

# Druckgasspeicher als Alternative zur Bleibatterie

Dr. Frank Täubner  
rosseta Technik GmbH

Vortrag auf der enerotec, Internationale Fachmesse für Energie, Leipzig, 10.03.2005

## 1. Freude und Ärger mit Bleibatterien

Die bisher einzigen weitverbreiteten Speicher für elektrische Energie sind die Blei-Säure-Akkumulatoren. Sie finden überall dort Anwendung, wo eine Sicherheit vor Stromausfall benötigt wird. In Krankenhäusern, Flugplätzen, Kraftwerken und bei anderen für Stromausfall empfindlichen Verbrauchern werden mit Bleibatterien unterbrechungsfreie Stromversorgungen aufgebaut. In Fahrzeugen sind Batterien als einfache transportable Energiequelle eingesetzt. Jeder Autofahrer hat eine Starterbatterie im Fahrzeug und weiß daher, dass die Lebensdauer seiner Batterie selten größer als fünf Jahre ist und dass im Winter bei starkem Frost die Batterie ziemlich schwach werden kann.

Eine etwas andere Anwendung der Bleibatterie ist ihre Nutzung als Energiespeicher in autarken Stromversorgungsanlagen, meist mit Solarzellen. Solche Anlagen sind in Deutschland kaum sinnvoll, da zum einen das Stromnetz normaler Weise überall vorhanden ist und zum anderen die Ausbeute aus den Solarzellen im Winter, gerade wenn viel elektrische Energie benötigt wird, auf einen sehr geringen Wert zusammenschrumpft.

In vielen Ländern Asiens, Afrikas und Mittelamerikas gibt es genug Sonne über das ganze Jahr und die Kosten zur Erschließung der dörflichen Regionen durch ein Stromversorgungsnetz sind meist unbezahlbar. Hier gibt es einen hohen Bedarf an solchen autarken Stromversorgungsanlagen.

Solarbatterie-Anlage	
4 Stück DETA-Solarbatterie	105 Ah, 12 V
nutzbare Energie	2.500 Wh
Gewicht	100 kg
Abmessungen	353 x 700 x 190 mm <sup>3</sup>
Preis	596 €
Lebensdauer	700 Ladezyklen 2 Jahre

Tabelle 1: Daten einer Batterieanlage für den Einsatz in einer netzunabhängigen Stromversorgung mit Solarzellen [ 1 ]

Im Gegensatz zu den oben genannten Anwendungen bekommt die Batterie nun richtig was zu tun. Innerhalb des Tagesverlaufs wird sie voll aufgeladen und am Abend bzw. in der Nacht

wieder tief entladen. Durch diese tägliche Beanspruchung verbunden mit den hohen Temperaturen in den betreffenden Ländern reduziert sich die Lebensdauer der Bleiakumulatoren in Solaranlagen auf zwei Jahre.

Für uns Mitteleuropäer ist das auch nicht weiter aufregend. Man kann die alten Batterien irgendwo abgeben und neu kaufen. In einem entlegenen Dorf sieht das aber anders aus. Es kostet Zeit und Geld die Batterien zu erneuern. Der Transport muss organisiert werden und für den Einbau benötigt man einen Spezialisten von weit her. Der Rücktransport der verbrauchten Bleibatterien entfällt. Nach einigen Jahren haben die Leute dort neben der Solaranlage einen richtigen Batteriefriedhof. So ist vielleicht zu verstehen, dass manche Bleibatterien hassen können.

Vorteile	Nachteile
geringer Preis	zu kurze Lebensdauer
hohe Energiedichte	reduzierte Leistung bei tiefen Temperaturen
Standarderzeugnis	Entlüftung erforderlich (es kann H <sub>2</sub> entstehen)

Tabelle 2: Vor- und Nachteile von Bleiakumulatoren

## 2. Die Idee vom Druckgasspeicher

Wir stellten uns die Frage, gibt es eine Alternative? Tatsächlich stellte Herr Cyphelly aus der Schweiz auf der VDI-Tagung Energiespeicher 2002 eine bisher wenig beachtete Möglichkeit durch Druckgasspeicherung vor [ 2 ]. Das Konzept ist zunächst ganz einfach. Herr Cyphelly schlägt vor, die üblichen Stahldruckflaschen als Druckbehälter zu nutzen. Durch eine Hydraulikpumpe wird Öl aus einem Vorratsbehälter in die Flaschen gepumpt und der dort vorhandene Stickstoff komprimiert. Sofern die Energie wieder benötigt wird, kann der Stickstoffdruck die Hydraulikeinheit antreiben, die dann über einen Generator mit Hilfe einer Elektronik die Energie bereitstellt.

Auf Basis dieser Idee baute Frau Olm in unserem Unternehmen eine einfache Versuchsanlage auf, um zunächst das Prinzip zu erproben [ 3 ]. Die Bestandteile der Anlage sind folgende:

- 1 – Hydraulikpumpe (Es wurden eine preiswerte Zahnradpumpe und eine Axialkolbenpumpe erprobt.)
- 2 – Magnetventil
- 3 – Leistungselektronik (bestehend aus zwei bereits vorhandenen Wechselrichtern.)
- 4 – Motorgenerator (Wir verwendeten einen herkömmlichen Elektromotor mit mäßigem Wirkungsgrad.)
- 5 – Stahldruckbehälter (Wir arbeiteten zunächst nur mit einem Behälter.)
- 6 – Stickstofffüllung (Es wurden Drücke bis 250 bar untersucht.)
- 7 – Hydrauliköl
- 8 – Vorratsbehälter (in Form eines Rohres, damit der Füllstand einfach bestimmt werden konnte.)

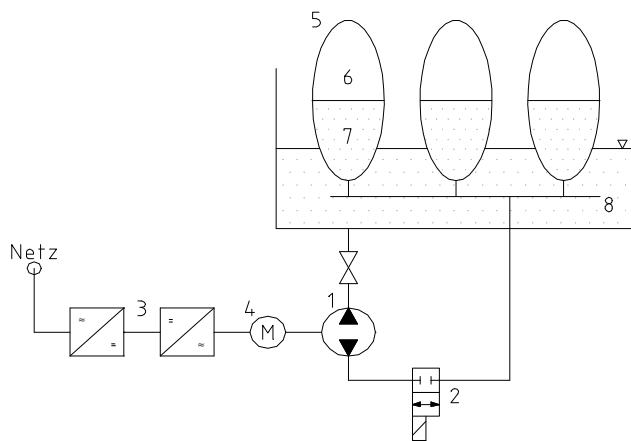


Abbildung 1 : Schema der Versuchsanlage Energiespeicherung durch Druckgas

In der Abbildung 2 ist diese Anlage zu sehen. Zwischen der Axialkolbenpumpe und dem Motor ist ein Messgerät zur Bestimmung des Drehmomentes zu erkennen. Das benötigen wir, um den Wirkungsgrad der Pumpe allein messen zu können. Die Leistungselektronik befindet sich hinter der Wand und ist mit einer Messtechnik zur Bestimmung der Leistung und der Energie ausgerüstet. Rechts auf dem Boden befindet sich eine SPS, die wir zur Messdatenerfassung benutzen.

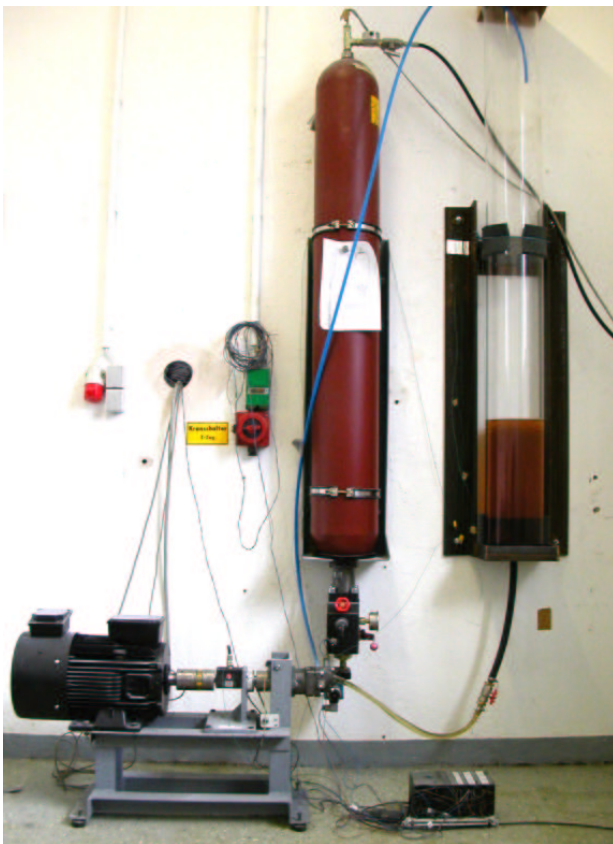


Abbildung 2 : Versuchsanlage der rosseta Technik GmbH

Zunächst wollten wir wissen, ob das vorgeschlagene Prinzip überhaupt realistisch ist. Die Praktiker der Druckspeicher warnten uns, dass der Wirkungsgrad kaum über 20 % liegen wird. Die beschriebene Anlage wurde also benutzt, um den Stickstoff mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu komprimieren bzw. zu entspannen. Die Temperatur des Gases wurde gemessen. Es wurde ein Modell aufgestellt, das die Wärmekapazität des Hydrauliköls und des Metalldruckbehälters berücksichtigt. Es zeigte sich, dass Stickstoff im Druckbereich bis 250 bar noch mit Abweichungen unter 3 % als ideales Gas angesehen werden kann. Der thermodynamische Wirkungsgrad wurde ermittelt. Darunter verstehen wir das Verhältnis der vom Speicher abgegebenen mechanischen Energie (das Integral über Öldruck x Volumenänderung) zu der vorher

aufgewendeten mechanischen Energie, um den Speicher aufzuladen. Das ist der Wirkungsgrad des Speichers selbst ohne Berücksichtigung der Verluste in Hydraulikpumpe, im Motorgenerator und in der Leistungselektronik. Die gemessenen Ergebnisse stimmten gut mit den berechneten Werten überein. Der Wirkungsgrad des Druckgasspeicher ist sehr stark von der Geschwindigkeit des Auf- oder Entladens abhängig. Je größer die Leistung ist, mit der der Speicher aufgeladen wird, um so stärker erwärmt sich das Gas und es entstehen Verluste. Erst wenn der Prozess genügend langsam geführt wird, so dass die Temperatur des Stickstoffs nur wenig ansteigt, erreicht man einen thermodynamischen Wirkungsgrad über 95 %.

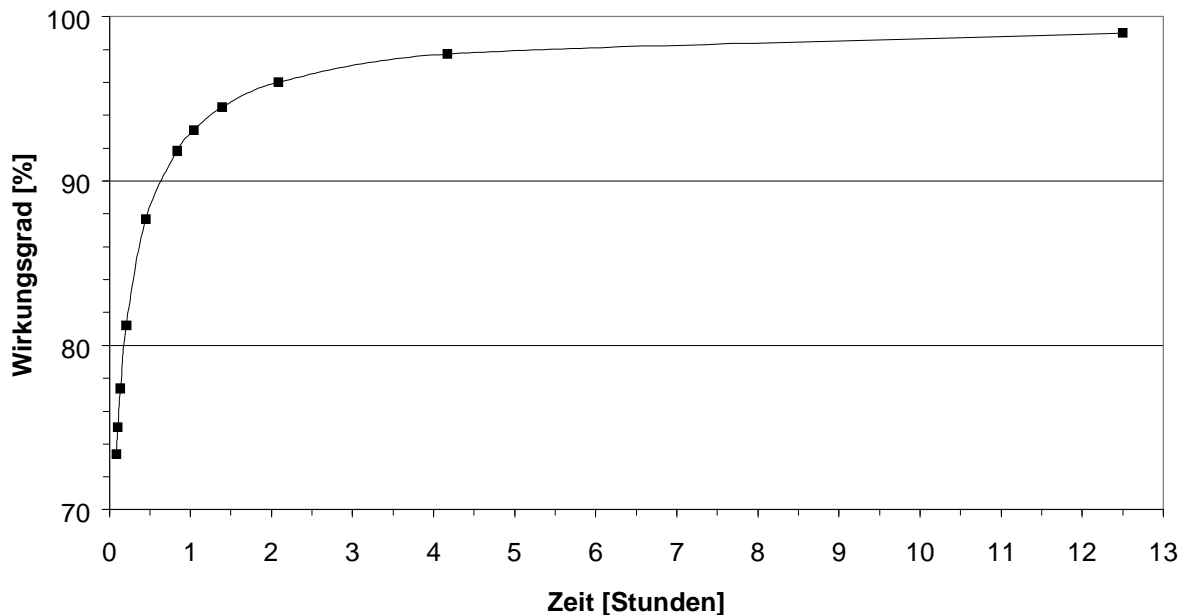


Abbildung 3 : Wirkungsgrad des Druckgasspeichers selbst ohne Hydraulikmotor, ohne Motorgenerator und Leistungselektronik in Abhängigkeit von der Auf- oder Entladezeit

Der Druckgasspeicher ist, ähnlich wie die Bleibatterie auch, ein langsamer Speicher. Um die Verluste gering zu halten, sollte man einen Zeitraum größer einer Stunde für die Auf- oder Entladung vorsehen. Diese Aussage gilt unabhängig von der Größe des Speichers. Erfreulicher Weise ist bei der Nutzung als Solarstromspeicher ausreichend Zeit vorhanden, so dass der Wirkungsgrad des Speichers selbst über 95 % liegen wird.

Der zweite für den Wirkungsgrad wesentliche Bestandteil ist die Hydraulikpumpe, die beim Entladen als Hydraulikmotor betrieben wird. Hier wird die mechanische Energie des unter Druck stehenden Öls in eine Drehbewegung überführt bzw. umgekehrt. Zu Beginn wurden Versuche mit einer Zahnradpumpe durchgeführt. Diese Pumpen sind sehr einfach aufgebaut und können als Pumpe und Motor, also in beiden Richtungen arbeiten. Der Wirkungsgrad lag jedoch nur zwischen 50 und 75 %, so dass wir schnell nach einer anderen Hydraulikpumpe zu suchen begannen. In der Abbildung 4 ist die Axialkolbenpumpe von Parker zu sehen.



Abbildung 4 : Axialkolbenpumpe

Diese kann Drücke bis 400 bar erzeugen, funktioniert in beiden Richtungen im Drehzahlbereich von 150 bis 4.600 Umdrehungen pro min. Den Wirkungsgrad der Axialkolbenpumpe haben wir allerdings nur bis 1.200 Umdrehungen pro min ausgemessen, da sonst die Gastemperatur in unserem kleinen Speicher zu stark angestiegen wäre.

Die Ergebnisse zeigen Werte zwischen 80 und 95 %, sofern die Drehzahl größer als 500 Umdrehungen pro min gewählt wird.

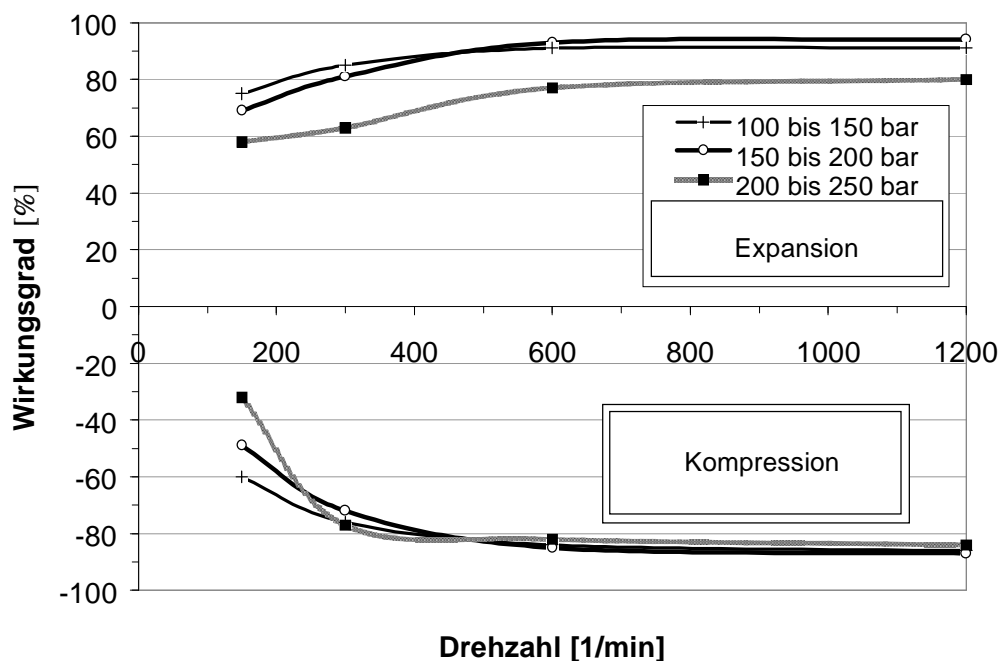


Abbildung 5 : Wirkungsgrad der Axialkolbenpumpe in Abhängigkeit von Drehzahl und Druck in beiden Richtungen (als Pumpe – Kompression und Motor – Expansion)

Sofern die Leistungselektronik und der Motorgenerator hinsichtlich Wirkungsgrad optimiert sind, können 5 bis 10 % Verlust an diesen Bauteilen erwartet werden. Das bedeutet, dass ein Druckgasspeicher mit einem Wirkungsgrad von 70 bis 90 % je nach Arbeitspunkt betrieben werden kann. Wir stellen fest, der Druckgasspeicher ist als Energiespeicher geeignet, wenn die Auf- und Entladevorgänge genügend langsam erfolgen. Langsam heißt, dass der Zahlenwert der Leistung (in kW) nicht über dem Zahlenwert des Speichervermögens (in kWh) liegen darf. Also ein Speicher mit 2 kWh Kapazität kann bis 2 kW elektrische Leistung aufnehmen oder abgeben. Diese erfreulichen Ergebnissen wurden an einzelnen Auflade- und Entladevorgängen gewonnen. Im Dauerbetrieb kamen jedoch ganz andere Schwierigkeiten zum Vorschein.

### 3. Keine Lösung ohne Probleme

Sofern der Speicher aufgeladen mit hohem Druck einige Stunden stehen blieb, zeigten sich beim Entladen im Hydrauliköl jede Menge Blasen. Die Ursache für diesen Effekt wurde nach einigen Versuchen schnell klar. Der Stickstoff löst sich in der Folge des hohen Drucks im Hydrauliköl. Bei der Entspannung auf Normaldruck bilden sich dann sofort hinter dem Hydraulikmotor die Blasen.



Abbildung 6 : Öl gesättigt mit Stickstoff bei hohem Druck tritt in den Ausgleichsbehälter ein

Leider wurden durch diesen Effekt erhebliche Mengen Stickstoff aus dem Druckbehälter ausgetragen, so dass der Druck bereits nach einigen Wochen auf 75 % abgesunken war. Der Austrag an Stickstoff war so groß, dass auch ein Sammeln des Stickstoffs über dem Ausgleichsbehälter und das Zurückpumpen nicht realistisch war. Um das Problem zu lösen, untersuchen wir folgende Wege.

Als erstes wurde versucht, eine Sperrschicht aus einer anderen Flüssigkeit zu finden, die leichter als Hydrauliköl ist, sich mit dieser nicht verbindet und außerdem noch die Diffusion des Stickstoffs behindert oder ganz stoppt. Diesen Weg gaben wir nach Durchsicht der verfügbaren Materialdatensammlungen und nach Gesprächen mit den Spezialisten auf diesem Gebiet auf.

Als zweites untersuchten wir die Nutzung einer Gummiblase, was in Stickstoffblasenspeichern technisch realisiert ist. Leider mussten wir feststellen, dass der Stickstoff durch den Gummi der Blase hindurch diffundiert. Das erfolgt zwar wesentlich langsamer jedoch immer noch so stark, dass nach einem Jahr ein Nachfüllen von Stickstoff erforderlich wird. Hinzu kommt, dass die Blasenvariante uns nicht sonderlich gut gefiel, da die Kosten für einen Druckbehälter mit Blase im Vergleich zu normalen Stahldruckflaschen wesentlich höher ausfielen.

Als drittes blieb nur noch die Variante mit einem Metallkolben zwischen Stickstoff und dem Öl, so dass die Diffusion völlig unterbunden wurde. Diese Variante war für uns zunächst die unangenehmste. Für die Kolbenvariante kann man Hochdruckrohre aus Spezialstahl verwenden, die innen glatt poliert sind und einen konstanten Durchmesser haben. Solche Rohre sind sehr teuer, zu teuer für das geplante Projekt. Da wir das Projekt nicht aufgeben wollten, mussten wir eine Lösung für einen neuartigen Hochdruckbehälter finden.

#### 4. Die Erfindung eines neuen Hochdruckbehälters

Die Lösung kam mit der Arbeit. Wir fertigen in der Rosseta Technik GmbH Schwungradspeicher mit einem Rotor aus Faserverbundmaterial [ 4 ]. Die dabei eingesetzten Kohlefasern sind fünfmal fester als Stahl. Mit unserer Wickelanlage können wir ohne Probleme feste Rohre herstellen, die innen eine genau so gute Oberfläche haben, wie das Rohr, auf das die Fasern gewickelt werden. Wir verfügen über Rechenprogramme, um solche Wickelkörper auszulegen.

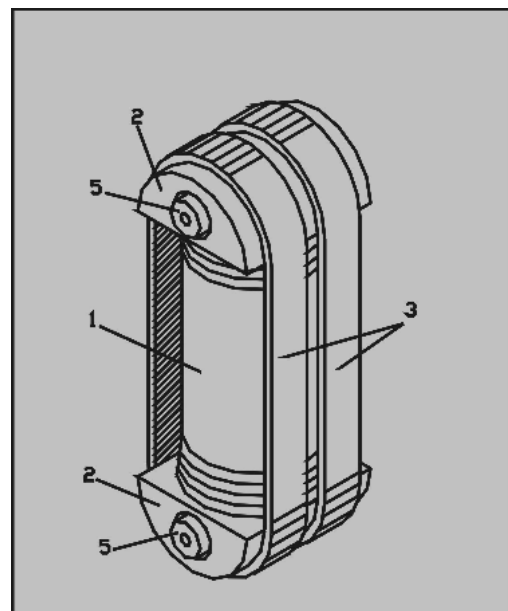
Ein Rohr aus Kohlefasern für einen Innendruck von beispielsweise 400 bar ist kein Problem. Die Schwierigkeiten gibt es nur an den Enden, da hier je nach Größe Kräfte von ca. 1.500 kN gleich 153 t in axialer Richtung aufgenommen werden müssen. Bei den auf dem Markt angebotenen Kohlefaserbehältern erreicht man die Festigkeit im Endbereich durch eine nachträgliche Umwicklung des Behälters in axialer Richtung. Allerdings haben diese Behälter zwei Nachteile für uns. Sie sind nach dem Wickelprozess und dem Aushärten des Kohlefaser-Epoxidharzverbundes geschlossen, man kann keinen Kolben einsetzen. Und der zweite Nachteil, die Technologie zur Fertigung der Behälter ist kompliziert. Es wird nämlich als erstes eine Metall-Hohlform gefertigt, auf die die Wicklung aufgebracht wird und die dann im Behälter bleiben muss. Sonst würde der Behälter im Bereich der Endstücke nicht gasdicht werden. Die ungünstige Überlappung der in unterschiedlichen Richtungen gewickelten Faserstränge führt zu mikroskopischen Rissen im Verbund, die noch nicht zum Ausfall führen, aber Gas durchlassen.

Wir kamen in dieser Situation auf eine völlig andere Lösung. Die axiale Wicklung wird nicht auf das Rohr gewickelt, sondern getrennt als Spannbügel ausgeführt. Solche Spannbügel hatten wir vor Jahren hergestellt, um die Festigkeit von Fasern zu untersuchen. In der Abbildung 7 ist der so aufgebaute Behälter gezeichnet.

Abbildung 7 : Darstellung des neuen Hochdruckbehälters der Rosseta Technik GmbH

- 1 – CFK-Rohr
- 2 – Endstücke aus Grauguss
- 3 – Spannbügel aus CFK
- 5 – Gaseinlass

Dieser Behälter ist zwar durch die nun etwas abstehenden Spannbügel größer und durch die kompakten Endstücke auch schwerer im Vergleich zu den angebotenen Kohlefaserbehältern. Aber er hat den Vorteil, dass er wesentlich einfacher zu fertigen ist, dass die Materialauslegung sicherer erfolgen kann und dass er für den Einbau eines Kolbens geeignet ist.





Durch die vollständige Simulation des Behälters mit dem Programm ANSYS haben wir die Konstruktion so lange verändert, bis der Sicherheitsfaktor 2 für den verwendeten Grauguss und den Faserverbund nachgewiesen werden konnte. In der Abbildung 8 ist ein Teilergebnis der Berechnung dargestellt. Es entstand zunächst als Computer-Modell ein mit geringem Aufwand zu fertigender Hochdruckbehälter mit einer glatten inneren Oberfläche, geeignet bis 400 bar. Die konkrete Anordnung des Behälters ist unseres Wissens neu, deshalb wurde die Anordnung zu einem Patent angemeldet.

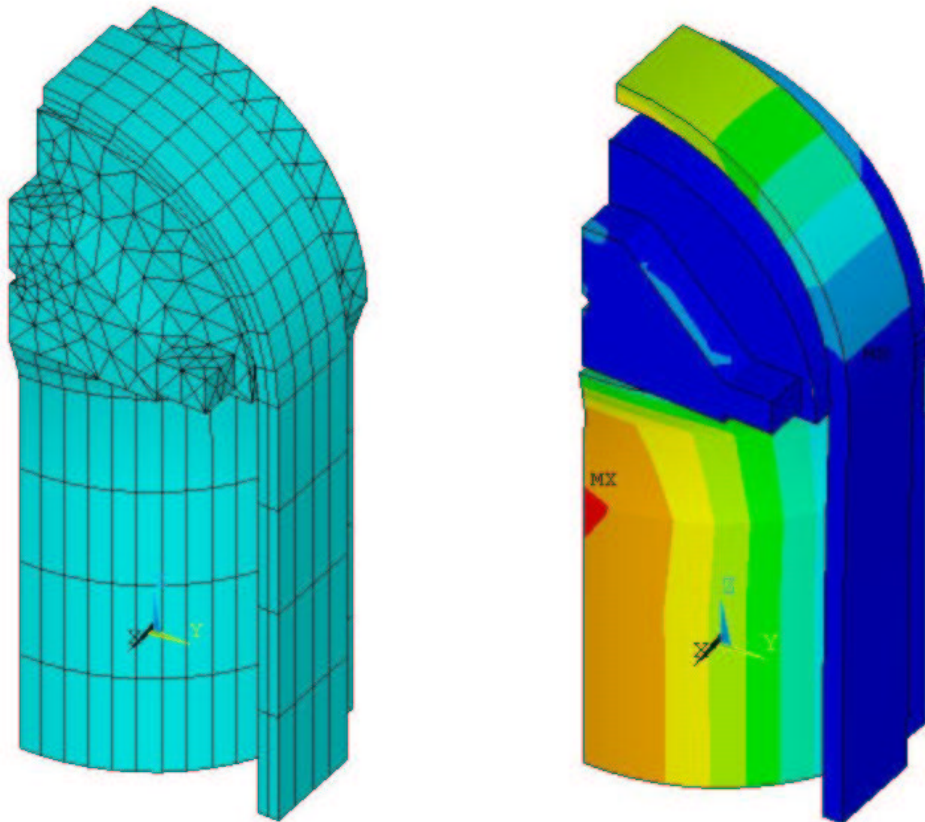


Abbildung 8 : FEM-Berechnung des neuen Hochdruckbehälters, es wird nur ein Achtel des Behälters berechnet, da der Behälter zu den drei Koordinatenebenen symmetrisch ist. Links ist das FEM-Netz dargestellt und rechts als Beispiel die Spannungen in y-Richtung. Entsprechend der Farben liegen die Spannungen zwischen 600 MPa (rot) und 0 (blau).

Nach dem die Berechnungen vorlagen, war es endlich möglich, die Leistungsfähigkeit des so aufgebauten Druckgasspeichers zu bestimmen. Ein Hochdruckbehälter besteht aus 21 kg Kohlefaser-Verbundmaterial und zwei Grauguss-Endstücken zu je 45 kg. Daraus wird für eine autarke Stromversorgung eine Speicheranlage mit 12 Druckgasspeichern zusammengestellt. Das entspricht den Abmessungen einer Palette. Die Höhe wurde zu 1,9 m gewählt, damit es beim Transport keine Probleme gibt.



Druckgasspeicher	
12 Druckbehälter zu je 60 l	
Arbeitsdruck	200 bis 400 bar
Arbeitsmedium	Stickstoff / Hydrauliköl
nutzbare Energie	2,75 kWh
Leistung	bis 2 kW
Gewicht	1,4 t
Abmessungen	Europalette (1,2 x 0,8 m) Höhe 1,9 m
Preis	ca. 5.000 € ohne Elektronik
Lebensdauer	7.300 Zyklen 20 Jahre

Tabelle 3 : Projektierte Eigenschaften des Druckgasspeichers

## 5. Ausblick

Die große Lebensdauer des Druckgasspeichers ist der wesentliche Vorteil des neuartigen Konzeptes. Damit lässt sich auch der wesentlich höhere Preis vertreten.

Für Sommer 2005 wird die Erprobung der neuen Hochdruckbehälter der rosseta Technik GmbH vorgesehen. Es werden zunächst drei 20 l- Behälter mit einer Länge von 750 mm hergestellt. Wir hoffen, dass die Erprobungen erfolgreich verlaufen und genügend Interesse für die Speicher entsteht.

Dabei sehen wir die interessante Möglichkeit, den Speicher so aufzubauen, dass die Solarzellen direkt an den Zwischenkreis angeschlossen werden können. Damit kann dann die Leistungselektronik für die Solarzellen entfallen, da diese gemeinsam mit dem Speicher genutzt wird. Der wesentliche Vorteil der Anlage gegenüber den Lösungen mit Bleibatterien besteht in der 20jährigen Lebensdauer. Mit 5 m<sup>2</sup> Solarzellen entsprechend 500 W<sub>peak</sub> kann ein System aufgebaut werden, was dann bei Bedarf auch für eine Stunde 2 kW elektrische Leistung bereitstellen kann.

## 5. Literatur und Quellenverzeichnis

- [ 1 ] [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de)
- [ 2 ] A. Reller, I. Cyphelly: Speicherung gasförmiger Energieträger – Eine Bestandsaufnahme, VDI-Berichte Nr. 1734, 2002, Seiten 37 bis 45
- [ 3 ] U. Olm: Planung, Aufbau und Konstruktion einer Druckgasspeicheranlage mit anschließender Funktionsprüfung und Optimierung des Arbeitsregimes, Diplomarbeit, Hochschule Anhalt (FH), 2004, 66 Seiten (zu beziehen über rosseta Technik GmbH)
- [ 4 ] [www.rosseta.de](http://www.rosseta.de)