

# Lastsprünge an der Viertelstunden-Grenze

Entwurf 1.900 vom 06.01.2014

von Walter Schittek

Vorbemerkung zum Entwurf:

Dieser ursprünglich aus 2010 stammende Text wurde Ende 2013 völlig überarbeitet und hat aufgrund der zunehmend besser erreichten Zielsetzung der Vollständigkeit den mehr als doppelten Umfang angenommen.

Da von vornherein klar war, dass für die Überarbeitung praktisch keine normal verfügbare Zeit genutzt werden konnte, wurde bewusst in Kauf genommen, dass die jetzt fertiggestellte Vorab-Version noch gravierende Einschränkungen besitzt:

- Kein systematisches Literaturstudium, deshalb zu geringe Unterlegung mit Quellen.
- Da Formeln, Tabellen und vor allem noch etliche zusätzliche Grafiken fehlen, braucht man beim Lesen deutlich mehr Vorstellungskraft.
- Meine Texte kranken daran, dass ich zu eher langen Sätzen neige. Vor Veröffentlichung durchforste ich sie und teile Sätze auf. Auch das habe ich hier nur teilweise gemacht.
- Blocksatz ohne Silbentrennung – eine Zumutung!

Die Behebung dieser Einschränkungen erscheint Mitte 2014 machbar, vorher voraussichtlich nur in sehr kleinen Schritten.

## Überblick/Zusammenfassung

Bei der Einführung variabler Strompreise wird in einigen Jahren der Zustand erreicht werden, dass die Tarife sich nicht mehr per Preisblatt, sondern nur noch tagesaktuell per Internet usw. kommunizieren lassen, wie z.B. beim „Real-Time-Pricing“. In diesem Text wird nachvollziehbar dargestellt, warum

1. bei Erreichen dieses Zustands die Etablierung automatischer Reaktionen der gesamten Verbrauchsseite beginnen wird, so dass die Stromkunden von der ständigen lästigen Beschäftigung mit dem Preisverlauf entlastet werden. Im Zusammenspiel von Elektroindustrie, Softwareanbietern, privaten und gewerblichen Stromkunden und ggf. Dienstleistern würde dies unausweichlich sogar gegen den Willen der Netzbetreiber durchgesetzt.
2. schon nach einzelnen wenigen Jahren durch geballte automatische Reaktionen der Verbrauchsseite auf Preiswechsel an der Viertelstundengrenze die Primärregelung mehrmals pro Woche an ihre Auslegungsgrenze (ENTSO-E: 3000 MW) kommen wird.

Diese qualitativen Aussagen werden überschlägig quantitativ belegt; dabei wird deutlich, dass man diese Problematik nicht „schön rechnen“ können wird.

**Erstmalig in der Geschichte der Stromversorgung wird somit den Netzbetreibern eine Entwicklung „von außen aufgezwungen“ werden, auf die es keine allmählichen Reaktionsmöglichkeiten gibt (wie z.B. bei der Einspeisung erneuerbarer Energien).**

Der Unterschied zu Fehlentwicklungen wie der ehemals vorgeschriebenen Abschaltung

von Windkraftanlagen unterhalb 49,5 Hz sowie der noch heute weit verbreiteten Abschaltung von Photovoltaik-Anlagen oberhalb 50,2 Hz ist folgender: Erstere hat sich bislang erst einmal (am 4.11.2006), letztere noch keinmal negativ ausgewirkt. Die hier dargestellte zu erwartende Fehlentwicklung wird sich nach einzelnen wenigen Jahren mehrmals pro Woche massiv auswirken.

Nach Darstellung der Problemlage (Kap. 2) werden denkbare Bausteine für Lösungsansätze untersucht (Kap. 3); deren sinnvolle Kombinationen werden anschließend bewertet (Kap. 4). Zu Beginn jedes Hauptkapitels gibt es Hinweise für den eiligen Leser.

Dieser Text möchte einerseits die umrissene Problemlage in den Fokus rücken, andererseits auf die Notwendigkeit rechtzeitiger Vorkehrungen dagegen hinweisen. Nebenbei ergibt sich, dass es keineswegs einfach sein wird, die Entscheidung für eine passende Kombination von Maßnahmen zu treffen, auch angesichts des damit verbundenen Aufwands und dauerhafter Kosten.

**Unbestritten bleibt, dass Smart Metering und der umfassende Einsatz variabler Tarife der richtige nächste Schritt sind. Allen Beteiligten sollte allerdings klar sein, dass eine über einen sehr kurzen Zeithorizont hinaus tragfähige Lösung nur erreicht wird, wenn die Einführung variabler Tarife fundiert vorbereitet wird.**

Ganz am Ende des Textes ergänzen zwei Seiten „Fazit und Ausblick“ diese Zusammenfassung.

## Hinweise

Wer mit **Smart Metering** befasst ist, findet die wichtigsten Informationen auf den ersten beiden Seiten des Textes (bis Ende Kapitel 1.1).

In der Ende 2008 erschienenen **2. Auflage des Buches „Strom – fit für die Zukunft?“** (Schittek, 2008; pdf-Volltext unter [http://www.staff.uni-marburg.de/~schittek/buch\\_strom.html](http://www.staff.uni-marburg.de/~schittek/buch_strom.html)) geht **Kapitel 2.2.3** schon auf das Thema Lastsprünge ein. Allerdings wurde die Darstellung sehr komprimiert gehalten, um dem vermeintlichen Randthema nicht zu viel Raum zu geben.

Entsprechend der tatsächlichen Bedeutung des Themas soll es hier nun – ohne Platz-Beschränkungen – von allen Seiten beleuchtet werden.

**Dieser Text richtet sich in erster Linie an Fachleute und kann von ihnen ohne Kenntnis des Buches/pdf (Schittek, 2008) gelesen werden.**

Nichtfachleute sollten zumindest die Kapitel bis 2.2.2 im Buch/pdf gelesen haben, und sollten dann ausprobieren, ob dieser Text für sie verständlich ist.

*Kursiv gedruckte Textteile* sind optional und nur dann von Bedeutung, wenn man Bedenken hat oder an einer Vertiefung interessiert ist – z.B. um für Diskussionen fit zu sein.

Die in diesem Text enthaltenen überschlägigen Berechnungen beziehen sich auf den Stand im Herbst 2013 (Primärregelreserve ENTSO-E: 3000 MW, deutscher Anteil 576 MW).

Das europäische Verbundnetz wird sich perspektivisch weiter ausdehnen, so dass sich diese Zahlen ändern können. Dadurch wird sich allerdings qualitativ nichts an den Aussagen in diesem Text ändern, auch quantitativ nichts zum Positiven. *Selbst dann nicht, wenn man zukünftig von einer deutlich erhöhten Gesamt-Primärregelreserve ausgehen müsste – denn in mindestens gleichem Verhältnis nimmt ja auch die Gesamt-Leistung auf Verbrauchsseite zu.*

In diesem Text wird immer wieder darauf Bezug genommen, dass potenziell jedes Neugerät eine preisintelligente Steuerung erhalten könnte, um optimal auf den Preisverlauf reagieren zu können. Ohne dass das jedes Mal extra erwähnt wird, steht dabei genauso die Möglichkeit im Raum, dass man die Preisintelligenz in eine zentrale Einheit je Anschluss verlagert, die alle oder einen Teil der Geräte entsprechend steuert.

Durch den Text zieht sich durch, dass die Thematik nicht rein quantitativ zu klären ist, wie es sonst bei elektrotechnischen Fragestellungen meist der Fall ist. Bewusst werden immer wo nötig auch qualitative Aspekte beachtet, wie z.B. Kundenakzeptanz oder denkbare Motive für ein ungünstiges Verhalten von Kunden.

Dank an die Fachleute, die mir bei der Erstellung der ersten Version des Textes Diskussionspartner waren: Karl-Heinz Peil, Holger Röpken, Holger Armbrüster (Stadtwerke Marburg), Dr. Jan Ringelstein (IWES Kassel), Christian Sauer (ISE Freiburg).

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Perspektiven variabler Tarife .....</b>	<b>6</b>
1.1	Smart Metering .....	6
1.2	Gute Gründe für die Viertelstundengrenze .....	7
1.3	Automatische Reaktionen sind sinnvoll .....	9
1.4	Automatische Reaktionen sind unvermeidlich .....	9
<b>2</b>	<b>Lastsprünge an der Viertelstundengrenze .....</b>	<b>10</b>
2.1	Korrelierte Preisverläufe .....	11
2.2	Lastsprünge allein schon durch Kühl-/Gefriergeräte .....	12
2.3	Zusammenballung von Lastsprüngen .....	14
2.4	Unschöne Zahlen .....	15
2.5	Weitere automatische Reaktionen .....	15
2.6	Lastsprünge und Lastprognosen .....	17
2.7	Zwischenfazit .....	20
<b>3</b>	<b>Bausteine für Lösungsansätze .....</b>	<b>21</b>
3.1	Von vornherein ungeeignete Lösungsansätze .....	22
3.2	Standardbaustein: Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts .....	23
3.3	Grundbausteine: Rampe statt Sprung .....	25
3.3.1	Verzicht auf festen Viertelstundenbezug .....	26
3.3.1.1	Koordination ist unumgänglich .....	26
3.3.1.2	Sinnvolle zeitliche Auflösungen .....	26
3.3.1.3	Häufigkeit von Preisänderungen .....	27
3.3.1.4	Grundbaustein 1: Koordinierte Preisbewegungen .....	28
3.3.2	Grundbaustein 2: Zufallsrampe .....	28
3.3.3	Grundbaustein 3: Unterschiedliche Viertelstundenrhythmen .....	30
3.3.4	Grundbaustein 4: Kundenbezogene feste Tarifschaltminuten .....	31
3.3.5	Grundbaustein 5: Kundenbezogene benachbarte Tarifschaltminuten.....	31
3.3.6	Grundbaustein 6: Echtzeit-Markierung jedes Preissprungs .....	32
3.3.7	Grundbaustein 7: Sekundengenaue Preiswechsel .....	33
3.4	Zusatzbaustein A: Proaktiver Einsatz der Minutenreserve .....	36
3.5	Zusatzbaustein B: Ent-korrelierte Preisbewegungen .....	39
3.6	Zusatzbaustein C: Orientierung an vollen Stunden .....	40
<b>4</b>	<b>Lösungsansätze .....</b>	<b>40</b>

<b>4.1 Lösungsansatz 1+A+B .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 Lösungsansatz 1+A+C .....</b>	<b>42</b>
<b>4.3 Lösungsansatz 2+A+B .....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 Lösungsansatz 2+A+C .....</b>	<b>43</b>
<b>4.5 Lösungsansatz 3+A+B .....</b>	<b>43</b>
<b>4.6 Lösungsansatz 4+A+B .....</b>	<b>43</b>
<b>4.7 Lösungsansatz 5+A+B .....</b>	<b>44</b>
<b>4.8 Lösungsansatz 6+A+B .....</b>	<b>44</b>
<b>4.9 Lösungsansatz 7+A+B .....</b>	<b>45</b>
<b>4.10 Außer Konkurrenz: Quasi-kontinuierlicher Preisverlauf .....</b>	<b>47</b>
<b>5 Fazit und Ausblick .....</b>	<b>48</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>51</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>51</b>
<b>Versionen dieses Textes .....</b>	<b>52</b>

# 1 Perspektiven variabler Tarife

Der eilige Leser mag dieses Hauptkapitel querlesen, allerdings dabei darauf achten, dass er diejenigen Punkte gründlich liest, denen er nicht auf Anhieb zustimmen kann.

Vieles kann sich als „variabler Strompreis“ bezeichnen. Die meisten heutigen Tarife lassen sich noch per Preisblatt oder per langfristiger Vorschau im Internet kommunizieren. In diesem Text geht es aber um solche Tarife, die sich nicht mehr per Preisblatt, sondern nur noch tagesaktuell per Internet usw. kommunizieren lassen, wie z.B. beim „Real-Time-Pricing“ (wik-Consult, 2006; 76). Solche Tarife möchte ich als *komplexe variable Tarife* bezeichnen, weil sie keine festen Preisstufen und keine vorgegebenen Zeitblöcke mehr haben.

Darüber, wann es soweit sein wird, dass komplexe variable Tarife zumindest in Teilen Europas flächendeckend eingeführt werden, gibt es unterschiedliche Meinungen und Absichten. Aber nicht der Zeitpunkt ist hierbei entscheidend, sondern ob bis dahin das Nötige vorbereitet wurde. Denn mit der flächendeckenden Einführung komplexer variabler Tarife wird ein Stein ins Rollen gebracht, der schon nach wenigen Jahren die gesamte europäische Stromversorgung ins Wanken bringen könnte – wenn dieser Schritt getan würde, ohne die Konsequenzen umfassend zu bedenken und sich vor Einführung für eine Gesamtlösung zu entscheiden.

Unerwartete/unerwünschte Konsequenzen sowie mögliche Lösungsansätze möchte dieser Text darstellen. Aus Gründen der angestrebten Vollständigkeit ist er sehr umfangreich geworden.

Das zu Grunde liegende Thema ist nicht völlig neu; z.B. unter der Bezeichnung Lawineneffekt (Nestle, 2008; 63) wurde es schon in Zusammenhang mit automatischen Reaktionen auf variierende Strompreise erwähnt. Die Tragweite des Themas im gesamten Verbundnetz soll hier aufgezeigt werden.

## 1.1 Smart Metering

Der Einsatz intelligenter Stromzähler (Smart Meters) mit allen dazu gehörenden Abrechnungs- und Informationsmöglichkeiten wird als Smart Metering bezeichnet.

Je klarer sich die technische Gestaltung komplexer variabler Tarife abzeichnet, desto mehr wird sich bei den Herstellern von Smart Meters eine Standardisierung verfestigen, so dass alles, was absehbar realisiert werden soll, auch durch die Geräte abgedeckt werden kann. Zentrale Funktionen sind dann weiterhin die Datenerfassung, -aufbereitung und -übermittlung. Alle Features, die man darüber hinaus unterschiedslos jedem Stromkunden zur Verfügung stellen möchte, wird man perspektivisch sinnvollerweise mit im Gehäuse der Smart Meters unterbringen. Sie bedienen Informationsschnittstellen im Haus und versorgen ggf. sogar alle elektrischen Geräte im Haus mit aktuellen und zukünftigen Preisinformationen.

Bei der Übermittlung und Auswertung der Messwerte hat sich die Zahl von 96 Datensätzen pro Tag, also ein Datensatz je Viertelstunde, schon als Standard herauskristallisiert. Dieser

Standard kann auch bei zukünftigen Tarifen, bei denen der Strompreis während einer Viertelstunde variieren kann, beibehalten werden – als Grundlage für die Bildung eines einzigen Datensatzes je Viertelstunde benötigt das Smart Meter dann alle Preise und ihre zeitliche Zuordnung. Dieser Viertelstundenrhythmus auf der Messseite wirft keine Probleme auf und wird hier nicht in Frage gestellt.

Ein Teilaspekt dieses Textes ist allerdings folgende Frage: Wird man diejenigen Smart Meters, die zu Beginn der flächendeckenden Einführung komplexer variabler Tarife bei den Kunden installiert werden, nach z.B. drei Jahren schon ersetzen müssen? Dies wäre dann nötig, wenn sich nach Einführung herausstellen würde, dass diese Art von Tarifen nicht ohne tiefe und kostspielige Eingriffe an allen mit Preisen oder Messungen befassten Stellen des Netzes fortgeführt werden könnte. Dafür, dass dies ein durchaus nicht unwahrscheinliches Szenario sein könnte, gibt dieser Text Anhaltspunkte.

Wer sich mit Smart Meters auskennt, bleibt bei dieser Perspektive u.U. gelassen, weil er um ihre Fähigkeiten weiß. Ein Smart Meter, das einfach durch Einspielen einer neuen Firmware ein völlig neues Verhalten erlernen kann, darf doch wohl als zukunftssicher gelten. Jedoch können die zu erwartenden Probleme mit sprunghaften Preisänderungen u.U. nur durch einen grundlegenden Systemwechsel gelöst werden, der folgende Bereiche betreffen könnte: Einplanung von Kraftwerkskapazitäten, Art des Stromhandels, Art der Abrechnung erzeugter und verbrauchter elektrischer Arbeit (z.B. durch Hinzunahme eines Relativfaktors), möglicherweise dynamische Preisanpassungen in Echtzeit mit Übermittlung einer Preisprognose an Stromkunden (grafisch) und Geräte (in Form von Datensätzen), möglicherweise weitere Besonderheiten je nach dem Konzept, für das man sich letztlich entscheidet. In diesem Text wird dargestellt, warum die gesamte Stromwirtschaft gezwungen sein könnte, in sehr kurzer Zeitspanne ein solches völlig neues System einzuführen, von dem bei der Investitionsentscheidung für die durchgängige Ausstattung mit neuen Smart Meters noch nichts absehbar wäre.

Smart Meters, wie sie heute und in den nächsten Jahren mit Blick auf Tarife mit sprunghaften Preisänderungen entwickelt und gebaut werden, sollten also nur so lange im großen Stil beschafft werden, wie sicher genug ist, dass komplexe variable Tarife noch z.B. mindestens fünf Jahre auf sich warten lassen werden.

Dies alles natürlich unter der Voraussetzung, dass die in den folgenden Abschnitten geschilderte Problemlage tatsächlich im Kern zutrifft. Dass das plausibel ist, wird in mehreren Schritten sowohl qualitativ als auch überschlägig quantitativ belegt. Dies ist natürlich weit entfernt von einem wissenschaftlichen Nachweis. Aber konkret genug, um zumindest die für Millioneninvestitionen nötige Sicherheit erheblich zu erschüttern.

## **1.2 Gute Gründe für die Viertelstundengrenze**

Heute und in näherer Zukunft bezieht sich vieles auf einen Rhythmus von ganzen Stunden. In diesem Text antizipiere ich zu erwartende Umstellungen auf Viertelstunden-Rhythmen. Das ändert qualitativ nichts, denn auch jeder Stundenwechsel findet ja zu einer vollen Viertelstunde statt!

Eins haben alle komplexen variablen Tarife gemeinsam, über deren greifbare Einführung diskutiert wird: Als Zeitpunkte für Preiswechsel werden volle Viertelstunden vorgesehen.

Das hat sehr gute Gründe:

1. Die Einplanung von Kraftwerkskapazitäten, die Aufstellung von Austauschfahrplänen der Regelzonen und der Handel an der Strombörse finden ebenfalls im Viertelstunden/Stunden-Rhythmus statt. Ein Großteil der Tarifmodelle mit Real-Time-Pricing wird sich hauptsächlich am EPEX-Spotmarkt orientieren.

2. Ein komplexer variabler Tarif mit z.B. 6...16 Preisänderungen pro Tag lässt sich gut tabellarisch darstellen, also wie in einem Preisblatt. Dabei werden Zeiten mit :00, :15, :30 oder :45 von den Kunden noch als „runde“ Zeiten empfunden, die man sich gut einprägen kann.

Ebenfalls sehr gut möglich ist eine grafische Darstellung des Preisverlaufs je Tag, solange die Preissprünge auf vollen Viertelstunden liegen. 96 Viertelstunden pro Tag kann man am Bildschirm recht gut überblicken und sich z.B. die teuersten Zeitabschnitte einprägen.

Bei solchen Tarifen kann sich also im Idealfall jeder Kunde aussuchen, ob er täglich die tabellarische oder die grafische Darstellung nutzt, um sich mit dem Preisverlauf zu befassen.

→ Tarife, bei denen Preisveränderungen zu irgendwelchen Zeitpunkten, also nicht genau auf der Viertelstundengrenze, stattfinden, sind in diesem Punkt besonders nachteilig: Eine grafische Darstellung kann hier höchstens „nettes Beiwerk“ sein; das Studieren der tabellarischen Darstellung ist unerlässlich. Dabei werden die allermeisten Menschen Probleme haben, sich vier oder mehr „krumme“ Zeiten wie 11:27 – 13:41, 16:42 – 19:03 länger als eine Minute zu merken.

→ Tarife mit (quasi-) kontinuierlichen Preisverläufen lassen sich nicht mehr tabellarisch, sondern nur noch grafisch darstellen. Dies allerdings sehr gut, denn mit einem längeren Blick kann man sich die teuersten Zeiten einprägen. Hierbei kommt es nicht darauf an, bestimmte Zeiten genau zu treffen, denn die Veränderungen gehen ja sanft vonstatten.

3. Wenn sicher ist, dass es im Laufe einer Viertelstunde keinen Preissprung gibt, kann das Last- und Kostenprofil auf Kundenseite mit 96 Datensätzen pro Tag erfasst werden. Diese Datenmenge lässt sich mit vertretbarem Einsatz an Ressourcen übertragen, speichern und abrechnen. Ein aus 96 Zeitabschnitten bestehendes Tages-Lastprofil lässt sich am Bildschirm gerade noch gut darstellen.

→ Diesen Vorteil haben allerdings auch andere Tarifmodelle, z.B. bei (quasi-) kontinuierlicher Preisveränderung. Auch dort gibt es im Laufe einer Viertelstunde keine Preis-Sprünge – sondern i.d.R. sanfte Veränderungen. Die im Smart Meter erfassten Daten je Viertelstunde können in einem einzigen Datensatz zusammengefasst werden (Schittek, 2012; 110).

→ Nur bei Preismodellen, die während des Verlaufs einer Viertelstunde einen Preissprung machen, werden 96 Datensätze pro Tag i.d.R. nicht ausreichen, denn der Kunde möchte natürlich wissen, wie viel Arbeit/Kosten während des teureren/billigeren Teils der Viertelstunde angefallen sind.

Diese drei Punkte mit ihren zusätzlichen Erläuterungen werden weiter unten im Text bei



der Bewertung der Bausteine und der Lösungsansätze in den Kapiteln 3 und 4 immer wieder eine (Neben-) Rolle spielen.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Viertelstundengrenze für Preisveränderungen sich aus Gründen der Einfachheit anbietet; alle anderen (kürzeren) Zeitbezüge wären in der Realisierung mit mehr Aufwand und mit Nachteilen verbunden.

### 1.3 Automatische Reaktionen sind sinnvoll

Variable Strompreise verfolgen auf wirtschaftlichem Wege ein technisches Ziel: Bei zukünftig (durch fortschreitenden Ausbau von Windkraft und Photovoltaik) immer stärker schwankendem Angebot soll sich die Strom-Nachfrage möglichst stark anpassen. Dadurch werden vorzuhaltende Kraftwerksleistungen im Spitzenlast-Bereich minimiert, und bei Bedarf kann die Nachfrage so gesteigert werden, dass sie auch zu einem eigentlich zu hohen momentanen Strom-Angebot passt.

In der ersten Zeit nach Einführung solcher Tarife wird (zumindest im Privatbereich) der Schwerpunkt auf manuellen Reaktionen der Stromkunden liegen. D.h. sie informieren sich immer wieder über die vorgesehenen Preisbewegungen und versuchen, ihren Geräteeinsatz zeitlich so zu legen, dass sie zu teuren Zeiten möglichst wenig Strom verbrauchen.

Je stärker die Tarife variieren, desto zeitintensiver und lästiger wird diese tägliche Aufgabe, die sich eigentlich niemand gewünscht hat. Die schwankenden Preise einfach zu ignorieren, werden sich die wenigsten Stromkunden auf Dauer leisten können.

Die Lösung liegt in automatischen Reaktionen von Geräten, so wie sie für größere Anlagen auf Seiten gewerblicher Stromkunden schon sehr bald nach Einführung solcher Tarife gang und gäbe sein werden. Die für eine automatisierte Steuerung von Haushalts- und gewerblichen Geräten nötigen Techniken gibt es schon (z.B. digitalSTROM) (Leibundgut, 2011; 25f), und die Kosten und der zusätzliche Energieverbrauch hierfür werden im Vergleich zum Nutzen vernachlässigbar sein.

Grundsätzlich sind automatische Reaktionen auch aus technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gründen sinnvoll, denn je stärker die Reaktion auf eine Preisveränderung ist, desto weniger gezielte Leistungsvariation ist auf Erzeugungsseite nötig, um z.B. eine Nachfragespitze abzudecken.

### 1.4 Automatische Reaktionen sind unvermeidlich

Nun möchte ich **ein kleines Gedankenspiel** machen: Nehmen wir einmal an, alle Netzbetreiber und Händler wären sich einig darin, mit allen Mitteln dafür sorgen zu wollen, dass möglichst wenig automatische Reaktionen von Geräten stattfinden – warum auch immer.

Dann würde jeder Stromversorger darauf achten, dass es bei den Methoden, mit denen er seinen Preisverlauf an die Kunden kommuniziert, möglichst wenig Übereinstimmung zu den Formaten der anderen Stromversorger gibt. Jeder Versorger würde z.B. seine Webseiten etwas anders aufbauen und im Extremfall alle paar Wochen wieder in einem neuen Format präsentieren. Das klingt verrückt, aber bleiben wir mal bei unserer Annahme.

Je komplexer die Tarife werden, desto stärker wird aber auf Seiten der Privatkunden der

Wunsch nach automatisierten Lösungen sein – denn sie wollen nicht mehr -zig Minuten pro Tag mit der Steuerung ihres Verbrauchs zubringen. So wird sich zwangsläufig selbst in kleinsten Versorgungsgebieten irgendein Dienstleister etablieren, der aus dem kommunizierten Preisverlauf immer wieder Datensätze in standardisiertem Format erzeugt. Diese lassen sich an einer Stelle einspeisen, die diese Informationen in geeigneter Weise bis in die Haushalte und zu den Geräten transportiert. Die Datenübertragung für diese Zwecke wiederum kann europaweit einheitlich oder mit sehr wenigen unterschiedlichen Verfahren erfolgen, so dass es für die Hersteller von Elektrogeräten kein Problem darstellt, den gesamten Markt mit Geräten zu versorgen, die automatisch auf sich ändernde Strompreise reagieren.

Bei neu entwickelten Elektrogeräten könnte die „Preisintelligenz“ gleich eingebaut werden. Bei langlebigen Altgeräten („weiße Ware“) lässt sich die automatische Reaktion auf die Preisinformation mit intelligenten Zwischensteckdosen fast genauso effektiv realisieren wie bei neuen Geräten. Ebenfalls denkbar ist eine zentrale Steuerung je Kundenanschluss, bei der statt der Preisinformationen Zustands- und Schaltinformationen über die Stromleitungen im Haus übertragen werden.

*Nicht dass das alles nur Zukunftsmusik wäre. Schon länger wird an der automatischen preisabhängigen Steuerung von Geräten und Anlagen in Haushalt und Kleingewerbe gearbeitet (Ringelstein et al., 2008). Und auch große Netzbetreiber stellen die Weichen für variable Tarife mit automatischen Reaktionen von Verbrauchsseite (Frey, 2006).*

Unser Gedankenspiel mit seiner extremen Annahme bringt uns somit zu folgendem Ergebnis: **Egal wie die Haltung der Netzbetreiber und Händler zu automatischen Reaktionen von Geräten und Anlagen auf Verbrauchsseite ist, ist es nur eine Frage der Zeit, bis potenziell alle in Frage kommenden Geräte automatisch reagieren.**

Aufgrund der geschilderten Not der privaten Stromkunden dürften nach der Einführung komplexer Tarife eher nur Monate statt Jahre vergehen, bis mehr und mehr Geräte automatisch reagieren. Man kann davon ausgehen, dass nach Ablauf einzelner weniger Jahre deutlich mehr als die Hälfte aller in Frage kommenden Geräte automatisch reagiert.

## 2 Lastsprünge an der Viertelstundengrenze

Dieses Hauptkapitel erarbeitet die Problemlage so ausführlich wie nötig. Jedes einzelne Unterkapitel und jeder einzelne Unterpunkt darin trägt dazu etwas Wichtiges bei. (Die Kapitel 3 und 4 kann man dafür bei Bedarf sehr abgekürzt lesen.)

Unser Gedankenspiel hat einen realen Hintergrund: Es gibt tatsächlich massive Gründe, warum die Netzbetreiber sich mit allen Mitteln gegen automatische Reaktionen von Geräten wehren sollten – wenn es denn Sinn hätte.

Dem einzelnen regionalen Versorger oder Händler, der alle Dienstleistungen des Übertragungsnetzbetreibers in Anspruch nimmt, können automatische Reaktionen von Verbrauchsseite sogar egal sein. Aber bei den für die Bereitstellung von Regelleistung Verantwortlichen dürften bei dem Gedanken alle Alarmglocken klingeln. Zumindest dann wenn es um geballte Reaktionen an der Viertelstundengrenze und nicht um gestreute Reaktionen

auf einen sich kontinuierlich verändernden Preis geht.

Allen variablen Tarifen grundsätzlich gemeinsam ist allerdings der wünschenswerte Effekt, dass sich die Strom-Nachfrage in mehr oder weniger starkem Maße an das schwankende Angebot. Für die bisher üblichen Tarife mit konstantem Strompreis gibt es bei zunehmendem Ausbau fluktuierender Erzeugung kein Existenzrecht mehr. Deshalb führen immer stärker variable Tarife und Smart Metering genau in die richtige Richtung. Es wäre fatal, diesen Fortschritt zu diskreditieren oder aufzuhalten.

Was ist nun so problematisch an der Viertelstunden/Stunden-Grenze, die komplexe variable Tarife mit ihren Preisveränderungen einhalten? Die Antwort auf diese Frage erschließt sich am besten Schritt für Schritt.

## 2.1 Korrelierte Preisverläufe

Hätte jeder regionale Stromversorger seine eigenen Einflussgrößen, aus denen er seinen Preisverlauf berechnet, und gäbe es zwischen den Einflussgrößen unterschiedlicher Versorger kaum Korrelationen, dann könnte man davon ausgehen, dass sich alle zur vollen Viertelstunde stattfindenden Lastwechsel meist recht gut ausgleichen. Jeder Versorger bräuchte nur seinen eigenen Preisverlauf und seine eigenen Lastprognosen im Blick zu haben und bräuchte sich um Lastsprünge kaum Gedanken machen.

Leider muss man jedoch davon ausgehen, dass die meisten Versorger ihre Preisverläufe anhand derselben Einflussgrößen berechnen – zuvorderst der Preisverlauf am EPEX-Spotmarkt. Wo bei einzelnen Versorgern andere Größen einen starken Einfluss haben, muss man dennoch davon ausgehen, dass es – z.B. bei recht einheitlichem Wetter – immer wieder eine starke Korrelation zum Preisverlauf anderer Versorger gibt. Nicht unbedingt bzgl. der absoluten Höhe der Preise, sondern bzgl. ihrer Bewegungsrichtung.

Beispiel: Bei trübem Winterwetter ohne große Luftdruckunterschiede dürfte es im ganzen europäischen Verbundnetz kaum einen Versorger geben, bei dem an einem Werktag um 11:00 Uhr MEZ/MESZ der Preis absinkt. Und kaum einen, bei dem um 23:00 Uhr der Preis ansteigt. Über ein konkretes Kalenderjahr verteilt wird man sehr viele solche Beispiele benennen können.

Trotzdem kann noch jeder Netzbetreiber seine Lastprognosen machen, und die werden meist ungefähr zutreffen. Je mehr automatische Reaktionen es gibt, desto weniger stark müssen die Preise variiert werden, um die gleiche Lastveränderung zu erreichen.

Wenn es für die Schaltzeitpunkte bei den automatischen Reaktionen von Geräten auf Preis-sprünge keinerlei Vorgaben gibt, muss man davon ausgehen, dass bei steigendem Preis genau zur vollen Viertelstunde viele oder sehr viele Geräte ihren Stromverbrauch verringern werden, z.B. Kühl-/Gefriergeräte. Entsprechend muss man damit rechnen, dass bei fallendem Preis viele Geräte ihren Stromverbrauch erhöhen – in dem Moment, in dem der Preis fällt, also genau zur vollen Viertelstunde. Dazu unten mehr.

Aus den Überlegungen bis hierher kristallisiert sich noch kein greifbares Problem heraus. Für den Ausgleich von Lastwechseln gibt es doch die Primär- und Sekundärregelung. Und außerdem möchte man ja durch einen fallenden Preis gerade zusätzlichen Stromverbrauch anziehen; es wäre also verkehrt, wenn daraufhin kein starker Lastwechsel käme – sollte

man meinen.

## 2.2 Lastsprünge allein schon durch Kühl-/Gefriergeräte

Für die folgenden Überlegungen wollen wir nur eine Art von Stromverbrauchern betrachten: Kühl- und Gefriergeräte und -anlagen im privaten und gewerblichen Bereich. Außerdem wollen wir bzgl. ihres Lastverhaltens nur Deutschland betrachten. Das Ergebnis vorweg: Es ist sehr plausibel, dass es allein durch Kühl-/Gefriergeräte mehrmals pro Woche Lastsprünge gibt, die den deutschen Anteil an der Primärregelreserve (zz. ca. 575 MW) um ein Vielfaches übertreffen. Wenn Entsprechendes in den anderen Ländern des Verbundnetzes passiert, würde allein durch diese Geräte die Primärregelung regelmäßig in die Knie gezwungen.

Natürlich wird jede/r, die/der sich bislang mit variablen Tarifen und Smart Metering beschäftigt hat, einer solchen Einschätzung nur dann zustimmen, wenn in den folgenden Überlegungen alle Bedenken und Lösungsansätze berücksichtigt werden. Es wird also recht umfangreich ...

Wie wird die Steuerung für ein Kühl-/Gefriergerät ausgelegt, das seine Arbeit rund um die Uhr zu niedrigstmöglichen Stromkosten (je Viertelstunde Aufsummierung von: el. Arbeit · Arbeitspreis) erledigen soll?

Eins vorweg: Verglichen mit einem ansonsten baugleichen Gerät, das auf herkömmliche Weise in relativ gleichmäßigem Rhythmus kühlt, wird solch ein Gerät ein paar Prozent mehr elektrische Arbeit leisten, s.u. *Diese Tatsache dürfte jedoch – egal ob nach Ressourcen-, Klima- oder Umweltgesichtspunkten – kaum negativ zu werten sein. Denn durch automatische Reaktionen auf Preisveränderungen werden Strom-Überangebote (z.B. bei starkem Wind) besser ausgenutzt und Strom-Engpässe abgeschwächt. Somit wird eine stark auf fluktuierender erneuerbarer Erzeugung basierende Stromversorgung gefördert.*

Die herkömmliche Steuerung eines Kühlgeräts ist so ausgelegt, dass die Innentemperatur immer innerhalb eines relativ engen Bandes gehalten wird. Eine ständige Verbreiterung dieses Bandes nach oben würde zu ständig wiederkehrenden wärmeren Temperaturen führen, die für das Kühlgut schädlich wären. Eine ständige Verbreiterung dieses Bandes nach unten ergäbe einen unnötig hohen Stromverbrauch.

Ganz anders ist eine nicht-ständige Verbreiterung des Temperatur-Bandes zu bewerten, die nur mit kleinen Zeitanteilen zum Einsatz kommt. Eine seltene und kurzfristige Verbreiterung des Bandes nach oben schadet dem Kühlgut nicht nennenswert – das kann in Relation zur Durchschnittstemperatur quantifiziert werden. Eine beliebig häufige Verbreiterung des Bandes nach unten führt zu einem erhöhten Durchschnitts-Stromverbrauch – natürlich nur in Zeiten, in denen sich das aufgrund deutlich niedrigeren Preises auch lohnt.

Beispielhaft greifen wir zunächst nur Kühlschränke heraus, und zwar Geräte heutiger Machart, die allerdings mit einer für zukünftige Bedingungen optimierten Steuerung ausgestattet werden. Wie sich die Ergebnisse verändern, wenn man Kühlschränke und Gefriergeräte zukünftiger Machart einbezieht, soll anschließend (in 2.3) separat betrachtet werden.

Im Folgenden wollen wir die Zeit zwischen zwei Preisminima (an einem trüben Tag z.B.

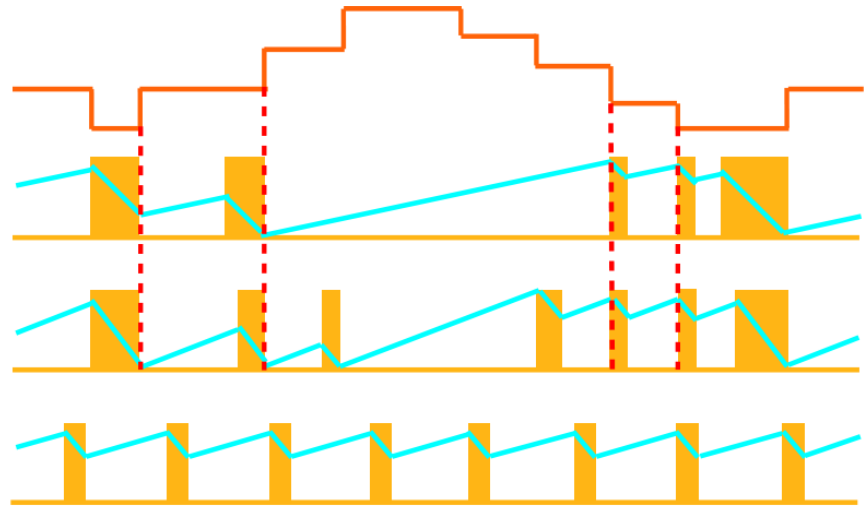
vor Mittag bis nach Mittag) betrachten. Ausgangspunkt ist eine Zeit (eine oder mehrere Viertelstunden), in der der Preis niedriger ist als vorher und nachher, also ein Minimum. Endpunkt ist ebenfalls ein Preisminimum. Eine Vereinfachung sei erlaubt: Das zweite Minimum soll preislich exakt gleich niedrig liegen wie das Anfangs-Minimum. *Wenn die Realität anders ist, ändert das nichts (qualitativ) bzw. wenig (quantitativ) an den folgenden Überlegungen; manches lässt sich dann nur nicht mehr so schön einfach formulieren.*

## Preisverlauf

### Voller Kühlschrank

### Fast leerer Kühlschrank

### Herkömmlicher Kühlschrank



(Abbildung ersatzweise einer eigenen Präsentation entnommen. blau = Temperatur, gelb = Kühlleistung, rot-gestrichelt = gleichzeitiges Schalten unabhängig von Fabrikat und Füllgrad)

Bezüglich des Schaltverhaltens der Geräte muss unterschieden werden:

- Manche (besonders gut isolierte und mit Kühlgut gefüllte) Geräte werden in der Lage sein, während aller höheren Preise zwischen den beiden Minima ohne Kühlleistung auszukommen. Solche Geräte werden sich exakt mit Beginn des ersten höheren Preises abschalten und exakt mit Beginn des nächsten Preisminimums wieder einschalten, um ihrem Kühlgut bei niedrigsten Stromkosten optimale Bedingungen zu bieten. Dies gilt für ausnahmslos jedes Preisminimum; einen Unterschied zwischen solchen Geräten kann es nur darin geben, ob und wie lange sie sich während des Preisminimums bei genügend niedriger Temperatur zwischenzeitlich abschalten.

- **Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken:**

Viele Geräte werden nicht die ganze Zeit zwischen zwei Preisminima auf Leistung verzichten können. Sie werden sich bei den beiden Preisminima genauso verhalten wie im vorigen Punkt beschrieben. Allerdings wird die Steuerung dieser Geräte dafür sorgen, dass sie sich nach Verlassen des Ausgangs-Preisminimums beim nächstteureren Preis noch einmal einschalten, natürlich nur so lange wie unbedingt nötig und so spät wie möglich. Entsprechend ist es bei Annäherung an das zweite Preisminimum. Hier werden diese Geräte sofort bei Erreichen des im Vergleich zum Minimum nächstteureren Preises einschalten, aber nur so lange wie nötig laufen, damit das Preisminimum bei der höchsten erlaubten Innentemperatur erreicht wird.

Dieses gezielte kürzere Einschalten vor Beginn bzw. nach Ende eines höheren Preises wird sich ggf. auch bei mehreren gestaffelten Preissprüngen nacheinander abspielen, bei Geräten, die bei weitem nicht die Zeit zwischen zwei Preisminima ohne Leistung über-

brücken können.

**Jeder solche Ausschaltvorgang wird am Beginn einer teureren Viertelstunde stattfinden, und jeder solche Einschaltvorgang am Beginn einer billigeren Viertelstunde.** Nur so wird das Kühlgut bei niedrigstmöglichen Stromkosten (den Umständen entsprechend) optimal gekühlt.

Eine Besonderheit gibt es noch: Wenn die Preisminima kurz sind, also z.B. nur eine einzige Viertelstunde dauern, werden manche Geräte über die volle Viertelstunde hinaus auch beim nächstteureren Preis noch durchgängig Leistung ziehen; bei einer weiteren Steigerung des Preises werden sie aber genau im Moment des Wechsels (vorübergehend) abschalten, also wiederum am Beginn einer teureren Viertelstunde.

Die obige ausführliche Beschreibung zu diesem Thema wird im Rest des Textes immer wieder referenziert als „Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken (2.2)“.

*Bei Aussagen zum Schaltverhalten von Kühl-/Gefriergeräten muss natürlich berücksichtigt werden, dass sie – je nach Bauart – ggf. zwischen Aus- und Wiedereinschalten eine Mindest-Ausschaltzeit einhalten müssen, die allerdings i.d.R. nur einen Bruchteil einer Viertelstunde ausmacht. Hierdurch ändern sich die Aussagen in diesem Text nicht.*

Bis hierher ist klar: Wenn auf die beschriebene Weise viele Kühlschränke gleichzeitig schalten, ergibt sich ein Lastsprung genau zur vollen Viertelstunde.

## 2.3 Zusammenballung von Lastsprüngen

Bei einem Tarifmodell, das sich direkt oder indirekt an Leistungsangebot und -nachfrage orientiert, gibt es an jedem Tag je nach Wetter 1 – 3 Preismaxima und entsprechend 1 – 3 Preisminima. Nachts wird man fast immer ein Preisminimum haben, mit Preisen, die oft deutlich unter den Preisen der tagsüber-Minima liegen.

Die Überlegungen in 2.2 gehen davon aus, dass Kühlschränke jedes Preisminimum ausnutzen müssen, um ihre Aufgabe einwandfrei zu erfüllen. Da ein nächtliches Preisminimum häufig tiefer ist als die anderen, besteht jedoch für die Gerätehersteller ein Anreiz, Geräte (z.B. mit Phase Change Materials) zu entwickeln, die tagsüber ganz oder fast ganz ohne Kühlleistung auskommen, sich also in erster Linie auf das nächtliche Preisminimum fokussieren.

Bezieht man nicht nur Kühlschränke, sondern auch Gefriergeräte in die Überlegungen ein, dann sollte man die Möglichkeit einkalkulieren, dass es zukünftig nennenswerte Anteile von Geräten geben könnte, die nicht einmal mehr jede Nacht Kühlleistung benötigen, sondern sich die billigsten Nächte der Woche aussuchen können.

Unser Interesse richtet sich nun auf diejenigen Situationen, in denen die größte Zusammenballung gleichgerichteter Schaltvorgänge bei Kühl-/Gefriergeräten und -anlagen stattfindet. Wenn alle denkbaren Arten von Geräten mit nennenswerten Anteilen vertreten sind, wird es um ein nächtliches Preisminimum herum stärkere Zusammenballungen von Schaltvorgängen geben als um die Preisminima tagsüber. Am stärksten werden die Zusammenballungen aber um besonders niedrige (nächtliche) Preisminima herum auftreten, die es nur einzelne Male pro Woche gibt.

Auf der Basis aller Überlegungen bis hierher lassen sich zusammenfassend folgende Aus-

sagen treffen:

**Nach einem länger dauernden besonders niedrigen Preisminimum ist damit zu rechnen, dass (vorsichtig formuliert) weit mehr als die Hälfte aller Kühl-/Gefriergeräte exakt zur vollen Viertelstunde abschaltet, sobald der nächsthöhere Preis wirksam wird.**

**Nach einem kurz dauernden besonders niedrigen Preisminimum wird man das Gleiche i.d.R. über die volle Viertelstunde sagen können, zu der der nächsthöhere Preis endet.**

**Entsprechendes gilt umgekehrt für das gleichzeitige Einschalten der Geräte bei der Annäherung an ein besonders niedriges Preisminimum.**

Die stärksten negativen und positiven Lastwechsel werden mehrmals pro Woche auftreten. Daneben sind mehrmals täglich weitere Lastwechsel von etwas geringerer Stärke zu erwarten, die sich jedoch ebenfalls massiv auswirken können.

Dies alles bezieht sich zunächst nur auf Kühl- und Gefriergeräte.

## 2.4 Unschöne Zahlen

Soweit die qualitativen Aussagen. Nun geht es um die absolute Stärke der zu erwartenden Lastwechsel.

Wir überschlagen: Wenn bei ca. 40 Millionen Haushalten in Deutschland jeder im Schnitt nur ein einziges Kühl- oder Gefriergerät mit einer Leistung von durchschnittlich nur 80 W hätte, wäre das eine Gesamtleistung von 3,2 GW. Wenn man für alle im gewerblichen Bereich am Stromnetz betriebenen Kühl- und Gefriergeräte und -räume eine Gesamtleistung von nur 1,8 GW ansetzt, ist das sicher nicht übertrieben. Somit kann man von einer Gesamtleistung von 5 GW ausgehen.

Nach der Einführung komplexer variabler Tarife dürfte es nicht allzu viele Jahre dauern, bis nahezu alle solchen Geräte automatisch auf den Preis reagieren; bei Altgeräten ggf. über intelligente Zwischensteckdosen mit Temperaturfühler. Denn durch die enormen Stromkostensparnisse besteht ein hoher Anreiz dazu, sie nicht einfach weiterlaufen zu lassen wie bisher.

Da man aus den obigen Schilderungen nicht mit letzter Sicherheit sagen kann, wie nahe an 100 % der Anteil der Geräte ist, der zur selben vollen Viertelstunde vor oder nach einem besonders niedrigen Preisminimum schaltet, sind wir mit folgender Aussage wohl auf der sicheren Seite:

**Mehrmals pro Woche muss damit gerechnet werden, dass mindestens 60 % der deutschen Kühl- und Gefriergeräte gleichzeitig in dieselbe Richtung (ein bzw. aus) schalten. Dies ergibt schlagartige Gesamt-Lastwechsel von 3...5 GW allein in Deutschland. Hierdurch würde allein von Deutschland aus und allein durch Kühl- und Gefriergeräte die Verbundnetz-weite Primärregelung (Auslegungsgrenze 3 GW) in die Knie gezwungen.**

## 2.5 Weitere automatische Reaktionen

Wer bei obiger Aussage Vorbehalte hat, weil er vielleicht etwas anders gerechnet hätte,

sollte sich klar machen:

- Wenn man Verbundnetz-weit alle Kühl- und Gefriergeräte in die Rechnung einbezüge, ergäben sich ca. 4...5x so große Zahlen.
- Auch bei vielen anderen Geräten bestünde die Tendenz, genau beim Wechsel zu einem günstigeren Preis ein- bzw. genau beim Wechsel zu einem teureren Preis auszuschalten, z.B. bei
  - ◆ elektrischen Warmwasserbereitern mit Vorratsspeicher (zukünftig auch Gas/Strom-Kombigeräte, die jeweils die momentan billigste Energieform nutzen),
  - ◆ elektrischen Speicherheizungen, soweit nicht per Rundsteuerimpuls geschaltet,
  - ◆ Elektroautos,
  - ◆ generell allen Anwendungen, die nur „irgendwann fertig werden“ sollen, z.B. Brenn-öfen.

Alle diese Geräte haben im Gegensatz zu Kühl- und Gefriergeräten eine Nennleistung von mehreren kW, so dass durch ihr gleichzeitiges Schalten ein vielfach stärkerer Lastwechsel hervorgerufen werden könnte. In der Zeit, in der variable Stromtarife sich durchsetzen und zunehmend komplexer werden, dürfte die Zahl der Elektroautos massiv zunehmen.

Wenn nur jeder 50. der 500 Mio. Einwohner des ENTSO-E-Gebiets ein 2-kW-Gerät hat, das – zu irgendeinem ungünstigen Zeitpunkt – gleichzeitig mit allen anderen schaltet, dann ergibt sich ein Lastsprung von 20 GW. Das entspricht nur 20 solchen Geräten in einem Ort mit 1000 Einwohnern. Es ist leicht vorstellbar, dass ein Vielfaches davon tatsächlich betrieben wird.

- **Schaltrhythmus-Anpassungen:**

Darüber hinaus gibt es viele Arten von Stromverbrauchern, die rund um die Uhr bzw. während ihrer Einschaltdauer eine Größe in einem nicht ganz engen Zielbereich halten sollen. Dies ist oft eine Temperatur, aber z.B. auch ein Pegel, ein Druck, eine Luftfeuchtigkeit. Beispiele hierfür:

- ◆ Wäschetrockner,
- ◆ Backöfen,
- ◆ Kaffeemaschinen,
- ◆ Wärmeplatten,
- ◆ Heizlüfter,
- ◆ Klimaanlage,
- ◆ Pumpen,
- ◆ Kompressoren,
- ◆ Luftentfeuchter.

Diese Geräte können ihren Stromverbrauch i.d.R. nur um -zig Sekunden bis einzelne Minuten verlagern, aber es geht meist – anders als bei den Kühlschränken – um Leistungen im kW-Bereich. Heute sind die Steuerungen dieser Geräte teils sehr simpel realisiert, aber bei komplexen variablen Tarifen werden die Hersteller die Möglichkeit sehen, schon bei den einfachsten Geräten mit einer Stromkostensparnis von einem oder mehreren € pro Jahr zu werben. Bei Billiggeräten kann das über die Lebensdauer die Hälfte des Kaufpreises ausmachen. Somit wird es einen starken wirtschaftlichen Anreiz geben, die Steuerungen – bei nur geringen Mehrkosten – so intelligent zu machen, dass



sie bei Annäherung an einen Preissprung den Toleranzbereich der zu regelnden Größe maximal ausnutzen und dann genau im Moment des Preissprungs schalten. Selbst Geräte, die sich nur in sehr engen Toleranzen bewegen können bzw. sich keinerlei Unregelmäßigkeit leisten dürfen (wie z.B. Elektroherde) können rechtzeitig vor Erreichen eines Preissprungs ihre Taktung so abstimmen, dass sie genau im Moment des Preissprungs passend schalten.

Die entscheidende Information hierbei ist: Jedes dieser verbreiteten Geräte wird, wenn es eingeschaltet ist, diese Strategie bei *ausnahmslos jedem* positiven oder negativen Preissprung anwenden. Um zu kalkulieren, wie stark ein korrespondierender Lastsprung sein mag, muss man also nur die Summe der Nennleistungen (bei Herden nur bezogen auf die momentan getakteten Platten) aller gerade europaweit eingeschalteten Geräte abschätzen.

*Wer davon ausgeht, dass diese ganze Schilderung gegenstandslos ist, weil die Kosten für intelligente Steuerungen zu hoch sind, mag folgenden Gedanken berücksichtigen: Die Industrie wendet seit Jahrzehnten die Strategie an, jede neue Produktgeneration wohldosiert mit immer wieder neuen, bisher nicht dagewesenen Features auszustatten. Dadurch wird ein Maximum an Käufern erreicht. Es muss nur ein einziger High-End-Hersteller irgendwann auf die Idee kommen, eine Art von Gerät mit einer intelligenten Steuerung auszustatten, die in dem beschriebenen Sinne arbeitet (aber sonst keinen Vorteil hat). Schon werden es die anderen Hersteller nicht vermeiden können nachzuziehen, um nicht ins Hintertreffen zu geraten. Man vergleiche die technischen Features von Automobilen der oberen Preiskategorie der 60er Jahre mit denen heutiger Kleinwagen. Wir reden hier über zukünftige Zeithorizonte von etlichen Jahrzehnten.*

Die obige ausführliche Beschreibung zu diesem Thema wird im Rest des Textes immer wieder referenziert als „Schaltrhythmus-Anpassungen (2.5)“.

- Ein Thema soll in diesem ganzen Text in Hinblick auf die Viertelstundengrenze ausgeklammert bleiben, wäre aber bei einer Gesamtlösung unbedingt zu berücksichtigen (vgl. Schittek, 2012; 55ff):

Es geht um die Nutzung des billigsten Nachtstroms durch Waschmaschinen, Geschirrspülmaschinen usw. Egal ob man den Strompreis nachts über 4...6 Stunden konstant niedrig hält oder ob die billigste Zeit deutlich kürzer ist: Wer will die Stromkunden daran hindern, dass alle ihre Geräte exakt mit Beginn der billigsten Zeit einschalten und dann zunächst überwiegend mit ihrer Nennleistung von z.B. 2 kW laufen? Wenn man davon ausgeht, dass in den billigsten Nächten eines dieser Geräte je 4 Einwohner läuft, ergäbe das allein in Deutschland schon einen Gesamt-Lastsprung von ca. 40 GW.

Für dieses Thema gäbe es (bei Beibehaltung der Viertelstundengrenze) Lösungsansätze, die z.T. Ähnlichkeit mit den unten behandelten hätten. Sie sollen hier nicht diskutiert werden; es soll nur das Bewusstsein geweckt werden, dass es dieses Thema auch noch gibt.

## 2.6 Lastsprünge und Lastprognosen

Aufbauend auf und passend zu Lastprognosen werden Kraftwerksfahrpläne erstellt. Wenn also die Lastprognose vorhersagt, dass in der billigsten Viertelstunde des Tages eine

gegenüber vorher und nachher deutlich erhöhte Last zu erwarten ist, wird dies ausgeglichen durch entsprechende Anpassung der Leistungen der Kraftwerke zu Beginn und am Ende der betreffenden Viertelstunde.

Nun könnte man vermuten, dass ein durch das gleichzeitige Schalten von Geräten verursachter Lastsprung einfach dadurch aufgefangen wird, dass sich gleichzeitig die Leistungen der Kraftwerke passend verändern. Dass dem nicht so ist, ergibt sich aus zwei Zusammenhängen.

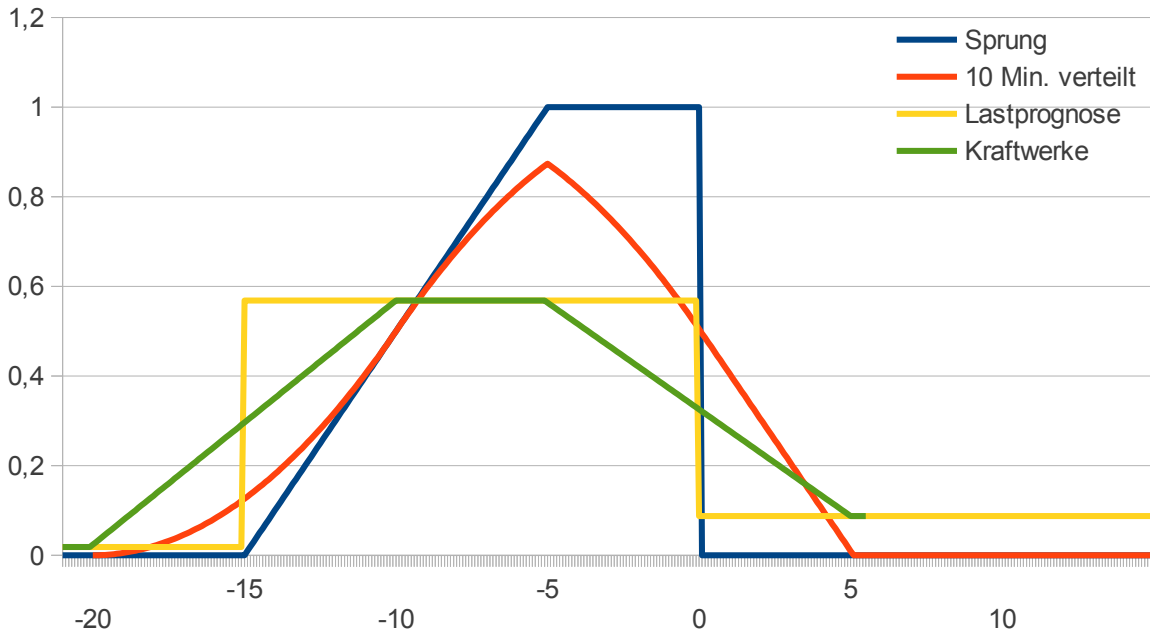
1. Austausch- und Kraftwerksfahrpläne werden nicht sprunghaft umgesetzt, sondern mit einer Rampe, die 5 Minuten vor der vollen Viertelstunde beginnt und 5 Minuten danach endet (UCTE, 2004; A1-18f). Diese allmähliche Leistungsänderung der Kraftwerke nützt also der Primär- und Sekundärregelung im Moment des Lastsprungs genau zur vollen Viertelstunde wenig.
2. **Übersteigende Lastsprünge:** Lastprognosen bilden den Durchschnittswert der Leistung je betrachtetem Intervall ab und nehmen keine Rücksicht auf die zeitliche Verteilung innerhalb des Intervalls. Da man bisher immer von stochastischen Leistungsänderungen bei einer sehr großen Zahl Beteiligter ausgehen konnte, war es für die Frequenz-Wirkleistungsregelung (Primär-/Sekundärregelung und Minutenreserve) kein Problem, die allmählichen Abweichungen vom Durchschnitt aufzufangen.

Durch automatische Reaktionen auf Preissprünge gibt es starke Laständerungen genau zur vollen Viertelstunde. Diese finden sich grundsätzlich auch in den Lastprognosen wieder – aber leider nur zum Teil.

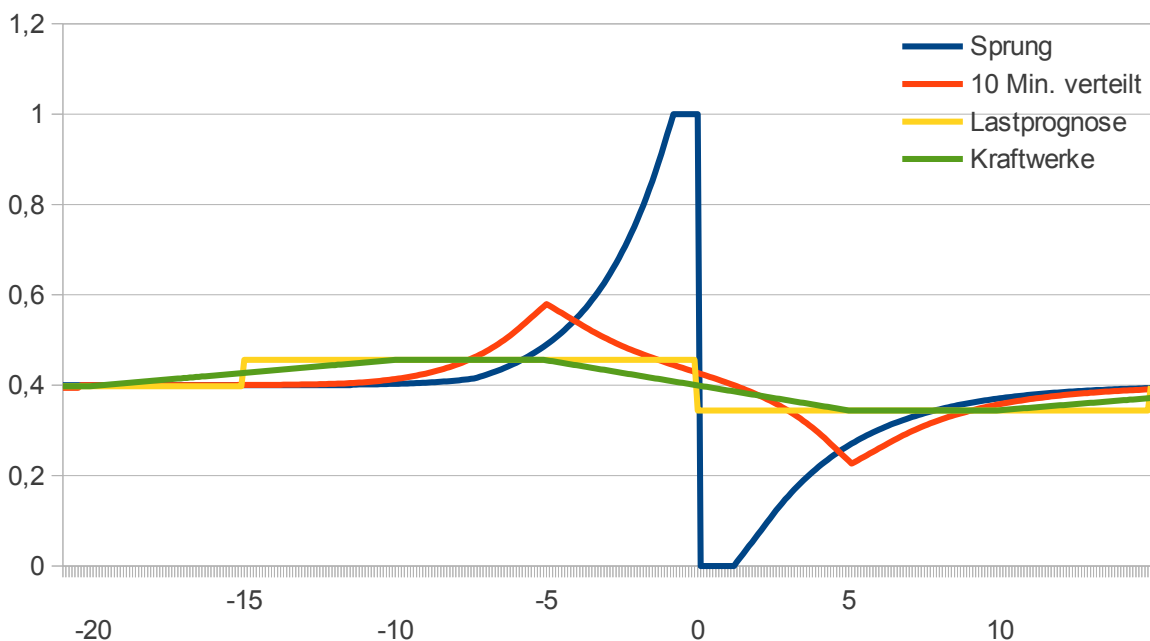
Unter den Schlagworten „Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken“ (2.2) sowie „Schaltrhythmus-Anpassungen“ (2.5) wurden zwei Gründe genannt, aus denen Geräte nur für Teile von Viertelstunden ihr Verhalten ändern, mit Blick auf einen bevorstehenden Preisanstieg bzw. auf eine soeben erfolgte Erniedrigung des Preises. Bei Kühlschränken wird man davon ausgehen können, dass sie in bestimmten Situationen für eher mehr als 5 Minuten einer Viertelstunde einschalten. Bei den anderen Geräten werden die Schaltrhythmus-Anpassungen in Summe zu einer Last-Zusammenballung in einem Zeitraum von deutlich weniger als 5 Minuten direkt bei der vollen Viertelstunde führen. Insgesamt muss man damit rechnen (vgl. die Grafiken unten), dass

- ◆ der Gesamt-Lastsprung durch die geschilderten Zusammenhänge deutlich stärker ausfällt, als die Unterschiede der Lastprognosen der beiden betroffenen Viertelstunden erkennen lassen.
- ◆ durch das Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken (2.2) während der Viertelstunde vor einem positiven Preissprung bzw. während der Viertelstunde nach einem negativen Preissprung eine kontinuierliche starke Lastveränderung in Gegenrichtung zum Lastsprung stattfindet.
- ◆ durch die Schaltrhythmus-Anpassungen (2.5) in den letzten 5 Minuten vor einem Lastsprung sowie in den ersten 5 Minuten nach einem Lastsprung eine kontinuierliche starke Lastveränderung in Gegenrichtung zum Lastsprung stattfindet.
- ◆ sich bei einer gleichmäßigen Verteilung der „normalen“ (nicht übersteigenden) Lastsprünge über eine Rampe von ca. 10 Min. (wie unten in 3.3 Punkt 1. beschrieben) keineswegs auch die übersteigenden Lastsprünge von selbst gleichmäßig mit verteilen. Es entstehen vielmehr Rampen mit zeitabhängig variierenden Steigungen.

Der auf 10 Minuten verteilte Lastsprung durch Schaltrhythmus-Anpassungen (unten zweite Grafik) sieht auf den ersten Blick recht „harmlos“ aus. Jedoch sind in beiden Grafiken die Leistungen relativ zum unmodifizierten Lastsprung angegeben. Aufgrund der in 2.5 geschilderten Zusammenhänge darf man befürchten, dass die stärksten Lastsprünge durch Schaltrhythmus-Anpassungen 3...10 Mal so stark werden könnten wie diejenigen durch Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken.



Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken - isoliertes vereinfachtes Beispiel



Schaltrhythmus-Anpassungen - isoliertes vereinfachtes Beispiel

Um sich einen groben quantitativen Eindruck zu verschaffen, könnte man im ersten Anlauf annehmen, dass sich während jeder betroffenen Viertelstunde eine konstante Leistungsänderungsgeschwindigkeit ergibt, bezogen auf alle diese Geräte. Die auf die Geräte bezogene durchschnittliche Last entsprechend Lastprognose ist dann halb so groß

wie der durch diese Geräte verursachte Anteil am Gesamt-Lastsprung.

Die obige ausführliche Beschreibung zu diesem Thema wird im Rest des Textes immer wieder referenziert als „übersteigende Lastsprünge (2.6)“.

Fazit: Selbst wenn man einen Weg findet (vgl. 3.3), um die Kraftwerksfahrpläne für den Ausgleich der eigentlich sprungartigen durchschnittlichen Laständerung nutzbar zu machen, muss man zusätzlich einen Weg finden, um die Primärregelung vor den deutlich übersteigenden Sprunganteilen zu bewahren.

Ob die Erstellung ausreichend genauer Last- und Lastsprungprognosen angesichts sprungartiger Preisveränderungen mit starken automatischen Reaktionen zukünftig möglich sein wird, soll nicht Thema dieses Textes sein. Allenfalls wird darauf hingewiesen wenn die Genauigkeit der Prognosen für einen bestimmten Zweck eine besondere Rolle spielt.

## 2.7 Zwischenfazit

Sehr bald nach Einführung komplexer variabler Tarife werden sich an Viertelstunden-Grenzen Lastsprünge ergeben, die durch die Primärregelung nicht aufgefangen werden können. Auf lange Sicht, wenn potenziell alle Geräte automatisch auf Preisbewegungen reagieren, werden diese Lastsprünge ein hohes Vielfaches der Primärregelreserve ausmachen.

Selbst wenn man durch vielerlei Maßnahmen erreichen könnte, dass alle in Europa gleichzeitig schaltenden Geräte zusammen maximale Lastsprünge von „nur“ 1...2 GW verursachen würden, müsste man sich sagen lassen, dass die Primärregelung für solche „geplanten“ sprunghaften Lastwechsel nicht gedacht ist. Bei geplanten Lastwechseln auf Erzeugungsseite werden maximale Leistungsänderungsgeschwindigkeiten bzw. „Rampen“ eingehalten. Die Auslegungsgrenze der Primärregelung wurde anhand der Wahrscheinlichkeit aller ungeplanten Lastwechsel (z.B. durch Ausfall von Netzeinrichtungen) festgelegt, und diese können ja theoretisch auch genau zur vollen Viertelstunde eintreten. Man wird sogar für den Moment der Beanspruchung von Netzeinrichtungen durch netzweite schlagartige Lastwechsel eine deutlich erhöhte Wahrscheinlichkeit des Ausfalls von Netzeinrichtungen ansetzen müssen.

Die Auslegung der Primärregelung müsste also selbst dann neu ermittelt (d.h. erhöht) werden, wenn man es schaffen würde, die Viertelstunden-Lastwechsel europaweit auf utopisch „niedrige“ 1...2 GW zu begrenzen. Diese Aussage gilt genauso, wenn kurz nach Beginn der Verbreitung automatischer Reaktionen von Geräten (z.B. im gewerblichen Bereich) die schlagartigen Lastwechsel noch nicht über 3 GW hinaus gehen.

Mit anderen Worten: **Variable Tarife, die automatische Reaktionen von Geräten provozieren, dürfen erst eingeführt werden, wenn es einen hierzu passenden Plan für die Aufstockung der verbundnetzweiten Primärregelreserve gibt. Dass es hierfür irgendein Konzept mit bezahlbarem Gesamtaufwand geben kann, ist schwerlich vorstellbar.**

Obwohl ich mich bemüht habe, keine extremen Annahmen zu treffen, wird sich kaum ver-

meiden lassen, dass manche Leser meine Darstellungen als „aufgebauscht“ bezeichnen. Sie werden also andere Annahmen für realistisch halten. Die Frage ist jedoch: Ändert sich mit dem, was sie für realistisch halten, wirklich qualitativ etwas an der Problemlage?

### 3 Bausteine für Lösungsansätze

Kapitel 4 basiert auf den hier beschriebenen Bausteinen. Trotzdem reicht es zur Not, wenn man außer dieser Einführung nur noch 3.3 (ohne Unterkapitel) sowie 3.3.7 bis 3.5 liest und sich von allen anderen nur einen kurzen Eindruck verschafft. Wer allerdings schon eine Meinung hat, auf welche Weise die Problematik zu lösen wäre, sollte die dazu passende Beschreibung (hoffentlich nicht in 3.1) gründlich lesen – falls es noch keine passende Beschreibung gibt, bitte Info an den Autor.

Wer den Ausführungen bis hierhin (überwiegend) zustimmen kann, wird völlig zu Recht darauf verweisen, dass dadurch ja nur ein Problem aufgezeigt wurde. Jedes Problem sollte aber erst einmal für lösbar gehalten werden, so auch hier.

Für das Folgende müssen wir eine Annahme treffen: Wie groß mag der mehrmals wöchentlich zu erwartende stärkste Lastsprung zu einer vollen Viertelstunde sein, der durch alle bisher erwähnten Arten von Geräten und Anlagen bei vollständig automatischer Reaktion verursacht würde? Bezogen auf das ENTSO-E-Gebiet mit einer Primärregelreserve von 3 GW wollen wir anhand der oben in 2.5 genannten Zahlen (ohne Wasch- und Geschirrspülmaschinen) einen Lastsprung von 30 GW ansetzen. *Wenn man alle Annahmen in die jeweils passende Richtung dreht, könnte man hier auch auf einen kleineren Wert von z.B. 20 GW kommen, aber es wären genauso gut auch 50 GW und mehr denkbar.*

Diese 30 GW werden uns im Folgenden immer wieder begegnen.

Lastveränderungen dieser Größenordnung können niemals erwünscht sein, sondern kommen – wie oben in 2.2 beschrieben – als Resultat der Kostenminimierungs-Strategien der Geräte zu Stande. Denn der Preis macht ja in großen zeitlichen Abständen Sprünge, anstatt sich ständig sanft anzupassen, wie es angesichts der Verläufe von Angebot und Nachfrage ideal wäre.

Manches, was einem bei erstmaliger Beschäftigung mit der Thematik spontan als ein oder gar „der“ Lösungsansatz in den Sinn kommt, stellt sich bei genauerer Betrachtung als mögliches Element einer aus mehreren abgestimmten Elementen bestehenden Lösung heraus – oder dann doch als ungeeignet.

Dieses Kapitel 3 enthält, aufgeteilt auf Bausteine, die Details der Lösungsansätze, die in Kapitel 4 dann nur noch zusammengefügt werden. Ohne Kenntnis der Bausteine wird man die Bewertungen der Lösungsansätze kaum nachvollziehen können. Nebenbei wird verständlich, warum eine dauerhafte Lösung der in Kapitel 2 umrissenen Problematik nur bei konsequenter Verfolgung des Themas auf allen Ebenen möglich ist.

Hinweise:

Immer wenn bei den Bausteinen Vorteile oder Nachteile beschrieben werden, die an anderer Stelle (z.B. bei den aus Bausteinen zusammengesetzten Lösungsansätzen) referenziert werden, erhalten sie eine fett gedruckte Kurzbezeichnung. Dort wo sie

referenziert werden, wird die Kurzbezeichnung benannt und in Klammern das Kapitel der ausführlichen Beschreibung.

Jede mögliche Eigenschaft von Bausteinen bzw. Lösungsansätzen kann entweder ein Nachteil sein oder ein Vorteil. Ist sie ein Nachteil, dann wird ihr Fehlen nicht als Vorteil benannt, und umgekehrt.

Auf einen denkbaren „Baustein“ für Lösungsansätze soll hier nicht eingegangen werden: Verbote. Wenn komplexe variable Tarife nur eingeführt werden könnten, indem man zugleich verbietet, dass z.B. Kaffeemaschinen und Wäschetrockner – wie in 2.5 skizziert – bei ausnahmslos jedem Preissprung einen Lastsprung machen, wäre das als Armutszeugnis aufzufassen. Auf solche Weise rückt man (vermeidbare) Schwächen des Stromversorgungssystems ins kritische Licht der Medien und weckt zivilen Ungehorsam (ähnlich wie bei „zu große Variation“ in 3.3.2 beschrieben). Manche der im folgenden angeführten weniger geeigneten Lösungsansätze stünden etwas besser da, wenn sie von Verboten flankiert würden, aber darauf wird in diesem Text nicht eingegangen.

Zunächst jedoch ein kurzer Blick auf denkbare Lösungsansätze, die sich aus unterschiedlichen Gründen als ungeeignet herausstellen.

### **3.1 Von vornherein ungeeignete Lösungsansätze**

*Dieser gesamte Text bezieht sich auf nicht-dynamische Tarifmodelle, deren Preisverläufe nicht in Echtzeit ermittelt, sondern mit genügend langem Vorlauf (i.d.R. mindestens ein Tag) bekannt gegeben werden. Von daher sind alle Lösungsansätze ungeeignet, die unter Berücksichtigung der Momentansituation (z.B. Auslastungsgrad der Primärregelung) auf eine Abweichung von den angekündigten Zeitpunkten von Preisänderungen abzielen. Diese Abweichungen müssten außerdem zeitnah an sämtliche Geräte und Stromkunden kommuniziert werden, was den Aufwand ähnlich hoch triebe wie bei einem echten dynamischen System, aber ohne dessen Vorteile.*

*Dieser gesamte Text bezieht sich außerdem darauf, dass Geräte nach Vorgaben der Benutzer autonom anhand einer Preisinformation entscheiden, wann und wie sie ihre Leistung variieren. Von daher sind Lösungsansätze ungeeignet, die diese autonome Entscheidung aushebeln wollen, z.B. durch verpflichtende Berücksichtigung von Rundsteuersignalen, die zum Ein- oder Ausschalten zwingen. Dies wird spätestens dann deutlich, wenn man sich klarmacht, dass die „von oben“ vorgegebene zeitliche Verlagerung des Schaltens sich nicht nur auf das Einschalten, sondern genauso auch auf das Ausschalten beziehen müsste – wobei der Verteilnetzbetreiber keine Informationen über den Gerätezustand (z.B. die Innentemperatur eines Kühlschranks) besitzt. Bei einer Verschiebung um etliche Minuten käme auch wieder das unten in 3.3.2 unter dem Schlagwort „Zu große Variation“ beschriebene Bündel von Nachteilen zum Tragen. Hier wäre es absehbar, dass Tricks die Runde machen, wie man die Berücksichtigung von Rundsteuersignalen beim einzelnen Gerät deaktivieren kann.*

*Lösungsansätze, die die Primärregelung kurz vor einem erwarteten preisbedingten Lastsprung manipulieren (vorprägen) wollen, sind ungeeignet:*

- Falls die Manipulation die Leistung der Primärregelung maximal in die Richtung bewegt, in die sie auch nach Auftreten des Lastsprungs arbeiten soll, bewegt sich die Frequenz vor dem Lastsprung in Gegenrichtung zur bevorstehenden Frequenzveränderung. Beträgt der Lastsprung deutlich mehr als 3 GW, so bewegt sich die Frequenz transient durch die Sollfrequenz und dann in die andere Richtung, und die Primärregelung hat keinerlei Leistungsreserve mehr, um dem entgegenzuwirken.
- Falls die Manipulation die Leistung der Primärregelung maximal entgegen der Richtung bewegt, in die sie nach Auftreten des Lastsprungs arbeiten soll, steckt dahinter der Gedanke, dass sie 6 GW Hub zur Verfügung haben soll, um den Lastsprung auszugleichen. Erreicht werden könnte dies dadurch, dass die Minutenreserve schon vor dem Lastsprung ihre Leistung um 3 GW entgegen dem Lastsprung verändert, ihn also schon vorab teilweise ausgleicht. Man mag sich außerdem vorstellen, dass die Minutenreserve einzelne Sekunden vor dem Lastsprung beginnt ihre Leistung mit sehr hoher Leistungsänderungsgeschwindigkeit weiter zu verändern auf die prognostizierte Stärke des Lastsprungs. Wenn dann ein Lastsprung von mindestens 3 GW kommt, muss die Primärregelung sich nur auf Normalleistung zurückbewegen und ggf. noch Abweichungen der Lastsprung-Prognose ausgleichen.  
Dieser Lösungsansatz ist einerseits zu abenteuerlich, andererseits mit Mühe und Not für Lastsprünge bis maximal 7...10 GW geeignet, nicht für bis zu 30 GW.

### 3.2 Standardbaustein: Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts

Ein oft unverzichtbarer Baustein für einen tauglichen Lösungsansatz ist eine Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts, die Geräte und Anlagen realisieren müssen, wenn sie mittels eines Schaltvorgangs auf den Preisverlauf reagieren.

Im Standardfall liegen die möglichen Zeitpunkte für Preisänderungen im Abstand von 1 Minute, und die Zufallsvariation soll dafür sorgen, dass sich das Schalten aller Geräte gleichmäßig verteilt. In diesem Fall muss die Vorgabe lauten: Variationsbereich  $-30...+30$  Sekunden.

Schaltvariationen von 30 s führen zu keinen nennenswerten Abrechnungs-Nachteilen und dürften von allen Kunden toleriert werden.

Die im Folgenden benannten Vorteile und Nachteile beziehen sich auf den genannten Standardfall.

#### **Vorteil:**

- Aus mehreren Lastsprüngen zu aufeinanderfolgenden vollen Minuten wird eine quasi-kontinuierliche Lastveränderung.

#### **Nachteile:**

##### • **Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation:**

Man wird die Hersteller der intelligenten Steuerungen für preisbasiertes Schalten kaum daran hindern können, dass die Geräte situationsabhängig entscheiden ob sie den vorgesehenen Schaltzeitpunkt genau auf die volle Minute legen oder – je nach Situation – 30 s davor oder danach. Beispiel:

Das Ende eines Preisminimums steht bevor. Weil es nur kurz dauert, kann ein Kühlschrank nicht weit genug herunterkühlen, um alle teureren Preise bis zum nächsten Minimum zu überbrücken. Er merkt sich vor, dass er kurz vor Ende des nächstteureren Preises noch einmal für 10 Minuten kühlt, d.h. er wird diesen teureren Preis sowieso noch nutzen müssen. Für ihn ist es nun am günstigsten, den niedrigsten Preis in jedem Fall bis zum Ende auszunutzen. Die Steuerung stellt den vorgesehenen Schaltzeitpunkt deshalb auf 30 s nach Ende des Preisminimums ein. Die Zufallsvariation entscheidet, für wie viele von den ersten 60 s des nächstteureren Preises der Kühlschrank noch weiterkühlt.

Derselbe Kühlschrank, dieselbe Steuerung: Das Ende eines Preisminimums steht bevor. Weil es mehrere Stunden dauerte, hat der Kühlschrank zwischenzeitlich abgeschaltet. Rechtzeitig vor Ende des Minimums schaltet er sich noch einmal ein, um den niedrigen Preis maximal auszunutzen. Allerdings achtet die Steuerung darauf, dass danach der vorgesehene Ausschaltzeitpunkt auf 30 s vor Ende des niedrigsten Preises gesetzt wird. Die Zufallsvariation entscheidet darüber, wann der Kühlschrank in den letzten 60 s des Preisminimums abschaltet. Dass er noch in den ersten Sekunden des teureren Preises kühlt, hat die Steuerung durch ihr Vorgehen ausgeschlossen.

Auf diese Weise kann ein auf 10 Schaltminuten verteilter Lastsprung (vgl. die Grundbausteine in 3.3), der eigentlich recht genau mit den Fahrplanrampen übereinstimmen sollte, zeitlich nach vorne oder hinten verschoben sein, was bei sehr großen GesamtLeistungsänderungen die Primärregelung deutlich beanspruchen würde.

Neben der Dauer eines Preisintervalls kann auch der Preisunterschied zwischen dem momentanen Preis und dem neuen Preis ausschlaggebend dafür sein, ob die Steuerung das Risiko, zufallsgesteuert einen teureren Preis mit zu nutzen bzw. einen billigeren Preis nicht ganz auszunutzen, im Einzelfall in Kauf nimmt oder nicht. Wünschenswert wäre zukünftig also eine recht gut zutreffende Prognose dieses Verhaltens. Je nach Lösungsansatz gäbe es dann die Möglichkeit, die Schaltvorgänge trotz unterschiedlichen Verhaltens der Geräte innerhalb des einzuhaltenden Gesamt-Zeitfensters gleichmäßig genug zu verteilen.

- **Mögliche Manipulation der 30s-Zufallsvariation:**

*Wenn man die Zufallsfunktion in den Einflussbereich der Kunden verlagert, wird man nicht ausschließen können, dass sie manipuliert wird, z.B. durch illegale Firmware-Patches.*

*Aus folgenden Gründen kann man dieses Risiko vernachlässigen:*

- ◆ *Der Anreiz, eine Zufallsvariation von  $-30...+30$  s zu manipulieren, ist denkbar gering. Anders wäre dies bei deutlich längeren Zufallszeiten.*
- ◆ *Bei ungefähr gleich großen Lastsprüngen im Abstand von 60 s, die durch die Zufallsfunktion in eine quasi-kontinuierliche Laständerung umgewandelt werden sollen, darf ein nicht geringer Anteil (20 %? 50 %?) ohne Zufallsfunktion auftreten. Rotierende Masse (oder ein zukünftiges Substitut), Primär- und Sekundärregelung gemeinsam fangen die Schwankung der kontinuierlichen Laständerung auf, ohne dass dafür bezifferbar mehr Ressourcen benötigt würden.*
- ◆ *Selbst wenn es eine hohe generelle Motivation geben sollte, die Zufallsfunktion zu manipulieren, wäre dazu auch in zukünftigen Jahrzehnten doch wohl nur ein kleiner*



*Bruchteil der Stromkunden fähig und bereit.  
Dieser eher theoretische Nachteil wird im Folgenden nicht weiter erwähnt.*

### **3.3 Grundbausteine: Rampe statt Sprung**

Beim Durchspielen und Kombinieren von Lösungsansätzen kristallisiert sich ein grundlegendes Kriterium heraus, das alle tauglichen Ansätze erfüllen: Das Lastsprung-Potenzial der automatisch auf den Preisverlauf reagierenden Geräte muss so in verträgliche Bahnen gelenkt werden, dass insgesamt verteilt sprunghaftes Verhalten mit quasi-kontinuierlichem Charakter entsteht. Mit anderen Worten: Ein Lösungsansatz ist so lange untauglich, wie er den geballt sprunghaften Charakter der Reaktionen auf Preisänderungen nur quantitativ verändern will. Dies ist, wie gesagt, ein Erfahrungswert, der durch die erste gefundene Ausnahme widerlegt werden könnte.

Der erwähnte quasi-kontinuierliche Charakter lässt sich in zwei grundlegend verschiedenen Ausprägungen darstellen:

#### **1. Übereinstimmende Rampen:**

Man sorgt dafür, dass sich die Schaltvorgänge möglichst gleichmäßig über einen Zeitraum von ca. 10 Minuten um die volle Viertelstunde herum verteilen. Die Weise, auf die man das erreicht, kann von Lösungsansatz zu Lösungsansatz sehr unterschiedlich sein – trotzdem sind alle erstmal tauglich. Eine Bedingung muss bei der Verteilung allerdings eingehalten werden: Falls Versorger unterschiedlich eingeteilt werden, muss sicher gestellt werden, dass keiner von ihnen gegenüber anderen benachteiligt wird, z.B. beim viertelstundenbasierten Strom-Einkauf.

Auf Erzeugungsseite werden fahrplanbedingte Leistungsänderungen von einer Viertelstunde/Stunde zur nächsten per Rampe mit konstanter Leistungsänderungsgeschwindigkeit umgesetzt, die 5 Minuten vor der vollen Viertelstunde beginnt und 5 Minuten danach endet (UCTE, 2004; A1-18f).

Wenn die über etliche Minuten gestreuten preisbasierten Lastsprünge für die Erstellung der Lastprognosen weiterhin als ein Sprung zur vollen Viertelstunde einkalkuliert werden, decken sich die entstehenden Rampen auf Verbrauchs- und Erzeugungsseite sowohl von der Zeit als auch von der Leistungsänderungsgeschwindigkeit her. Dass dieses Vorgehen mit der Exaktheit der Lastprognosen steht und fällt, wird klar mit Blick auf die Beispielzahl von 30 GW Leistungsänderung während der 10 Minuten.

Mit alledem sind allerdings die übersteigenden Lastsprünge (2.6) noch nicht abgedeckt; dafür gibt es jedoch einen zusätzlichen Baustein (siehe 3.4).

Sind die Rampen so realisiert, dass sich die Leistungsänderungen für jeden Versorger in gleicher Weise um die volle Viertelstunde herum verteilen, dann kann der Stromhandel weiterhin im Viertelstundenrhythmus stattfinden.

2. Man etabliert ein von vornherein quasi-kontinuierliches Preissignal und schafft Randbedingungen, unter denen Geräte niemals geballt auf Preisveränderungen reagieren. Damit ist man völlig unabhängig von Fahrplanrampen usw.; der Charakter der preisabhängigen Laständerungen entspricht weitgehend dem preisunabhängiger stochastischer Schaltvorgänge. Damit können automatische Reaktionen auf den Preisverlauf auf die gleiche Weise aufgefangen werden wie Lastvariationen heute.

In den folgenden Unterkapiteln werden nun mehrere auf Punkt 1. basierende Varianten auf Vorteile und Nachteile untersucht. Werden bei einer Variante die in Punkt 1. beschriebenen Vorteile alle erreicht, so wird dies als Vorteil „Übereinstimmende Rampen (3.3)“ benannt.

Ein auf Punkt 2. basierender Lösungsansatz wird in 4.10 vorgestellt.

### **3.3.1 Verzicht auf festen Viertelstundenbezug**

Alle in den nachfolgenden Kapiteln 3.3.2 ff beschriebenen Grundbausteine wahren auf die eine oder andere Weise einen festen Bezug zur vollen Viertelstunde. Vorgeschaltet wollen wir aber auf die Möglichkeiten eingehen, die sich ergeben, wenn man diesen festen Bezug bewusst verlässt – oder es zumindest versucht. Warum dabei nur genau ein Baustein für Lösungsansätze herauskommt, wird im Folgenden zunächst erarbeitet, bevor der Baustein selbst in 3.3.1.4 beschrieben wird.

#### **3.3.1.1 Koordination ist unumgänglich**

*Wenn Preisbewegungen mit 15 Minuten Mindestabstand zu zu großen Lastsprüngen führen, liegt der Gedanke nahe, die 15 Minuten aufzuteilen, so dass z.B. alle fünf oder drei Minuten oder gar jede ganze oder halbe Minute ein Preiswechsel irgendeines Versorgers stattfinden darf. Damit ist die Erwartung verbunden, dass sich die automatischen Reaktionen von Verbrauchsseite auf die in Frage kommenden Zeitpunkte aufteilen und so statt eines riesigen Lastsprungs zur vollen Viertelstunde mehrere schwächere Lastwechsel nacheinander erfolgen, die von Primär- und Sekundärregelung besser aufgefangen werden können. Ergänzen könnte man dies noch um zufällige Variationen der Schaltzeitpunkte um  $-30\dots+30$  bis hin zu  $-150\dots+150$  s, je nach dem Rhythmus, in dem Preiswechsel stattfinden dürfen.*

*Ganz so einfach geht es allerdings nicht, denn der Viertelstunden/Stunden-Takt existiert ja weiterhin für die Einplanung von Kraftwerkskapazitäten und vor allem am EPEX-Spotmarkt. Jeder Versorger, der zu einem anderen Zeitpunkt als zur vollen Viertelstunde einen Preiswechsel durchführt, hat einen Nachteil, der sich in seinem Geschäftsergebnis niederschlägt. Ohne jegliche Koordination der Preiswechsel der unterschiedlichen Versorger muss man also davon ausgehen, dass die Preiswechsel trotz kürzerer möglicher Zeitabstände weiterhin überwiegend zur vollen Viertelstunde stattfinden, mit den in Kapitel 2 beschriebenen Auswirkungen.*

*Damit scheiden alle solchen Modelle aus, die ohne Koordination der Preiswechsel auskommen wollen. Bei der eingangs geschilderten Zielrichtung wird also eine verbindliche Regelung benötigt, die eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet.*

#### **3.3.1.2 Sinnvolle zeitliche Auflösungen**

*Wenden wir uns nun der Frage zu, in welcher zeitlichen Auflösung Preisveränderungen unterschiedlicher Versorger möglich sein sollen.*

*Es wird eine dauerhafte Lösung gesucht, die auch dann noch einwandfrei arbeitet, wenn nach etlichen Jahren nahezu die gesamte Verbrauchsseite automatisch auf*

Preisänderungen reagiert. Beim grundsätzlichen Festhalten an sich sprungartig verändernden Preisen in merklichen zeitlichen Abständen wird man sinnvollerweise eine Zufallsvariation hinzufügen, damit sich gleichverteilte Laständerungen über einen Zeitraum ergeben. Lange Zufallsvariationen von sehr viel mehr als  $-30...+30$  s wirken sich massiv aus (vgl. Nachteil „Zu große Variation“ in 3.3.2), was am ehesten den Bereich der Kundenzufriedenheit betrifft. Man wird also die möglichen zeitlichen Abstände zwischen den Preisänderungen verschiedener Versorger nicht bei 5 oder 3 Minuten, sondern kürzer ansetzen.

Da die Versorger ihren Strom mit Viertelstunden-Bezug einkaufen müssen, wären Tarifschaltzeiten in den mittleren fünf Minuten von Viertelstunden für sie unattraktiv; außerdem müssten Laständerungen dort von Primär- und Sekundärregelung aufgefangen werden, weil die Fahrplanrampen nur die ersten und letzten fünf Minuten abdecken. Das Ziel aller Bausteine in diesem Kapitel 3.3 ist ja, die Streuung der preisabhängigen Schaltvorgänge möglichst deckungsgleich zu den Fahrplanrampen der Kraftwerke zu machen. Die möglichen Zeitpunkte für Preisänderungen müssten sich also um volle Viertelstunden herum gruppieren. Bei einem 2-Minuten-Abstand ergäben sich Zeitpunkte :56, :58, :00, :02, :04 / :11, :13, :15, :17, :19 / usw., mit einer Zufallsvariation von  $-60...+60$  s. Leider führt dies nicht zu durchweg geraden Minutenzahlen, die man sich besser einprägen könnte. Damit gibt es keinen Vorteil zu einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute, aber einen Nachteil: Die doppelt so lange Zufallsvariation. Wir halten fest: mögliche Zeitabstände von mehr als 1 Minute haben mehr Nachteile als Vorteile.

### **3.3.1.3 Häufigkeit von Preisänderungen**

Noch ein Aspekt bedarf der Klärung: die tatsächliche Häufigkeit von Preisänderungen beim einzelnen Versorger.

In diesem Text wird beispielhaft eine Zahl von 6...16 Preiswechslern pro Tag für komplexe variable Tarife genannt, aus gutem Grund: Welchem Stromkunden – egal ob sein Tarif immer zur vollen Viertelstunde oder zu beliebigen Minuten Preissprünge macht – möchte man zumuten, sich mit 30 oder 50 Preisänderungen pro Tag auseinanderzusetzen? 6...16 Preiswechsel lassen sich noch gut als Tabelle oder grafisch unterstützt darstellen – vorausgesetzt, man arbeitet nicht mit Bruchteilen von Minuten.

Wenn man sich von einer tabellarisch gerade noch überschaubaren Maximalzahl von Preiswechslern pro Tag löst, kommt auch ein Tarif mit quasi-kontinuierlicher Preisveränderung in Frage. Sinnvollerweise mit ausschließlich grafischer Darstellung des Preisverlaufs (siehe 1.2 Punkt 2.). Hier sind Bruchteile von Minuten sinnvoller als Minutenabstände, um möglichst sanfte Preisveränderungen zu erreichen. Solch eine Vorgehensweise wurde in 3.3 Punkt 2. schon kurz umrissen; ein hierauf aufbauender Lösungsansatz ist in 4.10 beschrieben.

Nun ist klar: Löst man sich von festen Bezügen auf volle Viertelstunden (die in allen anderen Unterkapiteln dieses Kapitels 3.3 gewahrt werden), will aber an sprungartigen Preisverläufen festhalten, so bleibt eine einzige sinnvolle Variante übrig, die im Folgenden beschrieben wird. Diese beschränkt sich auf eine noch überschaubare Zahl von Preisänderungen pro Tag und hat eine zeitliche Auflösung von 1 Minute.

### 3.3.1.4 Grundbaustein 1: Koordinierte Preisbewegungen

Die Zusammenballung von Lastwechseln kann man auf unterschiedliche Arten (versuchen zu) vermeiden. Eine Methode hierfür wird weiter unten in 3.5 als „ent-korrelierte Preisbewegungen“ beschrieben: Zu jedem vorgesehenen Zeitpunkt macht nur ein Teil der Versorger eine Preisbewegung, während alle anderen den Preis konstant lassen. Dort werden die Preisbewegungen auf mehrere volle Viertelstunden verteilt, während wir hier einen anderen Ansatz verfolgen wollen: Die Preisbewegungen der unterschiedlichen Versorger sollen sich gleichmäßig auf die Minuten um eine einzige Viertelstunde herum verteilen – mit entsprechenden Vorteilen.

Wie am Ende von 3.3.1.3 festgehalten, macht dabei nur ein Zeitabstand von 1 Minute Sinn. Dies ergänzen wir um eine zufällige Variation der Schaltzeiten auf Verbrauchsseite von –30...+30 Sekunden.

Die Art der Tarife mit z.B. 6...16 Preiswechseln pro Tag kann beibehalten werden. Würde man die Versorger in feste Gruppen aufteilen, die definierte Abstände zur vollen Viertelstunde einhielten, ergäbe sich der weiter unten in 3.3.3 beschriebene Baustein. Also geben wir hier vor, dass es keine festen Gruppen von Versorgern geben soll. Dann muss verhindert werden, dass zu viele Versorger gleichzeitig ihren Preis verändern. Dies erreicht man durch eine Verbundnetz-weite Koordination: Die Versorger melden die zugrundeliegenden Lastprognosen und ihre gewünschten Preisbewegungen an eine Zentrale und erhalten modifizierte Zeitpunkte für Preisbewegungen im Bereich –5...+5 Minuten um die volle Viertelstunde herum zurück, die dann umgesetzt werden.

Dabei kann der bei anderen Grundbausteinen auftretende Nachteil „Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation“ (3.2) vermieden werden, indem die Zeitpunkte für Preisbewegungen unterschiedlich gewichtet werden, je nachdem wie stark und in welche Richtung das Meidungsverhalten prognostiziert wird.

#### **Vorteil:**

- Übereinstimmende Rampen (3.3).

#### **Nachteile:**

- **Integrierter Nachteilsausgleich zwischen Versorgern nötig:** Es muss ein System gefunden werden, mit dem die Versorger die Nachteile zentral vorgegebener Tarifschaltzeiten untereinander gegenrechnen können bzw. sich gegenseitig nachweisen können, dass sich Nachteile und Vorteile ausgeglichen haben. Dies lässt sich sicher in die zentralen Algorithmen integrieren – aber wie erlangt der einzelne Versorger Sicherheit, dass das System wirklich niemanden be- oder übervorteilt?
- Die Stromkunden müssen sich immer wieder wechselnde krumme Zeiten merken. Dies ist ein Ärgernis, das man kaum jemandem so begründen können wird, dass er denkt, man habe wirklich das denkbar beste System eingeführt.
- Alle Vorteile der Viertelstundengrenze (siehe 1.2) gehen bei diesem Baustein verloren; er verfehlt also sein Ziel vollständig.

### 3.3.2 Grundbaustein 2: Zufallsrampe

Für alle Geräte und Anlagen, die nicht per Rampe, sondern per Schaltvorgang auf den

Preisverlauf reagieren, wird eine zufällige Variation des Schaltzeitpunkts im Bereich – 300...+300 Sekunden vorgegeben, bezogen auf die volle Viertelstunde.

### **Vorteile:**

- **Verringerte übersteigende Lastsprünge:** Die durch Schaltrhythmus-Anpassungen (2.5) entstehenden übersteigenden Lastsprünge schrumpfen auf einen Bruchteil zusammen, weil die meisten der dort genannten Geräte durch die lange Zufallsvariation nicht mehr sinnvoll preisbasiert schalten können.
- Alle drei in 1.2 genannten Vorteile der Viertelstundengrenze bleiben erhalten, Nr. 3 allerdings mit Abstrichen.

### **Nachteile:**

- **Meidung teurerer Zeiten bei 300s-Zufallsvariation:**

Bei z.B. 6...16 Preisveränderungen pro Tag wird es immer wieder billige Zeitabschnitte geben, die 30 Minuten oder weitaus länger dauern. Je länger die Zeit im Einzelfall ist, desto mehr Geräte wird es geben, die nicht gezwungen sind, diese Zeit vollständig auszunutzen. Weil sie um die langen Zufallszeiten zur vollen Viertelstunde wissen, werden ihre Steuerungen mit dem vorgesehenen Schaltzeitpunkt einfach einen Sicherheitsabstand von 5 Minuten zur vollen Viertelstunde einhalten, so dass sich das tatsächliche Schalten der Geräte auf die Minuten –10:00...–0:00 statt –5:00...+5:00 verteilt. Damit findet aber die Hälfte der Gesamt-Lastveränderung dieser Geräte nicht im Gleichklang zur Fahrplanrampe statt, sondern bei konstanter Leistung der Fahrplankraftwerke. Das Resultat ist eine äußerst starke Beanspruchung der Primärregelung, die auf keinen Fall toleriert werden kann.
- **Zu große Variation:**

Bei kurz dauernden niedrigen Preisen ist es nicht praktikabel, die teureren Minuten konsequent zu meiden: Dazu müsste ein vorgesehenes Einschalten auf 5 Minuten nach Beginn der billigeren Zeit bzw. ein vorgesehenes Ausschalten auf 5 Minuten vor Ende der billigeren Zeit gelegt werden. Was bleibt dann noch von einer billigen Viertelstunde übrig? Also wird ein erheblicher Anteil des Stromverbrauchs zu einem teureren Preis erfolgen als eigentlich vorgesehen.

Der Arbeitszustand von Kühl-, Gefrier- und anderen Geräten kann vom Stromkunden i.d.R. akustisch wahrgenommen werden. Gleichzeitig ist er über die billigsten Viertelstunden informiert und wird leicht feststellen können, dass sich sein Kühlschrank z.B. 4 Minuten vor Ende der teureren Zeit einschaltet, aber dann auch 4 Minuten vor Ende der billigsten Zeit schon wieder abschaltet. Auch durch kritische Berichte in Medien werden die Kunden darüber informiert werden, dass die preisabhängige Steuerung aufgrund der Vorgaben keinesfalls ideal abläuft. Es wird einem kritischen Teil der Kunden kaum verständlich zu machen sein, warum die Geräte immer wieder schlechter sparen als es eigentlich möglich wäre.

Man muss nicht allzu schwarz malen, um vorauszusehen, dass es illegale Firmware-Patches für verbreitete Geräte und „besonders“ intelligente (und noch dazu deutlich billigere) Zwischensteckdosen ohne Zulassung geben wird, jeweils mit der Eigenschaft, dass die zufällige Variation fest auf 0 programmiert ist. Wenn auf diese Weise nur 10 % aller Geräte manipuliert wären, würden europaweit aus z.B. 30 GW Lastwechsel

innerhalb von 10 Minuten schon mehr als 3 GW genau zur vollen Viertelstunde, und die Primärregelung wäre wieder am Anschlag. Die entlastenden Argumente, die bei der möglichen Manipulation der 30s-Zufallsvariation (3.2) gelten, greifen hier nicht. Über die kundenseitigen Lastprofile könnten solche „Sünder“ zwar mit etwas Rechenintelligenz aufgespürt werden, aber das Verfolgen solcher Taten wäre eine sehr zweischneidige Angelegenheit, die immer wieder medienwirksam werden könnte. Zumindest dann, wenn die „Sünder“ zu Recht behaupten könnten, ohne Festhalten an der Viertelstundengrenze ließen sich die Preissteuerungen von Geräten viel kundenfreundlicher realisieren. „Ziviler Ungehorsam“ darf sich generell einer breiten Unterstützung erfreuen und ist in unserer Gesellschaft zumindest dort weit verbreitet, wo es ums eigene Geld geht.

### 3.3.3 Grundbaustein 3: Unterschiedliche Viertelstundenrhythmen

Jeder Tarif \* jedes Versorgers wird einer von ENTSO-E-weit elf Gruppen zugeordnet. Die Summe der elektrischen Jahresarbeiten, die über die Tarife abgerechnet werden, soll bei allen elf Gruppen gleich groß sein. Ein fester Plan, der die elf *Tarifschaltminuten*  $-5...+5$  täglich neu auf die elf Gruppen verteilt, wiederholt sich alle elf Kalendertage.

Beispiel: Für Kunden des FlexiPlus-Tarifs der Stadtwerke Marburg werden die Tarifschaltminuten  $-5...+5$  in der Zeit vom 17.03.-27.03.2018 durchlaufen, usw. Am 17.03. zwischen 0:10 und 24:05 Uhr werden die 12 eingeplanten Preisänderungen also immer 5 Minuten vor der vollen Viertelstunde wirksam, am Tag danach 4 Minuten vor der vollen Viertelstunde, usw.

Hinzu kommt eine Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts von  $-30...+30$  Sekunden, siehe 3.2.

Da der Stromeinkauf weiterhin viertelstundenbasiert erfolgt, sind die Nachteile der Versorger um so größer, je weiter ihre aktuelle Tarifschaltminute gerade von Minute 0 entfernt ist. Diese Nachteile gleichen sich jedoch innerhalb von elf Kalendertagen überwiegend aus. Nach 77 Kalendertagen bleiben nur noch geringe Nachteile in Verbindung mit Feiertagen übrig. Und nach deutlich längerer Ausgleichszeit werden sich keine Nachteile mehr benennen lassen.

#### **Vorteil:**

- Übereinstimmende Rampen (3.3).

#### **Nachteile:**

- Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation (3.2).
- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren ständigen Wechsel als Nachteile empfinden.
- Der erste unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird aufgegeben, der zweite wird angekratzt, der dritte kann mit Modifikation beibehalten werden.

---

\* Alle Tarife eines Versorgers, deren Preise sich grundsätzlich zeitgleich ändern, werden hierbei wie ein einziger Tarif betrachtet.

### 3.3.4 Grundbaustein 4: Kundenbezogene feste Tarifschaltminuten

Preisänderungen zur vollen Viertelstunde (d.h. auch zur vollen Stunde) werden verteilt über elf Minuten umgesetzt. Die Verteilung erfolgt – bei jedem Versorger in gleicher Weise – durch Einteilung aller Stromkunden in elf Gruppen mit gleicher *Tarifschaltminute* – 5...+5.

Hinzu kommt eine Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts von –30...+30 Sekunden, siehe 3.2.

#### Vorteil:

- Übereinstimmende Rampen (3.3).

#### Nachteile:

- Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation (3.2).
- Stromkunden, denen nicht die Tarifschaltminute 0 zugeteilt wurde, werden dies als Nachteil empfinden. Da sich der Zusammenhang gut erklären lässt, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Der zweite unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird angekratzt; der dritte kann mit Modifikation beibehalten werden.

### 3.3.5 Grundbaustein 5: Kundenbezogene benachbarte Tarifschaltminuten

Dieser Baustein ist identisch mit dem vorigen Grundbaustein (3.3.4), bis auf ein einziges Detail – das eine völlig neue Beschreibung bedingt.

Preisänderungen zur vollen Viertelstunde (d.h. auch zur vollen Stunde) werden verteilt über 10...11 Minuten umgesetzt, je nach Situation. Die Verteilung erfolgt – bei jedem Versorger in gleicher Weise – durch Einteilung aller Stromkunden in zehn Gruppen mit gleichen benachbarten *Tarifschaltminuten* –5/–4, –4/–3, ..., +4/+5.

Hinzu kommt eine Zufallsvariation des Schaltzeitpunkts von –30...+30 Sekunden, siehe 3.2.

Ein Kunde, dem beispielsweise die benachbarten Tarifschaltminuten –3/–2 zugeteilt wurden, weiß, dass Preisänderungen bei ihm immer entweder 3 oder 2 Minuten vor der vollen Viertelstunde stattfinden. Wann genau, erfährt er am Vortag aus einer Tabelle; dabei hat der Versorger freie Hand, die gewählte Schaltminute im Tagesverlauf beliebig häufig hin und her zu wechseln. Die Absicht dabei ist, die Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation (siehe 3.2) so zu antizipieren, dass letztlich doch eine gleichmäßige Übereinstimmung mit den Fahrplanrampen erreicht wird.

Die Zeiten lassen sich folgendermaßen relativ übersichtlich darstellen:

7:13 (7:15–2) 7:57 (8:00–3)

#### Vorteile:

- Übereinstimmende Rampen (3.3).
- Die je Preisveränderung innerhalb jeder Kundengruppe zu treffende Auswahl, welchem Anteil von Kunden die frühere bzw. spätere Tarifschaltminute zugewiesen wird,

ermöglicht nebenbei eine gleichmäßige Verteilung übersteigender Lastsprünge (siehe 2.6). Hierdurch ergeben sich ideale Voraussetzungen für die Kombination mit Zusatzbaustein B.

#### **Nachteile:**

- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren Variation als Nachteile empfinden. Weil die Variation gering ist, werden nur wenige Kunden Anlass sehen, diese täglich bewusst zu berücksichtigen. Da sich die Zusammenhänge gut erklären lassen, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Der zweite unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird angekratzt; der dritte lässt sich nur mit zweifacher Modifikation (Umstellung des Auswertungsrhythmus auf die erste Tarifschaltminute; Auswertungsintervall kann 14, 15 oder 16 Minuten lang sein) beibehalten.

### **3.3.6 Grundbaustein 6: Echtzeit-Markierung jedes Preissprungs**

Was jahrzehntelang hilfreich war, kann auch für Zukünftiges nützlich sein: Rundsteuersignale sorgen heute dafür, dass Nachtspeicheröfen nicht alle gleichzeitig zu einer bestimmten Uhrzeit aktiv werden. Der Verteilnetzbetreiber schaltet sie in -zig Gruppen zeitlich abgestuft. So wird ein Gesamt-Lastsprung in vielfacher Stärke der Primärregelreserve vermieden.

Analog hierzu kann man Rundsteuersignale zukünftig nutzen, um um die Zeitpunkte vorangekündigter Preissprünge herum den tatsächlichen Zeitpunkt der Preisänderung zu markieren; sie geben ein Tarifschaltsignal. Das Senden der Rundsteuersignale erfolgt nach einem für die jeweilige konkrete volle Viertelstunde vorab erstellten Zeitplan. Statt Rundsteuersignalen ist natürlich auch ein anderes Verfahren denkbar, wodurch sich aber der Charakter des Lösungsansatzes nicht ändert.

Die Gesamt-Variationsbreite soll  $-5...+5$  Minuten betragen. Für den konkreten Stromkunden engt sich diese Zeit auf einen Spielraum von  $-30...+30$  s um eine volle Halbminute herum ein, denn mehr Variationsbreite braucht der Verteilnetzbetreiber nicht, um alle Lastsprünge gleichmäßig zu streuen. Das heißt konkret: Kunde A muss z.B. mit einer Variation im Bereich 3:00...4:00 Minuten vor der vollen Viertelstunde rechnen, während für Kunde B die Variation im Bereich 2:30...3:30 nach der vollen Viertelstunde festgelegt ist. Die Tarifschaltsignale werden immer in der gleichen Reihenfolge für dieselben Gruppen von Kunden gesendet, nur die Zeitpunkte dafür werden geringfügig variiert.

Bleibt das Signal (aufgrund eines technischen Fehlers) innerhalb des 60-s-Zeitfensters aus, so schaltet das Gerät mit einer Zufallsvariation von  $0...30$  s nach Ablauf des Zeitfensters.

Anders als beim direkten Schalten der Geräte durch Rundsteuersignale bleibt die Entscheidung über den Leistungseinsatz beim einzelnen Gerät bzw. bei einer zentralen Steuerung je Netzanschluss, vgl. „3.1 Von vornherein ungeeignete Lösungsansätze“.

#### **Vorteile:**

- Übereinstimmende Rampen (3.3).



- Die Rundsteuersignale können von den Verteilnetzbetreibern so gesetzt werden, dass nebenbei eine gleichmäßige Verteilung übersteigender Lastsprünge (siehe 2.6) erreicht wird. Hierdurch ergeben sich ideale Voraussetzungen für die Kombination mit Zusatzbaustein B.

#### **Nachteile:**

- Die Technologie, die die schnellst- und größtmögliche Verbreitung automatischer Reaktionen auf Preisbewegungen gewährleistet, nämlich preisintelligente Steuerungen in jedem Gerät, erhält bei diesem Lösungsansatz schlechtere Startchancen: Neben der Preisinformation muss auch das Aktivierungssignal am Netzanschluss so aufbereitet werden, dass es bei jedem Gerät verarbeitet werden kann. Für zentrale Steuerungen ist dies kein Problem.
- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren Variation als Nachteile empfinden. Weil die Variation gering ist, werden nur wenige Kunden Anlass sehen, diese bewusst zu beachten. Da sich die Zusammenhänge gut erklären lassen, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Der zweite unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird angekratzt; der dritte kann mit Modifikation (Auswertungsintervall wechselt synchron mit Preis) beibehalten werden.

### **3.3.7 Grundbaustein 7: Sekundengenaue Preiswechsel**

Wer Kapitel 3.3.1 aufmerksam gelesen hat, könnte hier stutzen: Dort wird erarbeitet, dass der kürzeste sinnvolle Zeitabstand für sprunghafte Preisänderungen bei 1 Minute liegt. Das ganze Kapitel dreht sich allerdings darum, dass man sich von festen Bezügen auf volle Viertelstunden löst. Dieser letzte Grundbaustein 7 – wie auch die vorigen – bewahrt dagegen den festen Bezug auf volle Viertelstunden und bedient sich in ganz anderem Zusammenhang als bei Kapitel 3.3.1 eines Sekundenabstands.

Dieser Grundbaustein entspricht dem vorigen, mit einem grundlegenden Unterschied: Statt den exakten Zeitpunkt des Preiswechsels in Echtzeit per Rundsteuersignal mitzuteilen, wird er von vornherein sekundengenau an alle Geräte kommuniziert.

Dieser Grundbaustein hat zwei Spielarten:

1. Jedem Stromkunden wird vom Versorger ein sekundengenaues festes *Tarifschaltdelta* aus dem Bereich  $-5:00...+5:00$  Min. mitgeteilt, um das jeder Preiswechsel gegenüber der vollen Viertelstunde verschoben wird. Die zeitliche Zuordnung aller Kunden eines Versorgers soll unter Berücksichtigung der ihnen zuzuordnenden Lasten so erfolgen, dass sich auch mit Einbeziehung der übersteigenden Lastsprünge (2.6) im Mittel eine möglichst gleichmäßige Rampe ergibt. Im Zeitverlauf zunehmende Ungleichmäßigkeiten bei der Zuordnung können zum großen Teil im Rahmen von sowieso stattfindenden Kunden-Fluktuationen ausgeglichen werden.
2. Sollten die Laständerungen im Tages-/Wochenverlauf doch zu unterschiedlich verteilt sein, so kann das Tarifschaltdelta durch den Versorger von Preiswechsel zu Preiswechsel so weit wie nötig variiert werden. Es wird bei Weitem ausreichend sein, hierfür je Kunde einen Spielraum von z.B.  $-30...+30$  s vorzusehen. Statt eines immer

gleichen Tarifschaltdeltas werden dann die variierten Zeitpunkte vorab kommuniziert. Da dieser Grundbaustein Chancen hat, tatsächlich realisiert zu werden, hier ein paar vertiefende (top-down) Überlegungen zur Erzielung gleichmäßiger Rampen bei preisbedingten Laständerungen:

*Spielart 1 basiert darauf, dass es gelingt, mit immer gleichen Einstellungen (Tarifschaltdeltas) insgesamt immer wieder gleichmäßige Rampen zu erzielen, selbst wenn durch Geräte/Anlagen im Einzelnen immer wieder ganz unterschiedliche Entscheidungen bzgl. des preisbedingten Schaltens gefällt werden.*

*Wenn jeder Versorger in der Lage ist, seine Laständerungen bei jedem Preiswechsel recht gleichmäßig über 600 Sekunden zu verteilen, dann wird insgesamt eine gleichmäßige Rampe erreicht. Dies gilt auch dann, wenn*

- *die Kombination derjenigen Versorger, die gleichzeitig einen Preiswechsel durchführen, ständig variiert.*
- *die Gesamtstärke der Laständerungen je Versorger und Preiswechsel von Mal zu Mal stark variiert.*

*Im Folgenden betrachten wir einen einzelnen Versorger und seine Stromkunden. Jeder Versorger hat ein hohes Interesse daran, dass sich die leistungsbewerteten Reaktionen auf jeden Preissprung möglichst gleichmäßig um die volle Viertelstunde herum verteilen, damit der Einkauf des Stroms weiterhin viertelstundenbasiert erfolgen kann.*

*Wenden wir uns zunächst den normalen, also nicht den übersteigenden Lastsprüngen (2.6) zu. Da alle Geräte/Anlagen algorithmenbasiert schalten, wird man je Tarif \* eines Versorgers Gruppen von Stromkunden bilden können, die bzgl. der Preisbewegungen eine hohe Korrelation zueinander zeigen, d.h. überwiegend gleichermaßen schalten bzw. nicht schalten. Als Grundprinzip wird verfolgt, je Gruppe die geschalteten Leistungen der Mitglieder dieser Gruppe möglichst gleichmäßig auf die 600 Sekunden zu verteilen.*

*Jeder Versorger wird einzelne von der Leistung her herausragende (industrielle) Kunden haben. Je nach den geschalteten Leistungen wird man aus diesen Versorger-übergreifend entweder je Regelzone oder ENTSO-E-weit Gruppen mit hoher Korrelation bilden; die Korrelation muss hierbei auch die Korrelation der Preiswechsel der betroffenen Versorger abbilden. Beginnend auf höchster Ebene und mit der Gruppe, unter deren Mitgliedern sich die höchsten geschalteten Leistungen befinden, verteilt man die Stromkunden, gewichtet mit ihren geschalteten Leistungen, möglichst gleichmäßig auf die 600 Sekunden. Der hierbei angewandte Algorithmus soll sowohl die ENTSO-E-weite Gleichmäßigkeit als auch – bei abnehmenden Schaltleistungen immer stärker – die Gleichmäßigkeit je Versorger optimieren. Bei den allergrößten Stromkunden ist darauf zu achten, dass*

- *keinem von ihnen das Tarifschaltdelta  $-0:30...+0:30$  (grob) zugeordnet wird. Hintergrund: Solange nicht durch Vorschriften ausgeschlossen ist, dass gehandelte Lasten exakt zur vollen Viertelstunde schalten, sollte hier keine zusätzliche sehr große Last positioniert werden.*
- *keinem von ihnen ein Tarifschaltdelta  $-5:00...-4:00$  (grob) zugeordnet wird. Hintergrund: Solange die Sekundärregelung sich noch nicht auf einem kräftigen Leistungs-Plateau in passender Richtung befindet, reagieren Netzfrequenz und*

---

\* Alle Tarife eines Versorgers, deren Preise sich grundsätzlich zeitgleich ändern, werden hierbei wie ein einziger Tarif betrachtet.

*Primärregelung stärker auf einen starken Lastsprung. Dies ergibt sich u.a. daraus, dass die an der Sekundärregelung teilnehmenden Einheiten eine Ansprechzeit von bis zu 5 Minuten haben dürfen (Amprion, 2014).*

*Sind alle Versorger-übergreifenden Zuordnungen getroffen, so verteilt jeder einzelne Versorger die Kunden der restlichen Gruppen leistungsbewertet auf die bei ihm von der Leistung her noch unterbelegten Bereiche der 600 Sekunden, wiederum beginnend mit der Gruppe, unter deren Mitgliedern sich die höchsten geschalteten Leistungen befinden. Der hierbei angewandte Algorithmus muss unter Kenntnis der Korrelationen auch zwischen den Gruppen dafür sorgen, dass*

- *die Verteilung mit Blick auf den Einkauf von Strom möglichst symmetrisch um die volle Viertelstunde herum erfolgt,*
- *die Verteilung sowohl innerhalb der 5 Minuten vor als auch innerhalb der 5 Minuten nach der vollen Viertelstunde so gleichmäßig wie möglich erfolgt.*

*Nehmen wir nun die übersteigenden Lastsprünge in den Blick. Wie an den Grafiken in 2.6 erkennbar, ergibt sich bei ihrer gleichmäßigen Verteilung auf 600 Sekunden keine lineare Rampe, weil die zur Lastsprung-Richtung gegenläufigen Laständerungen interferieren. Ändern lässt sich dies nur durch eine definiert ungleichmäßige Verteilung der preisabhängigen Schaltzeitpunkte auf die 600 Sekunden; aus einem merklich gebogenen Lastverlauf sowohl vor der vollen Viertelstunde als auch danach wird dann ein recht linearer. Denkbare Vorgehen dafür:*

*Bei der Aufteilung in Gruppen von Stromkunden wird zusätzlich unterschieden nach Stärke der Korrelation bzgl. Kurzzeit-Einschalten von Kühlschränken (2.2) sowie bzgl. Schaltrhythmus-Anpassungen (2.5). Die Gruppen mit den höchsten Anteilen übersteigender Lastsprünge werden – in Verfeinerung der obigen Beschreibung – vor Verteilung der anderen Gruppen definiert ungleich verteilt, und erst danach werden die restlichen Gruppen so verteilt, dass sich mit Blick auf die normalen (nicht übersteigenden) Lastsprünge eine gleichmäßige Rampe ergibt. Die o.g. Ungleichverteilung muss so erfolgen, dass sich bei Auftreten übersteigender Lastsprünge die gewünschte möglichst lineare Rampe ergibt.*

*Die obigen Überlegungen wurden so angestellt, als ob die Zuordnung von Tarifschaltdeltas zu Kunden erstmalig durchzuführen wäre, aber schon alle Daten über typische Tarifwechsel-Abläufe der Versorger, Schaltleistungen, Schaltverhalten vorlägen. Dieser scheinbare Widerspruch lässt sich leicht auflösen: Sinnvollerweise fällt die Entscheidung für dieses System ENTSO-E-weit vor Einführung der ersten komplexen variablen Tarife. In den folgenden Monaten und Jahren wird sich die in Kapitel 2 geschilderte Lastsprung-Problematik kontinuierlich aufbauen, anfangs ganz ohne Lastsprünge von bedenklicher Stärke. In dieser Aufbauphase können Tarifschaltdeltas fast beliebig vergeben werden. Stromkunden, die erstmalig in einen komplexen variablen Tarif wechseln, erhalten ein bewusst als vorläufig bezeichnetes Tarifschaltdelta. Wenn nach einiger Zeit (eher Jahre als Monate) am Lastprofil eines Kunden erkennbar ist, dass seine Geräte umfassend automatisch reagieren, kann man ihm im Zuge von Anpassungen ein neues Tarifschaltdelta zuordnen. Wichtig ist nur, dass danach langfristig bzgl. Änderungen sehr zurückhaltend agiert wird. Sinnvollerweise werden dann nötige Tarifschaltdelta-Änderungen auf Versorger-/Regelzonen-/ENTSO-E-Ebene mittels jahrelang gereifter*

*Algorithmen durchgeführt.*

Quintessenz der obigen Überlegungen: Es erscheint plausibel, dass Spielart 2 dieses Grundbausteins niemals – oder unter besonderen Umständen höchstens vorübergehend – zum Einsatz kommen wird. Die Äußerungen zu Vor-/Nachteilen beziehen sich deshalb auf Spielart 1.

#### **Vorteile:**

- Alle preisabhängigen Schaltvorgänge können ohne Zufallsvariation sekundengenau geplant und ausgeführt werden. Dies könnte mit Blick auf die Belange der Kunden (von industriellen Großkunden bis Haushaltskunden) der entscheidende Vorteil gegenüber allen anderen Grundbausteinen sein.
- Übereinstimmende Rampen (3.3).
- Die Zuordnung der Tarifschaltdeltas kann von den Versorgern so vorgenommen werden, dass im Mittel eine recht gleichmäßige Verteilung übersteigender Lastsprünge (siehe 2.6) erreicht wird. Hierdurch ergeben sich gute Voraussetzungen für die Kombination mit Zusatzbaustein B.

#### **Nachteile:**

- Stromkunden werden die feste Abweichung von der vollen Viertelstunde als Nachteil empfinden. Da sich der Zusammenhang gut erklären lässt, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Der zweite unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird angekratzt; der dritte kann mit Modifikation (Auswertungsintervall wechselt synchron mit Preis) beibehalten werden.

### **3.4 Zusatzbaustein A: Proaktiver Einsatz der Minutenreserve**

Einführung:

Die für Minutenreserve ausgeschriebene Leistung liegt zurzeit grob beim Vierfachen der Primärregelreserve; die Sekundärregelreserve hat auch etwa diese Größenordnung (regel-leistung.net, 2014a).

Minutenreserve (Tertiärregelung) wird grundsätzlich je Regelzone separat vorgehalten; in Deutschland sind die vier Regelzonen als Netzregelverbund zusammengefasst und schreiben Minutenreserve gemeinsam aus. Die zukünftig benötigte Leistung wird getrennt nach positiver und negativer Minutenreserve i.d.R. von Quartal zu Quartal auf Basis der jeweils vier zurückliegenden Quartale festgelegt (regel-leistung.net, 2014b). In den übrigen Regelzonen im ENTSO-E-Gebiet gibt es ähnliche Regelungen.

So wie die Sekundärregelung wird die Minutenreserve nur eingesetzt, um Leistungsabweichungen, die in einer Regelzone entstanden sind, innerhalb der Regelzone auszugleichen. Hierbei wird der deutsche Netzregelverbund im Normalfall wie eine einzige Regelzone gehandhabt (regel-leistung.net, 2014c). Die Minutenreserve arbeitet nach bisheriger Festlegung nicht proaktiv, sondern wird nach bereits entstandenem Leistungsungleichgewicht durch kurzfristige Fahrplanvorgaben variiert, um die Sekundärregelung zu entlasten (regel-leistung.net, 2014d). Der proaktive Einsatz der Minutenreserve könnte zukünftig eine je nach Konstellation sehr sinnvolle Maßnahme sein, um Primär- und Sekundärregelung von

vornherein größtenteils freizuhalten von sich bereits abzeichnenden direkt bevorstehenden Lastvariationen.

Alles Folgende gilt für alle Regelzonen im ENTSO-E-Gebiet gemeinsam und muss ggf. auf die einzelne Regelzone heruntergebrochen werden.

Die genaue Kenntnis von 2.6 und der darin referenzierten Teile von 2.2 und 2.5 wird im Folgenden vorausgesetzt. Wir gehen davon aus, dass sich ausreichend genaue Last- und Lastsprungprognosen erstellen lassen und dass ca. 30 Minuten vor einem Lastsprung auch eine recht genaue Prognose des preisabhängigen Lastverlaufs während der kommenden Viertelstunden vorliegt. Wir betrachten beispielhaft einen negativen Lastsprung; alles lässt sich zeitlich an der vollen Viertelstunde gespiegelt auch auf einen positiven Lastsprung übertragen.

Wenn die Prognose des Lastverlaufs für die Sekunden vor dem Lastsprung die gleiche Leistung angibt, wie sie auch durch die Lastprognose als mittlere Last der Viertelstunde gezeigt wird, gibt es offensichtlich keinen Lastsprung-Anteil, der aus Leistungen resultiert, die erst während der Viertelstunde aktiviert werden. Dann kann die Minutenreserve nichts beitragen, was nicht schon durch die Kraftwerksfahrpläne abgedeckt wird.

In allen anderen Fällen, in denen ein aus der reinen Lastprognose nicht ableitbarer überhöhter Lastsprung zu erwarten ist, dürfte die Ursache bei kurzfristigen Leistungsanteilen (siehe „Übersteigende Lastsprünge“ in 2.6) liegen, die durch die Minutenreserve proaktiv aufgefangen werden können. Der Lastsprung übersteigt dann deutlich die Lastprognose der 15 Minuten davor, und diese wiederum fällt in allen vorstellbaren Konstellationen höher aus als die Lastprognosen der vorhergehenden und der folgenden Viertelstunden.

Entsprechend den Rampen, die bei der Umsetzung von Austausch- und Kraftwerksfahrplänen eingehalten werden (UCTE, 2004; A1-18f), wird die Kraftwerksleistung schon 5 Minuten vor Beginn der letzten Viertelstunde vor dem Lastsprung gesteigert, obwohl sie zu dem Zeitpunkt größtenteils noch nicht benötigt wird. Nur während der mittleren 5 Minuten der Viertelstunde befindet sich die Kraftwerksleistung auf dem Niveau, das sie eigentlich laut Lastprognose während der Viertelstunde im Mittel haben sollte. Genau während dieser Zeit konstanter Kraftwerksleistung gibt es eine kontinuierliche starke Laststeigerung, die aus der „Vorbereitung“ der übersteigenden Lastsprünge resultiert (vgl. Grafiken in 2.6). Diese vermutlich gut prognostizierbaren Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch kann der proaktive Einsatz der Minutenreserve ausgleichen, und zwar auf folgende Weise:

Für die Minutenreserve wird vor einem Lastsprung ein auf die jeweilige Situation maßgeschneiderter Fahrplan erstellt, der – anders als heutzutage für die Minutenreserve definiert – in Abschnitten zu je 5 Zeitminuten die Leistungsänderungsgeschwindigkeit der Minutenreserve auf einen jeweils anderen Wert setzt. Der Plan gilt von 20 Minuten vor der vollen Viertelstunde, zu der der Lastsprung erfolgen soll, bis 20 Minuten danach; vorher und hinterher beträgt die Leistungsänderungsgeschwindigkeit in diesem Plan 0. Bei der Erstellung des Plans ist Folgendes zu beachten:

- Exakt einzuhalten: Je Viertelstunde wird die durch die Minutenreserve laut diesem Plan erbrachte elektrische Arbeit (pos./neg.) aufsummiert. Für jedes Ergebnis  $\neq 0$  muss in der folgenden Viertelstunde ein Zeitpunkt (irgendwo zwischen mm:ss 00:00 und 15:00)

benannt werden können, bis zu dem in dieser Viertelstunde die gleiche elektrische Arbeit, nur mit umgekehrtem Vorzeichen, erbracht wurde. Ab dem benannten Zeitpunkt wird die Arbeit dann wieder neu aufsummiert, usw. 20 Minuten nach dem Lastsprung muss die Summe laut Plan 0 betragen.

- Exakt einzuhalten: Der auf diese Weise erstellte Plan wird dem zur Entlastung der Sekundärregelung geführten eigentlichen Plan der Minutenreserve linear überlagert, d.h. die Leistungswerte und Leistungsänderungsgeschwindigkeiten addieren sich vorzeichenbehaftet.
- Exakt einzuhalten: Sollten Lastsprünge so kurz aufeinander folgen, dass der eine hierauf bezogene Plan noch nicht beendet ist, bevor der nächste beginnt, so werden die Pläne unabhängig voneinander erstellt und ebenfalls linear überlagert.
- So gut wie möglich einzuhalten – das eigentliche Ziel: Der Plan für die Minutenreserve soll im o.a. Zeitraum die Diskrepanz zwischen Fahrplanvariation der Erzeugung und prognostiziertem Lastverlauf möglichst gut ausgleichen.

Alles Beschriebene lässt sich 1:1 auf einen positiven Lastsprung übertragen, wenn man die Begriffe positiv und negativ tauscht und jedes Detail zeitlich an der vollen Viertelstunde spiegelt. Um hierbei einen verständlichen Text zu erhalten, muss man manche Zusammenhänge genau andersherum formulieren als es oben geschehen ist.

Die immer wieder neue passende Erstellung dieser Pläne geschieht zweckmäßigerweise durch eine Software, die alle genannten Punkte berücksichtigt und das Optimum ermittelt. Da die Minutenreserve über alle Regelzonen gleichmäßig verteilt ist, dürfen die in 5-Minuten-Abschnitten festzulegenden Leistungsänderungsgeschwindigkeiten durchaus hoch sein, falls das sinnvoll ist. Jedes an der Minutenreserve beteiligte Kraftwerk wird sich dann so regeln lassen müssen, dass man zu jedem durch 5 Minuten teilbaren Zeitpunkt eine andere Leistung vorgibt und diese Leistungswerte jeweils mit linearer Rampe verbunden werden.

*Anmerkung: Dieser Vorschlag steht und fällt nicht damit, dass für seine Realisierung tatsächlich die Minutenreserve eingesetzt wird. Es geht um das Prinzip, eine Gruppe von Kraftwerken (bzw. anteilige Kraftwerksleistungen) so zu steuern, dass sich potenziell alle fünf Minuten eine neue Gesamt-Leistungsänderungsgeschwindigkeit ergibt. Der Einsatz der Minutenreserve hierfür könnte eine Synergie mit sich bringen, d.h. die dann tatsächlich auszuschreibende Minutenreserve-Leistung dürfte niedriger sein als die addierten für Minutenreserve und für den Ausgleich übersteigender Lastsprünge benötigten Leistungen.*

*Es sind aber trotzdem Gründe denkbar dafür, nicht die Minutenreserve einzusetzen, z.B.:*

- *Die separate Vorhaltung von Kraftwerksleistungen könnte u.U. billiger realisierbar sein.*
- *Den Ausgleich übersteigender Lastsprünge sollen nicht die Übertragungsnetzbetreiber, sondern z.B. ein Zusammenschluss von Versorgern verantworten.*

### **Vorteile:**

- Falls der Gesamt-Lastsprung durch den gewählten Grundbaustein gleichmäßig auf die 10 Minuten Fahrplanrampe verteilt wird, kann dieser Baustein dafür sorgen, dass durch Primär- und Sekundärregelung nur noch die tatsächlichen Prognosefehler ausgeregelt werden müssen – verteilt über 10 Minuten.

- Bei allen drei in 1.2 genannten Vorteilen ergibt sich keine Verschlechterung gegenüber dem gewählten Grundbaustein.

**Nachteil:**

- **Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig:** In vielen Situationen addiert sich die für diese Zwecke benötigte Leistung mit gleichem Vorzeichen zu der für den normalen Einsatzzweck der Minutenreserve benötigten Leistung. Dies bedeutet, dass zukünftig eine höhere Reserve ausgeschrieben werden muss, mit entsprechend höheren Kosten. Erst die genauere Abschätzung der hinsichtlich der Effekte „Kurzzeit-Einschalten bei Kühlschränken“ (2.2) sowie „Schaltrhythmus-Anpassungen“ (2.5) zu erwartenden Leistungsänderungen kann Anhaltspunkte dafür liefern, in welchem Maße die Minutenreserve möglicherweise aufgestockt werden muss.

### 3.5 Zusatzbaustein B: Ent-korrelierte Preisbewegungen

Die in Kapitel 2 geschilderte Problemlage steht und fällt ja damit, dass die Preisbewegungen der unterschiedlichen Versorger im Verbundnetz stark bis sehr stark korrelieren. Dies betrifft, wie oben geschildert, nicht unbedingt die Preise selbst oder die Stärke der Preissprünge. Für das Auftreten enormer gleichzeitiger Lastsprünge reicht es aus, wenn zu gleichen Zeitpunkten Preisbewegungen mit gleicher Bewegungsrichtung erfolgen.

Dieser Zusatzbaustein kann darauf aufbauen, dass durch einen Grundbaustein schon dafür gesorgt wird, dass sich preisbedingte Laständerungen auf eine 10-Minuten-Rampe um die volle Viertelstunde herum verteilen. Er wird immer dann aktiv, wenn die preisbedingte Gesamt-Laständerung deutlich höher würde als für eine Vergleichmäßigung der Residuallast erwünscht. Dann werden – nach einem noch zu definierenden Algorithmus – Versorger ausgewählt, die ihre Preisänderung nicht zur kritischen Viertelstunde, sondern eine Viertelstunde vorher oder nachher durchführen müssen.

**Vorteil:**

- Zu jedem Zeitpunkt mit Preiswechseln können die insgesamt wünschenswerten preisbedingten Gesamt-Laständerungen recht zielgenau erreicht werden.

**Nachteile:**

- **Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig:** Jeder Versorger, der zu einer vollen Viertelstunde (Stunde) mit EPEX-Preisbewegung seinen Preis konstant lässt, hat bei der Abrechnung seines Stroms einen Nachteil. Es muss ein System gefunden werden, mit dem die Versorger solche Nachteile untereinander gegenrechnen können bzw. sich gegenseitig nachweisen können, dass sich Nachteile und Vorteile ausgeglichen haben. Dieses würde aufgrund der einzubeziehenden Größen vermutlich recht komplex.
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt nur wenig übrig.

### 3.6 Zusatzbaustein C: Orientierung an vollen Stunden

Manche beschriebenen Problemlagen oder Nachteile bestimmter Bausteine hängen damit

zusammen, dass generell davon ausgegangen wird, dass man in fernerer Zukunft alles, was heute noch bezogen auf volle Stunden geregelt wird, auf volle Viertelstunden beziehen wird. Deshalb soll hier bewusst der Ansatz gemacht werden, dass Preisveränderungen nur zur vollen Stunde stattfinden.

#### **Vorteile:**

- Bei viertelstundenbasierten Preistabellen wird man den Stromkunden im Höchstfall z.B. 16 Preisänderungen pro Tag zumuten wollen – wer wird sich mit mehr teils krummen Uhrzeiten auseinandersetzen wollen? Wenn es aber um volle Stunden geht, kann man den Kunden problemlos bis zu 24 Preisänderungen bieten – jede Stunde hat dann einen Preis.
- Bei allen drei in 1.2 genannten Vorteilen ergibt sich keine Verschlechterung gegenüber dem gewählten Grundbaustein.

#### **Nachteile:**

- **Inkompatibilität mit Zusatzbaustein B:** Nur mit Baustein B „Ent-korrelierte Preisbewegungen“ kann im Wochenverlauf durchgängig erreicht werden, dass die preisbedingte Gesamt-Laständerung nicht deutlich höher ausfällt als für eine Vergleichmäßigung der Residuallast erwünscht. Baustein B arbeitet mit der Verlagerung von Preiswechseln auf die vorhergehende bzw. folgende Viertelstunde – was bei Einsatz von Baustein C ja gerade ausgeschlossen wird. Im Ergebnis wird der steuerbare Teil der Erzeugungsseite mehrmals pro Woche etliche GW unerwünschte Leistungsänderungen auffangen müssen.
- **Schlechter Ausgleich von Schwankungen:** Dass man schon heute teilweise anstrebt, Austausch- und Kraftwerksfahrpläne im Viertelstundenrhythmus auszuführen, hat seinen guten Grund. Durch fluktuierende Erzeugung kommt – neben den Schwankungen auf Verbrauchsseite – so viel zusätzliche Bewegung in die Lastprognosen, dass man bei einer generellen Umstellung auf Viertelstunden deutlich weniger Regelenergie von Sekundärregelung und Minutenreserve bräuchte. Dieser Zusammenhang wird sich in künftigen Jahrzehnten noch sehr viel stärker darstellen. Variable Strompreise sollen für eine bessere Übereinstimmung zwischen Angebot und Nachfrage sorgen, also für eine Vergleichmäßigung der Residuallast. Diese Ressource kann man nur zu einem Bruchteil nutzen, wenn man sich von vornherein darauf festlegt, dass dies nur im Stundenrhythmus geschehen darf. Mit anderen Worten: Ein Lösungsansatz, der Preiswechsel nur um die volle Stunde herum zulässt, müsste schon sehr deutliche Vorteile gegenüber allen anderen Lösungsansätzen mit Viertelstunden-Bezug haben, damit er insgesamt am vorteilhaftesten ist.

## **4 Lösungsansätze**

Der eilige Leser hat hier leichtes Spiel: Ignoriert werden können alle die Lösungsansätze, deren Grundbausteine (benannt mit Ziffern) in Kapitel 3 schon nicht interessant waren. Um Kapitel 5 zu verstehen, sollte man allerdings zusätzlich Kapitel 4.10 lesen.

Aus den im vorigen Kapitel 3 vorgestellten Bausteinen können nun Lösungsansätze



zusammengestellt werden. Dies geschieht anhand folgender Überlegungen:

Jeder Lösungsansatz, der auf einem der Grundbausteine 1...7 basiert, enthält den Zusatzbaustein A „Proaktiver Einsatz der Minutenreserve“, weil sich anders die Problematik der übersteigenden Lastsprünge nicht lösen lässt.

Zusatzbaustein C „Orientierung an vollen Stunden“ wird aufgrund seiner Nachteile (siehe 3.6) nur dort vorgesehen, wo sich aus seiner Hinzunahme ein benennbarer Vorteil ergibt.

Jeder Lösungsansatz, der nicht Baustein C enthält (vgl. „Inkompatibilität mit Zusatzbaustein B“, 3.6), wird mit Baustein B „Ent-korrelierte Preisbewegungen“ kombiniert. Dies hat folgenden Hintergrund: Es ist von großer Bedeutung, dass preisbedingte Gesamt-Laständerungen nicht deutlich stärker ausfallen als mit Blick auf eine Vergleichmäßigung der Residuallast wünschenswert.

Die Reihenfolge orientiert sich an der Reihenfolge der eingesetzten Bausteine. Die Kapitelüberschriften benennen jeweils den eingesetzten Grundbaustein (Ziffer) und die eingesetzten Zusatzbausteine (Buchstaben) aus Kapitel 3.

Die Beschreibung der Lösungsansätze ist so knapp wie sinnvoll gehalten. Sie enthält i.d.R. nur Hinweise auf Besonderheiten, die sich nicht von selbst aus den Beschreibungen der verwendeten Bausteine erschließen.

Alle Lösungsansätze haben das Ziel, die durch preisbedingte Lastveränderungen hervorgerufene Auslastung der Primärregelung auf die Größenordnung von Schwankungen zu reduzieren, die bei Erzeugung und Verbrauch auch ohne den Einfluss variabler Preise entstünden. Wird dieses Ziel erreicht, so findet das keine besondere Erwähnung. Wird dieses Ziel nicht erreicht, so wird dies als Nachteil des betreffenden Lösungsansatzes angegeben.

## 4.1 Lösungsansatz 1+A+B

### **Koordinierte Preisbewegungen kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen:**

Während Grundbaustein 1 die Schaltminuten im Bereich  $-5...+5$  um die volle Viertelstunde herum variiert, verändert Zusatzbaustein B die von den Versorgern vorgesehenen Schaltzeiten bei Bedarf um ca.  $-15$  Min. oder  $+15$  Min.

Die Hinzunahme von Zusatzbaustein B wirkt sich – anders als bei anderen Lösungsansätzen – nicht zusätzlich nachteilig aus, denn Grundbaustein 1 muss von sich aus schon einen integrierten Nachteilsausgleich zwischen Versorgern beinhalten. Dieser kann vermutlich ohne nennenswerte neue Aspekte erweitert werden.

#### **Vorteile:**

- (keine)

#### **Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Integrierter Nachteilsausgleich zwischen Versorgern nötig (3.3.1.4).
- Die Stromkunden müssen sich immer wieder wechselnde krumme Zeiten merken. Dies

ist ein Ärgernis, das man kaum jemandem so begründen können wird, dass er denkt, man habe wirklich das denkbar beste System eingeführt.

- Alle Vorteile der Viertelstundengrenze (siehe 1.2) gehen bei diesem Lösungsansatz verloren; er verfehlt also sein Ziel vollständig.

## 4.2 Lösungsansatz 1+A+C

**Koordinierte Preisbewegungen kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie Orientierung an vollen Stunden.**

**Vorteile:**

- (keine)

**Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Integrierter Nachteilsausgleich zwischen Versorgern nötig (3.3.1.4).
- Die Stromkunden müssen sich immer wieder wechselnde Zeiten um die volle Stunde herum merken. Dieses Ärgernis ist etwas geringer als bei Orientierung an vollen Viertelstunden.
- Alle Vorteile der Viertelstundengrenze (siehe 1.2) gehen bei diesem Baustein verloren; er verfehlt also sein Ziel vollständig.

## 4.3 Lösungsansatz 2+A+B

**Zufällige Variation des Schaltzeitpunkts kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen:**

Bei passender Prognose des Lastverlaufs für jede Viertelstunde kann die Minutenreserve proaktiv diejenigen starken Lastveränderungen auffangen, die während konstanter Leistung der Fahrplankraftwerke stattfinden (vgl. „Meidung teurerer Zeiten bei 300s-Zufallsvariation“ in 3.3.2).

**Vorteil:**

- Verringerte übersteigende Lastsprünge (3.3.2).

**Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Zu große Variation (3.3.2).
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt bei Nutzung von Baustein B nur wenig übrig; bei Nr. 3 müssen Abstriche gemacht werden.

## 4.4 Lösungsansatz 2+A+C

**Zufällige Variation des Schaltzeitpunkts kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie Orientierung an vollen Stunden:**

Bei passender Prognose des Lastverlaufs für jede Viertelstunde kann die Minutenreserve proaktiv diejenigen starken Lastveränderungen auffangen, die während konstanter Leistung der Fahrplankraftwerke stattfinden (vgl. „Meidung teurerer Zeiten bei 300s-Zufallsvariation“ in 3.3.2).

**Vorteile:**

- Verringerte übersteigende Lastsprünge (3.3.2).
- Alle drei in 1.2 genannten Vorteile der Viertelstundengrenze bleiben erhalten, Nr. 3 allerdings mit Abstrichen.

**Nachteile:**

- Schlechter Ausgleich von Schwankungen (3.6).
- Inkompatibilität mit Zusatzbaustein B (3.6) führt dazu, dass u.U. deutlich stärkere preisabhängige Lastveränderungen stattfinden als für den Ausgleich von Schwankungen erwünscht.
- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Der in 3.3.2 beschriebene Nachteil „Zu große Variation“ tritt in abgemilderter Form auf (weil jede billigste Zeit mindestens eine Stunde dauert).

## **4.5 Lösungsansatz 3+A+B**

**Unterschiedliche Viertelstundenrhythmen kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen.**

**Vorteile:**

- (keine)

**Nachteile:**

- Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation (3.2) führt zu einer merkbaren Zusatzauslastung der Primärregelung, deren Ausmaß genauer untersucht werden müsste.
- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren ständigen Wechsel als Nachteile empfinden.
- Der erste unter 1.2 genannte Vorteil des Bezugs auf volle Viertelstunden wird aufgegeben, der zweite wird angekratzt, der dritte kann mit Modifikation beibehalten werden.

## **4.6 Lösungsansatz 4+A+B**

**Kundenbezogene feste Tarifschaltminuten kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen.**

**Vorteile:**

- (keine)

### **Nachteile:**

- Meidung teurerer Zeiten bei 30s-Zufallsvariation (3.2) führt zu einer merkbaren Zusatzauslastung der Primärregelung, deren Ausmaß genauer untersucht werden müsste.
- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Stromkunden, denen nicht die Tarifschaltminute 0 zugeteilt wurde, werden dies als Nachteil empfinden. Da sich der Zusammenhang gut erklären lässt, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt bei Nutzung von Baustein B nur wenig übrig; Vorteil Nr. 2 wird angekratzt; Nr. 3 kann mit Modifikation beibehalten werden.

## **4.7 Lösungsansatz 5+A+B**

### **Kundenbezogene benachbarte Tarifschaltminuten kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen.**

#### **Vorteil:**

- Grundbaustein 5 ist in der Lage, alle Lastsprung-Komponenten von Mal zu Mal so zu verteilen, dass sich eine gleichmäßige 10-Minuten-Rampe ergibt, die – bei zutreffender Last- und Lastverlaufsprognose – genau zu den Rampen der Fahrplankraftwerke und der proaktiv eingesetzten Minutenreserve passt.

#### **Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren Variation als Nachteile empfinden. Weil die Variation gering ist, werden nur wenige Kunden Anlass sehen, diese täglich bewusst zu berücksichtigen. Da sich die Zusammenhänge gut erklären lassen, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt bei Nutzung von Baustein B nur wenig übrig; Vorteil Nr. 2 wird angekratzt; Nr. 3 lässt sich nur mit zweifacher Modifikation (Umstellung des Auswertungsrhythmus auf die erste Tarifschaltminute; Auswertungsintervall kann 14, 15 oder 16 Minuten lang sein) beibehalten.

## **4.8 Lösungsansatz 6+A+B**

### **Echtzeit-Markierung jedes Preissprungs kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen.**

#### **Vorteil:**

- Grundbaustein 6 ist in der Lage, alle Lastsprung-Komponenten von Mal zu Mal so zu verteilen, dass sich eine gleichmäßige 10-Minuten-Rampe ergibt, die – bei zutreffender

Last- und Lastverlaufsprognose – genau zu den Rampen der Fahrplankraftwerke und der proaktiv eingesetzten Minutenreserve passt.

#### **Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Die Technologie, die die schnellst- und größtmögliche Verbreitung automatischer Reaktionen auf Preisbewegungen gewährleistet, nämlich preisintelligente Steuerungen in jedem Gerät, erhält bei diesem Lösungsansatz schlechtere Startchancen: Neben der Preisinformation muss auch das Aktivierungssignal am Netzanschluss so aufbereitet werden, dass es bei jedem Gerät verarbeitet werden kann. Für zentrale Steuerungen ist dies kein Problem.
- Stromkunden werden die Abweichungen von der Viertelstunde und auch deren Variation als Nachteile empfinden. Weil die Variation gering ist, werden nur wenige Kunden Anlass sehen, diese bewusst zu beachten. Da sich die Zusammenhänge gut erklären lassen, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt bei Nutzung von Baustein B nur wenig übrig; Vorteil Nr. 2 wird angekratzt; Nr. 3 kann mit Modifikation (Auswertungsintervall wechselt synchron mit Preis) beibehalten werden.

## **4.9 Lösungsansatz 7+A+B**

**Sekundengenaue Preiswechsel kombiniert mit proaktivem Einsatz der Minutenreserve sowie ent-korrelierten Preisbewegungen.**

Da dieser Lösungsansatz gute Realisierungschancen besitzt, wurde er um detaillierte Beschreibungen von Teilaspekten ergänzt.

Möglichst umfassende automatische Reaktionen von Geräten und Anlagen werden bei diesem Lösungsansatz/Konzept von Anfang an ausdrücklich vorgesehen und gefördert.

Folgende Bereiche sind betroffen:

- Für die elektronische Kommunikation des Preisverlaufs wird europaweit ein Standardverfahren etabliert, ggf. einzelne weitere Möglichkeiten, wenn dies sachlich begründbar ist.
- Zu begrüßen wäre eine einheitliche Strategie, wie dafür gesorgt wird, dass automatische Reaktionen so umfassend und effektiv wie möglich etabliert werden. Dies wird am ehesten erreicht durch Kommunikation des Preisverlaufs bis zu jedem Netzanschluss und weiter an jede Steckdose. Dadurch könnten neu hergestellte Elektrogeräte ab Werk durchgängig die Fähigkeit erhalten, automatisch auf den Preisverlauf zu reagieren, dank hoher Stückzahlen ohne nennenswerte Mehrkosten.

Der Lösungsansatz ist jedoch genauso anwendbar, wenn man ausschließlich die zentrale Steuerung von Geräten je Hausanschluss vorsieht oder beide Formen mischt.

- Für die preisverlaufsabhängige Steuerung von Geräten und Anlagen sind bzgl. der generellen Lastsprung-Thematik keinerlei Vorgaben nötig. Allerdings sollte das

Aufsuchen von Preisminima (z.B. nachts durch Waschmaschinen, s.o. 2.5) geregelt werden (vgl. Schittek, 2012; 57ff).

*Minimierung der Beeinträchtigung der Stromkunden:*

*Jeder Stromkunde wird darüber informiert, welches Tarifschaltdelta ihm initial zugeordnet wurde. Er erfährt außerdem, dass der Versorger bei Bedarf (z.B. geänderte Lastverteilung auf Kundenseite) das zugeordnete Schaltdelta ändern wird, unter langfristig gleichmäßiger Beanspruchung aller Stromkunden.*

*Per Online-Formular kann der Kunde beliebig oft (z.B. 1x pro Woche) seine Unzufriedenheit mit dem zuletzt zugeteilten Tarifschaltdelta ausdrücken und erhält ein anderes, das so vergeben wird, dass die vorgesehene Gesamtverteilung gewahrt bleibt bzw. verbessert wird. Es ist jedoch nicht möglich, ein bestimmtes Tarifschaltdelta (z.B. 0:00 oder +5:00) gezielt zu beantragen.*

*In allen elektronischen Informationen über den Preisverlauf, die gezielt an Kunden/Geräte versandt werden, ist das jeweils zugeordnete Schaltdelta schon berücksichtigt. Alle allgemein (z.B. in Tageszeitung/Videotext/Online-Auftritt) bekanntgegebenen Preisinformationen beziehen sich auf volle Stunden/Viertelstunden, wobei deutlich darauf hingewiesen wird, dass jeweils das zugeordnete Schaltdelta zu addieren ist.*

*Verbesserungen an der Gesamtverteilung führt jeder Versorger unter geringstmöglicher Beeinträchtigung der Stromkunden durch. D.h. er vergibt nicht etwa alle Schaltdeltas neu, sondern ordnet nur den zu verschiebenden Anteilen neue Schaltdeltas zu.*

*Grundsätzlich soll bei einem Stromkunden erst dann ein zweiter Wechsel des zugeordneten Schaltdeltas erfolgen, wenn auch alle anderen Altkunden des Versorgers schon einen Wechsel erfahren mussten. Damit erreicht man, dass das Tarifschaltdelta beim einzelnen Kunden i.d.R. über Jahre unverändert bleibt.*

*Grundsätzlich soll gewährleistet werden, dass das zugeteilte Tarifschaltdelta eines Kunden auch dann unverändert bleibt, wenn er – bei unverändertem Anschluss – den Versorger wechselt. Dies kann auf folgende Weise realisiert werden: Der alte Versorger teilt dem neuen das bisherige Schaltdelta des wechselnden Kunden (und den Zeitpunkt der letzten unfreiwilligen Änderung) mit. Alle Neuverträge sind in den ersten drei Monaten der Vertragslaufzeit gegen Änderung des Schaltdeltas geschützt, danach gelten sie als Altverträge. Veränderungen bei den Schaltdeltas durch Kunden-Fluktuation – bezogen auf den einzelnen Tarif\* eines Versorgers – gleichen sich statistisch teilweise von selbst aus; der Rest kann durch passende Zuordnung völlig neuer Anschlüsse ausgeglichen werden. Sollten sich bei einem Versorger nennenswerte Abweichungen ergeben, so muss er Schaltdeltas von Altkunden verändern.*

### **Vorteile:**

- Alle preisabhängigen Schaltvorgänge können ohne Zufallsvariation sekundengenau geplant und ausgeführt werden. Dies könnte mit Blick auf die Belange der Kunden (von industriellen Großkunden bis Haushaltskunden) der entscheidende Vorteil gegenüber allen anderen Lösungsansätzen sein, die an sprunghaften Preisänderungen festhalten.
- Grundbaustein 7 ist in der Lage, alle Lastsprung-Komponenten im Mittel so zu

\* Alle Tarife eines Versorgers, deren Preise sich grundsätzlich zeitgleich ändern, werden hierbei wie ein einziger Tarif betrachtet.

verteilen, dass sich eine recht gleichmäßige 10-Minuten-Rampe ergibt, die – bei zutreffender Last- und Lastverlaufsprognose – genau genug zu den Rampen der Fahrplankraftwerke und der proaktiv eingesetzten Minutenreserve passt.

#### **Nachteile:**

- Erhebliche Aufstockung der Minutenreserve nötig (3.4).
- Bei Nutzung von Baustein B Aufrechnung von Nachteilen zwischen Versorgern nötig (3.5).
- Stromkunden werden die feste Abweichung von der vollen Viertelstunde als Nachteil empfinden. Da sich der Zusammenhang gut erklären lässt, ist nicht mit dauerhafter Unzufriedenheit zu rechnen.
- Von dem in 1.2 genannten Vorteil Nr. 1 bleibt bei Nutzung von Baustein B nur wenig übrig; Vorteil Nr. 2 wird angekratzt; Nr. 3 kann mit Modifikation (Auswertungsintervall wechselt synchron mit Preis) beibehalten werden.

### **4.10 Außer Konkurrenz: Quasi-kontinuierlicher Preisverlauf**

Weil dieser Lösungsansatz nicht mehr mit sprunghaften Preisänderungen arbeitet – was unser Ausgangspunkt war – läuft er außer Konkurrenz. Er macht sich damit unabhängig von dem unter 1.2 genannten Vorteil Nr. 1.

Wie schon in 3.3.1.3 herausgearbeitet, eignen sich Zeitabstände unter einer Minute für quasi-kontinuierliche Preisveränderungen – die sich nur noch grafisch gut darstellen lassen. Wir betrachten beispielhaft einen Rhythmus von 30 Sekunden, den wir um eine zufällige Variation der Schaltzeiten auf Verbrauchsseite von  $-15\dots+15$  Sekunden ergänzen.

Wohlgemerkt, hier geht es nicht um ein dynamisches Modell; wir bleiben – wie bei allen anderen Lösungsansätzen – bei der Vorab-Festlegung der Preise, d.h. sie werden z.B. mit einem Tag Vorlauf festgelegt.

Dagegen, dass eine solche völlig neue Art von Tarif bei allen zu differenzierenden Arten von Kunden genügend Akzeptanz fände, scheint erstmal nichts zu sprechen. Dennoch müsste diese Frage vorab gründlich untersucht werden.

Quasi-kontinuierlich heißt in diesem Fall: Alle nötigen Preisveränderungen werden so sanft wie möglich angebahnt, mit geringstmöglichen Preis-Sprüngen von einer halben Minute zur nächsten.

Ohne Koordination geht es nicht – das wurde schon in 3.3.1.1 begründet. Das Mittel der Wahl ist in diesem Fall eine regelzonen- oder landesweit einheitliche *relative* Preissteuerung, deren Auslegungsziel geringstmögliche Preisveränderungen je 30-s-Schritt sind. [Relativ bedeutet hier: Jeder Versorger setzt (vergleichbar zu heute) einen 100%-Arbeitspreis z.B. von Jahr zu Jahr selbst fest. Zentral vorgegeben wird dann alle 30 s neu der relative Strompreis, z.B. 93,384 %.] Der Nachteil des einheitlichen Preisverlaufs (stärkstmögliche Korrelation!) wird bei Weitem übertroffen durch den Vorteil sanfter Preisbewegungen (statt Preissprüngen). Aber selbst hier kann nicht per se ausgeschlossen werden, dass doch einmal viele Geräte in derselben halben Minute schalten. Auf welche Weise man bei quasi-kontinuierlichem Preisverlauf einem gleichzeitigem Schalten vieler Verbraucher vorbeugen kann, wird an mehreren Stellen im Buch/pdf (Schittek, 2012)

behandelt. Manches lässt sich übertragen, obwohl es dort ja um eine echte dynamische Preisbildung geht.

#### **Vorteile:**

- Die Primärregelung wird i.d.R. nicht stärker beansprucht als durch die gewohnten unkoordinierten Lastwechsel bei konstantem Strompreis.
- Die in Kapitel 2 vorgestellte Grundproblematik existiert hierbei nicht, und es gibt auch keine übersteigenden Lastsprünge (2.6).
- Die hier noch relevanten unter 1.2 genannten Vorteile Nr. 2 und 3 bleiben erhalten.

#### **Nachteile:**

- Für die Abrechnung sind mehr Daten zu verarbeiten als bei den anderen Modellen. Wenn dies allerdings im entsprechend angepassten Smart Meter geschieht und dabei je Viertelstunde trotzdem nur ein einziger Abrechnungs-Datensatz entsteht, ist dies nicht als Nachteil zu werten.
- Die Kommunikation der Preisverläufe ist aufwändiger, weil grundsätzlich je 30 s ein Datensatz zu übertragen ist. Es gibt jedoch gute Möglichkeiten, die nötige Datenmenge auf einen geringen Bruchteil zu reduzieren, z.B. bei einem linear ansteigenden Preis nur die Startzeit, den Start-Preis, die Ende-Zeit und den Ende-Preis anzugeben.

## **5 Fazit und Ausblick**

Dieser Text hat einerseits eine mögliche bevorstehende Problematik erstmalig umfassend dargestellt. Noch ohne durchgängig wissenschaftliche Herangehensweise wurden Zusammenhänge benannt, die es plausibel erscheinen lassen, dass diese Problematik tatsächlich eine Relevanz haben wird.

Andererseits wurden in diesem Text mögliche Lösungsansätze benannt und grob bewertet. Der flüchtige Leser könnte dabei schlussfolgern: Sollte die Problematik tatsächlich eine Relevanz haben, so ist sie lösbar, also letztlich nicht wirklich von Bedeutung. Bei näherer Betrachtung kann man diesem Text jedoch eher folgende zusammenfassende Aussagen entnehmen:

- Manche „erste“ Gedanken hinsichtlich der Lösbarkeit der Problematik erweisen sich angesichts der zu vermutenden Komplexität und Stärke als nicht oder kaum zielführend, andere sind mit gravierenden Nachteilen verbunden.
- Bei der Bewertung von Lösungsansätzen ergibt die Beschränkung auf rein quantitative Aspekte kein vollständiges Bild; auch qualitative Aspekte, die am ehesten mit Kundenakzeptanz und möglicher Aufmerksamkeit der Medien im negativen Sinne zu tun haben, müssen berücksichtigt werden.
- Es erscheint plausibel, dass eine Lösung nur durch das Zusammenspiel mehrerer Lösungsbausteine erreicht werden kann.
- Es erscheint plausibel, dass die Realisierung einer Lösung mit hohem Einführungsaufwand sowie hohen regelmäßigen Kosten verbunden sein wird, selbst wenn man sie von Anfang an vorsieht und nicht erst nachträglich anflickt.

Die hier dargelegten groben Überlegungen und überschlägigen Berechnungen dürfen nicht



überbewertet werden. Aber auch ohne gesicherte Erkenntnisse bleibt festzuhalten:

**Wenn seriös über Tarifmodelle mit Viertelstunden/Stunden-Preisgrenzen (d.h. mit sprunghaften Preisänderungen) gesprochen wird, sollte immer auch deutlich darauf hingewiesen werden,**

- **dass Lastsprünge an der Viertelstundengrenze als Thema unbedingt berücksichtigt werden müssen.**
- **dass ggf. zu dem Zweck angeführte Hinweise auf mögliche Lösungsansätze nicht so verstanden werden dürfen, als sei damit das Thema auf einfachem Wege oder nachträglich lösbar.**
- **dass es bei umfassender Einführung von Tarifmodellen mit nicht-kontinuierlichem Preisverlauf ohne wissenschaftlich abgesicherte Dauerlösung der Lastsprung-Thematik möglich ist, dass manche darauf basierenden Investitionen u.U. schon nach wenigen Jahren vorzeitig abgeschrieben werden müssen.**

Deutliche Hinweise sind deshalb unerlässlich, weil bisher nahezu durchgängig der Eindruck entstehen konnte, das Thema sei entweder nicht gravierend oder ohne tiefe Eingriffe auch nachträglich/nebenbei lösbar.

Wendet man sich rechtzeitig möglichen Lösungsansätzen zu, so dürften die aussichtsreichsten Kandidaten in den Kapiteln 4.7 bis 4.9 zu finden sein. Der dafür absehbare Realisierungsaufwand und auch die dauerhaften Kosten sind Anreiz, nach einer möglicherweise noch besseren Lösung zu suchen.

Bei der Systematisierung von Bausteinen und Lösungsansätzen zu Recht an den Rand gedrängt wurde der in 4.10 beschriebene Lösungsansatz. Dadurch, dass er als einziger Lösungsansatz auf den proaktiven Einsatz der Minutenreserve verzichten kann und die genannten Nachteile zufriedenstellend lösbar erscheinen, drängt sich jedoch eine ergänzende Fragestellung auf:

Was ist langfristig sinnvoller?

- Tarifmodelle mit sprunghaften Preisänderungen weiter zu verfolgen und für deren zu vermutende gravierende Nachteile eine passende Lösung vorzusehen, oder
- von vornherein eine Gesamtlösung zu suchen, die das Ziel der Zusammenführung von Momentan-Angebot und -Nachfrage bestmöglich, ressourcenoptimiert und mit vertretbarem Aufwand erreicht – möglicherweise auf völlig neuen Wegen.

Eine Antwort auf diese Fragestellung wird sich festmachen müssen am Vergleich der Gesamtergebnisse mindestens zweier gründlich zu untersuchender Gesamtlösungen. In die Bewertungen müssen dabei alle Aspekte einfließen, die von mindestens einer der Lösungen berührt werden. Bei Untersuchung völlig neuer Wege könnten das durchaus auch Aspekte sein wie

- systemimmanente oder fehlende Transparenz und Vergleichbarkeit von Strompreisverläufen unterschiedlicher Versorger (mit Blick auf wechselwillige Kunden),
- systemimmanente oder fehlende Anreize für die Elektroindustrie zur Entwicklung möglichst energieeffizienter und stromkostensparender Geräte (→ Maximierung des Ausgleichs von Schwankungen),
- die für alle Beteiligten zufriedenstellende Einbeziehung fluktuierender Erzeugung in ein durchgängiges System mit variablen Arbeitspreisen, das langfristig beibehalten werden

kann,

- Robustheit des Verbundnetzes gegenüber zukünftig denkbaren Überangebots- und langdauernden extremen Mangelsituationen,
- automatisierte Einbeziehung der gesamten Verbrauchsseite in die adäquate Lösung dynamischer Situationen wie
  - ◆ drohende Überschreitung des Sicherheitsgrenzwerts einer Hoch-/Höchstspannungsleitung,
  - ◆ mehr als nur übergangsweises Verlassen des normalen Frequenzbereichs 49,8...50,2 Hz,
- eine evtl. mögliche ressourcenoptimierte (verteilte) Realisierung von Sekundärregelung und/oder Minutenreserve unter teilweise oder völligem Verzicht auf den dedizierten Einsatz von Kraftwerken.

Für alle diese Aspekte (und noch mehr) müssen angesichts der enormen Veränderungen auf Erzeugungsseite lange vor 2030 dauerhafte Lösungen etabliert werden. Wenn die gesamte Verbrauchsseite indirekt (über Preissignale) steuerbar wird, liegt der Gedanke nahe, diese Ressource auszubauen und für Weiteres zu nutzen.

Dass Smart Metering und die Einführung zunehmend stärker variierender Arbeitspreise ein jetzt notwendiger Schritt sind, ist unbestritten. Es darf nur nicht passieren, dass die Mehrheit der Beteiligten erst durch tatsächliche Probleme der in Kapitel 2 geschilderten Art „aufwacht“ und man dann erst anfängt, eine dauerhaft tragfähige Lösung zu entwickeln. Denn dann müsste sich ganz Europa etliche Jahre lang mit den geschilderten Problemen herumschlagen und die Zeit bis zur Einführung einer dauerhaften Lösung mit Provisorien überbrücken. Das entspräche nicht dem bisherigen Stil in der Elektrizitätswirtschaft.

# Anhang

## Literaturverzeichnis

**Amprion (2014):** Netzwelt / Regelung der Netze / Primärregelung, Sekundärregelung, Minutenreserve. Dortmund:  
<http://www.amprion.net/primarregelung-sekundaerregelung-minutenreserve>  
(Zugriff: 06.01.2014)

**Frey, H. (2006):** Preissignal an der Steckdose – intelligente Lastvergleichmäßigung. Hannover:  
[http://old.life-needs-power.de/2006/27-04-2006\\_Donnerstag/060427\\_13-30\\_SPS\\_Lifeneedspower\\_EnBW.pdf](http://old.life-needs-power.de/2006/27-04-2006_Donnerstag/060427_13-30_SPS_Lifeneedspower_EnBW.pdf) (Zugriff: 01.01.2014)

**Leibundgut, H. (2011):** LowEx Building Design . Zürich: vdf Hochschulverlag AG

**Nestle, D. (2008):** Energiemanagement in der Niederspannungsversorgung mittels dezentraler Entscheidung . Kassel: kassel university press GmbH

**regelleistung.net (2014a):** Ausschreibungsübersicht. Berlin/Pulheim/Stuttgart/Bayreuth:  
<https://www.regelleistung.net/ip/action/ausschreibung/public> (Zugriff: 01.01.2014)

**regelleistung.net (2014b):** Bestimmung des Bedarfs an Sekundärregelleistung und Minutenreserve. Berlin/Pulheim/Stuttgart/Bayreuth:  
<https://www.regelleistung.net/ip/action/dimensionierung> (Zugriff: 01.01.2014)

**regelleistung.net (2014c):** Netzregelverbund. Berlin/Pulheim/Stuttgart/Bayreuth:  
<https://www.regelleistung.net/ip/action/static/gcc> (Zugriff: 01.01.2014)

**regelleistung.net (2014d):** Allgemeines zur Regelleistung - Technische Aspekte. Berlin/Pulheim/Stuttgart/Bayreuth:  
<https://www.regelleistung.net/ip/action/static/techaspects> (Zugriff: 01.01.2014)

**Ringelstein, J.; Bendel, C.; Nestle, D. (2008):** Netz- und marktkonformes bidirektionales Energiemanagement für Lasten und dezentrale Erzeuger im Niederspannungsnetz . Kassel:  
[http://renknownet2.iwes.fraunhofer.de/pages/hybrid\\_system/data/2008\\_Graz\\_RJ\\_Bd\\_DN.pdf](http://renknownet2.iwes.fraunhofer.de/pages/hybrid_system/data/2008_Graz_RJ_Bd_DN.pdf) (Zugriff 01.01.2014)

**Schittek, W. (2008):** Strom – fit für die Zukunft? (Druckauflage) Marburg: Verlag Görlich & Weiershäuser

**Schittek, W. (2012):** Strom – fit für die Zukunft? (Online-Version 2.904) Marburg:  
[http://www.staff.uni-marburg.de/~schittek/Strom\\_fit\\_fuer\\_die\\_Zukunft.pdf](http://www.staff.uni-marburg.de/~schittek/Strom_fit_fuer_die_Zukunft.pdf) (Zugriff 01.01.2014)

**UCTE (2004):** UCTE Operation Handbook Appendix 1 – Load Frequency Control and Performance. Brüssel:

[https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/entsoe/Operation\\_Handbook/Policy\\_1\\_Appendix%20\\_final.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_Appendix%20_final.pdf) (Zugriff: 06.01.2014)

**wik-Consult – FhG Verbund Energie (2006):** Potenziale der Informations- und Kommunikations-Technologien zur Optimierung der Energieversorgung und des Energieverbrauchs (eEnergy). Bad Honnef:

[http://www.e-energy.de/documents/Studie\\_Potenziale\\_Langfassung.pdf](http://www.e-energy.de/documents/Studie_Potenziale_Langfassung.pdf) (Zugriff: 01.01.2014)

## **Versionen dieses Textes**

**1.900 vom 06.01.2014:** Vollständige Überarbeitung des gesamten Textes, noch mit Unzulänglichkeiten bei der Gestaltung.

**1.001 vom 17.02.2010:** Die unwichtigste Quantifizierung, nämlich die vermutete Häufigkeit, mit der die allerstärksten Lastsprünge zu erwarten sind, wird von „mehrmals täglich“ auf „mehrmals pro Woche“ verschoben. Dies aufgrund der Annahme, dass in zukünftigen Jahren ein nennenswerter Teil der Kühlschränke nur nachts Strom braucht und ein nennenswerter Teil der Gefriergeräte mehrere Tage lang ohne Strom auskommen kann. Die Änderungen betreffen vor allem Kapitel 2.2. Ansonsten gibt es keine qualitative oder quantitative Änderung der Kernaussagen.

**1.000 vom 18.01.2010:** Originalversion.