

# Netzregelung mit Wasserstoff-Speicherkraftwerken in zukünftig voll-regenerativen Netzen

Harald Weber

## Abstract

### *Grid control with hydrogen storage power plants in future fully regenerative grids*

*In the course of the energy transition, more and more electrical energy is generated by wind and PV plants. Some of this energy has to be stored in large chemical storage facilities (storage power plant). These new players are connected to the three-phase grid with converters and, due to the system, no longer have flywheel masses. The conventional power plants, on the other hand, will decrease in number. Therefore, the storage power plants must take over all the tasks of the conventional power plants, both for grid control and for secondary coupling.*

## 1 Zusammenfassung

*Im Zuge der Energiewende wird mehr und mehr elektrische Energie von Wind- und PV-Anlagen erzeugt. Diese Energie muss zum Teil in großen chemischen Speichern gespeichert werden (Speicherkraftwerk). Diese neuen Player werden mit Umrichtern an das Drehstromnetz angeschlossen und weisen systembedingt keine Schwungmassen mehr auf. Die konventionellen Kraftwerke dagegen werden in ihrer Anzahl zurückgehen. Deshalb müssen die Speicherkraftwerke alle Aufgaben der konventionellen Kraftwerke übernehmen und das sowohl für die Netzregelung als auch für die Sektorenkopplung.*

## 2 Einleitung

Mit der Ablösung der Dampfmaschinen durch Turbinen war zwar deren pulsierendes Drehmoment verschwunden, aber an der prinzipiellen Wirkungsweise der drehzahl- oder frequenzorientierten Regelung durch Momentan- und Primärreserveleistung hatte sich nichts geändert, da ja auch das Schwungrad in Form des Turbinen-Generator-Satzes weiter vorhanden war. Selbst in der modernen elektrischen Energieversorgung sind diese Netzregel-Prinzipien bis heute gültig, wobei allerdings im Europäischen Verbundnetz eine sprunghafte Verbraucheränderung an einem Ort zu einer europaweiten Ausspeicherung von Momentanreserve und anschließender – ebenfalls europaweiter – Bereitstellung von Primärregelleistung führt. Damit wird bei jeder Störung auch eine europaweite Lastflussverschiebung ausgelöst, da ja aufgrund der solidarischen Leistungsbereitstellung aller Erzeuger jede punktuell auftretende Störleistung von allen Kraftwerken des Netzes anteilig ausgeregelt wird.

Dampfmaschine und Dampfturbine werden hauptsächlich von fossilen Energieträgern angetrieben, was auch schon die Problematik der zukünftigen Energieversorgung umreißt. Durch den CO<sub>2</sub>-Ausstoß sowie die Endlichkeit dieser Energieträger ist ein Umstieg auf regenerative Energien zukünftig unausweichlich notwendig. Hier kommen in Deutschland Wind und Sonne

infrage. Da diese aber nicht planbar zur Verfügung stehen, müssen deren geerntete Energien in absehbarer Zeit in größerem Umfang gespeichert werden. Als ernsthafte Speicher kristallisieren sich hierbei immer mehr elektrische und chemische Speicher heraus. Die drei neuen Player in der Energieversorgung Wind, Sonne und Speicher haben eines gemein: Sie besitzen keine Schwungräder oder andere rotierende Massen mehr, da alle drei über leistungselektronische Umrichter an das Netz angeschlossen werden. Heutzutage stehen noch wenige Umrichter vielen Kraftwerken gegenüber, so dass sich die Umrichter an die Schwungmassen und deren Frequenz anpassen müssen. Das geschieht durch synthetische Erzeugung von Momentanreserve- und Primärregelleistung. Dazu berechnen die Umrichter aus der abgegebenen Wirk- und Blindleistung die passenden Spannungswinkel und -amplituden. Damit verhalten sich diese neuen Elemente dann ebenfalls wie Kraftwerke und können in das System integriert werden.

Zukünftig aber wird sich das Verhältnis umkehren: Einer Vielzahl durchaus leistungsstarker schwingungsmassefreier Umrichter bei Wind- und PV-Anlagen sowie bei Speichern und Gleichstromleitungen werden immer weniger – oder auch bald keine – konventionellen Kraftwerke mehr gegenüber stehen. Damit ist die Anpassung der Umrichter an die Welt der rotierenden Schwungmassen obsolet und eine neue Art der Netzregelung könnte eingeführt werden: Die winkelorientierte Netzregelung.

## 3 Das neue „konventionelle“ Kraftwerk oder Speicherkraftwerk

Die Grundprinzipien der Elektrischen Energieversorgung sowie der Netzregelung sind universell und müssen für alle Arten der Erzeugung, der Übertragung und Verteilung sowie des Verbrauchs wie folgt eingehalten werden:

- Weiträumige und feinverteilte Energieversorgung benötigt ein Drehstromnetz.
- Plötzliche Laständerungen müssen ins-

## Autor

Prof. Dr. Harald Weber  
Universität Rostock  
Rostock, Deutschland



tantant durch Momentanreserveleistung gespeist werden.

- Die Speicher der Momentanreserveleistung müssen im Sekundenbereich durch die Primärregelung entlastet und wieder aufgefüllt werden. Dazu werden Primärregelungs-Speicher benötigt.
- Die Primärregelung muss im Minutenbereich durch die Sekundärregelung abgelöst werden. Dabei ist dann auch deren Speicher wieder aufzuladen.
- Anschließend treten Fahrplanänderungen in Kraft, welche alle Regler wieder „auf null“ stellen.
- In einer voll-regenerativ versorgten Energieversorgung kommt noch folgende Aufgabe hinzu: Gewisse Mengen der geernteten Energie müssen für Prognosefehler sowie „Dunkelflauten“ gespeichert werden.

Bislang wurden diese Aufgaben von konventionellen Kraftwerken wahrgenommen, welche dazu aus einer Systemkette bestehend aus unterschiedlich schnellen Speichern sowie Umwandlern/Anpassern aufgebaut sind. In Bild 1a ist dazu beispielhaft die Systemkette eines Kohlekraftwerks dargestellt. Dessen Funktionsweise soll anhand einer sprungförmigen Leistungsanforderung an den Generatorklemmen dargestellt werden.

- **Umwandlung/Anpassung:** Die sprungförmige elektrische Leistungsanforderung wird vom Generator bei noch konstanter Drehzahl instantan in eine

sprungförmige Erhöhung des Luftspalt-Moments und damit der mechanischen Leistung umgesetzt.

- **Speicher:** Der Turbosatz bestehend aus Turbine-Generator-Erreger speichert instantan kinetische Energie aus und liefert diese mechanische Leistung. Dadurch sinkt die Drehzahl ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.
- **Umwandlung/Anpassung:** Der Primärregler greift über das Turbinenventil auf den Frischdampfpeicher (Trommel- oder Benson-Kessel) zu, wodurch im Sekundenbereich der Dampfstrom erhöht wird. Damit steigt das Turbinenmoment an und füllt den Drehzahl-Speicher wieder auf.
- **Speicher:** Durch den erhöhten Dampfstrom sinkt der Dampfdruck ab, welcher hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.
- **Umwandlung/Anpassung:** Der Brennstoffregler erhöht die Feuerung, um den Druck auszuregeln. Dabei wird mehr Kohle C mit Sauerstoff O<sub>2</sub> zu CO<sub>2</sub> umgewandelt. Im Verdampfer wird mehr Dampf erzeugt. Mit dem erhöhten Dampfstrom wird der Druck-Speicher wieder aufgefüllt.
- **Speicher:** Der Brennstoffregler greift im Minutenbereich auf die Kohlehalde zu und erhöht den Brennstoff-Massenstrom. Die Kohlemasse der Halde wird weniger, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Hier findet

selbstverständlich keine Wieder-auffüllung durch das Kraftwerk selbst statt, sondern die Kohle muss von außen zugeführt werden.

Durch das zunehmende Vorhandensein regenerativer Energiequellen aus Wind und Sonne muss das konventionelle Kraftwerk zu gewissen Zeiten seine Leistung stark reduzieren, um diesen Erzeugern Platz zu schaffen. Dazu muss die Mindestleistung abgesenkt und die Regelgeschwindigkeit erhöht werden. In dieser Anforderung stehen heute alle fossilen Erzeuger [3,4].

Um die o.g. Versorgungs- und Netzregelaufgaben auch weiterhin in einer voll-regenerativen Welt realisieren zu können, braucht es neue „konventionelle“ Kraftwerke, welche Energie bei „Dunkelflauten“ nicht nur liefern, sondern in Überschuss-Situationen auch speichern können. Dabei müssen diese neuen Anlagen für eine Übergangszeit auch noch in einer schwingmasse-orientierten Energieversorgung gemeinsam mit konventionellen Kraftwerken funktionieren. In einer rein umrichter-orientierten Energieversorgung können sie dann auch entweder netzbildend oder aber netzstützend bei konstanter Netzfrequenz betrieben werden, was den Übergang zur Winkelregelung bedeutet.

In Bild 1b ist die Systemkette dieses neuen, schwingmassefreien Kraftwerks dargestellt, welches im netzbildenden Modus arbeiten kann. Auch hier soll die Wirkungsweise wieder anhand einer sprungförmigen

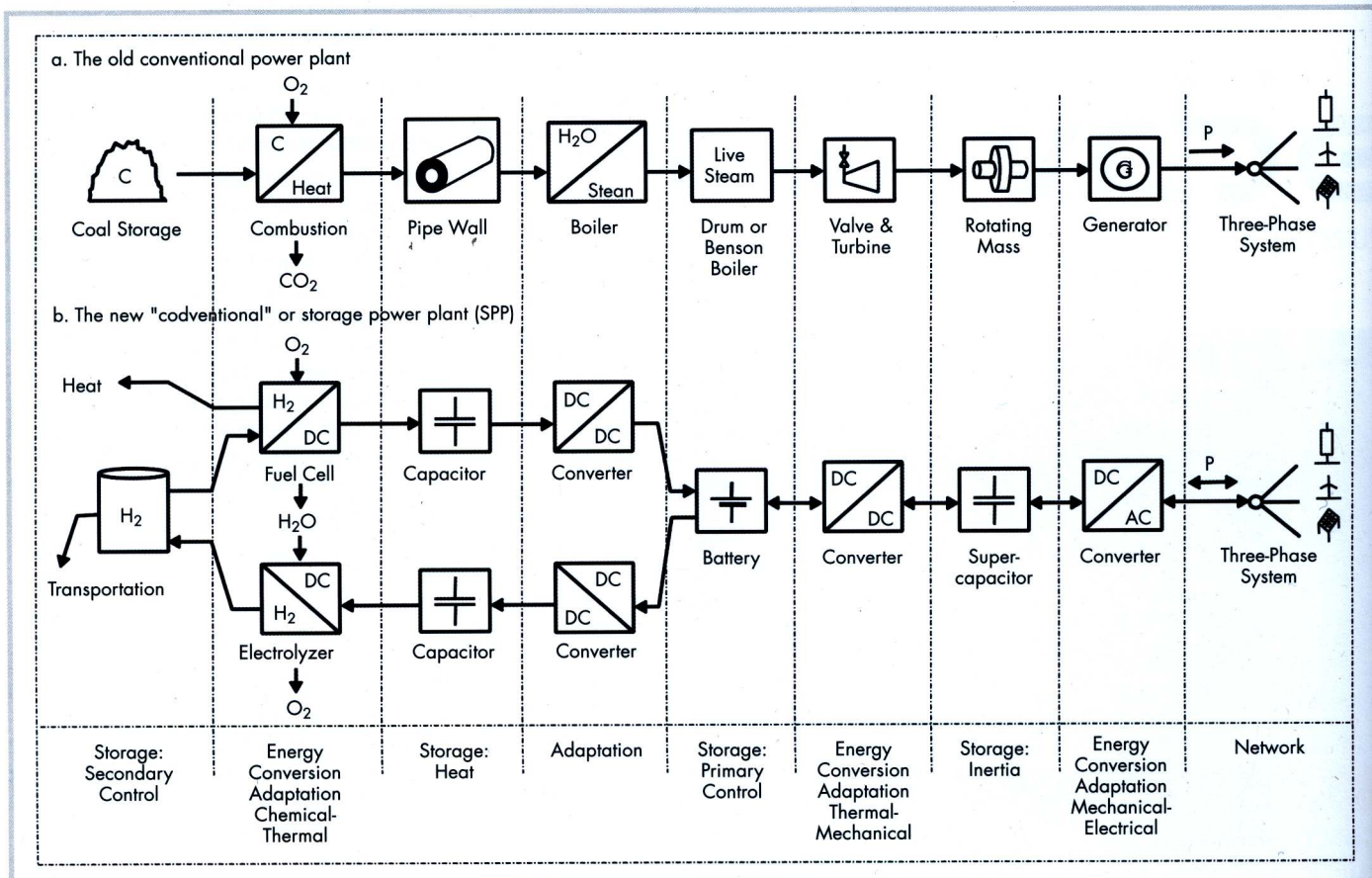


Bild 1. Vergleich von konventionellem thermischen Kraftwerk und Wasserstoff-Speicherkraftwerk.



gen Leistungsanforderung am DC/AC-Umrichter dargestellt werden:

- **Umwandlung/Anpassung:** Die sprungförmige elektrische Leistungsanforderung führt beim Umrichter bei konstant gehaltenem Netz-Spannungswinkel (netzbildend) zu einer instantanen Erhöhung des Drehstroms und damit auch zu einer instantanen Erhöhung des Gleichstroms auf der Gleichstromseite.
- **Speicher:** Der Super-Capacitor speichert instantan elektrische Energie aus und liefert diese Leistung. Dadurch sinkt seine Spannung ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Dieses Verhalten entspricht der Momentanreserve des konventionellen Kraftwerks.
- **Umwandlung/Anpassung:** Die Regelung des nachgeschalteten DC/DC-Umrichters soll die Kondensatorspannung konstant halten. Dazu greift sie auf die Batterie zu, wodurch im Sekundenbereich der Batteriestrom erhöht wird. Damit steigt der Kondensator-Ladestrom an und füllt den Spannungs-Speicher wieder auf. Dieses Verhalten entspricht der Primärregelung des konventionellen Kraftwerks.
- **Speicher:** Durch den erhöhten Batteriestrom sinkt die Batteriespannung ab, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet.

- **Umwandlung/Anpassung:** Der Brennstoffzellen-Regler erhöht die Aktivität der Brennstoffzelle, um die Batterie zu laden und die Batteriespannung auszuregulieren. Dabei wird mehr Wasserstoff  $2H_2$  mit Sauerstoff  $O_2$  zu  $H_2O$  umgewandelt. Der DC/DC-Umrichter passt dabei die Spannungen an. Mit dem erhöhten Batteriestrom-Ladestrom wird der Spannungs-Speicher wieder aufgefüllt.
- **Speicher:** Der Brennstoffzellenregler greift im Minutenbereich auf den Wasserstoffspeicher zu und erhöht den Brennstoff-Massenstrom. Die Wasserstoff-Masse des Speichers wird geringer, welche hier die Größe des Speicherinhalts kennzeichnet. Hier kann Wiederaufladung stattfinden.

Im Gegensatz zum alten konventionellen Kraftwerk, welches seine Leistungsabgabe nur bis zu einer Mindestleistung verringern kann, kann das neue konventionelle Kraftwerk seine Leistung auch umkehren und funktioniert damit wie ein Wasser-Speicherkraftwerk oder Pumpspeicherkraftwerk. Dazu wird bei Produktionsüberschuss aus den regenerativen Quellen stoßfrei von Brennstoffzellen- auf Elektrolyseur-Betrieb umgeschaltet. Der zugehörige Umrichter passt wieder die Spannung an und der Elektrolyseur erzeugt Wasserstoff passenden Drucks. Das neue konventionel-

le Kraftwerk kann somit als Speicherkraftwerk bezeichnet werden.

#### 4 Das Wasserstoff-Speicherkraftwerk in der Sektorenkopplung

In Bild 2 ist das Wasserstoff-Speicherkraftwerk als verbindendes Element in der Sektorenkopplung dargestellt. Bei Überschuss von regenerativer Energie wird der Wasserstoff-Speicher aufgeladen, während bei Strommangel aus dem Wasserstoff-Speicher das Stromsystem versorgt wird. Hierbei ist in beiden Betriebsmodi (Elektrolyseur- oder Brennstoffzellenbetrieb) stets die vollumfängliche Netzregelung garantiert, so dass bezüglich der „Netzstabilität“ keine unbeherrschbaren Situationen entstehen können.

Im Normalbetrieb soll das Wasserstoff-Speicherkraftwerk im Verbrauchsmodus arbeiten, d.h., es wird über den Elektrolyseur Wasserstoff erzeugen. Damit werden dann auch die Bereiche „Verkehr (Schwerverkehr)“ und „Wärmebedarf“ gedeckt. Die batterieelektrischen Fahrzeuge (BEV) hingegen sind als neue Verbraucher im elektrischen Netz angesiedelt. Bei Dunkelflauten jedoch wird das elektrische Netz aus dem Wasserstoff-Speicher versorgt.

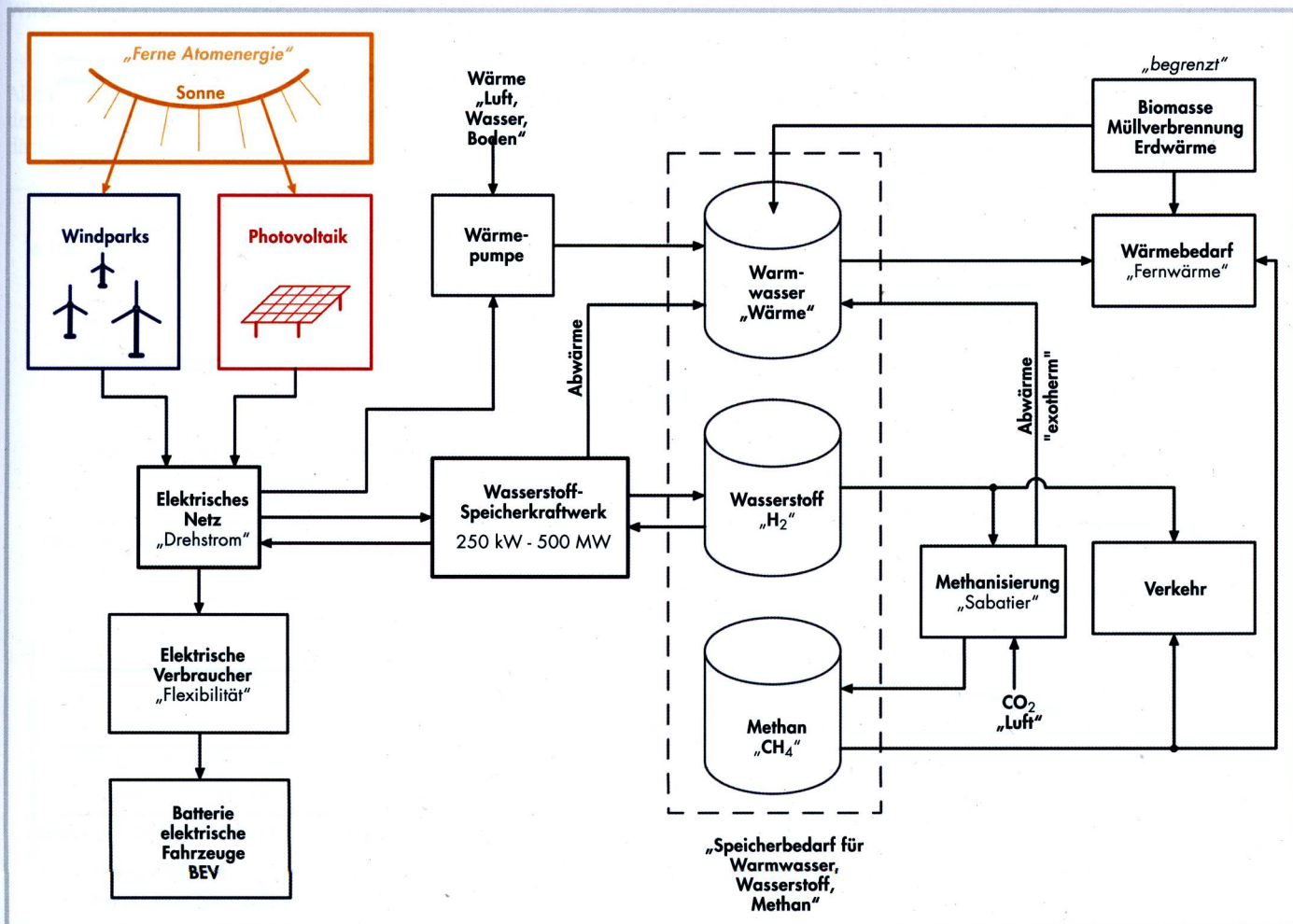


Bild 2. Das Wasserstoff-Speicherkraftwerk als Teil der Sektorenkopplung.



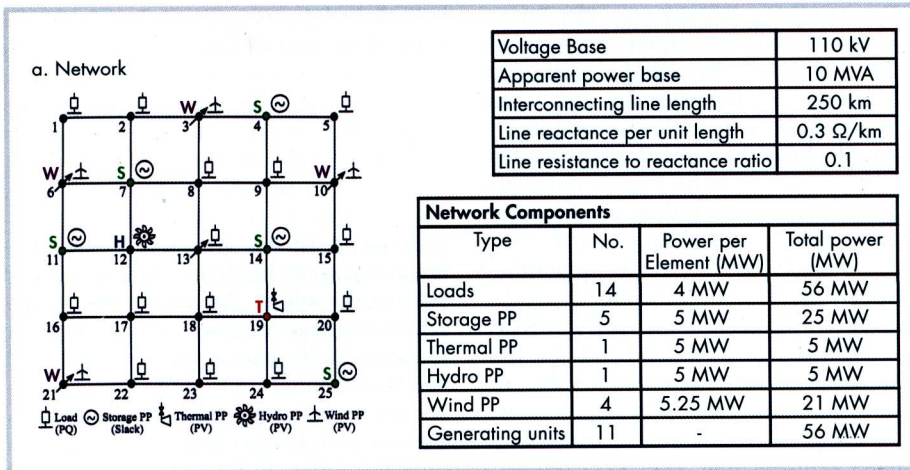


Bild 3. 25-Knoten-Beispielnetz 110 kV.

Hier ist dann auch eine hohe Flexibilität der elektrischen Verbraucher notwendig, um die Speicherkapazitäten nicht zu überlasten. Jedenfalls ist von einem weiteren starken Ausbau der erneuerbaren Energien auszugehen, damit das System im Gleichgewicht bleiben kann. Untersuchungen haben ergeben, dass alleine für den Strombedarf der Stadt Berlin in Windparks eine installierte Leistung von acht Gigawatt vorgehalten werden müsste. Deshalb sind hier auch Importe aus den Bereichen Strom,

Wasserstoff und Gas vorzusehen.

### 5 Netzbetrieb mit Wasserstoff-Speicherkraftwerken

Um den Netzbetrieb mit Wasserstoff-Speicherkraftwerken zu erläutern, ist in Bild 3 ein einfaches 25-Knoten-Beispielnetz mit seinen Kenngrößen dargestellt. In diesem Netz befinden sich neben den Wasserstoff-Speicherkraftwerken S mehrere Windparks W, ein thermisches Kohlekraft-

werk T, ein Wasserkraftwerk W sowie mehrere Verbraucher. Die Kennwerte des Netzes sind in der Abbildung in Tabellen zusammengefasst.

#### Lastzuschaltung

Im ersten Beispiel wird als Störانregung die Verbraucherlast am Knoten 13 sprunghaft von 4 auf 10 MW erhöht. Alle Kraftwerke sollen dabei gleichberechtigt an der Netzregelung teilnehmen und vor der Störung das Netz gemäß der Tabelle „Network Components“ in Bild 3 versorgen. Um die zeitliche Arbeitsweise sichtbar zu machen, werden neben der Netzfrequenz die Kraftwerksleistungen des Kohlekraftwerks, des Wasserkraftwerks und des Speicherkraftwerks am Knoten 7 in Bild 4 in per-unit-Werten dargestellt. Als Zeitbereiche wurden 2 s, 50 s und 2000 s gewählt, womit das Verhalten bezüglich der Momentanreserve, der Primärregelung und der Sekundärregelung deutlich wird.

#### Momentanreserve (Bildteil a):

Die Steigung des Frequenzabfalls zum Zeitpunkt null beträgt umgerechnet etwa - 2 Hz/s. Alle Kraftwerke liefern im ersten Moment Momentanreserve und tragen damit gemeinsam zu diesem langsamen und beherrschbaren Frequenzabfall (RoCoF)

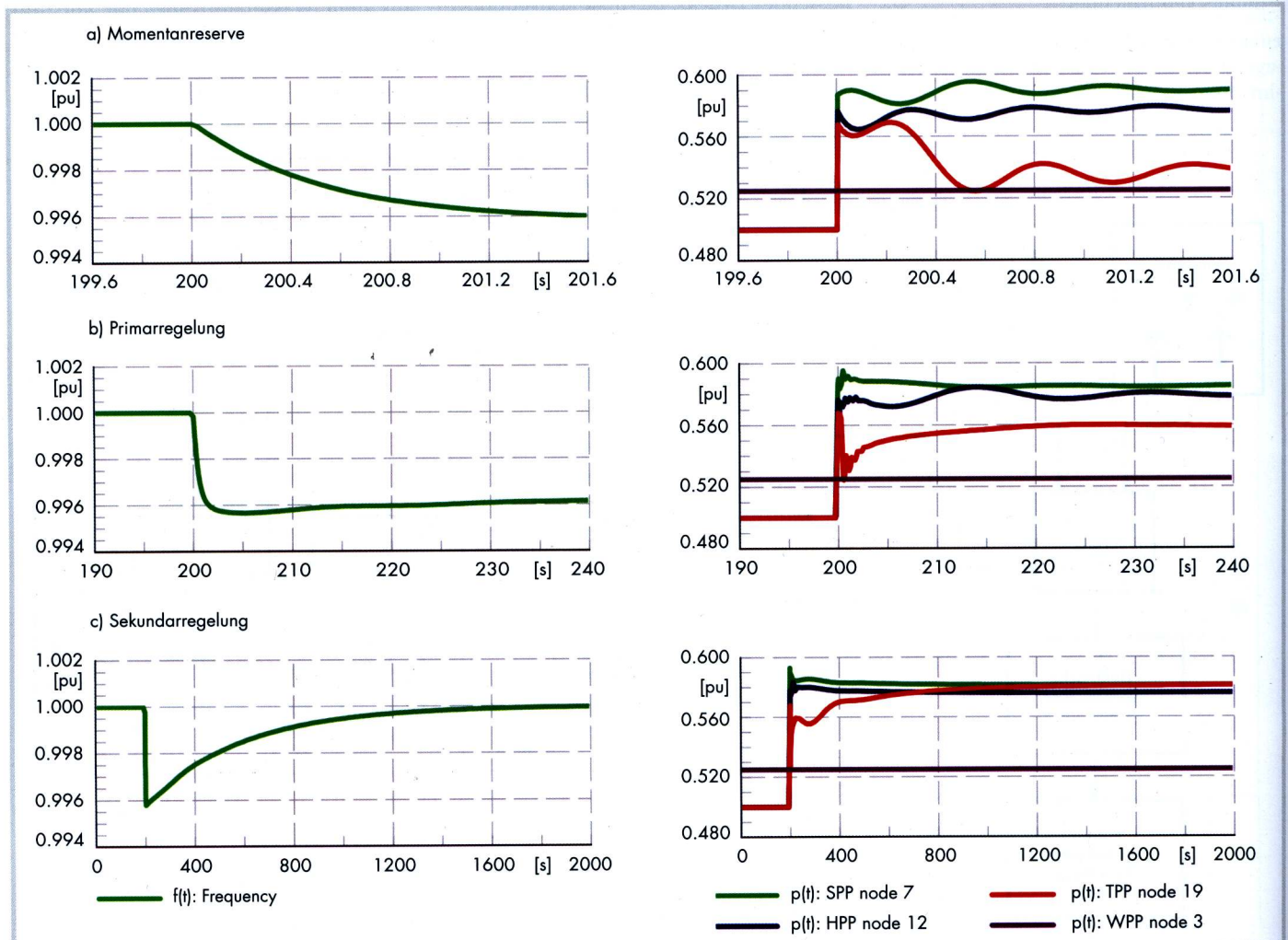


Bild 5. Frequenz und Leistungsbereitstellung der einzelnen Kraftwerkstypen T, H und S (Knoten 7).



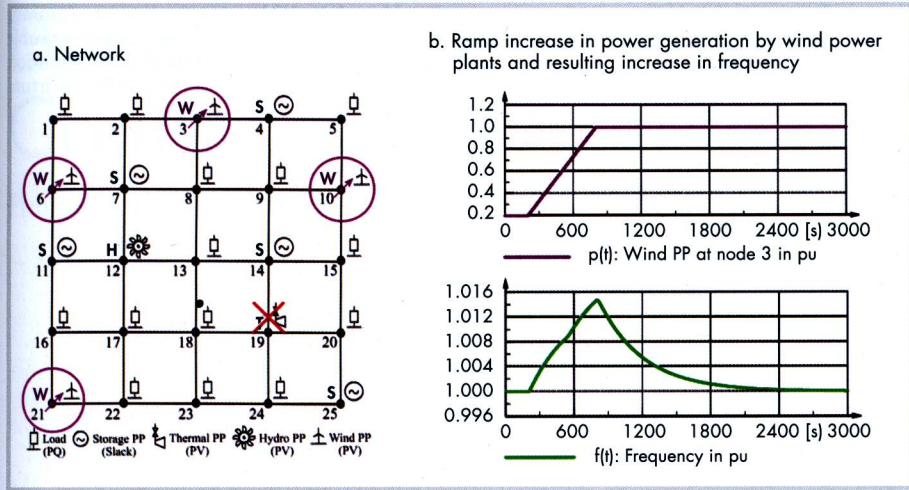


Bild 5. Ausregelung einer Windfront: Frequenzverlauf.

bei, auch die schwingungsmassefreien, per Umrichter an das Netz angeschlossenen Speicherkraftwerke.

**Primärregelung (Bildteil b):**

Neben dem Kohlekraftwerk und dem Wasserkraftwerk liefert auch das Speicherkraftwerk zuverlässig Primärregelleistung, womit ein Frequenzminimum bei etwa -0,996 pu entsprechend -200 mHz erreicht wird. Das festdruckgeregelte Kohlekraftwerk erleidet eine vorübergehende Druckreduktion, weswegen hier die abgegebene Wirkleistung etwas einbricht.

**Sekundärregelung (Bildteil c):**

Alle Kraftwerke nehmen mit entsprechender Leistungsaufteilung an der Sekundärregelung teil, weshalb die Netzfrequenz

sicher auf den Nennwert von 50 Hz zurückgeführt werden kann. Der Speicherinhalt des Wasserstoff-Speicherkraftwerks muss dabei natürlich so groß sein, dass er seine Leistungserhöhung auch über die benötigte Zeit aufrecht erhalten kann.

**Ausregelung einer Windfront**

Im zweiten Beispiel wird angenommen, dass im Netz eine durchlaufende Windfront ausgeregelt werden muss. Zudem wird hier ein voll-regenerativer Betrieb angenommen, bei welchem das Kohlekraftwerk bereits außer Betrieb ist, siehe Bild 5. Hierbei wird ein Windleistungsanstieg von 80 % der installierten Leistung innerhalb von 600 s entsprechend 10 Minuten vorausgesetzt, siehe Bild 1 b.

Bei diesem Vorgang steigt die Netzfrequenz während des Windanstiegs um 0,016 pu entsprechend 800 mHz an, um dann bei der erhöhten Windleistungs-Einspeisung aufgrund der Sekundärregelung wieder auf den Nennwert zurückgeführt zu werden.

In Bild 6 b sind die Leistungsverläufe des Wasserkraftwerks und eines Speicherkraftwerks dargestellt. Beim Ansteigen der Windleistung verringern zunächst beide Kraftwerkstypen ihre Leistungsabgabe, wobei das Wasserkraftwerk bei seiner Mindestleistung von 0,5 pu stehen bleibt. Das Speicherkraftwerk hingegen kann seine Leistung auch umkehren und damit die gesamte verbleibende Windleistung aufnehmen. Dabei geht das Kraftwerk automatisch vom Brennstoffzellen-Betrieb in den Elektrolyseur-Betrieb über, siehe Bild 6 b.

In Bild 6 c ist dazu noch der Pegel des zugehörigen Wasserstoffspeichers dargestellt. Aufgrund des Umschaltens auf Elektrolyseur-Betrieb bei Windanstieg wird der Speicher wieder aufgefüllt, was natürlich bei den konventionellen Kraftwerken nicht möglich war. Damit ist dieses Kraftwerk auch für die vollumfängliche Sektorenkopplung geeignet.

**Resümee**

Mit dem vorgestellten schwingungsmassefreien Wasserstoff-Speicherkraftwerk lässt sich in einer voll-regenerativen elektrischen Energieversorgung sowohl Netzregelung als auch Sektorenkopplung bei steter Auf-

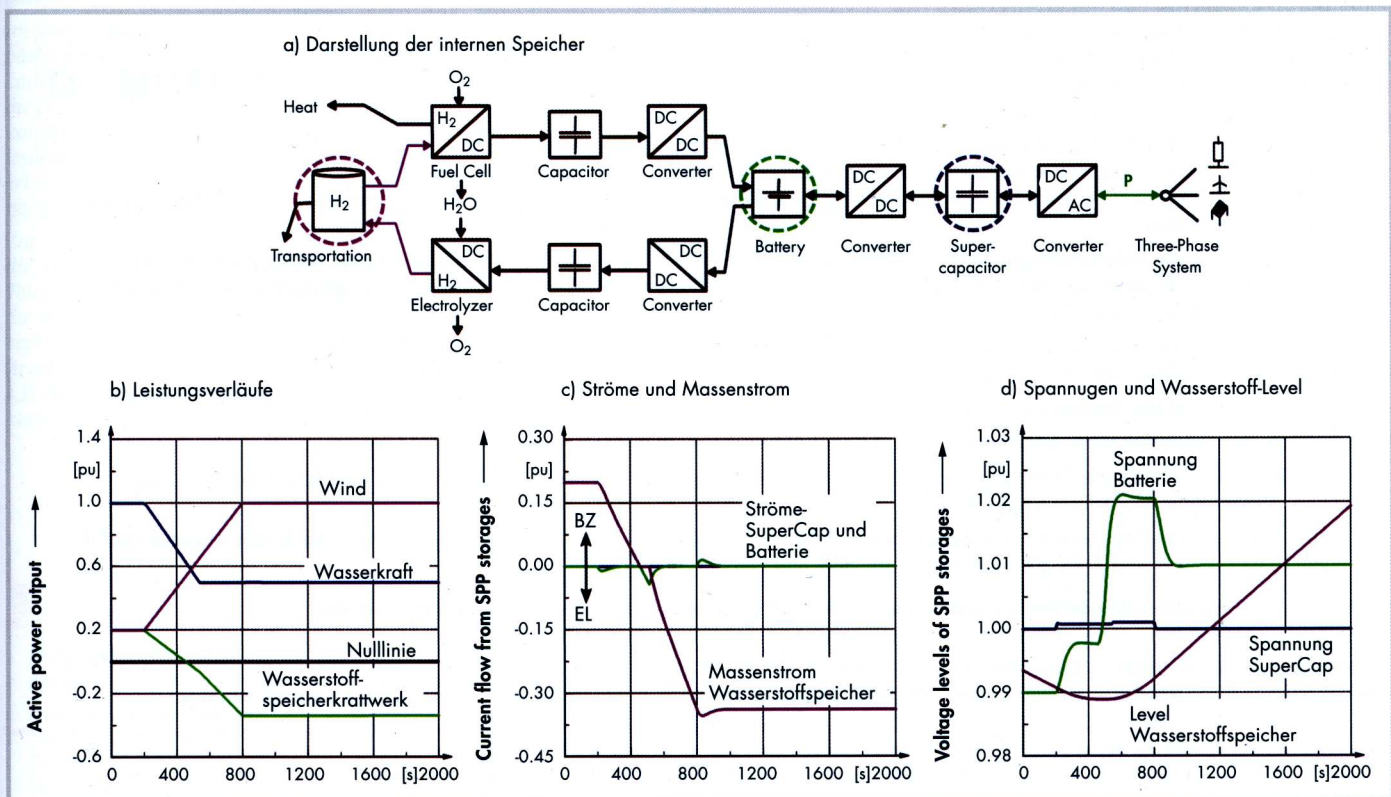


Bild 6. Ausregelung einer Windfront: Leistungen, Ströme und Level.



rechterhaltung der Versorgungssicherheit betreiben. Leistungsmäßig kann das Kraftwerk dabei so hoch-skaliert werden, dass sowohl Sektorenkopplung in Städten als auch Netzregelung und Wasserstoff-Erzeugung in industriellen Großanlagen durchgeführt werden kann. Damit ist dann eine realistische Perspektive für eine CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung gegeben.

## Literatur

1. Weber, H.: *Von der Frequenzregelung mit Schwungmassen (netzstützende Maßnahmen) zur Winkelregelung mit Umrichtern (netzbildende Maßnahmen)*, 12. ETG/GMA-Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“, 26. – 27.09.2017, Berlin.
2. Töpfer, M., Weber, H., Gerdun, P., Ahmed, N.: *Untersuchungen zur vollregenerativen Stromversorgung mit Wasserstoff-Speicherkraftwerken*, 13. ETG/GMA-Fachtagung „Netzregelung und Systemführung“ (2019), 18 - 19.09.2019, Berlin, Germany.

3. Ahmed, N., Weber, H.: *Importance of Storage Power Plants (SPP) in Large-Scale Renewable Energy Integration*, 2020 Wind Integration Workshop, 11-12 November 2020. (Virtual Conference).

## VGB-Standard

# RDS-PP®

## RDS-PP® Anwendungsrichtlinie Application Guideline

### Teil 41: Power to Gas Part 41: Power to Gas

VGB-S-823-41-2018-07-EN-DE. deutsch/englische Ausgabe 2018  
DIN A4, 160 Seiten, Preis für VGB-Mitglieder\* € 280,-, für Nichtmitglieder € 420,-, + Versandkosten und MwSt.  
Das vollständige RDS-PP® umfasst zusätzlich die Publikationen VGB-S-821-00-2016-06-DE und VGB-B 102; empfohlen werden des Weiteren der VGB-S-891-00-2012-06-DE-EN und VGB-B 108 d/e.

Für eine effiziente Abwicklung der Aufgaben von Planung, Entwicklung, Bau, Betrieb und Instandhaltung einer industriellen Anlage, ist es hilfreich, die Anlage zu gliedern und die einzelnen Anlagenteile klar und eindeutig mit einem alphanumerischen Kennzeichen zu versehen. Eine gute Kennzeichensystematik bildet die Struktur der Anlage und das Zusammenwirken ihrer einzelnen Teile genau ab.

Die Kennzeichnung unterstützt damit unter anderem ein wirtschaftliches Engineering der Anlage sowie eine kostenoptimierte Beschaffung, indem Anlagenteile mit vergleichbaren Anforderungen leicht und frühzeitig identifiziert werden können. Für Betrieb und Instandhaltung dient diese Kennzeichnung auch als eindeutige Adresse in Betriebsführungs- und Instandhaltungssystemen.

Zur Kennzeichnung von Industrieanlagen und ihrer Dokumentation gibt es internationale Normen, vor allem die DIN/EN-Reihe 81346. Das auf diesen Grundnormen basierende Kennzeichnungskonzept wird „Reference Designation System (RDS)“ genannt. Es ist prinzipiell für alle Industrieanlagen anwendbar.

Für den Kraftwerksbereich wurde in Einklang mit den Grundnormen die Fachnorm DIN ISO/TS 81346-10 veröffentlicht. Sie ist die normative Grundlage für das RDS-PP®, das „Reference Designation System for Power Plants“.

Diese Fachnorm deckt die Anwendung für alle Fachbereiche und alle Typen von Anlagen der Energieversorgung ab.

Das vorliegende Dokument regelt die Anwendung des Kennzeichensystems RDS-PP für Power to Gas Anlagen.

Die Richtlinie enthält detaillierte Festlegungen zur Referenzkennzeichnung für Anlagenteile, die spezifisch für eine Power to Gas Anlage sind (z.B. Elektrolyseur, Methanisierungssystem).

Für Anlagenteile, die projektspezifisch variieren, gibt die Richtlinie prinzipielle Anleitungen mit Beispielen, die im konkreten Anwendungsfall sinngemäß umzusetzen sind. Dies gilt insbesondere für Hilfs- und Nebensysteme.

\* Für Ordentliche Mitglieder (Anlagenbetreiber und -eigentümer) des VGB ist der Bezug von eBooks im Mitgliedsbeitrag enthalten.

