



# **Energiespeicherung als Nutzungsperspektive für leerstehende Bauwerke?**

Eine typologische und fallbezogene Untersuchung am Beispiel  
des Industrie- und Militärbaus

Vom Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl. -Ing. Joachim Schulze, geboren in Dernbach

Referentin: Prof. Dr.-Ing. Annette Rudolph-Cleff

Korreferent: Prof. Christoph Kuhn

Korreferent: Prof. Manfred Hegger †

Tag der Einreichung 01.04.2017

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2017

Erscheinungsort: Darmstadt  
Erscheinungsjahr: 2017  
D17

## Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Annette Rudolph-Cleff, Prof. Christoph Kuhn und Prof. Manfred Hegger†, die mich während der Verfassung dieser Arbeit tatkräftig und mit größtem Engagement unterstützt haben. Weiterhin möchte ich meiner Frau und meiner ganzen Familie danken, deren Beistand ich nicht missen möchte. Zu guter Letzt sollen meine Kolleginnen und Kollegen vom Fachgebiet Entwerfen und Stadtentwicklung nicht unerwähnt bleiben, die ich das ein oder andere Mal zu Rate gezogen habe.

Weiterhin möchte ich mich ganz besonders bei Frau Klank von der Abteilung für Stadtentwicklung und Planung in Hameln sowie bei Herrn Franz Engelke und Herrn Anton Senn von der Firma GoodMills Deutschland GmbH bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei der Darmstädter Exzellenz-Graduiertenschule für Energiewissenschaft und Energietechnik bedanken, dessen DFG Stipendienprogramm es mir ermöglicht hat, diese Arbeit zu finanzieren.

### Anmerkung:

Beim Titelbild und bei allen Piktogrammen in der hier vorliegenden Arbeit handelt es sich um eigene Darstellungen. Aufnahmen und Planunterlagen der Wesermühlen in Hameln erscheinen mit freundlicher Genehmigung der GoodMills Deutschland GmbH. Angaben zu Bunkeranlagen, welche sich im Besitz der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben befinden, erscheinen im Einverständnis mit dieser.

Ein Teil der Ergebnisse dieser Promotion ist bereits in zwei Veröffentlichungen eingeflossen. Dazu zählen die Inhalte der Kapitel II, III und IV. Bei den Publikationen handelt es sich um ein Kapitel mit dem Titel „*Innovative Ansätze im Bereich Energie und Nachhaltigkeit - Umnutzung von leerstehenden Industriebauten zu Energiespeichern - Eine Untersuchung am Beispiel der Silobauten*“ in dem Buch „*Innovationen in der Nachhaltigkeitsforschung*“, welches als Teil der Reihe „*Theorie und Praxis der Nachhaltigkeit*“ erschienen ist sowie um einen Konferenzbeitrag mit dem Titel „*Study on the potential of converting former military bunkers into energy storage facilities*“, der bei der „*World Sustainable Built Environment Conference*“ 06|2017 in Hongkong eingereicht wurde.

## Kurzfassung

Die Energiewende ist der Wegbereiter zu einer Energieversorgung, die fast vollständig auf dem Einsatz erneuerbarer Quellen basiert. Sollte dies gelingen, wäre es ein Meilenstein hin zur Dekarbonisierung und dem übergeordneten Ziel einer „fossil free future“. Die Abkehr von endlichen Rohstoffen wie Kohle, Gas und Erdöl, deren Nutzung mit dem Ausstoß klimaschädlicher Emissionen verbunden ist, korrespondiert zudem mit dem Leitgedanken nachhaltiger Entwicklung: Potentiale nutzen, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen einzuschränken oder zu gefährden. Doch bis wir einen Anteil an erneuerbaren Energien von bis zu 60% erreichen, ist die gemeinsame Anstrengung von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft gefordert. Eine der Kernfragen bei der Umsetzung der Energiewende, welche ursächlich mit dem Ausbau und der Einbindung der erneuerbaren Energiequellen in Verbindung steht, ist die nach der Speicherung von Energie. Sonnen und Windenergie sind fluktuierende Quellen, weshalb ihr Ertrag weder zu jeder Zeit noch in gleicher Menge verfügbar ist. Dieser Umstand steht allerdings im Widerspruch zu der Aufgabe jeder Energieversorgung, die darin besteht, Versorgungssicherheit zu bieten. Eine Möglichkeit, dieser Problematik zu begegnen, ist der Einsatz von Energiespeichern. Diese können in Zeiten der Überproduktion Überschüsse speichern, um damit Phasen verminderter Produktion zu überbrücken.

Die vorliegende Dissertation knüpft an diese zentrale Problematik der Energiewende an und geht der Frage nach, ob es möglich ist, einen Teil der perspektivisch notwendigen Speicherkapazitäten durch die Umnutzung von brachliegenden oder zur Disposition stehenden Bauwerken zur Verfügung zu stellen. Inhaltlich schränkt sich die Arbeit dabei in zweierlei Hinsicht ein. Der eine Fokus ist technischer Natur, da nur Systeme zur Speicherung von elektrischer Energie betrachtet werden, der andere ist typologischen Ursprungs und liegt bei den Bauwerken. Hierbei stehen zwei Nutzungskategorien im Vordergrund: der industrielle und der militärische Sektor. Methodisch gliedert sich die Promotion in drei Teile. Zuallererst werden vier Systeme zur Speicherung elektrischer Energie einer Kriterien gestützten Systemanalyse unterzogen, mit dem Ziel elementare Strukturanforderungen abzuleiten und zu benennen, welche diese an ein potentiell Bauwerk adressieren. Der zweite Teil nimmt eine Potentialabschätzung vor, inwiefern industrielle und militärische Bauwerkstypen die Voraussetzungen besitzen, jene systemischen Strukturanforderungen zu bedienen. Dazu zählt auch eine Clusteranalyse, aus der die relevanten Bauwerkstypen hervorgehen. Den Abschluss bildet eine Fallstudie. Diese dient zum einen als Stichprobe, um die Ergebnisse der typologischen Eignungsprüfung zu verifizieren, beinhaltet aber auch eine Planungsstudie, die Aufschluss gibt über den voraussichtlichen Kostenrahmen und die bauliche Umsetzung eines derartigen Umnutzungsvorhabens.

Im Ergebnis offenbart sich, dass sowohl im industriellen als auch im militärischen Gebäudesektor geeignete Bauwerkstypen existieren, wozu beispielsweise Kühltürme, Silobauten oder stollenartige Bunkeranlagen zählen. Weiterhin demonstriert eine Fallstudie, dass bestimmte Kombinationen aus Bestandsbauwerk und Speichersystem nicht nur baulich umsetzbar sind, sondern auch in Hinblick auf die Investitionskosten wirtschaftlich tragbare Lösungen hervorbringen können. Aber es geht nicht alleine um die Schaffung von Speicherkapazitäten. Derartige Konversionsvorhaben würden noch einer weiteren, übergeordneten Sache dienen: dem Erhalt von Baukultur.

## Abstract

Building a sustainable future calls for a strong re-evaluation of energy production and consumption patterns. With the release of the so-called 'energy concept' in 2010, the German government has made a clear commitment to sustainability, by officially anticipating a future energy supply system depending almost exclusively on renewable energy and utterly turning away from fossil energy carriers. The remodeling process involved will take decades and a number of defined issues are yet to be solved. Dealing with the fluctuation of renewable forms of energy, such as sun and wind power, is one of the key challenges. Apart from the extension of the power grid, it is indispensable to provide capacities for energy storage to face this problem. These units can be in operation when surplus production occurs, storing the energy and providing it at a later stage when a period of low production arises.

The doctoral thesis is linked to this essential challenge of our future energy supply system and deals with the question of whether it is possible to provide storage capacities by converting unused buildings. The dissertation sets the focus on electrical energy storage as well as industrial and military building types. It is subdivided into three main chapters. The first section involves a criteria based system analysis and deals with four systems of electrical energy storage. The goal is to derive the significant structural requirements that these systems address at the structure of a building. The second part evaluates the potential of building types in the industrial and military sector regarding the extent of their suitability for the conversion to an energy storage facility. The third part involves a case study that serves as a sample and verifies the outcome of the analysis of the aforementioned potentials. Lastly, a study on construction and implementation gives insight on the feasibility of such a conversion project.

In conclusion, the doctoral thesis points out a number of building types in the industrial as well as the military sector, such as silos, cooling towers or subterranean bunkers that are equipped with the adequate structural features necessary for the application of the energy storage systems analyzed. Furthermore, the case study demonstrates that the conversion to an energy storage facility can be feasible for certain combinations of building types and storage systems. However, the dissertation is not merely addressing the provision of storage capacity. Another important aspect deals with the preservation of building culture. By suggesting energy storage as a new form of usage, it may be possible to prevent former industrial or military buildings from being demolished in the future.

# Inhaltsverzeichnis

## I Einleitung

1.0 Die Energiewende - Umbau zu einer dezentralen Versorgungsstruktur.....	12
2.0 Relevanz und Kernfragen der Promotion .....	14
3.0 Methoden.....	15
4.0 Referenzen und der Stand der Forschung.....	17

## II Systeme

1.0 Systemwahl.....	21
2.0 Auslegung und Dimensionierung .....	22
3.0 Schwungradspeicher.....	24
3.1. Einführung.....	24
3.2. Funktionsweise.....	24
3.3. Berechnung und Entwicklung zu modernen Bauformen .....	25
3.4. Systembetrachtung .....	26
3.5. Referenzschwungrad .....	27
3.6. Anforderungskatalog .....	28
3.7. Schlussfolgerungen .....	29
4.0 Hubspeicher.....	30
4.1. Einführung.....	30
4.2. Stand der Forschung.....	30
4.3. Vorbild Fördertechnik.....	31
4.4. Entwurf eines Hubspeichers .....	33
4.5. Auslegung und Dimensionierung.....	37
4.6. Anforderungskatalog .....	42
4.7. Schlussfolgerungen .....	43

<b>5.0 Druckluftspeicher</b> .....	44
5.1. Einführung.....	44
5.2. Funktionsweise.....	44
5.3. Realisierte Kraftwerke.....	45
5.4. Stand der Forschung.....	46
5.5. Adiabates Niedertemperatur-Druckluftspeicherkraftwerk.....	49
5.6. Auslegung und Dimensionierung.....	52
5.7. Anforderungskatalog.....	57
5.8. Schlussfolgerungen.....	59
<b>6.0 Pumpspeicher</b> .....	60
6.1. Einführung.....	60
6.2. Konzeption und Betrieb moderner Pumpspeicherkraftwerke.....	60
6.3. Pumpspeicher im Maßstab des Bauwerks.....	60
6.4. Auslegung und Dimensionierung.....	66
6.5. Anforderungskatalog.....	70
6.6. Schlussfolgerungen.....	72
<b>III Typen</b>	
<b>1.0 Bauwerke</b> .....	74
1.1. Industriebau.....	74
1.1.1. Die Typen im Industriebau.....	78
1.1.2. Typologische Eignungsprüfung.....	79
1.1.3. Schlussfolgerungen.....	93
1.2. Militärbau.....	94
1.3. Der Bunkerbau.....	96
1.3.1. Geschichtliche Einordnung.....	96
1.3.2. Typen im Bunkerbau.....	100
1.3.3. Fazit und abgeleitete Typologie.....	102
1.3.4. Typologische Eignungsprüfung.....	104
1.3.5. Schlussfolgerungen.....	110



## **IV Pilote**

<b>1.0 Einleitung</b> .....	112
<b>2.0 Die Wesermühlen</b> .....	112
2.1. Objektbewertung .....	113
2.2. Silo III .....	114
2.3. Pilotprojekt A: Hubspeicher .....	114
2.3.1. Entwurfsbeschreibung .....	114
2.3.2. Kostenschätzung .....	122
2.4. Pilotprojekt B: Pumpspeicher .....	124
2.4.1. Entwurfsbeschreibung .....	124
2.4.2. Kostenschätzung .....	134

## **V Resümee und Ausblick**

## **VI Literaturverzeichnis**

## **VII Abbildungsverzeichnis**

## **VIII Anlagen**



# Kapitel I **Einleitung**

### 1.0 Die Energiewende - Umbau zu einer dezentralen Versorgungsstruktur



Abb. 1:  
Windenergie als zentraler Pfeiler der Energieerzeugung

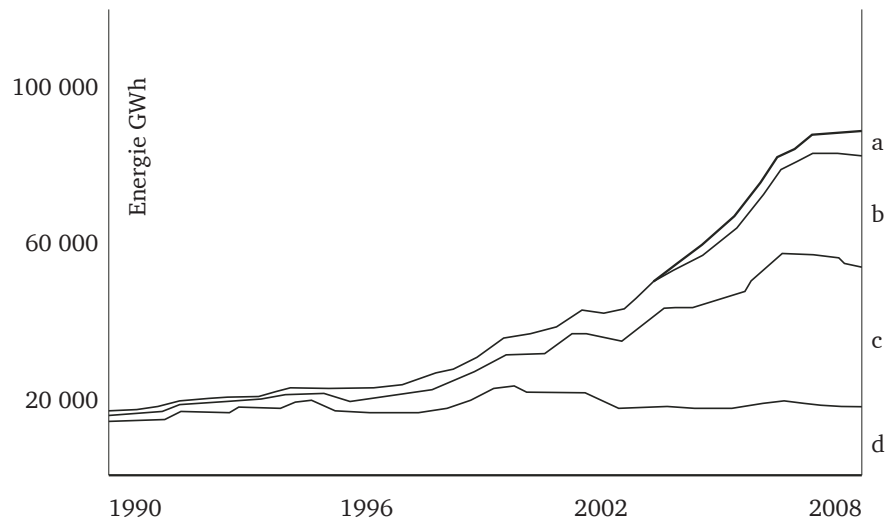
„Die Energiewende - Zukunft made in Germany“<sup>1</sup> lautet der Titel einer Broschüre des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Was dort in allgemein verständlicher Form aufbereitet wird, ist jedoch keine Zukunftsmusik, sondern bereits Realität. Das Energieversorgungssystem in Deutschland befindet sich in einem grundlegenden Prozess des Umbaus und der Neuorientierung. Weg von den fossilen hin zu den erneuerbaren Energieträgern lautet die Devise. Konkrete Schritte und einen Fahrplan, wie der „Aufbruch in ein neues Energiezeitalter“<sup>2</sup> gelingen soll, benennt die Bundesregierung in ihrem im September 2010 erschienenen Energiekonzept. Das Programm umfasst ein Paket verschiedener Maßnahmen, welche ineinandergreifen und bis zum Jahr 2050 umgesetzt werden sollen. Im Wesentlichen zählen hierzu der Ausbau der erneuerbaren Energien, die Steigerung der Effizienz und der Netzausbau. So soll beispielsweise der Primärenergieverbrauch in Deutschland bis 2020 „gegenüber 2008 um 20 % und bis 2050 um 50 % sinken“<sup>3</sup>, der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch 30 % bis 2030, 45 % bis 2040 und 60 % bis 2050 betragen<sup>4</sup> oder die Sanierungsraten für Gebäude sich von derzeit jährlich weniger als 1 % auf 2 % des gesamten Gebäudebestandes verdoppeln<sup>5</sup>. Diese Zahlen belegen die hohen Ansprüche des ambitionierten Programmes, welches Deutschland für die kommenden Jahrzehnte vor gewaltige Herausforderungen stellen wird und bei dessen Umsetzung sich einige zentrale Fragestellungen ergeben. Zu diesen zählt unbestrittenermaßen auch die nach der Speicherung von Energie.

Abb. 2:  
Der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung

Eigene Darstellung,  
Daten: IBA

Legende:

- a Photovoltaik
- b Biomasse
- c Windenergie
- d Wasserkraft



1 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012b  
 2 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012b, S. 4  
 3 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012a, S. 5  
 4 Vgl.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012a, S. 5  
 5 Vgl.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012a, S. 5

## Problemstellung

Bei einem Versorgungssystem, welches zu einem Großteil auf erneuerbaren Energieträgern, wie beispielsweise der Sonnen- oder der Windenergie beruht, besteht eine der größten Herausforderungen im Umgang mit der Fluktuation der Quellen. Sonnen- und Windenergie sind nicht zu jeder Zeit in gleicher Menge verfügbar und unter ungünstigen Umständen kann der Ertrag vorübergehend auf Null sinken. Erschwerend kommt hinzu, dass die Erzeugung nur bedingt vorhersehbar ist, wenn überhaupt ist dies nur über kurze Zeiträume von wenigen Tagen möglich. Je weiter man in die Zukunft schaut, umso ungenauer wird die Prognose bzw. umso größer die Unschärfe. Für die Energieversorgung ist es jedoch unabdingbar, Planungs- bzw. Versorgungssicherheit bieten zu können. Zudem gilt das Gebot des Leistungsgleichgewichtes: Nachfrage und Einspeisung von elektrischer Energie müssen sich die Waage halten<sup>1</sup>. Laut Energiekonzept der Bundesregierung bietet die Windenergie „kurz- und mittelfristig das wirtschaftlichste Ausbaupotential im Bereich erneuerbarer Energien“<sup>2</sup> und soll „langfristig die wichtigste Rolle beim Ausbau der erneuerbaren Energien einnehmen“<sup>3</sup>. Momentan beträgt dessen Anteil an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien ca. 35% und an der gesamten Stromerzeugung in Deutschland ca. 8%<sup>4</sup>. Bis zum Jahr 2025 soll dieser Anteil auf bis zu 25% gesteigert werden<sup>5</sup>. Mit der Schlüsselrolle, welcher der Windkraft und anderen erneuerbaren Quellen zukünftig übertragen wird, sind Strategien gefragt, die trotz Diskontinuität eine zuverlässige und sichere Energieversorgung garantieren. In der Diskussion befindlich ist die Kombination zweier Instrumente, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

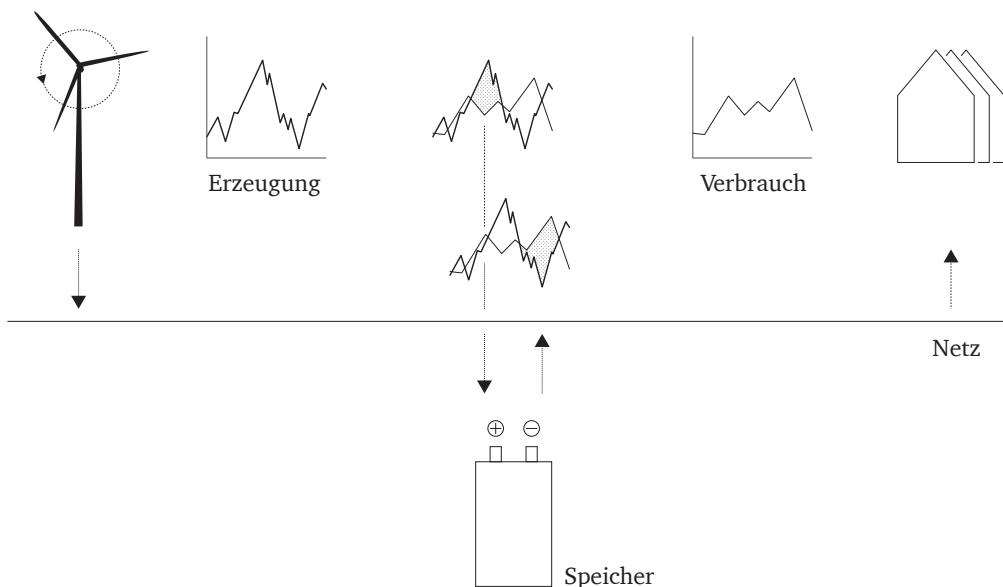


Abb. 3:  
Einsatz von Speichern in der  
Energieversorgung

- 1 Vgl.: Schwab, Adolf J., 2012, S. 36
- 2 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012a, S. 9
- 3 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012b, S. 30
- 4 Vgl.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2013, S. 5
- 5 Vgl.: <http://www.erneuerbare-energien.de/die-themen/windenergie/kurzinfo.html>

## Lösungsansätze

Dem zuvor beschriebenen Konflikt aus diskontinuierlicher Erzeugung auf der einen und benötigter Versorgungssicherheit auf der anderen Seite, kann man durch ein Maßnahmenbündel begegnen: dem Netzausbau und der Schaffung von Kapazitäten zur Energiespeicherung (Vgl. Abb. 3). Somit können Angebot und Nachfrage, unabhängig von der Quantität und dem Zeitpunkt ihres Auftretens, aufeinander abgestimmt werden. Das Verfahren beruht auf einem einfachen Prinzip. Bei Überproduktion oder verminderter Nachfrage werden Überschüsse erzeugt, die zwischengespeichert werden. Tritt nun der umgekehrte Fall ein, d.h. eine verminderte Produktion oder eine vermehrte Nachfrage, werden die zuvor erzeugten Überschüsse wieder ins Netz gespeist. Um die schnelle Verteilung der eingespeisten Energie zu garantieren, sind die Speicher in ein sogenanntes dezentrales Versorgungssystem eingebunden. Dieses beruht auf einem engmaschigen Verteilungsnetz, angebunden an eine Vielzahl kleiner Erzeuger. Es ist eine Alternative zum gegenwärtigen System der zentralen Versorgung, das auf dem Einsatz weniger Großkraftwerke beruht. Auch die Bundesregierung verweist im vorgestellten Energiekonzept explizit auf den Ausbau von Speicherkapazitäten und führt zu dessen Umsetzung sechs Handlungsfelder an<sup>1</sup>. Neben dem Ausschöpfen bestehender Kapazitäten und dem Erschließen neuer Potenziale zur Pumpspeicherung, ist die Forderung nach Innovation und Forschung im Bereich der Speichertechnologien ein zentraler Baustein innerhalb dieser Handlungsfelder.

## 2.0 Relevanz und Kernfragen der Promotion

Das vorliegende Promotionsvorhaben greift den oben beschriebenen Sachverhalt auf und nimmt darüber hinaus direkten Bezug zu den anvisierten Handlungsfeldern der Bundesregierung, respektive dem Ausbau von Speicherkapazitäten. Es geht der Frage nach, ob und wenn ja, in welcher Form man leerstehende Bauwerke zu Energiespeichern umnutzen kann, mit dem Ziel sie in einem dezentralen Verbund einzusetzen. In diesem Zusammenhang beschränkt sich die Arbeit auf die Speicherung von elektrischer Energie sowie Bauwerkstypen im Industrie- und Militärbereich, um u.a. folgende Teilaspekte zu bearbeiten:

- Welche Systeme zur Speicherung von elektrischer Energie kommen für die Umnutzung in Frage?
- Wie sehen die baustrukturellen Anforderungen der Speichersysteme aus?
- Welche Typen von Bauwerken im Bereich des industriellen und militärischen Sektors eignen sich zur Umnutzung?
- Für welche Speicherform von elektrischer Energie eignet sich welches Bauwerk welchen Typs?
- Welche Speicherkapazitäten kann man mit geeigneten Typen erzielen?

1 Vgl.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.], 2012a, S. 21

### 3.0 Methoden

Methodisch basiert die Promotion im Kern auf drei Teilpaketen, die im Folgenden mit den Schlagwörtern Systeme, Typen und Pilote beschrieben sind und auch in dieser Reihenfolge bearbeitet werden. Die einzelnen Bausteine generieren eigenständige Ergebnisse, dienen aber auch dazu Erkenntnisse für das darauf folgende Modul zu liefern.

#### Systeme

Ausgangspunkt ist die Untersuchung und Aufarbeitung von vier ausgewählten Systemen zur Speicherung von elektrischer Energie, die sich methodisch am besten mit dem Begriff der Kriterien gestützten Systemanalyse beschreiben lässt. Mittels Literaturrecherche wird der Stand der Forschung erfasst sowie der technische Aufbau und die Funktionsweise des Systemes nachvollzogen, wozu auch die Ermittlung wichtiger Kenndaten, wie etwa der Wirkungsgrad oder die Energiedichte, zählt. Ziel der Teilkapitel ist es, maßgebliche Anforderungen abzuleiten und zu benennen, welche die jeweiligen Systeme technisch/funktional bedingt an die Struktur eines potentiellen Bauwerks adressieren. Diese sind für die spätere Eignungsprüfung von Belang. Zu diesem Zweck werden die Systeme zunächst in gewählte Haupt- und dazugehörige Teilkomponenten gegliedert, was anhand von drei Kriterien geschieht. Erstens ist die Gliederung nur so weit zu führen, wie es der Zweck, also die Ableitung von Anforderungen, erforderlich macht. Zweites Kriterium ist der gegebene funktionale Zusammenhang im System, welcher beispielsweise die Wahl von Haupt- und Teilkomponenten mitbestimmt. Drittes und letztes Kriterium ist das der Relevanz. Wird eine Komponente aufgeführt, übernimmt diese eine signifikante Teilfunktion im Gesamtsystem, die sich eindeutig von der Rolle anderer Komponenten abgrenzen lässt. Basierend auf den genannten Kriterien werden die Gliederungen als Schemata abgebildet, die einzelnen Komponenten nummeriert und in tabellarischer Form beschrieben. Die eigentlichen Anforderungen beziehen sich jeweils auf die zuvor definierten Haupt- oder Primärkomponenten der Systeme. Auch in diesem Fall ist eine Gliederung sinnvoll, nicht zuletzt weil man damit eine lose Sammlung verhindert. So werden die abgeleiteten Anforderungen kategorisiert und definierten Ober- bzw. dazugehörigen Untergruppen zugeordnet.

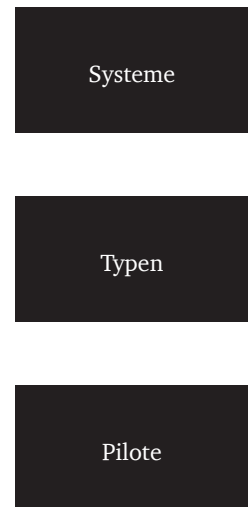


Abb. 4:  
Gliederung der Promotion in drei Teilpakete

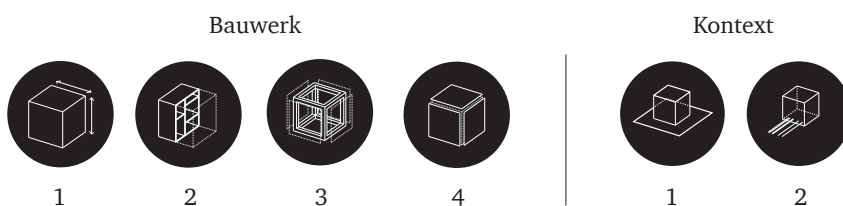


Abb. 5:  
Anforderungskategorien im Katalog

Unterschieden wird nach den Anforderungen, die das Bauwerk selber betreffen und denjenigen, welche in Zusammenhang mit dessen Kontext stehen. Beim Kontext finden sich zwei Subkategorien, nämlich Flächen (1) und Infrastruktur (2), beim Bauwerk vier: Dimensionen (1), räumliche Gliederung (2), Tragwerk und Konstruktion (3) sowie Hülle (4). Während die zuletzt genannten Kategorien selbsterklärend sind, bedürfen die kontextbezogenen Kategorien Flächen und Infrastruktur noch der Erläuterung. Hierbei verhält es sich wie folgt. Stellt ein System eine Anforderung an die Fläche, kann das beispielsweise bedeuten: eine Komponente muss aus funktionalen, technischen oder anderweitigen Gründen im Außenraum des Bauwerks platziert werden. Bei der Infrastruktur könnten Bedingungen lauten: es muss eine hochtemperierte Wärmequelle vor-

handen, die unmittelbare Anbindung an den Schienenverkehr, das Straßennetz oder der Zugang zu einem Wasserweg gewährleistet sein. Die Ergebnisse des Anforderungskataloges schlagen die Brücke zum nächsten Teilpaket, den Typen, wo sie in die Eignungsprüfung einfließen.

## Typen

Ziel des zweiten Teilpaketes ist es, die Eignung von Bauwerkstypen festzustellen und diejenigen Objekte zu benennen, welche sich aufgrund der gegebenen Voraussetzungen im besonderen Maße für eine Umnutzung zum Energiespeicher qualifizieren. Der eigentlichen Eignungsprüfung ist eine Clusteranalyse vorangestellt, aus der die relevanten Bauwerkstypen hervorgehen. Diese Methode ist u.a. in den Sozialwissenschaften verbreitet, um eine große Anzahl heterogener Objekte in möglichst homogene Gruppen zu unterteilen. Ein einfaches Exempel sind Befragungen, bei denen die Probanden anhand der Ausprägung von Variablen wie Alter, Wohnort oder Einkommen gruppiert werden<sup>1</sup>. Die Clusteranalyse ist jedoch nur Mittel zum Zweck. Im Anschluss erfolgt die eigentliche Analyse, für die das Clustern aber eine zwingende Voraussetzung darstellt. So verhält es sich auch im vorliegenden Fall, denn ohne die Definition von Bauwerkstypen kann keine Eignungsprüfung erfolgen. Die Clusteranalyse wird auf Individuen, Gegenstände oder Aggregate<sup>2</sup> angewendet<sup>3</sup> und umfasst üblicherweise drei Schritte: Variablenauswahl, Bestimmung des Distanz- bzw. des Ähnlichkeitsmaßes und Wahl des Verfahrens<sup>4</sup>. Zunächst einmal zählen Bauwerke als Gegenstände, nicht als Individuen oder Aggregate. Was die Variablenauswahl anbelangt, wird ein multivariates Verfahren angewandt, da sowohl architektonisch/konstruktive als auch zweckgebunden/funktionale Variablen herangezogen werden. Das sogenannte Distanz- bzw. Ähnlichkeitsmaß ist für jede der gesetzten Variablen festzulegen. Es bestimmt, inwiefern zwischen den betrachteten Objekten der Clusteranalyse eine Übereinstimmung besteht oder nicht, was allerdings noch die Kenntnis des gültigen Skalenniveaus voraussetzt. Hierbei hat man die Wahl zwischen nominalen, ordinalen und Intervallskalen, wobei letztere eine quantitative Einordnung erlauben, nominal- und ordinalskalen hingegen nur qualitative Abgrenzungen<sup>5</sup>. Das Clustern der Bauwerkstypen erfolgt auf der Basis nominaler und ordinaler Skalen, wenngleich die nominalen Skalen überwiegen. Diese unterscheiden nur ob eine bestimmte Eigenschaft zutrifft oder nicht. Beispielsweise verfügen die Geschossbauten über mehrere vollwertige Ebenen, die übrigen Bauwerkstypen Turm-, Flach-, Hallen- und Behälterbau nicht. Demgegenüber erfolgt die Unterscheidung zwischen den Schüttgutbehältern und den Druckgasbehältern auf der Basis ordinaler Skalen, welche auch Rangordnungen zulassen. Bei den Schüttgutbehältern richtet sich diese nach der Art und Weise wie das Gut eingelagert wird (1. Art, 2. Art und 3. Art), bei den Druckbehältern nach der Höhe des angewendeten Druckes (Niederdruckgas-, Hochdruckgas- und Flüssiggasbehälter) (siehe Typologie S. 78 - 79). Auch im Falle der militärischen Bauwerkstypen werden beide Skalenniveaus angewandt. Die Differenzierung zwischen Hoch- und Tiefbunker beispielsweise basiert auf einer nominalen Skala, welche anhand des Kriteriums der Lage unterscheidet, ob sich ein Bauwerk über oder unterhalb der Oberfläche befindet. Die Typen serieller Hochbunker kleiner Größe, teilnormierter Hochbunker mittlerer Größe der I. und II. Welle und übergroßer

1 Wiedenbeck, Michael und Züll, Cornelia, o.O. 2001, S. 01

2 Anmerkung: Damit sind Länder oder Organisationen gemeint

3 Stein, Petra und Vollnhals, Sven, Duisburg 2011, S. 01

4 Steinhauses, Detlef und Langer, Klaus, 1977, S. 19

5 Stein, Petra und Vollnhals, Sven, Duisburg 2011, S. 18



---

Hochbunker spezifischer Prägung und Funktion gehen aus der Kombination nominaler und ordinaler Skalen hervor. Zum einen werden die Objekte anhand ihrer Größe in kleine, mittlere und übergroße Bunker eingeteilt, was einer ordinalen Skala entspricht, zum anderen wird unterschieden, ob ein Objekt Teil der drei Bauphasen war, die von der nationalsozialistische Führung angeordnet wurden oder unabhängig davon entstand. Hierbei handelt es sich um eine nominale Skala, da nur geprüft wird, ob jene Zugehörigkeit bestand oder nicht (siehe Typologie S. 101). Als letzter Punkt soll noch auf die Frage nach dem Clusterverfahren eingegangen werden, bei der es vier Optionen gibt: hierarchisches Verfahren, partitionierendes Verfahren, Fuzzy Clustering und graphentheoretisches Clustering. Anwendung findet hier eine hierarchische Variante, genau genommen das sogenannte divisive<sup>1</sup> Verfahren. Dieses geht nicht von den einzelnen „nackten“ Objekten aus, sondern von bereits bestehenden Clustern, um diese dann sukzessiv in Subcluster zu spalten<sup>2</sup>. Sowohl im Bereich des Industrie- als auch des Militärbaus geht die Arbeit entsprechend vor. Eine bestehende Typologie<sup>3</sup> dient als Grundlage, um daraufhin die existierenden Typen (Cluster) weiter zu teilen. Die beschriebenen Bauwerkstypen, gewissermaßen das Produkt der Clusteranalyse, werden dann im Rahmen der Eignungsprüfung bewertet. Kennzeichnend sind die baustrukturellen Eigenschaften, welche aus der jeweiligen Typdefinition hervorgehen und die Abgrenzung zu anderen Typen schafft. Diese Merkmale werden mit den Systemanforderungen in Beziehung gesetzt, um daraufhin eine Bewertung abzugeben, inwiefern eine Eignung besteht. Abhängig davon wie hoch das Potential des Typen ausfällt, wird die Prüfung ausführlicher oder weniger detailliert vollzogen.

## **Pilote**

Das letzte Teilpaket, die Pilote, umfasst eine Planungsstudie an einem konkreten Objekt. Zu diesem Zweck wird ein Referenzbauwerk ausgewählt, was dem Typ nach eine hohe Eignung besitzt. Dieses dient in erster Linie als Stichprobe, um die Ergebnisse der Eignungsprüfung zu validieren, geht aber auch der Frage nach, wie sich eine Umnutzung aus planerischer, monetärer und letztlich auch architektonischer Sicht darstellt.

## **4.0 Referenzen und der Stand der Forschung**

In dem Bereich der Energiespeicherung wird weltweit intensiv geforscht. Was die Technologien anbelangt, sind es vor allem Wirkungsgrad, Kapazität und Zyklenzahl, die einem steten Prozess der Effizienzsteigerung, Optimierung und Verbesserung unterworfen sind. Daneben werden neue Technologien entwickelt oder bisher noch nicht konkurrenzfähige Systeme zur Marktreife gebracht. Beispielhaft kann man die Entwicklung der Elektromobilität anführen. Die Reichweite und die Leistungsfähigkeit der verbauten Akkumulatoren wurde in den vergangenen Jahren immer weiter gesteigert. Gleichermäßen sanken Preise, Baugrößen und Ladezeiten. Ähnlich dynamisch verhält es sich mit der Evolution von Smartphones oder tragbaren Computern. Sucht man nach Anknüpfungspunkten zur vorliegenden Arbeit, muss man an dieser Stelle allerdings differenzieren. So haben sich die zuletzt genannten Zweige zwar aus technischer Sicht in bemerkenswerter Weise entwickelt, für die Promotion im engeren Sinne

1 Anmerkung: Synonyme für teilend, spaltend, trennend

2 Stein, Petra und Vollnhals, Sven, Duisburg 2011, S. 18 - 20

3 Anmerkung: Der Begriff Typologie ist Synonym für Clustern bzw. das Ergebnis einer Clusteranalyse zu verstehen.

sind sie aber weniger relevant. Schließlich handelt es sich dabei um grundverschiedene Anwendungsgebiete und Maßstäbe. Interessant wird es, wenn von Energiespeicherung im Zusammenhang mit der Energiewende gesprochen wird. Einen guten Überblick verschafft die 2013 ins Leben gerufene ‚Forschungsinitiative Energiespeicher‘<sup>1</sup>, welche das BMWi in Kooperation mit BMU und BMBF fördert. Ziel dieser Plattform ist es auf laufende Forschungsprojekte zu verweisen, die Ergebnisse abgeschlossener Projekte zu präsentieren und darüber hinaus die Erkenntnisse und Innovationen im Bereich der Energiespeicherung zu bündeln. In den vier Themengebieten ‚Versorgungsnetze, Industrielle Prozesse, Gebäude und Analysen‘ liegen die Schwerpunkte auf der Weiterentwicklung bekannter Speichertechnologien, der Beschaffenheit zukünftiger Versorgungsnetze und wie Speichersysteme in diese eingebunden werden können. Bisher sind 87 laufende und abgeschlossene Forschungsprojekte einzusehen. Nachfolgend wird eine kleine Auswahl an Projekte genannt, die im Hinblick auf das Promotionsthema erwähnenswert erscheinen, zudem einen Eindruck von den Forschungsinhalten der Plattform vermittelt.

- ‚Unflexible Stromerzeugung ausgleichen: Multi-Grid-Storage‘

Das Forschungsprojekt ‚Multi-Grid-Storage‘ verknüpft die Sektoren Gas, Wärme und Elektrizität, um unter Anwendung der zugehörigen Schlüsseltechnologien Maßnahmen zu benennen, wie zukünftig auf die fluktuierende Erzeugung durch die erneuerbaren Energieträger reagiert werden könnte<sup>2</sup>.

- ‚Potenzial des Untergrundes ermitteln: ANGUS+‘

Bis Juni 2016 untersuchen die beteiligten Wissenschaftler des Projektes ANGUS+, wie verschiedene Möglichkeiten der unterirdischen Speicherung zu bewerten sind. Das Portfolio evaluierter Technologien reicht von der oberflächennahen Geothermie bis zur Druckluft- oder Wasserstoffspeicherung, die bis in tiefergehende Schichten reichen können<sup>1</sup>.

- Potenzial von Kavernen vorhersagen: ‚InSpEE‘

Das mit dreijähriger Laufzeit bis 2015 angesetzte Forschungsvorhaben untersucht das Potenzial von Salzkavernen zur „großskaligen Energiespeicherung“. Als mögliche Speichermedien werden in diesem Rahmen Druckluft und Wasserstoff untersucht. Neben der eigentlichen Potenzialabschätzung soll auch ein öffentlich zugängiges „Informationssystem Salz“ ins Leben gerufen werden<sup>1</sup>.

- ‚Speicher in der Wolke bündeln: green2store‘

Bis 2016 entwickeln Forscher ein Simulations- und Planungstool, welches verschiedene Speichersysteme und deren Kapazitäten in einem Netz miteinander koppelt. Die einzelnen Speicher werden, unabhängig von ihrem physischen Standort, in einer sogenannten „Cloud“ gebündelt und den am Netz angeschlossenen Verbrauchern zur Verfügung gestellt. Aus vielen kleinen Einheiten entsteht somit eine „energy storage cloud“ mit großer Kapazität<sup>1</sup>.

- ‚Kugelpumpspeicher unter Wasser: StEnSEA‘

1 Vgl.: <http://forschung-energiespeicher.info>, 31.05.2016

2 Vgl.: Vgl.: <http://forschung-energiespeicher.info>, 31.05.2016

---

Das Projekt StEnSEA greift das Prinzip des Pumpspeicherkraftwerks auf und entwickelt daraus einen Hohlkugelspeicher, der am Meeresboden liegt und mit Offshore-Windparks in Verbindung steht. Durch abwechselndes Befüllen und Entleeren des Kugelvolumens können die Speichereinheiten eine Kapazität von bis zu 20 MWh erreichen<sup>1</sup>.

- ‚Energiespeicher im Jahr 2030: Merit Order‘

Das Forschungsprojekt ‚Merit Order‘ geht der Frage nach inwieweit Lastspitzen durch eine Kombination aus Flexibilisierungsmaßnahmen im Netz und der Einbindung von Speicherkapazitäten abgebaut werden können<sup>1</sup>.

### **Weitere Forschungsvorhaben und relevante Projekte**

- ‚Windenergieeinspeisung durch die Nachnutzung stillgelegter Bergwerke‘

Am ‚efzn‘, dem ‚Energie-Forschungszentrum Niedersachsen‘ (wissenschaftliche Einrichtung der TU Clausthal), ist vom 01.01.2009 bis 31.12.2010 im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens untersucht worden, inwiefern ehemalige und nicht mehr betriebene Bergwerke zu Pumpspeicherkraftwerken umgenutzt werden können<sup>1</sup>.

- Die IBA Hamburg und der Energiebunker

Praktische Bezüge finden sich zur Internationalen Bauausstellung Hamburg ‚Zukunftskonzept erneuerbares Wilhelmsburg‘. Unter dem Leitmotiv ‚Stadt im Klimawandel‘, steht diese für die Umsetzung einer dezentralen Quartiersversorgung, welche vollständig auf erneuerbaren Energien basiert<sup>2</sup>. Besonders erwähnenswert ist das Pilotprojekt ‚Energiebunker‘, bei dem ein Flakbunker aus dem Jahr 1942 zu einem Energiespeicher mit quartiersversorgender Funktion umgenutzt wird. Hauptbestandteil ist ein Wasserbehälter mit zwei Mio. Liter Fassungsvermögen, der insgesamt 3000 Wohneinheiten mit Wärme versorgen kann. Als Quelle dienen ein BHKW<sup>3</sup> und eine solarthermische Anlage, die sich über das Dach und einen Teil der Fassade des Bunkers erstreckt. Das Innenleben des Bauwerks ist über eine großflächige Verglasung von Außen einzusehen, darüber hinaus wird das Dach als Aussichtsplattform genutzt, wo sich auch ein kleines Café befindet<sup>4</sup>. Somit sind einige Voraussetzungen geschaffen worden, dem Bauwerk neben seiner Schlüsselrolle in der Versorgung auch eine übergeordnete Funktion in der Wahrnehmung des Quartiers zukommen zu lassen. Der überwiegende Teil der o.g. laufenden oder abgeschlossenen Forschungsprojekte beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Speichertechnologien oder der Frage nach deren Rolle in dezentralen Versorgungssystemen. Insofern besteht zu der Thematik der Promotion lediglich auf indirekten Wege eine Verbindung. Einzig das Projekt zur Umnutzung stillgelegter Bergwerke geht auch der Frage nach der Verortung von Speichern, im Sinne einer Um- bzw. Nachnutzung, auf den Grund. Unmittelbare Bezüge gibt es hingegen zur IBA Hamburg. Gewissermaßen spielt man dort die Energiewende im Kleinen durch, womit sich praktische Erfahrungen nicht nur beim Einsatz des Energiebunkers sammeln lassen. Obwohl es sich bei diesem um einen Wärme- und keinen elektrischen Energiespeicher handelt, ist und bleibt das Projekt ein wichtiges Anschauungsobjekt.

1 Vgl.: Beck, H.-P., Schmidt, M. [Hrsg.], 2011

2 Vgl.: Internationale Bauausstellung Hamburg [Hrsg.], 2010, S. 43

3 Anmerkung: Blockheizkraftwerk

4 Vgl.: Internationale Bauausstellung Hamburg [Hrsg.], 2010, S. 198

# Kapitel II **Systeme**

## II Systeme

### 1.0 Systemwahl

Ein Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der selektiven Betrachtung von Systemen zur Speicherung von elektrischer Energie. Ausgeklammert werden thermische Speicher. Trotz dieser Einschränkung hat man es immer noch mit einer großen Diversität an Systemen zu tun, weshalb es notwendig ist, nochmals in der Kategorie der elektrischen Energiespeicher zu filtern. Zum Einstieg hilft die gängige und weit verbreitete Einteilung nach der physikalischen Form in elektrische, chemische, mechanische und thermische Energiespeicher weiter, die sich, abhängig von der gewünschten Bearbeitungstiefe, sukzessiv um Untergruppen und die dazugehörigen technischen Systeme erweitern lässt<sup>1</sup>.

Gruppe	Untergruppe(n)	technisches System(e)
elektrisch	-	Kondensator
	-	supraleitende magnetische Energiespeicher
chemisch	elektrochemisch	Blei-Säure-Akkumulator
	-	Lithium-Akkumulator
	-	Redox-Flow-Akkumulator
	-	...weitere
mechanisch	kinetisch	Schwungrad
	potentiell	Hubspeicher
	-	Druckluftspeicher
	-	Pumpspeicher
thermisch	-	-

Abb. 6:  
Gliederung der  
Energiespeicher

Bevor genauer auf einzelne technische Systeme eingegangen wird, kann man eine Gruppe bereits vorab ausschließen: die thermischen Energiespeicher. Wie bereits einleitend erwähnt, liegen diese außerhalb des gesetzten Untersuchungsrahmens dieser Arbeit. Die Gruppe der elektrischen bzw. direktelektrischen Speicher umfasst mit dem Kondensator und dem supraleitenden magnetischen Energiespeicher lediglich zwei Technologien. Beide sind jedoch für die anvisierte Anwendung nicht geeignet. Kondensatoren scheiden aufgrund ihrer Zweckbestimmung aus, bei den Supraleitern kommt noch der unverhältnismäßig hohe Aufwand für Bau und Betrieb hinzu<sup>2</sup>. Die Akkumulatoren sind wahrscheinlich die am weitesten verbreiteten elektrochemischen Energiespeicher, die unter dem gebräuchlicheren Begriff der Batterie bekannt sind. Am längsten sind die Blei-Säure-Akkumulatoren im Einsatz, teurer aber auch leistungsfähiger sind neuere Entwicklungen, wie etwa Lithium-Akkumulatoren, die beispielsweise in mobilen Computern oder in der Elektromobilität Anwendung finden<sup>3</sup>. Es gibt eine Vielzahl weiterer Untertypen, die sich u.a. in den verwendeten Materialien,

1 Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher, 2014, S. 36 - 37  
 2 Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher, 2014, S. 136 - 195  
 3 Neupert, Ulrik et.al., 2009, S. 36 - 59

Zyklenzahl	
Blei-Säure-Akkumulator	
203 - 1315	[-]
Lithium-Akkumulator	
400 - 1900	[-]
Pumpspeicherkraftwerk	
12 880 - 33 0000	[-]
Druckluftspeicherkraftwerk	
8620 - 17 100	[-]
Hubspeicher	
k.A.	[-]
Schwungrad	
> 1 Mio.	[-]

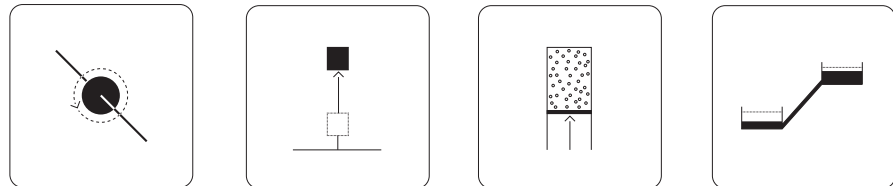
Abb. 7:  
Zyklenzahl ausgewählter Speichersysteme

Eigene Darstellung,  
Daten: Sterner, Stadler

Energiedichte, Zyklenzahl, Ladedauer und der Lebensdauer unterscheiden. Auf eine umfassende Auflistung kann jedoch verzichtet werden, da der Akkumulator als Speichersystem nicht weiter betrachtet wird. Dafür gibt es mehrere Gründe. Zu nennen sind die begrenzte Zyklenzahl<sup>1</sup>, die relativ kurze Lebensdauer, der Einsatz umweltschädlicher Komponenten wie beispielsweise Schwermetalle<sup>2</sup> oder die offenen Fragen, wenn es um die Entsorgung und das Recycling der Speichereinheiten geht. Es sind aber nicht nur die widrigen Kenndaten, sondern auch der Akkumulator als Solches. Dass man eine Batterieeinheit in fast jede Halle stellen kann, liegt auf der Hand und muss nicht im Zuge umfassender typologischer Eignungsprüfungen validiert werden. Anders verhält es sich beispielweise mit Hub-, Druckluft- oder Pumpspeicher. Hier sind die Anforderungen deutlich komplexer, was das Auffinden geeigneter Bauwerke zu einer anspruchsvollen und vielschichtigen Aufgabe macht. Dabei sind es gerade die Bauwerke mit unkonventioneller ggf. einmaliger Struktur, welche im Falle des Leerstandes vom Abriss bedroht sind, da tradierte Nutzungskonzepte häufig nicht greifen. Gerade in solchen Fällen könnten die zuletzt genannten Speichersysteme eine bisher unbeachtete Nutzungsoption bieten.

In der verbliebenen Gruppe der mechanischen bzw. potentiellen und kinetischen Energiespeicher findet man die vier Systeme Hub-, Druckluft-, Pump- und Schwungradspeicher, welche im Rahmen dieser Arbeit allesamt als untersuchenswert eingestuft werden. Was diese Systeme auszeichnet und für die anvisierte Nutzung qualifiziert, sind zum einen die technischen Kenndaten, wie etwa hohe Zyklenzahl und lange Lebensdauer, aber auch deren Fähigkeit, mit den Dimensionen eines gegebenen Bauwerks umzugehen. Der Hubspeicher beispielsweise kann dies durch Änderung von Hubhöhe sowie Format und Masse des Hubgewichtes tun, das Schwungrad durch Erweiterung oder Reduktion der Anzahl platzierter Module. Darüber hinaus sind alle Systeme, mit Ausnahme des Hubspeichers, bereits in der Praxis im Einsatz, in einigen Fällen sogar unmittelbar in Verbindung mit der Einspeisung regenerativ erzeugten Stroms.

Abb. 8:  
Ausgewählte Speichersysteme



## 2.0 Auslegung und Dimensionierung

Ein wichtiger Beitrag zur Arbeit an den Systemen ist die Transposition auf den Maßstab des Gebäudes, wozu es erforderlich ist einzelne Komponenten auszulegen und daraufhin zu dimensionieren. Welche Bausteine relevant sind ist abhängig vom System und basiert auf den Erkenntnissen aus der Analyse respektive der abgeleiteten Gliederung in Haupt- und Teilkomponenten. Die ermittelten Größenangaben können im Fließtext, in tabellarischer Form oder als Maßkette erscheinen. Je nachdem um welches System es sich handelt, wird die Dimensionierung in unterschiedlicher Schärfe betrieben. Ziel ist es zu einem Betrachtungsmaßstab zu gelangen, der ausreicht, um etwaige strukturell/räumlichen Zwänge, welche aus den Dimensionen eines Systems bzw. seiner Kompo-

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher, 2014, S. 600 - 604  
2 Vgl.: Neupert, Ulrik et.al., 2009, S. 42

---

nenten hervorgehen, zu erfassen. Generell will die Dimensionierung im Sinne der Arbeit als Angabe von Größenordnungen verstanden werden, wie man es beispielsweise aus der statischen Vordimensionierung von Bauteilen kennt. Wie genau bei der Auslegung und Dimensionierung vorgegangen wird, kann in den Teilkapiteln nachgelesen werden und anhand der Pilote in der Anwendung verifiziert werden.

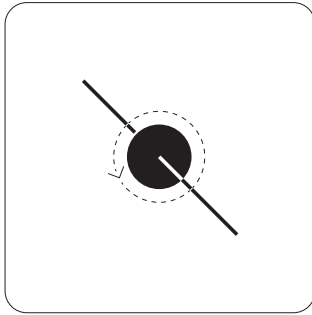


Abb. 9:  
Systempiktogramm  
Schwungradspeicher

### 3.0 Schwungradspeicher

#### 3.1. Einführung

Das Prinzip des Schwungrades basiert darauf Energie in der Bewegung einer rotierenden Masse zu speichern. Somit zählt dieses System zu den kinetischen Energiespeichern<sup>1</sup>. In der Reihe betrachteter Speichersysteme nimmt das Schwungrad in zweierlei Hinsicht eine Sonderstellung ein. Zum einen handelt es sich um den einzigen reinen Kurzzeitspeicher<sup>2</sup>, zum anderen vereint es alle Komponenten in einem kompakten Modul, welches extern vorgefertigt und analog zu einem Möbelstück im Bauwerk plaziert wird. Speicherkapazität und die Leistung können durch die Anzahl Module gesteigert werden. In der Anwendung hat das Schwungrad eine lange Historie. Dabei finden sich sowohl exotische Beispiele wie der Schweizer Gyrobus, die Gyrolokomotive oder der Concept Train ACT I der Boeing Vertol Co.<sup>3</sup>, im Gegenzug aber auch althergebrachte Anwendungen mit Low-Tech Charakter wie die Töpferscheibe<sup>4</sup>. Moderne Einsatzbereiche sind die unterbrechungsfreie Stromversorgung oder der Fahrzeugbau, wo das Schwungrad zur Wiedergewinnung von Bremsenergie dient. In den Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit rückt das Schwungrad durch zwei weitere Einsatzfelder: es wird zur Zwischenspeicherung von regenerativ erzeugtem Strom aus der Windkraft sowie zur Netzstabilisierung eingesetzt<sup>5</sup>.

Der Gyrobus wurde in den 50er Jahren von der Schweizer Fa. Örlikon entwickelt. Er war mit einem Schwungradantrieb ausgestattet, der es ihm erlaubte eine Fahrstrecke von ca. 3,5 km zurückzulegen. Dies entsprach der maximalen Distanz zwischen zwei Haltestellen, an denen das Schwungrad durch erneutes Aufladen wieder in Rotation versetzt wurde<sup>6</sup>.

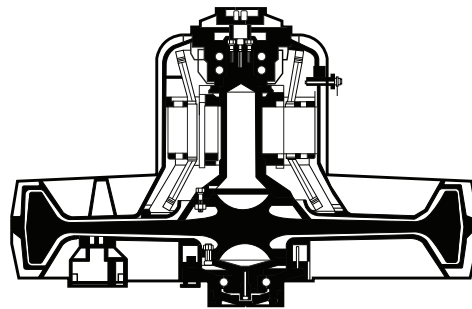


Abb. 10:  
Schwungrad des Gyrobuses

#### 3.2. Funktionsweise

Das Funktionsprinzip des Schwungrades lässt sich, unabhängig von dem spezifischen Anwendungsfall, auf das Zusammenspiel zweier Komponenten reduzieren. Zunächst bildet der Rotor das konstruktive und funktionale Kernstück, da die erzielbare Speicherkapazität unmittelbar von der Form, der Masse und der Umlaufgeschwindigkeit dieses Körpers abhängt. Gekoppelt ist die Schwungmasse mit dem zweiten Hauptelement, dem Motorgenerator. Tritt der Ladevorgang ein, wird dieser in Motorfunktion aktiv und versetzt unter Bezugnahme von elektrischer Energie die Schwungmasse in Bewegung. Der Entladevorgang stellt den umgekehrten Fall dar: die schnell rotierende Schwungmasse treibt den Motorgenerator in Generatorfunktion an, es wird elektrische Energie erzeugt (vergl.: Abb. 11). Dieser Prozess hält so lange an, bis die Speicherkapazität des Schwungrades erschöpft ist, d.h. die Masse sich nicht mehr dreht. Somit erschließt sich auch, warum Schwungräder im Einsatz auf kurze Speichervor-

- 1 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009, S. 124
- 2 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009, S. 141
- 3 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 509
- 4 Vgl.: Strößenreuther, Florian, 1996, S. 4
- 5 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009, S. 142 - 143
- 6 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 508f



gänge beschränkt bleiben. Die Lagerung der Schwungmasse zieht unweigerlich verhältnismäßig hohe Bereitstellungsverluste nach sich, womit längere Speicherperioden schnell unwirtschaftlich werden<sup>1</sup>. Dies ist ein Umstand, den auch hochmoderne magnetische Lagertechnik nicht gänzlich kompensieren kann.

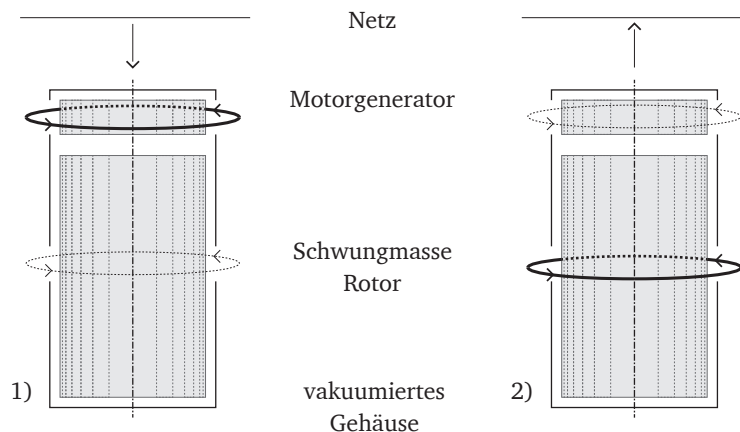


Abb. 11:  
Funktionsprinzip  
Schwungrad

- 1) Ladevorgang
- 2) Entladevorgang

### 3.3. Berechnung und Entwicklung zu modernen Bauformen

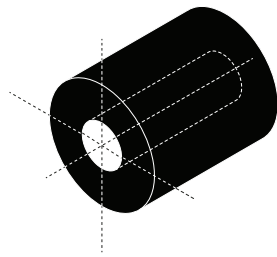
Kinetische Energie		
Variablen		
	Kürzel	Einheit
Masse	m	kg
Geschwindigkeit	v	m*s <sup>-1</sup>
Gleichung		
$E_{kin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$	-	Joule
Rotationsenergie		
Variablen		
Trägheitsmoment	J	kg*m <sup>2</sup>
Winkelgeschwindigkeit	w <sup>2</sup>	rad*s <sup>-1</sup>
Gleichung		
$E_{rot} = \frac{1}{2} \times J \times w^2$	-	Joule

Abb. 12:  
Tabelle Berechnungen

Physikalisch basiert die kinetische Energiespeicherung von Schwungrädern auf der sogenannten Rotationsenergie  $E_{rot}$ <sup>2</sup>. Diese leitet sich aus der Ermittlung der kinetischen Energie also Masse x Geschwindigkeit ab. Da es sich aber nicht um einen linearen Bewegungsvorgang sondern eine Kreisbewegung handelt, fließt anstelle der Geschwindigkeit ‚v‘ die Winkelgeschwindigkeit ‚w‘ und anstelle der Masse ‚m‘ das Massenträgheitsmoment ‚J‘ ein. Für das weitere Verständnis ist dabei zweierlei von Bedeutung. Zum einem fließt die Winkelgeschwindigkeit ‚w‘, im Gegensatz zum Trägheitsmoment ‚J‘, mit der zweiten Potenz in die Gleichung ein. Demzufolge bringt eine Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit

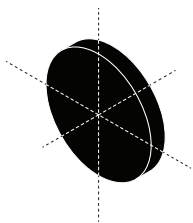
1 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009, S. 141

2 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 510



Hohlzylinder

$$J_x = \frac{1}{2} \times m (r_a^2 + r_i^2)$$



dünner Ring

$$J_x = m \times r^2$$

Abb. 13:  
Trägheitsmomente  
verschiedener  
Rotationskörper

stets exponentiell mehr Ertrag als eine vergleichbare Vergrößerung des Trägheitsmoments  $J$ . Man ist also bestrebt, die Umdrehungszahl gegenüber der Rotormasse zu erhöhen. Die zweite Größe, das Trägheitsmoment, ist abhängig von der Formgebung und der Masse des Rotationskörpers. Abb. 13 zeigt zwei mögliche Rotorformen. Die Varianz in der Ermittlung des Trägheitsmoments offenbart, dass in der Geometrie der Schwungmasse ein Optimierungspotenzial steckt, das moderne Konstruktionen mit besagten hohen Umdrehungszahlen kombinieren.

Die technische Evolution des Schwungrades kann man aus den oben dargelegten Erkenntnissen ableiten. Anfangs werden überwiegend große Massen in Form von Stahlschwungraden eingesetzt, die aber verhältnismäßig langsam rotieren. Mit dem Aufkommen neuartiger, hochfester Faserverbundwerkstoffe, werden die verbauten Rotoren erheblich leichter und es können immer höhere Umdrehungszahlen erzielt werden<sup>1</sup>. Hinzu kommen Innovationen im Bereich der Magnetlagerung, welche der Entwicklung neue Impulse verschaffen. Heutige, hochmoderne Bauformen, setzen Schwungradkörper aus Carbon oder Fiberglas ein, welche in vakuumierten Gehäusen laufen, magnetisch gelagert sind und mit bis zu 16 000 U/min<sup>2</sup> oder mehr rotieren.

### 3.4. Systembetrachtung

Das Schwungrad und seine Komponenten erfordern eine eigenständige Systembetrachtung, welche sich im Verfahren von Hub-, Druckluft- und Pumpspeicher unterscheidet. Dies betrifft den Umgang mit den Komponenten selber und die Anwendung von Berechnungsverfahren zur Ermittlung von Energiedichte, Kapazität oder Leistung. Zunächst ist eine Aufteilung des Schwungrades in einzelne Systemkomponenten zwar möglich, vor dem Hintergrund, diese anschließend mit Anforderungen an Bauwerk und Kontext zu verknüpfen, jedoch nicht zielführend. Beim Schwungrad handelt es sich, wie eingangs erwähnt, um ein fertiges Modul, welches alle Bestandteile in einem vakuumierten Gehäuse vereint. Schlussendlich würden alle Teilanforderungen obsolet, da dieses als luftdichter räumlicher Abschluss des Systems stets die prioritären Bedingungen stellen wird. Ein weiterer Aspekt ist die Frage nach der Skalierbarkeit des Schwungrades. Während andere Speichersysteme in Gänze oder deren Teilkomponenten skalierbar sind, wie beispielsweise die Höhe der Hubvorrichtung oder der Durchmesser der Hubmasse beim Hubspeicher, ist dies für das Schwungrad nicht ohne Weiteres möglich. Moderne Schwungräder sind hochtechnisierte Produkte. Die äußeren Abmessungen sind das Resultat eines Prozesses steter Weiterentwicklung und Optimierung, welcher vor dem Hintergrund der technischen Machbarkeit sowohl die einzelnen Bestandteile als auch deren Fügung einschließt. Eine Skalierung wird zwangsläufig alle Komponenten erfassen, womit nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein funktionierendes Ganzes im Zuge dessen kippt. Die Größe des Rotors beispielsweise unterliegt materialbedingten Restriktionen. Unabhängig davon, um welchen Werkstoff es sich konkret handelt, ob Stahl oder ein Verbund, jedes Material würde bei einer unzulässigen Vergrößerung des Radius irgendwann unter seiner Eigenlast reißen<sup>3</sup>.

Die geschilderten Bedingungen führen zu dem Schluss, dass der hohe technische Anspruch und das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Komponenten den eigenständigen Entwurf eines Schwungrades ausschließen. Als Alternative wird

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 510  
 2 Vgl.: <http://beaconpower.com/>  
 3 Vgl.: Rummich, 2009

ein geeignetes Referenzobjekt betrachtet, welches mit seinen Eckdaten als Muster dienen kann. Im Zuge der Recherche finden sich ein US-amerikanischer und ein kanadischer Hersteller, deren Schwungräder den Kriterien entsprechen. Frei zugängliche Datenblätter mit aussagekräftigen Angaben zu Spezifikationen und Dimensionen liegen nur beim US-amerikanischen Hersteller vor. Die folgenden Ausführungen basieren auf diesen Dokumenten.

### 3.5. Referenzschwungrad

Das betrachtete Schwungrad verwendet einen zylindrischen Kompositrotor aus Kohlefaser und Fiberglas, welcher mit 16 000 U/min rotiert. Die Schwungmasse ist magnetisch gelagert und das gesamte Innenleben steckt in einem evakuierten Stahlgehäuse. Weitere Kenndaten können der nebenstehenden Tabelle entnommen werden. Angeboten werden die Schwungräder für zwei Anwendungsgebiete: der Glättung von Leistungsschwankungen im Stromnetz sowie der verbesserten Netzintegration von elektrischer Energie aus erneuerbarer Erzeugung. Beides ist für die vorliegende Arbeit von Interesse. Wie bereits in der Einführung erwähnt, gilt im Stromnetz das Gebot des Leistungsgleichgewichtes: Nachfrage und Einspeisung von elektrischer Energie müssen sich die Waage halten<sup>1</sup>. Unter ungünstigen Umständen kann diese Balance durch kurzzeitige hohe Leitungsimpulse gestört werden, wenn z.B. eine Wolke bei starker Sonneneinstrahlung eine großflächige Photovoltaikfläche wieder frei gibt. Auch kurze starke Windböen führen bei Windkraftanlagen zu Leistungssprüngen. In beiden Fällen können Schwungräder eingesetzt werden, um diese abzufangen und zeitverzögert bei kleinerer Leistung wieder abzugeben.

Kenndaten Schwungrad		
Höhe	2,13	m
Durchmesser	0,91	m
Rotormasse	1,1	t
Gesamtmasse	ca. 2	t
Kapazität	25 bis 36	kWh
Leistung	100 bis 360	kW
Speicherdauer	4 bis 35	min min
Wirkungsgrad	85	%

Abb. 14:  
Kenndaten Schwungrad

eigene Darstellung,  
Herstellerdaten

Systemkomponenten	
1	<b>Schwungradmodul</b>
	Das Schwungradmodul besteht aus zwei relevanten Bausteinen. Dem eigentlichen Schwungrad und drei peripheren Elementen; der Leistungselektronik, der Steuerung und der Kühleinrichtung. Da es in erster Linie um deren räumliche Ausdehnung geht, können Leistungselektronik, Steuerung und Kühleinrichtung als Einheit aufgefasst werden. Diese nehmen zusammen etwa die Größe des Schwungrades an.
1.1	<b>Schwungrad</b>
	Das Schwungrad selber besteht aus einem evakuierten Stahlgehäuse mit einem Durchmesser von 0,9 m und einer Höhe von 2,13 m. In diesem befinden sich der Motorgenerator und der Rotor samt magnetischer Lagervorrichtungen. Die Schwungmasse rotiert mit 16 000 U/min und besteht aus einem Kohlefaser- / Fiberglaskomposit. Als Ort der Energiespeicherung stellt das Schwungrad das Kernstück der Anlage dar.
1.2	<b>Leistungselektronik, Steuerung und Kühlung</b>
	Die elektrische Maschine und die Lagereinrichtungen des Schwungrades benötigen eine aktive Kühlung. Die Leistungselektronik dient dazu, den vom Schwungrad während des Entladevorgangs erzeugten Strom in seiner Amplitude und Frequenz auf netzkonforme Werte zu bringen. Überwacht werden Funktion und Betrieb von der Steuerungseinheit.

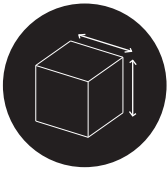
Abb. 15:  
Systemkomponenten  
Schwungrad

1 Vgl.: Schwab, Adolf J., 2012, S. 36

### 3.6. Anforderungskatalog

#### Anforderungen an das Bauwerk

#### Schwungradmodul

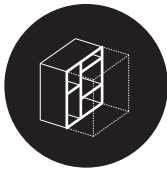


##### Dimensionen

###### » Grundfläche und lichte Raumhöhe

Die Schwungradmodule werden vorgefertigt und als fertige Elemente aufrecht stehend im Bauwerk platziert. Für die Aufstellfläche als Ganzes gilt: je mehr Schwungräder Platz finden, umso größer ist die erzielbare Leistung und Speicherkapazität. Der Raumbedarf des einzelnen Moduls beschränkt sich jedoch nicht auf dessen Außenkanten. Schwungräder müssen in regelmäßigen Abständen kontrolliert und gewartet werden, um sicherzustellen, dass keine Berstgefahr besteht. Die hohen Rotationsgeschwindigkeiten bringen Material und Technik an seine Grenzen. Reißt der Rotor, kann das Schwungrad außer Kontrolle geraten und es ist nicht ausgeschlossen, dass Teile der Schwungradmasse die Gehäusewand durchschlagen<sup>1</sup>. Wartung oder der Austausch erfolgen durch das Herausheben des Innenlebens aus dem Gehäuse. Demnach ist die erforderliche lichte Raumhöhe mindestens zu verdoppeln. In der Annahme, dass der Wartungsvorgang von einem mobilen Kran durchgeführt wird, ist im Umkreis des Moduls eine entsprechende Stellfläche vorzusehen. Ggf. kann diese größer ausgelegt werden, um auch für die eigentliche Wartungsprozedur zur Verfügung zu stehen.

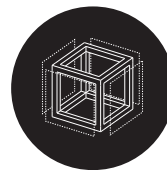
Da das Stahlgehäuse als alleinige Barriere unzureichend ist, erfordert der Berstschutz eine weitere Maßnahme. Der zuvor erwähnte US-amerikanische Hersteller versenkt hierzu die einzelnen Schwungräder in Betonwannen. Dieses Vorgehen schlägt auch Strößenreuther vor<sup>2</sup>. Analog vorzugehen, wenn man es mit einem bestehenden Bauwerk zu tun, kann nicht die Lösung sein. Ggf. wäre es denkbar, den Berstschutz durch das Setzen vorgefertigter Betonringe oder einer ähnlichen Schutzhülle zu realisieren. In jedem Fall muss die gewählte Schutzmaßnahme bei der Flächenkalkulation berücksichtigt werden.



##### Räumliche Gliederung

###### » schwellenloser Übergang zur ebenerdigen Aufstellfläche

Die Aufstellfläche sollte mindestens im Erdgeschoss, im Idealfall ebenerdig liegen und über einen schwellenlosen Übergang zu den angrenzenden Außenflächen verfügen. Diese Voraussetzung erleichtert nicht nur das erstmalige Aufstellen der Module, sondern auch die routinemäßigen Wartungsprozeduren, die ggf. den Austausch eines Moduls erforderlich machen.



##### Tragwerk und Konstruktion

###### » Tragfähigkeit der Aufstellfläche

Jedes Modul wiegt näherungsweise 2,5 t. Bei einer Grundfläche des Schwungrades von 0,64 m<sup>2</sup> entspricht dies einer Last von 40 kN/m<sup>2</sup>. Deckennutzlasten nach DIN 1055 - 3 für Werkstätten, Fabriken sowie Lagerräume werden mit 7,5 kN/m<sup>2</sup> bis 30 kN/m<sup>2</sup> veranschlagt<sup>3</sup>, abhängig von der Intensität des Betriebes. Somit stellt das Schwungrad einen außerordentlichen Lastfall dar, den es zu prüfen gilt. Erfüllt die Aufstellfläche allerdings die Anforderungen an die räumliche Gliederung, ist die dazugehörige Decke in ihrer Funktion als Bodenplatte i.d.R. stärker ausgeführt und den Belastungen ggf. auch ohne Ertüchtigung gewachsen.

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 512

2 Vgl.: Strößenreuther, Florian, 1996, S. 88

3 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.], 2001, S. 313

---

» große Spannweite

Für die Handhabung der Module sind große, zusammenhängende und störungsfreie Flächen von Vorteil. Weitgespannte Decken- oder Dachkonstruktionen garantieren, dass zumindest der Abstand tragender Bauteile zueinander kein Hindernis darstellt.

---

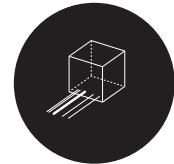
#### Anforderungen an den Kontext

#### Schwungradmodul

---

» *keine*

---



### 3.7. Schlussfolgerungen

Obgleich das Schwungrad bisher im Kontext des deutschen Energieversorgungssystems faktisch keine Rolle spielt und eher in anderen Anwendungsgebieten beheimat ist, sind schnell reagierende Leistungsspeicher eines der Systeme, die im Hinblick auf eine regenerative Energieversorgung diskutiert werden. Wie genau und in welchem Ausmaß ihr Einsatz erfolgt, wird sich im Zuge der weiteren Evolution des Energiesektors zeigen. Was die Anforderungen anbelangt, kann das Schwungrad im Vergleich zu den übrigen Systemen als moderat eingestuft werden. Allen voran muss genügend Fläche und lichte Raumhöhe vorhanden sein, beides Eigenschaften, die für viele Gebäudetypen zutreffen und auch in der Kombination nicht außergewöhnlich sind. Ohne die Eignungsprüfung vorweg nehmen zu wollen, sind etwa Nutzungen im Bereich der Lagerung und der Produktion u.a. aus funktionalen Gründen an diese Parameter gebunden. Dabei dürfte auch die erforderliche Raumhöhe von ca. 4,00 Metern kein Hindernis darstellen. I.d.R. kann man davon ausgehen, dass diese von den besagten Nutzungen sogar überschritten wird. In deren Fall sollte auch eine entsprechende infrastrukturelle Anbindung vorhanden sein, immerhin ist der An- und Abtransport von Gütern, Rohstoffen etc. eine der Voraussetzungen für die Lagerung oder Produktion von Waren und Ähnlichem.

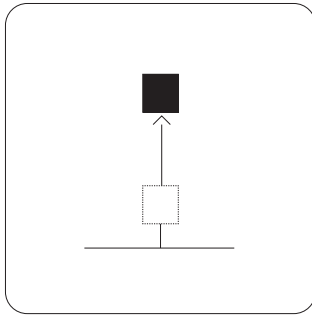


Abb. 16:  
Systempiktogramm  
Hubspeicher

## 4.0 Hubspeicher

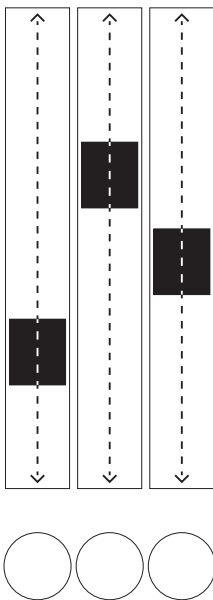
### 4.1. Einführung

Der Hubspeicher fördert Gewichte von einem niedrigen auf ein höheres Niveau, um potenzielle Energie zu speichern. Diesem Prinzip liegt die einfache Nutzung der Schwerkraft zugrunde. Während der Hebevorgang entgegen der Massenanziehung abläuft und Arbeit erfordert, kann diese beim anschließenden Absenkvorgang zurückgewonnen werden. Eigene Recherchen haben ergeben, dass es bisher keine realisierte und im Betrieb befindliche Hubspeicheranlage gibt. Große konstruktive sowie funktionale Parallelen gibt es allerdings zur Förder-technik, auf die im Folgenden detailliert eingegangen wird.

### 4.2. Stand der Forschung

Da es an einem gebauten Beispiel mangelt, ist man einzig auf die Ergebnisse aus Forschung und Entwicklung sowie verwertbarer literarischer Quellen angewiesen. Allerdings ist deren Anzahl begrenzt. So verzichtet das Fraunhofer Institut in seinem umfassenden Werk ‚Energiespeicher - Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial‘ darauf, den Hubspeicher zu erwähnen<sup>1</sup>. Auch Rummich führt diesen in ‚Energiespeicher‘ aus dem Jahre 2009 nicht als eigenes System auf. Behandelt wird der Hubspeicher in dem Grundlagenwerk ‚Energiespeicher - Bedarf, Technologie, Integration‘, allerdings unter dem Begriff des Lageenergiespeichers. Hierbei hat man es jedoch mit einer anderen Größenordnung und einem hydraulischen System zu tun, womit die Parallelen nur im grundlegenden Prinzip der Energiespeicherung bestehen<sup>2</sup>.

In der Forschung und Entwicklung gibt es eine kleine Gruppe nennenswerter Projekte. Ein laufendes Forschungsvorhaben zum Thema Hubspeicher ist an der Fachhochschule Heidelberg an der School of Engineering and Architecture angesiedelt. Neben einer Kurzbeschreibung der Funktionsweise und einer Aufzählung der Vorzüge des Prinzips Hubspeicher, findet sich auf der Webseite noch der Hinweis, dass man im Zuge des Projektes den Bau eines Versuchskraftwerks plane<sup>3</sup>. Der Arbeitsbereich Wasserbau der Universität Innsbruck entwickelt derzeit den sogenannten ‚Powertower‘, bei dem es sich um eine hydraulische Variante des Hubspeichers handelt. Bisher existieren zwei funktionsfähige Prototypen in unterschiedlichen Größen, laut Planungsstudien soll der Powertower einen Durchmesser von zehn Metern und eine Höhe von bis zu 100 m erreichen<sup>4,5</sup>. Die einzelnen Speicherzylinder sind in der Größe skalierbar und können sowohl ober- als auch unterirdisch angeordnet werden. Mehrere Powertower lassen sich zu einem ‚Cluster‘ mit zehn Einheiten verbinden<sup>6</sup>. In den Vereinigten Staaten existiert die Pilotanlage eines schienengebundenen Hubspeichersystems mit dem Namen ‚ARES‘ (Advanced Rail Energy Storage). Eine Lore mit mehreren Tonnen Gewicht fährt dabei selbstständig einen flach geneigten Hang hinauf, um im Bedarfsfall die gespeicherte Energie beim Abwärtsrollen wieder zur Verfügung zu stellen<sup>7</sup>. Aus der Übersicht lässt sich Folgendes konkludieren: die zuletzt aufgeführten Forschungsprojekte haben gemeinsam, dass sie zwar das Speicherprinzip des Hubspeichers aufgreifen, sich aber was die technische



Beim Powertower wird das Hubgewicht als Kolben in einem wassergefüllten Zylinder geführt. Das Wasser dient ausschließlich der Kraftübertragung. Eine angeschlossene Pumpenturbine hebt den Kolben beim Ladevorgang an. Senkt sich dieser wieder, erzeugt die Pumpenturbine in Turbinenfunktion elektrische Energie.

Abb. 17:  
Powertower der Universität  
Innsbruck

- 1 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009
- 2 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 520
- 3 Vgl.: <http://www.hochschule-heidelberg.de>, 27.05.2015
- 4 Vgl.: Aufleger, Markus, Neisch, Valerie, 2013
- 5 Vgl.: <http://www.powertower.eu>, 27.07.2015
- 6 Vgl.: Aufleger, Markus, Neisch, Valerie, Klar, Robert, 2013
- 7 Vgl.: <http://www.aresnorthamerica.com>, 27.07.2015

Umsetzung anbelangt, in Teilen von der Ausführung des Systems in der vorliegenden Arbeit unterscheiden. Demnach sind sie vor allem im Rahmen der Grundlagenrecherche von Interesse, als direktes Vorbild im weiteren Vorgehen aber weniger geeignet.

Als ergiebige Quelle hat sich die Webseite [www.hubspeicher.de](http://www.hubspeicher.de) erwiesen, welche auf die Privatinitiative des Physikers Werner Rau und dessen Stiftung RauEE zurückgeht. Der Webauftritt umfasst alle notwendigen Grundlagen zum Prinzip und der Funktionsweise des Hubspeichers, aktuelle Informationen zum Stand der Forschung sowie ein Portfolio eigens entwickelter Konstruktionsarten, wie dem ‚Windenspeicher‘-, dem ‚Zahnradspeicher‘- oder dem ‚Kettenspeicherkraftwerk‘. Mit dem ‚Windenspeicherkraftwerk‘ findet sich in der Reihe dieser Konstruktionsstudien auch der Ausgangspunkt für die weiterführenden Überlegungen zum konstruktiven Vorbild und der konkreten Ausführung des Hubspeichers, welche nachfolgend geschildert werden.

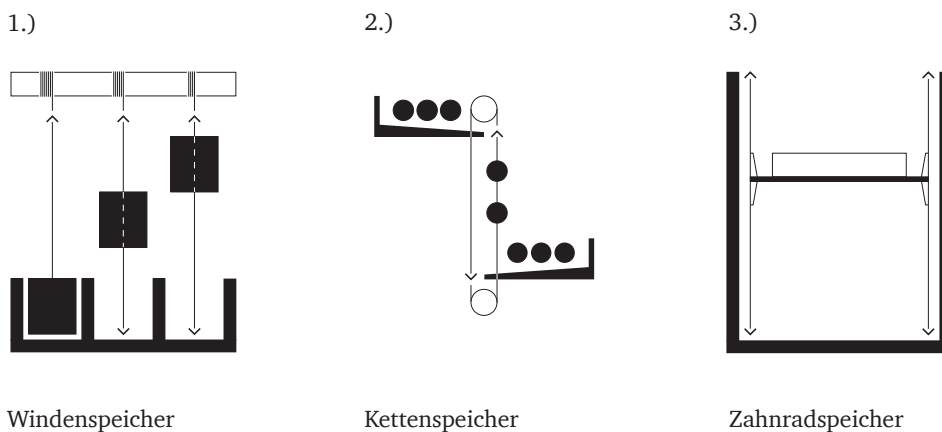


Abb. 18: Hubspeichervarianten nach Werner Rau

### 4.3. Vorbild Fördertechnik

Wie in der Einleitung bereits angedeutet, überschneiden sich Konstruktion und Funktion des Hubspeichers in der Fördertechnik. Diesen Hinweis liefert auch [www.hubspeicher.de](http://www.hubspeicher.de), mit dem Verweis auf technische Vorbilder wie dem Portal Kran. Die Fördertechnik selbst ist ein Teil der Transporttechnik, wie der nachstehenden Gliederung zu entnehmen ist. Während die Transporttechnik „...alle jene Verfahren und mechanische Einrichtungen, welche zur Erzielung von Ortsveränderungen von Gütern...“<sup>1</sup> umfasst, beschränkt sich die Fördertechnik auf den Teil, „...welcher sich mit jenen Einrichtungen und Verfahren beschäftigt, die es ermöglichen, Ortsveränderungen von Personen und Gütern über begrenzte Entfernungen meist auf festgelegten Wegen, durchzuführen.“<sup>2</sup>

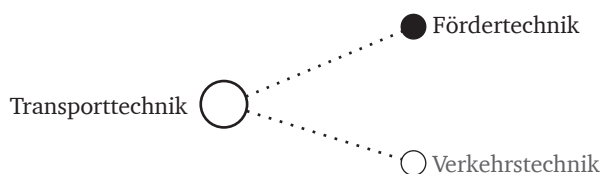


Abb. 19: Gliederung der Transporttechnik

1 Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 9  
 2 Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 9

Die Abgrenzung zur Transporttechnik erfolgt über die Länge des zurückgelegten Weges, da diese im Gegenzug „relativ unbegrenzte Entfernungen“<sup>1</sup> bestreitet. Mit Hilfe dieser Definitionen ist es möglich, die ersten Parallelen zum Hubspeichersystem zu ziehen: dieser bewegt ein Gewicht, was einem *Gut* entspricht, zwischen zwei fixen Höhenniveaus, was einer *begrenzten Entfernung* und einem *festgelegten Weg* gleichkommt. Betrachtet man die nächst tiefere Gliederungsebene der Fördermittel, „all jene Geräte und technische Hilfsmittel, welche zur Förderung eingesetzt werden“<sup>2</sup>, kann man von den zuvor gezogenen Parallelen auf ein konkretes technisches System schließen. Die Einteilung der Fördermittel ist der unten stehenden Gliederung zu entnehmen.



Abb. 20:  
 Gliederung der  
 Fördermittel

Da sowohl die Gruppe der Bauteile, Zubehör und Hilfsmittel als auch die der sonstigen Fördermittel ausscheiden, kommen nur Stetigförderer und Unstetigförderer in betracht. Per Definition erzeugen Stetigförderer „einen kontinuierlichen Fördergutstrom“<sup>3</sup>, ein Umstand, der bei einem Hubspeicher nicht zutrifft. Dieser hebt das Gewicht, ggf. mit Unterbrechungen, an und senkt es wieder, wenn die gespeicherte Energiemenge nachgefragt wird. Dies kann theoretisch unmittelbar nach dem Ladevorgang eintreten, in der Regel werden aber zwi-

1 Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 9  
 2 Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 10  
 3 Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 10



schen Lade- und Entladezeitpunkt Pausen liegen. Keinesfalls kann also von einem kontinuierlichen Vorgang die Rede sein. Das Profil der Unstetigförderer hingegen deckt sich mit der Funktionsweise des Hubspeichers. Diese erzeugen einen „diskontinuierlichen Fördergutstrom durch abwechselndes Hin- und Herbewegen der lasttragenden Elemente“<sup>1</sup>. Als technisches Vorbild springt sofort die Gruppe der Krane ins Auge, ruft man sich nochmalig die Funktionsbeschreibung des Hubspeichers in Erinnerung. An diesem Punkt schließt sich auch der Kreis zu [www.hubspeicher.de](http://www.hubspeicher.de), wo dieser ebenfalls als Referenz herangezogen wird.

#### 4.4. Entwurf eines Hubspeichers

Der Kranbau umfasst eine Reihe unterschiedlicher Typen, die als technische Vorlage dienen könnten. Will man die Konstruktion des Hubspeichers konkretisieren, macht es als Einstieg Sinn, zunächst die technischen Parameter genauer zu definieren. Abb. 21 gibt eine Auswahl gängiger Krantypen wieder<sup>2</sup>.

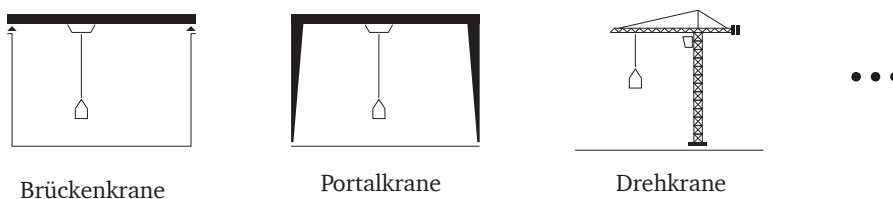


Abb. 21:  
Auswahl Krantypen

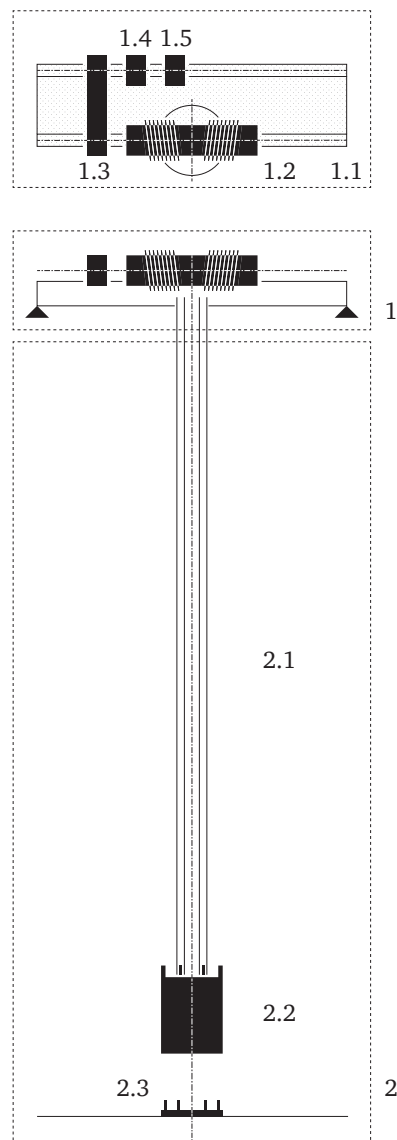
Im Mittelpunkt dieser Arbeit stehen die Brückenkrane. Im Unterschied zu den Portalkranen und den übrigen Typen ist dieser Gruppe eine enge Verbindung zur vorliegenden Fragestellung immanent, nämlich die Verknüpfung zu bestehenden Bauwerksstrukturen. Konkret können diese als Auflager für die Kranbrücke genutzt werden. In unveränderter Form kann der Brückenkran jedoch nicht zum Speicher avancieren, immerhin sind Kran und Hubspeicher trotz ähnlicher Funktionsweise für unterschiedliche Zwecke konstruiert. Dies hat zur Folge, dass der Brückenkran ein gewisses Maß an Adaption erfahren muss, um als Speichersystem eingesetzt zu werden. In erster Linie betrifft dies zwei Punkte: die Mobilität und die Energierückspeisung. Der Brückenkran wird eingesetzt, um Lasten von einem Punkt zu einem anderen zu befördern. Um dies zu gewährleisten, kann er sie nicht nur heben, sondern mit der sogenannten Laufkatze an der Brücke auch in horizontaler Richtung transportieren. Diese zusätzliche Bewegungsfreiheit wird beim Hubspeicher nicht benötigt, da dessen Kapazität ausschließlich vom vertikalen Hub abhängt. Demnach kann eine starre Hubvorrichtung vorgesehen werden, was den Konstruktionsaufwand des Hubspeichers vereinfacht. Des Weiteren fehlt dem Brückenkran eine substantielle Eigenschaft: die Möglichkeit zur Speicherung und Bereitstellung von potentieller Energie. Diese Funktion ist an das Zusammenspiel der Elemente Motor, Getriebe, Trommel und Seilzug gebunden, welche auch als Hubwerk<sup>3</sup> bezeichnet werden und das Kernstück eines jeden Kranes darstellen. Im Normalfall dreht der Motor die Trommel, womit das Seil aufgewickelt und die Last angehoben wird. Senkt sich diese wieder, kehrt sich der zuvor beschriebene Prozess um. Nun beginnt der Motor als Generator zu arbeiten und liefert elektrische Energie. Ein Fall, der zwangsläufig und in regelmäßigen Abständen auch im normalen Kranbetrieb auftritt. Vielerorts ist es die Regel, dass diese Energie ungenutzt bleibt und als Wärme in einem Wi-

1 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005, S. 10  
 2 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Krenn, Erhard, Stanker, Gerhard, 2005, S. 44 - 86  
 3 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 159 - 170

derstand vernichtet wird. Es existieren aber auch moderne Krananlagen, welche über eine sogenannte Energierückspeisung verfügen und ebendiese wieder zurück ins Netz geben oder unmittelbar am Standort verwenden<sup>1</sup>. Mit Ausnahme eines Umrichters, der den rückgespeisten Strom auf netzkonforme Werte bringt, sind solche innovativen Fördermittel praktisch baugleich mit herkömmlichen Anlagen<sup>2</sup>.

Basierend auf den obigen Ausführungen lässt sich folgendes Fazit ziehen. Prinzipiell kann man den Hubspeicher als Brückenkran auffassen, der jedoch mit einer starren Hubvorrichtung und der Fähigkeit zur Energierückspeisung ausgestattet ist.

Abb. 22:  
 Aufbau und Systemkomponenten  
 Hubspeicher



1 Vgl.: o.V., 2013a, S. 36  
 2 Vgl.: o.V., 2013b, S. 24 - 25

Systemkomponenten	
1	<p><b>Maschinensatz</b></p> <p>Der Maschinensatz umfasst die Komponenten des Hubwerks und ist der funktionale Kern des Hubspeichers.</p>
1.1	<p><b>Tragrahmen</b></p> <p>Gleichbedeutend mit einer Plattform dient der Tragrahmen der Aufnahme und Befestigung der Elemente des Hubwerks. Er überbrückt dabei das Vertikalvolumen, indem sich das Hubgewicht auf- und abbewegt. Die genaue Ausführung des Tragrahmens wird den jeweiligen Gegebenheiten des vorgefundenen Bauwerks angepasst.</p>
1.2	<p><b>Trommel</b></p> <p>Auf der Trommel wird der Seilzug aufgewickelt, an dem die Hubmasse hängt. Diese ist als Zwillingskonstruktion ausgeführt, was bedeutet, dass der Seilzug an zwei gegenüberliegenden Trommelteilen parallel auf- und abgewickelt wird. So wird verhindert, dass Seil und Last beim Hebe- und Senkvorgang von einer Seite der Trommel zur anderen wandern. Dieses Prinzip hat sich auch als Standard bei vergleichbaren Kranstrukturen etabliert<sup>1</sup>. Die Breite der Trommel resultiert aus der Gesamtlänge des aufzuwickelnden Seiles. Zu beachten ist die erforderliche Steigung der Rillen, die der Führung des Seiles dienen und schräg verlaufen. Zudem muss stets überprüft werden, ob die zulässige Seilablenkung bei einem vollständig abgewickelten Seil eingehalten wird. Der Durchmesser der Trommel kann frei gewählt werden, insofern die Mindestmaße nach DIN 15020 nicht unterschritten werden<sup>2</sup>. Grundsätzlich schonen Trommeln mit großzügig gewähltem Durchmesser den Seilzug<sup>3</sup>. Dies ist immer gegenüber dem erhöhtem Materialeinsatz abzuwägen.</p>
1.3	<p><b>Getriebe</b></p> <p>Motoren eines Hubwerks weisen hohe Drehzahlen von 738 bis 1445 U<sub>min</sub> auf, während die Trommel verhältnismäßig langsam rotiert<sup>4</sup>. Dazwischen liegen Faktoren von 23 bis 43, die aber auch Werte von 250 und mehr annehmen können. Das Getriebe hat die Aufgabe zwischen diesen beiden Geschwindigkeiten zu vermitteln, was durch eine mehrstufige Zahnradübersetzung gelingt. Eingesetzt wird ein Stirnradgetriebe, was sich durch seine einfache Konstruktion und den günstigen Preis auszeichnet<sup>5</sup>.</p>
1.4	<p><b>Motor</b></p> <p>Der Motor liefert die Antriebskraft zum Anheben der Speichermasse. Beim Absenkvorgang ist er als Generator aktiv und speist die zuvor gewonnene elektrische Energie in Kombination mit der nachgeschalteten Leistungselektronik wieder ins Netz. Die Kraftübertragung auf das angeschlossene Getriebe erfolgt durch die Antriebswelle, an der auch die mechanische Bremse des Systems greift. Im Kranbau werden sogenannte Lösebremsen verbaut, die sich nur beim Heben und Senken der Last öffnen, ansonsten aber aus Gründen der Sicherheit stets geschlossen bleiben<sup>6</sup>.</p>

Abb. 23:  
Tabelle  
Systemkomponenten

1 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 159 - 170

2 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005a, S. 21 - 32

3 Vgl.: Ernst, Hellmut, 1973

4 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005a, S. 187, S. 218

5 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 160 - 162

6 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 160 - 161

---

### 1.5 Leistungselektronik

---

Wenn der Motor im Zuge des Entladevorgangs als Generator arbeitet und elektrische Energie erzeugt, entspricht diese in ihrer Amplitude und Frequenz nicht genau den vom Netzbetreiber vorgegebenen Nennwerten. Die nachgeschaltete Leistungselektronik dient dazu, die ausgehenden Werte mit den Nennwerten des Netzes in Einklang zu bringen. Moderne Leistungselektronik erreicht hohe Wirkungsgrade und kann in einem kompakten Schaltschrank untergebracht werden<sup>1</sup>.

---

## 2 Hubvorrichtung

---

In der Hubvorrichtung findet das Heben und Senken der Hubmasse statt. Die dafür erforderlichen räumlichen Gegebenheiten sind prägend für das System Hubspeicher und stehen an oberster Stelle, wenn es um die strukturellen Voraussetzungen geeigneter Bauwerke geht.

---

### 2.1 Seilzug

---

Der Seilzug besteht aus einem System von acht Stahlseilen, an denen die Hubmasse des Speichers hängt. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Seiltypen, auf die jedoch nicht im Detail eingegangen werden kann. Um die Kräfte in Seil und Hubwerk zu verringern, arbeitet der Seilzug mit Rollenzügen, welche in ihrer Wirkung einem Flaschenzug entsprechen. Jeder Rollenzug besteht aus einer festen und einer beweglichen Rolle, wobei erstere auf Höhe der Trommel sitzt, während die lose Rolle als Teil der Unterflasche die Verbindung zum Hubgewicht herstellt und sich auch mit diesem auf- und abbewegt<sup>2</sup>. Im vorliegenden Fall werden vier Rollenzüge verbaut, womit die Normalkraft in den einzelnen Seilsträngen  $\frac{1}{8}$  der Gesamtkraft entspricht. Nachteilig ist die damit einhergehende Verlängerung des Seilzuges, die sich mit jedem Rollenzug verdoppelt und wiederum eine größere Trommel erfordert. Schlussendlich ist es eine Abwägungsfrage, bei der man das Optimum aus Seildurchmesser, gesamter Seillänge, Anzahl Rollenzüge und der erforderlichen Trommelgröße finden muss.

---

### 2.2 Hubmasse

---

Bei der Hubmasse handelt es sich um einen einfachen Zylinder aus Stahlbeton, der ein Gesamtgewicht von 50 bis 100 t erreicht. Der Hub eines Gewichtes dieser Größenordnung ist zwar nicht die Regel im Kranbetrieb, kann jedoch problemlos und ohne den Einsatz von Sonderkonstruktionen bewältigt werden. Ein einfacher Zweiträgerlaufkran beispielsweise hebt 10 t<sup>4</sup>, ein Schmiedekran schafft 200 t<sup>5</sup> und ein Maschinenhauskran gar 370 t<sup>6</sup>. Stahlbeton hat eine Dichte von 2,5 t/m<sup>3</sup><sup>5</sup>. Nimmt man exemplarisch an, das Gewicht hätte einen Durchmesser von 3 m und eine Masse von 100 t, würde es 6 m in der Höhe messen.

1 Vgl.: o.V., 2013b, S. 24 - 25

2 Vgl.: Wehking, Karl, 2005, S. 4

3 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 166 - 167

4 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005b, S. 48

5 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 109

6 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005b, S. 45

7 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.], 2001, S. 3.4

---

## 2.3 Aufsetzfläche

---

Wenn der Hubspeicher entladen wird, senkt sich das Gewicht mit gleichbleibender Geschwindigkeit bis zum Boden des Hubvolumens. Um etwaigen Schäden beim Aufsetzen vorzubeugen, gerade infolge des Dauerbetriebes, muss die betroffene Fläche entsprechend vorbereitet werden. Dies kann beispielsweise durch den Einsatz von Aufsetzpuffern geschehen, die den Aufprall des Gewichtes dämpfen. Diese Puffer können auch Unebenheiten ausgleichen und dafür sorgen, dass die Hubmasse auf einer waagerechten Fläche zum Stehen kommt. Derartige Puffer sind aus dem Aufzugsbau bekannt<sup>1</sup>, wo z.B. einfache Systeme aus Kunststoff eingesetzt werden.

---

## 4.5. Auslegung und Dimensionierung

Im Anschluss an die funktionale Systembeschreibung wird das Hubspeicherkraftwerk rechnerisch ausgelegt und seine Komponenten daraufhin dimensioniert. Als Vorlage dienen „Fördertechnik - Hebezeuge, Stetigförderer, Lagertechnik“<sup>3</sup>, „Fördertechnik 1 - Bauelemente, Konstruktion, Berechnung“<sup>4</sup> und „Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau“<sup>5</sup>. Die Ausgangsgrößen sind eine Hubhöhe von 40 m und eine Hubmasse von 65 t, was der getroffenen Auslegung im Kapitel IV: Pilote, S. 104 - 111, entspricht. Ursächlich geht diese auf ein bestehendes Referenzobjekt zurück, bei dem es sich um ein leerstehendes Getreidesilo handelt. Dies schließt eine Übertragbarkeit jedoch nicht aus. Zum einen sind 40 m eine Gebäudehöhe, die zumindest im Industriebau nicht zu einer Ausnahmeerscheinung zählt. Zum anderen ist man mit der getroffenen Auslegung insofern flexibel, da diese für Hubhöhen zwischen 30 bis 50 m eingesetzt werden kann. Bei einer Differenz, die sich in einer Größenordnung von 10 m bewegt, müssen die Komponenten nicht gänzlich neu bestimmt werden. Es werden eine Reihe von Vereinfachungen vorgenommen, von denen die Wichtigsten in der Marginalenspalte der Tabelle vermerkt sind. Anstelle von Teilwirkungsgraden wird ein Gesamtwirkungsgrad von 80%<sup>2</sup> angenommen.

### Konstante Größen

	Kürzel	Einheit	Wert
Hubmasse	$m_g$	kg	65 000
Gewichtskraft der Hubmasse	$F_g$	N	637 650
Hubhöhe	$s_1$	m	40
Anzahl Rollenzüge	n	-	4
Seillänge auf einer Trommelseite	$L_s$	m	160
Aufzuwendende Hubkraft	$F_1$	N	159 413

Abb. 24:  
Tabelle Auslegung und Dimensionierung

Rollenzüge, Seilzug und Lastaufnahmemittel werden nicht in das Gesamtgewicht mit einbezogen.

1 Vgl.: Lenzen, Volker, Böhm, Werner: Aufzugstechnik, 2012  
2 Vgl.: <http://www.hubspeicher.de>  
3 Vgl.: Reitor, Georg, 1979, S. 170 - 177  
4 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stancker, 2005b, S. 215 - 222  
5 Vgl.: Grote, K.-H und Feldhusen, J (Hrsg), 2007, S. U3

Der Beiwert  $c$  ist abhängig von dem verwendeten Seil, der Laufzeit und der Schwere des Betriebes. Gewählt werden nicht drehungsfreie Drahtseile und die Triebwerksgruppe 4 m, was bedeutet: 4 - 8 h Laufzeit, bei nahezu ständig großen Lasten<sup>1</sup>.

Die Leistung des Motors richtet sich nach der maximal zu bewältigenden Hubmasse und der Geschwindigkeit, mit der diese angehoben wird. Rechnerisch entspricht dies der sogenannten Volllastbeharrungsleistung multipliziert mit der Hubgeschwindigkeit<sup>2</sup>.

Anzahl Seilstränge	$z$	-	8
Maximale Zugkraft im Seil	$F_S$	N	79 706
Beiwert $c$	$c$	-	0,118
<b>Variablen</b>			
Seildurchmesser	$d$	mm	-
Masse des Seils	$m_s$	kg	-
Anzahl Seilrillen auf einer Trommelseite	$i$	-	-
Steigung der Seilrillen	$s$	mm	-
Trommeldurchmesser	$D_t$	m	-
Trommelbreite	$B_t$	m	-
Motorleistung	$P_L$	kW	-
Hubgeschwindigkeit	$V_H$	m/min	-
Seilgeschwindigkeit	$V_S$	m/min	-
Gesamte Hubdauer	$T_{Hub}$	min	-
Trommeldrehzahl	$n_T$	U/min	-
Motordrehzahl	$n_M$	U/min	-
Getriebeübersetzung	$i_{Gtr}$	-	-
Abtriebsmoment an der Trommel	$M_T$	kN * m	-
Potentielle Energie	$E_{Pot}$	J	-
<b>Gleichungen</b>			
$d = c * \sqrt{F_S}$			
$i = (L_s / D_t \times \Pi) + 2$			
$s = d + (1 \text{ bis } 4)$			
$B_t = (i \times s \times 2 + 1,50) / 1000$			
$V_S = V_H \times n$			
$P_L = (F_1 \times V_S) / 1000$			
$T_{Hub} = s_1 / V_H$			
$n_T = V_s / D_t \times \Pi$			
$L_s = T_{Hub} \times n_T \times D_t$			
$M_T = F_1 \times (D_t / 2)$			
$i = n_M / n_T$			
$E_{Pot} = F_g \times s_1$			

1 Vgl.: Wehking, Karl H, 2005, S. 22

2 Vgl.: Grote, K.-H und Feldhusen, J (Hrsg), 2007, S. U 38

### 01 - Bestimmung des Seildurchmesser $d$ [ $d = c \cdot \sqrt{F_S}$ ]

Beiwert $c$	-	0,118
$F_S$	N	79 706
$d$	mm	<b>33</b>

### 02 - Dimensionierung der Trommel

Anzahl Seilrillen auf einer Trommelseite  $i$  [  $i = (L_s / D_t \times \Pi) + 2$  ]

$L_s$	m	160
$D_t$	m	1,35
$i$	-	<b>40</b>

Steigung der Seilrillen  $s$  [  $s = d + (1 \text{ bis } 4)$  ]

$d$	mm	33
$s$	mm	<b>37</b>

Trommelbreite  $B_t$  [  $B_t = (i \times s \times 2 + 200) / 1000$  ]

$i$	mm	40
$s$	mm	37
$B_t$	m	<b>3,17</b>

### 03 - Bestimmung der Motorleistung $P_L$ [ $P_L = F_1 \times V_S$ ]

$V_H$	m/sec	0,07
$V_S$	m/sec	0,27
$F_1$	N	159 413
$P_L$	kW	<b>43</b>

### 04 - Bestimmung der Getriebeübersetzung $i_{Gr}$

Umdrehungszahl der Trommel  $n_T$  [  $n_T = V_s / D_t \times \Pi$  ]

$V_S$	m/min	16
$D_t$	m	1,35
$n_T$	U/min	<b>3,77</b>

Abtriebsmoment an der Trommel [  $M_T = F_1 \times (D_t / 2)$  ]

$F_1$	N	159 413
$D_t$	m	1,35
$M_T$	kN * m	<b>107,60</b>

Der minimale Trommeldurchmesser  $D_{\min}$  nach DIN 15020 beträgt 746,00 mm.

1 bis 4 wird abhängig von der Seilstärke bestimmt. Da es sich um ein stärkeres Seil handelt wird 4 gewählt.

Die Trommelbreite wird vergrößert um Platz für zwei zusätzliche Wicklungen und die Seilbefestigung zu schaffen.

Bei einer Hubhöhe von 40 m benötigt ein Hubvorgang genau 10 min. Da auf jeder Trommelseite die vierfache Seillänge aufgewickelt werden muss, ist die Seilgeschwindigkeit mit dem Faktor 4 zu multiplizieren.

Getriebeübersetzung $i_{\text{Gtr}}$ [ $i = n_M / n_T$ ]		
$n_M$	U/min	738,00
$n_T$	U/min	3,77
$i$	-	<b>196</b>
05 - Bestimmung der Potentiellen Energie $E_{\text{Pot}}$ [ $E_{\text{Pot}} = F_g \times s_1$ ]		
$F_g$	N	637 650
$s_1$	m	40
$E_{\text{Pot}}$	J	25 506 000
	kWh	<b>7,1</b>
$E_{\text{Pot}}$ mit Wirkungsgrad von 80%	kWh	<b>5,7</b>

Basierend auf den zuvor ermittelten Kennwerten werden die verbleiben Komponenten Seilrollen, Ausgleichsrolle, Getriebe und Motor dimensioniert. In der nebenstehenden Abb. 25 findet sich eine detaillierte Darstellung des projektierten Hubspeichers.

zu 1) Seilrollen

Die Mindestgröße der Seilrollen wird nach DIN 15020 bestimmt. Diese richtet sich nach dem Durchmesser des Seiles [ $d_{\text{min}}$ ], dessen Führung [ $h_1$ ] und der Triebwerksgruppe [ $h_2$ ] mit  $D_{\text{min}} = h_1 \times h_2 \times d_{\text{min}}$ .<sup>1</sup> In diesem Fall beträgt die Mindestgröße 933 mm. Da die oberen zwei Seilrollen auf der gleichen Achse wie die Trommel sitzen, wird der Durchmesser analog zur Trommel mit 1,35 m gewählt. Genauso wird mit den freien Seilrollen verfahren, schließlich kommt ein größerer Querschnitt der Haltbarkeit des Seiles entgegen.

zu 2) Ausgleichsrolle

Der Durchmesser der Ausgleichsrolle wird nach dem gleichen Verfahren wie die Seilrollen bestimmt. Er beträgt 533 mm. Gewählt werden 550 mm.

zu 3) Getriebe

Die Getriebegröße kann anhand des Trommelabtriebsmoments und der vorhandenen Übersetzung aus einer Tabelle abgelesen werden (Siehe Anlage)<sup>2</sup>.

zu 4) Motor

Die Motorgröße kann ebenfalls aus einer Tabelle abgelesen werden. Bekannt sein muss die geforderte Leistung und die Drehzahl<sup>3</sup>.

zu 5) Leistungselektronik

Bei der Leistungselektronik handelt es sich um ein sehr kompaktes Bauteil, dass auch nicht zwingendermaßen in räumlicher Nähe zu Trommel, Getriebe und

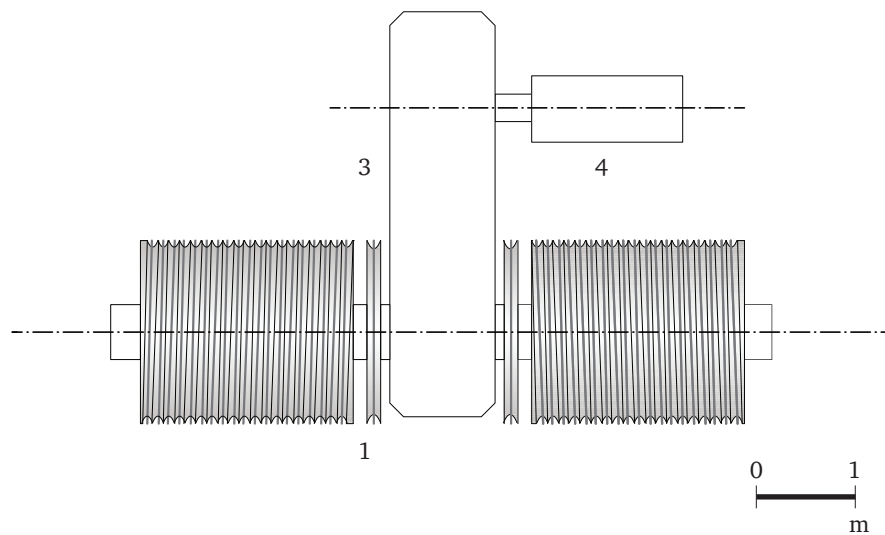
Ablesegrößen Getriebe:  
 $M_T$  : 107 kNm  
 $i$  : 196

Gewählter Motortyp:  
 55 kW  
 738 U/min  
 8 Pole

1 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005a, S. 45  
 2 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005a, S. 154  
 3 Vgl.: Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker, 2005a, S. 178 - 183



Motor platziert werden muss. Bei einer Anlage mit mehreren Hubspeichern wäre es auch möglich die einzelnen Module in einer größeren Einheit zu bündeln.



1) Seilrollen

Durchmesser 1.35 m

2) Ausgleichsrolle

Durchmesser 0.55 m

3.) Getriebe

L|B|H [m] 2,94 - 0,77 - 1,04

4) Motor

L|B|H [m] 1,25 - 0,63 - 0,74

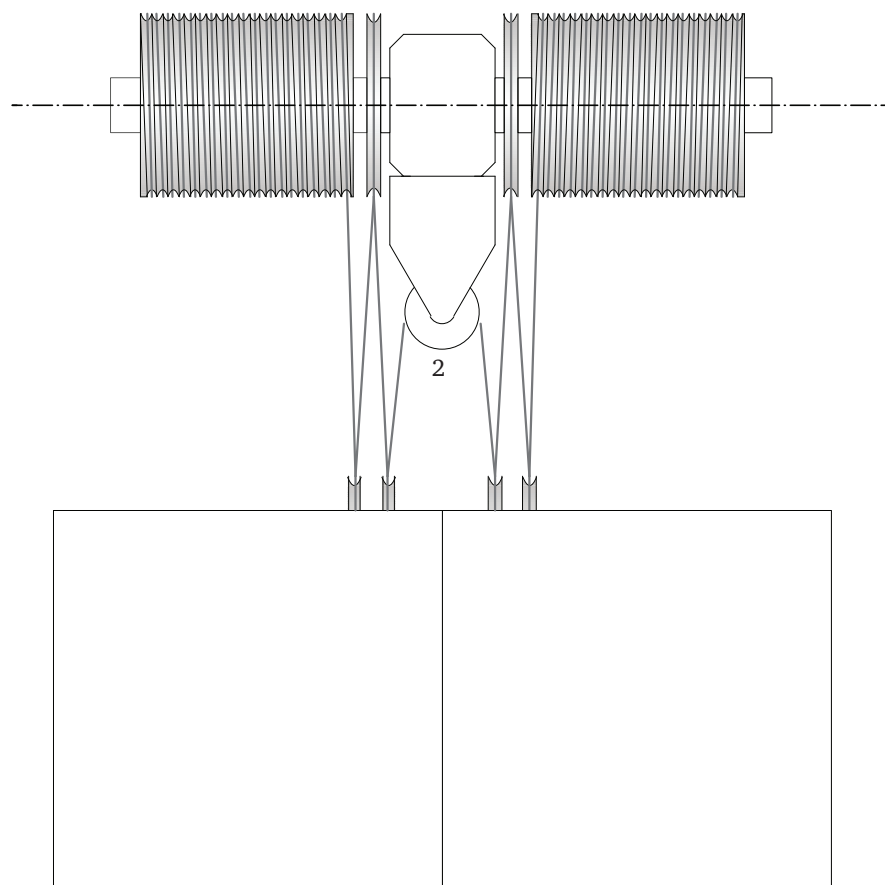
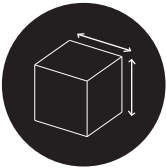


Abb. 25:  
Detail Hubspeicher

**4.6. Anforderungskatalog**

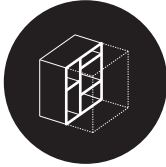


**Anforderungen an das Bauwerk** **Hubvorrichtung**

Dimensionen

» *Höhe des Bauwerks*

Die erzielbare Speicherkapazität ist im gleichen Maße abhängig von der Hubmasse und der Hubhöhe. Die Höhe des Bauwerks stellt also einen Schlüsselfaktor bei der Leistungsfähigkeit des Bauwerks als Speicher dar.



Räumliche Gliederung

» *offenes, störungsfreies und im Querschnitt konstantes Vertikalvolumen*

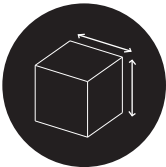
Voraussetzung zur Integration der Hubvorrichtung ist ein Vertikalvolumen, in dem sich das Gewicht auf- und abbewegen kann. Dieses sollte frei von Hindernissen sein und über die gesamte Hubhöhe den gleichen Querschnitt aufweisen.

» *Vertikalvolumen bis Oberkante Bodenplatte*

Idealerweise sollte sich das Vertikalvolumen bis zur Oberkante der untersten Geschossebene des Bauwerks erstrecken. Bei Abschluss des Entladevorgangs steht das Hubgewicht mit der gesamten Masse auf der darunter befindlichen Geschossdecke. Je nachdem wie der Hubzylinder dimensioniert ist, können die auftretenden Lasten eine kritische Größe erreichen. Belässt man es beispielsweise bei der Annahme von 100 t, 3 m Durchmesser und 6 m Höhe, sind das 142 kN/m<sup>2</sup>. Eine gute Vergleichsgröße bieten die Deckenlasten nach DIN 1055 - 3, welche für Werkstätten, Fabriken sowie Lagerräume mit 7,5 kN/m<sup>2</sup> bis 30 kN/m<sup>2</sup> angesetzt werden<sup>1</sup>. Streng genommen wäre eine so ausgeführte Decke also statisch unterdimensioniert und müsste punktuell verstärkt werden. Handelt es sich hingegen um die Bodenplatte, ist diese i.d.R. stärker ausgeführt und auch höheren Belastungen gewachsen.

**Anforderungen an den Kontext** **Hubvorrichtung**

» *keine*



**Anforderungen an das Bauwerk** **Maschinensatz**

Dimensionen

» *Schlankheit des Vertikalvolumens*

Das Vertikalvolumen sollte so proportioniert sein, dass die Volumenhöhe einem Vielfachen der Volumenbreite entspricht. Hintergrund ist das Bestreben, die Spannweite des Maschinenaufsatzes klein zu halten, womit sich auch der konstruktive Aufwand reduzieren lässt.

1 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.], 2001, S. 313

---

» *mehrere Vertikalvolumina oder gestrecktes Vertikalvolumen*

Mehrere räumlich getrennte Vertikalvolumen gleichen oder ähnlichen Querschnitts eröffnen die Möglichkeit zum Einsatz mehrerer Maschinensätze und Gewichte, mit dem Ziel die Speicherkapazität zu vergrößern. Den gleichen Zweck kann ein gestrecktes Vertikalvolumen erfüllen, bei dem die Einheiten der Länge nach aufgereiht werden. Ferner kann sich die Serie mindernd auf die Investitionskosten auswirken. Beispielsweise kann die Anschaffung von 26 gleichen Maschinensätzen eine Ersparnis von ca. 20% einbringen. Das haben Gespräche mit führenden Herstellerern ergeben, die im Zuge der Recherchen zum Kapitel IV: Pilote durchgeführt wurden.

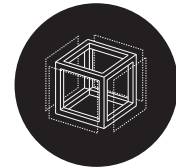
---

#### Tragwerk und Konstruktion

---

» *ausreichende Reserven*

Das Tragwerk sollte über ausreichend Reserven verfügen, um die Auflast aus Maschinensatz und der Hubmasse abtragen zu können.



---

#### Anforderungen an den Kontext

#### Maschinensatz

---

» *keine*

---

### 4.7. Schlussfolgerungen

Der Hubspeicher erzielt im Vergleich zu den anderen Systemen Schwungrad, Pump- und Druckluftspeicher die geringste Energiedichte. Bei einem Gewicht von 65 t und einem Wirkungsgrad von 80% beträgt die gespeicherte Energie pro Meter Hubhöhe lediglich 0,14 kWh. Ob sich dieser Nachteil über die Investitionskosten aufheben oder zumindest entschärfen lässt, kann nur die Fallstudie zeigen. Vorteilhaft am Hubspeicher sind die vergleichsweise einfache Konstruktion, die bei null liegenden Bereitschaftsverluste, die Flexibilität in der Leistung und die Unabhängigkeit von kontextuellen Gegebenheiten. Entscheidend für die Integration des Hubspeichers sind die Anforderungen an die Dimensionen und die räumliche Gliederung eines Bauwerks. Die Kombination beider Parameter wird auch die Suche nach geeigneten Bauwerkstypen bestimmen, wobei es weniger die Höhe, als die räumliche Gliederung ist, welche strukturprägend und charakteristisch für das jeweilige Bauwerk sein wird. Die Existenz konsistenter Vertikalräume, die sich zudem über eine große Höhe erstrecken und bestenfalls in hoher Anzahl vorhanden sind, ist sicherlich nicht alltäglich und an besondere Gegebenheiten gebunden, was u.a. die vormalige Nutzung des Bauwerks anbelangt. Je nachdem wie ein Bauwerk beschaffen ist, kann aber die Möglichkeit bestehen die erforderlichen strukturellen Gegebenheiten durch entsprechende Umbaumaßnahmen herzustellen, beispielsweise durch den Abbruch von Zwischendecken oder dergleichen. Dies muss allerdings immer am Einzelfall geprüft werden und wird sich i.d.R. dann lohnen, wenn „Ist“ und „Soll“ Zustand des Bauwerks möglichst nah beieinander liegen.

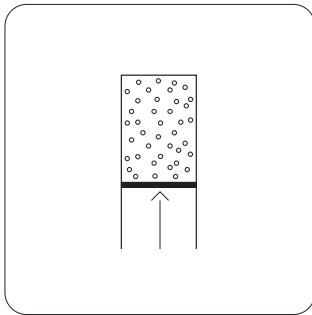


Abb. 26:  
Systempiktogramm  
Druckluftspeicher

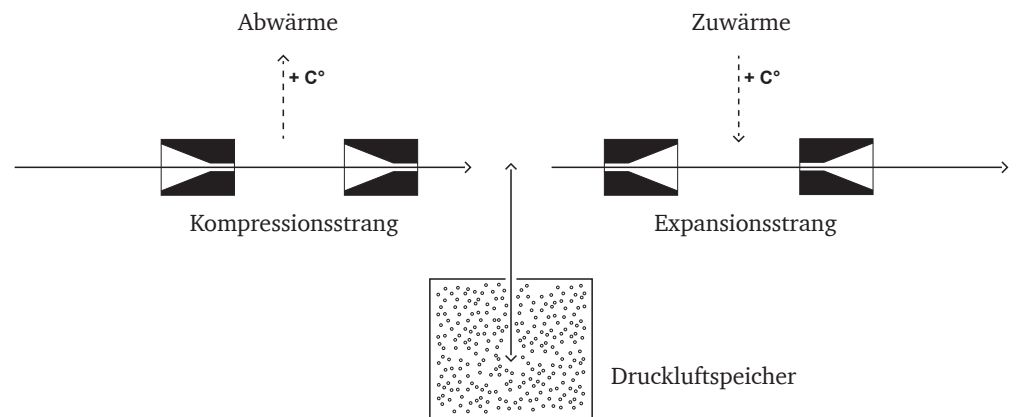
## 5.0 Druckluftspeicher

### 5.1. Einführung

Druckluftspeicher gehören zu der Gruppe Systeme, welche elektrische Energie in potenzieller Form speichern<sup>1</sup>. Um den Transfer vom Verständnis des eigentlichen Systems zur Aufstellung der damit verbundenen Anforderungen an Bauwerk und Kontext zu vollziehen, war es notwendig eine umfassende Recherche zu betreiben. Dies liegt zum einen daran, dass sich die Berechnungen zur Ermittlung von Energiedichte und Speicherkapazität komplexer und umfangreicher darstellen als bei anderen Systemen, hinzu kommt das weite Forschungsfeld, was es in diesem Kontext zu beachten gilt. Aufgrund dessen wird nachfolgend, über die reine Systembeschreibung hinaus, ausführlich auf realisierte Druckluftspeicherkraftwerke und den Stand der Forschung eingegangen. Im Weiteren wird die Wahl eines bestimmten (Unter-)Systemtyps hergeleitet, welcher vertieft betrachtet und in den Anforderungskatalog eingepflegt wird.

### 5.2. Funktionsweise

Unabhängig von ihrer spezifischen Bauart komprimieren alle Druckluftspeicherkraftwerke atmosphärische Luft, um somit elektrische Energie zu speichern. Grundsätzlich kann man Druckluftspeicherkraftwerke nach der Betriebsweise in *diabate* sowie *adiabate* Typen und nach der Art des eingesetzten Speichers in *Gleich-* oder *Gleitdruckspeicher* unterscheiden<sup>2</sup>. Mittels der nachfolgenden Funktionsschemata werden die einzelnen Untertypen vorgestellt und deren Spezifika erläutert.



#### 1.) Diabater Typ

1 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S. 7  
2 Vgl.: Rummich, 2009, S. 24f

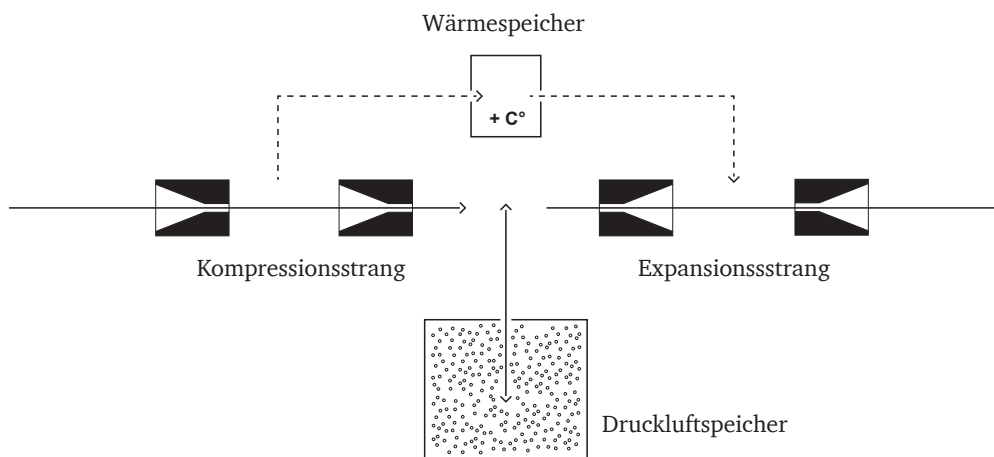


Abb. 27:  
Schemata diabater und  
adiabater Typ

## 2.) Adiabater Typ

Bei der Speicherung bzw. der Kompression von Luft fallen verhältnismäßig große Mengen Wärme an. Im Gegenzug wird beim anschließenden Expansionsprozess, d.h. dem Entladen des Druckluftspeichers, Wärme nachgefragt. Diabate und adiabate Kraftwerkstypen unterscheiden sich in der Art und Weise, wie mit diesem Umstand umgegangen wird. Diabate Kraftwerke behandeln die Kompressionswärme als Abwärme und entlassen diese in die Umgebung. Wird expandiert, muss die notwendige Wärme aus einer anderen Quelle zugeführt werden. Adiabate Kraftwerke hingegen speichern die anfallende Kompressionswärme, um diese beim Entladevorgang wieder zu verwenden. Die Typenfrage schlägt sich vor allem im Wirkungsgrad und Konstruktionsaufwand nieder, worauf im folgenden Abschnitt eingegangen wird. Neben der Differenzierung nach diabatem und adiabatem Betrieb, unterscheidet man nach der Art der Speicherung in Gleitdruck- und Gleichdruckspeicherung. In Gleitdruckspeichern steigt bzw. fällt der Druck im Zuge des Lade- und des Entladeprozesses; er gleitet. Bei Gleichdruckspeichern ändert sich dieser nicht. Nachfolgend wird auf diese Speicherart nicht weiter eingegangen, weil sie augenscheinlich mit einem technischen und baulichen Aufwand verbunden ist, der im Widerspruch zu der Idee steht, bestehende Bauwerksstrukturen nutzen zu wollen. Ein Konzept beispielsweise würde das Anlegen eines eigenen Speichersees erfordern<sup>1</sup>. Auch Theo Tietjen schlussfolgert, dass diese Form der Speicher aufgrund des erforderlichen Aufwandes als „sehr speziell“<sup>2</sup> angesehen werden kann. Im Weiteren beschränkt er sich auf Gleitdruckspeicher<sup>3</sup>.

## 5.3. Realisierte Kraftwerke

Weltweit existieren zwei gebaute Druckluftspeicherkraftwerke. Eines davon ist das aus dem Jahre 1978 stammende Kraftwerk Huntorf im niedersächsischen Elmfleth, nahe Bremen. Bei der zweiten Anlage handelt es sich um das 1991 errichtete Kraftwerk McIntosh im US-Bundesstaat Alabama. Das Kraftwerk Huntorf ist als diabate betriebene Anlage konzipiert. Ursprünglich war es im Betrieb als Spitzenlastkraftwerk an das nahegelegene und inzwischen stillgelegte Kernkraftwerk

1 Vgl.: Tietjen, 2013, S. 19  
Nach: Rummich, 2009  
2 Tietjen, 2013, S. 19  
3 Vgl.: Tietjen, 2013. S. 19

Kenndaten Huntorf	
Speichervolumen	310000 m <sup>3</sup>
Leistung	321 MW
Kapazität	560 MWh
Ladedauer	8 h
Entladedauer	2 h
Speicherdruck	46 - 72 Bar
Wirkungsgrad	42%

Abb. 28:  
Kenndaten Huntorf

eigene Darstellung,  
Daten: Sterner, Stadler

Anmerkung:  
1 Bar entspricht dem  
atmosphärischen Normal-  
druck auf der Erdoberfläche,  
72 Bar also dem  
Siebzugsfachen.

Unterweser gekoppelt, mittlerweile wird es aber als Puffer eingesetzt und dient dem Ausgleich fluktuierender Erzeugung aus erneuerbaren Quellen. Als eigentlicher Druckluftspeicher fungieren zwei Kavernen mit einem Gesamtvolumen von ca. 310 000 m<sup>3</sup><sup>1</sup>. Bei diesen handelt es sich um künstlich hergestellte Hohlräume, welche durch Aussohlen<sup>2</sup> in die unter der Anlage befindlichen Salzstöcke getrieben wurden. Diese bieten gute Voraussetzungen für die Druckluftspeicherung, da man zum einen große Volumina bereitstellen kann, zum anderen die umschließenden Wände des Salzstockes annähernd luftdicht sind. Die Betriebsweise deckt sich mit dem diabaten Schema nach Abb. 27. Offen bleibt die Frage nach der Bereitstellung der Wärme im Zuge des Entladeprozesses, worin auch einer der Schlüssel im Aufbau der Anlage liegt. Dies geschieht durch die Verfeuerung von Erdgas. Setzt der Entladebetrieb ein, wird das Erdgas mit der Druckluft zusammengeführt, in den Brennkammern der Expansionsturbinen des Kraftwerks entzündet und anschließend verbrannt. Ohne Zufuhr des Brennstoffes und dessen thermischer Verwertung würde der Turbinenstrang bei der Expansion der Druckluft vereisen. Technische Details zur Funktion von Kompression- und Expansionsstrang und den dafür erforderlichen Maschinen werden im nachfolgenden Abschnitt aufgegriffen. An dieser Stelle genügt es zu wissen, dass der Betrieb des Kraftwerks Huntorf an den Einsatz eines fossilen Brennstoffes gebunden ist. Das Gleiche gilt für das zweite Druckluftspeicherkraftwerk, das Kraftwerk McIntosh, welches eine Weiterentwicklung der Anlage in Huntorf darstellt. Druckluftspeicher ist in diesem Fall eine künstlich geschaffene Salzkaverne mit einem Gesamtvolumen von 540 000 m<sup>3</sup>. Die Fortentwicklung konnte den Wirkungsgrad auf 54 %<sup>3</sup> steigern, indem die Abwärme aus dem Betrieb der Turbine nach dem Wärmetauscherprinzip zur Vorkonditionierung der zugeführten Druckluft dient, was wiederum die eingesetzte Menge Erdgas um ca. 25 %<sup>4</sup> senkt.

Abschließend lässt sich folgendes Fazit ziehen. Die Technologie hat in der diabaten Auslegung zwar eine lange Erprobung in der Praxis hinter sich, eine flächendeckende Anwendung ist bisher jedoch ausgeblieben. Die beiden Anlagen weisen mit 42% und 54% moderate Wirkungsgrade auf und sind hinsichtlich ihres Standortes insofern unflexibel, weil sie an bestimmte geologische Gegebenheiten, nämlich Salzvorkommen gebunden sind. Entscheidend für die vorliegende Arbeit und das weitere Vorgehen ist jedoch die Tatsache, dass der Speicherprozess nicht emissionsfrei abläuft, sondern an den fossilen Energieträger Erdgas gebunden ist. Ruft man sich das Fernziel der Energiewende in Erinnerung, nämlich eine nahezu klimaneutrale Energieversorgung, erscheint es widersprüchlich ein Speichersystem einzusetzen, was augenscheinlich mit dieser Prämisse bricht. Demzufolge wird die diabate Bauform des Druckluftspeicherkraftwerks, wie sie sich in Huntorf und McIntosh wiederfindet, nicht weitergehend betrachtet. Es wird auf die adiabate Variante fokussiert, dessen Potenzial nun aufgezeigt wird.

#### 5.4. Stand der Forschung

Anhand der Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse dreier Forschungsprojekte wird das Thema adiabate Druckluftspeicherung beleuchtet und darauf aufbau-

- 1 Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 462
- 2 Weitere Informationen zum Verfahren vgl.: Rummich, 2009
- 3 Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 462
- 4 Neupert et.al., 2009, S. 127

---

end erläutert, welche Rückschlüsse für das eigene Vorgehen gezogen werden. Bei den relevanten Forschungsvorhaben handelt es sich um folgende Projekte:

- ADELE
- ADELE-ING
- Adiabates Niedertemperatur Druckluftspeicherkraftwerk zur Unterstützung der Netzintegration von Windenergie

Die Projekte ADELE und ADELE-ING stehen in einer unmittelbaren Beziehung zueinander. Das Projekt ADELE, Akronym für ‚Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung‘, war ein vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördertes Verbundprojekt, das Beteiligte aus der Industrie und der Forschung involvierte. Die Laufzeit betrug vier Jahre von 2009 bis 2013, zu den Kooperationspartnern gehörten u.a. RWE Power, General Electric und das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt<sup>1</sup>. Das Projekt betrieb Grundlagenforschung zum Layout und zu den technischen Komponenten eines adiabaten betriebenen Druckluftspeicherkraftwerks, welche schlussendlich in dem Bau einer Demonstrationsanlage münden sollten. Das Projekt konnte an die Ergebnisse der EU geförderten Studie ‚AA-CAES<sup>2</sup>‘ anknüpfen, die 2006 abgeschlossen wurde<sup>3</sup>. Zu dem Bau des geplanten Prototyps ist es bisher allerdings nicht gekommen. Geänderte „energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen“<sup>4</sup>, die enormen technischen Herausforderungen und die hohen Kosten der im Zuge von ADELE entwickelten Anlagenvariante zwang die Beteiligten aus Wirtschaft und Forschung dazu eine erneute Konzeptionsphase zu veranlassen. Diese wird im derzeit (März 2014) noch laufenden Projekt ADELE-ING bearbeitet.

Die zentrale Herausforderung bei der adiabaten Betriebsweise liegt im Umgang mit der entstehenden Wärme bei der Druckluftkompression. Bei einer Verdichtung auf 60 - 70 Bar treten Temperaturen von über 600 °C<sup>5</sup> auf. ADELE sah ein Konzept vor, bei dem ein Hochdruck-Hochtemperatur Wärmespeicher dieses Temperaturniveau bereithält. Die Firmen Züblin, DLR und OIH<sup>6</sup> waren als Projektpartner federführend für die Entwicklung der Systemkomponente Hochdruck-Hochtemperatur Wärmespeicher zuständig. Dieser ist als Spannbeton-Konstruktion ausgeführt und enormen Kräften ausgesetzt. Um den Beton vor Überhitzung zu schützen, muss zwischen dem eigentlichen keramischen Feststoffspeichermedium im Zentrum und der umfassenden Betonwandung eine Hochtemperaturisolierung und eine Kühlung eingesetzt werden. Die Dichtigkeit des Speichers wird durch eine innenliegende Stahlauskleidung gewährleistet. Neben dem Speicher stellt das hohe Wärmeniveau auch gewaltige Anforderungen an die erforderliche Druckverrohrung, sowie die eingesetzten Kompressionsmaschinen. Hierzu soll der Hinweis genügen, dass beispielsweise Bauarten von Kompressoren, wie sie bei der ADELE Anlage eingesetzt werden würden, überhaupt nur für einen Temperaturbereich von 300 °C, selten bis 400 °C, verfügbar sind<sup>7</sup>, sofern sie keine komplette Neuentwicklung darstellen.

1 Vgl.: Marquardt, Roland, Moser, Dr. Peter, 2014

2 AA-CAES: advanced adiabatic compressed air energy storage

3 Vgl.: Freund, Sebastian, Bieber, Dr. Mathilde, 2013, S. 4

4 Vgl.: Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio, Band 5, 2012, S. 803

5 Vgl.: Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio, Band 5, 2012, S.808

6 Ooms-Itnner-Hof

7 Vgl.: Tietjen, 2013, S. 46

Variante	Variante 1 Base Case			Variante 2 ADELE DEFAULT	Variante 3 Regenerator-WS im Sekundärkreislauf		Variante 4 Schmelz- salz/Ther- moöl	Variante 5 Mehrstufig, Ther- moöl-WS	Variante 6 Mehrstufig, ND-Regener- ator und Thermoöl- bzw. Beton-HD	
	1.1.1 HT-HD 610°C	1.1.2 HT-HD 610°C	1.2.1 HF-HD 560°C		2.1.1 HT-HD 650°C	3.1.1 HT-ND			3.1.2 HT-ND	6.1.1 NT 2-stufig
Untervariante										
Prozesseigenschaften										
t <sub>max_comp_out</sub> [°C]	610	610	560	650	575	575	575	320	350	350
P <sub>max_cavem</sub> [bar]	65	65	65	65	656	65	65	70	70	70
P <sub>max_Wärmespeicher</sub> [bar]	65	65	65	65	15	15	1	1	1.Stufe: 13 2.Stufe: 1	1.Stufe: 13 2.Stufe: 70
t <sub>max_wärmesp_in</sub> [°C]	610	610	560	650	560	560	560	280	350/280	350/280
Wärmespeichertyp	Feststoffre- generator	Feststoffre- generator	Feststoffre- generator	Feststoffre- generator	Feststoffre- generator	Feststoffre- generator	Schmelz- salz/Ther- moöl	Thermoöl	Feststoff/ Thermoöl	Feststoff/ Thermoöl
Ausführung der heißgehenden Rohrleitungen	P92	Innen- isoliert	P92	Innen- isoliert	P92	Innen- isoliert	P92	Stahl	Stahl	Stahl
Intercooler (IC)/ Lufttrocknung	Luft- trocknung	Luft- trocknung	Luft- trocknung	Luft- trocknung	IC	Luft- trocknung	IC	-	-	-

Abb. 29:  
ADELE-ING  
Anlagenkonzepte

Die zuvor genannten Spezifikationen stellen nur einen Teil der ambitionierten Anforderungen dar, die es beim ADELE Konzept zu bewältigen gilt. Dies hat u.a. dazu geführt, dass man zu Beginn des Folgeprojektes ADELE-ING alternative Anlagenkonzeptionen geprüft hat. Die vorliegende Arbeit greift diesen Umstand auf und verzichtet darauf, den oben beschriebenen Typ weiter zu verfolgen, nicht zuletzt aufgrund des erforderlichen technischen Aufwandes. In Anlehnung an die Konzeptauslese, welche ADELE-ING gemäß Abb. 29 vorgibt, wird nachfolgend die Wahl des zu betrachtenden Alternativsystems hergeleitet. Neben den Hochtemperatur Varianten, finden sich hier auch Layouts, welche mit niedrigen Temperaturen zwischen 320 °C und 350 °C arbeiten. Diese ‚low temperatur ACAES‘, Varianten 6.1.1. und 6.2.1., schneiden im Vergleich von Wirkungsgrad und Investitionskosten, neben der Variante 4.4.1., in einer ersten Prüfung durch ADELE-ING am besten ab<sup>1</sup>. Auch das Forschungsvorhaben „Adiabtes Niedertemperatur Druckluftspeicherkraftwerk zur Unterstützung der Netzintegration von Windenergie<sup>24</sup>“ des Fraunhofer Instituts schlägt ein Konzept vor, welches hohe Temperaturen und die damit verbundenen technischen Erschwernisse umgeht. Unabhängig von ihrer spezifischen Bauart, des konkreten Temperaturbereichs oder der Art des eingesetzten Wärmespeichers, teilen alle diese Verfahren die Kompression und die Expansion der Luft in mehrere Stufen auf, um zwischen diesen Stufen die Wärme auf einem niedrigeren Niveau ein- und auszukoppeln. Dieser Ansatz bringt einige Vorteile mit sich, darüber hinaus ist eine Tendenz zur Favorisierung dieses Typs erkennbar (s.o.). Folglich wird auch der eigenen Arbeit ein Druckluftspeicherkraftwerk dieser Bauart zugrunde gelegt. Abb. 30 vervollständigt die Reihe an Funktionsschemata um den adiabaten Niedertemperatur-Typ.

1 Vgl.: Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio, Band 5, 2012, S. 817  
 2 Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012



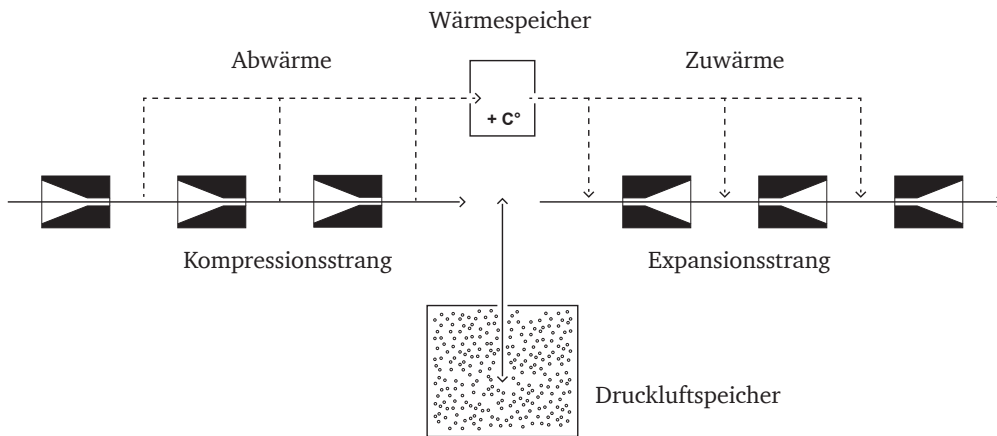


Abb. 30:  
Schema adiabater  
Niedertemperatur-Typ

### 3.) Adiabater Niedertemperatur-Typ

## 5.5. Adiabates Niedertemperatur-Druckluftspeicherkraftwerk

Das nachfolgende Anlagenlayout deckt sich in seinem Aufbau und den Systemkomponenten weitestgehend mit der Konzeption des Fraunhofer Instituts<sup>1</sup>, in dem oben bereits erwähnten Forschungsvorhaben. Bei der Leistung, dem Temperaturbereich der Wärmespeicherung, dem erzielten Speicherdruck und den eingesetzten Kompressions- sowie Expansionsmaschinen sind Anpassungen notwendig, die jedoch in keinem Widerspruch zur Gesamtkonzeption stehen. Das Konzept als solches und die vorgesehenen Modifikationen wurden mit dem Promotionsvorhaben „Hocheffizientes Druckluftspeicherkraftwerk mit Nutzung von Abwärme aus externen Quellen ohne Verwendung von Sondermaschinen“<sup>2</sup> rückgekoppelt, das eine ähnliche Fragestellung behandelt. Darüber hinaus wurde das Vorgehen im Dialog mit dem Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt auf seine Plausibilität hin geprüft. In seinen Grundzügen entspricht es dem allgemeinen Funktionsschema gemäß Abb. 30, wurde jedoch, was die Wärmespeicherung sowie den Kompressions- und Expansionsstrang angeht, präzisiert.

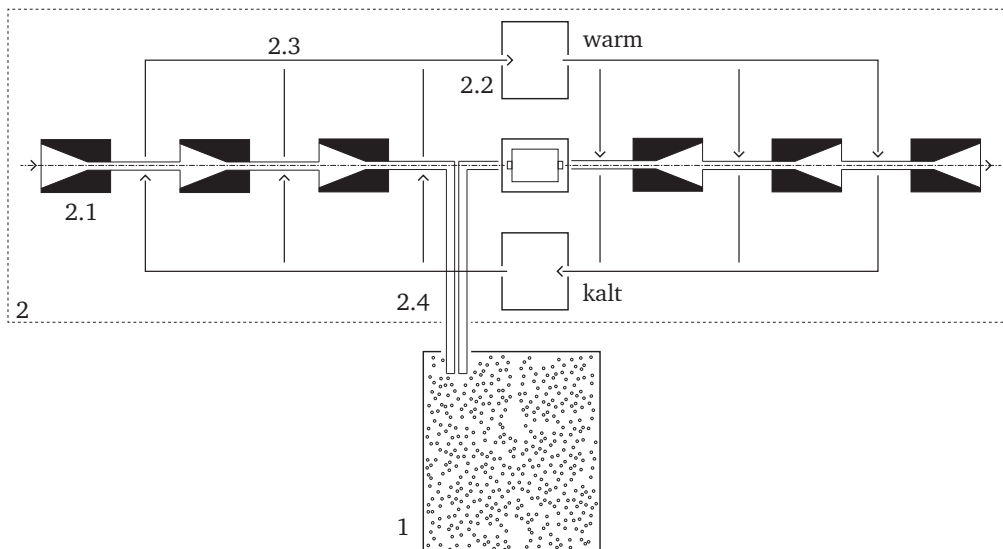


Abb. 31:  
Aufbau und Systemkomponenten  
Druckluftspeicherkraftwerk

1 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S.63  
2 Tietjen, Theo, 2013

Abb. 32:  
Tabelle  
Systemkomponenten

<b>Systemkomponenten</b>	
<b>1</b>	<p><b>Druckluftspeicher</b></p> <p>Der Druckluftspeicher ist der Kernbestandteil jedes Druckluftspeicherkraftwerks. In diesem wird die Druckluft beim Ladevorgang befördert und vorgehalten.</p>
<b>2</b>	<p><b>Maschinenhaus</b></p> <p>Das Maschinenhaus stellt neben dem Druckluftspeicher die zweite Hauptkomponente dar. Es wird immer als Einheit aufgefasst und beinhaltet die Maschinen zur Druckluftkompression- und Expansion, den Motorgenerator, die Wärmespeicher, die Druckluft- und Wärmeverrohrung sowie sämtliche periphere Komponenten.</p>
<b>2.1</b>	<p><b>Kompressions- und Expansionsstrang</b></p> <p>Im Kompressions- und Expansionsstrang findet bei Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz die Druckluftkompression und bei Einspeisung von elektrischer Energie ins Netz die Druckluftexpansion statt. Funktional und konstruktionstechnisch von Vorteil ist eine Anordnung der Maschinen auf einer Achse, wobei mittig, zwischen den Kompressions- und Expansionseinheiten, der Motorgenerator platziert wird<sup>1</sup>. Dieser ist in seiner Funktion umkehrbar und treibt einmal in Motorfunktion die Kompression an, wohingegen er bei der Druckluftentspannung von den Expansionsmaschinen angetrieben wird und in Generatorfunktion elektrische Energie erzeugt. Bei den Kompressions- und Expansionsmaschinen handelt es sich um sogenannte Strömungs- oder auch Turbomaschinen. Wird deren Welle in Rotation versetzt, saugen diese Luft an und komprimieren sie schrittweise über mehrere, auf der Welle befindliche und aufeinanderfolgende Stufen. Abhängig davon, wie sich der Luftstrom zur Welle bewegt, unterscheidet man zwischen axialen und radialen Typen. Bei axialen Maschinen bewegt sich der Luftstrom parallel zur Welle, bei radialen Maschinen trifft er senkrecht auf die Welle. Letztere sind für die vorliegende Anwendung die bessere Wahl<sup>2</sup>. Um ein gewünschtes Druckniveau im Speicher zu erzielen, benötigt diese eine bestimmte Anzahl Verdichtungsstufen, mit jeder Stufe steigt der Druck. Dazwischen besteht die Möglichkeit zur Wärmeauskopplung bzw. Kühlung, was eine der zentralen Voraussetzungen für das anvisierte Konzept darstellt. Bauartbedingt können in einem Gehäuse aber nur eine bestimmte Anzahl Stufen und Zwischenkühlungen untergebracht werden. Unter Umständen sind mehrere, hintereinander geschaltete Gehäuse notwendig, auf die sich die Gesamtanzahl Stufen verteilen<sup>3</sup>. Der Maschinenstrang wird dadurch natürlich länger. In ihrer Funktion sind Turbomaschinen umkehrbar. Prinzipiell kann der gleiche Typ sowohl als ‚Kraftmaschine‘ zur Luftkomprimierung, als auch als ‚Arbeitsmaschine‘, zum Antrieb des Generators und zur Elektrizitätserzeugung<sup>4</sup> eingesetzt werden. Zur Vereinfachung wird in der nachfolgenden Auslegung und Dimensionierung so verfahren und beide Stränge gleichgesetzt. Deren Leistung definiert sich über den Volumenstrom. Dieser bezeichnet die Menge Luft in m<sup>3</sup> pro Stunde, welche vom Verdichter bei der Kompression und dem Expander bei der anschließenden Entspannung bearbeitet wird. Damit verknüpft ist auch die gesamte Belade- und Entladezeit des Speichers, welche natürlich wichtige Kenngrößen des Systems darstellen.</p>

1 Vgl.: Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio, Band 5, 2012, S. 814  
 2 Bitte Schlussbemerkungen beachten  
 3 Vgl.: Grote, K.-H und Feldhusen, J (Hrsg): 2007, S. R62  
 4 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S. 65

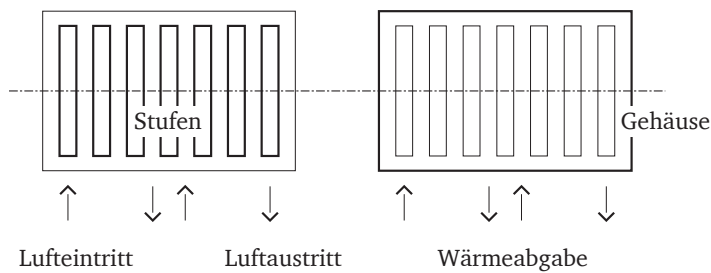


Abb. 33:  
Funktionsweise  
Turbomaschine

## 2.2 Wärmespeicher

Das Wärmespeicherkonzept arbeitet nach dem sogenannten ‚Zwei-Tank-System‘. Als Wärmeträger können Wasser oder Thermoöle zum Einsatz kommen, abhängig vom gewählten Temperaturbereich. Diese strömen im Zuge der Wärmeaufnahme- und Wärmeabgabe jeweils vom warmen in den kalten Speicher und umgekehrt. Dieses Verfahren hat eine Reihe Vorteile, u.a. ist die Temperatur über den gesamten Verlauf des Wärmetausches relativ konstant, was den Wirkungsgrad steigert. Wasser hat gegenüber Thermoölen den Vorzug ökologisch unbedenklich zu sein, außerdem sind wassergeführte Systeme technisch ausgereift und relativ einfach zu handhaben<sup>1</sup>.

## 2.3 Wärmeverrohrung

Die Wärmeverrohrung dient dem Transport der Kompressionswärme von den Wärmetauschern zu den Wärmespeichern.

## 2.4 Druckverrohrung

Die Druckverrohrung führt die Druckluft zu den Wärmetauschern, d.h. zur Zwischenabgabe der Kompressionswärme und in den Druckluftspeicher.

## Schlussbemerkung:

Bei der Auswahl des Verdichtertyps dient das zuvor erwähnte Forschungsvorhaben des Fraunhofer Instituts als Vorlage. Für den betrachteten Anwendungsfall bescheinigt dieses den Maschinen radialer Bauart, gegenüber den axial betriebenen Typen, eine höhere Eignung. Im weiteren Vorgehen setzt man sogenannte radiale Getriebeturbomaschinen ein, einen Untertypen der radialen Bauart<sup>2</sup>. Da jedoch für diese Form der Maschinen keine standardisierten Angaben vorliegen, weder in der Literatur noch auf Nachfrage beim Hersteller, wird als Alternative auf die Kenndaten radialer Einwellenturbomaschinen zurückgegriffen. Gegenüber den Getriebeturbomaschinen besitzen diese zwar eine verminderte Eignung, an der grundsätzlichen Anwendbarkeit besteht jedoch kein Zweifel. Das bestätigen auch andere Quellen, wie etwa die Dissertation „Hocheffizientes Druckluftspeicherkraftwerk mit Nutzung von Abwärme aus externen Quellen ohne Verwendung von Sondermaschinen“<sup>3</sup>.

1 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S. 47

2 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S. 37 - 40

3 Vgl.: Tietjen, Theo, 2013, S. 44 - 47

### 5.6. Auslegung und Dimensionierung

Die rechnerische Auslegung und die Dimensionierung werden gesondert in zwei Teilabschnitten behandelt. Einleitend erfolgt die Ermittlung der erzielbaren Speicherkapazität des adiabaten Druckluftspeicherkraftwerks, unter der Annahme eines Speichervolumens von 10 000 m<sup>3</sup>, eines Enddruckes im Speicher von 32 Bar und eines Gesamtwirkungsgrades von 56 %<sup>1</sup>. Als Vorlage dient „Energie - Ein Lehrbuch der physikalischen Grundlagen“<sup>2</sup>. Daran anknüpfend werden die relevanten Maße des dazugehörigen Maschinenhauses, respektive Maschinenstrang und Wärmespeicher, bestimmt. In der Einleitung zu den technischen Systemen wurde bereits auf die selektive Betrachtung von Kernkomponenten und Grundmaßen verwiesen, was auch für die nachfolgenden Angaben zutrifft. So beschränkt sich das Layout des Maschinenstranges auf die Elemente Kompressionsstrang, Expansionsstrang und Motorgenerator.

Anmerkung zum Speichervolumen:

Das Speichervolumen von 10 000,00 m<sup>3</sup> muss um das sogenannte ‚Kissen-gas‘ verkleinert werden, was aus technischen Gründen im Speicher verbleibt und ca. 1/3 des Volumen beansprucht<sup>3</sup>. Damit beträgt die tatsächliche nutzbare Kapazität nur 6666,00 m<sup>3</sup>

Konstante Größe			
	Kürzel	Einheit	Wert
Spezifische Wärmekapazität Luft bei 20°C	cv	kJ/(kg*K)	0,714
Dichte von Luft bei 20°C	q <sub>L</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1,19
Isotropenexponent	k	(-)	1,4
Variablen			
Temperatur vor der Kompression	T <sub>1</sub>	K	-
Temperatur nach der Kompression	T <sub>2</sub>	K	-
Druck vor der Kompression	P <sub>1</sub>	hPa	-
Druck nach der Kompression	P <sub>2</sub>	hPa	-
Volumen vor der Kompression	V <sub>1</sub>	m <sup>3</sup>	-
Volumen nach der Kompression	V <sub>2</sub>	m <sup>3</sup>	-
spezifische Arbeit der Verdichtung	w	kJ	-
Potentielle Energie	E <sub>pot</sub>	kWh	-
Gleichungen			
$T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(k-1/k)}$			
$P_2 / P_1 = (V_1 / V_2)^k$			
$T_1 / T_2 = (V_2 / V_1)^{(k-1)}$			
$w = cv * (T_2 - T_1)$			

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 471  
 2 Vgl.: Fricke, Jochen und Borst, Walter L., 1981, S. 420 - 426  
 3 Vgl.: Neupert, Ulrik, et al., 2009, S. 152

**01 - Bestimmung Temperatur  $T_2$  [  $T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(k-1/k)}$  ]**

$T_1$	K	293
$P_1$ - Hier Atmosphärendruck	hPa	1000
$P_2$	hPa	32 000
$T_2$	K	<b>789</b>

Anmerkungen:  
 293 K = 20 °C  
 789 K = 516 °C  
 1000 hPa = 1 Bar d.h.  
 normaler Atmosphärendruck

**02 - Bestimmung Ausgangsvolumens  $V_1$  [  $P_2 / P_1 = (V_1 / V_2)^k$  ]**

$V_2$ - Hier nutzbares Volumen des Speichers	m <sup>3</sup>	6667
$P_1$	hPa	1000
$P_2$	hPa	32 000
$V_1$	m <sup>3</sup>	<b>79 257</b>

**03 - Bestimmung von  $w$  und  $E_{pot}$  [  $w = cv * (T_2 - T_1) * 94.316$  ]**

$T_1$	K	293
$T_2$	K	789
$V_1$	m <sup>3</sup>	79 257
$cv$	kJ/(kg*K)	0,714
$q_L$	kg/m <sup>3</sup>	1,19
$E_{pot}$	MJ	33 394
	kWh	<b>9276</b>
$E_{pot}$ mit Wirkungsgrad von 56 %	kWh	<b>5195</b>

Nebenrechnung:  
 Ermittlung der gesamten  
 Luftmasse  
 $V_1 * q_L = 94.316$  kg

Abb. 34:  
 Tabelle Auslegung und  
 Dimensionierung

Druckverhältnis:  
Enddruck / Saugdruck

Druckverhältnis [-]	T [°C]
1 Bar auf 2 Bar   2	84
1 Bar auf 3 Bar   3	128
1 Bar auf 4 Bar   4	162
1 Bar auf 5 Bar   5	191
1 Bar auf 6 Bar   6	216

Abb. 35:  
Tabelle Druckverhältnisse  
und Temperaturen

Wie bereits in den Systemkomponenten beschrieben, erfolgt die Verdichtung auf das gewünschte Druckniveau von 32 Bar in mehreren Stufen. Mit jeder Stufe steigt die Temperatur an. Gemäß der technischen Vorlage wird die Kompressionswärme bei Erreichen eines zuvor definierten Temperaturniveaus, also nach einer bestimmten Anzahl Verdichtungsstufen, ausgekoppelt und zwischengespeichert. Entscheidend für die Dimensionierung des Maschinenstrangs ist die Höhe dieses Niveaus und wie häufig man im Zuge des Verdichtungs Vorgangs Wärme abführen muss. Anhand des ersten Schrittes aus der oben aufgeführten Berechnung, kann man die Temperatur bei gegebenem Druckverhältnis bestimmen (Vgl.: Abb. 35). Für das eigene Layout wird ein Druckverhältnis von zwei ausgewählt, für das vor allem die einfache technische Machbarkeit spricht<sup>1</sup>. Mit dem gegebenen Druckverhältnis wird der Gesamtprozess in fünf Teilschritte zerlegt: der Verdichtung von 1 auf 2 Bar, 2 auf 4, 4 auf 8, 8 auf 16 und von 16 auf 32 Bar. Da das Verhältnis aus End- zu Saugdruck immer zwei beträgt, liegt die Temperatur der Druckluft nach jedem Teilschritt bei anvisierten 84 °C. Die Berechnungsmethode der einzelnen Schritte deckt sich mit Abb. 34, allerdings werden die aus einem Verdichtungsschritt resultierenden Luftdichte  $q_L$  und Volumen  $V_2$  jeweils als Ausgangsgrößen für den darauffolgenden Abschnitt verwendet. Zum besseren Verständnis wird das Verfahren in Abb. 37 nochmals grafisch veranschaulicht.

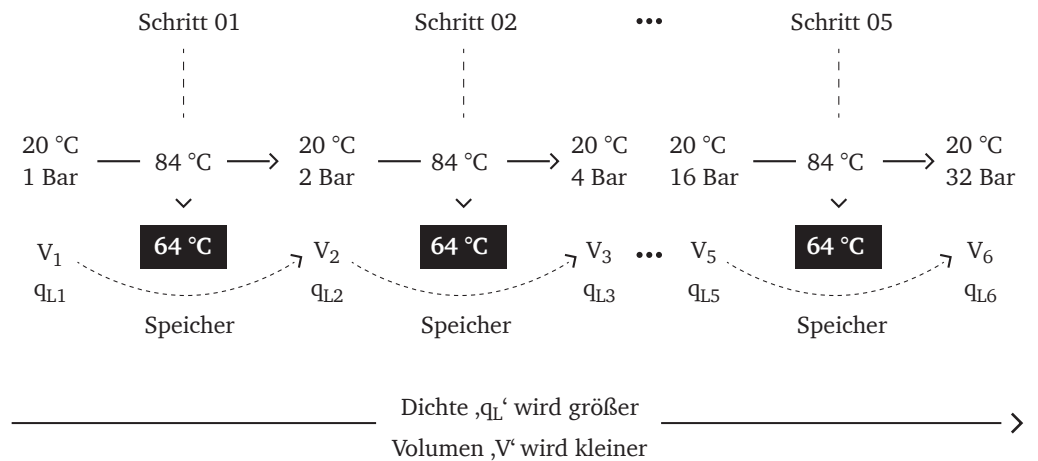


Abb. 37:  
Herleitung mehrstufige  
Kompression

Druckverhältnis [-]	$z'$ [-]
2	2
3	3
5	5
10	6
20	9
30	10
Summe Laufräder:	
2 * 5 = 10	

Abb. 36:  
Laufradanzahl  $z'$

Anhand der Datenblätter einer Radialverdichterreihe der Fa. Borsig<sup>2</sup>, ist mit dem gegebenen Druckverhältnis, dem Verdichtungsmedium und dessen Ansaugtemperatur, die erforderliche Anzahl Laufräder  $z'$  (Vgl.: Abb. 36) des Verdichterstranges und somit auch die Größe des oder der Gehäuse abzulesen. Wählt man den Turbokompressor G 500 aus, der im mittleren Leistungsbereich liegt und Volumenströme bis ca. 15 000,00 m<sup>3</sup>/h erreicht, ergibt sich der Maschinensatz in Abb. 38 auf der folgenden Seite.

eigene Darstellung,  
Herstellerdaten

1 Vgl.: Doetsch, Christian und Budt, Marcus, 2012, S. 64  
2 Vgl.: Bohl, Willi, und Elmendorf, Wolfgang, 2008, S. 310 - 315

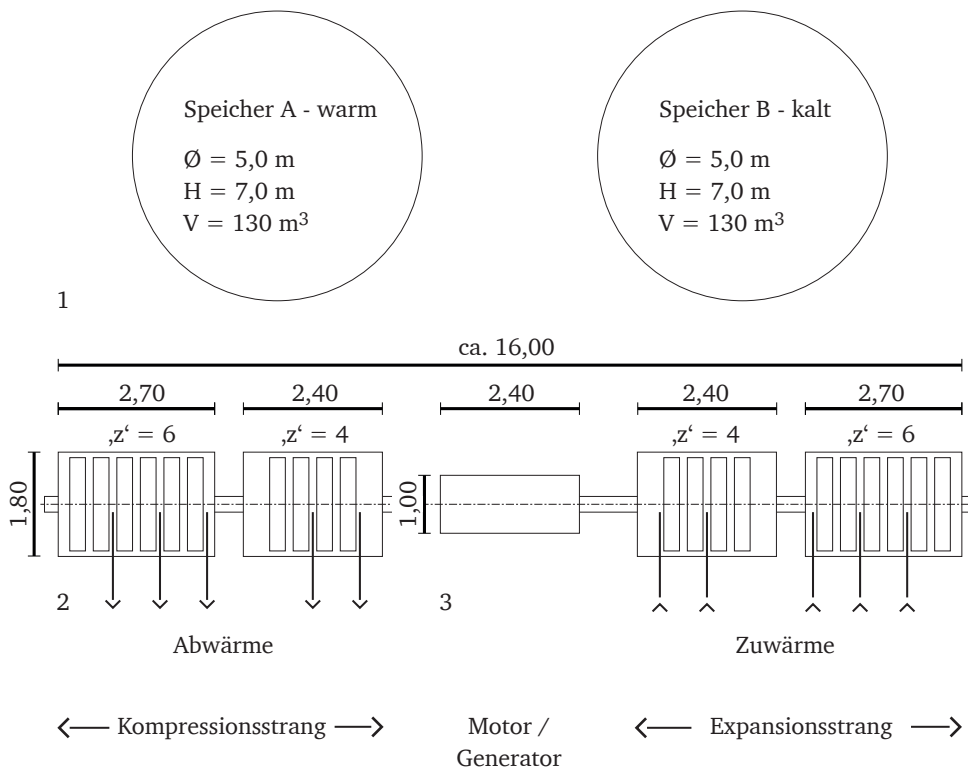


Abb. 38:  
Anlagenlayout  
eigene Darstellung

### Zu 1) Wärmespeicher

Die beiden Wärmespeicher der Anlage werden als stehende Zylinder mit einem Durchmesser von 5 m und einer Höhe von 7 m projektiert. Bemessungsgrundlage ist die Arbeit  $w'$ , die im vorliegenden Fall 33 394,00 MJ beträgt und der gesamten, zu speichernden Wärmemenge  $Q'$  entspricht. Um das erforderliche Volumen der Wärmespeicher abzuschätzen, wird zunächst die Masse des Wassers mit  $m_w = Q / (c_w * \Delta T)^1$  berechnet, um im Anschluss über die Dichte von Wasser  $q_L$  d.h. 1000 kg/m<sup>3</sup> auf das benötigte Speichervolumen zu schließen.

### Zu 2) Kompressions- und Expansionsstrang

Der Kompressions- und Expansionsstrang unterliegt zwei Restriktionen. Zum einen sind die Radialverdichter der Fa. Borsig in der Laufradanzahl auf acht pro Gehäuse limitiert, zum anderen kann innerhalb eines Gehäuses nur dreimal zwischengekühlt werden<sup>2</sup>. Für die anvisierte Anlage sind demnach zwei Gehäuse je Strang notwendig, die einmal sechs Stufen mit drei Zwischenkühlungen und einmal vier Stufen mit zwei Zwischenkühlungen aufnehmen. Mit den gewählten Maschinen und einem Volumenstrom von 12.000 m<sup>3</sup>/h, würde der Belade- und Entladevorgang 7 Stunden benötigen, was einer Leistung von ca. 1 MW entspricht.

Wassermasse	
$m_w$	kg
Wärmemenge	
$Q$	MJ
Temperaturdifferenz	
$\Delta T$	K
spezifische Wärmekapazität	
$c_w$	kJ / (kg * K)
Dichte von Wasser	
$q_L$	kg / m <sup>3</sup>

Abb. 39:  
Dimensionierung  
Wärmespeicher

1 Vgl.: Hauer, Andreas, Hiebler, Stefan und Reuß, Manfred, Stuttgart 2013, S. 44 ff.  
2 Vgl.: Grote, K.-H und Feldhusen, J (Hrsg): 2007, S. R62

### Zu 3) Motorgenerator

Als Motorgenerator wird ein reversibler Maschinentyp eingesetzt, der die Funktionen Motor und Generator in einem Gehäuse vereint. Derartige Maschinen sind vor allem aus der Pumpspeicherung bekannt, finden sich aber auch bei anderen Anwendungen, wie etwa dem Schwungrad. Motoren und Generatoren sind in weiten Teilen genormt<sup>1</sup> und es liegen detaillierte Listen der führenden Hersteller mit entsprechenden Maßangaben vor. Die Unterlagen zeigen, dass deren Größe im wesentlichen von der Leistung und der Drehzahl bestimmt wird. Langsam drehende Maschinen sind tendenziell schwerer als diejenigen mit hoher Drehzahl. Mit einer Leistung von 1 MW würde der Motorgenerator etwa eine Breite von 1,0 m, eine Länge von 2,4 m und eine Höhe von 1,40 erreichen. Die Stellfläche kann also mit dem vierstufigen Kompressor bzw. Expander gleichgesetzt werden

1 Vgl.: Krämer, Horst, Wiesbaden 1991. S. 164



## 5.7. Anforderungskatalog

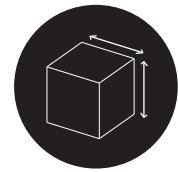
### Anforderungen an das Bauwerk

### Druckluftspeicher

#### Dimensionen

» *großer Rauminhalt*

Die Speicherkapazität ist an das umschlossene Luftvolumen gekoppelt. Demnach sind große Rauminhalte zur Maximierung der Speichermenge anzustreben.



#### Räumliche Gliederung

» *Volumina unter OKGOF<sup>1</sup> sind gegenüber oberirdischen Volumina zu bevorzugen*

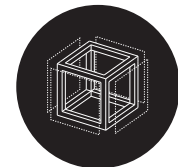
Bei der Beladung und Entladung der Druckluft treten im Speicher Temperaturschwankungen auf, ggf. auch unter Kondensatausfall. Im Erdreich herrschen ganzjährig konstante Temperaturen über dem Gefrierpunkt. Tendenziell sind Speichervolumina unter OKGOF<sup>1</sup> also temperaturbeständiger und können die umgebende Erdmasse nutzen, um die auftretenden Temperaturspitzen abzapfen. Darüber hinaus schützt deren Lage die eingelagerte Druckluft vor größeren Temperaturveränderungen im Tagesverlauf und sommerlicher Hitzeeinwirkung<sup>2</sup>. Auch aus statischer Sicht gibt es Argumente für eine Lage unter OKGOF<sup>1</sup>. Der Erddruck auf die Umfassungswände kann sich positiv auf die Druckbeständigkeit des Bauwerkes auswirken.



#### Tragwerk und Konstruktion

» *Flächentragwerke sind gegenüber Stabtragwerken zu bevorzugen*

Die Druckluft bringt auf alle Umfassungsflächen eine gleichmäßige Last auf. Dabei entsprechen 32 000 hPa, also zweiunddreißigfacher Normaldruck, einer Kraft von 3200 kN/m<sup>2</sup>. Grundsätzlich besitzen Flächentragwerke für einen derartigen Lastfall eine höhere Eignung, da sie mit der Fläche zur Lastabtragung arbeiten. Lineare Kraftbündelung und -ableitung, wie es Stabtragwerke praktizieren, sind weniger geeignet.



» *Tragwerke mit formaktiver Komponente*

Druckluftspeicher in industriellen Anwendungsbereichen mit kleineren Volumina werden üblicherweise als Zylinder mit beidseitigen Kugelhappen hergestellt<sup>3</sup>. Große Gasometer sind als stehende Zylinder und druckbelastete Speicher in Kugelform bekannt<sup>4</sup>. Die Formgebung ist in erster Linie das Resultat einer statischen Optimierung. Diese Prämisse kann als Anforderung an das Tragwerk potenziell geeigneter Bauwerke übertragen werden.

» *Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen sind gegenüber Mauerwerks- oder Mischkonstruktionen zu bevorzugen*

Die statischen Anforderungen aus der Druckluftspeicherung sind im Vergleich zu den üblichen Lastannahmen in der Gebäudestatik enorm. Beispielsweise nimmt man Deckennutzlasten nach DIN 1055 - 3 für Werkstätten, Fabriken sowie Lagerräume mit 7,5 kN/m<sup>2</sup> bis 30 kN/m<sup>2</sup> an<sup>5</sup>, wohingegen man es nun mit Kräften in der Größenordnung von 1600 bis 3200 kN/m<sup>2</sup> zu tun hat, je nach Enddruck im Speicher.

1 Anmerkung: Oberkante Geländeoberfläche

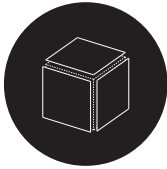
2 Vgl.: Tietjen, Theo, 2013, S. 20ff

3 Vgl.: Schwate, Werner et al, 1992, S. 129f

4 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher, 2014 S. 367

5 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen, 2014, S. 3.13

Sowohl Stahl- als auch Stahlbetonkonstruktionen können per se als sehr leistungsfähig bezeichnet werden und sind anderen Konstruktionsarten, zumindest was die vorliegende Anwendung anbelangt, überlegen. Ein Argument, was einzig für die Stahlbetonkonstruktionen spricht, ist deren Masse. Diese kann bei der zuvor beschriebenen Temperaturproblematik Abhilfe schaffen, indem sie als Puffer wirksam wird



**Hülle**

» *möglichst kleiner Öffnungsanteil, Luftdichtigkeit*

Jede Öffnung im Bauwerk stellt eine Speicherleckage und damit Schwächung dar. Je kleiner der Öffnungsanteil, Fugen eingeschlossen, desto weniger Ertüchtigungsaufwand besteht darin diese zu verschließen. Was die Luftdichtigkeit anbelangt, so ist es doch eher unwahrscheinlich auf ein Bauwerk zu treffen, was dieses Kriterium ohne Weiteres erfüllt. Schließlich gehört es nicht zur gängigen Praxis Gebäudehüllen derart auszustatten. Bei Passivhäusern beispielsweise gilt ein Grenzwert, 100% luftdicht sind auch diese nicht<sup>1</sup>. Man kann also davon ausgehen, dass man diese im Zuge einer Umnutzung nachträglich herstellen muss.

**Anforderungen an den Kontext**

**Druckluftspeicher**

» *keine*

**Anforderungen an das Bauwerk**

**Maschinenhaus**

» *keine*

**Anforderungen an den Kontext**

**Maschinenhaus**

**Flächen**

» *Fläche zur Platzierung des Maschinenhauses*

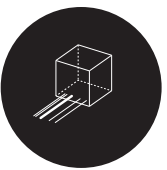
Das Maschinenhaus ist als Neubau vorzusehen und in unmittelbarer Nähe des Speichers zu platzieren. Hierzu zählt auch die Möglichkeit das Maschinenhaus auf der Dachfläche des Bauwerks zu verorten.



**Infrastruktur**

» *erschließbare Wärmequellen*

Eine Wärmequelle, wie etwa Fernwärme oder industrielle Abwärme, könnte zum Betrieb des Druckluftspeicherkraftwerks genutzt werden.



1 Vgl.: <http://www.passiv.de>, Zugriff am 03.03.2016

---

## 5.8. Schlussfolgerungen

Die Druckluftspeicherung ist mit Abstand das aufwändigste und auch kostenintensivste System in der Reihe. Ein Defizit, das sich auf lange Sicht mit der zunehmenden Verbreitung und der damit einhergehenden technischen Reifung des Systems relativieren könnte. Demgegenüber ist die hohe Energiedichte als klarer Vorteil zu nennen. Diese beträgt bei einem Wirkungsgrad von 56% zwischen 0,13 und 1,7 kWh pro m<sup>3</sup> zu komprimierendem Luftvolumen, bei Drücken zwischen 8 und 64 bar. Schaut man auf die Anforderungen des Systems, fällt eine Kategorie besonders ins Auge: Tragwerk und Konstruktion. Die Flächenlasten, welche bei Drücken von 8 bis 64 bar auftreten bewegen sich in Größenordnungen, die weit über das hinaus gehen, was üblicherweise in der Gebäudestatik angenommen wird. Darin liegt eine bzw. die zentrale Herausforderung. Hinzu kommen weitere Spezifika, wie z.B. die luftdichte Hülle, die das Auffinden geeigneter Bauwerke erschweren. Im Gegensatz zum Schwungrad, dessen Anforderungen sich beispielsweise mit den Gegebenheiten produzierender oder zu Lagerzwecken errichteter Bauten überschneiden, finden sich bei der Druckluftspeicherung keine unmittelbaren Bezüge zu verbreiteten Nutzungsformen, wenn überhaupt, wird ein geeignetes Bauwerk einem einzigartigen, sehr speziellen Zweck vorbehalten sein. Eine interessante Option stellt die Nutzung von Abwärmequellen dar, die es einem erlaubt das Druckluftspeicherwerk in energetische Netzwerke einzubinden. Gerade in verdichteten städtischen Räumen mit hoher Wärmelast könnte diese Variante zum Tragen kommen.

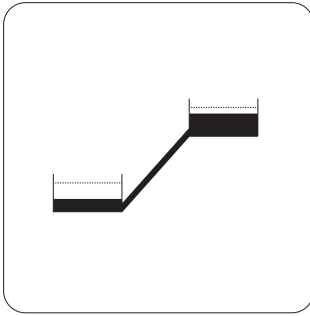


Abb. 40:  
Systempiktogramm  
Pumpspeicher

## 6.0 Pumpspeicher

### 6.1. Einführung

Der Pumpspeicher verwendet das Medium Wasser zur Speicherung von potentieller Energie, indem dieses zwischen zwei unterschiedlichen Höhenniveaus bewegt wird<sup>1</sup>. Eine Artverwandtschaft besteht zum Hubspeicher, da beiden Systemen die Nutzung der Schwerkraft zu eigen ist. Streng genommen besteht der einzige Unterschied im verwendeten Medium, welches die erforderliche Masse liefert: flüssiges Wasser auf der einen, ein fester Körper auf der anderen Seite. Pumpspeicher sind bewährte und ausgereifte technische Anlagen, welche als einziges System eine breite Anwendung als großformatige Energiespeicher erfahren<sup>2</sup>. Insofern nehmen sie in der Systembetrachtung eine Sonderrolle ein.

### 6.2. Konzeption und Betrieb moderner Pumpspeicherkraftwerke

Im Betrieb befindliche Pumpspeicherkraftwerke, wie man sie auch in Deutschland findet, arbeiten mit sehr großen Volumina zwischen 1 Mio m<sup>3</sup> und 110 Mio m<sup>3</sup>. Im Aufbau verfügen alle diese Anlagen über ein Ober- und ein Unterbecken, wobei es sich bei letzterem auch um ein natürliches Fließgewässer handeln kann. Dies ist z.B. beim Kraftwerk Geesthacht in der Nähe von Hamburg der Fall, welches Elbwasser in ein 80 m darüber befindliches, künstlich angelegtes Oberbecken mit 3,8 Mio m<sup>3</sup> Fassungsvermögen pumpt<sup>4</sup>. Technischer Kern des Kraftwerks sind die Pumpe, die Turbine und der Motorgenerator. Wird der Speicher geladen, befördern Motor und Pumpe das Wasser ins Oberbecken. Beim Entladevorgang kehrt sich dieser Prozess um, das zurückfließende Wasser treibt Turbine und Generator an, es wird elektrische Energie erzeugt<sup>5</sup>. Innerhalb der Struktur des elektrischen Energieversorgungssystems nehmen Pumpspeicherkraftwerke die Rolle sogenannter Spitzenlastkraftwerke ein. In den Nachtstunden sinkt die Stromnachfrage, die Grundlastkraftwerke müssen systembedingt jedoch mit unverminderter Leistung weiter laufen wie zu Tageszeiten. Es entsteht ein Stromüberschuss<sup>6</sup>. Um die verminderte Nachfrage zu kompensieren, werden u.a. Pumpspeicherkraftwerke aktiv und pumpen mit der überschüssigen Energie Wasser ins Oberbecken. Im Laufe des Tages wird dieses Wasser wieder abgelassen, um jene Stromnachfrage zu decken, welche über die Grundlast hinausgeht, die Spitzenlast<sup>7</sup>. Der finanzielle Erlös ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Bezug günstigen Nachtstroms und dem Verkauf hochpreisigen Tagstroms. Es liegt auf der Hand, dass Pumpspeicherkraftwerke einen erheblichen Eingriff in die Natur darstellen, was dazu führt, dass ihre Ausbaukapazitäten in Deutschland eingeschränkt sind, nicht zuletzt wegen der Bindung an besondere topographische Gegebenheiten<sup>8</sup>.

### 6.3. Pumpspeicher im Maßstab des Bauwerks

Realisierte und im Betrieb befindliche Pumpspeicherkraftwerke, wie sie im vorherigen Abschnitt beschrieben werden, bewegen sich in ganz anderen Größenordnungen, als die anvisierten Anlagen dieser Arbeit. So besteht zwar funktional

1 Vgl.: Ulrike Neupert, 2009, S. 131

2 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 479

3 Vgl.: König, Felix von, und Jehle, Christoph, 2005, S. 172

4 Vgl.: <http://kraftwerke.vattenfall.de/geesthacht>, 13.08.2015

5 Vgl.: Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas und Gonsowski, Pete, 2010, S. 194 - 195

6 Vgl.: Schwab, Adolf J., 2012, S. 39

7 Vgl.: Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas und Gonsowski, Pete, 2010, S. 194

8 Vgl.: Ulrike Neupert et al., 2009, S.135

kein Unterschied, aber in der Auslegung. Man könnte also sagen, dass es sich bei den Pumpspeichern dieser Arbeit um einen eigenen Untertyp handelt, der sich in seiner Größe vom etablierten System Pumpspeicherkraftwerk unterscheidet. Nachfolgend wird eine Einordnung dieses Untertyps vorgenommen, um im Anschluß die Auslegung und Wahl der technischen Komponenten vorzunehmen. Allgemein werden Wasserkraftanlagen in acht Kategorien klassifiziert, von denen drei, nämlich Technik, Nutzfallhöhe und Leistung, herangezogen werden. Die übrigen Kategorien, zu denen z.B. energiewirtschaftliche Gesichtspunkte, die Betriebsweise oder wasserwirtschaftliche Belange zählen, sind für die vorliegende Einordnung, die eher genereller Natur ist, zweitrangig. Ausgehend von der technischen Einordnung als Pumpspeicherkraftwerk, bewegt man sich gemäß Abb. 42 im Bereich der Mitteldruck- und der Kleinwasserkraftanlagen.

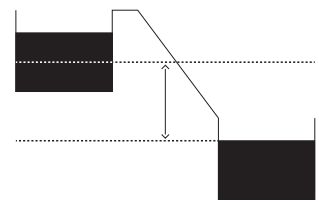


Abb. 41:  
Nutzfallhöhe  
Die Nutzfallhöhe wird von der Oberkante des Unterbeckens bis zur Mitte des Oberbeckens gemessen.

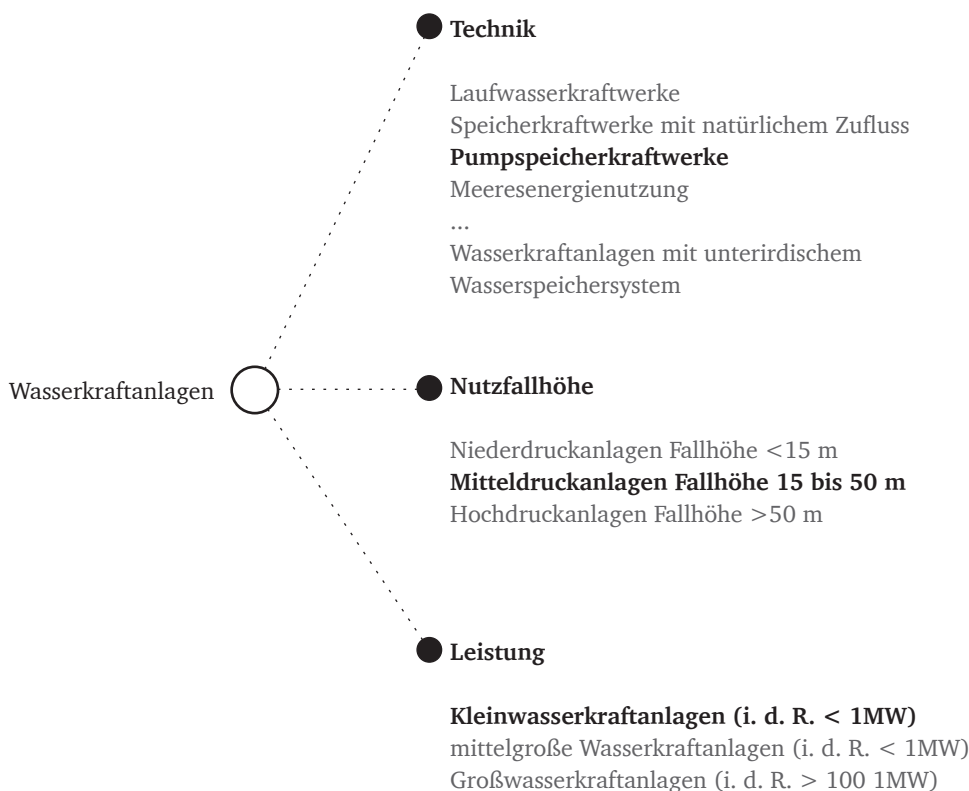


Abb. 42:  
Klassifizierung der Wasserkraftanlagen

Hintergrund der vorgenommenen Einordnung sind die baulichen Voraussetzungen potentieller Bauwerke. Zunächst wird die Nutzfallhöhe 50 m nicht überschreiten, immerhin müsste die Höhe des Bauwerks dann 100 m betragen. Die Leistung aus der Wasserkraftnutzung wird nach  $P = Q \times p \times g \times h_{\text{eff}} \times \eta_{\text{ges}}$  [W] ermittelt<sup>1</sup>. Die Bemessung von Turbine und Pumpe, welche im Kapitel IV: Pilote anhand eines existierenden Referenzbauwerks vorgenommen wird, liegt mit ca. 250 kW weit unter der determinierten Grenze zu den mittelgroßen Wasserkraftanlagen. Man kann also davon ausgehen, dass ein 1 MW Leistung, wenn überhaupt, nur in Ausnahmefällen überschritten wird. Folglich handelt es bei der vorliegenden Konzeption um ein Pumpspeicherkraftwerk, das mittlere Fallhöhe aufweist und kleine Leistungen erbringt.

Leistung <b>P</b> aus der Wasserkraft	
Durchflussrate	Q
Dichte von Wasser	p
Erdbeschleunigung	g
effektive Fallhöhe	$h_{\text{eff}}$
Wirkungsgrad	$\eta_{\text{ges}}$

Abb. 43:  
Variablen zur Leistungsermittlung

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 481

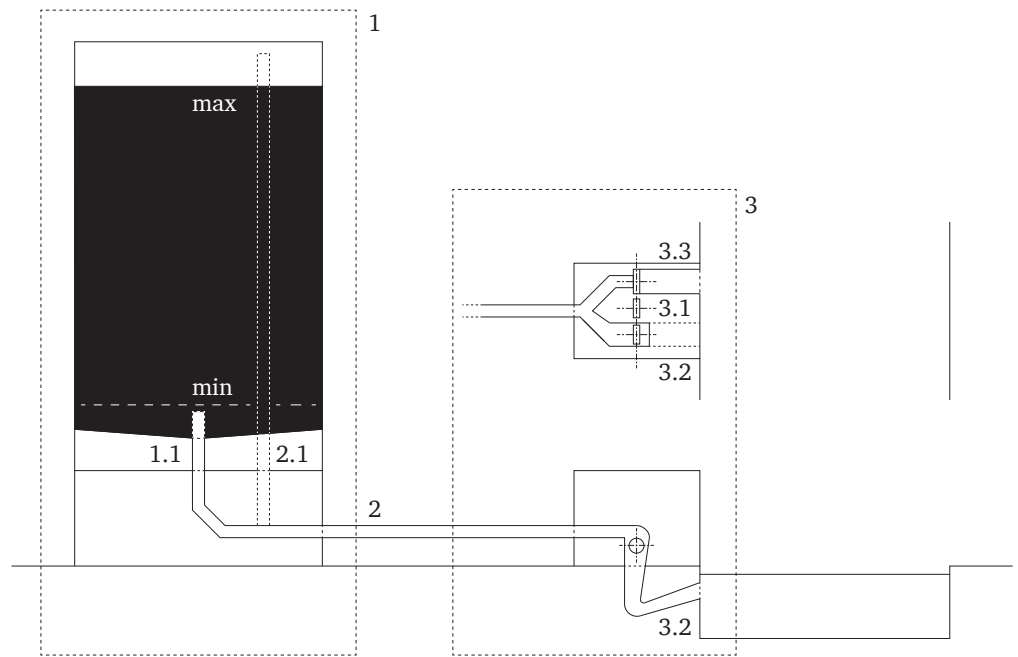


Abb. 44:  
Aufbau und System-  
komponenten Pumpspeicher

**Systemkomponenten**

**1 Wasserreservoir**

Das Wasserreservoir ist die zentrale Komponente des Pumpspeichers und in seinen Anforderungen richtungsweisend, wenn es um die strukturellen Voraussetzungen potentieller Bauwerke geht. Ferner geht aus seiner Höhe und seinem Volumen die eigentliche Kapazität des Pumpspeichers hervor. Wird das Reservoir beladen, steigt der Wasserspiegel im Inneren bis zum Erreichen des Maximalpegels, welcher auch als Oberwasser [OW] bezeichnet wird. Beim Entladen des Speichers fällt der Pegel bis zum Minimalpegel. Dieser liegt jedoch nicht auf gleicher Höhe mit der Sohle des Reservoirs, da technisch bedingt immer eine Restmenge Wasser im Speicher verbleibt<sup>1</sup>. Bei Pumpspeicherkraftwerken müssen die Becken, insofern sie künstlich angelegt sind, in regelmäßigen, wenn auch großen Abständen gewartet werden. Das Oberbecken des Pumpspeicherkraftwerk Glems beispielsweise, wurde erstmalig nach 30 Jahren Betrieb entleert, um Schlamm abzupumpen und die Abdichtungsmaßnahmen zu erneuern<sup>2</sup>. Auch bei den kleinen Anlagen dieser Arbeit werden sowohl Abdichtung als auch Sedimentation eine Rolle spielen (siehe Abschnitt zur Wasserfassung). Dieses zieht vergleichbare Wartungsarbeiten nach sich, wozu das Reservoir vollständig entleert wird und das Kraftwerk im Betrieb ausfällt.

**1.1 Zu- und Ablauf**

Der Zu- und Ablauf stellt den Übergang von der Druckleitung zum Wasserspeicher dar. Er verfügt über radial angeordnete Öffnungen, über die das Wasser zu- und abströmen kann. Konventionelle Pumpspeicherkraftwerke haben Einlaufftürme, die als solche schon ein eigenes kleines Bauwerk darstellen und u.a. über einen Aufzug sowie einen Zugangssteg verfügen<sup>3</sup>.

1 Vgl.: Kaczynski, Jürgen, 1991, Abb. S. 90 oben

2 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 125 - 126

3 Vgl.: Kaczynski, Jürgen, 1991, Abb. S. 90 oben

---

Die Ausführung und die Ausmaße solcher Einlauffürme sind natürlich der großen Kraftwerksleistung geschuldet und nicht unmittelbar zum Vorbild zu nehmen. Immerhin ist eine Revision des Zu- und Ablaufs bei leerem Reservoir jederzeit möglich, sollte dieser in Augenschein genommen werden müssen. Auch eine vollständige Leerung des Reservoirs ist nicht mit dem Aufwand vergleichbar, welches ein derartiges Unterfangen für ein mehrere Millionen Kubikmeter fassendes Oberbecken bedeutet.

---

## 2 Druckleitung

Die Druckleitung befindet sich zwischen dem Wasserreservoir und dem Krafthaus. Sie führt das Wasser beim Ladevorgang von der Pumpe zum Reservoir und bei der Entladung vom Reservoir zur Turbine. Im Gegensatz zu den sogenannten Freispiegelleitungen, ist die kreisförmige Druckleitung über den ganzen Querschnitt mit Wasser gefüllt. Bei der Planung sind einige Grundsätze zu beachten. Zunächst ist die Druckleitung bei gleichmäßigem Gefälle möglichst geradlinig zu führen und eine kurze Trassierung anzustreben. Für Krümmungen im Leitungsverlauf sind große Radien zu wählen, Querschnittsänderungen sollten nicht urplötzlich sondern stetig vollzogen werden. Rohrabzweigungen mit kleinen Winkeln mindern die Strömungsverluste. In der Regel besteht die Haupttrasse aus einem Rohr, verteilt wird erst kurz vor dem Krafthaus. Als Material kommt üblicherweise Stahl zum Einsatz. Bei der eigentlichen Trassenführung kann die Druckleitung auf Betonfundamenten ruhen, wobei diese abwechselnd gleitend und fix ausgeführt werden<sup>1</sup>. Wichtiger Bestandteil der Druckleitung sind die Absperr- und Regulierorgane, welche die Wassermengen steuern oder auch unterbrechen können. Diese sind u.a. aus Gründen der Betriebssicherheit vorzusehen, da der Wasserstrom in der Druckleitung jederzeit unterbrochen werden muss<sup>2</sup>. Bauart, Anzahl und Positionierung dieser Organe werden für jede Anlage individuell abgestimmt, erfahrungsgemäß finden sich am Fuß- und am Hochpunkt der Druckleitung derartige Vorrichtungen<sup>3</sup>.

---

### 2.1 Wasserschloss

Das Betätigen von Verschluss- und Regulierorganen führt zu Durchflussschwankungen in der Druckleitung. Diese rufen Druckstöße hervor, die sich in der Leitung ausbreiten und enorme Kräfte mit schädigender Wirkung ausüben können. Dies gilt insbesondere für den Einsatz schnell reagierender Verschlussapparaturen. Das sogenannte Wasserschloss kann derartige Druckstöße kompensieren. Im Prinzip handelt es sich dabei um einen vertikalen Schacht, der in Verbindung mit der Druckleitung steht und über den höchsten Pegel des Oberwassers hinaus reicht. Tritt eine Druckwelle auf, schwankt die Wassersäule im Wasserschloss auf und ab, bis diese abgeklungen ist. Die Dimensionierung des Wasserschlosses wird für jede Anlage individuell vorgenommen, häufig anhand von Modellversuchen<sup>4</sup>. Üblicherweise befindet es sich am Hochpunkt der Druckleitung<sup>5</sup>. Ob man für die anvisierten Anlagen dieser Arbeit ein Wasserschloss vorsehen muss oder nicht, kann aus den o.g. Gründen nicht abschließend beantwortet werden. In der Praxis sind Wasserschlösser vor allem deshalb notwendig, weil die Druckleitung viel Wasser fasst und lange Strecken zwischen Oberbecken und Krafthaus überwindet. Dies wird bei der Umnutzung von Bauwerken nicht die Regel sein.

1 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 237 - 380

2 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 441

3 Vgl.: Kaczynski, Jürgen, 1991, Abb. S. 114

4 Vgl.: König, Felix von, und Jehle, Christoph, 2005, S. 129 -130

5 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 381

---

### 3 Krafthaus

---

Im Krafthaus sind alle technischen Einrichtungen vereint, die der Stromerzeugung durch das Pumpspeicherkraftwerk dienen. Im Wesentlichen sind das der Tandemsatz, also Pumpe, Turbine und Generator, die Steuerung, die Wasserfassung sowie das Saugrohr<sup>1</sup>. Das Krafthaus selber kann im Bestandsbauwerk untergebracht werden oder separiert davon als eigenständiger Funktionsbau stehen. Das hängt von den Gegebenheiten des Bauwerks und seines Standortes ab. In jedem Fall müssen Aufstellen, Wartung und Austausch der Maschinen jederzeit möglich sein. Zu diesem Zweck kann man dauerhaft installierte Hebevorrichtungen an der Decke vorsehen oder mit einem mobilen Kran operieren, für dessen Betrieb Öffnungen im Dach einzuplanen sind. Unabhängig von der gewählten Lösung ist eine ausreichende Raumhöhe notwendig<sup>2</sup>.

---

#### 3.1 Tandemsatz

---

Als Tandemsatz bezeichnet man die Einheit aus Turbine, Generatormotor und Pumpe. Diese liegen auf einer Achse, wobei der Generatormotor mittig zwischen Turbine und Pumpe liegt<sup>3</sup>. Nachfolgend werden die Teilkomponenten des Tandemsatzes beschrieben.

##### 1) Wasserturbine

Allgemein setzen Wasserturbinen die Energie des strömenden Mediums Wassers in einem Laufrad in eine Drehbewegung um, welche in einem Generator der Erzeugung von elektrischer Energie dient. Grundsätzlich wird nach Überdruck- und Gleichdruckturbinen unterschieden. Während Überdruckturbinen komplett vom Wasser umströmt werden, sind es bei den Gleichdruckturbinen nur Teile des Laufrades. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Typen wie Francis-, Kaplan- oder Peltonurbinen, die richtige Wahl kann man anhand zweier Faktoren treffen: der Durchflussrate  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] und der Fallhöhe  $h_{\text{eff}}$  [m]. Anhand einer Tabelle ist es möglich, den Einsatzbereich der verschiedenen Typen abzulesen<sup>4</sup>. Für die geplanten Anlagen mit mittleren Fallhöhen und kleiner Leistung ist die sogenannte Durchströmturbine eine geeignete Maschine. Bei dieser handelt es sich um eine einfache, robuste sowie preisgünstige Turbine, welche zudem häufig im Bereich der Kleinwasserkraftanlagen eingesetzt wird<sup>5</sup>.

##### 2) Generatormotor

Der Generatormotor findet sich auch bei den übrigen Systemen Hub-, Druckluft- und Schwungradspeicher. Die Funktionsweise sollte daher aus den vorausgegangenen Kapiteln bekannt sein. In diesem Fall treibt er die Pumpe in Motorfunktion an, als Generator zur Stromerzeugung ist er in Kombination mit der Turbine aktiv.

##### 3) Wasserpumpe

Pumpspeicherkraftwerke benötigen eine Kraftmaschine, um das Wasser auf das erforderliche Höhenniveau zu befördern. Hierfür werden Kreiselpumpen radialer Bauart eingesetzt, deren Auswahl sich nach der gewünschten Förderhöhe und dem erforderlichen Förderstrom richtet<sup>6</sup>. Passende Maschinen finden sich beispielsweise in den Unterlagen der Hersteller.

Die Durchflussrate  $Q$  gibt die Kubikmeter Wasser pro Sekunde an, welche die Turbine durchströmen. Diese reicht von 0,05 bis 1000  $\text{m}^3/\text{s}$ . Angenommen wird eine Durchflussrate, die im Bereich von 1,0  $\text{m}^3/\text{s}$  liegt. Nimmt man das Silo III der Wesermühlen als Referenz (Vgl. Kapitel IV: Pilote), wären die 20 000  $\text{m}^3$  Volumen in knapp sechs Stunden befüllt, bei einer Leistung der Turbine von 230 kW.

Die Förderhöhe entspricht der Höhendifferenz zwischen dem Unter- und dem Oberwasser, die von der Pumpe überwunden werden muss. Der Förderstrom ist die Wassermenge pro Sekunde, welche die Pumpe durchströmt. Analog zur Turbine wird dieser mit 1,0  $\text{m}^3/\text{s}$  angesetzt.

1 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 489

2 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 492

3 Vgl.: Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas und Gonsowski, Pete, 2010, Abb. S. 195

4 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 531 - 534

5 Vgl.: Pálffy, Sandor, 2014, S. 161 - 190

6 Vgl.: Kaczynski, Jürgen, 1991, S. 145 - 148



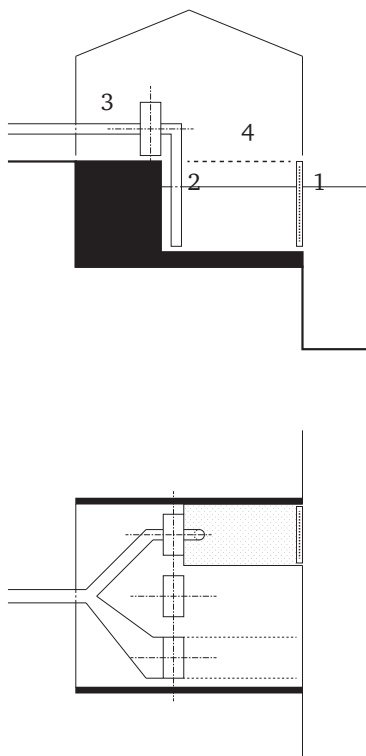
### 3.2 Wasserfassung

In der Wasserfassung wird das sogenannte Triebwasser entnommen, aufbereitet und im Anschluss von der Pumpe in die Druckleitung und das Reservoir befördert. Grundsätzlich dient die Wasserfassung der Minderung von Feststoffeinträgen im Wasser, da diese die maschinellen Einrichtungen des Pumpspeicherkraftwerks beschädigen können. Dazu zählen das Geschiebe, die Schwebstoffe und das Treibgut. Insbesondere harte, kantige Schwebstoffe wie Quarzsand führen zu Abschleifferscheinungen an Turbine und Pumpe<sup>1</sup>. Zunächst unterscheidet man vier unterschiedliche Möglichkeiten der Wasserentnahme: die Seiten-, die Stirn-, die Sohlen- und die Saugentnahme. Bis auf die Saugentnahme, sind alle mit erheblichem baulichen Aufwand verbunden und angesichts der anvisierten Anlagendimensionen bzw. Entnahmemengen ungeeignet<sup>2</sup>. Relativ einfach zu realisieren, ist die Saugentnahme, welche bei „kleineren“<sup>3</sup> Abflussmengen eine probate Lösung darstellt. Die nebenstehende Abbildung stellt den Konzeptentwurf eines Krafthauses im Grundriss und im Schnitt dar, bei dem die Wasserfassung auf diesem Entnahmeprinzip basiert.

Beim Geschiebe handelt es sich um Grobsand, Kies und Steine, welche im Sohlebereich eines Fließgewässers mitgetragen werden.

#### 2.1 Saugrohr

Über das Saugrohr wird das Wasser nach der Turbinierung unterhalb des Wasserspiegels wieder ins Gewässer zurück befördert. Bei der Durchströmturbine ist ein derartiges Saugrohr ab einer effektiven Fallhöhe von etwa zehn Metern vorzusehen<sup>4</sup>.



Wasserfassung
1 Grob- und Feinrechen
2 Saugrohr
3 Wasserpumpe
4 Abdeckung

Abb. 45:  
Konzeptentwurf  
Wasserfassung  
(stehendes Gewässer)

- 1 Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas und Gonsowski, Pete, 2010, S. 207
- 2 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 159 - 168
- 3 Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas und Gonsowski, Pete, 2010, S. 202
- 4 Vgl.: Rotariers, Thomas (Hrsg), 1991, S. 57
- 5 Vgl.: Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 587

### 6.4. Auslegung und Dimensionierung

Die Auslegung und Dimensionierung des Pumpspeichers ist ohne Kenntnis von Speichervolumen und effektiver Fallhöhe nicht möglich. Auch in diesem Fall dient das Referenzbauwerk der Pilote als Orientierung (Vgl. Kapitel IV: Pilote). Konkret hat man es mit einem Speichervolumen von 20 000 m<sup>3</sup>, einer Oberwasserhöhe von 40 m und einer effektiven Fallhöhe von 23,5 m zu tun. Die darauf basierende Spezifikation lässt sich auch auf andere Bauwerk mit abweichenden Volumina und Höhenverhältnissen übertragen, insofern sich diese nicht gravierend von den angesetzten Werten unterscheiden. Wie bei den übrigen Speichersystemen werden keine Teilwirkungsgrade, sondern ein Gesamtwirkungsgrad von 80%<sup>5</sup> angesetzt.

Konstante Größen			
	Kürzel	Einheit	Wert
Volumen des Wasserreservoirs	V <sub>Res</sub>	m <sup>3</sup>	20 054
Dichte von Wasser	ρ <sub>W</sub>	kg/m <sup>3</sup>	1000
Erdbeschleunigung	g	m/s <sup>2</sup>	9,81
Höhe Oberwasser	h <sub>OW</sub>	m	40
effektive Fallhöhe	h <sub>eff</sub>	m	23,5
Durchflussrate Beladung	Q <sub>Bel</sub>	m <sup>3</sup> /s	1,0
Durchflussrate Entladung	Q <sub>Ent</sub>	m <sup>3</sup> /s	1,0
Fließgeschwindigkeit	V	m/s	3,5
Variablen			
Gesamte Beladedauer	h <sub>Bel</sub>	h	-
Gesamte Entladedauer	h <sub>Ent</sub>	h	-
Innendurchmesser Druckleitung	d <sub>i</sub>	m	-
Leistung der Turbine	P <sub>Tur</sub>	kW	-
Potentielle Energie	E <sub>pot</sub>	J	-

Die Fließgeschwindigkeit V in der Druckleitung ist zwischen 1 und 7 zu wählen. Je höher die Geschwindigkeit, umso kleiner der resultierende Rohrdurchmesser.

Gleichungen<sup>1 2</sup>

$$P = Q_{\text{Ent}} \times p \times g \times h_{\text{eff}} / 1000$$

$$E_{\text{Pot}} = V_{\text{Res}} \times p_{\text{W}} \times g \times h_{\text{eff}}$$

$$d_i = 1,128 \times \sqrt{(Q_{\text{Ent}} / V)}$$

$$h_{\text{Bel (Ent)}} = V_{\text{Res}} / Q_{\text{Bel (Ent)}} \times 3600$$

01 - Bestimmung des Innendurchmessers der Druckleitung [  $d_i = 1,128 * \sqrt{(Q_{\text{Ent}} / V)}$  ]

$Q_{\text{Ent}}$	m <sup>3</sup> /s	1,0
V	m/s	3,5
$d_i$	m	<b>0,60</b>

02 - Bestimmung der Turbinenleistung  $P_{\text{Tur}}$  [  $P = Q_{\text{Ent}} \times p \times g \times h_{\text{eff}} / 1000$  ]

$Q_{\text{Ent}}$	m <sup>3</sup> /s	1,0
$p_{\text{W}}$	kg/m <sup>3</sup>	1000
g	m/s <sup>2</sup>	9,81
$h_{\text{eff}}$	m	23,5
P	kW	<b>231</b>

03 - Bestimmung der potentiellen Energie  $E_{\text{pot}}$  [  $E_{\text{pot}} = V_{\text{Res}} \times p_{\text{W}} \times g \times h_{\text{eff}}$  ]

$V_{\text{Res}}$	m <sup>3</sup>	20 054
$p_{\text{W}}$	kg/m <sup>3</sup>	1000
g	m/s <sup>2</sup>	9,81
$h_{\text{eff}}$	m	23,5
$E_{\text{pot}}$	MJ	4623
	kWh	<b>1284</b>
$E_{\text{pot}}$ mit Wirkungsgrad von 80%	kWh	<b>1027</b>

04 - Bestimmung der Ladedauer  $h_{\text{Bel}}$  [  $h_{\text{Bel (Ent)}} = V_{\text{Res}} / Q_{\text{Bel (Ent)}} \times 3600$  ]

$V_{\text{Res}}$	m <sup>3</sup>	20 054
$Q_{\text{Bel}}$	m <sup>3</sup> /s	1,0
$Q_{\text{Ent}}$	m <sup>3</sup> /s	1,0
$h_{\text{Bel}}$	h	<b>5,57</b>
$h_{\text{Ent}}$	h	<b>5,57</b>

Abb. 46:  
Tabelle Auslegung und  
Dimensionierung

1 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 480 - 481

2 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 248

Ausstehend sind die Dimensionen der Hauptkomponenten Turbine, Pumpe und Generator, auf die zum Abschluss eingegangen wird.

### 1) Turbine

Die Durchströmturbine ist anhand der Berechnungsvorlage aus Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 627 - 628 überschlägig zu dimensionieren. Für die vorliegenden Kenndaten ergibt sich ein Laufradaußendurchmesser von 0,7 m und eine Laufradbreite von 0,4 m. Die tatsächlichen Abmessungen der gesamten Turbine inklusive Gehäuse sind allerdings größer und nur im Zuge einer konkreten Umsetzung sowie in Absprache mit einem Hersteller zu bestimmen.

### 2) Pumpe

Wie bereits im Abschnitt zu den Systemkomponenten erwähnt, richtet sich die Auswahl der Pumpe nach dem Förderstrom von 1,0 m<sup>3</sup>/s und der Förderhöhe von 40 m. Anhand dieser Kenngrößen wird eine Maschine entsprechender Leistung in den Unterlagen eines namhaften Pumpenherstellers gesucht. Die gewählte Pumpe hat eine Höhe von ca. 1,80 m und beansprucht eine Stellfläche von ca. 2,00 m x 2,00 m.

### 3) Motorgenerator

Bei der Auswahl des Motorgenerators wird analog zum System Druckluftspeicher vorgegangen. Details können dort im Abschnitt zur Auslegung und Dimensionierung nachgelesen werden. Überschlägig würde der Motorgenerator im Leistungsbereich von 231 kW eine Länge von 1,80 m, eine Breite von 0,65 m und eine Höhe von 0,90 erreichen.

---

## Sonstige Bemerkungen

### 1) Tandemsatz

Bei der maschinellen Einrichtung des Krafthauses gilt es eine Besonderheit zu beachten. Diese resultiert aus der gegebenen Fallhöhe, welche im Gegensatz zu herkömmlichen Anlagen eine große Amplitude von beinahe 40 m zwischen Maximal- und Minimalpegel aufweist. Dies führt dazu, dass die Drehzahl der Turbine Schwankungen unterliegt, die über das Normalmaß hinausgehen. Für die Turbine selber stellt das kein Problem dar, wohl aber für den angeschlossenen Generator, der ohne Gegenmaßnahme Strom veränderlicher Frequenz und Amplitude erzeugen würde. Für diesen fände sich allerdings kein Abnehmer. Wie aus dem vorherigen System Hubspeicher bekannt, könnte man diesem Problem mit einer nachgeschalteten Leistungselektronik begegnen. Eine konstruktive Parallele findet sich beim Bau von Windrädern, die naturgemäß mit Drehzahlschwankungen umgehen müssen und genauso verfahren<sup>1</sup>.

### 2) Wasserrecht

Wasser in Deutschland ist Allgemeingut, geschützt und kann nicht in Besitz genommen werden. Für jegliche Form der Nutzung muss das entsprechende Wasserrecht erworben werden. Generell sind die Verfahren langwierig und der Ausgang oft ungewiss<sup>2</sup>. Dieser Umstand sollte bei der Planung von neuen Pumpspeichern bekannt sein.

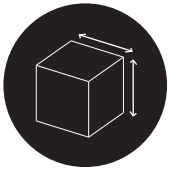
1 Vgl.: Schwab, Adolf J, 2012, S. 207 - 208

2 Vgl.: König, Felix von, und Jehle, Christoph, S. 11 - 14

## 6.5. Anforderungskatalog

### Anforderungen an das Bauwerk

### Wasserreservoir



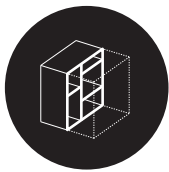
#### Dimensionen

##### » Höhe des Bauwerks

Die potentielle Energiemenge aus der Wasserkraftnutzung ist abhängig von der effektiven Fallhöhe und der Gesamtmenge Wasser im Speicher. Mit zunehmender Höhe des Bauwerks geht also eine Steigerung der Speicherkapazität einher.

##### » großer Rauminhalt

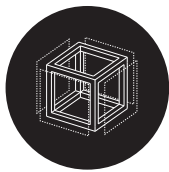
Wie zuvor erwähnt, fließt neben der effektiven Fallhöhe gleichermaßen die Menge Wasser in die Ermittlung der potentiellen Energiemenge ein. Geht man davon aus, dass der Rauminhalt des Bauwerks vollständig oder zumindest in großen Teilen geflutet wird, ist die Kapazität und damit die Wirksamkeit des Speichers unmittelbar an dessen Größe gebunden.



#### Räumliche Gliederung

##### » offenes, störungsfreies und im Querschnitt konstantes Vertikalvolumen / Volumina

Für den Be- und Entladevorgang des Reservoirs ist es von Vorteil, wenn das zu befüllende Volumen oder die zu befüllenden Volumina einen gleichbleibenden Querschnitt aufweisen und keine signifikanten Störungen, Hindernisse oder Dergleichen aufweisen. Dies garantiert den gleichmäßigen sowie vollständigen Zu- und Ablauf der Wassermassen.



#### Tragwerk und Konstruktion

##### » Flächentragwerke sind gegenüber Stabtragwerken zu bevorzugen

Die Wassersäule im Speichervolumen bringt auf die Umfassungswände eine Flächenlast auf, die vom Oberwasserspiegel bis zur Sohle pro Meter um  $10 \text{ kN/m}^2$  ansteigt. Verständlicherweise empfehlen sind Flächentragwerke gegenüber Stabtragwerken für den oben beschriebenen Lastfall.

##### » Tragwerke mit formaktiver Komponente

Für den Pumpspeicher gilt sinngemäß das, was zu diesem Punkt beim Druckluftspeicher ausgeführt wird.

##### » Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen sind gegenüber Mauerwerks- oder Mischkonstruktionen zu bevorzugen

Geht man davon aus das Eignungskriterium der Dimension ist erfüllt, das Bauwerk verfügt also über eine entsprechende Höhe und den erforderlichen Rauminhalt, stellt die resultierende Flächenlast aus der Wassersäule eine über das Normalmaß hinausgehende Belastung dar. Diese beträgt bei einer Bauwerkshöhe von 40 m immerhin  $400 \text{ kN/m}^2$ . Zum Vergleich sei an dieser Stelle auf den Anforderungskatalog der Druckluftspeicherung verwiesen. Stahl- und Stahlbetonkonstruktionen zählen erwiesenermaßen zu den leistungsfähigsten Bauweisen. Für Flächenlasten, die sich in der Größenordnung von mehreren 100 kN bewegen, sind sie alternativen Konstruktionsformen, wie etwa dem Mauerwerk, überlegen.

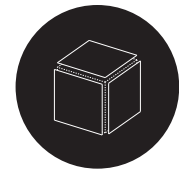
---

## Hülle

---

» *möglichst kleiner Öffnungsanteil, Wasserdichtigkeit*

Öffnungen in der Bauwerkshülle müssen im Zuge einer Ertüchtigung verschlossen werden, sonst kommt es zwangsläufig zum Austreten des im Speicher befindlichen Wassers. Ein möglichst kleiner Öffnungsanteil reduziert den dafür erforderlichen Aufwand. Bei der Wasserdichtigkeit tun sich Parallelen zur Druckluftspeicherung und der Forderung nach einer luftdichten Umfassung auf. Auch für die Wasserdichtigkeit gilt: es ist fraglich auf ein Objekt zu treffen, dass dieser Anforderung vollends gerecht wird. Im Gegensatz zur Luftdichtigkeit existieren aber bewährte Lösungen, u.a. bietet die chemische Industrie verschiedene Abdichtungsverfahren an. Schließlich ist der Bau von Flüssigkeitsbehältern nicht neu. Erprobte Verfahren finden sich auch bei der Konstruktion von Trinkwasserbehältern.



---

## Anforderungen an den Kontext

---

## Wasserreservoir

» *keine*

---

## Anforderungen an das Bauwerk

---

## Maschinenhaus

» *keine*

---

## Anforderungen an den Kontext

---

## Maschinenhaus

### Flächen

» *Fläche am Gewässer*

Das Krafthaus vereint die Wasserfassung, den Turbinenabfluss über das Saugrohr und den Tandemsatz in einem kompakten Neubau. Funktional sollte dieser unmittelbar am Ufer des benachbarten Gewässers platziert werden, eine Fläche entsprechender Größe muss dafür zur Verfügung stehen. Abhängig von der Lage des Bauwerks, kann diese auch mit dem Bauwerk zusammenfallen oder sich mit diesem überschneiden.



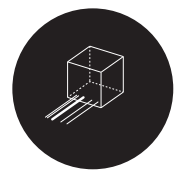
---

## Infrastruktur

---

» *Lage an einem stehendem Gewässer*

Zum Betrieb eines Pumpspeicherkraftwerkes ist es zwingend notwendig, dass sich im näheren Umfeld, bestenfalls unmittelbar am Bauwerk, ein Gewässer befindet, welches über ein nutzbares Fassungsvermögen verfügt. Stehende Gewässer, wie z.B. die Becken von Binnenhäfen oder Ähnliches, sind gegenüber Fließgewässern klar zu bevorzugen, weil hier die zuvor beschriebene Problematik jener schädigender, fester Schwebstoffanteile entfällt. Dies ermöglicht eine vereinfachte Ausführung der Wasserfassung<sup>1</sup>.



---

1 Vgl.: Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil, 2014, S. 168 - 169

## 6.6. Schlussfolgerungen

Die Pumpspeicherung vereint die drei Aspekte hohe technische Reife, akzeptable Energiedichte und moderater Aufwand zu einem ausgewogenen Mix, wie man ihn bei den anderen Systemen nicht findet. In dieser Hinsicht ist die Pumpspeicherung einzigartig. Hinsichtlich der systemischen Anforderungen gibt es Parallelen zur Druckluftspeicherung und zum Hubspeicher. Auch in diesem Fall kommt den Kategorien Tragwerk und Konstruktion sowie Hülle eine besondere Bedeutung zu, allerdings in abgeschwächter Form. Zum einen rangieren die auftretenden Flächenlasten aus der Wassersäule deutlich hinter denen der Druckluftspeicherung, zum anderen ist das Herstellen wasserdichter Umfassungen kein Novum, von daher besteht auch hier ein signifikanter Unterschied zur Notwendigkeit einer luftdichten Hülle. Die Anforderungen an die räumliche Gliederung entsprechen in ihren Grundsätzen denen des Hubspeichers und sind ähnlich zu bewerten. Alleinstellungsmerkmal ist die zwingende Anforderung an den Kontext, der bei Schwungrad, Hub-, und Druckluftspeicher, wenn überhaupt, nur fakultative Anforderungen benennt.



# Kapitel III Typen

## 1.0 Bauwerke

Wie bereits in der allgemeinen Einführung angedeutet, stehen der Industrie- und Militärbau im Fokus der nachfolgenden Untersuchung. Die Arbeit nimmt also eine nutzungsbezogene Einschränkung vor, da andere Kategorien von Bauwerken, wie beispielsweise Wohn-, Büro- oder Kulturbauten etc., nicht Gegenstand der Betrachtung sind. Ausgangspunkt ist zunächst die Hypothese, dass in den besagten Kategorien des Industrie- und Militärbaus ein hoher Fundus potenziell geeigneter Bauwerke existiert, womit eine Analyse aussichtsreich und im Sinne der Arbeit Erfolg versprechend erscheint. Diese Annahme beruht jedoch nicht auf bloßer Spekulation, sondern auf folgendem Hintergrund: Zunächst sind Begriffe wie Abriss, Brache und Konversion untrennbar mit vormals industriell oder militärisch genutzten Flächen verbunden. Es gibt eine Vielzahl bereits umgenutzter oder noch in Konversion befindlicher Industrie- und Militärräume. Prominentes Beispiele ist die Zeche Zollverein im Ruhrgebiet, wo im Rahmen der Internationalen Bauausstellung Emscher Park auch einige nennenswerte Einzelobjekte wie der Gasometer Oberhausen und die Jahrhunderthalle Bochum eine Revitalisierung mit Leuchtturmcharakter erfahren haben<sup>1</sup>. Die Aufgabe einiger ehemals militärisch genutzter Standorte liegt vergleichsweise kurz zurück, so wurde das Areal Gateway Gardens in Frankfurt am Main vor ca. 20 Jahren von den US-amerikanischen Streitkräften geräumt<sup>2</sup>, die letzten Familien verließen das 144 Hektar umfassende Benjamin Franklin Village in Mannheim sogar erst im Jahr 2012<sup>3</sup>. All dies ist zwar kein Garant dafür tatsächlich geeignete Einzelobjekte vorzufinden, der Sachverhalt als Solches gepaart mit der hohen Diversität an Typen erhöht jedoch die Wahrscheinlichkeit auf entsprechende Referenzen zu treffen. Darüber hinaus sind es zwei existierende Bauwerke, nämlich der ‚Energiebunker‘ in Hamburg und die ‚Wesermühlen‘ in Hameln, welche eine wesentliche Inspirationsquelle für die Arbeit darstellen, überdies den in der Antragsphase gesetzten typologischen Fokus untermauern. Der Energiebunker in Wilhelmsburg als prototypisches Beispiel einer Umnutzung vom ehemaligen Militärbauwerk zum Energiespeicher mit quartiersversorgender Funktion, die Wesermühlen als Zeugnis dafür, dass Leerstand im Industriebau ein wiederkehrendes und aktuelles Phänomen ist, das weder zeitliche noch örtliche Begrenzungen kennt. Nachfolgend wird sich die eingangs gestellte Hypothese in zweierlei Hinsicht bestätigen. Zum einen finden sich sowohl im Industrie- als auch im Militärbau geeignete Typen, zum anderen offenbaren typologische Überschneidungen zu den Wohn- oder Bürobauten, dass deren vorheriger Ausschluss gerechtfertigt war.



Abb. 47:  
Wesermühlen Hameln

Die Wesermühlen in Hameln wurden 2014 stillgelegt. Im Vordergrund das knapp 50 m Hohe Silo III. Das Objekt wird im nachfolgenden Kapitel zu den Pilotprojekten genauer beleuchtet.



Abb. 48:  
Energiebunker Hamburg

### 1.1. Industriebau

Der Industriebau ist ein weites Feld und die Grenzen zu anderen Nutzungskategorien zuweilen fließend. Eine Näherung kann am besten über die gewählte Systematik erfolgen, aus der auch die Definition hervorgeht. In der gesichteten Literatur finden sich drei unterschiedliche Ansätze zur Typologisierung, deren Sichtweisen auf den Industriebau mal weiter, mal etwas enger gefasst sind. In „Bauten der Industrie und Technik“ spricht Axl Föhl von „technischen Bauten und Anlagen“ und ordnet diesen drei übergreifenden Sektoren, nämlich „Produktion, Verkehr und Versorgung“<sup>4</sup> zu. In der nächsthöheren Gliederungsebene wird Produktion nach Industriezweigen, Verkehr nach Verkehrsträgern und

1 Vgl.: Fakultät Raumplanung, TU Dortmund (Hrsg.), Essen 2008, S.276f, S.288f, S.80f

2 Vgl.: <http://www.gateway-gardens.de>, 29.09.2015

3 Vgl.: <http://www.konversion-mannheim.de>, 29.09.2015

4 Vgl.: Föhl, Bonn 1994, S. 23f

Versorgung nach Versorgungsgut sektorenspezifisch präzisiert. Im Ergebnis hat man eine Typisierung, die sowohl nach dem übergeordneten, als auch dem spezifischen Zweck vorgeht. Ähnlich verfahren Bernd und Hilla Becher, wobei deren Gliederung insgesamt feiner ist, es fehlt allerdings die Metaebene. In dem Werk „Anonyme Skulpturen - Eine Typologie technischer Bauten“<sup>1</sup> beispielsweise findet man folgende Typen: Kalköfen, Kühltürme, Hochöfen, Fördertürme, Wassertürme, Gasbehälter und Silos. In „Typologien“<sup>2</sup> wird analog verfahren. Aufgeführt werden Wassertürme, Kühltürme, Gasbehälter, Fördertürme, Aufbereitungsanlagen, Kies- und Schotterwerke, Kalköfen, Getreidesilos, Kohlebunker, Hochöfen und Fabrikhallen. Die Typisierung ist dabei weitestgehend konsistent, lediglich bei den Typen der Silos und Fabrikhallen würde man eine präzisere Einordnung erwarten. Im Falle der Silos nach dem Gut, bei den Fabrikhallen nach der Art der Produktion oder dergleichen. Zudem kann man darüber streiten, ob die Begriffe Turm, Behälter, Bunker und Fabrikhalle einer zweckgebundenen oder eher einer architektonischen Einordnung entsprechen, einen Ansatz, den Walther Henn, „der Nestor des deutschen Industriebaus“<sup>3</sup>, verfolgt. In „Bauten der Industrie“<sup>4</sup> unterscheidet er zwischen Geschossbauten, Hallenbauten, Flachbauten und Sonderbauten. Zu den Sonderbauten zählen dabei u.a. Behälter, Türme, Brücken, Masten und Rohrleitungen. Gesondert erwähnt Henn die „zusammengesetzten Baukörper“, welche einer eigenen Kategorie bedürfen und sich in der Fügung auf die o.g. Standardtypen zurückführen lassen. Abb. 49 bereitet die Typisierungen in tabellarischer Form auf und stellt den Übergang zur eigenen Systematik her.

1) Walther Henn		Ebene 01	-
Industriebauten		Geschossbauten	
		Flachbauten	
		Hallenbauten	
		Sonderbauten	
		konstruktiv / architektonisch	
2) Bernd und Hilla Becher		Ebene 01	-
Technische Bauten		Kalköfen	
		Kühltürme	
		Hochöfen	
		Fördertürme	
		Wassertürme	
		Gasbehälter	
		Silos	
		zweckbezogen / funktional	

1 Vgl.: Becher, Bernhard und Hilla, Düsseldorf 1970

2 Vgl.: Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen (Hrsg.), München [u.a.] 2003

3 Vgl.: Ackermann, Kurt, Jockers, Michael, Bartenbach, Christian, Stuttgart 1993

4 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955

3) Axl Föhl	Ebene 01	Ebene 02
Technische Bauten und Anlagen	Produktion	Bergbau Textilproduktion ...
	Verkehr	Wasserverkehr Eisenbahnverkehr ...
	Versorgung	Gasversorgung Wasserversorgung ...
	zweckbezogen / funktional	

Abb. 49:  
Tabelle Typisierungen im Vergleich

Betrachtet man die verschiedenen Typologien im Vergleich, erscheint es vor dem Hintergrund der gestellten Aufgabe folgerichtig, den architektonisch / konstruktiven Ansatz Wather Henns aufzugreifen und als Ausgangspunkt für die eigene Systematik zu nehmen. Der Abgleich systemimmanenter Anforderungen von Schwungrad-, Hub-, Druckluft- und Pumpspeicher mit den strukturellen Voraussetzungen vorhandener Bauwerkstypen kann naturgemäß nur dann gelingen, wenn die gewählte Typologie auch diesbezüglich relevante Informationen liefert. Bei der zweckbezogenen / funktionalen Systematik, wie sie Axl Föhl verwendet, ist dies nicht unmittelbar der Fall. Schließlich geben die Typen technischer Bau und Anlage der Produktion, des Verkehrs oder der Versorgung zunächst keinen Aufschluss darüber, wie sie aus struktureller Sicht beschaffen sind. Bei Bernd und Hilla Becher muss man relativieren, immerhin erlauben Typen wie der Förderturm oder der Gasbehälter den Rückschluss, dass der eine über eine entsprechend Höhe, der andere über ein entsprechendes Volumen verfügt. Dies ist aber mehr der Namensgebung als dem eigentlichen Kriterium der Typisierung geschuldet, da im Grundsatz nach wie vor einer zweckbezogenen / funktionalen Logik gefolgt wird. Anders sieht es bei den Typen aus, welche aus der Systematik Henns hervorgehen. Geschoss-, Hallen- oder Flachbauten lassen zwar als Typen die konkrete Funktion offen, implizieren im Gegenzug aber eine Reihe elementarer struktureller Eigenschaften, die schon auf den ersten Blick und ohne weitergehende Informationen ins Auge springen.

Bislang ist eine Frage offen geblieben, nämlich die nach dem Untersuchungsrahmen. Was genau heißt Industriebau? Föhl, Becher und Henn haben unterschiedliche Vorstellungen davon, welche Objekte hierunter zu verstehen sind. Während Föhl in seiner Kategorie der „Technischen Bauten und Anlagen des Verkehrs“ auch Brücken-, Tunnel-, oder Schleusenbauwerke aufführt, den Begriff also weiter fasst, beschränken sich Henn und Becher eher auf Bauten der Versorgung und Produktion, um bei Föhls Terminologie zu bleiben. Dieser Ansatz deckt sich mit dem eigenen Standpunkt. Industriebauten haben im weitesten Sinne immer etwas mit Produktionsvorgängen oder Versorgungsaufgaben zu tun. Der Einfachheit halber wird in diesem Zusammenhang auf eine weitere Unterscheidung, beispielsweise nach Infrastruktur- und Industriebauten, verzichtet. Die Grenze zwischen beiden ist so fließend, mit einer Differenzierung würden sich eher mehr Grauzonen auf tun. Einfacher ist es, den Horizont des Industriebaus auszuweiten, um dann eine klare Trennung zu den Verkehrsbauten zu schaf-

---

fen. Konkret heißt das: Brücken, Schleusen, Tunnel oder Parkhäuser sind im Rahmen dieser Promotion keine Industriebauten, Lokschuppen, Umspannwerke oder Gasbehälter schon.

### 1.1.1. Die Typen im Industriebau

Wie zuvor erläutert, bilden die drei elementaren Typen Geschoss-, Hallen-, Flachbau, sowie die Sonderbauten die Basis der vorliegenden Systematik. Ergänzend kommen der Behälter- und der Turmbau hinzu. Während diese bei Walther Henn eine untergeordnete Rolle spielen und neben Brücken sowie Schornsteinen als Sonderelemente deklariert werden<sup>1</sup>, erfahren sie im Zuge der eigenen Typfindung eine Aufwertung. Hintergrund ist das außergewöhnliche Potenzial, das sie im Rahmen der vorliegenden Forschungsfrage besitzen. Mit diesen sechs Typen ist die erste Ebene der Typologie komplett.

Ebene 01	-	-	-
Turmbau			
Geschossbau			
Flachbau			
Behälterbau			
Hallenbau			
Sonderbau			
konstruktiv / architektonisch			

Abb. 50:  
Tabelle Typologie  
1. Ebene

Eine homogene Eignungsprüfung aller Speichersysteme ist auf der Grundlage dieser Ebene jedoch nur eingeschränkt möglich. Was beim Hallen-, Flach- und Geschossbau funktioniert, ist für den Behälter- sowie den Turmbau nicht in gleicher Schärfe möglich. Dies hängt zum einen mit der hohen Diversität an Untertypen unterschiedlicher Prägung zusammen, welche Turm- und Behälterbau umfassen, zum anderen mit den gebotenen strukturellen Voraussetzungen, die einen tiefer gehenden Blick erforderlich machen. Aufgrund dessen wird die Typologie um drei zusätzliche Ebenen erweitert, wovon jedoch nur Behälter- und Turmbau gebrauch machen. Obendrein gehen diese nach einem anderen Kriterium vor, nämlich funktional / zweckgebunden, womit im Ergebnis ein Hybrid aus konstruktiv / architektonischer sowie funktional / zweckgebundener Typologisierung entsteht.

Ebene 01	Ebene 02	Ebene 03	Ebene 04
Turmbau	Kühltürme ...weitere	Nasskühltürme ...weitere	Naturzugskühler ...weitere
Geschossbau	-	-	-
Flachbau	-	-	-
Behälterbau	Flüssigkeitsbehälter ...weitere	Wasserbehälter ...weitere	Erdbehälter ...weitere
Hallenbau	-	-	-
Sonderbau	-	-	-
konstruktiv / architektonisch		zweckbezogen / funktional	

Abb. 51:  
Tabelle Ausschnitt Typologie  
1. - 4. Ebene

1 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 38

---

Spontan könnte man meinen dieses Ergebnis sei ein Widerspruch zu den Erkenntnissen aus der einleitenden Gegenüberstellung typologischer Ansätze nach Föhl, Becher und Henn. Dies ist aber nicht der Fall, denn im Kern bestätigt sich das gezogene Fazit: die Ausgangskriterien sollten konstruktiv / architektonischer Natur sein. Mit Hilfe dieses Vorgehens wird die Eignungsbemessung verkürzt, da man, ausgehend von der Prüfung der Grundtypen, selektiv und zielgerichtet vertiefen kann. Ganz unabhängig davon und dem Anspruch, alle Grundtypen in gleicher Schärfe prüfen zu wollen, hat die detaillierte Teilbetrachtung noch eine andere Bewandnis. Behälter- und Turmbau verfügen grundsätzlich über ein hohes Potenzial, was sich in der Eignung für drei der insgesamt vier Systeme, nämlich Druckluft-, Hub- und Pumpspeicher, ausdrückt. Somit ist es in jedem Fall interessant, genauer hinzuschauen. Auf der nachfolgenden Doppelseite findet sich die Typologie in der Übersicht. Ausgehend von den sechs Grundtypen, fächern sich Turm- und Behälterbau über drei Ebenen nach Untertypen auf.

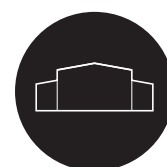
### 1.1.2. Typologische Eignungsprüfung

Die typologische Eignungsprüfung geht systematisch nach Typen und dazugehörigen Ebenen vor. Ausgangspunkt bildet die Ebene 1, mit den Grundtypen Turm-, Geschoss-, Flach-, Behälter- und Hallenbau. Abhängig vom Typ und dessen Eignung, wird die Prüfung knapp oder ausführlicher gestaltet. Für die Prüfung selbst existiert kein strenges Muster, Eckpfeiler sind die Anforderungskategorien der Systeme, also Dimension, räumliche Gliederung, Tragwerk und Konstruktion, Hülle, Flächen sowie Infrastruktur. Die Anforderungen selber können in den vorherigen Kapiteln zu den Speichersystemen nachgelesen werden.

#### Hallenbauten

- Schwungradspeicher

Hallenbauten bieten geradezu ideale Voraussetzungen zur Aufnahme von Schwungradanlagen. In der Regel handelt es sich dabei um einen oder mehrere langgestreckte Baukörper, den sogenannten Hallenschiffen, die im Querschnitt eine große Breite mit großer Höhe verbinden<sup>1</sup> (Vgl.: Abb. 53). Hallenbauten verfügen somit über ausreichend Grundfläche zur Platzierung einer adäquaten Anzahl an Modulen, zum anderen sollte die lichte Raumhöhe mehrheitlich über fünf Meter liegen, womit auch eine problemlose Wartung der Einheiten gewährleistet ist. Sowohl Flächenangebot als auch Raumhöhe resultieren aus der eigentlichen Nutzung von Hallenbauten, die typischerweise für Lagerzwecke von Stück- oder Massengut<sup>2</sup> sowie der Produktion schwerer Güter und Maschinen dienen. Diese bedingen auch einen ebenerdigen Zugang zum Hallenraum. Sehr häufig findet man stationäre Krananlagen vor<sup>3</sup>, was wiederum der lichten Raumhöhe zugute kommt. Auch Tragwerk und Konstruktion sollten den Anforder-



1 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 39  
2 Vgl.: Schramm, Werner, Wiesbaden u.a. 1965, S. 03  
3 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 38

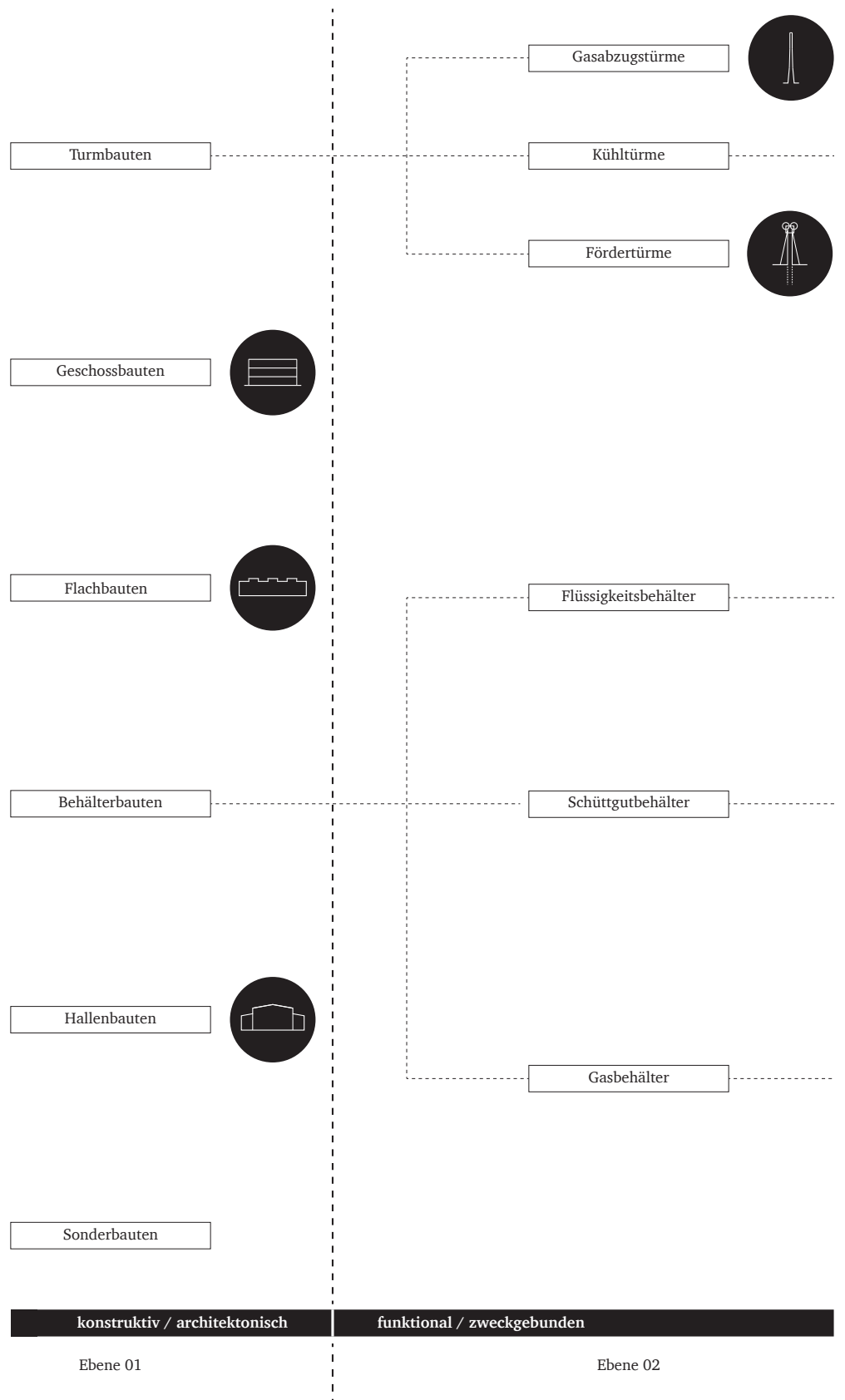
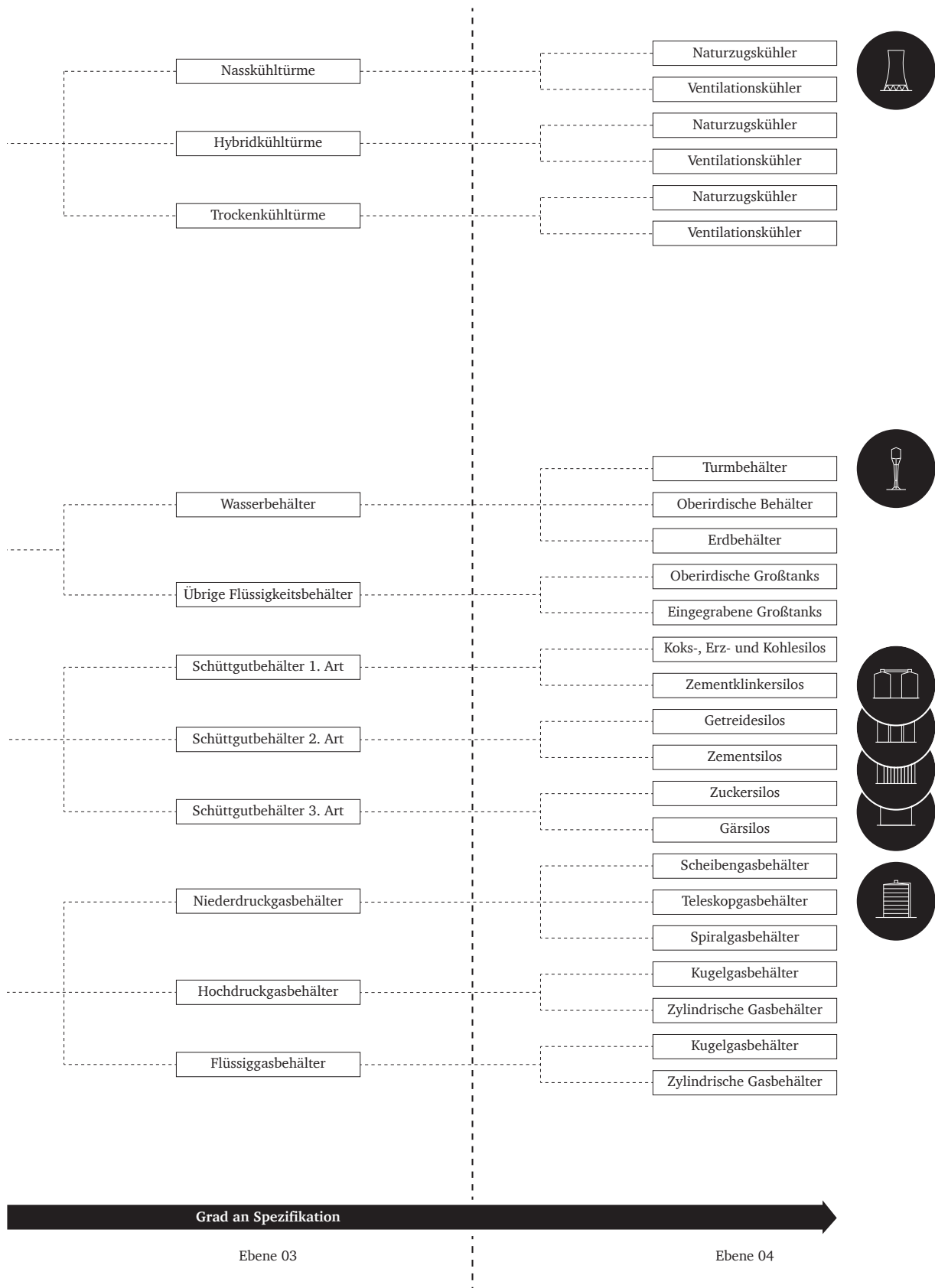


Abb. 52:  
Übersicht Typologie





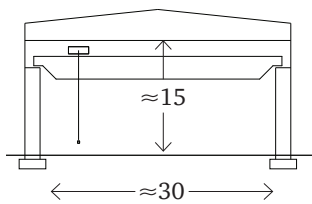


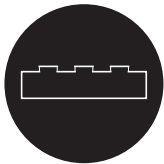
Abb. 53:  
Querschnitt Hallenbau

derungen des Schwungradsystems genügen. Es versteht sich von selbst, dass Hallenbauten als Stabtragwerke konzipiert werden und die Nutzflächen so weit wie möglich stützenfrei bleiben. Die zuvor genannten Nutzungsbeispiele lassen außerdem den Schluss zu, dass man mit Lasten hantiert, die mindestens genauso oder deutlich schwerer als das Schwungrad sein sollten.

Die unmittelbare Anbindung an einen Verkehrsträger, der bis in den Hallenbau hineinführt ist keine Seltenheit, was den systemischen Anforderungen an die vorhandene Infrastruktur entgegenkommt. Hierbei soll nochmalig auf die zuvor erwähnten Nutzungen verwiesen werden, bei denen eine derartige Anbindung aus logistischen Gründen häufig von Vorteil wenn nicht sogar zwingend erforderlich ist.

- Hubspeicher, Druckluftspeicher und Pumpspeicher

Hallenbauten bieten für die übrigen Speichersysteme keinerlei passende Voraussetzungen. Weder verfügen sie über ausreichend Höhe, entsprechend proportionierte Vertikalräume, umschlossene Volumina oder die erforderlichen statischen Gegebenheiten.



**Flachbauten**

- Schwungradspeicher

Die Grenze zwischen Hallen- und Flachbau ist fließend. Im Gegensatz zu den Hallenbauten, die eher zu schmalen, langgestreckten Baukörpern neigen, entwickeln sich Flachbauten bei geringerer Höhe gleichmäßiger in der Länge und in der Breite. Wenn man Krananlagen vorfindet, sind diese weniger leistungsfähig, was u.a. damit zusammenhängt, dass man bestrebt ist große Flächen mit sehr leichten Bauweisen zu überdachen<sup>1</sup>. Während Hallenbauten auch oder häufig primär über die hohen Seitenflächen belichtet werden, findet man bei Flachbauten Dachlichter unterschiedlichster Prägung vor. Für die Eignungsprüfung ist nur das Kriterium der lichten Raumhöhe relevant, alle anderen Voraussetzungen können mit den Hallenbauten gleichgesetzt werden. Da diese in der Regel etwas niedriger ausfällt und in einigen Beispielen<sup>2</sup> unter fünf Meter liegt (Abb. 54), kann den Flachbauten eine hohe, wenn auch geringfügig abgeschwächte Eignung für den Einsatz von Schwungradspeichern gegenüber den Hallenbauten attestiert werden.

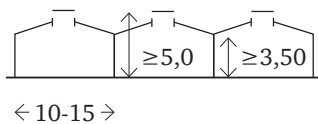


Abb. 54:  
Querschnitt Hallenbau

- Hubspeicher, Druckluftspeicher und Pumpspeicher

Für die Flachbauten gilt das Gleiche wie für die Hallenbauten. Sie sind für die übrigen Systeme nicht geeignet.



**Geschossbauten**

- Schwungradspeicher, Hubspeicher, Druckluftspeicher und Pumpspeicher

Die Prüfung der Geschossbauten kann relevant knapp ausfallen, da sie augenscheinlich für keines der betrachteten Speichersysteme passende Voraussetzungen bieten. Ausgelegt für den leichten und mittelschweren Betrieb, findet im Geschossbau die Verarbeitung oder die Produktion auf mehreren Ebenen

1 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 119  
2 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 174 -175

statt, beispielhaft kann es sich dabei um Betriebe aus der feinmechanischen, der optischen oder der Genussmittelindustrie handeln<sup>1</sup>. Unmittelbar ausschließen kann man eine Eignung für die Systeme Hub-, Druckluft- und Pumpspeicher. U.a. fehlt es an durchgängigen Vertikalräumen, ausreichender Höhe und störungsfreien Volumina entsprechender Kapazität. Darüber hinaus sind die Seitenflächen zu Belichtungszwecken meist vollständig verglast, die Hülle ist also das Gegenteil von geschlossen. Schwungräder können, insofern es die vorhandene Raumhöhe zulässt, wenn überhaupt nur im Erdgeschoss platziert werden, womit zwangsläufig die Frage nach der Nutzung der übrigen Ebenen aufkommt. Schlussendlich fehlt es also auch hier an geeigneten Voraussetzungen.

## Turmbauten

- Schwungradspeicher

Die Turmbauten erfordern eine tiefer gehende Betrachtung. Die Prüfung wird anhand von Untertypen vollzogen, welche Bestandteil der Ebenen zwei und vier sind. Dies betrifft allerdings nur die Systeme Hub-, Druckluft- und Pumpspeicher, ausschließen kann man an dieser Stelle bereits die Schwungradspeicher. Entscheidende Charakteristika des Turmbaus sind seine außerordentliche Höhe, gepaart mit einem schlanken Format. Abhängig von den Ausmaßen des Turmes hat man es entweder mit einer verhältnismäßig kleinen Grundfläche zu tun, die nicht genügend Raum für eine adäquate Anzahl Schwungradmodule bietet, oder diese ist zwar ausreichend groß, aber das darüber befindliche Volumen bleibt ungenutzt. Auch wenn der Turm über Geschossebenen verfügt, sind diese für eine potenzielle Schwungradanlage aufgrund ihrer problematischen Zugänglichkeit nicht zu gebrauchen.

## Turmbauten | Gasabzugstürme

- Hubspeicher, Druckluftspeicher und Pumpspeicher

Die Gasabzugstürme tauchen der Vollständigkeit halber, nicht aufgrund ihrer Relevanz, innerhalb der typologischen Untersuchung auf. Wichtigster Vertreter dieser Gruppe sind die Industrieschornsteine. Bei Höhen zwischen 100 und 200 m entstehen Schaftvolumen von ca. 1000 bis 6000 m<sup>3</sup><sup>2</sup>. Während die Druckluftspeicherung vor allem aus statischer Sicht ausscheidet, sind die durchschnittlich erzielten Volumina für die Pumpspeicherung zu klein. Im direkten Vergleich bieten Silos bei geringerer Höhe, aber deutlich größerem Volumen, bessere Voraussetzungen an, nicht zuletzt aufgrund ihrer Affinität zur Lage am Wasser. Im Falle des Hubspeichers sprechen vier Argumente gegen eine Umnutzung. Erstens sind Wartung und Montage problematisch, da man es mit einer großen Höhe zu tun hat, bei der eine vollwertige Form der Erschließung fehlt. Zweitens verfügen Schornsteine nicht über einen konstanten Querschnitt, dieser ändert sich über die Höhe<sup>3</sup>. Drittens ist der Schornstein streng genommen eher ein Einzelobjekt, womit die Möglichkeit zur Multiplikation des Hubspeichers entfällt. Viertens ist es äußerst fraglich, ob die schlanke Konstruktion des Schornsteins 100 Tonnen Hubgewicht kompensieren kann, insbesondere dann, wenn sich dieses bei geladenem Speicher an der höchsten und damit schlankesten Stelle der Schaftwandung<sup>4</sup> befindet.

1 Vgl.: Henn, Walther, Band 1, München 1955, S. 38

2 Vgl.: Götzen, Wilhelm, Essen 1976, S. 12.

3 Vgl.: Götzen, Wilhelm, Essen 1976, S. 60

4 Vgl.: Götzen, Wilhelm, Essen 1976, S. 153

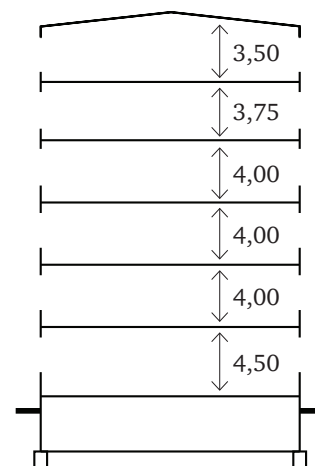


Abb. 55:  
Querschnitt Geschossbau





### Turmbauten | Fördertürme

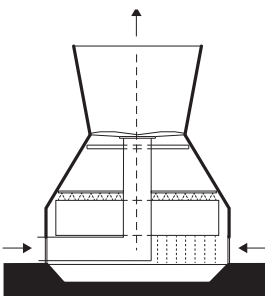
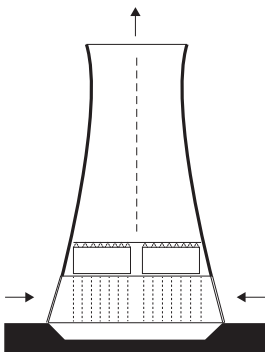
- Hubspeicher

Ähnlich wie die Gasabzugstürme werden die Fördertürme im Rahmen dieser Arbeit eher knapp behandelt. Grund dafür ist aber nicht ihre mangelnde Eignung, sondern der Ursprung dieser. Streben- und Turmgerüste<sup>1</sup>, wie sie fachlich korrekt bezeichnet werden, erscheinen zunächst für eine Umnutzung als Hubspeicher prädestiniert. Allerdings hat dies in erster Linie mit dem Förderschacht darunter zu tun, den sie bedienen oder bedient haben, statt mit dem Turmbauwerk selbst. Eine kombinierte Betrachtung von Schacht und Turm soll jedoch an anderer Stelle erfolgen. Im Kontext dieser Arbeit steht der eigentliche Turm im Fokus, dem, für sich betrachtet, nur eine geringe Eignung bescheinigt werden kann. Zwar erreichen die Türme Höhen zwischen 30 und 70 m<sup>2</sup>, strukturell fehlt es allerdings an der Möglichkeit zur Multiplikation der Hubeinheiten, die entscheidend zur Steigerung der Speicherkapazität beitragen kann.



### Turmbauten | Kühltürme | Nasskühltürme | Naturzugskühler

Die Kühltürme stellen eine aussichtsreiche Gruppe von Typen dar. Vorbehaltlich einer genauen Prüfung, könnten sie aufgrund ihrer baulichen Eckdaten hinsichtlich Volumen, Höhe und Tragkonstruktion für die Hub-, Druckluft- und Pumpspeicherung interessant sein. Darüber hinaus ist perspektivisch damit zu rechnen, daß Kühltürme mit der vermehrten Stilllegung fossil oder nuklear betriebener Großkraftwerke brach fallen. In der Entwicklung von Nachnutzungsoptionen besteht also Forschungsbedarf<sup>3</sup>.



Kühltürme unterscheidet man zunächst nach ihrem Medium in Nass-, Trocken- und Hybridkühler, sowie nach dem Verfahren in Naturzugs- und Ventilationskühler. Dabei verwenden Nasskühler Wasser als Kühlmittel, Trockenkühler Luft, während Hybridkühler mit einer Kombination aus beiden Medien arbeiten. Beim Kühlverfahren setzen Naturzugskühler ausschließlich auf die natürliche Konvektion im Turm, Ventilationskühler hingegen unterstützen diese durch einen Ventilator<sup>4</sup>. Bei der folgenden Eignungsprüfung kann man sich auf die Nass- und Hybridkühltürme, in Form der Naturzugskühler beschränken. Funktional bedingt verfügen diese, bei vergleichbaren Volumen, über die größte Höhenentwicklung aller Untertypen. Sie haben also eignungstechnisch betrachtet die günstigste Verteilung beider Parameter (Vgl.: Abb. 56). Weiterhin existiert eine Infrastruktur zur Bereitstellung des Kühlmediums Wasser, was für die Pumpspeicherung von essentieller Wichtigkeit ist. Stellvertretend für beide wird nachfolgend vom Nasskühlturm bzw. dem Naturzugskühler gesprochen.

- Hubspeicher

Für eine Eignung als Hubspeicher sprechen die Höhe und der durchgängige Vertikalraum. Allerdings ist das Kriterium der Schlankheit nicht erfüllt, der Turm ist bei der gegebenen Höhe zu breit (Vgl.: Abb. 57). Wesentlich bessere Voraussetzung, hinsichtlich des Kriteriums Multiplikation, bieten Silobauten.

Abb. 56:  
Querschnitte Naturzugs- und Ventilationskühler

1 Vgl.: Buschmann, Walter, Berlin 1998, Typologie im rückseitigen Einband.  
2 Vgl.: Hermann, Wilhelm und Gertrude, Königstein im Taunus 2003  
3 Vgl.: <http://www.hubspeicher.de>, 28.10.2015  
4 Vgl.: Hampe, Erhard, Berlin 1975, S. 34 - 37

- Druckluftspeicher

Offenkundig handelt es sich beim Naturzugskühler um kein wirklich geschlossenes Volumen, was seine Eignung als Druckluftspeicher entscheidend schwächt. Sowohl die aufgelöste Sockelzone, als auch der gesamte Deckel des Turmes müssten im Zuge einer Umnutzung luftdicht verschlossen werden. Aller Voraussicht nach ist es mit diesen Ertüchtigungsmaßnahmen aber nicht getan, denn das eigentliche Problem liegt in der Statik begründet. In der Regel hat man es bei Naturzugskühlern mit sogenannten Hyberboliden<sup>1</sup> zu tun, hocheffiziente, formaktive Tragwerke, die aber nur für den Fall der Eigen- und Windlast<sup>2</sup> ausgelegt sind. Ein Blick in die Bautabellen genügt, um diese mit den auftretenden Flächenlasten aus der Druckluftspeicherung in Relation zu setzen. Die Windlast beispielsweise wird über den Staudruck „q“ und den aerodynamischen Beiwerten „c<sub>f</sub>“ bzw. „c<sub>p</sub>“ ermittelt. Abhängig von der Höhe des Bauwerks und der damit verknüpften Windgeschwindigkeit beträgt der Staudruck „q“ zwischen 0,5 kN / m<sup>2</sup> und 1,3 kN / m<sup>23</sup>. Die auftretenden Flächenlasten aus der Druckluftspeicherung dagegen betragen 1600 kN / m<sup>2</sup> bis 3200 kN / m<sup>2</sup>. Diese Gegenüberstellung führt einem die Verhältnismässigkeiten vor Augen. Selbst bei hohen Gebäuden zwischen 20 m und 100 m, wo der Maximalwert von 1,3 kN / m<sup>2</sup> gilt, liegt zwischen beiden Flächenlasten ein Faktor von 2000. Diese große Diskrepanz, gepaart mit den Eingangs geschilderten Unzulänglichkeiten, führen zu dem Schluss den Kühlturm als ungeeignet einzustufen.

- Pumpspeicher

Zwar stellt sich auch beim Pumpspeicher zuerst die Frage nach der statischen Eignung, allerdings in abgeschwächter Form. Bei einer durchschnittlichen Kühlturmhöhe von 80 m (Abb. 57) beträgt die Druckkraft aus der Wassersäule auf halber Höhe 400 kN / m<sup>2</sup>, am tiefsten Punkt des Turmes 800 kN / m<sup>24</sup>. Nimmt man die mittlere Druckkraft von 400 kN / m<sup>2</sup> als Bezugsgröße, achteln sich die Anforderungen der Druckluftspeicherung, während man etwa um den Faktor 300 über den beschriebenen Windlasten liegt. Ohne Ertüchtigungsmaßnahmen wird man demnach auch hier nicht auskommen, wozu im Übrigen auch die Abdichtung der Turminnenflächen gehört, ein Aspekt, der im folgenden Kapitel zu den Pilotprojekten genauer erläutert wird. Dennoch hat die Nutzung als Pumpspeicher Vorzüge. Weder Hub- noch Druckluftspeicher sind auf die vorhandene Infrastruktur zur Fassung des Kühlwassers angewiesen, der Pumpspeicher hingegen kann diese nutzen, sie stellt sogar ein entscheidendes Eignungskriterium dar. Auch die Frage nach der Ertüchtigung ist zu relativieren. Großkraftwerke verfügen in der Regel über mehrere Kühltürme des gleichen Typs, eine entwickelte Maßnahme kann also gleich mehrfach angewandt werden. In Anbetracht der großen Menge potenzieller Energie, die man theoretisch in einer Gruppe Türme speichern kann (Vgl.: Abb. 59), bleibt die Option Pumpspeicher trotz gegebener Widrigkeiten interessant.

Aussenabmessungen	
Höhe [m]	Breite [m]
64	43
73	53
74	58
85	62
91	65
94	71

Abb. 57:  
Beispielhafte  
Aussenabmessungen von  
Kühltürmen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Wandungsstärken	
Höhe [m]	Stärke [m]
140	0,20
138	0,30
114	0,23
114	0,13
100	0,13

Abb. 58:  
Beispielhafte  
Wandungsstärken von  
Kühltürmen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Szenario Pumpspeicher
Kühlturm [B * H] 65 m * 90 m
ca. 300 000 m <sup>3</sup> Volumen
Potentielle Energie
ca. 30 MWh
Bei 4 Türmen
ca. 120 MWh

Abb. 59:  
Szenario Kühlturm als  
Pumpspeicher

1 Vgl.: Hampe, Erhard, Berlin 1975, S. 51  
 2 Vgl.: Hampe, Erhard, Berlin 1975, S. 122  
 3 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.], 2001, S. 3.20f.  
 4 Zur Berechnung siehe Anforderungskatalog Pumpspeicher S.??

## Behälterbauten

- Schwungradspeicher

Beim Behälterbau handelt es sich um den Typus mit der größten Diversität, was sich mit Blick auf die Systematik in der Vielzahl an Untertypen ausdrückt. Generell werden diese nach der Art des gefassten Gutes und dem Umgang mit diesem unterschieden. Trotz großer Varianz ist es anhand der verbindenden, gemeinsamen Grundmerkmale möglich, neben einer Eignung für Hub-, Druck- und Pumpspeicher, eine mangelnde Eignung für das System Schwungrad auszusprechen. Egal um welchen Untertypen es sich konkret handelt, bietet keiner brauchbare Flächenkontingente an, die für eine Schwungradanlage in Frage kämen. Einmal ist es die unzureichende Größe der Fläche, wie beim Turmbehälter, ein anderes Mal die fehlende Zugänglichkeit, wie bei fast allen Silotypen, die eine entsprechende Nutzung erschweren bzw. ausschließen.



### Behälterbauten | Flüssigkeitsbehälter | Wasserbehälter | Turmbehälter

- Hubspeicher

Die Turmbehälter, besser bekannt unter dem Begriff der Wassertürme, sind bzw. waren lange Zeit ein Bestandteil des Trinkwasserversorgungssystems in Deutschland. Ursprünglich übernahmen sie zwei Funktionen. Zum einen dienten sie der Aufrechterhaltung des erforderlichen Druckes im Trinkwassernetz, zum anderen der Pufferung zwischen Erzeugung und Verbrauch<sup>1</sup>. Wassertürme gab es in einer Mannigfaltigkeit unterschiedlichster Typen, die sich in der Konstruktionsweise und funktionalen Details unterschieden haben. Ein Blick in die Werke Bernhard und Hilla Bechers lohnt in diesem Kontext auf jeden Fall. Für das System Hubspeicher sind sie allerdings ungeeignet. Sinngemäß entsprechen die Ausschlusskriterien denen des Förderturms und können auf der vorherigen Seite nachgelesen werden.

- Druckluftspeicher

Für eine Nutzung als Druckluftspeicher sprechen das geschlossene Volumen des eigentlichen Behälters, seine Dichtigkeit sowie die zylindrische oder kugelförmige Formgebung. Ausschlusskriterium ist allerdings die Kapazität. Bei Becher<sup>2</sup> findet sich eine sehr umfangreiche Sammlung dokumentierter Wassertürme. Der überwiegende Teil dieser erreicht lediglich ein Volumen, das kleiner als 1000 m<sup>3</sup> und somit ungeeignet ist.

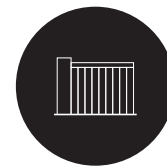
- Pumpspeicher

Es mag im ersten Moment nahe liegend sein, den Turmbehälter als Pumpspeicher zu nutzen, da er fast schon idealtypisch Volumen mit Höhe verbindet. Auch die vormalige Nutzung spricht dafür. Analog zum Druckluftspeicher sind die vorhandenen Kapazitäten allerdings zu klein.

1 Vgl.: Föhl, Axel, Bonn 1994, S. 109

2 Vgl.: Becher, Bernhard und Hilla, Passau 197, S. 415 - 424

## Behälterbauten | Schüttgutbehälter | Schüttgutbehälter 1. - 3. Art | Silos



Die Schüttgutbehälter zählen zu den leistungsfähigsten Typen in der Systematik, da sie viele Systemanforderungen bedienen. Unterschieden werden sie nach den jeweiligen Lageransprüchen des Gutes<sup>1</sup>, in erste, zweite und dritte Art (Vgl.: Abb. 60). Die sechs aufgeführten Typen sind als repräsentativer Querschnitt zu verstehen, naturgemäß gibt es auch hier Sonderfälle, welche jedoch nicht alle genannt werden können. Unter dem Begriff Getreide (-silo) fallen eine Reihe weitere landwirtschaftliche Erzeugnisse nämlich Weizen, Roggen, Gerste, Hafer, Hirse, Mais und Reis<sup>2</sup>. Nachfolgend werden die verschiedenen Silotypen im direkten Vergleich betrachtet, was es erleichtert die mitunter feinen Eignungsdifferenzen herauszuarbeiten.

- Hubspeicher

Einige der Silobauten bieten für die Hubspeicherung geradezu idealtypische Voraussetzungen an. Vorab ausschließen kann man die Koks-, Erz und Kohlesilos sowie die Gärsilos. Bei Ersteren handelt es sich strenggenommen um einen Sondertyp, der mehrere kleine Behälter in einem Turm vereint, die zuletzt aufgeführten Gärsilos sind verhältnismäßig klein und selten größer als 20 m<sup>3</sup>. Für die übrigen Untertypen gilt, dass diese fast ausnahmslos einen durchgängigen Vertikalraum bieten, überwiegend aus Stahlbeton konstruiert sind und alle Bauwerke eine entsprechende Kapazität, also Größe, hervorbringen<sup>4</sup>. Im weiteren Vorgehen sind die Höhe, die Schlankheit, sowie die Anzahl, das Format und die Verteilung der Silozellen eignungsrelevant. Die hervorstechenden Merkmale von Zementklinker-, Getreide-, Zement- und Zuckersilos gehen aus der Gegenüberstellung in Abb. 61 hervor.

Schüttgutbehälterarten	
1.	Lagern - Schützen
2.	Lagern - Schützen
	Pflegen - Erhalten
3.	Lagern - Schützen
	Pflegen - Erhalten
	Aufbereiten - Verändern

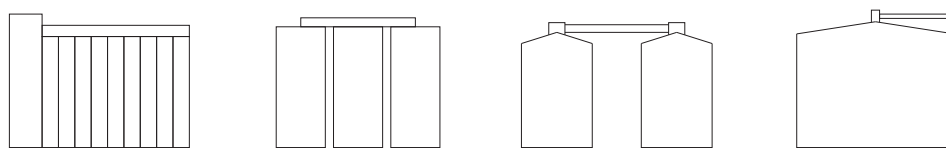
Abb. 60:  
Schüttgutbehälterarten

Abb. 61:  
Formate Silotypen

Abb. 62:  
Tabelle Silotypen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Zellenhöhe [m]  
Zellendurchmesser [m]  
Zellenschlankheit [ - ]



Getreidesilos			Zementsilos			Zementklinkersilos			Zuckersilos		
min	max	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø	min	max	Ø
35	49	42	45	52	48,5	41	50	45,5	35	55	45
8	11	9,5	15	20	17,5	25	32	28,5	20	55	37,5
4,4	4,5	4,4	3	2,6	2,8	1,6	1,6	1,6	1,8	1	1,2

Diese Abbildung verdeutlicht, dass die Durchschnittshöhen der verschiedenen Untertypen relativ nah beieinander liegen, während die Spannweite beim Zellendurchmesser und der resultierenden Schlankheit sehr groß ist. Die besten Voraussetzungen bieten hierbei eindeutig die Getreidesilos. Abhängig vom tatsächlich ausgeführten Zellendurchmesser könnten vereinzelt auch Zementsilos in Frage kommen, durch das Raster fallen jedoch Zementklinker- und Zuckersilos. Schaut man im nächsten Schritt auf die Format- und Fügungsalternativen der Silozellen in Abb. 63<sup>5</sup>, so ist die Passung bei den Varianten eins bis drei

1 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 1, Berlin 1987, S. 35  
 2 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 2, Berlin 1991, S. 180  
 3 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 2, Berlin 1991, S. 227  
 4 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 2, Berlin 1991, Grafik S. 32  
 5 Vgl.: Schramm, Werner, Wiesbaden u.a. 1965, S. 207 - 208

gleichdeutend hoch, während Variante vier die nächstschwächere und die Varianten fünf und sechs die schwächste Eignung besitzen. Hintergrund ist die Anforderung an die Multiplizierbarkeit des Hubspeichers, der Zellen gleicher Größe und Formates nachfragt. Die zwischen den großen Hauptzellen befindlichen kleineren „Zwickelzellen“, der Varianten vier bis sechs, stehen im Widerspruch zu diesem Prinzip.

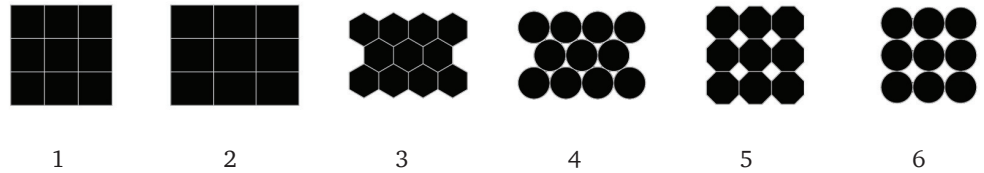


Abb. 63:  
Zellenformate

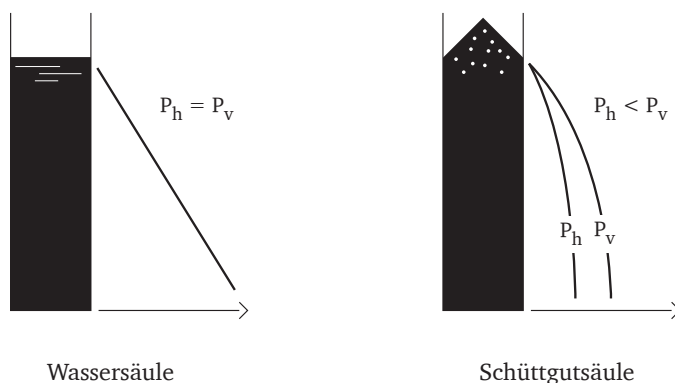
- Druckluftspeicher

Will man Silos zur Druckluftspeicherung nutzen, wird es primär um die Frage nach deren statischer Eignung gehen. Somit setzt sich fort, was bereits als Tendenz bei den vorausgegangenen Typen erkennbar war. Diesen Rückschluss erlaubt der Blick auf die Schüttgutlasten in Abb. 67. Auch im Falle der Silos liegen Auslegung und systemische Anforderung relativ weit auseinander. Wenn überhaupt, kommt man nur bei Zement- und Zementklinker in Bereiche, wo man über eine Ertüchtigung nachdenken kann. Dabei gilt es immer noch einen mittleren Faktor von zehn zu kompensieren. Hinzu kommen der Verschluss und die luftdichte Ausführung der Bauwerke. Abschließend kann man sagen, dass die Silobauten nicht gänzlich ungeeignet sind, sich aber nur schwach empfehlen. Gegenüber den Kühlturmbauten, welche eignungsstechnisch ausgeschlossen wurden, besitzen sie den Vorzug der größeren statischen Belastbarkeit.



- Pumpspeicher

Für die Pumpspeicherung bieten Silos ähnlich gute Voraussetzungen wie für den Hubspeicher. Einige Anforderungen decken sich, wie etwa die nach einer Mindestgröße und -höhe, bei anderen, wie der Schlankheit oder dem Zellenformat, unterscheiden sich die Systeme allerdings. Prinzipiell ist es für die Funktion des Pumpspeichers irrelevant, ob man ein schlankes oder weniger schlankes Zellenformat vorfindet. Kleinere Zellen bedeuten allerdings mehr Wandungsquerschnitt. Bei identischen Außenabmessungen des Silos reduziert sich dadurch das Innenvolumen, womit die speicherbare Energiemenge sinkt. Ganz unabhängig vom Querschnitt, der Höhe oder der Anzahl der Zellen, ist in diesem Zusammenhang deren statische Belastbarkeit von Interesse. Zunächst hängt diese unmittelbar mit den Eigenschaften des Silogutes zusammen, welches Grundlage der ursprünglichen Bemessung war. Schaut man sich die Wichten einiger ausgewählter Schüttgüter in Abb. 64 an, so liegen Getreide und Zucker knapp unter, Zement- und Zementklinker deutlich über der von Wasser. Daraufhin kann man jedoch nicht unmittelbar auf die statische Eignung schließen. Die unterschiedlichen Lastverhalten von Schüttgut- und Wassersäule bedingen eine differenziertere Betrachtung.



Während der Druck aus der Wassersäule linear bis zum niedrigsten Punkt des Behälters ansteigt, verhält sich die Druckkraft aus der Schüttgutsäule im Anstieg degressiv und strebt einem Grenzwert entgegen<sup>1</sup>. Die kritische Bemessungsgröße bei der Auslegung einer Silozelle ist der horizontale Druckanteil „ $P_{he}$ “ auf die Wandung<sup>2</sup>, welcher sich beim Entleerungsvorgang einstellt. Im Gegensatz zur Wassersäule, bei der Horizontal- und Vertikaldrücke immer gleich groß sind<sup>3</sup>, ist der horizontale Druckanteil einer Schüttgutsäule stets kleiner als die vertikal auftretende Kraft. Das Verhältnis beider zueinander wird durch das sogenannte „Horizontallastverhältnis“ ausgedrückt und liegt je nach Schüttgut zwischen 0,3 und 0,6 (Vgl.: Abb. 66)<sup>4</sup>. Für die Belange der Pumpspeicherung ist die Silozelle also im doppelten Sinne unterbemessen: einmal durch die non-lineare Steigung des Druckes und zum zweiten durch das ungünstige Horizontallastverhältnis.

1 Vgl.: Schulze, Dietmar, 2014, S. 11 -15  
 2 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], 1988, S. 71f.  
 3 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], 1988, S. 41  
 4 Vgl.: Schulze, Dietmar, 2014, S. 11 -15  
 5 Vgl.: Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.], 2001, S. 3.2f.  
 6 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], 1988, S. 492

Wichte der Schüttgüter <sup>5</sup>	
Wasser	10 KN/m <sup>3</sup>
Getreide	9 KN/m <sup>3</sup>
Zement	16 KN/m <sup>3</sup>
Zementklinker	18 KN/m <sup>3</sup>
Zucker	9,5 KN/m <sup>3</sup>

Abb. 64:  
Wichten im Vergleich

Eigene Darstellung,  
Daten: Schneider

Horizontallastverhältnisse der Schüttgüter <sup>6</sup>	
Wasser	1,00
Getreide	0,60
Zement	0,65
Zementklinker	0,50
Zucker	0,60

Abb. 66:  
Horizontallastverhältnisse

Eigene Darstellung,  
Daten: Martens

Abb. 65:  
Prinzipieller Druckverlauf einer Wasser- und einer Schüttgutsäule

In der Silostatik unterscheidet man zwischen den Horizontallasten  $P_{hf}$  für das Füllen und  $P_{he}$  für das Entleeren des Silos. Größere Kräfte treten immer beim Entleeren auf, weshalb  $P_{he}$  zur Bemessung der Zellen herangezogen wird.

Weizensilos				
1)	Berechnungsergebnisse verschiedener Silovorschriften im Vergleich, 1966 <sup>2</sup>	Zellenhöhe	[ m ]	42
		Zellendurchmesser	[ m ]	7,80
		Horizontaldruck $P_{he}$ bei 42 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>35 - 79</b>
		Wasserdruck bei 42 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>420</b>
		Faktor	[ - ]	<b>5,0 - 12</b>
2)	Silo Jeddah, 1979 Maximaler Bemessungsdruck, mit dem die Zellen zur Ausführung gelangten <sup>3</sup>	Zellenhöhe	[ m ]	40,0
		Zellendurchmesser	[ m ]	7,30
		Horizontaldruck $P_{he}$	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>63</b>
		Wasserdruck bei 40 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>400</b>
		Faktor	[ - ]	<b>6,0</b>
Zementsilos				
1)	Berechnungsergebnis nach DIN 1055, Teil 6, 1964 <sup>4</sup>	Zellenhöhe	[ m ]	46,0
		Zellendurchmesser	[ m ]	20,0
		Horizontaldruck $P_{he}$ bei 46 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>225</b>
		Wasserdruck bei 46 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>460</b>
		Faktor	[ - ]	<b>2,0</b>
2)	Silo in Adelaide, 1980 Berechnungsergebnisse verschiedener Silovorschriften im Vergleich <sup>5</sup>	Zellenhöhe	[ m ]	44,0
		Zellendurchmesser	[ m ]	28,0
		Horizontaldruck $P_{he}$ bei 44 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>300 - 425</b>
		Wasserdruck bei 44 m	[ kN/m <sup>2</sup> ]	<b>440</b>
		Faktor	[ - ]	<b>1,0 - 1,5</b>

Abb. 67:  
Tabelle horizontale  
Entleerungsdrücke  $P_{he}$

Eigene Darstellung,  
Daten: Theimer und Hampe

2 Vgl.: Theimer, Otto F., 1966, S. 759  
3 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 1, Berlin 1987, S. 194  
4 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 1, Berlin 1987, S. 31  
5 Vgl.: Hampe, Erhard, Band 1, Berlin 1987, S. 213

Wie groß die Unterschiede ausfallen hängt vom Silogut ab, respektive der Wichte und dem Horizontallastverhältnis. Während Zement- und Zementklinkersilos in etwa gleich zu beurteilen sind, rangieren die Getreidesilos eignungstechnisch dahinter. Verifizieren kann man diese Einordnung anhand einiger berechneter horizontaler Entleerungsdrücke „P<sub>he</sub>“ aus der Praxis (Vgl.: Abb. 67). Generell sieht man, dass die geltenden Normen bzw. Vorschriften zu recht großen Bandbreiten bei den berechneten Werten führen kann. Wie erwartet, sind die Horizontaldrücke bei den Zementsilos größer als bei den Getreidesilos, was in erster Linie mit dem Gut, aber auch mit den unterschiedlichen Zellendurchmessern zusammenhängt. Beim Silo in Adelaide beispielsweise ergeben die konservativen Lastannahmen sogar Drücke, die mit denen einer Wassersäule vergleichbar sind. Dennoch wird man in den meisten Fällen statische Ertüchtigungsmaßnahmen ergreifen müssen, was im folgenden Kapitel am Beispielobjekt der Wesermühlen ausführlich behandelt wird. Vorab kann man sagen, dass die nachträgliche Verstärkung von Silozellen kein Novum ist und es verschiedene realisierte Beispiele nebst dokumentierten Verfahren gibt. Offen bleiben muss die Frage nach der erforderlichen Infrastruktur. Ob sich ein geeignetes Gewässer in Reichweite des potenziellen Bauwerks befindet, kann auf typologischer Ebene nicht abschließend beantwortet werden. Dafür spricht die Tatsache, dass der Zugang zu einem Wasserweg eine Möglichkeit eröffnet, große Mengen Silogut herbeizuschaffen oder abzutransportieren.

In der nebenstehenden Abb. 68 in eigener Darstellung findet sich ein Vergleich der Speicherkapazitäten verschiedener Modellsilos, mit einer angenommenen Lagerkapazität von jeweils 50000 t. Zellohöhen und Zelldurchmesser entsprechen dem Durchschnitt nach Abb. 62. Anhand der Wichte der einzelnen Schüttgüter kann auf das erforderliche Gesamtvolumen geschlossen werden. Augenscheinlich ist nur das Getreidesilo für die Hubspeicherung geeignet, sowohl Zement- als auch Zuckersilo verfügen nicht über das notwendige Maß an Schlankheit, obendrein ist die Anzahl an Silozellen zu gering.

Silovergleich	
Lagerkapazität	50 000 T
<b>Getreidesilo</b>	
19 Zellen [ 9,5 * 42 m ]	
Volumen	55556 m <sup>3</sup>
Speicherkapazität	
Hubspeicher	174 kWh
Pumpspeicher	2543 kWh
<b>Zementsilo</b>	
3 Zellen [ 17,5 * 48,5 m ]	
Volumen	31250 m <sup>3</sup>
Hubspeicher	32 kWh
Pumpspeicher	1652 kWh
<b>Zuckersilo</b>	
1 Zelle [ 37,5 * 45 m ]	
Volumen	52632 m <sup>3</sup>
Speicherkapazität	
Hubspeicher	-
Pumpspeicher	2438 kWh

Abb. 68:  
Vergleich der  
Speicherkapazitäten

## Behälterbauten | Gasbehälter | Niederdruckgasbehälter | Scheibengasbehälter

Die Gruppe der Niederdruckgasbehälter weist in der Historie und der Funktion einige Parallelen zu den Wassertürmen auf. So übernahmen auch diese primär eine puffernde Funktion, in diesem Fall zwischen der Gaserzeugung und dem Gasverbrauch, und dienten nebenbei der Aufrechterhaltung des erforderlichen Druckes im Netz<sup>1</sup>. Obwohl sie vereinzelt noch gebaut werden, sind die Niederdruckgasbehälter, zumindest in Deutschland, weitestgehend obsolet geworden. Zwei seltene, noch im Betrieb befindliche Exemplare findet man in Stuttgart<sup>2</sup> und in Lübeck<sup>3</sup>. Unterschieden wird nach drei Bauformen: Den Teleskop-, den Schrauben-, und den Scheibengasbehältern. Die beiden erstgenannten Behältertypen bestehen aus mehreren, ineinander gesteckten Glocken, die abhängig vom Füllstand teleskopartig aus einem Wasserbecken im Sockel des Behälters ein- oder ausfahren. Beim Hebevorgang wird Wasser aus diesem Becken in den sogenannten Hak- bzw. Schöpftassen mitgeführt, womit der Behälter, respektive die einzelnen Glocken, abgedichtet werden<sup>4</sup>. Im Gegenzug ist der Scheibengas-



1 Vgl.: Frühschutz, Oliver, 2011, S. 12

2 Vgl.: Frühschutz, Oliver, 2011, S. 14

3 Vgl.: Bernd, Michael, 2004

4 Vgl.: Schramm, Werner, Wiesbaden u.a. 1965, S. 322 - 323

Scheibengasbehälter		
V [m <sup>3</sup> ]	D [m]	H [m]
10 000	23	31
30 000	30	48
50 000	34	62
75 000	42	64
100 000	45	73
150 000	54	76
200 000	58	85
250 000	62	93
300 000	68	95
350 000	68	109
400 000	73	107

Abb. 69:  
Dimensionen von Scheiben-  
gasbehältern

Eigene Darstellung,  
Daten: Schramm

behälter äußerlich statisch, die Kinematik beschränkt sich auf eine bewegliche Scheibe im Inneren. Diese stellt den erforderlichen Gasdruck her und trennt das gas- vom luftgefüllten Volumen. Unabhängig vom gewählten Speichersystem steht die beschriebene Kinematik von Teleskop- und Schraubenbehältern einer Umnutzung erschwerend gegenüber. Ein Nachteil, den der Scheibengasbehälter funktional bedingt nicht hat. Aufgrund dessen wird die Eignungsprüfung auf diesen Typen beschränkt, der zudem auch größere Dimensionen erreicht<sup>1</sup>.

- Hubspeicher

Der Scheibengasbehälter verfügt zwar in der Regel über ausreichend Höhe, inkompatibel mit dem System Hubspeicher ist aber seine Schlankheit. Dieser Aspekt wurde im vorherigen Abschnitt zu den Silobauten bereits hinreichend erläutert, der Scheibengasbehälter scheidet daher eignungstechnisch aus.

- Druckluftspeicher

Es liegt auf der Hand, dass der Scheibengasbehälter passende Voraussetzungen für die Druckluftspeicherung liefert. Immerhin ist dieser als Gasbehältnis konzipiert. Allerdings werden auch in diesem Fall, wie bei den bisherigen Typen, statische Ertüchtigungsmaßnahmen nicht ausbleiben. Die Druckluftspeicherung arbeitet mit Drücken von 16 bis 32 Bar oder sogar mehr, der Scheibengasbehälter hingegen ist für „geringfügig über Atmosphärendruck liegende Betriebsdrücke“<sup>2</sup> ausgelegt. Wie genau diese Maßnahmen aussehen, welchen Umfang sie annehmen und bis zu welchem Speicherdruck sie vertretbar erscheinen, kann schlussendlich nur am konkreten Objekt beantwortet werden.

- Pumpspeicher

Grundsätzlich ist der Scheibengasbehälter auch als Pumpspeicher denkbar. Die Kombination aus Höhe, Volumen und der gewählten Konstruktionsweise decken sich mit den aufgestellten Anforderungen des Systems. Im Kern wird es auch in diesem Fall, analog zum Druckluftspeicher, auf die Frage nach der statischen Eignung hinauslaufen. Was die Infrastruktur anbelangt, der Zugang zu einem stehenden Gewässer also, kann auf typologischer Ebene keine Aussage getroffen werden. Eine explizite Standortbindung an ein Gewässer existiert zumindest nicht. Die Eignung muss sich also auch am Einzelfall messen lassen, ob ein derartiger Zugang existiert oder nicht.

1 Vgl.: Schramm, Werner, Wiesbaden u.a. 1965, S. 322 - 324  
2 Vgl.: Sterner, Michael, und Stadler, Ingo, 2014, S. 366

---

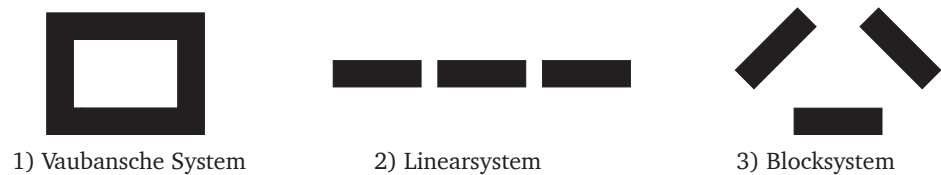
### 1.1.3. Schlussfolgerungen

Der industrielle Gebäudesektor hat sich als recht ergiebiges Untersuchungsobjekt erwiesen. Das gilt sowohl für die Anzahl geeigneter Bauwerke, als auch das Maß der Eignung. Im Sinne einer Rangordnung wären an erster Stelle die Silobauten zu nennen, weil diese die Anforderungen zweier Systeme bedienen: der Hub- und der Pumpspeicherung. Als nächstes folgen die Hallen- bzw. die Flachbauten, mit einer hohen Eignung für die Installation von Schwungrädern. Am schwächsten empfehlen sich die Kühlturmbauten und die Scheibengasbehälter. Sie besitzen zwar Potential, sind im Falle einer Umnutzung jedoch auf Ertüchtigungsmaßnahmen angewiesen. Im Hinblick auf die Speichersysteme zeigt sich, dass keiner der Bauwerkstypen es erlaubt, eine Druckluftspeicherung in Erwägung zu ziehen, selbst unter der Berücksichtigung etwaiger Ertüchtigungsmaßnahmen. Zumindest für die Industriebauten bestätigt sich an dieser Stelle der zuvor geäußerte Verdacht. Die Anforderungen des Schwungrades sind nur mit den Hallen- bzw. Flachbauten kompatibel, allerdings ohne nennenswerte Ertüchtigungsmaßnahmen ergreifen zu müssen. Diese sind immer in Verbindung mit der Pumpspeicherung nötig, die sich aber für drei Typen, nämlich die Scheibengasbehälter, die Kühlturmbauten und die Silobauten empfiehlt. Als letztes ist noch der Hubspeicher zu nennen, dessen Anforderungen sich weitestgehend mit der Beschaffenheit der Silobauten decken.

## 1.2. Militärbau

Neben dem Industriebau ist der Militärbau die zweite Kategorie an Bauwerken, welche einer typologischen Eignungsprüfung unterzogen werden. Die Eingangsfragen lauten hier: mit welchen Typen hat man es zu tun, was sind die Kriterien und wie fein muss eine Gliederung ausfallen, um eine gegebene Eignung feststellen zu können oder auch nicht. Im Gegensatz zum Industriebau kann der Auftakt der Analyse jedoch nicht in der Gegenüberstellung verschiedener Typisierungsformen und deren anschließender Synthese bestehen, aus dem einfachen Grund, weil für den Militärbau, wenn überhaupt, derartige Systematiken nur für einzelne Teilbereiche, wie den Kasernen- oder den Bunkerbau, nicht aber für das gesamte Spektrum an Bauwerken vorliegen. Das haben die eigenen Literaturrecherchen ergeben. Hansjörg Schwalm beispielsweise, zieht seinen Abriss in „Militärbauten“<sup>1</sup> primär chronologisch auf. Beginnend mit dem vorgeschichtlichen Zeitraum schlägt er den Bogen über die Militärinfrastruktur der Griechen, den germanischen Wehrbauten, dem Zeitalter des Absolutismus über die Entwicklung bis zum Zweiten Weltkrieg zur modernen Infrastruktur der Bundeswehr, um nur einige zu nennen. Typologische Fragen sind für ihn nur am Rande von Interesse. Eine Ausnahme bilden die Kasernen, bei denen nach verschiedenen Gebäudetypen und -stellungen differenziert wird. Genannt werden das Vaubansche, das Linear- und das Blocksystem. Aufhänger ist und bleibt aber auch hier die Historie, da die Darstellung der Typen in erster Linie dazu dient, die Entwicklung des Kasernenbaus aus dem zeitlichen Kontext herzuleiten.

Abb. 70:  
Kasernentypen



Selektive typologische Betrachtungen stellt Michael Foedrowitz<sup>2</sup> an, in diesem Fall für den Teilbereich der Bunkeranlagen, wenn er eine Gliederung in Hochbunker, Tiefbunker und unterirdische Luftschutzstollen vorschlägt. Was im Zuge der eigenen Forschung zunächst als Erschwernis wahrgenommen wird, reifte aber in der Erkenntnis, dass eine allumfassende Typologie des Militärbaus gar nicht das Ziel sein muss und kann. Hansjörg Schwalm liefert diesbezüglich einen wichtigen Hinweis. Der Militärbau erfährt durch die einsetzende Technisierung im Ersten Weltkrieg und ihrer darauf folgenden Potenzierung im Zweiten Weltkrieg einen entscheidenden Wandel. Die Infrastruktur, welche bis dahin vorrangig der Unterbringung und Versorgung von Soldaten dient, wird massiv ausgebaut und mehr und mehr zu dem Zweck errichtet, technische Belange zu befriedigen. Die moderne Kriegsführung führt zu einer Verschiebung der Prioritäten und bringt zudem neue Typen militärischer Bauwerke hervor. Für das eigene Vorgehen lassen sich daraus folgende Schlüsse ziehen: Vor jener Technisierung bestand die militärische Infrastruktur überwiegend aus Kasernenbauten, bei denen es sich um einfache Wohnanlagen handelte. Egal, welchen Untertypen man genau betrachtet. Neben deren funktionaler Einordnung sind diese aus konstruktiv/architektonischer Sicht als Geschossbauten zu klassifizieren, womit sie in zweifacher Hinsicht außerhalb des Fokus dieser Arbeit liegen:

1 Vgl.: Schwalm, Hansjörg, 1982

2 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a

einmal aus funktionaler und einmal aus struktureller Sicht. Den Nachweis liefert die typologische Eignungsprüfung der Industriebauten, innerhalb derer sich die Geschossbauten als ungeeignet erwiesen haben. Aufgrund dessen kann man den erforderlichen Untersuchungsrahmen in zeitlicher Hinsicht einzuschränken, nämlich auf den Zweiten Weltkrieg und die Nachkriegszeit.

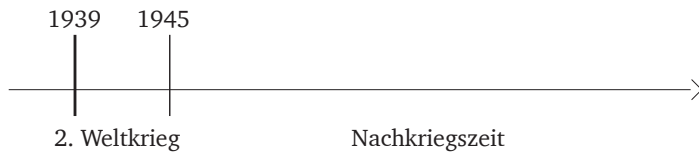


Abb. 71:  
Betrachtungshorizont

Neben dem bereits getroffenen zeitlichen Fokus ist eine weitere Einschränkung möglich, die funktionaler Natur ist. Ausgangspunkt ist der zuvor erwähnte, technisch begründete Umschwung im Militärbau. Dieser brachte vor allem eine interessante Gruppe an Bauwerken hervor: die Bunkeranlagen. Die Recherchen haben gezeigt, dass sich ein Großteil der im Militärbau errichteten Objekte unter diesem Begriff subsumieren lassen, wenn man sich der eigentlichen Funktion besinnt und nicht von der Vielzahl unterschiedlicher in Verwendung befindlicher Benennungen in die Irre führen lässt. Etymologisch ist der Terminus Bunker seit dem 19. Jahrhundert nachweisbar, ursprünglich als Bezeichnung für Massengutbehälter u.a. zur Aufbewahrung von Kohle. In die wehrbauliche Fachsprache übernommen, wurde dieser im Zuge des 1. Weltkrieges und bezeichnete dort fortan „gegrabene betonbefestigte Stellungen und Unterstände“<sup>1</sup>. Entstehungsgeschichtlich kann man also von Bauwerken sprechen, die eines verbindet: sie übernehmen primär eine Schutzfunktion. Dabei ist es unerheblich, ob diese materiellen Gütern, Menschen oder ggf. beidem dient. Hinter Termini wie Luftschutzturm<sup>2</sup>, Hohlgangsystem, Panzerwerk<sup>3</sup>, Luftschuttstollen<sup>4</sup>, Gerätehauptdepot oder Komplexlager<sup>5</sup> verbergen sich nicht grundverschiedene Typen von Bauwerken, sondern unterschiedliche Prägungen des Grundtyps Bunker. Mit dieser Erkenntnis ist der Ausgangspunkt der typologischen Untersuchung gesetzt und das Forschungsfeld klar: es geht um die Typologie der Bunker.

Als Vorgriff auf die nachfolgenden Ausführungen zur Genese des Bunkerbaus, soll an dieser Stelle noch abschließend auf den zeitlichen Betrachtungshorizont eingegangen werden. Der Bunkerbau und -betrieb hat, zumindest in Deutschland, einen relativ genau zu bestimmenden Anfangs- und Endpunkt. Ein beachtlicher Teil der in Deutschland noch vorhandenen Objekte wurde im Zweiten Weltkrieg errichtet<sup>6</sup>, weitere kamen im Zeitalter des Kalten Krieges hinzu. Mit dem Ende der Sowjetunion, der Auflösung des Warschauer Paktes und der einsetzenden Entspannungspolitik zwischen den Ost- und Westmächten kam allerdings in den 90er Jahren der Bunkerbau sowie der Betrieb und Erhalt bestehender Anlagen allmählich zum Erliegen<sup>7</sup>. Der Begriff Nachkriegszeit kann durch

- 1 Vgl.: Angerer, Henning: Flakbunker, Hamburg 2000, S. 11f.  
Nach: Drodowski, Günther [Hsrg.], 1963  
Kluge, Friedrich, 1997
- 2 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b
- 3 Vgl.: Jurga, Robert M., 2013, S. 120, S. 136
- 4 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 16
- 5 Vgl.: Fäth, Harald, 2009, S.18 und 29
- 6 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 09 - 32
- 7 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 15

das Zeitalter des Kalten Krieges ersetzt werden, womit der Untersuchungsrahmen gefasst wird.

Abb. 72:  
Betrachtungshorizont



### 1.3. Der Bunkerbau

Im nachfolgenden Abschnitt wird die geschichtliche und technische Entwicklung des Bunkerbaus in Deutschland beschrieben. Um Missverständnissen vorzubeugen soll eingangs darauf hingewiesen werden, dass die baugeschichtliche Einordnung nicht zum zentralen Thema dieser Promotion avanciert, sondern im Falle der Bunkerbauten für das Verständnis von Typologie und Typen hilfreich erscheint.

#### 1.3.1. Geschichtliche Einordnung

Abb. 73:  
Einteilung in Luftschutzorte erster und zweiter Ordnung sowie mit Sonderstatus am Beispiel des Luftgaukommandos XI



Legende:  
 ■ LS-Ort 1. Ordnung  
 ● LS-Ort 2. Ordnung  
 ○ LS-Ort mit Sonderstatus

Auch wenn sich der Bunker als militärischer Schutzbau bis in den ersten Weltkrieg zurückverfolgen lässt, markiert ein Ereignis im Zweiten Weltkrieg den Beginn eines umfassenden und im Umfang noch nicht da gewesenen Neubauprogramms, das bis 1945 insgesamt ca. 6000 Hoch- und Tiefbunker in ganz Deutschland hervorbringt. Anlaß ist ein britischer Luftangriff auf Berlin im Sommer 1940, der die nationalsozialistische Führungsriege, allen voran Adolf Hitler, in Panik versetzte. In Folge dessen wurde der Ruf nach koordinierten Schutz-



maßnahmen laut, die im Oktober 1940 im sogenannten Führer-Sofortprogramm gipfelten. Das per Führererlass initiierte Programm forderte den umfassenden Bau von Bunkeranlagen zum Schutz der Zivilbevölkerung, von Militäreinrichtungen, Rüstungsindustrie und Verkehrsknotenpunkten. In der Durchführung wurde das Programm in mehreren aufeinander folgenden Wellen organisiert und letzten Endes auf bedrohte Städte von strategischer Bedeutung und mit mehr als 100.000 Einwohnern beschränkt; ein Widerspruch zum ursprünglich proklamierten Anspruch die gesamte Zivilbevölkerung schützen zu wollen. In Abb. 73 ist die Einteilung in sogenannte Luftschutzorte zu erkennen, welche ihrem Bedrohungsstatus nach in Orte erster und zweiter Ordnung sowie in einigen Fällen mit Sonderstatus klassifiziert wurden.

Den Auftakt der Baumaßnahmen bildete die erste Welle, welche von 1940 bis 1941 andauerte und mit 61 Städten den größten Umfang aller Etappen hatte. Im Zuge dessen wurden insgesamt 839 Bunker errichtet. Die im Sommer 1941 anknüpfende zweite Bauphase umfasste nochmals 31 Städte. In Summe bringen beide Wellen bis Sommer 1943 ca. 3000 Schutzbauten hervor. Bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges im Mai 1945 wurde das Sofortprogramm durch eine finale dritte Welle ergänzt, mit der die Anzahl fertig gestellter Bunker weiter anstieg. Allerdings beschränkte sich diese, mancherorts auch als Zusatzprogramm bezeichnete Welle, auf den Bau sogenannter Luftschutzstollen, die sich baulich stark von den Bauwerken der ersten und zweiten Welle unterschieden. Neben den Bunkern des Sofort-Programmes, bei denen es sich überwiegend um Zivilschutzbauten handelt, wird bis Kriegsende noch eine vergleichbar große Anzahl Bunker realisiert, die nicht der allgemeinen Bevölkerung, sondern Industriebetrieben, der Reichsbahn oder der Wehrmacht zugeordnet waren<sup>1</sup>. Erwähnenswert sind noch einige Bunkerbauten, die aufgrund ihrer Ausmaße und/oder ihres besonderen propagandistischen Stellenwerts einen Sonderstatus einnahmen, wie beispielsweise die Flakbunker in Hamburg, Berlin und Wien oder der U-Boot Bunker Valentin in der Nähe von Bremen.

#### Zivile Verteidigung



Abb. 74:  
Elemente der  
Zivilverteidigung

Nach dem Ende des Zweiten Weltkrieges und dem Untergang des Nationalsozialismus sollten die vorhandenen Bunker in Deutschland auf Veranlassung der Alliierten Besatzungsmächte durch Sprengung vernichtet werden. Da jedoch der weitestgehend erhaltene oder lediglich beschädigte, aber nicht zerstörte Bestand mittlerweile für verschiedene Zwischennutzungen Verwendung fand, wird die Direktive 22<sup>2</sup> mehr oder weniger konsequent umgesetzt. In vielen Fällen einigte man sich auf die „Entfestigung“, womit der Bunker nicht gänzlich unbrauchbar wurde, sondern nur für den Kriegsfall nutzlos ist. Dies konnte beispielsweise durch das Sprengen von Öffnungen in die Aussenwände geschehen<sup>3</sup>. In den 50er Jahren machte sich allerdings ein Sinneswandel breit. Politische Umwälzungen, der aufkeimende Ost-West Konflikt, die atomare Drohkulisse des Kalten Krieges und die kollektive Angst vor einem Dritten Weltkrieg veranlassten die Bundesregierung dazu, ein umfassendes Programm zur zivilen Verteidigung

1 Vgl: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 09-13

2 Vgl.: Angerer, Henning, 2000, S. 84

3 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 143-168

aufzusetzen. Der zugehörige Maßnahmenkatalog sah in einigen der vier Teilbereiche (Vgl.: Abb. 74) auch den Einsatz von Bunkeranlagen vor<sup>1</sup>.

### **Bereich: Zivilschutz**

Richtet man das Augenmerk zunächst auf die Bauwerke, welche unmittelbar zum Schutz und Aufenthalt von Personen gedacht waren, so kann man zwischen dem Neubau und der Instandsetzung differenzieren. Letztere stellte die weitaus häufigere Variante dar, der Neubau war eher unterrepräsentiert und brachte nicht so viel Bauwerke hervor wie etwa das Sofortprogramm der Nationalsozialisten. Überwiegend kamen sogenannte Hausschutzräume zur Ausführung, mit einer vergleichsweise kleinen Belegungszahl von ca. 50 Personen. Diese waren privaten oder öffentlichen Gebäuden zugeordnet und Bestandteil des Kellergeschosses, insofern sie nicht als eigenständiger Bau konzipiert waren und in Reichweite des angegliederten Gebäudes lagen. Ein Sonderfall stellten die sogenannten Mehrzweckanlagen dar, Parkgaragen, U-Bahn-Stationen oder Straßentunnel, die verbunkert ausgeführt wurden und im Ernstfall als Schutzräume fungieren sollten. Wie eingangs erwähnt, gab man jedoch vielerorts der Instandsetzung den Vorzug. Diese bestand darin erhaltene Bunker aus dem Zweiten Weltkrieg zu ertüchtigen, was immerhin mit annähernd 600 Anlagen in unterschiedlichem Umfang praktiziert wurde. Weitere Bunker, die in den Bereich des Zivilschutzes fallen und nennenswert erscheinen, sind die Bauten des Warndienstes. Im Krisenfall hatte dieser die Aufgabe ABC- und Luftlage zu kontrollieren, relevante Informationen zusammenzutragen und auszutauschen, um daraufhin die Bevölkerung rechtzeitig vor drohenden Gefahren alarmieren zu können. Zentrale Schnittstelle waren die zehn Warnämter, zu denen auch jeweils ein standardisierter Warnamtsbunker gehörte. Zwischen 1961 und 1968 gebaut, kamen diese als viergeschossige unterirdische Bauwerke, mit einem Bruttorauminhalt von 16.000 m<sup>3</sup> und einer Umfassungswandstärke von drei Metern, zur Ausführung<sup>2</sup>.

### **Bereich: Aufrechterhaltung der Staats- und Regierungsfunktion**

Im Verteidigungs- oder Spannungsfall, wie man eine akute oder drohende militärische Auseinandersetzung damals umschrieb, sollte auch der Staatsapparat weiterhin funktionsfähig bleiben. Zu diesem Zweck mussten die Entscheidungsträger nebst angegliederten Institutionen über entsprechend geschützte und ausgestattete Ausweichquartiere verfügen können. Im Laufe der 60er Jahre wurden sowohl Bundes-, Landes- als auch Bezirksebene aufgefordert in der Frage aktiv zu werden und Vorschläge für mögliche verbunkerte und sichere Räumlichkeiten zu unterbreiten. Während einige das frühe Planungsstadium nicht übersteigen oder man sich nicht zu einer Einigung durchringen konnte, kamen u.a. im Falle Nordrhein-Westfalens oder Baden-Württembergs die geplanten Ausweichsitze zur Ausführung. Dies trifft auch für eine Anzahl Bezirksregierungen und kreisfreier Städte zu. Häufig verortete man die verbunkerten Quartiere im Untergeschoss anderweitig öffentlich genutzter Gebäude wie z.B. in Schulen oder Behörden, einige wurden auch nach Vorbild der Warnamtsbunker als eigenständige Bauten ausgeführt. Am spektakulärsten ist sicherlich der Ausweichsitz der Bundesregierung im Ahrtal bei Bonn, der insgesamt 17 Kilometer Stollenlänge umfasst und hinsichtlich seiner Größe und Ausstattung eigene Maßstäbe setzt.

1 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 11

2 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 10 - 72

---

## **Bereiche: Sicherstellung der Versorgung der Zivilbevölkerung und Streitkräfte Unterstützung der Streitkräfte**

Bei den beiden verbliebenen Bereichen kann man sich eher kurz fassen. Die Schutzbauten für das Post- und Fernmeldewesen, dem Geld- und Finanzwesen sowie dem Verkehrswesen sind mit den zuvor beschriebenen Bunkeranlagen im Zivilschutz vergleichbar. Auch ihre Anzahl blieb überschaubar. Hintergrund ist das Bestreben der Bundesregierung essentielle Funktionen, wie Kommunikation und Mobilität, auch im Falle einer kriegerischen Auseinandersetzung zumindest im Notbetrieb aufrechterhalten zu können. Verbunkerte Lagerhäuser, wie das mittlerweile abgerissene Kühlhaus Hammerbrook in Hamburg oder vollgeschützte Wasserwerke bleiben Exoten, die in erster Linie als Zeitzeugen von Interesse sind.

### **Weitere Anlagen mit militärischer Nutzung**

Neben den zuvor beschriebenen Objekten der Zivilverteidigung, sind auf den Gebieten der Bundesrepublik Deutschland und der ehemaligen DDR auch einige Anlagen mit rein militärischer Funktion entstanden. Die Quellenlage zu diesen Komplexen, welche Jahrzehnte lang der Geheimhaltung unterlagen, ist unübersichtlich. Zwar gibt es einige privat initiierte Webseiten, die sich mit großem Engagement dem Thema widmen, es fehlt jedoch an einer fundierten, wissenschaftlichen Aufarbeitung. Martin Kaule hat in seinem Werk „Faszination Bunker“ eine Auswahl Anlagen zusammengestellt, die er steckbriefartig auf ein bis zwei Seiten beschreibt<sup>1</sup>.

### **Die Aufgabe der Zivilverteidigung und das Schicksal der Bunkeranlagen**

Mit dem Ende des Kalten Krieges wurden die errichteten Bunkeranlagen und auch die minutiös erarbeiteten Verteidigungspläne in weiten Teilen obsolet. Offiziell eingestellt wurde das zivile Schutzprogramm aber erst im Jahr 2007. Die Pläne zur Wiederherstellung von Weltkriegsbunkern waren bereits 1990 Geschichte, also kurz nach der Deutschen Wiedervereinigung<sup>2</sup>. Bis heute stehen viele ehemalige Bunkeranlagen leer, sind abgerissen oder für Wohn-, Kultur-, Lager- oder anderweitige Zwecke umgebaut worden. Ein Bestand noch unverkaufter Objekte befindet sich im Besitz der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben<sup>3</sup> und wird dort verwaltet und ggf. veräußert.

1 Vgl.: Kaule, Martin, 2014

2 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 17

3 Vgl.: <https://www.bundesimmobilien.de>

### 1.3.2. Typen im Bunkerbau

Der Einstieg zur typologischen Untersuchung erfolgt mittels der Analyse und Gegenüberstellung bereits vorhandener Systematiken erfolgen. Es gibt zwei Werke, nämlich „Bunkerwelten - Luftschutzanlagen in Norddeutschland“<sup>1</sup> von Michael Foedrowitz und das erst kürzlich erschienene Werk „Bunker beleben“ der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.]<sup>2</sup>, die als Vorlage herangezogen werden können. Während bei Foedrowitz das Thema Typologie eher Nebensache ist, spielt sie bei der Veröffentlichung der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben eine zentrale Rolle. Foedrowitz befasst sich in erster Linie mit der geschichtlichen Aufarbeitung des Bunkerbaus in Norddeutschland, wie schon aus dem Titel ersichtlich wird, stellt diesem jedoch eine umfassende Darstellung der Hintergründe in ganz Deutschland voran. In typologischen Fragen wird er im Teilkapitel „Bunkertypen und Luftschutzanlagen“ konkret. Benannt werden drei Grundtypen, nämlich oberirdische Hochbunker, Tiefbunker und unterirdische Luftschutzstollen. Von behördlicher Seite geht man etwas differenzierter vor und unterteilt die Hochbunker weiter in Luftschutztürme und Luftschutzhäuser, wobei letztere frei stehend oder in an- bzw. eingebauter Form Bestandteil städtischer Strukturen wie Block oder Zeile sein können. Darüber hinaus sind verschiedene informelle Bezeichnungen im Umlauf, welche sich vornehmlich an der äußeren Gestalt des Bauwerks orientieren. Beispielhaft nennt Foedrowitz die Begriffe Spitz-, Flach-, Rund-, Vierkant- und Klotzbunker. Auch Kuriositäten, wie der Ein-Mann-Bunker, zählen zum Repertoire der errichteten Anlagen<sup>3</sup>, womit der Verfasser seine Abhandlung mit dem Hinweis auf die beachtlichen Größenunterschiede der Bunkeranlagen abschließt. Wenn man die Ausführungen Foedrowitzs auf ihren Kern herunterbricht, quasi das typologische Destillat bildet, so ergibt sich die Systematik nach Abb. 75.

1) Michael Foedrowitz	Ebene 01	-
Bunkerbauten	· Hochbunker	·
	· Tiefbunker	·
	· Luftschutzstollen	·
	konstruktiv / architektonisch	

Abb. 75:  
Tabelle Typologie Foedrowitz

Die Typologie beschränkt sich auf die zuerst genannten Grundtypen Hochbunker, Tiefbunker und Luftschutzstollen, was weitestgehend einer Einteilung nach architektonisch/konstruktiven Gesichtspunkten entspricht. Insbesondere dann, wenn man sich einen Überblick verschaffen will, ist die gewählte Tiefe der Systematik hilfreich und in der Wahl der drei elementaren Typen auch konsistent. Theoretisch ist die Gliederung um eine beliebige Anzahl Ebenen erweiterbar, was ihren Wert nochmals unterstreicht. Beispielhaft könnte man die Hochbunker in einer zweiten Ebene in besagte Luftschutztürme und Luftschutzhäuser unterteilen, um dann in einer finalen dritten Ebene deren städtebauliche Lage in freistehend, angebaut und eingebaut zu differenzieren. Zur Veranschaulichung ist eine derartige Erweiterung in Abb. 76 zu sehen.

1 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a  
 2 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015  
 3 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 32

Ebene 01	Ebene 02	Ebene 03
Luftschutzstollen	-	-
Tiefbunker	-	-
Hochbunker	Luftschutztürme	-
	Luftschutzhäuser	freistehende Luftschutzhäuser
	-	angebaute Luftschutzhäuser
	-	eingebaute Luftschutzhäuser
konstruktiv / architektonisch		städtebaulich

Abb. 76:  
Tabelle Erweiterung  
Typologie Foedrowitz

Durch das Raster fallen vermeintliche Untertypen wie der Spitz-, der Vierkant- oder der Klotzbunker, da es sich dabei doch eher um volksmundliche Umschreibungen handelt, die typologisch schwer auseinander zu halten sind und von daher in der eigentlichen Typfrage wenig Wert besitzen. Im Werk „Bunker beleben“ der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.] genießen Typologie und Typ einen anderen Stellenwert. Im Gegensatz zu Foedrowitz ist nicht die Historie Kernthema, sondern die Auseinandersetzung mit der Frage, ob und wie man Bunkeranlagen bzw. Hochbunker im Speziellen<sup>1</sup> umnutzen kann. Im Wesentlichen werden städtebauliche, räumliche und technische Parameter beleuchtet, die mit einer Konversion in Verbindung stehen können. Beispiele realisierter Umbauten stellen einen praktischen Bezug her und ein angegliederter Ideenwettbewerb weitet das Spektrum um mögliche Nachnutzungen, wie ein Schwimmbad oder eine Bibliothek. Was die Typologie anbelangt, so kann man zwischen einer Differenzierung die nach der Lage des Bunkers im Stadtraum und einer, die nach seiner Form vorgeht, unterscheiden. Beides Methoden, die auf elementare architektonische Merkmale zurückgreifen.

1) BImA	Ebene 01	Ebene 02
Hochbunker	integrierter Hochbunker	integrierter Hochbunker im Block
	-	integrierter Hochbunker in der Reihe
	-	...weitere
	exponierter Hochbunker	exponierter Hochbunker im Block
	-	exponierter Hochbunker in der Reihe
	-	...weitere
	verborgener Hochbunker	verborgener Hochbunker im Block
	-	verborgener Hochbunker in der Reihe
	-	...weitere
		städtebaulich

Abb. 77:  
Tabelle Typologie 01 BImA

1 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben, Berlin 2015, S. 12

Erstere, also die kontextuelle Betrachtungsform, unterscheidet in der Ebene eins zwischen Hochbunkern, die Block, Reihe, Zeile, Platz oder Sondersituation zugeordnet sind und in der zweiten Ebene wie diese formuliert sind. Dabei wird zwischen integrierter, exponierter oder verborgener Lage differenziert<sup>1</sup> (Vgl.: Abb. 77). Der zweite Typisierungsansatz folgt formalen Kriterien und spezifiziert in der ersten Ebene nach dem „Fußabdruck“ des Bunkers, womit die Form seiner Grundfläche gemeint ist, um dann in der darauffolgenden Ebene die Entwicklung dieses Fußabdruckes in der Höhe zu studieren, was mit dem Begriff der Kubatur umschrieben wird<sup>2</sup>. Da die Typenbildung außergewöhnlich fein ausfällt, beschränkt sich die untenstehende Abb. 78 auf einen kleinen Ausschnitt, der jedoch zum Verständnis genügen sollte.

2) BiMA	Ebene 01	Ebene 02
Hochbunker	Quadrat Hochbunker	Würfel Turm
	Rechteck Hochbunker	Quader gestufter Quader
	...weitere	
		konstruktiv / architektonisch

Abb. 78:  
Tabelle Typologie 02 BiMA

### 1.3.3. Fazit und abgeleitete Typologie

Beide Typologien sind natürlich Spiegel des Untersuchungsgegenstandes, vor dessen Hintergrund sie entstanden sind. Bei Foedrowitz ist es in erster Linie die Historie, bei der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben ist es der Rückschluss vom dem Typen auf mögliche Nachnutzungen. Somit sind sie auch ein Stück weit spezifisch und nicht unmittelbar für die vorliegende Forschungsfrage zu übernehmen. Darüber hinaus beschränken sich beide auf den Zeithorizont des Zweiten Weltkrieges, die Bunker aus dem Kalten Krieg werden typologisch nicht erfasst. Dennoch gibt es Anknüpfungspunkte, wobei sich diese eher bei Foedrowitz, als bei der BiMA auf tun. Städtebauliche Kriterien oder die äußere Form, wie sie die BiMA anführt, sind nicht entscheidend, wenn man die Eignung des Bunkers prüfen will, unabhängig davon, mit welchen der vier Speichersysteme man es zu tun hat. Einzige Ausnahme bildet der Quadrat-Hochbunker, wenn er als Turm in Erscheinung tritt. Die implizierte Höhe des Bauwerks könnte ggf. für eine Eignung als Hubspeicher sprechen, eine Eigenschaft, die ihn als eigenen Typen auszeichnet. Somit fällt der Fokus auf den Ansatz Foedrowitz` s, die Lektüre der BiMA bietet zumindest in Punkto Typologie keine unmittelbaren Anknüpfungspunkte. Basis der eigenen Systematik sind zwei der drei Grundtypen Foedrowitz, nämlich Hochbunker und Tiefbunker. Diese bilden die erste Ebene der Typologie. In der zweiten Ebene spalten sich die Hochbunker in vier Untertypen auf, als da wären serielle Hochbunker kleiner Größe, teilnormierte Hochbunker mittlerer Größe der I. und II. Welle, übergroße Hochbunker spezifischer Prägung und Funktion sowie Sondertypen. Die Tiefbunker wiederum werden unterteilt in integrierte Tiefbunker, freiliegende Tiefbunker, stollenartige Tiefbunker und Sondertypen (Vgl. Abb. 79).

1 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 37ff.

2 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 44 - 47

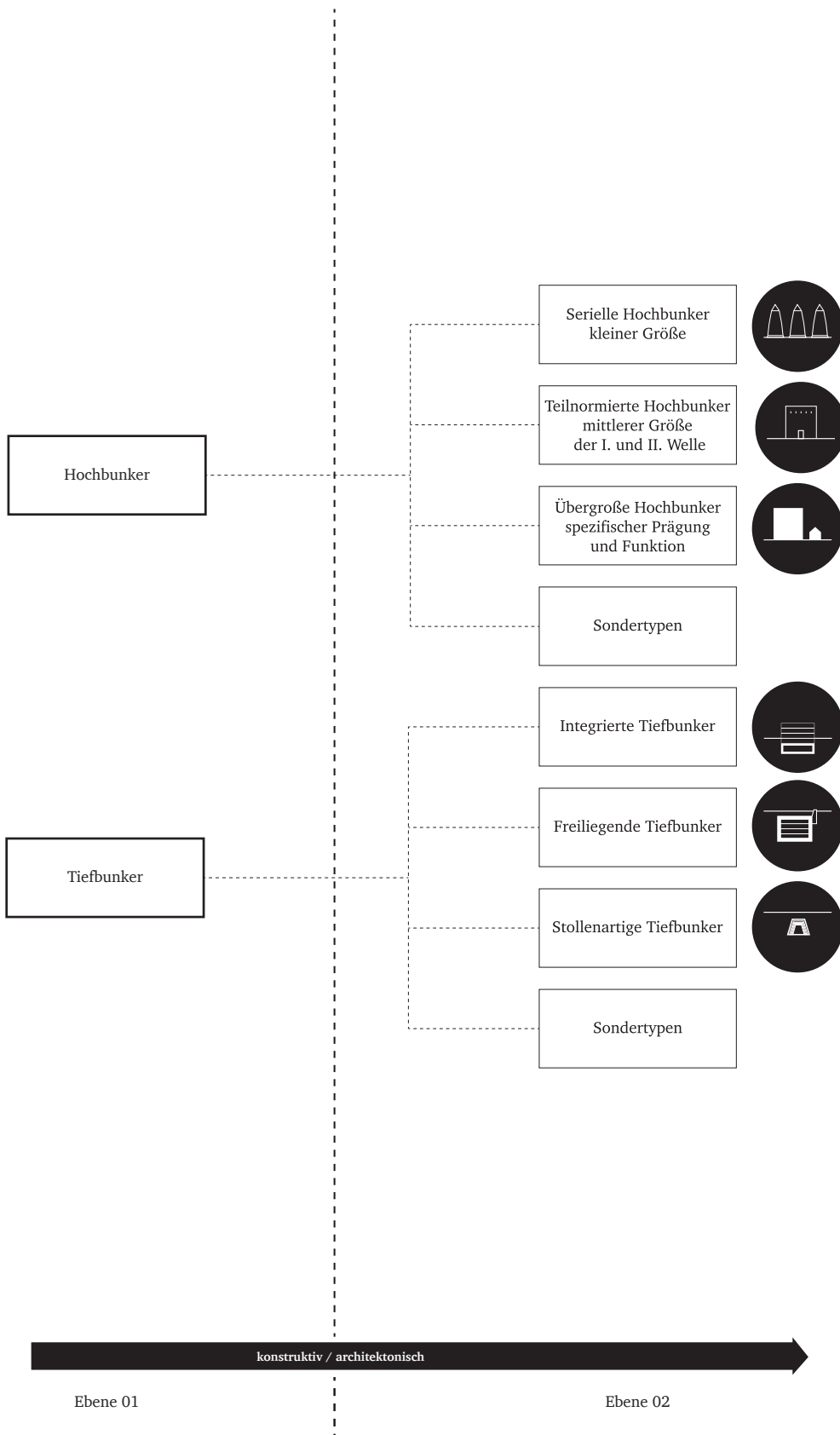


Abb. 79:  
Übersicht Typologie



Abb. 80:  
Meistgebauter Typ Winkel  
in prägnanter Zuckerhutform



### 1.3.4. Typologische Eignungsprüfung

Bevor mit der eigentlichen Eignungsprüfung fortgefahren wird, soll eingangs darauf hingewiesen werden, dass die Prüfung der einzelnen Typen nicht in gleicher Schärfe erfolgt. Allgemein führen Faktoren wie der bauliche Zustand, das Aufkommen oder eine problematische Quellenlage dazu, die Bunkertypen zu wichten und prioritäre Untersuchungsobjekte auszumachen. Das Hauptaugenmerk der Studie liegt bei den teilnormierten Hochbunkern mittlerer Größe der I. und II. Welle, was in erster Linie mit ihrer vergleichsweise hohen Anzahl begründet wird. Immerhin besaß die Bundesanstalt für Immobilienaufgaben bis 2005 noch ca. 400 derartiger Objekte<sup>1</sup>. Auf die Gesamtanzahl von ca. 3000 Bunkern wurde bereits in der Einleitung hingewiesen. Schaut man im Gegenzug auf die freiliegenden Tiefbunker, so haben die Recherchen lediglich zehn Warnamtsbunker<sup>2</sup> ausmachen können, die sich auf den ersten Blick und hinsichtlich ihrer baulichen Kenndaten für eine Prüfung qualifizieren. Zeitgleich sind zwar auch ca. 60 sogenannte RV-Stellenschutzbunker errichtet worden, diese fallen jedoch aufgrund ihres kleinen Bruttovolumens von lediglich 720 m<sup>3</sup> durch das Raster<sup>3</sup>.

#### Hochbunker | Serielle Hochbunker kleiner Größe

Die seriellen Hochbunker kleiner Größe vereinen zwei Eigenschaften, nämlich die der Standardisierung mit einem vergleichsweise hohen Aufkommen, was sie als eigenständigen Typen auszeichnet und legitimiert. Historisch gesehen stammt das Gros dieser Untertypen aus der Zeit des Zweiten Weltkrieges, in der die Standardisierung ganzer Bauwerke, trotz wiederholter Bemühungen, zumindest in der konkreten Umsetzung eine Ausnahmeerscheinung blieb<sup>4</sup>. Beispielhaft sollen drei Bauarten dieses Typs genannt werden: Winkel-, Zombek- und Dietelturm. Während von der Bauart Dietel nur „einige wenige Exemplare“<sup>5</sup> realisiert wurden, sind es beim Winkelturm Deutschlandweit immerhin ca. 200 Stück<sup>6</sup>. Entstehungsgeschichtlich lässt sich dieser Untertyp sogar bis in die Zeit vor dem Zweiten Weltkrieg zurückverfolgen, wo erste Exemplare bereits in den 30er Jahren für die Belange des Werkschutzes, der Wehrmacht und der Reichsbahn errichtet worden sind<sup>7</sup>. Das auffallend kleine Format dieser Bunkertypen wird nicht nur aus der nebenstehenden Abbildung deutlich, sondern geht auch aus den damaligen Bestimmungen zum Bau von Luftschutztürmen hervor. Diese schreiben eine maximale Belegungszahl von nur 500 Personen vor, u.a. soll der lichte Durchmesser der kreisrunden Grundfläche maximal 10 m betragen<sup>8</sup>. Näherungsweise kommt ein Winkelturm auf ein Nettovolumen von knapp 1000 m<sup>3</sup>, wenn man überschlägig einen Innenzylinder mit einem mittleren Durchmesser von ca. 7,5 m und einer Höhe von ca. 22,5 m annimmt. Die dokumentierten Zombekleinheiten in Hamburg erreichen Bruttovolumina zwischen 800 m<sup>3</sup> und 1100 m<sup>3</sup><sup>9</sup>.

1 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 10

2 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 54

3 Vgl.: Lubbe, Christop, 2013, S. 69

4 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 34

5 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b, S. 11

6 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 5

7 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 26

8 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b, S. 6

9 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b, S. 23



- Schwungrad, Hubspeicher, Druckluftspeicher und Pumpspeicher

Die Prüfung der seriellen Hochbunker kann relativ knapp ausfallen, da schon allein deren Größe ein Ausschlusskriterium darstellt. Darüber hinaus kommen die Objekte aber auch aus struktureller Sicht nicht in Frage. Für das Schwungrad gibt es nicht genügend Stellfläche, die Geschosshöhe ist unzureichend und zudem hätte man von vornherein Schwierigkeiten die Einheiten ins Innere des Bauwerks zu bekommen. Hub- und Pumpspeicher benötigen, neben einer Reihe anderer Voraussetzungen, vor allem eine größere Höhe. Im Falle der Druckluftspeicherung ist es das unzureichende Innenvolumen, was eine weitergehende Prüfung relevanter Parameter obsolet macht. Als Fazit erweisen sich die seriellen Hochbunker als ungeeignet.

### Hochbunker | Teilnormierte Hochbunker mittlerer Größe der I. und II. Welle

Die große Masse der in Deutschland noch vorhandenen Bunkeranlagen können unter diesem Typen subsumiert werden. Da auf die Entstehungsgeschichte bereits eingegangen wurde, sollen an dieser Stelle in erster Linie die eignungsrelevanten baulichen Kenndaten, wie etwa Größe, Konstruktionweise oder Bauteildimensionen aufgearbeitet werden. Man kann damit beginnen, dass es sich bei allen Hochbunkern um Stahlbetonbauten handelt, deren innere Struktur prinzipiell einem herkömmlichen Geschossbau entspricht. Die Ebenen dienten der Unterbringung möglichst vieler Schutzsuchender, deren Verteilung über ein oder mehrere Treppenhäuser erfolgte. Bei Objekten mit mehr als sechs Geschossen oder mit einer besonders hohen Belegungszahl, gibt es einen Aufzug<sup>1</sup>. Die Größe der Hochbunker bzw. deren Volumen variiert. Während die I. Welle eher kleinere Bauten hervorbrachte, tendiert man im Zuge der sich anschließenden II. Welle dazu, die Bunkervolumen sukzessive zu vergrößern. Hintergrund waren damalige Untersuchungen, die belegten, dass sich die Kubikmeter verbaubtem Stahlbetons mit zunehmender Anzahl Schutzplätze im Bunker verringert<sup>2</sup>. Ein gewichtiges Argument, angesichts einer sich immer mehr zuspitzenden Ressourcenknappheit. Gut nachvollziehen kann man diese Entwicklung am Beispiel der Verkaufsobjekte im „Bunkerkatalog Bremen“<sup>3</sup>, der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben. Erbauungsjahr und Bruttorauminhalt einiger ausgewählter Bauten sind in der nebenstehenden Tabelle eingetragen. Grundrisse und Schnitte einiger ausgewählter Hochbunker finden sich in Abb. 82. Beim Studium der Planunterlagen fällt der Blick unweigerlich auf die enormen Wand- und Deckenstärken der Bauwerke, die eine ihrer hervorstechendsten Merkmale sind und zum Abschluss der Typenbeschreibung genauer beleuchtet werden. Anlass zum Bau derart massiver Hüllen ist natürlich die Schutzwirkung, die diese den Bunkerinsassen vor einschlagenden Geschossen bieten müssen. Die genaue Ausführung von Wänden und Decken unterlag unterschiedlichen, teils auch widersprüchlichen Vorgaben, weshalb man ad hoc keine Aussagen zu deren Beschaffenheit treffen kann. Erschwerend kommt hinzu, dass die Bunkeranlagen trotz verbindlicher Auflagen und darauf basierender Planunterlagen, häufig davon abweichend gebaut wurden<sup>45</sup>. Anhand der damals geltenden Vorschriften lässt sich allenfalls ein Portfolio möglicher Konstruktionsarten aufstellen, die tatsächliche Ausführung kann jedoch nur am Objekt selber festgestellt werden. In diesem Kontext sind zwei Vorschriften zu nennen, die bauliche Festlegungen für



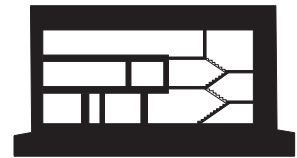
Lothringer Str.	1941
2900 m <sup>3</sup>	
Mainstr.	1941
4490 m <sup>3</sup>	
Klitzenburg	1942
5501 m <sup>3</sup>	
Am Sportplatz	1942
7878 m <sup>3</sup>	
Hardenbergstr.	1942
12 538 m <sup>3</sup>	
Admiralstr.	1945
10 788 m <sup>3</sup>	

Abb. 81:  
Bruttorauminhalt  
ausgewählter  
Hochbunker in Bremen

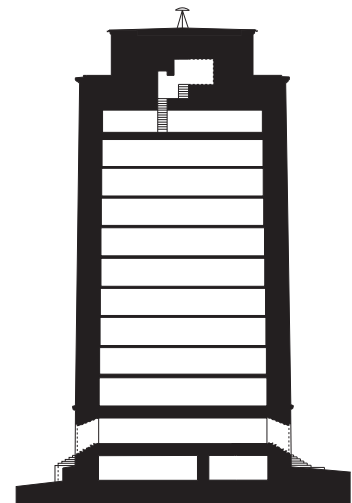
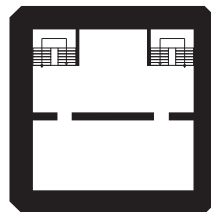
Eigene Darstellung,  
Daten: BImA

1 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 31f.  
2 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 34  
3 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], o.O. 2015  
4 Vgl.: Kern, Georg, 1961a, S. 212  
5 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 30f.

1) Bremen
Kornstrasse
L B H (über OKGOF) [m]:
55 17 10
Bruttorauminhalt [m <sup>3</sup> ]
ca. 11 074
Wand- & Deckenstärke [m]:
2,0



2) Bremen
Hardenbergstrasse
L B H (über OKGOF) [m]:
18 18 39
Bruttorauminhalt [m <sup>3</sup> ]
ca. 12 636
Wand- & Deckenstärke [m]:
2,0



3) Oberhausen
Baustrasse
L B H (über OKGOF) [m]:
17 20 12
Bruttorauminhalt [m <sup>3</sup> ]
ca. 4100
Wand- & Deckenstärke [m]:
2,0

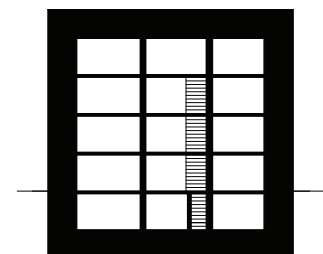
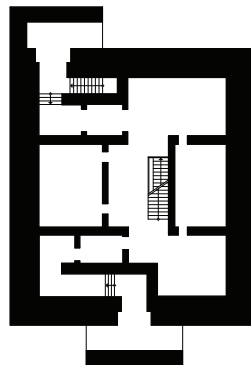


Abb. 82:  
Ausgewählte Bunker

Eigene Darstellung,  
Daten: Planunterlagen

Grundrisse

Schnitte

die Errichtung von Bunkern enthielten. Die Erste stammt aus dem Jahr 1939 und schrieb für den Bau von Luftschutztürmen u.a. eine Deckenstärke von 1,40 m und eine Wandstärke von 1,10 m vor. Die Armierung war als Gitterraum-, Spiral- oder kubische Bewehrung vorzusehen. Nach Bekanntgabe des Führersfortprogramms im Oktober 1940 wurden diese Richtlinien für die Bauten der I. Welle übernommen<sup>12</sup>. Für die Bunker der II. Welle galt das zweite Reglement, nämlich die „besonderen Bestimmungen für den Bau von LS Bunkern“; 1942 erlassen, wurden die bereits geltenden Anforderungen ausgeweitet und verschärft (Vgl.: Abb. 83). Ebenfalls verankert war der Einbau der sogenannten „Braunschweiger Bewehrung“, die eigens für den Bunkerbau vom Institut für baulichen Luftschutz in Braunschweig entwickelt wurde<sup>3</sup>. Auf Nachfrage können bei der BiMA Planungsunterlagen von insgesamt 17 bisher unverkauften<sup>4</sup> Bunkern bezogen werden. Aus der Aufstellung in Abb. 84 geht hervor, dass die gängigen Wand- und Deckenstärken bei den vorliegenden Objekten zwischen 1,10 m, 1,40 m und 2,00 m liegen.

- Schwungradspeicher, Hubspeicher und Pumpspeicher

Hinsichtlich der Eignung für die Systeme Schwungrad-, Hub- und Pumpspeicher kann an dieser Stelle auf die bereits erfolgte Prüfung der seriellen Hochbunker verwiesen werden. Obwohl man es in diesem Fall mit deutlich größeren Bauten zu tun hat, sind die strukturellen Unterschiede marginal. Auf den Punkt gebracht handelt es sich auch hierbei um Geschossbauten. Die außerordentlichen Wand- und Deckenstärken führen zu keiner Neubewertung der unzureichenden Eignung.

- Druckluftspeicher

Die Druckluftspeicherung ist das einzige System in der Reihe, dessen technische Anforderungen sich mit den baulichen Merkmalen der Hochbunker überschneiden. Zu nennen sind die fast vollständig geschlossene Aussenhülle, gepaart mit den massiv sowie hochbewehrt ausgeführten Wand- und Deckenbauteilen. Demnach besteht eine Eignung, die es zu prüfen gilt. Auch Tietjen benennt in seiner Promotion unter dem Titel „Hocheffizientes Druckluftspeicherkraftwerk mit Nutzung von Abwärme aus externen Quellen ohne Verwendung von Sondermaschinen“ Bunkeranlagen als potenzielle Speicher. *„Ebenfalls als Druckspeicher denkbar sind bisher ungenutzte Bunkeranlagen, insbesondere Tiefbunker oder unterirdische Anlagen. Bunker verfügen häufig über zum Teil meterdicke Stahlbetonwände, die das Potenzial zum Ertragen hoher Drücke bieten könnten.“*<sup>5</sup> Richtigerweise verweist der Autor an dieser Stelle auf die Problematik hoher Drücke, denn genau darin liegt die Herausforderung. Das Bauwerk muss mit Flächenlasten von 800 bis 3200 kN/m<sup>2</sup> umgehen können, womit die Schlüsselfrage nach dessen Eignung auf die Statik hinausläuft. Abschließend beantworten kann diese allerdings nur ein Tragwerksplaner, der es an einem konkreten Einzelfall prüft. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit muss sie offen bleiben, gleichwohl können noch zwei Aspekte aufgeführt werden, die für die Prüfung Relevanz besitzen. Diese betreffen die Betonfestigkeit und die verbaute Bewehrung. So belegen Untersuchungen der BiMA, dass die Druckfestigkeit des verbauten Betons mittlerweile bei der Festkeitsklasse C55, an-

Wand - und Deckenstärken	
Belegungszahl	Stärke [m]
> 1500	3,00
mehr als 1000	2,50
< 300	2,00

Abb. 83:  
Wand - und Deckenstärken nach der Richtlinie aus dem Jahr 1942

Eigene Darstellung,  
Daten: BiMA

Nr.	Wand [m]	Decke [m]
1)	2,00	1,40
2)	2,00	2,00
3)	2,00	2,00
4)	2,00	2,00
5)	1,10	1,40
6)	1,10	1,40
7)	2,00	1,40
8)	1,10	1,40
9)	1,10	1,40
10)	1,10	1,40
11)	1,10	1,40
12)	2,50	1,40
13)	k.A.	k.A.
14)	2,50	1,40
15)	2,00	2,00
16)	2,15	1,40
17)	2,00	k.A.

Abb. 84:  
Wand - und Deckenstärken

Eigene Darstellung,  
Daten: BiMA

1 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998a, S. 26  
 2 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b, S. 6  
 3 Vgl.: Foedrowitz, Michael, 1998b, S. 34  
 4 Stand: 15.02.2016  
 5 Vgl.: Tietjen, Theo, 2013, S. 24

statt der ursprünglich anzusetzenden Klasse C30 liegt<sup>1</sup>. Das Ergebnis aus über 70 Jahren Nacherhärtung. Auch die verbaute Bewehrung entspricht keinem Standard. Bekannt sind insgesamt sechs Ausführungsarten<sup>2</sup>, von denen die sogenannte kubische Bewehrung für eine kleine Studie herangezogen werden soll. Diese Form der Armierung verwendet 12 mm starke Stäbe, welche den gesamten Wandquerschnitt horizontal und vertikal in einem Abstand von 100 mm bis 150 mm durchziehen<sup>3</sup>. Betrachtet man einen ein Meter breiten Wandstreifen und vergleicht den gesamten Bewehrungsquerschnitt der kubischen, mit der heute üblichen Bewehrung nach DIN EN 1992-1-1 (EC2), ergibt sich das Bild nach Abb. 85.

Den erforderlichen Bewehrungsquerschnitt nach DIN EN 1992-1-1 (EC2) kann durch Multiplikation des betrachteten Wandquerschnitts mit dem Faktor 0,0015 ermittelt werden<sup>5</sup>.

Abb. 85: Vergleich der Bewehrungsquerschnitte

	Wandstärken [m]		
	0,3	1,1	2,0
<b>1) Kubische Bewehrung</b>			
Gesamter vertikaler Bewehrungsquerschnitt [cm <sup>2</sup> ]	20	102	193
<b>2) Bewehrung nach DIN</b>			
Gesamter vertikaler Bewehrungsquerschnitt [cm <sup>2</sup> ]	4,5	17	30
<b>Faktor 1 / 2</b>	<b>4,5</b>	<b>6,2</b>	<b>6,4</b>

Die Auswertung verdeutlicht, dass die kubische Bewehrung um einen Faktor von 4,5 bis 6,4 über dem Bewehrungsquerschnitt einer nach heutigen Standards ausgeführten Bewehrung liegt.



### Hochbunker | Übergroße Hochbunker spezifischer Prägung und Funktion

Ein gutes Beispiel für diesen Bunkertypen sind die Flaktürme, von denen insgesamt zwölf Exemplare in Berlin, Hamburg und Wien erbaut wurden. Im Gegensatz zu den Bunkern mit reiner Zivilschutzfunktion, sind die Flakbunker auch mit Geschützen zur Fliegerabwehr ausgestattet<sup>4</sup>. Abgesehen von ihrer Größe, kann man sie aus struktureller Sicht mit den zuvor beschriebenen Bunkern der I. und II. Welle gleichsetzen.

- Schwungradspeicher, Hubspeicher, Pumpspeicher und Druckluftspeicher



Abb. 86: Flakturm im Wiener Augarten

Für die Eignungsprüfung gilt sinngemäß das, was bereits zu den Hochbunkern mittlerer Größe ausgeführt wurde. Was die Druckluftspeicherung anbelangt, soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Flakbunker in Teilen über noch stärker dimensionierte Wände und Decken ( bis zu 3,50 m) verfügen. Darüberhinaus bieten sie natürlich auch mehr Speichervolumen.

1 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 31  
 2 Vgl.: Kern, Georg, 1961b, S. 304 -307  
 3 Vgl.: Kern, Georg, 1961b, S. 304 -307  
 4 Vgl.: Angerer, Henning: Flakbunker, Hamburg 2000

---

## Tiefbunker | Integrierte Tiefbunker

Die integrierten Tiefbunker sind immer Bestandteil eines anderweitig genutzten Gebäudes. Häufig wurde so im Falle der erwähnten Ausweichsitze von Bezirks- und Landesregierungen verfahren, u.a. aus Gründen der Tarnung. Beispielhaft seien die Ausweichsitze der Landesregierung Schleswig-Holsteins und der Bezirksregierung Münster genannt, die sich beide unter öffentlichen Schulgebäuden befinden<sup>1</sup>.



- Schwungradspeicher, Hubspeicher, Pumpspeicher und Druckluftspeicher

Die integrierten Tiefbunker verfügen meist über ein bis zwei Geschosse, die in eine Vielzahl kleiner Räume und Flure untergliedert sind. Weitestgehend erinnern die Grundrisse an ein Krankenhaus oder Ähnliches. Eine Eignung für eines der betrachteten Systeme ist nicht gegeben. Auch die unmittelbare Nachbarschaft zu anderen Nutzungen kann z.B. im Falle der Druckluftspeicherung als problematisch angesehen werden.

## Tiefbunker | freiliegende Tiefbunker

Von den freiliegenden Tiefbunkern sind vergleichsweise wenig Exemplare erbaut worden. Wenn überhaupt stammen diese aus der Zeit des Kalten Krieges, von unterirdischen Bunkern kam man im Zuge der Bauprogramme der I. und II. Welle schon sehr früh ab<sup>2</sup>. Wie bereits erwähnt, können an dieser Stelle die zehn Warnämter als Beispiele aufgeführt werden.



- Schwungradspeicher, Hubspeicher und Pumpspeicher

Ein Blick auf Schnitt und Grundriss der Warnämter genügt, um die mangelnde Eignung festzustellen. Die Parallelen zum gewöhnlichen Geschossbau tun sich auch hier auf.

- Druckluftspeicher

Die Tiefbunker sind ähnlich zu bewerten wie die Hochbunker, wobei ihnen die unterirdische Lage sowie die Decken- und Wandstärken von drei Metern Stärke zu Gute kommen. In Kombination mit dem auftretenden Erddruck sind sie hinsichtlich der statischen Leistungsfähigkeit den Hochbunkern überlegen.

## Tiefbunker | stollenartige Tiefbunker

Die stollenartigen Tiefbunker umfassen eine vergleichsweise große Anzahl unterschiedlicher Bauwerke. Auf die problematische Quellenlage wurde bereits in der Einleitung hingewiesen. Vorab ausschließen kann man die sogenannten Luftschutzstollen aus dem Zweiten Weltkrieg, die Foedrowitz als eigenen Typen aufführt. Diese wurden im Zuge der III. Welle des Sofortprogrammes erbaut, einer Zeit, in der Material- und Arbeitskräftemangel das Erbauen von Hochbunkern in großer Zahl nicht mehr zuließ. Dementsprechend mangelhaft und wenig dauerhaft ist auch häufig deren Ausführung. Untersuchungen am Beispiel der Stadt Salzgitter belegen, dass der Großteil der dort erbauten Stollen heutzutage verfallen, verfüllt oder nicht mehr zugänglich ist<sup>3</sup>. Interessanter sind



1 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 92 - 99

2 Vgl.: Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.], Berlin 2015, S. 30

3 Vgl.: Rychlak, Martin, Salzgitter 2007

stollenartige Anlagen wie der ehemalige Regierungsbunker im Ahrtal bei Bonn, der stellvertretend für eine Vielzahl anderer, nicht hinreichend dokumentierter Anlagen stehen soll. Dieser, mittlerweile fast vollständig zurückgebaute Bunker, wurde von 1959 bis 1972 erbaut und umfasst Haupt- und Nebestollen mit einer Gesamtlänge von fast 19 km, bei einem Volumen von 367 000 m<sup>3</sup>. Der Hauptstollen hat einen Durchmesser von sieben bis acht Metern und besteht aus einer 40 bis 50 cm starken Betonröhre, die in die Wandung eines ehemaligen Eisenbahntunnels betoniert wurde. Der Rückbau der Anlage zwischen 2001 und 2004 ging soweit, dass man sogar die Ölfarbe von den Innenflächen der Betonröhren entfernte<sup>1</sup>.

- Schwungradspeicher, Hubspeicher und Pumpspeicher

Für die Systeme Schwungrad-, Hub- und Pumpspeicher bieten die stollenartigen Anlagen keine zwingende Eignung. Allenfalls wäre es möglich, Schwungräder in die Stollen zu stellen, wobei es fraglich ist, ob man damit das Potenzial dieser Bauwerke ausschöpft.

- Druckluftspeicher

Man kann schon fast soweit gehen zu sagen, dass die stollenartigen Tiefbunker sämtliche Anforderungen der Druckluftspeicherung erfüllen. Insbesondere was deren Druckbelastbarkeit anbelangt, sind sie einzigartig. Das kreis- bzw. eiförmige Profil der Stollenröhren ist formaktiv und darüber hinaus von Fels umgeben<sup>2</sup>. Das gilt zumindest für den Bunker im Ahrtal. Dementsprechend hoch sollten die ansetzbaren Drücke sein. Entscheidend ist am Ende der bauliche Zustand der Anlage und inwiefern es möglich ist, diese luftdicht auszuführen. Theoretisch könnte man bei einem nutzbaren Volumen von 250 000 m<sup>3</sup> und einem Speicherdruck von 32 Bar ca. 200 MWh Energie speichern.

### 1.3.5. Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zum Industriebau, bei dem sich die Eignung auf verschiedene Bauwerkstypen und Systeme verteilt, beschränkt sich die Ausbeute im Militärbau auf einen Typen: die stollenartigen Tiefbunker. Angesichts der außerordentlich hohen Eignung dieses Typs und der Tatsache, dass Speichermengen im Bereich von bis zu 200 MWh möglich wären, hat das Ergebnis aber einen vergleichsweise hohen Stellenwert. Darüber hinaus ist es das einzige Bauwerk, welches mit den als sehr speziell und anspruchsvoll einzustufenden Anforderungen der Druckluftspeicherung korrespondiert. Als Alleinstellungsmerkmal verleiht es dem Ergebnis eine besondere Qualität, die im Kontext der Arbeit als Ganzes nicht untergehen soll. Ansonsten wären noch die teilnormierten Hochbunker mittlerer Größe der I. und II. Welle, die freiliegenden Tiefbunker und die übergroßen Hochbunker spezifischer Prägung und Funktion zu nennen, die zwar auch den Anforderungen der Druckluftspeicherung entgegenkommen, deren tatsächliche Eignung allerdings u.a. nur in Verbindung mit genauen statischen Berechnungen und der Auswertung von Materialproben bestimmt werden kann.

1 Vgl.: Lubbe, Christoph, 2013, S. 74 - 78

2 Vgl.: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und Stiftung Haus der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland [Hsrg.], Tübingen 2006, S. 64

# Kapitel IV **Pilote**

## 1.0 Einleitung

Die typologische Eignungsprüfung hat eine Reihe an Bauwerkstypen ergeben, die sich für eine (Um-)Nutzung als Energiespeicher qualifizieren. Während im militärischen Bereich in erster Linie die stollenartigen Bunkerbauten zu nennen wären, sind es im industriellen Sektor, neben den Kühltürmen, vor allem die Silobauten, welche sich in besonderer Form auszeichnen. Im nachfolgenden Kapitel wird die typologische Eignungsprüfung um die Ebene der konkreten Planung erweitert, indem die Umnutzung zu zwei Speichertypen, nämlich dem Pump- und dem Hubspeicher, an einem existierenden Referenzbauwerk vollzogen wird. Die Pilote dienen in erster Linie als Stichprobe, um diese Ergebnisse der typologischen Eignungsprüfung zu validieren. Es werden aber auch neue Erkenntnisse gewonnen, wie etwa der Kostenrahmen, innerhalb dessen sich eine Umnutzung bewegen würde.

An erster Stelle steht natürlich die Stichprobenauswahl, also die Frage nach dem passenden Referenztyp bzw. -bauwerk. Im günstigsten Fall sollte dieses nicht nur eine ausgeprägte Eignung für eines oder besser gleich mehrere der untersuchten Speichersysteme besitzen, sondern sich gleichermaßen hinsichtlich seiner spezifischen Charakteristika mit einem Großteil der Bauwerke gleichen Typs decken. Somit ist gewährleistet, dass die Ergebnisse der Pilotprojekte auf möglichst viele Bauten gleicher oder ähnlicher Gattung übertragbar sind. Was die Eignung anbelangt, gibt es neben den Silobauwerken keinen weiteren Typen, der sich für zwei der insgesamt vier Speichersysteme eignet. Somit ist es offenkundig, warum dieser als Referenz herangezogen wird. Die Wahl des konkreten Planungsobjektes fällt auf die Wesermühlen in Hameln. In diesem Fall hat man es mit einem Getreidesilo kleiner bis mittlerer Größe zu tun, was sich neben der Typzugehörigkeit auch aufgrund weitergehender Kriterien qualifiziert. Zum einen erfüllt es durch die Lage am Hamelner Hafen zwingende Anforderungen der Pumpspeicherung an den Kontext, zum anderen ist das Objekt seit Mitte 2014<sup>1</sup> von Leerstand betroffen. Dieser Umstand verleiht der Untersuchung eine besondere Qualität, da sie nicht nur rein akademischer Natur ist, sondern ggf. Lösungsansätze für ein akutes Problem liefern kann.

## 2.0 Die Wesermühlen



Abb. 87:  
Wesermühlen Gesamtkomplex

Bei den Wesermühlen handelt es sich um einen zweiteiligen Industriekomplex am Hafen der niedersächsischen Stadt Hameln. Dieser besteht aus einem Hauptgebäude, der eigentlichen Mühle, und dem sog. Silo III, welches auf der gegenüberliegenden Seite des Hafenbeckens, vis-a-vis zur Mühle, situiert ist. Die Wesermühlen sind bis Mitte 2014 in Betrieb, dann wird der Standort vom Betreiber Kampffmeyer bzw. GoodMills Deutschland stillgelegt und zum Verkauf angeboten. Zwischen 2014 und 2016 wird das Thema mehrfach in der lokalen Presse aufgegriffen, bekannt sind vier Artikel aus der DEWEZET, der Deister- und Weserzeitung. Während zwischenzeitlich auf die großen Schwierigkeiten beim Verkauf des großflächigen Ensembles hingewiesen wird<sup>2</sup>, erscheint 2016 ein Beitrag, in dem der angebliche Verkauf von Mühle und Silo bekanntgegeben wird. Ein Nutzungsmix aus Wohnen und Arbeiten soll die Wesermühlen wieder zum Leben erwecken. Offiziell bestätigt ist der Verkauf laut Autor allerdings nicht<sup>3</sup>. Unabhängig davon bleiben die Wesermühlen als Anschauungsobjekt interessant. Darüber hinaus müssen die tradierten Nutzungsvorschläge Woh-

1 Vgl.: Behmann, Ulrich, 2014, o.S.

2 Vgl.: Tiedemann, Andrea, Behmann, Ulrich, 2015, o.S.

3 Vgl.: Behmann, Ulrich, 2016, o.S.



nen und Arbeiten erst noch den Beweis erbringen, sich auch längerfristig am Standort Hameln halten und etablieren zu können. Ebenso wirft der Umgang mit der Gebäudesubstanz eine Reihe Fragen auf. Neben der Tiefe des Hauptgebäudes ist es vor allem die Baustruktur des Silo III, welche ohne umfangreiche Umbaumaßnahmen nur schwer mit den Ansprüchen von Wohn- oder Büronutzungen zu vereinen ist. Im Gegensatz dazu können Nachnutzungen, welche mit den baustrukturellen Gegebenheiten so weit wie möglich korrespondieren, wie sie diese Arbeit untersucht und aufzeigt, Lösungen hervorbringen, bei dem der Bestandsbau ein wirklicher Zugewinn und kein Hindernis darstellt. Die hohe Passung kann jedoch nicht nur das Funktionale, sondern auch das Wirtschaftliche bedingen. Das bestätigt das Ergebnis, welches aus den Kostenschätzungen auf Seiten 124 - 125 hervorgeht.

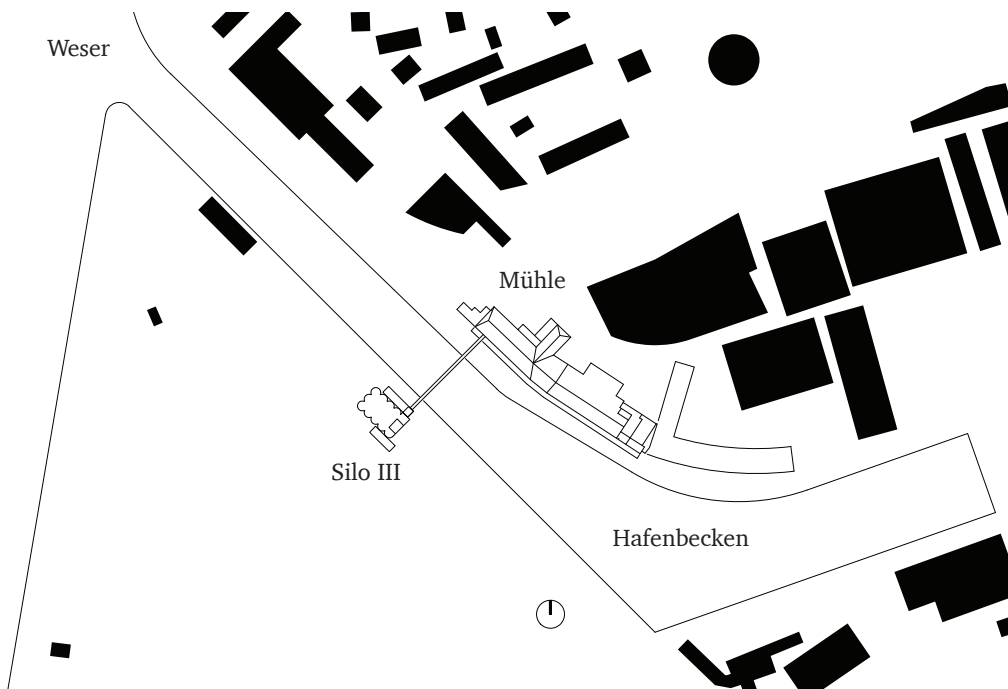


Abb. 88:  
Lageplan  
Wesermühlen  
[ohne Maßstab]

## 2.1. Objektbewertung

Bei einer Vor-Ort Begehung im August 2015 werden sowohl Hauptgebäude, als auch das Silo III in Augenschein genommen. Zu diesem Zeitpunkt sind im Hauptgebäude bereits umfangreiche Abbruch- und Demontagemassnahmen vorgenommen worden, die in erster Linie die maschinelle Einrichtung betreffen. Das Gebäude ist damit in großen Teilen bereits entkernt. Das Silo III hingegen bleibt unangetastet, lediglich die Verbindungsbrücke über das Hafenbecken befindet sich im Rückbau. Insgesamt kann man die Bausubstanz als gut bis sehr gut bewerten, was sicherlich auf eine sorgsame Pflege und Erhaltung zurückzuführen ist sowie den Umstand, dass die endgültige Aufgabe der Gebäude zum damaligen Zeitpunkt erst ein Jahr zurücklag. Die Ausgangsbedingungen für eine Umnutzung, ganz gleich welcher Natur, sind also als durchweg positiv einzustufen.

Gegenstand der Pilotprojekte ist alleine das Silo III, das Hauptgebäude wird dabei nicht weiter betrachtet. Obwohl auch dieses Bereiche umfasst, die sich für eine Energiespeicherung eignen, ist es vor allem deren wiederkehrende Mischung mit Geschossstrukturen, die eine Umnutzung erschweren und das Bau-



Abb. 89:  
Entkerntes Geschoss



Abb. 90:  
Verteil- und Füllebene Silo III

werk im Sinne der eingangs beschriebenen Ziele einer Referenzstudie als ungeeignet erscheinen lassen. Während freistehende Silos, wie das Silo III, keine Ausnahmeerscheinung, sondern eher die Regel sind, kann man das Hauptgebäude der Wesermühlen als Sonderfall einstufen.

## 2.2. Silo III



Abb. 91:  
Silo III

Das Silo III ist ein Getreidesilo mit einem Fassungsvermögen von 20 000 Tonnen. Das gesamte Bauwerk ist in Stahlbeton errichtet und erreicht eine Höhe von ca. 52 m. Es umfasst elf Zellen mit einem lichten Durchmesser von 6,69 m, wobei die Zellen im Mitteltrakt jeweils in vier Subeinheiten unterteilt sind. Zwischen dem Mittel- und den beiden angrenzenden Außentrakten spannen sich die sogenannten Zwickelzellen auf, die etwa die gleiche Größe erreichen wie die geteilten Zellen in der Mitte. Alle Zellen haben eine Wandungsstärke von 20 cm, wobei die Außenzellen im Querschnitt bis zu drei Viertel kreisförmig ausgebildet ist. Im Nordosten liegt die zweiläufige Hauptschließung und der Teil des Gebäudes, welcher über zwölf Stockwerke als Geschossbau ausgeführt ist. Dabei erstreckt sich die oberste Ebene über die gesamte Breite von 35 Metern. Zu Betriebszeiten diente diese dazu die Silozellen zu beschicken. Im Gegenzug existiert ein durchgängiges Untergeschoss, in welches die Siloauslässe zum Leeren der Zellen münden. Das Silo III verfügt über drei Anbauten. Zwei leichte, vermutlich mit Faserzementplatten verkleidete Stahl Funktionsbauten an den Längsseiten und dem massiven, eingeschossigen Verwaltungstrakt im Nordosten. Weitere Kenndaten können der nebenstehenden Tabelle entnommen werden.

Kenndaten Silo III	
Grundfläche	
724,00	[ m <sup>2</sup> ]
Bruttogeschossfläche	
2870,00	[ m <sup>2</sup> ]
Bruttorauminhalt	
40 000,00	[ m <sup>3</sup> ]
Innenvolumen der Zellen	
22 000,00	[ m <sup>3</sup> ]

Abb. 92:  
Kenndaten Silo III

Eigene Darstellung,  
Daten: Planunterlagen

## 2.3. Pilotprojekt A: Hubspeicher

### 2.3.1. Entwurfsbeschreibung<sup>1</sup>

Pilot A sieht die Umnutzung des Silo III zu einem Hubspeicherkraftwerk vor. Die Höhe von 52 m, gepaart mit den durchgängigen Vertikalräumen der Silozellen, stellen die entscheidenden Eignungsvoraussetzungen dar. Dreh- und Angelpunkt der Planungsstudie sind Anzahl, Auslegung und Unterbringung der Hubwerke. Zunächst bietet es sich an, die ehemalige Verteil- und Füllenebene im zwölften Obergeschoss zur Platzierung der Maschinensätze zu nutzen [1]. Zum einen hat man genügend Fläche, die mit Ausnahme von vier Stahlbetonstützen auch störungsfrei ist, zum anderen befindet man sich an strategisch günstiger Position, unmittelbar über den Kappen der Silozellen. Es werden verschiedene Varianten erprobt, bei der das Gewicht der Speichereinheiten zwischen 65, 75 und 100 T variiert wird. Als Optimum hat sich ein Gewicht von 65 T erwiesen, damit kann man insgesamt 26 Hubeinheiten vorsehen, zwei über jeder Zelle. Sowohl bei 75, als auch bei 100 T ist dies aufgrund der breiteren Trommeln nicht möglich, zumindest verbleibt dem eigenen Ermessen nach zu wenig Raum für Toleranzen. Auch eine Vergrößerung des Trommeldurchmessers von 1,35 auf 1,40 m oder mehr wird in Erwägung gezogen, das erhöhte Trommelabtriebsmoment treibt jedoch die Dimensionen des Getriebes unverhältnismäßig in die Höhe. Man hätte somit an anderer Stelle mit Platzproblemen zu kämpfen. Theoretisch wäre es denkbar die Ebene im zwölften Obergeschoss zu verlassen und die Hubeinheiten in einer Aufstockung unterzubringen, womit man Platz gewinnen könnte, diese Option wird jedoch zugunsten der eingangs beschriebenen Lösung nicht weiter

<sup>1</sup> Vorab ist es hilfreich, die auf den nachfolgenden Seiten abgebildeten Planunterlagen zu sichten. Die in Klammern stehenden Zahlen dienen der Orientierung und finden sich auf den Plänen wieder.

---

verfolgt. Als Aufsetzfläche für die Hubgewichte wird ein Kiesbett vorgesehen, welches durch das Verfüllen der Silokegel hergestellt wird [2].

Die Positionierung der Hubwerke zieht eine Reihe zwingender Umbau- bzw. Abbruchmaßnahmen nach sich. Dazu zählen der Rückbau der Silokappen [3] und der längs verlaufenden Trennwände [4] im mittleren Silotrakt sowie der Abbruch des bestehenden Daches [5]. Bei Letzterem ist es nicht die Funktion des Hubspeichers selber, sondern das erstmalige Einbringen und der ggf. notwendige Austausch der Hubwerke, welche Rück- und Neubau bedingen. Das neu zu errichtende Dach wird als Stahlkonstruktion mit einer leichten Blecheindeckung projektiert und müsste aus zuvor genannten Gründen über die Möglichkeit zur Reversion verfügen. Die Flächen über den Zellen bzw. den Hubwerken sind demzufolge von der primären d.h. irreversiblen Tragkonstruktion des Daches ausgespart. Die Hubwerke sitzen mittig über den zugeordneten Zellenhälften und liegen auf vier Stahlträgern auf. Vorbehaltlich einer genauen statischen Bemessung werden diese überschlägig mit einer Höhe von 1,00 m angenommen. Die Träger spannen von Zell- zu Zellwand oder von Zell- zu Außenwand, wo sie in einer Auflagertasche Halt finden. Die gesamte Ebene ist so organisiert, dass man über Laufstege alle Einheiten zwecks Wartung, Austausch oder im Falle einer technischen Störung erreichen kann.

Neben den Eingriffen am eigentlichen Silo werden weitere Abbruchmaßnahmen vorgenommen. Diese sind zwar nicht zwingend notwendig, aber aus verschiedenen Gründen zu legitimieren. Dazu zählen der erwähnte Verwaltungstrakt [6] im Nordosten und die zwei leichten Anbauten an den Längsseiten [7]. Letztere haben für die Funktion als Hubspeicher keine Bewandnis, müssten aber im Falle einer Folgenutzung weiter instand gehalten werden. Da es sich um leichte Konstruktionen ohne tiefgreifende Verbindungen zur Primärstruktur des Silos handelt, kann man davon ausgehen, dass der Abbruch mit vertretbarem Aufwand zu realisieren ist. Eine Annahme, die sich beim Auswerten der Kostenschätzung bestätigt. Analog verhält es sich beim Verwaltungstrakt. Das einzige Argument was gegen einen Abbruch spricht, wäre die Möglichkeit zur Fremdvermietung der Räumlichkeiten. Inwiefern sich Interessenten für eine Nutzung des Anbaus finden würden, kann an dieser Stelle allerdings nicht beantwortet werden. Im vorliegenden Fall wird daher von einem Abbruch ausgegangen.

### **Zwischenfazit**

Die Planungsstudie bestätigt die hohe Eignung des Typs Silo für das System Hubspeicher und damit auch die Ergebnisse der typologischen Eignungsprüfung. Unabhängig von den anfallenden Kosten kann man sagen, dass die erforderlichen Umbauaßnahmen behutsam bleiben. Immerhin kann das Silo äußerlich praktisch unangetastet bleiben und die Sichtung der Planunterlagen offenbart: auch das Innenleben wird bis auf wenige gezielte Eingriffe verschont. Diese resultieren in Teilen aus den unterschiedlichen Formaten der Silozellen, was bereits in der Eignungsprüfung als struktureller Nachteil ausgewiesen wurde. Als Suboptimal kann man den Abbruch und den Neuaufbau des Daches bezeichnen. Mit Sicherheit eine Maßnahme, auf die man gerne verzichten würde, die man aber billigend in Kauf nehmen muss. Im Verhältnis zu den gesamten Baukosten nimmt diese aber nur einen unbedeutenden Stellenwert ein.

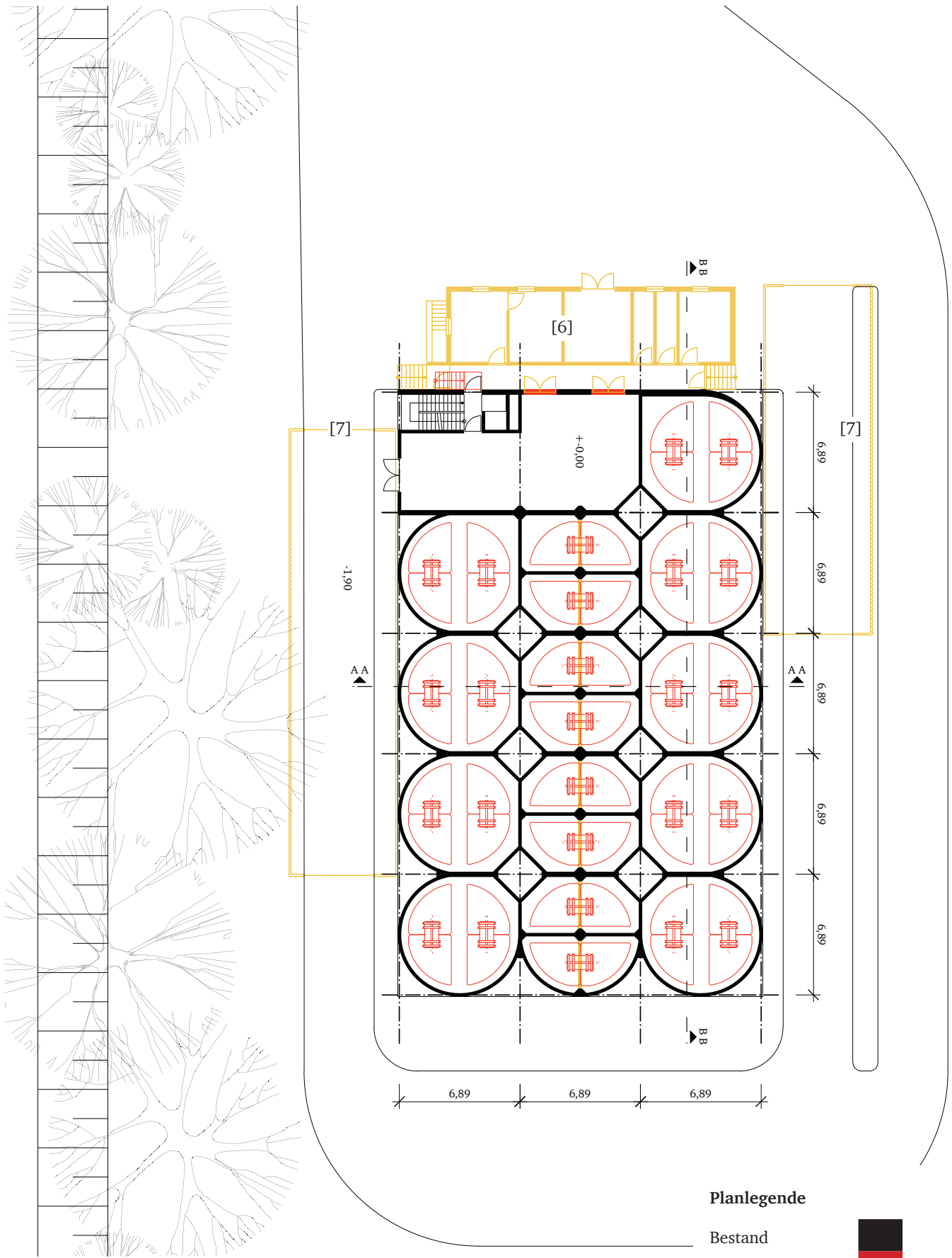


Abb. 93:  
Grundriss Erdgeschoss

**Planlegende**

Bestand

Neubau

Abbruch



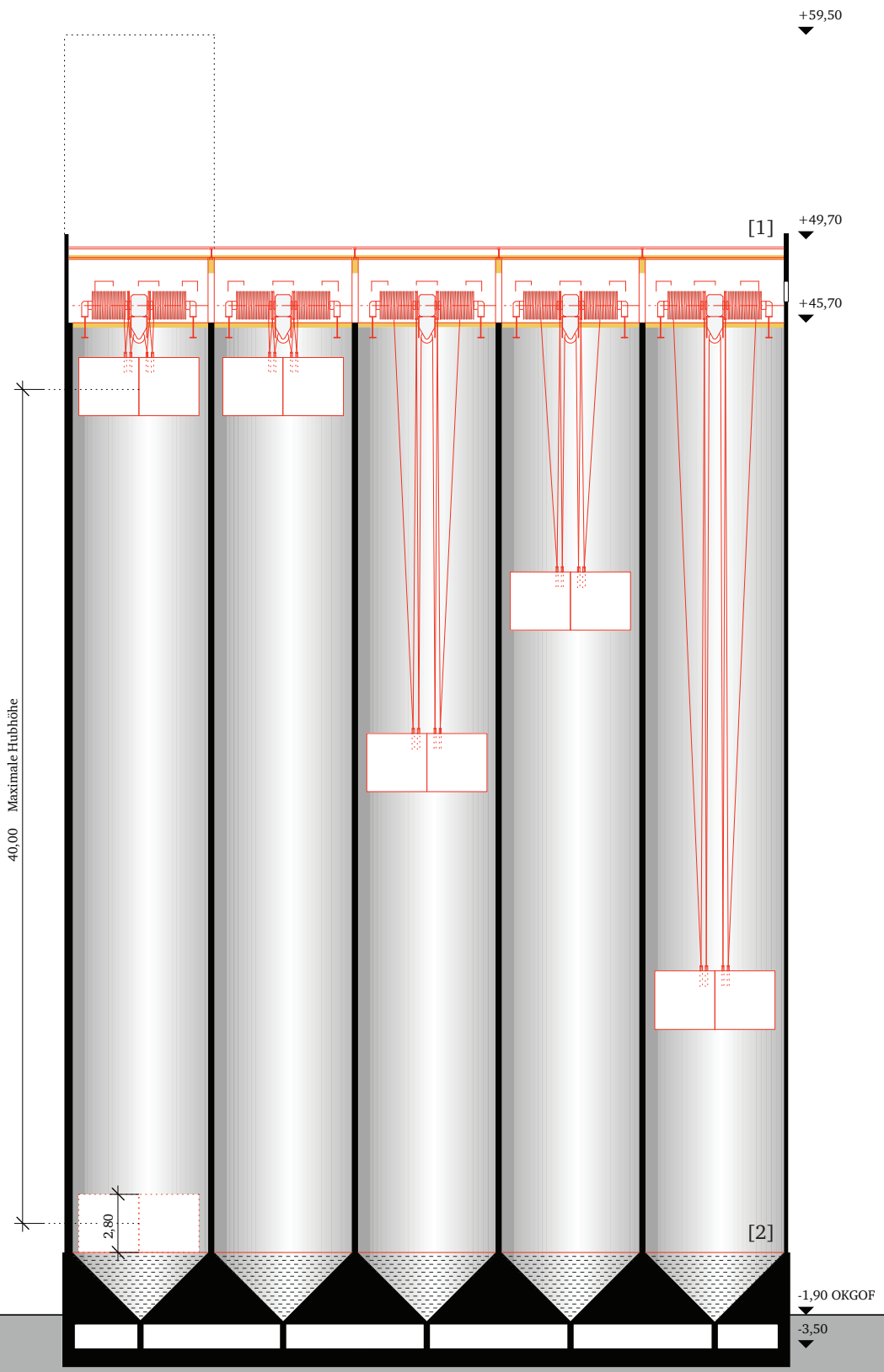
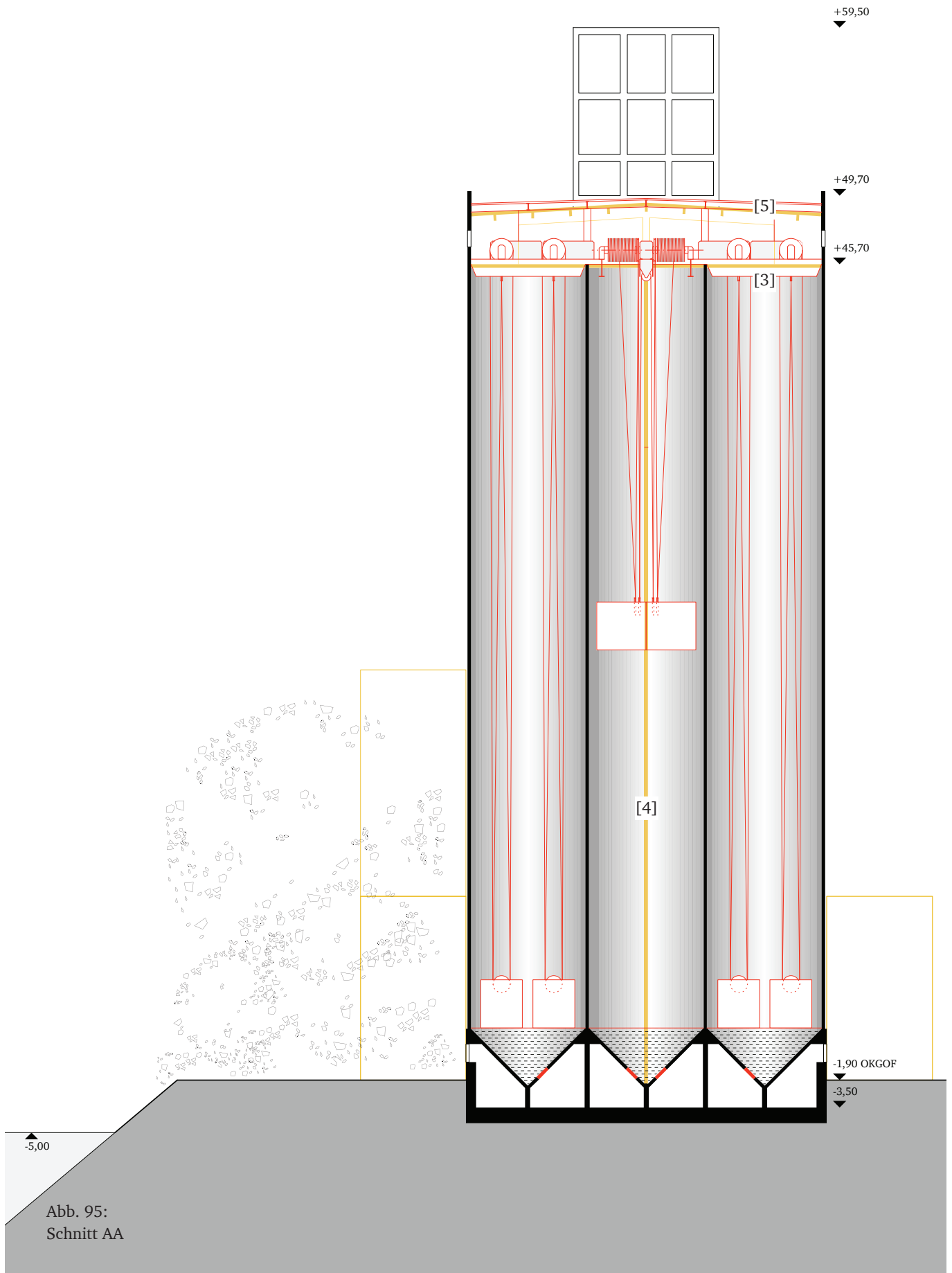


Abb. 94:  
Schnitt BB



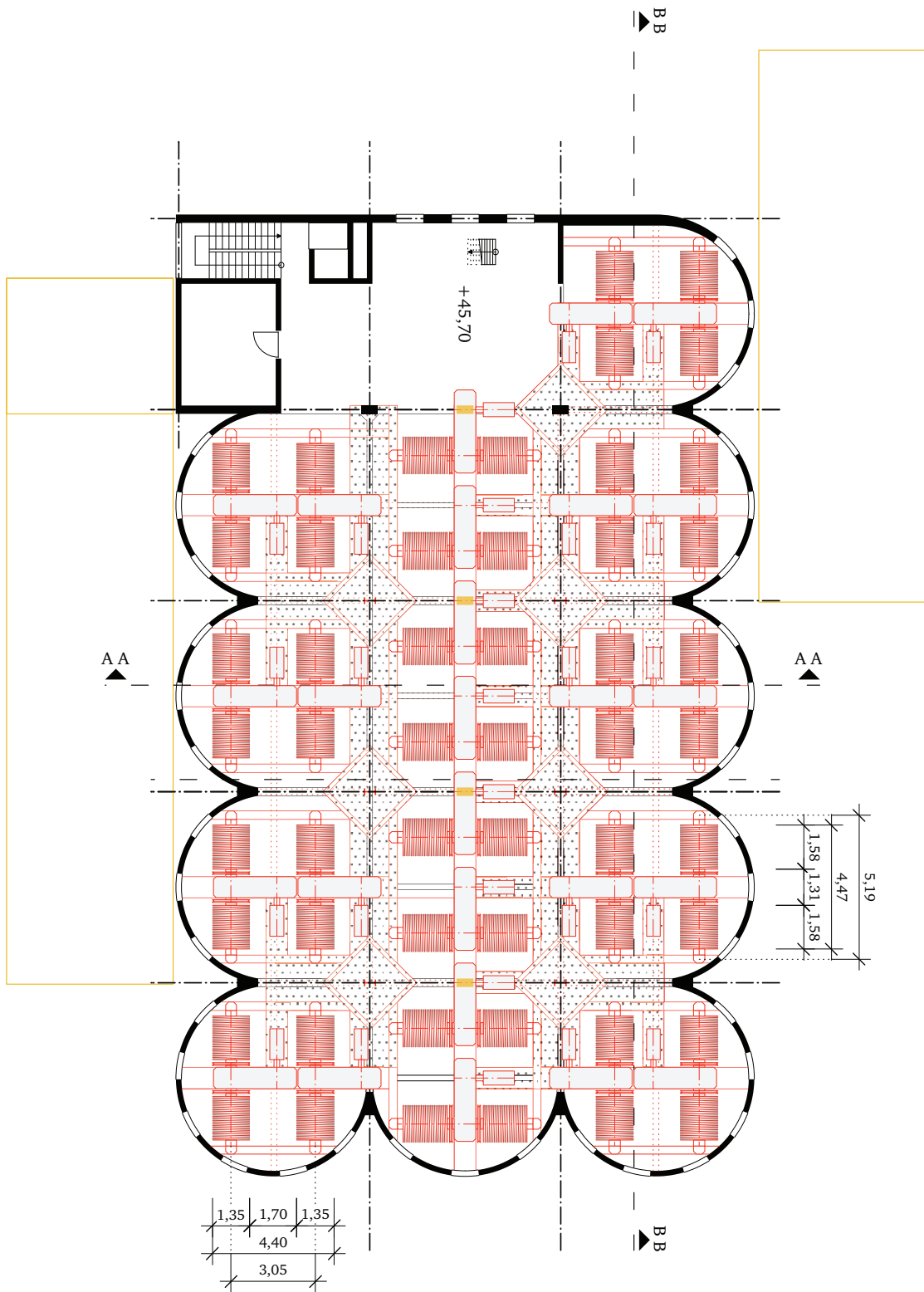


Abb. 96:  
Grundriss Maschinenebene

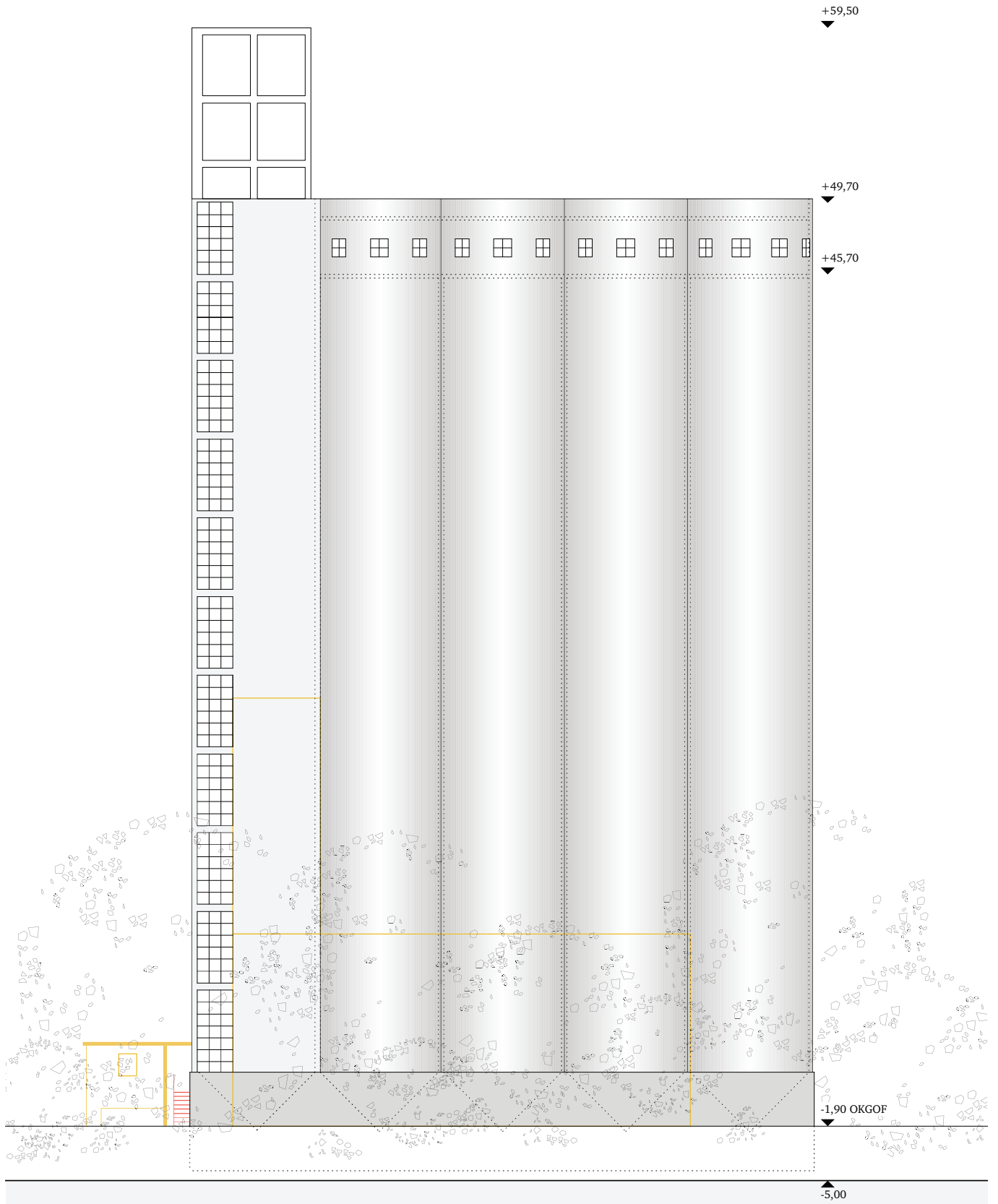
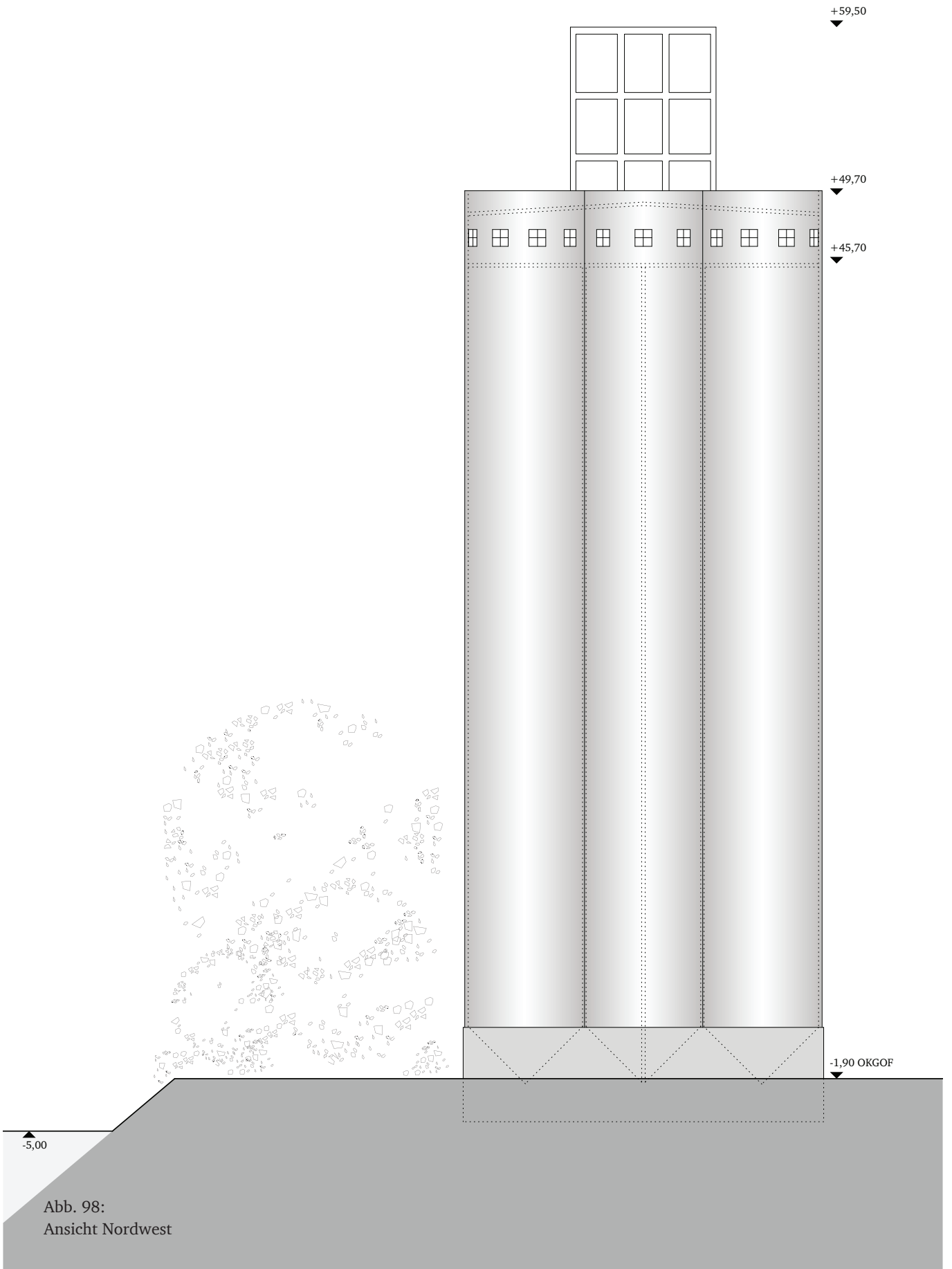


Abb. 97:  
Ansicht Nordost





### 2.3.2. Kostenschätzung

#### Vorbemerkungen<sup>1</sup>

Die Kostenschätzung für die Umnutzung des Silo III wird in Anlehnung an die DIN 276 aufgestellt und umfasst die Kostengruppen 100 bis 700. Bepreist wird nach den Fachbüchern des BKI<sup>2</sup>. Hierzu zählen die Baukosten Gebäude 2014<sup>3</sup>, die Baukosten Gebäude Altbau 2014<sup>4</sup> und die Baukosten Positionen 2013<sup>5</sup>. Darüber hinaus werden einige Werte aus der Fachliteratur übernommen und in Ausnahmefällen Angaben führender Hersteller verwendet. Die ausführliche Kostenschätzung mit detaillierten Anmerkungen zu einzelnen Positionen und Quellen findet sich in der Anlage.

Ergebnisse Kostenschätzung		Summen min	Summen ø
<b>Maschinelle Komponenten</b>			
Hubwerke	€	1.972.425,00	1.972.425,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	79,71	72,99
<b>Abbruch Nebengebäude optional</b>			
Anbau Nord	€	25.024,00	25.806,00
Anbau Süd	€	14.784,00	15.246,00
Anbau West	€	24.613,50	33.897,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	2,60	2,77
<b>Abbruch Silotrakt</b>			
	€	196.012,60	256.534,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	6,51	7,81
<b>Umbau Silotrakt</b>			
	€	241.784,50	398.409,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	9,77	14,74
<b>Zwischensumme / Alle Maßnahmen</b>			
	€	2.474.643,60	2.702.317,00
<b>Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen</b>			
	€	2.410.222,10	2.627.368,00
<b>KG 700 Baunebenkosten (ca. 25% KG 300 - 600)</b>			
Alle Maßnahmen	€	618.660,90	675.579,25
Nur zwingende Maßnahmen	€	602.555,53	656.842,00

Abb. 99:  
Auszug Kostenschätzung

- 1 Anmerkung: Die Vorbemerkungen gelten sinngemäß auch für die Kostenschätzung des PSPKW
- 2 BKI: Baukosteninformationszentrum deutscher Architektenkammern
- 3 Vgl.: BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.], Stuttgart 2014a
- 4 Vgl.: BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.], Stuttgart 2014b
- 5 Vgl.: BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.], Stuttgart 2013

KG200			
	€	1.428,00	2.856,00
Gesamtsumme			
Alle Maßnahmen	€	3.094.732,50	3.380.752,25
Nur zwingende Maßnahmen	€	3.014.205,63	3.287.066,00
Regionalfaktor			0,95
Alle Maßnahmen	€	2.943.090,61	3.215.095,39
Nur zwingende Maßnahmen	€	2.866.509,55	3.125.999,77

Das Hubspeicherkraftwerk ist laut Kostenschätzung mit einem Gesamtinvestitionsvolumen von ca. 3,2 Millionen Euro behaftet. Legt man dieses auf die Kapazität von 147 kWh um, ergibt sich ein Kapitalaufwand von ca. 21.000 Euro pro Kilowattstunde (siehe Anmerkung). Ohne Zweifel kann dieser als sehr hoch bezeichnet werden, immerhin liegt das Pumpspeicherkraftwerk im Vergleich bei 3.100 Euro, handelsübliche Akkumulatoren zur Speicherung von Strom aus Photovoltaik bei ca. 200 (Blei-Säure) bis 1100 Euro (Lithium Ionen)<sup>1</sup>. Wenn man sich die einzelnen Positionen vor Augen führt, ist die Hauptinvestitionssumme eindeutig auf die maschinellen Einrichtungen der Hubwerke zurückzuführen, diese generieren mit ca. 1,9 Millionen Euro über 70% der Kosten. Die reinen Baukosten, also der Aufwand für Abbruch- und Umbaumaßnahmen am Bestandsgebäude betragen zusammen ca. 730.000 Euro, was dem verbleibenden Anteil von 30% entspricht. Bestätigt hat sich der vergleichsweise geringe Aufwand zum Abbruch der drei Anbauten. Bezogen auf die Gesamtsumme macht dieser nur 3% der Kosten aus, im Verhältnis zu den reinen Baukosten sind es 10%. Der Abbruch von Silokappen und Zwischenwände ist dagegen nicht zu unterschätzen. Dieser beläuft sich immerhin auf 250.000 Euro, was 40% der reinen Baukosten entspricht. Die verbleibende Summe ist auf die nicht unerheblichen Mengen an Baustahl zurück zu führen, insgesamt ca. 85 Tonnen, die zur Montage der Hubwerke erforderlich sind.

## Fazit

Abschließend ist das Hubspeicherkraft eher kritisch zu bewerten. Obwohl sich das Silo aus struktureller Sicht sehr gut eignet, sind es die hohen Investitionskosten für die maschinelle Einrichtung, die einen wirtschaftlichen Betrieb fragwürdig erscheinen lassen. Diesen Rückschluss erlaubt der Vergleich mit dem Pumpspeicherkraftwerk und den kleinformatischen Akkumulatoren. Dies gilt auch für den Fall, dass sich über die Baumaßnahmen eine Kostenreduktion erzielen ließe, da es bei der Hauptsumme zur Anschaffung der Hubwerke bliebe. In der vorliegenden Größe reicht die Kapazität von 147 kWh aus, um den Tagesbedarf an elektrischer Energie von ca. 15 Einfamilienhäusern bzw. 15 Vier Personen Haushalten zu decken. Ob das Hubspeicherkraftwerk ggf. in einer anderen Konstellation eine Zukunft hat, kann an dieser Stelle nicht beantwortet bzw. nicht ausgeschlossen werden. Die Vorteile bleiben: hohe Lebensdauer, hohe Zyklenzahl, keine Bereitsstellungsverluste, keine ungeklärten Entsorgungsfragen und Flexibilität in der Leistung.

- 1 Vgl.: Sterner, Michael, Stadler, Ingo, Berlin, Heidelberg 2014, S. 600
- 2 Vgl.: Sterner, Michael, Stadler, Ingo, Berlin, Heidelberg 2014, S. 40
- 3 Vgl.: Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e.V. [Hrsg.], o.O. 2012, S. 2

Anmerkung:  
Eine gängige Vergleichsgröße bei der Bewertung von Speichersystemen stellen die Kapitalkosten [CAPEX] dar, welche der Quotient von Investitionskosten und Leistung und / oder Speicherkapazität sind<sup>2</sup>.



Abb. 100:  
Kapazität Hubspeicher

Anmerkung:  
Der durchschnittliche Jahresstrombedarf eines vier Personenhaushaltes liegt bei etwa 3500 kWh<sup>3</sup>. Im Gegensatz zum Heizwärmebedarf, ist dieser im Jahresgang relativ gleichmäßig verteilt. Von daher kann man den Jahresbedarf durch 356 teilen, womit man einen Tagesbedarf von ca. 10 kWh erhält.

## 2.4. Pilot B: Pumpspeicher

### 2.4.1. Entwurfsbeschreibung

Alternativ zu Pilot A befasst sich Pilot B mit der Umnutzung des Silos zu einem Pumpspeicherkraftwerk. Neben der Höhe, sind es das Volumen und die Beschaffenheit der Silozellen, welche eine Umnutzung aussichtsreich erscheinen lassen. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sei an dieser Stelle nochmals auf die Lage an einem stehenden Gewässer hingewiesen, womit auch der Zugang zu einer geeigneten Wasserquelle gegeben ist. Kernthemen beim Umbau sind der Entwurf des Krafthauses sowie die Maßnahmen zur statischen Ertüchtigung und Abdichtung des Bestandes. Da es sich bei Letzterem um ein recht umfassendes Thema handelt, was zudem einen entscheidenden Anteil am Erfolg oder Misserfolg der Umnutzung hat, wird dieses vorangestellt.

#### Statische Ertüchtigung und Abdichtung

Die statische Leistungsfähigkeit der Silobauten wurde bereits in Kapitel III als Teil der typologischen Eignungsprüfung behandelt. Es hat sich gezeigt, dass Silos, wenn überhaupt, nur in Ausnahmefällen ausreichend dimensioniert sind, um dem Druck einer Wassersäule in den Zellen standzuhalten. In der Regel wird man diese statisch verstärken müssen. Getreidesilos, wie das Silo III, kann man per se als ungeeignet einstufen. Im vorliegenden Fall wird daher eine Ertüchtigung der äußeren Silozellen respektive deren Umfassungswände vorgesehen [1]. Prinzip und Ausführung orientieren sich an verschiedenen Quellen.

Zunächst ist das Thema nicht neu. Die Schadenshäufigkeit infolge statischen Versagens liegt bei Silobauten vergleichsweise hoch<sup>1</sup>. Generell ist die Berechnung der auftretenden Drücke für den Tragwerksplaner eine große Herausforderung. Insbesondere beim Entleeren der Zellen gilt es dynamische Überdrücke zu erfassen, die den Ruhedruck sogar um das 2,5 fache übersteigen können<sup>2</sup>. Neben dem Grundbruch, der zu einem Totaleinsturz des Silos führen kann, gibt es eine Vielzahl dokumentierter Fälle, bei denen einzelne Zellen beschädigt wurden. Das Schadensbild reicht von Rissen und Aufplatzungen bis zum Zellbruch, bei der die Zellwand infolge der Überbelastung nachgibt<sup>3</sup>. Je nach dem wie stark die Zellen und das Silo als Ganzes in Mitleidenschaft gezogen worden sind, ist es möglich, die aufgetretenen Schäden zu beseitigen und anschließend das Silo so weit zu ertüchtigen, dass es den vorgesehenen Belastungen zukünftig gewachsen ist. Methodisch unterscheidet man zunächst nach dem Schadensbild, um daraufhin das geeignete Sanierungsverfahren zu wählen<sup>4</sup>.

1 Vgl.: Günther, Timm, 1986, S. 145

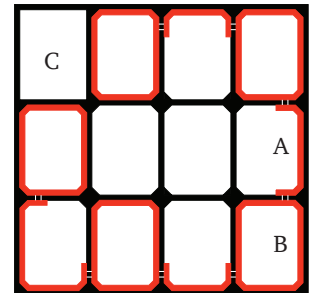
2 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], Berlin 1988, S. 467

3 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], Berlin 1988, S. 471-475

4 Vgl.: Günther, Timm, 1986, S. 146

Schadensbilder	Zugeordnete Maßnahmen
Die Standsicherheit ist gewährleistet	Anstrich der Außenwände Anstrich mit schützender Wirkung
Die Standsicherheit ist eingeschränkt	Beschichtung der Außenwände Spritzbeton auf den Außenwänden Außenverkleidung mit Blech oder zementgebundenen Platten <sup>4</sup>
Die Standsicherheit ist nicht ausreichend	Verstärkung der Zellen mit Spritzbeton Verstärkung der Zellen mit Stahlblech oder Zwischenabspannungen Verstärkung der Zellen mit Umschnürung Verstärkung der Zellen mit GFK Verstärkung der Zellen mit Stahlbeton

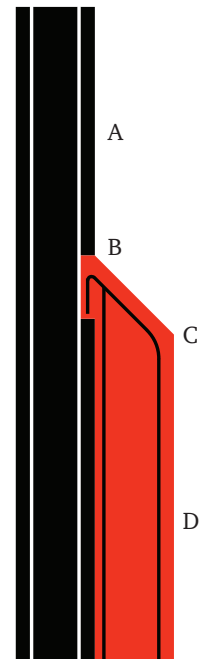
Abb. 101:  
Schadensbilder und  
zugeordnete Maßnahmen



A: Teilweise Verstärkung  
B: Volle Verstärkung  
C: Treppenhaus

Streng genommen hat man es bei der Umnutzung nicht mit einem Sanierungsvorhaben zu tun, dennoch lassen sich Parallelen zu dem Fall der unzureichenden Tragfähigkeit ziehen. Als Maßnahmen kommen die Verstärkung der Zellen in Spritz- und in Stahlbeton in Frage. Die Varianten mit Stahlblech, GFK oder Umschnürung eignen sich nur für kreisrunde Zellen, bei Letzterer muss zudem die gesamte Außenfläche der Zellen zugänglich sein<sup>1</sup>. Beides trifft für das Silo III nicht zu. Stellt man die beiden Optionen Spritz- und Stahlbeton gegenüber, gibt es keinen eindeutigen Favoriten. Einige Details sprechen allerdings für eine Ausführung in Stahlbeton. Ausschlaggebend ist die Kompatibilität mit jeder Zellenform<sup>2</sup>, wohingegen die Verfahren in Spritzbeton bevorzugt bei großformatigen Rundzellen angewandt werden<sup>34</sup>. Nebenbei bemerkt ist das Einziehen einer zweiten Wand in Stahlbeton laut Kostenschätzung auch etwas günstiger. Wie aus den Planunterlagen hervorgeht, werden nur die äußeren Zellen verstärkt. Dieses Vorgehen deckt sich mit den Angaben aus der Fachliteratur (Vgl: Abb. 102 und Abb. 103). Da die inneren Zellen beidseitig Druck erhalten, kann man dieses Prinzip auch als Laie gut nachvollziehen. Vor dem Hintergrund der stark eingeschränkten Zugänglichkeit der Zellen über Einstiegsluken beschreibt Theimer die Ausführung einer neuen Innenschale als „sehr mühsam und zeitraubend“<sup>45</sup>. Wenn man sich vor Augen führt, dass beim Silo III immerhin 11 000 m<sup>2</sup> Zellwand zu verstärken und knapp 18 000 m<sup>2</sup> nach entsprechender Vorbehandlung abzudichten sind, ist es legitim, nicht nur über einen Abbruch der Silokappen nachzudenken, sondern auch so vorzusehen [2]. Obwohl damit zusätzliche Kosten verbunden sind, kann man davon ausgehen, dass es die Ausführung sowie das Einbringen von Gerüsten, Schalung und Materialien ungemein vereinfacht, ggf. auch erst möglich macht.

Abb. 102:  
Verstärkung eines  
Zellenverbundes



A: Vorhandene Betonwand  
B: Einsatz eingestemmt  
C: Neigung Schräge 45°  
D: Neue Betonwand

1 Vgl.: Günther, Timm, 1986, S. 148  
2 Vgl.: Günther, Timm, 1986, S. 148  
3 Vgl.: Martens, Peter [Hrsg.], Berlin 1988, S. 480  
4 Vgl.:Theimer, Otto F, 1966, S. 762  
5 Vgl.:Theimer, Otto F, 1966, S. 762  
6 Vgl.: Anmerkung: Nur bei ausreichender Standsicherheit

Abb. 103:  
Detail Wandverstärkung

Neben der ausreichenden Tragfähigkeit, muss auch die Wasserdichtigkeit der Silozellen gewährleistet sein. Referenzverfahren finden sich beim Bau und der Sanierung von Trinkwasserbehältern. Deren Abdichtungen müssen zum einen dauerhaft sein und zum anderen aus hydrologischer Sicht als unbedenklich gelten. Laut Vorgabe sind Trinkwasserbehälter in WU-Beton<sup>1</sup> auszuführen, was auch die Wasserundurchlässigkeit sicherstellen soll. Erfahrungsgemäß genügt dies jedoch nicht. Wiederkehrende Mängel bei der Ausführung resultieren in Leckagen, weshalb man in der Regel ergänzende Oberflächenbehandlungen einsetzt, um die Dichtigkeit dauerhaft zu garantieren<sup>2</sup>. Für das Silo III heißt das: eine mögliche Ausführung in WU-Beton scheidet aus. Stattdessen wird herkömmlicher Stahlbeton eingesetzt und im Anschluss mit einem geeigneten Abdichtungsverfahren behandelt. Bei den inneren Zellen kann analog vorgegangen werden, allerdings setzt dies die vorherige Reinigung der bestehenden Betonoberfläche voraus<sup>3</sup>. Abb. 104 gibt Aufschluss über Werkstoffe und Techniken<sup>4</sup>.

Werkstoff	Technik
Kunststoffe	PVC Folien
	PEHD Profilplatten
	polyolefine Dichtungsbahnen
	kunststoffvergütete Mörtel
mineralische Materialien	wasserundurchlässige Zementputze
	zementgebundene Beschichtungen
	Zementmörtelauskleidungen
Metalle	Edelstahlauskleidungen
Sonstige	Fliesenauskleidungen
	Glasauskleidungen

Abb. 104:  
Werkstoffe und Techniken

Es führt zu weit, sämtliche Techniken im Detail zu beschreiben. Theoretisch sind alle umsetzbar, die Frage ist eher welche zuverlässig, praktikabel und angemessen erscheinen, darüber hinaus aus Sicht der Kosten in Frage kommen. Im Vergleich kann man die Wahl auf zwei Systeme eingrenzen: die zementgebundenen Beschichtungen und die kunststoffvergüteten Mörtel. Während diese mit ca. 35 bis 60 €/m<sup>2</sup> veranschlagt werden, liegen die übrigen Systeme zumeist bei Preisen von 100 € / m<sup>2</sup> und mehr<sup>5</sup>. Zementgebundene Beschichtungen werden schon seit längerem zur Abdichtung von Trinkwasserbehältern eingesetzt. Da es vermehrt zu Schadensfällen gekommen ist, muss man bei der Verarbeitung des Materials und der Vorbehandlung des Untergrundes besondere Sorgfalt walten lassen. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. ( DVGW ) hat hierfür eigene technische Anforderungen aufgestellt<sup>6</sup>. Dieser Umstand soll nicht unerwähnt bleiben. In einem qualitativen Vergleich unterschiedlicher Abdichtungsverfah-

1 Anmerkung: WU-Beton: wasserundurchlässiger Beton  
 2 Wilderer, Peter A., Merkl, Gerhard, Borho, Manfred [Hrsg.], München 1992, S. 51-67  
 3 Merkl, Gerhard, Oldenburg 2005, S. 112  
 4 Merkl, Gerhard, Oldenburg 2005, S. 107 - 136  
 5 Merkl, Gerhard, Oldenburg 2005, S. 132  
 6 Merkl, Gerhard, Oldenburg 2005, S. 111

---

ren erzielen sie aber 20 von 27 möglichen Punkten. Die Lebensdauer wird mit bis zu zehn Jahren angegeben<sup>1</sup>.

### **Krafthaus**

Das Krafthaus [3] wird unmittelbar an der Böschungskante zum Hafenbecken platziert. Obwohl eine Unterbringung im Bestandsgebäude erstrebenswert ist, zumal dort noch Flächenreserven existieren, sprechen zwei Hauptargumente dagegen. Aufstellung, Wartung und Austausch der maschinellen Komponenten Turbine, Pumpe und Motorgenerator bedingen den Einsatz eines Kranes. Dieser ist aber nicht ohne Weiteres im Bestandsbau zu betreiben, geschweige denn fest zu installieren. Alleine die ausgewählte Kreiselpumpe wiegt annähernd vier Tonnen. Hinzu kommt die Problematik des Triebwassers, welches in irgendeiner Form zum Krafthaus gelangen muss. Es wäre doch eher abwegig einen 20 m langen Kanal zum Bestandsgebäude graben zu müssen. Das Krafthaus selber entspricht dem Konzeptentwurf aus der Systembeschreibung in Kapitel III. In seiner Breite korrespondiert es mit der Fassade des Bestandes und stellt somit einen klaren Bezug zu diesem her. [4]. Der Tandemsatz wird auf gleicher Höhe mit dem Untergeschoss des Silo III montiert, wodurch das entsprechende Geschoss zur Hälfte in der Böschung versenkt wird. Der Firstpunkt des Daches liegt mittig auf der Achse von Turbine, Pumpe und Motorgenerator, um dort die maximale lichte Raumhöhe von ca. 3,30 m zur Verfügung zu stellen. Das Dach ist so konzipiert, dass man es abnehmen kann. Dies ist natürlich nur dann erforderlich, wenn man ganze Komponenten austauschen muss<sup>2</sup>. Die Fassaden des Krafthauses sind mit Ausnahme der komplett verglasten Hafenseite geschlossen. Über die Druckleitung [5] steht es in Verbindung mit dem Hauptbau und den Silozellen. Diese wird auf dem kürzesten Weg zum mittig positionierten Einlauf [6] geführt. Anknüpfungspunkt ist die auf -4,45 m liegende Ausbuchtung des bestehenden Untergeschosses [7], welche fortgesetzt wird, um die Druckleitung unterhalb der uferbegleitenden Straße [8] zum Krafthaus zu führen. Hierbei besteht aber weiterhin die Möglichkeit zur Revision, da die Druckleitung offen liegt und von oben über Gitterroste zugänglich ist. Um das gleichmäßige Fluten der Silozellen und einen einheitlichen Pegel zu garantieren, sind diese über Öffnungen in den aufgehenden Wänden kurzgeschlossen [9].

### **Zwischenfazit**

Auch im Falle des Pumpspeicherkraftwerks bestätigt sich das Ergebnis der typologischen Eignungsprüfung. Im Gegensatz zum Hubspeicher muss man aber umfassendere Maßnahmen ergreifen, wozu in erster Linie die Verstärkung der Silozellen zählt. Dass sich der Umbau gegenüber einem vergleichbaren Neubau dennoch rentiert, bestätigt die Kostenschätzung. Daher kann man die Eignung nach wie vor als hoch einstufen. Äußerlich bleibt das Silo wie beim Hubspeicher unverändert, wenn man von den vorgesehenen Abbruchmaßnahmen absieht.

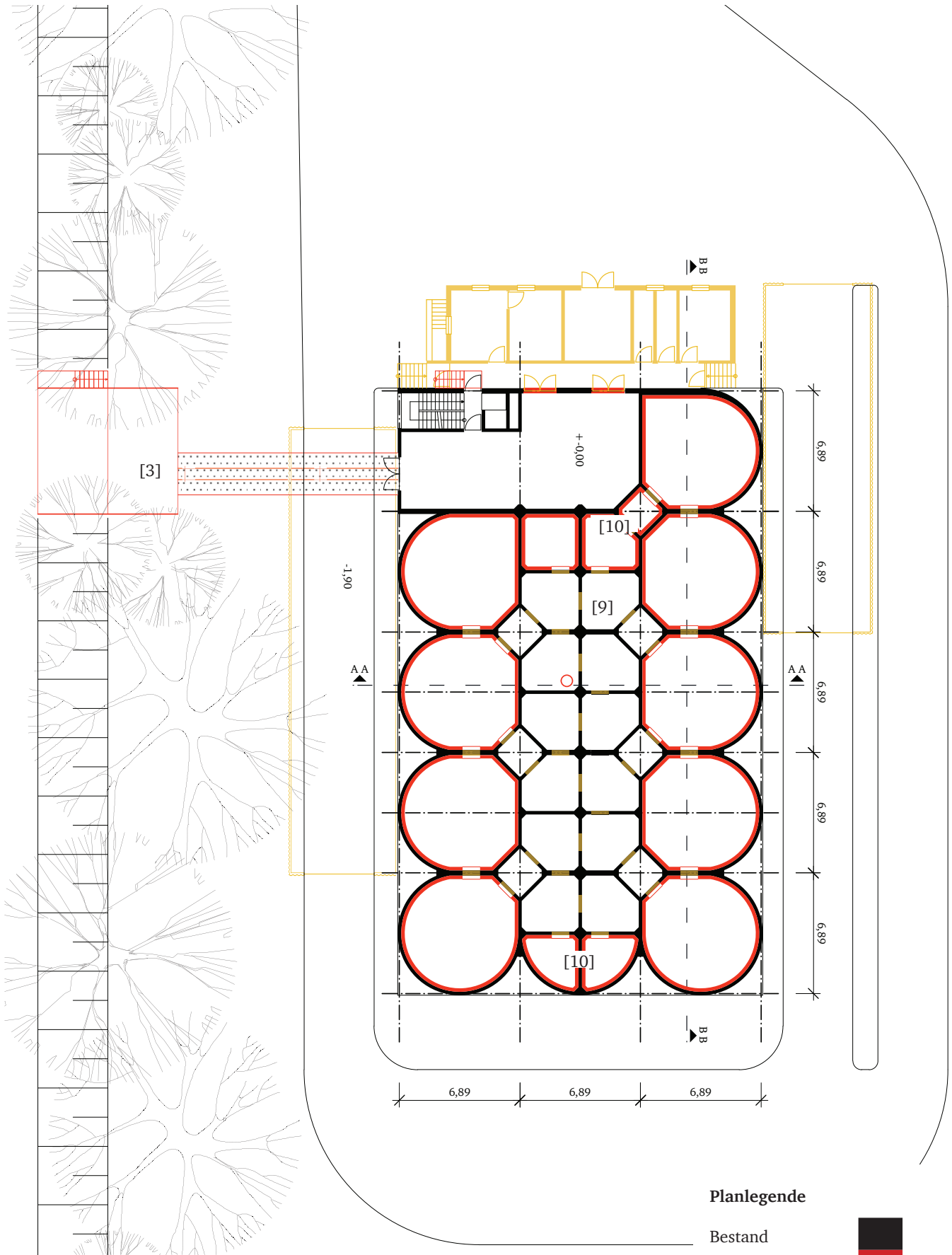
Abschließend soll noch darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den vorgeschlagenen Maßnahmen zur statischen Ertüchtigung um ein Konzept handelt, das programmatische Züge trägt. Detailfragen, wie etwa die genaue Formgebung und die Wandungsstärke der Innenschalen, können nur im Dialog mit einem Tragwerksplaner und nach der Entnahme von Materialproben usw. beantwortet werden. Dies betrifft auch den Umgang mit den geteilten Zellen an

1 Merkl, Gerhard, Oldenburg 2005, S. 133

2 Vgl.: Anmerkung: siehe Kapitel II: Systeme, System Pumpspeicher

beiden Enden des mittleren Traktes, die aufgrund ihrer reduzierten Größe problematisch sein könnten [10]. Ggf. muss man für diese Einheiten eine Sonderlösung entwickeln, die sich vom übrigen Vorgehen unterscheidet. Ein weiterer Aspekt betrifft die auftretende Bodenpressung nach der Umnutzung. Abhängig davon, welche Wichte man zum Zeitpunkt der Erbauung für das Silogut d.h. Getreide angenommen hat (zwischen 750 und 900 kN/m<sup>3</sup>), würde man mit dem Pumpspeicherkraftwerk die Auflast um zehn bis 30 Prozent vergrößern. Bedauerlicherweise waren die statischen Unterlagen im vorliegenden Fall unvollständig, weshalb weder in Erfahrung gebracht werden konnte, wie hoch die Lastannahmen waren, noch wie groß die zulässige Bodenpressung am Standort ist. Für die Umnutzung spricht allerdings die Tatsache, dass vor der Erbauung des Silos ein Bodenaustausch vorgenommen wurde, der Bodengrund also verbessert wurde. Generell ist die Bodenpressung ein entscheidender Faktor, welcher sich von Bauwerk zu Bauwerk unterscheiden kann und bei der Eignungsbewertung unbedingt prioritär zu berücksichtigen ist.





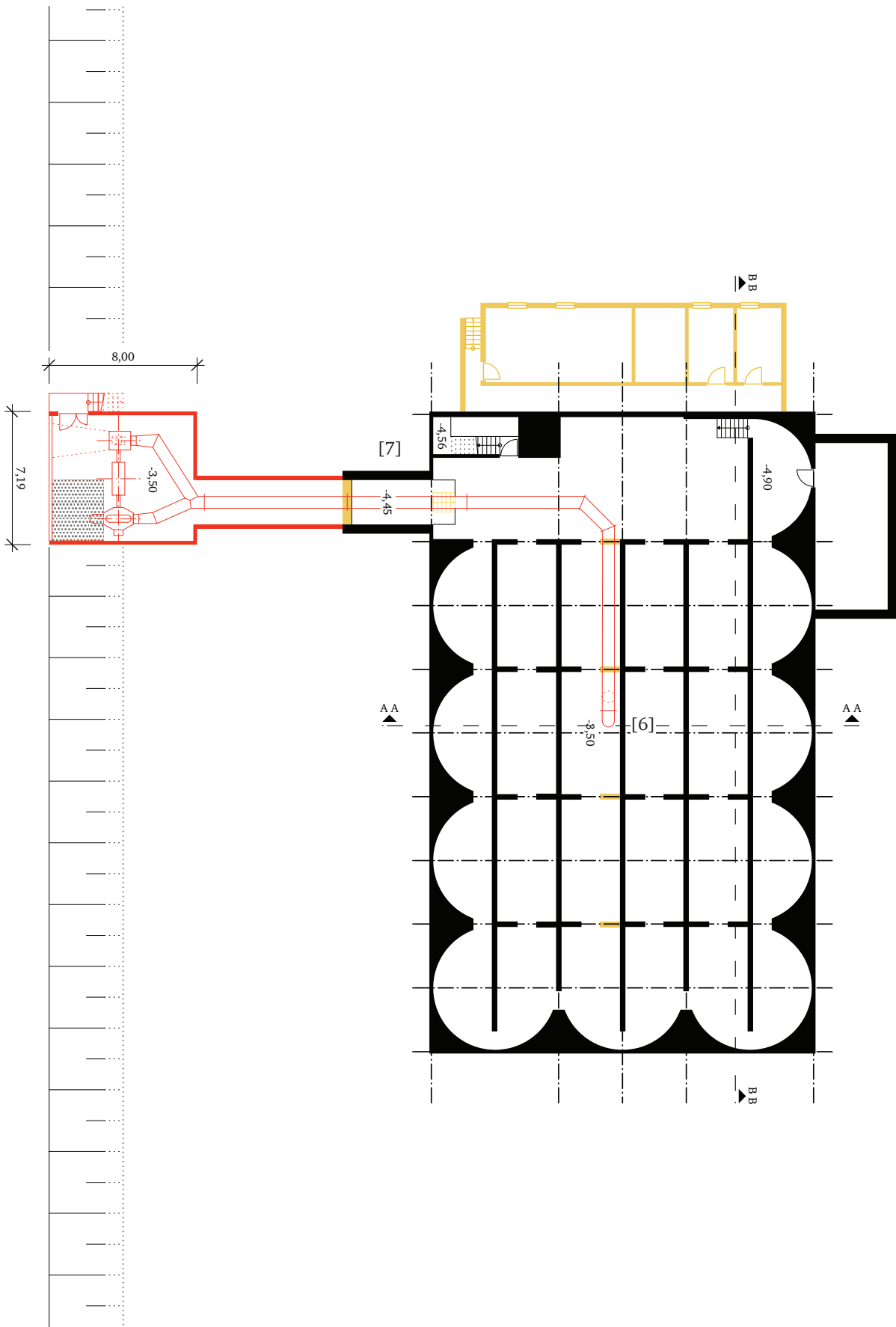


Abb. 106:  
Grundriss Untergeschoss

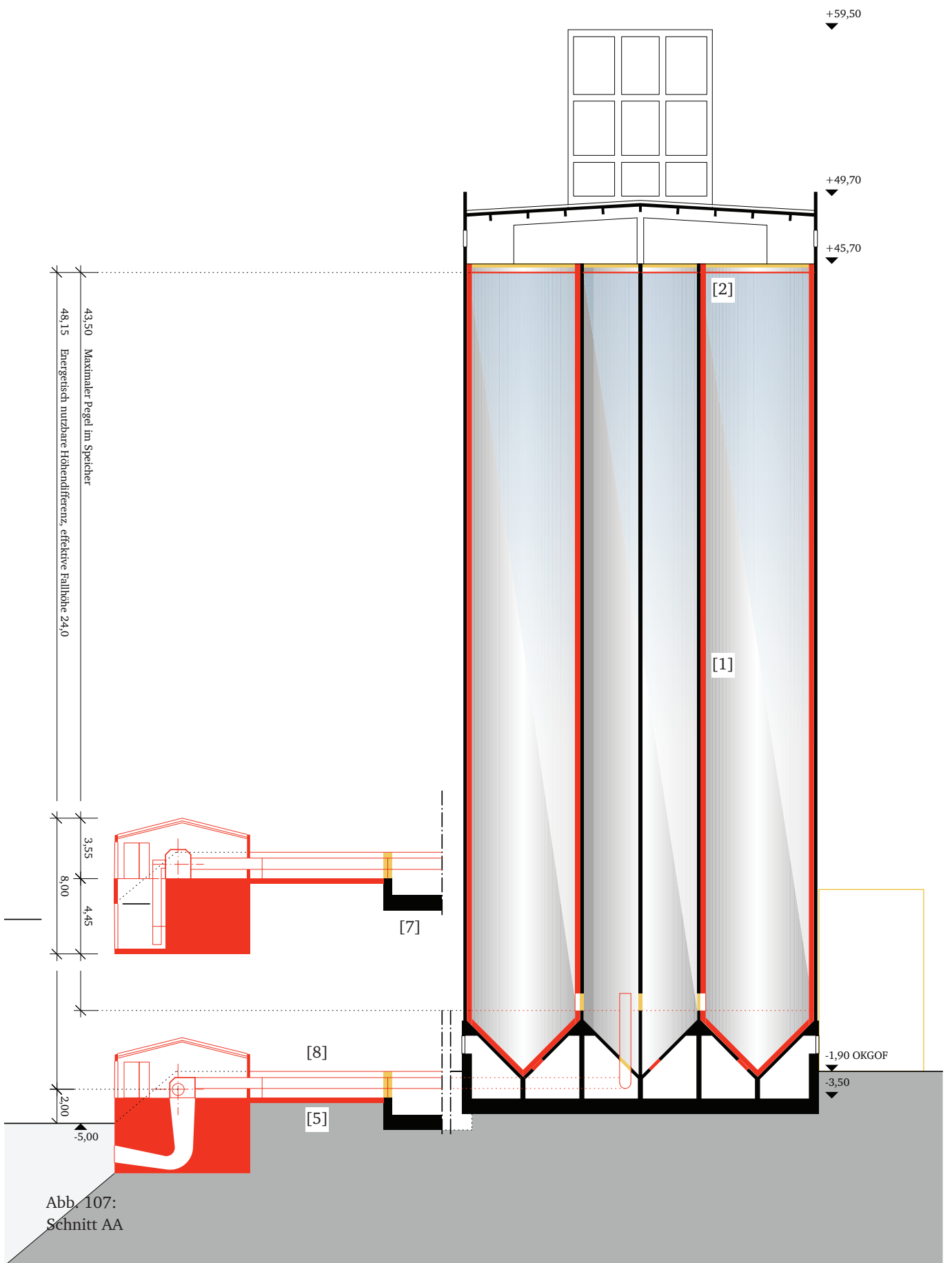


Abb. 107:  
Schnitt AA

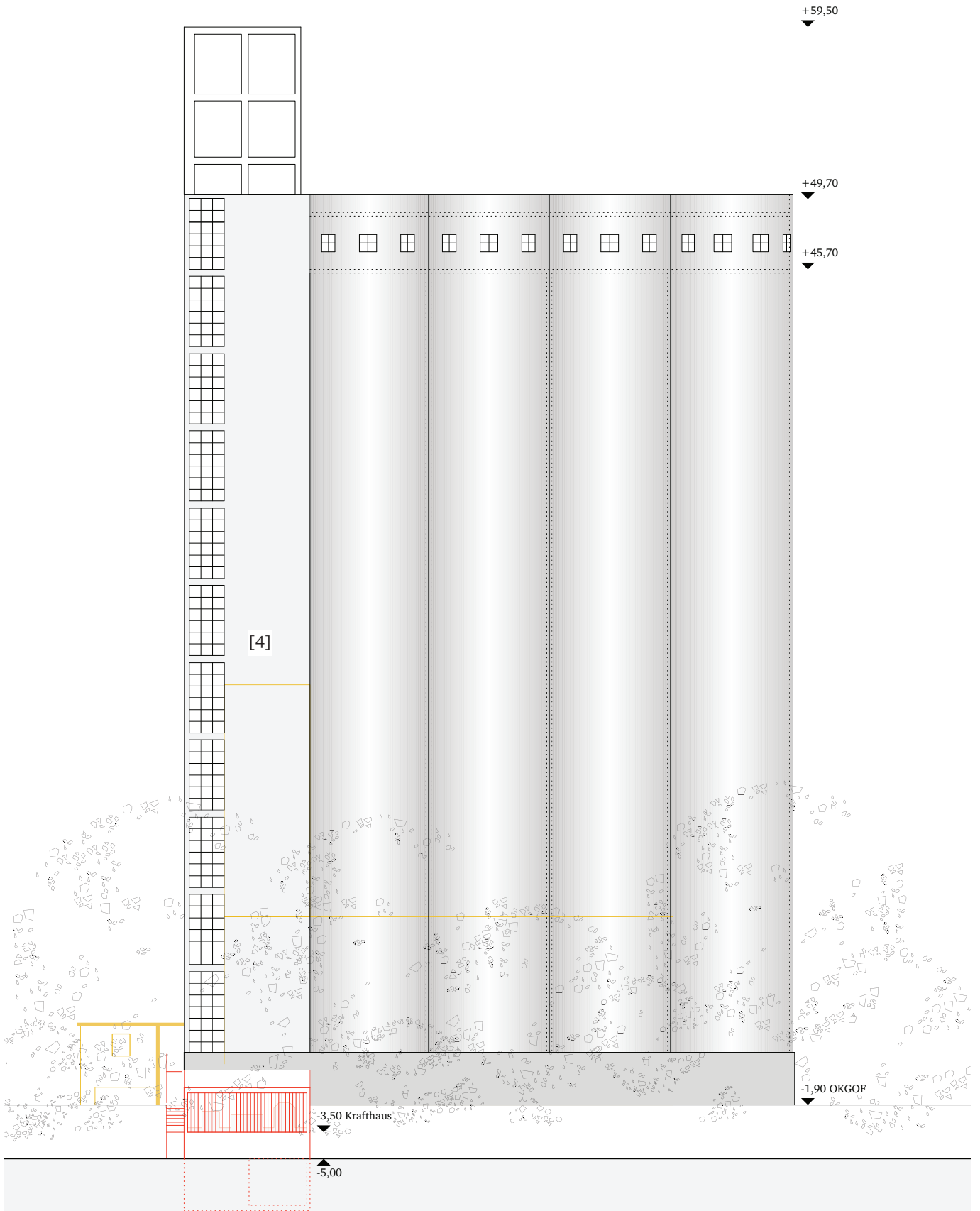


Abb. 108:  
Ansicht Nordost

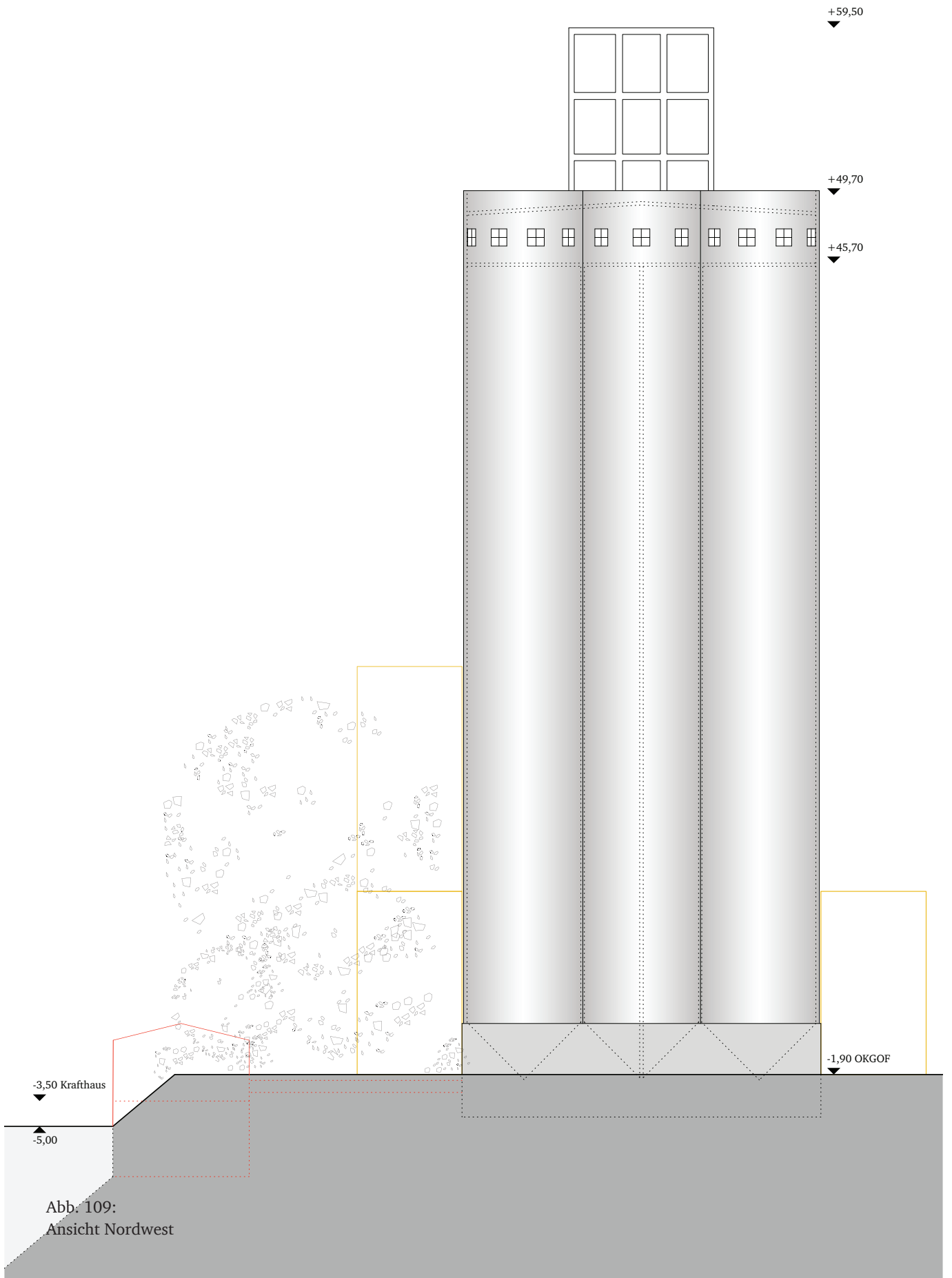


Abb. 109:  
Ansicht Nordwest

## 2.4.2. Kostenschätzung

Ergebnisse Kostenschätzung		Summen min	Summen ø
<b>Maschinelle Komponenten</b>			
Druckleitung	€	59.066,56	59.066,56
Maschinensatz	€	63.140,12	63.140,12
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	6,82	4,50
<b>Neubau</b>			
Krafthaus	€	69.430,00	76.100,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	3,87	2,80
<b>Abbruch Nebengebäude optional</b>			
Anbau Nord	€	25.024,00	25.806,00
Anbau Süd	€	14.784,00	15.246,00
Anbau West	€	24.613,50	33.897,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	3,59	2,76
<b>Abbruch Silotrakt</b>			
	€	26.815,00	37.510,00
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	1,50	1,38
<b>Umbau Silotrakt</b>			
	€	1.509.765,45	2.405.125,25
Anteil an Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%	84,22	88,56
<b>Zwischensumme / Alle Maßnahmen</b>			
	€	1.792.638,63	2.715.890,93
<b>Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen</b>			
	€	1.728.217,13	2.640.941,93
<b>KG 700 Baunebenkosten (ca. 25% KG 300 - 600)</b>			
Alle Maßnahmen	€	448.159,66	678.972,73
Nur zwingende Maßnahmen	€	432.054,28	660.235,48
<b>KG 200 und 500</b>			
	€	22.134,00	34.986,00
<b>Gesamtsumme</b>			
Alle Maßnahmen	€	2.262.932,29	3.429.849,67
Nur zwingende Maßnahmen	€	1.728.217,13	3.336.163,42
<b>Regionalfaktor</b>			
			0,95
Alle Maßnahmen	€	2.152.048,61	3.261.787,03
Nur zwingende Maßnahmen	€	1.643.534,49	3.172.691,41

Abb. 111:  
Auszug Kostenschätzung

Vergleich Neubau		Summen min	Summen ø
Maschinelle Komponenten			
Druckleitung	€	59.066,56	59.066,56
Maschinensatz	€	63.140,12	63.140,12
Neubau			
Summe nach Bruttorauminhalt	€	6.000.000,00	7.600.000,00
KG 700 Baunebenkosten (ca. 25% KG 300 - 600)			
	€	1.530.551,67	1.930.551,67
Gesamtsumme			
	€	7.530.551,67	9.530.551,67
Regionalfaktor			
			0,95
	€	7.161.554,64	9.063.554,64
Anteil Umbau zu Neubaukosten			
	%	30	36

Das Pumpspeicherkraftwerk beläuft sich in der Summe auf eine Investition von ca. 3,2 Millionen Euro und liegt damit gleichauf mit dem Pilot A. Der wesentliche Unterschied liegt in den Kosten je gespeicherter Kilowattstunde. Bei einer Gesamtkapazität von 1027 kWh fallen hierfür ca. 3200 Euro an, was einem Siebtel des Hubspeichers entspricht. Das sind zwar dreimal so viel wie bei einem Batteriespeicher, man darf allerdings nicht vergessen, dass die technischen Parameter des Pumpspeichers ganz andere Zyklenzahlen und eine theoretisch unbegrenzte Laufzeit erlauben. Hinzu kommt die fast bei Null liegenden Bereitschaftsverluste. Im Gegensatz zum Hubspeicher, bei dem ein wirtschaftlicher Betrieb eher unwahrscheinlich erscheint, könnte der Pumpspeicher in der vorliegenden Kapazität durchaus interessant sein. Schaut man sich die Aufteilung der Kosten im Detail an, entfällt der größte Anteil von 80% auf die Maßnahmen zur Abdichtung und Ertüchtigung des Bestandes. Im Gegensatz zum Hubspeicher veranschlagt die maschinelle Einrichtung d.h. Pumpe, Turbine, Motorgenerator und Druckleitung nur 5% der Baukosten. Entscheidend für die Gesamtkosten ist also in erster Linie die statische Leistungsfähigkeit des Bestandsbau, und inwiefern es einem gelingt, die erforderlichen baulichen Maßnahmen zu optimieren. Vergleicht man die Umbaukosten mit denen eines Neubaus, so liegt man bei etwa 36 % des Neubaupreises. Auch in dieser Hinsicht ist der Pumpspeicher konkurrenzfähig.

## Fazit

Beim Pumpspeicherkraftwerk kann man eine durchweg positive Bilanz ziehen. Obwohl die baulichen Eingriffe einen größeren Umfang einnehmen als beim Hubspeicher, zeigt sich diese hohe Eignung des Typs Silo. Zudem belegen die umfangreichen Erfahrungen bei der Sanierung und Ertüchtigung bestehender Anlagen, dass die erforderlichen Umbaumaßnahmen machbar sind. Auch bei den Investitionskosten steht der Umbau verhältnismäßig gut dar. Selbst der oft kritische Vergleich mit dem Neubau wird bestanden. Hinsichtlich der Kapazität liegt der Pumpspeicher deutlich über dem Pilot A. Dieser entspricht dem Tagesbedarf von ca. 100 Vier Personen Haushalten.



Abb. 112:  
Kapazität Pumpspeicher

# Kapitel V **Resümee und Ausblick**



---

## Potential

Ausgehend von dem umfassenden Blick auf die Typologie hin zum existierenden Objekt, demonstriert diese Arbeit, welche Möglichkeiten industrielle oder militärische Bestände bieten und wie eine konkrete Umnutzung zum Energiespeicher aussehen könnte. Wenngleich sich die Ausbeute im Bereich der militärischen Bauwerke auf die stollenartigen Bunkeranlagen beschränkt, zeichnen sich diese durch die besonders hohe Eignung und große Speicherkapazität aus. Im Industriebau hingegen existieren einige Typen, die für eine Umnutzung in Frage kommen könnten, u.a. die Kühlturm- und die Silobauten. Die Pilote demonstrieren, dass die Revitalisierung zu einem Pumpspeicherkraftwerk nicht nur auf typologischer Ebene aufgeht, sondern auch aus planerischer und konstruktiver Sicht machbar ist. Die Kostenschätzung liefert darüber hinaus den Beweis, dass es gerade die Nutzung der Bestandsstruktur ist, die im Vergleich zum Neubau den Unterschied zwischen unwirtschaftlich und wirtschaftlich ausmacht. Mit einer Investitionssumme von ca. 3200 € pro gespeicherter Kilowattstunde, ist diese auch mit herkömmlichen Batteriespeichern konkurrenzfähig, wenn man Lebensdauer, Zyklenzahl etc. mit berücksichtigt. Während der Hubspeicher, zumindest was den Fall des Silo III angeht, aus wirtschaftlicher Sicht ausscheidet, sind es bei der Druckluftspeicherung die außerordentlichen Anforderungen an das Tragwerk, welche eine Bestandsnutzung, mit Ausnahme der stollenartigen Bunkeranlagen, ohne weitreichende Ertüchtigungsmaßnahmen ausschließen.

## Relevanz

Hinsichtlich ihrer Kapazität sind die meisten Typen als klein- bis mittelformatige Speicher zu klassifizieren. Obwohl die Arbeit darauf verzichtet, die Anzahl geeigneter Bauwerke in Deutschland zu quantifizieren, ist davon auszugehen, dass sich ihr Beitrag zum prognostizierten Gesamtspeicherbedarf nur auf ein kleines Maß beschränken kann. Dies bedeutet aber nicht, dass dieser Anteil irrelevant wäre oder das Umnutzungskonzept als Ganzes in Frage steht. Die Energiewende kann nur dann gelingen, wenn vernetzt gedacht und auf verschiedenen Ebenen gehandelt wird. Es ist nicht die singuläre, omnipotente Maßnahme gefragt, sondern das Zusammenspiel vielfältiger Instrumente, die von klein- bis großmaßstäblich, von zentral bis dezentral und von regional bis überregional reichen, um nur einige Beispiele zu nennen. Von daher darf man den Wert eines umgenutzten Getreidesilos nicht alleine an der Speicherkapazität messen. Vielmehr kann ein solches Objekt ein notwendiges Glied in einer Kette vieler Maßnahmen sein, die auf der Niederspannungsebene verortet sind und erst in der Synergie das große Ganze ermöglichen.

## Mehrwert

Abgesehen von der Bereitstellung erforderlicher Speicherkapazitäten, ist es auch der Erhalt von Bausubstanz als Solches, der eine Umnutzung legitimiert. Abgesehen davon, dass man Ressourcen, Bauland und Energie einspart, darüber hinaus einen nachhaltigen Umgang mit der Umwelt praktiziert, liegt eine große Stärke in dem Schutz unseres baukulturellen Erbes, egal welcher Fasson. Das es sich beim Industriebau um eine aussterbende Gattung handelt, weil lebensfähige Neunutzungen fehlen, wurde schon von Ute Hassler und Nikolaus Kohler in „Das Verschwinden der Bauten des Industriezeitalters“ aufgezeigt. Natürlich lässt sich darüber streiten, ob das Silo III erhaltenswert ist oder nicht. In jedem Fall prägt es aufgrund seiner Höhe, dem schlanken, fast schon turmartigen

Format und der prominenten Lage an der Weser die Silhouette der Stadt Hameln. Auch aus geschichtlicher Sicht gibt es eine tiefe Verbundenheit. Traditionell war Hameln schon immer Mühlenstandort und die Wesermühlen der letzte Betrieb, mit der eine 1200 jährige Geschichte zu Ende ging. Es sollte somit im vornehmlichen Interesse der Stadt und seiner Bürger sein, derartige Bauwerke wieder mit Leben zu füllen. Mit der Nutzung als Energiespeicher bietet sich nicht nur die Möglichkeit, das Silo III weiter zu nutzen, sondern Neuland zu betreten und ein Projekt zu realisieren, das Potenzial zum Leuchtturm haben könnte.

# Kapitel VI **Literaturverzeichnis**

## Literaturquellen

- Ackermann, Kurt [Hrsg.]: Industriebau, Stuttgart 1984
- Ackermann, Kurt, Jockers, Michael, Bartenbach, Christian: Geschossbauten für Gewerbe und Industrie, Stuttgart 1993
- Angerer, Henning: Flakbunker, Hamburg 2000
- Becher, Bernhard und Hilla: Anonyme Skulpturen, Düsseldorf 1970
- Becher, Bernhard und Hilla: Studien zur Kunst des 19. Jahrhunderts, Band 13. Industriearchitektur des 19. Jahrhunderts - Die Architektur der Förder- und Wassertürme, Passau 1971
- Beck, H.-P., Schmidt, M. [Hrsg.]: Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke, Abschlussbericht, Clausthal 2011
- Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 4, Neuruppin 2012.
- Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 5, Neuruppin 2012
- BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.]: BKI Baukosten Altbau 2014: Statistische Kostenkennwerte, Stuttgart 2014 (b)
- BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.]: BKI Baukosten Gebäude 2014: Statistische Kostenkennwerte Teil 1, Stuttgart 2014 (a)
- BKI Baukosteninformationszentrum [Hrsg.]: BKI Baukosten Positionen 2013: Statistische Kostenkennwerte Teil 3, Stuttgart 2013
- Bohl, Willi, und Elmendorf, Wolfgang: Strömungsmaschinen 1 - Aufbau und Wirkungsweise, Würzburg 2008
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und Stiftung Haus der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland [Hrsg.]: Der Regierungsbunker, Tübingen 2006
- Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.]: Bunker beleben, Berlin 2015
- Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hrsg.]: Bunkerkatalog Bremen, o.O., 2015
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Die Energiewende. Zukunft made in Germany, 1. Auflage Februar 2012, Berlin 2012 (b)
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: 100 Prozent Klimaschutz, 1. Auflage Mai 2013, Berlin 2013
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Stand Oktober 2011, Berlin 2010 (a)
- Buschmann, Walter: Die Bau- und Kunstdenkmäler von Nordrhein - Westfalen, Band I. Rheinland: Zechen und Kokereien im rheinischen Steinkohlenbergbau Aachener Revier und westliches Ruhrgebiet, Berlin 1998.
- Doetsch, Christian und Budt, Marcus: Adiabates Niedertemperatur Druckluftspeicherwerk zur Unterstützung der Netzintegration von Windenergie, Oberhausen 2012
- Drodoski, Günther [Hrsg.]: Duden. Das Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache, Band 7, Mannheim 1963
- Ernst, Hellmut: Die Hebezeuge -Band 1 - Bemessungsgrundlagen, Bauteile, Antriebe, 8. Auflage, Braunschweig 1973
- Fachgebiet Städtebau, Stadtgestaltung und Bauleitplanung, Fakultät Raumplanung, TU Dortmund [Hrsg.]: Internationale Bauausstellung Emscher Park - Die Projekt 10 Jahre danach, Essen 2008
- Fäth, Harald: Bunker, Basen und Relikte, Gelnhausen 2009
- Foedrowitz, Michael: Bunkerwelten, Berlin 1998 (a)
- Foedrowitz, Michael: Luftschutztürme und ihre Bauarten 1934 bis heute, Wölfersheim-Berstadt 1998 (b)
- Föhl, Axel: Bauten der Industrie und Technik, Schriftenreihe des Deutschen Nationalkomitees für Denkmalschutz, Band 47, Bonn 1994
- Fricke, Jochen und Borst, Walter L: Energie, München, Wien, Oldenbourg 1981
- Frommhold, Peter und Gareiß, Erwin: Bauwörterbuch - Begriffsbestimmungen aus dem Bauwesen, 2. Auflage, Düsseldorf 1978
- Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil: Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb, 6. aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin 2014
- Götzen, Wilhelm: Schornsteine in Massivbauweise - Technik und Wirtschaftlichkeit hoher, frei stehender Industrieschornsteine, Essen 1976
- Grote, K.-H und Feldhusen, J [Hrsg.]: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage, Berlin 2007
- Hampe, Erhard: Kühltürme, Berlin 1975
- Hampe, Erhard: Silos, Band 1. Grundlagen, Berlin 1987
- Hampe, Erhard: Silos, Band 2. Bauwerke, Berlin 1991
- Hauer, Andreas, Hiebler, Stefan und Reuß, Manfred: Wärmespeicher, 5. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart 2013
- Hegger, Manfred et. al.: UrbanReNet I EnEff: Stadt - Verbundprojekt Netzoptimierung - Teilprojekt: Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum, Darmstadt 2012
- Hermann, Wilhelm und Gertrude: Die alten Zechen an der Ruhr (Die Blauen Bücher), 5. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2003, Königstein im Taunus 2003
- Auflage 2003, Königstein im Taunus 2003
- Heymann-Berg, Joachim P., Netter, Renate, Netter, Helmut [Hrsg.]: Ernst Neufert Industriebauten, Wiesbaden u.a. 1973
- Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker: Fördertechnik 1 - Bauelemente, Konstruktion, Berechnung, 7. Auflage, Wien, München 2005
- Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker: Fördertechnik 2 - Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen, Logistik, 5. Auflage, Wien, München 2004
- Internationale Bauausstellung [Hrsg.]: Energieatlas Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg, Hamburg 2010
- Jurga, Robert M: Befestigungsanlagen und Bunker im Dritten Reich, Königswinter 2013
- Kaczynski, Jürgen: Stauanlagen Wasserkraftanlagen, Düsseldorf 1991
- Kaule, Martin: Faszination Bunker, Berlin 2014
- Kluge, Friedrich: Etymologisches Wörterbuch des Deutschen, München 1997
- Knappsten, Gerhard: Aufgaben zur Festigkeitslehre - ausführlich gelöst - Mit Grundbegriffen, Formeln, Fragen, Antworten, 4. überarbeitete Auflage 2008, Frankfurt am Main 2008
- König, Felix von und Jehle, Christoph: Bau von Wasserkraftanlagen - Praxisbezogene Planungsgrundlagen, 4. neu bearbeitete Auflage, Heidelberg 2005
- Krämer, Horst: Elektrotechnik im Maschinenbau, 3. völlig überarbeitete Auflage, Wiesbaden 1991

---

Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen [Hrsg.]: Typologien industrieller Bauten, München [u.a.] 2003

Lenzen, Volker, Böhm, Werner: Aufzugstechnik, 2. Auflage, Würzburg 2012

Lubbe, Christoph: Bunker aus dem Kalten Krieg, Stuttgart 2013

Marquardt, Roland, Moser, Dr. Peter: Schlussbericht - Adiabate Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung (ADELE) - Projekt zur Erforschung und Entwicklung einer marktfähigen und emissionsfreien Energiespeichertechnologie auf Basis neuartiger Druckluftspeicherkraftwerke, Essen 2014

Martens, Peter [Hrsg.]: Silohandbuch, Berlin 1988

Martens, Peter [Hrsg.]: Silohandbuch, Berlin 1988

Merkel, Gerhard: Trinkwasserbehälter - Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung, Oldenburg 2005

Neupert, Ulrik, Euting, Thomas, Kretschmer, Thomas, Notthoff, Claudia, Ruhlig, Klaus, Weimert, Birgit: Energiespeicher - Technische Grundlagen und energiewirtschaftliches Potenzial, Stuttgart 2009

Pálffy, Sandor: Wasserkraftanlagen - Klein- und Kleinstkraftwerke, 7. neubearbeitete Auflage, Renningen 2014

Reitor, Georg: Fördertechnik - Hebezeuge, Stetigförderer, Lagertechnik, München 1979

Romberg, Oliver und Nikolaus Hinrichs: Keine Panik vor Mechanik - Erfolg und Spaß im klassischen „Loser-Fach“ des Ingenieurstudiums, 5. überarbeitete Auflage, Wiesbaden 2006

Rotariers, Thomas [Hrsg.]: Wasserkraft nutzen - Ratgeber für Technik und Praxis, Cölbe 1991

Rummich, Erich: Energiespeicher, Renningen 2009

Rychlak, Martin: Ehemalige unterirdisch Luftschutzstollen im Stadtgebiet Salzgitter - Abschlussbericht, Salzgitter 2007

Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.]: Bautabellen für Architekten - Mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 21. Auflage, Köln 2014

Schramm, Werner: Lager und Speicher - für Stück- und Schüttgüter, Flüssigkeiten und Gase - Handbuch für Planung, Bau und Ausrüstung, Wiesbaden u.a. 1965.

Schulze, Dietmar: Pulver und Schüttgüter - Fließigenschaften und Handhabung, 3. ergänzte Auflage, Berlin Heidelberg 2014

Schwab, Adolf J.: Elektroenergiesysteme, Heidelberg [u.a.] 2012

Schwab, Adolf J.: Elektroenergiesysteme, Heidelberg [u.a.] 2012

Schwalm, Hansjörg: Militärbauten, Heidelberg [u.a.] 1982

Schwate, Werner et al.: Handbuch Drucklufttechnik, 2. Auflage, Leipzig 1992

Sigloch, Herbert: Strömungsmaschinen - Grundlagen und Anwendungen, München 2009.

Stein, Petra und Vollnhals, Sven: Grundlagen clusteranalytischer Verfahren, Duisburg 2011

Steinhausen, Detlef und Langer, Klaus: Clusteranalyse - Einführung in Methode und Verfahren der automatischen Klassifikation, Berlin, New York 1977

Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, Berlin, Heidelberg 2014

Strößenreuther, Florian: Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung, Aachen 1996

Tietjen, Theo: Hocheffizientes Druckluftspeicherkraftwerk mit Nutzung von Abwärme aus externen Quellen ohne Verwendung von Sondermaschinen, Lüneburg 2013

Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen e.V [Hrsg.]: Photovoltaik für Privathaushalte - Eine Verbraucherinformation, o.O. 2012

Vischer, Daniel, Patt, Heinz, Huber, Andreas, Gonsowski, Pete: Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen, 7. aktualisierte Auflage, Berlin 2010

Walther, Henn: Bauten der Industrie, Band 1. Planung, Entwurf, Konstruktion, München 1955

Walther, Henn: Bauten der Industrie, Band 2. Ein internationaler Querschnitt, München 1955

Wehking, Karl H: Laufende Seile - Bemessung und Überwachung, 3. vollständig neu bearbeitete Auflage, Renningen 2005

Wiedenbeck, Michael und Züll, Cornelia: Klassifikation mit Clusteranalyse: Grundlegende Techniken hierarchischer und K-means-Verfahren, How-To-Reihe, Band 10, o.O. 2001

Wilderer, Peter A., Merkel, Gerhard, Borho, Manfred [Hrsg.]: 17. Wassertechnisches Seminar Wasserbehälter Instandhaltung - Fertigteilbauweise, München 1992

## Zeitschriften

Aufleger, Markus; Neisch, Valerie; Klar, Robert (2013): Powertower und Buoyant Energy - Energie hydraulisch und dezentral speichern In: Busch, Wolfgang; Kaiser, Frederike: Unkonventionelle Pumpspeicher - Schlüsseltechnologie der zukünftigen Energielandschaft? Tagungsband zum Forum „Unkonventionelle Pumpspeicher“ Nov. 2013 Goslar

Balzereit, Dorothee, Wer will die alte Mühle haben? Rundgang durch den Industriekomplex, in: DEWEZET (2015), Ausgabe 06.06.2015

Bardua, Sven: Keine Chance für die Denkmalpflege?: Zementfabriken und Betonsilos als Problemfälle, in: Industriekultur (2005), Nr. 32, S. 32

Behmann, Ulrich, Mühle ohne Käufer - Architekten sollen vorschlagen, was mit dem Gebäude passieren soll, in: DEWEZET (2014), Ausgabe 10.02.2014

Behmann, Ulrich, Wohnen und arbeiten am Fluss - Mühlengebäude und Silo verkauft - Konsortium will „viele Millionen“ investieren, in: DEWEZET (2016), Ausgabe 22.01.2016

Bernd, Michael: Der Scheibengasbehälter in Lübeck, in: Industriekultur (2004), Nr. 26, S. 7 - 9

Frieder, Blum: Rüstiger Riese am Kanal: Der Gasometer in Oberhausen, Nordrhein-Westfalen, in: Industriekultur (2007), Nr. 40, S. 34

Frühshutz, Oliver: Gasbehälter - Zeugen einer technischen Revolution, in: Industriekultur (2011), Nr. 57, S. 12 - 15

Günther, Timm, Sanierung von Siloanlagen aus Stahlbeton, in: Beton und Stahlbetonbau (1986), Nr. 6, S. 145-149

Janssen, Thomas: Gewaltige Maschinen für große Aufzüge: Fördermaschinen im Steinkohle-Bergbau von Lothringen und dem Saarland, in: Industriekultur (2005), Nr. 33, S. 12 - 13

Kern, Georg: Baulicher Luftschutz - Bauliche Instandsetzung von Schutzbunkern - Allgemeine Betrachtungen zu den Richtlinien, in: Zivilschutz (1961a), Nr. 06, S. 212

Kern, Georg: Baulicher Luftschutz - Bauliche Instandsetzung von Schutzbunkern - Allgemeine Betrachtungen zu den Richtlinien, in: Zivilschutz (1961b), Nr. 09, S. 304 - 307

Neisch, Valerie; Klar Robert; Aufleger, Markus (2013) Development of Energy Storage Systems for decentralized Applications In: Proceedings of the International Conference an Exhibition - Hydro 2013, Okt. 2013 Innsbruck

o.V.: Baukran speist Energie ins Netz zurück, in: www.polyscope.ch (2013b), Nr. 09, S. 24 -25

o.V.: Schweizer Energieleistung, in: Kran & Bühne (2013a), Nr. 110, S. 36

Panatscheff, C., An Empirical Formula for the Probable Specific Cost of Pumped-Storage Power Stations, in: Wasserwirtschaft (1989), Nr. 79, S. 74-79

Söder, Jens: Das Deutsche Strebengerüst in Fachwerkbauweise im Ruhrgebiet, in: Industriekultur (1998), Nr. 4, S. 30 - 31

Theimer, Otto F: Wiederinstandsetzung beschädigter Stahlbetonsilos, in: Die Mühle + Mischfüttertechnik (1966), Nr. 46, S. 759 - 762

Tiedemann, Andrea, Behmann, Ulrich, Still steht die Mühle - Keine Investoren in Sicht - „weil Hameln nicht Hamburg ist“, in: DEWEZET (2015), Ausgabe 22.05.2015

## Internetquellen

<http://www.aresnorthamerica.com> (Zugriff am 27.07.2015)

<http://www.beaconpower.com> (Zugriff am 13.04.2015)

Internetseite des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [www.erneuerbare-energien.de/die-themen/windenergie/kurz-info.html](http://www.erneuerbare-energien.de/die-themen/windenergie/kurz-info.html) (Zugriff am 24.09.2013)

Internetseite zur Forschungsinitiative Energiespeicher der Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, für Wirtschaft und Technologie und für Bildung und Forschung <http://forschung-energiespeicher.info> (Zugriff am 24.09.2013)

<http://www.gateway-gardens.de> (Zugriff am 29.09.2015)

<http://www.hochschule-heidelberg.de> (Zugriff am 27.05.2015)

<http://www.kraftwerke.vattenfall.de/geesthacht> (Zugriff am 13.08.2015)

<http://www.konversion-mannheim.de> (Zugriff am 29.09.2015)

<http://www.passiv.de> (Zugriff am 03.03.2016)

<http://www.powertower.eu> (Zugriff am 27.07.2015)

<http://www.temporalpower.com> (Zugriff am 13.04.2015)

# Kapitel VII **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1:  
Windenergie als zentraler Pfeiler der Energieerzeugung

[https://commons.wikimedia.org/wiki/Wind\\_turbine#/media/File:20120517\\_xl\\_wiki\\_3324.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/Wind_turbine#/media/File:20120517_xl_wiki_3324.JPG) (Zugriff am 11.07.2016)

Abb. 2:  
Der Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung

Eigene Darstellung,  
Daten: IBA

IBA [Hrsg.]: Energieatlas, Hamburg, 2010, S. 122

Abb. 3:  
Einsatz von Speichern in der Energieversorgung

Eigene Darstellung

Abb. 4:  
Gliederung der Promotion in drei Teilpakete

Eigene Darstellung

Abb. 5:  
Anforderungskategorien im Katalog

Eigene Darstellung

Abb. 6:  
Gliederung der Energiespeicher

Eigene Darstellung

Abb. 7:  
Zyklenzahl ausgewählter Speichersysteme

Eigene Darstellung,  
Daten: Sterner, Stadler

Sterner, Michael und Stadler, Ingo: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration, Berlin, Heidelberg 2014, S. 600 - 604

Abb. 8:  
Ausgewählte Speichersysteme

Eigene Darstellung

Abb. 9:  
Systempiktogramm Schwungradspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 10:  
Schwungrad des Gyrobuses

Eigene Darstellung  
in Anlehnung an:

Strößenreuther, Florian: Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung, Aachen, 1996, S. 8

Abb. 11:  
Funktionsprinzip Schwungrad

Eigene Darstellung

Abb. 12:  
Tabelle Berechnungen

Eigene Darstellung

Abb. 13:  
Trägheitsmomente verschiedener Rotationskörper

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure, 11. Auflage, Berlin Heidelberg, 2012

Abb. 14:  
Kenndaten Schwungrad

Eigene Darstellung,  
Herstellerdaten

Abb. 15:  
Systemkomponenten Schwungrad

Eigene Darstellung

Abb. 16:  
Systempiktogramm Hubspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 17:  
Powertower der Universität Innsbruck

Eigene Darstellung in Anlehnung an:

<http://www.powertower.eu> (Zugriff am 05.08.2015)

Abb. 18:  
Hubspeichervarianten nach Werner Rau

Eigene Darstellung in Anlehnung an:

<http://www.hubspeicher.de> (Zugriff am 25.09.2015)

Abb. 19:  
Gliederung der Transporttechnik

Eigene Darstellung

Abb. 20:  
Gliederung der Fördermittel

Eigene Darstellung

Abb. 21:  
Auswahl Krantypen

Eigene Darstellung

Abb. 22:  
Aufbau und Systemkomponenten Hubspeicher

Eigene Darstellung



---

Abb. 23:  
Tabelle Systemkomponenten

Eigene Darstellung

Abb. 24:  
Tabelle Auslegung und Dimensionierung

Eigene Darstellung

Abb. 25:  
Detail Hubspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 26:  
Systempiktogramm Druckluftspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 27:  
Schemata diabater und adiabater Typ

Eigene Darstellung

Abb. 28:  
Kenndaten Huntorf

Eigene Darstellung,  
Daten: Sterner, Stadler

Sterner, Michael, und Stadler, Ingo: Energiespeicher - Bedarf,  
Technologien, Integration, Berlin, Heidelberg, 2014, S. 462

Abb. 29:  
ADELE-ING Anlagenkonzepte

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Beckmann, Michael und Hurtado, Antonio: Kraftwerkstechnik - Sichere  
und nachhaltige Energieversorgung, Band 5, Neuruppin, 2012, S. 808

Abb. 30:  
Schema adiabater Niedertemperatur-Typ

Eigene Darstellung

Abb. 31:  
Aufbau und Systemkomponenten Druckluftspeicherkraftwerk

Eigene Darstellung

Abb. 32:  
Tabelle Systemkomponenten

Eigene Darstellung

Abb. 33:  
Funktionsweise Turbomaschine

Eigene Darstellung

Abb. 34:  
Tabelle Auslegung und Dimensionierung

Eigene Darstellung

Abb. 35:  
Tabelle Druckverhältnisse und Temperaturen

Eigene Darstellung

Abb. 37:  
Herleitung mehrstufige Kompression

Eigene Darstellung

Abb. 36:  
Laufgradanzahl ,z'

Eigene Darstellung,  
Herstellerdaten

Abb. 38:  
Anlagenlayout

Eigene Darstellung

Abb. 39:  
Dimensionierung Wärmespeicher

Eigene Darstellung

Abb. 40:  
Systempiktogramm Pumpspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 41:  
Nutzfallhöhe

Eigene Darstellung nach:

Giesecke, Jürgen, Heimerl, Stephan und Mosonyi, Emil: Wasserkraftanlagen -  
Planung, Bau und Betrieb, 6. aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin, 2014

Abb. 42:  
Klassifizierung der Wasserkraftanlagen

Eigene Darstellung

Abb. 43:  
Variablen zur Leistungsermittlung

Eigene Darstellung

Abb. 44:  
Aufbau und Systemkomponenten Pumpspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 45:  
Konzeptentwurf Wasserfassung (stehendes Gewässer)

Eigene Darstellung

Abb. 46:  
Tabelle Auslegung und Dimensionierung

Eigene Darstellung

Abb. 47:  
Wesermühlen Hameln

Eigene Darstellung

Abb. 48:

Energiebunker Hamburg

[https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=energiebunker+hamburg&title=Special:Search&go=Go&uselang=de&searchToken=f0km7a2v5ue0himtt8jgr1rc4#/media/File:Energiebunker\\_\(Hamburg-Wilhelmsburg\).phb.ajb.jpg](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=energiebunker+hamburg&title=Special:Search&go=Go&uselang=de&searchToken=f0km7a2v5ue0himtt8jgr1rc4#/media/File:Energiebunker_(Hamburg-Wilhelmsburg).phb.ajb.jpg)  
(Zugriff am 11.07.2016)

Abb. 49:

Tabelle Typisierungen im Vergleich

Eigene Darstellung

Abb. 50:

Tabelle Typologie 1. Ebene

Eigene Darstellung

Abb. 51:

Tabelle Ausschnitt Typologie 1. - 4. Ebene

Eigene Darstellung

Abb. 52:

Übersicht Typologie

Eigene Darstellung

Abb. 53:

Querschnitt Hallenbau

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Walther, Henn: Bauten der Industrie, Band 1. Planung, Entwurf, Konstruktion, München 1955, S. 113

Abb. 54:

Querschnitt Hallenbau

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Walther, Henn: Bauten der Industrie, Band 1. Planung, Entwurf, Konstruktion, München 1955, S. 120

Abb. 55:

Querschnitt Geschossbau

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Walther, Henn: Bauten der Industrie, Band 1. Planung, Entwurf, Konstruktion, München 1955, S. 100

Abb. 56:

Querschnitte Naturzugs- und Ventilationskühler

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Hampe, Erhard: Kühltürme, Berlin 1975, S. 34

Abb. 57:

Beispielhafte Aussenabmessungen von Kühltürmen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Hampe, Erhard: Kühltürme, Berlin 1975, S. 110

Abb. 58:

Beispielhafte Wandungsstärken von Kühltürmen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Hampe, Erhard: Kühltürme, Berlin 1975, S. 154

Abb. 59:

Szenario Kühlturm als Pumpspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 60:

Schüttgutbehälterarten

Eigene Darstellung

Abb. 61:

Formate Silotypen

Eigene Darstellung

Abb. 62:

Tabelle Silotypen

Eigene Darstellung,  
Daten: Hampe

Hampe, Erhard: Silos, Band 2. Bauwerke, Berlin 1991, S. 30

Abb. 63:

Zellenformate

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Schramm, Werner: Lager und Speicher - für Stück- und Schüttgüter, Flüssigkeiten und Gase - Handbuch für Planung, Bau und Ausrüstung, Wiesbaden u.a. 1965, S. 207 - 208

Abb. 64:

Wichten im Vergleich

Eigene Darstellung,  
Daten: Schneider

Schneider, Klaus-Jürgen [Hrsg.]: Bautabellen für Architekten - Mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 21. Auflage, Köln 2014, S. 3.2f

Abb. 66:

Horizontallastverhältnisse

Eigene Darstellung,  
Daten: Martens

Martens, Peter [Hrsg.]: Silohandbuch, Berlin 1988, S. 492

Abb. 65:  
Prinzipieller Druckverlauf einer Wasser- und einer Schüttgutsäule

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Schulze, Dietmar: Pulver und Schüttgüter - Fließigenschaften und Handhabung, 3. ergänzte Auflage, Berlin Heidelberg 2014, S. 13

Abb. 67:  
Tabelle horizontale Entleerungsdrücke  $P_{he}$

Eigene Darstellung,  
Daten: Theimer und Hampe

Theimer, Otto F.: Wiederinstandsetzung beschädigter Stahlbetonsilos, in: Die Mühle + Mischfüttertechnik (1966), Nr. 46, S. 759

Hampe, Erhard: Silos, Band 1. Grundlagen, Berlin 1987, S. 31, 194, 213

Abb. 68:  
Vergleich der Speicherkapazitäten

Eigene Darstellung

Abb. 69:  
Dimensionen von Scheibengasbehältern

Eigene Darstellung,  
Daten: Schramm

Schramm, Werner: Lager und Speicher - für Stück- und Schüttgüter, Flüssigkeiten und Gase - Handbuch für Planung, Bau und Ausrüstung, Wiesbaden u.a. 1965, S. 324

Abb. 70:  
Kasernentypen

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Schwalm, Hansjörg: Militärbauten, Heidelberg [u.a.] 1982

Abb. 71:  
Betrachtungshorizont

Eigene Darstellung

Abb. 72:  
Betrachtungshorizont

Eigene Darstellung

Abb. 73:  
Einteilung in Luftschutzorte erster und zweiter Ordnung sowie mit Sonderstatus am Beispiel des Luftgaukommandos XI

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Foedrowitz, Michael: Bunkerwelten, Berlin 1998 (a), S. 75

Abb. 74:  
Elemente der Zivilverteidigung

Eigene Darstellung

Abb. 75:  
Tabelle Typologie Foedrowitz

Eigene Darstellung

Abb. 76:  
Tabelle Erweiterung Typologie Foedrowitz

Eigene Darstellung

Abb. 77:  
Tabelle Typologie 01 BImA

Eigene Darstellung

Abb. 78:  
Tabelle Typologie 02 BImA

Eigene Darstellung

Abb. 79:  
Übersicht Typologie

Eigene Darstellung

Abb. 80:  
Meistgebauter Typ Winkel in prägnanter Zuckerhutform

Eigene Darstellung

Abb. 81:  
Bruttorauminhalt ausgewählter Hochbunker in Bremen

Eigene Darstellung,  
Daten: BImA

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hsrg.]:  
Bunkerkatalog Bremen, o.O., 2015

Abb. 82:  
Ausgewählte Bunker

Eigene Darstellung,  
Daten: Planunterlagen

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben

Abb. 83:  
Wand - und Deckenstärken nach der Richtlinie aus dem Jahr 1942

Eigene Darstellung,  
Daten: BImA

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hsrg.]: Bunker beleben,  
Berlin 2015, S. 30

Abb. 84:  
Wand - und Deckenstärken

Eigene Darstellung,  
Daten: BImA

Bundesanstalt für Immobilienaufgaben [Hsrg.]: Bunker beleben,  
Berlin 2015, S. 30

Abb. 85:  
Vergleich der Bewehrungsquerschnitte

Eigene Darstellung

Abb. 86:  
Flakturm im Wiener Augarten

Eigene Aufnahme

Abb. 87:  
Wesermühlen Gesamtkomplex

Eigene Darstellung

Abb. 88:  
Lageplan Wesermühlen [ohne Maßstab]

Eigene Darstellung

Abb. 89:  
Entkerntes Geschoss

Eigene Darstellung

Abb. 90:  
Verteil- und Füllebene Silo III

Eigene Darstellung

Abb. 91:  
Silo III

Eigene Darstellung

Abb. 92:  
Kenndaten Silo III

Eigene Darstellung,  
Daten: Planunterlagen

Abb. 93:  
Grundriss Erdgeschoss

Eigene Darstellung

Abb. 94:  
Schnitt BB

Eigene Darstellung

Abb. 95:  
Schnitt AA

Eigene Darstellung

Abb. 96:  
Grundriss Maschinenebene

Eigene Darstellung

Abb. 97:  
Ansicht Nordost

Eigene Darstellung

Abb. 98:  
Ansicht Nordwest

Eigene Darstellung

Abb. 99:  
Auszug Kostenschätzung

Eigene Darstellung

Abb. 100:  
Kapazität Hubspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 101:  
Schadensbilder und zugeordnete Maßnahmen

Eigene Darstellung

Abb. 102:  
Verstärkung eines Zellenverbundes

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Günther, Timm, Sanierung von Siloanlagen aus Stahlbeton, in:  
Beton und Stahlbetonbau (1986), Nr. 6, S. 145-149

Abb. 103:  
Detail Wandverstärkung

Eigene Darstellung,  
in Anlehnung an:

Günther, Timm, Sanierung von Siloanlagen aus Stahlbeton, in:  
Beton und Stahlbetonbau (1986), Nr. 6, S. 145-149

Abb. 104:  
Werkstoffe und Techniken

Eigene Darstellung

Abb. 105:  
Grundriss Erdgeschoss

Eigene Darstellung

Abb. 106:  
Grundriss Untergeschoss

Eigene Darstellung

Abb. 107:  
Schnitt AA

Eigene Darstellung

Abb. 108:  
Ansicht Nordost

Eigene Darstellung

Abb. 109:  
Ansicht Nordwest

Eigene Darstellung

Abb. 110:  
Auszug Kostenschätzung

Eigene Darstellung

Abb. 111:  
Auszug Kostenschätzung

Eigene Darstellung

---

Abb. 112:  
Kapazität Pumpspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 113:  
Getriebegrößen

Eigene Darstellung, nach:

Hoffmann, Klaus, Erhard Krenn, Gerhard Stanker:  
Fördertechnik 1 - Bauelemente, Konstruktion, Berechnung,  
7. Auflage, Wien, München 2005 S. 154

Abb. 114:  
Kostenschätzung Hubspeicher

Eigene Darstellung

Abb. 115:  
Kostenschätzung Pumpspeicher

Eigene Darstellung

# Kapitel VIII Anlagen

## Verzeichnis der Anlagen

Seite 152	Tabelle Getriebegrößen
Seite 153 - 158	Kostenschätzung Hubspeicher
Seite 159 - 166	Kostenschätzung Pumpspeicher
Seite 168 - 169	Lebenslauf / Eidesstattliche Erklärung

Abtriebsmoment	Höhe	Breite	Achsabstand 3 Stufen	Achsabstand 4 Stufen	Grenzübersetzung 3 Stufen	Grenzübersetzung 4 Stufen
[kNm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
10	250	425	670	780	45	210
20	300	475	790	910	60	270
30	350	530	890	1010	70	315
40	380	570	970	1100	80	350
50	415	610	1030	1180	90	380
60	440	640	1090	1260	95	410
70	465	670	1145	1330	98	438
80	480	700	1190	1390	103	463
90	490	730	1240	1450	105	490
100	515	750	1280	1567	108	510
110	520	770	1320	1649	110	530
120	530	790	1350	1731	114	555
130	540	820	1390	1813	115	570
140	545	840	1500	1895	117	622
150	605	850	1557	1977	131	651
160	626	914	1613	2059	136	679
170	648	943	1670	2141	141	708
180	669	973	1726	2223	146	737
190	690	1002	1783	2305	151	765
200	712	1032	1839	2387	156	794

Anmerkung:

Die Vorlage wird ab einem Abtriebsmoment von 140 durch Interpolation erweitert.

Abb. 113:  
Getriebe Größen



**Hubspeicher Kostenschätzung**

## Maschinensätze

	Einheit	Größe	Summe min	Summe Ø
Anzahl Hubwerke	-	26		
Hubwerk inkl. Energierückspeisung	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø
		89.250,00 (1)		2.320.500,00
Abschlag für Anzahl ca. 15%				1.972.425,00

## Kostenschätzung nach DIN 276

## Umbau Slotrakt

## ABBRUCH

## Anbau Nord

## KG 100

## Entfällt

## KG 200 Herrichten und Erschliessen

	Einheit	Größe	Summe min	Summe Ø
FBG - Fläche Baugrundstück	m <sup>2</sup>	714,00		
200	m <sup>2</sup> FBG	4,00	1.428,00	2.856,00
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion			25.024,00	25.806,00
Baumassen				
m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup>	782		

	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø
361 Dachkonstruktionen					
361.34.03 Abbruch von Blechdach / Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m² Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und	10	11	7.820,00	8.602,00
363.43.01 Abbruch von Faserzementplatten / Fassade und Dach Anbauten Nord	m² Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und	22	22	17.204,00	17.204,00
<b>Anbau Süd</b>					
KG 100	Entfällt				
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt				
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion				14.784,00	15.246,00
Baumassen					
	Einheit		Größe		
m² Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	m²	462			
<b>Anbau West</b>					
361 Dachkonstruktionen					
361.34.03 Abbruch von Blechdach / Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m² Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und	10	11	4.620,00	5.082,00
363.43.01 Abbruch von Faserzementplatten / Fassade und Dach Anbauten Nord	m² Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und	22	22	10.164,00	10.164,00
<b>Anbau West</b>					
KG 100	Entfällt				
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt				
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion				24.613,50	33.897,00
Baumassen					
	Einheit		Größe		
m² Bodenplatte	m²	100			
m² tragende Mauerwerksflächen	m²	240			
m² Öffnungsfläche von Fenstern und Türen Außen	m²	20			
m² nicht tragende Mauerwerksflächen	m²	112			
m² Stb Deckenfläche	m²	100			

m² Öffnungsfläche von Türen Innen	m²	12,5					
m² Dachfläche westlicher Anbau	m²	100					
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø		
324 Unterböden und Bodenplatten							
324.15.02 Abbruch von Betonplatten, d= 15-20cm	m² Bodenplatte	23	30	2.300,00	3.000,00		
331 Tragende Außenwände							
331.16.11 Abbruch von Ziegelmauerwerk, d=25cm	m² tragende Mauerwerksflächen	38	50	9.120,00	12.000,00		
334 Außentüren und -fenster							
334.91.81 Abbruch von Holz- bzw. Metalltüren- und fenstern	m² Öffnungsfläche von Fenstern und Türen	24	37	480,00	740,00		
342 Nichttragende Innenwände							
342.16.05 Abbruch von Ziegelmauerwerk, d = 11,5 - 20cm	m² nicht tragende Mauerwerksfläche	28	36	3.136,00	4.032,00		
344 Innentüren und -fenster							
344.12.04 Abbruch von Holztür, Holz- oder Stahlzarge	m² Öffnungsfläche von Türen	19	22	237,50	275,00		
351 Deckenkonstruktionen							
351.15.05 Abbruch von Stb-Decken, d= 18-25cm	m² Stb Deckenfläche	68	100	6.800,00	10.000,00		
361 Dachkonstruktionen							
361.42.02 Abbruch von Holzdachkonstruktion / westlichen Anbau	m² Dachfläche westlicher Anbau	20	29	2.000,00	2.900,00		
363.91.81 Abbruch von Dachbelag / Für Hauptdach und westlicher Anbau	m² Dachfläche Hauptdach + westlicher Anbau	5,4	9,5	540,00	950,00		
<b>Hauptgebäude</b>							
KG 100	Entfällt						
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt						
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion				196.012,60	256.534,00		
Baumassen							
	Einheit	Größe					
m² Wände in Beton	m²	1200					
m Stützenlänge	m	12					
m² Stb Deckenfläche	m²	482					
m² Öffnungsfläche von Türen Innen	m²	5					

m² Stb Dachfläche Hauptdach	m²	584					
m² Dachfläche Hauptdach + westlicher Anbau	m²	584					
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø		
<b>331 Tragende Außenwände</b>							
331.21.09 Abbruch von Stb Wänden, d=35	m² Wände in Beton	100	120	120.000,00	144.000,00		
<b>333 Außenstützen</b>							
333.21.05 Abbruch von Stahlbetonstütze 30x25cm	m Stützenlänge	-	23	276,00	276,00		
<b>344 Innentüren und -fenster</b>							
344.12.04 Abbruch von Holztiir, Holz- oder Stahlzarge	m² Öffnungsfläche von Türen	19	22	95,00	110,00		
<b>351 Deckenkonstruktionen</b>							
351.15.05 Abbruch von Stb-Decken, d=18-25cm	m² Stb Deckenfläche	68	100	32.776,00	48.200,00		
<b>361 Dachkonstruktionen</b>							
351.15.05 Abbruch von Stb-Decken, d=18-25cm / Hauptdach	m² Stb Dachfläche Hauptdach	68	100	39.712,00	58.400,00		
363.91.81 Abbruch von Dachbelag / Für Hauptdach und westlicher Anbau	m² Dachfläche Hauptdach + westlicher Anbau	5,4	9,5	3.153,60	5.548,00		
<b>UMBAU</b>							
<b>Hauptgebäude</b>							
KG 100	Entfällt						
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt						
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion							
Baumassen	Einheit	Größe		241.784,50	398.409,00		
<b>DAF - Fläche Dach</b>							
kg Stahlträger HEB	kg	82500					
m² Gitterrost	m²	56					
kg Stahlträger IPE	kg	1320					
m² Beton für Gewichte	m²	2600					
m³ Kies	m³	585					

	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø
360 Dächer (2)		90	125	52.560,00	73.000,00
LB 017 Stahlbauarbeiten (3)					
2 Profilstahl-Konstruktion; Profile IPE (4)		2	4	1.168,00	5.280,00
3 Profilstahl-Konstruktion; Profile HEA/HEB		1	2	82.500,00	165.000,00
16 Gitterroste, verzinkt (5)		69	104	3.864,00	5.824,00
LB 013 Betonarbeiten					
18 Bodenplatte inkl. Randschalung aus C25/30 STB, d = 30		39	50	101.400,00	130.000,00
LB 002 Erdarbeiten (6)					
46 Grabenverfüllung mit anzuliefernden Material		0,5	33	292,50	19.305,00
<b>Summen</b>				<b>Summe min</b>	<b>Summe Ø</b>
Maschinelle Komponenten					
Hubwerke	€			1.972.425,00	1.972.425,00
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			79,71	72,99
Abbruch Nebengebäude Optional					
Anbau Nord	€			25.024,00	25.806,00
Anbau Süd	€			14.784,00	15.246,00
Anbau West	€			24.613,50	33.897,00
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			2,60	2,77
Abbruch Silotrakt					
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	€			196.012,60	256.534,00
Umbau Silotrakt	%			6,50	7,80
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten					
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			241.784,50	398.409,00
Zwischensumme / Alle Maßnahmen					
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen	€			2.474.643,60	2.702.317,00
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen	€			2.410.222,10	2.627.368,00

KG 700 Baunebenkosten (ohne KG 200, KG 500 und KG600)			
ca. 25% der KG 300-600 (7)			
Zwischensumme / Alle Maßnahmen	618.660,90	675.579,25	
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen	602.555,53	656.842,00	
KG 200 (8)	1.428,00	2.856,00	
<b>Gesamtsumme</b>			
Alle Maßnahmen	3.094.732,50	3.380.752,25	
Nur zwingende Maßnahmen	3.014.205,63	3.287.066,00	
Regionalfaktor		0,95	
Alle Maßnahmen	2.943.090,61	3.215.095,39	
Nur zwingende Maßnahmen	2.866.509,55	3.125.999,77	

#### Erläuterungen:

Alle Angaben beziehen sich auf die Baukosten Gebäude Altbau 2014

#### Anderweitige Quellen:

- |    |  |    |   |
|----|--|----|---|
| 1) | Herstellerrangabe  | 6) | BKI Kostenplanung 2013  |
| 2) | BKI Kostenplanung 2014<br>Baukosten Gebäude<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 683    |    | Baukosten Positionen<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 232                          |
| 3) | BKI Kostenplanung 2013<br>Baukosten Positionen<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 362 | 7) | BKI Kostenplanung 2013<br>Baukosten Positionen<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 45 |
| 4) | BKI Kostenplanung 2013<br>Baukosten Positionen<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 362 | 8) | BKI Kostenplaner<br>Baukosten Gebäude<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 54          |
| 5) | BKI Kostenplanung 2013<br>Baukosten Positionen<br>Statistische Kostenwerte<br>S. 362 |    |   |

Abb. 114:  
Kostenschätzung Hubspeicher

**Pumpspeicher Kostenschätzung**

Kostenschätzung gem. empirischer Formel

Variablen	Kürzel	Einheit	Größe
installierte Leistung	N	MW	0,23
tägliches Umwälzvolumen	V	10	0,12
effektive Fallhöhe	H	m	23,50
Horizontaldistanz zw. Becken	L	km	0,03
beide Becken vorhanden	f	-	0,10
optimale geologische Verhältnisse	g	-	0,90
Gesamtkoeffizient	k	-	655,00
$k = 635 * [(f + N(L/3)) * (V(L/3)) * (H(L/4)) * (L(L/8)) / N]^g$	k	sfr/kW	970,88
Summe		€	203.677,80

Kapitalaufwand der einzelnen Bestandteile

Druckleitungen	$k_R$	€	59.066,56
0,29			
Maschinelle und elektrische Einrichtung	$k_{ME}$	€	63.140,12
0,31			
Sonstiges	$k_S$	€	61.103,34
0,30			
Summe	$k_{R,ME,S}$	€	183.310,02

Kostenschätzung nach DIN 276

NEUBAU (1)

Baumassen	Einheit	Größe
FBG - Fläche Baugrundstück	m <sup>2</sup>	714,00
BGI - Baugrubeninhalt	m <sup>2</sup>	344,00
GRF - Gründungsfläche	m <sup>2</sup>	80,00
AWF - Aussenwandfläche	m <sup>2</sup>	250,00
DEF - Deckenfläche	m <sup>2</sup>	50,00

DAF - Dachfläche	m <sup>2</sup>	60,00						
BGF - Bruttogeschossfläche	m <sup>2</sup>	60,00						
AUF - Aussenanlagenfläche	m <sup>2</sup>	714,00						
KG 100	Entfällt							
KG 200 Herrichten und Erschliessen						1.428,00		2.856,00
200	m <sup>2</sup> FBG	2,00	4,00			1.428,00		2.856,00
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion						47.296,00		76.100,00
351 Baugrube	m <sup>3</sup> BGI	9,00	20,00			3.096,00		6.880,00
320 Gründung	m <sup>2</sup> GRF	71,00	117,00			5.680,00		9.360,00
330 Aussenwände	m <sup>2</sup> AWF	111,00	163,00			27.750,00		40.750,00
340 Innenwände	m <sup>2</sup> IWF	92,00	197,00			0,00		0,00
350 Decken	m <sup>2</sup> DEF	99,00	195,00			4.950,00		9.750,00
360 Dächer	m <sup>2</sup> DAF	90,00	125,00			5.400,00		7.500,00
370 Baukonstruktive Einbauten	m <sup>2</sup> BGF	1,00	20,00			60,00		1.200,00
390 Sonstige Baukonstruktionen	m <sup>2</sup> BGF	6,00	11,00			360,00		660,00
KG 400 Bauwerk - Technische Anlagen	Entfällt da bereits aus empirischer Formel							
KG 500 Aussenanlagen						20.706,00		32.130,00
500	m <sup>2</sup> AUF	29,00	45,00			20.706,00		32.130,00
KG 600 Ausstattung und Kunstwerke	Entfällt							
Summe KG 300+500						69.430,00		76.100,00



<b>Umbau Silotrakt</b>			
<b>ABBRUCH</b>			
<b>Anbau Nord</b>			
KG 100	Entfällt		
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt		
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion		25.024,00	25.806,00
Baumassen			
	Einheit	Größe	
m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup>	782,00	
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit
	Einheit	Summe min	Summe Ø

<b>361 Dachkonstruktionen</b>			
361.34.03 Abbruch von Blechdach /Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	10,00	11,00
363.43.01 Abbruch von Faserzemenplatten / Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	22,00	22,00
		7.820,00	8.602,00
		17.204,00	17.204,00

<b>Anbau Süd</b>			
KG 100	Entfällt		
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt		
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion		14.784,00	15.246,00
Baumassen			
	Einheit	Größe	
m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup>	462,00	
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit
	Einheit	Summe min	Summe Ø

<b>361 Dachkonstruktionen</b>			
361.34.03 Abbruch von Blechdach /Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	10,00	11,00
363.43.01 Abbruch von Faserzemenplatten / Fassade und Dach Anbauten Nord und Süd	m <sup>2</sup> Fläche Fassade + Dach Anbauten Nord und Süd	22,00	22,00
		4.620,00	5.082,00
		10.164,00	10.164,00

Anbau West						
KG 100	Entfällt					
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt					
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion				24.613,50		33.897,00
Baumassen						
	Einheit	Größe				
m <sup>2</sup> Bodenplatte	m <sup>2</sup>	100,00				
m <sup>2</sup> tragende Mauerwerksflächen	m <sup>2</sup>	240,00				
m <sup>2</sup> Öffnungsfläche von Fenstern und Türen Außen	m <sup>2</sup>	20,00				
m <sup>2</sup> nicht tragende Mauerwerksflächen	m <sup>2</sup>	112,00				
m <sup>2</sup> Stb Deckenfläche	m <sup>2</sup>	100,00				
m <sup>2</sup> Öffnungsfläche von Türen Innen	m <sup>2</sup>	12,50				
m <sup>2</sup> Dachfläche westlicher Anbau	m <sup>2</sup>	100,00				
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø	
324 Unterböden und Bodenplatten						
324.15.02 Abbruch von Betonplatten, d = 15-20cm	m <sup>2</sup> Bodenplatte	23,00	30,00	2.300,00	3.000,00	
331 Tragende Außenwände						
331.16.11 Abbruch von Ziegelmauerwerk, d=25cm	m <sup>2</sup> tragende Mauerwerksflächen	38,00	50,00	9.120,00	12.000,00	
334 Außentüren und -fenster						
334.91.81 Abbruch von Holz- bzw. Metalltüren- und fenstern	m <sup>2</sup> Öffnungsfläche von Fenstern und Türen	24,00	37,00	480,00	740,00	
342 Nichttragende Innenwände						
342.16.05 Abbruch von Ziegelmauerwerk, d=11,5 - 20cm	m <sup>2</sup> nicht tragende Mauerwerksfläche	28,00	36,00	3.136,00	4.032,00	
344 Innentüren und -fenster						
344.12.04 Abbruch von Holztür, Holz- oder Stahlzarge	m <sup>2</sup> Öffnungsfläche von Türen	19,00	22,00	237,50	275,00	
351 Deckenkonstruktionen						
351.15.05 Abbruch von Stb-Decken, d= 18-25cm	m <sup>2</sup> Stb Deckenfläche	68,00	100,00	6.800,00	10.000,00	
361 Dachkonstruktionen						
361.42.02 Abbruch von Holzdachkonstruktion/ westlichen Anbau	m <sup>2</sup> Dachfläche westlicher Anbau	20,00	29,00	2.000,00	2.900,00	
363.91.81 Abbruch von Dachbelag / Für Hauptdach und westlicher Anbau	m <sup>2</sup> Dachfläche Hauptdach + westlicher Anbau	5,40	9,50	540,00	950,00	

Hauptgebäude						
KG 100	Entfällt					
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt					
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion		26.815,00				37.510,00
Baumassen						
	Einheit	Größe				
m² Wände in Beton	m²	70,00				
m² Stb Deckenfläche	m²	290,00				
m² Öffnungsfläche von Türen Innen	m²	5,00				
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø	
331 Tragende Außenwände						
331.21.09 Abbruch von Stb Wänden, d=35	m² Wände in Beton	100,00	120,00	7.000,00		8.400,00
344 Innentüren und -fenster						
344.12.04 Abbruch von Holztür, Holz- oder Stahlzarge	m² Öffnungsfläche von Türen	19,00	22,00	95,00		110,00
351 Deckenkonstruktionen						
351.15.05 Abbruch von Stb-Decken, d= 18-25cm	m² Stb Deckenfläche	68,00	100,00	19.720,00		29.000,00

UMBAU (2)						
Hauptgebäude						
KG 100	Entfällt					
KG 200 Herrichten und Erschliessen	Entfällt					
KG 300 Bauwerk - Baukonstruktion		1.509.765,45				2.405.125,25
Baumassen						
	Einheit	Größe				
m² Außenwandfläche	m²	9,50				
Statische Erüchtigung und Abdichtung						
m² Innenfläche Silozellen Schaft inkl. Kegel	m²	10.540,00				
Nur Abdichtung						
m² Innenfläche Silozellen Schaft inkl. Kegel	m²	7.616,00				

	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit	Summe min	Summe Ø
339 Außenwände sonstiges					
Produktion, Gewerbe und Handel	m² Außenwandfläche	3,10	3,50	29,45	33,25
LB 033 Baureinigungsarbeiten					
Position 8 Fassade reinigen; Sichtfassade mit Hochdruckreiniger	m² Innenfläche Silozellen	11,00	17,00	199.716,00	308.652,00
LB 013 Betonarbeiten					
Position 24 Wandbauteil d=15-24 cm, Ortbeton inkl. Schalung	m² Innenfläche Silozellen	64,00	130,00	674.560,00	1.370.200,00
Positionen aus anderen Quellen (3):					
dünn-schichtig, Zementgebunden, rein mineralisch(5 mm)	m² Innenfläche Silozellen	35,00	40,00	635.460,00	726.240,00
<b>Summen</b>					
Maschinelle Komponenten				Summe min	Summe Ø
Druckleitungen				59.066,56	59.066,56
Maschinensatz				63.140,12	63.140,12
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			6,82	4,50
Neubau					
Krafthaus				69.430,00	76.100,00
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			3,87	2,80
<b>Abbruch Nebengebäude Optional</b>					
Anbau Nord				25.024,00	25.806,00
Anbau Süd				14.784,00	15.246,00
Anbau West				24.613,50	33.897,00
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			3,59	2,76
<b>Abbruch Silotrakt</b>					
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			26.815,00	37.510,00
Umbau Silotrakt				1,50	1,38
<b>Umbau Silotrakt</b>					
Anteil am Gesamtkosten ohne Nebenkosten	%			1.509.765,45	2.405.125,25
Zwischensumme / Alle Maßnahmen				84,22	88,56
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen				1.792.638,63	2.715.890,93
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen				1.728.217,13	2.640.941,93

KG 700 Baunebenkosten (ohne KG 200, KG 500 und KG600) (4)			
	ca. 25% der KG 300-600		
Zwischensumme / Alle Maßnahmen	448.159,66	678.972,73	
Zwischensumme / Nur zwingende Maßnahmen	432.054,28	660.235,48	
KG 200 und 500 (5)			
	22.134,00	34.986,00	
Gesamtsumme			
Alle Maßnahmen	2.262.932,29	3.429.849,67	
Nur zwingende Maßnahmen	1.728.217,13	3.336.163,42	
Regionalfaktor		0,95	
Alle Maßnahmen	2.152.048,61	3.261.787,03	
Nur zwingende Maßnahmen	1.643.534,49	3.172.691,41	
<b>Vergleich Neubau (6)</b>			
Maschinelle Komponenten			
Druckleitungen	59.066,56	59.066,56	
Maschinensatz	63.140,12	63.140,12	
Neubau			
Baumassen			
	Einheit	Größe	
m	m	40.000,00	
	Einheit	€ (min)/Einheit	€ (Ø)/Einheit
	m	150,00	190,00
		6.000.000,00	7.600.000,00
			Summe Ø

KG 700 Baunebenkosten			
	ca. 25% der KG 300-400	1.530.551,67	1.930.551,67
Gesamtsumme		7.530.551,67	9.530.551,67
Regionalfaktor		0,95	
Vergleich		7.161.554,64	9.063.554,64
		0,30	0,36
Vergleich Umbau und Neubaukosten		30	36
			%

#### Erläuterungen:

Alle Angaben beziehen sich auf die Baukosten Gebäude Altbau 2014

#### Anderweitige Quellen:

- 1) Kostenermittlung nach empirische Formel: 4) Merkl, Gerhard: Trinkwasserbehälter - Planung, Bau, Betrieb, Schutz und Instandsetzung, München, 2005, S. 132 - 133  
Panatschkeff, C., An Empirical Formula for the Probable Specific Cost of Pumped-Storage Power Stations, in: 5,6) BKI Kostenplaner  
Wasserwirtschaft (1989), Nr. 79, S. 74-79  
Baukosten Gebäude  
Statistische Kostenwerte
- 2) BKI Kostenplanung 2014 7) BKI Kostenplanung 2014  
Baukosten Gebäude  
Statistische Kostenwerte  
Referenz:  
Lagergebäude ohne Mischnutzung,  
Baukosten Gebäude - statistische  
Kostenwerte, S. 682 - 690  
BKI Kostenplanung 2013  
Baukosten Positionen  
Statistische Kostenwerte
- 3) Industrielle Produktionsgebäude,  
Massivbauweise  
S.642

Abb. 115:  
Kostenschätzung Pumpspeicher



## Lebenslauf / Wissenschaftlicher Werdegang

Joachim Schulze  
geboren am 04.05.1978 in Dernbach

### Berufliche Laufbahn

- Seit 05 | 2013      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Entwerfen und Stadtentwicklung, TU Darmstadt, Prof. Dr.-Ing Annette Rudolph-Cleff
- 02 | 2012 - 12 | 2013      Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, TU Darmstadt, Prof. Manfred Hegger
- 09 | 2010 - 10 | 2011      Projektleiter bei Drexler Guinand Jauslin Architekten GmbH
- 04 | 2008 - 08 | 2010      Projektarchitekt bei schneider+schumacher Planungsgesellschaft mbH

### Ausbildung

- 09 | 2012 - 04 | 2013      „Fachplaner für Passiv- und Plusenergiehäuser TU Darmstadt“
- 11 | 2011 - 02 | 2012      „Energieberater TU Darmstadt“
- 2001 - 2008      Architekturstudium TU Darmstadt, Abschluss Diplom



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt habe. Alle wörtlichen und sinngemäßen Entlehnungen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Dissertation ist bisher an keiner anderen Fakultät vorgelegt worden.

Darmstadt, den 06.07.2017

Joachim Schulze