

# Dezentrale Speicher und andere Methoden zur Steigerung der Hosting Capacity in Verteilnetzen

## Ergebnisse aus dem Projekt Stromspeicher2050

Peter EDER-NEUHAUSER<sup>(1)</sup>, Johannes KATHAN<sup>(2)</sup>, Daniel BURNIER DE CASTRO<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Technische Universität Wien, <sup>(2)</sup> & <sup>(3)</sup> Austrian Institute of Technology

### **Kurzfassung:**

Die Integration dezentraler Erzeugung in Verteilnetzen hat Auswirkung auf das lokale Spannungslevel und die Auslastung von Netzkomponenten. Das Ausmaß ist vor allem von der Netztopologie, der Ausdehnung des Netzes und den verbauten Komponenten abhängig. Damit ist die Integration verteilter Erzeuger begrenzt. Um die Durchdringung von erneuerbaren Energien zu steigern ist es notwendig bestehende Verteilnetze mit verschiedenen Maßnahmen zu unterstützen.

In dieser Arbeit werden verschiedene Integrationsprobleme dezentraler Erzeuger sowie mögliche Lösungsansätze analysiert. Dazu wurde in einer Fallstudie Simulationen an einem typischen ländlichen Verteilnetz durchgeführt, das sich durch die geografische Ausbreitung und geringe Leitungsquerschnitte mit gleichzeitig viel verfügbarer Fläche für erneuerbare Erzeuger zu dieser Betrachtung besonders eignet. Zur Bewertung der Wirksamkeit einzelner Integrationsmaßnahmen wird die Methodik der Hosting Capacity herangezogen. Diese erlaubt die systematische Bestimmung der möglichen Anschlussleistung von Erzeugungseinheiten an einem Netzknoten. Es wurden Blindleistungsregelung, Wirkleistungsregelung, Stufensteller, Netzverstärkung und Speichersysteme als Maßnahmen untersucht. Die maximale Einspeisung wurde an dem Punkt bestimmt, wo unzulässige Spannungsanhebung oder maximale Auslastung die Grenzen der Infrastruktur erreichen.

**Keywords:** Netzsimulation, Hosting Capacity, Spannungshaltung, Photovoltaik, elektrische Speicher, Blindleistungsregelung, Kabel- und Transformatorauslastung

## 1 Einleitung

Mit einer steigenden Erzeugungsleistung von dezentralen Erzeugern im Verteilnetz können negative Effekte für die Versorgungsqualität und Komponenten entstehen. Ein wesentliches Problem bei dezentraler Einspeisung ist die Spannungsanhebung. Durch Einspeisung auf der Verteilnetzebene wird die lokale Netzspannung angehoben. Das Spannungsband darf nicht außerhalb seiner definierten Grenzen betrieben werden. Das reservierte Spannungsband für dezentrale Einspeisung erlaubt nach [1] eine Spannungsanhebung von 3% im Niederspannungsnetz und 2% im Mittelspannungsnetz. Bei Überschreiten dieser Grenzen können Netzkomponenten oder Verbraucher zu Schaden kommen. Durch Rückspeisung in höhere Netzebenen werden Leitungen und Transformatoren belastet wobei die Auslastungsgrenzen (vgl. [2], [3]) einzuhalten sind. Um diese Problemstellungen zu bearbeiten, ist es notwendig bei größerer Durchdringung von dezentraler Erzeugung wirkungsvolle Maßnahmen zu diskutieren. Daher behandelt diese Arbeit die Frage welche Maßnahmen, in welchem Ausmaß, zur Erhöhung der Hosting Capacity in ländlichen Verteilnetzen beitragen.

---

<sup>1</sup> Gusshausstraße 25, 1040 Wien

+43 1 5880 138951

[peter.eder.neuhauser@nt.tuwien.ac.at](mailto:peter.eder.neuhauser@nt.tuwien.ac.at)

<sup>2</sup> Giefingasse 2, 1210 Wien

+43 50550-6027

[johannes.kathan@ait.ac.at](mailto:johannes.kathan@ait.ac.at)

Das Verteilnetz wird heute weitgehend ohne aktive Regelungsansätze betrieben. Durch dezentrale Erzeugung müssen im Verteilnetz flexible Mechanismen für eine aktive Regelung geschaffen werden. So kann z.B. durch Veränderung des Einspeisewinkels an der Erzeugungsanlage die Spannung durch Blindleistung beeinflusst werden. Durch Wirkleistungsbegrenzung kann die Einspeisung direkt verringert werden. Durch eine Erhöhung der Kurzschlussleistung  $S_{KV}$  im Netz aufgrund von Leitungstausch kann die Spannungsanhebung ebenfalls reduziert werden.

## 2 Methodik

Ein Referenznetz und ein reales Mittelspannungsnetz werden mit der Bewertungsmethodik der Hosting Capacity (HC) untersucht. Die HC ist definiert nach [9] als die maximale Leistung an dezentraler Erzeugung, ohne dass eine inakzeptable Verschlechterung der Versorgungsqualität eintritt bzw. unzulässige Komponentenbelastung vermieden wird. In dieser Arbeit werden verschiedene Integrationsmaßnahmen für ein ländliches Verteilnetz über Lastflussberechnungen und dynamische Netzsimulationen untersucht und ausgewertet (vgl. [5]). Das entwickelte Referenznetz dient zur Entwicklung und Beschreibung einzelner Maßnahmen und erlaubt einen konsistenten Vergleich bzw. Parameterstudien. So werden unterschiedliche Erdkabel auf Spannungsgrenzen und Leitungsauslastung bei steigender Leitungslänge und Einspeiseleistung untersucht.

Die einzelnen Anwendungsfälle bzw. Untersuchungsszenarien werden mit Tages- und Jahresprofilen von Erzeugung und Bedarf durchgeführt, um so die Regelungsmaßnahmen im Betrieb abzubilden. Die in der Untersuchung verwendeten Profile werden im Verbraucherzählpeilsystem (VZPS) abgebildet. Das Photovoltaik-Profil stammt aus [11]. Tabelle 1 fasst die Messbedingungen des Tagesprofils zusammen.

*Tabelle 1 Quelldaten gemessenes Photovoltaik-Tagesprofil*

Referenzwert	Wert	Einheit
Ausrichtung	Süd	-
Aufständigung	35	°
Maximale Wirkleistung	-0,74	p.u.
Zeitliche Auflösung	1	Sekunde

Das PV-Jahresprofil basiert auf Daten von NASA [12] aufbereitet mit HOMER [13]. Es handelt sich um über mehrere Jahre gemittelte Monatswerte. Tabelle 2 zeigt die Daten des Jahresprofils.

*Tabelle 2 Quelldaten Photovoltaik-Jahresprofil nach [12]*

Referenzwert	Wert	Einheit
Ausrichtung	Süd	-
Aufständigung	30	°
Maximale Wirkleistung	-0,83	p.u.
Zeitliche Auflösung	15	Minuten

Für das Bedarfsprofil wird das synthetische Lastprofil für Haushalte (H0) verwendet [14]. Die maximale Wirkleistung liegt bei 0,8 p.u. und die maximale Blindleistung bei 0,36 p.u.

### 2.1 Erzeugungseinheit

Ein bestehendes Modell für die Regelung von dezentralen Erzeugungsanlagen [8] wird verwendet um eine aktive Steuerung von Blind- und Wirkleistung zu ermöglichen. Diese sind jeweils über definierte Punkte parametrisierbar. Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen die definierten Regelungsfunktionen bzw. die möglichen Parameterpunkte.

Bei Unterspannung zwischen 0,97 und 0,98 p.u. wird Blindleistung ins Netz geliefert und somit die Spannung angehoben. Zwischen 1,018 und 1,0195 p.u. Überspannung wird laut Abbildung 1

Blindleistung aus dem Netz bezogen wodurch die Spannung lokal sinkt. Auf diese Weise kann mehr Wirkleistung eingespeist werden ohne die Spannung weiter anzuheben. Blindleistungsbezug und Wirkleistungseinspeisung verhalten sich proportional. Zwischen 1,0195 p.u. und 1,0205 p.u. ist die Wirkleistungsbegrenzung aktiv (Abbildung 2). In diesem Bereich wird von 100% auf 0% gedrosselt. Damit ist es möglich Spannungserhöhungen zu vermeiden.

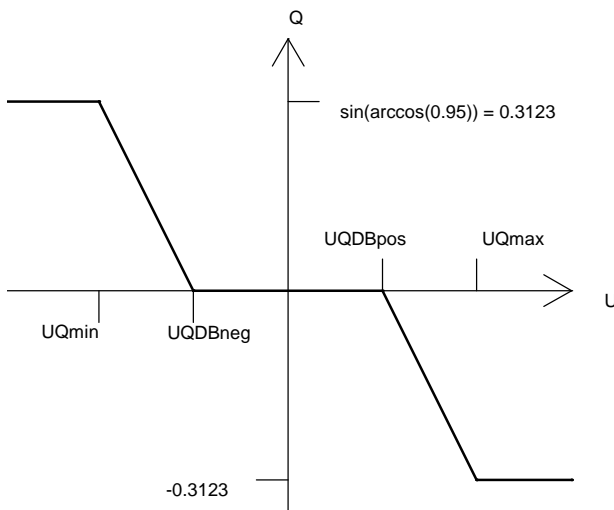


Abbildung 1 PV-Regler: Blindleistungsregelung

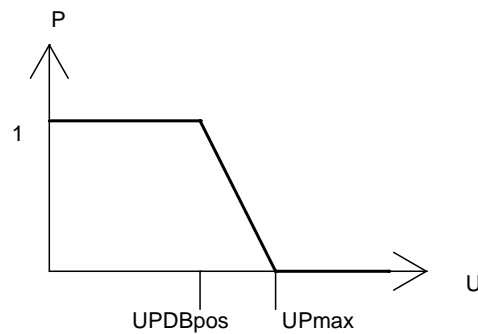


Abbildung 2 PV-Regler: Wirkleistungsbegrenzung

## 2.2 Speichersystem

Ein bestehendes Speichermodell [7] wird für den Betrieb im Mittelspannungsnetz adaptiert. Es besteht aus einer Kontrolleinheit, einem Umrichter und einem Batteriespeicher der im Modell implementierte Regler versucht durch Wirkleistungsaufnahme die Netzspannung auf 1,02 p.u. zu halten bei gleichzeitiger Beachtung des Ladezustandes der Batterie. Das bedeutet, dass ab einer Spannung von 1,019 der Speicher lädt und darunter entlädt. Gleichzeitig wird eine Überladung ab 90% Ladegrad bzw. eine Tiefentladung unter 10% verhindert. Dadurch ist der Speicher im Einsatz durch die gewählte Kapazität beschränkt.

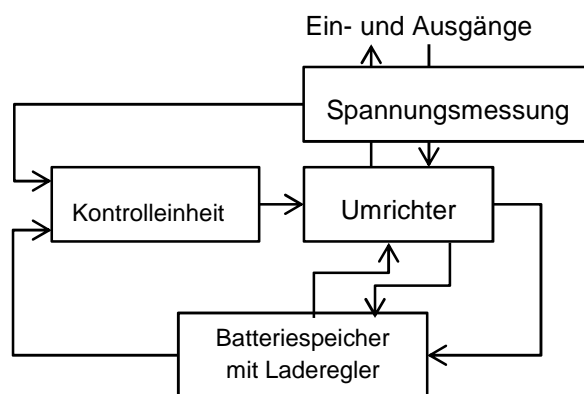


Abbildung 3 Speicher-Strategie eig. Darst. nach [8]

Tabelle 3 zeigt die Parameter für den Speicher wobei die Einstellungen auf Tages- und Jahres-simulation optimiert wurden. Die Lade- und Entladewirkungsgrade beziehen sich auf die Ladeelektronik bzw. auf die Batterie. Der Gesamtwirkungsgrad ergibt sich wie folgt:

$$\eta_{gesamt} = \eta_{Umr\_Ladung} \times \eta_{Umr\_Entladung} \times \eta_{Batt\_Ladung} \times \eta_{Batt\_Entladung} \quad \text{Formel 2-1}$$

$$\eta_{gesamt} = 0,95^4 = 0,8145$$

Tabelle 3 Einstellwerte des Speicher-Reglers

Formelzeichen	Beschreibung	Wert	Einheit
	Speicher-Regelspannung	1,019	p.u.
$\eta_{Batt\_Ladung}$	Ladewirkungsgrad Batterie	0,95	-
$\eta_{Batt\_Entladung}$	Entladewirkungsgrad Batterie	0,95	-
$\eta_{Umr\_Ladung}$	Ladewirkungsgrad Umrichter	0,95	-
$\eta_{Umr\_Entladung}$	Entladewirkungsgrad Umrichter	0,95	-
$\eta_{gesamt}$	Gesamtwirkungsgrad	0,8145	-

### 3 Maßnahmenübersicht zur Netzintegration

Die in der Praxis gängigen Methoden zur Ertüchtigung der Verteilnetze sind passive Methoden welche nach der Installation keine weiteren Stellmöglichkeiten zulassen: Netzausbau, Transformatortausch, Längsregler und Strangkompensation<sup>2</sup> sind solche Maßnahmen und werden großzügig dimensioniert um künftigen Zubau zu erlauben. [7] Kapitel 2.1 argumentiert, dass die Peakleistung selten erreicht, jedoch das Netz auf die maximale Einspeisung ausgebaut werden muss. Aktive Maßnahmen zeichnen sich dadurch aus, direkt in den Netzbetrieb einzugreifen. Laststufenregler, Blindleistungsregelung, Wirkleistungsbegrenzung, Speicher, Demand Side Management sind aktive Maßnahmen, die einzeln oder in Kombination angewendet werden können.

Die definierten Maßnahmen bzw. deren Wirksamkeit und Verhalten werden in einem Referenznetz untersucht. Dazu werden dynamische Simulationen über einen Zeitraum von 24 Stunden ausgeführt die das Stabilitätsverhalten ermitteln. Weiters werden Simulationen über den Zeitraum eines Jahres durchgeführt um die resultierenden Energiesummen zu ermitteln, woraus abgeleitet wird wie hoch die Gesamtverluste einzelner Maßnahmen sind bzw. Anforderungen an die Speicherkapazität abgeleitet werden können.

Das Referenznetz besteht aus einem externen Netz (Slack), einem Transformator mit einer Leitung, einem Erzeuger, einer Last und einem Speicher. Der Stufensteller am Transformator ist deaktiviert. Die Grenzwerte der Netzkomponenten gelten für alle Simulationen:

- maximal zulässige Auslastung der Leitung von 70% nach [10]
- Spannungsanhebung am Ende der Leitung von  $U_{Leer} + 2\%$
- angenommene maximale Transformatorauslastung von 80%.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Daten des Transformators der in allen Untersuchungen verwendet wird.

Tabelle 4 Kenndaten des Transformators nach [4]

Referenzwert	Wert	Einheit
Nennscheinleistung	32	MVA
Nennfrequenz	50	Hz
Spannung Oberseite	110	kV
Spannung Unterseite	30	kV
Maximale Schaltstufe	25	-
Minimale Schaltstufe	1	-
Spannungsänderung pro Stufe	1	%

<sup>2</sup> Längsregler und Strangkompensation werden in dieser Arbeit nicht näher betrachtet, gehören jedoch zu den passiven Maßnahmen. weiterführende Literatur [9] Kapitel 5.3.5

Die Kabelspezifikation für das Referenznetz ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 Kabeldaten generisches Testnetz

Typ	Material	Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Nennstrom [kA]	Länge [km]
N2YSY	AL	240	0,395	30

Ohne Last und Erzeugung beträgt die Referenzspannung 1,00 p.u.. In einem ersten Schritt wird die Basis Hosting Capacity durch Zuschaltung von ungenerierter Einspeisung ohne Last ermittelt. Diese beträgt 6,1 MW<sub>peak</sub>. Bei aktiver Last erhöht sich die HC auf 11,2 MW<sub>peak</sub> und kann bis zum Erreichen der zulässigen Spannung mehr PV-Leistung einspeisen. Die maximale Leitungs- und Transformatorauslastung werden in diesem Szenario zu keinem Zeitpunkt überschritten.

### 3.1 Netzausbau, Leitungsverstärkung

Die Leitungsverstärkung ist die gängigste Methode zur Steigerung der Aufnahmekapazität von Verteilnetzen. Um die diese Maßnahme detaillierter zu betrachten wird eine Parameterstudie durchgeführt, die die Effekte erdverlegter Kabel bei steigenden Einspeiseleistungen, Leitungslängen und -typen inklusive Transformator analysiert. Es wird ein Generator mit sechs verschiedenen Leitungstypen über verschiedene Leitungslängen simuliert. Die Einspeiseleistung wird inkrementell von 0 MW auf die maximale Nennscheinleistung des Transformatormodells (32 MW) ebenso wie die Leitungslänge erhöht. Bei Erreichen der maximal zulässigen Auslastung der Leitung oder des Transformators ist die Hosting Capacity erreicht. Es wird keine Blindleistung eingespeist und symmetrische Belastung angenommen. Die Kabellänge wird mit 40 km begrenzt da im österreichischen Mittelspannungsnetz kaum längere Leitungen vorkommen [10].

zeigt Material, Querschnitt & Nennstrom der in der Parameterstudie untersuchten Leitungstypen. Ein Vergleich unterschiedlicher Kabeltypen zeigt, dass die maximale Auslastung und die maximal zulässige Spannung nicht proportional mit dem Querschnitt steigt. Dies ist auf Länge, thermische Erwärmung und Skin-Effekt zurückzuführen. Bei doppeltem Querschnitt kann nicht die doppelte Leistung eingespeist werden kann.

Tabelle 6 Kabeldaten nach [6]

Typ	Material	Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Nennstrom [kA]
N2YSY	AL	120	0,27
N2YSY	AL	240	0,395
N2YSY	AL	500	0,57
N2YSY	CU	120	0,345
N2YSY	CU	240	0,505
N2YSY	CU	500	1

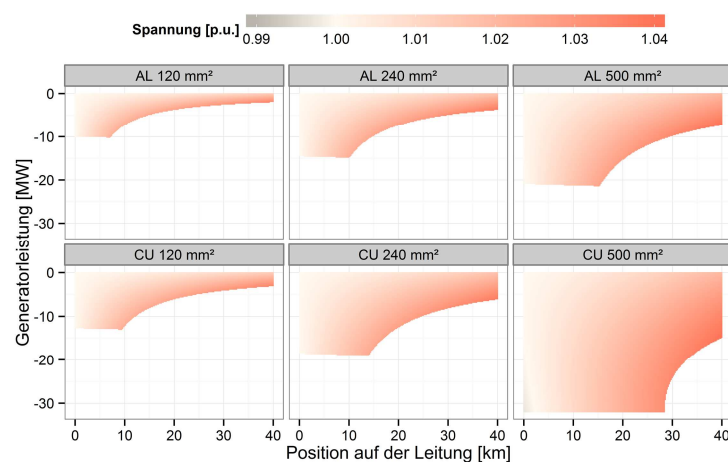


Abbildung 4 Spannung über Kabellänge und Generatorleistung

Alle Kabeltypen außer Kupfer (CU) 500 mm<sup>2</sup> erreichen bei kurzen Leitungslängen (< 20 km) als Grenzkriterium die Leitungsauslastung von 70% (vgl. [10]). Bei einer CU 500 mm<sup>2</sup> Leitung erreicht der Transformator vorher die maximale Auslastung. Dies bedeutet dass in diesem Fall das Kabel mehr Leistung führen könnte als der Transformator. Je größer die Leitungslänge desto eher tritt eine lokale Spannungserhöhung ein, ohne dass das Kabel überlastet wird. Bei Aluminium (AL) 500 mm<sup>2</sup> ist nach 15 km die Länge erreicht, an der die 21 MW Einspeisung das Grenzkriterium der Leitungsauslastung erreichen. Ab 16 km erreicht das Kabel nicht mehr die maximale

Auslastung, sondern die maximale Spannungsanhebung. Abbildung 4 zeigt die Spannung am Ende der Leitung über die Leitungslänge und Generatorleistung.

Die Hosting Capacity (HC) ist für jede Leitungslänge unterschiedlich, daher wird die Leitungslänge aufgrund der Vorkommnisse im realen Netz auf 30 km beschränkt. Zwischen den drei Aluminium Leitertypen ergibt sich am Ende der Leitung eine mögliche Einspeisung von 2,5 MW, 5 MW und 10 MW. Was einer jeweiligen Verbesserung der Hosting Capacity von 100% entspricht. Bei den Kupfer Leitern liegen die Einspeiseleistungen bei 4 MW, 8 MW und 25 MW. Das entspricht einer Steigerung von 100% und 213%. [9] diskutiert dass die HC, in urbanen Netzen bei geringen Leitungslängen und starker Vermaschung, eher durch thermische Überbelastung erreicht wird. Bei langen Leitungen wirkt sich die Spannungserhöhung am stärksten aus.

### 3.2 Stufentransformator

Der Stufentransformator ist eine Methode zur variablen Veränderung der Anzahl der primärseitigen Windungen am Transformator während des Betriebes. Sie dient zum Halten der sekundärseitigen Spannung, in den Toleranzgrenzen. In Zukunft werden Laststufenregler im Verteilnetz vermehrt notwendig sein um die Herausforderungen von dezentralen Erzeugern an das Netz beherrschbar zu machen. In der Realität sind, bedingt durch die Spannungsänderung in allen parallelen Netzabschnitten nur wenige Stufenstellungen möglich um das Spannungsband in geregelten Grenzen zu halten.

Ein Laststufenregler wird am Umspanner bei steigender Einspeiseleistung und Last (3 MW) ohne Speicher simuliert. Der Stufensteller am Transformator regelt zu jeder Zeit auf die Spannung an der Klemmleiste auf seiner Unterspannungsseite. Die neutrale Stufenstellung ist 12 wobei zwischen 25 Stufen geregelt werden kann und jede Stufe 10% Spannungsdifferenz beträgt. Die Simulation zeigt, dass bei Einspeisung von mehr als  $11,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$  die Spannung den Grenzwert von 1,02 p.u. übersteigt. Durch Zuschalten des Stufenstellers kann die Spannung in den zulässigen Grenzen gehalten werden. Bei einer Verringerung der Einspeisung wird die Stufenstellung wieder erhöht. Ab einer Einspeiseleistung von  $56 \text{ MW}_{\text{peak}}$  ist es notwendig dass der Stufensteller die kleinste mögliche Stufe 0 ansteuert. Die Maßnahme Stufensteller hat hier seine Grenze erreicht und bei weiterer Einspeisung treten Spannungserhöhungen auf.

### 3.3 Blindleistungsregelung

Über Blindleistungsregelung ist es möglich die Spannung am anliegenden Netzknoten innerhalb der zulässigen Spannungsgrenzen zu halten. Nach [15] müssen Wechselrichter in jedem Betriebspunkt mindestens eine Phasenverschiebung von  $\cos \varphi = 0,95$  in beiden Richtungen bereitstellen können. Blindleistung kann einerseits zur Spannungshaltung verwendet werden, andererseits belastet sie das Netz mit Blindströmen. Je mehr Blindleistung im Netz transportiert werden muss, desto höher ist die Auslastung der übertragenden Netzkomponenten. Die erzeugte Blindleistung von dezentralen Erzeugern muss von einem anderen Netzteilnehmer kompensiert werden.

Die Wirkung der Blindleistungsregelung auf die HC inklusive Last (3 MW) wird mit der in Kapitel 2.1 dargestellten Regelung untersucht. Die Ermittlung der Hosting Capacity erfordert eine Betrachtung der Auslastung der Infrastruktur. Bereits bei  $21,7 \text{ MW}_{\text{peak}}$  Einspeisung erreicht die Leitungsauslastung 70%. Daraus ergibt sich eine maximale Erhöhung um  $10,5 \text{ MW}_{\text{peak}}$  oder 93,7% von  $11,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$  (Basis HC) auf  $21,7 \text{ MW}_{\text{peak}}$ . Eine Leitungsverstärkung würde die HC anheben. Um bei dieser Maßnahme einen Regelungsbereich zu zeigen an dem die Q-Regelung an ihre Grenzen stößt wurde der Leistungsfaktor bei einer Einspeiseleistung von  $20 \text{ MW}_{\text{peak}}$  auf 0,98 verändert. Auf diese Weise kann ab ca. 10:30 Uhr der Regler die Spannungskriterien nicht mehr halten. Ab diesem Zeitpunkt muss wie dargestellt eine andere Maßnahme greifen (in diesem Fall Wirkleistungsbegrenzung).

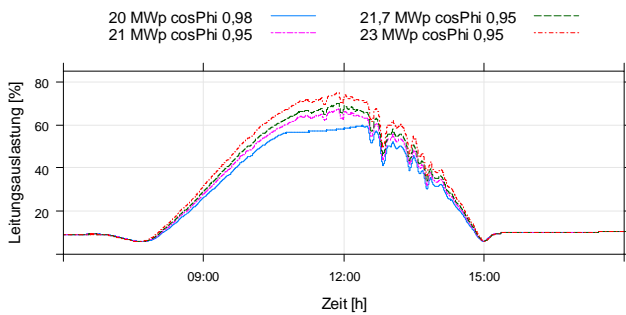


Abbildung 5 Q-Regelung: Leitungsauslastung

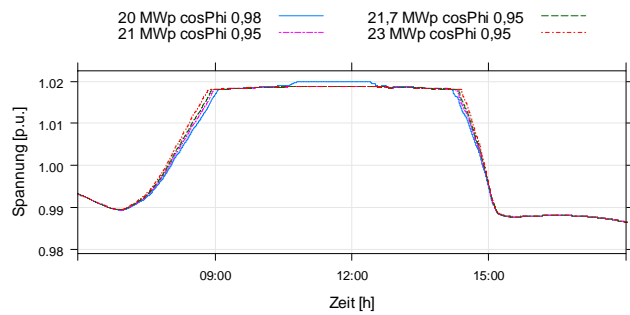


Abbildung 6 Q-Regelung: Spannung

Eine Jahresanalyse zeigt dass durch Q-Regelung bei einem Leistungsfaktor von 0,95 und einer PV-Leistung von  $< 21,7 \text{ MW}_{\text{peak}}$  die gesamte Energie ins Netz geliefert werden kann. Daher treten keine Energieverluste wie vergleichsweise bei Wirkleistungsbegrenzung auf.

### 3.4 Wirkleistungsbegrenzung

Wirkleistungsbegrenzung reduziert die Einspeisung der Anlagenbesitzer. Nach [38] Kapitel 2.5.3 muss eine Erzeugungsanlage mit reduzierter Leistung betrieben werden können. Der Netzbetreiber ist berechtigt, eine vorübergehende Begrenzung der Einspeiseleistung zu verlangen. Alle Erzeugungseinheiten müssen im Betrieb bei einer Frequenz von mehr als 50,2 Hz die momentane Wirkleistung, mit einem Gradienten von 40% der momentan verfügbaren Leistung des Generators je Hertz absenken. Die Reduktion von Wirkleistung wirkt direkt auf die Einnahmen des Erzeugers.

Wirkleistungsbegrenzung kann zu jeder Zeit eine stabile Spannungshaltung gewährleisten. Der Regler begrenzt die Wirkleistungsbegrenzung am Erzeuger auf Kosten der Einspeisung. Es werden folgende Erzeugergrößen über ein Tagesprofil simuliert: 8, 10 und 11,2  $\text{MW}_{\text{peak}}$ , 12, 14 und 16  $\text{MW}_{\text{peak}}$ .

Mit der Maßnahme Wirkleistungsbegrenzung kann jede Anlagengröße ans Netz gebracht werden jedoch ist dies aufgrund der Energieverluste über den Zeitraum eines Jahres nur begrenzt sinnvoll. Abbildung 7 zeigt einen annähernd linearen Anstieg der Jahresverluste über die Einspeiseleistung. Der maximal akzeptable Energieverlust wird mit 10% angenommen. Auf diese Weise wird abgeleitet dass die Hosting Capacity mit  $< 16 \text{ MW}_{\text{peak}}$  PV-Leistung begrenzt ist.

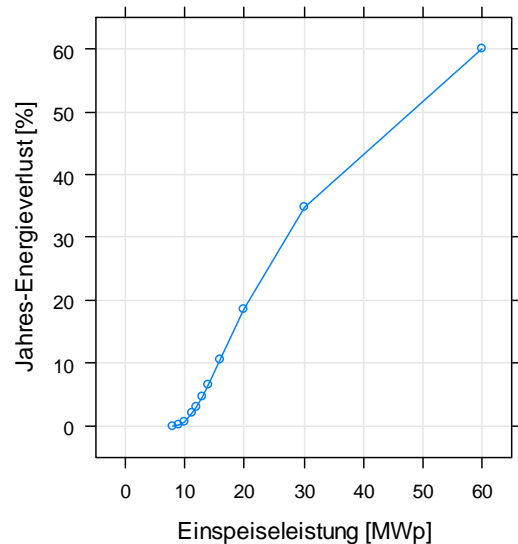


Abbildung 7 P-Regelung: Jahreserzeugung und Verluste

### 3.5 Speichersysteme

Speicher agieren als Entkopplungsmechanismen von Erzeugung und Verbrauch, da sie auf beide Weise im Netz wirksam sind. Sie sind modular erweiterbar und können nahezu allen technischen Gegebenheiten angepasst werden. Ein netzseitig gekoppelter Speicher hat die Möglichkeit die Spannung in geregelten Grenzen zu halten. Bei Auftreten von Überspannungen kann der Speicher die Überschussenergie aus dem Netz entnehmen und somit die Spannung absenken.

Ein Batteriespeicher zur Erhöhung der Hosting Capacity mit dem definierten Modell (siehe Kapitel 2.2) inklusive Last (3 MW) wird simuliert. Die Wirkleistungsbegrenzung der Erzeugungseinheit bleibt aktiv um den Speicher zu ersetzen, wenn der Speicher vollständig geladen ist. Abbildung 8

zeigt Spannung und Wirkleistung am Netzknoten über eine Tagessimulation. Ab einer Einspeisung größer 11,2 MW<sub>peak</sub> ist ein Speicher notwendig.

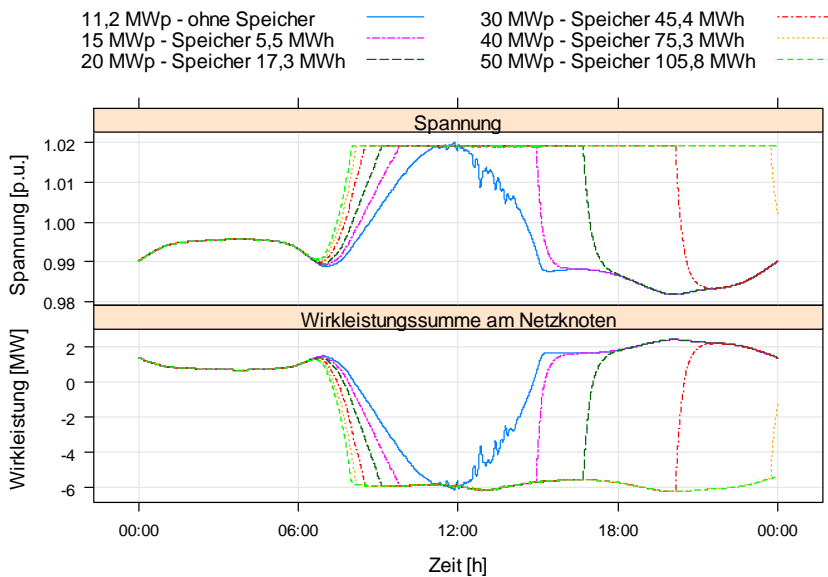


Abbildung 8 Speicher: Spannung, Auslastung und Wirkleistung

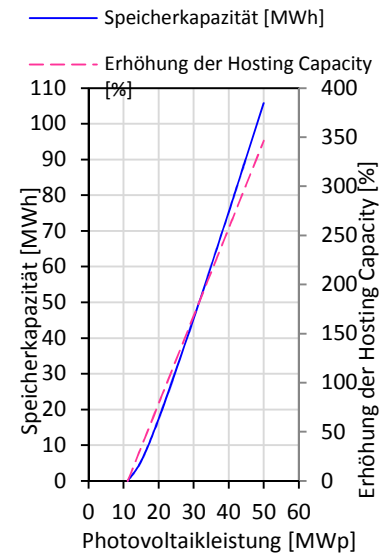


Abbildung 9 Speicher: Speicherkapazität über Erzeugungsleistung

Abbildung 9 zeigt, dass die notwendige Speicherkapazität nahezu linear etwa im Verhältnis 2:1 steigt. Die Hosting Capacity Steigerung wird auf der Sekundärachse in Prozent aufgetragen und schneidet die Speicherkapazität bei 51,4 MWh und einer Einspeiseleistung von 32 MW<sub>peak</sub>. An diesem Punkt wird die maximale sinnvolle Erzeugungsleistung bzw. Speichergöße angenommen da, die Steigung der notwendigen Speicherkapazität die Steigung der Hosting Capacity übersteigt.

Tabelle 7 zeigt Erzeugungsleistungen des Speichers, korrespondierende Speicherkapazitäten, Leerzeit und Hosting Capacity Steigerung.

Tabelle 7 Notwendige Speicherkapazität und Hosting Capacity

Photovoltaik Leistung MW <sub>peak</sub>	Speicher- kapazität MWh	Leerzeit des Speichers [%]	Hosting Capacity Steigerung	
			[MW]	[%]
11,2	0	-	0	0
15	5,5	60	3,8	34
20	17,3	42	8,8	79
30	45,4	30	18,8	168
40	75,3	21	28,8	257
50	105,8	19	38,8	346



### 3.6 Kombinierte Regelung

Anders als die oben genannten Methoden benötigt eine kombinierte Regelung aus den beschriebenen Maßnahmen eine Kommunikationsinfrastruktur zwischen Erzeugungsanlage, Messsensoren und Umspanner. Die Fernregelung bindet dezentrale Erzeugung in die Schaltentscheidung am Umspanner ein wenn die Stufenregler-Position verändert wird. Die Spannung wird an ausgewählten Knotenpunkten abgefragt und bei Gefährdung

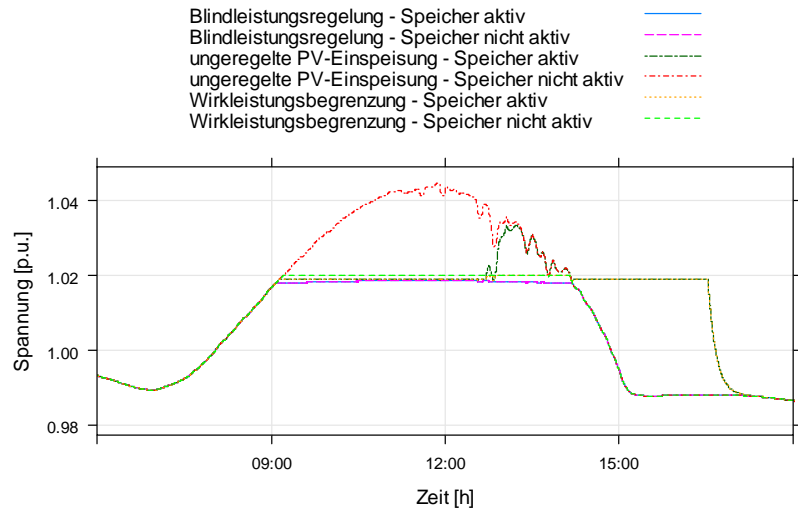


Abbildung 10 Kombinierte Regelung: Spannung

der Spannungsqualität entsprechend angepasst. Die Erzeugungsanlage wird dabei nicht manipuliert. Da eine Veränderung der Stufenstellung globale Auswirkungen auf parallele Stränge hat muss die Fernregelung alle Spannungswerte im Versorgungsgebiet berücksichtigen [4].

Es werden eine Last mit 3 MW, ein Erzeuger mit 20 MW<sub>peak</sub> und ein Speicher mit 15 MWh simuliert. Der Speicher besitzt eine Entlade- und Ladeleistung von 10MW. Es wurden Größenordnungen gewählt wo eine Abregelung aufgrund eines zu kleinen Speichers notwendig werden. Der Stufensteller wird deaktiviert da davon ausgegangen werden kann dass er bei parallelen Strängen nicht zuverlässig funktioniert. Es werden sechs verschiedene Regelungsarten simuliert, um zu zeigen welche Einflüsse sich in Kombination mit einem Speicher ergeben. Diese sind:

- Q-Regelung
- P-Begrenzung
- unregelte Einspeisung

Unregelte Einspeisung ohne Speicher liefert die gesamte Wirkleistung ins Netz und führt zu Spannungsanhebungen auf 1,045 p.u. am Netzknoten. Die Nutzung eines Speichers ermöglicht es die Spannung in den Grenzen zu halten. Ab dem Zeitpunkt wo der Speicher vollständig gefüllt ist speist die PV-Anlage die gesamte Leistung ein. Dies führt ebenfalls zu unzulässigen Spannungserhöhungen. Wirkleistungsbegrenzung mit Speicher ermöglicht es die gesamte Wirkenergie einzuspeisen jedoch auf Kosten der Wirkenergie. Die Leistung des Erzeugers wurde so gewählt, dass die Leitungsauslastung im schlechtesten Fall einen Anschluss an die lokale Verteilschiene zulässt, ohne dass die Notwendigkeit einer dezidierten Zuleitung auftritt. Die Leitungsauslastung bleibt zu jeder Zeit unter 70%. In einer Jahressimulation wird jeder Regelungsmodus mit und ohne Speicher über die Jahresprofile aus Kapitel 2 simuliert. Bei Wirkleistungsbegrenzung ohne Speicher können 15.972,4 MWh eingespeist werden. Der Verlust zwischen vollständiger Einspeisung und Wirkleistungsbegrenzung beträgt somit 22,6%. Mit Speicher können im gleichen Betriebsmodus 18.297,9 MWh eingespeist werden wodurch sich der Verlust auf 6,7% verringert. Da unregelte Einspeisung nicht zur Spannungshaltung geeignet ist, wird Wirkleistungsbegrenzung ohne Speicher als Minimumkriterium angenommen. Die Differenz zu Blindleistungsregelung ohne Speicher beträgt in diesem Fall 21,8%. Bei aktivem Speicher verringert sich die Differenz auf 6%.

## 4 Fallstudie für ein ländliches Mittelspannungsnetz

Ein repräsentatives Mittelspannungsnetz aus dem österreichischen alpinen Raum wurde gewählt, um die definierten Maßnahmen zu analysieren. Es werden zwei Netzabschnitte simuliert und auf kritische Knoten getestet um den optimalen Platz für die Erzeugungsanlage zu untersuchen. In Netzabschnitt 1 werden die Modelle der Erzeugungsanlage und des Speichers aus dem Referenz implementiert. Die Lasten und der Stufensteller am Transformator bleiben zu jeder Zeit aktiv. Im nächsten Schritt wird die Basis Hosting Capacity (Basis-HC) ermittelt. Sie wird ohne elektrische Lasten berechnet um den schlechtesten Fall für die Einspeisung, zu zeigen. Die Basis HC wird bei  $4,5 \text{ MW}_{\text{peak}}$  inklusive Lasten ermittelt um eine gemeinsame Basis für die folgenden Simulationen zu schaffen. Es werden nur Regelungsmethoden angewendet, die die Grenzkriterien im Referenznetz einhalten.

Das reale Mittelspannungsnetz besteht aus einem externen Netz (Slack), einem Transformator, 40 Mittelspannungsleitungen, einer Erzeugungsanlage, einem Speicher und 23 Lasten. Die restlichen Stränge des realen Netzes werden für die Simulation, aufgrund der vereinfachten Auswertung deaktiviert. Die Referenzspannungen werden ohne Lasten und Erzeugung an verschiedenen Punkten im Netz gemessen.

Um die Netzqualität sicherzustellen muss eine Lokalisierung der kritischen Knoten im Netz gegeben sein. Ein kritischer Knoten weist mindestens einmal im Jahr den höchsten bzw. den niedrigsten Spannungswert aller Knoten im Netzabschnitt auf [4]. Die Leitungsauslastung übersteigt am schlechtesten Punkt zu keiner Zeit 40% woraus sich ableiten lässt dass in dieser Topologie eher Spannungserhöhungen als Leitungsauslastungen auftreten. Die Messpunkte werden umliegend zu den ausgewählten Netzknoten platziert. Außerdem werden die Kabel aus Strang 1 und 2 zum Transformator gemessen.

Die Kabel weisen ähnliche Querschnitte auf. Die Erzeugungsanlage wird nach den Profilen in Kapitel 2 simuliert. Die Lasten basieren auf einer Mischung von synthetischen Lastprofilen. In Abschnitt 1 sind 12 Lasten aktiv. In Abschnitt 2 sind 11 Lasten aktiv. An jeder Last ist entweder ein Mittelspannungsverbraucher oder ein untergelagertes Niederspannungsnetz angeschlossen.

### 4.1 Stufensteller am Umspanner mit Fernregelung

Bei Fernregelung wird die gemessene Spannung in die Schaltentscheidung des Stufenstellers einbezogen. Damit kann die Spannung netzweit beeinflusst werden. Aufgrund der Wirksamkeit der anderen Regelungsmethoden werden Speicher und Wirkleistungsregelung deaktiviert, da der Laststufenregler sonst nicht angesprochen wird. Die Spannungsmessung wird über Kommunikation zu einem Knoten im Netz realisiert. Einmaliges herabsetzen der Stufenstellung führt zu einem Spannungssprung in beiden Strängen und zu einer zulässigen Spannung von ca. 0,99 p.u. an Knoten 191. Eine weitere Stufenstellung nach unten senkt die Spannung an Knoten 191 unter 0,98 p.u. ab. Da dies nicht mehr zulässig ist, wird die Stufenstellung auf eine Stufe begrenzt. Daher wird die maximale Erzeugung mit  $6,3 \text{ MW}_{\text{peak}}$  angenommen. Die Basis Hosting Capacity liegt bei  $4,5 \text{ MW}_{\text{peak}}$  und die maximal mögliche Einspeisung durch Stufenstellung bei  $6,3 \text{ MW}_{\text{peak}}$  wodurch sich eine Hosting Capacity Steigerung um  $1,8 \text{ MW}_{\text{peak}}$  ergibt.

### 4.2 Blindleistungsregelung ohne Speicher

Bei Q-Regelung ohne Speicher werden die Spannungsgrenzwerte am untersuchten Knoten zu jeder Zeit eingehalten und die Leitungsauslastung steigt maximal auf 69% an. Es ist möglich die Einspeiseleistung von  $7,6 \text{ MW}_{\text{peak}}$  durch Blindleistungsbezug ins Netz einzuspeisen, jedoch wird darüber hinaus die Reichweite von Blindleistungsregelung ausgereizt und Wirkleistungsbegrenzung notwendig. Die Auswirkungen auf den Umspanner verursachen zunächst eine Entlastung da aufgrund des lokalen Verbrauches weniger Energie über den Umspanner fließen

muss. Anschließend ergibt sich eine höhere Belastung durch Blindleistungsbezug. Die Rückwirkungen auf Strang 2 sind vernachlässigbar. Die Ermittlung der Hosting Capacity für Blindleistungsregelung wird auf die Reichweite der Blindleistungsregelung beschränkt und liegt somit bei  $7,6 \text{ MW}_{\text{peak}}$ . Das ergibt eine maximale Hosting Capacity Erhöhung von  $3,1 \text{ MW}_{\text{peak}}$ .

### 4.3 Blindleistungsregelung mit Speicher

Eine Blindleistungsregelung mit einem Speicher (5MWh) bei steigender Erzeugerleistung wird simuliert. Die maximale Lade- und Entladeleistung beträgt 5 MW. Die Spannungsgrenzwerte werden zu jeder Zeit eingehalten. Durch Blindleistungsbezug lassen sich maximal  $8,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$  ans Netz anschließen ohne unzulässige Auslastungen in der Infrastruktur zu verursachen. Daher wird die Q-Regelung bis  $8,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$  ausgereizt um anschließend dem Speicher die Aufgabe der Spannungshaltung zu übergeben. Der Speicher ist in dieser Konfiguration kaum wirksam und erreicht dabei einen Ladezustand von lediglich 0,2%. Bei einer Erzeugerleistung von  $9,2 \text{ MW}_{\text{peak}}$  übernimmt der Speicher ebenfalls die Regelung. Der Ladezustand steigt auf 15% jedoch wird die maximale Leitungsauslastung überschritten. Am Umspanner ergibt sich durch Wirkleistungseinspeisung zunächst eine Entlastung durch lokalen Verbrauch jedoch anschließend durch Blindleistungsbezug eine Belastung. Die Auswirkungen in Netzabschnitt 2 bewegen sich in einem vernachlässigbaren Bereich. Die Hosting Capacity wird aufgrund der Leitungsauslastung bei  $8,2 - 4,5$  also  $3,7 \text{ MW}_{\text{peak}}$  berechnet.

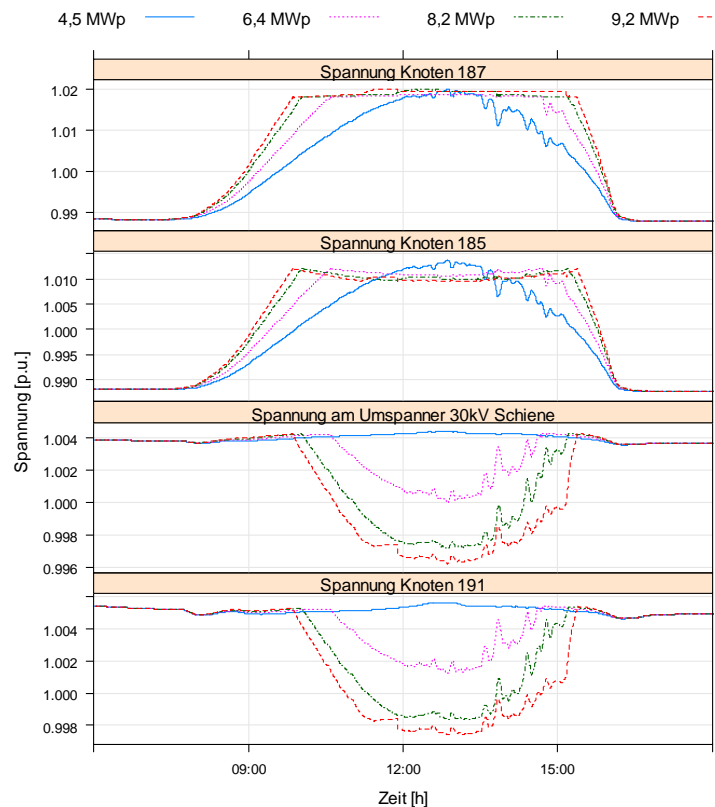


Abbildung 11 Q-Regelung mit Speicher: Spannungen

### 4.4 Netzausbau am Erzeuger bzw. Leitungstausch

In Kapitel 4.3 wird die maximale Leitungsauslastung als begrenzendes Kriterium wirksam. Daher ist es notwendig eine Leitungsverstärkung zu diskutieren wofür, das Kabel am Anschlussknoten herangezogen wird. Durch Leitungsverstärkung auf einen Leitungstyp mit dem doppelten Nennstrom sinkt die Auslastung in der Leitung von 75% auf unter 45% jedoch entstehen im nächsten Kabelabschnitt Überlastungen. Aufgrund der großen Anzahl von Leitungsabschnitten wirkt sich das Auslastungsproblem durch Netzausbau, jeweils beim nächsten Kabel aus. Da ein Leitungstausch aller Leitungen nicht für sinnvoll angenommen wird, leistet ein Netzausbau in diesem Fall keinen Beitrag zur Erhöhung der Hosting Capacity. Netzausbau wird nur dann als sinnvoll angesehen wenn eine eigene Zuleitung für die Erzeugungsanlage zum Umspanner gebaut wird. Aufgrund der geringen Rückwirkungen in parallele Netzabschnitte wird diese Methode jedoch nicht betrachtet.

## 4.5 Wirkleistungsbegrenzung ohne Speicher

Eine Wirkleistungsbegrenzung ohne Speicher über den Zeitraum eines Tages und eines Jahres wird simuliert. Die Tagessimulation zeigt, dass zu jeder Zeit die Spannungsgrenzwerte eingehalten werden. Tabelle 8 zeigt einen Vergleich der berechneten Jahresenergiesummen bei Wirkleistungsbegrenzung und bei unregelter Einspeisung. Es ergeben sich Verluste von bis zu 35,7%. Durch die Verdoppelung der Hosting Capacity von 4,5 auf 9 MW<sub>peak</sub> ergeben sich Verluste von 11,5% der Jahreserzeugung verursacht. Dieser Bereich wird als die maximale Hosting Capacity angenommen. Das ergibt eine HC-Steigerung um 100%.

Tabelle 8 Wirkleistungsbegrenzung: Jahreserzeugung und Verluste

Einspeiseleistung [MW <sub>peak</sub> ]	HC-Erhöhung [%]	Energie bei P-Regelung [MWh]	Energie ohne Regelung [MWh]	Verluste	
				[MWh]	[%]
4,5	(Basis HC)	4368,1	4368,1	0	0
6,75	50	6187,6	6674,3	486,6	3,5
9	100	7440,9	9060,3	1619,3	11,5
11,25	150	8354,6	11527,7	3173,1	22,5
13,5	200	9050,8	14078,1	5027,3	35,7

## 4.6 Wirkleistungsbegrenzung mit Speicher

Es wird ein Speicher in kombinierter Regelung mit Wirkleistungsbegrenzung analysiert. Die Einspeiseleistung und Speicherkapazitäten werden sukzessive erhöht und über den Zeitraum eines Tages simuliert. Die Basis-HC kann ohne Regelung im Netz aufgenommen werden wobei darüber hinaus Regelung notwendig wird. Mit 15 MW<sub>peak</sub> Erzeugung und 20 MWh Speicherkapazität wird ein zu klein dimensionierter Speicher simuliert. Im Lauf des simulierten Tages (ca. 14:00 Uhr) wird die maximale Kapazität erreicht und die Spannung kann nicht länger gehalten werden. Ab diesem Zeitpunkt übernimmt die Wirkleistungsbegrenzung diese Aufgabe. Durch die aktive Regelung in Strang 1 am Netzknoten 187 treten an keinem Punkt Überspannungen auf. Es sind geringfügige Rückwirkungen auf Strang 2 sichtbar. Diese Rückwirkungen schwanken zwischen 1,0045 und 1,0060 p.u. und sind somit vernachlässigbar.

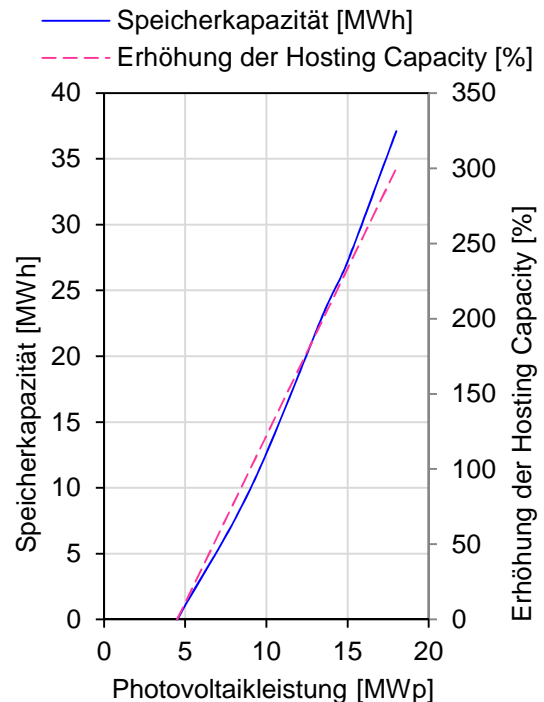


Abbildung 12 Speicherkapazität und Erhöhung der HC über Erzeugungsleistung

Tabelle 9 zeigt die Einspeiseleistungen, die korrespondierenden Speicherkapazitäten, und die Hosting Capacity Steigerung. Abbildung 12 zeigt einen nahezu linearen Anstieg ca. im Verhältnis 2:1 der notwendigen Speicherkapazität um die Erzeugungsleistung speichern zu können. Ab einer Erzeugungsleistung von 13,5 MW<sub>peak</sub> und einer Speicherkapazität von 23,2 MWh ist die maximal sinnvolle Speichergröße erreicht, da die Steigung der notwendigen Speicherkapazität die Steigung der Hosting Capacity übersteigt.

Tabelle 9 Wirkleistungsbegrenzung: Leistung, Speicherkapazität und HC Erhöhung

Photovoltaik Leistung [MW <sub>peak</sub> ]	Speicherkapazität [MWh]	Wirkleistungsbegrenzung	Hosting Capacity Steigerung	
			[MW <sub>peak</sub> ]	[%]
4,5	0	Nein	0	0
9	9,9	Nein	4,5	100
13,5	23,2	Nein	9	200
15	20	Ja	10,5	233
15	27,2	Nein	10,5	233
18	37,1	Nein	13,5	300

## 5 Zusammenfassung & Vergleich

Es hat sich herausgestellt dass die Hosting Capacity im Referenznetz allgemein größer ist als im realen Netz. Der Grund dafür liegt in der Netztopologie, die im Referenznetz aus einer Leitung und einem Netzknoten besteht, wobei im Vergleich dazu im realen Netz zwei Netzabschnitte mit einer großen Anzahl an Verbrauchern existieren. Zusätzlich gibt es im realen Netz bedingt durch die unterschiedlichen Leitungsquerschnitte und Leitungstypen mit Verzweigungen, Einschränkungen in der Flexibilität des Spannungsbandes. Die Simulationen in beiden Netzen werden mit der Basis Hosting Capacity als Grundlage verglichen. Die Basis-HC wurde für beide Netze bei aktiven Lasten und aktivem Laststufenregler ermittelt.

Tabelle 10 Quantitativer Vergleich der Hosting Capacity im generischen Testnetz

Regelungsmethode	Hosting Capacity Steigerung in		Begrenzende Größe
	[MW]	[%]	
Basis Hosting Capacity	11,2	-	Spannungsanhebung
Stufensteller / Fernregelung	56	400	Spannungsanhebung
Wirkleistungsbegrenzung (P)	16	42,9	Jahresenergieverlust
Blindleistungsregelung	21,7	93,7	Leitungsauslastung
Speicher	32	186	Steigende Speichergröße pro Hosting Capacity-Steigerung
Kombinierte Regelung	20	78,6	Abhängig vom Regelungsmodus
Leitungsverstärkung	22,4	100	Spannungsanhebung

Tabelle 11 Quantitativer Vergleich der Hosting Capacity im realen Mittelspannungsnetz

Regelungsmethode	Hosting Capacity Steigerung in		Begrenzende Größe
	[MW]	[%]	
Basis Hosting Capacity	4,5	-	Spannungsanhebung
Wirkleistungsbegrenzung mit Speicher	13,5	200	Spannungsanhebung
Wirkleistungsbegrenzung ohne Speicher	9	100	Jahresenergieverlust
Netzausbau am Netzknoten 187	4,5	0	Leitungsauslastung
Blindleistungsregelung mit Speicher	8,2	82	Leitungsauslastung
Blindleistungsregelung ohne Speicher	7,6	69	Leitungsauslastung
Stufensteller am Umspanner mit Fernregelung	6,3	40	Spannungsabsenkung im parallelen Strang

Für die einzelnen Maßnahmen konnte folgendes abgeleitet werden:

- Durch **Leitungsverstärkung** war es möglich im Referenznetz die Hosting Capacity bei allen Kabeln um 100% zu erhöhen. Eine Ausnahme bildet die Leitungsverstärkung bei Kupfer (CU) 240 mm<sup>2</sup> auf CU 500 mm<sup>2</sup> wo eine Steigerung um mehr als 213% festgestellt aber auch die Transformatorauslastung überschritten wurde. Dieses Beispiel zeigt dass bei Netzausbau die gesamte Infrastruktur berücksichtigt werden muss. Im realen Netz

zeigte sich Leitungsverstärkung als unwirksam da sich die maximale Auslastung ins nächste Kabel fortpflanzt.

- Bei **Wirkleistungsbegrenzung** ohne Speicher hat sich im Referenznetz herausgestellt dass die Jahresenergieverluste mit steigender Einspeiseleistung so stark ansteigen dass die Hosting Capacity Steigerung mit 42,9% begrenzt wurde. Im realen Netz erreicht die Reichweite von Wirkleistungsbegrenzung eine Steigerung um 100% gegenüber der Basis-HC. Bei Wirkleistungsbegrenzung wird die Einspeiseleistung ab erreichter maximaler Spannung begrenzt wodurch eine Einhaltung der Grenzkriterien sichergestellt ist. Der wesentlichste Nachteil zeigt sich in den Energieverlusten.
- Durch Einsatz eines **Speichers** konnte die Hosting Capacity im realen Netz um 200% erhöht werden. Im Referenznetz konnte die Hosting Capacity um 186% gesteigert werden. Die Regelung an der Erzeugungsanlage hatte in beiden Fällen nur dann eine Auswirkung, wenn der Speicher zu klein dimensioniert wurde und die Tageserzeugung nicht gespeichert werden kann. Speicher haben die Möglichkeit die Überproduktion der Erzeugungsanlage abzufedern und zu einem späteren Zeitpunkt abzugeben. Somit ist eine Spannungshaltung möglich und es kann über Netzdienstleistung diskutiert werden wenn eine geeignete Kommunikation realisiert wird. Der größte Nachteil sind die steigenden Anforderungen an die Speicherkapazität bei steigender Einspeiseleistung.
- Mit **Blindleistungsregelung** konnte im Referenznetz die Hosting Capacity um 93,7% gesteigert werden. Durch Ändern des Leistungsfaktors von  $\cos\varphi = 0,95$  auf 0,98 war es möglich zu zeigen dass bei Erreichen der Grenzen der Q-Regelung die Wirkleistungsbegrenzung einspringt. Im realen Netz konnte mit Q-Regelung ohne Speicher 69% mehr Erzeugung angeschlossen werden, bis die maximal zulässige Leitungsauslastung als Grenzkriterium wirkt. Bei aktivem Speicher war es möglich die HC um 82% zu steigern, wobei der Speicher nur minimal zum Einsatz kommt da die Blindleistungsregelung die Spannungsregelung zum Großteil selbst bewerkstelligt. Der wichtigste technische Vorteil von Blindleistungsregelung gegenüber anderen Regelungsmethoden ist die Fähigkeit durch Blindleistungsbezug die Spannung am Netzknoten abzusenken um mehr Wirkleistung im Netz unterzubringen. Ein Nachteil zeigt sich in der Leitungsauslastung da Blindleistung die Leitungskapazitäten schmälert.
- Für den **Stufentransformator** können zwei wesentliche Aussagen getroffen werden. Einerseits weist sich der Stufensteller am Transformator als eine wirkungsvolle Methode zur Spannungshaltung aus wenn es sich um ein Netz ohne parallele Netzabschnitte (wie beim Referenznetz) handelt. Wenn dies der Fall ist lässt sich die Spannung am Umspanner beliebig anheben bzw. absenken. Andererseits sinkt die Reichweite der Einsatzfähigkeit sobald ein anderer Strang berücksichtigt werden muss. In den Simulationen konnte eine signifikante Reduktion der Hosting Capacity durch den Einsatz des Laststufenreglers zwischen Referenznetz und realen Netz beobachtet werden. Der Grund dafür liegt im realen Netz in Netzabschnitt 2 dessen Spannung nicht beliebig einstellbar ist. Im Referenznetz konnte die Hosting Capacity um  $44,8 \text{ MW}_{\text{peak}}$  oder 400% erhöht werden. Im realen Netz konnte die Hosting Capacity um  $1,8 \text{ MW}_{\text{peak}}$  oder 40% erhöht werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass in einem Netz mit mehr als zwei Netzabschnitten die Einsatzfähigkeit des Stufenstellers zur Spannungshaltung bei dezentraler Einspeisung im Vergleich zur Simulation weiter sinkt.
- **Kombinierte Regelung** wurde im Referenznetz mit fest eingestellter Einspeiseleistung und Speicher-kapazität getestet um einen Vergleich der verschiedenen Methoden mit ihren Grenzen zu zeigen. Dabei hat sich herausgestellt dass alle Regelungsmethoden mit ihren Kombinationen die Spannung lokal wirksam einhalten und keine unzulässigen Aus-

lastungen hervorrufen. Eine Ausnahme sind die Kombinationen mit „ungeregelter Einspeisung“ an der Erzeugungsanlage wo Spannungserhöhungen aufgetreten sind. Die Hosting Capacity wurde im Testnetz um 78,6% im Vergleich zur Basis-HC angehoben. Im realen Netz wurden nur solche Kombinationen getestet die im Testnetz bereits erfolgreich die Spannung halten konnten. Die Ergebnisse wurden bereits im Absatz Speicher und Q-Regelung diskutiert.

## 6 Literatur

- [1] W. Tenschert, „Smart Grids: Herausforderungen für uns als Verteilernetzbetreiber - Die Rolle der unterschiedlichen Stromnetzebenen in der Smart Grid Entwicklung“, gehalten auf der Smart Grids Week 2011, Linz, Austria, 25-Mai-2011.
- [2] VDE, „DIN VDE 0298-4: Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstrom: Teil4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen“. Aug-2003.
- [3] G. Kerber und R. Witzmann, „Loading Capacity of Standard Oil Transformers on Photovoltaic Load Profiles“, gehalten auf der World Renewable Energy Congress (WRECX), Glasgow, UK, 2008.
- [4] Brunner H, Bletterie B, „DG Demonetz“, AIT Wien, Wien, 2009.
- [5] G. Kerber und R. Witzmann, „Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen“, *ew*, Bd. 107, Nr. 6, S. 22–26, 2008.
- [6] DIgSILENT, „DIgSILENT Germany - PowerFactory - Power System Analysis and Engineering“, Jan-2013. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.digsilent.de/>. [Zugegriffen: 04-März-2013].
- [7] J. Kathan, „Increasing the Hosting Capacity of Photovoltaics with Electric Storage - Simulation and Hardware-in-the-Loop Concept“, Masterthesis, Fachhochschule Technikum Wien, 2011.
- [8] Kadam S., Henein S., „SmartLV - Regler“. 22-Mai-2013.
- [9] M. H. Bollen, *Integration of Distributed Generation in the Power System*. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] Brunner H, „Zuleitungen zu PV-Anlagen: Expertenbefragung“, 29-Apr-2013.
- [11] Bletterie B., „morePV2grid - gemessenes normiertes Erzeugungsprofil“. 22-Mai-2013.
- [12] NASA - Atmospheric Science Data Center, „Surface meteorology and Solar Energy“, 14-Juni-2011. [Online]. Verfügbar unter: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>. [Zugegriffen: 14-Juni-2011].
- [13] National Renewable Energy Laboratory, *HOMER - The Micropower Optimization Model*. Boulder, USA, 2009.
- [14] APCS Power Clearing and Settlement AG, „Synthetische Lastprofile“, 25-Jan-2012. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile>. [Zugegriffen: 25-Jan-2012].
- [15] bdew, „mittelspannungsrichtlinie“. 2008