

Schlussbericht **November 2005**

Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen mit DEA

BFH - HTI Hochschule für Technik und Informatik, 2501 Biel

In Zusammenarbeit mit

RIPEnergy AG, Talstrasse 2, 8702 Zollikon

Schnyder Ingenieure AG, Bösch 23, 6331 Hünenberg

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:

www.electricity-research.ch

INHALTSVERZEICHNIS

Projektteam.....	1
Zusammenfassung / Résumé / Summary	2
Zusammenfassung.....	2
Résumé	4
Summary	6
1. Ausgangslage und Umfeld	7
1.1. Vermehrter Einsatz von dezentralen Energieerzeugungseinheiten	7
1.2. Auswirkungen auf den Betrieb des Niederspannungsnetzes	7
1.3. Energieeffiziente Nutzung des 400 V Netzes und Vermeidung von Doppelumwandlung	8
1.4. Grundlagen und bisherige Forschungsaktivitäten	9
2. Ziele.....	9
3. Funktionen und Einsatzmöglichkeiten.....	10
3.1. Aufbau und Einbindung des gesteuerten Speichers.....	10
3.1.1. Prinzipieller Aufbau des gesteuerten Speichers.....	10
3.1.2. Einbindung der gesteuerten Speicher ins NS-Netz.....	11
3.2. Funktionen der gesteuerten Speicher.....	11
3.2.1. Übersicht.....	11
3.2.2. Energiemanagement	12
3.2.3. Lastflusssteuerung im Netz	13
3.2.4. Verbesserung der Netzqualität.....	14
3.2.5. Erhöhung der Versorgungssicherheit der Verbraucher.....	15
3.3. Konkrete Einsatzmöglichkeiten.....	15
3.3.1. Gesteuerter Speicher als Spannungsstabilisator	15
3.3.2. Inselnetze mit gesteuerten Speicher	15
3.3.3. Grossverbraucher mit Eigenerzeugung.....	16
4. Alternativen zum gesteuerten Speicher	16
4.1. Qualitativer Vergleich	16
4.1.1. Verschiedene Anwendungen des gesteuerten Speichers.....	16
4.1.2. Dauernde Spannungsstabilisierung am Ende einer langen Sticheitung	16
4.1.3. Netzqualität, Oberwellenglättung, Blindleistungskompensation.....	17
4.1.4. Reduktion von Spannungsspitzen / Einspeisung bei Spannungsausfällen.....	18
4.1.5. Vor- und Nachteile des gesteuerten Speichers und seiner Alternativen.....	19
4.2. Kostenvergleich für eine konkrete Anwendung	20
4.2.1. Aufgabenstellung	20
4.2.2. Bestehende Anspeisung der abgelegenen Verbraucher.....	20
4.2.3. Einsatz eines gesteuerten Speichers bei den Verbrauchern	21
4.2.4. Einsatz einer MS-Leitung als Alternative zum gesteuerten Speicher	22

4.2.5.	Einsatz einer 990 V Leitung als Alternative zum gesteuerten Speicher.....	23
4.2.6.	Einsatz eines Notstromaggregates als Alternative zum gesteuerten Speicher.....	24
4.2.7.	Vergleich des gesteuerten Speichers mit den Alternativen.....	25
5.	Speichertechnologie.....	26
6.	Simulationen einer konkreten Anwendung.....	28
6.1.	Aktuelle Situation der konkreten Anwendung	28
6.2.	Aufbau der Simulation.....	30
6.3.	Regelung	30
6.3.	Simulationsergebnisse.....	31
6.4.	Einfluss der Kondensatoren	33
6.5.	Auswirkungen des gesteuerten Speichers.....	33
6.6.	Fazit aus den Simulationen.....	37
7.	Schlussfolgerungen.....	38
8.	Ausblick	39
	Literatur und Quellen	40
	Anhänge	41
	Anhang 1: Simulationsverläufe.....	41

PROJEKTTEAM

Die Ausarbeitung der Studie ist durch das folgende Projektteam erfolgt:

Projektleitung: Prof. Michael Höckel, BFH - HTI Hochschule für Technik und Informatik, Biel

Projektbearbeitung: René Vollenwyder, HTI Biel
Marco Buholzer, RipeEnergy AG
Urs Kreyenbühl, RipeEnergy AG
Dr. Gilbert Schnyder, Schnyder Ingenieure AG
Peter Mauchle, Schnyder Ingenieure AG

ZUSAMMENFASSUNG / RÉSUMÉ / SUMMARY

Zusammenfassung

Der vermehrte Einsatz von dezentralen Energieerzeugungsanlagen kann den Ausbau und den Betrieb der Verteilnetze nachhaltig beeinflussen. Für die Gewährleistung eines sicheren und zuverlässigen Betriebes kann dadurch zusätzliche Infrastruktur erforderlich werden. Der Einsatz des gesteuerten Speichers ist eine Möglichkeit, um auf den Betrieb von NS-Netzen einzuwirken. Nebst dem Einfluss des gesteuerten Speichers auf den Lastfluss kann er auch für das Energiemanagement, zur Verbesserung der Netzqualität und zur Erhöhung der Versorgungssicherheit der Verbraucher eingesetzt werden.

Von den möglichen Anwendungen des gesteuerten Speichers wurde die Regulierung der Netzspannung im Detail mittels Simulationen untersucht. Daraus geht hervor, dass die Reduktion von Spannungsabsenkungen von der Leistung des gesteuerten Speichers abhängig ist. Die Reaktionszeit zur Ausregelung von Spannungseinbrüchen hingegen ist abhängig von der Zeit bis die gespeicherte elektrische Energie bereitgestellt werden kann, d.h. von der Art der Batterien und allenfalls parallel dazu geschalteten Kondensatoren. Je schneller die Batterien die benötigte Leistung abgeben können, desto geringer muss für eine geforderte Reaktionszeit die installierte Kondensatorleistung sein.

Die Alternativen zum gesteuerten Speicher wie Notstromanlagen, USV-Anlagen und Leitungsausbauten oder die Energieübertragung über das Mittelspannungsnetz konkurrieren den gesteuerten Speicher sehr stark. So wird ein Verteilnetzbetreiber abgelegene Verbraucher über das Mittelspannungsnetz mit einer zusätzlichen Transformatorenstation versorgen, bevor er einen gesteuerten Speicher einsetzt, der im Vergleich zur MS-Leitung und der Trafostation bei grossen Leistungen teurer ist und zudem auch mehr Unterhalt erfordert.

Eine optimale Anwendung des gesteuerten Speichers ergibt sich in Inselnetzen im Zusammenhang mit dezentralen Energieerzeugern, die mit Solarenergie, Windenergie oder weiteren erneuerbaren Energien betrieben werden. Dabei dient der gesteuerte Speicher als Puffer um überschüssig produzierte elektrische Energie aufzunehmen und bei Bedarf fehlende Energie ins Inselnetz einzuspeisen.

Mit dem gesteuerten Speicher kann der Lastfluss im NS-Netz so beeinflusst werden, dass Überlasten vermieden und eine ausgeglichene Netzbelastung erreicht wird. Diese Funktionalität des gesteuerten Speichers ist vor allem in NS-Netzen mit mehreren dezentralen Energieerzeugungsanlagen interessant.

Gesteuerte Speicher können zudem zur Verbesserung der Netzqualität eingesetzt werden. Abhängig von der Art der Aufschaltung auf das NS-Netz kann die Spannungsqualität für die Verbraucher verbessert, die durch die Verbraucher erzeugten Netzzrückwirkungen im NS-Netz reduziert oder auf das Spannungsprofil im NS-Netz eingewirkt werden.

Weitere für den gesteuerten Speicher gut geeignete Anwendungen ergeben sich im Zusammenhang mit wärmegeführten Eigenerzeugungsanlagen oder zur Steuerung des Strombezuges aus dem Verteilnetz. Diese Anwendungen des gesteuerten Speichers sind

vor allem im liberalisierten Strommarkt interessant, wenn ein Grossverbraucher bestrebt ist, sein prognostiziertes Lastverhalten möglichst genau einzuhalten um die Beschaffung von Ausgleichsenergie zu vermeiden.

Im Rahmen des Projektes „Verteilte Einspeisungen im Niederspannungsnetz“ (VEiN) ist vorgesehen, zusätzlich zu den dezentralen Energieerzeugungsanlagen auch gesteuerte Speicher mit einzubeziehen.

Résumé

L'application accrue d'installations de production d'énergie décentralisées peut influencer de manière efficace le développement et le fonctionnement des réseaux de distribution. Ainsi, pour la garantie d'une exploitation sûre et fiable, une infrastructure supplémentaire peut devenir nécessaire. L'application d'un accumulateur d'énergie dirigé est une possibilité, qui peut influencer l'exploitation des réseaux basse tension. En plus de l'influence de l'accumulateur d'énergie dirigé sur le flux d'énergie, il peut aussi être utilisé pour la gestion énergétique, pour afin d'améliorer la qualité du réseau et d'augmenter la sécurité d'approvisionnement des consommateurs.

Parmi les applications possibles de l'accumulateur d'énergie dirigé, la régulation de la tension du réseau a été examinée en détail par des simulations. Les résultats montrent clairement que la réduction des chutes de tension dépend de la puissance de l'accumulateur d'énergie dirigé. Par contre, le temps de réaction pour la compensation des coupures de tension dépend toutefois du temps jusqu'à ce que l'énergie électrique stockée peut être fournie, c.-à-d. du type des batteries et éventuellement besoin des condensateurs enclenchés en parallèle. Plus les batteries peuvent rapidement livrer la performance nécessaire, plus la puissance installée des condensateurs doit être faible pour un temps de réaction exigé.

Les alternatives à l'accumulateur d'énergie dirigé comme p.ex. des groupes électrogènes de secours, des alimentations de sauvegarde du secteur et des élargissements des lignes électriques ou le transfert énergétique sur le réseau de tension moyenne, concurrencent très fortement l'accumulateur d'énergie dirigé. Ainsi, un exploitant de réseau de distribution fournira les consommateurs éloignés sur le réseau de tension moyenne avec un poste de transformateur supplémentaire, avant qu'il n'utilise un accumulateur d'énergie dirigé. Il est plus coûteux en comparaison d'une ligne moyenne tension et le poste de transformation pour des grandes puissances et provoque en outre aussi plus d'entretien.

Une application optimale d'un accumulateur d'énergie dirigé est judicieuse dans les réseaux d'îlot en rapport avec des producteurs d'énergie décentralisés qui utilisent l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou d'autres énergies renouvelables. L'accumulateur d'énergie dirigé sert comme tampon pour emmagasiner une énergie électrique produite en excédent et à livrer une énergie manquante au réseau d'îlot.

Avec l'accumulateur d'énergie dirigé, le flux d'énergie dans le réseau basse tension peut être influencé de telle sorte, que des surcharges peuvent être évitées et qu'une charge de réseau équilibrée puisse être atteinte. Cette fonctionnalité de l'accumulateur d'énergie dirigé est intéressant surtout dans les réseaux basse tension avec plusieurs installations de production d'énergie décentralisées.

L'accumulateur d'énergie dirigé peut en outre être utilisé pour améliorer la qualité du réseau. En fonction du type de connexion avec le réseau basse tension, la qualité de tension pour les consommateurs peut être améliorée, les rétroactions au réseau provoqué par les consommateurs peuvent être réduites ou bien on arrive à influencer le profil de tension dans le réseau basse tension.

Il en résulte des applications supplémentaires pour l'accumulateur d'énergie dirigé en connexion avec la production combinée chaleur force ou pour le contrôle de la consommation d'électricité du réseau basse tension. Ces applications de l'accumulateur d'énergie dirigé sont surtout intéressantes sur le marché d'électricité libéralisé, si un grand consommateur est désire observer le plus précisément possible, son comportement de flux prognostiqué pour éviter d'acheter de l'énergie de compensation.

On prévoit dans le cadre du projet, "alimentations distribuées dans le réseau basse tension" (VEiN) d'inclure, en plus des installations de production d'énergie décentralisées également, des accumulateurs d'énergie dirigés.

Summary

The increase of decentralized energy production plants can strongly influence the extension and the operation of the electrical distribution grid. Additional infrastructure can be necessary to guarantee a safe and reliable operation. A controlled storage system is a possibility to optimize the operation of such a low voltage grid. In addition to influencing the load flow controlled storage systems can also be used for energy management, to improve the voltage and current quality as well as for the increase the reliability of the mains.

As one of the possible applications of the controlled storage systems the regulation of the mains voltage at remote consumers was examined in detail with simulations. The results of the simulations showed that the reduction of voltage drops depends on the power of the controlled storage system. The response time to compensate the voltage drops, however, depends on the time for activating the stored electrical energy, i.e. it depends on the kind of batteries and the capacity of the parallel connected condensers. The faster the batteries can activate the necessary power, the smaller the capacity of the condensers must be to get the required response time.

Emergency power supplies, UPS systems, the increase of line capacity or the distribution of electrical energy at medium voltage are very reasonable alternatives to the controlled storage system. Thus a power supplier will supply remote consumers via the medium voltage grid with an additional transformation near by the consumers, before they use a controlled storage system, which is more expensive and requires more maintenance especially for large power to be supplied.

The operation of a controlled storage system is an optimal application in separated grids with decentralized energy production plants. The decentralized energy production can be powered by solar energy, by wind energy or by other renewable energies. The controlled storage system serves as buffer to take up surplus produced electrical energy and if necessary to supply missing electrical energy into the separated grid.

The load flow in low voltage grids can be affected with the controlled storage system in such a way that overload of the grid is avoided and a balanced load in the grid is reached. This functionality of the controlled storage system is of interest particularly in low voltage grids with several decentralized energy production plants.

Controlled storage systems can improve the quality of a grid. Dependent on the kind of the connection to the low voltage grid, the voltage quality at the consumer's side can be improved, the disturbances produced by a consumer and supplied into the grid can be reduced or the voltage profile in the grid can be optimized.

Further applications for the controlled storage system are the operation together with warmth-led power generation plants or the operation for the controlling of the power taken from the distribution grid. These applications of the controlled storage system are particularly of interest in connection with the opened electrical energy market, where a big consumer is anxious to keep his prognosticated load as exactly as possible to avoid the procurement of balance energy.

The context of the project "Verteilte Einspeisungen im Niederspannungsnetz" (VEiN) includes in addition to the decentralized energy production plants controlled storage systems.

1. AUSGANGSLAGE UND UMFELD

1.1. Vermehrter Einsatz von dezentralen Energieerzeugungseinheiten

Aufgrund der im Bereich der dezentralen Energieerzeugungsanlagen aktuellen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ist davon auszugehen, dass zukünftig vermehrt Energiequellen wie Sonne, Wind, Biomasse und Wasser dezentral genutzt sowie in einer Umgebung mit Wärmebezug dezentral Brennstoffzellen und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen zur Anwendung gelangen könnten.

Diese vermehrt dezentral eingesetzten Erzeugereinheiten (DEA) können den Ausbau und den Betrieb der Verteilnetze auf den verschiedenen Spannungsebenen der Verteilnetze nachhaltig beeinflussen.

1.2. Auswirkungen auf den Betrieb des Niederspannungsnetzes

Je nach Anzahl und Leistungsklasse der dezentralen Einspeisungen ist der Betrieb des Niederspannungsnetzes mit der gängigen Ausgestaltung nicht mehr in allen Betriebszuständen sicher gestellt. Lokale Spannungserhöhungen und Überlastungen der Netzelemente sind durch den Einsatz einer vermehrten Anzahl von dezentralen Einspeisungen im Niederspannungsnetz möglich [1].

Mit den vorhandenen Schutz- und Messeinrichtungen dürfte die von den Verbrauchern auch in Zukunft geforderte hohe Netz- und Versorgungsqualität nicht mehr gewährleistet werden.

Bestehende Normen definieren die technischen Anforderungen an dezentrale Energieerzeugungsanlagen [2]. Diese Anforderungen definieren die Ausrüstung von dezentralen Erzeugungsanlagen an der Schnittstelle zum öffentlichen Netz. Im Zusammenhang mit der Erwartung einer vermehrten dezentralen Energieerzeugung sind auch Untersuchungen betreffend der Trennung der DEA vom Netz im Störfall durchgeführt worden [3].

Mit den definierten technischen Anforderungen nach [2], die teilweise den Einsatz von DEA behindern können, ist das Zusammenwirken zwischen einer Vielzahl von Anlagen und dem Netz nicht gewährleistet. Der vermehrte Einsatz von dezentralen Energieerzeugungsanlagen kann daher zur Gewährleistung des sicheren und zuverlässigen Betriebes zusätzliche Infrastruktur im Niederspannungsnetz erfordern.

Eine Möglichkeit zur Beherrschung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen kann der Einsatz eines steuerbaren Speicherelementes sein, der für den Ausgleich zwischen Einspeisung und Bezug von Energie im Niederspannungsnetz eingesetzt werden kann. Eine prinzipielle Übersicht dieser Möglichkeit ist in (Abbildung 1) dargestellt.

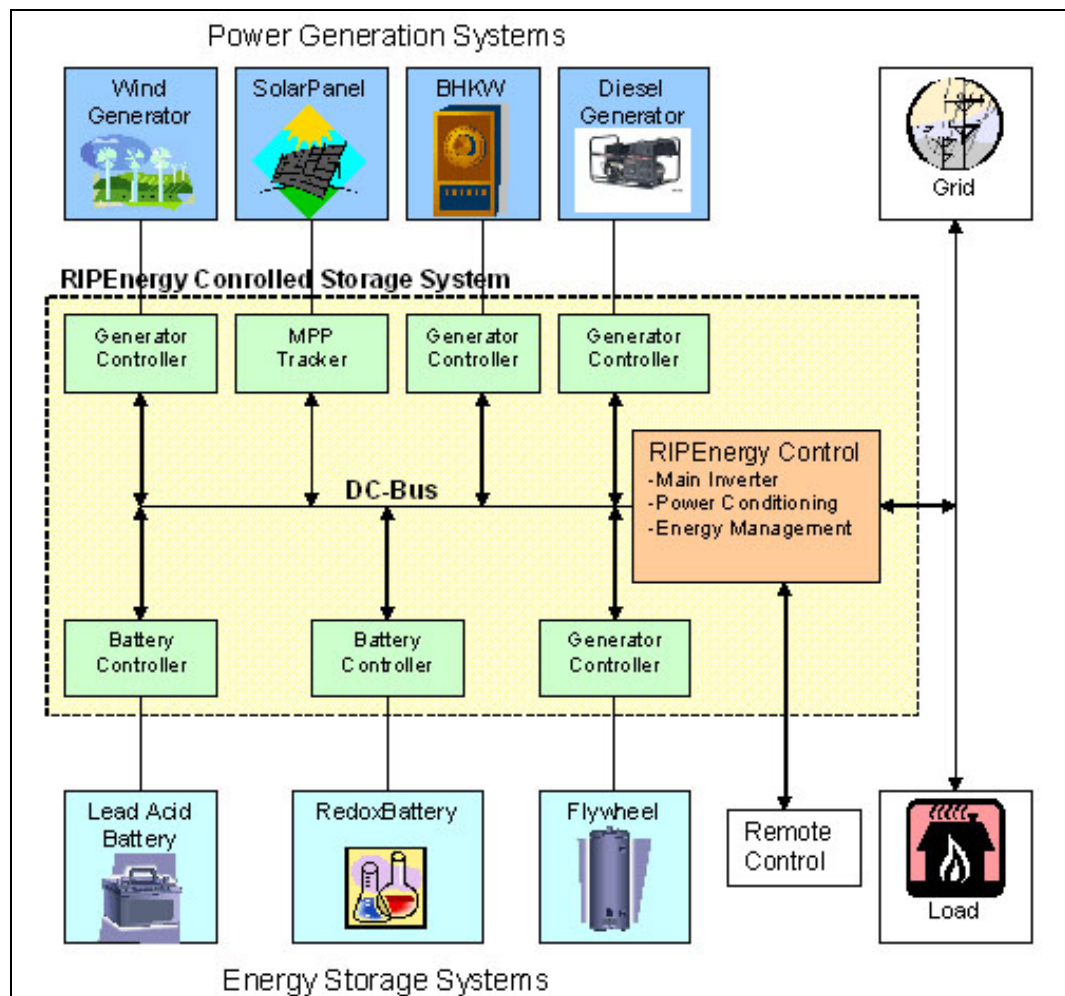


Abbildung 1: Prinzipielle Übersicht zu den Möglichkeiten des gesteuerten Speichers (Quelle: RipeEnergy)

1.3. Energieeffiziente Nutzung des 400 V Netzes und Vermeidung von Doppelumwandlung

Mit dem Einsatz von gesteuerten Speichern zwischen Netzteilen mit dezentralen Energieerzeugungsanlagen und dem Niederspannungsnetz der öffentlichen Versorgung kann der Energiefluss im Niederspannungsnetz optimiert werden. Die gesteuerte Speicherung erlaubt einen Ausgleich des Energieflusses im Niederspannungsnetz und damit die effiziente Energieverteilung durch Vermeidung von Spitzenlasten im Netz. Da die Verluste quadratisch mit der Stromstärke zunehmen, kann durch einen teilweise gesteuerten Energiefluss, eine ausgeglichene Belastung angestrebt werden.

Mit einem gesteuerten Speicher kann die direkte und einmalige Umwandlung der Gleichstrom/Drehstromumwandlung, z.B. bei Photovoltaikanlagen oder Brennstoffzellen, erfolgen.

1.4. Grundlagen und bisherige Forschungsaktivitäten

Die Realisierung des Projektes stützt sich unter anderem auf die Resultate des BFE Forschungsprojektes „Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Netzen - technische und ökonomische Auswirkungen“ [1]. Das Forschungsprojekt liefert auf Basis von theoretischen Abklärungen und Simulationen an real existierenden Netzen Resultate über die Beeinflussung des Betriebs von Mittel- und Niederspannungsnetzen durch den vermehrten Einsatz von dezentralen Energieerzeugungsanlagen. Auswirkungen auf die Planung und den Aufbau von Verteilnetzen unter dem Aspekt vermehrter dezentraler Erzeugungseinheiten werden abgeleitet.

2. ZIELE

Mit dem Forschungsprojekt „Steuerbare Speicher zur Optimierung des Energieflusses in Niederspannungsnetzen mit DEA“ wurden die folgenden Zielsetzungen, bzw. Resultate angestrebt:

- Darlegung der Rahmenbedingungen für die Energieflussoptimierung durch Speicher in Niederspannungsnetzen unter Berücksichtigung des vermehrten Einsatzes von dezentralen Erzeugungseinheiten;
- Ermitteln konkreter Einsatzvarianten des gesteuerten Speichers und Ableiten des Anwendungspotenzials;
- Ableiten von technischen Anforderungen für die gesteuerten Speicherelemente.
- Abklärung der Kosten und der Wirtschaftlichkeit von gesteuerten Speicherelementen
- Vergleich der Speicherelemente gesteuerter Speicher oder Netz als Speicher oder fossile Einspeisungen

3. FUNKTIONEN UND EINSATZMÖGLICHKEITEN

3.1. Aufbau und Einbindung des gesteuerten Speichers

3.1.1. Prinzipieller Aufbau des gesteuerten Speichers

Der gesteuerte Speicher besteht im Wesentlichen aus leistungselektronischen Umrichtern, einem DC-Bus und den Speichereinheiten. Der prinzipielle Aufbau ist aus Abbildung 2 ersichtlich.

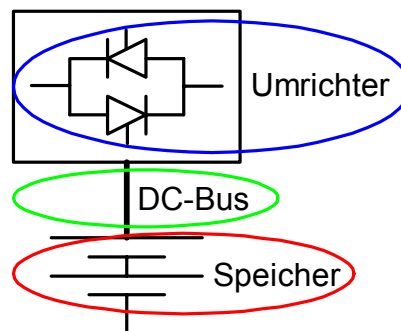


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau der gesteuerten Speicher

Die Umrichter werden als kombinierte Gleich- und Wechselrichter mit IGBT's realisiert. Abhängig von der Art der Ankopplung ans NS-Netz, die parallel oder seriell erfolgen kann, weist der Umrichter einen oder zwei AC-Anschlüsse sowie einen DC-Anschluss auf und beinhaltet allenfalls noch einen Bypass zur Umgehung der Umrichter.

Der DC-Bus dient als Verbindung zwischen dem Umrichter und den Speichern. Er beinhaltet sämtliche Komponenten, die für die Gewährleistung einer stabilen Gleichspannung und zur Entkopplung der DC-Seite von der AC-Seite erforderlich sind. Auf den DC-Bus können über DC/DC-Wandler DC-Verbraucher und DC-Erzeuger, wie z.B. Photovoltaikanlagen aufgeschaltet werden.

Als Speicher werden vorerst konventionelle Batterien eingesetzt. Der Einsatz von anderen Energiespeichern, wie z.B. Redox-Flow-Batterien mit grossen Elektrolyttanks und Supercaps zur Bereitstellung von grossen Leistungsspitzen oder Schwungräder, die über Gleichstrommaschinen angetrieben werden, ist vorgesehen.

3.1.2. Einbindung der gesteuerten Speicher ins NS-Netz

Die gesteuerten Speicher werden bei den Endverbrauchern oder an ausgewählten Netzknoten ins NS-Netz eingebunden. Dabei kann eine Aufschaltung parallel oder in Serie zu den Verbrauchern und den dezentralen Energieerzeugungsanlagen erfolgen, wie dies in Abbildung 3 aufgezeigt ist.

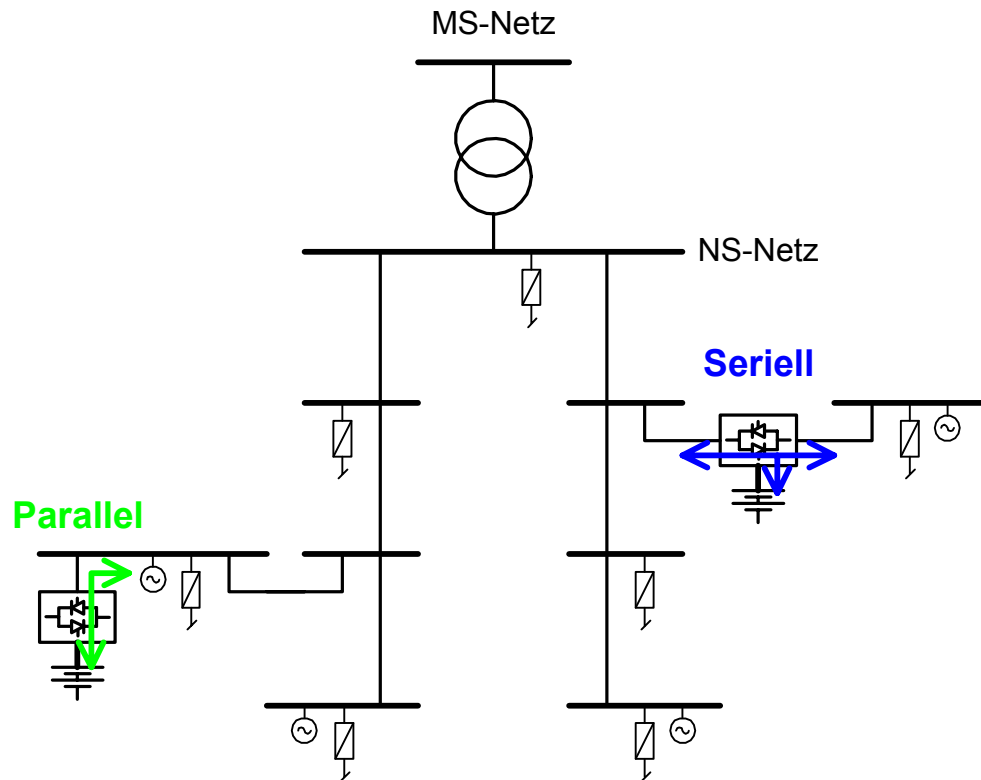


Abbildung 3: Prinzipielle Darstellung der parallelen und seriellen Aufschaltung der gesteuerten Speicher

Die serielle Aufschaltung der gesteuerten Speicher hat gegenüber der parallelen Aufschaltung den Nachteil, dass sie energetisch schlechter ist, da die gesamte, zwischen dem Netz und den Verbrauchern übertragene Energie über die Leistungselektronik fließt. Diese Übertragungsverluste können durch einen Bypass reduziert werden, womit allerdings auch die Entkopplung zwischen dem Netz und den Verbrauchern nicht mehr besteht, d.h. funktional erfolgt dadurch eine parallele Aufschaltung.

3.2. Funktionen der gesteuerten Speicher

3.2.1. Übersicht

Mit den gesteuerten Speichern können mehrere Funktionen erfüllt werden. Dies sind das Energiemanagement für die einzelnen Endverbraucher, die Lastflusssteuerung im Netz und die Verbesserung der Netzqualität. Gesteuerte Speicher, die seriell aufs NS-Netz aufgeschaltet werden, können auch zur Erhöhung der Versorgungssicherheit der Verbraucher beitragen. Einzelne Funktionen sind kombiniert möglich, wie z.B. das Energiemanagement und die Verbesserung der Netzqualität. Hingegen ist ein Energiemanagement für den Endverbraucher und eine Lastflusssteuerung im Netz nicht gleichzeitig möglich. Im Folgenden werden die Funktionen der gesteuerten Speicher beschrieben.

3.2.2. Energiemanagement

Mit der Funktion „Energiemanagement“ regelt der gesteuerte Speicher den Bezug resp. die Abgabe von Wirk- und Blindleistung an der Netzanschlussstelle des Endverbrauchers wie in Abbildung 4 aufgezeigt.

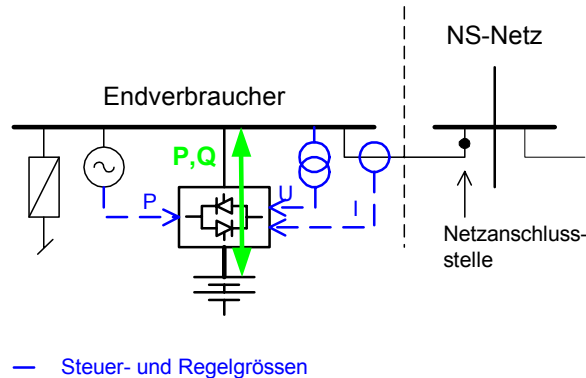


Abbildung 4: Messgrößen für die P-Q-Regelung

Diese Funktion ist mit der parallelen wie auch mit der seriellen Aufschaltung des gesteuerten Speichers möglich.

Die Leistungsvorgaben an der Netzanschlussstelle werden durch den Endverbraucher vorgegeben. Der gesteuerte Speicher wird im Rahmen seiner Leistung und der Grösse des Energiespeichers diese Vorgaben erfüllen, so dass je nach Verbrauch und Produktion Energie vom Speicher bezogen oder in den Speicher abgegeben wird. Für den Endverbraucher entstehen somit folgende Vorteile:

- Leistungsspitzen werden vermieden oder reduziert.
- In Niedertarifzeiten produzierte elektrische Energie kann gespeichert und zu Hochtarifzeiten genutzt werden.
- Den prognostizierten Lastprofilen des Endverbrauchers kann optimal nachgefahren werden. Dies ist vor allem im liberalisierten Strommarkt wichtig.
- Der vom Netzbetreiber vorgegebene maximale Blindleistungsbezug, d.h. der minimale $\cos \varphi$, kann eingehalten werden.

Für das NS-Netz, d.h. aus der Sicht des Netzbetreibers präsentiert sich ein Endverbraucher mit einem gesteuerten Speicher, der die Funktion Energiemanagement nutzt, als Verbraucher mit einem kontinuierlichen, voraussagbaren Lastverlauf. Durch die Vermeidung von Lastspitzen und die Energiespeicherung beim Endverbraucher können die Übertragungsverluste im Netz reduziert werden.

Ein weiterer Bestandteil des Energiemanagements ist die direkte Aufschaltung von DC-Erzeugern, wie z.B. Photovoltaikanlagen oder Brennstoffzellen auf den DC-Bus und die zugehörige Speicherbewirtschaftung. Die produzierte elektrische Energie kann dabei ohne grosse Umwandlungsverluste gespeichert werden, es ist lediglich eine DC/DC-Wandlung erforderlich.

3.2.3. Lastflusssteuerung im Netz

Ein Netzbetreiber kann zur Stabilisierung eines NS-Netzes, das viele DEA enthält, gesteuerte Speicher einsetzen. Mit Hilfe der gesteuerten Speicher kann der Lastfluss im NS-Netz so beeinflusst werden, dass Überlastungen vermieden und eine ausgeglichene Netzbelastung erreicht wird. Die gesteuerten Speicher regeln bei dieser Anwendung die Spannung am jeweiligen Anschlusspunkt durch die Abgabe oder Aufnahme von Wirk- und Blindleistung. Die Anschlusspunkte werden so gewählt, dass die gesteuerten Speicher optimal auf das Spannungsprofil der einzelnen Leitungen im NS-Netz einwirken können. Mögliche Anschlusspunkte mit den zugehörigen Regelgrößen sind in Abbildung 5 aufgezeigt.

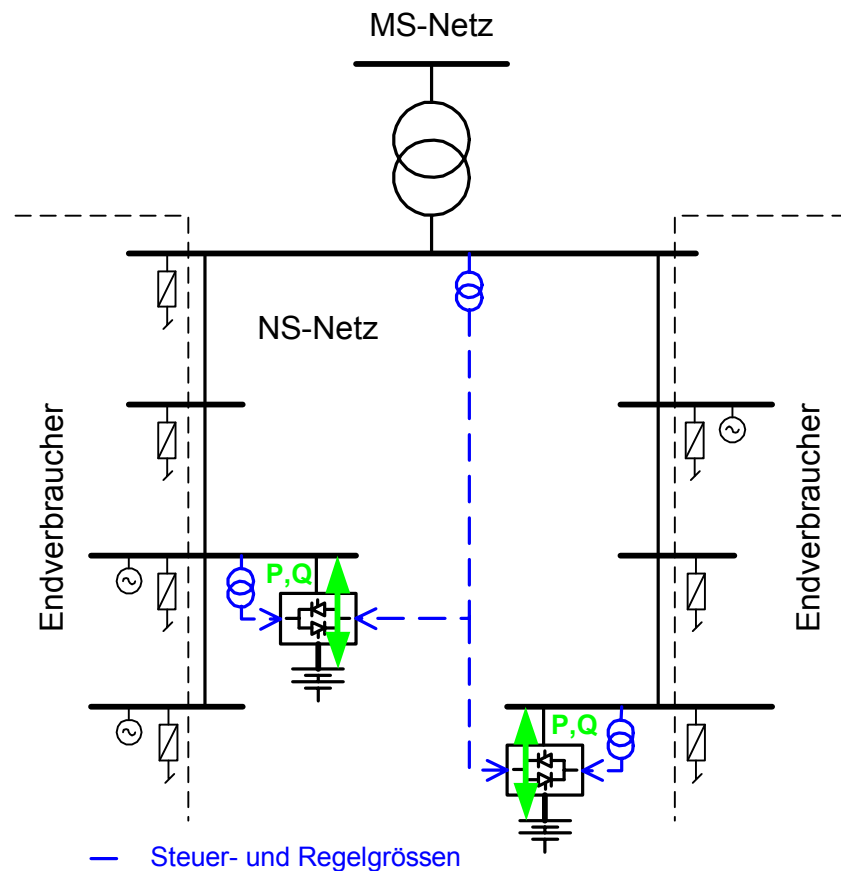


Abbildung 5: Anschlusspunkte für die Lastflusssteuerung im NS-Netz

Werden die gesteuerten Speicher zur Lastflusssteuerung im NS-Netz eingesetzt, so sind sie Bestandteile des Netzes und werden in den Betrieb des Netzbetreibers integriert. Für die Funktion der Lastflusssteuerung ist eine parallele Aufschaltung der gesteuerten Speicher ideal.

3.2.4. Verbesserung der Netzqualität

Gesteuerte Speicher können auch zur Verbesserung der Netzqualität eingesetzt werden. Abhängig von der Art der Aufschaltung können Netzstörungen und Rückwirkungen der Verbraucher ins Netz unterschiedlich effizient reduziert werden. Die Verbesserung der Netzqualität durch die gesteuerten Speicher wird in Tabelle 1 qualitativ dargestellt.

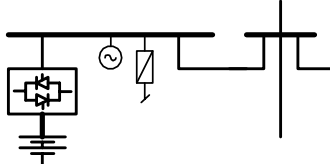
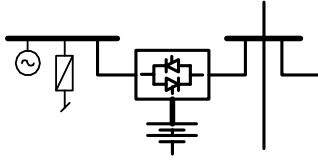

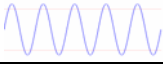
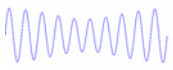
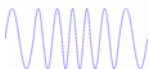
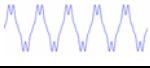
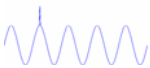
	Parallele Aufschaltung	Serielle Aufschaltung
Netzstörungen		
Netzunterbruch, Netzeinbruch 	+	++
Über-, Unterspannungen 	+	++
Spannungsschwankungen 	+	++
Frequenzschwankungen 	-	++
Spannungsverzerrungen 	+	++
Spannungsspitzen 	-	+
Netzzrückwirkungen		
Verbesserung des $\cos \varphi$	+ abhängig von der Leistung	+ abhängig von der Leistung
Klirrfaktor des vom NS-Netz bezogenen Stromes THDi	+	++
Energieeffizienz		
Energieverluste des gesteuerten Speichers	Unabhängig vom Energie- bezug der Verbraucher, nur abhängig von der Bewirt- schaftung des Energiespei- chers.	Abhängig vom Energiebezug der Verbraucher, da der ge- samte Strom durch den ge- steuerten Speicher fließt.

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Reduktion
der Netzstörungen und Netzzrückwirkungen
(- nicht möglich; + teilweise; ++ gut)

Mit einer seriellen Aufschaltung der gesteuerten Speicher werden bessere Resultate bezüglich der Netzqualität erreicht als mit einer parallelen Aufschaltung. Der Grund dafür ist, dass das NS-Netz und das Netz der Endverbraucher bei der seriellen Aufschaltung durch den gesteuerten Speicher entkoppelt werden, solange die Verbindung zwischen den beiden Netzen nicht aus energetischen Gründen über den Bypass erfolgt. Die serielle Aufschaltung der gesteuerten Speicher weist gegenüber der parallelen Aufschaltung eine schlechtere Energieeffizienz auf, da bei der seriellen Aufschaltung die gesamte, zwischen dem Netz und den Verbrauchern übertragene Energie über die Leistungselektronik fließt.

3.2.5. Erhöhung der Versorgungssicherheit der Verbraucher

Bei einem Ausfall des versorgenden NS-Netzes können die in Serie aufgeschalteten gesteuerten Speicher die Versorgung der angeschlossenen Verbraucher unterbrechungsfrei übernehmen, indem sie einen Inselbetrieb aufrecht erhalten, wie dies von unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen (USV) bekannt ist. Soll bei parallel aufgeschalteten gesteuerten Speichern vom Netzbetrieb in den Inselbetrieb gewechselt werden, so muss das Netz des Verbrauchers mit einem Leistungsschalter vom NS-Netz getrennt werden. Die Dauer der Versorgung im Inselbetrieb ist abhängig vom Verbrauch, der gespeicherten Energie und einer allfälligen Produktion von elektrischen dezentralen Erzeugern im Inselnetz. Nach einer stabilen Spannungswiederkehr im NS-Netz können die Verbraucher mit einem seriell aufgeschalteten gesteuerten Speicher unterbrechungsfrei auf das NS-Netz rücksynchronisiert werden.

3.3. Konkrete Einsatzmöglichkeiten

3.3.1. Gesteuerter Speicher als Spannungsstabilisator

Abgelegene Siedlungen oder Weiler werden häufig über lange NS-Leitungen versorgt, deren Längen bis zu 1 km betragen können. Diese Art der Versorgung hat den Nachteil, dass bei grosser Last, wie z.B. während der Mittagszeit oder am Abend die Netzspannung bei den Verbrauchern in Folge des grossen Spannungsabfalls über der NS-Leitung stark reduziert wird. Die Verbraucher in abgelegenen Siedlungen und Weiler werden somit häufig mit schlechter Netzqualität versorgt. Zudem tritt zusammen mit dem grossen Spannungsabfall über der NS-Leitung auch ein beträchtlicher Übertragungsverlust auf.

Der gesteuerte Speicher kann in abgelegenen Siedlungen und Weiler als Spannungsstabilisator eingesetzt werden. Dabei werden die Energie und Leistung zu Starklastzeiten zur Hauptsache aus dem gesteuerten Speicher entnommen. Dadurch kann der Spannungsabfall über der NS-Leitung gering gehalten werden und die grossen Spannungsschwankungen am Anschlusspunkt der Verbraucher werden somit vermieden. Zu Zeiten mit schwacher Last wird der gesteuerte Speicher mit einer geringen Leistung, die über die NS-Leitung bezogen wird, wieder aufgeladen.

Gesteuerte Speicher mit einer Leistung von 30 kW oder 50 kW und einer Energiespeicherung für eine Stunde maximale Leistungsabgabe sind für kleine Siedlungen resp. kleine Weiler ausreichend.

3.3.2. Inselnetze mit gesteuerten Speicher

Die gesteuerten Speicher können auch in Inselnetzen eingesetzt werden. Für diese Anwendung eignen sich vor allem Voralpengebiete, die elektrifiziert werden sollen. Mit Hilfe eines gesteuerten Speichers kann bei der Elektrifizierung abgelegener Gebiete auf die Zu-

leitung verzichtet werden, wenn die elektrische Energie, anstatt über eine NS-Leitung geliefert, vor Ort durch Solaranlagen, Windanlagen und allenfalls weitere dezentrale Energieerzeuger produziert wird. Die dabei überschüssig produzierte elektrische Energie wird mittels des gesteuerten Speichers in Batterieanlagen gespeichert und wieder abgegeben, wenn der Verbrauch die dezentrale Produktion übersteigt. Die Regelung des gesteuerten Speichers gibt die Frequenz und Spannung im Inselnetz vor und ist bestrebt, die entsprechenden Grenzwerte gemäss EN50160 einzuhalten.

3.3.3. Grossverbraucher mit Eigenerzeugung

Ein Grossverbraucher mit Eigenerzeugung, wie z.B. einem BHKW, einem Kleinwasserkraftwerk oder einer Gasturbine, kann zur Ergänzung seiner Erzeugungsanlagen einen gesteuerten Speicher einsetzen. Mittels des gesteuerten Speichers kann ein gleichmässiger Strombezug aus dem Netz angestrebt werden, um die Kosten für Leistungsspitzen zu reduzieren. Der gesteuerte Speicher bringt dabei den Vorteil, dass die Leistungsabgabe der Erzeugungsanlagen nicht dem Verbrauch angepasst werden muss und die DEA somit im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden kann. Die Anpassung an den Verbrauch wird durch den gesteuerten Speicher übernommen, d.h. er regelt die Speicherung oder Abgabe nach der Leistung am Netzanschlusspunkt des Grossverbrauchers.

4. ALTERNATIVEN ZUM GESTEUERTEN SPEICHER

4.1. Qualitativer Vergleich

4.1.1. Verschiedene Anwendungen des gesteuerten Speichers

Abhängig von der jeweiligen Anwendung des gesteuerten Speichers bestehen alternative Anlagen, um die prinzipiell selbe Funktionalität wie mit dem gesteuerten Speicher zu erreichen. Die möglichen Alternativen zum gesteuerten Speicher werden im Folgenden aufgezeigt und bezüglich der Vorteile und der Nachteile miteinander verglichen.

4.1.2. Dauernde Spannungsstabilisierung am Ende einer langen Stickleitung

Werden abgelegene Verbraucher über eine lange Stickleitung mit Niederspannung versorgt, so ist die Spannung am Anschlusspunkt der Verbraucher stark vom aktuellen Verbrauch abhängig. Dieser Verbrauchsabhängigkeit der Spannung kann mit Dieselaggregaten, mit Blockheizkraftwerken, mit neuen Leitungen, mit einer Versorgung ab dem MS-Netz und zusätzlicher Trafostation sowie mit dem gesteuerten Speicher entgegen gewirkt werden. Diese möglichen Anlagen sind bezüglich der Investition sowie der Betriebskosten und des Wartungsaufwandes sehr verschieden (Abbildung 6).

Prinzipiell kann auch der Phasenschieber als Alternative zur Spannungsstabilisierung in Betracht gezogen werden. Da jedoch, wie in [1] gezeigt, der Spannungsabfall über langen Leitungen in NS-Netzen vor allem durch die übertragene Wirkleistung verursacht wird, ist der Phasenschieber keine gleichwertige Alternative zum gesteuerten Speicher und wird daher in diesem Zusammenhang nicht mehr weiter betrachtet.

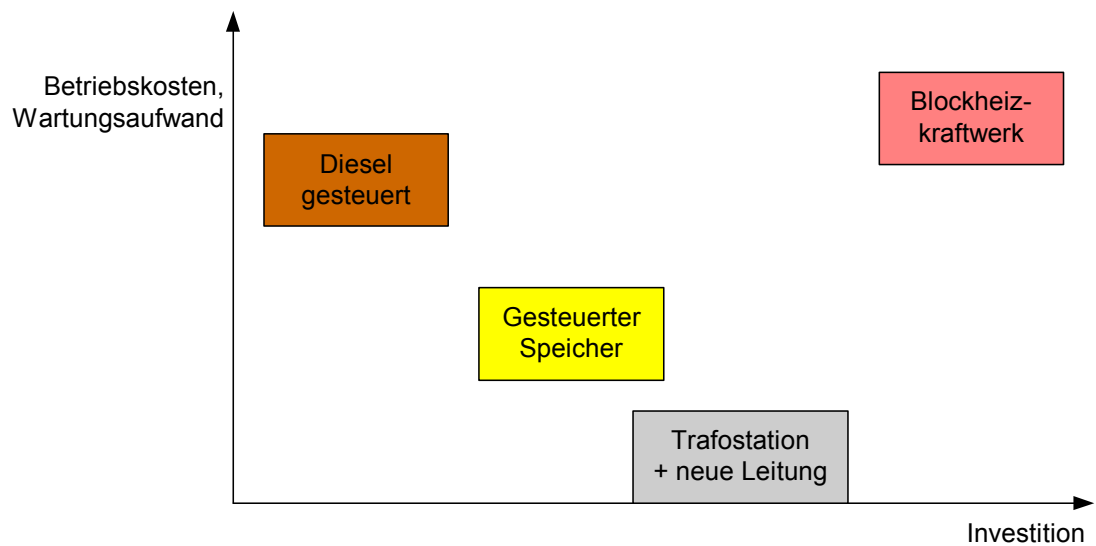


Abbildung 6: Betriebskosten, Wartungsaufwand und Investition von Anlagen zur dauernden Spannungsstabilisierung

4.1.3. Netzqualität, Oberwellenglättung, Blindleistungskompensation

Der gesteuerte Speicher und seine Alternativen beeinflussen die Netzqualität unterschiedlich (Abbildung 7).

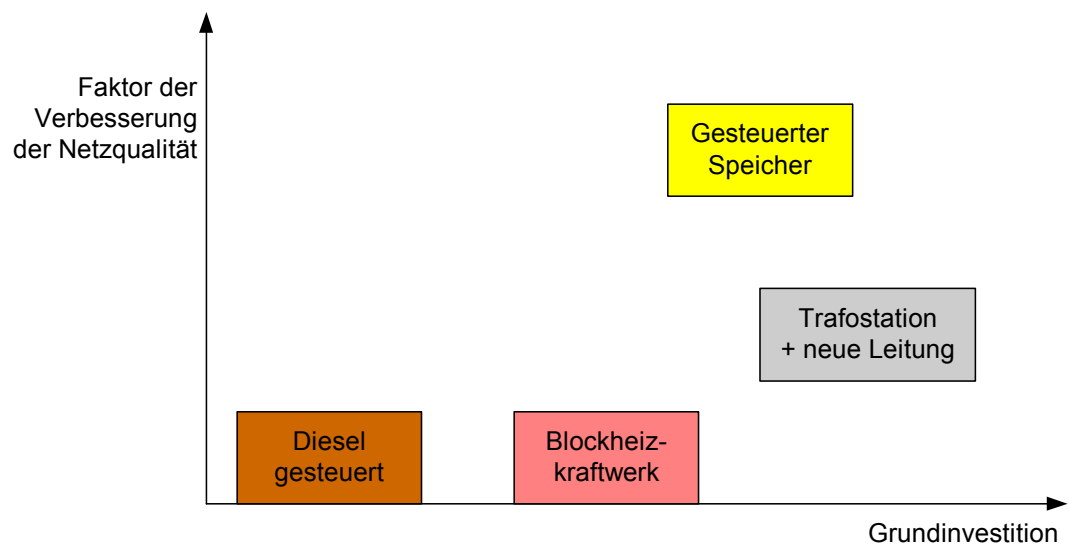


Abbildung 7: Einfluss auf die Verbesserung der Netzqualität und Grundinvestitionen

4.1.4. Reduktion von Spannungsspitzen / Einspeisung bei Spannungsausfällen

Der gesteuerte Speicher und seine Alternativen weisen bezüglich der Reduktion von Spannungsspitzen und der Überbrückung von Spannungsausfällen ein stark unterschiedliches Verhalten auf (Abbildung 8).

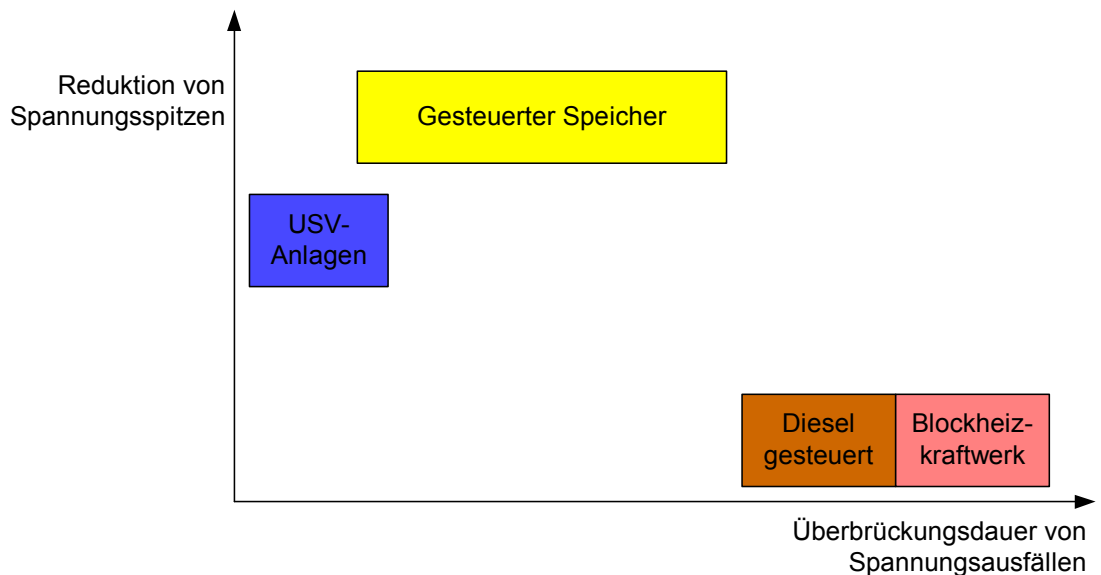


Abbildung 8: Korrelation zwischen kurz- und langzeitigen Netzverbesserungen

Die Reaktionszeiten der verschiedenen Anlagen gehen aus Abbildung 9 hervor.

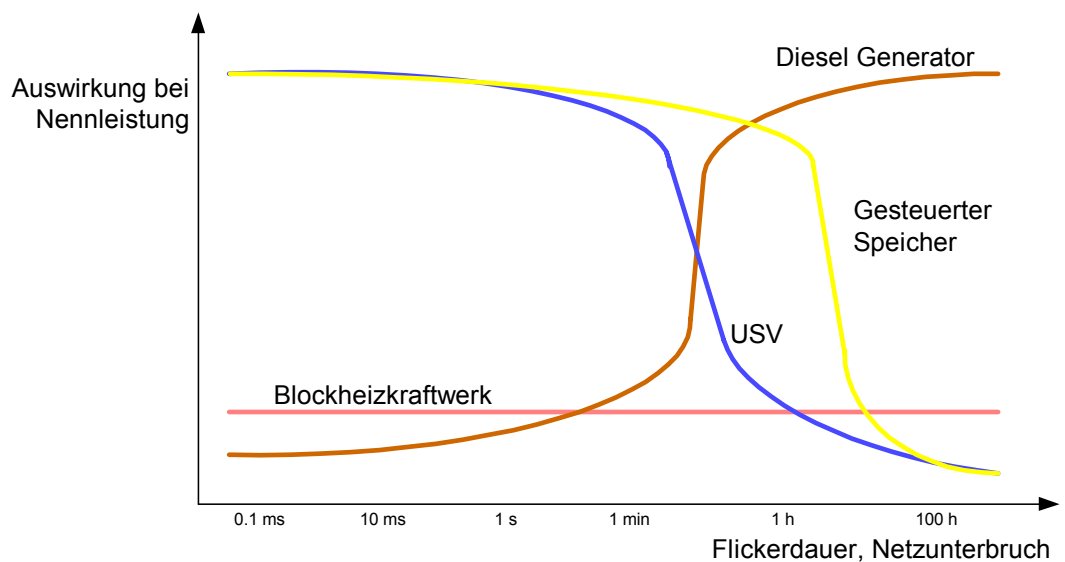


Abbildung 9: Reduktion von Spannungsspitzen und Überbrückung von Netzunterbrüchen bei Nennleistung

4.1.5. Vor- und Nachteile des gesteuerten Speichers und seiner Alternativen

Die Vor- und Nachteile des gesteuerten Speichers und seiner Alternativen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Daraus und auch aus der vorhergehenden qualitativen Betrachtung der unterschiedlichen Anlagen geht hervor, dass die geforderte Funktionalität bestimmt, welche der möglichen Anlagen für die jeweilige Aufgabenstellung am besten geeignet ist.

Anlage	Vorteile	Nachteile
Diesel	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungspreis; - Überbrückung von lang andauernden Netzunterbrüchen 	<ul style="list-style-type: none"> - Umweltverträglichkeit; - Netzqualität, keine aktive Regelung zur Netzqualitätsverbesserung; - Lärm; - Erweiterbarkeit; - Wartungsintensiv; - Betriebsmittelbeschaffung
Gesteuerter Speicher	<ul style="list-style-type: none"> - Regenerative Energiegewinnung mit PV, Windanlagen oder Klein-Wasserkraftwerken; - Speichergrösse einfach erweiterbar; - Regenerative Energieeinspeisung kann im Verhältnis zum Spitzenverbrauch verhältnismässig klein sein; - Verbesserung der Netzqualität; - Verbesserung der Netzauslastung; - Blindleistungskompensation 	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungspreis
USV-Anlage	<ul style="list-style-type: none"> - Bekannter Stand der Technik; 	<ul style="list-style-type: none"> - kleine Speichergrössen; - keine aktive Regelung zur Netzqualitätsverbesserung; - üblicherweise werden nur Netzunterbrüche bis maximal 1 Stunde überbrückt
Leitung, Trafostation	<ul style="list-style-type: none"> - bekannter Stand der Technik; - Netzqualität 	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellungskosten; - nachträgliche Kapazitätserweiterung ist aufwändig
Blockheizkraftwerk	<ul style="list-style-type: none"> - Dank Wärmeerzeugung erhöhter Gesamtwirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> - Anschaffungspreis - Netzqualität, keine aktive Regelung zur Netzqualitätsverbesserung; - Betriebsmittelbeschaffung

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Anlagen bezüglich der Netzqualität

4.2. Kostenvergleich für eine konkrete Anwendung

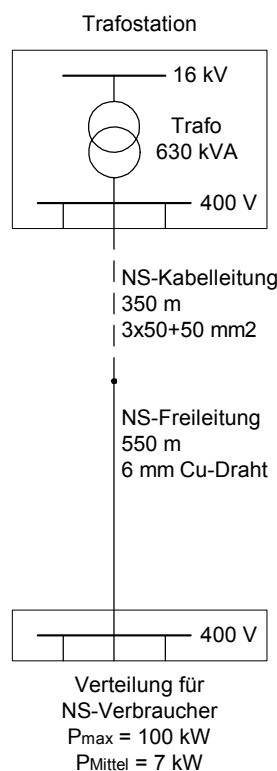
4.2.1. Aufgabenstellung

Zur Stabilisierung der Spannung von abgelegenen NS-Verbrauchern bestehen mehrere Möglichkeiten. Der Einsatz eines gesteuerten Speichers ist eine davon. Als Alternative zum gesteuerten Speicher können auch die Varianten „MS-Leitung“, „990 V Leitung“ und „Notstromaggregat“ für die Spannungsstabilisierung in Betracht gezogen werden.

Im Folgenden werden die Ausgangslage und die möglichen Anwendungen erläutert, deren Kosten abgeschätzt und mit den Kosten eines gesteuerten Speichers verglichen.

4.2.2. Bestehende Anspeisung der abgelegenen Verbraucher

Für den Vergleich der verschiedenen Varianten zur Versorgung der abgelegenen NS-Verbraucher wird als Rechenbeispiel von der folgenden bestehenden realen Versorgung ausgegangen (Abbildung 10).



Die abgelegenen Verbraucher werden ab einer Transformatorstation über eine Zuleitung bestehend aus einem 350 m langen NS-Kabel und einer 550 m langen NS-Freileitung versorgt.

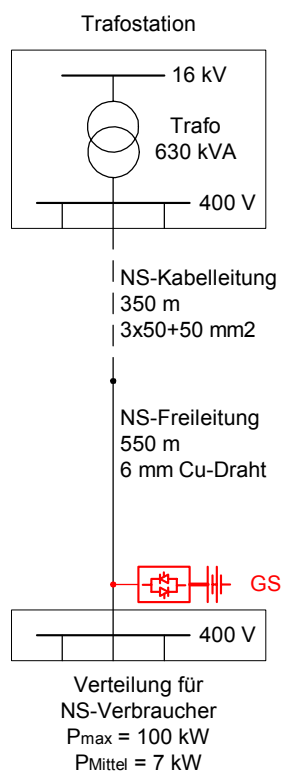
Die mittlere gesamte Leistung der abgelegenen Verbraucher beträgt 7 kW. Zu Spitzenlastzeiten, d.h. je eine Stunde am Mittag und am Abend kann die maximale gesamte Leistung 100 kW betragen. Diese Spitzenleistung verursacht eine grosse Spannungsabsenkung beim Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher, d.h. der Grenzwert gemäss EN50160 wird unterschritten. Mittels des gesteuerten Speichers oder den Alternativen „MS-Leitung“, „990 V Leitung“ resp. „Notstromaggregat“ soll diese unzulässige Spannungsabsenkung vermieden werden.

Mit einem Energiemanagement auf der Verbraucherseite könnte als weitere Alternative zu den im Folgenden aufgeführten Varianten die Spitzenlast reduziert und somit auch die Spannungsabsenkung verringert werden. Ein solches Energiemanagement setzt jedoch voraus, dass die Verbraucher bereit sind, zu den Spitzenlastzeiten, wie am Mittag und am Abend ihren Stromverbrauch einzuschränken.

Abbildung 10: Bestehende Versorgung der abgelegenen Verbraucher

4.2.3. Einsatz eines gesteuerten Speichers bei den Verbrauchern

Der Gesteuerte Speicher (GS) wird am Ende der NS-Freileitung unmittelbar vor der Verteilung für die NS-Verbraucher angeschlossen (Abbildung 11).



Der gesteuerte Speicher wirkt als Spannungsstabilisator. Beziehen die abgelegenen Verbraucher eine grosse Leistung, so speist der gesteuerte Speicher Energie und Leistung ins NS-Netz ein. Dies bewirkt, dass der Spannungsabfall über der NS-Leitung reduziert wird und die grossen Spannungsschwankungen am Anschlusspunkt der Verbraucher vermieden werden. Zu Zeiten mit schwacher Last wird der gesteuerte Speicher mit einer geringen Leistung, die über die NS-Leitung bezogen wird, wieder aufgeladen.

Für das aufgezeigte Beispiel und den Kostenvergleich mit den Alternativen werden gesteuerte Speicher mit einer Leistung von 30 kW oder 50 kW und einer Energiespeicherung für eine Stunde maximale Leistungsabgabe betrachtet.

Als Speicher werden Redox Flow Batterien eingesetzt, wodurch eine hohe Lebensdauer der Batterien von bis zu 20 Jahren erreicht werden soll. Diese hohe Lebensdauer basiert darauf, dass die Speicherkapazität lediglich vom Ionenaustausch des Elektrolyten abhängig ist. Die ausreichende Funktionalität des Ionenaustausches wird mit dem fachgerechten Unterhalt der Redox Flow Batterien erreicht.

Abbildung 11: Bestehende Versorgung der abgelegenen Verbraucher und zusätzlichem gesteuertem Speicher (GS)

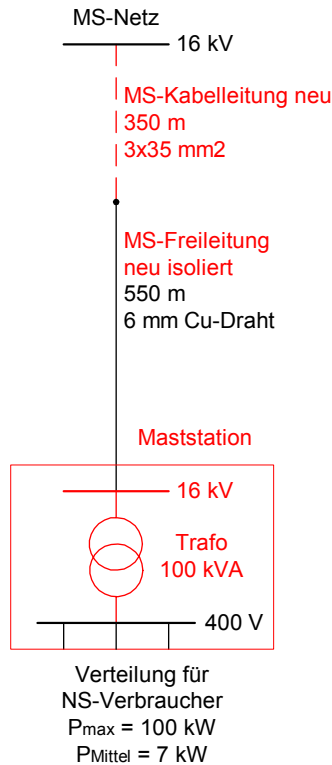
Die Kosten für die gesteuerten Speicher mit einer Leistung von 30 kW resp. 50 kW und Redox Flow Batterien sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

	Leistung GS 30 kW	Leistung GS 50 kW
Wechselrichter (Lebensdauer 20 Jahre)	Fr. 25'000.-	Fr. 30'000.-
Speicher (Redox Flow Batterien)	Fr. 50'000.-	Fr. 85'000.-
Installation, Inbetriebnahme	Fr. 15'000.-	Fr. 17'000.-
Gesamte Investition	Fr. 90'000.-	Fr. 132'000.-
Service und Unterhalt pro Jahr	Fr. 2'500.-	Fr. 2'550.-
Service und Unterhalt für 20 Betriebsjahre	Fr. 50'000.-	Fr. 51'000.-
Totale Kosten für 20 Betriebsjahre	Fr. 140'000.-	Fr. 183'000.-

Tabelle 3: Kostenschätzung für gesteuerte Speicher gemäss RIPLEnergy

4.2.4. Einsatz einer MS-Leitung als Alternative zum gesteuerten Speicher

Eine Alternative zur Versorgung der abgelegenen Verbraucher ist die Einbindung ins MS-Netz und die Transformation unmittelbar vor der Verteilung für die Verbraucher (Abbildung 12).



Die Zuleitung zu den abgelegenen Verbrauchern muss ins MS-Netz integriert werden. Die bestehende Freileitung muss neu auf 16 kV isoliert werden. Die Kabelleitung muss durch ein 16 kV Kabel ersetzt werden.

Bei den abgelegenen Verbrauchern muss eine Maststation mit einer Transformatorleistung von 100 kVA erstellt werden. Ab dieser Station wird die bestehende Verteilung für die NS-Verbraucher angespeist.

Die Variante „MS-Netz“ hat den Nachteil, dass weitere Anspeisungen von einzelnen Verbrauchern ab der Zuleitung, z.B. nach 300 m der MS-Freileitung, nur noch über Transformatoren möglich sind.

Abbildung 12: Versorgung der abgelegenen Verbraucher ab dem MS-Netz

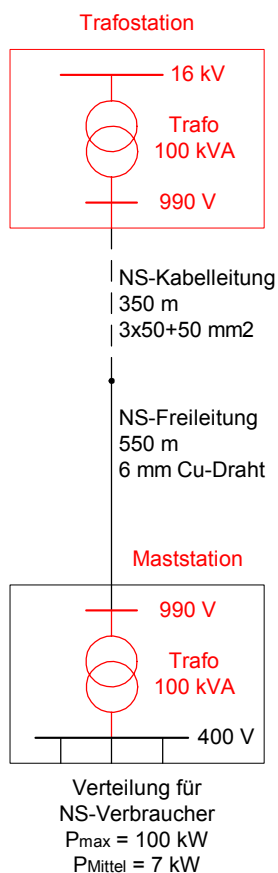
Die Kosten für die Einbindung ins MS-Netz inkl. der zusätzlichen Transformation sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

MS-Kabel inkl. Trasse und Anschlüsse	Fr. 65'000.-
Isolation der bestehenden Freileitung auf 16 kV	Fr. 30'000.-
Maststation mit 100 kVA Transformator inkl. Trenner	Fr. 55'000.-
Gesamte Investition	Fr. 150'000.-
Service und Unterhalt für die Maststation pro Jahr	Fr. 1'000.-
Service und Unterhalt für 20 Betriebsjahre	Fr. 20'000.-
Totale Kosten für 20 Betriebsjahre	Fr. 170'000.-

Tabelle 4: Kostenschätzung für die Versorgung ab dem MS-Netz

4.2.5. Einsatz einer 990 V Leitung als Alternative zum gesteuerten Speicher

Eine weitere Alternative zur Versorgung der abgelegenen Verbraucher ist die Anspeisung der Verbraucher über eine 990 V Leitung (Abbildung 13).



Die bestehende Trafostation wird mit einem 100 kVA 16.0 / 0.99 kV Transformator ergänzt. Die bestehende NS-Kabelleitung wird an den 990 V Abgangsschalter angeschlossen.

Die NS-Kabelleitung und die NS-Freileitung können unverändert weiter benutzt werden, da die Isolation von 400 V Leitungen für 1 kV Betriebsspannung ausgelegt ist.

Bei den abgelegenen Verbrauchern muss eine Maststation mit einer Transformatorleistung von 100 kVA und der Transformation 990 V / 400 V erstellt werden. Ab dieser Station wird die bestehende Verteilung für die NS-Verbraucher angespeist.

Die Variante „990 V Leitung“ hat den Nachteil, dass weitere Anspeisungen von einzelnen Verbrauchern ab der Zuleitung, z.B. nach 300 m der 990 V Freileitung, nur noch über Transformatoren möglich sind.

Die lastabhängigen Spannungsschwankungen können bei der Variante „990 V Leitung“ nur beschränkt reduziert werden, da wohl der Spannungsabfall über der Leitung reduziert wird, die beiden Transformatoren jedoch zusätzliche Spannungsabfälle erzeugen.

Abbildung 13: Versorgung der abgelegenen Verbraucher über 990 V Leitung

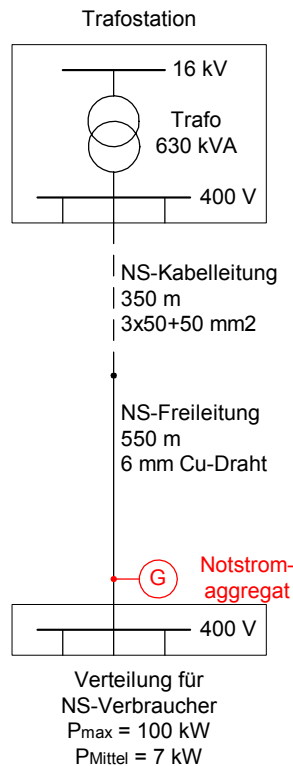
Die Kosten für die Versorgung der abgelegenen Verbraucher über eine 990 V Leitung sind in der Tabelle 5 zusammengestellt.

Erweiterung der Trafostation mit einem 100 kVA 16 kV / 0.99 kV Trafo inkl. Eingangs- Abgangsschalter.	Fr. 40'000.-
Maststation mit 100 kVA 990 V / 400 V Transformator inkl. Trenner	Fr. 55'000.-
Gesamte Investition	Fr. 95'000.-
Service und Unterhalt für die Transformatoren pro Jahr	Fr. 1'000.-
Service und Unterhalt für 20 Betriebsjahre	Fr. 20'000.-
Totale Kosten für 20 Betriebsjahre	Fr. 115'000.-

Tabelle 5: Kostenschätzung für die Versorgung mittels 990 V

4.2.6. Einsatz eines Notstromaggregates als Alternative zum gesteuerten Speicher

Bei den abgelegenen Verbrauchern kann die Spannung auch durch die Einspeisung von elektrischer Leistung mittels eines Notstromaggregats gestützt werden (Abbildung 14).



Das Notstromaggregat wird am Ende der NS-Freileitung unmittelbar vor der Verteilung für die NS-Verbraucher angeschlossen.

Das Notstromaggregat wirkt als Spannungsstabilisator. Beziehen die abgelegenen Verbraucher eine grosse Leistung, so wird das Notstromaggregat eingeschaltet und dadurch Energie und Leistung von der Notstromanlage ins NS-Netz eingespeist. Dies bewirkt, dass der Spannungsabfall über der NS-Leitung reduziert wird und die grossen Spannungsschwankungen am Anschlusspunkt der Verbraucher vermieden werden. Zu Zeiten mit schwacher Last ist das Notstromaggregat ausgeschaltet, d.h. die abgelegenen Verbraucher werden vollständig über die NS-Leitung versorgt.

Anstelle der Batterien wie beim gesteuerten Speicher werden Treibstofftanks benötigt.

Die Variante „Notstromaggregat“ weist den Nachteil auf, dass regelmässig Treibstoff geliefert werden muss, um jederzeit ausreichende Primärenergiereserven zur Verfügung zu haben.

Abbildung 14: Bestehende Versorgung der abgelegenen Verbraucher und zusätzlichem Notstromaggregat

Die Kosten für die elektrische Energie ab dem NS-Netz und ab dem Notstromaggregat werden als gleich hoch betrachtet. Die Kosten für 1 kWh Primärenergie, d.h. Treibstoff betragen ca. 5 Rp. Bei einem Wirkungsgrad des Notstromaggregates von 25 % ergibt dies Kosten von 20 Rp. für 1 kWh elektrische Energie.

Die Kosten für den Einsatz von Notstromaggregaten sind in der Tabelle 6 zusammengestellt.

	Notstromaggregat 30 kW	Notstromaggregat 50 kW
Gesamte Investition des Notstromaggregates inkl. Treibstofftank und Anschluss ans NS-Netz	Fr. 40'000.-	Fr. 60'000.-
Service und Unterhalt pro Jahr ohne Treibstoff	Fr. 3'000.-	Fr. 4'000.-
Service und Unterhalt ohne Treibstoff für 20 Betriebsjahre	Fr. 60'000.-	Fr. 80'000.-
Totale Kosten für 20 Betriebsjahre (ohne Treibstoff)	Fr. 100'000.-	Fr. 140'000.-

Tabelle 6: Kostenschätzung für Notstromaggregate

4.2.7. Vergleich des gesteuerten Speichers mit den Alternativen

Die Kostenschätzungen der einzelnen Varianten zur Verbesserung der Spannungsqualität bei abgelegenen Verbrauchern sind in Tabelle 7 zusammengestellt.

Varianten mit den Kosten für 20 Betriebsjahre	Untervarianten	
	30 kW	50 kW
Gesteuerter Speicher mit Redox Flow Batterien	Fr. 140'000.-	Fr. 183'000.-
Anspeisung ab MS-Netz	Fr. 170'000.-	Fr. 170'000.-
Anspeisung über 990 V Leitung	Fr. 115'000.-	Fr. 115'000.-
Notstromaggregat mit Treibstofftank (ohne Treibstoff)	Fr. 100'000.-	Fr. 140'000.-

Tabelle 7: Vergleich der Kostenschätzungen der einzelnen Varianten

Der Vergleich der Variante „990 V Leitung“ mit dem gesteuerten Speicher zeigt, dass die Kosten für diese Variante 18 % resp. 37 % geringer sind als diejenigen eines gesteuerten Speichers. Dazu muss jedoch eingebracht werden, dass aus technischer Sicht die Variante „990 V Leitung“ die schlechteste der vier aufgezeigten Varianten ist, da durch die beiden zusätzlichen Transformatoren und den entsprechenden Stufenstellungen wohl die Spannungsabsenkung am Anschlusspunkt reduziert werden kann, die lastabhängigen Spannungsschwankungen jedoch bestehen bleiben.

Die Variante „Notstromaggregat“ ist im Vergleich mit dem gesteuerten Speicher bezüglich der dauernden Spannungsstabilität gleichwertig, nicht aber bezüglich der Verbesserung der Netzqualität. Die Kosten für ein Notstromaggregat sind um 29 % resp. 23 % geringer als für den gesteuerten Speicher. Das Notstromaggregat weist jedoch aus betrieblicher und organisatorischer Sicht den grössten Aufwand auf, da regelmässige Wartungen des Aggregates unerlässlich sind und die Lieferung des benötigten Treibstoffes gesichert sein muss.

Die Variante „MS-Netz“ ist die technisch beste und betrieblich einfachste Lösung zur Reduktion der Spannungsschwankungen und der Spannungsabsenkungen am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher. Die Kosten für die Variante „MS-Netz“ liegen 21 % über denjenigen des gesteuerten Speichers mit einer Leistung von 30 kW und 7 % unterhalb der Kosten des gesteuerten Speichers mit einer Leistung von 50 kW.

5. SPEICHERTECHNOLOGIE

Der elektrische Energiespeicher ist ein wesentlicher Bestandteil des gesteuerten Speichers. Um den optimalen Speicher zu bestimmen, wurden verschiedene auf dem Markt erhältliche Speichertypen miteinander verglichen. Die zurzeit bestehenden Vor- und Nachteile der betrachteten Speicher mit unterschiedlichem Entwicklungsstand sind aus Tabelle 8 ersichtlich.

Speichertyp	Leistungsbereich	Autonomiezeit	Vorteile	Nachteile
Redox Flow Battery	5 kW bis 1 MW	1 Std. bis 24 Std.	<ul style="list-style-type: none"> - Leistung und Energie sind modular erweiterbar - hohe Lebensdauer bis 20 Jahren und geringe Wartung - Energiespeichermenge ist mit relativ kleinem Aufwand beliebig erweiterbar - sehr kleine Selbstentladung - Zyklenfest, d.h. mehr als 10'000 Lade-/Entladezyklen sind möglich - hoher Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> - DC-Spannung kleiner 100 V - neue Technologie - hohe Beschaffungskosten
Blei Akku	1 kW bis 50 kW	1 Min. bis 2 Std.	<ul style="list-style-type: none"> - Konventionelle Technik - geringe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> - kurze Lebensdauer, d.h. Erneuerung ist nach 5 bis 7 Jahren erforderlich - Aufwändige Wartung - keine Tiefentladung möglich
Supercap	5 W bis 100 kW	1 Sek. bis 1 Min.	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Lade- und Entladeströme - Zyklenfest 	<ul style="list-style-type: none"> - geringes Energiespeichervermögen
Flywheel	10 kW bis 500 kW	1 Sek. bis 5 Min.	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Lade- und Entladeströme - Zyklenfest - lange Lebensdauer 	<ul style="list-style-type: none"> - geringes Energiespeichervermögen - aufwändige Regelungselektronik

Tabelle 8: Vergleich verschiedener Speichertypen

Der Vergleich der Speichertechnologien zeigt, dass die Redox Flow Batterien für den gesteuerten Speicher der am besten geeignete elektrische Speicher sind. Bei ersten Anwendungen der gesteuerten Speicher werden allerdings vorerst Bleibatterien zum Einsatz kommen. Die Gründe dafür sind, dass:

- die zur Zeit mögliche maximale DC-Spannung der Redox Flow Batterien kleiner als 100 V ist,
- die Erhöhung dieser DC-Anschlussspannung mittels DC/DC-Wandler die Anlage verteuert und den Wirkungsgrad verschlechtert sowie
- eine Serieschaltung von mehreren Redox Flow Batterien ebenfalls zu teuer ist.

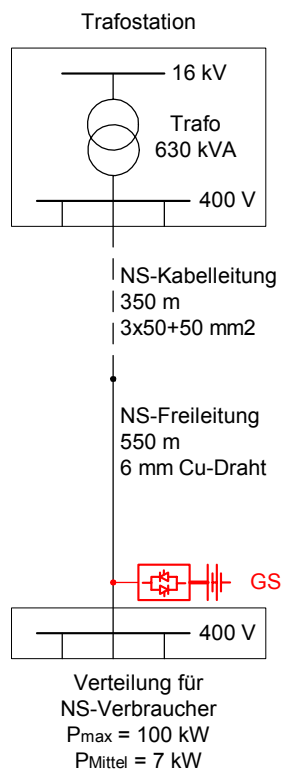
Die Entwicklung zu höheren DC-Spannungen von Redox Flow Batterien wird vorangetrieben. Die optimale DC-Anschlussspannung für einen Einsatz mit den gesteuerten Speichern liegt im Spannungsbereich über 300 V.

Weitere detaillierte Vergleiche von unterschiedlichen elektrischen Speichern sind auch im entsprechenden Bericht von GreenNet ersichtlich [4].

6. SIMULATIONEN EINER KONKRETEN ANWENDUNG

6.1. Aktuelle Situation der konkreten Anwendung

Für die Simulation einer konkreten Anwendung eines gesteuerten Speichers wird wiederum das Beispiel der abgelegenen Verbraucher bei gezogen (Abbildung 10). Der Gesteuerte Speicher (GS) wird am Ende der NS-Freileitung unmittelbar vor der Verteilung für die NS-Verbraucher angeschlossen (Abbildung 15).



Am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher wurde vom lokalen Verteilnetzbetreiber während zwei Wochen die Netzspannung gemessen und registriert (Abbildung 16 und Abbildung 17). Diese Messungen zeigen auf, dass abhängig von der Tageszeit, d.h. von der Belastung, Netzspannungen im Bereich zwischen 240 V und 175 V auftreten. Die Grenzwerte gemäss der Norm EN50160 werden somit nicht eingehalten.

Der gesteuerte Speicher ist eine Möglichkeit, die Qualität der Netzspannung am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher zu verbessern. Die von der HTI Biel mit DlgSILENT durchgeführte Simulation des Einsatzes eines gesteuerten Speichers wird im Folgenden erläutert.

Abbildung 15: Konkrete Anwendung für die Simulation des gesteuerten Speichers (GS)

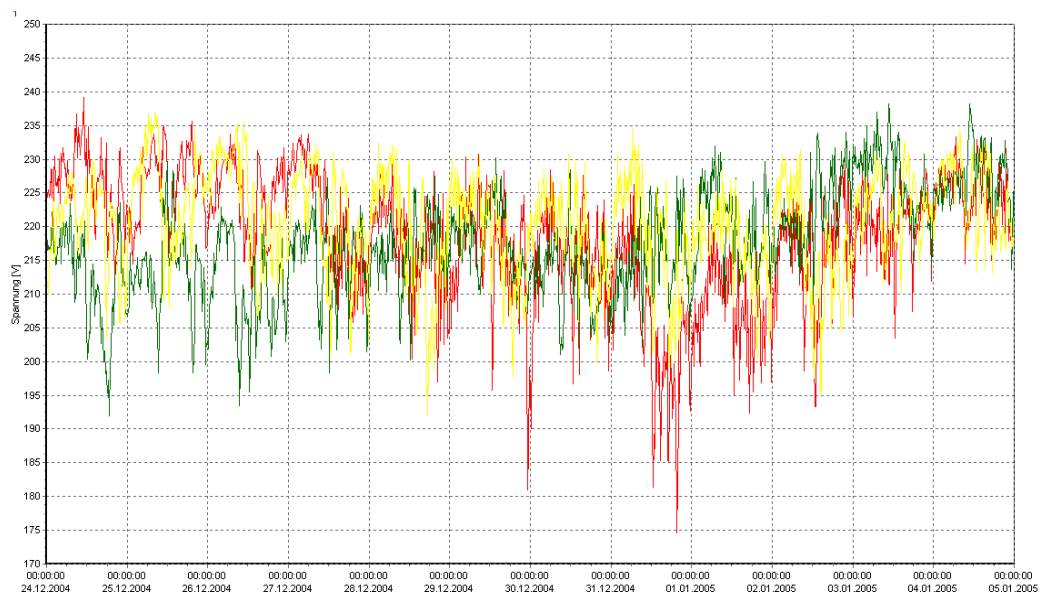


Abbildung 16: Gemessener Spannungsverlauf am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher in der Zeit vom 24.12.04 bis 5.01.05

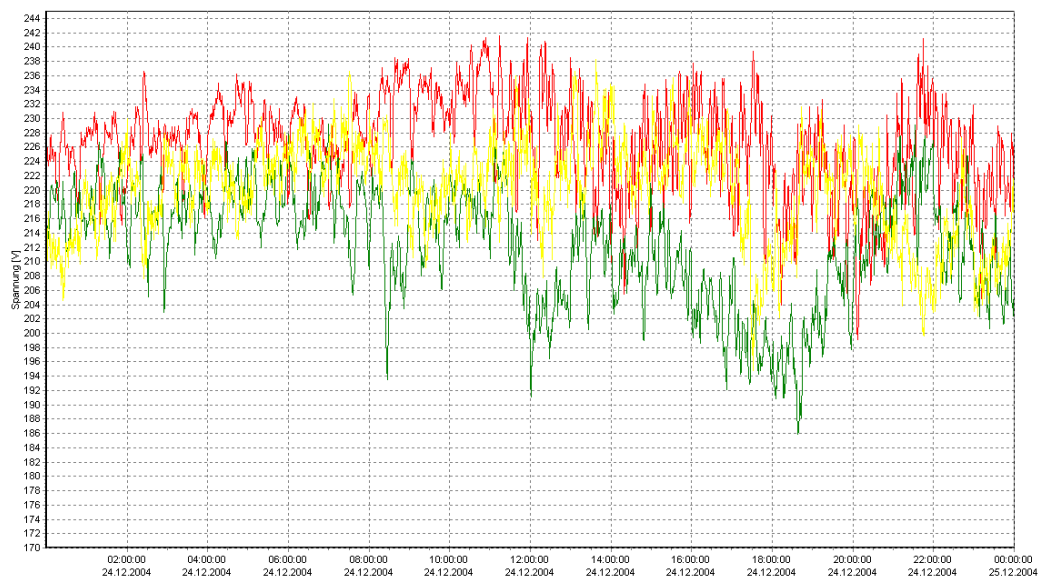


Abbildung 17: Gemessener Spannungsverlauf am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher vom 24.12.04

6.2. Aufbau der Simulation

Die NS-Leitung, die abgelegenen Verbraucher und der gesteuerte Speicher werden für die Simulation gemäss Abbildung 18 abgebildet.

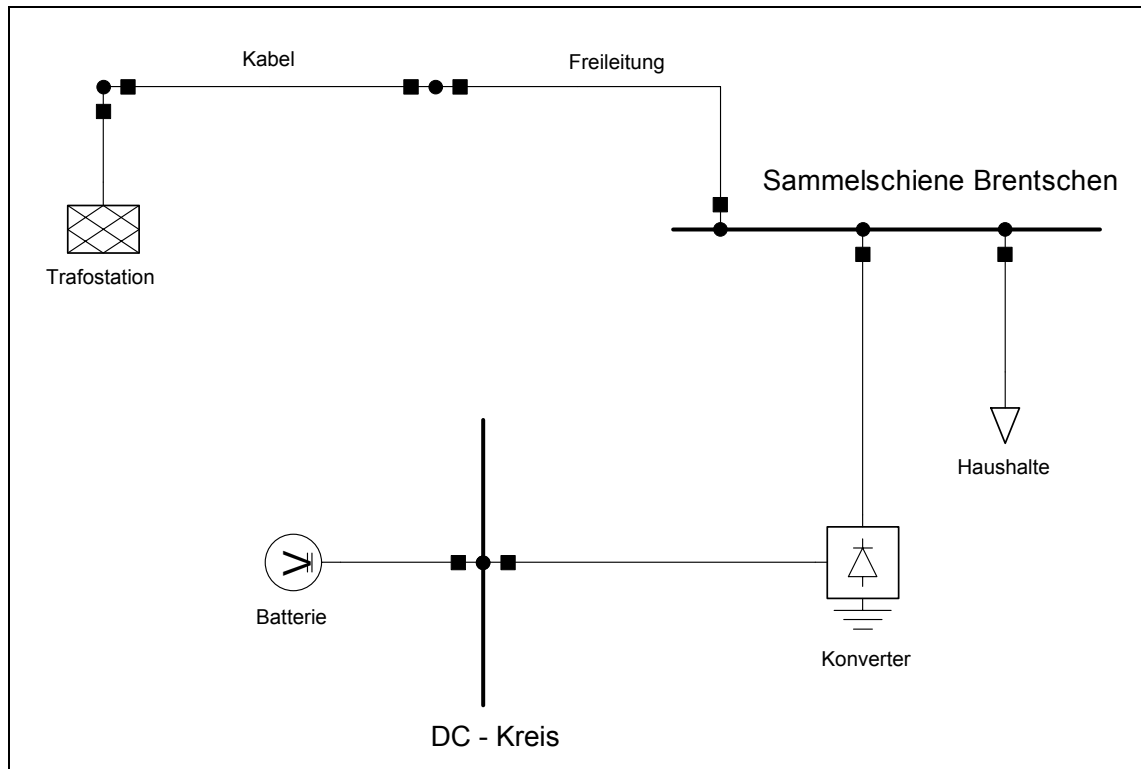


Abbildung 18: Aufbau der Simulation

Der PWM Konverter regelt die Spannung am Anschlusspunkt. Sobald die Spannung absinkt wird die ab den Batterien ins Netz eingespeiste Leistung innerhalb der vorgegebenen Grenzen des gesteuerten Speichers erhöht, so dass die Spannung wieder auf den Sollwert stabilisiert.

6.3. Regelung

Abbildung 19 zeigt als Übersicht das Composite Model, welches den Aufbau der Regelung darstellt. Für die Regelung ist der PQ-Kontroller zuständig. Er übernimmt die Steuerung des Konverters (DIgSILENT-Modul), indem er zwei Sollwerte (i_{d_ref} und i_{q_ref}) in der d/q-Ebene für den Kontroller erzeugt, wodurch die Regelung blind- und wirkstromabhängig wird. Die vier Blöcke auf der linken Seite des Schemas dienen der Datenerfassung und Datenübergabe. Die Grössen P_{in} , Q_{in} und u werden in den Blöcken PQ_Measurement und Voltage P_{CC} gemessen. Dies sind Standardfunktionen des Simulationsprogrammes DIgSILENT. Die Messung erfolgt an der „Sammelschiene Brentschen“, d.h. am Anschlusspunkt der abgelegenen Verbraucher. Der Block PLL dient der Messung der Phasenlage und wird zur Überwachung benötigt. In den Kontrollermodulen werden die Abweichungen der Messwerte von internen Referenzwerten gebildet und aufintegriert. Die Sollwertabweichungen werden wiederum in die Regelung zurückgeführt.

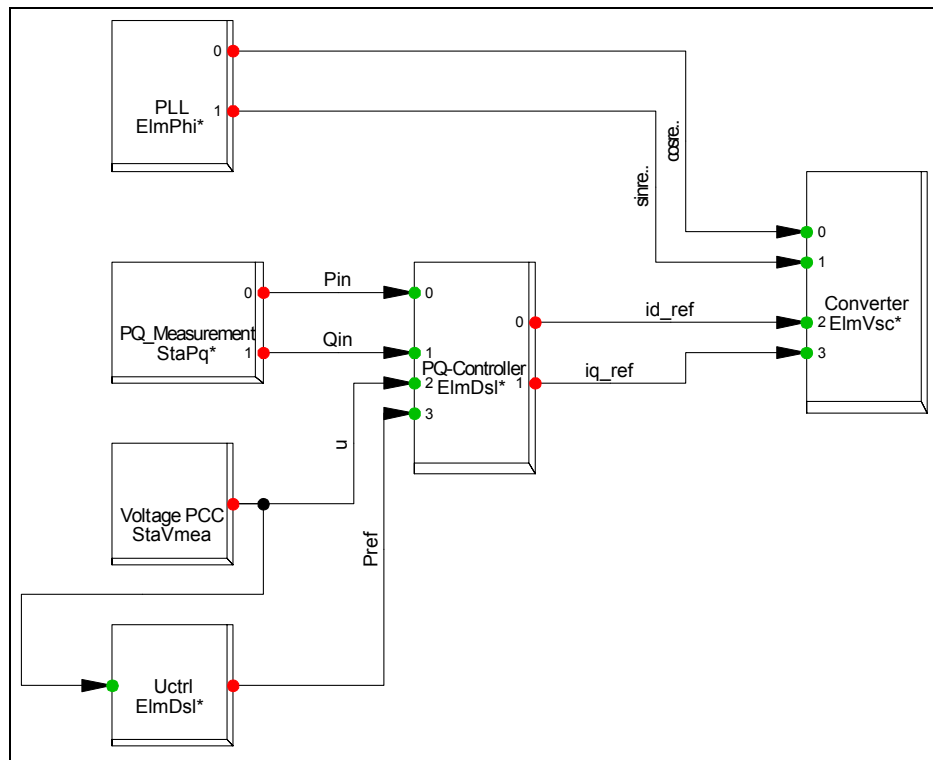


Abbildung 19: Das gesamte Modell in der Übersicht

6.3. Simulationsresultate

Bei einer Last von 60 kW wurde bei Betrieb ohne gesteuertem Speicher eine minimale Spannung von 170 V berechnet. Dies entspricht einem Spannungseinbruch von 27% und entspricht auch den Messreihen des Verteilnetzbetreibers.

Für die Simulationen zur Verbesserung der Netzqualität wurden gesteuerte Speicher mit einer Leistung von 30 kW und einer Leistung von 50 kW eingesetzt. Dabei resultierten folgende Verbesserungen der Netzspannung, wenn Wirkleistung resp. Wirk- und Blindleistung eingespeist werden.

- Mit einem 30 kW Umrichter und reiner Wirkleistungseinspeisung kann der Spannungseinbruch auf 12% reduziert werden.
- Mit einem 30 kVA Umrichter und Wirk- und Blindleistungseinspeisung (30 kVA, $\cos \varphi = 0.7$) kann der Spannungsabfall auf 14 % reduziert werden.
- Mit einem 50 kW Umrichter und reiner Wirkleistungseinspeisung kann der Spannungseinbruch auf 5 % reduziert werden.
- Mit einem 50 kVA Umrichter und Wirk- und Blindleistungseinspeisung (50 kVA, $\cos \varphi = 0.7$) kann der Spannungsabfall auf 8 % reduziert werden.

Die Netzseitigen Phasenströme des gesteuerten Speichers betragen 43 A beim 30 kW Umrichter, resp. 76 A beim 50 kW Umrichter.

Die Funktionsweise zur Spannungsregulierung des simulierten gesteuerten Speichers ist aus Abbildung 20 ersichtlich. Dabei wird ausgehend von einer Grundlast von 20 kW und $\cos \varphi = 0.95$ eine Last von 10 kW mit $\cos \varphi = 0.95$ zugeschaltet. Der gesteuerte Speicher regelt den Spannungseinbruch innerhalb von 2 Sekunden aus.

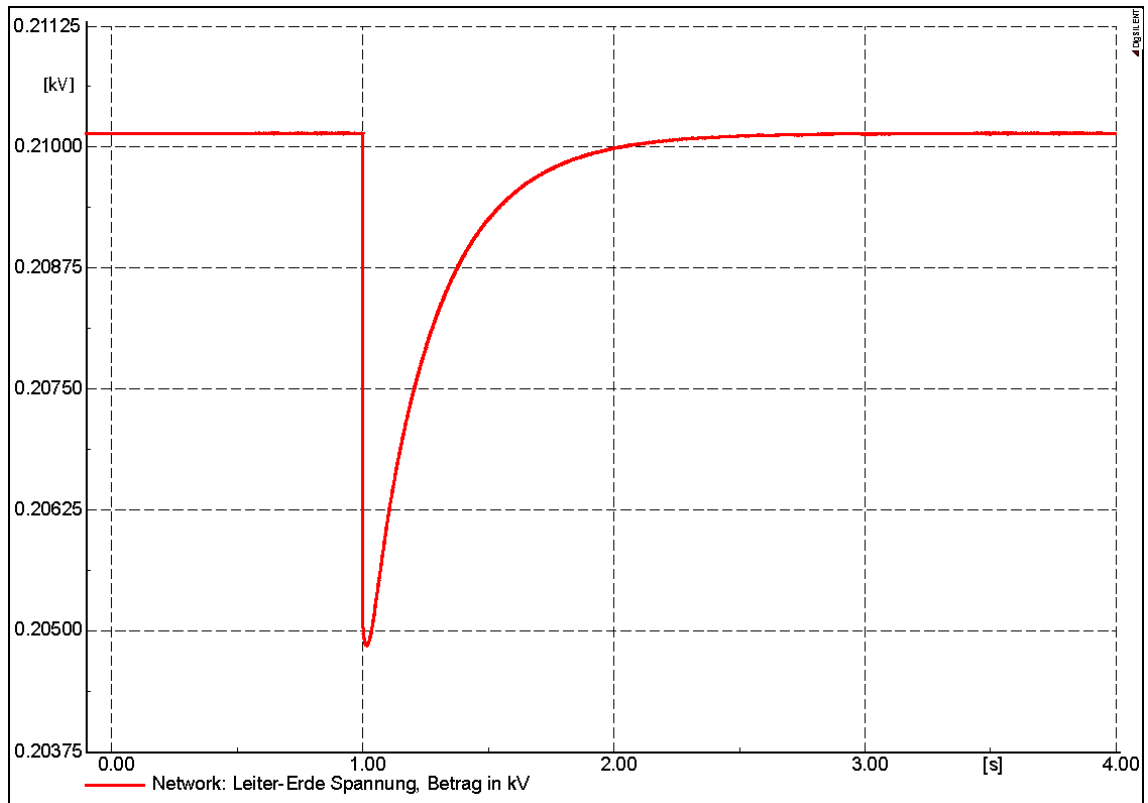


Abbildung 20: Simulierter Spannungsverlauf am Anschlusspunkt des gesteuerten Speichers

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Ausregelung ist unabhängig von der Leistung des gesteuerten Speichers. Die Wahl der Leistung ist abhängig von der Verbrauchsleistung. Für die konkrete Anwendung der abgelegenen Verbraucher ist eine Leistung von 50 kVA erforderlich um bei einer Last der Verbraucher von 60 kW die Netzspannung innerhalb von $\pm 10\%$ der Nennspannung ausregeln zu können.

Soll die Ausregelzeit verbessert werden, so ist der gesteuerte Speicher mit zusätzlichen Kondensatoren zu bestücken, d.h. parallel zur Batterie müssen Kondensatoren geschaltet werden, die die benötigte Leistung schneller als die Batterie abgeben können.

6.4. Einfluss der Kondensatoren

Die Grösse der benötigten Kondensatoren ist abhängig von der Zeit die das System benötigt um die geforderte Leistung bereit zu stellen, sowie von der Höhe der Leistungssprünge.

Die benötigte Energie für eine kürzere Ausregelzeit ist aus Abbildung 21 ersichtlich. Die blau ausgefüllte Fläche ist proportional zur Energiemenge. (Grundlast 20 kW $\cos \varphi = 0.95$, Lastzuschaltung 10 kW $\cos \varphi = 0.95$, 1 Sekunde Regelzeit).

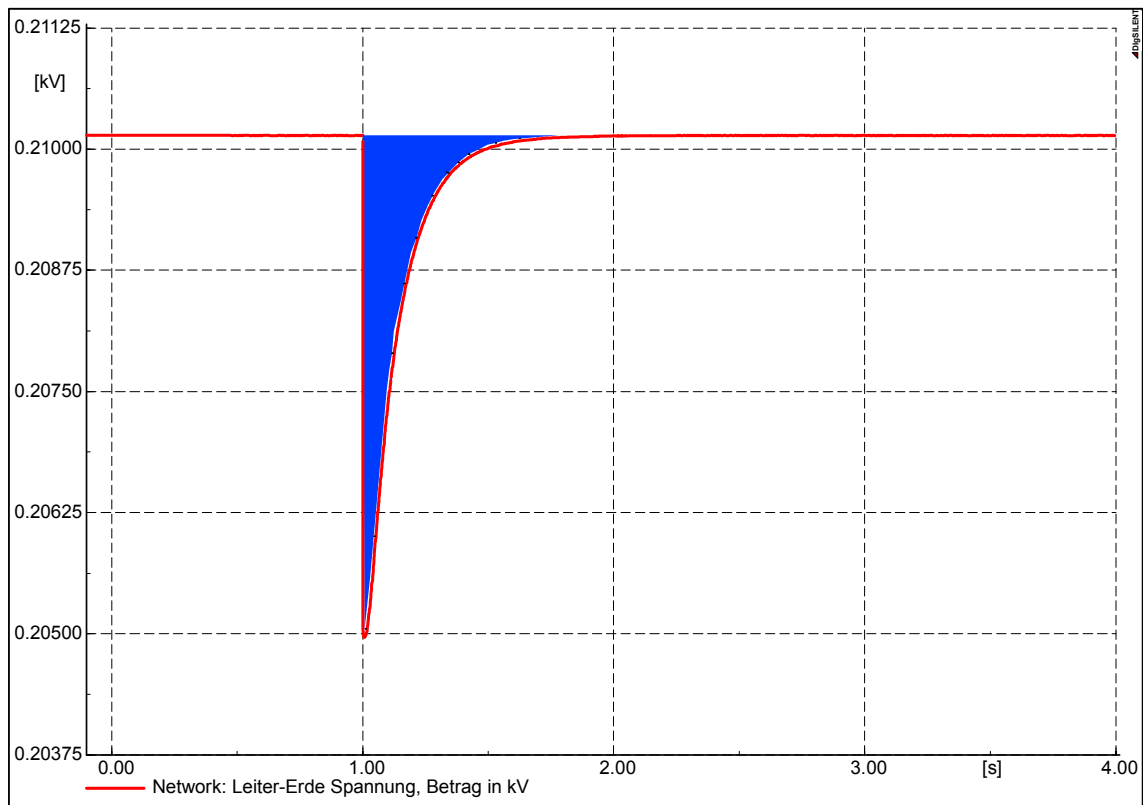


Abbildung 21: Benötigte Kapazität

Mit zusätzlichen Kapazitäten kann der Spannungseinbruch reduziert oder fast aufgehoben werden. Dabei muss grundsätzlich festgelegt werden, wie weit die Zeit des Spannungseinbruches reduziert werden muss. Es stellt sich dabei die Frage, reicht eine Ausregelzeit von 100 ms aus, muss diese kürzer sein, z.B. 10 ms oder kann die Ausregelzeit sogar 4 Sekunden betragen. Die entsprechenden Simulationsverläufe sind aus Anhang 1 ersichtlich.

6.5. Auswirkungen des gesteuerten Speichers

Die Auswirkungen des gesteuerten Speichers bei der konkreten Anwendung der abgelegenen Verbraucher ist in Abbildung 22 aufgezeigt. Es handelt sich dabei um einen 48 Minuten langen Ausschnitt aus der Messung des Verteilnetzbetreibers vom 24.12.2004 (Abbildung 17). Die rote, untere Kurve zeigt jeweils den gemessenen Spannungsverlauf, die blaue, obere Kurve den Verlauf mit einem gesteuerten Speicher mit 10 ms Reaktionszeit am Anschlusspunkt der Verbraucher. Abbildung 23 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt aus der Simulation zu einem Zeitpunkt (120s), an welchem ein Lastsprung und somit ein Spannungsrückgang erfolgt. Dieser hohe Spannungssprung ΔU wird durch die

Auflösung der Messdaten von einem Messwert pro Minute hervorgerufen und tritt bei einem realen kontinuierlichen Verlauf mit diesem Gradienten im Netz nicht auf. Es ist also zu erwarten, dass durch den Einsatz des Speichers im realen Netz auch kurzzeitige Spannungsänderungen stark reduziert werden.

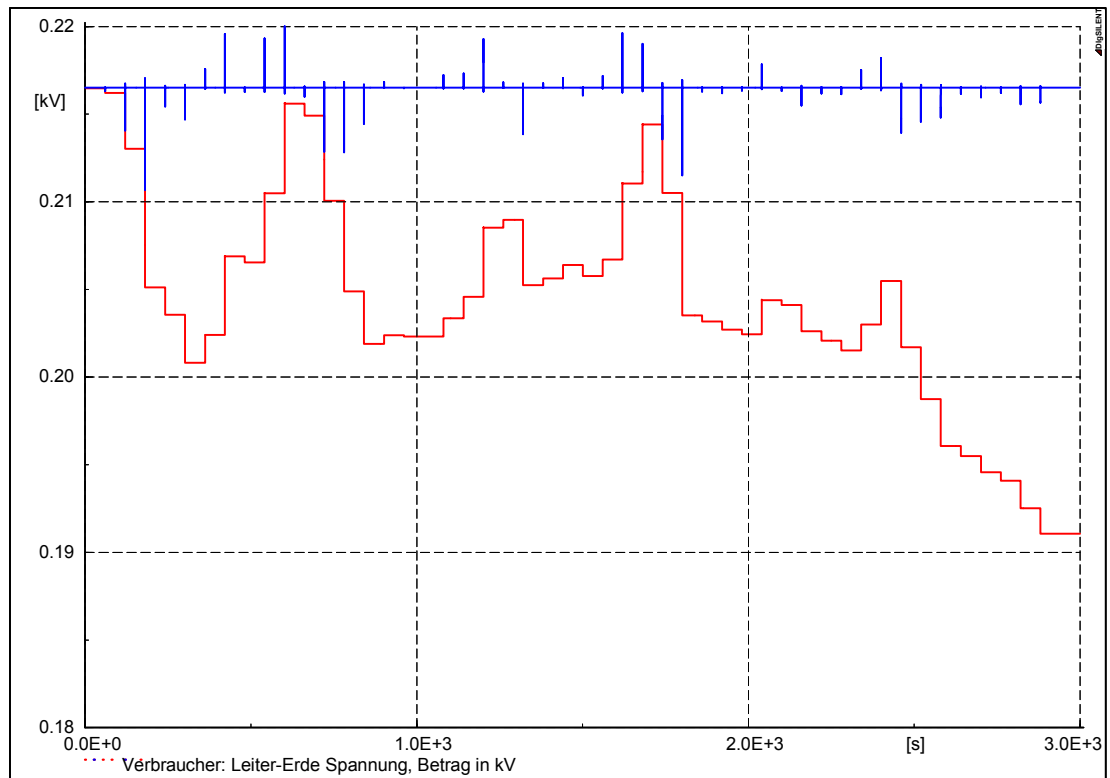


Abbildung 22: Spannungsverlauf mit (blaue obere Kurve, 50kW) und ohne gesteuerten Speicher (rote untere Kurve)

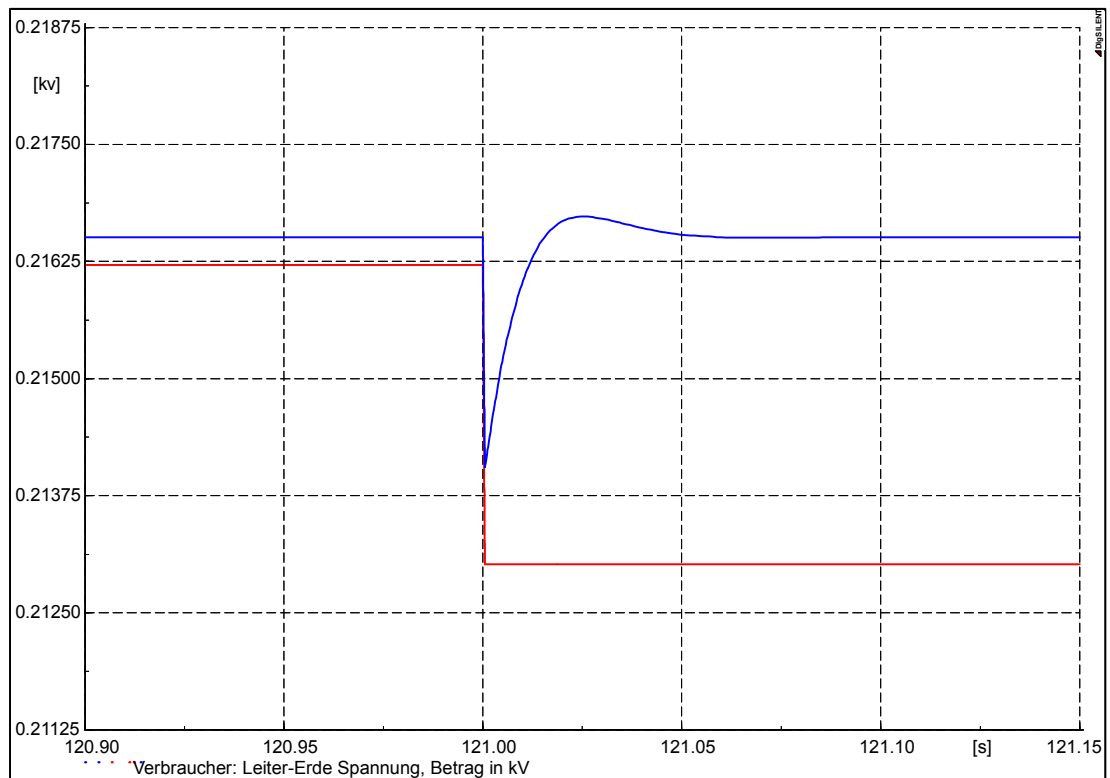


Abbildung 23: Vergrößerung des Spannungsverlaufes

Abbildung 24 zeigt den Verlauf des Speicherinhaltes in kWh. Simuliert wurde dabei ein elektrischer Speicher mit einem Energieinhalt von 30 kWh. Zu Beginn ist der Speicher halbvoll. Der Speicherinhalt sinkt während der simulierten 48 Minuten auf fast 25% ab.

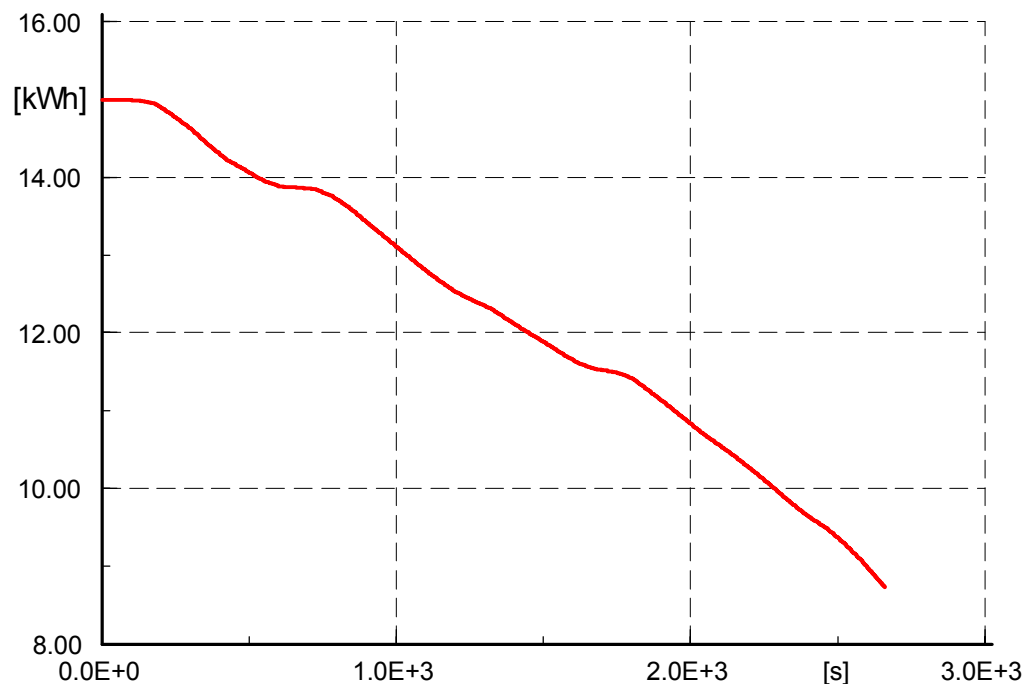


Abbildung 24: Verlauf des Speicherinhaltes (in kWh)

Zur besseren Darstellung der Wirkungsweise des Speichers, wurde für die folgenden Abbildungen der Lastverlauf dahingehend modifiziert, dass die Netzspannung zeitweise über der Sollspannung liegt und somit der Speicher während dieser Zeit geladen wird. Abbildung 25 zeigt den Verlauf mit (blaue, obere Kurve) und ohne (rote, untere Kurve) gesteuerten Speicher. Der Verlauf der Spannung geht zwischenzeitlich auch über die „Stabilisierungsspannung“ hinaus. Abbildung 26 zeigt den zugehörigen Verlauf des Speicherinhaltes mit dem modifizierten Lastverlauf.

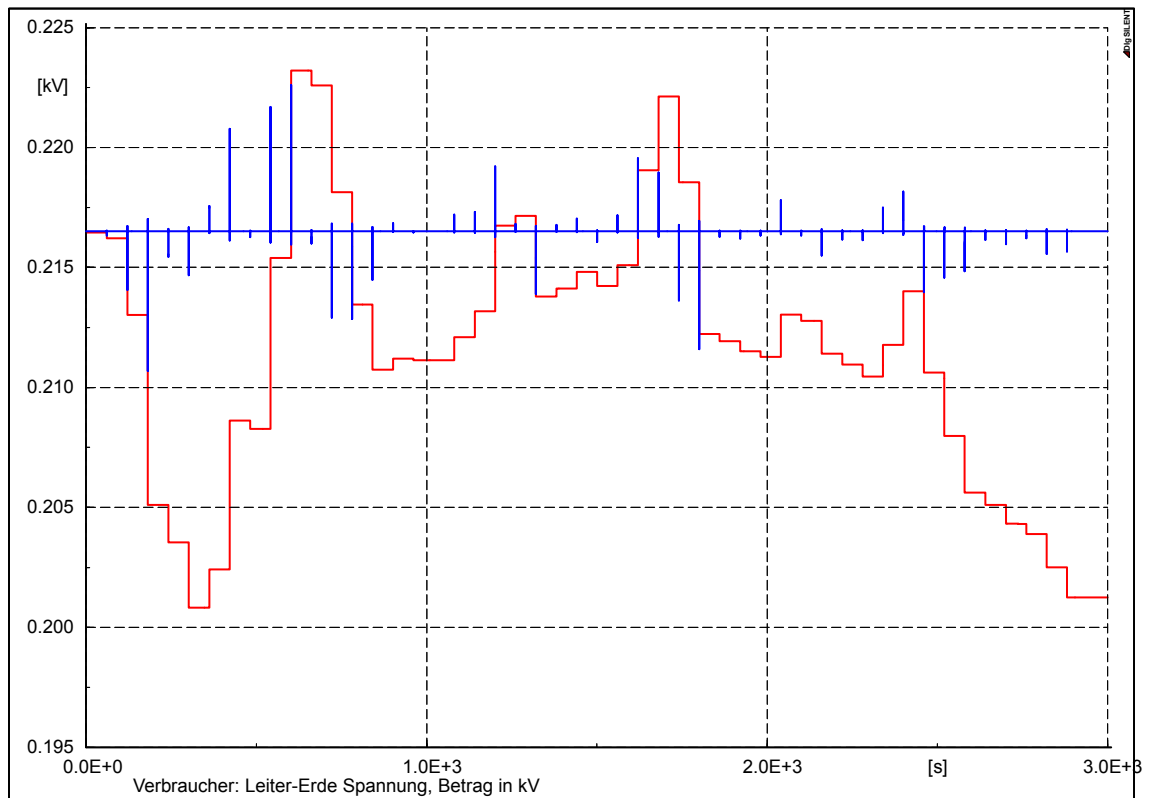


Abbildung 25: Modifizierter Spannungsverlauf

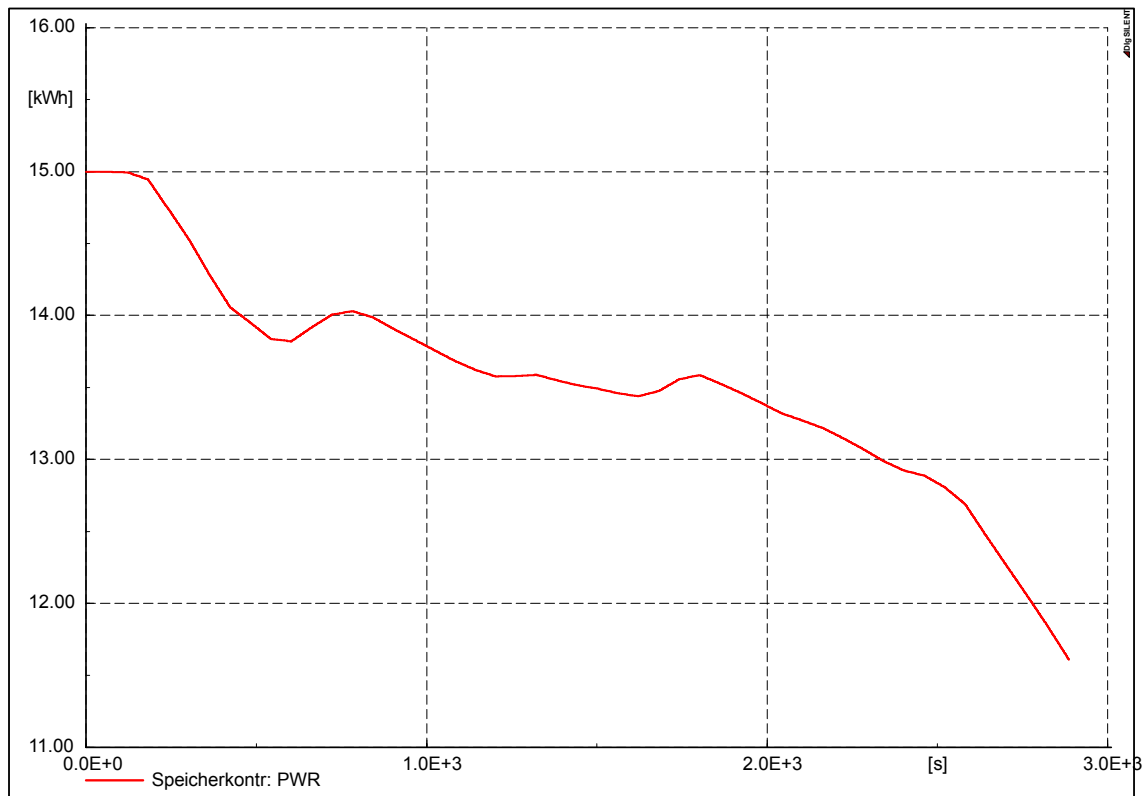


Abbildung 26: Resultierender Verlauf des Speicherinhaltes mit dem modifizierten Spannungsverlauf

6.6. Fazit aus den Simulationen

Die Simulationen haben gezeigt, dass der Einsatz eines gesteuerten Speichers mit einer Leistung von 50 kW ideal aber nicht zwingend notwendig für die Verbesserung der Spannungsqualität ist. Bereits der kleinere Speicher mit einer Leistung von 30 kW kann in diesem konkreten Fall die Spannungshaltung zufrieden stellend verbessern.

Ähnlich verhält es sich mit den Kondensatoren. Sie sind nicht zwingend notwendig. Die kurzen Spannungseinbrüche können zwar mit der Batterie nicht vollständig abgedeckt werden. Die maximal zulässige Dauer der Spannungseinbrüche bestimmt die Leistung der zusätzlichen Kondensatoren. Im Sekunden- und Minutenbereich können Spannungsschwankungen ohne zusätzliche Kondensatoren ausgeglichen werden, weil die Dynamik des Speichers sicherlich hierfür ausreichend ist. Erst wenn die Ausregelzeit wesentlich kleiner als 1 Sekunde sein muss, müssen in Ergänzung zu den Batterien zusätzliche Kondensatoren eingesetzt werden. Dies hängt stark von der eingesetzten Speichertechnologie ab und ist separat zu untersuchen.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Von den möglichen Anwendungen des gesteuerten Speichers wurde die Regulierung der Netzspannung im Detail mittels Simulationen untersucht. Daraus geht hervor, dass die Reduktion von Spannungsabsenkungen von der Leistung des gesteuerten Speichers abhängig ist. Die Reaktionszeit zur Ausregelung von Spannungseinbrüchen hingegen ist abhängig von der Zeit bis die gespeicherte elektrische Energie bereitgestellt werden kann, d.h. von der Art der Batterien und allenfalls parallel dazu geschalteten Kondensatoren. Je schneller die Batterien die benötigte Leistung abgeben können, desto geringer muss für eine geforderte Reaktionszeit die installierte Kondensatorleistung sein.

Die Alternativen zum gesteuerten Speicher wie Notstromanlagen, USV-Anlagen und Leitungsausbauten oder die Energieübertragung über das Mittelspannungsnetz konkurrenzieren den gesteuerten Speicher sehr stark. So wird ein Verteilnetzbetreiber abgelegene Verbraucher über das Mittelspannungsnetz mit einer zusätzlichen Transformatorenstation versorgen, bevor er einen gesteuerten Speicher einsetzt, der im Vergleich zur MS-Leitung und der Trafostation bei grossen Leistungen teurer ist und zudem auch mehr Unterhalt erfordert.

Eine optimale Anwendung des gesteuerten Speichers ergibt sich in Inselnetzen im Zusammenhang mit dezentralen Energieerzeugern, die mit Solarenergie, Windenergie oder weiteren erneuerbaren Energien betrieben werden. Dabei dient der gesteuerte Speicher als Puffer um überschüssig produzierte elektrische Energie aufzunehmen und bei Bedarf fehlende Energie ins Inselnetz einzuspeisen.

Mit dem gesteuerten Speicher kann der Lastfluss im NS-Netz so beeinflusst werden, dass Überlasten vermieden und eine ausgeglichene Netzbelastung erreicht wird. Diese Funktionalität des gesteuerten Speichers ist vor allem in NS-Netzen mit mehreren dezentralen Energieerzeugungsanlagen interessant.

Gesteuerte Speicher können zudem zur Verbesserung der Netzqualität eingesetzt werden. Abhängig von der Art der Aufschaltung auf das NS-Netz kann die Spannungsqualität für die Verbraucher verbessert, die durch die Verbraucher erzeugten Netzzrückwirkungen im NS-Netz reduziert oder auf das Spannungsprofil im NS-Netz eingewirkt werden.

Eine weitere für den gesteuerten Speicher gut geeignete Anwendung ergibt sich zusammen mit wärmegeführten Eigenerzeugungsanlagen oder zur Steuerung des Strombezuges aus dem Verteilnetz. Diese Anwendungen des gesteuerten Speichers sind vor allem im liberalisierten Strommarkt interessant, wenn ein Grossverbraucher bestrebt ist, sein prognostiziertes Lastverhalten möglichst genau einzuhalten um die Beschaffung von Ausgleichsenergie zu vermeiden.

8. AUSBLICK

Im Rahmen des Projektes „Verteilte Einspeisungen im Niederspannungsnetz“ (VEiN) ist vorgesehen, zusätzlich zu den dezentralen Energieerzeugungsanlagen auch gesteuerte Speicher einzusetzen. Im Rahmen des Projektes VEiN werden die Einsatzmöglichkeiten vorerst mittels Simulationen analysiert, um in späteren Projektphasen die Anwendung des gesteuerten Speichers im Netzparallelbetrieb wie auch im Inselbetrieb zu erproben.

Die zurzeit noch bestehenden technischen Nachteile der Redox Flow Batterien, d.h. zu tiefe DC-Spannung haben RPEnergy veranlasst, die Entwicklung des gesteuerten Speichers zurückzustellen. Sobald die Entwicklung der Redox Flow Batterien, oder eines entsprechenden alternativen und preisgünstigen elektrischen Energiespeichers jedoch soweit fortgeschritten ist, dass die Batteriespannung im benötigten Spannungsbereich liegt, wird die Entwicklung des gesteuerten Speichers von RPEnergy wieder aufgenommen, um das Produkt auf den Markt bringen zu können.

LITERATUR UND QUELLEN

- [1] Zunahme der dezentralen Energieerzeugungsanlagen in elektrischen Verteilnetzen;
Dr. G. Schnyder, P. Mauchle, Prof. M. Höckel, P. Lüchinger, Dr. O. Fritz, C. Häderli,
E. Jaggy;
Bundesamt für Energie, Schlussbericht Dezember 2003,
www.electricity-research.ch
- [2] Parallelschaltung von Niederspannungs-Energieerzeugungsanlagen mit Stromver-
sorgungsnetzen;
Eidgenössisches Starkstrominspektorat, STI Nr. 219.1081 d/f;
Oktober 1981,
- [3] Zuverlässigkeit von Sicherheitsschaltungen gegen Inselbildung;
Dr. Markus Real, Alpha Real;
Bundesamt für Energie, Schlussbericht 1999,
www.electricity-research.ch
- [4] Cost and Technical Opportunities for Electricity Storage Technologies;
Work Package 3;
IT Power Ltd, July 2004, ITP/788 GreenNet,
www.greenet.at

ANHÄNGE

Anhang 1: Simulationsverläufe

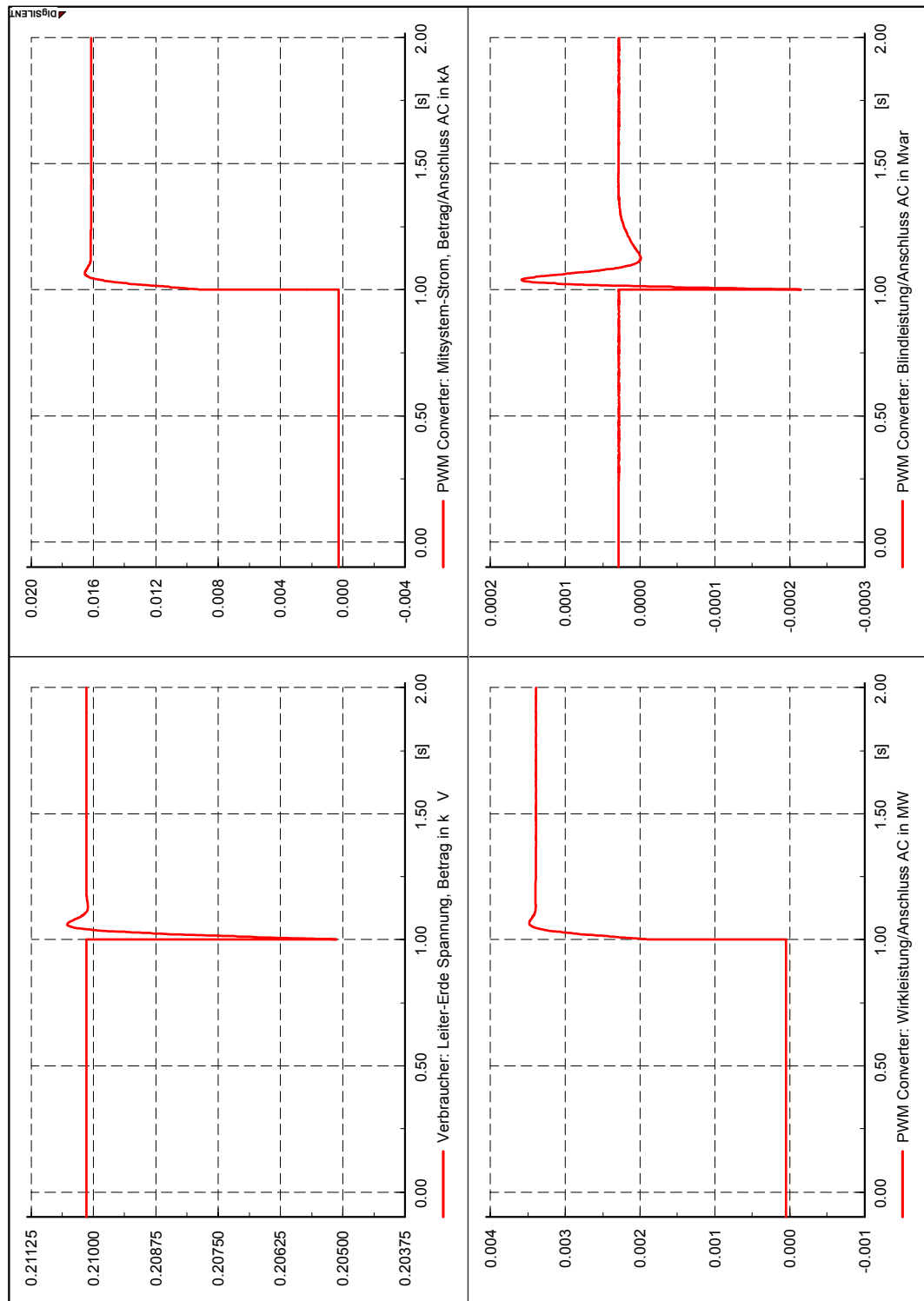


Abbildung 27: Grundlast 20 kW $\cos \varphi = 0.95$, Lastzuschaltung 10kW $\cos \varphi = 0.95$, 0.1 Sekunden Regelzeit

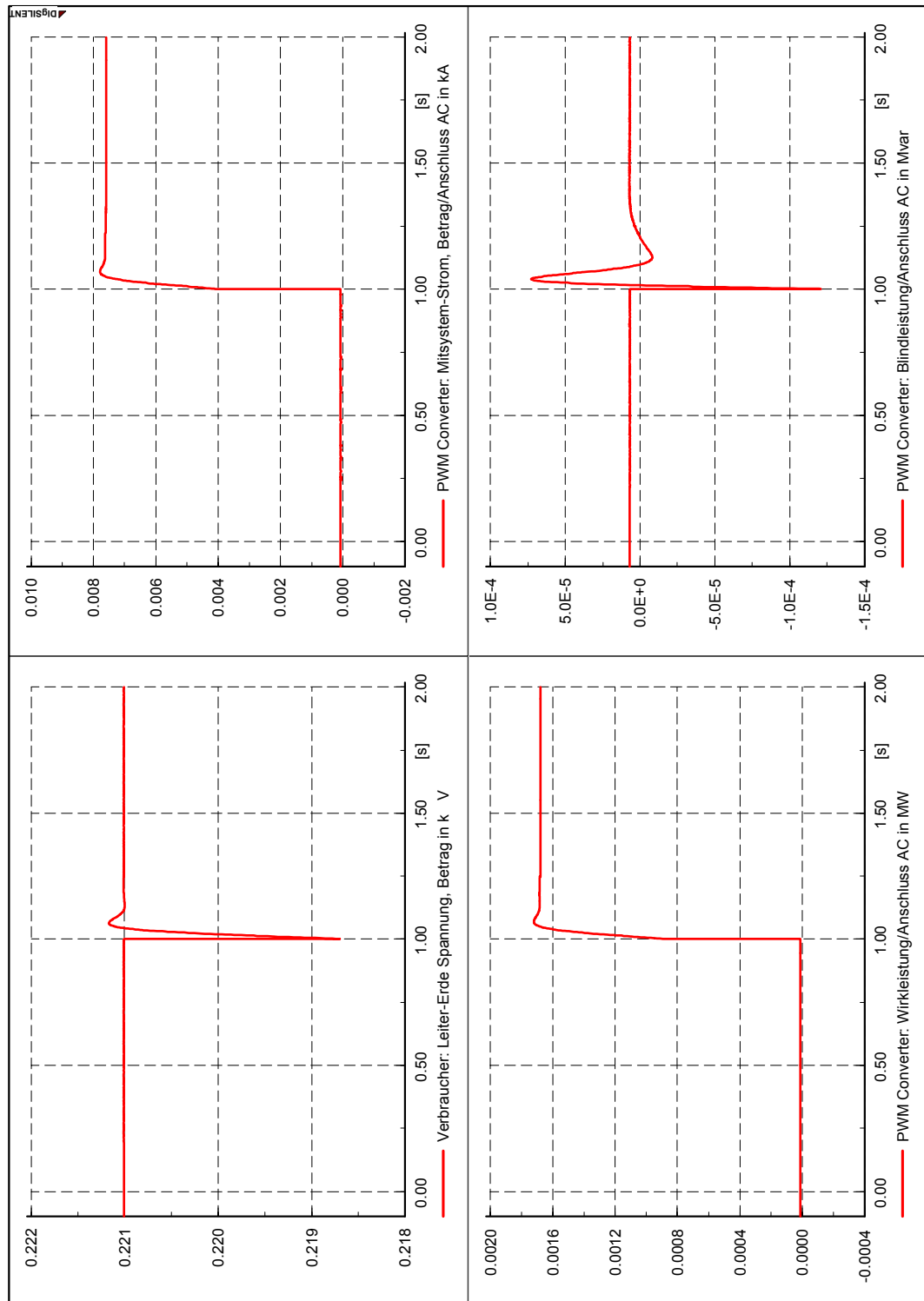


Abbildung 28: Grundlast 10 kW $\cos \varphi = 0.95$, Lastzuschaltung 5kW $\cos \varphi = 0.95$, 0.1 Sekunden Regelzeit

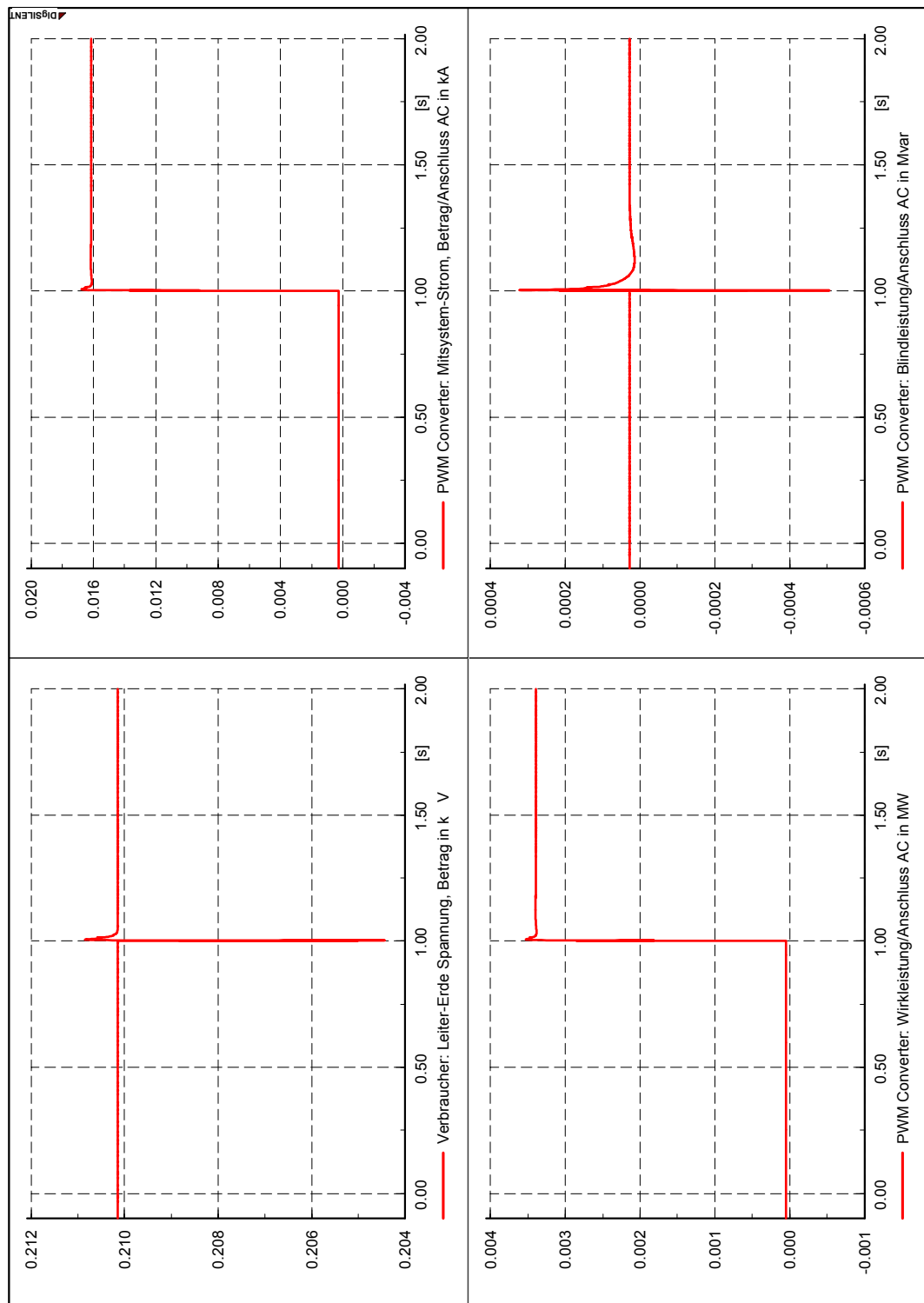


Abbildung 29: Grundlast 20 kW $\cos \varphi = 0.95$, Lastzuschaltung 10 kW $\cos \varphi = 0.95$, 0.01 Sekunden Regelzeit

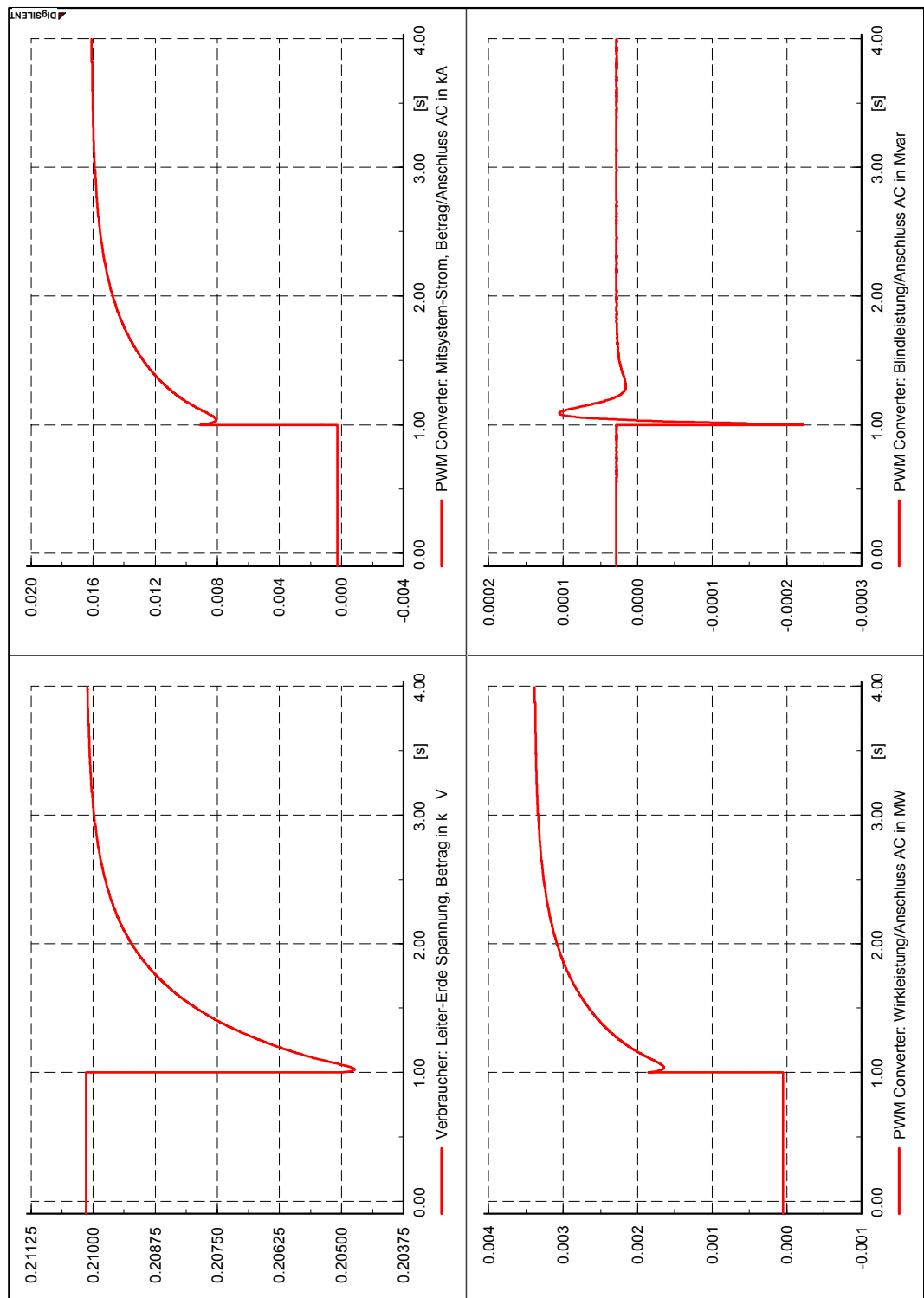


Abbildung 30: Grundlast 20 kW $\cos \varphi = 0.95$, Lastzuschaltung 10 kW $\cos \varphi = 0.95$, 4 Sekunden Regelzeit