

# *Gashandel und Gasbeschaffung*

## LEKTION 3

Dr. Jörg Borchert  
Dr. Thorsten Heimann  
Dr. Ralf Schemm

---

## Speicheroptimierung

---

### Hinweis des Herausgebers

© 2011, Herausgeber dieser Lektion des EUROFORUM-Lehrgangs ist der EUROFORUM Verlag, ein Geschäftsbereich der EUROFORUM Deutschland SE, Düsseldorf. Wir weisen darauf hin, dass das Urheberrecht sämtlicher Texte und Grafiken in dieser Lektion bei dem/n jeweiligen Autor/en und das Urheberrecht des Lehrgangs als Sammelwerk bei dem Herausgeber liegt. Die begründeten Urheberrechte bleiben umfassend vorbehalten. Jede Form der Vervielfältigung z. B. auf drucktechnischem, elektronischem, optischem, photomechanischem oder ähnlichem Wege – auch auszugsweise – bedarf der ausdrücklichen, schriftlichen Einwilligung sowohl des Herausgebers als auch des jeweiligen Autors der Texte und Grafiken. Es ist Lehrgangsteilnehmern und Dritten nicht gestattet, die Lektionen oder sonstige Unterrichtsmaterialien zu vervielfältigen.



**Dr. Ralf Schemm**

Dr. Ralf Schemm ist seit Mai 2007 Berater bei BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Thematische Schwerpunkte: Risikomanagement, Energiehandel, strukturierte Beschaffung, Vertrieb, Gestaltung von organisatorischen Schnittstellen, Gestaltung von betriebs- und energiewirtschaftlichen Aspekten in Investitionsprojekten. Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin, Diplom 2003. 2003 bis 2006 quantitativer Analyst im Risikomanagement Energiehandel, Stadtwerke Leipzig GmbH.

Von 2006 bis 2011 Promotion zum Thema „Modell zur Untersuchung von Investitionsentscheidungen unter Unsicherheit in Stromerzeugungstechnologien“ an der Technischen Universität Berlin im Fachgebiet für Energie- und Rohstoffwesen.

Autor des Buches „Stromhandel – Institutionen, Marktmodelle, Pricing und Risikomanagement“ (Schäffer-Poeschel Verlag, 2006).



**Dr. Jörg Borchert**

Dr. Jörg Borchert ist seit Mai 2006 Berater bei BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH. Seit 2009 Fachteamleiter. Thematische Schwerpunkte: Energiehandel, Vertrieb, Kraftwerke, Risikomanagement.

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin (Diplom 1997) sowie an der London School of Economics and Political Science. Promotion 2003. 1997 bis 1999 Analyst für Projekt- und Exportfinanzierung bei der Berliner Bank AG. 1999 bis 2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Technischen Universität Berlin im am Fachgebiet für Energie- und Rohstoffwesen. 2002 bis 2006 Leiter Risikomanagement Energiehandel, Stadtwerke Leipzig GmbH. Seit 2002 Lehrbeauftragter an der Technischen Universität Berlin für die Lehrveranstaltung „Energiehandel und Risikomanagement“.

Autor diverser Fachartikel und des Buches „Stromhandel – Institutionen, Marktmodelle, Pricing und Risikomanagement“ (Schäffer-Poeschel Verlag, 2006).



**Dr. Thorsten Heimann**

Dr. Thorsten Heimann ist seit 2009 Berater bei BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH.

Thematische Schwerpunkte sind quantitative Analysen und energiewirtschaftliche Modellierung, insbesondere stochastische Ansätze. Von 2004 bis 2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Ökonometrie und Wirtschaftsstatistik an der Universität Münster. Während dieser Zeit Promotion im Bereich der Simulation von Einkommensrisiken. Zuvor Diplom-Studium der Volkswirtschaftslehre, Fachrichtungen Finanzierung und Ökonometrie.

## Inhalt

	<b>Zielformulierung</b>	6
<b>1</b>	<b>Entwicklung des Gasmarktes und Nutzen aus Speichern und Speicherscheiben</b>	7
1.1	Entwicklungstendenzen des Gasbedarfs sowie des Gasaufkommens und der resultierende systemische Speicherbedarf	7
1.2	Eigenschaften von Gasspeichern und betriebswirtschaftliche Bewertungsmöglichkeiten	9
1.2.1	Geringe Implementierungstiefe	11
1.2.2	Mittlere bis hohe Implementierungstiefe	12
1.2.3	Hohe Implementierungstiefe	14
<b>2</b>	<b>Bewertung und Steuerung von Gasspeichern im Terminmarkt</b>	17
2.1	Bewertung mit der „Intrinsic Hedge“-Strategie	17
2.2	Bewertung mit „Intrinsic Rolling Hedge“-Strategie	19
2.2.1	Steuerung des Speichers in täglicher Ausführung	20
2.3	Bewertung mit einem Forwardkurvenmodell im Forwardmarkt	24
2.3.1	Modellierung der Forwardkurve	25
2.4	Fallbeispiele und Ergebnisse der Bewertung im Terminmarkt	26
2.4.1	Bewertung vor Fälligkeit des Speichers	27
2.4.2	Bewertung mit Zeitdelta zwischen Vertragsabschluss und Beginn des Hedgings	29
2.4.3	Sensitivität des Bid-Ask-Spreads	31
2.4.4	Sensitivität in Abhängigkeit von der Handelsfrequenz	32
2.4.5	Sensitivität in Abhängigkeit vom Anfangsfüllstandsniveau	34
<b>3</b>	<b>Bewertung mithilfe eines Spotmodells</b>	37
3.1	Stochastische Optimierung	38
3.2	Spotpreismodellierung	42
3.3	Beispielalgorithmus der LSMC-Simulation	44
3.4	Fallbeispiele und Ergebnisse	48
3.4.1	Bewertung einer Kaverne	50
3.4.2	Bewertung eines Kugelspeichers	55
3.4.3	Sensitivitäten des Kavernenspeichers	59
3.4.4	Sensitivität in Abhängigkeit des Preisprozesses	59
	<b>Zusammenfassung</b>	67
	<b>Literaturverzeichnis</b>	68

## Zielformulierung

In dieser Lektion werden in Kapitel 1 der fundamentale Wandel des Gasmarktes dargestellt und die daraus folgenden Implikationen für die Einsatzweise von Gasspeichern abgeleitet. Hierbei werden kurz die unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten zur Speichernutzung skizziert. Neben den klassischen Möglichkeiten der Speicherbewirtschaftung sind durch die Liberalisierung des Gasmarktes insbesondere die Vermarktungsmöglichkeiten am Termin- und Spotmarkt zu nennen. Nach qualitativer Einführung in diese Thematik soll der Leser in Kapitel 2 und 3 mit zwei Bewertungs- und Steuerungsverfahren für einen Gasspeicher an den beiden Marktstufen Termin- und Spotmarkt methodisch vertraut gemacht werden. Im Mittelpunkt dieser Verfahren steht, dass die Speicher marktorientiert gegenüber den jeweiligen Marktstufen eingesetzt werden. Marktorientiert bedeutet in diesem Zusammenhang, dass allein Preisinformationen der Handelsmärkte die Einsatzweise des Speichers bestimmen.

Kapitel 2 konzentriert sich auf die Bewertungs- und Bewirtschaftungsverfahren im Terminmarkt und stellt in diesem Zusammenhang das „Intrinsic Rolling“-Verfahren vor. Hierbei wird zum einen darauf eingegangen, wie Termingeschäfte unter Berücksichtigung der Speicherrestriktionen optimal eingegangen werden können. Zudem wird gezeigt, wie diese Positionen gewinnbringend „rolliert“ werden können (Umstellung der optimalen Terminmarktprodukte im Portfolio) bei Veränderungen der Terminmarktpreise.

In Kapitel 3 wird die Bewertung von Gasspeichern gegenüber dem Spotmarkt mittels der stochastischen dynamischen Programmierung behandelt. Hierzu wird zunächst die eingesetzte Methodik der Least-Squares-Monte-Carlo-Technik vorgestellt. Danach werden die mithilfe dieser Methodik erhaltenen Werte für unterschiedliche Gasspeicher-Settings (Kavernen und Kugelspeicher) ausgewertet.

Durch die zahlreichen Beispiele und Case Studies sollen dem Leser zudem bei beiden Verfahren Einsichten für die wesentlichen Werttreiber hinsichtlich der Speicherauslegung und der Marktgegebenheiten vermittelt werden.

# 1 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 aus systemischer Perspektive die Notwendigkeit für Speicher zu skizzieren. Aufgrund der Fülle von Einflussfaktoren auf die Entwicklung des Gasmarktes werden hier nur ausgewählte Faktoren berücksichtigt.

## 1.1 Entwicklungstendenzen des Gasbedarfs sowie des Gasaufkommens und der resultierende systemische Speicherbedarf<sup>1</sup>

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 zurzeit noch vernachlässigbar gering.<sup>2</sup>

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.<sup>3</sup> Für die Zukunft wird in den Szenarien des BMWi<sup>4</sup> bis 2020 von einem konstanten bis leicht sinkenden Erdgasverbrauch ausgegangen (ca. 3 Mio. TJHu in 2020), das Szenario des BMU<sup>5</sup> 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 dermaßen 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

1 Vgl. Borchert, J./Hasenbeck, M./Jungbluth, C./Schemm, R. (2009): Bewertung und Steuerung von Gasspeichern bzw. Gasspeicherscheiben, ZfE Zeitschrift für Energiewirtschaft 04/2009.

2 Eigene Berechnungen aus BMWi Energiedaten 2008.

3 Eigene Berechnungen aus BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes.

4 Vgl. Schlesinger, M. et al.

5 Vgl. Nitsch, J.

als die monatlichen Verbräuche im Sommer.<sup>6</sup> 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 zum Heizwärmebedarf deutlich abnehmen wird.<sup>7</sup>

- 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, vielmehr – aufgrund der Produktionszeiten – eine Tages- und Wochenstruktur, die durch individuelle Produktionsrandbedingungen geprägt wird.
- 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 Gasverbrauch sind hier vor allem GuD-Kraftwerke mit guter Auslastung – ist einerseits nur bei ausreichenden Preisspreads zwischen Strompreis auf der einen und Gas- und CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Preise, höherer Flexibilitätsbedarf in der Stromerzeugung aufgrund konstant bleibender Grundlasterzeugung aus Kernkraft und Braunkohle sowie 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.

6 Eigene Berechnungen aus BMWi Energiedaten 2008.

7 Vgl. Jacob, D. et al.

Der Gasbedarf in Deutschland kann zurzeit (2008) noch zu etwa 15 % aus heimischen Quellen gedeckt werden.<sup>8</sup> Dabei ist seit dem Jahr 2003 ein rückläufiger Trend bei der heimischen Förderung sichtbar. Gegenüber 2007 sank die Förderung in 2008 um 8 %.<sup>9</sup> Der Förderrückgang ist natürlichen Ursprungs, bedingt durch die zunehmende Erschöpfung und Verwässerung der Lagerstätten.<sup>10</sup> 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 Russland führten zu einem höheren Speicherbedarf in Zentral- und Westeuropa.

Jedoch können 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 wichtigen Bezugsquellen werden.<sup>11</sup> 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 Bandlieferung 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.<sup>12</sup> 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.

## 1.2 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 stellen in Deutschland neben kleineren dezentralen Speichern im Wesentlichen große Untergrundspeicher her.

8 Eigene Berechnungen aus BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes.

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

10 Ebenda.

11 Vgl. Hirschhausen, C. v.

12 Vgl. GTE + European Capacity Development Report 2008.

Es gibt drei Typen von Untergrundspeichern: Aquiferspeicher, Porenspeicher und Kavernenspeicher. Aquifere sind wasserführende Gesteinsschichten, deren Speicherwirkung 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.<sup>13</sup> 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 Gasmengen 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 Mindestgasmengen 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 müssen 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 Untertageformationen 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 werden, 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.

<sup>13</sup> Vgl. Landesamt für Bergbau und Geologie, Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2008, Hannover 2009.

- **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 fluid-dynamischen und geologischen Stabilitätsgründen sind die Ein- und Ausspeisekapazität sowie die Möglichkeit, zwischen Ein- und Ausspeisung umzuschalten, prinzipiell vom Füllstand des Speichers abhängig. Das heißt: Abhängig von der Fahrweise des Speichers können sich die Leistungseigenschaften verändern. Jeder Speicherbetreiber veröffentlicht hierzu eine so genannte 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 (EUR/MWh) abgebildet.

Eine Bewertung von Speichern wird in der energiewirtschaftlichen Praxis sehr verschieden vorgenommen. Traditionell aber wurde ein Speicher relativ zu gaswirtschaftlichen Nutzen bzw. zu dessen traditioneller gaswirtschaftlicher Einsatzweise bewertet. Durch die Entstehung von Großhandelsmärkten existiert nun auch die Möglichkeit, einen Speicher relativ zu den entstehenden Marktpreisen zu bewerten.

Voraussetzung für die Nutzung der nachfolgend beschriebenen Einsatzmöglichkeiten ist in allen Fällen mit Ausnahme der Drittvermarktung ein eigener Bilanzkreis und damit einhergehend ein funktionierendes Bilanzkreismanagement. Zusätzlich ist für die Bewirtschaftung des Speichers – auch hier wieder mit Ausnahme der Drittvermarktung – ein eigenes Portfoliomanagement notwendig. Der Umfang des Portfoliomanagements ist dabei von der Art der Speicherbewirtschaftung abhängig. Im Folgenden sind die Einsatzmöglichkeiten nach aufsteigender Implementierungstiefe aufgeführt.

### **1.2.1 Geringe Implementierungstiefe**

#### **Drittvermarktung**

Bei der Drittvermarktung werden Nutzungsrechte an dem Speicher vermarktet. Dies kann sich auf einen Teil des Speichers oder den gesamten Speicher beziehen. Dabei kann der Speicher direkt durch die Anteilseigner oder zentral über einen „Vermarktungspool“ am Markt platziert werden. Die Platzierung am Markt kann sowohl bilateral als auch über Auktionierung erfolgen.

Die Nutzungsrechte können in Form von Speicherbündeln oder als separate Speicherdienstleistungen, d. h. Ein- bzw. Ausspeicherleistung und Arbeitsgasvolumen unabhängig voneinander, vermarktet werden. Die technischen Restriktionen des Speichers, wie z. B. jahreszeitliche Füllstandsrestriktionen, füllstandsabhängige Ein- bzw. Ausspeicherleistung und Nichtverfügbarkeit bei Revision/Störung, bilden die Grundlage für die im Speichernutzungsvertrag festzulegenden vertraglichen Restriktionen.

Im Vergleich zu den anderen hier geschilderten Einsatzmöglichkeiten des Speichers sind die Erlöse aus der Drittvermarktung gerade bei langfristigen Speichernutzungsverträgen gut planbar und nahezu risikofrei. Zudem erfordert die Drittvermarktung im Vergleich zu den anderen hier betrachteten Einsatzarten keine speziellen Kenntnisse in den Bereichen Handel, Portfolio- und Bilanzkreismanagement beim Anbieter der Drittvermarktung.

## **1.2.2 Mittlere bis hohe Implementierungstiefe**

### **Optimierung von Gasbezugsverträgen**

Voraussetzung für die Optimierung von Gasbezugsverträgen ist ein offener bzw. teiloffener Bezugsvertrag und ein eigener Bilanzkreis bzw. Subbilanzkreis. Der Speicher kann in diesem Fall zur Vermeidung von Take-or-Pay-Verpflichtungen und zur Begrenzung der Leistungsspitze (Peak-Shaving) eingesetzt werden. Die Optimierung ist dabei nicht nur auf den eigenen Bezugsvertrag begrenzt, sondern kann auch Dritten angeboten werden.

Für den Fall, dass im Gaswirtschaftsjahr weniger Menge und/oder Leistung benötigt wird als vorher angenommen und bestellt, kann die nicht benötigte Menge/Leistung eingespeichert werden. Hierzu ist es erforderlich, dass der Speicher über eine hinreichend große Einspeicherleistung und ein entsprechendes Arbeitsgasvolumen verfügt, die ausreichen, um die Take-or-Pay-Verpflichtung unter den gegebenen Bedingungen einzuhalten.

Beim Peak-Shaving wird der Speicher zur Reduzierung der benötigten Leistung aus dem Bezugsvertrag eingesetzt. Hierzu wird zu Zeiten erhöhten Leistungsbedarfs zusätzliche Leistung aus dem Speicher in den Bilanzkreis eingebracht und damit die Bezugsleistung aus dem Liefervertrag begrenzt.

Der Einsatz des Speichers zur Vertragsoptimierung führt zu einer veränderten Benutzungsstruktur gegenüber einem Vollversorgungsvertrag und damit in der Regel auch zu einer veränderten Preisstellung gegenüber diesem. Der Wert des Speichers wird bei dieser Einsatzart durch die Kosteneinsparung des offenen Bezugsvertrages gegenüber dem Vollversorgungsvertrag definiert.

## Strukturierung von Lieferungen

Eine Strukturierung von Lieferungen ist über den Speicher dahingehend möglich, dass an den Handelsplätzen standardisierte Produkte auf der Basis eines prognostizierten Referenzlastgangs bezogen werden. Durch Kombination der verschiedenen Terminprodukte (Jahresband, Quartalsbänder und Monatsbänder) lässt sich eine saisonale „Vorstrukturierung“ durchführen.

Kurzfristiger Strukturierungsbedarf – hier durch den Speicher – entsteht zum einen aus der Abweichung des tatsächlichen Lastgangs vom Referenzlastgang und zum anderen aus der Abweichung des Referenzlastgangs vom starren Profil der beschafften Bänder. Strukturiert werden kann generell sowohl über die kurzfristigen Marktstufen als auch über einen flexiblen Speicher.

Verfügt der Händler über die Möglichkeit, zur kurzfristigen Strukturierung einen Speicher einzusetzen, hat er hierzu mehrere Möglichkeiten: Überschussmengen kann er bei hohen Spotmarktpreisen am Spotmarkt verkaufen oder bei niedrigen Spotmarktpreisen einspeichern. Fehlende Mengen können bei niedrigen Spotmarktpreisen am Spotmarkt bezogen oder bei hohen Spotmarktpreisen ausgespeichert werden. Durch den Einsatz des Speichers werden in diesem Fall die Struktur und die Volatilität der Spotpreise genutzt.

Voraussetzung für den Einsatz des Speichers ist jedoch, dass entsprechende Mengen im Speicher vorhanden sind bzw. dass noch Arbeitsgasvolumen zur Verfügung steht. Die Prognose der optimalen Befüllungszeitpunkte zu möglichst günstigen Preisen setzt ein funktionierendes Portfoliomanagement voraus, das sowohl langfristige als auch kurzfristige (Day-ahead-)Prognosen durchführt, die entsprechenden Handelsgeschäfte tätigt und den Speicher bewirtschaftet. Weitere Voraussetzung ist ein eigener Bilanzkreis oder Subbilanzkreis inklusive Bilanzkreismanagement, das die jeweiligen Nominierungen bzw. Renominierungen vornimmt.

## Optimierung des Bilanzkreises (Ausgleichsenergie)

Unter der Voraussetzung, dass ein eigener Bilanzkreis bzw. Subbilanzkreis mit entsprechendem Bilanzkreismanagement vorhanden ist, lässt sich der Speicher auch zur Optimierung des Bilanzkreises einsetzen. Ist die Entnahme aus dem Speicher günstiger als der Preis für Ausgleichsenergie, werden dem Speicher Mengen zugeführt oder entnommen, um die Ausgleichsenergie zu minimieren. Für den Fall, dass der Preis für Ausgleichsenergie geringer ist als die Kosten für Gas aus dem Speicher bzw. die Einspeicherung von Gas in den Speicher, wird der Speicher nicht eingesetzt und es wird die günstigere Ausgleichsenergie beschafft.

Wie bei der Bereitstellung von Regelenergie wird der Einsatz des Speichers durch die unterbrechbaren Kapazitäten für den Entry ins Marktgebiet (also der Ausspeisung aus dem Speicher) eingeschränkt. Die Einschränkung hängt hier direkt von der Unterbrechungswahrscheinlichkeit für die Entry-Kapazitäten ab.

Der Wert des Speichers wird hier über den Wert der substituierten Ausgleichsenergie bestimmt.

### 1.2.3 Hohe Implementierungstiefe

#### Einsatz an standardisierten Großhandelsmärkten

Der Einsatz des Speichers an standardisierten Großhandelsmärkten dient der Realisierung von Erlösen aus Handelsgeschäften. Erlös lässt sich an Märkten generieren aus

- dem saisonalen Preisunterschied zwischen Sommer- und Winterhalbjahr,
- der Preisvolatilität der verschiedenen Segmente der Forwardkurven und
- Preisunterschieden an verschiedenen Märkten.

An den Börsen werden standardisierte Produkte wie beispielsweise Jahres-, Quartals- oder Monatsbänder am Terminmarkt bis hinunter zu Tagesbändern am Spotmarkt und das Produkt „within day“ gehandelt.

Die getätigten Handelsgeschäfte sind abhängig von der Risikostrategie des jeweiligen Un-ternehmens. Risikolos – dieses bezieht sich hier lediglich auf Marktpreisrisiken – lassen sich Arbitragegeschäfte durchführen. Bei Arbitragegeschäften werden z. B. unterschiedliche Produkte gleicher Menge zum gleichen Zeitpunkt ge- und verkauft; beispielsweise wird bei gleichzeitigem Kauf des Q3 und Verkauf des Q1 der saisonale Preisunterschied gehoben. Dieses wird an späterer Stelle dieser Unterlage methodisch vertieft.

Risikolos lässt sich auch ein Erlös aus dem Preisunterschied zwischen Termin- und Spotmarkt generieren, sofern keine offenen Positionen eingegangen werden. Sind beispielsweise die Spotpreise höher als die Preise am Terminmarkt, kann Gas aus dem Speicher kurzfristig verkauft und die fehlende Menge gleichzeitig zu einem späteren Erfüllungszeitpunkt am Terminmarkt beschafft werden. Umgekehrt können bei höheren Terminmarktpreisen kurzfristig günstige Spotmengen bezogen und eingespeichert werden. Gleichzeitig wird die bezogene Spotmenge am Terminmarkt zu dem höheren Preis wieder verkauft und zum Erfüllungszeitpunkt ausgespeichert. Durch Abtausch von Produkten bei Preisänderung vor Erfüllung des Terminkontrakts können die Erlöse aus den Arbitragegeschäften optimiert werden.

Bei Einsatz des Speichers an standardisierten Großhandelsmärkten stellt die vom Speicher zur Verfügung gestellte Flexibilität den Bewertungsmaßstab dar. Die Flexibilität kann als Realoption aufgefasst werden, die die Möglichkeit für verschiedene Handelsgeschäfte bietet. Diese Realoption gilt es mit Marktpreisen zu bewerten. Genau auf dieses wird später detailliert methodisch eingegangen.

## Bereitstellung von Regenergie

Stimmen Nominierung und tatsächlicher Verbrauch über alle Bilanzkreise im Marktgebiet nicht überein, ist der Bilanzkreisnetzbetreiber dazu verpflichtet, nach einheitlichen, transparenten, nichtdiskriminierenden und marktorientierten Verfahren Regenergie zu beschaffen. Dabei hat der Bilanzkreisnetzbetreiber interne Regenergie wie z. B. Netzpuffer vorrangig einzusetzen.

Im Gegensatz zu interner Regenergie, die nach GABi Gas kostenfrei angeboten werden muss, ist externe Regenergie kostenpflichtig. Mit einem Speicher kann freie Leistung als externe Regenergie im Markt angeboten werden.

Anbieter von Regenergie müssen sicherstellen, dass diese nach Bedarf des Bilanzkreisnetzbetreibers jederzeit abrufbar ist. Derzeit gibt es im Markt noch keine standardisierten Produkte für Regenergie, vielmehr ist jeder Bilanzkreisnetzbetreiber frei, Regenergieprodukte auszuschreiben. Dies führt zu unterschiedlichen Vorgehensweisen in den verschiedenen Marktgebieten. So gibt es beispielsweise nicht in allen Marktgebieten einen Leistungspreis für die langfristige Vorhaltung von Regenergie. Kommt der Regenergieanbieter im vereinbarten Vorhaltezeitraum nicht zum Zuge, kann er für die vorgehaltene Regenergie keinen Erlös generieren. In Bezug auf einen Speicher bedeutet dies, dass hier Kapazitäten blockiert werden, die nicht oder nur auf unterbrechbarer Basis anderweitig gewinnbringend genutzt werden können.

Für alle Produkte besteht Nominierungspflicht seitens des Regenergieanbieters am virtuellen Handelspunkt (VHP).

Die auf die jeweilige Ausschreibung eingegangenen Angebote werden getrennt nach Bereitstellung und Übernahme in eine Merit-Order-Liste aufgenommen. Der jeweils preiswerteste noch in der Liste verbliebene Regenergieanbieter wird im Fall eines Abrufs gezogen.

Bei der Bereitstellung von Regenergie wird der Wert des Speichers durch den jeweils gültigen und noch weiterzuentwickelnden Rechtsrahmen sowie den Preis für das Konkurrenzprodukt, dem Preis für Flexibilität auf dem Handelsmarkt, definiert.



Speicher sind hilfreiche Instrumente in dem Gasmarkt, um zeitlich auftretende Ungleichgewichte aus Angebot und Nachfrage überbrücken zu können. Dieses gilt aus systemischer wie auch aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. Letztere schlägt sich in der traditionellen Bewertung eines Speichers an seinen gaswirtschaftlichen Nutzen nieder. In einem Gasmarkt mit einem eigenständigen Großhandelsmarkt werden alle Verträge und realwirtschaftlichen Assets an den Großhandelsmärkten gespiegelt, um den Wert zu identifizieren (Mark-to-market). Bei einem Speicher – so auch bei vielen anderen Assets im Energiemarkt –

müssen bei dieser Bewertung die physischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese schlagen sich auch bei Speichern in Restriktionen (z. B. endliche Ein- und Ausspeiseleistungen, füllstandsabhängige Ein- und Ausspeicherleistungen) nieder und führen zu intertemporalen Abhängigkeiten in der Fahrweise. Diese müssen explizit bei der Bewertung berücksichtigt werden. Für eine Marktbewertung werden üblicherweise arbitragefreie Handelsstrategien mit dem Asset und Großhandelsmarktprodukten gesucht und diese Handelsstrategie dann mit ihren Marktpreisen bewertet. Dieses Prinzip wird im Folgenden detailliert erläutert und auf den Speicher angewendet.

## 2 Bewertung und Steuerung von Gasspeichern im Terminmarkt

Ein Speicher kann im Terminmarkt mithilfe von gehandelten Termingeschäften gesteuert werden. Im Terminmarkt stellt der Speicher ein Bündel von kalendrischen Spreadoptionen dar, die über die Restriktionen des Speichers miteinander verbunden sind. Der Wert eines solchen Kalenderspreads entspricht dem Preisdelta zwischen dem Monatskontrakt Monat  $i$  und Monat  $j$ <sup>14</sup>:

$$\text{Spread}_{\text{Value}(i,j,t)} = \text{Max}[0; v * (F_j(t) - F_i(t))]$$

mit:

- $v$  = Energiemenge im Forwardprodukt
- $F$  = Forwardpreis

Der in der obigen Formel dargestellte Spread stellt den *inneren Wert* der Kalenderoption dar. Zur Sicherung dieses inneren Wertes muss ein Forward für den Monat  $j$  verkauft und für den Monat  $i$  gekauft werden. Unter Verwendung einer aktuellen Forwardkurve kann so aus mehreren Kalenderspreads der innere Wert eines Speichers bestimmt und gesichert werden. Die Steuerung des Speichers mithilfe der Termingeschäfte stellt eine risikolose Strategie da. Durch das Eingehen der jeweiligen Positionen und der Verwendung des Speichers verbleibt keine offene Position, die einem Preisrisiko unterliegt. Dies wird erreicht, indem die Menge aller Kaufkontrakte der Menge aller Verkaufskontrakte entspricht, wobei das zeitliche Auseinanderfallen zwischen Kauf und Verkauf durch den Speicher ausgeglichen wird (Ein- und Ausspeicherung).

### 2.1 Bewertung mit der „Intrinsic Hedge“-Strategie

Der *innere Wert* eines Speichers kann mithilfe der „Intrinsic Hedge“-Strategie ermittelt werden. Dabei erhält man mit dem Speicherwert gleichzeitig die zugehörigen notwendigen Positionen entlang der *Forwardkurve*, um den Wert risikofrei mithilfe des entsprechenden Speichereinsatzes zu erwirtschaften.

Der Wert des Speichers wird durch das gleichzeitige Eingehen von optimalen Long- und Shortpositionen entlang der Forwardkurve abgebildet. Hierdurch wird der zeitliche Spread in Form der zugrunde liegenden Saisonalität in der Forwardkurve ausgenutzt. Mithilfe der Speicherbewirtschaftung kann dieser Spread risikofrei erzielt werden. Die adäquate Wahl der Termingeschäfte lässt sich als das folgende deterministische lineare Optimierungsproblem darstellen<sup>15</sup>:

$$I_{\text{Value}}(F_i(t), v, t) = \max_v \left( - \sum_i F_i(t) v_i \right)$$

<sup>14</sup> Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im weiteren Verlauf auf eine Diskontierung verzichtet.

<sup>15</sup> Vgl. Clewlow, L., Strickland, C.

mit:

- $v$  = Energiemenge im Forwardprodukt (negativ bei Ausspeisung; positiv definiert bei Einspeisung)

unter den Nebenbedingungen NB1 und NB2.

Die Speicherparameter und Restriktionen werden bei diesem Verfahren in Form der beiden Nebenbedingungen berücksichtigt, sodass der Bezug zum Bewertungsgegenstand nicht verloren geht.

NB1: Die optimale Position im Forward  $i$  ist restringiert durch das maximale und minimale Aus- und Einspeisevolumen im entsprechenden Terminmarktsegment.

$$-V_{out_i} \leq v_i \leq V_{in_i} \quad \forall i$$

mit:

- $V_{out}$  = maximale Ausspeisemenge im Forwardprodukt
- $V_{in}$  = maximale Einspeisemenge im Forwardprodukt

NB2: In jedem Terminmarktsegment müssen die Minimal- und Maximal- Füllstandsrestriktionen eingehalten werden:

$$Vol_{min_i} \leq \sum_{j=1}^i v_j \leq Vol_{max_i} \quad \forall i$$

mit:

- $Vol_{min}$  = minimaler Füllstand zum Ende des Forwardproduktes
- $Vol_{max}$  = maximaler Füllstand zum Ende des Forwardproduktes

Bei dem Verfahren der „Intrinsic Hedge“-Bewertung handelt es sich um eine statische Strategie. Es nutzt nur die Informationen der aktuellen Forwardkurve. Erfolgen keine Anpassungen im Portfolio, ist der durch die Strategie erzielbare Cashflow immun gegenüber weiteren Veränderungen in der Forwardkurve. Daneben unterstellt es, dass keine Positionsanpassungen im Terminmarkt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums (Fälligkeit) mehr vorgenommen werden.

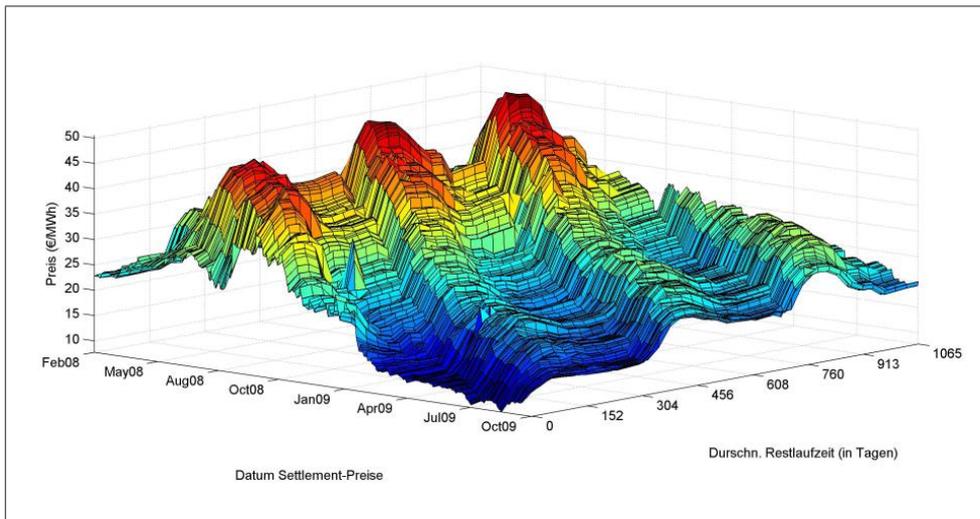


Abbildung 1: Entwicklung der Forwardkurve im Zeitablauf

Abbildung 1 veranschaulicht die Veränderungen der Forwardkurve im Zeitablauf. Zum einen fällt auf, dass die gesamte Forwardkurve im Zeitablauf angehoben und gesenkt wird. Zum anderen verändert sich auch der zeitliche Spread zwischen den einzelnen Terminkontrakten. Dies führt zu der Überlegung, ob eine Anpassung des Portfolios im Zeitablauf einen zusätzlichen Wert generiert. Diese Form der Dynamisierung des Optimierungsverfahrens wird als „Intrinsic Rolling Hedge“-Strategie bezeichnet und im folgenden Abschnitt erläutert.

## 2.2 Bewertung mit „Intrinsic Rolling Hedge“-Strategie

Die Dynamisierung des Verfahrens kommt dadurch zustande, dass täglich oder in einem anderen Zeitraster der aktuelle optimale „Intrinsic Hedge“ berechnet wird. Veränderungen in der Forwardkurve können zu Veränderungen in der optimalen Zusammenstellung der Terminpositionen führen. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass eine proportionale horizontale Bewegung der Forwardkurve (Parallelverschiebung) i. d. R. nicht zu einer Veränderung der optimalen Position führt, da hierdurch keine Veränderung des zeitlichen Spreads hervorgerufen wird. Dies bedeutet, dass generelle Preissteigerungen entlang der Forwardkurve nicht werterhöhend wirken, da der Spread mit Forwardkontrakten sich nicht verändert und die Position in den relevanten Termingeschäften bereits abgesichert ist. Hingegen wird bei Veränderung der Form (Saisonalität) der Forwardkurve eine Veränderung des Hedges vorliegen.

Die „Intrinsic Hedge“-Bewertung stellt eine untere Wertgrenze für die Bewertung mit der „Intrinsic Rolling Hedge“-Strategie dar. Dies liegt daran, dass Positionsänderungen in den zu  $t_0$  gewählten optimalen Forwardprodukten nur vorgenommen werden, falls eine Verbesserung des Ergebnisses erzielt werden kann. Mit dieser rollierenden Strategie sind keine Terminmarktrisiken verbunden. Es werden neue Arbitragemöglichkeiten des Speichers ausgenutzt. Der Handel ist somit nicht mit einem spekulativen Handel gleichzusetzen, in dem Positionen eingegangen werden

mit dem Risiko einer nachteiligen Preisänderung. Dies könnte mit einem Speicher u. a. dadurch vorgenommen werden, dass zu einem günstigen Zeitpunkt am Spotmarkt Energie gekauft und diese nicht gleichzeitig am Terminmarkt wieder verkauft wird. Im Falle der „Intrinsic Hedge“-Strategie ist der Mengensaldo über alle Termin- und Spotprodukte per Definition zu jedem Zeitpunkt null.

Bei der „Intrinsic Rolling“-Bewertung wird in jedem Zeitpunkt  $t$  mithilfe der dann aktuellen Forwardkurve der „Intrinsic Hedge“ berechnet. In einem zweiten Schritt wird der Wert des neuen „Intrinsic Hedge“ in  $t$  mit dem Wert der letzten optimalen und durchgeführten Positionsänderung in  $\tau_t$  verglichen.  $\tau_t$  bezeichnet dabei den letzten vor  $t$  liegenden Zeitpunkt, zu dem eine Positionsänderung stattgefunden hat. Daneben wird die Auflösung des Hedges in  $\tau_t$  zu heutigen Terminmarktpreisen durchgeführt:

$$\text{Bed: } \left[ I_{\text{Value}}(F_t, v, t) - I_{\text{Value}}(F_t, v, \tau) + \sum_i (F_i(t) - F_i(\tau)) \cdot v_i(\tau) \right] > 0$$

Falls diese Bedingung erfüllt ist, werden die Forwardkontrakte in die neue optimale Ausgestaltung rolliert. Hierzu werden die alten Positionen aufgelöst und die neuen Positionen eingegangen.

Anhand der folgenden drei fiktiven Forwardkurven soll das „Intrinsic Rolling“-Verfahren beispielhaft durchgeführt werden. Zur besseren Illustration wird nun davon ausgegangen, dass die drei Forwardkurven weit vor dem Zeitraum der Speicherbewirtschaftung liegen und somit keine Spotpositionen eingegangen werden. Die generelle Methodik kann aber auch mit der Spotbewirtschaftung durchgeführt werden.

### 2.2.1 Steuerung des Speichers in täglicher Ausführung



#### Beispiel

Im Folgenden soll die Steuerung der Terminmarktpositionen im Zeitablauf anhand eines Beispiels erläutert werden. Hierzu wird in diesem Schritt vereinfachend unterstellt, dass der Speicher folgende Charakteristika auf Monatsbasis aufweist:

Einspeiseleistung [MWh/Tag]	20
Ausspeiseleistung [MWh/Tag]	20
Vol_Min [MWh]	0
Vol_Max [MWh]	1200

Tabelle 1: Speicherparameter eines fiktiven Beispiels

Der Speicher soll für die einfachere Nachrechnung über eine Ein- und Ausspeiseleistung von 20 MWh/Tag sowie über ein maximales Speichervolumen von 1200 MWh verfügen. In diesem Beispiel werden keine Einspeise- bzw. Ausspeisekosten oder ein Bid-Ask-Spread unterstellt. Der Speicher bildet einen virtuellen Vertrag ab. Es wird unterstellt, dass der Vertrag für das Jahr 2012 vereinbart wurde und eine direkte Bewirtschaftung im Jahr 2011 nach Vertragsabschluss mithilfe der Forwardkurve durchgeführt werden soll. Es wird weiter davon ausgegangen, dass der virtuelle Speichervertrag einen Anfangs- und Endfüllstand von 50 % aufweist.

	Jan	Febr	Mrz	Apr	Mai	Juni	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
t1	24,3	23,6	22,5	23,0	23,2	22,0	22,5	22,8	23,2	23,5	23,9	23,2
t2	24,0	25,0	22,8	22,4	22,6	22,2	22,8	22,5	23,1	22,2	24,5	24,3
t3	26,0	25,0	22,8	22,4	22,6	19,0	21,3	22,5	23,1	22,2	24,5	23,3

Tabelle 2: Verlauf der Forwardkurve [EUR/MWh] zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten

In Tabelle 2 ist beispielhaft der fiktive Verlauf einer Forwardkurve zu drei Zeitpunkten dargestellt. Entsprechend dem Verlauf soll nun die „Intrinsic Rolling“-Strategie angewendet werden. Hierbei soll zu jedem Zeitpunkt die optimale Position in den einzelnen Terminmarktprodukten gewählt werden. Negative Positionen stellen Verkaufsgeschäfte und positive Positionen stellen Kaufgeschäfte dar. Die maximal möglichen Kauf- und Verkaufsgeschäfte werden durch das Volumen des Speichers und seine Ein- und Ausspeiseleistungen begrenzt.

	Jan	Febr	Mrz	Apr	Mai	Juni	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
t1	-600	0	620	0	-620	600	600	0	0	-600	-600	600
t2	-40	-560	0	600	-20	600	-620	620	-600	620	-600	0
t3	-600	0	0	600	-600	600	600	-20	-600	620	-600	0

Tabelle 3: Optimale Entscheidung „Intrinsic Hedge“ [MWh] der Ein- und Ausspeisung im Zeitablauf

Tabelle 3 zeigt das Resultat der Optimierung. Die Optimierung wählt die Produkte, welche den größten kalendarischen Spread ermöglichen. Hierbei muss aber die Füllstandsrestriktion des Speichers beachtet werden. Offensichtlich wird hierbei versucht, im Winter bei hohen Gaspreisen Verkaufsgeschäfte durchzuführen und im Sommer Kaufgeschäfte zur erneuten Befüllung des Speichers zu tätigen. Der Spread zwischen dem Winter- und Sommerprodukt kann als Gewinn erwirtschaftet werden.

Aufgrund des Anfangsfüllstandes und der Preisstellung des Januarkontraktes erfolgt in t1 ein Verkauf des Forwards für den Januar. Die Intertemporalität des Speichers führt dazu, dass nicht gleichzeitig auch der Februar verkauft werden kann, sondern erst eine erneute Befüllung in Form eines Kaufkontraktes im März abgeschlossen wird.

Diese Optimierung wird zu jedem einzelnen Zeitpunkt vorgenommen. Aufgrund der Veränderungen der Forwardkurve können sich hierdurch Veränderungen der optimalen Position in den Terminmarktprodukten ergeben. Der Verlauf der Forwardkurve und das Ein- und Ausspeiseverhalten ist auch noch einmal in Abbildung 2 dargestellt.

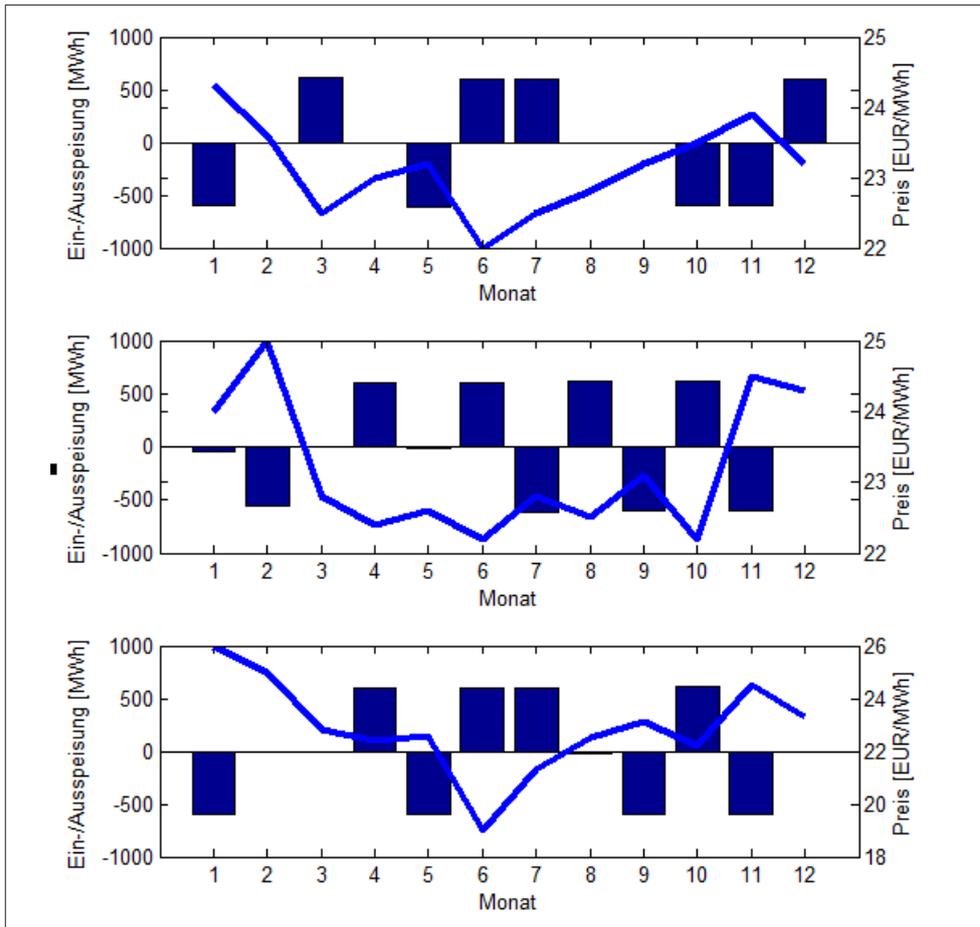


Abbildung 2: Darstellung Forwardkurve und Ein-/Ausspeisung

Aus den fiktiven Ein- und Ausspeisungen des Speichers, welche mit den jeweiligen Positionen in den Forwardkontrakten identisch sind, kann auch der Speicherfüllstand zum Ende des jeweiligen Monats dargestellt werden (*Tabelle 4*). Hierbei ist jeweils der Speicherfüllstand zum Ende des jeweiligen Monats abgetragen. Da in t1 im Januar verkauft wird, muss in diesem Zeitpunkt der Speicher entleert werden, sodass der Endfüllstand null beträgt. Im März wird gekauft, sodass der Füllstand wieder auf 620 MWh ansteigt. Der Füllstand spiegelt somit die kumulative Position aller Kauf- und Verkaufsprodukte wider unter Berücksichtigung des Anfangsfüllstandes. Maximale und minimale Füllstandsrestriktionen werden hierbei in jedem Monat eingehalten.

Im Verlauf des Füllstandes ist zum einen die klare Saisonalität der Forwardkurve wiederzuerkennen. Daneben zeigt sich, dass in den einzelnen Monaten kleinere

Verschiebungen zustande kommen, da sich der Spread zwischen den einzelnen Monaten innerhalb der Forwardkurve leicht ändert.

	Jan	Febr	Mrz	Apr	Mai	Juni	Jul	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
t1	0	0	620	620	0	600	1200	1200	1200	600	0	600
t2	560	0	0	600	580	1180	560	1180	580	1200	600	600
t3	0	0	0	600	0	600	1200	1180	580	1200	600	600

Tabelle 4: Füllstand des Speichers am Ende des jeweiligen Monats im Zeitablauf

Tabelle 5 zeigt den „intrinsic Wert“ des Speichers. Dieser ergibt sich zu jedem Zeitpunkt  $t$  aus der Multiplikation der Forwardkurve mit dem jeweiligen Ein- und Ausspeiseverhalten.

	intrinsic	nicht realisierte Wertänderung	Kosten/Erlöse durch Positionsänderungen	Wert in t	Wertzuwachs
t1	2.834	0	0	2.834	2.834
t2	3.634	-216	2.334	5.752	2.918
t3	6.786	-2.000	930	7.834	2.082

Tabelle 5: Intrinsic Wert des Speichers

Der „intrinsic Wert“ zu jedem Zeitpunkt  $t$  ist aber nur zu erzielen, wenn erstmalig der komplett unbesicherte Speicher am Terminmarkt arbitragefrei vermarktet wird. Wenn Positionen bereits zu  $t - 1$  in den Terminkontrakten eingegangen und diese in  $t$  nicht verändert wurden, kann eine Preisveränderung von  $t - 1$  zu  $t$  keine Wertänderung des Gesamtportfolios nach sich ziehen. Aus diesem Grunde werden in der Spalte „nicht realisierte Wertänderungen“ die Preiseffekte herausgerechnet, welche beim Rollieren in den neuen Hedge nicht realisiert werden können. In  $t3$  ist dies insbesondere die Verringerung des Juni-Preises um 3,2 EUR/MWh. Diese Verringerung von  $t2$  nach  $t3$  kann nicht gewinnsteigernd beim Rollieren der Position vereinnahmt werden, da sich die Position von  $t2$  auf  $t3$  in diesem Segment nicht ändert. Daneben kann für die bereits in  $t2$  im Januar vorliegende Shortposition von  $-40$  die Erhöhung des Preises von 2 EUR/MWh nicht genutzt werden. In Summe kann in  $t3$  aufgrund der bereits vorliegenden Positionen nicht der Spread der Forwardkurve in Höhe von 6786 EUR, sondern ein um 2000 EUR verringerter Spread erwirtschaftet werden. Dies zeigt, dass die Strategie des „Intrinsic Hedge“ zwar den aktuellen Wert sichert; falls sich jedoch der Kalenderspread der gesicherten Kontrakte in den nachfolgenden Zeitpunkten weiter erhöht, kann dies nicht gewinnsteigernd genutzt werden. Durch das Hedging werden also auch Chancen auf steigende Spreads der eingegangenen Position vernichtet. Ein Wertzuwachs ergibt sich somit nur in der Veränderung der optimal kombinierten Kalenderspreads.

Eine weitere Komponente, welche zur Wertbestimmung des Portfolios in jedem Zeitschritt  $t$  aus Terminmarktgeschäften herangezogen werden muss, stellt die Mark-to-market der in  $t$  wieder geschlossenen Positionen gegenüber  $t - 1$  dar. Wenn

das Portfolio in eine neue Kombination aus Terminmarktgeschäften rolliert wird, müssen die alten Positionen geschlossen werden. Hierbei wird das Preisdelta aus Vertragsabschluss und jetzigem Preis in  $t$  realisiert. Aus den drei Komponenten in Summe kann zu jedem Zeitpunkt der Wert des Portfolios abgelesen werden. In dem hier verwendeten Beispiel steigt somit der Wert von 2834 EUR in  $t_1$  auf 7834 EUR in  $t_3$ , was durch die Bewegung der Forwardkurve und der erneuten Veränderung der Terminmarktpositionen bewirkt wurde. Dieses fiktive Beispiel zeigt somit, dass eine kontinuierliche Anpassung der Terminmarktgeschäfte bei Veränderungen in der Forwardkurve ein zusätzliches Gewinnpotenzial realisieren kann.



Mithilfe der dynamischen Strategie „Intrinsic Rolling“ können neu auftretende risikofreie Handelsmöglichkeiten genutzt und eine Wertsteigerung gegenüber dem Anfangshedge erzielt werden.

Die Intrinsic-Hedge-Bewertung stellt eine Wertuntergrenze der Intrinsic-Rolling-Bewertung dar.

### 2.3 Bewertung mit einem Forwardkurvenmodell im Forwardmarkt

Die im letzten Abschnitt vorgenommene Optimierung gegenüber der realen Entwicklung der Forwardkurve kann zur täglichen Steuerung des Speichers im Zeitablauf entlang des Terminmarktes verwendet werden. Daneben kann dieser Wert ex post zur Performancemessung des Handels herangezogen werden. Da dieser Wert risikofrei erwirtschaftet werden kann, sollte ein Handel diese Benchmark mindestens schlagen. Für eine zukunftsorientierte Bewertung ist das Heranziehen der historischen Entwicklung der Forwardkurve aber nur bedingt geeignet, da sie nicht repräsentativ für die zukünftige Entwicklung ist.

Für die Bewertung, welche vor der Realisierung der Forwardkurve vorgenommen wird, ist der weitere Verlauf der Forwardkurve unsicher. Der Zusatzwert des „Intrinsic Rolling“ ist somit nicht eindeutig bestimmbar. Aus diesem Grunde wird nicht gegenüber einem einzigen, sondern gegenüber  $n$  Forwardkurvenszenarien das „Intrinsic Rolling“-Verfahren angewendet. Aus der resultierenden Häufigkeitsverteilung des inneren Speicherwerts können der Erwartungswert für die Bewertung sowie die Quantile der Verteilung für ein entsprechendes Risikomanagement herangezogen werden. Diese Monte-Carlo-Simulation beinhaltet die folgenden Schritte:

1. Generierung von  $n$  Monte-Carlo-Szenarien für die Entwicklung der Forwardkurve und der Spotpreise über den gesamten Handelszeitraum
2. Durchführung des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens in jeder der  $n$  Simulationen
3. Bildung des Erwartungswertes des Endwertes über alle Simulationen

### 2.3.1 Modellierung der Forwardkurve

Forwardkurvenmodelle versuchen die wesentlichen empirischen Eigenschaften der Forwardkurve zu modellieren. Hierzu gehört zum einen der klare Einfluss der Zeit bis Fälligkeit auf die Volatilität. Zum anderen kommt es innerhalb der Forwardkurvenbewegung neben der reinen Parallelverschiebung zu einer Veränderung der Steigung bzw. der Krümmung der Forwardkurve.

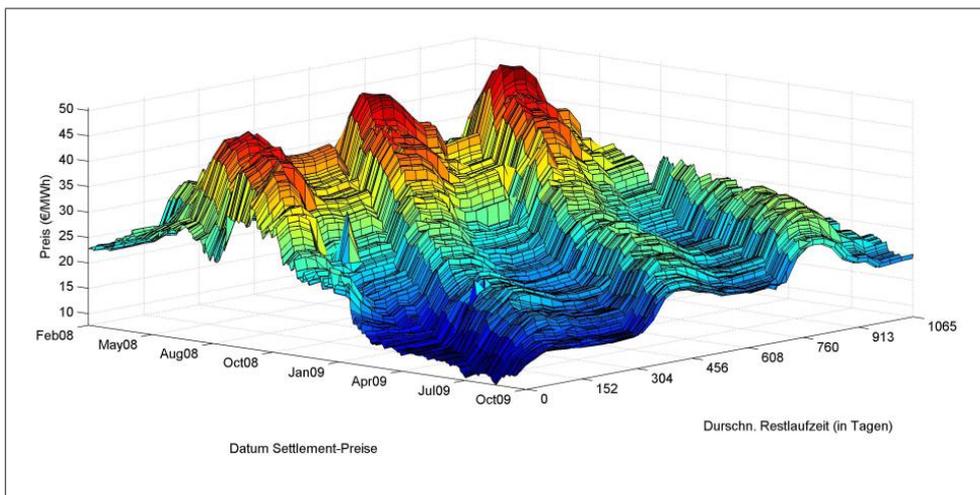


Abbildung 3: Darstellung empirische Forwardkurven

Die Evolution der Forwardkurve kann z. B. mithilfe eines mehrfaktoriellen Prozessmodells beschrieben werden. Hierbei werden einzelne Volatilitätsfunktionen  $\sigma_i$  in Abhängigkeit der Zeit bis Fälligkeit ( $T-t$ ) beschrieben und über eigene stochastische Prozesse  $dz$  in die Zukunft getrieben:

$$dF(t, T) = F(t, T) \left( \sum_{i=1}^n \sigma_i(t, T) dz_i(t) \right)$$

Die Veränderung der Forwardnotierung für die Fälligkeit in  $T$  zum Zeitpunkt  $t$  wird durch eine Linearkombination unterschiedlicher Volatilitätsfunktionen berechnet, die jeweils über einen eigenen Zufallsprozess  $dz$  modelliert werden. Eine sinnvolle Analyse und eine Auswahl der in der Forwardkurve vorkommenden Volatilitätsstrukturen lassen sich z. B. mit der Principal-Component-Analyse durchführen, bei der die Eigenwerte und Eigenvektoren der Varianz-Kovarianz- oder der Korrelationsmatrix berechnet werden. Der Eigenwert (EG) jedes Eigenvektors zeigt das Gewicht der Volatilitätsstruktur in der Gesamtvolatilität an.

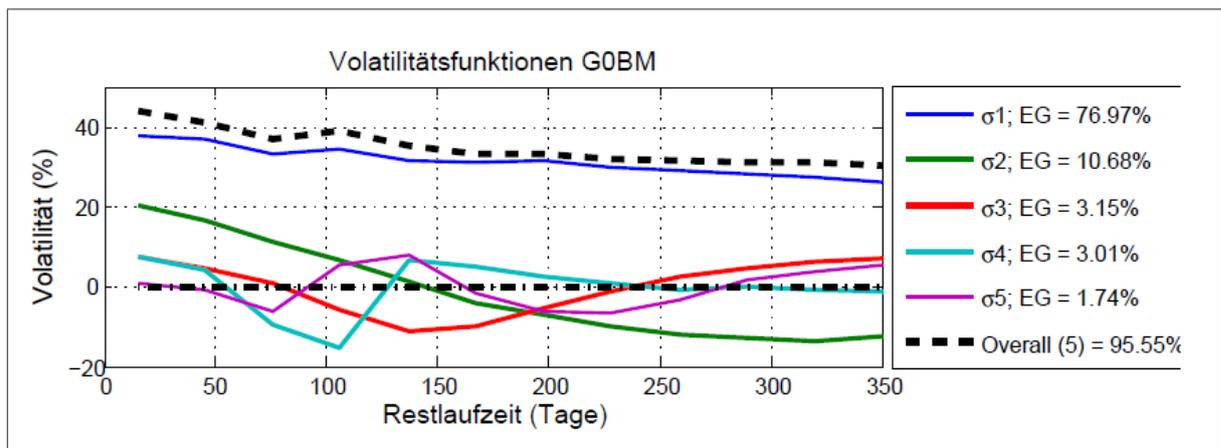


Abbildung 4: Volatilitätsfunktionen der Forwardkurve bei Anwendung der Principle-Component-Analyse

Forwardkurven besitzen die typische Eigenschaft, dass die Volatilitätsfunktionen, welche eine Parallelverschiebung der gesamten Kurve bewirken, einen Großteil der Gesamtvolatilität (in Abbildung 4 ca. 77 %) abbilden. Hierdurch wird aber für einen risikolos bewirtschafteten Speicher im „Intrinsic Rolling“-Verfahren kein nennenswerter Wert generiert. Aus diesem Grunde ist es insbesondere wichtig, möglichst viele unterschiedliche, empirisch beobachtbare Volatilitätsfunktionen zu modellieren. Hierdurch kann dann wiederum eine Vielzahl von Veränderungsmustern der Forwardkurve abgebildet werden, welche den Wert des Speichers bilden.

## 2.4 Fallbeispiele und Ergebnisse der Bewertung im Terminmarkt

In den folgenden Abschnitten werden exemplarisch einige Fallbeispiele und Sensitivitäten eines Speichers in der Terminvermarktung errechnet. Es wird hier unterstellt, dass der Speicher folgende Charakteristika besitzt.

	Kavernenspeicher
Arbeitsgasvolumen [m <sup>3</sup> ]	48.000.000
Ausspeiseleistung [m <sup>3</sup> /h]	80.000
Einspeiseleistung [m <sup>3</sup> /h]	40.000
Einspeisekosten [€/MWh]	0
Fülldauer [Tage]	50
Entnahmedauer [Tage]	25

Tabelle 6: Speicherparameter im Terminmarkt

In der ersten Bewertung wird der Wert einer Speicherbewirtschaftung ein Jahr vor Beginn der Erfüllung simuliert. Hierbei wird zum einen ein Bid-Ask-Spread von null und in einer zweiten Bewertung von 0,1 EUR/MWh unterstellt. In der dritten Bewertung erfolgt eine Betrachtung der Verteilung des Speicherwertes, wenn der initiale Hedge erst 100 Tage nach Übergabe des Speichers durchgeführt wird.

Anschließend werden einzelne Sensitivitäten errechnet. Hierbei wird zum einen das Ergebnis in Abhängigkeit verschiedener Bid-Ask-Spreads untersucht. Daneben wird die Auswirkung verschiedener Handelsfrequenzen von täglich bis wöchentlich untersucht. Abschließend wird die Abhängigkeit des Wertes vom Anfangsniveau modelliert. Die Untersuchungen sollen einen Verständnissgewinn der wesentlichen Wirkungsprinzipien zwischen Parametern und Wert des Speichers anhand dieser Methodik erzielen.

### 2.4.1 Bewertung vor Fälligkeit des Speichers

Im ersten Fallbeispiel wird ein Speicherbündel im Terminmarkt bewertet. Hierbei sollen 360 Handelszeitpunkte unterstellt werden, in denen die einzelnen Monatsprodukte des Jahres 2012 gehandelt werden können. Eine gleichzeitige Bewirtschaftung gegenüber dem Spotmarkt erfolgt nicht. Der hierdurch erzielbare Wert soll im Folgenden ausgewiesen werden, wobei zunächst kein Bid-Ask-Spread in den Terminpreisen berücksichtigt wird.

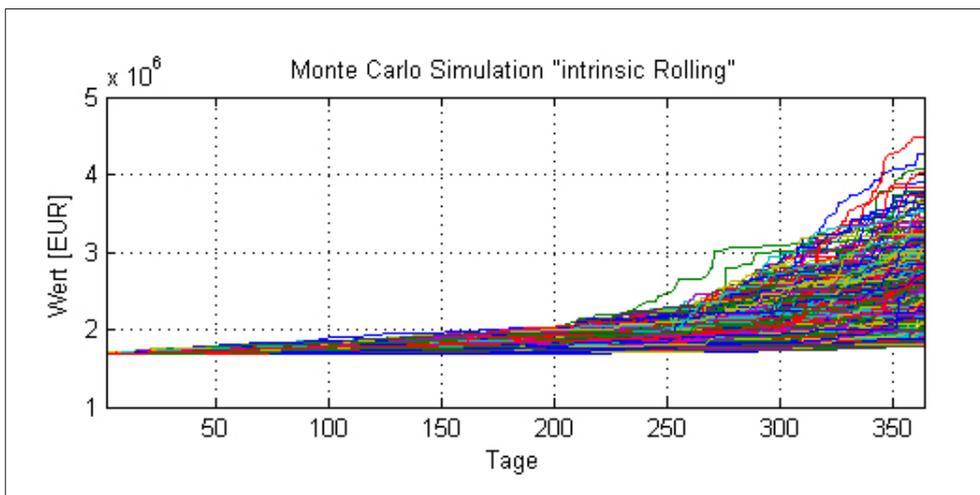


Abbildung 5: Monte-Carlo-Simulation Intrinsic Rolling Base Case Bid Ask 0 EUR/MWh

Abbildung 5 stellt die Entwicklung des Portfoliowertes in den einzelnen Monte-Carlo-Simulationspfaden dar. Hierbei zeigt sich insbesondere das „Floor-Niveau“ des „Initial Hedge“. Dies bedeutet, dass alle Endwerte der Verteilung am Ende der Handelsperiode größer als der „Intrinsic Hedge“ zu  $t_0$  sind. Der nur geringe diskrete Verlauf der Wertentwicklung in den einzelnen Szenarien impliziert, dass relativ kontinuierlich Positionen im Portfolio verändert werden und hierdurch keine Wertsteigerungen erzielt werden können.

Die klare Zeit-bis-Fälligkeits-Struktur der einzelnen Volatilitätsbänder des Forwardkurvenmodells führt dazu, dass der kumulierte Wert des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens im Zeitablauf überproportional zunimmt. Die starre Korrelationsbeziehung, weit entfernt der Fälligkeit, löst sich hierbei zwischen den einzelnen Kontrakten immer weiter auf, sodass nahe der Fälligkeit stärkere Formänderungen der For-

wardkurve auftreten als zum Zeitpunkt der Handelsaufnahme. Hierdurch kann der Algorithmus in den einzelnen Simulationspfaden verstärkt in neue Terminproduktkombinationen rollieren und einen deutlicheren Wertzuwachs aus der veränderten Terminmarktposition erzielen.

In der ersten Betrachtung wurde der Bid-Ask-Spread ignoriert, sodass das Rollieren der Position sehr kontinuierlich entlang der Zeitachse stattfinden kann. In einer zweiten Untersuchung soll nun eine Bewertung gegenübergestellt werden, bei der ein Bid-Ask-Spread von 0,1 EUR/MWh unterstellt wird. Vergleicht man nun die Wertentwicklung in den einzelnen Monte-Carlo-Simulationen in Abbildung 6 und Abbildung 7, so zeigt sich, dass der Verlauf bei Berücksichtigung eines Bid-Ask-Spreads wesentlich diskreter ausfällt. Die Handelsfrequenz und das Handelsvolumen nehmen somit deutlich ab. Daneben ist auch die Spreizung des erzielbaren Endwertes wesentlich geringer.

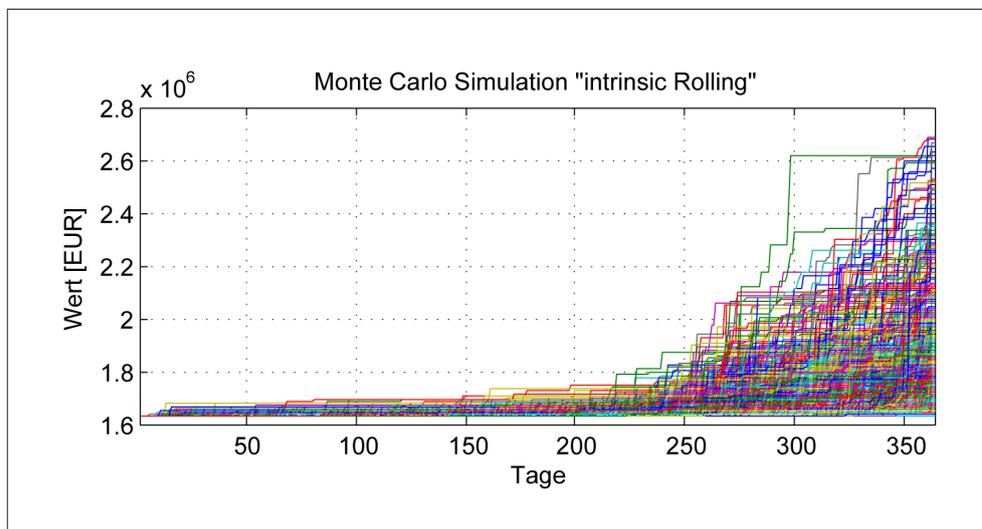


Abbildung 6: Monte-Carlo-Simulation Intrinsic Rolling vor Fälligkeit „Base Case Bid Ask 0,1 EUR/MWh“

Die Positionen werden nur rolliert, wenn damit mindestens auch der Bid-Ask-Spread erwirtschaftet werden kann. Von der Maßnahme wird somit weniger der „Intrinsic Hedge“ beeinflusst, dessen Wert relativ stabil bleibt. Vielmehr wird das Wertpotenzial durch zusätzliche Handelsmöglichkeiten stark verringert. Der Erwartungswert des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens sinkt von ca. 2,58 Mio. EUR auf 1,89 Mio. EUR bzw. um ca. 25 %.

[Mio. €]	"Intrinsic Hedge"	"Rolling Intrinsic"	5%-Quantil	95%-Quantil
Base Case Bid Ask Null	1.686.143	2.585.054	1.937.044	3.410.398
Base Case Bid Ask 0,1 EUR/MWh	1.628.177	1.894.900	1.658.917	2.352.759

Tabelle 7: Erwartungswert und Quantile des Base Case

Neben dem Erwartungswert sinkt auch das Upside-Potenzial der Speicherbewirtschaftung überproportional stark um ca. 1 Mio. EUR. Bei Ignorieren des Spreads kann im 95-Prozent-Quantil ein Spread von ca. 3,4 Mio. EUR erzielt werden, was eine Steigerung gegenüber dem Erwartungswert von ca. 0,9 Mio. EUR bedeutet. Bei Berücksichtigung des Bid-Ask-Spreads sinkt die Differenz zwischen Erwartungswert und 95-Prozent-Quantil auf ca. 0,7 Mio. EUR.

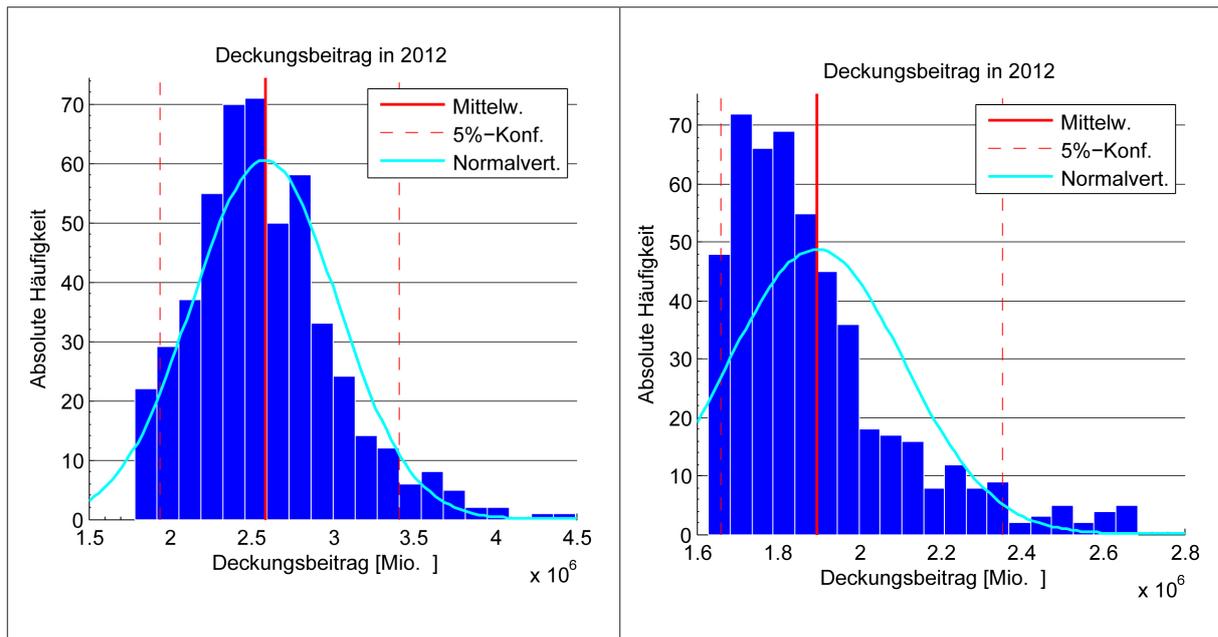


Abbildung 7: Endwertverteilungen der beiden Intrinsic-Rolling-Verfahren

Die Aussagen bzgl. der Spreizung der Ergebnisse lassen sich auch am Histogramm der Endwertverteilung ablesen. Die Einführung eines Bid-Ask-Spreads zeigt somit, dass hierdurch der Wert des Speichers deutlich sinkt. In den meisten Bewertungsroutinen wird dieses Phänomen aber vernachlässigt, sodass es zu einer systematischen Wertüberschätzung kommen kann. Daneben wird bei Vernachlässigung des Bid-Ask-Spreads in der Bewertung ein unrealistisch hohes Handelsvolumen errechnet, das daher nicht zur Grundlage der Handelskonzeption in der späteren Steuerung verwendet werden kann.

#### 2.4.2 Bewertung mit Zeitdelta zwischen Vertragsabschluss und Beginn des Hedgings

In dieser Bewertung soll der Einfluss des Zeitpunktes des ersten „Intrinsic Hedge“ auf die Verteilung des Endwertes untersucht werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der „Intrinsic Hedge“ nicht direkt, sondern erst 100 Tage nach Übergabe des Speichervertrages im Terminmarkt durchgeführt wird.

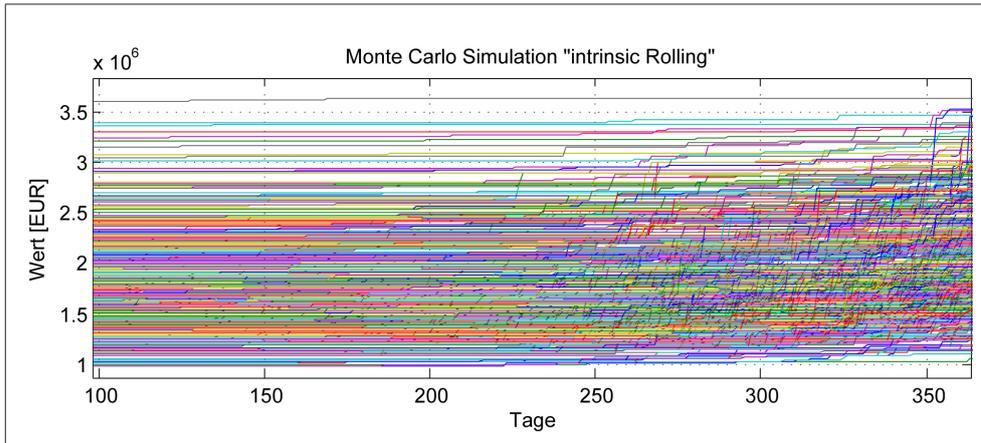


Abbildung 8: Monte-Carlo-Simulation Intrinsic Rolling der Bewertung t100

Die Auswirkungen des Strategiewechsels lassen sich anhand von Abbildung 8 zeigen. Der Verlauf des Wertes im Intrinsic-Rolling-Verfahren hat sich gegenüber dem Base Case deutlich verändert. Es existiert kein einheitlicher Floor mehr, auf dem der „Intrinsic Hedge“ liegt. Die Simulation der Forwardkurve über 100 Zeitschritte führt dazu, dass am Tag der Durchführung des „Intrinsic Hedge“ jede Simulation eine individuell zugrunde liegende Forwardkurve besitzt. Die daraus folgende Wertverteilung ist deutlich größer als im Base Case, da der Speicher ungehedged 100 Tage der Wertänderung der Forwardkurve ausgesetzt wird. Gegenüber dem Base Case ist somit schon bei Handelsaufnahme eine starke Streuung des Speicherwertes vorhanden, die sich im „Intrinsic Rolling“-Verfahren nicht mehr stark verändert.

[Mio. €]	"Intrinsic Hedge"	"Rolling Intrinsic"	5%-Quantil	95%-Quantil
Base Case 100 Tage		2.032.582	1.300.386	2.987.767

Tabelle 8: Erwartungswert und Quantile der Bewertung t100

Die Auswirkung der Maßnahme lässt sich auch sehr gut bei der Betrachtung des 5-Prozent-Quantils der Endwertverteilung zeigen. Der dort erzielbare Wert von ca. 1,3 Mio. EUR liegt deutlich unterhalb des „Intrinsic Hedge“ im Base Case. Demgegenüber ist aber das Upside-Potenzial auch von 2,35 Mio. EUR auf ca. 2,98 Mio. EUR gestiegen.

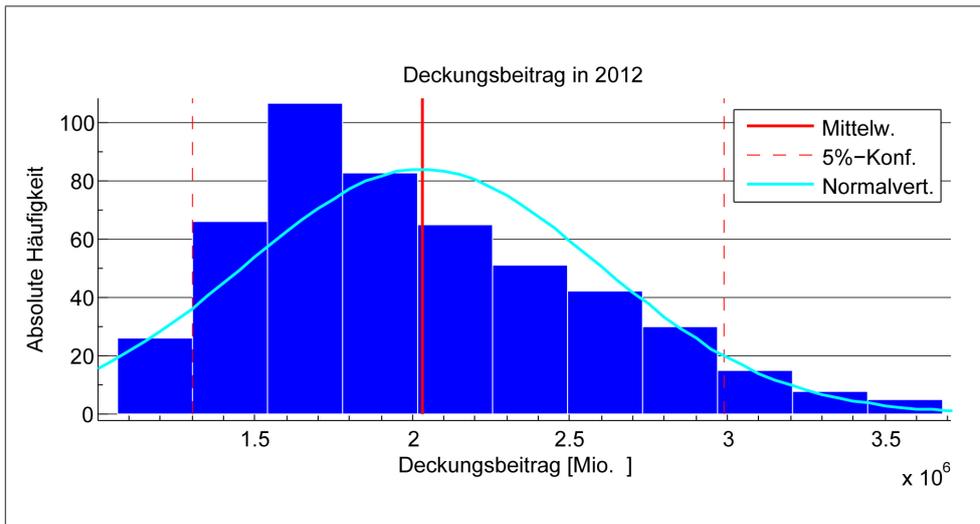


Abbildung 9: Werteverteilung des Endwertes des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens von t100

Bei Betrachtung des Histogramms hat die Linkssteilheit der Base-Case-Betrachtung deutlich abgenommen. Bei der Risikoquantifizierung eines Speichers sollte somit auch die unterstellte Handelstätigkeit berücksichtigt werden. Das Risiko beim „Intrinsic Rolling“-Verfahren wird insbesondere durch den Zeitpunkt des ersten „Intrinsic Hedge“ bestimmt. Bei direkter Durchführung mit Vertragsabschluss lässt sich somit ein Mindesterlöspotenzial klar bestimmen. Erfolgt keine direkte Einleitung der Handelsaktivitäten, muss dies in der Risikoberechnung des Downside-Potenzials Berücksichtigung finden.

### 2.4.3 Sensitivität des Bid-Ask-Spreads

Die Umschlagshäufigkeit und damit auch die Möglichkeit einer weiteren Wertsteigerung im Intrinsic-Rolling-Verfahren bzw. in der Speicherbewirtschaftung ist, wie im vorletzten Kapitel dargestellt, von dem im Markt vorherrschenden Bid-Ask-Spread abhängig. Der Bid-Ask-Spread kann als Liquiditätsindikator eines Marktes angesehen werden. Gerade in noch jungen Märkten wie dem deutschen Gasmarkt kann dieser teilweise sehr hoch werden, sodass ein Ignorieren bei der Bewertung einen zu optimistisch dargestellten Wert ergeben kann. In dieser Sensitivitätsuntersuchung wird der Spread im Folgenden in unterschiedlichen Stufen von 0 bis 0,9 EUR/MWh simuliert und die daraus folgende Wertentwicklung ermittelt.

	Sensitivität Bid Ask Spread						
Bid Ask-Spread	-	0,10	0,20	0,30	0,50	0,70	0,90
Erwartungswert	2.585.054	1.917.785	1.743.832	1.641.264	1.496.961	1.360.094	1.227.168
5 % Quantil	1.943.879	1.667.508	1.579.175	1.511.900	1.395.741	1.279.581	1.163.420
95 % Quantil	3.614.299	2.469.967	2.161.155	1.961.969	1.798.069	1.665.847	1.533.964

Tabelle 9: Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit des Bid-Ask-Spreads

Die Wertentwicklung zeigt eine starke Wertabsenkung um ca. 600 TEUR zwischen einem Spread von 0 und der minimalen Einführung von 0,1 EUR/MWh. Im weiteren Verlauf sinkt der Wert aber deutlich geringer in relativ konstanten Raten von 100 TEUR pro 0,1 EUR/MWh Spreadvergrößerung.

Mithilfe dieser Darstellung können somit sehr gut die Kosten eines illiquiden Marktes für die Besitzer von flexiblen Assets wie Gasspeichern berechnet werden. Wenn man im Worst Case von ca. 0,9 EUR/MWh Spread ausgeht, verliert der Speicher aufgrund von Transaktionskosten gegenüber einem idealen Markt ca. 1,3 Mio. EUR. Für die Beurteilung von langfristigen Engagements in Assets wie z. B. einen Speicher ist es somit von fundamentaler Bedeutung, eine realistische Einschätzung zur Entwicklung der Liquidität und damit der vorherrschenden Transaktionskosten der Märkte zu generieren.

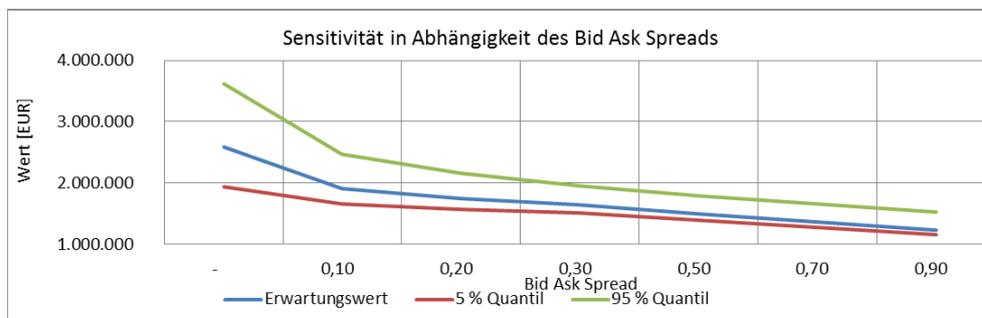


Abbildung 10: Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit des Bid-Ask-Spreads

Interessanterweise wird bei Erhöhung des Bid-Ask-Spreads der absolute Abstand zwischen den Quantilen der Endwertverteilung deutlich verringert, wobei der Abstand zwischen 5-Prozent-Quantil und Erwartungswert sehr viel geringer ist als zwischen Erwartungswert und 95-Prozent-Quantil. Mit der Bewirtschaftung sind somit mehr Chancen als Risiken verbunden. Dies liegt daran, dass bei einem hohen Spread ein Rollieren der Position nur zu wenigen Handelszeitpunkten vorgenommen wird. Die Masse der Wertverteilung konzentriert sich somit nahe am initialen „Intrinsic Hedge“. In einigen wenigen Szenarien kommt es aber zu deutlichen Verwerfungen in der Forwardkurve innerhalb der Handelsperiode (z. B. ausgelöst durch ökonomische Schockereignisse, kriegerische Auseinandersetzungen oder technische Defekte an den überregionalen Transportkapazitäten). Diese können im „Intrinsic Rolling“-Verfahren dann auch bei hohen Spreads zu deutlichen Wertsteigerungen führen.

#### 2.4.4 Sensitivität in Abhängigkeit von der Handelsfrequenz

In vielen kleineren Handelsabteilungen werden Assets nicht täglich, sondern in größeren Zeitabständen gegenüber dem Terminmarkt bewirtschaftet. Dies führt dazu, dass kurzfristige, nur temporär bestehende Forwardkurvenänderungen nicht im „Intrinsic Rolling“-Verfahren genutzt werden können. Die hierdurch erzielte

Wertminderung soll als Indiz für die Sensitivität des Wertes in Abhängigkeit der Handelsfrequenz ausgewiesen werden. Die Handelsfrequenz wird von täglich bis auf wöchentlich abgesenkt. Es wird kein Bid-Ask-Spread berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass in diesem Fall die Effekte am deutlichsten hervortreten.

Handelsfrequenz	Sensitivität Handelsfrequenz						
	1	2	3	4	5	6	7
Erwartungswert	2.620.902	2.616.233	2.584.582	2.567.645	2.536.334	2.529.392	2.502.446
5 % Quantil	1.943.879	1.945.769	1.924.386	1.878.718	1.935.553	1.881.757	1.875.395
95 % Quantil	3.614.299	3.660.069	3.558.498	3.546.669	3.387.923	3.360.693	3.282.203

Tabelle 10: Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit der Handelsfrequenz

Die Wertentwicklung ist in *Tabelle 10* dargestellt. Hierbei zeigt sich deutlich, dass der Wert des Speichers nur gering sinkt, wenn die Handelsfrequenz abgesenkt wird. Im letzten Fall wird gegenüber der täglichen Handelsfrequenz nur an 52 Tagen im Jahr eine Beurteilung des neuen „Intrinsic Hedge“ vorgenommen und eine entsprechende Handelsaktivität ausgelöst. Der Wertverlust beträgt nur ca. 100 TEUR. Gegenüber der Einführung von Bid-Ask-Spreads besitzt diese realitätsnähere Abbildung des Handelsverhaltens somit kaum wertmindernde Einflüsse auf das Bewertungsverfahren. Diese Aussage beschränkt sich aber auf die reine Terminvermarktung und kann so nicht aufrechterhalten werden, wenn auch die Spotvermarktung mit einbezogen wird.

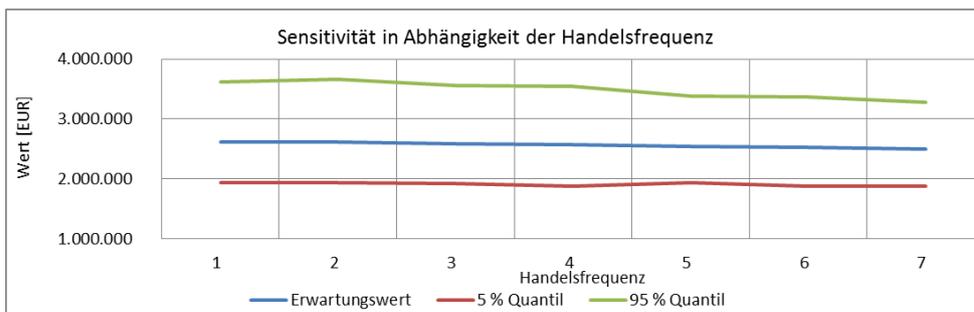


Abbildung 11: Sensitivität des Ergebnisses in Abhängigkeit der Handelsfrequenz

Einen deutlicheren Effekt besitzt die Verringerung der Handelsfrequenz auf das Upside-Potenzial. Hier sinkt der Wert bei wöchentlicher Ausübung um ca. 330 TEUR. Dies liegt daran, dass hierbei Preisbewegungen mitberücksichtigt werden, welche innerhalb der Handelsfrequenz wieder abgebaut werden.

### 2.4.5 Sensitivität in Abhängigkeit vom Anfangsfüllstands niveau

In dieser Sensitivitätsanalyse wird die Abhängigkeit des Wertes beim „Intrinsic Rolling“-Verfahren von der Anfangs- und Endfüllstandsrestriktion untersucht. Hierzu wird die Bedingung von 40 % bis 100 % des Volumens verändert und der resultierende Erwartungswert sowie die Quantile des Endwertes berechnet.

	Sensitivität Anfangsfüllstands niveau						
Füllstand [%]	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Erwartungswert	1.906.197	1.912.017	1.918.292	1.923.904	1.929.174	1.933.790	1.941.181
5 % Quantil	1.655.542	1.661.546	1.667.550	1.673.554	1.679.558	1.685.562	1.691.566
95 % Quantil	2.441.614	2.465.156	2.471.160	2.477.164	2.483.168	2.467.640	2.452.831

Tabelle 11: Sensitivität des Wertes in Abhängigkeit des Anfangsfüllstandes

In *Tabelle 11* sind der Erwartungswert sowie die Quantile der Verteilung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Wert des Speichers unabhängig ist von der Füllstandsrestriktion. Dieses ist kein allgemeingültiges Ergebnis, sondern der besonderen Konstellation aus Speicherparametern und der Form der zugrunde liegenden Forwardkurve geschuldet.

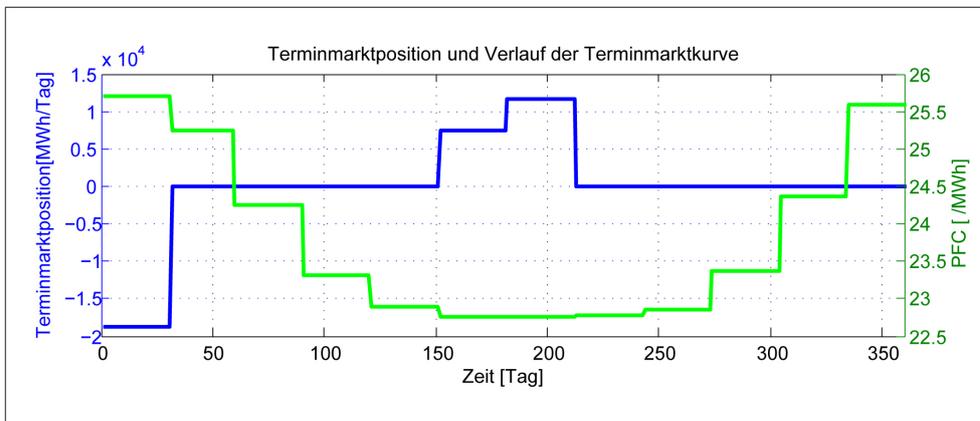


Abbildung 12: Terminmarktposition des Intrinsic Hedge mit Anfangsfüllstand von 100 %

Die Erklärung der Ursache lässt sich anhand von *Abbildung 12* und *Abbildung 13* vornehmen. Hierbei zeigt sich, dass das Eingehen der Longposition im Terminmarkt nicht sensitiv ist gegenüber einer Veränderung des Anfangsfüllstands niveaus, da die Sommerpreise in der Forwardkurve am niedrigsten sind. Daneben ist die Forwardkurve im Dezember auf nahezu identischem Niveau wie im Januar, sodass eine Verschiebung von verkauften Terminkontrakten zwischen Januar und Dezember keine Ergebnisänderung bewirkt. Wenn die Forwardkurve einen klaren Trend oder unterschiedliche Niveaus zwischen den beiden Winterhälften aufweisen würde, hätte die Anfangsfüllstandsrestriktion einen Einfluss auf den Wert des

„Intrinsic Hedge“ und damit auch auf den Erwartungswert des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens.

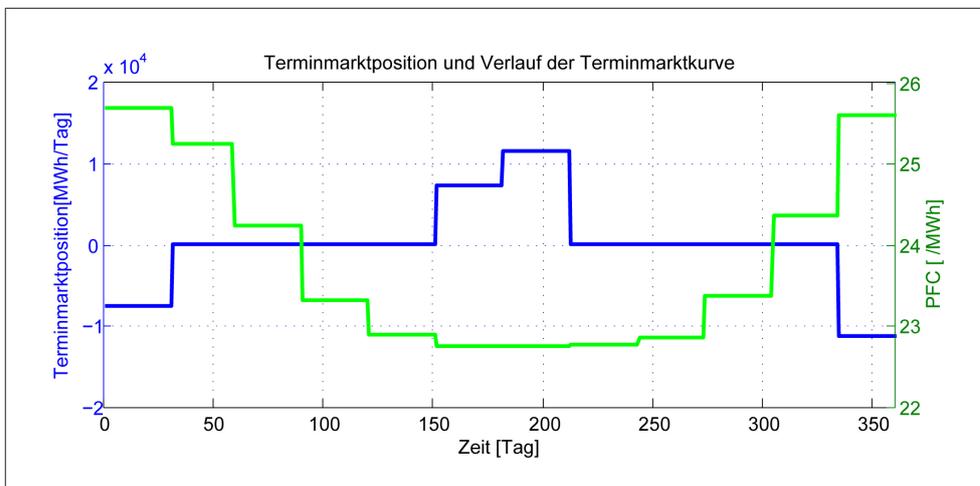


Abbildung 13: Terminmarktposition des Intrinsic Hedge mit Anfangsfüllstand von 40 %



In diesem Kapitel wurde eine risikofreie Bewirtschaftungsstrategie von Speichern im Terminmarkt vorgestellt. Hierbei wird initial der Speicher am Terminmarkt arbitragefrei optimiert und dann werden die daraus resultierenden Handelspositionen eingegangen. Mithilfe der dynamischen Strategie „Intrinsic Rolling“ können neu auftretende risikofreie Handelsmöglichkeiten genutzt und eine Wertsteigerung gegenüber dem Anfangshedge erzielt werden. Die Intrinsic-Hedge-Bewertung stellt eine Wertuntergrenze der Intrinsic-Rolling-Bewertung dar.

Der Wert eines Speichers wird marktseitig insbesondere von der Volatilität und der Korrelation der einzelnen Terminmarktsegmente getrieben. Die Zeit-bis-Fälligkeits-Struktur der Volatilität zeigt, dass dieses Verfahren insbesondere kurz vor Fälligkeit der Positionen an Wert gewinnt. Der Hauptvolatilitätstreiber in Form der Parallelverschiebung kann nicht wertbringend in diesem Verfahren genutzt werden.

Das „Intrinsic Rolling“-Verfahren stellt vergleichsweise geringe Anforderungen an das methodische Know-how und die Handelskompetenz. In der Optimierung können sehr komplexe Restriktionen und die Illiquidität des Marktes in Form der zur Verfügung stehenden Produkte und des Bid-Ask-Spreads abgebildet werden. Das Verfahren gibt direkte Anweisungen zur Ausführung geeigneter Hedging-Aktivitäten.

Das „Intrinsic Rolling“-Verfahren ist reaktiv ausgerichtet und antizipiert keine Erwartungshaltung auf zukünftige Veränderungen, wie es in der stochastischen Optimierung in Form der Delta-Steuerung üblich ist.

Als Ergebnis von Sensitivitätsanalysen lässt sich festhalten, dass die Berücksichtigung von Bid-Ask-Spreads eine deutliche Wertminderung erwirkt, wohingegen eine Absenkung der Handelsfrequenz einen geringeren Einfluss auf die Wertentwicklung besitzt. Dies zeigt, dass das Verfahren gut im Alltag ohne große Abschlüsse durchführbar ist.

Der „Intrinsic Hedge“ sollte bei Abschluss eines Vertrages immer als Mindest-Benchmark einem Händler gegenüber aufgestellt werden. Eine Verzögerung des Beginns des „Intrinsic Rolling“ erhöht hierbei deutlich die Risiken, diesen zu verfehlen.

### 3 Bewertung mithilfe eines Spotmodells

Im letzten Kapitel wurde eine deterministische Optimierungsmethodik vorgestellt, welche in Form des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens den Wert eines Speichers durch den Wert der gehandelten Terminmarktpositionen beziffern kann.

In der nun vorgestellten Systematik der stochastischen Optimierung wird davon ausgegangen, dass der Speicher flexibel täglich Kauf- und Verkaufsentscheidungen für den nächsten Tag gegenüber dem Spotmarkt innerhalb seiner gesetzten Restriktionen trifft. Durch die tägliche Einsatzentscheidung wird die maximale Flexibilität des Speichers genutzt. Aufgrund dieser Flexibilität kann man einen Speicher als Realloption auffassen. Mithilfe der Flexibilität lässt sich nicht nur der vorhersehbare Spread entlang der Forwardkurve, sondern lassen auch unvorhersehbare Preisänderungen gewinnbringend durch eine optimale Strategie von Ein- und Auspeichervorgängen umsetzen.

Die Volatilität des Spotpreisprozesses ist somit eine weitere Wertkomponente des Speichers, welche mithilfe dieses Verfahrens bewertet werden kann. Grundlagen dieser Entscheidungen sind bei der Spotoptimierung das in Zukunft erwartete Spotpreisniveau sowie der aktuelle Speicherfüllstand. Das erwartete Spotpreisniveau entspricht dem Futurepreis (*Risikoneutralität*). Gegenüber der deterministischen Optimierung wird die Entscheidung in diesem Bewertungsalgorithmus unter höherer Unsicherheit formuliert, da die Volatilität des Spotpreises die Volatilität der Forwardkurve deutlich übersteigt. Die höheren Risiken werden aber auch mit einem höheren Erwartungswert als beim „Intrinsic Rolling“ kompensiert.

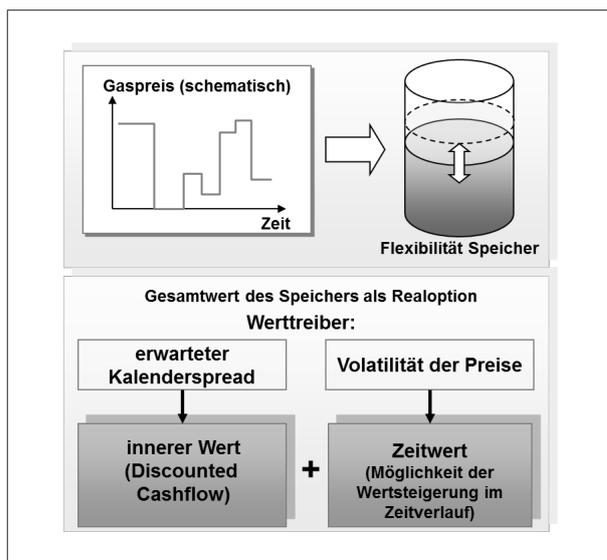


Abbildung 14: Innerer Wert und Zeitwert des Speichers

Der Zeitwert des Speichers entsteht durch diese Flexibilität in Kombination mit der möglichen Abweichung der realisierten Spotpreise von der aktuellen Forwardkurve. Mithilfe eines geeigneten Hedgings lässt sich dieser Zeitwert auch theoretisch sichern.

### 3.1 Stochastische Optimierung

Bei der Bewertung des Speichers gegenüber dem Spotmarkt wird unterstellt, dass der tägliche Spotpreis für den nächsten Tag vor Festlegung der Speicherfahrweise bekannt ist und in die Entscheidung mit einfließt.

Das Speicherbewertungsproblem im Spotmarkt soll nun geeignet formalisiert werden, um die Zielfunktion der Optimierung aufzustellen. Hierzu wird der gesamte Zeitraum  $[t_0; T]$  der Speicherbewirtschaftung in  $n$  Zeitschritte diskretisiert. Zu den jeweiligen Zeitpunkten kann durch den Inhaber des Speichers die Speicherfahrweise für den Spotmarkt des nächsten Tag festgelegt werden. Die jeweilige Speicherfahrweise korrespondiert mit einer Zustandsänderung des Füllstandes im Speicher  $v(t)$  (Einspeisung, Ausspeisung, keine Aktion). Die Zustandsänderung ist wiederum mit einer konkreten Auszahlung  $h(S(t), v(t))$  verbunden. Da zum Zeitpunkt der Zustandsänderung der zugrunde liegende Spotpreis bekannt ist, ist auch die daraus folgende Auszahlung  $h$  für die Beurteilung der Zustandsänderung eindeutig bestimmbar. Allgemein kann dies wie folgt formuliert werden:

$$h(S(t), v(t)) = \begin{cases} -(S(t) + cost_{inj})v(t) & \text{Einspeisung} \\ -(S(t) + cost_{extr})v(t) & \text{Ausspeisung} \\ 0 & \text{Stillstand} \end{cases}$$

Bei einer Einspeisung ist  $v(t)$  positiv, sodass der Zahlungsstrom negativ wird. Bei einer Ausspeisung ist  $v(t)$  negativ, sodass ein positiver Zahlungsstrom resultiert.

Die Entwicklung des Füllstandes  $Vol$  im Zeitablauf ergibt sich aus der Aggregation der Zustandsänderungen über die Zeit:

$$Vol(t) = Vol(0) + \sum_{\tau=1}^n v(\tau)$$

Für den Füllstand existieren die gleichen Restriktionen wie in Kapitel 2 dargestellt.

$$Vol_{min}(t) \leq Vol(t) \leq Vol_{max}(t)$$

$$v_{min}(t) \leq v(t) \leq v_{max}(t)$$

Die Restriktionen des Speichers führen dazu, dass die Speicherfahrweise in  $t$  die mögliche Speicherfahrweise in  $t + 1$  beeinflusst. Für die Bewertung des Speichers  $W$  im Zeitpunkt  $t$  muss somit die optimale Speicherfahrweise  $\pi$  für den gesamten

restlichen Zeitraum bestimmt werden, die sich aus der heutigen sicheren Auszahlung und den zukünftigen unsicheren Auszahlungen zusammensetzt:

$$W(t, S(t), vol(t)) = \sup_{\pi} E \left[ \sum_{t=1}^T e^{-rt} h(S(t), v(t)) | \mathfrak{I}(t) \right]$$

Unter der Annahme eines vollständigen Marktes und des damit korrespondierenden risikoneutralen Wahrscheinlichkeitsmaßes entspricht der arbitragefreie Wert des Speichers dem Erwartungswert der aggregierten Cashflows  $h$  der optimalen Speicherfahrweise  $\pi$ . Hierbei wird unterstellt, dass alle Informationen des Spot- und Terminmarktes  $\mathfrak{I}(t)$ , welche zum Zeitpunkt der Bewertung bekannt sind, in der Auffindung der optimalen Speicherfahrweise verarbeitet werden. Eine entscheidende Bedingung für diese Form der präferenzfreien Bewertung ist, dass jederzeit ein Portfolio aus dem Speicher und Terminmarktgeschäften konstruiert werden kann, dessen Wertänderung unabhängig von der konkreten Spotpreisentwicklung dem risikofreien Zinssatz  $r$  entspricht.

Für das Auffinden der optimalen Speicherfahrweise und dem damit verbundenen Erwartungswert in  $t$  kann die dynamische Programmierung verwendet werden, in der das Problem numerisch iterativ rückwärtig gelöst wird.

Im letzten Zeitpunkt  $T$  kann die optimale Fahrweise leicht bestimmt werden, da keine Unsicherheit mehr vorherrscht. Der Spotpreis und die Füllstandsrestriktion bestimmen eindeutig die optimale Strategie.<sup>16</sup>

$$W(T, S(T), vol(T)) = \max_{v \in U(T, v(T))} h(S(T), v(T))$$

Der Wert wird für alle potenziellen Füllstandsniveaus errechnet. Der Wert des Speichers aller vorangegangenen Zeitschritte kann in den inneren Wert der direkten Ausübung  $h(S(t), v(t))$  und den „Continuation Value“ CV aller zukünftigen erwarteten Cashflows bei Durchführung der Aktion  $v(t)$  aufgespalten werden.

$$W(t, S(t), vol(t)) = \max_{v \in U(t, vol(t))} h(S(t), v(t)) + CV(t, S(t), vol(t), v(t))$$

Inhaltlich bedeutet dies, dass im Zeitschritt  $t$  die Auszahlung aller möglichen Aktionen (Einspeisung, Ausspeisung, Stillstand) und die daraus abgeleiteten bedingten, erwarteten optimalen Auszahlungen der Folgeperioden gegeneinander abgewogen werden müssen, um die optimale Aktion in  $t$  für die Speicherbewirtschaftung zu ermitteln. Die erwartete Auszahlung hängt deshalb von der Aktion  $v(t)$  in  $t$  ab, da ein Einspeichern in  $t$  zu höheren erwarteten Cashflows der Folgeperioden führen sollte als eine Ausspeicherung. Konkret bedeutet dies, dass in  $t$  ein Ausspeichern optimal ist, wenn die direkte Auszahlung  $h$  und die daraus resultierenden erwarteten

<sup>16</sup>  $U$  stellt das Set aller erlaubten Füllstandsänderungen zum Zeitpunkt  $t$  dar.

teten Cashflows der Folgeperiode mit einem um  $v(t)$  verringerten Füllstand größer sind als die Komposition aus direkter Auszahlung und „Continuation Value“, also beiden anderen möglichen Aktionen (Einspeicherung und Stillstand).

Der „Continuation Value“ wiederum stellt den Erwartungswert des Speichers nach Ausübung für den nächsten Zeitschritt, sodass hierdurch eine rekursive Beziehung hergestellt wird.

$$CV(t, S(t), vol(t), v(t)) = E[e^{-r}W(t+1, S(t+1), vol(t) + v(t))]$$

Der CV ist zum Zeitpunkt  $t$  unsicher, sodass hierüber eine Erwartungshaltung gebildet werden muss.

In der stochastischen Optimierung stehen unterschiedliche Ansätze zur Berechnung des Wertes des Speichers  $W$  und des „Continuation Value“ CV zur Verfügung. Hierzu zählen u. a. Finite Differenzen-Gitter, Trinomialbäume oder die Least-Squares-Monte-Carlo-Simulation (LSMC), deren Lösungsalgorithmus im Folgenden näher erläutert werden soll.<sup>17</sup>

Longstaff und Schwartz<sup>18</sup> haben gezeigt, dass der „Continuation Value“ CV durch Linearkombinationen von Basisfunktionen  $\varphi$  approximiert werden kann. Anhand dieser Funktionen kann der bedingte Erwartungswert für alle erlaubten Füllstandsniveaus  $Vol$  und Aktionen  $v$  in allen simulierten Preispfaden  $w$  berechnet werden:

$$CV(t, S(t, w), Vol(t), v(t)) \approx \sum_{i=1}^n \varphi_i(t, S(t, w), Vol(t), v(t)) \beta_{i,t}$$

Die Parameter der Basisfunktionen werden mithilfe einer Regression in einem ersten Schritt geschätzt und dann zur Berechnung von CV verwendet. Dieses wird in jedem Zeitschritt  $t$  rückwärtig iterativ durchgeführt. Mithilfe des „Continuation Value“ kann wiederum die optimale Strategie in dem jeweiligen Pfad festgelegt und der Wert des Speichers  $w$  in  $t$  errechnet werden – als Erwartungswert aller optimal ausgeübten Auszahlungen von  $t$  bis  $T$ .

Neben dem fairen Wert der Optionalität des Speichers  $W(0)$  ergibt sich noch ein weiterer interessanter Sachverhalt, der insbesondere zur Steuerung eines Speichers verwendet werden kann. Da in jedem Zeitschritt und für jedes Volumen eine Regressionsfunktion für den „Continuation Value“ parametrisiert wurde, kann diese dazu verwendet werden, in jedem Zeitpunkt  $t$  einen Schwellwert der Zustandsvariablen Spotpreis zu berechnen, ab dem eine vorzeitige Ausübung in Form eines Ein- bzw. Ausspeisevorgangs sinnvoll ist.

<sup>17</sup> Vgl. Boogert, A., de Jong, C.

<sup>18</sup> Vgl. Longstaff, F., Schwartz, E. (2001).

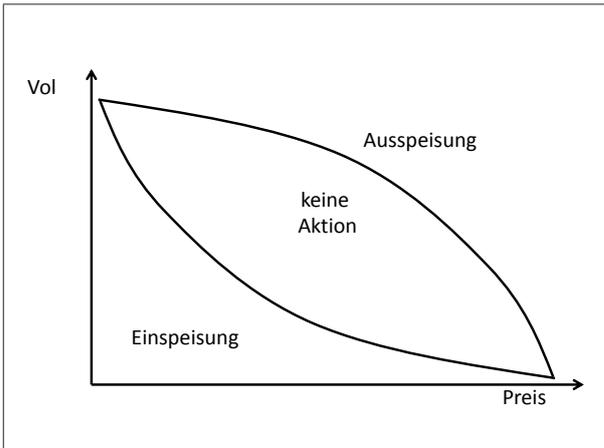


Abbildung 15:  
Schematische Darstellung der Ausübungsgrenzen eines Speichers

Mittels dieser Information kann die Option anhand dieser Schwellgröße vom Inhaber gesteuert und optimal im Spotmarkt eingesetzt werden. Unter dem zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Informationsstand bedeutet dies, die optimale Strategie zu verfolgen. Dies muss nicht mit der ex post ermittelbaren optimalen Ausübung übereinstimmen, da der Algorithmus über keine perfekte Voraussicht einer deterministischen Optimierung verfügt.

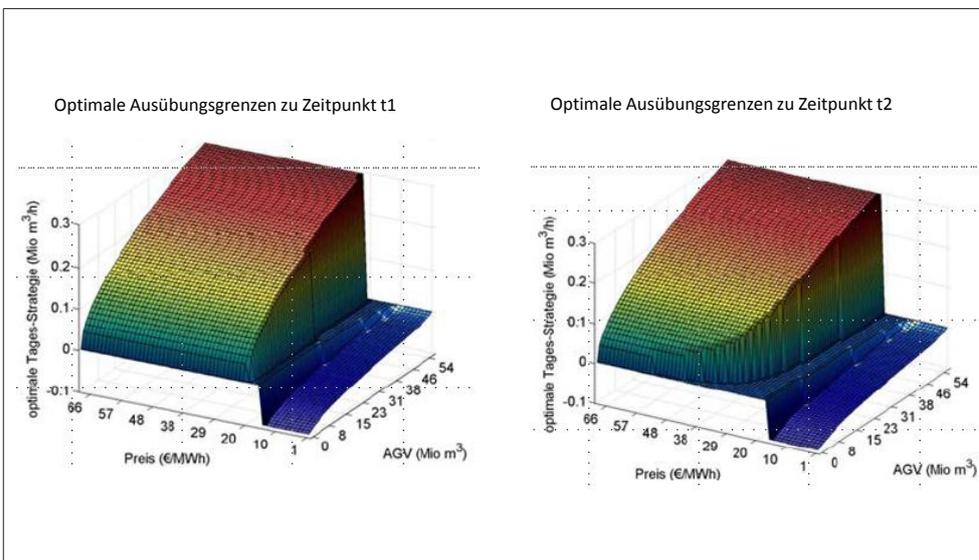


Abbildung 16: Darstellung der Ausübungsgrenzen eines Speichers zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten



Zur Durchführung der LSMC-Simulation sind folgende Schritte durchzuführen:

1. Simulation einer  $(m \times n)$  Zustandsmatrix von Preisen mit  $w$  Pfaden und  $n$  Ausübungszeitpunkten unter Verwendung risikoneutraler Wahrscheinlichkeiten

2. Berechnung des Wertes des Speichers in  $T$  bzgl. aller Füllstandsniveaus
3. Rückwertige iterative Berechnung des Wertes in  $t = T-1$  bis  $t = 0$ 
  - a. Aufstellen eines Sets von Basisfunktionen  $\varphi_t$
  - b. Bestimmung des bedingten Erwartungswertes CV in jedem Zeitschritt  $t$  und Füllstandsniveau mithilfe der Regression
  - c. Wahl der optimalen Ausübung des Speichers in  $t$
4. Abdiskontierung des Erwartungswertes aller Auszahlungen der optimalen Stoppsstrategie in  $t = 0$

### 3.2 Spotpreismodellierung

Der erste Bestandteil des LSMC-Prozesses stellt die risikoneutrale Modellierung des Spotpreisprozesses dar. Hierbei wird i. d. R. unterstellt, dass sich der (logarithmierte) Spotpreis  $\ln(S(t) = x(t))$  aus zwei unbeobachtbaren dynamischen Komponenten (Zustände  $\chi(t)$  und  $\xi(t)$ ) sowie einer deterministischen Saison  $Sai(t)$  zusammensetzt:

$$S(t) = e^{\chi(t) + \xi(t) + Sai(t)}$$

Die deterministische Saisonfunktion  $Sai$ , welche die saisonalen Elemente des Preises aufnimmt, kann als Fourier-Reihe formuliert werden.

Die Stochastik des Prozesses wird durch diese Formulierung in zwei Bestandteile zerlegt. Der Prozess  $\chi(t)$  repräsentiert die kurzfristige Störung des Gesamtsystems. Kurzfristige Störungen bei leitungsgebundenen Gütern können zu großen Preisbewegungen und somit zu einer erhöhten Volatilität in angespannten Situationen des Gesamtsystems führen. Die Auswirkung solcher Störungen hängt wesentlich von der im System zur Verfügung gestellten Speicherkapazität ab. Hierunter fallen alle kurzfristigen Ungleichgewichte des Gesamtsystems, welche z. B. durch Unterbrechungen von Interkonnektoren oder kurzfristige Nachfrageschwankungen aufgrund extremer Wettersituationen vorliegen. Die zugrunde liegenden Ursachen sind nicht persistent, sodass der Preisschock wieder ausgeglichen wird (z. B. durch eine Rückkehr der Temperatur zum langfristigen Durchschnitt).

Für die mathematische Formulierung solcher Phänomene kann ein Mean-Reversion-Prozess verwendet werden.

$$d\chi(t) = \kappa\chi(t)dt + \sigma_\chi(t)dz_\chi(t)$$

$\kappa$ : Rückregelungsrate des Prozesses

$d\chi$ : Veränderung der kurzfristigen Preiskomponente zwischen zwei Zeitschritten

$dt$ : Zeitintervall zwischen zwei Simulationsschritten

$\sigma\chi$ : Volatilität in Prozent p. a.

$d\chi$ : Wiener-Prozess der kurzfristigen Preiskomponente

Hierbei wird eine Abfolge von Störungen (Stochastische Differentialgleichung (SDE)) modelliert, die mit dem Zeitablauf durch die Konstante ( $\kappa < 1$ ) wieder abgebaut werden, sodass eine stetige Tendenz zur Rückkehr zum langfristigen Gleichgewicht von null besteht.

In der Regel bewegen sich alle Commodities mehr oder weniger stark korreliert in Abhängigkeit von globalen langfristigen Konjunkturzyklen bzw. der geopolitischen Lage, sodass neben den besprochenen stationären Abweichungen zusätzlich eine nicht stationäre Komponente in Form einer geometrischen Brownschen Bewegung zu berücksichtigen ist. Die Störung dieser Komponente ist dauerhaft:

$$d\xi(t) = \mu dt + \sigma_\xi(t) dz_\xi(t)$$

$d\xi$ : Veränderung der langfristigen Preiskomponente zwischen zwei Zeitschritten

$dt$ : Zeitintervall zwischen zwei Simulationsschritten

$\sigma_\xi$ : Volatilität in Prozent p. a.

$d\xi$ : Wiener-Prozess der langfristigen Preiskomponente

$\mu dt$ : erwartete Rendite in einer Zeiteinheit  $dt$

Die Schätzung dieser beiden Prozesse muss mithilfe der Kalman-Filter-Technik erfolgen, da diese nicht direkt beobachtbar sind. Eine genaue Unterteilung der Gesamtvolatilität in die beiden zugrunde liegenden Prozesse ist für eine genaue Bewertung des Speichers von herausragender Bedeutung, wie im *Abschnitt .3.4.4* nachfolgend noch demonstriert wird.

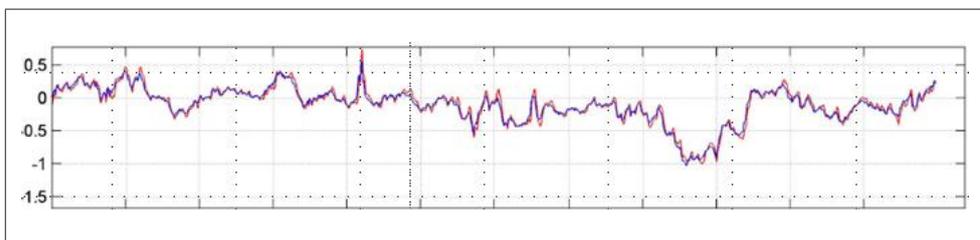


Abbildung 17: Kalmanfilter-des unbeobachteten kurzfristigen Prozesses

Die Abbildung 17 und Abbildung 18 zeigen die Zerlegung des beobachtbaren logarithmierten und desaisonalisierten Spotpreis in seine zwei unbeobachtbaren Einzelbestandteile. Hierbei zeigt sich sehr schön die Mean-Reverting-Eigenschaft im kurzfristigen Prozess und die Entwicklung des langfristigen Prozesses.

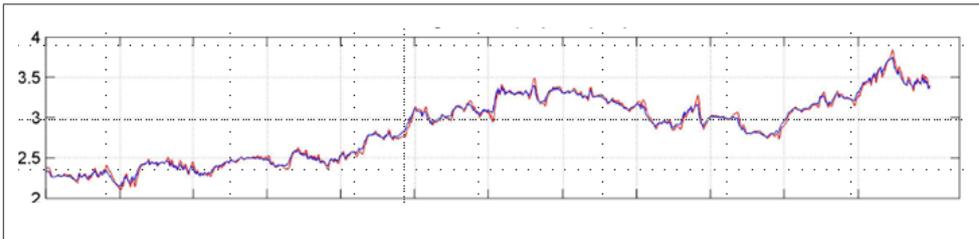


Abbildung 18: Kalman-Filter des unbeobachteten langfristigen Prozesses

Die Kalibrierung der Prozesse erfolgt somit zum einen an den Daten des historischen Spotmarktes. Daneben wird zur Kalibrierung die aktuelle Forwardkurve verwendet, um durch eine Anpassung einer Risikoprämie  $\lambda$  einen risikoneutralen Prozess zu formulieren (mathematisch:  $E_t(S(T)) = F_{t,T} e^{\lambda\sigma(T-t)}$ ).<sup>19</sup>

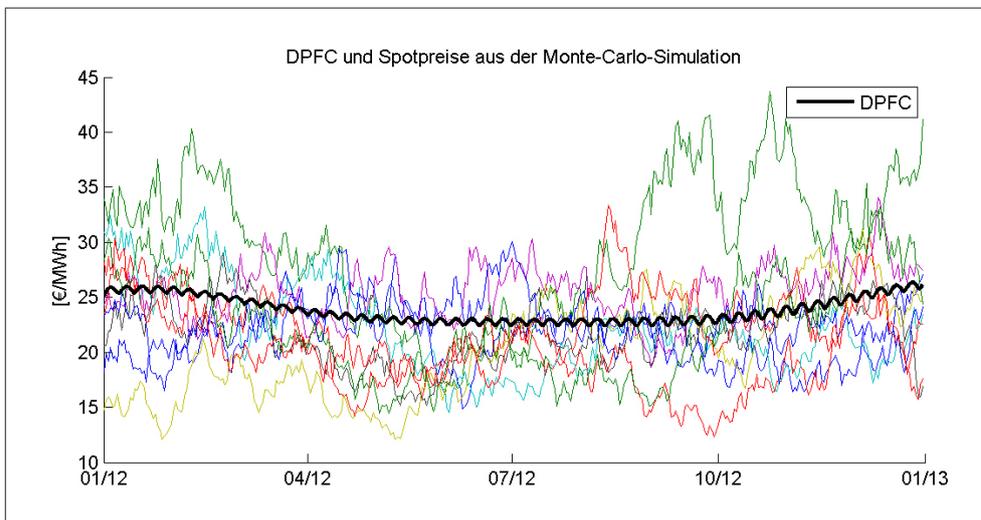


Abbildung 19: Spotpreissimulationen und Forwardkurve als Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation

### 3.3 Beispielalgorithmus der LSMC-Simulation

Zur Veranschaulichung der LSMC-Methodik soll der prinzipielle Algorithmus an einem kurzen Beispiel in stark vereinfachter Form dargestellt werden (siehe hierzu auch Longstaff, F./Schwartz, E. [2001]). Um die Komplexität des Problems zu reduzieren, wird eine amerikanische Putoption bewertet. Diese Form der Option gewährt eine Ausübung eines Verkaufsrechts (Auspeicherung) zu einem heute definierten Strike  $K$  innerhalb der Laufzeit  $[t = 0; T]$ . Das Speichersetting lässt sich in eine amerikanische Option umwandeln, wenn der Speicher keine Einspeiseleistung besitzt und genau einmal ausspeisen kann.

Der Zeithorizont wird wiederum in  $n$  Zeitschritte diskretisiert und eine simulierte Preismatrix ( $m \cdot n$ ) mit  $m$  Pfaden und  $n$  Ausübungszeitpunkten erzeugt, wobei jedes

<sup>19</sup> Vgl. hierzu z. B. Pilipovic, D.

Element  $S(w,t)$  den Preis im  $w$ -ten Pfad zum  $t$ -ten Ausübungszeitpunkt charakterisiert. Der zugrunde liegende Spotpreis  $S$  hat im Betrachtungszeitpunkt  $t = 0$  einen Wert von 1,00. Zur vereinfachten Darstellung werden  $n = 8$  Simulationenpfade für den Spotpreis generiert, die in Tabelle 12 abgetragen sind.

Pfad	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
1	1	1,09	1,08	1,34
2	1	1,16	1,26	1,54
3	1	1,22	1,07	1,03
4	1	0,93	0,97	0,92
5	1	1,11	1,56	1,52
6	1	0,76	0,77	0,9
7	1	0,92	0,84	1,01
8	1	0,88	1,22	1,34

Tabelle 12: Simulationenpfade des Beispiels

Jeweils zum Ende eines Jahres kann zu einem Preis  $K = 1,10$  die Option ausgeübt werden. Der risikolose Zinssatz  $r$  beträgt 6 % im Jahr bei kontinuierlicher Verzinsung.

Neben dem Spotpreis soll nun mit  $C(w, s; t, T)$  die Reihe der Cashflows im Pfad  $w$  dargestellt werden, unter der Maßgabe, dass die Option nicht vor  $t$  ausgeübt wird und der Optionshalter sich an die optimale Ausübungsstrategie in jedem Zeitpunkt  $s$  mit  $t < s \leq T$  hält (im Falle einer amerikanischen Option mit einem Ausübungsrecht würde demnach maximal ein Cashflow pro Pfad vorkommen).

Um die optimale Ausübungsstrategie und den damit verbundenen Cashflow zu erhalten, wird nun ein rückwärtsiterativer Algorithmus vorgestellt, der dazu führt, dass der Optionswert in  $t = 0$  ermittelt werden kann. Beginnend mit dem letzten Zeitpunkt  $T$  wird die optimale Strategie nur anhand des inneren Wertes der Option ermittelt, da die Option nicht mehr zu einem späteren Zeitpunkt ausgeübt werden kann und der „Continuation Value“ somit null beträgt.

$$C(w, T) = h(S(T)) = (K - S(w, T))^+$$

Könnte die Option nur zum Zeitpunkt  $t = 3$  ausgeübt werden, würde sie eine Auszahlung in Höhe ihres inneren Wertes generieren, für eine Putoption also  $\max(K - S(w, T), 0)$ . Die Auszahlungen sind in Tabelle 13 abgetragen.

Pfad	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
1			0,00
2			0,00
3			0,07
4			0,18
5			0,00
6			0,20
7			0,09
8			0,00

Tabelle 13: Auszahlungen zum letzten Ausübungstermin

Der Wert der Option bei direkter Ausübung zum Zeitpunkt  $t = 2$  ist in Tabelle 14 dargestellt.

Pfad	1	2	3	4	5	6	7	8
Innerer Wert $t = 2$	0,02	0	0,03	0,13	0	0,33	0,26	0

Tabelle 14: Innerer Wert der Option zum Zeitpunkt  $t = 2$

Auf den Pfaden 1, 3, 4, 6 und 7 ist die Option zu diesem Zeitpunkt im Geld. Für diese Pfade wird die folgende Beziehung für die Berechnung des „Continuation Value“ CV angenommen:

$$CV = a_1 a_1 + a_2 a_2 S + a_3 S^2 a_2 S^2$$

Die Parameter  $a$  können nun anhand der Preise in  $t = 2$  und der optimale Cashflow in  $t = 3$  durch eine Regression geschätzt werden.

$$\sum_{j=1}^5 (CV_j - a_1 - a_2 S_j - a_3 S_j^2)^2$$

Gemäß Tabelle 13 sind die zugehörigen Werte für die  $CV_j$ 's:  $0e^{1 \times (-0,06)}$ ,  $0,07e^{1 \times (-0,06)}$ ,  $0,18e^{1 \times (-0,06)}$ ,  $0,20e^{1 \times (-0,06)}$  und  $0,09e^{1 \times (-0,06)}$ . Die zugehörigen Spotpreise sind in Tabelle 12 abgetragen. Es ergeben sich somit aus der Regression folgende Werte:  $a_1 = -1,070$ ,  $a_2 = 2,983$  und  $a_3 = -1,813$ . Setzt man diese in obige Gleichung ein, lautet die Funktion des bedingten Erwartungswertes:

$$E[CV|S(w,t)] = -1,070 + 2,983 S(w,t) - 1,813 S(w,t)^2$$

Für die Pfade 1, 3, 4, 6 und 7 ergeben sich geschätzte Continuation Values von (0,0369), (0,0461), (0,1176), (0,1520) und (0,1565).

Pfad	1	2	3	4	5	6	7	8
innerer Wert $t = 2$	0,02	0	0,03	0,13	0	0,33	0,26	0
Continuation Value	0,04	0	0,05	0,12	0	0,15	0,16	0

Tabelle 15: Vergleich Continuation Value und innerer Wert der Option zum Zeitpunkt  $t = 2$ 

Diese vergleicht man mit den Auszahlungen bei sofortiger Ausübung (siehe Tabelle 15) zum Zeitpunkt  $t = 2$ . Eine sofortige Ausübung wäre somit bei den Pfaden 4, 6 und 7 optimal, wobei es auf den Pfaden 1 und 3 aussichtsreicher erscheint, zu einem späteren Zeitpunkt auszuüben.

Tabelle 16 zeigt die Auszahlungen der optimalen Stoppstrategie zum Zeitpunkt  $t = 2$  für alle acht Pfade, wenn zum Zeitpunkt 2 *oder* 3 ausgeübt wird. Da die Option bei Ausübung verfällt, müssen alle folgenden Auszahlungen im weiteren Verlauf eines Pfades bei vorzeitiger Ausübung auf null gesetzt werden. Pro Pfad darf bei diesem Optionstyp generell nur eine Auszahlung auftreten.

Pfad	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
1		0	0
2		0	0
3		0	0,07
4		0,13	0
5		0	0
6		0,33	0
7		0,26	0
8		0	0

Tabelle 16: Auszahlungen zu  $t_2$  und  $t_3$ 

Nach einem weiteren Schritt zurück in der Zeit wird für  $t = 1$  entsprechend verfahren. Mithilfe der Preise in  $t = 1$ , bei welchen der innere Wert größer null ist, wird der Cashflow der optimalen Stoppstrategie im Zeitraum  $[t = 2; t = 3]$  regressiert, um abermals die Regressionsparameter zu schätzen:

$$E[CV|S(w,t)] = 2,038 - 3,335S(w,t) + 1,356 S(w,t)^2$$

Der innere Wert und der Continuation Value zum Zeitpunkt  $t = 1$  sind in folgender Tabelle abgebildet.

Pfad	1	2	3	4	5	6	7	8
innerer Wert $t = 1$	0,01	0	0	0,17	0	0,34	0,18	0,22
Continuation Value	0,013			0,109		0,28	0,11	0,153

Tabelle 17: Vergleich Continuation Value und innerer Wert der Option zum Zeitpunkt  $t = 3$ 

Eine vorzeitige Ausübung ist somit in den Pfaden 4, 6, 7 und 8 angebracht.

Tabelle 18 enthält die so ermittelten optimalen Auszahlungen in  $t = 1$ . Auf den Pfaden 2 und 5 ist die Option während der gesamten Laufzeit nie im Geld und verfällt ohne eine Auszahlung. In einem einzigen Pfad erfolgt keine vorzeitige Ausübung der Option.

Pfad	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0,07
4	0,17	0	0
5	0	0	0
6	0,34	0	0
7	0,18	0	0
8	0,22	0	0

Tabelle 18: Auszahlungsprofil der gesamten Laufzeit

Der Gesamtwert der Option im Zeitpunkt  $t = 0$  ergibt sich aus dem Erwartungswert der abdiskontierten Cashflow-Matrix bei optimaler Ausübung:

$$W(t, S(t)) = \frac{1}{n} \sum_{w=1}^n \sum_{t=1}^T C(w, t) e^{-(t-t_0)r}$$

Er beträgt 0,1144 und ist damit ca. doppelt so hoch wie der Wert einer europäischen Option.

### 3.4 Fallbeispiele und Ergebnisse

Im Folgenden werden beispielhaft ein Kavernenspeicher und ein Kugelspeicher mithilfe der Least-Squares-Monte-Carlo-Simulation gegenüber dem Spotmarkt bewertet. Hierbei wird eine tägliche Bewirtschaftung mit Ein- und Ausspeisung entsprechend der optimalen Strategie unterstellt.

Kugelspeicher verfügen über hohe Ein- und Ausspeiseleistungen im Verhältnis zum Arbeitsgasvolumen und werden daher zum Ausgleich kurzfristiger Angebots- und

Nachfrageschwankungen verwendet. Dabei werden sowohl stochastische Preisdifferenzen zwischen verschiedenen Tagen als auch Spreads zwischen Werktagen und Wochenenden genutzt, um einen möglichst hohen Gewinn zwischen ein- und ausgespeistem Gas zu erzielen. Für das Nutzen von Preisdifferenzen über längere Zeiträume hinweg ist das Arbeitsgasvolumen von Kugelspeichern zu gering. Dies bedeutet, dass der Sommer-Winter-Spread in den Gaspreisen nicht von Kugelspeichern wertsteigernd genutzt werden kann. Dementsprechend eignen sie sich auch nicht für das „Intrinsic Rolling“-Verfahren.

Für den Ausgleich von saisonalen Schwankungen über das Jahr werden daher Kavernenspeicher verwendet, da diese über ein sehr viel größeres Arbeitsgasvolumen und damit auch über eine höhere Ein- und Ausspeisedauer verfügen. Typischerweise wird im Sommer zu niedrigen Preisen Gas eingespeist, welches im Winter zu höheren Preisen wieder ausgespeist wird. Kavernen können ähnlich wie Kugelspeicher auch kurzfristige Preisschwankungen verwerten. Dies stellt bei einer Kaverne im Vergleich zum Kugelspeicher jedoch einen geringeren Wertbestandteil dar. Im Gegensatz zum Kugelspeicher folgt der Füllstand einer Kaverne daher auch eher der Gaspreissaison.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen Kavernen- und Kugelspeichern liegt in der Umschlagshäufigkeit. Darunter versteht man das Verhältnis der Summe der Ein- bzw. Ausspeisemengen zum gesamten Arbeitsgasvolumen. Die Umschlagshäufigkeit gibt somit an, wie oft der Speicher sein Volumen im Jahr umsetzt. Bei Kavernen ist die Umschlagshäufigkeit eher gering, jedoch ist der durchschnittliche erwirtschaftete Spread relativ hoch. Kugelspeicher hingegen weisen üblicherweise eine höhere Umschlagshäufigkeit und geringere Spreads auf als Kavernen. Der Grund hierfür ist, dass Kavernen zur Ausnutzung der Gaspreissaison einen Großteil ihres Volumens dazu verwenden, Gas über einen längeren Zeitraum zu speichern, während Kugelspeicher geringere Preisunterschiede über einen kürzeren Zeitraum nutzen.

Im Folgenden wird nun die Bewertung eines Kavernen- und eines Kugelspeichers bei ausschließlicher Bewirtschaftung gegenüber dem Spotmarkt für das Kalenderjahr 2012 dargestellt. Die Bewertung erfolgt mit der Least-Squares-Monte-Carlo-Technik unter Simulation von 5.000 Szenarien der stündlichen Spotpreisentwicklung. Beide Speicher werden jeweils einmal mit und einmal ohne Einspeisekosten bewertet.<sup>20</sup>

Die Spezifikationen, die den Bewertungen zugrunde liegen, sind in Tabelle 19 dargestellt. Fixkosten werden bei der Bewertung nicht berücksichtigt, da sie für die Einsatzentscheidung des Speichers irrelevant sind. Der Start- und Endfüllstand wird in allen Bewertungen mit 60 % zum Beginn und zum Ende des Bewertungszeitraums vorgegeben.

<sup>20</sup> Die Bewertung mithilfe der Least-Square-Monte-Carlo-Optimierung erfolgt mithilfe der Software ARMS der Firma Price[it].

	Kavernenspeicher	Kugelspeicher
Arbeitsgasvolumen [m <sup>3</sup> ]	48.000.000	384.000
Ausspeiseleistung [m <sup>3</sup> /h]	80.000	8.000
Einspeiseleistung [m <sup>3</sup> /h]	40.000	8.000
Einspeisekosten [€/MWh]	0 bzw. 0,85	0 bzw. 0,85
Fülldauer [h]	1200	48
Entnahmedauer [h]	600	48

Tabelle 19: Spezifikationen der bewerteten Speicher

### 3.4.1 Bewertung einer Kaverne

Die Ergebnisse der Bewertung des Kavernenspeichers sind in Tabelle 20: zusammengefasst. Der Gesamtwert des Speichers (innerer Wert plus Zeitwert) bei Berücksichtigung von Einspeisekosten liegt bei 6,42 Mio. EUR. Ohne Einspeisekosten ist der Wert mit 7,96 Mio. EUR erwartungsgemäß höher.

[Mio. €]	Innerer Wert	Zeitwert	Stoch. Wert	5%-Quantil	95%-Quantil
Mit Einspeisekosten	1,51	4,91	6,42	3,28	9,70
Ohne Einspeisekosten	2,61	5,35	7,96	4,81	11,29

Tabelle 20: Deckungsbeiträge der Kavernen (Zusammenfassung)

Unterschiedliche Preisverläufe in den einzelnen Monte-Carlo-Durchläufen führen zu unterschiedlichen zeitlichen Spreads und somit auch zu einer Streuung der Deckungsbeiträge. Diese Verteilung ist in Abbildung 20 dargestellt. Der Deckungsbeitrag kann dabei auch negativ werden, da der Optimierungsalgorithmus keine perfekte Voraussicht für die Einsatzplanung besitzt. Die Spannweite zwischen 5-Prozent- und 95-Prozent-Quantil ist in den Fällen mit und ohne Einspeisekosten mit 6,43 bzw. 6,48 Mio. EUR in etwa gleich. Auch die Form der Verteilungen weist keine systematischen Unterschiede auf, sodass sich beide Fälle eher durch das Niveau der Deckungsbeiträge unterscheiden und die Verteilung ohne Einspeisekosten die zweite Verteilung bzgl. Erwartungswert und Risiko dominiert.

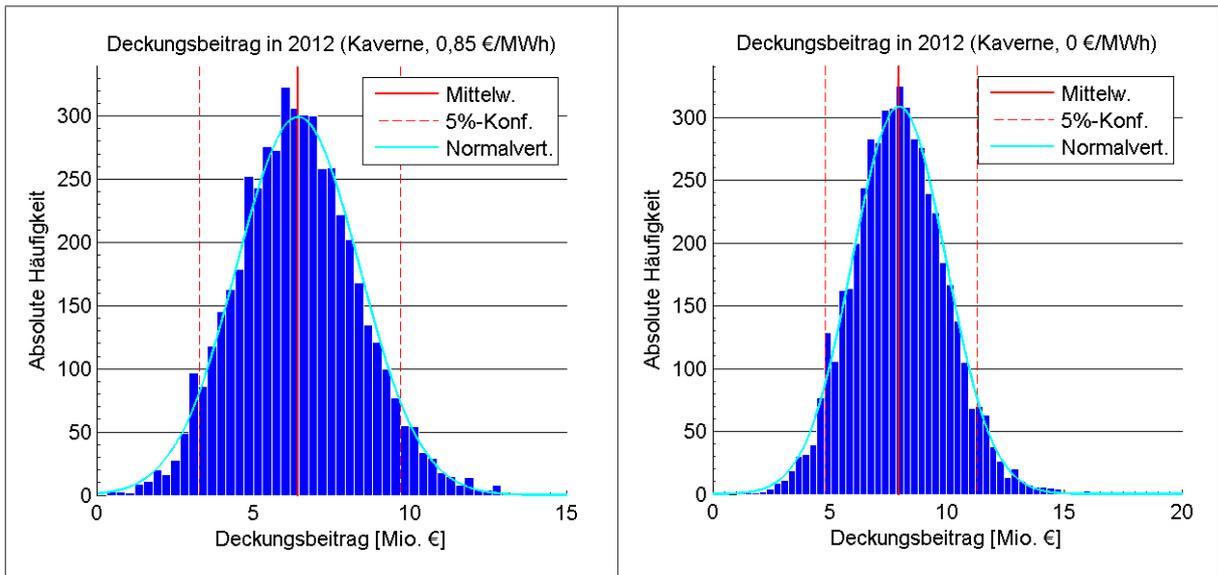
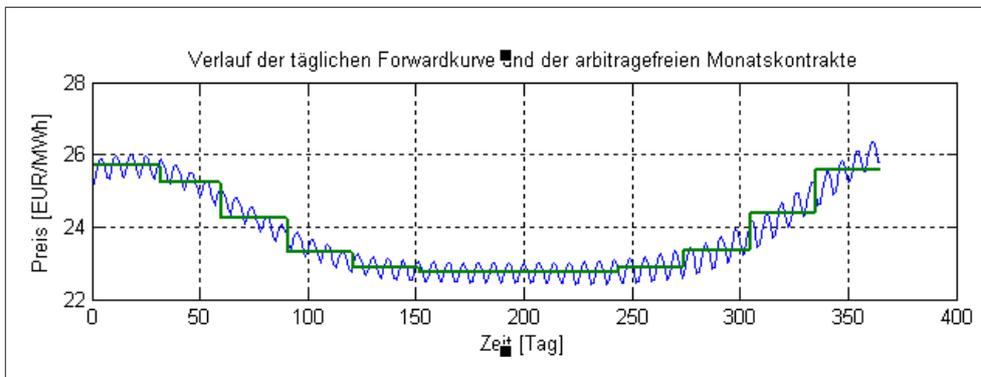


Abbildung 20: Verteilung der Deckungsbeiträge der Kavernen

Diese Einschätzung wird durch die in Abbildung 21 dargestellten monatlichen Deckungsbeiträge bestätigt, die sich im Wesentlichen nur durch ihr Niveau unterscheiden. Hier ist auch zu erkennen, dass die Kaverne ihr Geld hauptsächlich in den Wintermonaten verdient, wenn zu hohen Gaspreisen ausgespeist werden kann.



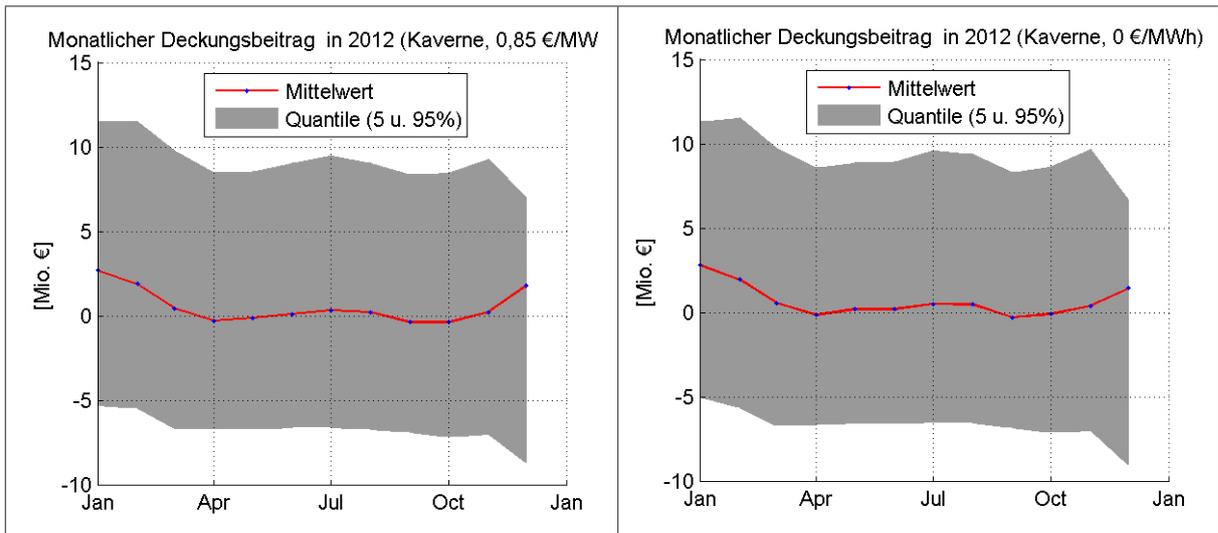


Abbildung 21: Monatliche Deckungsbeiträge der Kavernen

Abbildung 22 zeigt den Spread zwischen den durchschnittlichen Einspeisepreisen und den durchschnittlichen Ausspeisepreisen innerhalb eines Kalendermonats. Dieser Spread liegt bei Berücksichtigung von Einspeisekosten im Jahresmittel bei 3,97 EUR/MWh und damit deutlich über dem mittleren Spread ohne Einspeisekosten von 2,55 EUR/MWh. Der Grund hierfür liegt darin, dass der Speicher ohne Einspeisekosten versucht, jeden Spread zu realisieren, der im Erwartungswert größer null ist (sofern dies durch die Restriktionen aus Arbeitsgasvolumen und Ein- und Ausspeiseleistung möglich ist). Hingegen beschränkt sich der Speicher mit Einspeisekosten auf diejenigen (höheren) Spreads, die im Erwartungswert über den Einspeisekosten liegen.

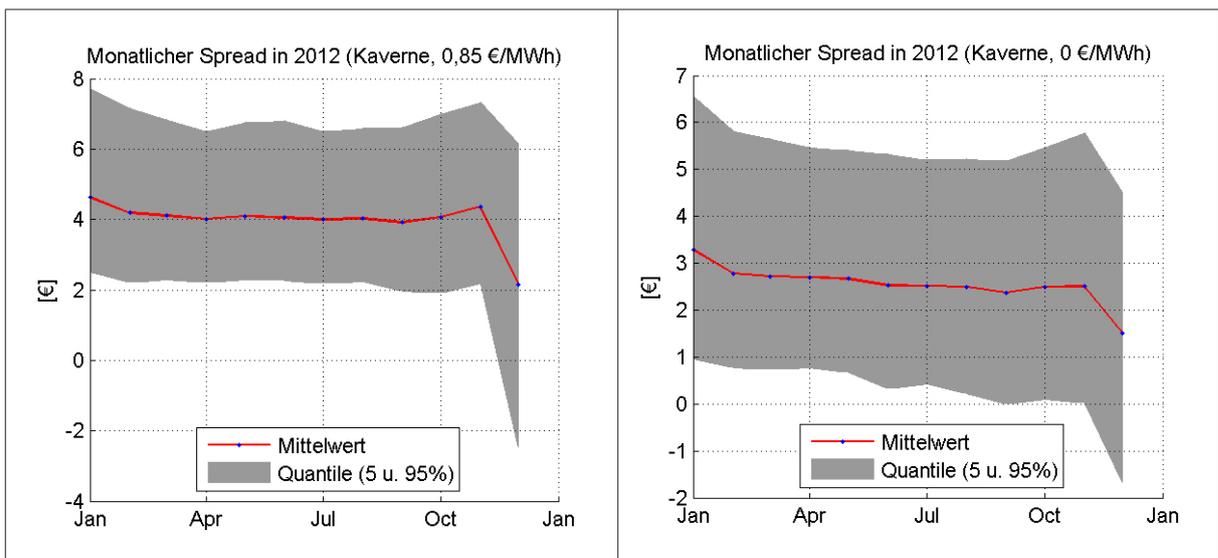


Abbildung 22: Monatliche Spreads der Kavernen

Die Einspeisekosten schränken somit die Aktivitäten des Speichers deutlich ein, was sich auch in der Umschlagshäufigkeit widerspiegelt. Während die Kaverne ohne Einspeisekosten eine erwartete Umschlagshäufigkeit von 4,0 aufweist, fällt dieser Wert bei Berücksichtigung von Einspeisekosten auf 2,6.

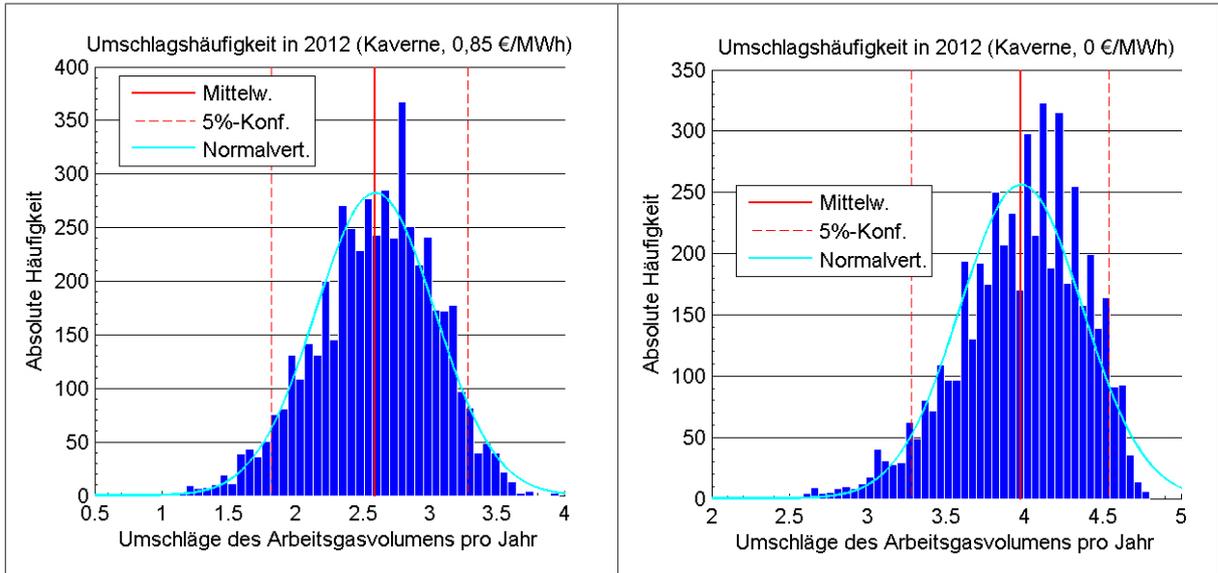


Abbildung 23: Verteilung der Umschlagshäufigkeiten der Kavernen

Abbildung 24 zeigt die erwarteten täglichen Füllstände und die erwarteten Preise (DPFC). Es ist zu erkennen, dass der Füllstand den Preisen vorwegläuft und der Speicher sich somit bei erwarteten Preissteigerungen füllt bzw. entsprechend bei erwarteten Preisrückgängen leert.

Der betrachtete Füllstand bewegt sich in einem recht engen Band. Dies liegt daran, dass es sich um den Mittelwert über alle Monte-Carlo-Simulationen handelt. In den einzelnen Monte-Carlo-Szenarien können die Füllstände durchaus stärker schwanken. Zudem können sich auch die Fahrweisen des Speichers in den Fällen mit und ohne Einspeisekosten deutlich stärker unterscheiden, als dies im Mittel der Fall ist.

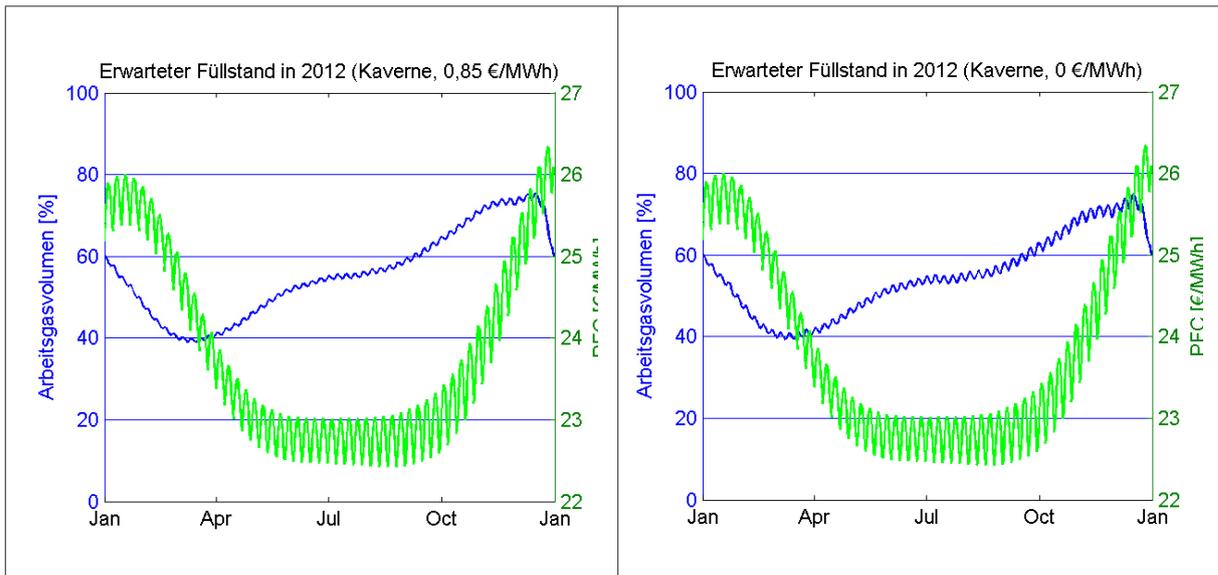


Abbildung 24: Erwartete tägliche Füllstände der Kavernen

Das in Tabelle 21 dargestellte Delta-Risiko bezeichnet die Sensitivität des Speicherwertes auf eine kleine Preisänderung. Hier ist ein Zusammenhang mit der Fahrweise zu erkennen. In den Zeiträumen, in denen der Speicher sich vorwiegend füllt, ist das Delta-Risiko negativ, da ein Preisanstieg zu einer Verringerung des Spreads führt. In den Zeiträumen, in denen der Speicher vorwiegend auspeist, ist das Delta-Risiko hingegen positiv, da Preissteigerungen zu einem höheren Spread führen.

	mit Einspeisekosten		ohne Einspeisekosten	
	Delta-Risiko [€]	Hedge [MW]	Delta-Risiko [€]	Hedge [MW]
Jan. 12	63.486	85,33	63.307	85,09
Feb. 12	52.335	77,88	51.066	75,99
Mrz. 12	-3.078	-4,14	-4.616	-6,20
Apr. 12	-33.366	-46,34	-33.531	-46,57
Mai. 12	-28.624	-38,47	-20.402	-27,42
Jun. 12	-19.241	-26,72	-20.005	-27,78
Jul. 12	-7.929	-10,66	-5.276	-7,09
Aug. 12	-12.645	-17,00	-6.872	-9,24
Sep. 12	-36.860	-51,19	-39.174	-54,41
Okt. 12	-35.766	-48,07	-30.659	-41,21
Nov. 12	-11.772	-16,35	-9.727	-13,51
Dez. 12	73.460	98,74	55.889	75,12

Tabelle 21: Delta-Hedge der Kavernen

Die Tabelle enthält zudem in den Spalten Hedge diejenigen Mengen der entsprechenden Monats-Futures, die notwendig sind, um das Portfolio aus Speicher und Futures Delta-neutral zu stellen. Für den Januar 2012 beispielsweise müssten Future-Kontrakte (mit Lieferzeitraum Januar 2012) mit einem Leistungswert von 85,33 MW verkauft werden. Diesen Wert erhält man, indem man das Delta-Risiko durch die Anzahl der Stunden des jeweiligen Monats teilt. Die Delta-Steuerung

unterscheidet sich fundamental von der Steuerung mithilfe des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens und muss täglich an das neu berechnete Delta angepasst werden. Wird der Speicher so bewirtschaftet, kann der Erwartungswert mithilfe der Hedging-Aktivitäten rein theoretisch erzielt werden. In der Praxis führen Transaktionskosten und die Diskretisierung der Terminmarktprodukte (mindestens Monatsprodukte) dazu, dass der Erwartungswert beim Delta-Hedging einen oberen Grenzwert darstellt und mit einer Restunsicherheit behaftet ist. Nichtsdestotrotz kann durch das Delta-Hedging die resultierende Streuung der Wertverteilung um den Erwartungswert deutlich reduziert werden.

### 3.4.2 Bewertung eines Kugelspeichers

Die Ergebnisse der Bewertung des Kugelspeichers sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Hier fällt zunächst auf, dass der Gesamtwert des Speichers ohne Berücksichtigung von Einspeisekosten mit ca. 164 TEUR mehr als doppelt so hoch ist wie bei Berücksichtigung von Einspeisekosten (ca. 81 TEUR).

[T€]	Innerer Wert	Zeitwert	Stoch. Wert	5%-Quantil	95%-Quantil
Mit Einspeisekosten	13,5	67,9	81,4	36,4	133,9
Ohne Einspeisekosten	141,0	23,4	164,4	99,7	236,1

Tabelle 22: Deckungsbeiträge der Kugeln (Zusammenfassung)

Die Spannweite zwischen 5-Prozent- und 95-Prozent-Quantil beträgt im Fall mit Einspeisekosten 97 TEUR. Im Fall ohne Einspeisekosten liegt dieser Wert bei 136 TEUR und ist damit deutlich höher. Wie auch in Abbildung 25 erkennbar ist, hat die Streuung der Verteilung somit zugenommen. Allerdings ist das Verlustrisiko gemessen am Value-at-Risk aufgrund des stark gestiegenen Niveaus der Deckungsbeiträge immer noch geringer als bei Berücksichtigung von Einspeisekosten.

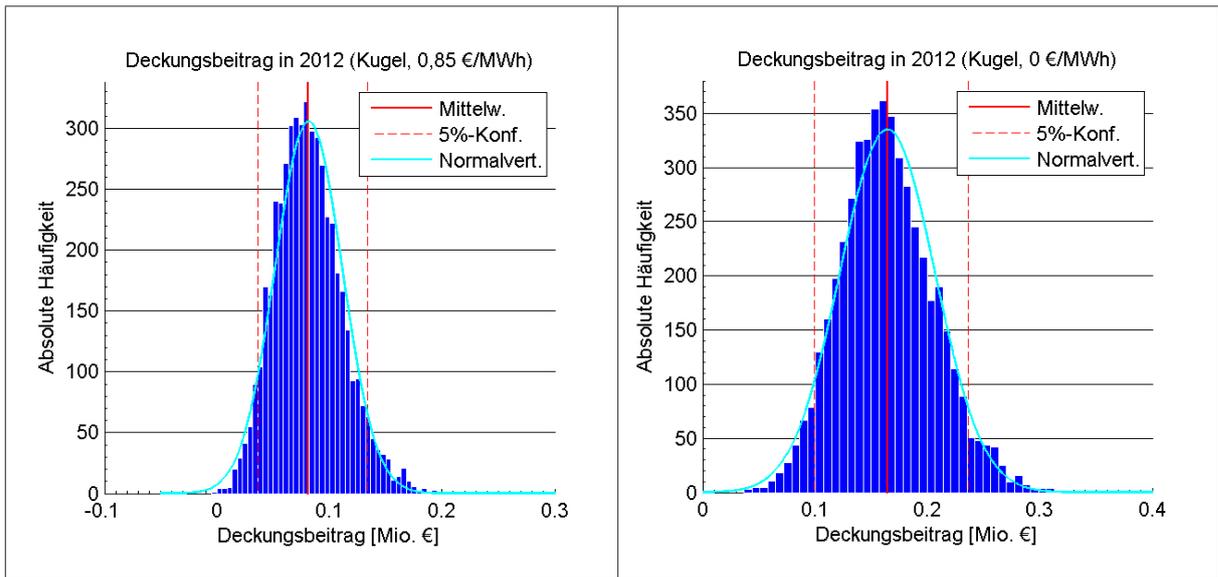


Abbildung 25: Verteilung der Deckungsbeiträge der Kugeln

Die höhere Streuung der Deckungsbeiträge schlägt sich auch in den monatlichen Deckungsbeiträgen in Abbildung 26 wieder. Hier ist zu bemerken, dass die Deckungsbeiträge keinen Einfluss der Gaspreissaison aufweisen, da der Kugelspeicher die saisonalen Schwankungen nicht nutzt.

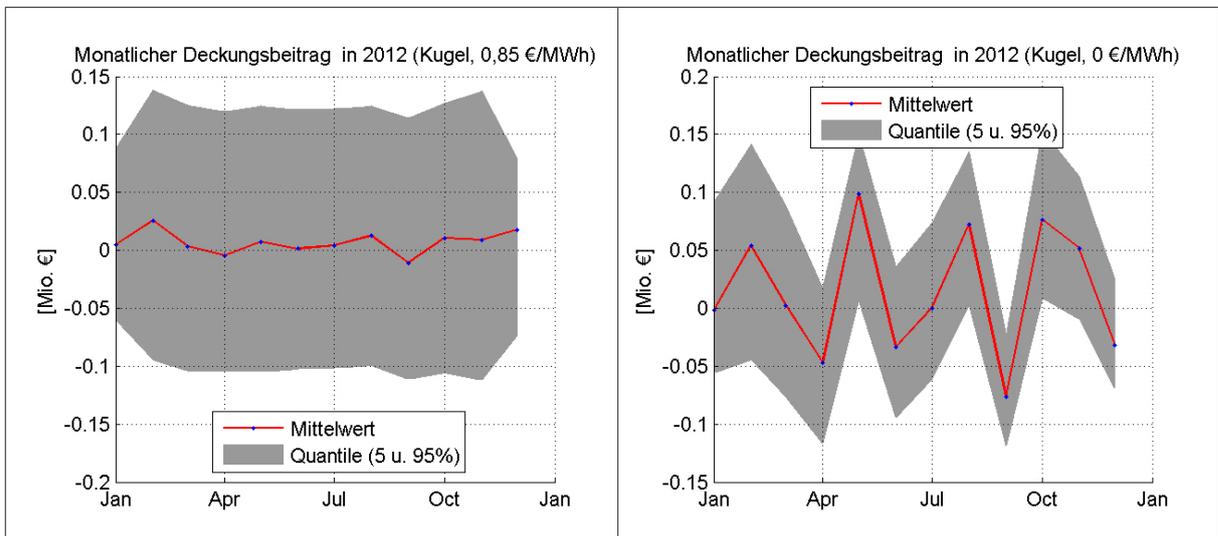


Abbildung 26: Monatliche Deckungsbeiträge der Kugeln

Der monatliche Spread in Abbildung 27 liegt bei Berücksichtigung von Einspeisekosten im Jahresmittel bei 3,88 EUR/MWh und ohne Berücksichtigung von Einspeisekosten bei 0,77 EUR/MWh. Während der mittlere Spread mit Einspeisekosten ungefähr beim mittleren Spread der Kaverne liegt, erwirtschaftet der Kugelspeicher ohne Einspeisekosten hingegen einen deutlich niedrigeren Spread als die Kaverne ohne Einspeisekosten (2,55 EUR/MWh). Die Ursache ist in der unterschiedlichen Umschlagshäufigkeit zu suchen.

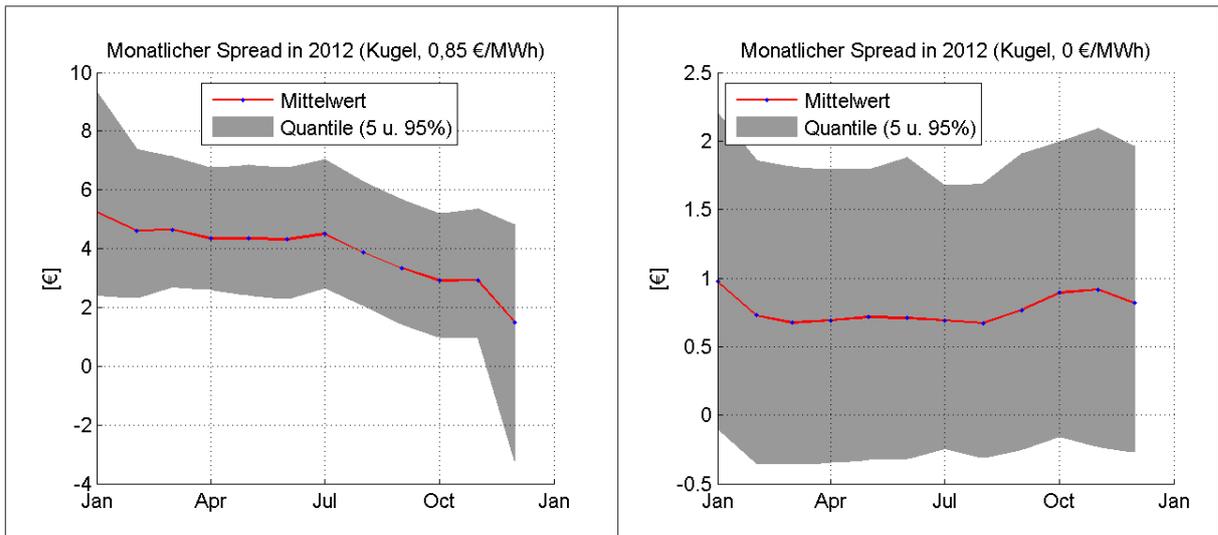


Abbildung 27: Monatliche Spreads der Kugeln

Abbildung 28 zeigt, dass die Umschlagshäufigkeit bei Berücksichtigung von Einspeisekosten bei 5,6 liegt, wohingegen sie ohne Berücksichtigung von Einspeisekosten mit 46,2 um ein Vielfaches höher liegt. Da es sich hierbei vor allem um die Ausnutzung von Differenzen zwischen Preisen am Wochenende und an Werktagen handelt, ist eine Umschlagshäufigkeit in der Größenordnung von 52 Wochen pro Jahr durchaus plausibel. Insgesamt lässt sich sagen, dass die Restriktionen, die den Speichern über die Einspeisekosten auferlegt werden, den Kugelspeicher in seiner Fahrweise wesentlich stärker einschränken, als es bei der Kaverne der Fall ist.

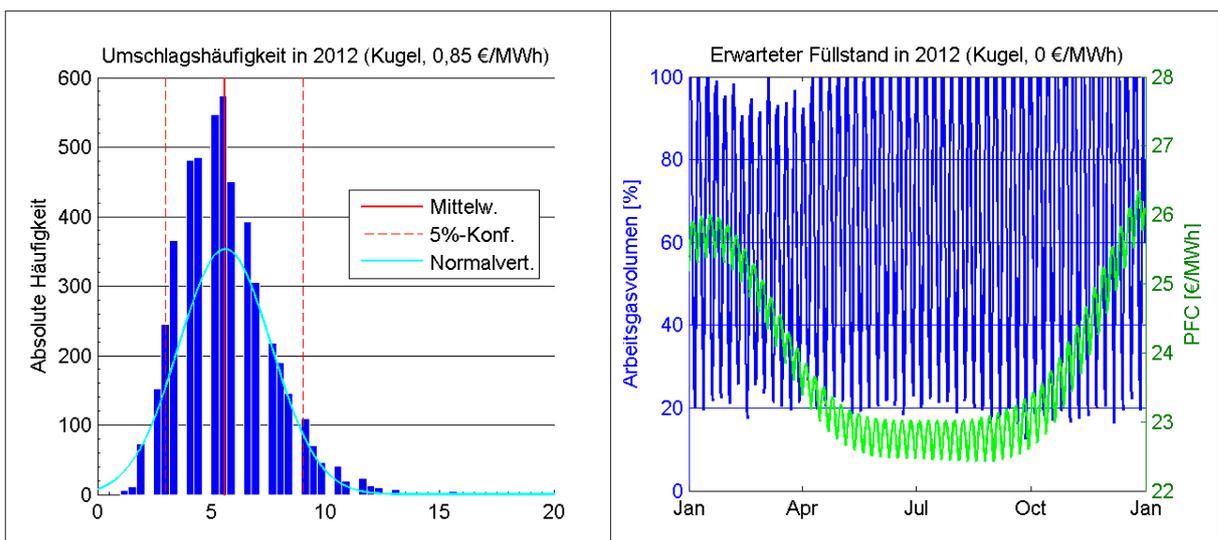


Abbildung 28: Verteilung der Umschlagshäufigkeiten der Kugeln

Beim Vergleich der Fahrweisen in Abbildung 29 zeigen sich die Auswirkungen der Einspeisekosten deutlich. Während der mittlere Füllstand bei Berücksichtigung von Einspeisekosten noch relativ gering schwankt und sich ähnlich wie die Kaverne an der Jahressaison der DPFC orientiert, bewegt sich der mittlere Füllstand ohne

Berücksichtigung von Einspeisekosten sowohl unabhängig von der Jahressaison als auch in einem wesentlich breiteren Schwankungsbereich. Der Kugelspeicher ohne Einspeisekosten kann zu wesentlich mehr Zeiten einen positiven Deckungsbeitrag generieren. Der Grund ist, dass der Kugelspeicher ein deutlich höheres Verhältnis von Ein- und Ausspeiseleistung zum Arbeitsgasvolumen besitzt als die Kaverne:

- Ausspeisen: Kaverne 0,17 %, Kugel 2,08 %
- Einspeisen: Kaverne 0,08 %, Kugel 2,08 %

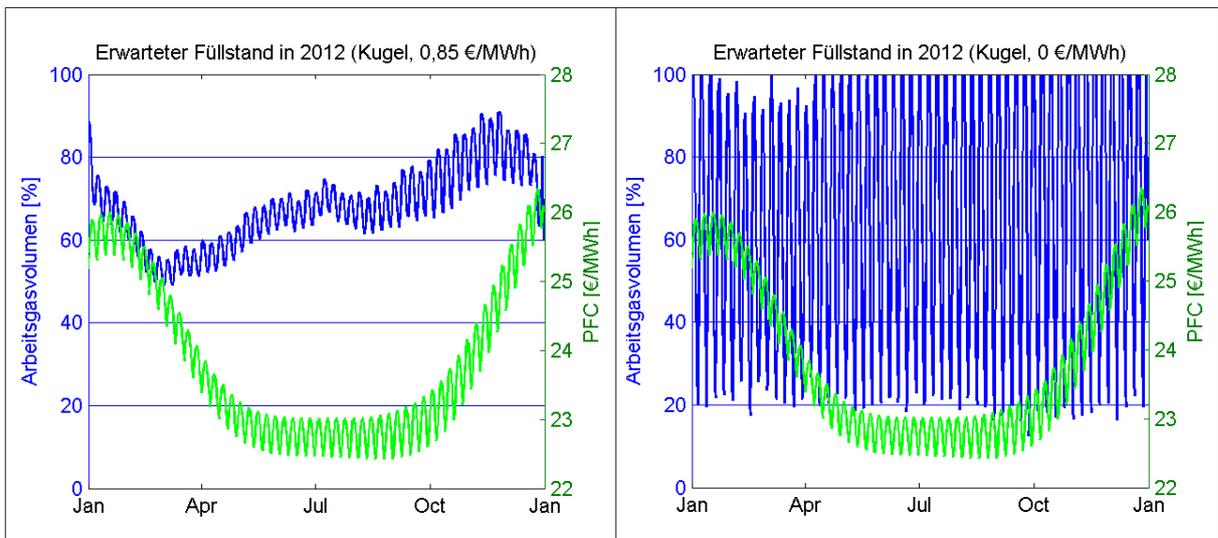


Abbildung 29: Erwartete tägliche Füllstände der Kugeln

Tabelle 23 zeigt das Delta-Risiko und die optimalen Hedge-Mengen des Kugelspeichers. Aufgrund des geringeren Einflusses der Gaspreissaison auf die Fahrweise des Kugelspeichers ist hier gerade unter Vernachlässigung von Einspeisekosten kein saisonaler Einfluss zu sehen.

	mit Einspeisekosten		ohne Einspeisekosten	
	Delta-Risiko [€]	Hedge [MW]	Delta-Risiko [€]	Hedge [MW]
Jan. 12	-331	-0,45	-834	-1,12
Feb. 12	748	1,11	1.704	2,54
Mrz. 12	-114	-0,15	-356	-0,48
Apr. 12	-466	-0,65	-2.461	-3,42
Mai. 12	46	0,06	3.763	5,06
Jun. 12	-214	-0,30	-2.063	-2,87
Jul. 12	-74	-0,10	-566	-0,76
Aug. 12	257	0,35	2.690	3,62
Sep. 12	-739	-1,03	-4.015	-5,58
Okt. 12	141	0,19	2.505	3,37
Nov. 12	78	0,11	1.467	2,04
Dez. 12	667	0,90	-1.834	-2,46

Tabelle 23 Delta-Hedge der Kugeln

In Abbildung 30 sind die vier Bewertungen (Kaverne und Kugel jeweils mit und ohne Einspeisekosten) hinsichtlich des Verhältnisses von innerem Wert zu Zeitwert gegenübergestellt. Auffällig ist, dass der Anteil des inneren Wertes am Gesamtwert mit 85,7 % beim Kugelspeicher ohne Einspeisekosten wesentlich höher ist als bei der Kugel mit Einspeisekosten (16,6 %). Auch bei den beiden Kavernen liegt der Anteil des inneren Wertes deutlich niedriger. Denn die sehr hohe Umschlagshäufigkeit der Kugel ohne Einspeisekosten führt dazu, dass ein Großteil der Ein- und Ausspeiseleistungen und des Arbeitsgasvolumens bereits durch die Ausnutzung des wöchentlichen Spreads zwischen Werktagen und Wochenenden belegt ist, sodass nur noch wenig Spielraum zur Generierung von Deckungsbeiträgen aus zufälligen Preisbewegungen besteht. Die übrigen drei Speicher hingegen verfügen aufgrund der geringeren Umschlagshäufigkeit über deutlich mehr freie Kapazitäten, die nicht durch die Optimierung entlang der DPFC gebunden sind.

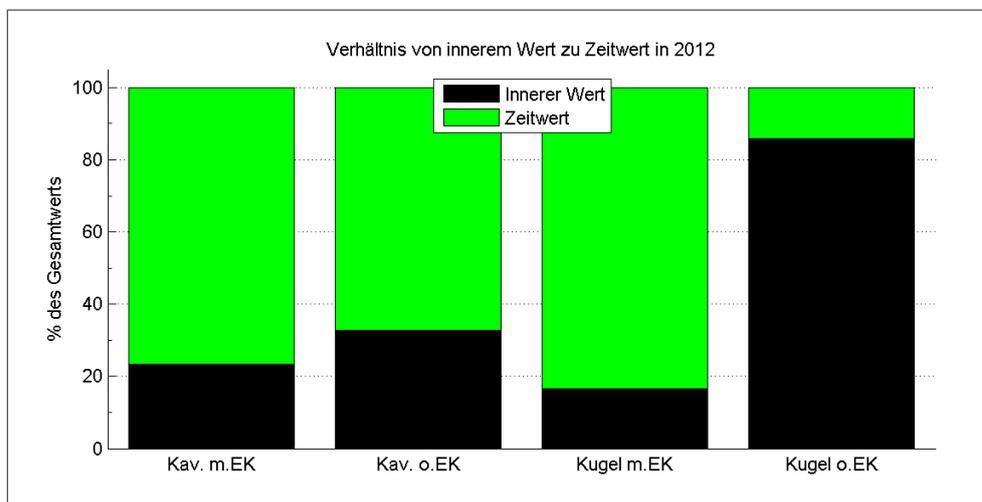


Abbildung 30: Zusammensetzung der Gesamtwerte der bewerteten Kavernen- und Kugelspeicher

### 3.4.3 Sensitivitäten des Kavernenspeichers

Der Wert des Speichers in der LSMC-Optimierung hängt im Wesentlichen von zwei grundlegenden Parametrierungen ab:

- Parameter des Preisprozesses
- Parameter des Speichers

### 3.4.4 Sensitivität in Abhängigkeit des Preisprozesses

#### Veränderung der Mean Reverting Rate und der kurzfristigen Volatilität

In der ersten Untersuchung wird die Abhängigkeit des Wertes von der Höhe der Rückregelungsrate  $\kappa$  (Kappa) untersucht. Hierbei wird gleichzeitig die Volatilität des kurzfristigen Prozesses so angepasst, dass die Varianz, gegen die der Prozess  $x$  in  $T$  konvergiert, konstant gehalten wird:

$$\text{Var}[x(T)] \approx \frac{\sigma^2}{2\kappa}$$

Ansonsten würde eine Steigerung von  $\kappa$  die resultierende Varianz in T absenken, was zu einer Absenkung des Speicherwertes führen würde.

	1	2	3	4	5	6	7	8
kappa (365)	5	7	9	11	13	15	17	19
sigma (365)	0,47	0,56	0,64	0,70	0,76	0,82	0,87	0,92
Halbwertszeit [Tagen]	50,60	36,14	28,11	23,00	19,46	16,87	14,88	13,32

Tabelle 24: Veränderung der Mean Reverting Rate und der kurzfristigen Volatilität

Die Erhöhung von  $\kappa$  führt dazu, dass die Halbwertszeit abnimmt. Störungen des Systems werden somit schneller wieder abgebaut. Eine Halbwertszeit von 50 Tagen z. B. bedeutet, dass eine Störung nach 50 Tagen zur Hälfte abgebaut ist.

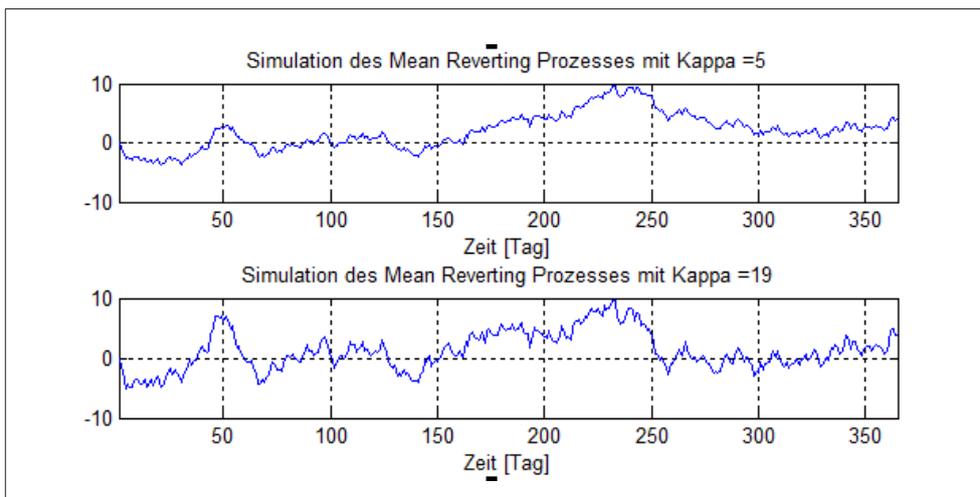


Abbildung 31: Simulation des Mean-Reverting-Prozesses in Abhängigkeit von Kappa

Der Effekt unterschiedlicher Parameter ist in Abbildung 31 dargestellt. Der Prozess mit einem geringeren Kappa besitzt eine kleinere tägliche Volatilität. Im Gegenzug kann dieser aber über einen wesentlich längeren Zeitraum von seinem Gleichgewichtsniveau abgelenkt werden. Für die Speicherbewirtschaftung bedeutet dies, dass ein Speicher im ersten Fall eine wesentlich kleinere Umschlagshäufigkeit besitzt als beim zweiten Prozess, in dem hohe tägliche Preisänderungen schnell wieder auf das Ursprungsniveau zurückgeregelt werden.

Die Auswertung des Speicherwertes zeigt bei steigendem Kappa einen klar ansteigenden Verlauf, da die höhere Speicherumschlagshäufigkeit auch mit einem höheren durchschnittlichen Spread zwischen Ein- und Ausspeicherung verbunden ist. Der Wert bei einem Kappa von 19 verdoppelt den Wert gegenüber einem Kappa von 5.

Dieses Ergebnis zeigt, dass eine genaue Parametrierung des Preisprozesses eine große Bedeutung für die richtige Wertbestimmung des Speichers besitzt.

	Abhängigkeit der Parameter des kurzfristigen Prozesses							
Kappa	5	7	9	11	13	15	17	19
Erwartungswert [EUR]	3.172.741	3.967.964	4.718.394	5.412.576	6.053.115	6.644.815	7.177.814	7.675.804
prozentuale Veränderung		11%	8%	7%	6%	5%	4%	3%

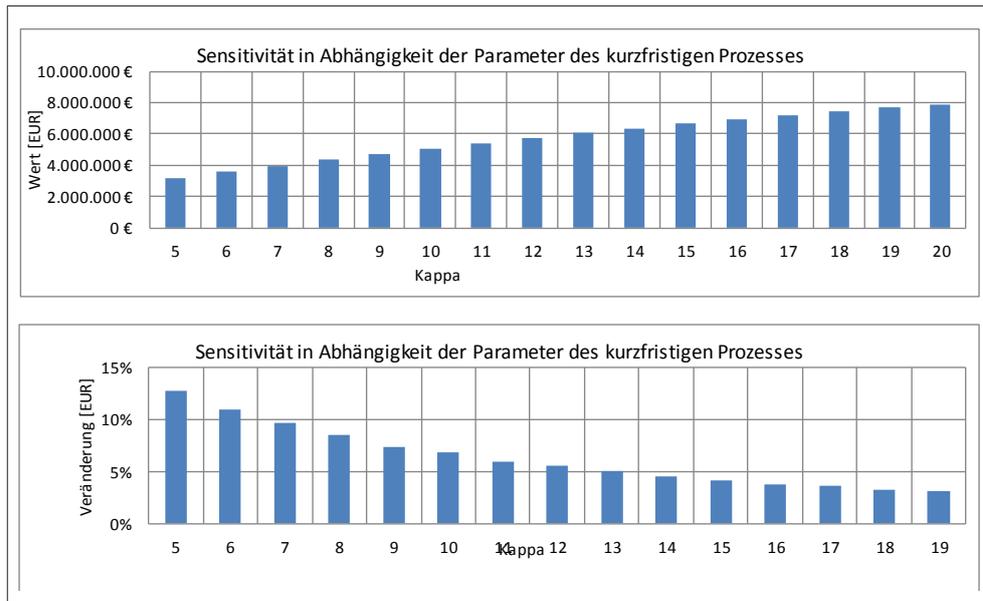


Abbildung 32: Sensitivität des Speichers in Abhängigkeit der Mean Reverting Rate und der kurzfristigen Volatilität

### Veränderung der Volatilität des langfristigen Prozesses

Die Untersuchung der Abhängigkeit des Wertes des Speichers von der Volatilität des langfristigen Prozesses ist in *Tabelle 25* dargestellt.

	Abhängigkeit des Wertes von der langfristigen Volatilität						
langfristige Volatilität [%]	10%	14%	22%	30%	38%	46%	50%
Erwartungswert [EUR]	6.419.237	6.421.024	6.426.550	6.430.388	6.439.032	6.443.452	6.449.258

Tabelle 25: Sensitivität des Speichers in Abhängigkeit der Langfristvolatilität

Es zeigt sich, dass der Speicher nicht wesentlich auf eine Veränderung der langfristigen Volatilität reagiert. Dies liegt daran, dass die Volatilität in dem hier verwendeten Modell in einer „Brownschen Bewegung“ ohne Drift verarbeitet wird. Entgegen dem Mean-Reverting-Prozess, welcher die kurzfristige Schwankung des Gaspreises repräsentiert und zu einem langfristigen Mittel hinstrebt, besitzt dieser Prozess kein Gedächtnis und kann somit im Erwartungswert nicht in einer Veränderung des Kalenderspreads münden. Aus dem derzeitigen Niveau der Preise kann die Optimierung keine Informationen zur Veränderung des Kalenderspreads zukünftiger Zeitpunkte generieren. Dieses Ergebnis zeigt, dass es bei der Kalibrie-

Die Bewertung von Mehrfaktormodellen wesentlich darauf ankommt, die Volatilität des resultierenden Preisprozesses genau in die zugrunde liegenden stochastischen Prozesse rückzuführen. Hierbei besitzt insbesondere der Kalman-Filter eine herausragende Bedeutung.

### **Sensitivität der Speicherparameter**

In der Regel ist zu Beginn einer Investitionsentscheidung in ein virtuelles Speicherbündel das Parameterset des Speichers aus den Bestandteilen AGV, Einspeise- und Ausspeiseleistung nicht eindeutig vorbestimmt, sondern Gegenstand der finanziellen Verhandlungen. In den folgenden Untersuchungen soll hierfür auch die Abhängigkeit des resultierenden Werts des Speichers von diesen Parameterausprägungen untersucht werden. Mithilfe der Untersuchung kann ein fundamentales Verständnis über die Werttreiber und Grenzen der Auslegung des Speichers gewonnen werden.

### **Veränderung der Einspeiseleistung**

Die Einspeiseleistung wird in mehreren Schritten von 10.000 m<sup>3</sup> bis 80.000 m<sup>3</sup> variiert. Damit verbunden ist die Änderung des Verhältnisses aus Ein- und Ausspeisedauer. Hierbei zeigt sich, dass gerade bei einem geringen Niveau der Einspeiseleistung durch eine Erhöhung eine deutliche Wertsteigerung erzielt werden kann. Dies liegt daran, dass im Ausgangsniveau der Speicher das 8-Fache der Ausspeisezeit (ca. ½ Jahr) benötigt, um den Speicher wieder komplett zu füllen, wodurch die Fähigkeit der intertemporalen saisonalen Ein- und Ausspeicherung stark eingeschränkt wird. Die Steigerungen der Einspeiseleistung im Bereich von 60.000 bis 80.000 m<sup>3</sup> generieren dagegen nur einen unterproportionalen Wertzuwachs, da hierdurch nicht mehr das saisonale Verhalten verändert wird, sondern nur das Reaktionsvermögen, bei extrem niedrigen Niveaus vermehrt einspeichern und somit kurzfristige Preisschwankungen besser ausnutzen zu können.

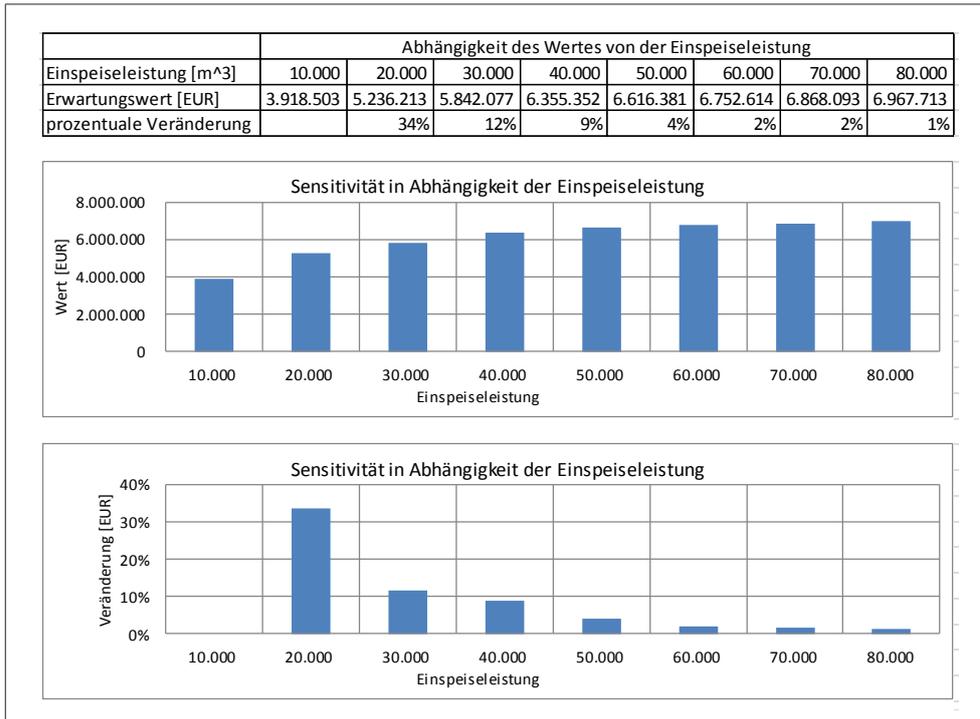


Abbildung 33: Sensitivität des Speichers in Abhängigkeit der Einspeiseleistung

### Veränderung der Ausspeiseleistung

Analog zur Veränderung der Einspeiseleistung lässt sich auch die Ausspeiseleistung variieren und der daraus resultierende Effekt auf den Erwartungswert untersuchen.

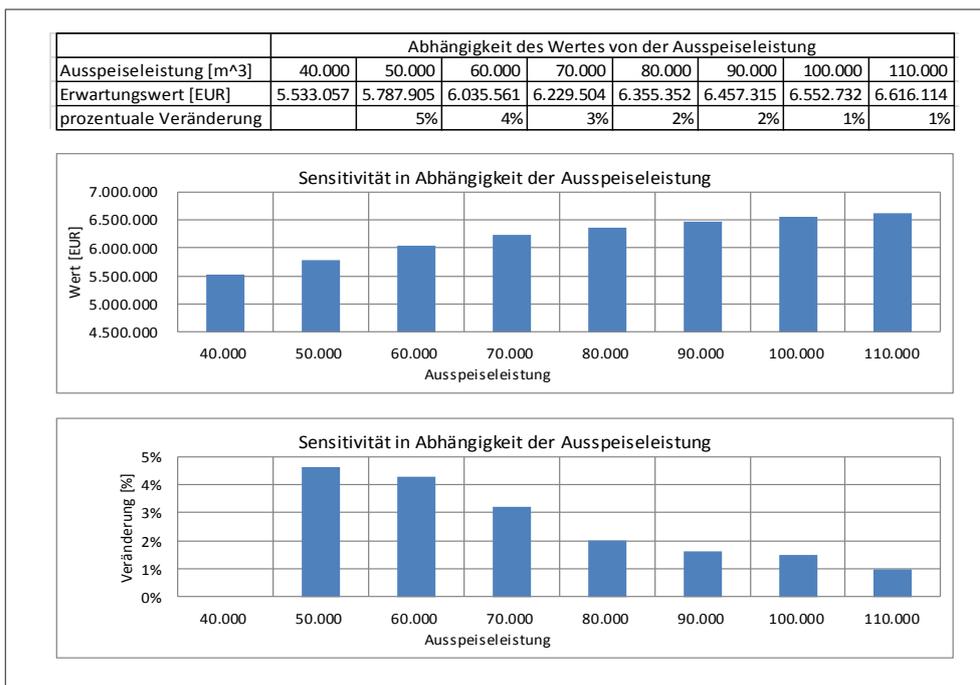


Abbildung 34: Sensitivität des Speichers in Abhängigkeit der Ausspeiseleistung

Auch bei Variation der Ausspeiseleistung zeigt sich, dass der absolute Wertzuwachs bei Erhöhung der Ausspeiseleistung kontinuierlich abnimmt, sodass auch bzgl. dieses Parameters eine optimale Auslegung der Kaverne erfolgen muss. Hierbei sind Skaleneffekte in den Kosten dem sinkenden Grenznutzen der Maßnahme gegenüberzustellen.

### Veränderung der Einspeisekosten

In einer weiteren Sensitivität wird der Wert des Speichers in Abhängigkeit der Einspeisekosten modelliert.

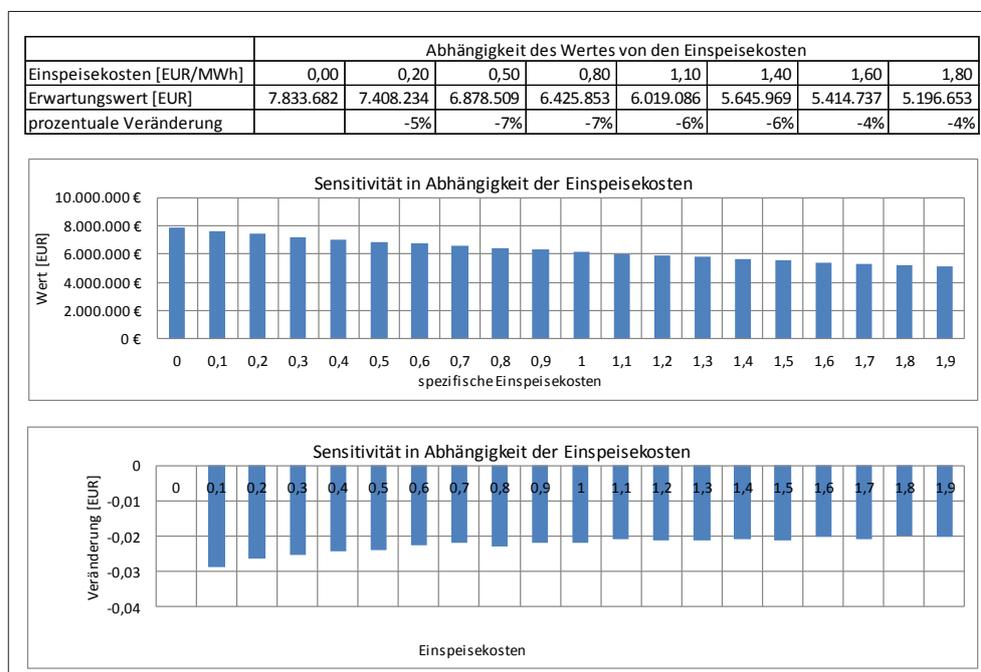


Abbildung 35: Sensitivität des Speichers in Abhängigkeit der Einspeisekosten

In der Untersuchung werden die Einspeisekosten von 0 bis 1,90 EUR/MWh variiert. Bei Ignorierung der Einspeisekosten kann der Speicher jede Preisbewegung gewinnbringend verarbeiten. Dies führt zu einer hohen Umschlagshäufigkeit und einer entsprechend hohen Wertausprägung (ca. 7,8 Mio. EUR). Bei ansteigenden Einspeisekosten sinkt dieser Wert kontinuierlich ab und erreicht bei 1,90 EUR/MWh Einspeisekosten einen Wert von 5,2 Mio. EUR. Bei dieser Höhe der Einspeisekosten wird so gut wie keine intrawöchentliche Saisonalität mehr ausgenutzt und die Verweildauer des Gases zwischen Ein- und Ausspeisung wird deutlich erhöht. Insgesamt nimmt der Erwartungswert um ca. 2,6 Mio. EUR ab und stellt eine bedeutsame Wertminderung dar. Der gleiche Effekt würde sich einstellen, falls ein Bid-Ask-Spread in den Preisen vorliegt. Dies zeigt, dass die Speicherbewirtschaftung gegenüber der Forwardkurve zur Sicherung des Erwartungswerts in Form des Delta-Hedgings in einem nicht liquiden Marktumfeld vor großen Herausforderungen steht. Die durch die Bewertung angezeigten Werte können hierbei

nicht mehr risikoneutral gesichert werden, ohne einen nennenswerten Wertverlust durch die Umschlagshäufigkeit zu provozieren. Gerade bei Speichern mit hoher Umschlagshäufigkeit würde dies den Gewinn dramatisch reduzieren, sodass eine exakte Berücksichtigung dieser Kosten bzw. des Bid-Ask-Spreads in der Praxis von hoher Bedeutung ist.



In diesem Kapitel wurde die Bewertung von Gasspeichern gegenüber dem Spotmarkt mittels der stochastischen dynamischen Programmierung behandelt. Hierzu wurde zunächst die Least-Squares-Monte-Carlo-Technik vorgestellt. Dabei werden viele Szenarien der Gaspreise mit dem Erwartungswert der heutigen Forwardkurve generiert. Der Wert des Speichers ergibt sich dann aus der Optimierung des abgebildeten Speichers unter den verschiedenen betriebstechnischen Restriktionen gegenüber den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Preise und wird durch den Erwartungswert der Deckungsbeiträge repräsentiert. Der Vorteil gegenüber einer deterministischen Optimierung liegt in der expliziten Berücksichtigung der Unsicherheit der Gaspreise und der Flexibilität des Speichers.

Durch dieses Verfahren können ein innerer Wert und ein Zeitwert bestimmt werden. Der innere Wert entspricht dem Wert des Speichers, bewertet gegenüber der aktuellen Forwardkurve. Der Zeitwert repräsentiert die Möglichkeit, dass sich aufgrund der Volatilität der Preise und der Korrelationen bessere Werte einstellen können als durch den derzeitigen Terminmarktpreis. Der Zeitwert resultiert aus der Flexibilität des Speichers, die Fahrweise in den unterschiedlichen Szenarien der Monte-Carlo-Simulation unter Berücksichtigung der Unsicherheit durch eine Erwartungsbildung zu adaptieren.

In einem Fallbeispiel wurden zur Demonstration der Methodik ein Kavernenspeicher und ein Kugelspeicher bewertet. Das Ergebnis war nicht nur der erwartete Wert des Speichers, sondern auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die Aussagen über die Unsicherheit der Deckungsbeiträge liefert. Hierbei zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen dem Kavernen- und dem Kugelspeicher, die schlussendlich in der unterschiedlichen Fahrweise aufgrund der unterschiedlichen Speicherspezifikationen (insbesondere Ein- und Ausspeiseleistungen) begründet sind. Der Kugelspeicher generiert den Großteil seines Wertes durch Verwerten von wöchentlichen Preisdifferenzen, während der Wert der Kaverne zusätzlich stark von der Jahressaisonalität getrieben wird. Zudem zeigt sich, dass der Kugelspeicher zwar niedrigere Spreads erwirtschaftet, dafür jedoch eine höhere Umschlagshäufigkeit besitzt.

Die Bewertungen wurden für die beiden Speicher jeweils einmal mit und einmal ohne Einspeisekosten bewertet. Hierbei zeigt sich, dass die Einspeisekosten insbesondere beim Kugelspeicher ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Wert des Speichers sind, da sie die Aktivitäten des Speichers aufgrund der deutlich höheren Umschlagshäufigkeit wesentlich stärker einschränken, als dies bei der Kaverne der Fall ist.

Ein weiteres Ergebnis der Optimierung ist das Delta-Risiko, welches die Reaktion des Speicherwerts auf Marktpreisänderungen quantifiziert. Hieraus können Hedge-Empfehlungen abgeleitet werden, die den Speicherwert gegenüber Preisänderungen immun machen. Im Gegensatz zum Intrinsic Rolling sichert ein solcher Delta-Hedge neben dem inneren Wert auch den Zeitwert des Speichers.

Eine Sensitivitätsanalyse des Speicherwerts ergab, dass bereits bei Auslegung der Speicherspezifikation eine Bewertung und eine darauf aufbauende Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden sollte. Dadurch kann der Wertbeitrag einzelner Parameteränderungen (wie beispielsweise eine Erhöhung oder Verringerung der Ein- und Ausspeiseleistungen) bestimmt werden. In praxi wird es ein ökonomisch optimales Setting zur Bewirtschaftung des Speichers gegenüber dem Spotmarkt geben, welches die Rohmarge und Fixkosten zueinander optimiert.

Zudem ist bei der Bewertung darauf zu achten, dass das verwendete Spotpreismodell gut kalibriert ist, da der Speicherwert gegenüber der Volatilität der Spotpreise sensitiv ist. Hier kommt es insbesondere auf die Zuordnung der Volatilität zu einem kurz- und einem langfristigen Prozess an.

## Zusammenfassung

In dieser Lektion wurden beginnend mit der Darstellung des fundamentalen Wandels des Gasmarktes die daraus folgenden Implikationen für die Einsatzweise von Gasspeichern abgeleitet. Anschließend wurden zwei Bewertungs- und Steuerungsverfahren für einen Gasspeicher an den beiden Marktstufen Termin- und Spotmarkt methodisch vorgestellt und anhand von Beispielrechnungen illustriert.

Das Verfahren zur Bewertung und Steuerung im Terminmarkt stellt ein sehr robustes und methodisch einfaches Verfahren dar. Hierbei wird die Saisonalität der Forwardkurve bzw. deren Veränderungen arbitragefrei mithilfe des Speichers ausgenutzt. Dieses Verfahren kann nicht den gesamten Zeitwert des Speichers ausweisen. Es zieht in jedem Zeitpunkt nur die aktuellen Informationen der Forwardkurve zur Entscheidung heran. Es bildet aber keine bedingte Erwartung über zukünftige Erträge und deren Beeinflussung durch die aktuelle Speicherfahrweise, um hieraus eine optimale Entscheidung zu formulieren.

Bei der Bewertung gegenüber dem Spotmarkt mithilfe der Least-Squares-Monte-Carlo-Simulation wird in einer stochastischen Optimierung dagegen der volle Zeitwert des Speichers und damit der gesamte Zusatznutzen der Flexibilität ermittelt. Hierdurch leiten sich auch wesentlich andere Hedging-Empfehlungen als im ersten Verfahren ab, um diesen zu sichern.

Der Einsatz der beiden Verfahren im Alltag zur Bewirtschaftung des Speichers hängt insbesondere vom Know-how, den Speicherparametern und der Risikobereitschaft des Handels ab. Beide Strategien liefern hierzu Hedging-Empfehlungen ab, mit welchem der zugrunde liegende Wert gesichert werden kann. Risikoaverse Händler, die einen Großteil des inneren Wertes sichern wollen, könnten im Terminmarkt einen Großteil des Speichers mithilfe des „Intrinsic Rolling“-Verfahrens bewirtschaften. Sie würden hierdurch den saisonalen Spread in der Forwardkurve rollierend sichern. Gleichzeitig kann ein kleinerer Anteil mithilfe der stochastischen Optimierung und den damit verbundenen Ausübungsgrenzen gegenüber dem Spotmarkt bewirtschaftet werden.

In einem liquiden vollständigen Markt wird eine Steuerung des Speichers allein gegenüber den vorhandenen Marktstufen vorgenommen und der Wert für alle Marktteilnehmer objektiv messbar. Für den Fall, dass der Markt illiquide ist und hierdurch z. B. eine Kundenlast nicht allein am Termin- und Spotmarkt jederzeit gedeckt werden kann, erscheint es notwendig, den Speicher im Kontext einer Portfoliooptimierung zu bewerten. Dies wird in der nächsten Lektion vorgenommen. Hierbei ist aber zu beachten, dass der Speicher dadurch eine individualisierte Wertkomponente erhält, die von der konkreten Ausgestaltung des jeweiligen Portfolios abhängt.

## Literaturverzeichnis

**Bertsekas, D. (2005):** Dynamic Programming and Optimal Control, Vol. 1, 3. ed, Athena Scientific

**Bjerkstrand, 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./Jungbluth, C./Schemm, R. (2009):** Bewertung und Steuerung von Gasspeichern bzw. Gasspeicherscheiben, ZfE Zeitschrift für Energiewirtschaft, 04/2009

**Borchert, J./Hasenbeck, M. (2009):** Bewertung und Steuerung von Kraftwerksscheiben, Zeitschrift für Energiewirtschaft, 02/2009

**Clelow, L./Strickland, C. (2009):** Gas Storage: rolling intrinsic valuation, energy risk 2009

**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-GG15;[http://www.tudresden.de/www/leeg/publications/wp\\_gg\\_15\\_hirschhausen\\_LTM\\_lng\\_vs\\_russia.pdf](http://www.tudresden.de/www/leeg/publications/wp_gg_15_hirschhausen_LTM_lng_vs_russia.pdf)

**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.gie.eu.com](http://www.gie.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.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/energiestatistiken.html>

**N. N.:** BMWi, Ausgewählte Statistiken zur Entwicklung des deutschen Gasmarktes, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Energiestatistiken/gasstatistiken.html>

**Nitsch, J. (2007):** Leitstudie 2007 Ausbaustrategie 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