

ABSCHLUSSBERICHT

Zum Projekt

Erhalt und Umnutzung von Siloanlagen am Flensburger Ballastkai in geförderten Wohnraum und Energiespeicher, ggf. Fläche für Gemeinbedarf

Berlin, 14.02.2025



ANTRAGSSTELLERIN:

LAGERSCHWERTFEGER GmbH
Köpenicker Chaussee 4
10317 Berlin

AUTORINNEN [alphabetisch, / Kooperationspartner]]:

Ulrich Auer / blueorange development GmbH, Berlin
Florian Deisinger / CAPE Ing., Schwäbisch Hall
Michelle Hur / TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK GmbH, Stuttgart
Prof. Dr. Dirk Kruse / Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co. KG., Gifhorn
Prof. Markus Lager / LAGERSCHWERTFEGER GmbH
Florian Müller / LAGERSCHWERTFEGER GmbH
Boris Peter / C4 engineers GmbH, Stuttgart
Anja Raab / TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK GmbH, Stuttgart
Ramona Schwertfeger LAGERSCHWERTFEGER GmbH
Felix Thumm / TRANSSOLAR ENERGIETECHNIK GmbH, Stuttgart

INHALT

ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT	5
EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	5
Motivation / Potenzial des Bestands!	5
Projektentwicklung	7
Zielsetzung	7
DIE STADT FLENSBURG	8
Planungsrechtliche Situation „Hafen-Ost“	9
Landesentwicklungsplan und Vorbereitende Untersuchungen zu Hafen-Ost	9
POTENZIAL UNGENUTZTER STRUKTUREN IM BUNDESGBIET	10
Fallbeispiele	13
Bereits umgebaute und / oder umgenutzte Beispiele:	15
ARCHITEKTUR	17
Interdisziplinarität	17
Planungsrecht	17
Städtebauliche / Stadtplanerische Einordnung	18
Städtebau, Vergleich Anzahl Wohnung	18
Vorgeschlagene Nutzungen und mögliche Nutzungsverteilung	19
Architektonische Qualität / Potenzial	21
Potenziale und Risiken / Aufwände – Grundrisse, Organisation	26
Fassaden	27
TRAGWERK / AUSFÜHRUNG	28
Lage und vorhandene Bebauung	28
Bestands- und Konstruktionsbeschreibung	30
Silo-Gebäude A1	31
Silo-Gebäude B2	35
Silo-Gebäude C (C1 bis C3)	38
Silo-Gebäude D2	40
Silo-Gebäude D4	41
Prinzipien der Umnutzung von Silos	44
Nachhaltigkeit und graue Emissionen	46
BESTANDSERHALT	46
INNOVATION	47
KREISLAUFFÄHIGKEIT	47
GRAUEN EMISSIONEN DER TRAGKONSTRUKTION	49
BRANDSCHUTZ	52
Grundlagen des Bauordnungsrecht	52

Brandschutzanforderungen Nutzung Hochhaus	52
Brandschutzanforderungen Nutzung Sonstiges Wohnen	53
Brandschutzanforderungen Nutzung Energiespeicher	53

BAUPHYSIK 55

ENERGIESPEICHER 57

Arten von Energiespeichern	57
Stromspeicher für die Energiewende	58
Speichertypen für den Einsatz in den (Getreide)silos	60
Energiespeichertechnologien	60
Bewertungskriterien	61
Festkörperbatterie	62
Tankbasierte Stromspeicher / Flüssigbatterie	64
Wärmespeicher auf Wasserbasis	65
Hochtemperaturwärmespeicher mit Wärmekraftprozess (Carnot-Batterien)	65
Fazit Energiespeichervergleich	66
Energie- und Speicherkonzept für die Siloumnutzung in Flensburg	68
Potentiale für Erzeugung Erneuerbare Energien am Standort	71
Energiebedarf und Lastprofil des neuen Gebäudekomplexes	72
Einführung	72
Heizwärme	73
Trinkwarmwasser	73
Kühlen, Gebäudestrom, Nutzerstrom	73
e-Mobilität	75
Zusammenfassung	75
Stromspeicherdimensionierung	76
Rechenmodell für Stromquellen und -senken	76
Variantenuntersuchung	79
Ergebnisse	79
Vermeiden von CO2 Emissionen durch Integration von Stromspeicher in den Silogebäuden in Flensburg	80
Fazit Nachhaltigkeitsstrategie für die Siloumnutzung in Flensburg	82

ÖKONOMIE DES PROJEKTS 82

Finanzierungsmodelle	82
Schlüsselmaßnahmen und Projektstruktur:	82
Wirtschaftliche Eckdaten und Finanzierungsstruktur:	83
Bewertung der ökonomischen Machbarkeit:	83
ZwischenFazit	84

FAZIT 85

Umnutzung zu Wohnraum und Energiespeicher im Allgemeinen	85
--	----

Die Silos im Kontext des Flensburger Rahmenplans Hafen-Ost	85
--	----

QUELLEN	86
----------------------	-----------

Literatur	86
-----------	----

Abbildungen	86
-------------	----

Endnoten	89
----------	----

ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT

Es geht um Gebäudebestände an der Flensburger Förde. Dort bestehen Silo-Anlagen, die im Rahmenplan "Hafen-Ost" zum Abriss vorgesehen sind. Der Rahmenplan umfasst rund 1.000 Wohnungen.

Wir, LAGERSCHWERTFEGER GmbH, Transsolar Energietechnik GmbH und die C4 engineers GmbH, machen auf eigene Initiative eine Studie zum Erhalt der Silo-Anlagen angefertigt. Die selbst gestellte Aufgabe lautete, die Bestandsgebäude sinnvoll in den bestehenden Rahmenplan Hafen-Ost einzubetten, also eine mögliche Nachnutzung ohne Abriss zu definieren. Ergebnis ist, dass wir mit vertretbarem Umbau-Aufwand mehr Fläche zur Verfügung stellen können, als der Rahmenplan bei Abriss auf der Grundfläche der Silos vorsieht. Dies bei mindestens 67% geringerem CO₂-Verbrauch, bezogen auf die Erstellung des im Rahmenplan angenommenen Bauvolumens in Holz-Hybridbauweise. Im Rahmenplan ist kein Stromspeicher o.ä. vorgesehen.

Ohne Abriss entsteht kein bzw. deutlich weniger Müll bzw. Bauschutt. Zudem können wir in den ehemaligen Industrieanlagen Batteriespeicher vorsehen, die 17.000 Haushalte für einen Tag mit gespeichertem [und vorzugsweise regenerativen] Strom versorgen.

Hauptgegenstände der Studie sind die Voruntersuchungen, ob die Bestandsgebäude für den Einbau der benötigten Wohnungen geeignet sind und ob sich Energiespeichersysteme direkt neben dem Wohnen betreiben lassen. Weiter untersuchen wir die Moderation der Akteure sowie die Wirtschaftlichkeit und Vorbildwirkung des Projekts. Dieses DBU-Förderprojekt begleitet das reale Vorhaben bereits in der Projektentwicklungsphase.

EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

MOTIVATION / POTENZIAL DES BESTANDS!

Die drei letzten Baukulturberichte heißen „Neue Umbaukultur“ [2022/23], „Öffentlich Räume“ [2020/21] und „Erbe – Bestand – Zukunft“ [2018/19]². Zwei davon widmen sich also dem Thema Bestand als materielle wie gestalterische Ressource. 2015 erscheint „Verbieht das Bauen! Streitschrift gegen Spekulation, Abriss und Flächenfraß“³. Inken Baller kämpft seit Jahrzehnten für Um- und Weiterbau und betont dies bis zu ihrem letzten Vortrag⁴.

Ausgangssituation, Silos in Flensburg, Silogebäude

In der modernen Gesellschaft sind die Herausforderungen rund um die Schaffung von Wohnraum, den Erhalt von Bausubstanz und die Energiespeicherung von zentraler Bedeutung. Diese Themen sind nicht nur einzeln relevant, sondern auch in ihrer Wechselwirkung, besonders im Kontext des Klimawandels, der rasanten Urbanisierung und nicht zuletzt zu erwartenden globalen [Klima]Flüchtlingsströme. Angesichts des Bevölkerungswachstums, Migration und der Urbanisierung ist die Schaffung von Wohnraum ein drängendes Thema. In Deutschland fehlen derzeit 700 000 Wohnungen [PA23]. Es gilt, nachhaltige und energieeffiziente Wohnlösungen zu entwickeln, die den modernen Anforderungen entsprechen. Der Erhalt von bestehender Bausubstanz ist dabei eine kosteneffiziente und ressourcenschonende Alternative zum Neubau, und sollte immer zuerst in Betracht gezogen werden. Die Instandhaltung und Modernisierung von Gebäuden kann deren Gesamtenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen signifikant reduzieren. Darüber hinaus hat der Erhalt von Bausubstanz auch einen sozialen und kulturellen Wert, der oft unterschätzt wird. Abriss von funktionierenden Gebäudestrukturen - rein aus ästhetischen Gründen - darf in der heutigen Zeit nicht mehr legitimiert werden.

Um Treibhausgasemissionen in allen Sektoren zu reduzieren, muss sektorenübergreifend die Wende von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern geschafft werden. Energiespeicher spielen dabei eine Schlüsselrolle. Sie ermöglichen es, Schwankungen in der erneuerbaren Energieerzeugung auszugleichen und tragen zur Stabilisierung des Energienetzes bei.

Die Schaffung von Wohnraum, der Erhalt von Bausubstanz und die Implementierung von Energiespeichern sind drei ineinandergreifende Themenbereiche, die

maßgeblichen Einfluss auf unsere zukünftige Lebensqualität und den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen haben. Durch die gezielte Analyse und Umsetzung von Strategien in diesen Bereichen kann ein wichtiger Beitrag zu den substanziellen Themen unserer Zeit geleistet werden.

Die Silogebäude der Stadt Flensburg bieten genau diese Möglichkeit: Die Umnutzung zu Wohnraum und Energiespeichern bindet viele Tonnen CO₂ und vermeidet graue Emissionen, die beim Neubau entstehen würden. Darüber hinaus kann mittels innovativem Energie- und Speicherkonzept der Autarkiegrad erhöht werden und die Nutzung von regenerativen Energien am Standort maximiert werden. Die Volumina der früheren Getreidesilos bieten nicht nur Platz für Energiespeicher zur Versorgung der neu erschaffenen Wohnungen, sondern könnten regenerativen Strom für ein ganzes Quartier mit 1'000- 10'000 Wohnungen zwischenspeichern. Durch die Umnutzung der Getreidesilos in Wohnraum und Energiespeicher entsteht ein Speicherpotential im urbanen Kontext, dass bei klassischen Neubautentwicklungen nie zur Verfügung stehen würde.

Im Rahmen dieses Projekts wurde diese Idee verschiedenen Branchengrößen aus Energieversorgern, Stadtwerken, Batterieherstellern und Forschungsinstituten vorgestellt. Alle Ansprechpartner bewerteten die im Forschungsprojekt kombinierten Themen als relevant und äußerten positive Rückmeldungen. Dieses positive Feedback hat unsere Motivation nur bestätigt. Alle Unternehmen bestanden darauf über den weiteren Projektverlauf weiterhin informiert zu werden, um mögliche Beteiligungen und Kooperationen in der Zukunft zu eruieren.



Abbildung 1 – Im Zuge der Studie befragte und betrachtete Gesellschaften aus Forschung und Industrie

In diesem Bericht zeigen wir die Potenziale des Erhalts der bestehenden Baumassee der Silogebäude auf. Unsere These und unser Ziel: Die große Baumassee bietet Raum sowohl für konventionelle Nutzungen [in diesem Falle Wohnnutzung] als auch für die Speicherung von regenerativer Energie. Dieser Raum ist im beschlossenen Rahmenplan gar nicht oder unzureichend vorgesehen. Durch die Installation von Energiespeichern in den Bestandsgebäuden entsteht die Möglichkeit, regenerativ erzeugte Energie direkt dort zu speichern, wo der Bedarf anfällt. Hierbei ist das „Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045, Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz“⁵, Stand 07.03.2023 zu erwähnen. Unter „5. 10 Ausbau der Wärmespeicherung“: „... Der Gebäudebestand kann als Wärmespeicher nutzbar gemacht werden. In Verbindung mit größeren Warmwasserspeichern wird die zeitliche Unabhängigkeit von Erzeugung und Verbrauch weiter erhöht. Die Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch stärkt die Resilienz des Gebäudesektors, sofern er als Speicher eingesetzt wird. Die Gebäude können zukünftig auch für den Energiesektor im Demand-Side-Management⁶ zur Verfügung stehen bzw. genutzt werden. Saisonale Speicher mit sensibler Wärmespeicherung sind bereits im Einsatz. Diese können insbesondere bei Kopplung mit den volatilen Erneuerbaren Energien mehr Flexibilität ins Energiesystem bringen.“

PROJEKTENTWICKLUNG

Durch das eigeninitiative Aufzeigen der Potenziale durch die Initiator:innen werden zunächst die vorhandenen Kapazitäten des Bestands beleuchtet, um Stadtpolitik und -verwaltung von der Sinnhaftigkeit des Nicht-Abriss zu überzeugen.

Es geht explizit nicht um monokulturelle Befriedigung des Bedarfs separater Akteure. Das Projekt ist Beispiel für die Vernetzung unterschiedlicher Interessen. Mit dem Vorhaben verhindern wir "Mononutzungen", indem wir vorhanden Raum und Struktur nutzen und nicht einzelne Bedarfe bestmöglich bedienen.

Durch Erhalt der Silos kann voraussichtlich deutlich mehr Fläche genutzt werden als im Falle Abriss + [kleinerer] Neubau. Durch die Vorbildwirkung der eigeninitiativen, sachlich motivierten Projektentwicklung erwarten wir positive Strahlkraft: Durch Nutzung demokratisch wie verwaltungstechnisch gegebener Möglichkeiten motiviert das Projekt ambitionierte zum Aufdecken ähnlicher Potenziale, in anderen Städten und Gemeinden [oder bei Immobilien im Allgemeinen]. In puncto Strahlkraft verweisen wir auf die steigende Zahl an umgenutzten Hafen- und / oder Speichergebäuden, siehe unten.

ZIELSETZUNG

Die hohe Masse und die Robustheit der Siloanlagen scheinen prädestiniert für die Installation schwerer Energiespeicheranlagen bei gleichzeitiger Nutzung des Gebäudes. Die Umnutzung des Bestands ist erstes Ziel dieser Arbeit.

Ein weiteres Ziel des Vorhabens ist die dezentrale Bereitstellung von Energie. Fernwärme ist in Flensburg flächendeckend verfügbar, es gibt einen Anschlusszwang. Elektrische Energie wird -außer bei den sog. Balkonkraftwerken- größtenteils zentral hergestellt und über lange Wege transportiert. Dabei entstehen zwischen drei und neun Prozent Verluste⁷. Über die Installation der Energiespeicher im genutzten Gebäude soll die Energie direkt am Ort des anfallenden Bedarfs gespeichert und zur Verfügung gestellt werden. Da sich die Silos inmitten eines künftigen urbanen Gebiets befinden, gehen wir von hohem Energiebedarf aus. Dies umso mehr, wenn der -oft gleichzeitige- Bedarf an Lademöglichkeiten für E-Fahrzeuge zunimmt. Hiervon gehen wir zumindest übergangsweise aus. Dem Thema Energie sind ist das Kapitel ENERGIESPEICHER gewidmet.

Ein weiteres Ziel ist eher die Beseitigung eines Problems: Gegenwärtig scheint die Speicherung von Elektrizität nicht wirtschaftlich, da man sowohl fürs Einspeichern als auch für die Abgabe aus den Speichern Miete an die Betreiber:innen der Netzwerke zahlt. Die Höhe dieser Abgaben macht das Beziehen eingespeicherter, regenerativ gewonnener Energie teurer als auf konventionellem Weg bezogene Energie. Dieser Missstand muss sich ändern, damit die Energiewende eine Chance hat.

Nochmals die Ziele in Kurzform:

1. Nutzung robuster, bestehender Gebäudestrukturen als Raum für Energiespeicher bei gleichzeitiger Nutzung der Gebäude als Wohn- und Geschäftshaus oder für Gemeinbedarf [Bibliothek, Stadtzentrum, Bildung]
2. Nutzung bereitgestellter Energie aus den Speichern in deren lokalem Umfeld
3. Erstellen einer wirtschaftlichen Strategie für Speicherung und Vertrieb regenerativer Energie

DIE STADT FLENSBURG

„Die Stadt Flensburg liegt am Ende der rund 35 km langen Flensburger Förde in 3 km Entfernung von der deutsch-dänischen Grenze. Sie ist kreisfreie Stadt, Oberzentrum und die drittgrößte Stadt Schleswig-Holsteins. Sie grenzt an die Kreise Nordfriesland und Schleswig-Flensburg.

Die Hafen- und Handelsstadt, die seit 1284 Stadtrechte besitzt, ist durch ihre unmittelbare Beziehung zum Wasser und die Begegnung zweier Kulturen geprägt. In Flensburg leben 95.469 Einwohner (Stand: 31.12.2017)¹ und im Einzugsgebiet ca. 450.000 Einwohner.

Die Stadt ist durch die Bundesstraßen B 199, die B 200 und die Bundesautobahn A7 / E45 mit zwei Abfahrten überörtlich gut angebunden. Sie besitzt einen (Geschäfts-) Flughafen und einen Bahnhof mit IC / ICE-Haltepunkt. In Flensburg sind eine Europa-Universität, eine Hochschule und das Kraftfahrtbundesamt ansässig.

Die Wirtschaftsstruktur der Stadt Flensburg wird durch einen überdurchschnittlich hohen Anteil von Arbeitsplätzen im Dienstleistungsbereich (84 %) bestimmt. Das produzierende Gewerbe nimmt 16 % ein. Die ca. 5.000 Unternehmen in Flensburg beschäftigen ca. 40.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Die Stadt ist außerdem Sitz der Industrie- und Handelskammer, der Handwerkskammer und der Kreishandwerkerschaft.

Als identitätsstiftende Alleinstellungsmerkmale gegenüber dem Umland und anderen Städten sind z.B. zu nennen:

- . der große Anteil der dänischen Minderheit, deutsch-dänische Baukultur prägt das Stadtbild,
- . die Geschichte rund um die Hafenwirtschaft und Kaufmannskultur und
- . die Flensburger Förde.“⁸

„LANDSCHAFTSRAHMENPLAN

Für die kreisfreie Stadt Flensburg, die Kreise Nordfriesland und Schleswig-Flensburg (Planungsraum V) wurde 2002 vom Land Schleswig-Holstein der Landschaftsrahmenplan (LRP) aufgestellt. Flensburg wird darin überwiegend als Siedlungsraum in der Naturraumkarte dargestellt.

Landschaftliche Leitbilder der naturräumlichen Regionen „Urbaner Raum“ sind u.a.:

- . Naturerlebnisräume und Grünzüge in Siedlungsnähe als ortsteilbezogene Erholungsstätten
- . Gesundes innerörtliches Lokalklima durch unversiegelte Flächen, begrünte Verkehrswege und Plätze, Freihaltung der Kaltluftschneisen (Niederungsgebiete) von Bebauung,
- . Kulturhistorisch besondere Landschaftsausschnitte durch Erhaltung und Entwicklung des Knicksystems, der Kleingewässer und sonstiger kulturhistorisch bedeutsamer Objekte
- . Naturnahe Seen, Förden / Buchten und Fließgewässer“⁹

PLANUNGSRECHTLICHE SITUATION „HAFEN-OST“

Der Flächennutzungsplan [FNP]¹⁰ weist den Bereich als Gewerbliche Baufläche aus:

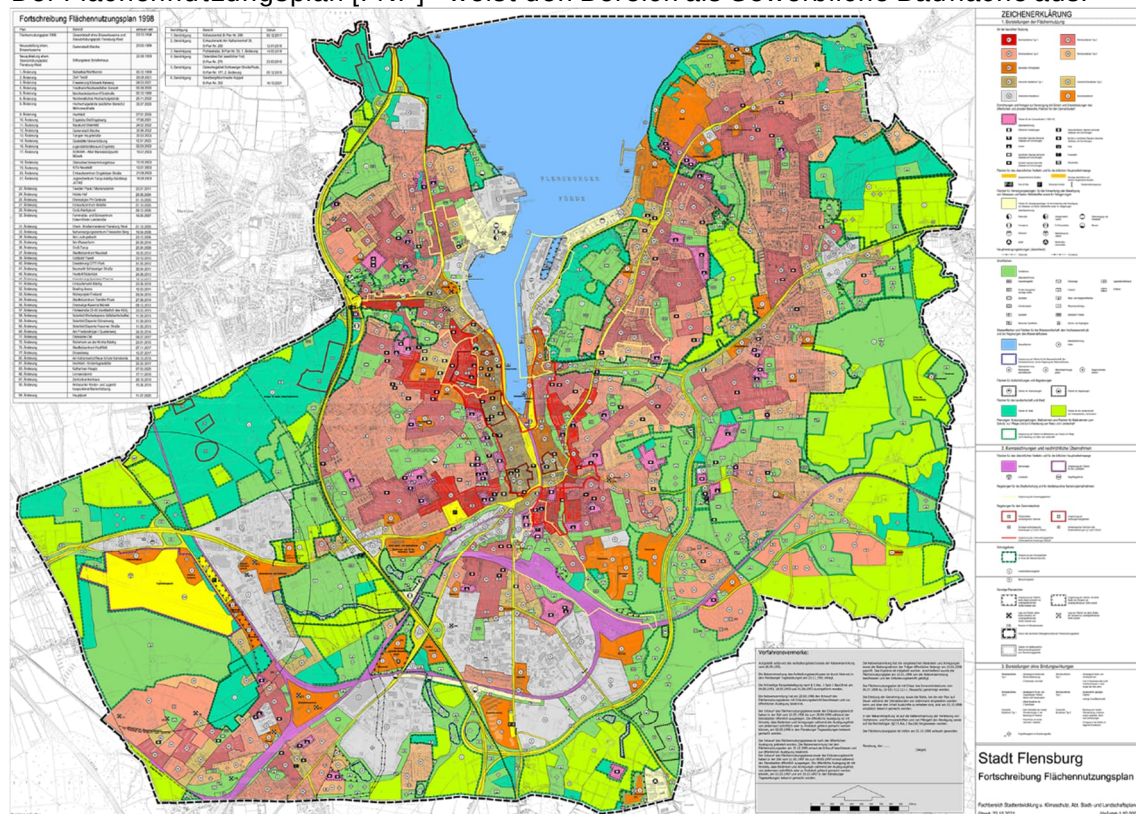


Abbildung 2 - FNP der Stadt Flensburg

Mit dem Rahmenplan beabsichtigt die Stadt Flensburg die Aufstellung eines Bebauungsplans. Der zur Durchsetzung des Rahmenplans notwendige, am 21.02.2019 gefasste Satzungsbeschluss „Sanierungsgebiet Hafen-Ost“ ist vom OVG Schleswig am 02.10.2024 wegen eines Formfehlers für ungültig erklärt worden.¹¹ Die Umwidmung des Gebiets um den Flensburger Hafen wird derzeit auf landespolitischer Ebene diskutiert.¹² Die planungsrechtliche Situation muss damit als ungeklärt bezeichnet werden. Die Verfasser gehen in dieser Studie davon aus, dass der Rahmenplan wie geplant umgesetzt wird. Für die planungsrechtliche Einordnung gehen wir vom gültigen Baurecht aus, siehe Kapitel Planungsrecht.

LANDESENTWICKLUNGSPLAN UND VORBEREITENDE UNTERSUCHUNGEN ZU HAFEN-OST

„Die Stadt Flensburg wird im Landesentwicklungsplan des Landes Schleswig-Holstein 2010 als Oberzentrum dargestellt. Für die städtebauliche Entwicklung sind als Ziele u.a. der Vorrang der Innen- vor der Außenentwicklung sowie die Umnutzung brachliegender ehemals industriell-gewerblich genutzter Flächen im Siedlungsbereich genannt. Der Flensburger Hafen wird als regional bis lokal bedeutsamer Wirtschaftshafen eingestuft. Als Ziel wird „eine an ihren Funktionen gemessene Bestandserhaltung und Bedarfsanpassung angestrebt“.

Der Küstenraum Flensburgs ist als Schwerpunkttraum für Tourismus und Erholung genannt, hierzu gehören auch die Wasser- und Landflächen des Untersuchungsgebiets Hafen-Ost und die Landfläche einschließlich Volkspark. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt in der Weiterentwicklung als „Maritimes Urlaubsland“. Auf der Grundlage der Tourismusstrategie des Landes Schleswig-Holstein sollen die touristischen Planungen und Maßnahmen im Land auf einen Qualitätstourismus und Saison verlängernde Maßnahmen ausgerichtet sein und die Wachstumspotenziale des Tourismus genutzt werden.

REGIONALPLAN

Für Flensburg gilt der Regionalplan 2002 für den Planungsraum V / Landesteil Schleswig (Schleswig-Holstein Nord). Eine Neuaufstellung ist in Bearbeitung.

Nach den Festsetzungen des Regionalplans ist der „Landesteil Schleswig“ insgesamt ländlicher

Raum, nur teilweise überlagert von den drei Stadt- und Umlandbereichen sowie von den Ordnungsräumen für Tourismus und Erholung an der Nord- und Ostsee.

Flensburg hat trotz andersartig prognostizierter Einwohnerzahlen Einwohnerzuwachs zu verzeichnen. Dies wird in der derzeit bearbeiteten Fortschreibung berücksichtigt, d.h. für Flensburg wird von einer Einwohnersteigerung ausgegangen.

LANDSCHAFTSRAHMENPLAN

Für die kreisfreie Stadt Flensburg, die Kreise Nordfriesland und Schleswig-Flensburg (Planungsraum V) wurde 2002 vom Land Schleswig-Holstein der Landschaftsrahmenplan (LRP) aufgestellt. Flensburg wird darin überwiegend als Siedlungsraum in der Naturraumkarte dargestellt.

Landschaftliche Leitbilder der naturräumlichen Regionen „Urbaner Raum“ sind u.a.:

. Naturerlebnisräume und Grünzüge in Siedlungsnähe als ortsteilbezogene Erholungsstätten“¹³

POTENZIAL UNGENUTZTER STRUKTUREN IM BUNDESGBIET

Es wurden exemplarisch ungenutzte Strukturen in urbanen Gebieten ähnlich den Silos im Hafen-Ost von Flensburg gesucht. Beispielhaft wurden hier die Binnenhäfen des Rheins, Mains und der Elbe herangezogen. Die beiden Wasserstraßen versorgen den Westen Deutschlands vornehmlich mit Rohgütern, in Ballungsgebieten oder Industrieanlagen gibt es weitläufige Hafengebiete mit entsprechenden Siloanlagen. Inwieweit diese noch in Benutzung bzw. für eine Umnutzung zur Verfügung stehen, wäre in einer tiefergehenden Recherche zu untersuchen. Die Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, die Verfasser:innen gehen von einer Vielzahl an Bestandssilos im Bundesgebiet aus, die für infrastrukturelle Nutzung in Frage kommen.

Idealerweise sind diese ungenutzten Siloanlagen in der Nähe eines Fernwärmenetzes. Die Daten zu vorhandenen Fernwärmenetzen und der Standorte der Siloanlagen wurden hierfür abgeglichen:

1. Hamburger Hafen, S&A Silo
S&A Silo, Wilhelm-Weber-Straße 6, 21079 Hamburg
2. Hamburg, Rethe Speicher
Eversween 11, 21107 Hamburg
3. Magdeburg, Öko-Korn-Nord
Industriestraße, 39126 Magdeburg
4. Magdeburg, Silo Nord
Saalestraße 20, 39126 Magdeburg
5. Magdeburg, Magdeburger Getreide Gesellschaft mbH
Saalestraße 27, 39126 Magdeburg
6. Magdeburg, Viterra
Am Hansehafen 8, 39126 Magdeburg
7. Holcim Westcement, Duisburg
Ackerstraße, 47166 Duisburg
8. Duisburg Küppersmühle
Philosophenweg 49-51, 47051 Duisburg
9. C. Steinweg
Am Außenhafen, 47059 Duisburg
10. Duisburg, Promberger
Baldusstraße 47138 Duisburg
11. Duisburg Süd, HKM Hochofen A
Ehringer Str. 200, 47259 Duisburg
12. Mülheim a.d.R., Bamberger Mälzerei Beteiligungs GmbH
Rheinstraße, 45478 Mülheim an der Ruhr
13. Krefeld, Lagerhaus Pegels GmbH & Co. KG - Werk 2
Silostraße 25, 47809 Krefeld
14. Krefeld, Lagerhaus Pegels GmbH & Co. KG - Werk 1
Hentrichstraße 55, 47809 Krefeld
15. Krefeld, GoodMills Deutschland GmbH
Castellweg, 47809 Krefeld

16. Düsseldorf
Weizenmühlenstraße 20, 40221 Düsseldorf
17. Düsseldorf, Fortin Mühlenwerke
Fringsstraße 1, 40221 Düsseldorf
18. Neuss, AGRAVIS Mischfutter West GmbH
Duisburger Str. 16, 41460 Neuss
19. Köln Niehl
Lagerhauskai, 50735 Köln
20. Köln Deutz
Siegburger Str. 110, 50679 Köln
21. Koblenz
Fritz-Ludwig-Straße, 56070 Koblenz
22. Wiesbaden, Raiffeisen
Hafenweg, 65201 Wiesbaden
23. Mainz, Bindewald Silo
Mühlenstraße 2, 55120 Mainz
24. Frankfurt a.M., Aurora
Franziusstraße, 60314 Frankfurt am Main
25. Hanau, Raiffeisen Agrar
Hafenstraße 10, 63450 Hanau
26. Würzburg, BayWa Agrar
Friedrich-Koenig-Straße 1, 97080 Würzburg
27. Würzburg, Würzburger Hafensilo GmbH
Nördliche Hafenstraße 5, 97080 Würzburg
28. Schweinfurt, Ireks GmbH
Hafenstraße 46, 97424 Schweinfurt
29. Schweinfurt, Cramer-Mühle GmbH&Co. KG
Maininsel 3, 97424 Schweinfurt
30. Nürnberg, Geltinger Verwaltung GmbH
Rotterdamer Str. 77, 90451 Nürnberg
31. Worms, Bamberger Mälzerei Beteiligungs GmbH, Proland
Rheinweg 7, 67550 Worms
32. Worms, RWZ-Regionalzentrum Raiffeisen Agrarhandel Rhein-Main-Mosel-Saar (RAR)
Hafenstraße 16-32, 67547 Worms
33. Mannheim, GoodMills Deutschland GmbH
Hombuschstraße 5, 68169 Mannheim
34. Mannheim, Deutsche Tiernahrung GmbH
Franzosenstraße 3, 68169 Mannheim
35. Mannheim, Catural GmbH
Mühlenstraße 1, 68169 Mannheim
36. Karlsruhe, ZG Raiffeisen Karlsruher Lagerhausgesellschaft
Werftstraße 7, 76189 Karlsruhe
37. Heilbronn, beweka Kraftfutterwerk GmbH
Hafenstraße 39, 74076 Heilbronn

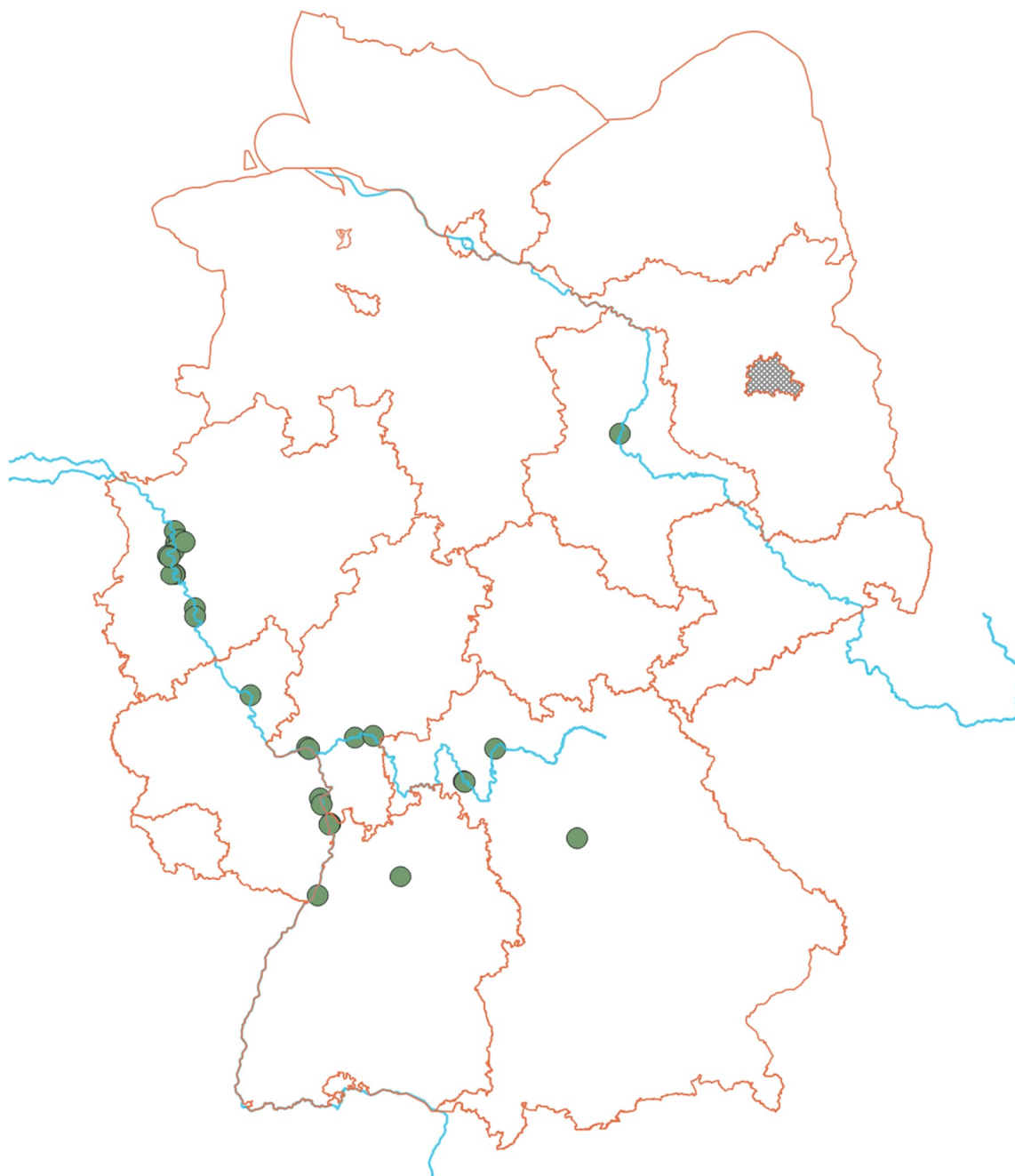


Abbildung 3 Lage der Silos im Bundesgebiet Quelle: QGIS, Wikipedia

FALLBEISPIELE

Zur Überprüfung der quantitativen Leistungsfähigkeit der hier behandelten Idee betrachten wir hier einige Beispiele auf Ihre Größe hin.

*Düsseldorf (Nr. 17)

Silovolumen: ca. 65000 m³

Fläche für Gewerbe/Wohnen: 7500 m²



Abbildung 4 – Quelle: Bing

Köln Deutz (Nr. 21)

Silovolumen: ca. 440000 m³

Fläche für Gewerbe/Wohnen: ca. 60000 m² BGF



Abbildung 5 – Quelle: Bing

Würzburg (Nr. 27)

Silovolumen: ca. 70000 m³

Fläche für Gewerbe/Wohnen: ca. 6000 m² BGF



Abbildung 6 - -- Quelle: Bing

BEREITS UMGEBAUTE UND / ODER UMGENUTZTE BEISPIELE:

Hier zeigen wir einige bereits realisierte Beispiele aus den Fachmedien auf. Aufgrund der Ähnlichkeit hinsichtlich Materialeinsatzes und Struktur beschränken wir uns hier nicht ausschließlich auf Silos, sondern betrachten auch z.B. umgebaute Bunkieranlagen.



Abbildung 7 - KORNVERSUCHSSPEICHER, Europacity Berlin, AFF Architekten, Foto: TJARK SPILLE



Abbildung 8 Atelier Deshaus: Minsheng Dock Silo renovation; Quelle: https://www.behance.net/gallery/59550679/Minsheng-Dock-Silo-renovation-Atelier-Deshaus?locale=fi_FI

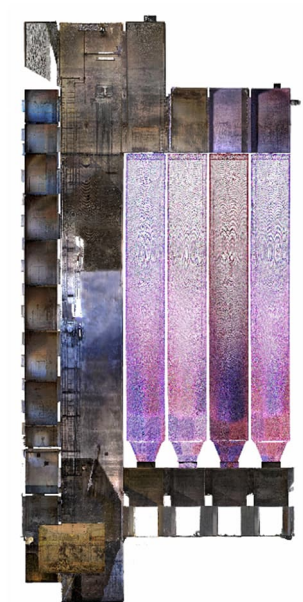


Abbildung 9 – Brandlhuber + - Prototypenwerkstatt; Quelle: <https://bplus.xyz/en/projects/0154.2-prototyping-workshop>



Abbildung 10 – COBE: the silo; Quelle: <https://www.cobe.dk/projects/the-silo>



Abbildung 11 - bhl Architekten von Bassewitz Limbrock Partner GmbH; Quelle: <https://das-silo.de/konzept/>



Abbildung 12 - O-office Architects; Industrie-Silo in Shenzhen, Quelle: https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Installation-Industrie-Silo_in_Shenzen_umgenutzt_3519281.html



Abbildung 13 – Ricardo Bofill, La Fabrica, Quelle: <https://www.houzz.de/fotos/ricardo-bofill-taller-de-arquitectura-headquarters-phvw-vp-41848003>



Abbildung 14 – Wernik Holtkamp Architekten, Zwarte Silo, Quelle: <https://www.houzz.de/fotos/ricardo-bofill-taller-de-arquitectura-headquarters-phvw-vp-41848003>

INTERDISZIPLINARITÄT

Das Projekt setzt interdisziplinäres Arbeiten nicht nur der Planer:innen, sondern aller Akteur:innen inklusive Stadtverwaltung und Politik voraus. Die einzelnen Disziplinen Architektur, Energie und Tragwerk müssen jeweilige Potenziale und Herausforderungen zeitgleich analysieren, um effizient arbeiten zu können. Umfangreiche Begutachtung des Bestands, permanenter Austausch und Rückkopplung mit weiteren Ingenieur:innen sind unabdingbar. Einer Bewertung der bestehenden Struktur muss die Einschätzung der - sich aus der Kombination der konventionellen mit der energetischen Nutzung der Gebäudestruktur ergebenden - Ansprüche an Tragwerk und Bauphysik und Brandschutz vorausgehen. Dies nicht nur innerhalb der agierenden Planer:innen, sondern ebenfalls mit möglichen Betreiber:innen. Aus der meist monokulturellen Ausrichtung einer Immobilienunternehmens / einer Vermieterin oder eines Energieunternehmens resultiert die Notwendigkeit einer Neubewertung des eigenen Geschäftsfelds mit anderen, teilweise artfremden Akteur:innen. Somit liegt der Fokus neben den planerischen Ergebnissen auch auf Ideenfindung und Vorarbeit der Ingenieur:innen aus Technik und Wirtschaft. Die Dokumentation dieser Phasen bedarf akribischer Begleitung der eigentlichen Planungsarbeit.

Die folgenden Ausführungen sind größtenteils enthalten in der Präsentation vor dem Flensburger SUPA [Städtischer Umwelt- und Planungsausschuss] am 10.10.2023

PLANUNGSRECHT

Je nach verwendetem Energiespeichersystem ist von unterschiedlichen Genehmigungsprozessen auszugehen. Dienen die Speicher nur für die Verbrauchsseite, beispielsweise als Stromspeicher für die neu erstellten Wohneinheiten inkl. E-Ladestationen oder als (saisonaler) Wärmespeicher, so werden diese im Zuge der Baugenehmigung der Gebäude betrachtet. Wärmespeicher wie z.B. Eisspeicher bedürfen hier keiner Genehmigung, da z.B. weder Sonden im Erdreich (Geothermie) oder Gefahrenstoffe verwendet werden. Bei größeren Stromspeichern könnten im Zuge der Genehmigungsplanung Gutachten zu Schallimmissionen und elektrischen und magnetischen Feldern sinnvoll sein. Einhausungen können diese sicher abschirmen, Grenzwerte nach Bundes-Immissionsschutzgesetz so eingehalten werden.

Großmaßstäbliche Stromspeicher, die beispielsweise zur (regionalen) Netzstabilisierung verwendet werden, sind als Infrastrukturmaßnahme in einem wesentlich aufwendigeren Planfeststellungsverfahren zu genehmigen. Das Planungsrecht für einzelne, großmaßstäbliche Energiespeicheranlagen in Schleswig-Holstein fällt somit unter die Zuständigkeit des Landes und ist in den einschlägigen Landesgesetzen und Verordnungen geregelt.

In Schleswig-Holstein gelten für Energiespeicheranlagen in der Regel folgende rechtlichen Rahmenbedingungen:

Landesplanung: Die Standortwahl für Energiespeicheranlagen fällt in den Zuständigkeitsbereich der Landesplanung. Das Landesentwicklungsprogramm (LEP) enthält Grundsätze und Leitlinien für die raumordnerische Entwicklung und Nutzung des Landes. Energiespeicheranlagen müssen in Einklang mit den Vorgaben des LEP stehen. Regionalplanung: Auf regionaler Ebene werden die Vorgaben des LEP durch Regionalpläne konkretisiert. Diese können Standortbedingungen und -beschränkungen für Energiespeicheranlagen festlegen.

Besonders bei größeren Anlagen und in Abhängigkeit der Verwendeten Speichermedien bzw. -stoffe kann eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich sein. Eine erste Prüfung hat ergeben, dass die hier betrachteten Energiespeicher keiner Genehmigung nach Bundes-Immissionsschutzgesetz bedürfen, s. „Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4. BImSchV“ - Anhang 1.

Das Planungsrecht sieht in der Regel die Möglichkeit einer Öffentlichkeitsbeteiligung vor. Erfahrungen aus der Energiewirtschaft zeigen hier, dass diese umfassend und faktenbasiert durchzuführen ist, um mögliche Bedenken der Bevölkerung zu adressieren.

Netzanbindung: Große Energiespeicheranlagen müssen in das bestehende Stromnetz integriert werden. Hierbei sind technische Vorgaben und Vereinbarungen mit Netzbetreibern erforderlich.

Energiewirtschaftsgesetz: Bundesgesetze wie das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) können ebenfalls Anforderungen an den Bau und Betrieb von Energiespeicheranlagen stellen, insbesondere im Hinblick auf Netzzugang und Systemdienstleistungen. Siehe: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/F/fehmbelt/planfeststellungsverfahren_guterklaert.html

STÄDTEBAULICHE / STADTPLANERISCHE EINORDNUNG

Die Silos befinden sich zentral im Bereich des Sanierungsprojekts Hafen-Ost. Die Fläche, auf der sich die Silos befinden, ist dort als „Entwicklungsfläche für gemischtes Wohnen“¹⁴ deklariert. Gegenwärtig ist die Fläche im FNP als Gewerbliche Baufläche deklariert.

Die betrachteten Gebäude sind bauordnungsrechtlich aufgrund ihrer Höhe und ihrer beabsichtigten Umnutzung hin zu Wohnen, Gewerbe, Lagern und Speichern von Energie grundsätzlich als Hochhäuser nach MBO "Musterbauordnung 2002", geändert am 22./23.09.2022, zu bewerten.

Die bautechnischen Anforderungen an Hochhäuser ergeben sich aus der Hochhaus-Richtlinie – HHR für Schleswig-Holstein vom 05.08.2016 – in Verbindung mit der Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein (LBO-SH) 06.12.2021. Die Richtlinie HHR für Schleswig-Holstein regelt besondere Anforderungen und Erleichterungen im Sinne von § 51 Abs. 1 LBO-SH „Sonderbauten“, hier für den Bau und Betrieb von Hochhäusern.

Es ist davon auszugehen, dass die in den Gebäuden integrierten Energiespeicher entsprechend elektrischer Betriebsräume nach „Landesverordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen“ (EltBauVO) vom 2. Mai 2022 auszuführen sind.

Siehe §1 Anwendungsbereich Abs. 1. und §2 ff. zur Ausführung.

STÄDTEBAU, VERGLEICH ANZAHL WOHNUNG

Wie eingangs beschrieben sieht der planungsrechtlich nicht verbindliche Rahmenplan „Hafen-Ost“ den Abriss der sukzessive nach dem zweiten Weltkrieg errichteten Silos und den Neubau von wesentlich niedrigeren Gebäuden mit hauptsächlich Wohnnutzung vor. Das hier mitbetrachtete Silo mit dem Baujahr 1936 steht unter Denkmalschutz und soll erhalten bleiben. Eine spezielle Nutzung für diesen sog. Ballastkai-Speicher¹⁵ ist im Rahmenplan (Präsentation, S. 17-18) nicht vorgegeben.

Die städtebaulich-architektonische Dimension der bestehenden Siloanlagen widerspricht dem gestalterischen Konzept des Rahmenplans sowie den bereits erwähnten Vorbereitenden Untersuchungen nach §141 BauGB, dort bezeichnen Dipl.-Ing. Stefanie Hagen und Dipl.-Ing. Erich Reuter vom IHR Sanierungsträger die Silos als „massiven[r] und hohen[r] Industriebau“, der die „östliche[n] Stadthafensilhouette dominiert“¹⁶.

Der Erhalt der teils über 50 Meter hohen Gebäude sind für die Flensburgerinnen und Flensburger zwar ein so vertrauter wie prägnanter Anblick, entspricht aber nicht dem mit knapper Mehrheit angestrebten Rahmenplan bzw. den vorausgegangenen Untersuchungen. Der Erhalt der Silos wäre ein wesentlicher Eingriff in das gestalterische Konzept des Rahmenplans. Dieser sieht ein sog. Hafenband¹⁷ vor, welches die drei älteren Gebäude Ballastkai-Speicher^a, den sog. Habro- oder Stadt-Speicher^b und den Hübsch- oder Harnskaispeicher^c als prägende Struktur nutzt¹⁸. Der dargestellte Lageplan (Präsentation, S.20) greift die städtebaulichen Ideen des Rahmenplans auf und passt diesen in der näheren Umgebung auf den Erhalt der Silos an. Die vorgeschlagene Anzahl der Wohnungen im Rahmenplan anstelle der Silos soll

^a Denkmalliste Dil/Ez [Kulturdenkmal Ipsa-Lege, Einzeldenkmal], zur Eintragung vorgesehen] der Stadt Flensburg, Ballastkai Nr. 10, Getreidespeicher

^b Denkmalliste D/Ez [eingetragenes Kulturdenkmal, Einzeldenkmal], Harniskai Nr. 22

^c Denkmalliste Dil/Ez [Kulturdenkmal Ipsa-Lege, Einzeldenkmal], zur Eintragung vorgesehen] der Stadt Flensburg, Harniskai Nr 4

mit Erhalt der Silos mindestens erreicht werden. Mit Umsetzung der im Rahmenplan gezeigten Bebauung ließen sich überschlägig 292 Wohnungen im Betrachtungsbereich um die Silos errichten. Nach unseren Kalkulationen ließen sich mit dem hier erarbeiteten alternativen Schema auf gleicher Grundfläche 358 Wohnungen errichten, also rund 25% mehr¹⁹.

VORGESCHLAGENE NUTZUNGEN UND MÖGLICHE NUTZUNGSVERTEILUNG

Neben der Nutzung als Energiespeicher soll in den Silos vornehmlich Wohnraum geschaffen werden, um die im Rahmenplan formulierten Ziele und Bedarfe in Flensburg zu bedienen. Entsprechend werden weitere Nutzungen für die Erdgeschosse am Boulevard [siehe Rahmenplan] vorgeschlagen. Die robuste, großzügige Struktur der Siloanlagen ermöglicht vor allem im Erdgeschoss und den ersten Obergeschossen auch großflächigere Nutzungen wie Büro-/Gewerbe- oder Ausstellungsflächen, s. Präsentation, S. 26-40.



Abbildung 15- Nutzungsverteilung,, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 28

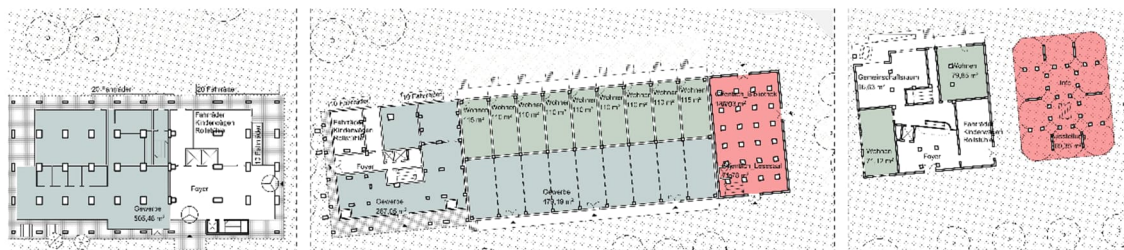


Abbildung 16 - Grundriss EG ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 29

Die Verteilung von konventioneller Nutzung und Energiespeichern wird in dieser Arbeit wie folgt angenommen:

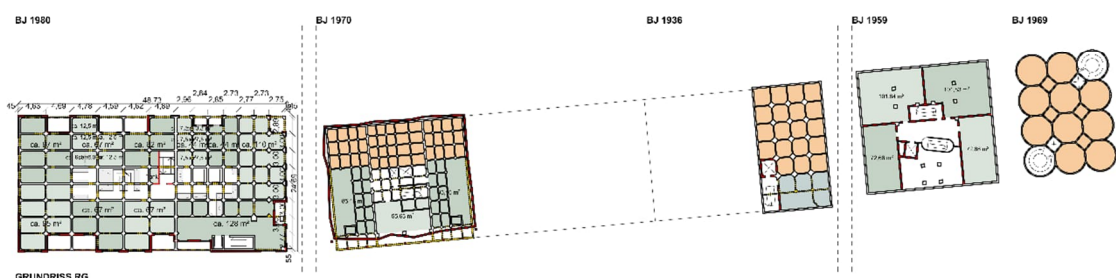


Abbildung 17 - Grundriss Regelgeschoss ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 26

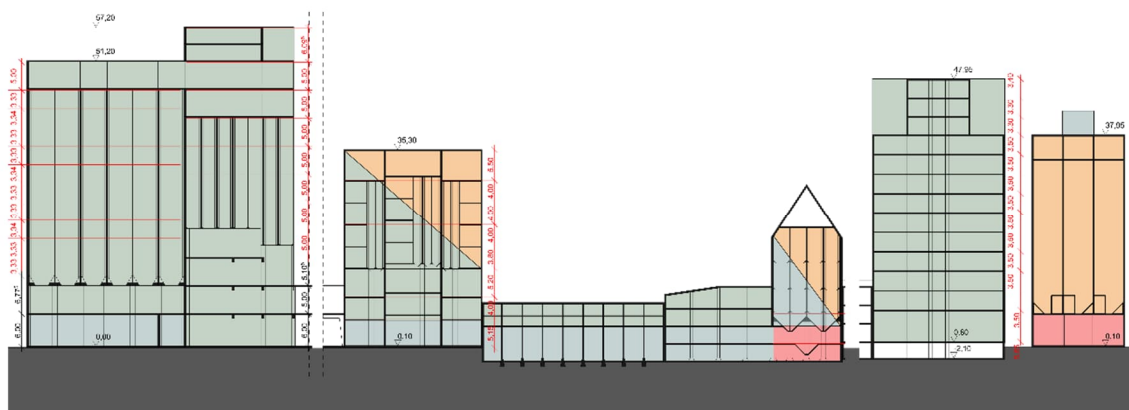


Abbildung 18- Längsschnitt ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 27

Die energetischen Aspekte werden im Abschnitt ENERGIESPEICHER vertieft.

ARCHITEKTONISCHE QUALITÄT / POTENZIAL

Ein zentrales Potenzial der Idee besteht nach Einschätzung der Verfasser:innen in dem Impuls, den die Umnutzung gerade der Struktur mit sich brächte, auf den die Flensburger:innen seit Jahrzehnten von der belebten Innenstadt an der Westseite der Förde aus blicken:



Abbildung 19 - Blick aus Innenstadt und Förde-Westufer, Foto: Timon Oberfeld



Abbildung 20 - Visualisierung der umgebauten Silos, Rendering: Atelier Tata

Die mögliche architektonische Qualität des Bestands lässt sich anhand der oben gezeigten Referenzen erahnen.



Abbildung 21 - KORNVERSUCHSSPEICHER, Europacity Berlin,, AFF Architekten, Foto: TJARK SPILLE²⁰

Das räumlich faszinierende Moment der Siloanlagen liegt neben ihrer Dimension auch in ihrer Struktur. Im Bestandsschnitt lässt sich die Dimension der etwa 30 Meter hohen Schächte erkennen. Die Verfasser:innen dieser Arbeit wollen dieses Moment gestalterisch lesbar halten, nicht überformen.

Möglichst suffizienter Umgang mit den Strukturen birgt sowohl ökobilanzielles wie architektonisches Potenzial. Dabei liegt beim Ballastkai-Speicher, entworfen und geplant von Oberingenieur Max Schulz aus Berlin,²¹ die nach klassischer Lesart die höchste Material- und Handwerksqualität, bestätigt z.B. durch den Sachverhalt des Denkmalschutzes. Auch die jüngeren Silos sind allesamt Ingenieurbauwerke. Äquivalent zum abnehmenden Alter der Anlagen verringert sich der Umfang der traditionell-handwerklichen Arbeit, mit welcher die Bauwerke errichtet wurden. So ist der südlich des Ballastkai-Speichers gelegene, 1959 errichtete Bau noch partiell geklinkert die Fassade sorgfältig gegliedert und großzügig verglast. Diesem folgen Ende der 1960er Jahre der Baukörper mit neun zylindrischen Röhren-Silos aus Stahlbeton weiter südlich, sowie in den Siebziger und frühen Achtziger Jahren die beiden Anlagen nördlich des Ballastkai-Speichers. Letztere sind als Stahlbetonskelett

mit Fassaden Stahlbeton und Sandwich Elementen ausgebildet, wie sie z.B. im Hallenbau verwendet werden.



Abbildung 22 - Bestandsaufnahme der Siloanlagen vom 13.03.2023

In den vorbereitenden Untersuchungen wird der Abriss der nach 1936 errichteten Siloanlagen empfohlen. Die Verfasser dieser Arbeit stimmen mit den vorbereitenden Untersuchungen dahingehend überein, dass der Zustand der Anlagen und die Minderwertigkeit der Ausführung nicht erhaltenswert ist. Den Denkmalschutz-Status auf die jüngeren Gebäude auszuweiten, scheint nicht mehrheitsfähig. Gestalterisches Potenzial sehen wir in der prägenden Wirkung für die Flensburger Stadt- bzw. Hafensilhouette. Durch die Umnutzung und Sanierung der Siloanlagen blieben Silhouette und Struktur der Gebäude erhalten. Ehemals wirtschaftlich notwendige Zweckbauten wären Auftakt und Impuls für ein neues Quartier. Zudem bliebe ihnen die Funktion des Speichers erhalten — als Energiespeicher. Bezogen auf die Menge an Energie, die für die Herstellung der Silos aufgebracht wurde und nun in den immensen Betonmassen steckt, wäre ihr Abriss und der Neubau kleinerer Gebäude an gleicher Stelle ein Affront an den Zeitgeist sowie die oben beschriebenen Herausforderungen.

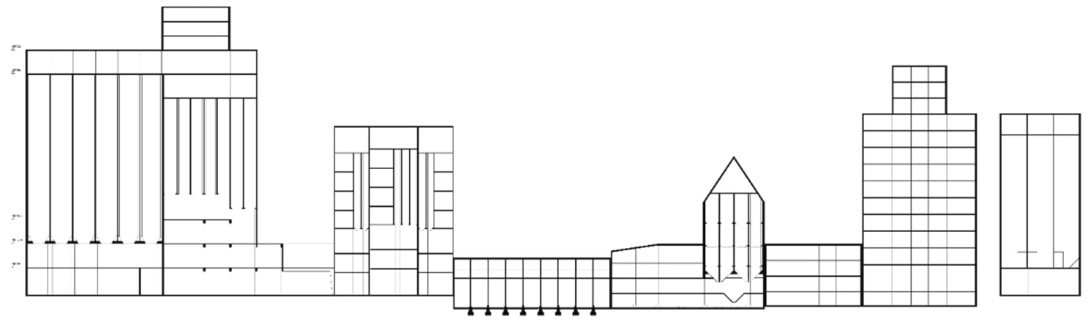


Abbildung 23 - Schnitt durch alle Silos am Ballastkai, ohne Maßstab



Abbildung 24 - Blick von Osten auf den 1980 errichteten Speicher, Durchfahrt zur Förde



Abbildung 25 - Blick auf die 1969 errichteten Stahlbetonzylinder im Süden des Grundstücks



Abbildung 26 - Maschinenbereich des 1959 errichteten Speichers mit Blick über die Förde auf die Flensburger Innenstadt



Abbildung 27 - Blick auf Fassade des HaGe-Speichers, Bj 1980

POTENZIALE UND RISIKEN / AUFWÄNDE – GRUNDRISSSE, ORGANISATION

Sämtliche Silos wurden auf Grundlage von Bestandsplänen zeichnerisch erfasst und in ein 3D-Modell übertragen. Anhand des Silos „HaGe-Kraftfuttermischwerk“ mit dem Baujahr 1980 wurden auf Grundrissebene im Maßstab 1:200 verschiedene Grundrissvarianten erprobt.

Zielsetzung ist hier gut nutzbare, flächeneffiziente und förderfähige Wohnungen bei möglichst viel bewahrter Rohbaustruktur zu erhalten, welche bestenfalls keinerlei Einschränkungen gegenüber gleichwertigen Wohnungen in Neubauten haben. Dies gelingt weitestgehend in unten gezeigten Beispielgrundriss bei Wohnungsgrößen von zwei bis vier Zimmern bzw. 44-100 m² ²². Die Förderfähigkeit ist hier gegeben, die vorgegebenen Zimmergrößen lassen sich in der Rohbaustruktur abbilden.

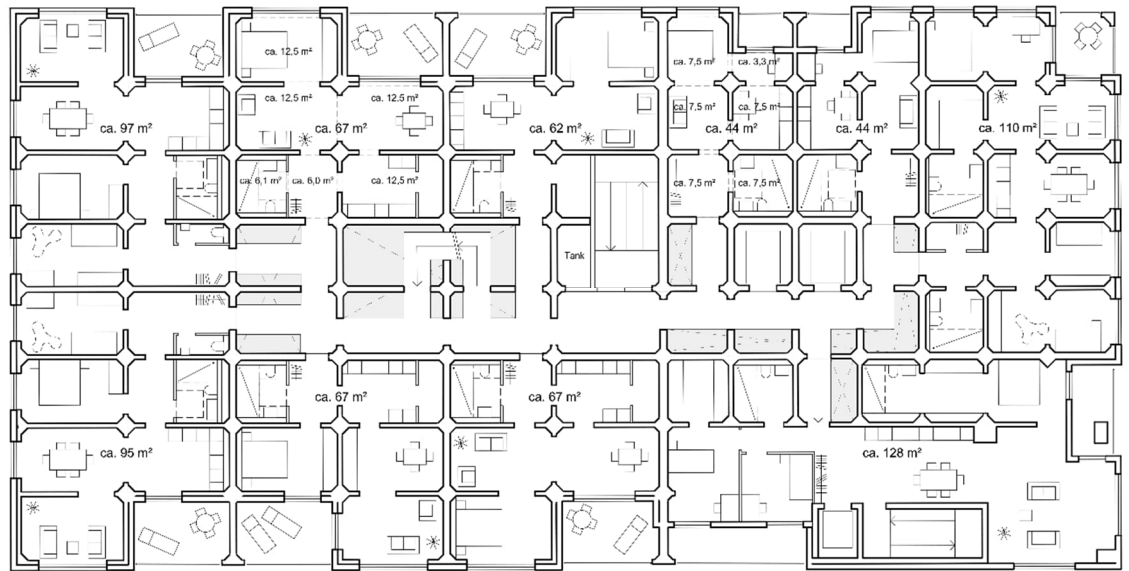


Abbildung 28 - Grundriss Regelgeschoss Wohnen ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 43

Zusätzlich wurde eine Clusterwohnung als alternative Wohnform getestet. Diese weist sechs Privatzimmer und zwei Gemeinschaftlich genutzte Räume und Sanitärbereiche auf.

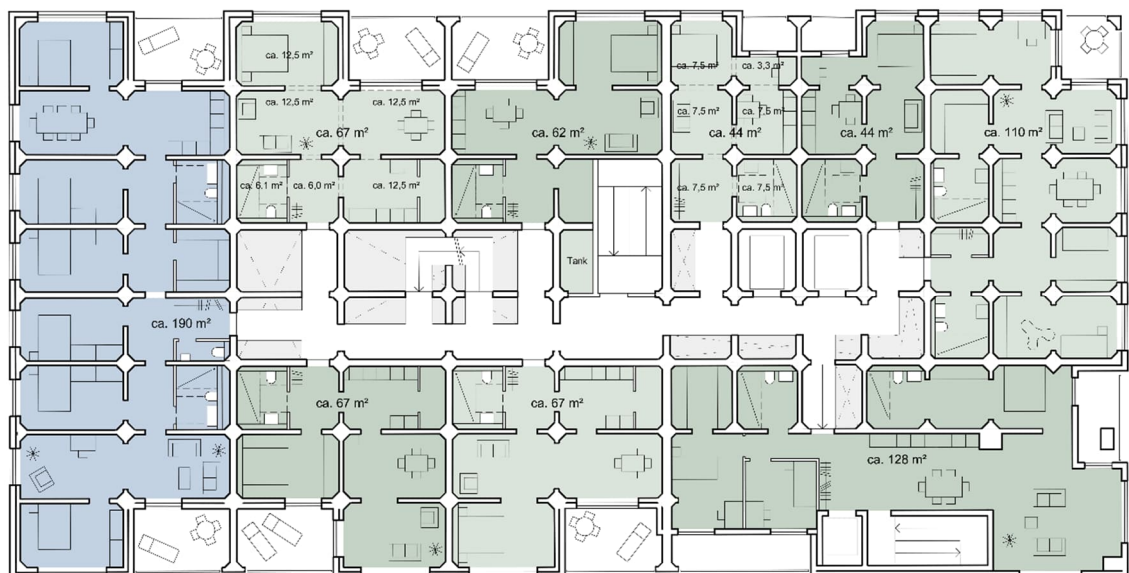


Abbildung 29 - Grundriss Clusterwohnung ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 43

Die bereits bestehenden Gebäude stärken nach Einschätzung der Verfasser:innen das Identifikationspotenzial mit dem neu entstehenden Quartier Hafen-Ost durch ihre bereits seit Jahrzehnten gegebene Präsenz im Stadtbild verbunden mit der Aneignung durch Umnutzung. Auch öffentlich zugängliche Highlights wie die Terrasse im neunten Stockwerk tragen zur Attraktivität des gesamten Quartiers bei. Die Umnutzung der Silos kann große Strahlkraft entwickeln in Richtung Stadtumbau [architektonischer Diskurs] sowie [vor allem kommunale] Energiewirtschaft. Wir müssen eine nicht unwesentliche Anzahl Öffnungen in die Stahlbetonstruktur schneiden, um Tür- und Fensteröffnungen sowie Durchgänge zu erhalten. Wir untersuchten den dabei entstehenden Aufwand und haben diesen in unsere Kalkulationen [siehe unten] mit einbezogen. Der entstehende Abraum kann bei Herstellung befestigter Flächen im Außenraum wiederverwendet werden, erfährt dabei allerdings ein Downsampling.

FASSADEN

Die Fassaden sind im Rendering als großzügig geöffnete [zwecks möglichst tiefem Einfall von Tageslicht] und vor die Bestandsstruktur gehängte, hinterlüftete

Elementfassaden dargestellt, bedürften jedoch intensiverer Betrachtung bei Weiterführung des Projekts. Wir gehen davon aus, dass die Fassaden mit Photovoltaik-Paneelen hergestellt werden. Die Anforderungen an die Fassaden ergeben sich aus dem GEG sowie angestrebten Förder- und Energiestandards.

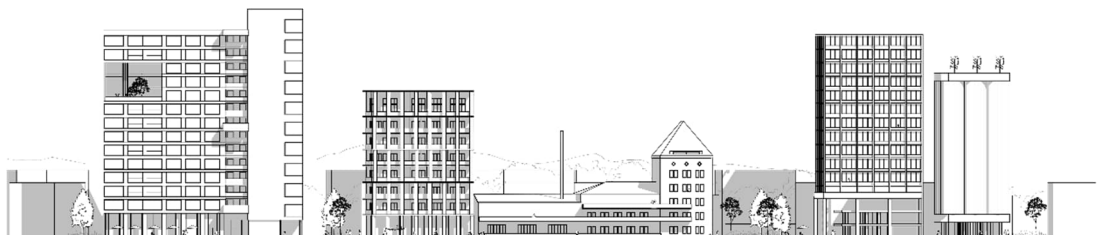


Abbildung 30 - Ansicht von Westseite der Förde, ohne Maßstab

TRAGWERK / AUSFÜHRUNG

LAGE UND VORHANDENE BEBAUUNG

Die Grundstücke Ballastkai 10 und 10a liegen im förmlich festgelegten Sanierungsgebiet Hafen-Ost und werden in der Gemarkung FL-G 48 mit dem Flurstück 94 mit 277 qm, dem Flurstück 167 mit 1.853 qm, dem Flurstück 264 mit 3.656 qm (alle Ballastkai 10) und dem Flurstück 263 (Ballastkai 10a) mit 692 qm geführt.



Abbildung 31 - Abbildung - Ansicht Silogebäude mit Nummerierung

Die Silolagergebäude und die Gebäude eines Mischfutterwerks liegen direkt an der Innenförde von Flensburg. Etwa 40 m östlich verläuft die nach Glücksburg führende Straße Ballastbrücke. Die direkte Erschließungsstraße "Ballastkai" verläuft unmittelbar östlich an den zu untersuchenden baulichen Anlagen. Ebenfalls ist westlich der Gebäude und der Hafenmole eine Umfahrt mit Durchfahrt durch eine umbaute Schüttgosse vorhanden. Die Grundstücksgrenzen verlaufen im Allgemeinen ca. 1,0 m bis ca. 2,0 m parallel zu den Gebäudefluchten. Das gesamte Areal ist ca. 230 m lang und zwischen ca. 25 m und ca. 27 m breit. Es verläuft in einem Abstand von ca. 13 m parallel zur Wasserlinie des Hafens.

Das Ursprungssilogegebäude stammt aus dem Jahr 1936. Weitere Silos und Mischfutteranlagen wurden in den 60er, 70er und 80er Jahren errichtet. Das mit ca. 50 m höchste Silogegebäude (A1) wurde Anfang der 80er Jahre erstellt.



Abbildung 32 - Abbildung - Luftbild Silagebäude mit Nummerierung

BESTANDS- UND KONSTRUKTIONSBESCHREIBUNG

Übersicht Baumasse Ballastkai 10 / 10a

Stand: 03.05.2024

Flurstück	Gebäudeabschnitt	Gebäude	Länge (m)	Breite (m)	Höhe (m)	Geschossigkeit	Grundfläche (qm)	Kubatur (cbm)
Ballastkai 10								
167	A1	Neubau Silo	52,00 13,00	23,50 23,50	50,00 7,00	10 1	1.222 306	61.100 2.142
	A1.1	Vorbau Ostseite Nord, Teil 1	12,50	5,00	7,50	1	63	473
	A1.2	Vorbau Ostseite Nord, Teil 2	11,00	5,00	10,00	2	55	550
94	B1	Schaltwarte	18,00	10,00	15,00	3	180	2.700
	B2	Pressenhaus	22,00	25,00	35,50	8	550	18.975
264	C1 Denkmal	Holzlager 2	32,00	22,00	9,00	2	704	6.336
	C2 Denkmal	Holzlager 1	20,00	22,00	11,00	3	440	4.840
	C3 Denkmal	SUKA-Silo	13,00	23,00	27,50	6	299	8.223
	D1	Verbindungsbau	20,00	15,00	10,00	2	300	3.000
	D2	Roter Silo	25,00 12,50	20,00 10,00	39,00 10,00	10 3	500 125	19.500 1.250
	D2.1	Vorbau Westseite	37,00	7,50	10,00	2	278	2.780
	D2.2	Vorbau Ostseite Süd, Teil 2	12,50	5,00	5,00	1	63	315
	D3	Verbindungsbau Trockner	8,00	20,00	15,00	5	160	2.400
	D4	Rund-Silo	20,00	26,00	40,00	2	520	20.800
	D4.1	Vorbau Ostseite Süd, Teil 1	26,00	5,00	10,00	3	130	1.300
Ballastkai 10a								
263	E	Verwaltung	22,00	12,00	8,00	2	264	2.112
SUMME:								158.796

Abbildung 33 - Übersicht Baumasse Ballastkai 10/10a

SILO-GEBÄUDE A1



Abbildung 34 - Silo-Gebäude A1

10 bzw. 11-geschossiges Silogebäude, Baujahr ca. 1980

Länge: ca. 52,00 m, Breite: ca. 23,50 m, Höhe: ca. 50,00 bzw. 57,00 m

Grundfläche: ca. 1.222 m², Kubatur ca. 63.239 m³

Dieses Silo besteht aus Stahlbeton und ist mit ca. 50 bzw. 57 m Höhe der höchste Gebäudeteil des HaGe-Komplexes.

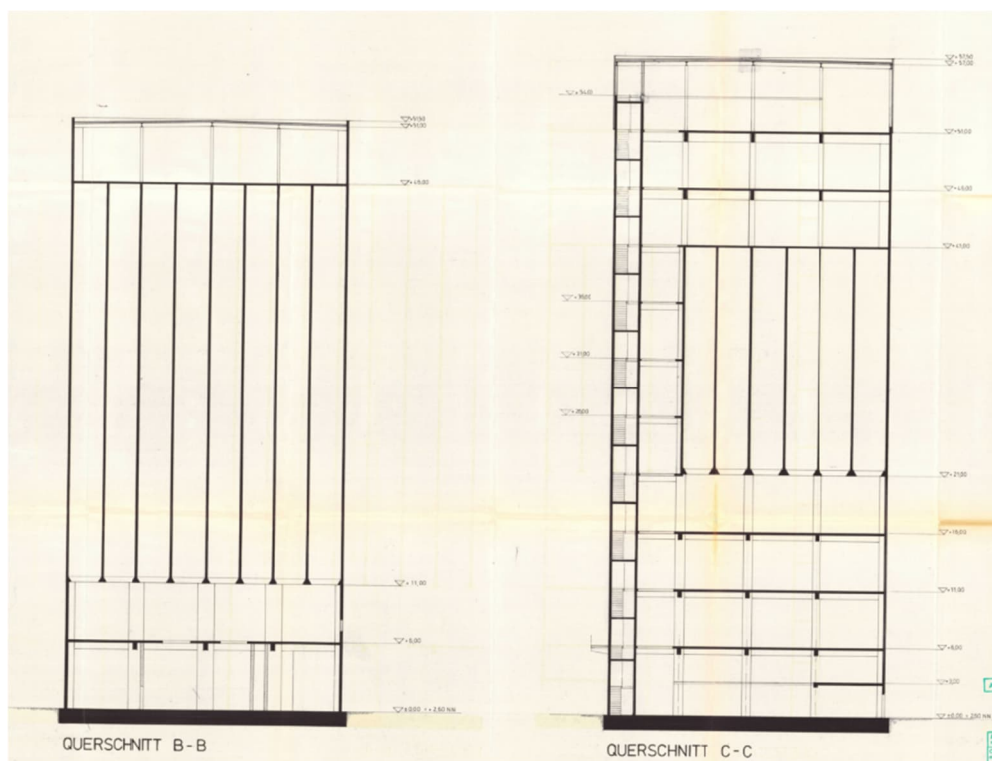


Abbildung 35 - Bestandsschnitt Gebäude A1

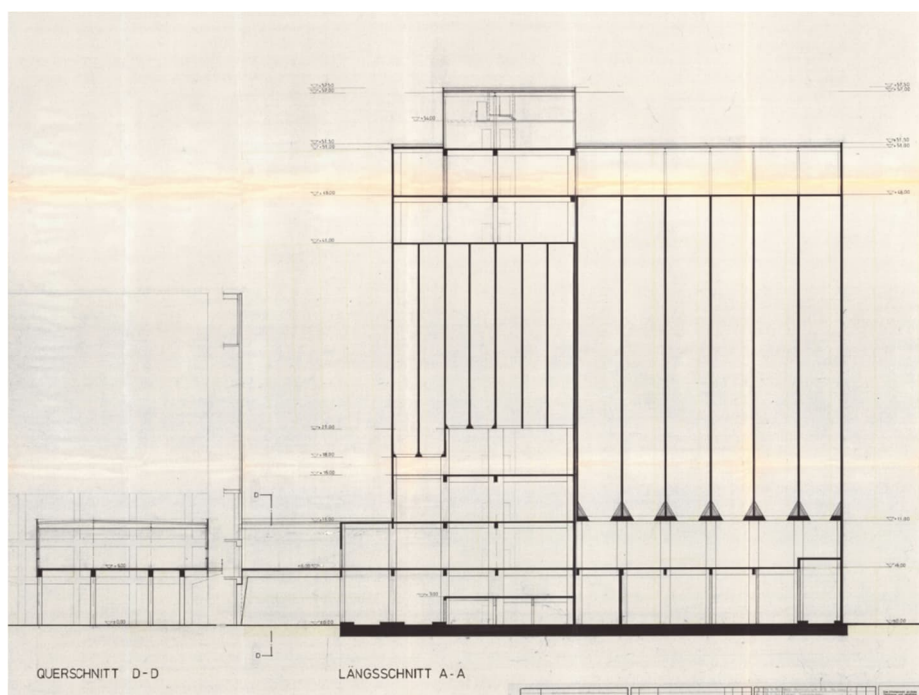


Abbildung 36 - Bestandsschnitt Gebäude A1

Die Siloschächte sind ca. 35 m hoch und bestehen aus massiven Stahlbetonschachtwänden. Die darunterliegenden Geschosse sind als Stahlbetonskelettkonstruktion ausgebildet. Die Gründung erfolgt vermutlich mittels massiver Plattengründung und Pfählen aus Stahlbeton. Allgemeine Daten zum Baugrund und Bohrdaten liegen im Umweltportal Schleswig-Holstein vor. Danach ist im Bereich der Ufereinfassung mit weichen bindigen Böden über Sand und Geschiebelehm/-mergel zu rechnen und im Bereich der Bestandsbebauung mit Sanden, Geschiebelehm und -mergel, in die auch Mudden und Torf eingelagert sein können. Danach wird aus jetziger Sicht von Tiefgründungen im Bestand ausgegangen.

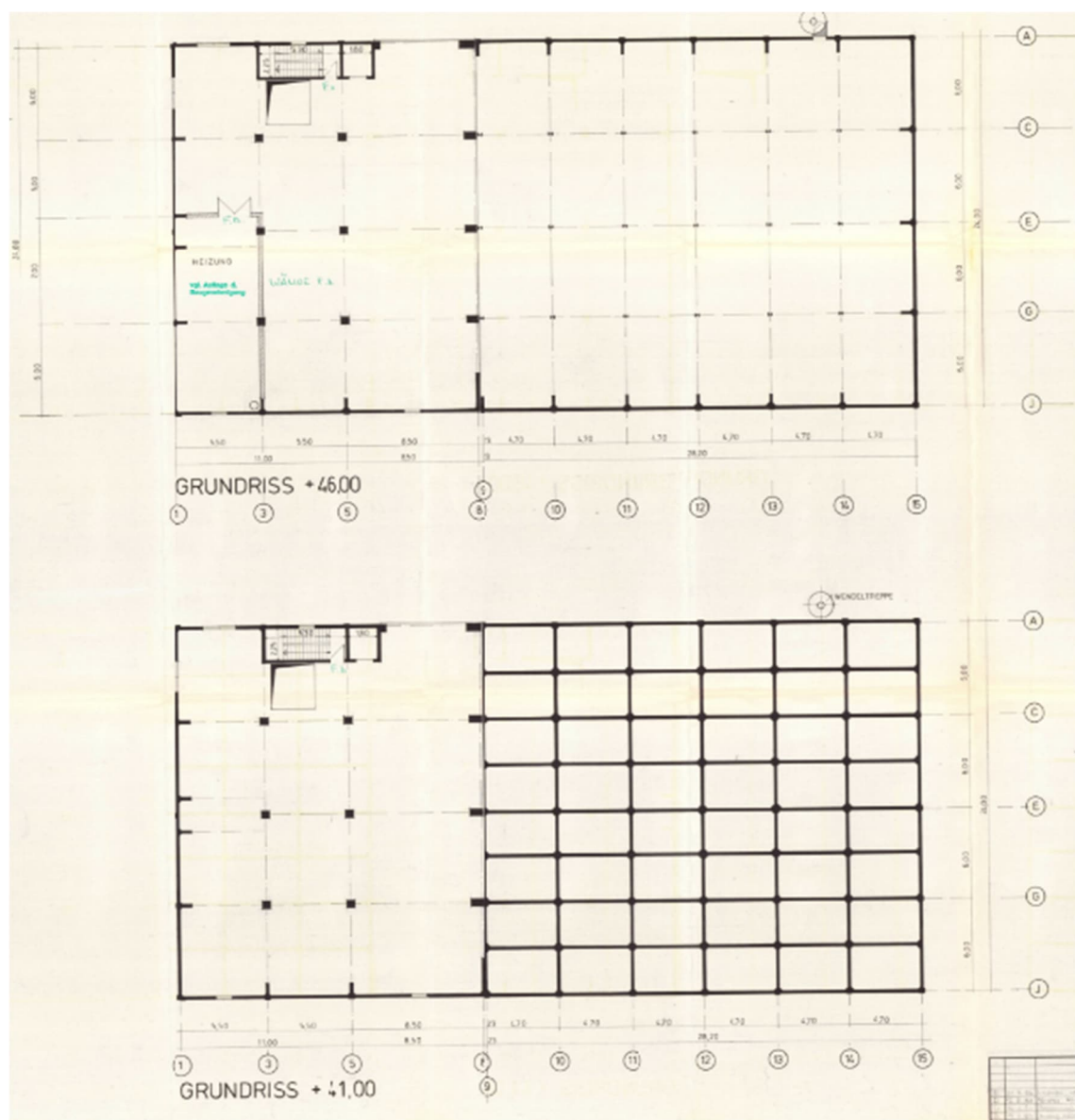


Abbildung 37 - Bestandsgrundrisse Obergeschosse Gebäude A1

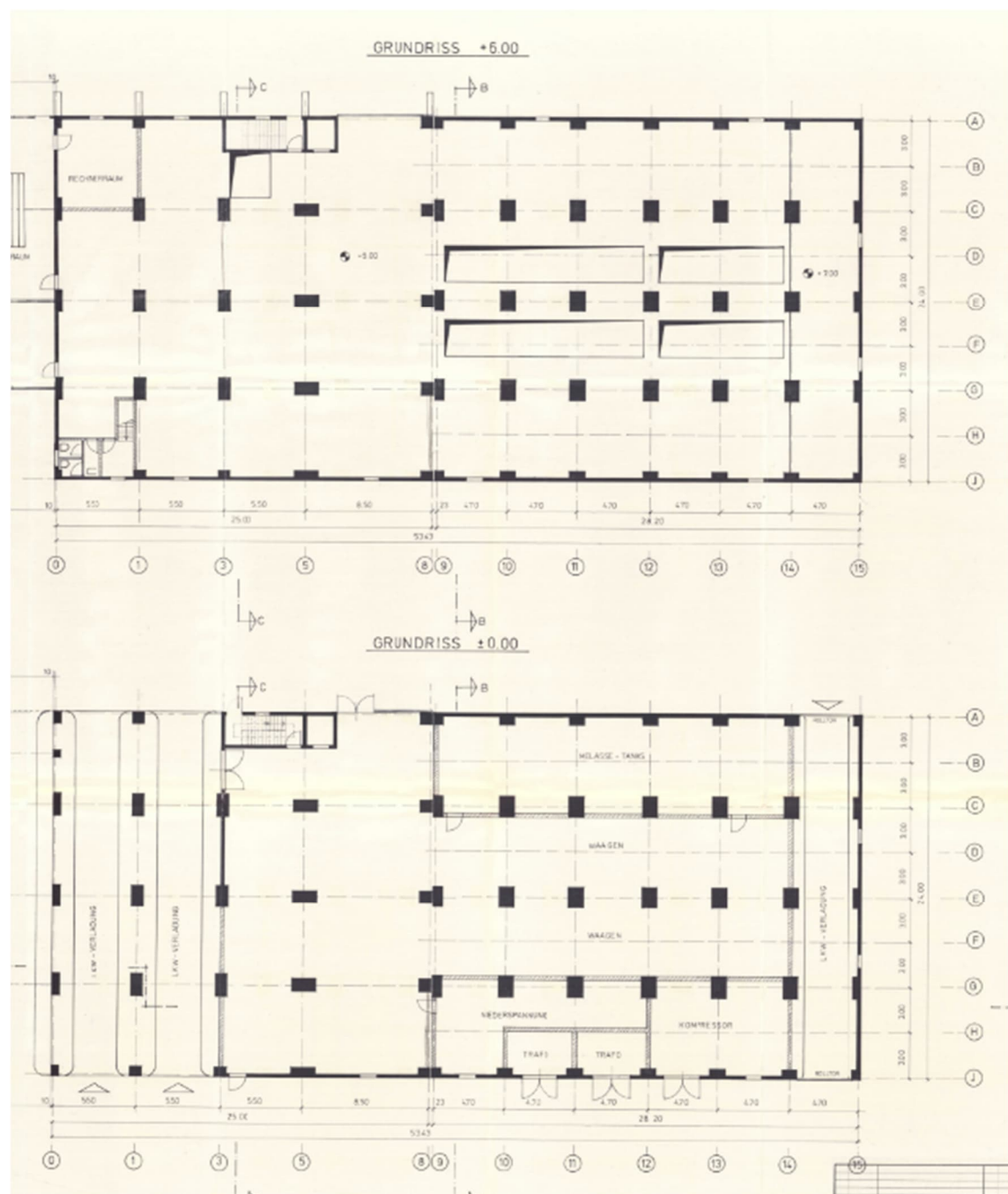


Abbildung 38 - Bestandsgrundrisse Erdgeschoß und 1. Obergeschoß Gebäude A1

SILO-GEBÄUDE B2



Abbildung 39 - 8-geschossiges Industriegebäude (Pressenhaus I + II + III), Baujahr ca. 1970

Länge ca. 22,00 m, Breite ca. 25,00 m, Höhe ca. 34,50 m

Grundfläche ca. 550 m², Kubatur ca. 18.975 m³

Dieses Silo wurde in Stahlbetonskelettbauweise erstellt und ist ca. 34,50 m hoch. Bis auf Höhe des dritten Geschosses sind die Außenwände mit roten Vormauerziegeln bekleidet und bestehen darüber aus schalungsrauen Stahlbetonwänden. Die Gründung erfolgte vermutlich mittels massiver Plattengründung aus Stahlbeton.

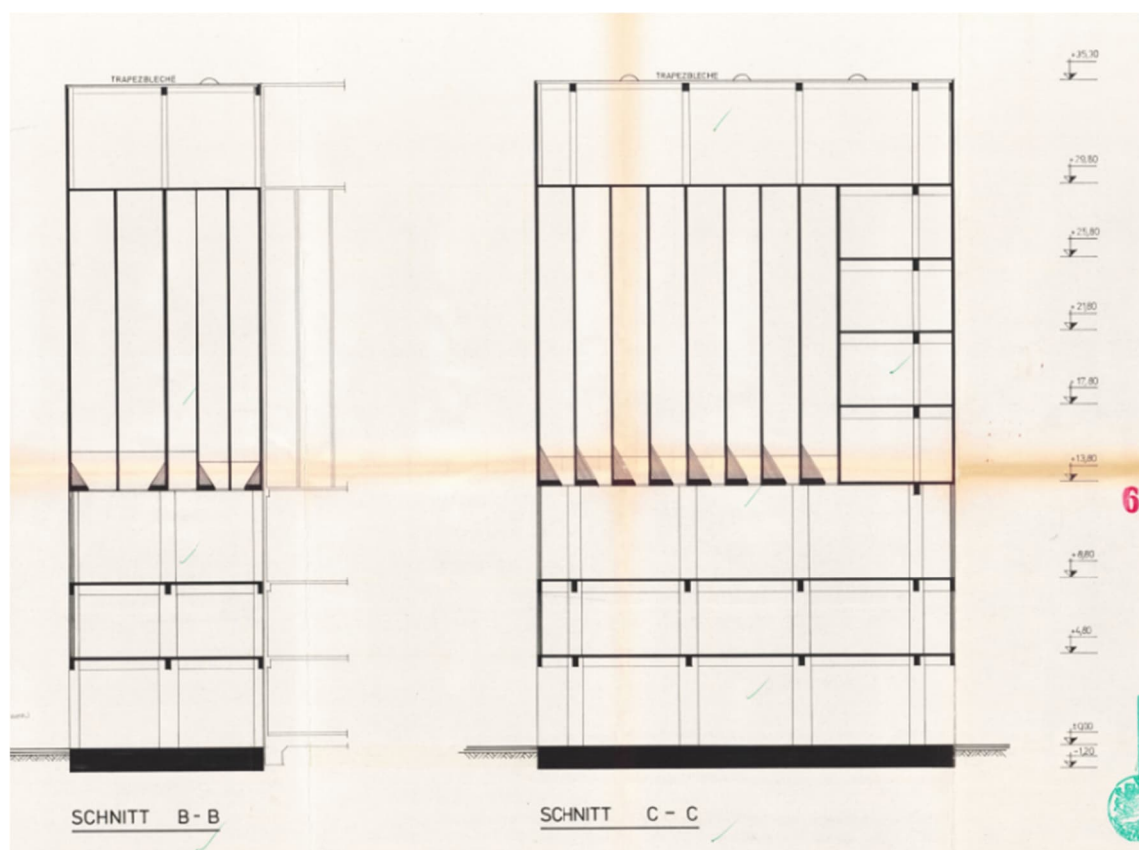


Abbildung 40 - Bestandsschnitt Silogebäude B2

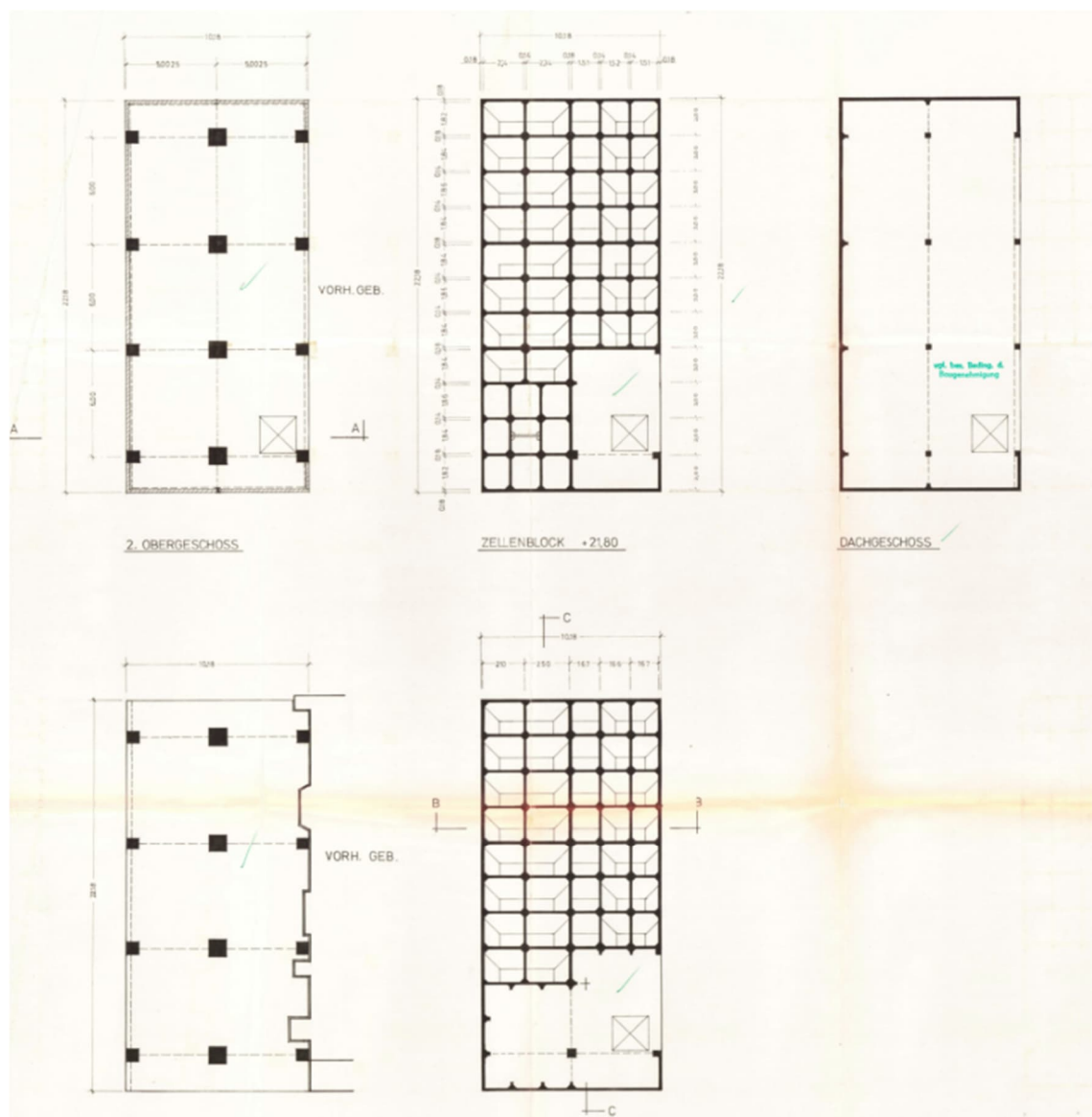


Abbildung 41 - Grundrisse Bestandsgebäude B2

SILO-GEBÄUDE C (C1 BIS C3)



Zweigeschossige Halle (Holzlager 2) C1, Baujahr 1936
 Länge ca. 32,00 m, Breite ca. 22,00 m, Höhe ca. 9,00 m
 Grundfläche: ca. 700 m², Kubatur ca. 6.300 m³

Zweigeschossige Halle mit Drempel (Holzlager 1) C2, Baujahr 1936
 Länge ca. 20,00 m, Breite ca. 22,00 m, Höhe ca. 11,00 m
 Grundfläche ca. 440 m², Kubatur ca. 4.800 m³

Fünfgeschossiger Getreidespeicher (SUKA-Silo) C3, Baujahr 1936
 Länge ca. 13,00 m, Breite ca. 23,00 m, Höhe ca. 27,50 m
 Grundfläche ca. 300 m², Kubatur ca. 8.200 m³

Auf einer Teilfläche des Flurstücks 264 auf dem Grundstück Ballastkai 10 befinden sich drei unter Denkmalschutz stehende Gebäude. Es handelt sich u. a. um einen 5-geschossigen mit rotem Klinker verblendeten Eisenbetonbau, Steineisenkonstruktion und Mauerwerk in Zementmörtel als Getreidespeicher mit 24 ca. 17m hohe Silozellen. In der Liste des Landesamtes für Denkmalpflege Schleswig-Holstein werden die unter Schutz gestellten Gebäude mit der Objekt Nummer 8152 geführt. Die Räume dienen der Lagerung von Getreide, Futter- und Düngemitteln. Die Gründung erfolgte auf 8-9 m langen Pfählen, welche bis zu 2,5m in die tragenden Sandschichten einbinden. Es handelt sich vermutlich um Holzpfähle, die geplant vollständig im Grundwasser liegen.

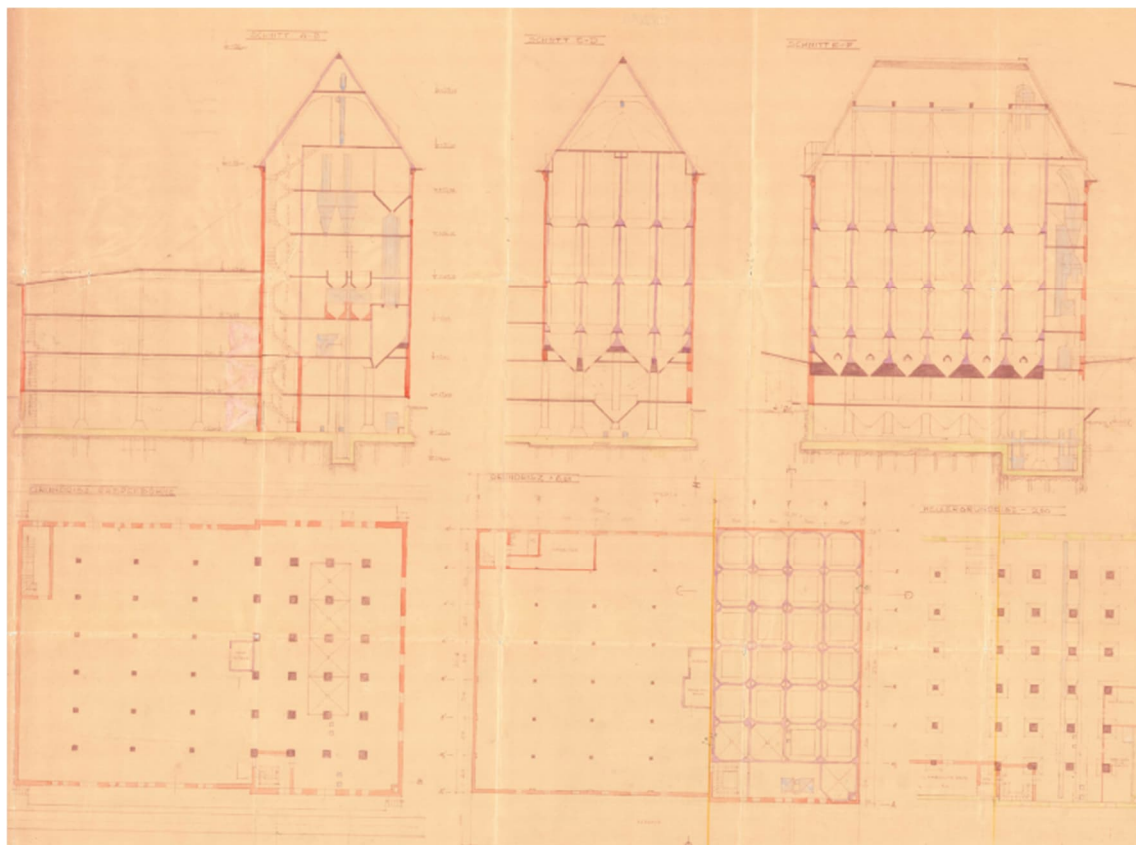


Abbildung 42 - Schnitte und Grundrisse Bestandsgebäude C

SILO-GEBÄUDE D2



Abbildung 43 - Ansicht Silo-Gebäude D2

Mehrgeschossiges Silogebäude (Roter Silo)

Länge ca. 25,00 m, Breite ca. 20,00 m, Höhe ca. 39,00 m

Grundfläche ca. 500 m², Kubatur ca. 19.500 m³

Aufbau: Länge ca. 15,00 m, Breite ca. 7,50 m, Höhe ca. 10,00 m

Grundfläche ca. 113 m², Kubatur ca. 1.130 m³

Das rote, etwa 39 bzw. 49 m hohe Silo wurde in Massivbauweise erstellt und die ca. 40 cm starken Außenwände sind mit einem roten Vormauerziegel verkleidet. Im Inneren befinden sich zahlreiche Betonstützen der Stahlbetonskelettkonstruktion und Stahlbetonschüttkegel. Das Silodach ist als flach geneigtes Satteldach ausgebildet. Die Umfassungswände des Silos bestehen aus Ziegeln oder Kalksandstein.

SILO-GEBÄUDE D4



Abbildung 44 - Foto Rundsilo Gebäude D4

Mehrgeschossiges Silogebäude (Rund-Silo)
Länge ca. 20,00 m, Breite ca. 26,00 m, Höhe ca. 40,00 m

Grundfläche ca. 520 m², Kubatur ca. 20.800 m³

Gebäude- und Konstruktionsbeschreibung:

Das Rundsilo aus Stahlbeton ist ca. 40 m hoch und voll unterkellert. Das Rundsilo hat bis in eine Höhe von ca. 5 m schalungsraue Stahlbetonwände und darüber hinaus den Silos angepasste rundgeschalte glatte Stahlbetonwände. Die zwölf Röhrenzellen, die das Gebäude bilden, sind auf Stahlbetonstützen gelagert und es wurden Stahlbetonzwischendecken eingezo-gen. Die Gründung erfolgte als Tiefgründung mittels Pfählen.

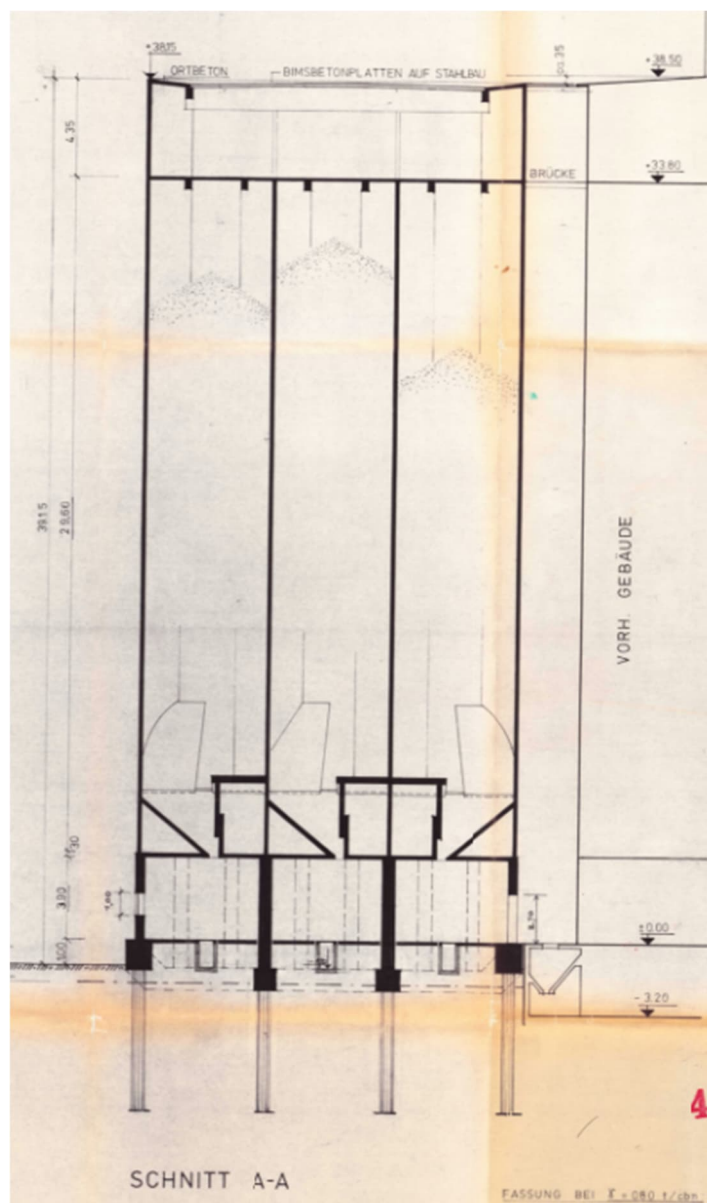


Abbildung 45 - Bestandsschnitt Silogebäude D4

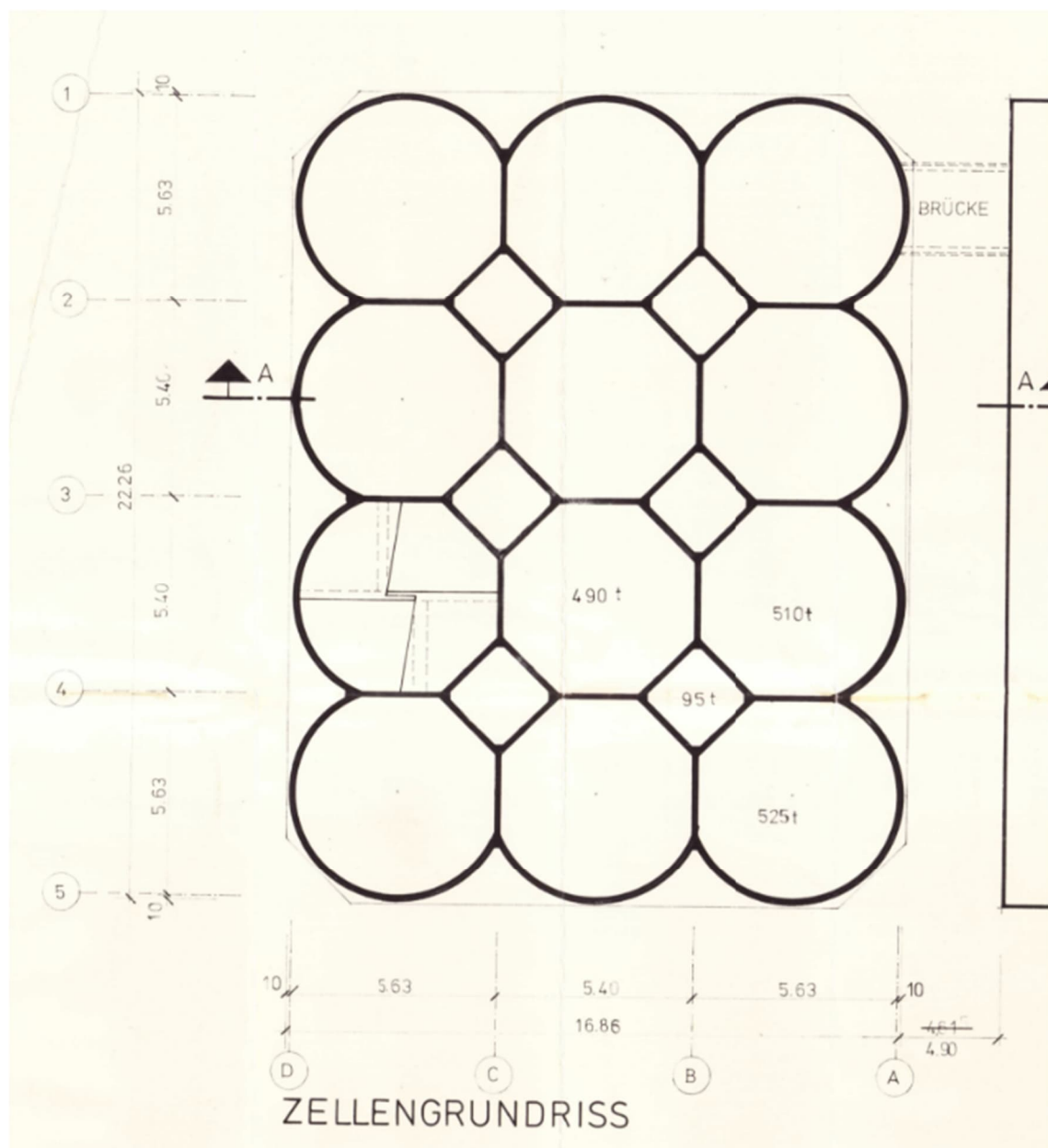


Abbildung 46 - Zellengrundriss Silogebäude D4

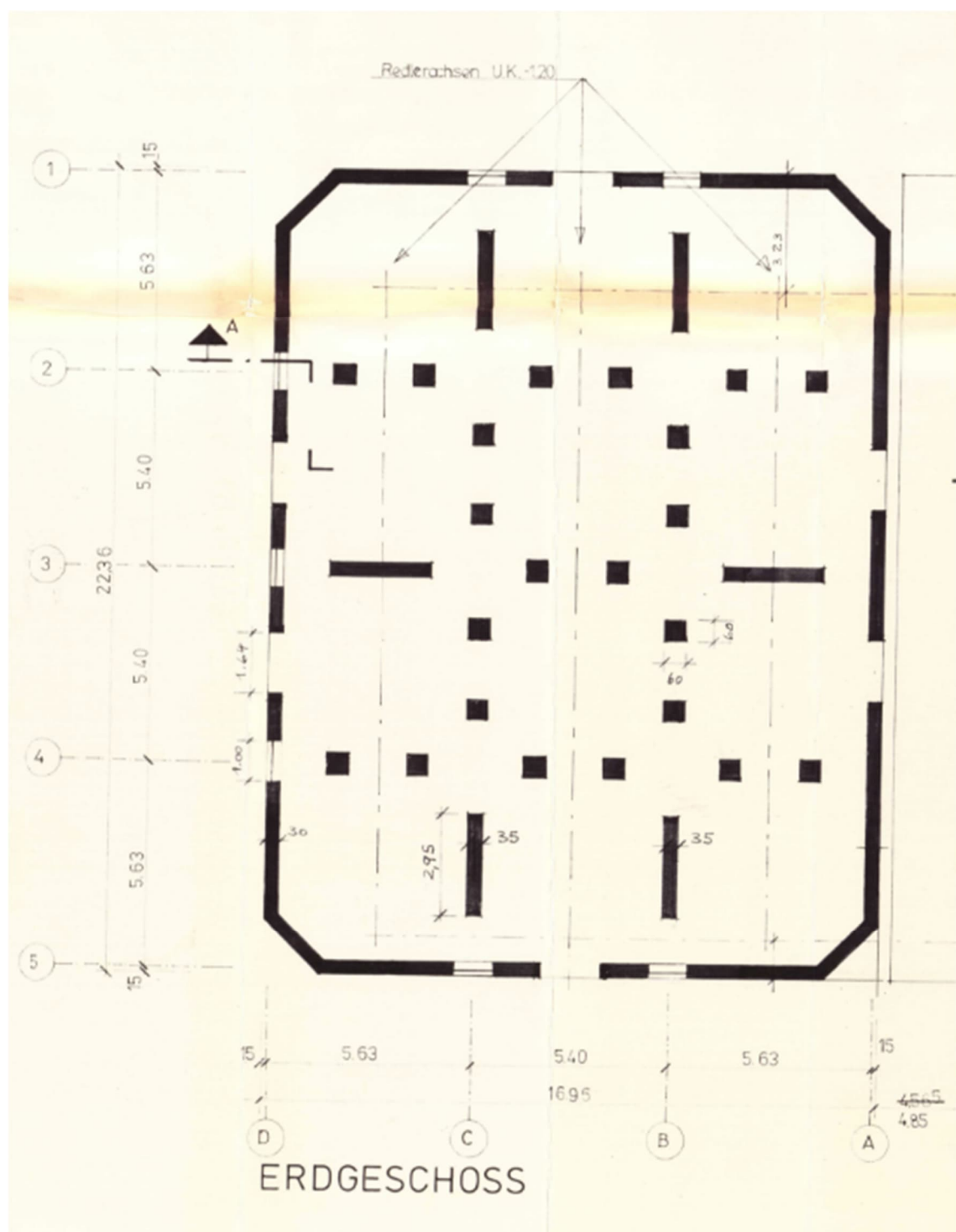


Abbildung 47 - Bestandsgrundriss EG Silogeäude D4

PRINZIPIEN DER UMNUTZUNG VON SILOS

Nachfolgend wird anhand des Bestandsgebäudes A1 die prinzipielle Umnutzung von Siloschächten in mehrgeschossige Hochbauten untersucht. Es liegen derzeit keine statischen Unterlagen zur vorhandenen Tragkonstruktion vor, so dass die nachfolgenden Überlegungen prinzipieller Natur sind.

Für eine Geschoßnutzung sind die Schächte mittel Deckenkonstruktionen zu unterteilen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Gebäudelasten der neuen Wohnungsnutzung nicht die Silotraglasten im gefüllten Zustand überschreiten oder ggf. die Vertikallasten mittels neuer Tragelemente unabhängig abgetragen werden.

Konzeptidee:

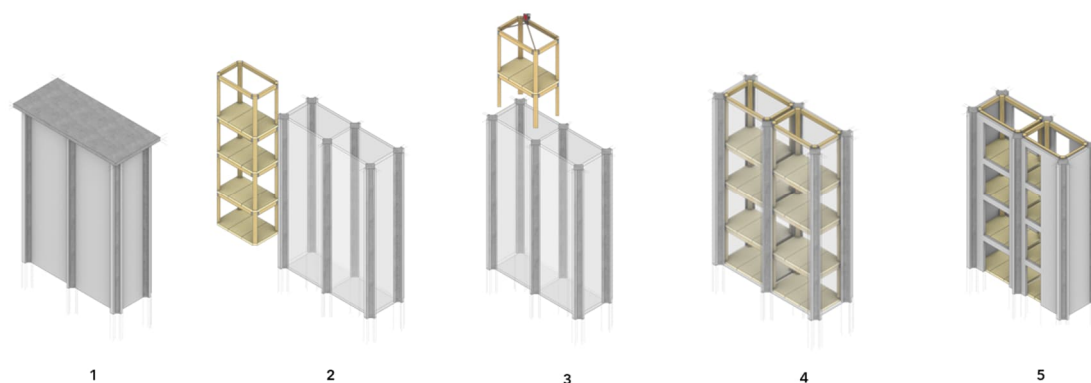


Abbildung 48 - Tragwerk Decken - logistisches Konzept

Bestandskonstruktion, Dachkonstruktion wird entfernt
 Vorfertigung von 3D Holzskelettmodulen
 Einheben der vorgefertigten Module in die oben offenen Schächte
 Eigenständiger vertikaler Lastabtrag der neuen Holzkonstruktion
 Herstellung von Wandöffnungen im Bestand

Ziel des Tragwerksentwurfs ist mit möglichst einfachen und handelsüblichen Bauteilen auszukommen. Durch die Vermeidung großer Mengen von herstellereinspezifischen Holzprodukten und ein hohes Maß an Auslastung der eigenen Werkstatt kann die Wertschöpfung eines Zimmereibetriebs und damit das Interesse an der Umsetzung deutlich verbessert werden.

Die Stützen und Unterzügen sind als blockverleimte Konstruktionsvollholz- oder Brett-schichtholzelemente vorgesehen. Auf Grund der Gebäudehöhe und den daraus resultierenden erhöhten Brandschutzanforderungen ist für die Deckenkonstruktion von einer massiven Brettsperrholzplatte auszugehen. Die Bauteile werden durch zimmermannsmäßige Versätze aufeinandergelegt und mittels selbstbohrender Gewindeschrauben reversibel verbunden. Alle Elemente werden in der Werkstatt vorgefertigt und dann vor Ort zu vertikalen 3D-Modulen zusammengesetzt. Eine möglichst große Reichweite kann durch die Verwendung normativ geregelter Baustoffe, wie Konstruktionsvollholz bzw. Brett-schichtholz (Träger Stützen) und Brettsperrholz (Decken) erreicht werden. Dies spielt **für die Übertragbarkeit** auf ähnliche Bausituationen zur Verbreitung des Holzbaus eine entscheidende Rolle.

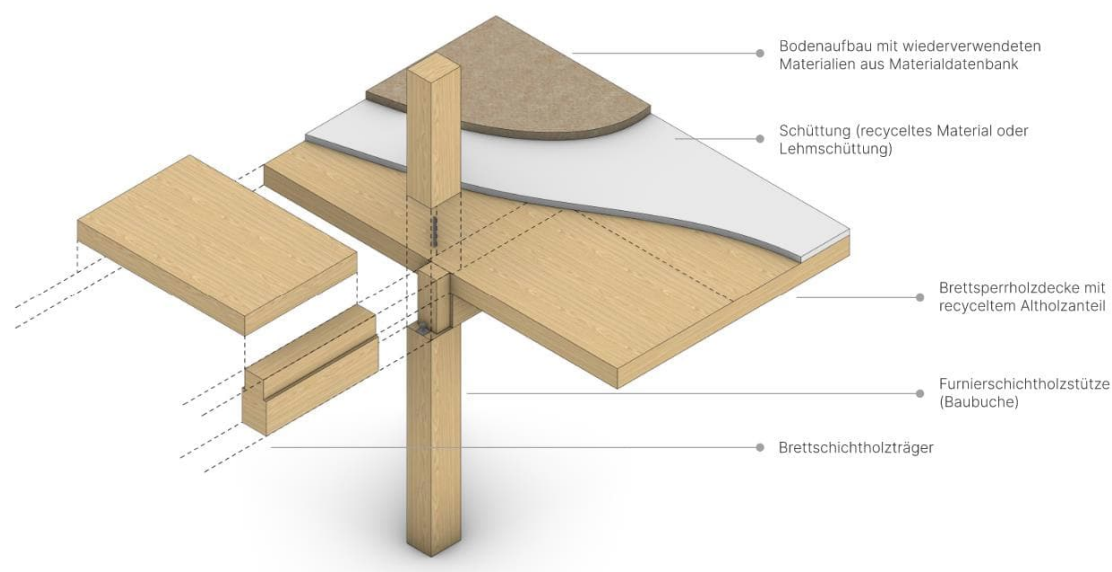


Abbildung 49 - Beispiel Auflager mittels Versatz

NACHHALTIGKEIT UND GRAUE EMISSIONEN

Die Projektstudie der Silos in Flensburg wird beispielgebend für die Um- und Nachnutzung von vergleichbaren Bestandsgebäuden. Der sorgfältige und bedachte Umgang mit unseren vorhandenen Ressourcen ist der Schlüssel zu einer Baukultur, welche mittels klug transformierter Bestandsbauwerke und regionaler Materialien zum Leitbild wird.

BESTANDSERHALT

Die Tragkonstruktion des Bestands wird weitestgehend erhalten und lediglich in Teilbereichen zur Belichtung und Erschließung entfernt.

Auf Grund der Nutzungsänderungen und den Eingriffen in das Bestandstragwerk ist mit einem weitestgehenden Verlust des Bestandsschutzes zu rechnen. Dies führt für die tragenden Bauteile dazu, dass diese nach aktuell gültiger Normung überprüft werden müssen.

Die Bestandskonstruktion übernimmt vor allem die Horizontallasten. Die neue Holzkonstruktion trägt die Vertikallasten eigenständig ab. Der konstruktive Brandschutz des Bestandstragwerks und des Holzbaus ist in Form einer Heißbemessung nachzuweisen.

Mittels moderner grafischer Programmierung und Parametrisierung der Gebäudemodelle können Bestandsbauwerke planerisch erfasst und Änderungen flexibel umgesetzt werden. Für die Fallstudie wurde anhand der vorhandenen Bestandsunterlagen ein 3D Modell des Bestandstragwerks erstellt.

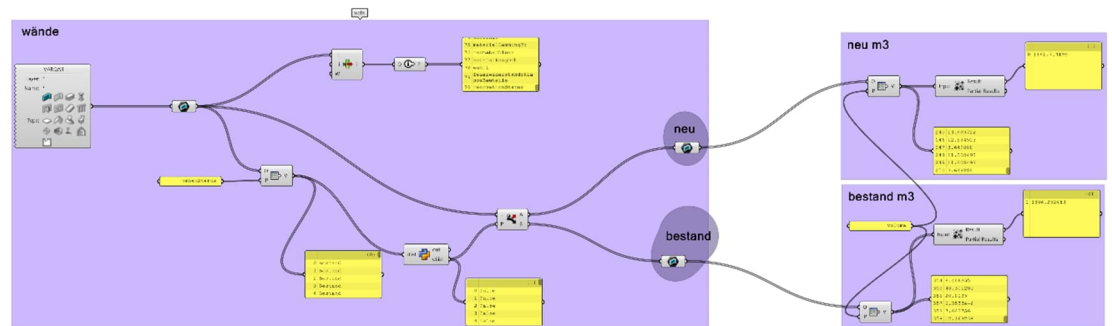


Abbildung 50 - grafische Programmierung des Bestands mittels Grasshopper und Rhino

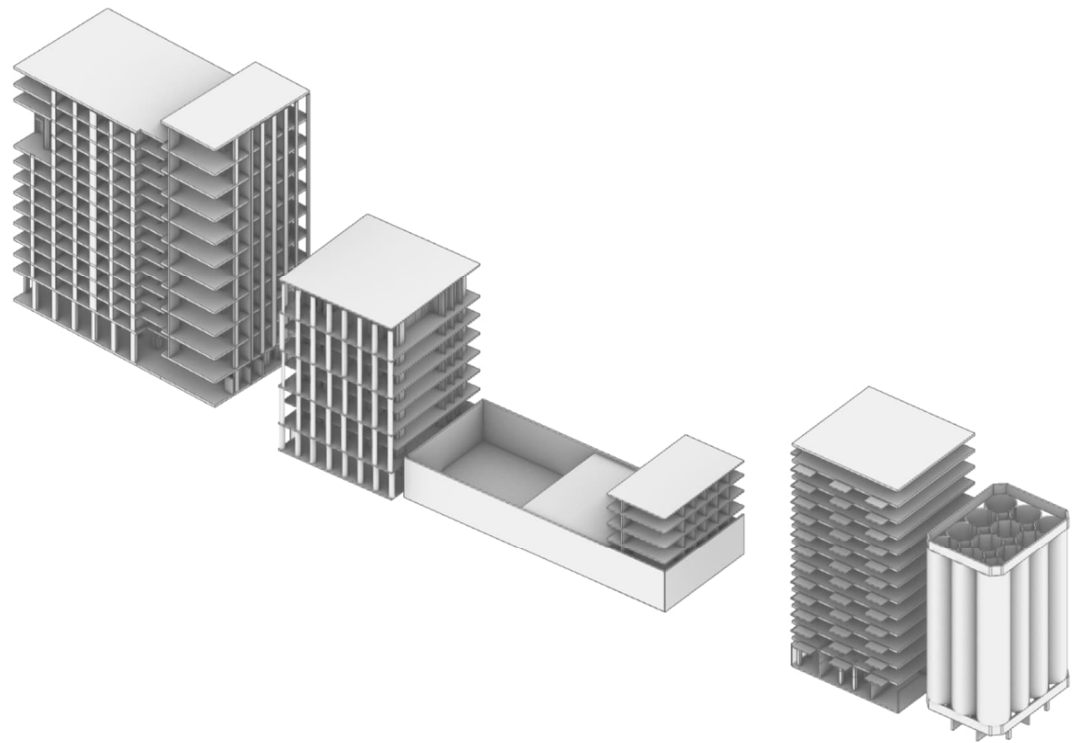


Abbildung 51 - 3D Gebäudemodell des Bestands

Mittels automatisierter 3D-Laserscanner kann die Bestandsstruktur in der Projektphase maßgenau vermessen und das 3D-Modell an die gebaute Realität angepasst werden.

INNOVATION

Um den Innovationswettbewerb neuer Bauweisen für Klimaneutralität und Ressourcenschonung nicht in einzelnen Leuchtturmprojekten versanden zu lassen muss sichergestellt werden, dass eine Innovation schnell von Allen angewendet werden kann. Innovative Lösungen, die in urheberrechtlich geschützte Systeme überführt sind und dann nur von einzelnen Firmen angeboten werden bleiben zumeist in der Nische.

Unser Vorschlag vertikaler 3D Holzmodule orientiert sich daher an den bekannten Fertigungsmethoden von horizontalen 3D Raummodulen. Die Innovation liegt nicht in der komplexen und neuartigen Bauweise, sondern der Kombination von bekannten Vorfertigungsmethoden in einem neuen Kontext.

KREISLAUFFÄHIGKEIT

Unsere Umsetzungsstrategie sieht vor zunächst alle verfügbaren Sekundärrohstoffe der Nachbarschaft auf deren Wiederverwertungspotential zu prüfen und nur im Zweifel durch Primärmaterialien zu ersetzen. Durch die Taxonomie ist eine Dynamik entstanden, welche eine Neujustierung von Abfall- und Produktrecht im Kreislaufwirtschaftsgesetz erwartet lässt und das Wiederverwenden vereinfachen wird.

Wichtig ist die im Entwurfskonzept vorgesehene materialerhaltende Wiederverwendung der Holzwerkstoffe, damit zum Ende des Lebenszyklus, der Kohlenstoff weiterhin gespeichert bleibt (Wiederverwendung der Materialien). Auf Grund der aufgelösten Bauweise und vorwiegend gesteckte und geschraubte Bauteilverbindungen (Versatz und reversible Vollgewindeschrauben) wird ein hohes Maß an Kreislauffähigkeit erreicht.

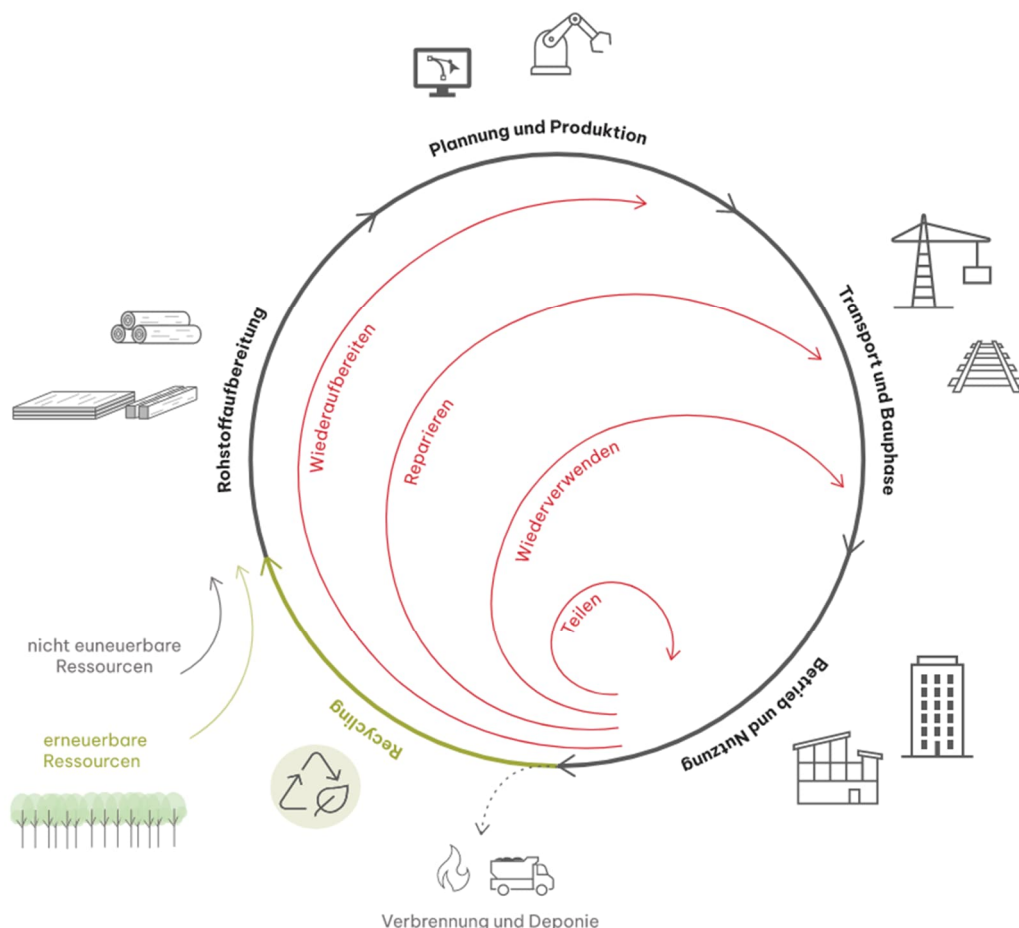


Abbildung 52 - Kreislaufgerechte Holzbauplanung

Durch eine nachhaltige Aufforstung mit klimaresilienten Baumarten, ist es dann sogar möglich, durch den suffizienten Bau von Holzgebäuden effektiv Kohlenstoff der Atmosphäre zu entziehen.

Kaskaden Szenario Wiederverwendung

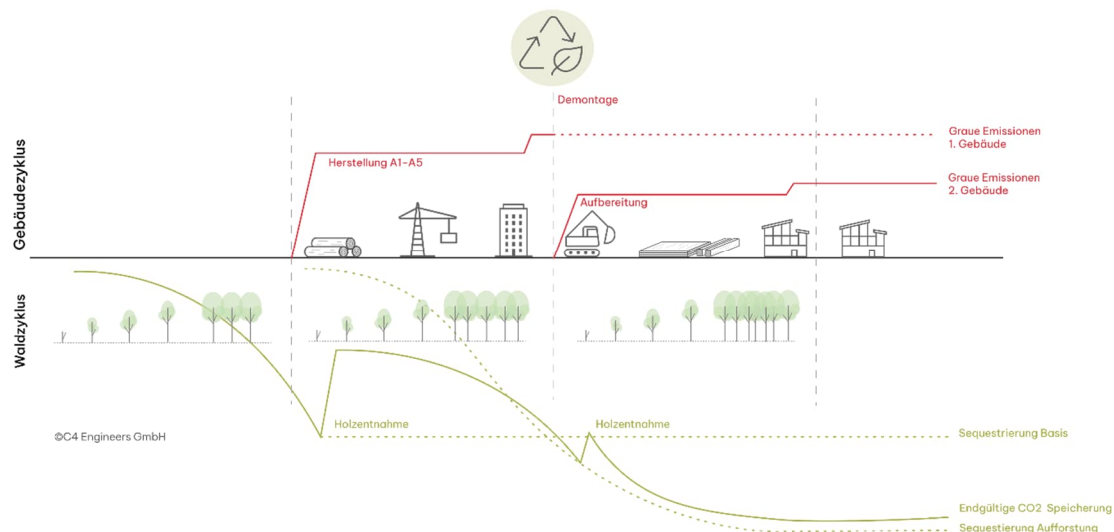


Abbildung 53 - Qualitives Schaubild - CO2 Speicherung im REUSE-Szenario

Im Reuse-Szenario fallen Teile der Emissionen der Herstellungsphase weg. Die Demontage und die Aufbereitung der Holzbauteile sind weniger emissionsintensiv als

die Produktion neuer Bauteile.

Kaskaden Nutzung Neubau und Verbrennung

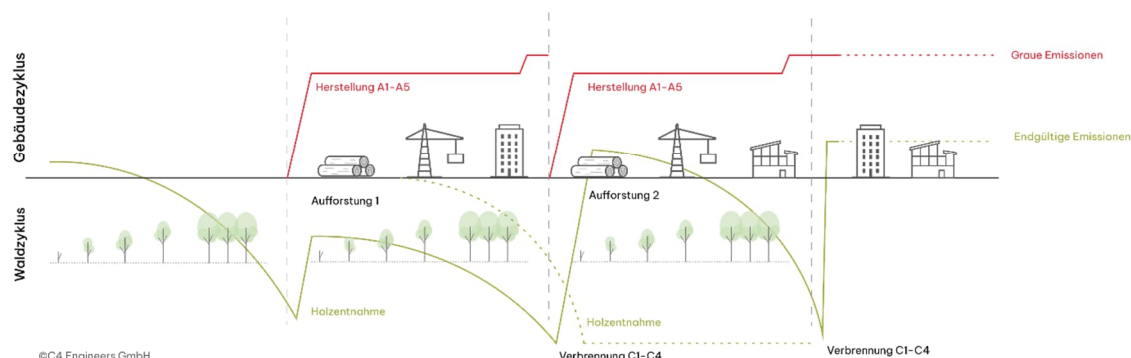


Abbildung 54 - Qualitatives Schaubild – CO₂ Speicherung im Neubauszenario

Im Vergleich zu einem Neubauszenario, in dem das Holz nach Abbau des ersten Gebäudes verbrannt wird, fallen erneut die gleichen Herstellungsemissionen an. Zusätzlich ergibt sich durch die Verbrennung der Bauteile keine langfristige CO₂ Speicherung.

Der Vergleich zeigt, wie wichtig, die zukünftige Wiederverwendung von Holzbauteilen sein wird. Durch einen Gebäudemodell basierten Bauteilkatalog wird die Planung und der Bau eines darauffolgenden Gebäudes begünstigt. Der Buchwert des Grundstücks dürfte sich in diesem Fall um den Materialwert erhöhen.

GRAUEN EMISSIONEN DER TRAGKONSTRUKTION

Konstruktionen im Bauwesen (Materialien und Herstellung) sind für ca. 11% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Durch die Verwendung von Holz als Ergänzung zum Bestandstragwerk lassen sich die neuen grauen Emissionen im Vergleich zur Verwendung von Stahlbeton wesentlich reduzieren.

Vergleich der GWP verschiedener Deckensysteme

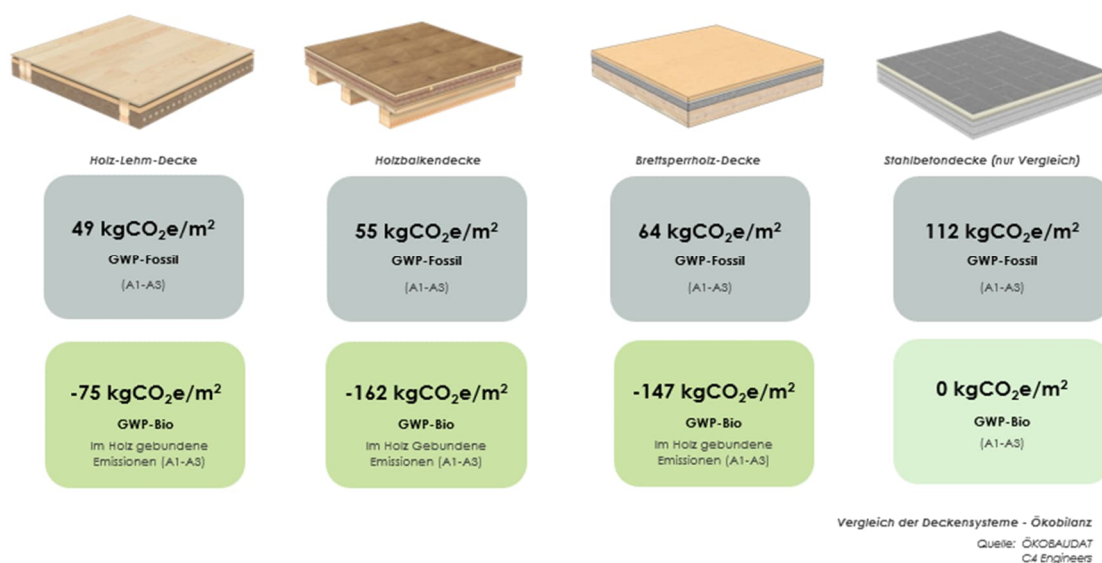


Abbildung 55 - Vergleich des Global Warming Potentials (GWP) verschiedener Deckenkonstruktionen

Bei der Gebäudetransformation entstehen im Fertigungs- und Montageprozess (LCA Modul A) durch die ergänzende Holzkonstruktion ca. 3.200 t CO₂e Emissionen.

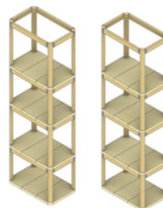
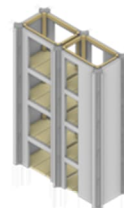
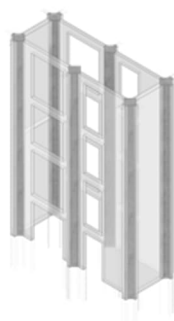
Ökobilanz - Gesamtverbrauch Tragwerk (tCO₂e) - Aktueller EntwurfBestand
aus Stahlbeton0 tCO₂e
Cradle to grave (A-C)Umbau
aus Holz3 260 tCO₂e
Cradle to grave (A-C)Bestand + Umbau
aus Holz und Stahlbeton3 260 tCO₂e
Cradle to grave (A-C)3 545 Fahrten von London
nach New York**= CO₂ Durchschnittsverbrauch
von 408 Deutschen pro Jahr975 Durchschnittliche
Familienautos, die ein
Jahr lang laufen **= entspricht Durchschnittsverbrauch von 200 Einwohnern
8 to/Jahr/Einwohner in Deutschland**Global Carbon Budget (2022); Gapminder (2022); UN (2022); HYDE (2017); Gapminder (Systema Globalis)
OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions • CC BY
**Structural Carbon Tool, Elliot Wood Partnership Limited and The Institution of Structural Engineers

Abbildung 56 - Lebenszyklusbetrachtung Tragwerk

Holz speichert als nachwachsender Baustoff bei der Photosynthese Kohlendioxid. Auf Grund der kreislaufgerechten Ausführung kann das CO₂ dauerhaft bzw. über einen langen Zeitraum im Stoffkreislauf gebunden bleiben. Für die ergänzende Holzkonstruktion der Silos ergibt sich eine Speicherung von ca. 7.800 t CO₂e.

Bestand

0 tCO₂e
Im Holz gebundene CO₂-Emissionen

Umbau + Bestand

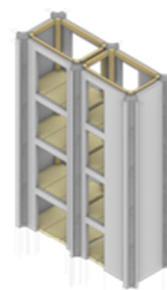
7 832 tCO₂e
Im Holz gebundene CO₂-Emissionen= 1000 m³ Holz
1t CO₂e pro m³ Holz

Abbildung 57 - Speicherung Kohlendioxid im Holztragwerk

Zusätzlich ergeben sich bei der Verwendung von Holz anstelle von Stahlbeton oder Stahl Substitutionseffekte. Vergleicht man die Transformation der bestehenden Silos, also den umfangreichen Erhalt der vorhandenen Stahlbetonkonstruktion und die Ergänzung mittels nachwachsender Holzbauteilen, mit einem fiktiven Wohnungsneubau in konventioneller Ortbetonbauweise, so ergibt sich ein Kohlendioxid-Vermeidungspotential von ca. 13.500 t CO₂e.

Ökobilanz - Gesamtverbrauch Tragwerk (tCO₂e) - Vergleichsvariante

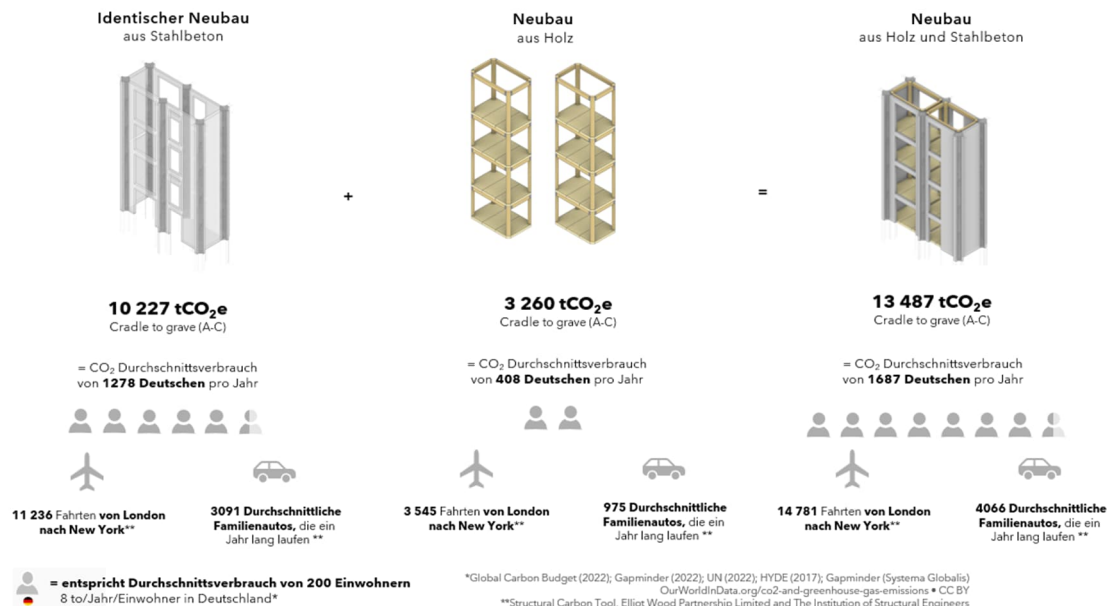


Abbildung 58 - Vergleich Neubau in Ortbetonbauweise mit Entwurf (Bestandserhalt und Holzbau)

Summiert man die im Tragwerk ungefähr entstehenden Emissionen, die im kreislaufgerecht ausgeführten Holzbau gespeicherten CO₂-Mengen und die sich auf Grund der Materialsubstitution ergebenden Emissionen auf, so erhält man das Emissionsvermeidungspotential im Tragwerk. IM VERGLEICH ZUM STATUS QUO DER BAUREALITÄT KÖNNEN ALSO CA. 18.000 T TREIBHAUSGASE DURCH DIE UMNUTZUNG DER BESTEHENDEN SILOGEBÄUDE IN FLENSBURG EINGESPART WERDEN.

GRUNDLAGEN DES BAUORDNUNGSRECHT

Grundlage für die brandschutztechnische Beurteilung der betrachteten Gebäude ist zunächst die Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein (Landesbauordnung - LBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. Juli 2024. Die Gebäude werden durchweg in die Gebäudeklasse 5 eingestuft. Aufgrund einer Höhe > 22 m der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses mit Aufenthaltsräumen fallen einzelne Gebäude in den Sonderbautatbestand Hochhaus gem. §2 Abs. (4) Ziffer 1 der LBO.

Für die grundsätzlich Beurteilung ist daher gem. VVTB SH die Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern: (Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHHR) in der Fassung April 2008-04, zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2012 maßgebend.

Für die, in die Gebäude integrierten Energiespeicher, liegt auf Grundlage der bauordnungs-rechtlichen Regelungen kein Sonderbautatbestand vor. Die Landesverordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (EltBauVO) vom 2. Mai 2022 regelt gem. Anwendungsbereich ausschließlich zentrale Batterieanlagen für bauordnungsrechtlich vorgeschriebene sicherheitstechnische Anlagen und Einrichtungen in Gebäuden. Dieser Sachverhalt liegt im vorliegenden Fall nicht vor.

Im Übrigen weist das Muster einer Verordnung über den Bau von Betriebsräumen für elektrische Anlagen (M-EltBauVO) mit Stand vom 22.02.2022 im Gegensatz zur EltBauVO (S-H) einen erweiterten Anwendungsbereich auf. Das Muster gilt grundsätzlich auch für die Aufstellung von Energiespeichersystemen in Form von Akkumulatoren für die allgemeine Stromversorgung. Aufgrund der Einschränkungen gem. § 1, Abs. (2) würde aber auch diese Verordnung die Regelungslücke nicht vollumfänglich schließen.

Auch aus der Aufzählung gem. §2 Abs. (4) LBO ergibt sich kein Sonderbautatbestand. Formal steht damit kein Handwerkszeug zur Beurteilung von Gebäude integrierten zentralen Energiespeichern zur Verfügung.

Auf Grundlage von § 51 Abs. 1 LBO können in Verbindung mit der Nutzung als Hochhaus ggf. besondere Anforderungen zur Verwirklichung der allgemeinen Anforderungen nach § 3 Absatz 2 gestellt werden.

Der Regelsetzer ist hier dringend gefordert, entsprechende Änderungen in die Bauordnung einzupflegen.

BRANDSCHUTZANFORDERUNGEN NUTZUNG HOCHHAUS

Hochhäuser weisen von Natur aus, ein erhöhtes brandschutztechnisches Risiko auf. Das basiert insbesondere auf den deutlich komplizierteren Angriffswegen (der Hauptangriffsweg verläuft vertikal) und der schwierigen Rettungswegsituation. Die Bewohner sind praktisch ausschließlich auf die baulichen Rettungswege angewiesen. Eine Unterstützung durch Rettungsgeräte der Feuerwehr ist, aufgrund der für Hochhäuser typischen Gebäudehöhen, nicht mehr möglich.

Hinzu kommt, dass sich in einem Hochhaus Nutzungsbedingt eine größere Anzahl von Bewohnern aufhalten wird.

Um den Risiken entgegenzuwirken, sind die prinzipiellen Brandschutzanforderungen nachzuweisen:

Alle Bauteile eines Hochhauses müssen feuerbeständig nachgewiesen werden. Die Nachweise müssen trotz Bestand auf Basis der aktuellen Normenlage geführt werden, da der Bestandsschutz aufgrund der geänderten Nutzung entfällt. Sie müssen zudem aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Dies ist augenscheinlich der Fall. Spätestens im Rahmen der Umbaumaßnahmen ist dies zu überprüfen. Ggf. vorgefundene brennbare Baustoffe sind vorzugsweise auszubauen. Ggf. ist auch robuste Kapselung denkbar. Dies ist im Einzelfall zu entscheiden.

Die Rettungswege müssen im vorliegenden Fall durch einen Sicherheitstreppenraum ausfallsicher gestaltet werden. Die Treppenraumwände müssen, über die Anforderung feuerbeständig hinausgehend, das zusätzliche Kriterium der mechanischen Widerstandsfähigkeit (Bauart Brandwand) erfüllen. Die Wohnungstüren sind, um den Rettungsweg noch sicherer zu gestalten, feuerhemmend, rauchdicht und

selbstschließend auszuführen. Um das Eindringen von Feuer und Rauch in den Sicherheitstrepfenraum zu verhindern, ist zwischen dem notwendigen Flur und dem Treppenraum eine Sicherheitsschleuse anzuordnen. Eine Rauchschutzdruckanlage muss dafür sorgen, dass im Brandfall eindringender Rauch in das Brandgeschoss zurückgedrückt wird.

Der vertikale Angriffsweg für die Feuerwehreinsatzkräfte muss über einen Feuerwehraufzug sichergestellt werden. Um den Angriffsweg ebenfalls entsprechend ausfallsicher zu gestalten, müssen der Fahrtschacht und die jeweiligen Vorräume ebenfalls eine Rauchschutzdruckanlage, die sicherstellt, dass der Angriffsweg nicht durch Raucheintritt beeinträchtigt wird, erhalten.

Der Löschangriff muss durch nasse Steigleitungen wirksam unterstützt werden.

Alle sicherheitstechnischen Anlagen müssen eine Sicherheitsstromversorgung erhalten. Ggf. können hierzu die Energiespeicher herangezogen werden.

Für Wohnhochhäuser bis 60 m Höhe kann auf eine automatische Löschanlage verzichtet werden. Dies gilt gleichermaßen für die automatische Brandmeldeanlage, soweit die Ansteuerung des Feuerwehraufzugs und der Rauchschutzdruckanlagen durch Anlagen integrierte Brandmelder erfolgt.

BRANDSCHUTZANFORDERUNGEN NUTZUNG SONSTIGES WOHNEN

Für die weiteren Gebäude unterhalb der Hochhausgrenze gelten die Anforderungen gem. LBO in Abhängigkeit der Gebäudeklasse.

Auch hier gilt, dass alle Bauteile feuerbeständig nachgewiesen werden müssen. Die Nachweise müssen aufgrund des Entfalls des Bestandschutzes auf Basis der aktuellen Normenlage geführt werden.

Für Flucht und Rettung ist mind. ein notwendiger Treppenraum analog den Anforderungen Hochhaus einzubauen. Auf eine Rauchschutzdruckanlage in Verbindung mit der Sicherheitskaskade Treppenraum – Vorraum – notwendiger Flur – Nutzungseinheit kann verzichtet werden, soweit ein zweiter Flucht- und Rettungsweg (baulich oder über Geräte der Feuerwehr) zur Verfügung steht. Ein Feuerwehraufzug ist nicht erforderlich.

BRANDSCHUTZANFORDERUNGEN NUTZUNG ENERGIESPEICHER

Formal steht in Schleswig-Holstein keine Beurteilungsgrundlage für die Nutzung von Räumen oder Gebäuden als Energiespeicher zur Verfügung. Die Beurteilung erfolgt daher hilfsweise auf Grundlage der allgemeinen Schutzziele gem. § 3 LBO. Diese Schutzziele sind:

1. Die sichere Flucht und Rettung der Personen muss möglich sein.
2. Der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch muss vorgebeugt werden

3. Es müssen wirksame Löscharbeiten möglich sein

Zunächst in das brandschutztechnische Risiko zu klären. Dazu lassen sich die Energiespeicher in brennbare und nichtbrennbare Technologien unterscheiden. Anforderungen an nichtbrennbare Energiespeicher

Da die Räume für die Energiespeicher keine Aufenthaltsräume sondern reine Technikräume mit nur sporadischem Aufenthalt von Wartungspersonal sind, ist ein Flucht- und Rettungsweg auskömmlich, sofern der Ausgang ins Freie oder der notwendige Treppenraum innerhalb von 35 m erreicht werden können. Es bestehen keine Bedenken, den Zugang unmittelbar vom Treppenraum (beim Hochhaus Sicherheitskaskade beachten) zu realisieren. Das Schutzziel Nr. 1 ist damit hinreichend umgesetzt.

Für Schutzziel Nr. 2 gilt es zu beachten, die grundsätzliche Technologie nichtbrennbar klassifiziert werden kann, aber die begleitenden Aggregate und Anlagen im Regelfall brennbar sind. Es ist daher grundsätzlich eine feuerbeständige Trennwand zwischen der Nutzung Wohnen und der Nutzung Energiespeicher erforderlich. Die maximale Grundfläche ist auf 1.600 m² zu begrenzen. Das Schutzziel Nr. 2 ist damit hinreichend umgesetzt.

Zur Durchführung wirksamer Löscharbeiten kann es bei großflächigen und ggf. hohen Energiespeichern erforderlich sein, eine Maßnahmen zur Rauchableitung und trockene Steigleitungen (Hochhaus nasse Wandhydranten) vorzusehen.

Weitergehende Anforderungen zu Umsetzung des Schutzziels Nr. 3 werden nicht gestellt.

Anforderungen an brennbare Energiespeicher

Insbesondere die Li-Ionen Speicher weisen ein signifikantes Risiko auf. Vor dem Hintergrund der verstärkten Nutzung im Bereich der Mobilität ist in den nächsten Jahren mit einem erhöhten Anfall von ausgemusterten Zellen zu rechnen.

Wirtschaftlich und im Sinne der Nachhaltigkeit ist eine Wiederverwendung in stationären Energiespeichern zweifelsohne sehr sinnvoll. Aus brandschutztechnischer Sicht führt dies allerdings zu einem nochmals erhöhten Risiko.

Brände von Energiespeichern auf Basis von Li-Ionen Zellen sind äußerst schwer zu beherrschen und stellen Feuerwehreinsatzkräfte vor erhebliche Probleme.

Beispielhaft ist dies an dem Brand im Vistra Batteriespeicherkraftwerk in Moss Landing, Kalifornien darstellbar.

Gemäß den öffentlich zur Verfügung stehenden Informationen handelt es sich bei dem Batteriespeicherkraftwerk um eine der größten Anlagen weltweit. Die Leistung liegt bei 750 MW mit einer Kapazität von 3.000 Megawattstunden (MWh). Die verwendeten Zellen waren Li-Ionen Batterien (NMC) der Firma Tesla. Insgesamt wurden 113.000 Module in Spezialcontainern aufgebaut. Der letzte und größte Brand brach am 16.01.2024 um 15 Uhr lokaler Zeit aus. Das Feuer brannte über 4 Tage und es waren Tausende Batteriezellen beteiligt. Seit der Errichtung 2019 war es bereits der vierte Brand in der Einrichtung.

Das Batteriespeicherkraftwerk wurde eingeschossig auf einer Fläche von ca. 4.800 m² bei einer inneren Höhe von ca. 16 m geplant und ausgeführt. Das Gebäude wurde mit einer automatischen Löschanlage (Sprinkler) geschützt. Die exakte Auslegung der Löschanlage ist unbekannt.

Bemerkenswert an dem Brandereignis war die schnelle Ausbreitung von Flammen und Rauch. Weiterhin konnten wirksame Löscharbeiten durch die Feuerwehreinsatzkräfte nicht durchgeführt werden. Aufgrund des Versagens der Löschanlage führte der über 96 Stunden Brand zu einem Teileinsturz des Gebäudes (komplettes Versagen der Dachkonstruktion).

Während des Brandes war es erforderlich ca. 1.500 Anwohner zu evakuieren.

Dieses Brandereignis zeigt beispielhaft, welche Herausforderungen ein brandschutztechnisches Sicherheitskonzept für Gebäudeintegrierte Batteriespeicher auf Basis von Li-Ionen Technologie lösen muss. Die nachfolgenden Anforderungen sind beispielhaft und müssen in jedem Einzelprojekt überprüft und angepasst werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit wird nicht erhoben.

Folgende Grundsatzanforderungen sind zu beachten:

- Der Aufstellraum muss über mindestens zwei bauliche Flucht- und Rettungswege verfügen. Die Rettungsweglängen sind auf max. 30 m zu verkürzen. Die Rettungswege sind unabhängig von den notwendigen Treppenträumen zu organisieren. (Schutzziel 1)
- Der Aufstellraum ist in seiner Grundfläche und seiner inneren Höhe zu begrenzen. Die Grundfläche sollte 400 m² bei einer max. Höhe von 15 m nicht überschreiten (Raumvolumen max. 6.000 m³). Die raumabschließenden sind in Bauart einer Brandwand bzw. als feuerbeständige Geschossdecke auszuführen. (Schutzziel 2)
- Der Aufstellraum ist mit einer geeigneten Löschanlage zu schützen. Versuche mit Spezialschäumen haben gute Ergebnisse hinsichtlich der Löschbarkeit von Li-Ionen Zellen gezeigt. Dies ist ggf. durch Realbrandversuche zu belegen. Neben einer automatischen Branderkennung ist es sinnvoll eine zusätzliche Videoüberwachung mit Aufschaltung zu einer ständig besetzten Stelle (z.B. Leitwarte o.ä.) zu installieren. Alternativ zur Übertragung auf eine ständig besetzte Stelle kann in Abstimmung mit der Feuerwehr auch die Zwischenspeicherung (z.B. letzte 60 Minuten) auf einem Server im Feuerwehrranlaufpunkt sinnvoll sein. (Schutzziel 3)
- Es sind Maßnahmen zur Löschwasserrückhaltung zu planen und auszuführen. Kapitel Brandschutz wird nachgereicht

Der Erhalt der Siloanlagen und die entsprechende Umnutzung stellen neben gestalterischen und statischen Aufgaben auch Anforderungen an die bauphysikalischen Themen. Hierbei geht es um das Wohlbefinden (Behaglichkeit) des Nutzers sowie eine bauphysikalisch korrekte Ausführung der Sanierungsmaßnahmen im Hinblick auf Schadensfreiheit, Ökologie, Erfüllung von gesetzlichen Anforderungen und die Wirtschaftlichkeit.

Die bauphysikalischen Themen lassen sich in die Bereiche Wärmeschutz, Feuchteschutz, Bau- und Raumakustik unterteilen.

Wärmeschutz und Feuchteschutz:

Da es sich vorliegend um eine Umnutzung mit dem Ziel des nachhaltigen Sanierens zur CO₂-Einsparung handelt, wird auch in Bezug auf die zu verwendenden Materialien und die entsprechende sortenreine Trennbarkeit ein Augenmerk gelegt. Hinsichtlich des winterlichen Wärmeschutzes (Energieeinsparung) ist bei den Siloanlagen, wo möglich, eine Außendämmung mit hinterlüfteter Fassade als Wetterschutz geplant. In Bereichen mit erhaltenswertem äußerem Erscheinungsbild (Backsteinfassade) wird auf eine Innendämmung gewechselt. Durch die Anwendung unterschiedlicher Dämmmaßnahmen, sind zur dauerhaften Schadensfreiheit, im Projektverlauf neben den Regelaufbauten auch die Übergänge (Wärmebrücken) hinsichtlich Feuchteausfall detailliert zu untersuchen. Entsprechende Dämmmaßnahmen sind im Gesamtkontext zur Nutzung (interne Feuchtelast) und haustechnischen Systemen zu prüfen.

Bei der Umnutzung der Siloanlage zu Gewerbe- und Wohnfläche sind die Anforderungen des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) baurechtlich einzuhalten. Ein darüberhinausgehender energetischer Standard ermöglicht die Berücksichtigung verschiedener wirtschaftlicher Förderprogramme. Dies ist im Zuge der weiteren Planung gegenüberzustellen und hinsichtlich der Finanzierung und wirtschaftlichen Randbedingungen abzustimmen.

Neben dem winterlichen Wärmeschutz spielt der sommerliche Wärmeschutz eine immer größere Rolle. Hierbei geht es um das Ausarbeiten von Maßnahmen zur Reduzierung der Überhitzung von Aufenthaltsräumen. Um einen unnötig hohen Stromverbrauch (aktive Kühlung) zu vermeiden, sind sogenannte passive Maßnahmen bauphysikalisch zu prüfen und gestalterisch umzusetzen. Dies kann vorliegend unter anderem durch Ausführung der Außendämmung und somit dem Erhalt der raumseitig thermisch wirksamen Speichermasse (Stahlbetonwand ohne thermische relevante Verkleidung) erzielt werden. D.h. trotz eines Holz-Hybridbaus, können die großen Vorteile eines schweren Stahlbetonbaus sehr effektiv thermisch genutzt werden. Dies erfolgt in Kombination mit einer Nachlüftung, welche die kühle Nachtluft in die Räume bringt. Es kühlt zuerst die Raumluft und dann die Bauteile (Boden, Decke, Wände) ab und speichern die geringere Temperatur der Nacht. Im sommerlichen Tagesverlauf kann somit einem Ansteigen der Raumtemperatur entgegenwirkt werden. Ergänzend ist ein außenliegender Sonnenschutz zur Reduzierung der solaren Lasten vorzusehen. Dieser ist im Hinblick auf die exponierte Lage sowie Windbeanspruchung entsprechend abzustimmen.

Bauakustik:

Um die Belästigungen durch Außenlärm und Innenlärm (benachbarte Nutzungseinheit) auf ein nicht gesundheitsschädliches Maß zu reduzieren, definiert die DIN 4109-1:2018-01 Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung. Diese, als Mindestanforderungen bezeichneten Werte, sind baurechtlich einzuhalten. Darüberhinausgehend, können je nach Wohn- und Gewerbenutzung auch erhöhte Anforderungen vereinbart und entsprechend geplant werden. Nach diesem Vorgehen könnte das Projekt auch umgesetzt werden, wenn der benachbarte Hafen weiterhin betrieben würde.

Im Sinne des nachhaltigen Bauens sollte abgewogen werden, wo tatsächlich welcher Schallschutz notwendig und sinnvoll ist und an welcher Stelle ggf. die Konstruktionsschichten, sowie die Zusatzlast reduziert werden kann. Durch die Reduktion von Zusatzlast, hochgerechnet auf ein mehrgeschossiges Wohngebäude, können zudem die statisch relevanten Querschnitte und somit der Materialverbrauch wesentlich reduziert werden.

Um die Siloanlagen umnutzen zu können, sie das aktuelle Konzept das Einstellen von Holzstützen und Brettsperrholzplatten vor. Die leichte Holzkonstruktion muss zum

Schutz der Bewohner vor Lärmeinwirkung aus einer benachbarten Nutzungseinheit ertüchtigt werden. Hierzu sind die Brettsperrholzplatten mittels eines schwimmenden Bodenaufbaus und einer zusätzlichen Ballastierung der Rohdecke durch Splitt auszuführen. Im vorliegenden Fall ist auch die Wiederverwendung des zerkleinerten Betons der neu erstellten Fensteröffnungen zur Ballastierung denkbar. Darüberhinausgehend ist die Einbaufuge zwischen neuer Holzkonstruktion und bestehender Stahlbetonkonstruktion dauerhaft luftdicht und entsprechend verkleidet zur Reduzierung des Schallübertrags auszuführen. Die bestehende Stahlbetonkonstruktion begünstigt zudem die bauakustischen Randbedingungen. Die sonst im Holzbau hinsichtlich eines guten Schallschutzes aufwendig auszuführenden flankierenden Bauteile (z.B. Außenwände), sind aufgrund der hohen Masse des bestehenden Stahlbetons bereits in einer optimalen Kombination vorhanden. Die Stahlbeton Außenwände erfüllen neben den aufgeführten Vorteilen bei der internen Bauakustik auch bereits einen sehr guten Schallschutz gegen Außenlärm. Demnach spielen primär die Fensterelemente eine maßgebende Rolle zum Schutz der Bewohner vor Außenlärm. Je nach zukünftiger Hafennutzung und angrenzendem Verkehrslärm sind die Fenster unter Berücksichtigung der Raumnutzung und Raumgeometrie entsprechend zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach DIN 4109-1 auszulegen.

Raumakustik:

Die Raumakustik beschäftigt sich mit der Schallausbreitung im Raum und deren Beeinflussung durch schallabsorbierende und schallreflektierende Flächen. Ziel ist eine optimale, bzw. der Raumnutzung angepasste Sprachverständlichkeit, eine angepasste Hörsamkeit, sowie die Reduzierung des Lärmpegels. Das zentrale Regelwerk der Raumakustik ist die DIN 18041:2016-3, Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung. In vorliegender Sanierung ist ein raumakustisches Augenmerk auf die Gewerbebereiche zu legen. Je nach Nutzung der einzelnen Raumzonen, sind die raumakustischen Maßnahmen entsprechen auszulegen. Primär wird die Anordnung von Absorberelementen an der Decke vorgesehen. In Bereichen mit bestehenden Silotrichtern oder anderen zu erhaltenden baulichen Elementen sind, unter Berücksichtigung der akustischen Reflexion und vorgesehenen Raumnutzung, geeignete Absorberflächen zu definieren. Im Sinne der Nachhaltigkeit, sind Absorber aus nachwachsenden Rohstoffen oder zirkulär verwendbaren Elementen zu bevorzugen.

ENERGIESPEICHER

In den leerstehenden Silos ist ein Teil des Bauvolumens nur schwer für Wohnraum nutzbar. Diese Bereiche sind im Gebäudeschnitt und Grundriss in Abbildung 59 in orange markiert. Geringes Tageslicht oder die Raumstruktur erschweren den Umbau zu attraktivem Wohnraum in diesen Bereichen erheblich. Im Rahmen des Projekts wird daher untersucht, wie diese Volumina bestmöglich als Energiespeicher genutzt werden können. Zunächst wird dafür im folgenden Abschnitt ein genereller Überblick über verschiedene Arten von Energiespeichern erstellt.



Abbildung 59: Schnitt und Grundriss der Getreidesilos in Flensburg. Farblich markiert nach vorgesehenen Nutzungen. In Orange der Raum für Energiespeicher

ARTEN VON ENERGIESPEICHERN

Energiespeicher unterscheiden sich nach der Energieform in mechanische, elektrochemische, thermische, chemische und elektrische Speicher. Typische mechanische Speicher sind Pumpspeicherkraftwerke und Schwunghmassenspeicher. In Pumpspeicherkraftwerken wird Wasser in höher gelegene Reservoirs gepumpt, um es später zur Stromerzeugung durch Turbinen wieder freizugeben. Schwunghmassenspeicher nutzen die Trägheit einer sich drehenden Masse bspw. eines Rades, um Energie zu speichern und bei Bedarf wieder freizugeben.

Zu den elektrochemischen Speicher zählen unter anderem Lithium(Li)-Ionen-Batterien und Redox-Flow Batterien. Li-Ionen Batterien sind weit verbreitet in mobilen Anwendungen und zunehmend auch in stationären Anlagen. Redox-Flow-Batterien eignen sich besonders für groß angelegte Speicherprojekte und haben den Vorteil, dass Kapazität und Leistung unabhängig voneinander skalierbar sind.

Bei thermischen Speichern wird zwischen sensiblen und latenten Wärmespeichern unterschieden. Sensible Wärmespeicher speichern Wärme durch Erhöhung der Temperatur eines Mediums, meist Wasser oder Gestein. Latente Wärmespeicher dagegen nutzen den Phasenübergang eines Materials (fest-flüssig) zur Energiespeicherung, z.B. Eis-Wasser.

In chemischen Speichern wie Power-to-Gas-Speichern erfolgt die Speicherung von Energie durch Erzeugung eines Energieträgers wie Methan oder Wasserstoff. Überschüssiger Strom kann beispielsweise zur Elektrolyse von Wasser genutzt werden, um Wasserstoff zu erzeugen, der dann gespeichert wird. Bei der Methanisierung wird der erzeugte Wasserstoff anschließend mit CO₂ reagiert, um Methan (CH₄) zu produzieren, welches einfacher zu speichern ist.

Elektrische Speicher können Kondensatoren oder Supraleitende Magnetische Energiespeicher (SMES) sein. Kondensatoren ermöglichen eine schnell verfügbare Speicherung von Energie in elektrischen Feldern, allerdings meist nur für sehr kurze Zeiträume und in geringen Mengen. SMES nutzen die Eigenschaften von Supraleitern zur Speicherung von Energie im Magnetfeld, sind aber noch sehr kostenintensiv. Jeder dieser Energiespeichertypen hat spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf Kapazität, Effizienz, Kosten und Anwendungsbereiche. Die Wahl des passenden Energiespeichers hängt stark von den jeweiligen Anforderungen des Energiesystems ab. In Abbildung 60 die auf [Ste14] basiert, ist dargestellt für welchen Bereich, sich welche Art von Energiespeicher besonders gut eignet. Charakterisiert sind die Einsatzbereiche dabei durch die Speicherkapazität und die Ausspeicherdauer. Eine kurze Ausspeicherdauer bei hoher Kapazität bedeutet gleichzeitig eine hohe Entladeleistung. Im kWh-Bereich sind Kondensatoren und Spulen angesiedelt, im MWh-Bereich verschiedene Batteriespeicher und Wärmespeicher. Bei noch größeren Kapazitäten sind Pumpspeicherkraftwerke und Druckluftspeicher im Vorteil. Auch Fernwärmespeicher liegen typischerweise im GWh-Bereich. Für Speicher im TWh-Bereich kommen laut [Ste14] nur noch Power-to-Gas Speicher in Frage.

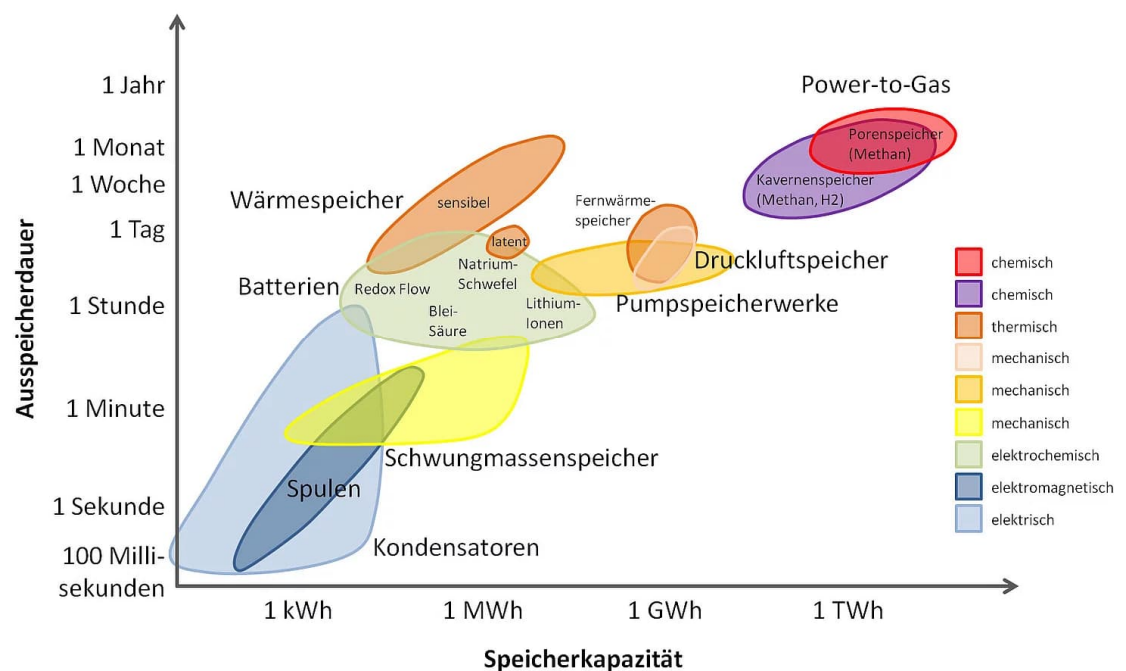


Abbildung 60: Vergleich verschiedener Speichertechnologien nach Entladedauer und Speicherkapazität [Ene23] nach [Ste14]

STROMSPEICHER FÜR DIE ENERGIEWENDE

Eine der zentralen Herausforderungen der Energiewende ist die intermittierende Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen wie Solar- und Windenergie. Diese Volatilität erfordert robuste Lösungen zur Energiespeicherung, um die Netzstabilität zu gewährleisten und eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen. Immer häufiger muss in Deutschland die erneuerbare Stromproduktion gedrosselt werden, siehe Abbildung 61 - Durch Einspeisemanagement (Drosseln) verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, [AEE23], weil die erzeugte Energie nicht über das Stromnetz verteilt werden kann. Stromspeicher ermöglichen in diesem Kontext die Erhöhung des erneuerbaren Anteils im Stromnetz, indem sie Angebot und Nachfrage zeitlich entkoppeln.

Durch Einspeisemanagement verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien

Statt Anlagen abzuregeln, wäre es sinnvoller, den Strom zu speichern oder in anderen Anwendungen, zum Beispiel zum Heizen einzusetzen („Sektorkopplung“).



Abbildung 61 - Durch Einspeisemanagement (Drosseln) verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, [AEE23]

Der deutsche Markt für Stromspeicher hat in den letzten Jahren eine rasante Entwicklung erlebt. Insbesondere Lithium-Ionen-Batterien haben an Popularität gewonnen, sowohl für private Haushalte als auch für industrielle Anwendungen. Wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen, hat die installierte Batteriekapazität in Deutschland in den letzten Jahren exponentiell zugenommen.

Stand: Januar 2025

Batteriekapazität in Deutschland (Alle Batterietechnologien, MaStR)

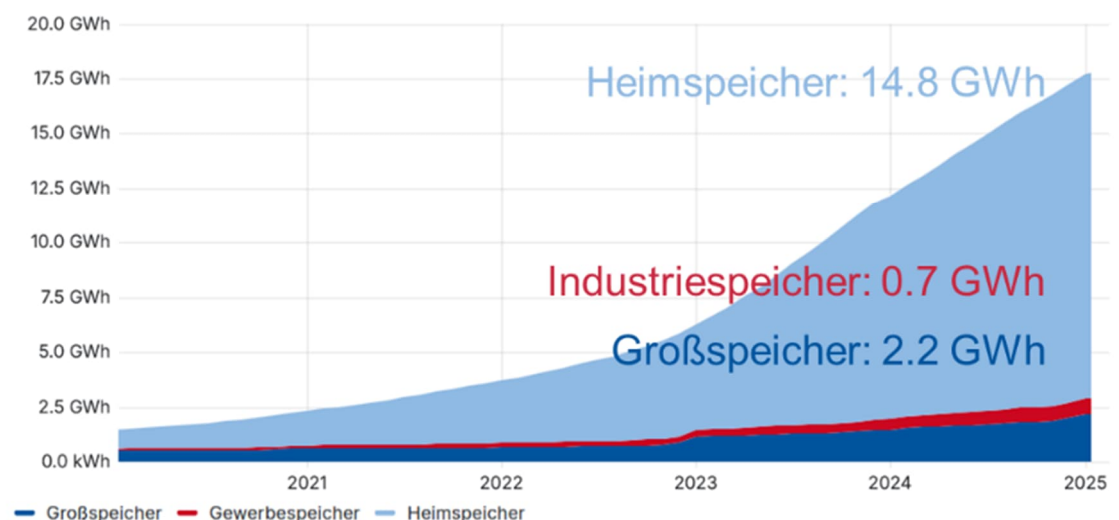


Abbildung 62 - Installierte Batteriekapazität in Deutschland, Stand 1.2025, Bildquelle: www.battery-charts.de nach [Fig23]

Die erhöhte Nachfrage hat zu einer signifikanten Kostensenkung geführt, die wiederum die Marktakzeptanz erhöht hat. Weiter Faktoren, die die Marktdynamik beeinflussen sind staatliche Anreize, technologische Fortschritte und die abnehmenden Kosten für erneuerbare Energien. Trotz des positiven Trends bestehen

noch Herausforderungen, wie regulatorische Unsicherheiten und technische Beschränkungen in Bezug auf Kapazität und Lebensdauer der Speicher. Zudem sind die Anfangsinvestitionen für viele potenzielle Anwender nach wie vor eine finanzielle Hürde. Die weiteren Marktaussichten hängen stark von der Entwicklung innovativer Technologien und einer klar definierten politischen Strategie ab. Die fortlaufende Forschung und Entwicklung, verspricht verbesserte Speichertechnologien, die einen effizienteren und kostengünstigeren Einsatz ermöglichen könnten.

In der Gesamtbetrachtung ist deutlich, dass Stromspeicher eine Schlüsselkomponente in der Energiewende darstellen. Ihre vielfältigen Anwendungen und sich schnell entwickelnden Technologien machen sie zu einem unverzichtbaren Element beim Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem. Die Umnutzung der Getreidespeicher in Flensburg kann dabei ein Leuchtturmprojekt sein, das zeigt, wie Bestandsstrukturen zu Energiespeichern umgenutzt werden können. So kann der Zubau an Energiespeichern, mit dem Erhalt schwer nutzbarer Gebäudestrukturen und der Schaffung von Wohnraum kombiniert werden.

SPEICHERTYPEN FÜR DEN EINSATZ IN DEN (GETREIDE)SILOS

ENERGIESPEICHERTECHNOLOGIEN

In den Getreidespeichern in Flensburg stehen insgesamt maximal 15 000 m³ zur Nutzung als Energiespeicher zur Verfügung. Um das Potential der Umnutzung der leerstehenden Getreidespeicher grob einordnen zu können wird überschlägig die mögliche Speicherkapazität berechnet. Klassische Li-Ionen Akkus haben eine Energiedichte von ca. 60 kWh_{el} / m³. Unter Beachtung des Raums, der für Peripherie notwendig ist und der Abstände, die gewahrt werden müssen, wird angenommen, dass nur ca. die Hälfte des Volumens mit den eigentlichen Batterien gefüllt wird. Damit würde man eine Speicherkapazität von ca. 500 MWh erreichen. Auch wenn die Speicherdichten je nach Technologie stark variieren, kann damit das Feld der infrage kommenden Technologien bereits etwas eingegrenzt werden.

Um verschiedene Speichertechnologien für die Anwendung in den leerstehenden Getreidesilos in Flensburg zu vergleichen, wird eine Bewertungsmatrix erstellt. Das Ziel ist, zu identifizieren, welche Speichertechnologien sich besonders gut für das Projekt eignen. Einige Speichertypen werden bereits vorab vom Vergleich ausgeschlossen. Die Risiken von Druckluftspeichern und Power-to-Gas-Speichern in unmittelbarer Nähe zu Wohnraum werden aktuell als zu hoch angesehen. Zudem wird der Wirkungsgrad der chemischen Energiespeicherung mit nur 40 % bei Wasserstoff [Ler18] als nicht vertretbar angesehen. Des Weiteren sind Speicher deren Speicherdauer unter 1 Stunde liegen, wie die elektrischen Speicher und Schwungmassenspeicher, für die Speicherung von erneuerbaren Energien weniger geeignet. Ihr Anwendungsbereich liegt eher in der Notstromversorgung, was für die Wohnnutzung jedoch von geringer Relevanz ist. In den Vergleich einbezogen werden aus der Gruppe der Festkörperbatterien Lithium-Ionen-NMC (Li-NMC), Lithium-Ionen-LFP (Li-LFP), Second Life Lithium-Ionen-NMC (2nd Life Li-NMC), Salzwasserbatterie und Salzbatteie. Außerdem werden die Tankbasieren Batterien Vanadium-Redox-Flow (VRF) und Organic-Redox-Flow (ORF) untersucht. Dazu kommen die Speichergruppen Carnot-Batterien, mechanische Speicher (Pumpspeicher, Hebespeicher) und Wärmespeicher.

Für den Vergleich in Bezug auf die Anwendung in Flensburg, werden Kriterien aus dem Bereich Realisierung neben Wohnraum, Re-Use, Nachhaltigkeit sowie technologische Aspekte als relevant angesehen. Es werden qualitativ nach einem Ampelsystem Einschätzungen zu den Kriterien gebildet. Im Folgenden werden die Bewertungskriterien aus der Matrix genauer beschrieben und deren Wahl begründet.

Tabelle 1 - Bewertungsmatrix zum Vergleich verschiedener Energiespeichertechnologien im Hinblick auf die Installation in den ehemaligen Getreidesilos in unmittelbarer Nähe zur Wohnbebauung

Bauform		Festkörperbatterie n		Tankbasierte		Carnot		Mech.		Wärme- speicher	
	Li- NMC	Li- LFP	2nd Life Li-NMC	Salz wasser	Salz	VRF	ORF				
Einfluss auf Wohnraum											
Sicherheit, Brandschutz, Toxizität											
Nutzerbeeinträchtigung (Lärm, Vibrationen, u.a.)											
Ökologische und Soziale Qualität											
Graue Emissionen, Umbau, Komplexität der Strukturumnutzung											
Rohstoffe (Einfluss auf Mensch & Umwelt)											
Technische Qualität											
Marktreife / TRL Skala 1..12 = gering... hoch	11	7	8	8	10	8	4	8	12	12	
Spezifische Speicherkapazität											
Effizienz											
Skalierbarkeit											
Maßgebende Qualitäten (& typische Anwendungsbereiche)	Schnell, leichtes Gewicht (e-Mobilität)	Stunden (Stationär)	Kurz (e-Mobilität, Peak shaving)	Stunden (Stationär)	Stunden bis Tage, viele Zyklen	Stunden bis Tage	Stunden bis Tage (Stationär)	Stunden bis Monate (Stationär)			

BEWERTUNGSKRITERIEN

Eine Besonderheit in Flensburg ist die Realisierung eines großen Energiespeichers in unmittelbarer Nähe zu Wohnraum. Deshalb ist es interessant zu vergleichen, welche Komplexität aus dieser räumlichen Situation entsteht. Dabei stehen Aspekte der Sicherheit wie Brandschutz und Toxizität im Vordergrund sowie störende Nutzerbeeinträchtigungen wie Vibration, Lärm und Geruchsbelästigungen. Aufwendige Sicherheitsmaßnahmen können einerseits die Grauen Emissionen beim Einbau erhöhen, sowie den verfügbaren Platz für die eigentlichen Energiespeicher

verringern. Dies könnte auch zu einer Erhöhung der Kosten des Projekts in Planung und Umsetzung führen.

Beim Speichervergleich wird außerdem ein besonderes Augenmerk darauf gelegt, wie gut sich die Technologien mit der Prämisse des Re-Use vereinen lassen. Das bedeutet einerseits zu bewerten, wie viel des Bestandsgebäudes erhalten werden kann und andererseits, wie aufwendig der Einbau der Speichertechnologie ist. Ein Vergleichskriterium hierbei ist wie viele Graue Emissionen durch den Einbau entstehen. Ziel ist es, herauszufinden, bei welcher Speichertechnologie die Bestandsstruktur tatsächlich vorteilhaft genutzt werden kann und bei welchen Technologien ein mindestens genauso hoher oder sogar grösserer Aufwand beim Einbau entsteht, wie bei einem Referenz Neubau des Speichers «auf der grünen Wiese».

Ein weiterer relevanter Aspekt für den Vergleich ist, was für Rohstoffe benötigt werden. Dabei werden die Auswirkungen der Rohstoffgewinnung auf Menschen und Umwelt betrachtet.

Der dritte Block an Kriterien beschäftigt sich genauer mit der Speichertechnologie. Die Marktreife der Technologie wird in Form des Technology Readiness Levels (TRL), siehe z.B. [IEA25], bewertet. Des Weiteren werden Effizienz und Spezifische (Spez.) Kapazität der Technologien betrachtet. Die Effizienz beschreibt wie viel der eingespeicherten Energie beim Ausspeichern noch entnommen werden kann. Der Raumbedarf und damit die spez. Kapazität spielt in diesem Projekt eine untergeordnete Rolle, da Platz kein kritisches Problem ist. Die spezifische Kapazität (kWh / m^3) wird für das Gesamtsystem abgeschätzt und nicht rein für die Batteriezellen. Dafür werden, wo verfügbar, Daten zu Containerlösungen verwendet. Alternativ werden bei Herstellern Einschätzungen zum Anteil aktives Speichervolumen am Bruttospeichervolumen eingeholt. Worin sich die Technologien außerdem unterscheiden, ist die Skalierbarkeit. Damit ist nicht nur gemeint wie komplex eine Hochskalierung zu großen Kapazitäten ist, sondern auch, ob Leistung (kW) und Kapazität (kWh) unabhängig voneinander skaliert werden können.

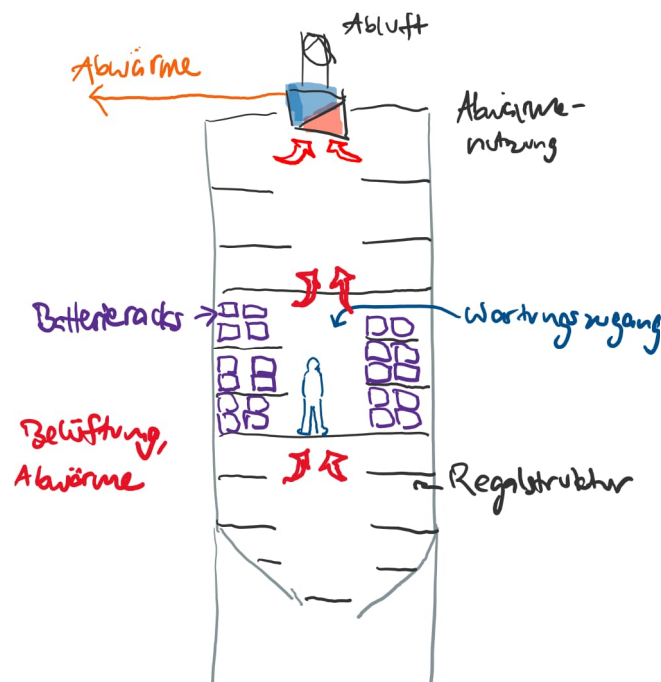
Das letzte Kriterium befasst sich mit den maßgeblichen Qualitäten und dem typischen Anwendungsbereich der Technologien. Diese sind interessant, um die eigentlichen Stärken einer Technologie zu erkennen und zu prüfen, ob diese grundsätzlich mit dem Projekt kompatibel ist. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die typische Speicherdauer, also für wie lange Energie eingespeichert bleiben soll. Dafür spielen die Selbstentladung, die Zyklenfestigkeit und das Verhältnis Leistung zu Kapazität der Technologie eine Rolle. Außerdem gibt es Speichertypen die bspw. aufgrund ihres geringen Gewichts für mobile oder stationäre Anwendungen prädestiniert sind.

Um die Bewertungsmatrix ausfüllen zu können, werden Konzepte für den Einbau der einzelnen Technologien in die Silos skizziert. Ein Ergebnis der Vergleichsmatrix, ist die Gruppierung der Speichertechnologien nach den für den Einbau in die Silospeicher relevanten Eigenschaften. Es wird unterschieden zwischen Festkörperbatterien, tankbasierten Stromspeichern, tankbasierten Wärmespeichern, Hochtemperaturwärmespeichern und mechanischen Stromspeichern.

FESTKÖRPERBATTERIE

Mit Festkörperbatterien sind die Speichertypen gemeint, die in Einheiten mit einem festgelegten Verhältnis von Kapazität zu Leistung gebaut werden. Beim Einbau solcher Zellen in den Silos wird eine Vielzahl identischer Einheiten in den Silos platziert und zu einem Speicher verschalten.

Wie solche Batteriezellen in ein Getreidesilo eingebaut werden könnten, ist in Abbildung 63 skizziert. Die Batterien werden in einer Regalstruktur gestapelt. Dabei müssen Abstände zur Belüftung vorgesehen werden. Ein Lüftungssystem sorgt für einen ausreichenden Luftwechsel. Oben am Silo wird an einem Wärmeübertrager Abwärme abtransportiert. Für die Wartung der Batterien muss der Zugang zu allen Batterien garantiert werden. Im Gebäudegrundriss rechts in Abbildung 63 ist ein Konzept zur Wartbarkeit dargestellt, in dem einzelne Siloschächte ausschließlich als Wartungszugang genutzt werden. Über Fenster in dem Wartungsschächten kann direkt auf die Batterien zugegriffen werden. Es wird angestrebt so den Platzbedarf für Wartungszugänge so gering wie möglich zu halten.



Je nach Schachtgröße, dient ein Schacht als Zugang zu den umliegenden Bereichen über Fenster

Abbildung 63: Konzeptskizze zum Einbau von Batteriezellen im Getreidesilo. Links Schnitt durch ein Silo, rechts Grundriss eines Silogebäudes mit gemischter Nutzung

Die verschiedenen Batteriezellensysteme unterscheiden sich beim Einbau im Silo, vor allem durch das Temperaturniveau, auf dem sie betrieben werden, sowie durch die Menge und den Ort der anfallenden Abwärme. Hochtemperaturbatterien wie Salz-batterien, müssen auf Temperaturen von 200 °C bis 800 °C erhitzt werden, um einsatzfähig zu sein. Sie werden stark gedämmt, um Wärmeverluste zu minimieren. Abwärme fällt bei ihnen deswegen hauptsächlich an den Wechselrichtern an. Bei Batterien, die in etwa bei Raumtemperatur arbeiten, entsteht Abwärme sowohl an den Batteriezellen selbst als auch an den Wechselrichtern. Ein Überhitzen der Batteriezellen muss bei allen Batterietypen verhindert werden, indem die Abfuhr der Abwärme sichergestellt wird. Das führt zu unterschiedlichen Mindestabständen zwischen den Batterieblöcken und zu unterschiedlichen Mindestluftwechseln im Bauwerk.

Die meistverwendete Technologie bei aktuell neu gebauten Stromspeichern, sind Li-Ionen Batterien [Fig23]. Sie zeichnen sich durch eine hohe Speicherdichte bei geringem Gewicht, eine hohe Leistung und mittlerweile relativ geringen Kosten aus. Ein großes Problem stellt jedoch die Rohstoffgewinnung und das Recycling dar. Bei Lithium Akkus werden die bereits weit verbreitenden Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC)-Zellen und die neuartigen Lithium-Eisenphosphat (LFP)- Zellen betrachtet. Die LFP-Zellen enthalten weniger seltene Erden als die NMC-Zellen und sind sicherer im Betrieb. Das Risiko von Entzündung und Explosion ist bei LFP-Zellen gering und es wird kein Cobalt benötigt.

Second-Life Lithium-Batterien sind eine Möglichkeit Lithium-Akkus länger zu verwenden. Wenn die Kapazität der Batterien nach einer bestimmten Anzahl Ladezyklen stark abnimmt, werden sie für mobile Anwendungen unattraktiv. Als stationärer Speicher, bei dem Energiedichte eine weniger wichtige Rolle spielt, sind sie dann immer noch interessant. Neben verringerter Kosten, ist hier auch die Rohstoffbeschaffung als weniger problematisch zu bewerten.

Salzwasser-Batterien, genauer Natrium-Ionen-Batterien, befinden sich in einem früheren Entwicklungsstadium als Lithium-Akkus. Deren Vorteil besteht darin, dass keine kritischen Rohstoffe benötigt werden und sie weder brennbar noch explosiv sind. Außerdem liefern sie eine höhere Leistung im Verhältnis zur Kapazität verglichen mit Li-Ionen. Was die Lebensdauer und den Wirkungsgrad betrifft schneiden sie jedoch etwas schlechter ab als Li-Ionen.

Die Natrium-Nickel-Chlorid Batterie oder Salz-batterie, ist ein Batterietyp, der schon seit den 1980ern auf dem Markt ist. Sie ist auch unter dem Namen ZEBRA-Batterie bekannt und zählt zu den Hochtemperatur- oder Thermalbatterien. Da sie geringere Leistungen im Verhältnis zur Masse liefert, ist die Technologie für mobile Anwendungen nicht attraktiv. Bei ortsfesten Anwendungen besonders in der Nähe

von Wohnraum, kann sie jedoch ihre Vorteile ausspielen. Sie besteht aus sozial- und umweltverträglichen Materialien, ist recycelbar, nicht brennbar und nicht explosionsgefährdet. Preislich kann sie aber aktuell nicht mit Li-Ionen konkurrieren, vor allem da die Produktion überwiegend in Europa stattfindet. Zuletzt wird die Organic-Solid-Flow Batterie betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine Redox-Flow Batterie, die einen festen, organischen Elektrolyten verwendet. Sie wird in Zellen mit festem Leistung-zu-Kapazität Verhältnis entwickelt. Vorteile sind die lange Lebensdauer und die unbedenklichen Materialien.

TANKBASIERTE STROMSPEICHER/FLÜSSIGBATTERIE

Mit tankbasierten Stromspeichern sind im wesentlichen Redox-Flow-Batterien gemeint. In diesen Systemen wird der Elektrolyt als Speichermedium, getrennt von den Leistungseinheiten aufbewahrt. Leistung und Kapazität können unabhängig voneinander skaliert werden. Generell weisen sie eine geringere Speicherdichte und Effizienz auf als Lithium-Akkus. Ihre hohe Lebensdauer und Zyklenfestigkeit machen sie aber zu einer attraktiven Wahl als ortsfeste Stromspeicher für Erneuerbare Energien. Das größte Risiko, das von der Redox-Flow Batterie ausgeht, ist die Leckage. Der Elektrolyt ist ätzend und wassergefährdend, weshalb bauliche Maßnahmen zur Absicherung getroffen werden müssen. Die Nutzung in einem Wohngebäude wird in Deutschland aktuell im Projekt «BiFlow», siehe [KIT20], erprobt. Für die Nutzung in Flensburg könnte die tankbasierte Speicherung besonders attraktiv sein. Womöglich können die bestehenden Silos als Tragstruktur für Kunststofftanks dienen, wie in Abbildung 64 skizziert. In Standardlösungen bestehen die Elektrolyttanks aus einem Kunststofftank, der außen mit einer Metallstruktur stabilisiert wird. Diese kann bei Nutzung der Getreidesilos im Gegensatz zum Referenzprojekt entfallen.

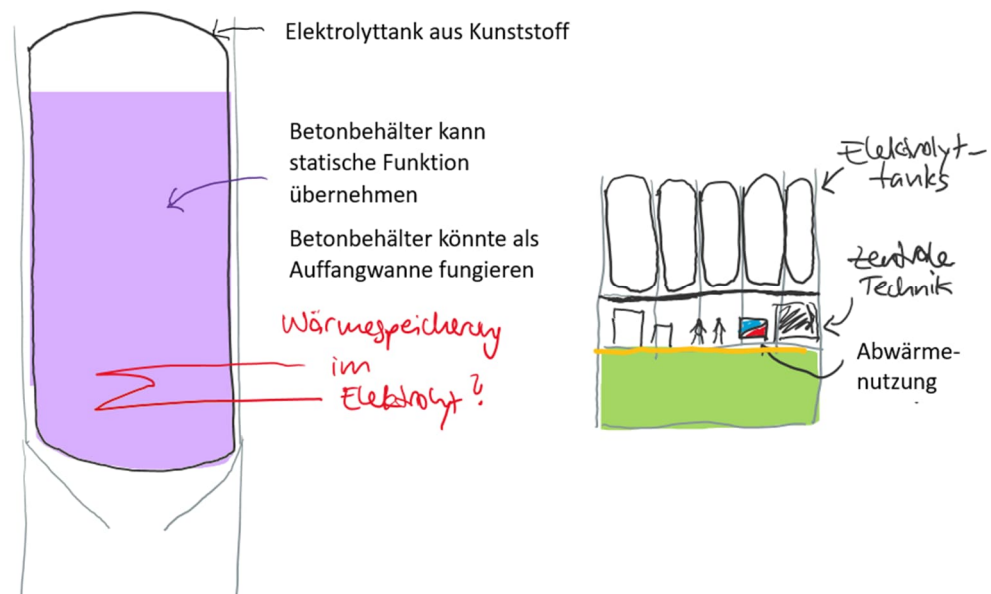


Abbildung 64: Konzeptskizze zum Einbau einer Redox-Flow-Batterie in den Getreidesilos. Links Schnitt eines Silos mit eingebautem Elektrolyttank. Rechts Schnitt durch ein Silogebäude mit Elektrolyttanks über Zentralem Technikraum mit Leistungseinheiten.

Um sich gegen Leckage abzusichern, könnte das Betonsilo abgedichtet werden und so als Auffangwanne dienen. Bei Be- und Entladung erwärmt sich der Elektrolyt. Diese Abwärme kann mit einem flüssig / flüssig Wärmeübertrager effizient ausgekoppelt werden [KIT20]. Zusätzlich zu den Elektrolyttanks wird Raum für eine Technikzentrale benötigt. Die Leistungseinheiten, genannt Stacks, und die Leistungselektronik werden darin zentral installiert. Für die Technikzentrale muss laut [KIT23] ein Volumen von ca. 30% der Speichertankvolumen vorgesehen werden.

Vanadium als Rohstoff für den verbreitetsten Elektrolyt, ist zwar nicht selten, jedoch schwankt seine Verfügbarkeit aufgrund schwankender Nachfrage aus der Stahlindustrie. Organische Elektrolyten sollen umweltfreundlicher und günstiger

werden. Diese befinden sich noch in der Entwicklung und erreichen aktuell noch nicht dieselbe Langlebigkeit wie Vanadium basierte Elektrolyte, vgl. [Kwa20].

WÄRMESPEICHER AUF WASSERBASIS

Als Wärmespeicher werden wasserbasierte Speicher in Betracht gezogen. Die verbreitetste Form von Wärmespeichern sind Warmwasserspeicher. In den in Flensburg verfügbaren Volumina ist die saisonale Speicherung von Wärme für die Wohnungen im Gebäudekomplex theoretisch möglich. Auch ein Eisspeicher ist eine Option zur kompakten Speicherung von Wärme auf niedrigem Temperaturniveau in Kombination mit einer Wärmepumpe.

Beide Arten von Speichern könnten mit sehr geringem Aufwand in die bestehende Struktur integriert werden. Wie in Abbildung 65 skizziert, könnten die Betonwände der Silos abgedichtet und direkt mit Wasser geflutet werden. Die Silos könnten aus statischen Gründen allerdings nur bis zu ca. 80 % mit Wasser gefüllt werden. Im Grundriss auf der rechten Seite ist die Idee skizziert, die Dämmung und gegebenenfalls auch die Abdichtung gemeinsam außen, um alle Wärmespeicher anzubringen, um Platz und Kosten zu sparen.

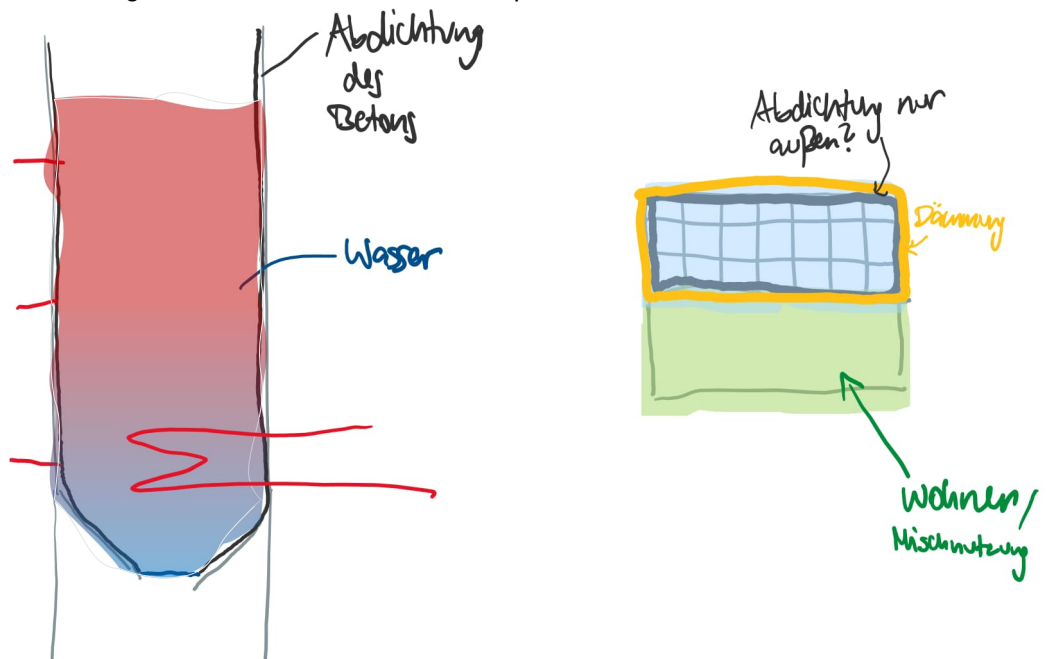


Abbildung 65: Konzeptskizze zum Einbau eines Warmwasserspeichers in den Getreidesilos. Links Schnitt eines Silos, rechts Grundriss eines Silogebäudes mit verschiedenen Nutzungen

Wasserbasierte Speicher enthalten keine kritischen Rohstoffe und sind sehr langlebig. Sie schneiden in der Bewertungsmatrix am besten ab. Was jedoch deren Ökobilanz betrifft, kann ein saisonaler Wärmespeicher nicht mit einem Energiespeicher konkurrieren, der im Idealfall täglich Be- und Entladen wird. Weitere Optionen zum Einsatz von Wärmespeichern werden bei der Entwicklung des Energiekonzepts in Abschnitt Energie- und Speicherkonzept für die Silounutzung in Flensburg diskutiert.

HOCHTEMPERATURWÄRMESPEICHER MIT WÄRMEKRAFTPROZESS (CARNOT-BATTERIEN)

Als Carnot-Batterien, werden Energiespeicher bezeichnet, die Strom in Form von Hochtemperaturwärme speichern und bei Bedarf über eine Turbine wieder in Strom umwandeln. Prinzipiell sind solche Hochtemperaturwärmespeicher ähnlich aufgebaut wie Warmwasserspeicher, jedoch mit einem anderem Speichermedium. Ein Konzept zum Einbau in den Getreidesilos ist in Abbildung 66 skizziert. Es müssten, ähnlich wie bei der Redox-Flow-Batterie, Tanks in die Silos eingebracht werden. Allerdings muss vermutlich aufgrund der hohen Temperaturen eine Wärmedämmung zwischen Tank und Betontragstruktur eingebracht werden. Zudem wird Platz für eine Maschinenhalle benötigt, in der Turbine und Generator betrieben werden können, siehe Gebäudeschnitt rechts in Abbildung 66. Bei diesen Maschinen handelt es sich um

Kraftwerkstechnik, die mit vielen Sicherheitsauflagen einhergeht und eine ständige Überwachung vor Ort erfordert.

Als Speichermedium wird in der linken Skizze von einer Salzschnmelze ausgegangen. Möglich wäre auch die Verwendung eine Feststoffs (rechte Skizze), der mit Luft durchströmt wird. So könnten die Getreidesilos wieder mit einem Schüttgut, in diesem Fall bspw. Keramikformteilen, befüllt werden.

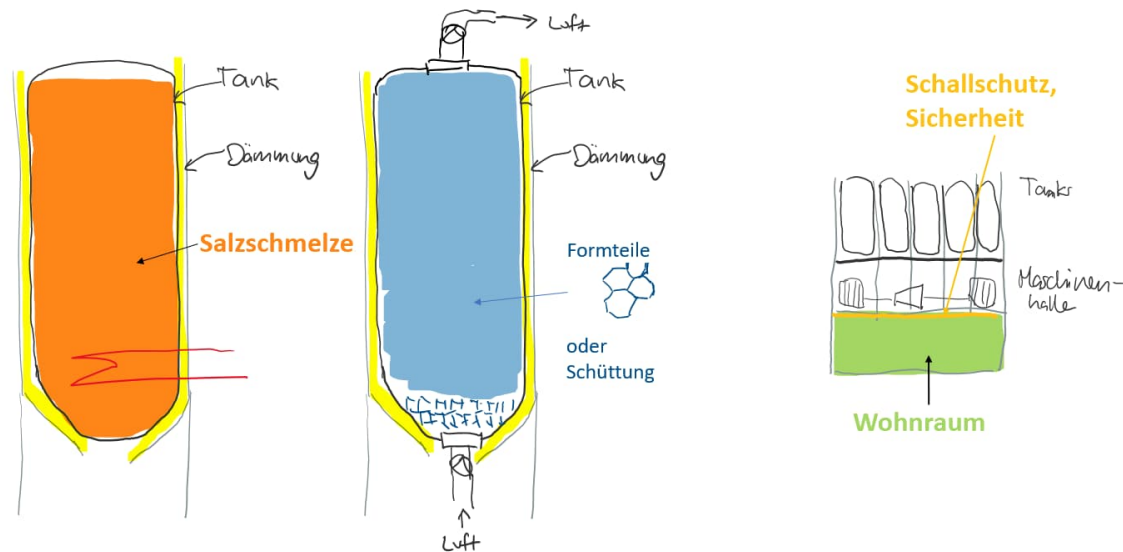


Abbildung 66: Konzeptskizze zum Einbau einer Carnot-Batterie in den Getreidesilos in Flensburg. Links Schnitt durch ein Silo mit eingesetztem Hochtemperaturwärmespeicher, rechts Gebäudeschnitt mit Flüssigsalztanks oben, darunter Maschinenhalle und darunter Wohnraum.

FAZIT ENERGIESPEICHERVERGLEICH

Der relativ weit gefasste Vergleich mithilfe der Bewertungsmatrix in Tabelle 1 liefert erste Erkenntnisse darüber, welche Technologien besonders für die Anwendung in den Flensburger Getreidespeichern interessant sind. Die Carnot-Batterien scheiden aufgrund der derzeit komplexen Sicherheitsaspekte aus, die mechanischen Stromspeicher haben im Vergleich zu allen anderen Technologien eine zu geringe und die Salzbatterien werden für diesen Anwendungsfall als technisch unterlegen gegenüber den anderen Festkörperbatterien angesehen. Sie bieten nur eine sehr kurze Speicherdauer bei vergleichbarer Effizienz wie andere Festkörperbatterien, erreichen geringere Leistungen und sind auch nach Jahrzehnten der Entwicklung immer noch teurer als Li-Ionen Batterien.

In Tabelle 2 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** werden die vielversprechendsten Technologien zusammenfassend nebeneinandergestellt. Lithium-Ionen-Akkus werden als aktueller Stand der Technik für Stromspeicher mit der Salzwasser-Batterie, den (Organic)-Redox-Flow Batterien (ORF) und dem Warmwasserspeicher verglichen. Dass aber jederzeit noch weitere, bisher nicht erwähnte Technologien, zu diesen vier Technologien hinzukommen können, wird durch die letzte Spalte mit dem «?» angedeutet.

Die Kriterien, nach denen verglichen wird, stellen den Aufwand und den Nutzen der jeweiligen Technik für das Projekt in Flensburg gegenüber. Die Sicherheitsinfrastruktur fasst die zuvor genannten Aspekte zu Sicherheit und Immissionen zusammen. Im Aspekt der Umweltfreundlichkeit geht es um die verwendeten Rohstoffe: Welche Auswirkungen hat die Rohstoffgewinnung auf Mensch und Umwelt, wie gut können die Materialein recycelt werden, wie knapp sind die Rohstoffe? In Umbaumaßnahmen werden die Art und der Aufwand des Einbaus sowie besondere Synergien genannt. Die technischen Aspekte konzentrieren sich hier auf die spezifische Speicherkapazität und die Zyklenfestigkeit als wichtigste Kriterien. Bei der spezifischen Speicherkapazität wird, wie zuvor, die Speicherdichte des Gesamtsystems inklusive Peripherie verwendet. Unter dem Punkt Marktreife wird der Projektcharakter beschrieben, der durch die Marktreife der Technologie entsteht. Zuletzt sind unter Wirtschaftlichkeit die Investitionskosten auf die Speicherkapazität bezogen genannt. Für eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung müssen die Investitionskosten jedoch stets im Zusammenhang mit dem Anwendungsfall des Speichers betrachtet werden.

Tabelle 2 - Zusammenfassender Vergleich vielversprechender Speichertechnologien für die Nutzung in den Getreidespeichern in Flensburg

	Lithium-Ionen Batterie	Salzwasser Batterie	(Organic) Redox-Flow	Wärmespeicher (Wasser)	?
					
Einfluss auf Wohnraum					
Sicherheitsinfrastruktur	Aufwendig Löschanlage notwendig	Nicht brennbar, nicht explosiv	nicht brennbar, explosionsssicher Wassergefährdung	Keine besonderen Maßnahmen notwendig	?
Ökologische Qualität					
Umweltfreundlichkeit					?
Umbaumaßnahmen	Regalsystem in Bestandsstruktur	kaum Vorteile durch Bestandsstruktur	Nutzung der Struktur für Statik der Behälter. Als Auffangbecken	Einfachster Einbau, Nutzung der Struktur	?
Technische Qualität					
Spez. Speicherkapazität	31 kWh _{el} /m ³ (50% aktives Volumen)	18 kWh _{el} /m ³ (75% aktives Volumen)	15 kWh _{el} /m ³ (50% aktives Volumen)	50-70 kWh _{th} /m ³ (95% aktives Volumen)	?
Zyklusfestigkeit	8'000	5'000	20'000	unbegrenzt	?
Ökonomische Qualität					
Marktreife, Projektcharakter	Stand der Technik, Hohe Produktionsvolumen	Pilotanlage in dieser Größenordnung	Erprobte Anlagen die schon über 10 Jahre in Betrieb sind	Stand der Technik	?
Investitionskosten	600 € / kWh	1200 € / kWh	800 € / kWh	1 € / kWh _{th}	?

Die Sicherheitsinfrastruktur ist für Lithium-NMC-Batterien besonders aufwendig. Am umweltfreundlichsten, was Rohstoffe und Recycling betrifft, sind der Warmwasserspeicher und die Salzwasserbatterie. Die Umbaumaßnahmen steigern sich von Warmwasser zu Redox-Flow zu Salzwasser und Lithium im Aufwand. Die spezifische Speicherkapazität der drei Stromspeicher variiert von 30 kWh_{el}/m³ für Lithium zu 20 kWh_{el}/m³ bei Redox-Flow-Batterien [ESS25] und 18 kWh_{el}/m³ bei Salzwasserbatterien [Blu25]. Die angegebenen Speicherdichten berücksichtigen bereits eine Abschätzung, wie dicht die Gebäudevolumen mit den tatsächlichen Speichern belegt werden können («aktives Volumen»). Bei allen Speichertypen wird Platz für periphere Komponenten benötigt und bei Festkörperbatterien müssen zudem Abstände zwischen den Racks eingehalten werden. Die Speicherdichte bei Warmwasserspeichern ist mit 50-70 kWh_{th}/m³ höher als bei den Stromspeichern. Da es sich um thermische Energie handelt, ist das aber nur bedingt vergleichbar. Die Zyklusfestigkeit ist definiert als die Anzahl Ladezyklen, nach der die Speicherkapazität sich durch Alterung auf 80% der ursprünglichen Kapazität reduziert. Sie ist damit ein Maß für die Langlebigkeit. Bei der Zyklusfestigkeit sind Warmwasserspeicher, aber auch der Redox-Flow Speicher, den beiden Festkörperbatterietypen deutlich überlegen. Am schlechtesten schneidet die

Salzwasserbatterie mit 5000 Zyklen ab. Die Marktreife der Speichertechnologie bestimmt welchen Projektcharakter die Realisierung in den Flensburger Silos erhalten würde. Die Investitionskosten bezogen auf die Speicherkapazität hängen stark mit der Marktreife zusammen.

Von den Stromspeichern erweist sich die Redox-Flow Batterie in diesem Vergleich am attraktivsten für das Projekt. Vor allem die Synergien, die beim Einbau entstehen und die relativ hohe Marktreife, sprechen für eine Verwendung der Technologie in den Getreidesilos. Für die schnelle Bereitstellung hoher Leistungen, wie bei Elektromobilität sollten ergänzend Li-Ionen Batterien bedacht werden. Zusätzlich bietet es sich an, Wärmespeicher in der Silostruktur zu installieren. Diese schneiden im Vergleich am besten ab, besonders dank der einfachen Handhabung und ihrer Umweltfreundlichkeit.

ENERGIE- UND SPEICHERKONZEPT FÜR DIE SILOUMNUTZUNG IN FLENSBURG

Für den Gebäudekomplex der ehemaligen Silos wird derzeit ein innovatives Energie- und Speicherkonzept entwickelt, das darauf abzielt, die Emissionen im Gebäudebetrieb zu minimieren. Dies soll durch die Maximierung der Nutzung lokaler und gegebenenfalls auch regional erneuerbarer Energien erfolgen. Innerhalb der Bestandsstrukturen der ehemaligen Silogebäude sind große Speicher für Strom und Wärme geplant. Die Kopplung dieser Sektoren zielt darauf ab, den Standort und darüber hinaus möglichst viel erneuerbare Energie zu nutzen.

Die Bereitstellung von Wärme und Strom für die entstehenden Wohn- und Mischnutzungsbereiche sowie die Elektromobilität der Bewohner ist essenziell. Die Untersuchung der lokalen erneuerbaren Energien konzentriert sich auf die Nutzung von Solarstrahlung und Windkraft. Die Wärmeerzeugung erfolgt fossilfrei mittels Wärmepumpensystemen. Als Wärmequelle bieten sich ungedämmte Energiespeicher (Kalter Wasserspeicher) an, die sich relativ einfach in die Strukturen der Bestandssilos integrieren lassen und mit dem Speichermedium Wasser ökologisch unbedenklich sind. Wärmepumpen entziehen dem Speicher Energie und bringen diese auf ein für die Heizung nutzbares Wärmeniveau von ca. 40 °C. Parallel dazu findet eine Regeneration des Energiespeichers statt, wobei die Wärmequellen Abwärme aus anderen Nutzungen (Server, Prozesskälte) oder die Abwärme bei der Be- und Entladung der Stromspeichereinrichtung umfassen. Die Regeneration des Energiespeichers erfolgt durch Abwärmequellen wie:

- Abwärme aus anderen Nutzungen (Server, Prozesskälte)
- Abwärme bei der Be- und Entladung der Stromspeicherung
- Abluftwärmetauscher (z. B. Wohnungsabluft)
- Solarthermie (z.B. als PVT-Hybridkollektor, siehe Abbildung 67 und Abbildung 68)
- Umweltenergie (Außenluft)

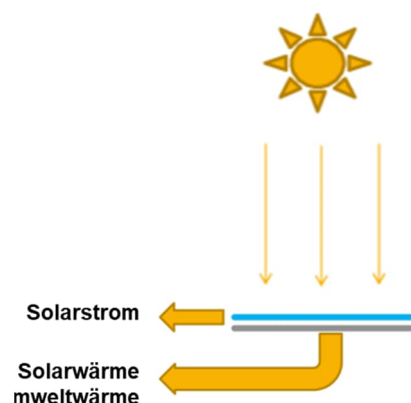


Abbildung 67: Skizze zum Funktionsprinzip eines PVT-Kollektors

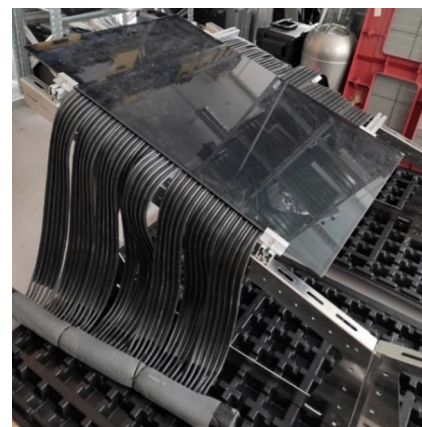


Abbildung 68: Foto eines PVT-Kollektor-Mockups bei der Erprobung bei Transsolar

Anstelle des Energiespeichers könnte auch ein Eisspeicher in Betracht gezogen werden, da dieser eine deutlich höhere Speicherkapazität pro m³ aufweist. Diese ist auf die Nutzung der Latentwärme zurückzuführen, die bei der Phasenumwandlung von Wasser zu Eis (oder umgekehrt) freigesetzt bzw. aufgenommen wird. Allerdings ist für die Installation ein hoher Aufwand erforderlich und die Systemtemperaturen im

Heizfall müssen an der Verdampferseite stets unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser liegen, was sich wiederum auf die Jahresarbeitszahlen auswirkt. Da das Speichervolumen bei der Siloumnutzung ausreichend vorhanden ist, wird empfohlen, auf ein effizienteres und weniger komplexes System mit Anergiespeichern zu setzen. Eine zusätzliche Energiequelle könnte die Aquathermie darstellen, bei der Wärme aus dem Fjord entnommen und mittels einer Wärmepumpe genutzt wird. Allerdings ist hier mit einem hohen Genehmigungsaufwand zu rechnen, weshalb diese Variante nicht weiter untersucht wurde. Auch die Geothermie wird aufgrund des bereits dicht bebauten Gebiets als schwierig umsetzbar angesehen und daher nicht weiterverfolgt. Die Strukturen der Bestandssilos bieten ein ausreichendes Volumen für große Batteriespeicher. Ein Stromspeichermix aus Technologien für Grund- und Spitzenlasten ist dabei sinnvoll. Tankbasierte Batteriespeicher (Redox-Flow) eignen sich aufgrund ihrer Nichtbrennbarkeit und Explosionssicherheit, was die erforderliche Sicherheitsinfrastruktur deutlich vereinfacht. Darüber hinaus bieten tankbasierte Batteriespeicher eine hohe Zyklenfestigkeit und eine unabhängige Skalierbarkeit von Kapazität und Leistung des Zellenstacks, was sie für den vorliegenden Anwendungsfall besonders attraktiv macht. Abgesehen von Redox-Flow-Batterien ist auch die Nutzung von Lithium-Ionen-Speichern vorgesehen. Die Technologie ist aufgrund der hohen Produktionsvolumina hochentwickelt und weist Vorteile bezüglich der Energiedichte sowie der Fähigkeit zur Absorbierung von Leistungsspitzen auf. Die Sektorkopplung mittels Wärmepumpen und großvolumiger Speicher ermöglicht zudem die Speicherung von überschüssigem Strom aus der Photovoltaikanlage, in Wärme oder Kälte.

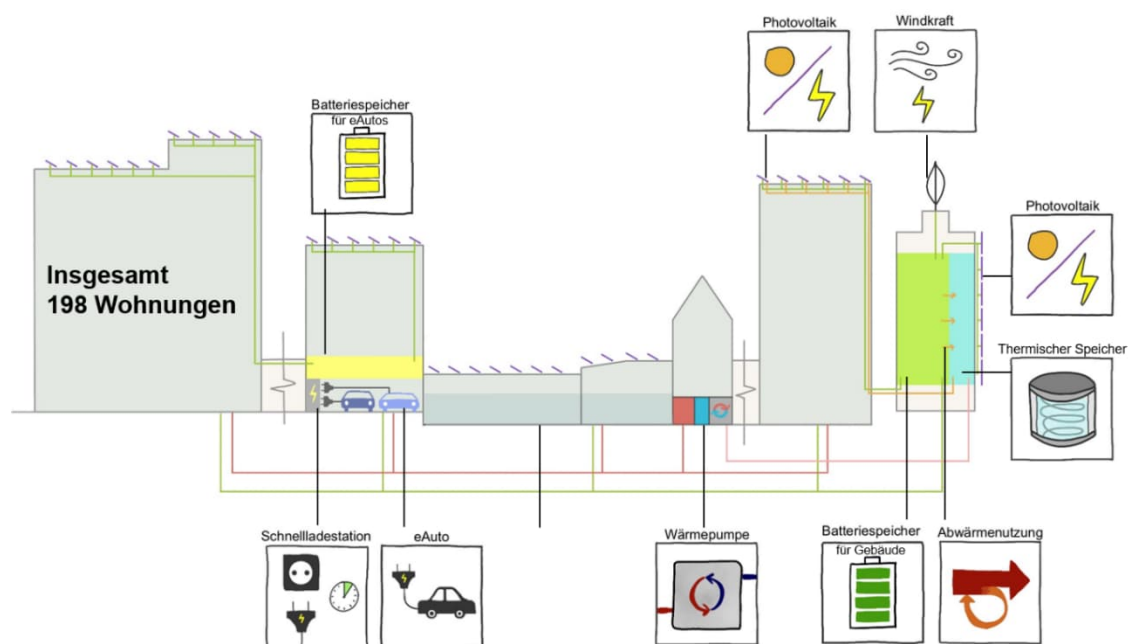


Abbildung 69: Konzeptskizze Energieversorgung umgenutzter Silos

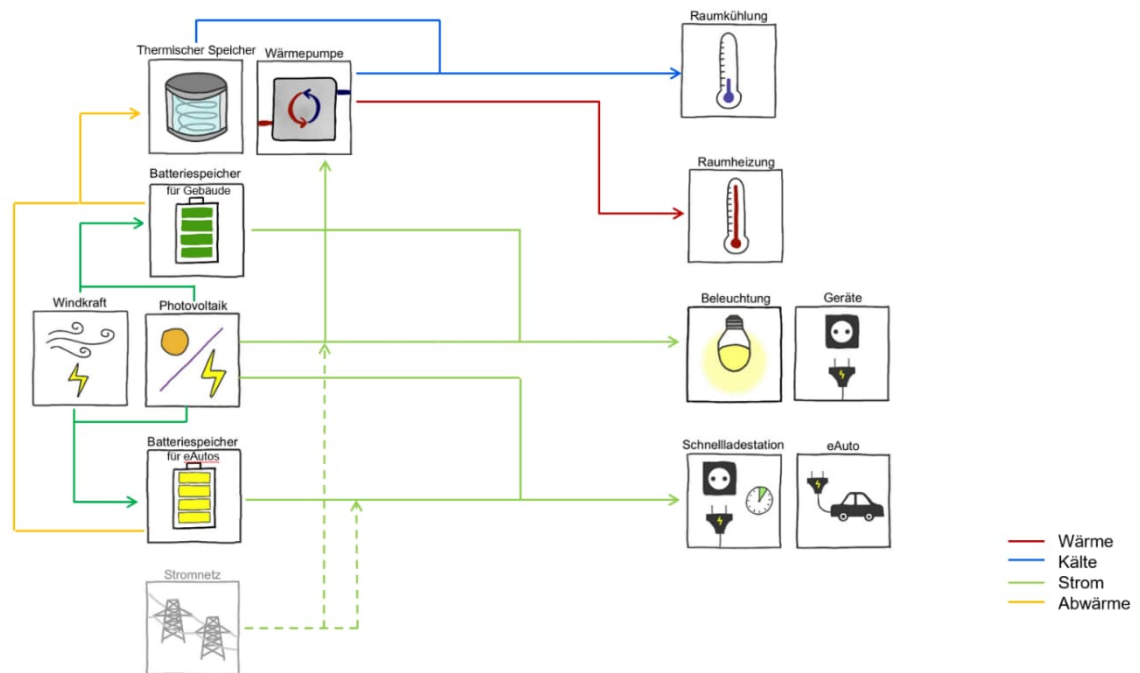


Abbildung 70: Schema des Energiekonzepts für das Gebäudeensemble, mit allen Hauptkomponenten

POTENTIALE FÜR ERZEUGUNG ERNEUERBARE ENERGIEN AM STANDORT

Im Rahmen der Untersuchung wurden die Potenziale zur Nutzung von Solarenergie und Windenergie auf dem Grundstück einer detaillierten Analyse unterzogen. Zur Ermittlung des Potenzials für Solarenergie wurde eine Besonnungsstudie durchgeführt. Dabei wurde ein 3D-Modell des Gebäudezuges erstellt und mittels Simulation ermittelt, wie viel Solarstrahlung jährlich auf die verschiedenen Gebäudeoberflächen trifft (vgl. Abbildung 71, Abbildung 72). Die eingefärbten Flächen auf den Gebäudeansichten aus Südwest und Nordost veranschaulichen das Solarpotential jeder Fläche entsprechend der Skala in Abbildung 73.

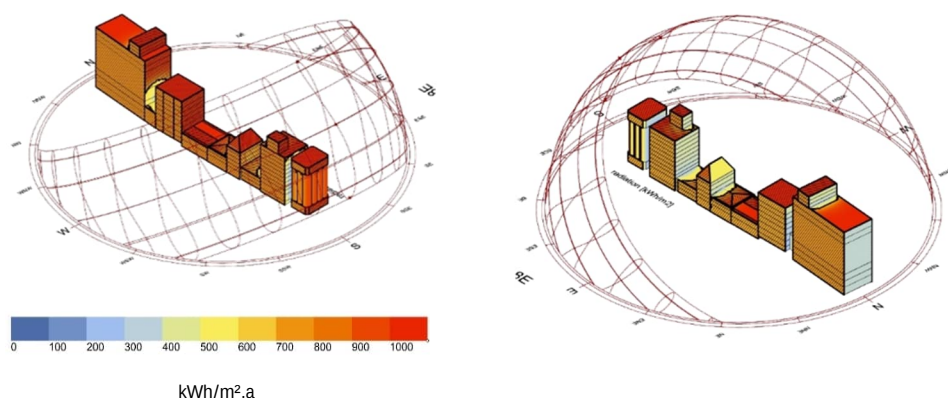


Abbildung 71: Ergebnis Besonnungsstudie, SW-Ansicht

Abbildung 72: Ergebnis Besonnungsstudie, NO-Ansicht

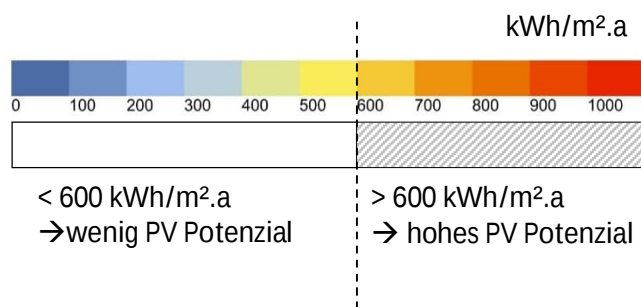


Abbildung 73: Skala, Spezifische solare Einstrahlung

Eine Photovoltaikanlage ist typischerweise ab einer jährlichen Besonnung von 600 kWh/m².a rentabel. Dies ist in Abbildung 71 und Abbildung 72 ersichtlich, wo die orange bis rot markierte Flächen als rentabel eingestuft werden. Diese Bereiche umfassen hauptsächlich die Dachflächen sowie die äußeren Fassaden, die nach Süden, Westen und Osten ausgerichtet sind.

Die eingefärbten Flächen, die ein hohes Potenzial für die Erzeugung von Solarstrom aufweisen, summieren sich auf eine Fläche von ca. 6500 m². Bei der Planung wurde eine Belegung der Fassade mit 30 % PV-Anlagen angesetzt. Die Gesamtfläche kann eine Leistung von bis zu 1 MWp und einen Jahresertrag von 4000 MWh regenerativ erzeugtem Strom generieren.

Aufgrund der limitierten Verfügbarkeit der Dachfläche im Mehrgeschossbau wurde der Fokus auf Photovoltaik als regenerative Stromquelle für die Beladung der Stromspeicher in den Silo-Strukturen gesetzt, anstatt solarthermische Kollektoren zu bevorzugen. Es wird jedoch empfohlen, die Dachfläche durch die Verwendung von Hybridkollektoren in Form von Photovoltaik-thermischen Kollektoren (PVT), doppelt zu nutzen.

Des Weiteren werden die Potenziale zur Nutzung von Windenergie eingehend untersucht. Die Gewinnung regenerativer Energien aus Wind ist insbesondere von

Interesse, da diese Energiequelle oft zur Verfügung steht, wenn die Photovoltaik geringe Erträge liefert (z. B. nachts oder bei Bewölkung).

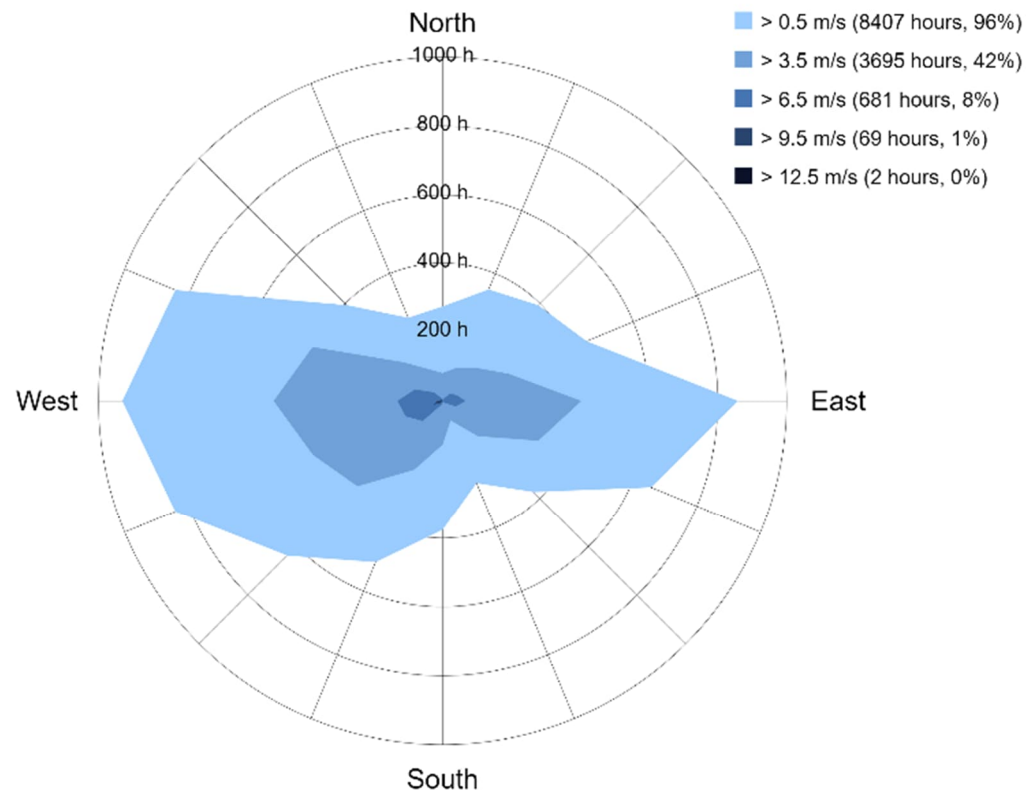


Abbildung 74: Windrose für den Standort Flensburg

Die Windrose in Abbildung 74 stellt das Ergebnis der meteorologischen Messungen am Standort Flensburg in einem typischen Jahr auf einer Referenzhöhe von 10 Metern über Normalnull dar. Die Hauptwindrichtungen sind dabei West und Ost.

Die exponierte Lage potenzieller Kleinwindkraftanlagen auf den Silogebäuden bietet einen signifikanten Vorteil. Aufgrund der Höhe von 30 bis 50 Metern sind die Windverhältnisse in der Regel günstiger als in den meteorologischen Daten angegeben. Eine überschlägige Abschätzung hat ergeben, dass bereits mit einer 5-kW-Anlage etwa 15 MWh an ganzjährig erzeugtem, regenerativem Strom generiert werden könnten.

Um die Windverhältnisse am Standort besser quantifizieren zu können, sollte eine einjährige Windmessung auf den Silogebäuden durchgeführt werden. Ziel dieser Messung ist zum einen die verbesserte Prognose des Ertrags und zum anderen die Bestimmung des am besten geeigneten Windkraftanlagen-Typs.

ENERGIEBEDARF UND LASTPROFIL DES NEUEN GEBÄUDEKOMPLEXES

EINFÜHRUNG

Die Abschätzung des Energiebedarfs für den zukünftigen Gebäudekomplex ist eine wesentliche Grundlage für die Ermittlung des Potenzials des Energie- und Speicherkonzepts. Als erster Ansatz wird der Gebäudekomplex mit einer Gesamtwohnfläche von 16.000 m² angenommen, die sich auf 198 Wohneinheiten mit jeweils 80 m², sowie einer gewerblichen Fläche von 2.300 m² verteilt.

Dieses Kapitel beschreibt die Abbildung der verschiedenen Lastprofile für:

- Heizung
- Trinkwarmwassererwärmung
- Kühlen, Gebäudestrom, Nutzerstrom
- Elektroautos

Im Rahmen der Untersuchung werden sechs Varianten mit unterschiedlicher Anzahl an Wohnungen analysiert, wobei die Varianten sowohl die Präsenz als auch die Abwesenheit von Stromspeichern sowie die Integration von Elektroautos umfassen. Dies entspricht einer Vielfalt unterschiedlicher Lastkurven. Eine detaillierte

Beschreibung dieser Varianten ist im Abschnitt Stromspeicherdimensionierung zu finden.

HEIZWÄRME

Der Heizwärmeenergiebedarf eines Bauvorhabens wird maßgeblich durch die Dämmwerte der Außenfassaden und der Außentemperatur bestimmt. Um eine verlässliche Prognose des Heizwärmebedarfs zu erhalten, können diese Faktoren mit Angabe der maximalen Last und der Heizgrenztemperatur in einer hyperbolischen Korrelation gesetzt werden (Abbildung 75).

Für das Gebäude wird eine maximale Heizlast von 550 kW ermittelt (spezifische maximale Heizlast $30 \text{ W/m}^2 \cdot 18300 \text{ m}^2$ Wohn- und Gewerbefläche), bei einer Außentemperatur von -7.5°C . Ab einer Außentemperatur von 12°C ist eine Beheizung der Räume nicht mehr erforderlich.

Der jährliche Strombedarf der Wärmepumpe wird dann unter Zugrundelegung einer mittleren Jahresarbeitszahl von 4 berechnet, was 292 MWh/a oder knapp $16 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ entspricht. Das Lastprofil der Wärmepumpe ist in Abbildung 82 als Wochenverlauf zu sehen.

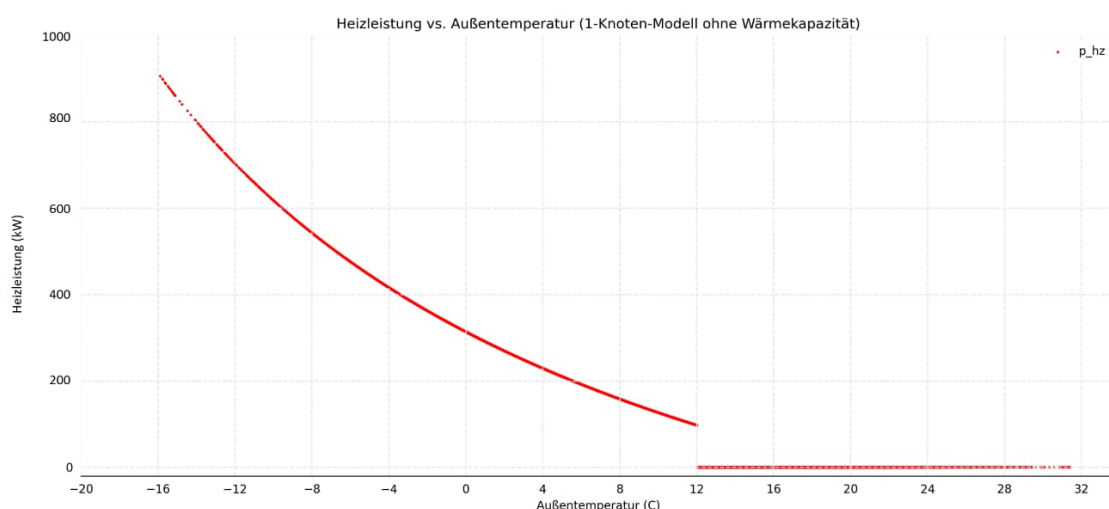


Abbildung 75: Heizleistung vs. Außentemperatur, 1-Knoten Modell

TRINKWARMWASSER

Der jährliche Nutzenergiebedarf für Warmwasser wird gemäß den Vorgaben des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins (SIA) Standard 2024/2021 sowie auf Basis empirischer Daten ermittelt.

Die Verteilung dieses Energiebedarfs erfolgt gleichmäßig über einen Zeitraum von täglich sechs Stunden (6:00–8:00 Uhr, 11:00–13:00 Uhr, 18:00–20:00 Uhr). Mit einer Jahresarbeitszahl von 3.5 für die Wärmepumpe liegt der jährliche Endenergiebedarf für Trinkwarmwasser des Gebäudekomplexes bei etwa 92 MWh/a oder $5 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Das Lastprofil ist in Abbildung 82 und Abbildung 83 als Wochenverlauf dargestellt.

KÜHLEN, GEBÄUESTROM, NUTZERSTROM

Der jährliche Nutzenergieverbrauch der beiden Nutzungsarten (Wohnen und Gewerbe) basieren auf gemittelten spezifischen Werten aus Simulationen vergleichbarer Projekte (Nutzung, Klima, usw.), in denen Energie für Kühlen, Gebäudestrom (z.B. Pumpen, Ventilatoren), und Nutzerstrom (d.h. Geräte und Beleuchtung, die die Nutzer betreiben) getrennt ausgegeben wurde (s. Abbildung 76). Der spezifische Endenergiebedarf fürs Kühlen wird über eine mittlere Jahresarbeitszahl ermittelt. Für den Gebäudestrom sowie den Nutzerstrom gilt eine Arbeitszahl von 1, da der Strom unmittelbar aus dem Stromnetz bezogen wird. Infolgedessen gilt Endenergie gleich Nutzenergie (s. Abbildung 77).

Die Ermittlung des jährlichen Endenergiebedarfs für das Komplex erfolgt abschließend durch Multiplikation der Flächen mit dem spezifischen Endenergiebedarf. (s. Abbildung 78).

	Kühlen	Gebäudestrc	Nutzerstrom
	kWh/m ² /a	kWh/m ² /a	kWh/m ² /a
Wohnfläche	6.6	5	14
Gewerbe	10	4	18

Abbildung 76: Spezifische Nutzenergie des Gebäudes pro Nutzung

COP	3.5	1	1
	Kühlen	Gebäudestrc	Nutzerstrom
	kWh/m ² /a	kWh/m ² /a	kWh/m ² /a
Wohnfläche	1.9	4.6	14.0
Gewerbe	2.9	3.8	18.0

Abbildung 77: Spezifische Endenergie pro Nutzung

	Fläche	Anteil Fläche	Kühlen	Gebäudestrc	Nutzerstrom	Gesamt
	m ²		kWh/a	kWh/a	kWh/a	kWh/a
Wohnfläche	16000	87%	30'171	73'280	224'000	327'451
Gewerbe	2300	13%	6'571	8'694	41'400	56'665

Abbildung 78: Jährliche Endenergie pro Nutzung

Die jährliche Endenergie wird folglich in viertelstündlichen Werten nach den repräsentativen Lastprofilen des VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft) aufgelöst, sodass ein jährliches Lastprofil entsteht. Die VDEW-Lastprofile sind nach Kundengruppen (Haushalt, Gewerbe, Landwirtschaft) aufgeschlüsselt. Die Erstellung eines Jahreslastverlaufs berücksichtigt Unterschiede zwischen Wochentagen und Wochenenden sowie Jahreszeiten (Winter / Sommer / Übergangszeit). Die Jahresverläufe für die Kundengruppe Haushalt (H0) (Abbildung 79) und Gewerbe allgemein (G0) (Abbildung 80) mit jeweils einem Endenergiebedarf von 1000 kWh/a wurden als Basis herangezogen. Zudem wurden diese skaliert, sodass die resultierenden Endenergiebedarfe zu den obigen Abschätzungen (327 451 kWh/a Wohnfläche, 56 665 kWh/a Gewerbe) passen (Abbildung 81). Das Lastprofil ist auch in Abbildung 82 als Wochenverlauf dargestellt.

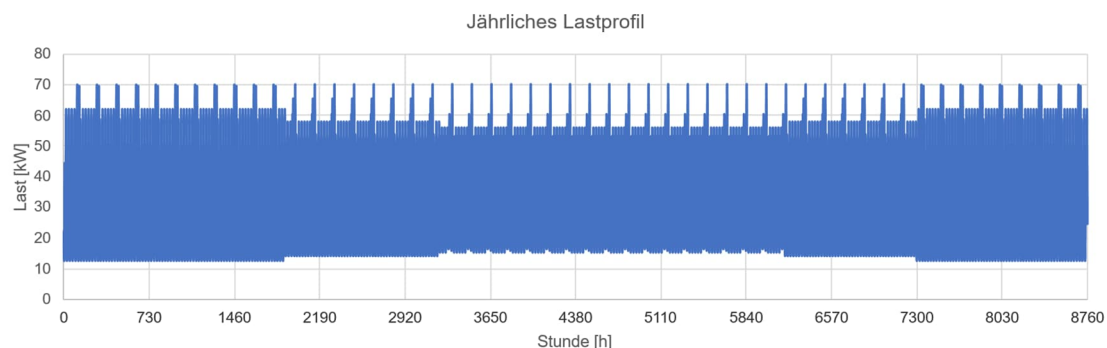


Abbildung 79: Jährliches Stromlastprofil für Wohnfläche, ohne Wärmepumpe für Heizung/Kühlung

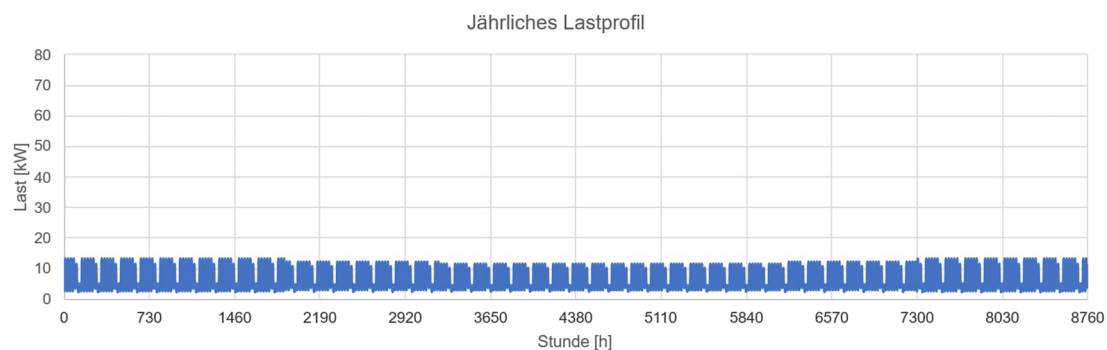


Abbildung 80: Jährliches Stromlastprofil für gewerbliche Fläche, ohne Wärmepumpe für Heizung/Kühlung

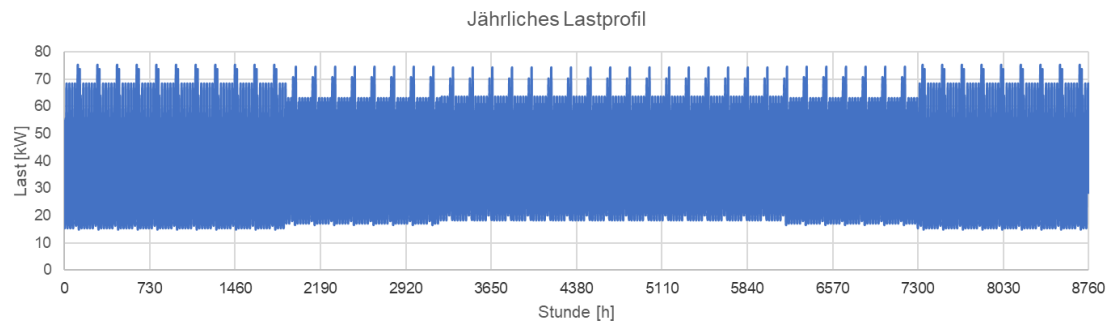


Abbildung 81: Jährliches Stromlastprofil für das Gebäudekomplex (Wohnfläche + Gewerbe), ohne Wärmepumpe für Heizung / Kühlung

E-MOBILITÄT

In der vorliegenden Untersuchung wird die Relevanz des Elektrofahrzeugs für zukunftsorientierte Energie- und Speicherkonzepte erörtert. Im Gegensatz zu anderen Stromlasten, wie beispielsweise Beleuchtung oder Wärmepumpen, fungiert ein Elektrofahrzeug nicht nur als Last, sondern auch als Speicher. Dadurch kann der Deckungsgrad erneuerbarer Energien sowie der Anteil der Eigennutzung gesteigert werden. Die zugrunde liegende Studie geht von einem Besitzanteil von 25 % Elektrofahrzeugen in privaten Haushalten aus, die täglich genutzt werden. Die Batteriegröße wird mit 60 kWh pro Auto angenommen, was dem Durchschnittswert eines mittelgroßen Wagens entspricht. Das Ladeprofil des Aggregats erreicht sein Maximum am Ende des Tages, um 20:00 Uhr, mit 20 % der Batteriekapazität. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Batterien nicht im Laufe des Tages vollständig entladen werden, wenn die Menschen nach Hause zurückkehren. Die Leistung des bezogenen Stroms nimmt nachts ab, während die E-Autos allmählich aufgeladen werden. Die gesamte Ladedauer ist länger als bei einem einzelnen E-Auto, da die Aufladung für unterschiedliche E-Autos zu verschiedenen Uhrzeiten beginnt. Das Lastprofil ist in Abbildung 82 und Abbildung 83 als Wochenverlauf dargestellt.

ZUSAMMENFASSUNG

In Abbildung 82 und Abbildung 83 sind die Lastprofile für die Variante 4 (mit PV, Speicher und Elektroautos) einzeln und als Gesamtlast für den Winterfall und den Sommerfall beispielhaft dargestellt.

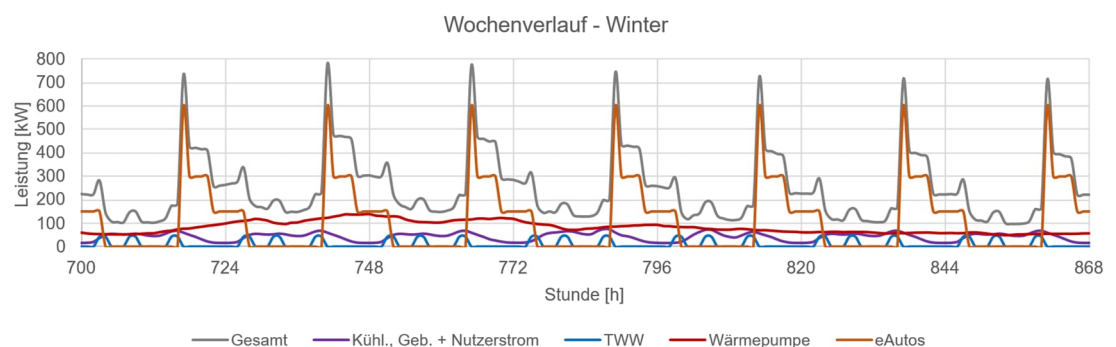


Abbildung 82: Stromlastprofile, Winter Wochenverlauf

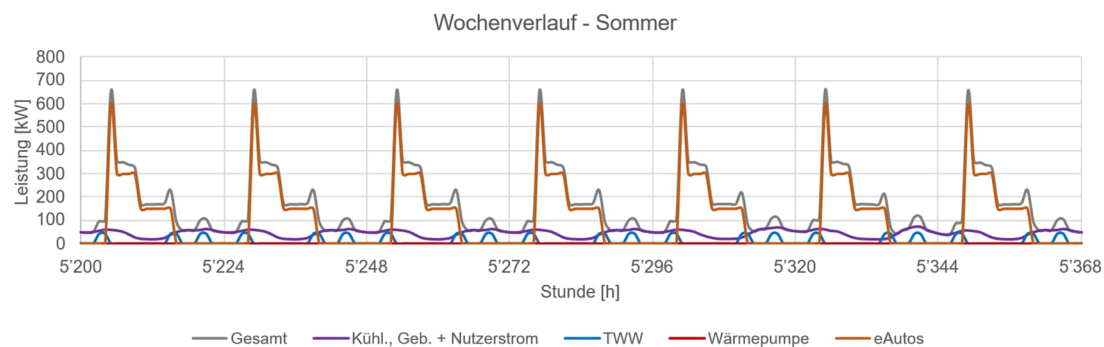


Abbildung 83: Stromlastprofile, Sommer Wochenverlauf

STROMSPEICHERDIMENSIONIERUNG

RECHENMODELL FÜR STROMQUELLEN UND -SENKEN

Im Rahmen der Entwicklung eines Rechenmodells im Softwarepaket Trnsys 18 (für transiente Systeme) wird ein Ansatz konzipiert, der die Wechselwirkungen und Potenziale von erneuerbaren Energien, dem Stromnetz, einem Batteriespeicher und einer elektrischen Last über einen Zeitraum von einem Jahr ermittelt (vgl. Abbildung 85). Die Interaktionen werden durch 21 Zustände oder Modi mit unterschiedlichen Kombinationen der Energiequellen und -senken beschrieben. (s. Beispiele Abbildung 85, Abbildung 86, sowie Gesamtliste Abbildung 87).

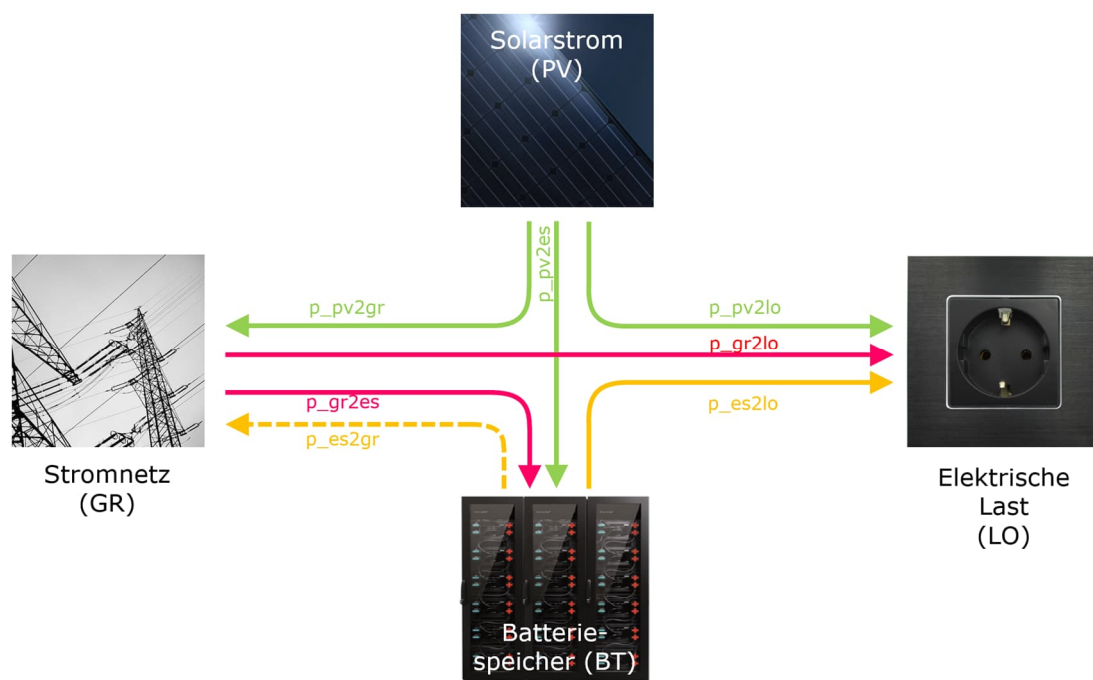


Abbildung 84: Schema des Simulationsmodells

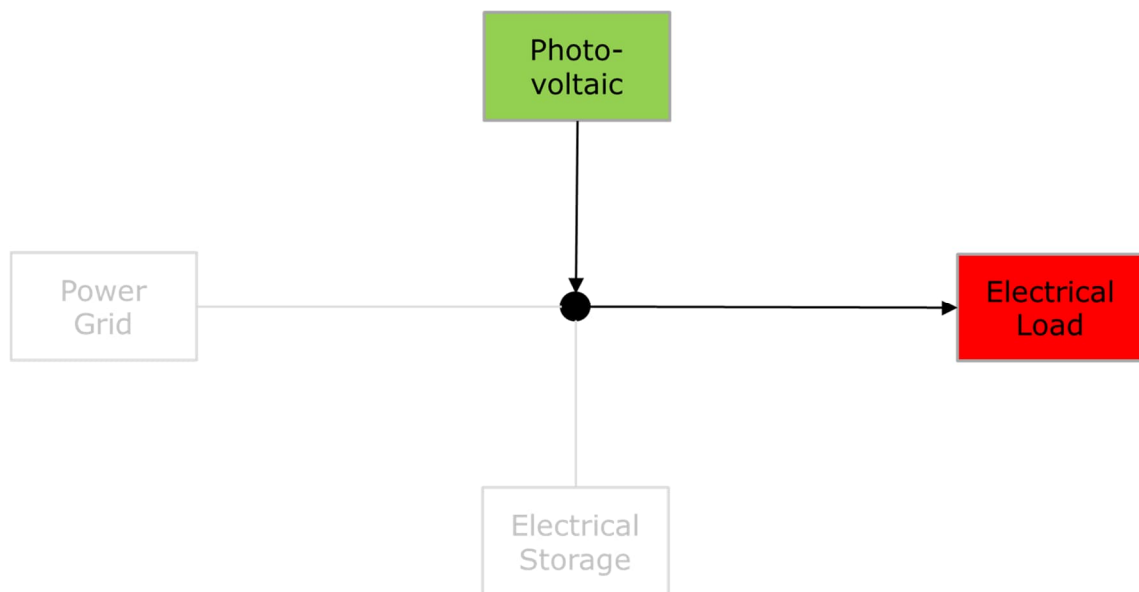


Abbildung 85: Modus 1 - PV als Energiequelle, Stromlast als Energiesenke

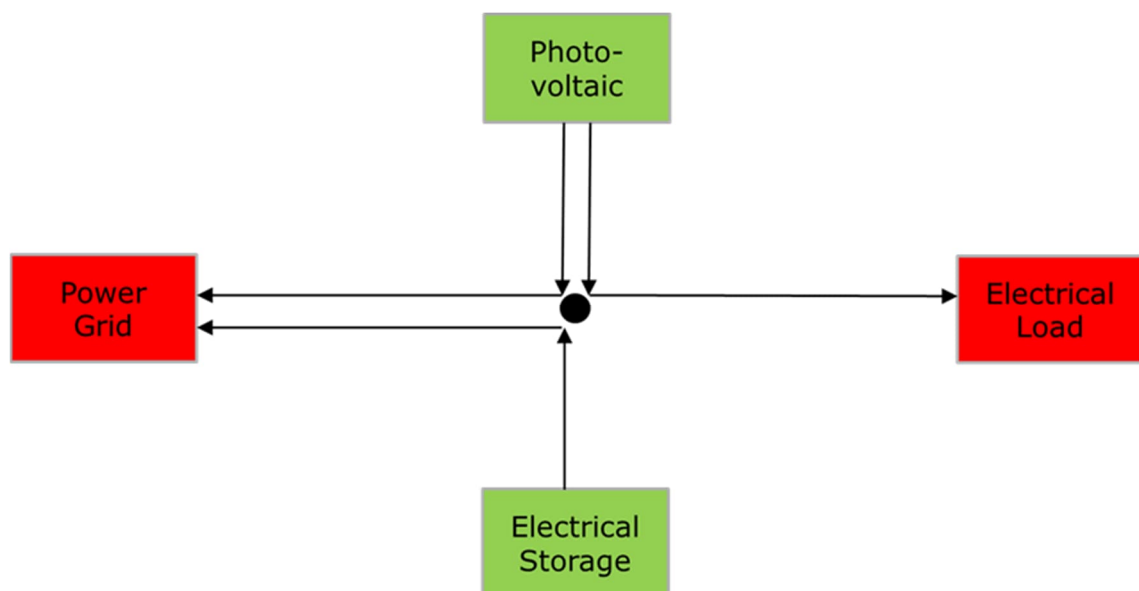


Abbildung 86: Modus 19 - PV und Batteriespeicher als Energiequellen, Stromlast und Stromnetz als Energiesenke

	Quelle	Senke	Q/S	Q/S		
Quelle-Senke	PV	LOAD	ESTORAGE	GRID	Zustand Nr.	Beschreibung
0Q-0S	0	0	0	0	0	keine Leistungsübertragung
1Q-1S	1	-1	0	0	1	
1Q-1S	1	0	-1	0	2	
1Q-1S	1	0	0	-1	3	
1Q-1S	0	-1	1	0	4	
1Q-1S	0	0	1	-1	5	Regelleistung (ES entladen in GR)
1Q-1S	0	-1	0	1	6	
1Q-1S	0	0	-1	1	7	peak shaving (ES laden von GR)
1Q-2S	1	-1	-1	0	8	
1Q-2S	1	-1	0	-1	9	
1Q-2S	1	0	-1	-1	10	
1Q-2S	0	-1	1	-1	11	Regelleistung (ES entladen in GR)
1Q-2S	0	-1	-1	1	12	peak shaving (ES laden von GR)
1Q-3S	1	-1	-1	-1	13	
2Q-1S	1	-1	1	0	14	
2Q-1S	1	-1	0	1	15	
2Q-1S	0	-1	1	1	16	
2Q-1S	1	0	1	-1	17	Regelleistung (ES entladen in GR)
2Q-1S	1	0	-1	1	18	peak shaving (ES laden von GR)
2Q-2S	1	-1	1	-1	19	Regelleistung (ES entladen in GR)
2Q-2S	1	-1	-1	1	20	peak shaving (ES laden von GR)
3Q-1S	1	-1	1	1	21	

Abbildung 87: 21 Modi des Rechenmodells

Projekt-spezifische Eingaben ins Modell umfassen:

- Elektrische Lastprofile (wie im vorherigen Kapitel beschrieben),
- Eigenschaften der Photovoltaikanlage (z.B. Größe in m² und kW, Wirkungsgrad, Neigung),
- Wetterdaten für ein Testreferenzjahr (TRJ) nach dem deutschen Wetterdienst (inklusive solare Einstrahlung, Außentemperatur),
- Eigenschaften des Batteriespeichers (z.B. Kapazität in kWh, Maximale Entladetiefe – Depth of Discharge)

Photovoltaik	Bruttofläche	Anteil	Nettofläche
	m ²		m ²
Dach (30° Neigung, nach S)	2904	80%	2323
Südfassade (90° Neigung)	1430	30%	429
Westfassade (90° Neigung)	5983	30%	1795
Ostfassade (90° Neigung)	5963	30%	1789
Fläche für 1 kWp	6		

Abbildung 88: Anordnung der PV Fläche

Die Realisierung der Photovoltaikanlage erfolgt nicht ausschließlich auf der Dachfläche der Silogebäude, sondern auch als BIPV (Building-Integrated PV). Letzteres steht für die Anbringung von Anlagen an der Gebäudefassade, um das Potenzial des großen Gebäudeensembles als Energieerzeuger zu maximieren und die begrenzte Grundstücksfläche effizient zu nutzen. Die Flächen pro Fassade und deren Wirkungsgrad ist in Abbildung 88 aufgelistet.

Als Wetterdaten wird das extreme Testreferenzjahr für den Standort im Jahr 2045 verwendet, da eine lange Betriebsdauer erzielt wird und diese Herangehensweise einen konservativen Ansatz darstellt.

In Abschnitt Fazit Energiespeichervergleich wird dargelegt, dass im Rahmen dieses Bauvorhabens ein signifikanter Anteil der Batteriekapazität durch die Implementierung der Redox-Flow-Technologie bereitgestellt wird. Diese Lösung wird aufgrund ihrer vielversprechenden Eignung für die Integration in die bestehende Struktur bevorzugt. Zusätzlich wird die Integration bewährter Lithium-Ionen-Technologie zur Abpufferung von Lastspitzen im Stromspeichermix als wesentlicher Bestandteil des Gesamtkonzepts in Betracht gezogen.

Im Gebäudeensemble steht neben ca. 16.000m² Wohnfläche ein Volumen von rund 15 000 m³ Volumen für Batteriespeicher zur Verfügung. In diesem Volumen kann eine Redox-Batterie mit einer Speicherkapazität von 650 MWh installiert werden. Die maximale Entladetiefe beträgt 90 %.

VARIANTENUNTERSUCHUNG

In der vorliegenden Untersuchung werden sechs Varianten sukzessiv mit dem Rechenmodell analysiert (Abbildung 89). Das Gebäudeensemble wird in der Referenzvariante 1 ohne PV-Anlage und ohne Batteriespeicher beschrieben. In der Variante 2 wird eine PV-Anlage berücksichtigt, während in der Variante 3 zusätzlich ein Stromspeicher berücksichtigt wird. In der Variante 4 werden schließlich noch Elektroautos als weitere Verbraucher hinzugefügt.

Var.	Gebäude	Technologien	Anzahl Wohnungen	PV	Sp.	eA	Geschossfläche	PV Fläche	PV Platzierung	Speichergröße	Speichervolumen
							m ²	m ²		MWh	m ³
1	Silos	o. PV	200				18000	0	Silos Dach + Wände	0	0
2	Silos	m. PV	200				18000	6300	Silos Dach + Wände	0	0
3	Silos	m. PV + Speicher	200				18000	6300	Silos Dach + Wände	2	130
4	Silos	m. PV + Speicher + eAutos	200				18000	6300	Silos Dach + Wände	2	130
5	Silos + Viertel	m. PV + Speicher + eAutos	1000				92000	18000	Silos + Viertel	12	780
6	Silos + Stadtteil	m. PV + Speicher + eAutos	10000				915000	200000	Silos + Stadtteil	100	6500

Abbildung 89: Beschreibung der Varianten

Die Berechnungen ergaben, dass für den Gebäudekomplex in den Varianten 2 bis 4 ein Speicher von 2 MWh ausreichend ist, da ein größerer Speicher keinen signifikanten Vorteil bietet. Aus diesem Grund werden in den Varianten 5 und 6 die Möglichkeiten untersucht, wie das Speichervolumen des Gebäudekomplexes im größeren Kontext, etwa als ein Energiespeicher für ein Viertel oder einen Stadtteil genutzt werden kann. In diesen Varianten werden der Autarkie- und der solare Nutzungsgrad konstant gehalten, während die PV-Fläche und die Speichergröße angepasst werden, um das Batteriespeichervolumen zu maximieren. In diesen Fällen übersteigen die PV-Flächen die verfügbare Fläche am Silogebäudekomplex, sodass eine Verteilung auf das Viertel, den Stadtteil und das Umland notwendig wäre.

ERGEBNISSE

Für jede der untersuchten Varianten erfolgt eine Ermittlung des Autarkiegrads, des solaren Nutzungsgrads, der CO₂-Emissionen sowie der CO₂-Einsparungen durch die verschiedenen Ansätze (Abbildung 92). Der Autarkiegrad gibt den Anteil des Energiebedarfs an, der durch PV-erzeugtem Strom gedeckt wird, sowohl durch direkte Verwendung als auch durch Bezug vom Stromspeicher. Dieser Anteil wird im Verhältnis zum Gesamtenergiebedarf ermittelt. Der solare Nutzungsgrad quantifiziert den im Gebäude eingesetzten PV-Strom als Anteil der Gesamtmenge PV-erzeugten Stroms.

$$\text{Autarkiegrad} = \frac{\text{PV- oder Batterie-Strom verbraucht}}{\text{Gesamtstrombedarf}}$$

Abbildung 90: Definition Autarkiegrad als mathematische Formel

$$\text{Solarer Nutzungsgrad} = \frac{\text{PV- oder Batterie-Strom verbraucht}}{\text{PV-Strom erzeugt}}$$

Abbildung 91: Definition Solarer Nutzungsgrad als mathematische Formel

Die CO₂-Emissionen, die im Rahmen des Betriebs entstehen, sind auf den Verbrauch des netzbezogenen Stroms zurückzuführen. Unter der Prämisse, dass die CO₂-intensive Stromerzeugung durch die Verdrängung von Netzstrom zunächst substituiert wird (beispielsweise durch die Abschaltung von Kohle- und Gaskraftwerken), wurde in dieser Analyse der CO₂-Faktor der Kohleverstromung mit 1049 g/kWh [VQ] angesetzt. Eine Reduzierung des Netzstromverbrauchs resultiert demzufolge in einer CO₂-Einsparung.

Bei der Referenzvariante (Variante 1) ist keine PV-Anlage vorhanden, sodass sowohl der Autarkiegrad als auch der solare Nutzungsgrad demzufolge 0 % betragen. In Variante 2, die die Einführung einer PV-Anlage vorsieht, wird der Autarkiegrad auf 33 % gesteigert. Ein Stromspeicher (Variante 3) führt zu einem Autarkiegrad von 50 %. In Variante 4, die Elektroautos einschließt (siehe Abschnitt e-Mobilität), sinkt der Autarkiegrad, da die erzeugte Menge an erneuerbarer Energie der PV gleichbleibt, während der Gesamtenergiebedarf steigt. Gleichzeitig erhöht sich der solare Nutzungsgrad von 61 % (Variante 3) auf 85 % (Variante 4). (s. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden., Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**)

Var.	Gebäude	Technologien	Anzahl Wohnungen	PV	Sp.	eA	Autarkie-grad	Solarer Nutzungs-grad	CO2 Emissionen	CO2 Einsparung
							%	%	t/a	t/a
1	Silos	o. PV	200				0%	0%	800	0
2	Silos	m. PV	200				33%	38%	540	270
3	Silos	m. PV + Speicher	200				50%	61%	400	400
4	Silos	m. PV + Speicher + eAutos	200				31%	85%	1300	560
5	Silos + Viertel	m. PV + Speicher + eAutos	1000				32%	89%	6300	2900
6	Silos + Stadtteil	m. PV + Speicher + eAutos	10000				28%	88%	65700	25800

Abbildung 92: Zusammenfassung der Ergebnisse

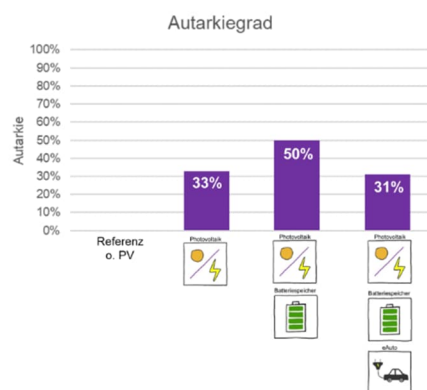


Abbildung 93: Autarkiegrad des Gebäudekomplexes, in Abhängigkeit der berücksichtigten Komponenten

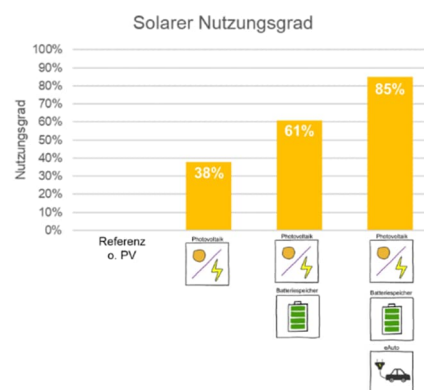


Abbildung 94: Solarer Nutzungsgrad in Abhängigkeit der berücksichtigten Systemkomponenten

Es ist darauf hinzuweisen, dass bei einer Erhöhung der Anzahl der Wohnungen und dem Erreichen eines Autarkiegrads sowie eines solaren Nutzungsgrads, wie sie in Variante 4 erreicht werden, für Variante 5 (1 000 Wohnungen) eine PV-Fläche von 18 000 m² (entsprechend 2,5 Fußballfeldern) sowie ein Speicher mit einer Kapazität von 12 MWh erforderlich sind. Für Variante 6 (10 000 Wohnungen) sind 200 000 m² PV (28 Fußballfelder) und 100 MWh Speicher erforderlich. In Variante 6, trotz der signifikant grösseren Wohnfläche (ca. 10.000 Wohnungen) und einer beachtlichen PV-Fläche (200.000 m² oder 28 Fußballfelder), könnte das Speichervolumen im Gebäudekomplex untergebracht werden (100 MWh statt der maximal möglichen 650 MWh). Dies veranschaulicht das signifikante Potenzial, bestehende Strukturen, wie die Silogebäude in Flensburg, als Großspeicher für erneuerbare Energien im städtebaulichen Kontext zu nutzen.

VERMEIDEN VON CO2 EMISSIONEN DURCH INTEGRATION VON STROMSPEICHER IN DEN SILOGEBÄUDEN IN FLENSBURG

Die CO₂ Einsparungen der verschiedenen Varianten werden in Abbildung 95 als absolute Werte dargestellt und in Abbildung 96 in Relation zum CO₂-Sparpotential eines Waldes visualisiert. Die Darstellung in Abbildung 96 zeigt, dass jedes Baum-Piktogramm das CO₂ Sparpotential einer 50 ha großen Waldfläche oder 300 t/a repräsentiert.

Bei der Referenzvariante (Variante 1), die keine Photovoltaikanlage (PV) enthält, werden keine CO₂-Einsparungen erzielt, sodass der gesamte Strombedarf über das

öffentliche Stromnetz gedeckt werden muss. Bei den Varianten 2 bis 4 steigt die Menge der gesparten CO₂-Emissionen mit jeder zusätzlichen Technologie (PV, Batteriespeicher, Elektroautos) von 270 t/a bis auf 560 t/a an. Variante 5 weist eine etwa fünffach höhere CO₂-Einsparung im Vergleich zu Variante 4 (2.900 t/a oder 480 ha Wald) auf, während Variante 6 eine ca. 46-fach höhere Einsparung (25.800 t/a oder 4.300 ha Wald) erzielt.

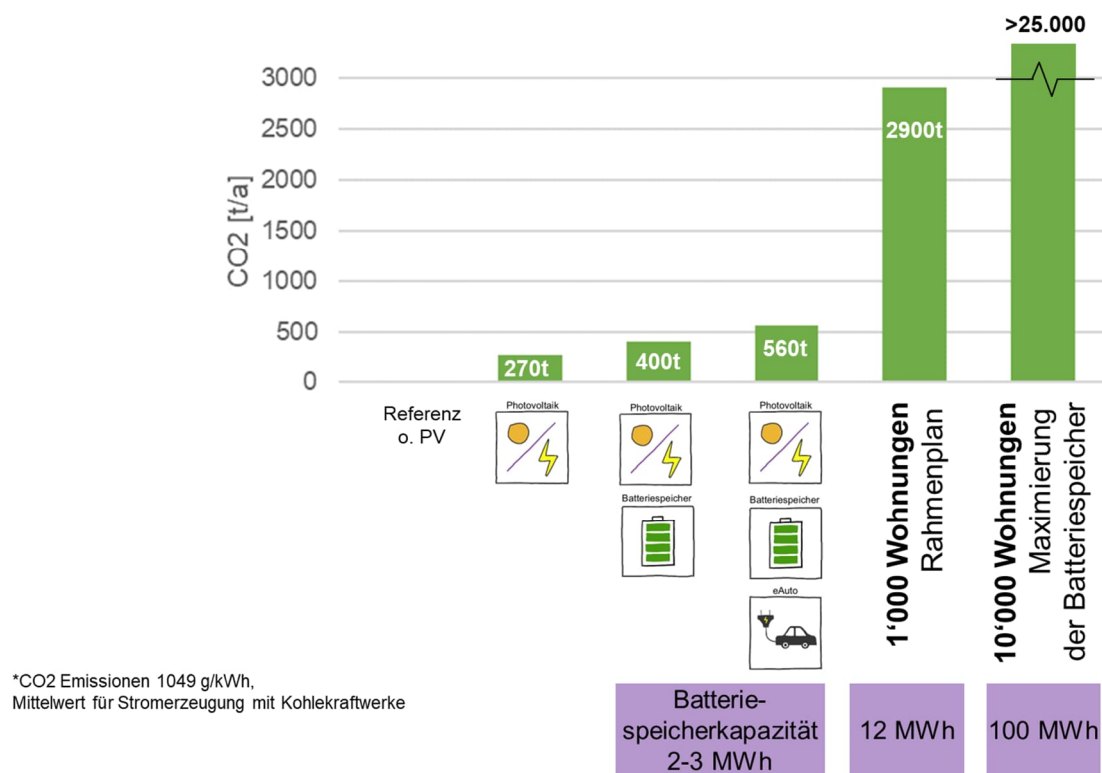


Abbildung 95: CO₂ Einsparungen in Abhängigkeit mit Technologien und Anzahl der Wohnungen

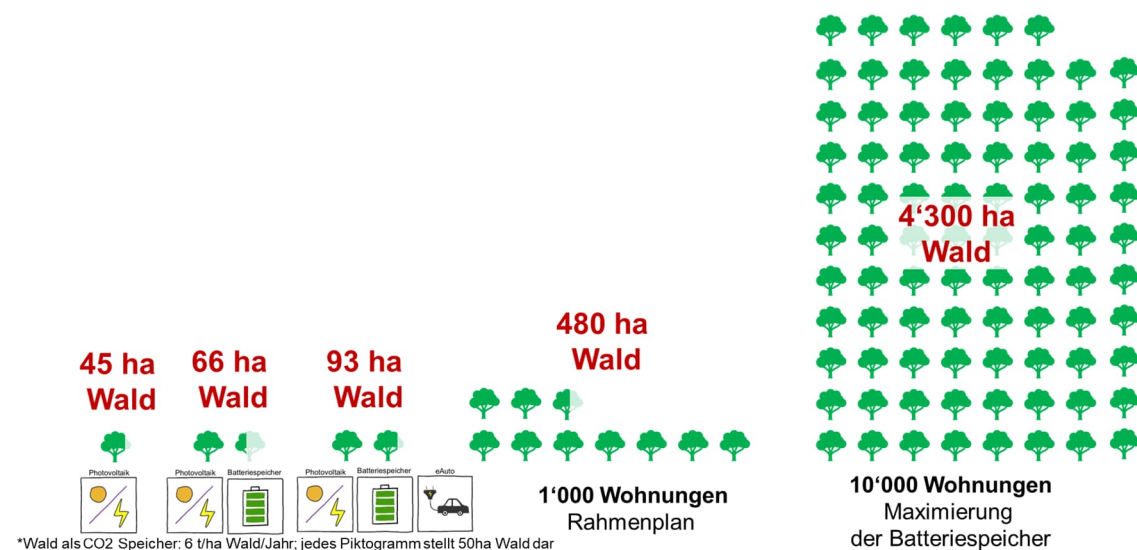


Abbildung 96: CO₂ Einsparungen als Waldfläche

FAZIT NACHHALTIGKEITSSTRATEGIE FÜR DIE SILOUMNUTZUNG IN FLENSBURG

Die Umnutzung der bestehenden Silogebäude in Flensburg stellt eine innovative und nachhaltige Lösung für die Herausforderungen der Gegenwart dar. Durch den Erhalt der Gebäudestrukturen werden im Vergleich zu Neubauten etwa 10.000 Tonnen CO₂ vermieden, was einem signifikanten Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen entspricht. Darüber hinaus wird durch die Umnutzung der Silos in Wohnraum ein deutlicher Mehrwert geschaffen: Insgesamt werden 198 Wohneinheiten geschaffen, was einer Steigerung von 25 % im Vergleich zu den im aktuellen Rahmenplan vorgesehenen Einheiten entspricht.

Das Projekt umfasst jedoch weit mehr als die Schaffung von Wohnraum, sondern integriert ein ganzheitliches, innovatives Energiekonzept, das auf erneuerbaren Energien und moderner Speichertechnologie basiert. Die Installation von Photovoltaik-Anlagen auf Dächern und Fassaden sowie von Windturbinen mit einer Leistung von 5 bis 10 kW auf den Silos dient der maximalen Erzeugung erneuerbarer Energie am Standort. Die Kombination von Wärmepumpen und thermischen Speichern ermöglicht ein effizientes Heiz- und Kühlungssystem, während thermische Speicher zum einen zur Zwischenspeicherung von Wärmeenergie eingesetzt werden und zum anderen eine Sektorkopplung ermöglichen. Darüber hinaus werden verschiedene Arten von Stromspeichern wie Redox-Flow-Batterien und Lithium-Ionen-Speicher integriert. Diese dienen nicht nur der Energieversorgung des Wohnkomplexes selbst, sondern bieten auch die Kapazität, je nach Bedarf und Konfiguration, zwischen 1.000 und 10.000 Haushalte im gesamten Quartier mit Energie zu versorgen.

Das Projekt hat somit das Potenzial, den Autarkiegrad der Energieversorgung deutlich zu erhöhen und die CO₂-Emissionen im Betrieb signifikant zu reduzieren. Die Innovationskraft und Nachhaltigkeit des Vorhabens resultiert in einem Leuchtturmcharakter und macht es zu einem Best-Practice-Beispiel für zukünftige, ähnliche Projekte. Die Umnutzung der Silogebäude in Flensburg stellt eine ganzheitliche, nachhaltige Lösung dar, die sowohl ökologische als auch soziale Aspekte berücksichtigt und als Modell für andere ungenutzte große Gebäudestrukturen dienen kann.

ÖKONOMIE DES PROJEKTS**FINANZIERUNGSMODELLE**

Ausgangsbasis für die Ermittlung der entsprechenden Finanzierungsmodelle waren folgende Prämissen:

Berücksichtigung verschiedener Bevölkerungsschichten bei der Entwicklung: Dies ist aus mehreren Gründen wichtig, da sie sowohl soziale als auch wirtschaftliche Vorteile bietet und zur langfristigen Stabilität eines Quartiers beiträgt. Eine soziale Durchmischung verhindert räumliche Segregation und die Bildung sozialer Brennpunkte, indem sie unterschiedliche Bevölkerungsgruppen zusammenbringt. Außerdem stärkt diese Konzeption den gesellschaftlichen Zusammenhalt und die Integration von Minderheiten in die Mehrheitsgesellschaft. Die Wertstabilität von Immobilien wird ebenfalls durch eine ausgewogene soziale Mischung gefördert, da diese das Image des Quartiers verbessert und Investitionen attraktiver macht. Das Finanzierungsmodell ist daher nicht auf kurzfristigen Return on Investment ausgelegt, sondern auf langfristige Wertstabilität. Aus diesem Grund sind auch nur ca. 30% als Eigentumswohnungen geplant, die jedoch als wesentlicher Finanzierungsbaustein dienen. Die mehrheitlichen Flächen sollen im Mietmodell langfristig im Bestand gehalten werden, bevorzugt durch eine städtische Wohnungsbaugesellschaft, die eher der Wohnraumversorgung verpflichtet ist, als hohe Renditen gegenüber Anlegern zu generieren.

SCHLÜSSELMAßNAHMEN UND PROJEKTSTRUKTUR:**1. Grundstückssicherung und Planungsrecht:**

Die Stadt übernimmt die Sicherung des Grundstücks und schafft Planungsrecht für Wohnen und Gewerbe. Dies ist eine notwendige Grundlage, um das Projekt rechtlich und städtebaulich abzusichern.

2. Projekt-Strukturvarianten:

Zwei mögliche Modelle werden vorgeschlagen:

- a) Variante 1: Ein Projektentwicklungsunternehmen fungiert als Service-Developer für eine kommunale Wohnungsbaugesellschaft / -genossenschaft.
- b) Variante 2: Ein Projektentwicklungsunternehmen arbeitet im Joint Venture (JV) mit einem anderen regionalen Entwickler / Bestandshalter zusammen.

3. Nutzungsmix und Wohnkonzept

Nutzungsmix:

- a) 30% Eigentumswohnungen
- b) 15% freifinanzierter Wohnungsbau
- c) 50% geförderter Wohnungsbau
- d) 5% Gewerbeflächen
- e) Wohnungsmix:
- f) Wohnungen von 2 bis 5 Zimmern sowie Clusterwohnungen, um verschiedene Zielgruppen anzusprechen.

WIRTSCHAFTLICHE ECKDATEN UND FINANZIERUNGSSTRUKTUR:

- a) Gesamtkosten (GK): Die Gesamtkosten belaufen sich auf ca. 87 Mio. EUR (4.800 EUR brutto / qm Nutzfläche).
- b) Projektfinanzierung:
 - a. Eigenkapital (EK): 24 Mio. EUR (27%)
 - b. Fremdkapital (FK): 52 Mio. EUR (60%) über ein Konsortium regionaler Banken
 - c. Förderzuschuss: 11 Mio. EUR (13%)
- c) Verkaufsvolumen und Einnahmen:
 - a. Verkaufsvolumen der Eigentumswohnungen: ca. 40 Mio. EUR.
 - b. Übernahme der Bestandseinheiten für die Bewirtschaftungsphase zu Gestehungskosten von ca. 35 Mio. EUR. Diese können wie folgt finanziert werden:
 - i. Eigenkapital: 13 Mio. EUR (37%)
 - ii. Fremdkapital: Bankdarlehen: 18 Mio. EUR (50%)
 - iii. Förderdarlehen: 4 Mio. EUR (13%)
- d) Mieteinnahmen in der Bewirtschaftungsphase:
 - a. Jahr 1: ca. 1,5 Mio. EUR p.a.
 - b. Anfangsrendite bezogen auf das Eigenkapital: ca. 2% vor Steuern
 - c. Durchschnittliche Rendite über einen Zeitraum von 15 Jahren beträgt ca. 4-5%.

BEWERTUNG DER ÖKONOMISCHEN MACHBARKEIT:

- a. Stärken des Projekts:
 - Hoher Förderanteil (13%) reduziert die Eigenkapitalbelastung.
 - Nutzungsmix mit hohem Anteil an gefördertem Wohnraum entspricht politischen Zielen.
 - Solide Finanzierungsstruktur durch regionale Banken stärkt die lokale Wirtschaft.
 - Langfristige Renditeaussichten von durchschnittlich ca. 4-5% sind attraktiv für Investoren bzw. Bestandhalter.
- b. Herausforderungen:
 - i. Hohe Baukosten von ca. 4.800 EUR / qm könnten Risiken bei der Rentabilität bergen.
 - Abhängigkeit von Fördermitteln erfordert stabile politische Unterstützung.
 - Komplexität durch denkmalgeschützte Bausubstanz erhöht potenzielle Risiken in der Bauphase.
 - Ansonsten sind die üblichen Projektrisiken zu beachten wie z.B:
 1. Marktrisiken (Nachfrageschwankungen, Preisvolatilität)
 2. Finanzierungsrisiken (Zinsänderungen, Liquidität)
 3. Bau- und Fertigstellungsrisiken
 4. Rechtliche und regulatorische Risiken

ZWISCHENFAZIT

Das Projekt "Flensburg Silos" zeigt eine grundsätzlich positive ökonomische Machbarkeit, insbesondere durch die solide Finanzierungsstruktur, den Nutzungsmix und die langfristigen Renditeaussichten. Die Umsetzung hängt jedoch stark von einer effektiven Kostenkontrolle, politischer Unterstützung und einer effizienten Zusammenarbeit zwischen den Akteuren ab.

FAZIT

Der hier vorgestellte Ansatz ist auf zwei Ebenen zu betrachten:

- . Nutzung logistisch-industrieller Strukturen wie z.B. Silos für die Umnutzung zu Wohnraum und Energiespeicher im Allgemeinen
- . Einbettung des Konzepts in den Kontext des Flensburger Rahmenplans Hafen-Ost und die politische Diskussion auf Landesebene

UMNUTZUNG ZU WOHNRAUM UND ENERGIESPEICHER IM ALLGEMEINEN

Beim Referenzstudium stellen wir fest, dass sich viele Silos auf Liegenschaften befinden, welche ohnehin im Fokus städtebaulicher Umnutzungsprojekte stehen. Dies bestätigt eine grundsätzliche Attraktivität der Lage, welche sich häufig auszeichnet durch räumliche Nähe zur Innenstadt und / oder Wasserlage.

Zunehmendes Interesse an und Sensibilität gegenüber Bestandserhalt [Bauwesen] in Politik und Verwaltung sowie vor allem in der Gesellschaft macht die spezifische Betrachtung ebensolcher Gebäudestrukturen so wichtig wie interessant als Impuls für neue Quartiere sowie als potenziellen Ort für die Zwischenspeicherung regenerativ erzeugter Energie.

Im Falle der Flensburger Förde diskutieren wir den Erhalt der Silos u.a. im Kontext des Denkmalschutzes [siehe oben]. Die Ergebnisse dürften beispielhaft sein für die Betrachtung anderer, ähnlich gelagerter Beispiele. In dieser Diskussion entstehen neue Argumente, die jenseits denkmalschützerischer Aspekte für den Erhalt der Strukturen sprechen.

In dieser Studie geht es um die Nutzung als Wohnraum. Ob und wie gut sich die Strukturen dafür eignen, hängt neben der Gebäudestruktur maßgeblich von der Lage der Grundstücke ab und ist im Einzelfall zu untersuchen. Fest steht nicht zuletzt durch die angeführten Referenzen, dass sich die hier betrachteten Strukturen ebenso gut für anderweitige Nutzungen einsetzen lassen. Der Umfang des Eingriffs, vor allem der Schneidarbeiten an der Struktur, bedarf intensiver kritischer Betrachtung, da diese Arbeiten aufwendig und zeitintensiv sind.

Die Umnutzung wie hier aufgezeigt kann den architektonischen Diskurs um die Erhaltung des Bestands bereichern und mit der dezentralen Bereitstellung gespeicherter Energie einen erheblichen Beitrag zur Energiewende -sowohl auf Seiten der Nutzer:innen wie in der Energiewirtschaft- leisten.

DIE SILOS IM KONTEXT DES FLENSBURGER RAHMENPLANS HAFEN-OST

Wir konnten den Flensburger SUPA mit unserer Arbeit davon überzeugen, dass der Nicht-Abriss der Silos aus ökobilanzieller Sicht erheblich sinnvoller ist als der Abriss mit Umsetzung des an der Stelle geplanten, geringeren Umfangs an Wohnungen. In der weiteren Bearbeitung wäre die Qualität der Kaimauern, der Gründung, der Betongüte der Siloschächte nebst etwaigen Belastungen genauer zu untersuchen, um präzisere Aussagen über Notwendigkeit und Umfang von Ertüchtigungsmaßnahmen treffen zu können. Gegenwärtig wird der Rahmenplan Hafen-Ost nicht weitererfolgt, da man die Umwidmung des Hafengebiets auf höherer politischer Ebene diskutiert. Ein Beschluss zur Einstellung des Rahmenplans würde die Ausgangslage für die Umnutzung der Silos zu Wohnraum grundlegend ändern. Da die Silos gegenwärtig nicht genutzt werden und sie im Süden direkt an eine Wohnbebauung grenzen, erscheint uns eine Umnutzung auch ohne Durchführung des Rahmenplans Hafen-Ost sinnvoll und möglich. Im Falle eines Weiterbetriebs der Hafenwirtschaft wären vor allem die von dort ausgehende Lärmentwicklung in die Planung mit einzubeziehen.

QUELLEN

LITERATUR

[AEE23]	Agentur für Erneuerbare Energien e.V.: <i>Durch Einspeisemanagement verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien</i> , 2023, https://www.unendlich-viel-energie.de/mediathek/grafiken/durch-einspeisemanagement-verlorene-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien2 (13.01.2025)
[Blu25]	BlueSkyEnergy, <i>Aquion S30-0080 Battery – Data Sheet</i> , https://provisionsolar.com/wp-content/uploads/2016/10/Aquion-S-30-Battery-Data-Sheet.pdf , (13.1.25)
[KIT20]	Karlsruher Institut für Technologie, <i>Energiewende: Dezentrale Energieversorgung durch innovative Strom-Wärme-Kopplung</i> , https://www.kit.edu/kit/pi_2020_107_energiewende-dezentrale-energieversorgung-durch-innovative-strom-warme-kopplung.php , (Pressemitteilung vom 02.12.20)
[KIT23]	Telefonat mit Dr.-Ing. Christian Kupper, KIT, am 25.08.23
[Ene23]	Greenhouse Media GmbH: <i>Energiespeicher-Technologien im Überblick</i> ; https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/oekostrom/energiespeicher#c17315 (13.01.2025)
[ESS25]	E22 Energy Storage Solutions, <i>DATASHEET 250kW 1,000kWh</i> , https://provisionsolar.com/wp-content/uploads/2016/10/Aquion-S-30-Battery-Data-Sheet.pdf (13.01.2025)
[Fig23]	FIGGENER, J., HECHT, C., HABERSCHUSZ, D., BORS, J., SPREUER, K., KAIRIES, K., STENZEL, P., SAUER, D.: <i>The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023)</i> , 2023, DOI: 10.48550/arXiv.2203.06762, www.battery-charts.de
[IEA25]	International Energy Agency (IEA): <i>ETP Clean Energy Technology Guide</i> , https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?layout=tree&selectedTechID=all , 2024
[Kwa20]	Kwabi, D., Yunlong, J., Aziz, M.: <i>Electrolyte Lifetime in Aqueous Organic Redox Flow Batteries: A Critical Review</i> , https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.9b00599 Chemical Reviews, Vol. 120/14, 2020.
[Ler18]	Lerbinger, A.: <i>Stromspeichersysteme: Übersicht und aktueller Stand in Deutschland und Frankreich</i> , DFBEW, 2018, Berlin
[PA23]	Pestel Institut für Systemforschung/Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. (Hrsg.): <i>Bauen und Wohnen in der Krise - Aktuelle Entwicklungen und Rückwirkungen auf Wohnungsbau und Wohnungsmärkte</i> ; Hannover/Kiel, Februar 2023
[Ste14]	STERNER, M., STADLER, I.: <i>Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration</i> , Springer-Vieweg, 2017
[Qua24]	QUASCHNING, V.: <i>Spezifische Kohlen-dioxid-emissionen verschiedener Brennstoffe</i> . https://volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index.php (26.12.2024)

ABBILDUNGEN

Abbildung 1 – Im Zuge der Studie befragte und betrachtete Gesellschaften aus Forschung und Industrie	6
Abbildung 2 - FNP der Stadt Flensburg	9
Abbildung 2 Lage der Silos im Bundesgebiet Quelle: QGIS, Wikipedia	12
Abbildung 3 – Quelle: Bing	13
Abbildung 4 - – Quelle: Bing	13
Abbildung 5 - – Quelle: Bing	14
Abbildung 3 - KORNVERSUCHSSPEICHER, Europacity Berlin, AFF Architekten, Foto: TJARK SPILLE	15

Abbildung 4 Atelier Deshaus: Minsheng Dock Silo renovation; Quelle: https://www.behance.net/gallery/59550679/Minsheng-Dock-Silo-renovation-Atelier-Deshaus?locale=fi_FI	15
Abbildung 8 – Brandlhuber + - Prototypenwerkstatt; Quelle: https://bplus.xyz/en/projects/0154.2-prototyping-workshop	15
Abbildung 9 – COBE: the silo; Quelle: https://www.cobe.dk/projects/the-silo	15
Abbildung 10 - bhl Architekten von Bassewitz Limbrock Partner GmbH; Quelle: https://das-silo.de/konzept/	16
Abbildung 11 - O-office Architects; Industrie-Silo in Shenzhen, Quelle: https://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Installation_Industrie-Silo_in_Shenzen_umgenutzt_3519281.html	16
Abbildung 12 – Ricardo Bofill, La Fabrica, Quelle: https://www.houzz.de/fotos/ricardo-bofill-taller-de-arquitectura-headquarters-phvw-vp~41848003	16
Abbildung 13 – Wernik Holtkamp Architekten, Zwarte Silo, Quelle: https://www.houzz.de/fotos/ricardo-bofill-taller-de-arquitectura-headquarters-phvw-vp~41848003	16
Abbildung 5- Nutzungsverteilung,, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 28	19
Abbildung 6 - Grundriss EG ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 29	19
Abbildung 7 - Grundriss Regelgeschoss ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 26	19
Abbildung 8- Längsschnitt ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 27	20
Abbildung 9 - Blick aus Innenstadt und Förde-Westufer , Foto: Timon Oberfeld	21
Abbildung 10 - Visualisierung der umgebauten Silos, Rendering: Atelier Tata	21
Abbildung 11 - KORNVERSUCHSSPEICHER, Europacity Berlin,, AFF Architekten, Foto: TJARK SPILLE	22
Abbildung 12 - Bestandsaufnahme der Siloanlagen vom 13.03.2023	23
Abbildung 13 - Schnitt durch alle Silos am Ballst Kai, ohne Maßstab	24
Abbildung 14 - Blick von Osten auf den 1980 errichteten Speicher, Durchfahrt zur Förde	24
Abbildung 15 - Blick auf die 1969 errichteten Stahlbetonzylinder im Süden des Grundstücks	24
Abbildung 16 - Maschinenbereich des 1959 errichteten Speichers mit Blick über die Förde auf die Flensburger Innenstadt	25
Abbildung 17 - Blick auf Fassade des HaGe-Speichers, Bj 1980	26
Abbildung 18 - Grundriss Regelgeschoss Wohnen ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 43	27
Abbildung 19 - Grundriss Clusterwohnung ohne Maßstab, aus Präsentation vom 10.10.2023, Seite 43	27
Abbildung 20 - Ansicht von Westseite der Förder, ohne Maßstab	28
Abbildung 21 - Abbildung - Ansicht Silogebäude mit Nummerierung	28
Abbildung 22 - Abbildung - Luftbild Silogebäude mit Nummerierung	29
Abbildung 23 - Übersicht Baumasse Ballst Kai 10/10a	30
Abbildung 24 - Silo-Gebäude A1	31
Abbildung 25 - Bestandsschnitt Gebäude A1	32
Abbildung 26 - Bestandsschnitt Gebäude A1	32
Abbildung 27 - Bestandsgrundrisse Obergeschoße Gebäude A1	33
Abbildung 28 - Bestandsgrundrisse Erdgeschoß und 1. Obergeschoß Gebäude A1	34
Abbildung 29 - 8-geschossiges Industriegebäude (Pressenhaus I + II + III), Baujahr ca. 1970	35
Abbildung 30 - Bestandsschnitt Silogebäude B2	36
Abbildung 31 - Grundrisse Bestandsgebäude B2	37
Abbildung 32 - Schnitte und Grundrisse Bestandsgebäude C	39
Abbildung 33 - Ansicht Silo-Gebäude D2	40
Abbildung 34 - Foto Rundsilos Gebäude D4	41
Abbildung 35 - Bestandsschnitt Silogebäude D4	42
Abbildung 36 - Zellengrundriss Silogebäude D4	43
Abbildung 37 - Bestandsgrundriss EG Silogebäude D4	44
Abbildung 38 - Tragwerk Decken - logistisches Konzept	45

Abbildung 39 - Beispiel Auflager mittels Versatz	45
Abbildung 40 - grafische Programmierung des Bestands mittels Grasshopper und Rhino	46
Abbildung 41 - 3D Gebäudemodell des Bestands	47
Abbildung 42 - Kreislaufgerechte Holzbauplanung	48
Abbildung 43 - Qualitatives Schaubild - CO2 Speicherung im REUSE-Szenario	48
Abbildung 44 - Qualitatives Schaubild – CO2 Speicherung im Neubauszenario	49
Abbildung 45 - Vergleich des Global Warming Potentials (GWP) verschiedener Deckenkonstruktionen	49
Abbildung 46 - Lebenszyklusbetrachtung Tragwerk	50
Abbildung 47 - Speicherung Kohlendioxid im Holztragwerk	50
Abbildung 48 - Vergleich Neubau in Ortbetonbauweise mit Entwurf (Bestandserhalt und Holzbau)	51
Abbildung 49: Schnitt und Grundriss der Getreidesilos in Flensburg. Farblich markiert nach vorgesehenen Nutzungen. In Orange der Raum für Energiespeicher	57
Abbildung 50: Vergleich verschiedener Speichertechnologien nach Entladedauer und Speicherkapazität [Ene23] nach [Ste14]	58
Abbildung 51 - Durch Einspeisemanagement (Drosseln) verlorene Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien, [AEE23]	59
Abbildung 52 - Installierte Batteriekapazität in Deutschland, Stand 1.2025, Bildquelle: www.battery-charts.de nach [Fig23]	59
Abbildung 53: Konzeptskizze zum Einbau von Batteriezellen im Getreidesilo. Links Schnitt durch ein Silo, rechts Grundriss eines Silogebäudes mit gemischter Nutzung	63
Abbildung 54: Konzeptskizze zum Einbau einer Redox-Flow-Batterie in den Getreidesilos. Links Schnitt eines Silos mit eingesetztem Elektrolyttank. Rechts Schnitt durch ein Silogebäude mit Elektrolyttanks über Zentralem Technikraum mit Leistungseinheiten.	64
Abbildung 55: Konzeptskizze zum Einbau eines Warmwasserspeichers in den Getreidesilos. Links Schnitt eines Silos, rechts Grundriss eines Silogebäudes mit verschiedenen Nutzungen	65
Abbildung 56: Konzeptskizze zum Einbau einer Carnot-Batterie in den Getreidesilos in Flensburg. Links Schnitt durch ein Silo mit eingesetztem Hochtemperaturwärmespeicher, rechts Gebäudeschnitt mit Flüssigsalztanks oben, darunter Maschinenhalle und darunter Wohnraum.	66
Abbildung 57: Skizze zum Funktionsprinzip eines PVT-Kollektors	68
Abbildung 58: Foto eines PVT-Kollektor-Mockups bei der Erprobung bei Transsolar	68
Abbildung 59: Konzeptskizze Energieversorgung umgenutzter Silos	69
Abbildung 60: Schema des Energiekonzepts für das Gebäudeensemble, mit allen Hauptkomponenten	70
Abbildung 61: Ergebnis Besonnungsstudie, SW-Ansicht	71
Abbildung 62: Ergebnis Besonnungsstudie, NO-Ansicht	71
Abbildung 63: Skala, Spezifische solare Einstrahlung	71
Abbildung 64: Windrose für den Standort Flensburg	72
Abbildung 65: Heizleistung vs. Außentemperatur, 1-Knoten Modell	73
Abbildung 66: Spezifische Nutzenergie des Gebäudes pro Nutzung	74
Abbildung 67: Spezifische Endenergie pro Nutzung	74
Abbildung 68: Jährliche Endenergie pro Nutzung	74
Abbildung 69: Jährliches Stromlastprofil für Wohnfläche, ohne Wärmepumpe für Heizung/Kühlung	74
Abbildung 70: Jährliches Stromlastprofil für gewerbliche Fläche, ohne Wärmepumpe für Heizung/Kühlung	74
Abbildung 71: Jährliches Stromlastprofil für das Gebäudekomplex (Wohnfläche + Gewerbe), ohne Wärmepumpe für Heizung / Kühlung	75
Abbildung 72: Stromlastprofile, Winter Wochenverlauf	75
Abbildung 73: Stromlastprofile, Sommer Wochenverlauf	76
Abbildung 74: Schema des Simulationsmodells	76
Abbildung 75: Modus 1 - PV als Energiequelle, Stromlast als Energiesenke	77
Abbildung 76: Modus 19 - PV und Batteriespeicher als Energiequellen, Stromlast und Stromnetz als Energiesenke	77

Abbildung 77: 21 Modi des Rechenmodells	78
Abbildung 78: Anordnung der PV Fläche	78
Abbildung 79: Beschreibung der Varianten	79
Abbildung 80: Definition Autarkiegrad als mathematische Formel	79
Abbildung 81: Definition Solarer Nutzungsgrad als mathematische Formel	79
Abbildung 82: Zusammenfassung der Ergebnisse	80
Abbildung 83: Autarkiegrad des Gebäudekomplexes, in Abhängigkeit der berücksichtigten Komponenten	80
Abbildung 84: Solarer Nutzungsgrad in Abhängigkeit der berücksichtigten Systemkomponenten	80
Abbildung 85: CO2 Einsparungen in Abhängigkeit mit Technologien und Anzahl der Wohnungen	81
Abbildung 86: CO2 Einsparungen als Waldfläche	81

ENDNOTEN

¹ [https://www.ihrs.de/fileadmin/Content/PDF_und/Images/Hafen-](https://www.ihrs.de/fileadmin/Content/PDF_und/Images/Hafen-Ost/Download/230206_8Seiter_BroschuereA4_Rahmenplan_Einzelseiten-WEB.pdf)

[Ost/Download/230206_8Seiter_BroschuereA4_Rahmenplan_Einzelseiten-WEB.pdf](https://www.ihrs.de/fileadmin/Content/PDF_und/Images/Hafen-Ost/Download/230206_8Seiter_BroschuereA4_Rahmenplan_Einzelseiten-WEB.pdf)

² <https://www.bundesstiftung-baukultur.de/publikationen/pdf-zum-download/baukulturberichte>

³ Daniel Fuhrhop; Verbietet das Bauen!; 224 Seiten; Softcover; ISBN-13: 978-3-96238-194-3; oekom Verlag; München

⁴ Inken Baller hält ihren letzten Vortrag am 07.01.2025 im Architekturforum der Fachhochschule Erfurt

⁵ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Klimaschutz/gebaeudestrategie-klimaneutralitaet-2045.html>

⁶ <https://www.next-kraftwerke.de/tag/demand-side-management>

⁷ „Die Internationale Elektrotechnische Kommission geht 2007 von einem Übertragungsverlust vom Kraftwerk bis zum Verbraucher zwischen 8 % und 15 % aus“, aus: Wikipedia -

<https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cbertragungsverlust#:~:text=Die%20Internationale%20Elektrotechnische%20Kommission%20geht,8%20%25%20und%2015%20%25%20aus>

⁸ Aus: Flensburg - Hafen-Ost Vorbereitende Untersuchungen nach §141 BauGB mit integriertem städtebaulichem Entwicklungskonzept Stand: 22.01.2019 (Entwurf zum Ratsbeschluss am 21.02.2019), Seite 12

⁹ Aus: Flensburg - Hafen-Ost Vorbereitende Untersuchungen nach §141 BauGB mit integriertem städtebaulichem Entwicklungskonzept Stand: 22.01.2019 (Entwurf zum Ratsbeschluss am 21.02.2019), Seite 18

¹⁰ FNP: chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.flensburg.de/PDF/FI%C3%A4chennutzungsplan_in_aktueller_Fortschreibung.PDF?ObjSvrID=2306&ObjID=10233&ObjLa=1&Ext=PDF&WTR=1&ts=1681213806

¹¹ <https://www.ihrs.de/stadterneuerung/hafen-ost>

¹² Telefonat Markus Lager mit Bürgermeister [Henning Brüggemann](#) vom xx.12.2024

¹³ Aus: Flensburg - Hafen-Ost Vorbereitende Untersuchungen nach §141 BauGB mit integriertem städtebaulichem Entwicklungskonzept Stand: 22.01.2019 (Entwurf zum Ratsbeschluss am 21.02.2019), Seite

¹⁴ Siehe Rahmenplan in der Fassung November 2022, https://www.ihrs.de/fileadmin/Content/PDF_und/Images/Hafen-Ost/Download/221116_FHO-Rahmenplan_A1_NOV22_FINAL.pdf

¹⁵ <https://de.wikipedia.org/wiki/Ballastkai-Speicher>

¹⁶ Aus: Flensburg - Hafen-Ost Vorbereitende Untersuchungen nach §141 BauGB mit integriertem städtebaulichem Entwicklungskonzept Stand: 22.01.2019 (Entwurf zum Ratsbeschluss am 21.02.2019), Seite 17

¹⁷ 2. Öffentlichkeitsveranstaltung Flensburg Hafen-Ost, Präsentation auf Veranstaltung und Rahmenplan Zukunft Hafen-Ost – Hafenband + maritim. grün. gemeinschaftlich.

¹⁸ siehe hierzu hierzu Kapitel 2. Leitbild und Strukturkonzept sowie 3. Städtebau im Erläuterungstext zum Städtebaulichen Rahmenplan vom November 2022, Autoren: CITYFÖRSTER architecture + urbanism Urban Catalyst R+T Verkehrsplanung im Auftrag der Stadt Flensburg

¹⁹ siehe Präsentation 230910_SILOS_SUPA_Optimized.pdf, Seite 19-21

²⁰ Quelle: <https://www.aff-architekten.com/story/40/sanierung-und-transformation-kornversuchsspeicher-in-berlin.html>

²¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Ballastkai-Speicher>

²² Die Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. in Kiel stellt die Förderfähigkeit des potenziell zu schaffenden Wohnraums nach Prüfung der Grundrisse dem Grunde nach und bekräftigt den Bedarf „solcher Projekte“ im Telefonat Walberg – Lager