
Technische Grundlagen und Umsetzungsvarianten eines Pumpspeichers am Elbe-Seitenkanal

2

Maik Plenz, Stephan Mattner, Robert Koch, Thomas Weiß und Detlef Schulz

2.1 Grundlagen der Pumpspeicherung

Die physikalischen Grundlagen der Energiespeicherung durch Potentialunterschiede lassen sich konkret aus der speziellen Relativitätstheorie und vereinfacht aus den newtonschen Gravitationsgesetzmäßigkeiten herleiten. Das Produkt aus der orts-/feldabhängigen Gravitationsfeldstärke ($\vec{g}$) bzw. vereinfacht dargestellt der Arbeit der Erdanziehungskraft (g), der Masse eines Körpers (m) und der Höhe (h) über dem Erdradius (R) definiert dabei die potentielle Energie, mit der ein Körper versehen ist. Pumpspeicherkraftwerke nutzen diesen Effekt, um überschüssige elektrische Energie zwischenzuspeichern, indem Wasser von einem niedrigeren Niveau eines Speichersystems (Unterbecken, h_{UB}) auf ein höheres Niveau, in ein unabhängiges Aufnahmesystem (Oberbecken, h_{OB}), befördert wird. Die elektrische Energie (E_{el}) wird dabei in Lageenergie bzw. potenzielle Energie (E_{pot}) umgewandelt.

Maik Plenz ✉

BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus, Deutschland

e-mail: maik.plenz@b-tu.de

Stephan Mattner · Thomas Weiß · Detlef Schulz

Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, Fakultät für Elektrotechnik/Professur für Elektrische Energiesysteme, Hamburg, Deutschland

e-mail: detlef.schulz@hsu-hh.de, thweiss@hsu-hh.de

Robert Koch

Leuphana Universität Lüneburg, Lüneburg, Deutschland

e-mail: degenhart@uni.leuphana.de

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

H. Degenhart et al. (Hrsg.), *Pumpspeicher an Bundeswasserstraßen*,

DOI 10.1007/978-3-658-10916-5_2

Potentielle Energie allgemein und in Kanalpumpspeichern

$$E_{pot} = - \int_R^{R+h} m \cdot \vec{g} \cdot d\vec{r} = \varrho_{H_2O} \cdot V_{H_2O} \cdot g \cdot (h_{OB} - h_{UB}) \quad (2.1)$$

ϱ_{H_2O} Dichte des Wassers [kg/m³]

h_{OB} Höhe Oberbecken ü. NN [m]

h_{UB} Höhe Unterbecken ü. NN [m]

V_{H_2O} Volumen des Wassers [m³]

Um die Energie aus dem potentiellen System zu nutzen, wird das Wasser aus dem Oberbecken abgelassen und über einen (reversiblen) Maschinensatz (Pumpturbine mit Generator) oder ein ternäres System (Motorgenerator mit separater Turbine und Pumpensatz) wieder in Strom (E_{el}) umgewandelt.

Rückwandlung elektrischer Energie

$$E_{el} = \eta_{Gesamt} \cdot E_{pot} \quad [\text{MWh}] \quad (2.2)$$

Der Speichersystemwirkungsgrad ist wie in allen mechanischen Umwandlungsprozessen mit vielfältigen Verlusten beim Ein- und Ausspeichern elektrischer Energie beaufschlagt. Als Gesamtwirkungsgrad großer, moderner Pumpspeicherkraftwerke werden zwischen 75 bis 80 % angegeben.¹ Im Gesamtsystemwirkungsgrad (η_{Gesamt}) kumulieren sich die Effizienzverluste des Pumpspeicherwerkes, durch Rohrreibungsverluste, Verluste im Maschinensatz, Umwandlungsverluste etc. zu einem Gesamtverlust, der die abgegebene Energiemenge dabei um die ursprünglich bezogene Energiemenge reduziert.

Zusammensetzung des Gesamtwirkungsgrades

$$\eta_{Gesamt} = \eta_L^2 \cdot \eta_{totM} \cdot \eta_{Trafo}^2 \quad [-] \quad (2.3)$$

η_{Gesamt} Gesamtwirkungsgrad [-]

η_L Wirkungsgrad Leitungen [-]

η_{totM} Wirkungsgrad Maschinensatz [-]

η_{Trafo} Wirkungsgrad Trafo [-]

¹ Konstantin (2009).

Bildung des Maschinensatzwirkungsgrades

$$\eta_{\text{totM}} = \eta_T \cdot \eta_{\text{Getriebe}} \cdot \eta_G \cdot (1 - \eta_{\text{Eig}}) \cdot \eta_P \cdot \eta_M \quad [-] \quad (2.4)$$

η_T	Wirkungsgrad Turbine [-]
η_{Eig}	Eigenversorgung WKA [-]
η_{Getriebe}	Wirkungsgrad Getriebes/Riemenantriebes (sofern vorh.) [-]
η_G	Wirkungsgrad Generator [-]
η_P	Wirkungsgrad Pumpe [-]
η_M	Wirkungsgrad Motor [-]

Vollständige Regelfähigkeit, ein hoher Wirkungsgrad und die vergleichsweise kurzen Zeitgradienten zum Anlauf der Anlage trugen zu einer stärkeren Fokussierung auf Planung und Weiterentwicklung dieser Speichertechnologie bei.² Diese vorteilhaften Eigenschaften legen die Anwendung eines kongruenten Systems innerhalb begrenzter, regionaler Gegebenheiten als erstrebenswert nahe. Die Integration von Pumpspeicherwerken in die Bundeswasserstraßen erfordert die Analyse weiterer Faktoren.

Unter anderem können stehende Gewässer, welche durch Staustufen, Schleusen oder Hebewerke von anderen Gewässern, Flüssen oder Flussabschnitten isoliert sind und durch befestigte Uferumrandungen abgegrenzt sind, als Speicherbecken betrieben und über Pumpwerke mit Wasser gespeist werden. Das bedeutet, dass die Übergänge zu einem Fluss oder Kanal mit einer Staustufe begrenzt werden. Diese müssen an ein Speicherbecken angebunden sein und über Wasserstandsregulierungsanlagen (Pumpen und Entlastungsleitungen) verfügen, die von außen mit Wasser versorgt werden können, ohne dass die Funktionen des versorgenden Flusses bzw. Kanals eingeschränkt werden. Analoges gilt für die Abgabe des gespeicherten Wassers. Darüber hinaus muss das hypothetische Speicherbecken einen Mindestpotentialunterschied zu seinem versorgenden System, welches kein isoliertes Speicherbecken sein muss, vorweisen.

Unterschiedliche Pegel an den betrachteten Staustufen ermöglichen zwischen den entstehenden Speicherbecken die Option zur Ein-/und Ausspeicherung potentieller Energie. Eine sogenannte Speicherlamelle bewirkt die Generierung des Speichervolumens im System des Speicherbeckens. Als Speicherpotential der Wasserstraße begrenzt diese Lamelle einerseits das maximal mögliche Einspeisevolumen und gibt andererseits die zulässige Höhendifferenz zwischen dem unteren und oberen Betriebswasserstand an.

Aufgrund der vorgesehenen Nutzung der Bundeswasserstraßen als unkonventionelle Pumpspeicherkraftwerke werden ausschließlich Staustufen betrachtet, an denen bereits Wasserpumpen und/oder Entlastungsanlagen installiert sind. Die existierenden Anlagen weisen Leistungen von wenigen Hundert bis zu 8500 kW auf und befinden sich überwiegend an den künstlichen Kanälen der Bundeswasserstraße. Diese Pumpen werden

² Giesecke und Mosonyi (2009).

regulär zur Niveauregulierung genutzt, um die Pegel der Flüsse und Kanäle auf einem individuellen Niveau zu halten. So wird die Schiffbarkeit der Wasserstraßen sichergestellt. Bei einer Gegenüberstellung von zu erwartenden Vorteilen bei einer Umsetzung eines Pumpspeicherwerkes innerhalb der Bundeswasserstraßen, im Vergleich zum Neubau eines konventionellen Pumpspeicherwerks, können folgende Punkte genannt werden:

1. Potentielle Speicherbecken bzw. -systeme existieren bereits und müssen nur umgerüstet werden.
2. Teile der für die Energiewandlung benötigten Anlagen stehen in Form von Wasserpumpen bereits an zahlreichen Staustufen zur Verfügung. Die Netzeinspeisungspunkte in die Mittelspannung sind im Zweifel bereits erschlossen und ausreichend dimensioniert.
3. Zusätzliche negative externe Auswirkungen und Belastungen auf Ökosysteme sind in Bundeswasserstraßen aufgrund der bereits bestehenden Nutzungen nicht so stark wie ein Neubau von Pumpspeichern in bisher nicht vom Menschen genutzten Räumen. Hierzu zählen ebenfalls Belastungen der Anwohner in der unmittelbaren Umgebung des Kanals und/oder der Schleusungs- und Schiffshebeanlage.
4. Die Bundeswasserstraßen in Nord- und Mitteleuropa besitzen räumliche Nähe zu dezentralen, großtechnischen, volatilen Erzeugern.

Als Nachteil kann genannt werden, dass im Falle einer Umsetzung des Projekts die Energiespeicherung nicht im Aufgabenspektrum der Behörden steht. Die Kernkompetenz besteht in der Infrastrukturbereitstellung, -erhaltung und Versorgung technischer, gewerblicher, landwirtschaftlicher oder hauswirtschaftlicher Anwender mit Betriebswasser. Die Gewährleistung von Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt sowie die nachhaltige und energetisch optimierte Bewirtschaftung der Wasserressourcen haben für die zuständigen Behörden höchste Priorität.³ Zur Sicherstellung des Schiffsverkehrs ist eine umfassende Bewirtschaftung der Bundeswasserstraßen notwendig, da den Kanalsystemen eine natürliche Speisung fehlt. Weiter unterliegt ein erreichter Sollwasserstand permanenten externen Einflüssen, vor allem

- einer natürlichen Versickerung,
- der Wasserentnahme durch Dritte,
- dem natürlichen talwärtigen Abfluss des Wassers,
- schifffahrtsbedingten Schleusungsvorgängen,
- Wettereinflüssen wie Regen, Verdunstung und Überschwemmung sowie
- natürlichen, ungesteuerten Zu- und Abflüssen von Nebensystemen.

Eine energiewirtschaftliche Nutzung muss daher in das bestehende Bewirtschaftungssystem integriert werden. Gleichzeitig sind die Potenziale der Bundeswasserstraßen ungleich verteilt. Darüber hinaus ist anders als in einem abgeschlossenen Pumpspeicherwerk

³ Frießecke (2009).

mit zwei Speicherbecken die Pendelwassermenge eines Kanalpumpspeichers von der zum benötigten Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Lamelle und dem Potentialunterschied abhängig.

2.2 Pumpspeicher im Elbe-Seitenkanal

Die Idee des Kompetenztandems EnERgioN mit Blick auf den Kanalpumpspeicher besteht darin, das Stromnetz mit dem Wasserstraßennetz zu verbinden und in einem ersten Pilotprojekt den Elbe-Seitenkanal und die in ihm integrierten Schleusen bei Uelzen und das Schiffshebewerk Scharnebeck zur Speicherung von Strom zu nutzen. Der Elbe-Seitenkanal ist eine Bundeswasserstraße im Bundesland Niedersachsen. Mit einer Länge von 115,2 km gehört er neben dem östlichen Teil des Mittellandkanales zum Gebiet des Wasser- und Schifffahrtsamtes (WSA) Uelzen (Abb. 2.1). Durch das Doppelsenkrechtschiffshebewerk Scharnebeck (siehe Abb. 2.2) und der Schachtschleusengruppe Uelzen (Abb. 2.3) überbrückt der Kanal einen Bruttohöhenunterschied von 61 m (Scharnebeck 38 m, Uelzen 23 m), vom Staubereich der Elbe oberhalb von Geesthacht bis in die Scheitelhaltung des Mittellandkanales nahe Wolfsburg.

Die zur Speicherung benutzten Teilabschnitte des Elbe-Seitenkanals sind in der voranstehenden Karte (Abb. 2.1) mit den Buchstaben (A) bis (C) erläutert und stellen jeweils



Abb. 2.1 Verlauf des Elbe-Seitenkanals inkl. Übersicht der vorhandenen Schleusen und Schiffshebewerke in der untersuchten Region (WSV 2013; sowie FOSSGIS e. V. und openstreetmap.de). Auf OpenStreetMap-Daten basierend © creative commons license (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>)

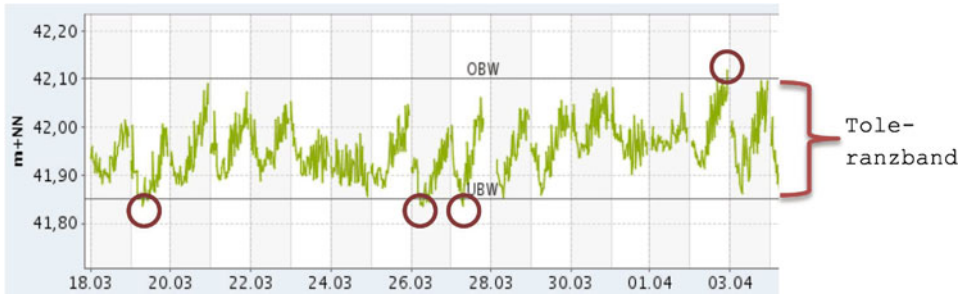


Abb. 2.2 Lamelle Uelzen Unterbecken – Scharnebeck Oberbecken. (Pegelonline 2013)

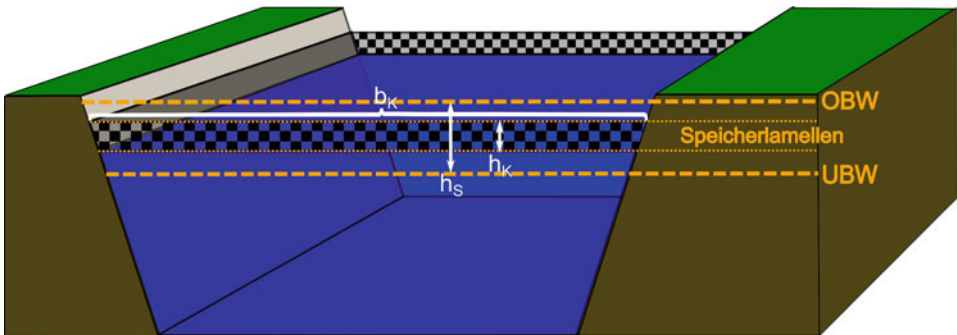


Abb. 2.3 Schematische Darstellung der benutzten Speicherlamelle

das Ober- bzw. Unterbecken der jeweiligen Pump- bzw. für späteren Einbau betrachteten Turbineneinheit dar. Die Bewirtschaftungslamelle der untersuchten Abschnitte beträgt maximal 20 cm bzw. 25 cm. Sie wird im weiteren Verlauf in Zusammenhang mit den aktuellen Gegebenheiten an Hubanlagen Schiffhebewerk Scharnebeck (A) und der Schleuse Uelzen (B) genauer untersucht. In den Tab. 2.1 und 2.2 findet sich eine Zusammenfassung relevanter Daten der untersuchten Hubanlagen.

2.3 Speichervolumina

2.3.1 Speicherlamelle

Die Speicherlamelle wird in ihrer Basis als Toleranzband bzw. Ausgleichslamelle der Schifffahrt verwendet. Notwendig wird diese Bewirtschaftung der Wasserstraßen und Kanäle durch fehlende natürliche Speisungen, die Wasserentnahme Dritter, Wettereinflüsse und Verluste. Die Regulierung des Sollwasserstandes der Becken erfolgt mithilfe von Pumpen (befüllen) und Entlastungsleitungen (entleeren). Die maximale Auslenkung des Wasserspiegels zur Einhaltung des Sollwasserstandes und somit zum gefahrlosen Betrieb

Tab. 2.1 Technische Daten Doppelsenkrechtschiffshebewerk Scharnebeck

Bruttofallhöhe	38 m
Pumpwerk	4 Pumpen
Nennleistung	je 1200 kW
Pumpleistung	je 2,25 m ³ /s
Summe	
Nennleistung	4,8 MW
Pumpleistung	9 m ³ /s
Hersteller der Pumpen	KSB
Entlastungsmengen	25 m ³ /s durch 2 Leitungen
Bisherige Pumpmengen in [1000 m ³]:	
2009	12.353
2010	688
2011	1545
Bisherige Entlastungsmengen in [1000 m ³]:	
2009	5969
2010	30.879
2011	843

Tab. 2.2 Schachtschleusengruppe Uelzen (Schleusen I und II)

Bruttofallhöhe	23 m
Pumpwerk	5 Pumpen
Nennleistung	je 1700 kW
Pumpleistung	je 5,6 m ³ /s
Summe	
Nennleistung	8,5 MW
Pumpleistung	28 m ³ /s
Hersteller der Pumpen	KSB
Entlastungsmengen	15 m ³ /s durch 2 Leitungen
Wasserverlust durch Schleusungsvorgang:	
Schleuse I	21.640 m ³
Schleuse II	17.500 m ³
Bisherige Pumpmengen in [1000 m ³]:	
2009	125.891
2010	90.211
2011	130.472
Bisherige Entlastungsmengen in [1000 m ³]:	
2009	0
2010	2272
2011	7

des Schiffsverkehrs schwankt zwischen dem oberen Bemessungswasserstand (OBW) und unteren Bemessungswasserstand (UBW).

Die halbautomatische Einhaltung des Sollwasserstandes wird durch die dem jeweiligen Kanal zugehörige Außenstelle der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) gesteuert und kann je nach Beckenlänge und Schwingungszustand nur temporär verzögert stattfinden. Ausbrüche aus den jeweiligen Grenzen, die kurzzeitig zu einer Über- bzw. Unterschreitung des UBW/OBW an den jeweiligen Messpunkten führen, sind die Folge (siehe Abb. 2.2). Die Höhe der Ausgleichslamelle variiert in den Wasserverkehrsstraßen von einigen wenigen Zentimetern bis zu 40 cm. Dies ist abhängig von der geografischen Lage, den Zuflüssen, den existierenden Hubanlagen, dem Frachtaufkommen oder der Aufnahme- bzw. Abgabefähigkeit angrenzender Wassersysteme.

Die getroffenen Annahmen zur Bestimmung der Kapazität der Bundeswasserstraßen beschränken sich auf die Aussage, dass eine Speicherlamelle zur Verfügung stehen muss, die das vorhandene Toleranzband (h_T) vollständig belegt. Die Einführung eines Gesamtoptimierungsprogramms, welches Schiffbarkeit und Energiespeicherung verbindet, ermöglicht die theoretische Anpassung der Speicherlamelle. Vorstellbar sind unter Berücksichtigung von Pegelschwankungen und bisheriger Betriebsweise gemäß Expertenmeinungen aus der WSV Begrenzungen auf 50 % dieser Lamelle (h_S).

Die Speicherlamelle (h_S) dient der Energiespeicherung, wobei die Nebenbedingung „Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs“ Vorrang besitzt und bei Bedarf auch die energetische Nutzung dieser Lamelle verhindert. Deshalb kann es zu Einschränkungen kommen, wenn Einspeicherung und Ausspeicherung elektrischer Energie durch den aktuellen Zustand des Beckens (Einspeicherung – Becken maximal befüllt/Ausspeicherung – Becken auf UBW) nicht erlaubt werden.

Die in Abb. 2.3 dargestellte Lamelle zeigt schematisch auf, in welcher Lamellenbreite potentielle Energie ein- und ausgespeichert werden könnte. Sie stellt keine endgültige, ideale Nutzung der zur Verfügung stehenden Wasservolumina dar. Zukünftig erscheint es zweckmäßig die Randbreite der Ausgleichslamelle an eine spätere Simulation anzupassen. Zur dreidimensionalen Bestimmung der Volumina dienen neben der Lamelle, die Beckenbreite (b_K) und Länge des Kanalabschnittes (l_K).

2.3.2 Bundeswasserstraßen

Untersuchungen haben ergeben, dass nicht jeder Kanal gleich gute Voraussetzungen zur Energiespeicherung bietet. Die wichtigsten Eigenschaften für oder gegen die Installation und Nutzung einer Pumpspeichereinheit in Bundeswasserstraßen sind: große Fallhöhen, wenige Hub- oder Schleusenwerke und möglichst große Speicherbecken. Die Analyse verschiedener Wasserstraßen anhand dieser Parameter ermöglichte die Entwicklung einer schematischen Übersicht zu möglichen Beckennutzungen. Abbildung 2.4 zeigt den Mittellandkanal (MLK) (Scheitelhaltung) als zentrales Oberbecken und erläutert die potentiellen Energien, die jeweils zur Verfügung stehen. Der Kanal gliedert sich direkt in

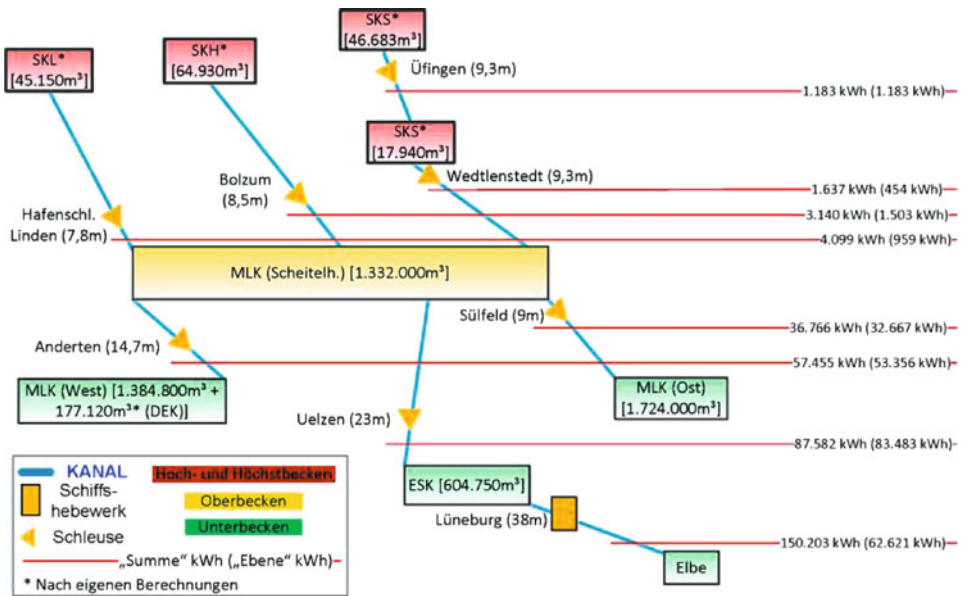


Abb. 2.4 Pumpspeicherverbund des Mittellandkanals (Scheitelhaltung) über mehrere Potentialebenen. *SKL* Stichkanal Hannover/Linden, *DEK* Dortmund-Ems-Kanal, *SKH* Stichkanal Hildesheim, *MLK* Mittellandkanal, *SKS* Stichkanal Salzgitter, *ESK* Elbe-Seitenkanal

mehrere potenziell interessante Staustufen sowie den Elbe-Seitenkanal. Somit ist es in der Lage, drei verbundene Unterbecken zu bedienen.

Die Abbildung verdeutlicht die Flexibilität des Pumpspeicherkraftwerks in Bundeswasserstraßen. Je nach Verfügbarkeit und Energiebedarf können verschiedene Beckensysteme genutzt oder gepoolt eingesetzt werden. Gleichfalls lohnt sich eine kurze, ökonomische Untersuchung der Ausbaumöglichkeiten im Pumpspeicherverbund. Für die Investitionen und deren Kosten zur Umrüstung der Anlagen zeigt die Grafik einen entscheidenden Vorteil der Bundeswasserstraßen. Es ist keineswegs notwendig, im ersten Finanzierungsschritt sämtliche Umbaukosten des Gesamtsystems zu tragen – ein relevanter Unterschied zu einem herkömmlichen Pumpspeicherkraftwerk. Vielmehr besteht die Option, je nach Kapitalverfügbarkeit, modular Unterbecken oder Hoch- und Höchstbecken zu implementieren. Auf der Erlösseite ist es für eine Nutzung des Gesamtsystems denkbar, mit den Einzelanlagen in verschiedenen Wirtschaftsbereichen zu agieren. Die relativ geringen erzielbaren Leistungen der betrachteten Hochbecken (SKS, SKH und SKL) könnten z. B. im außerbörslichen Handel (Over-The-Counter, OTC) vermarktet werden. Hingegen sollten die hohen erzielbaren Leistungen der Unterbecken Elbe-Seitenkanal bzw. Elbe über die Staustufen Uelzen und Lüneburg z. B. am Regelleistungsmarkt oder Spotmarkt angeboten werden, eine detailliertere Betrachtung wird hierüber Auskunft geben. Vorstellbar ist weiterhin auch eine an eine Gesamtsimulation der Bundeswasserstra-

ßen gebundene Gesamtvermarktung, um sowohl Speicherhaltung als auch Schifffahrt und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Im Rahmen des EnERgioN Projektes wurde jedoch zunächst nur der Elbe-Seitenkanal näher betrachtet.

2.3.3 Elbe-Seitenkanal

Im Folgenden (siehe Tab. 2.3) werden die zur Verfügung stehenden Wassermengen erläutert. Die in Abb. 2.1 dargestellten Abschnitte des Elbe-Seitenkanals werden hierfür unterteilt:

- (A) Unterbecken Scharnebeck: ESK – Elbe,
- (B) Mittelbecken Scharnebeck/Uelzen: ESK,
- (C) Oberbecken Uelzen: Übergang ESK – MLK.

Der Abschnitt (A) ist, bedingt durch die Anbindung an die Elbe, nicht als einzelnes Becken zu betrachten. Die Elbe besitzt durch ihr zur Verfügung stehendes Gesamtvolumen voraussichtlich ausreichend Pendelwassermenge. Neben der im Elbe-Seitenkanal zur Verfügung stehenden Wassermenge muss im Oberbecken Uelzen (C) auch der Mittel- landkanal als angrenzende Wasserstraße betrachtet werden. Die in Tab. 2.4 angeführten Speichervolumina verdeutlichen eine Erweiterung der potentiellen Speicherkapazität um 55 % bezogen auf die maximale Gesamtspeichermenge des Elbe-Seitenkanals.

Diese Wassermengen befinden sich geografisch gesehen zwischen der Schleuse Sülfeld und der Schleuse Anderten (siehe Karte, Abb. 2.1 oben). Insgesamt stehen die in Tab. 2.5 aufgelisteten Gesamtspeichervolumina, differenziert in die jeweiligen Lamellenhöhen, zur Verfügung.

Tab. 2.3 Theoretische Speichervolumina im Elbe-Seitenkanal

Speichervolumina [nur Elbe-Seitenkanal]				
	[Einheit]	(A)	(B)	(C)
Breite	[m]	53		
Nutzbare Länge ESK	[km]	Elbe	45,272	60,615
Nutzbare Lamelle ESK	[cm]		25	20
Volumina Lamelle (5 cm)	[m³]		119.970,80	160.629,75
Volumina Lamelle (10 cm)	[m³]		239.941,60	321.259,50
Volumina Lamelle (15 cm)	[m³]		359.912,40	481.889,25
Volumina Lamelle (20 cm)	[m³]		479.883,20	642.519,00
Volumina Lamelle (25 cm)	[m³]		599.854,00	– ^a

^a Im Oberbecken beträgt die Bewirtschaftungslamelle 20 cm.

Pumpspeicher an Bundeswasserstraßen
Technische, wirtschaftliche und rechtliche
Rahmenbedingungen am Beispiel des
Elbe-Seitenkanals

Degenhart, H.; Schomerus, Th.; Schulz, D. (Hrsg.)

2015, XVII, 107 S., Softcover

ISBN: 978-3-658-10915-8