

Dr. Jörg Borchert, Marc Hasenbeck, Dr. Christian Jungbluth, Ralf Schemm

Bewertung und Steuerung von Gasspeichern bzw. Gasspeicherscheiben

Abstract

In diesem Artikel werden zunächst einleitend der Gasmarkt Deutschland und der sich daraus ergebende Speicherbedarf skizziert. Folgend wird auf verschiedene Speichernutzen aus betriebswirtschaftlicher Perspektive eingegangen und die in diesem Artikel vorgestellten Bewertungsverfahren einleitend beschrieben. In diesem Artikel werden stochastische Optimierungsmethoden aufgegriffen, die sowohl eine Bewertung der Speicher gegenüber einem Spotpreis, als auch gegenüber einer gesamten Forwardcurve ermöglichen. Hierzu werden zunächst Modelle zur Beschreibung der Marktpreise vorgestellt und anhand empirischer Daten kalibriert. Dann wird eine beispielhafte Speicherscheibe zunächst auf Basis der Least-Square-Monte-Carlo-Technik gegenüber dem stochastischen mehrfaktoriellen Spotpreismodell bewertet. Hieran schließt sich die Vorstellung der Bewertung sowie des Hedgings gegenüber der Forwardcurve an. Abschließend erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung beider Verfahren.

In this paper you find a brief introduction to the German gas market as well as a draft of the resulting storage requirements in Germany. In the following different storage usages are looked into from an economical perspective. Additionally the presented evaluating methods in this paper are specified. This paper then introduces stochastic optimization methods which give the possibility to assess the storage against the spot price as well as against to the whole forward curve. For this models to evaluate the market price are illustrated and calibrated on the basis of empirical data.

After this a sample storage slice is rated with the Least-Square-Monte-Carlo method based on a stochastic multi factor spot price model. Then the hedging evaluation against the whole forward curve is presented. Concluding you find a comparison of the two methods.

1 Einleitung

Investitionen in Gasspeicher – insbesondere in Kavernen – bzw. entsprechende Speicherscheiben werden aktuell von vielen Seiten vorangetrieben. Hiermit stellen sich für die Unternehmen die Fragen, wie diese Investitionen zu bewerten und dann auch im Portfolio marktorientiert zu steuern sind.

In diesem Artikel wird daher in einem einleitenden Überblicksteil zunächst aus gaswirtschaftlicher Sicht ein Speicherbedarf skizziert. Dieser Teil untergliedert sich in eine systemische und eine betriebs-

wirtschaftliche Betrachtung von Speichernutzen.

In dem Hauptteil dieses Artikels werden dann verschiedene Bewertungs- und Steuerungsverfahren von Speichern bzw. Speicherscheiben vorgestellt, und anhand einer beispielhaften Speicherscheibe die Ergebnisse diskutiert.

Hierzu werden die relevanten Gaspreise analysiert und modellhaft beschrieben. Danach stellen wir Bewertungs- und Hedgingverfahren gegenüber einem Terminmarkt vor und gehen folgend auf die Bewertung gegenüber Spotpreisen ein. Abschließend werden beide Verfahren so-

wie die resultierenden Ergebnisse verglichen.

2 Entwicklung des Gasmarktes und Nutzen aus Speichern und Speicherscheiben

In diesem Kapitel gehen wir zunächst überblicksartig auf verschiedene Entwicklungen im Gasmarkt Deutschland ein, um daraus zunächst aus systemischer Pers-

Kontakt

Dr. Jörg Borchert

Berater bei der BET GmbH
joerg.borchert@bet-aachen.de

Dr. Christian Jungbluth

Berater bei der BET GmbH
christian.jungbluth@bet-aachen.de

Ralf Schemm

Berater bei der BET GmbH
ralf.schemm@bet-aachen.de

BET GmbH
Alfonsstr. 44
52070 Aachen

Dipl. Vw. Marc Hasenbeck

Gesellschafter price[it] GmbH in Halle und Doktorand an der Universität Halle

price [it]
Breite Str. 32a
06108 Halle

hasenbeck@price-it.eu

pektive die Notwendigkeit für Speicher zu skizzieren. Aufgrund der Fülle von Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Gasmarktes werden hier nur ausgewählte Faktoren berücksichtigt.

2.1 Entwicklungstendenzen des Gasbedarfs sowie des Gasaufkommens und der resultierende systemische Speicherbedarf

Erdgas wird in Deutschland vor allem zur Bereitstellung von Heizwärme in den Sektoren der privaten Haushalte, im Gewerbe und im Dienstleistungsbereich eingesetzt, als Brennstoff in den Kraftwerken und Heizwerken der Energieversorger und der Industrie, zur Bereitstellung von Prozesswärme sowie neuerdings auch im Verkehr als Kraftstoff für Erdgasfahrzeuge. Den größten Anteil am jährlichen Gasverbrauch haben dabei die privaten Haushalte mit ca. 37 % des zuordenbaren Gasverbrauchs, gefolgt von der Industrie mit ca. 30 %. Die Stromerzeugung sowie der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen haben jeweils einen Anteil von ca. 15-18 % am jährlichen zuordenbaren Gasverbrauch, der Anteil des Verkehrssektors ist zur Zeit noch vernachlässigbar gering.¹

Die mittlere jährliche Steigerungsrate des Erdgasverbrauchs liegt seit dem Jahr 2000 bei ca. 0,5 %, während zwischen 1990 und 2000 noch mittlere Steigerungsraten von ca. 2,8 % p. a. zu messen waren.² Für die Zukunft wird in den Szenarien des BMWi³ bis 2020 von einem konstanten bis leicht sinkenden Erdgasverbrauch ausgegangen (ca. 3 Mio. TjHu in 2020), das Szenario des BMU⁴ sieht diesen Trend bis zum Jahr 2030 fortgesetzt mit dann ca. 2,7 Mio. TjHu. Die Ergebnisse dieser Szenarien sind dabei sehr sensitiv bezüglich der getroffenen Annahmen. Im Einzelnen stellen sich die Einflussgrößen des zukünftigen Gasbedarfs in Deutschland in den benannten Szenarien folgend dar:

- Ein großer Teil des Erdgases wird in Deutschland mittel- oder unmittelbar zur Gebäudeheizung bzw. Raumwärmebereitstellung eingesetzt. Damit ist der tägliche Erdgasbedarf und -verbrauch in Deutschland stark abhängig von der aktuellen Außentemperatur.

Die Struktur des Erdgasverbrauchs weist dadurch eine starke Saisonalität auf: die monatlichen Verbräuche im Winter sind auf ganz Deutschland bezogen in der Regel um den Faktor 2 bis 3 höher als die monatlichen Verbräuche im Sommer.⁵ Für einzelne Regionen und Versorgungsgebiete von städtischen Energieversorgungsunternehmen können diese Saisonalitäten noch deutlich höher liegen. Insgesamt ist der jährliche Erdgasverbrauch in Deutschland damit nicht nur von strukturell bedingten Änderungen des Bedarfs, sondern auch wesentlich von der Witterung während der Wintermonate beeinflusst. Mittel- bis langfristig werden bei den privaten Haushalten spürbar rückläufige Verbräuche erwartet, die sich insbesondere auf die energetische Sanierung bestehender Gebäude und den sinkenden Heizwärmebedarf neuer Gebäude zurückführen lassen. Aus ähnlichen Gründen werden rückläufige Verbräuche im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen erwartet. Dabei spielt mittel- bis langfristig neben den Anstrengungen im Gebäudesektor zur Reduktion der Heizwärmebedarfe auch die erwartete klimatologische Entwicklung mit steigenden Durchschnittstemperaturen auch in Deutschland einem geringeren Gasbedarf für Heizzwecke zu. Insgesamt ist zu erwarten, dass die Saisonalität des Gasbedarfs analog dem Heizwärmebedarf deutlich abnehmen wird.⁶

- Im industriellen Sektor werden konstante bis geringfügig rückläufige Verbräuche erwartet. Die Steigerung der Energieproduktivität kompensiert und überwiegt die erwarteten Produktionsausweitungen. Der industrielle Verbrauch hat keine ausgeprägt saisonale, aufgrund der Produktionszeiten vielmehr eine Tages- und Wochenstruktur, die durch individuelle Produktionsrandbedingungen geprägt werden.
- Demgegenüber werden in verschiedenen Studien – teilweise signifikant – steigende Verbräuche aus der Stromerzeugung erwartet. Dabei ist die Abschätzung des Gasbedarfs aus Stromerzeugung im Vergleich etwa zum Gasbedarf der privaten Haushalte schwierig. Der Neubau von Gaskraftwerken – signifikant für den Gasver-

brauch sind hier vor allem GuD-Kraftwerke mit guter Auslastung – ist einerseits nur bei ausreichenden Preisspreads zwischen Strompreis auf der einen und Gas- und CO₂-Preis auf der anderen Seite wirtschaftlich, andererseits bestehen gerade für den Neubau von Gaskraftwerken deutliche Risikofaktoren. Gas-GuD-Kraftwerke stehen mit ihrer Stromerzeugung in Konkurrenz zu anderen Kraftwerkstechnologien, wie z. B. Steinkohle-Kraftwerken. Steigende Kohle- und auch CO₂-Preise, höherer Flexibilitätsbedarf in der Stromerzeugung aufgrund konstant bleibender Grundlasterzeugung aus Kernkraft und Braunkohle und steigender fluktuierender Erzeugung aus Wind und anderen regenerativen Quellen sind allerdings Faktoren, die gerade die Wirtschaftlichkeit von Gas-GuD-Kraftwerken begünstigen. Daneben muss bei steigender Einspeisung aus fluktuierenden Quellen – vor allem Wind und Photovoltaik – zusätzliche regelbare Kraftwerksleistung zur Verfügung gestellt werden, z. B. aus Gasturbinen. Hieraus ergibt sich ein deutlich zunehmender Strukturierungs- und damit Flexibilitätsbedarf in der Gaslieferung.

Der Gasbedarf in Deutschland kann zur Zeit (2008) noch zu etwa 15 % aus heimischen Quellen gedeckt werden.⁷ Dabei ist seit dem Jahr 2003 ein rückläufiger Trend bei der heimischen Förderung sichtbar. Gegenüber 2007 sank die Förderung in 2008 um 8 %⁸. Der Förderrückgang ist natürlichen Ursprungs, bedingt durch die zunehmende Erschöpfung und Verwässerung der Lagerstätten.⁹ Auch die Menge des aus den Niederlanden und anderen EU-Staaten importierten Gases ist seit Jahren rückläufig. Damit wird sich die Importabhängigkeit Deutschlands und der EU insgesamt in Zukunft weiter erhöhen. Als Lieferanten werden weiterhin Russland und Norwegen eine große Rolle spielen. Der Rückgang der (Swing-)Förderung in Deutschland und der EU sowie ein höherer Anteil eher unflexibler Aufkommensquellen wie der Importe aus Russ-

1 eigene Berechnungen aus BMWi Energiedaten 2008

2 eigene Berechnungen aus BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes

3 vgl. Schlesinger, M. et al.

4 vgl. Nitsch, J.

5 eigene Berechnungen aus BMWi Energiedaten 2008

6 vgl. Jacob, D. et al.

7 eigene Berechnungen aus BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes

8 vgl. Landesamt für Bergbau und Geologie, Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2008, Hannover 2009

9 ebenda.

land führt zu einem höheren Speicherbedarf in Zentral- und Westeuropa.

Jedoch kann für die EU insgesamt auch der LNG-Markt mit unterschiedlichen Anbietern aus Afrika und dem Nahen Osten, sowie die Anbindung an die Lieferregion Kaspisches Meer / Iran (Nabucco Pipeline) zu einer wichtigen Bezugsquelle werden.¹⁰ Unklar ist noch, wie sich das LNG Angebot auf den Speicherbedarf auswirken wird. Es kann aber eher davon ausgegangen werden, dass die LNG Terminals voll ausgelastet werden und damit zwar theoretisch eine Flexibilitätsquelle darstellen, praktisch aber eher eine Bandleistung generieren.

Des Weiteren ist zu beachten, dass Deutschland zunehmend ein Transitland für Erdgas wird: die Exportmenge hat sich in den letzten zehn Jahren verdreifacht auf heute (2008) ca. 470 TJ, das sind gut 12 % des Gesamtaufkommens an Erdgas in Deutschland. Die Ferngasleitungsnetzbetreiber reagieren hierauf, sowie auf die Veränderung der Lieferströme und auch die zunehmende Liquidität auf den Großhandelsmärkten mit einem Ausbau der Ferngasleitungskapazitäten.¹¹ Damit ist der Gasmarkt in Deutschland kein isolierter Markt. Es ist davon auszugehen, dass Speicher in Deutschland zur Strukturierung der Gaslieferungen in einem europäischen Markt eingesetzt werden, und umgekehrt Speicher in anderen Ländern zur Strukturierung für Deutschland. Allerdings gibt es in Deutschland günstige geologische Bedingungen speziell für den Bau von Kavernenspeichern, was diese Investitionen deutlich fördern dürfte.

2.2 Eigenschaften von Gasspeichern und betriebswirtschaftliche Bewertungsmöglichkeiten

Aus der mangelnden Deckungsgleichheit von Angebot und Nachfrage entsteht der Speicherbedarf. Den saisonalen sowie auch den kurzfristigen Ausgleich zwischen Verbrauchsstruktur und Import- und Förderstruktur aus der obigen Abbildung stellen in Deutschland neben kleineren dezentralen Speichern im wesentlichen große Untergrundspeicher her. Es gibt drei Typen von Untergrundspeichern: Aquiferspeicher, Porenspeicher und Kavernenspeicher. Aquifere sind wasserführende Gesteinsschichten, deren Speicher-

wirkung auf die Löslichkeit des Erdgases im Wasser zurückzuführen ist. Porenspeicher sind trockene Gesteinsschichten, deren Porenraum als Speicher dient. Speziell Porenspeicher sind oftmals ehemalige Gasförderstätten. Kavernenspeicher sind Hohlräume in mächtigen Salzstöcken, die künstlich durch Solung hergestellt werden.¹² Die Ein- und Ausspeicherung von Erdgas in Aquifere und Porenspeicher läuft bedingt durch die Art der Bindung des Gases im natürlichen Porenraum bzw. im Wasser allgemein träger ab als die Ein- und Ausspeicherung in Kavernenspeicher, die unter hohem Druck (200 bar und mehr) betrieben werden können. Demgegenüber besitzen Aquifere und Porenspeicher meist wesentlich größere Speichervolumina als Kavernenspeicher. Dies führt dazu, dass erstere eher zur Herstellung des beschriebenen saisonalen Ausgleichs in gleichmäßiger Betriebsweise gefahren werden, während letztere auch für kürzerfristige Handelsgeschäfte und mehrmaligen Umschlag der speicherbaren Gasmenge geeignet sind. Dabei ist die Speichernutzung durch verschiedene technische Parameter eingeschränkt, beispielsweise sinken die möglichen Entnahmeraten bei Entleerung des Speichers aufgrund des fallenden Drucks, umgekehrt steigen die Einspeicherkosten bei vollem Speicher und steigendem Druck aufgrund höherer notwendiger Kompressionsarbeit. Mindestdruck und Mindestgasmenge müssen in Kavernenspeichern erhalten bleiben, um die Stabilität der Kaverne zu gewährleisten. Auf diesen Zusammenhang wird später bei der Beschreibung der Speicherparameter nochmals eingegangen.

Für alle Speicher und insbesondere für die Kavernen gelten folgende Kennzahlen als besonders relevant und müssen im Rahmen einer Bewertung bzw. im Rahmen einer kontinuierlichen Handelsplanung berücksichtigt werden:

- **Arbeitsgasvolumen (AGV):** Das Arbeitsgasvolumen ist das Volumen, welches zur Ein- und Ausspeicherung effektiv zur Verfügung steht. Vom AGV muss das geometrische Volumen, das Gesamtvolumen sowie das Kissengasvolumen unterschieden werden. Das AGV ergibt sich aus der Differenz von Gesamt- und Kissengasvolumen. Letzteres ist das Gas, das benötigt wird, um

einen zum Erhalt der geologischen Untertage-Formationen notwendigen Druck in der Kaverne zu generieren.

- **Konvergenzrate:** Bei Kavernen tritt der Umstand ein, dass sich das geometrische Volumen über die Dauer und die Art der Nutzung verringert (Hohlraumverluste). Diese Veränderung kann vereinfachend über eine Rate pro Jahr beschrieben, die sich auf das verfügbare AGV unmittelbar auswirkt. Werden nur Einjahres-Speicherscheibenverträge abgeschlossen, sind die AGV für das Jahr in aller Regel konstant. Erfolgt eine langjährige Beteiligung an einem Speicher, muss die Konvergenzrate in der Bewertung explizit über das jährlich zur Verfügung stehende AGV berücksichtigt werden.
- **Einspeicher- und Ausspeicherleistung:** Diese Leistungsgrößen bestimmen maßgeblich den Wert des Assets, da sie das Flexibilitätspotenzial und damit die Aktivitäten in den Märkten bestimmen. Diese Leistungskennzahlen hängen im Wesentlichen von der Dimensionierung der Obertageanlagen des jeweiligen Speichers ab und sind in praxi sehr verschieden ausgestaltet. Aus fluiddynamischen und geologischen Stabilitäts-Gründen ist die Ein- und Ausspeisekapazität sowie die Möglichkeit, zwischen Ein- und Ausspeisung umzuschalten, prinzipiell vom Füllstand des Speichers abhängig. D. h. abhängig von der Fahrweise des Speichers können sich die Leistungseigenschaften verändern. Jeder Speicherbetreiber veröffentlicht hierzu eine sogenannte Speicherkennlinie für die Ein- und Ausspeisung. Da diese Größen – wie oben skizziert – die Leistungsfähigkeit und damit den Wert des Speichers bestimmen, müssen diese Größen in der kontinuierlichen Einsatzplanung angepasst werden. In der Literatur lassen sich verschiedene funktionale Modellierungsvarianten für die Leistungen finden.
- **Ein- und Ausspeicherkostenfunktionen:** Die Speicheraktivität selbst verursacht prinzipiell Kosten, da Verdichter betrieben werden müssen. Abhängig vom Speicherbetreiber werden diese Kosten unterschiedlich abgebildet. Sehr häufig werden in praxi die Kosten als Konstante (€/MWh) abgebildet.

Eine Bewertung von Speichern wird in der energiewirtschaftlichen Praxis sehr verschieden vorgenommen. Traditionell aber

¹⁰ vgl. v. Hirschhausen, C.

¹¹ vgl. GTE+ European Capacity Development Report 2008

¹² vgl. Landesamt für Bergbau und Geologie, Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2008

Abb. 1 | Nutzen von Gasspeichern



wurde ein Speicher relativ zu gaswirtschaftlichen Nutzen bewertet. Durch die Entstehung von Großhandelsmärkten existiert nun auch die Möglichkeit, einen Speicher relativ zu den entstehenden Marktpreisen zu bewerten. Folgende Abbildung gibt einen Überblick über die verschiedenen gaswirtschaftlichen Nutzenpotenziale eines Speichers.

Die betriebswirtschaftlichen Nutzenpotenziale aus einem Speicher lassen sich dabei wie folgt beschreiben und klassifizieren:

- Verkauf von Nutzungsrechten (Speicherbündel): Anstelle der eigenen Bewirtschaftung werden Speicheranteile zur Nutzung an Dritte vermietet.
- Optimierung des eigenen Bezugs- und Lieferportfolios durch
 - Einsatz des Speichers zur Strukturierung von Lieferungen: standardisierte Produkte (Bänder) auf der Bezugsseite werden durch Einsatz des Speichers zu beliebigen Lieferfahrplänen
 - Peak-Shaving Bezugsvertrag: Leistungsspitzen und damit Kosten aus dem Leistungspreis eines klassischen Bezugsvertrags werden durch den Einsatz des Speichers reduziert
 - Optimierung Bilanzkreis, Ausgleichsenergie: Prognosefehler und damit Kosten für Ausgleichsenergie werden durch kurzfristigen Speichereinsatz reduziert
- Vermarktung an Netzbetreiber durch Einsatz auf dem Regelenergiemarkt:

Speicherleistung und -volumen wird an den Bilanzkreisnetzbetreiber vermietet

- Einsatz an Großhandelsmärkten: Bewirtschaftung des Speichers durch physische Erfüllung von Termin- und Spotgeschäften am Großhandelsmarkt

In diesem Artikel wird eine Bewertung gegenüber den Großhandelsmärkten (gegenüber Spotpreisen und der gesamten Forwardcurve) vorgenommen. Dieses bietet sich an aufgrund der Tatsache, dass der zentrale Speicher bzw. die entsprechende Scheibe am Handlungspunkt direkt handelbar ist. Zum anderen muss davon ausgegangen werden, dass in einem effizienter werdenden Gasmarkt auch die anderen gaswirtschaftlichen Nutzen einen Wert zugewiesen bekommen, der sich direkt aus den Großhandelsmarktpreisen ergibt. Insofern ist eine marktorientierte Bewertung sinnvoll und marktgerecht.

Im Rahmen der Marktbewertungsverfahren lassen sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten unterscheiden: erstens kann der Speicher im Rahmen einer deterministischen Optimierung als ein Asset aufgefasst werden, welches sich durch ein lineares Produkt (z. B. ein Fahrplan) sinnvoll beschreiben lässt. Zum anderen kann im Rahmen einer stochastischen Bewertung der Flexibilität des Speichers Rechnung getragen werden und das Asset als reale Option abgebildet werden. In praxi ist eine deterministische Bewertung traditionell weit verbreitet. Gerade aber Kaver-

nen weisen so große Flexibilitätspotenziale auf, dass eine deterministische Bewertung den tatsächlichen Marktwert unterschätzt.

Für jede Form der Bewertung muss der gleiche prinzipielle Prozess durchlaufen werden. Zunächst muss ein Modell für die Marktpreise aufgebaut werden. Im Rahmen der deterministischen Bewertung reicht eine einwertige Größe z. B. in Form einer PriceForwardCurve (PFC) oder einer Spotpreiserwartung. Diese Zeitreihe (Vektor) wird in der Einsatzoptimierung verarbeitet. In der stochastischen Bewertung müssen ein Marktpreismodell bzw. Marktpreisszenarien (Matrix) existieren. In der stochastischen Bewertung wird die gesamte Szenariomatrix direkt verwendet. In jeder Variante der Einsatzoptimierung (stochastisch oder deterministisch) muss der betrachtete Speicher mit seinen Charakteristiken in Bezug auf die oben genannten Speicherkenngrößen abgebildet werden. Wir konzentrieren uns in diesem Artikel auf die stochastische Optimierung.

Wir stellen zunächst ein stochastisches Modell vor, welches die empirischen Daten der Spotpreise sehr gut replizieren kann und auch in der theoretischen Diskussion weit verbreitet ist. Für die Zwecke der stochastischen Optimierung können zwei Varianten grundsätzlich unterschieden werden. Zum einen kann eine Optimierung gegenüber einem Spotmarkt erfolgen. Für die Bewertung einer Kaverne ist dies auch sinnvoll, da die Kaverne so große Flexibilität besitzt, die gerade in Kurzfristmärkten generierbar ist. Auf dieses Verfahren gehen wir im folgenden Kapitel ein. Zum anderen kann auch ein Wert abgeleitet werden, der sich aus dem Hedging des Speichers entlang der Terminmärkte ergibt. Die Optimierung gegenüber einem Terminmarkt könnte z. B. der Abgrenzung der Aktivitäten eines Kurzfrist- und eines Langfrighthändlers sowie auch zum Aufbau einer Forward-Hedgestrategie durch den Langfristhandel dienen. Mit Hilfe verschiedener rollierender Hedgingverfahren kann der Wert der Bewirtschaftung des Speichers im Terminmarkt bestimmt und die wesentlichen Wert treibenden Komponenten identifiziert werden, um eine geeignete Handelsstrategie darauf abzustimmen. Auf diese beiden Verfahren gehen wir in Kapitel 3 und 4 ein.

3 Steuerung und Bewertung von Gasspeichern im Spotmarkt mit einem Spotmarktmodell

Die Bewertung des Speichers bzw. der Speicherscheibe kann unter bestimmten Voraussetzungen aus den Marktpreisen für Gas abgeleitet werden. Der Speicher wird hierbei als reales Derivat mit dem Underlying Gaspreis betrachtet. Zu den Voraussetzungen zählen optimalerweise ein hinreichend liquider Markt, einhergehend mit niedrigem Bid-Ask-Spread sowie niedrigen Transaktionskosten. Bei jungen Märkten, wie dem betrachteten NCG-Markt (vormals ECG, Handel seit Oktober 2007) sind diese Bedingungen trotz stetig steigender Umsätze bisher nicht vollständig erfüllt. Jedoch zeigt die starke Korrelation zu anderen Märkten, wie z. B. dem liquiden TTF, dass auch hier eine markt-nahe Bewertung durchgeführt werden kann, insbesondere angesichts mangelnder Bewertungsalternativen.

Wird der Gasspeicher im Verbund mit anderen Assets eingesetzt, können die beiden ausführlich vorgestellten Verfahren in den meisten Fällen direkt verwendet werden, ohne komplizierte Verflechtungen in die Bewertung einbeziehen zu müssen. Eydeland und Wolyniec¹³ beschreiben den Fall eines Gasspeichers, der zur Gasversorgung eines Kraftwerks eingesetzt wird. Die separate Bewertung von Gasspeicher und Kraftwerk führt zu dem gleichen Ergebnis wie eine simultane Verbundbewertung, da mit Opportunitätskosten gegenüber dem Markt bewertet wird.

Der in diesem Kapitel vorgestellte Bewertungsansatz ermittelt den Wert des Gasspeichers gegenüber dem Spotmarkt. Dies geschieht in mehreren Schritten

- Auswahl, Kalibrierung und Test eines geeigneten Spotmarktmodells
- Mathematische Beschreibung des Speichers bzw. der Vertrags- und physischen Restriktionen als Zustandsmodell
- Lösung des Bewertungsproblems über die Ermittlung einer optimalen Einsatzstrategie bei unsicheren Preisen über die LSMC-Methode¹⁴
- Risikoanalyse, Ableitung einer Handelsstrategie (z. B. optimale Handelsheuristiken)
- gegebenenfalls Aufsetzen einer Hedgestrategie und deren Initialisierung.

3.1 Formulierung eines Modells für die NCG Spotpreise

In Übereinstimmung mit vielen Autoren¹⁵ unterstellen wir, dass der (logarithmierte) Spotpreis $\ln(S(t) = x(t))$ sich aus zwei un beobachtbaren dynamischen Komponenten (Zustände χ_t und ξ_t) sowie einer deterministischen Saison f_t zusammensetzt:

$$S_t = e^{\chi_t + \xi_t + f_t}$$

Zur einer ausführlichen Ableitung und Analyse dieses Ansatzes wird auf Sorensen¹⁶ verwiesen. Die Definition für χ_t als kurzfristige Störung impliziert die Verwendung eines Mean Reversion Prozesses, d. h. einer dynamischen Abfolge von Störungen (Stochastische Differentialgleichung (SDE)), die mit dem Zeitablauf wieder abgebaut werden, so dass eine stetige Tendenz zur Rückkehr zum langfristigen Gleichgewicht besteht:

$$d\chi_t = \kappa\chi_t dt + \sigma_\chi dz_t^\chi$$

mit:

- $d\chi$: Veränderung der kurzfristigen Preiskomponente zwischen zwei Zeitschritten
- dt : Zeitintervall zwischen zwei Simulationsschritten
- σ_χ : Volatilität in Prozent p. a.
- dz_t^χ : Wiener-Prozess
- κ : Parameter für Geschwindigkeit p. a., mit der Abweichungen vom Gleichgewicht wieder abgebaut werden.

Die ökonomische Interpretation dieser Modellkomponente liegt unmittelbar in der Verwendung von Gas als Consumption-Asset begründet. Temporäre Knappheiten, hervorgerufen z. B. durch extrem niedrige Temperaturen im Winter führen während dieser Phase im Falle knapper Speichervorräte zu steigenden Preisen, die bei Rückkehr zur Normaltemperatur wieder abgebaut werden (die Temperatur selbst tendiert nach Abweichungen zur langfristigen Durchschnittstemperatur zurück). Die Theorie zur Erklärung und Bepreisung dieser Beobachtung liefert die „Theory of Storage“¹⁷ und der resultierenden Convenience Yield.

Unmittelbar im Zusammenhang mit den temporären stochastisch modellierten Knappheiten steht, aufgrund des Importes aus unflexiblen Mengen und der nicht-konstanten saisonalen Gasnachfrage, die

deterministische Saisonfunktion f_t , die sich als endliche Fourierreihe beschreiben lässt.

Da Gas in der langfristigen Sicht als Substitutionsgut zu Öl aufgefasst werden kann¹⁸, liegt es nahe, neben den besprochenen stationären Abweichungen zusätzlich eine nicht-stationäre Komponente in Form einer geometrischen Brownschen Bewegung zu berücksichtigen. Dies tun wir durch eine langfristige Renditekomponente, deren stochastische Störungen wir somit als persistent betrachten:

$$d\xi_t = \mu dt + \sigma_\xi dz_t^\xi$$

mit:

- $d\xi$: Veränderung der langfristigen Preiskomponente zwischen zwei Zeitschritten
- dt : Zeitintervall zwischen zwei Simulationsschritten
- σ_ξ : Volatilität in Prozent p. a.
- dz_t^ξ : Wiener-Prozess
- μdt : erwartete Rendite in einer Zeiteinheit dt .

Eine Bewertung mit diesem Modell, kalibriert an historischen NCG-Spotpreisen, erfordert eine Kenntnis der Risikoprämie, um die Cash-Flows risikoneutral zu diskontieren. Die Ermittlung der relevanten Risikoprämie, z. B. über ein CAPM-Modell, erweist sich bekanntermaßen als sehr schwierig. Um dieses Problem zu umgehen, ermitteln wir die Risikoprämie implizit direkt aus den Marktpreisen. Dies geschieht unter Hinzuziehen von Preisinformationen aus dem Futuresmarkt. Durch eine Erweiterung des Beobachtungssystems werden die Day-ahead-Spotpreisprognosen um die Erwartungen für die Spotpreise zu den relevanten Futuresfälligkeiten ergänzt. Da nur der Halter der Spotposition für das Spotmarktrisiko, nicht aber die Long-Futuresposition mit der Risikoprämie λ bezahlt werden, lassen sich aus den Differenzen zwischen der Spotpreisprognose und dem Futurespreis die Risikoprämien ermitteln (mathematisch: $E_t(S_T) = F_{t,T} e^{\lambda\sigma(T-t)}$)¹⁹.

3.2 Empirische Kalibrierung des Modells

Das diskret in ein Zustands- und ein Beobachtungssystem transformierte kontinuierliche Modell wird mit einem Kalman-Filter geschätzt. Dabei wird das Pa-

13 vgl. Eydeland A., Wolyniec K.

14 vgl. Longstaff, F.A., Schwartz, E.S.

15 vgl. z. B. Schwartz, E. S., Smith, J.E.

16 vgl. Sorensen, C.

17 vgl. Brennan, M. J.

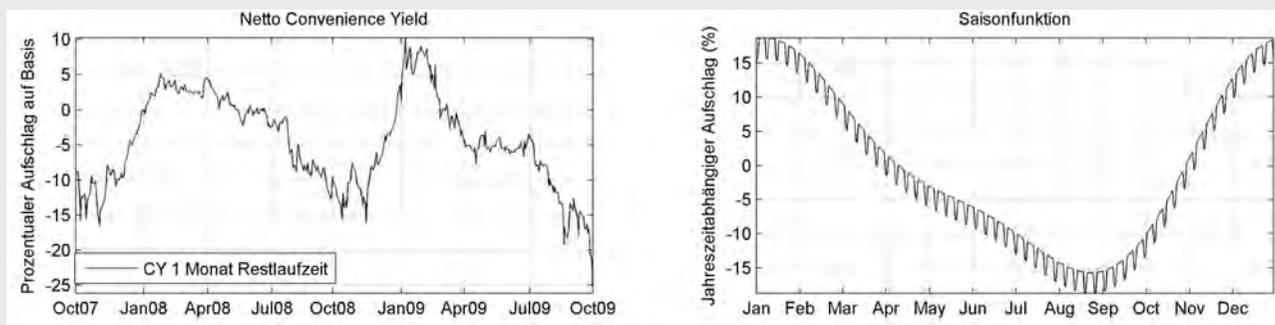
18 vgl. z. B. Dixit, A.K., Pindyck, R.S.

19 vgl. hierzu z. B. Pilipovic, D.

Tab. 1 | Nutzen von Gasspeichern

	κ	σ_x	μ	σ_ξ	ρ	λ_x	λ_ξ	sin1	cos1	sin2	cos2	likelihood
Parameter	3,3	0,77	0,02	0,3	-0,07	-0,03	-0,11	0,08	-0,01	0,1500	0,03	-5.6132e+003
t-Tests	11,41	24,45	0,09	14,5	-0,012	-0,02	-0,526	33,13	-9,49	75,53	31,53	

Abb. 2 | Modellergebnisse



parameterset implizit über eine Log Likelihood Maximierung ermittelt. Die aus dem Parameterset resultierenden Zustände bilden die Basis für die Schätzer der Beobachtungen. Diese prognostizierten Beobachtungen werden durch das Maß minimaler quadratischer Abweichungen so gut wie möglich an die empirischen Spot- und Futurespreise gefittet. Zum Aufbau der Zustandssystem-Matrizen siehe u. a. Schwartz, Smith (2000) oder Sorensen. Die aus dem NCG-Datensatz für den Zeitraum 01.10.2007 bis 06.10.2009 für das oben vorgestellte Preissystem hervorgehenden Parameter sind mit dazugehörigen t-Test-Ergebnissen in Tabelle 1 widergegeben.

Die Halbwertszeit (in Jahren: $\log(2)/\kappa$) für den kurzfristigen Prozess sagt aus, wie lange es dauert, bis eine Störung im System wieder zur Hälfte abgebaut ist. Für den besprochenen Datensatz beträgt sie 77 Tage. Die Volatilität der kurzfristigen Gleichgewichtsstörungen beträgt 77 % (p. a.). Diese Größe ist zusammen mit der Halbwertszeit die Hauptkomponente für die kurzfristig ausgerichtete Speicheraktivität am Spotmarkt. Das Niveau der zu realisierenden Spreads am Spotmarkt wird maßgeblich durch die langfristige Bewegung, modelliert durch den langfristigen

Prozess bestimmt. Die Volatilität dieses nichtstationären langfristigen Gleichgewichts beträgt 33 %. Die Rendite μ des langfristigen Prozesses ist schwierig zu bestimmen, häufig hat der geschätzte Wert eine hohe Standardabweichung. Dieses Problem lässt sich auf die Unterbestimmung des Systems zurückführen. Glücklicherweise ist die risikoneutrale Äquivalenzbewertung unter der Drift $\mu - \lambda_\xi = 9\%$ (p. a.) aussagekräftig, da ihr Wert durch die Hinzunahme der Futurespreis-Beobachtungen gestützt wird.

Abbildung 2 zeigt, dass der NCG-Markt sich über die letzten zwei Jahre im Schnitt überwiegend im 'Normal Contango' befunden hat, d. h. der Futureswert lag aufgrund einer negativen Risikoprämie über dem erwarteten Spotpreis. Nach der Theorie von Keynes und Hicks zeigt dieses Ergebnis, dass Hedger sich meist Long positionieren und dafür eine Risikoprämie an den Spekulanten (in diesem Falle Short-Position) bezahlen.²⁰

Die Risikoprämie ist für den Marktteilnehmer realisierbar, wenn er in der Lage ist, zu den Marktpreisen für den Netto-

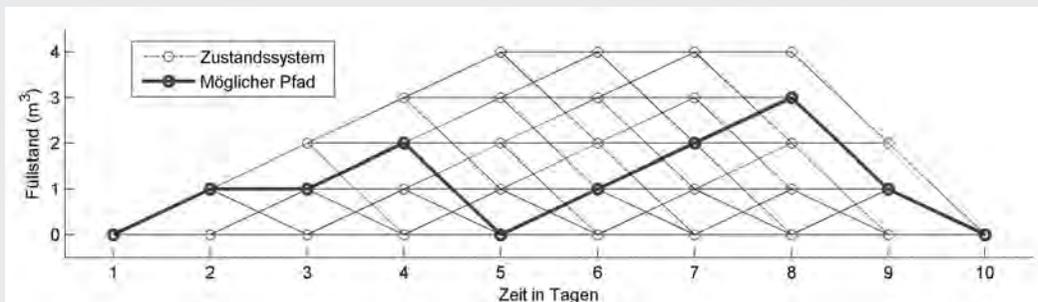
Convenience Yield zu agieren.²¹ Abbildung 2 zeigt links den identifizierten Convenience Yield, berechnet aus den Spotpreisen und dem künstlichen Frontfutures-Kontrakt mit einer konstanten Restlaufzeit von 30 Tagen. Die Berechnung wurde auf Basis des kalibrierten Modells durchgeführt.

Ein positiver Convenience Yield impliziert eine positive Basis (hier definiert als die Differenz aus Spotpreis abzüglich Frontfutures); somit ist das Frontfutures billiger als der Spot, da der gegenwärtige Besitz von physischem Gas aktuell mehr Wert ist als eine (nicht-physische!) Long-Position im Futuresmarkt. Da die Saisonkomponente ein maßgeblicher Bestandteil des Convenience Yields ist, haben wir sie im rechten Teil von Abbildung 2 abgebildet.²²

21 Jeder Marktteilnehmer hat unterschiedliche Kostenfunktionen, die von den sich durchschnittlich ergebenden Lagerkosten und Convenience Yield (zusammen Netto-Convenience Yield) abweichen.
22 Zusätzlich zu den Sinusoidal-funktionen haben wir die Wochenendeinflüsse, gemessen über eine Dummy-Regression, in die Saisonfunktion integriert. Dieses zweistufige Verfahren begründet sich in der ausschließlichen Verwendung von Handelstags-Preisnotierungen im Kalman Filter System.

20 siehe dazu Hull, J.

Abb. 3 | Schema für das Zustandssystem eines fiktiven Gasspeichers



3.3 Bewertung des Speichers mit der LSMC-Methode

Die für die beispielhafte Bewertung herangezogene fiktive Speicherscheibe hat folgende Kenngrößen:

- Injektionsgeschwindigkeit c_{in} : 600.000 m³/Tag
- Extraktionsgeschwindigkeit c_{out} : 2.400.000 m³/Tag
- Arbeitsgasvolumen c_{max} : 60 Mio. m³
- Vertragslaufzeit: Speicherwirtschaftsjahr vom 1. April 2009 bis 31. März 2010
- Der Speicher ist zu Anfang und zu Ende des Kontraktes leer

In der Praxis sind häufig weitere Punkte von Belang für die Bewertung.²³ Wir wählen in diesem Artikel eine vergleichsweise abstrakte Vertrags-Konstellation für die Analyse, um eine belastbare Vergleichsbasis zwischen a) den Einsätzen auf verschiedenen Märkten und b) den Werttreibern der Assetkurse durchführen zu können. Auf Erweiterungen wird in den jeweiligen

Optimierungspassagen an den relevanten Stellen eingegangen.

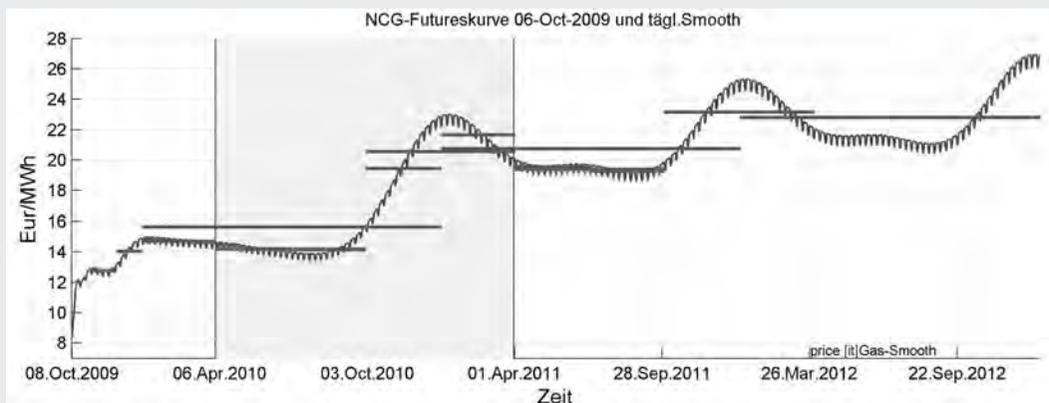
3.4 Beschreibung des allgemeinen Zustandssystems

Eine Optimierung über die PFC soll einen ersten, unteren Rand für die Spotmarkt-Bewertung liefern. Unter der Annahme, dass der Trader das Balance of Month-Produkt (BoM) handeln oder synthetisch rekonstruieren kann, lassen sich die Cashflows risikoneutral abzinsen. Ist dies nicht der Fall, muss das Residualrisiko z. B. über eine Risikopräferenzfunktion in den möglichen Hedge miteinbezogen werden.

Zur Ermittlung einer optimalen Handelsstrategie wenden wir ein einfaches dynamisches Verfahren in einem Zustandssystem an, das den Gasspeicher mit Nebenbedingungen hinlänglich beschreibt und rekursiv gelöst wird²⁴. Das Zustandssystem entspricht dem System, das auch zur Optimierung im stochastischen Rahmen benutzt wird. Man überlegt in einem ersten Schritt die möglichen Zustände, in

denen sich der Gasspeicher befinden kann. In unserem Beispiel definieren wir den Zustand $n = 1$ als leeren Speicher, $Z_1 = 0$. Die folgenden möglichen Zustände definieren wir linear über $Z_n = Z_{n-1} + c_{in}$ für alle $n > 1$ und $Z_n \leq c_{max}$. In unserem Beispiel ergibt sich aus $c_{max}/c_{in} = N = 100$. Diese einfache Zustandsraumbeschreibung ist möglich, weil wir zum einen konstante Ein- und Auspeise-Geschwindigkeiten unterstellen und zum anderen ein ganzzahliges Verhältnis aus $\max(c_{in}, c_{out})/\min(c_{in}, c_{out})$ haben. Auf diese Weise sind stets alle Zielzustände definiert, zwischen denen man innerhalb 24 Stunden wechseln kann. Da die Preise ebenfalls in täglicher Auflösung empirisch vorliegen bzw. später simuliert werden, ist das System über Zustandsraum und Zeit konsistent aufgebaut. Befindet man sich beispielsweise am Tag t in Zustand Z_n , so kann man zum Tag $t + 1$ in die Zustände Z_{n-4} (Extraktion) und Z_{n+1} (Injektion) wechseln. Bei der Definition der möglichen Sprünge (Knotenverbindungen) sind zusätzlich

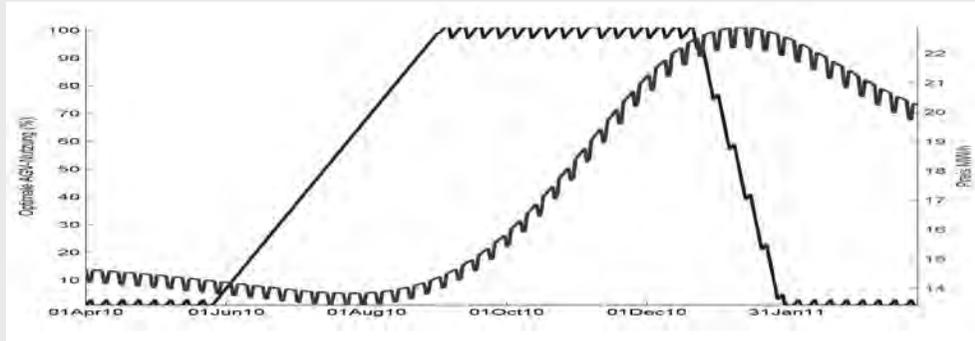
Abb. 4 | PFC für NCG-Settlementpreise; grau hinterlegt der Bewertungszeitraum



23 vgl. Kapitel 2.2

24 vgl. Bertsekas, D.

Abb. 5 | Gegenüberstellung von PFC und deterministischer Strategie



Rahmenbedingungen nötig, um die AGV-Beschränkungen zu berücksichtigen.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch den Aufbau eines Zustandssystems sowie einen möglichen Lösungspfad für eine Gasspeicherscheibe mit 4 m³ AGV, c_{in} = 1, c_{out} = 2 und 10 Tagen Vertragslaufzeit (jeweils leere Übergabe bei Vertragsbeginn und -ende).

Die Integration von flexiblen, z. B. füllstandsabhängigen Kosten ist durch Hinzufügen des entsprechenden Terms leicht umsetzbar. Nicht konstante Ein- und Auspeisefunktionale, z. B. ein funktionaler Zusammenhang zu dem genutzten AGV, können auch in das System integriert werden. Dies erfordert jedoch häufig eine Interpolation während der Berechnungen, da meist nicht alle möglichen Zustände exakt die diskreten vorgegebenen Zustände treffen. Bei einigen Funktionen ist es

durch nichtlineare Zustandsachsen möglich, die rechenaufwendige Interpolation zu umgehen.

3.5 Deterministische Optimierung über die PFC

Abbildung 4 zeigt eine Preis-Forwardkurve (PFC) in täglicher Auflösung für die NCG-Settlementpreise vom 6.10.2009.

Anhand der definierten Endbedingung (in unserem Fall: leere Übergabe am Vertragsende) lassen sich die Cashflows im letzten Zeitschritt einfach berechnen. Dynamisch arbeitet man sich nun rückwärts durch das Statesystem und sucht für jeden Zustand Z_n^t ($n = 1, \dots, N$ und $t = 0, \dots, T$) zum Zeitpunkt t den optimalen aus allen 3 möglichen Anschlusspunkten in $t+1$. Zum Schluss dieses rekursiven Verfahrens erhält man den Wert des Speichers in allen Zuständen Z_n^0 zum Zeitpunkt 0. Der

für uns relevante Zustand Z_1^t (leerer Speicher zum Zeitpunkt 0) beinhaltet den gesuchten Wert des Speichers. Für den Beispielspeicher haben wir einen Wert von 6,3583 Millionen Euro ermittelt. Anhand der ermittelten optimalen Lösung für den Wert des Speichers lässt sich nun auch der optimale Fahrplan entwickeln. Dieser ist in Abbildung 5 gegen die relevanten Preise geplottet.

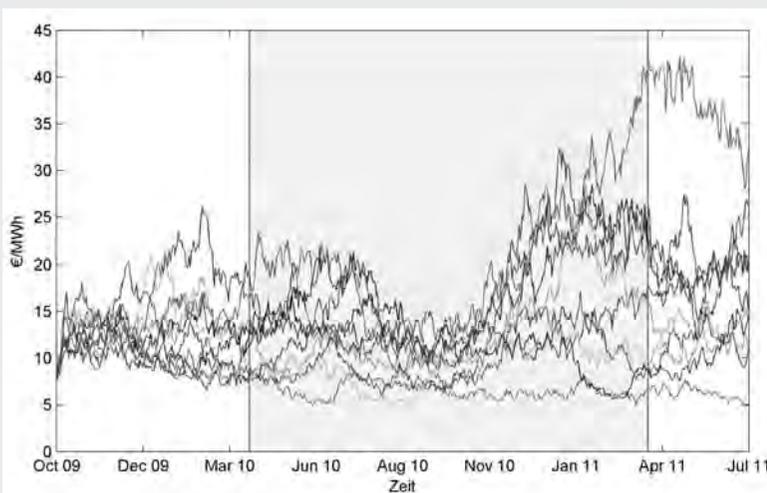
3.6. Stochastische Optimierung

Um das gegebene Problem in einem stochastischen Umfeld zu lösen, gibt es verschiedene Ansätze, u. a. Finite Differenzen-Gitter, Trinomialbäume oder Least Squares Monte Carlo (LSMC)-Simulation.

Wenn das Modell mehrere Faktoren hat (insbesondere mehr als 2), empfiehlt es sich²⁵, einen LSMC-Algorithmus aufzusetzen.²⁶ Zur Durchführung erzeugt man im ersten Schritt eine ausreichend große Anzahl an Monte Carlo Simulationen für alle Risikofaktoren. Abbildung 6 zeigt mehrere aus einem Bündel von 10.000 Simulationen für NCG-Spotpreise. Die Simulationen sind im Bewertungszeitraum in der Grafik grau hinterlegt.

Nach der Simulationserstellung folgt die Definition des Zustandssystems anhand von physischen Restriktionen und ggf. weiteren Kontraktspezifikationen. Das System für unsere Beispielbewertung ist im Aufbau identisch mit dem Zustandssystem aus der deterministischen Optimierung an der PFC. Nun folgt die Ermittlung der optimalen Strategie, um durch eine optimale Steuerung des Spei-

Abb. 6 | 10 Spotpreis-Simulationen; grau: Bewertungszeitraum



25 vgl. Wilmott, P.

26 vgl. Longstaff, F.A., Schwartz, E.S.

chers den maximalen Gewinn zu erzielen:

$$V_0 = \max_{c_t \in \{c_{in}, c_{out}, 0\}, t=0, \dots, T} E \left[\sum_{t=0}^T e^{-rt} c_t \cdot P_t \mid F_t \right]$$

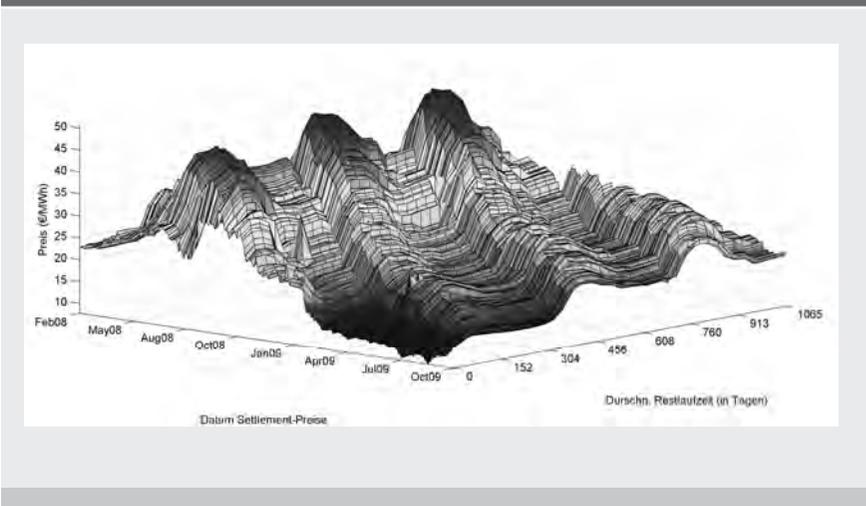
wobei F_t den in t verfügbaren Informationsstand über Preise und aktuelle Zustände bezeichnet. Im Zentrum der rekursiven LSMC-Lösungsmethode steht dabei das Continuation Value Konzept. Der Continuation Value CV_{t+1}^n beinhaltet die Summe der optimierten Cashflows für den Zeitraum $t+1$ bis T , die erzielt wird, wenn man heute in den Zustand z_n wechselt. Zu beachten ist, dass der CV immer auf die Vektoren der simulierten Risikofaktoren, in unserem Beispiel der lang- (ξ_l) und der kurzfristige Prozess (χ_c), regressiert wird. Für eine ausführliche Darstellung dieses Konzepts, insbesondere des Regressionsaufbaus für die Ermittlung des Continuation Values sei auf den Artikel von Borchert, J. und Hasenbeck, M²⁷ verwiesen.

4 Steuerung und Bewertung von Gasspeichern im Terminmarkt mit einem Forwardkurvenmodell

4.1. Formulierung des Forwardkurvenmodells

Die empirischen Verläufe der Forwardkurve zeigen, dass sich deren Form im Zeitablauf verändern kann, z. B. in Form einer Parallelverschiebung, einer Veränderung der Steigung bzw. der Krümmung der einzelnen Segmente. Dieses wird an-

Abb. 7 | empirische Forwardkurven



hand der empirischen Forwardkurven aus der Abbildung 7 ersichtlich.

Daraus folgt die Forderung, mehrere Faktoren zur Beschreibung der Veränderung der Terminmarktkurve in einem stochastischen Prozessmodell zu verwenden:

$$dF_{t,T} = F_{t,T} \left(\sum_{i=1}^n \sigma_i(t, T) dZ_i(t) \right)$$

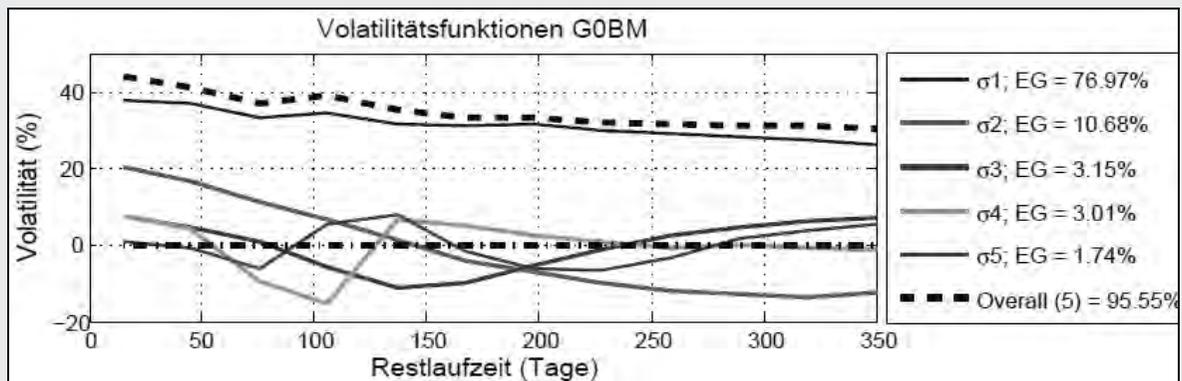
In der obigen Gleichung werden unterschiedliche Volatilitätsstrukturen durch einzelne zugrunde liegende Zufallsprozesse getrieben.

Eine sinnvolle Analyse und eine Auswahl der in der Forwardkurve vorkommenden Volatilitätsstrukturen lässt sich mit der Principle Component Analyse durchführen, bei der die Eigenwerte und Eigenvektoren der Varianz-Kovarianz- oder der Korrelationsmatrix berechnet

werden. Die Eigenvektoren zeigen die Beziehung zwischen jedem Segment der Forwardkurve und dem für diesen Eigenvektor zuständigen Zufallsprozess an. Aus der Linearkombination der PC (Volatilitätsstruktur) und den zugrunde liegenden Zufallsprozessen lässt sich wiederum die Veränderung der Forwardkurve rekonstruieren. Der Eigenwert (EG) jedes Eigenvektors zeigt das Gewicht der Volatilitätsstruktur in der Gesamtvolatilität an.

Das Ergebnis der PCA in Abbildung 8 zeigt, dass die häufigste Veränderung der Terminmarktkurve eine Parallelverschiebung darstellt – 77% der Gesamtvolatilität gehen auf diese Bewegung zurück. Daneben ist am zweithäufigsten eine entgegengesetzte Bewegung zwischen kurzem und langem Ende der Terminmarktkurve zu beobachten. Die weiteren Volatilitätsstrukturen, wie z. B. die Wölbung usw. besitzen ein weit geringeres Gewicht in der

Abb. 8 | Volatilitätsfunktionen



27 vgl. Borchert, J. und Hasenbeck, M

Gesamtvolatilität der Terminmarktkurve.

Je mehr Faktoren verwendet werden, desto realistischere Veränderungen können durch ihre Linearkombinationen und den dazugehörigen Hauptkomponenten dargestellt werden. Bei Forwardkurvenmodellen wird sich zumeist auf die Beschreibung von 3 bis 5 unterschiedlichen Volatilitätsstrukturen beschränkt, um den Trade off zwischen Genauigkeit und Komplexität des Forwardkurvenmodells gerecht zu werden. In den folgenden Abschnitten wird noch eingehend erläutert, warum gerade nur die Volatilitätsstrukturen jenseits der Parallelverschiebung Wert generierend für den Speicher bei Anwendung der jeweiligen Strategie sind.

Im Weiteren sollen drei verschiedene Ansätze vorgestellt werden, mit denen der Speicher entlang der Entwicklung der Forwardkurve gesteuert wird und mit deren Hilfe sich eine Bewertung des Speichers im Terminmarkt durchführen lässt. Die drei Bewertungsverfahren lassen sich hinsichtlich ihrer impliziten Handelsstrategie unterscheiden:

- Intrinsic Hedge (IH) Strategie
- Intrinsic Rolling Hedge (IR) Strategie
- Extrinsic Rolling Hedge (ER) Strategie

Diese sollen im weiteren Verlauf näher erläutert werden. Die Ausführungen stützen sich maßgeblich auf die Autoren Bjerksund, P. et al., Gray, J., Khandelwal, P. und Eydeland und Wolyniec ab.

4.2 Bewertung mit einer Intrinsic Hedge Strategie

Die einfachste Form der Speicherbewirtschaftung entlang der Forwardkurve stellt der Intrinsic Hedge dar. Hierbei wird gegen die in der Saisonalität der Forwardkurve liegende Arbitragemöglichkeit optimiert, um eine risikoneutrale Position in Long und Short-Forwardpositionen einzugehen, die den höchstmöglichen Gewinn mit der Nutzung des Speichers erwirtschaftet. Der IH wird am ersten Tag der Speicherbewirtschaftung vorgenommen und bis zum Ende der Speichernutzungsdauer nicht mehr verändert. Mit Hilfe dieser Strategie kann der innere Wert des Speichers im Zeitpunkt t0 berechnet werden. Er stellt somit eine Wertuntergrenze des im folgenden Abschnitt dargestellten Intrinsic Rolling Hedge Verfahrens dar. In der praktischen Umsetzung kann ein einfaches lineares Optimierungsproblem aufgestellt werden, um das optimale Hedgeportfolio (monatliche Forwardpositionen) unter Einbehaltung aller Speicherrestriktionen zu errechnen:

$$v_t = \text{Max}_x \left[- \sum_i F_t^i x_i \right]$$

$$\forall i : EL_MAX \leq x_i \leq L_MAX$$

$$\forall j \geq 1 : \sum_{i=1}^j V_i \leq SP_Vol$$

mit :

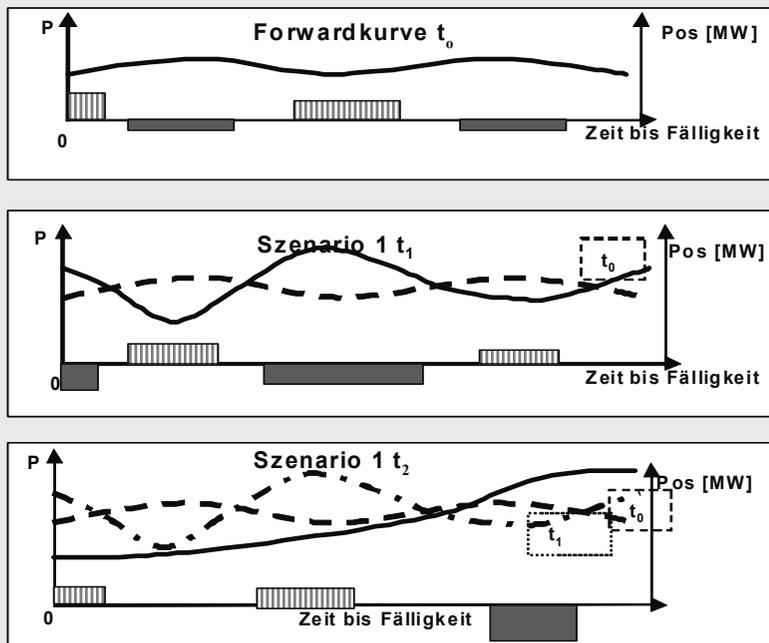
- EL_MAX = maximale monatliche Entladevolumen
- L_MAX = maximale monatliche Ladevolumen
- SP_Vol = Speichervolumen
- F = Forwardpreis des i-ten Monats zum Zeitpunkt t

4.3 Bewertung mit Intrinsic Rolling Hedge Strategie

Wie oben bereits skizziert, bewegt sich die gesamte Forwardkurve stochastisch in verschiedenen Figuren. Die Wertberechnung entsprechend des IH vernachlässigt die Möglichkeit, innerhalb des Terminmarktes auf Veränderungen der Struktur der Terminmarktkurve zu reagieren. In jedem Entscheidungszeitpunkt kann bei veränderter Informationslage der optimale risikoneutrale Hedge angepasst und ein aus der Handlungsweise resultierender Zusatzertrag verbucht werden.

In Abbildung 9 ist die optimale risikofreie Anpassung des Hedge entlang der Terminmarktkurve in drei aufeinander folgenden Zeitpunkten dargestellt. Nachdem im Zeitpunkt t0 der optimale Hedge berechnet wurde und in t1 eine neue Forwardkurve am Markt gehandelt wird, kann eine Ergebnisverbesserung im Vergleich zu t0 durch eine Veränderung der Forwardpositionen erreicht werden. Hierzu wird in den Zeitpunkten, in denen sich die Forwardkurve erhöht, eine zusätzliche Shortposition und im umgekehrten Fall eine Longposition aufgebaut bzw. die in t0 eingegangenen Positionen angepasst. Die resultierende Position in t1 ist analog zu t0 eine risikofreie Position, deren Bestimmung analog zum IH ein deterministisches Optimierungsproblem unter Beachtung der in t0 getätigten Geschäfte und der vorhandenen Speicherrestriktionen darstellt. Da die gesamte neue Terminkurve im Zeitpunkt t1 handelbar ist, wird diese erneute Optimierung unter vollständiger Information durchgeführt und kann einen zusätzlichen risikofreien Ertrag zu dem in t0 erzeugen (im schlechtesten Fall würde keine Aktion erfolgen und somit kein Zusatzertrag generiert werden). Her-

Abb. 9 | optimale risikoneutrale Anpassung des Hedges im Zeitablauf



vorzuheben sind bei dieser Form der Handelsstrategie somit zwei wesentliche Aussagen.

- Die Tradingaktivitäten nutzen neu auftretende risikofreie Handelsmöglichkeiten entlang der Terminmarktkurve in Folge deren Veränderung zwischen zwei Zeitpunkten.
- Der IH in t_0 stellt eine untere Grenze des Gesamtwertes aller Hedgingaktivitäten bis zum Zeitpunkt T dar.

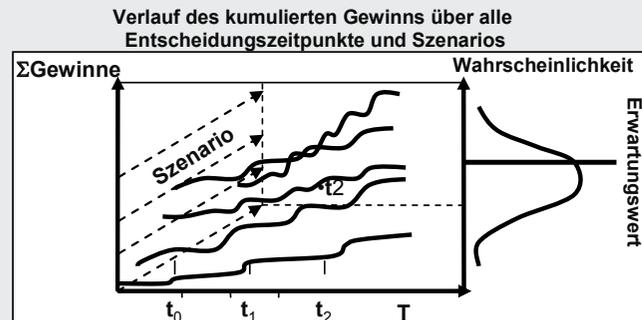
Durch das Rollieren des Hedges kann im Zeitablauf in weiteren Zeitpunkten ein Zusatzertrag zum inneren Wert des Speichers generiert werden. Dieser Zusatzwert ist ex ante unsicher. Die Bestimmung des Erwartungswertes des Zeitwertes des Speichers unter Durchführung des IR-Verfahrens erfolgt mit Hilfe der Monte Carlo Simulation eines Forwardkurvenmodells, wie es z. B. eingangs dieses Kapitels vorgestellt wurde. Hierzu wird die Veränderung der optimalen risikoneutralen Position in jedem Entscheidungszeitpunkt und Monte Carlo Szenario der Forwardkurve berechnet. Der Zeitwert in t entspricht dem Erwartungswert der kumulierten Erträge von $t \rightarrow T$ über alle Szenarien.

Dieses Verfahren kann sich entweder auf Aktivitäten im Terminmarkt vor Fälligkeit der Positionen beschränken, oder auch die physische Ausübung des Speichers in jedem Tag am Spotmarkt explizit berücksichtigen.

Beim physischen Hedging in einem Markt mit liquide handelbaren balance of month oder weekahead Produkten kann – solange der Spotmarkt teurer ist als dieses Produkt – unter Beachtung der Restriktionen im Spotmarkt ausgespeist werden und der finanzielle Wert mit einer Longposition im balance of month gehedged werden. Eine umgekehrte Vorgehensweise wird für niedrigere Spotnotierungen als balance of month -Notierungen gelten.

Ein Hauptnachteil der IR-Steuerung und -Bewertung liegt in der Tatsache, dass nur Volatilitätsbänder Wert generierend sind, welche die Struktur der Kurve verändern (z. B. Drehung, Wölbung,...). Aufgrund der Arbitragestrategie kann durch eine parallele Verschiebung der Terminmarktkurve in nach gelagerten Zeitpunkten i. d. R. kein wesentlicher Zusatzertrag generiert werden, da die Nettoposition entlang der Terminmarktkurve nach jeder Tradingaktivität Null ist. In Abbildung 8 ist gezeigt worden, dass ein Großteil der Volatilität sich in Folge von Parallelver-

Abb. 10 | Prinzip des intrinsic rolling hedge



schiebungen äußert (ca. 76 % der Gesamtvolatilität). Die restlichen Volatilitätsstrukturen, die innerhalb der Terminmarktkurve auftreten, besitzen eine wesentlich kleinere Eintrittswahrscheinlichkeit. Hieraus erklärt sich, dass die resultierende Wertverteilung des Verfahrens eine hohe Rechtsschiefe aufweist (siehe Abbildung 11).

4.4 Bewertung mit einer Extrinsic Hedge Strategie

Im Folgenden sollen abschließend die Extrinsic Static Hedge und die Extrinsic Rolling Hedge Strategie und das daraus resultierende Wertberechnungsverfahren vorgestellt werden. Im Zusammenhang mit dieser Steuerung wird der Speicher als Bündel von Kalenderspread-Optionen aufgefasst. Jede Option besteht aus einem Monat, in dem Energie gespeichert, und in einem nach gelagerten Monat, in dem die Energie ausgespeichert wird. Innerhalb eines Kalenderjahres enthält der Speicher bei monatlicher Auflösung ein Bündel von $(12^2 - 12) / 2 = 66$ Kalender Spread Optionen. Aus diesem Möglichkeitenraum muss die Zusammensetzung der Kalenderspread-Optionen (Spread Bündel) mit dem höchsten Zeitwert unter Einbehaltung der Speicherrestriktionen gewählt werden. Der Zeitwert aller zum Zeitpunkt t_0 möglichen Kombination aus Kalenderspread-Optionen kann wiederum über den Erwartungswert des Cash-Flows innerhalb der Monte Carlo Simulation berechnet werden. Die Steuerung (Hedging) des Zeitwertes des optimalen Spreadbündels erfolgt in dieser Vorgehensweise anhand des Deltas in den zugrunde liegenden Forwardpositionen. Es handelt sich hierbei um einen dynamischen Hedge, bei dem die Delta-Positionen der betrachteten

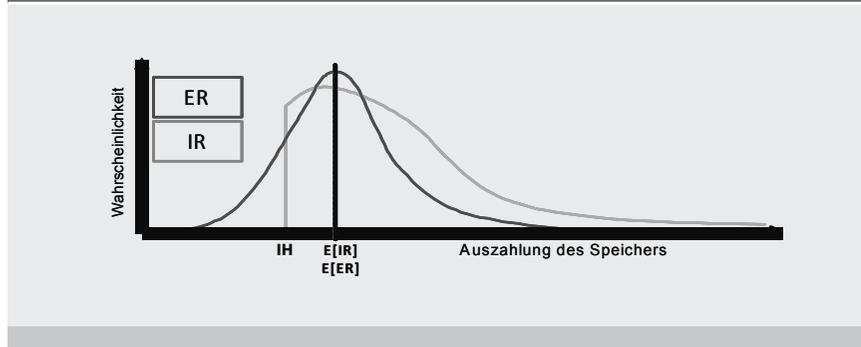
Kalenderspread-Optionen kontinuierlich den Veränderungen der Terminmarktkurve angepasst werden und somit eine Realisierung des Zeitwertes erlauben.

Im Zeitablauf könnte es sich aber als vorteilhaft erweisen, eine andere Kombination von Kalenderspread-Optionen delta-neutral zu hedgen, die einen höheren Zeitwert besitzen als die bisher betrachteten. Hierzu wird in die neue Delta-Position des veränderten Spreadbündels übergegangen (gerollt) und diese solange Delta-neutral gehalten bis sich eine erneute Gelegenheit bietet, eine Veränderung in der Zusammensetzung der optimalen Kombination der Kalenderspread-Optionen vorzunehmen. In jedem Zeitpunkt muss somit der Händler zum einen berechnen, ob eine Veränderung des zu steuernden Spreadbündels unter Berücksichtigung aller Umstrukturierungskosten sinnvoll ist. Zum anderen muss er in jedem Zeitpunkt die notwendigen Delta-Positionen eingehen, um den realisierbaren Zeitwert zu sichern.

4.5 Fazit: Steuerung/Bewertung eines Speichers im Terminmarkt

Der Wert eines Speichers wird marktseitig insbesondere von der Volatilität und der Korrelation der einzelnen Terminmarktsegmente getrieben. Je geringer die Korrelation zwischen den Segmenten ausgestaltet ist, desto größeren Werteeinfluss besitzt die Volatilität. Empirische Untersuchungen von Gray und Khandelwal haben gezeigt, dass der Erwartungswert des Cash-Flows aus ER- und IR-Strategie äquivalent sind. Deshalb stellt sich die Frage, welches der beiden Verfahren operativ eingesetzt werden sollte. Hierbei stellt sich zum einen die Frage, wie die individuelle Risikopräferenz des Traders ausgelegt ist, da die bei-

Abb. 11 | Vergleich der Auszahlungsprofile der einzelnen Hedgingstrategien



den resultierenden Cash-Flow Verteilungen nicht identisch sind. Daneben sind bei der Durchführung der Hedging Strategie im operativen Betrieb (in einem Pfad der Monte Carlo Simulation) die Cash-Flows und die Hedginganteile sehr unterschiedlich. Die Verteilung des resultierenden Cash-Flows der IR-Strategie enthält eine extreme Linksschiefe und besitzt somit eine hohe Streuung von realisierbaren Cash-Flows, die größer sind als der IH. Daneben existiert bei dieser Strategie eine sichere untere Grenze des Wertes, die direkt in Form des IH gesichert werden kann. Die Verteilung der Cash-Flows des Rolling Delta-Verfahrens ist symmetrischer und durch die Delta-Steuerung enger.

Die Wahl des Bewertungs- und Steuerungsverfahrens des Speichers im Terminmarkt hängt im operativen Einsatz daneben sowohl von unternehmensinternen, als auch von unternehmensexternen Faktoren ab.

Die aufgezählten Verfahren stellen zum einen an das Know How der Handelsabteilung als auch an die methodische Kompetenz der im Unternehmen befindlichen Risikomanagement- und Bewertungskapa-

zitäten steigende Anforderungen. Die Bestimmung und Durchführung eines IR-Hedges ist reaktiv und ausgerichtet an den Informationen zum Zeitpunkt des Handelns. Das Rolling Delta-Hedging stellt eine im Markt aktivere Tradingaktivität dar, da es sich an Erwartungen ausrichtet und die Zukunft in der Tradingstrategie antizipiert. Daneben kann mit der Frequenz des Deltahedges auch die Exposition gegenüber Parallelverschiebungen der Terminmarktkurve gesteuert werden (wenn die Summe aller Delta-Positionen über die gesamte Terminmarktkurve ungleich Null ist. Der IH kann als Benchmark sowohl für das IR als auch das ER verwendet werden, anhand dessen der Handel im Rendite-Risikoraum performen muss.

Daneben stellen die Verfahren steigende Anforderungen an die Reife des Marktes als Quelle der Hedgingaktivitäten. Bei Vorliegen eines sehr illiquiden Marktes mit hohen Bid-Ask-Spreads ist eine praktische Realisierung des theoretischen Zeitwertes des Speichers mit Hilfe des Delta-hedgings kaum möglich. Zudem ist der Zeitwert wesentlich abhängig von der Form der im Markt befindlichen Volatili-

tätsstrukturen. Die Analyse des NCG-Marktgebietes hat gezeigt, dass ca. 74 % der Volatilität des Marktes nicht wert treibend beim Einsatz des IR-Verfahrens genutzt werden können.

5 Vergleich der Ergebnisse zwischen einer LSMC-Spotmarkt-Bewertung und einer IR-Terminmarkt-Bewertung anhand eines HJM-Modells

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der LSMC-Spotmarkt-Bewertung und der Intrinsic-Rolling-Forwardmarkt-Bewertung vorgestellt und miteinander verglichen.

5.1 Auswertung der LSMC-Spotmarkt-Bewertung

Für die vorgestellte Beispielscheibe ermitteln wir aus 10.000 Simulationen einen Wert von 7,45 Millionen Euro.²⁸ Die Verteilung der Cashflows des ungehedgten Speichers ist in Abbildung 12 wiedergegeben. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % liegt der erzielte, abgezinste Cashflow am Ende der Kontraktlaufzeit innerhalb des angegebenen Konfidenzintervalls (gestrichelte Linien). Die Verteilung ist rechtsschief, und mit einer relativ geringen Wahrscheinlichkeit ist es möglich, extrem hohe Gewinne bei nicht geschlossenen Positionen zu erzielen.

Der Cash-Flow und dessen Verteilung resultiert aus zwei unterschiedlichen Handelsmotivationen heraus:

²⁸ Wir haben eine risikoneutrale Zinsrate von 3% unterstellt.

Abb. 12 | Cashflows des ungehedgten Gasspeichers am Spotmarkt

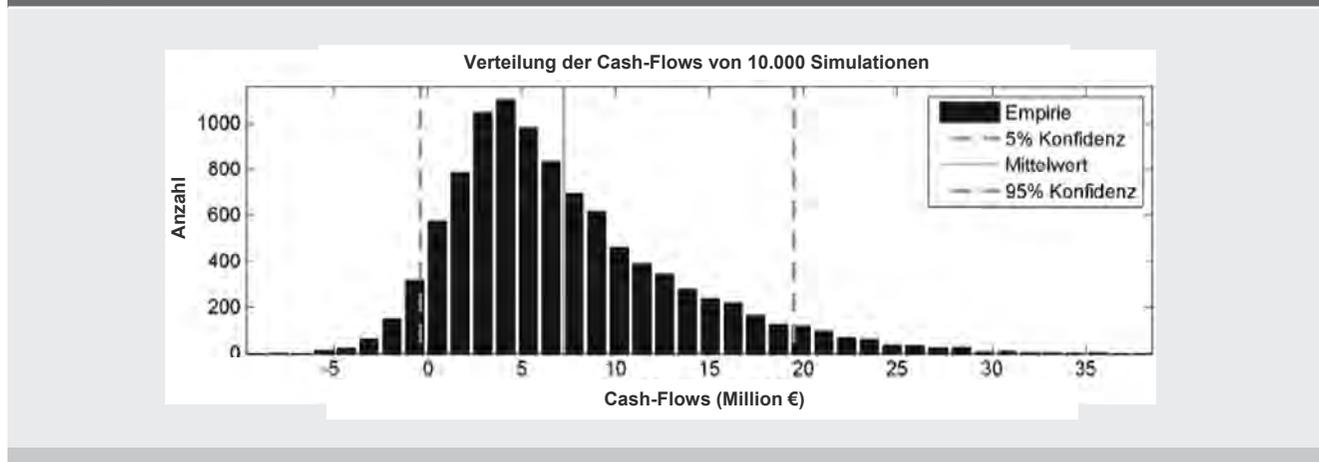


Abb. 13 | Speichereinsatz innerhalb eines Szenarios entlang der Monte Carlo Simulation

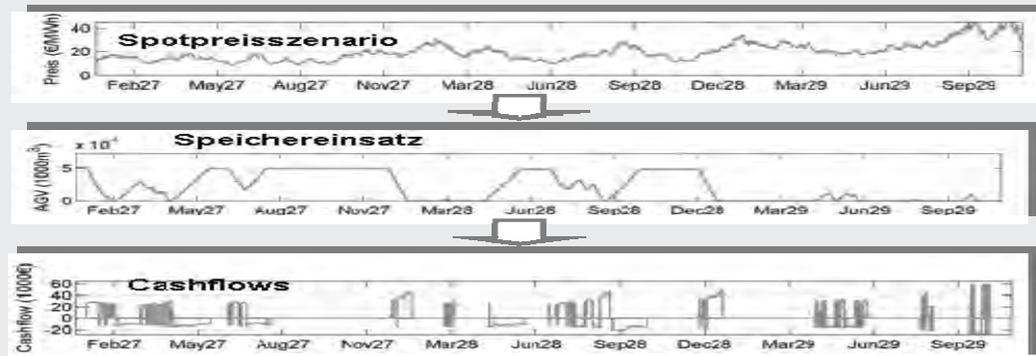
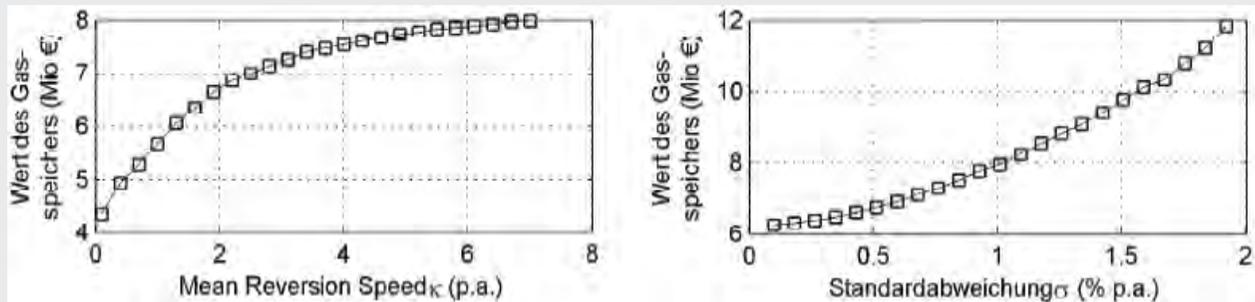


Abb. 14 | Sensitivität des Speicherwertes von Parametervariationen der Prozesskomponenten



- Saisonale Bewirtschaftung des Speichers
- Kurzfristige Bewirtschaftung des Speichers

Bei der saisonalen Bewirtschaftung des Speichers am Spotmarkt wird in der Periode mit niedrigen Preisen eingespeist und in der Periode mit hohen Preisen am Spotmarkt ausgespeist. Die Simulationen des Zweifaktormodells aus 3.1 haben gezeigt, dass der saisonale Spread insbesondere durch die geometrische Brownsche Bewegung beeinflusst wird und dieser nicht konstant im Zeitablauf ist. Die saisonale Bewirtschaftung des Speichers ist maßgeblich für die Schiefe der Verteilung – verursacht durch die Lognormalverteilung der langfristigen Preiskomponente – und die möglichen auftretenden negativen Gesamtdeckungsbeiträge (bei Umkehr bzw. starker Veränderung des generellen Preisniveaus) verantwortlich. Die Bewertung zeigt, dass das Wertpotential gegenüber einem Einfaktormodell und dessen Verteilung deutlich erhöht ist. Speicherbe-

treiber, die vor dem Auftreten der Finanzmarktkrise auf die „natürliche“ Sommer-Winter-Saison der Gaspreise am Spotmarkt ihre Tradingstrategie ausgerichtet und gespeichert haben, wurden durch das generelle überproportionale Absinken der Spotpreise in der Ausspeicherperiode mit hohen negativen Deckungsbeiträgen belastet. Das Ergebnis zeigt, dass Risikomanagementapplikationen bei dieser Form der Handelsmotivation dringend Mehrfaktormodelle zugrunde liegen sollten (unter der Voraussetzung, dass keine Hedgingaktivitäten am Forwardmarkt stattfinden).²⁹

Die kurzfristige Bewirtschaftung des Speichers ist aufgrund der guten Antizipation des kurzfristigen Mean Reverting Levels wesentlich risikoärmer und insbesondere auf potentiell auftretende Preisspitzen ausgerichtet. Hier kommt der volle

²⁹ Aus vorhandenen längeren Spotpreis-Zeitreihen für Gas lassen sich häufig je nach Samplezeitraum unterschiedliche Parameter bestimmen, daher sollte man den Kalibrierungszeitraum mit Bedacht in Hinsicht auf das zu bewertende Produkt wählen.

Optionscharakter zum Tragen, täglich den Speicher entsprechend der Preislage frei zu disponieren. Das Wertpotential ist aber aufgrund der Speicherrestriktionen (Ausspeise- und Einspeiseverhalten und der Spotpreischarakteristik) begrenzt (siehe Abbildung 13).

Um die Sensitivität des Wertes unseres Beispielspeichers gegenüber den Parametern des kurzfristigen Prozesses χ_t (Mean Reversion Geschwindigkeit κ und Volatilität σ_χ) zu illustrieren, haben wir den Wert des Speichers für alternative Parameterkonstellationen berechnet. Abbildung 14 zeigt links die Wertvariationen, die mit wechselndem κ bei konstantem σ_χ einhergehen. Mit zunehmender Mean Reversion Geschwindigkeit steigt die Rendite mit sinkendem Grenzzuwachs an. Durch die schnellere Rückkehr zum Gleichgewicht lassen sich höhere Spreaderträge verwirklichen, der Zuwachs wird allerdings durch die Leistungsbeschränkungen der Einspeicherung zunehmend beschränkt (Heuristisch: Irgendwann kann der Spei-

Abb. 15 | Verteilung der Cash-Flows bei Start der Bewirtschaftung xx Monate vor Beginn der Erfüllung

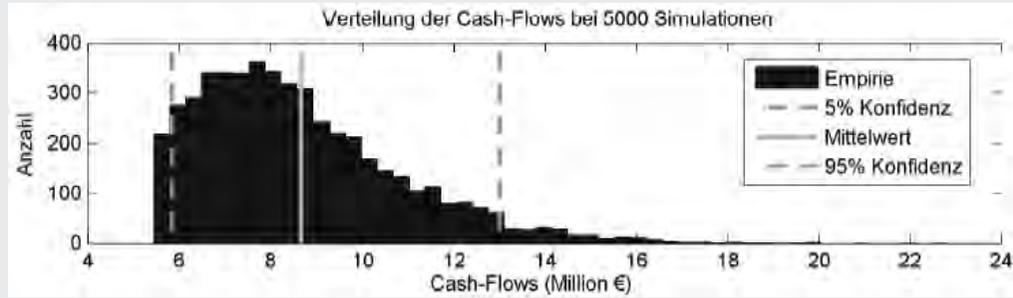
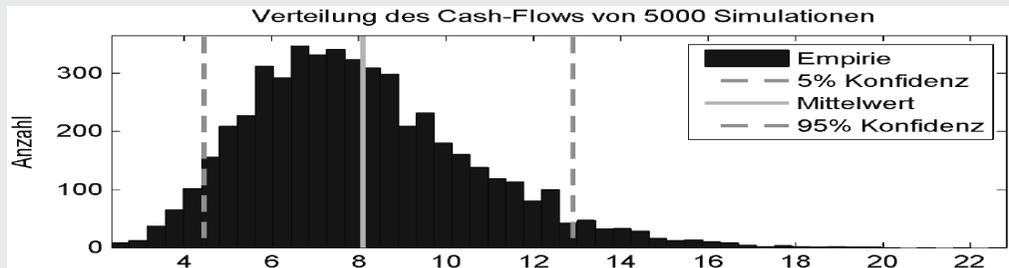


Abb. 16 | Verteilung der Cash-Flows bei Start der Bewirtschaftung bei Beginn der Erfüllung



cher³⁰ nicht mehr schnell genug reagieren). Die Wertsteigerung tritt somit ab einem bestimmten Level in eine Sättigung ein. Die rechte Seite von Abbildung 14 zeigt die exponentielle Zunahme des Speicherwertes bei steigender Volatilität σ_x und konstantem κ . Dieses Ergebnis ist intuitiv nachvollziehbar, weil größere Preisschwankungen höhere Gewinnmöglichkeiten generieren und die Varianz als zweites Moment quadratisch auf den Optionswert des Speichers wirkt. Das Wertpotential tritt somit in keine Sättigung bei der saisonalen Komponente ein, da hier die Speicherrestriktionen geringer wirken.

Bei der Speicherbewirtschaftung sollte demnach eine enge Abstimmung zwischen der Analyseabteilung und der Tradingabteilung vorgenommen werden, um die Sensitivität der Speicherträge von Parametervariationen des zugrunde liegenden Spotmarktes genau zu identifizieren und daraufhin die Handelsstrategie abzustimmen. Daneben bestimmt das Rendite-Risikoverhältnis der beiden Handelsstrategien in Verbindung mit der Risiko-

aversion des Händlers die Aufteilung der Speicherbewirtschaftung in die beiden Handelsmotivationen.

5.2 Auswertung der Intrinsic-Rolling-Futuremarkt看wertung

Eine Möglichkeit der eher risikoaversen saisonalen Bewirtschaftung von Speichern liegt in der Intrinsic Rolling Strategie. Bei dem Intrinsic Rolling Verfahren wurden zwei Berechnungen durchgeführt:

- Aufnahme der Handelsaktivität bei Vertragsabschluss
- Aufnahme der Handelsaktivität mit Beginn des Kontraktes

Das Ergebnis der ersten Bewirtschaftungsmethode spiegelt die im theoretischen Kontext gemachten Aussagen der linkssteilen und rechtsschiefen Verteilung mit der unteren Wertgrenze des IH wider. Das Potential durch das Rollieren des IH innerhalb der Erfüllungsperiode beläuft sich im Erwartungswert auf 8,67 Mio €. Der IH generiert 5,45 Mio €. Das Konfidenzniveau ist wesentlich enger als bei der am Spotmarkt ausgerichteten Bewirtschaftung. Dafür ist auch das Potential auf

sehr hohe Erträge wesentlich geringer als bei der reinen Spotmarkt看wertung.

Die Form der Verteilung der Cash-Flows verändert sich stark, wenn zwischen Übernahme des Assets und Beginn der Bewirtschaftung eine lange Zeitdauer vergeht. In der zweiten Untersuchung wurde die Bewertung zum Stichtag 06.09.2009 mit Beginn der Aktivitäten zum Beginn der Erfüllungsperiode ab dem 01.04.2010 vorgenommen. Hierbei resultiert ein Erwartungswert der Verteilung mit 8,08 Mio € und ein Erwartungswert des IH von 6,46 Mio €. Der geringere Erwartungswert der Verteilung kommt dadurch zustande, dass weniger Zeit für die Wertsteigernde Rolling-Strategie zur Verfügung steht.

Im Gegensatz zum ersten Verfahren bei dem der erste IH in allen Monte Carlo Simulationen auf der gleichen aktuellen Forwardkurve vorgenommen wurde, sind aus Sicht von t_0 in diesem Fall auch die Forwardkurven beim ersten IH zufallsgeneriert und damit unsicher. Es existiert somit keine ex ante definierte Untergrenze des Gewinns.

30 vgl. Boogert A., de Jong C.

5.3 Vergleich der beiden Verfahren

Die Verteilung bei der Intrinsic Rolling Handelsstrategie ist wesentlich enger als die bei ungehedgter Spotmarktbewirtschaftung. Dies liegt zu einem daran, dass bei der saisonalen Bewirtschaftung im Spotmarkt durch die Brownsche Bewegung ein großes Wert- bzw. Verlustpotential genutzt werden kann. Die äquivalente stochastische dominante Komponente im Forwardmarkt in Form der Parallelverschiebung wirkt sich auf die Ergebnisverteilung der Intrinsic Rolling Strategie und sofortiger Handelsaufnahme bei Übergabe des Assets dagegen kaum aus. Daneben gibt es bei dieser Strategie eine definierte positive untere Grenze für das Gewinnpotential und lässt sich somit gut in die wirtschaftliche Planung einstellen. Risikoaverse Händler könnten somit ihre Handelsstrategie für die saisonale Bewirtschaftung im Terminmarkt mit der Intrinsic Rolling Strategie aufbauen und zusätzlich einen Anteil des Speichers gegenüber dem Spotmarkt bewerten und bewirtschaften.

Aus dem Spotmarkt-Bewertungsverfahren lassen sich hierfür Ausübungsgrenzen der Speicherbewirtschaftung ableiten, die eine bedeutende Handelsunterstützung darstellen können. Die Grenzen zeigen dem Händler an, welche Aktion unter Einbeziehung der Unsicherheit bei definiertem aktuellem Spotpreis, Füllstand und Tag im Jahr zu wählen ist.

Die Bewertung des Intrinsic Rollings gibt dem Händler zum einen das Wertpotential für eine weitere risikoneutrale Bewirtschaftung im Terminmarkt an, als auch die aktuell optimale Hedgeempfehlung zur Nutzung der Saisonalität der Forwardkurve.

Sehr risikofreudige Händler können zudem einen Teil des eingespeicherten Gases am Terminmarkt ungehedged belassen, um von der Stochastik der langfristigen Preiskomponente zu profitieren. Die Gesamtstrategie ist somit aufgebaut aus verschiedenen Anteilen der Exposition gegenüber der lang- und kurzfristigen Komponente des Gaspreisprozesses und sollten sich an der Risikoaversion des Handels bzw. des Unternehmens und der Speicherrestriktionen ausrichten.

Literaturverzeichnis

- Bertsekas, D. (2005): Dynamic Programming and Optimal Control, Vol.1, 3.ed, Athena Scientific
- Bjersund, P., Stensland, G., Vagstad, F. (2008): Gas Storage Valuation: Price Modelling v. Optimization Methods, NHH Discussion paper, October 2008, 1-31
- Boogert A., de Jong C. (2008) Gas storage valuation using a Monte Carlo method, The Journal of Finance 15 (3), 81-98
- Borchert, J., Hasenbeck, M. (2009): Bewertung und Steuerung von Kraftwerksscheiben, Zeitschrift für Energiewirtschaft, 02/2009
- Brennan, M. J. (1958) The Supply of Storage, The American Economic Review, Vol. 48, No. 1. (mar., 1958), pp. 50-72
- Dixit, A.K., Pindyck, R.S. (1994): Investment under Uncertainty, Princeton University Press
- Eydeland A., Wolyniec K. (2003) Energy and Power Risk Management, John Wiley & Sons, New Jersey
- Gray, J., Khandelwal, P. (2004): Realistic Natural Gas Storage Models II: Trading strategies, Commodities Now, September 2004, 1-5
- Hirschhausen, C. v.: Langfristige Erdgasversorgung Europas, Working Paper WP-GG-15; http://www.tu-dresden.de/wwwleeg/publications/wp_gg_15_hirschhausen_LTM_Ing_vs_russia.pdf
- Hull, J.C. (2009): Options, Futures, and Other Derivatives, 7th ed., Pearson
- Jacob, D. et al. (2008): Klimaauswirkung und Anpassung in Deutschland, im Auftrag des Umweltbundesamts, Forschungsbericht 204 41 138, Dessau, August 2008
- Lautier, D. (2003) Term Structure Models of Commodity Prices, Cahier de recherche du cereg no. 2003-9
- Longstaff, F.A., Schwartz, E.S. (2001): Valuing American Options by Simulation: A Simple Least-Squares Approach, Finance, May 9, 2001, Paper 1-01
- N.N. (2008): Eurostat, table nrg_103m: Versorgung Gas – monatliche Daten, 2008, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>
- N.N. (2008): GTE+ European Capacity Development Report 2008, Brussels, 28.11.2008, www.gje.eu.com
- N.N. (2008): Ramboll Oil & Gas, Study on natural gas storage in the EU, draft final report for DG TREN C1, Virum 2008
- N.N. (2009): Landesamt für Bergbau und Geologie, Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2008, Hannover 2009
- N.N.: BMWi Energiedaten 2008, <http://www.bmw.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html>
- N.N.: BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes, <http://www.bmw.de/BMWi/Navigation/Energie/Energiestatistiken/gasstatistiken.html>
- Nitsch, J. (2007): Leitstudie 2007 "Ausbastrategie erneuerbare Energien", Stuttgart, Feb. 2007
- Pilipovic D. (2007) Energy Risk, 2nd ed., McGraw-Hill, New York
- Schlesinger, M et al., (2007): Energieszenarien für den Energiegipfel 2007, Basel, Nov. 2007
- Schwartz, E. S., Smith, J.E. (2000): Short-Term Variations and Long-Term Dynamics in Commodity Prices, Management Science, Vol.46, No. 7, July 2000, 893-911
- Sorenden, C. (2002) Modeling Seasonality in Agricultural Commodity Futures, The Journal of Futures Markets, Vol.22, No. 5, 393-426(2002)
- Wilmott, P. (2006): Paul Wilmott on Quantitative Finance, John Wiley & Sons Ltd.