**Control Reserve**）市場は、縮小傾向
 - フレキシビリティの全体需要は増えているが、当日（直前の）**SPOT**市場によって賄われる傾向
- 優れた**VPP**と契約できれば、小規模発電事業者も利潤を大きくすることができる