

Abschlussbericht des Green Start-Up Programms gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Kosten- und energieeffiziente Energiespeicherlösung für
Industrie- & Netzanwendungen



Autoren: M.Sc. Alexander Börgel & M.Sc. Niko Dalke

für

Hypnetic GmbH
Engelbosteler Damm 126
30167 Hannover

Az 35503/51

Datum: 21.02.2024

Inhalt

1.	Abbildungsverzeichnis.....	2
2.	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.	Zusammenfassung.....	3
4.	Einleitung.....	4
5.	Hauptteil.....	6
5.1.	Bereich 1: Betriebswirtschaft, Verwaltung, Organisation.....	6
5.2.	Bereich 2: Prototyp.....	6
5.3.	Bereich 3: Seed-Finanzierung.....	9
5.4.	Bereich 4: Management-System.....	10
5.5.	Bereich 5: Marketing und Vertrieb.....	15
5.6.	Bereich 6: Human Resource.....	19
6.	Fazit.....	20
7.	Literaturverzeichnis.....	21

1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kernprozesse zur Patentanmeldung (Bereich 1).....	6
Abbildung 2:	Prototyp der Hypnetic GmbH.....	7
Abbildung 3:	Funktionsschema des Prototyps.....	7
Abbildung 4:	Prototyp-Versuch zur Drehzahl-Regelung.....	7
Abbildung 5:	Funktionsschema NDHD-Konzept.....	8
Abbildung 6:	Versuchsergebnis der Hubraum-Verstellung innerhalb des NDHD-Konzeptes.....	9
Abbildung 7:	Arbeitsprozess Seed-Finanzierung.....	9
Abbildung 8:	Übergeordnete Regelziele für den Hypnetic-Energiespeicher.....	11
Abbildung 9:	Struktur der zu implementierenden Bestandteile der MPC-Regelung in blau und rot sowie das bestehende Streckenmodell des HPES in grün.....	11
Abbildung 10:	Implementiertes Wirkungsgrad-Kennfeld der elektrischen Maschine.....	12
Abbildung 11:	Vergleich der Verläufe zwischen der MPC-Regelung und der PI-Regelung beim Anfahrprozess s für eine geforderte Leistung von 12 kW und einer Abtastzeit von 10 ms.....	12
Abbildung 12:	Einordnung der zukunftsorientierten Instandhaltung [8].....	13
Abbildung 13:	Vorgehens-Schema des Predictive Maintenance Konzeptes für das Management System.....	13
Abbildung 14:	Frequenz-Spektrum im Normalzustand für Prototyp und Simulation.....	14
Abbildung 15:	Frequenz-Spektrum in der Simulation mit dem Fehler einer erhöhten <i>Leckage</i>	14
Abbildung 16:	Anwendungen und Nutzen des Hypnetic-Energiespeichers für <i>Industry PV-Prosumer</i>	15
Abbildung 17:	Anwendungen und Nutzen des Hypnetic-Energiespeichers (HE) für Betreiber von Windkraft- und Elektrolyse-Anlagen (WES).....	16
Abbildung 18:	Geplantes Energienetz im Pilot-Projekt für Zielgruppe 2.....	16
Abbildung 19:	Vertriebsprozess für den Hypnetic-Energiespeicher.....	18
Abbildung 20:	Gemeinsame Besprechung und Technologie-Begutachtung mit einem potentiellen Kunden.....	18
Abbildung 21:	Übersicht der bei der Hypnetic GmbH absolvierten Abschlussarbeiten.....	20

2. Zusammenfassung

Innerhalb des Förderprojektes wurde die Technologie-Entwicklung des hydropneumatischen Energiespeichers sowie die Unternehmens-Entwicklung der Hypnetic GmbH als Unternehmen zur Herstellung und Vermarktung deutlich vorangebracht.

Für die Technologie-Entwicklung wurde der Prototyp aufgebaut und getestet. Es konnte validiert werden, dass ein konventioneller Hydraulik-Motor zum Zwecke der elektrischen Energiespeicherung eingesetzt werden und dass die Hubraumverstellung des Hydraulik-Motors für die Leistungsregelung sinnvoll sein kann. Basierend auf dem Prototyp-Einhub-Konzept wurde ein weiteres Konzept, das Hochdruck-Niederdruck-Konzept erarbeitet und getestet, welches die Skalierungsprobleme des Einhub-Konzeptes lösen kann. Das Management-System für den hydropneumatischen Energiespeicher ist für die betriebssichere und möglichst effiziente Realisierung der vom Anwender gewünschten Be- bzw. Entladung zuständig. Für das Management-System plant die Hypnetic GmbH den Einsatz von modernen Regel- und Wartungsmechanismen. Während des Förderzeitraumes konnten signifikante Fortschritte in den Bereich Predictive Control und Predictive Maintenance erreicht werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine MPC-Regelung die Performance des hydropneumatischen Energiespeichers erhöhen kann. Für die zukunftsorientierte Instandhaltung konnten Ansätze zur Realisierung erarbeitet und die Sinnhaftigkeit für den Einsatz im hydropneumatischen Energiespeicher validiert werden.

Innerhalb der Unternehmensentwicklung wurde die Bereiche Betriebswirtschaft, die Verwaltung und Organisation, Marketing- und Vertriebsthemen, die Seed-Finanzierungsrunde sowie die Akquise von Teamverstärkungen erfolgreich durchgeführt. In dem Förderzeitraum konnte die Zielgruppe und deren Anwendung und Nutzen detailliert sowie verschiedene Kontaktknüpfung zur markttechnischen Anwendung des hydropneumatischen Energiespeichers geknüpft werden. Zudem konnte durch die Seed-Finanzierungsrunde sichergestellt werden, dass die Entwicklung der Technologie und des Unternehmens fortgeführt werden kann. Als Teamverstärkung konnten insgesamt sechs Studierende für Entwicklungsarbeiten und Anwendungsmöglichkeiten der hydropneumatischen Energiespeicher-Technologie gewonnen werden.

3. Einleitung

Der Zubau der volatilen, nicht regelbaren bzw. von externen Faktoren abhängigen Wind- & Solarkraft erfordert für die Gewährleistung der Netzstabilität und Versorgungsqualität weltweit wachsende, zeitliche Energieausgleiche [1]. Die Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden steigen kontinuierlich an, die Energiebeschaffung für Unternehmen wird aufgrund der Energiewende stetig teurer [2]. Solar- und Windkraftanlagen werden immer häufiger abgeregelt, weil zu Zeiten mit guten, klimatischen Bedingungen zu viel erneuerbar erzeugter Strom im Netz ist.

Energiespeicher können diese zeitlichen Energieausgleiche prinzipiell bewerkstelligen. Den Großteil der Energiespeicherung heutzutage übernehmen Pumpspeicherkraftwerke und Batterien. Der Ausbau der Pumpspeicherkraftwerke stagniert in Deutschland seit 2015, weil günstige, geographische Standorte bereits genutzt werden und weitere massive Landschaftseingriffe einen immer größer werdenden Antrag- und Begutachtungsberg nach sich ziehen [3]. Außerdem können Pumpspeicherkraftwerke nicht dezentral eingesetzt werden. Unter den Batterien ist mit großem Abstand die Lithium-Batterie führend. Obwohl sie unter den Batterie-Technologien die höchste Zyklenstabilität und Nutzungsdauer erreicht, ist diese für großskalige und energieintensive Anwendungen in vielen Fällen für eine Wirtschaftlichkeit zu gering. Die auftretende Kapazitäts- und Leistungsdegradation sowie die Sensitivität gegenüber Tiefenentladungen verstärken dieses Problem.

Wasserstoff-Technologien für die elektrische Energiespeicherung haben einen relativ niedriger Gesamt-Wirkungsgrad sowie relativ hohe, leistungsspezifische Anschaffungskosten. Trotzdem sind sie der Hoffnungsträger für langfristige, z.B. saisonale Energieausgleiche. Schwungräder und Superkondensatoren werden in extrem leistungsintensiven Speicher-Anwendungen eingesetzt, in denen hohe Leistungen im Sekunden-Bereich zur Verfügung gestellt werden muss. Um den aus Solar- oder Windkraft erzeugten Strom für einen späteren Zeitpunkt zwischen zu speichern, weisen eine zu hohe Selbstentladung und eine zu geringe Energiedichte auf. Andere Energiespeicher-Technologien, wie Power-to-Gas, Redox-Flow-Systeme und Liquid Air, scheitern für die breite Anwendung an hohen Kosten und/oder an einem niedrigen Wirkungsgrad.

Die Hypnetic GmbH ist 2019 mit der Mission gestartet, Druckluftspeicher (CAES) dezentral einsetzbar und marktfähig zu machen. Bis zum heutigen Tage werden keine dezentralen CAES betrieben. Konventionelle CAES können nicht dezentral eingesetzt werden, weil sie auf Untergrund-Kavernen angewiesen sind, in denen das Druckgas zwischengespeichert wird. Das direkte Komprimieren von Gasen mittels Gaskompressoren in konventionellen Druckluftenergiespeichern verhindert einen hohen Wirkungsgrad und eine hohe Energiedichte. Es werden externe Kühlkreisläufe und damit zusätzliche Komponenten mit Wirkungsgradverlusten notwendig. Für die Expansion des Gases in der Rückverstromung werden zusätzliche Wärmezuführsysteme (Verbrennung von Öl/Gas) erforderlich, damit an der Gasturbine keine Vereisung auftritt.

Die konkrete Zielstellung innerhalb des Green-Startup-Programms der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in der Antragstellung war zusammengefasst die Markteintrittsphase zu unterstützen. Weil die Entwicklung der dezentralen CAES-Technologie hin zur

Marktfähigkeit einen enormen Aufwand darstellt, waren wir im Anschluss an die EXIST-Förderung Mitte 2021 noch nicht bereit bzw. weit genug für eine größervolumige Seed-Finanzierungsrunde. Zur Unterstützung der Marktreintrittsphase haben wir folgende Arbeitspaket-Bereiche definiert und per Umwidmungsantrag im Januar 2023 aktualisiert.

Im Bereich 1 haben wir die betriebswirtschaftlichen und organisatorischen Aufgaben zusammengefasst. In diesem Bereich fällt auch die Patent-Gestaltung und -Einreichung.

Der Bereich 2 umfasst Versuche & Weiterentwicklungen mit unserem Prototyp. Dieser ist unter allen bekannten CAES-Speichern der Welt derjenige mit der höchsten Effizienz bei gleichzeitig höchster Energiedichte.

Unter Bereich 3 sind die Aufgaben zusammengefasst, die für die Vorbereitung und Durchführung einer Seed-Finanzierungsrunde erforderlich sind

Der Bereich 4 umfasst Entwicklung für das Management-System des Hypnetic-Energiespeichers, welches neben der einzigartigen Verschaltung aus in anderen Industrie-Bereichen etablierten Komponenten eine zentrale Rolle einnimmt. Hauptaugenmerk hierbei liegt auf der Steuerung und Regelung, den Schnittstellen zu vorhandenen Kunden-Systemen und die Entwicklung eines Predictive Maintenance Ansatzes.

Im Bereich 5 sind sämtliche Aufgaben innerhalb der Themengebiete Marketing und Vertrieb untergebracht. Dazu zählen besonders die Erstellung von Marketing-Materialien, die Realisierung von Messe-Auftritten und Marketing-Kampagnen und die Akquise und Kommunikation mit potentiellen Anwendern des Speichersystems.

Der Bereich 6 umfasst die Durchführung von technischen Abschlussarbeiten (am IfES, LUH) für die Weiterentwicklung des Systems und Arbeiten rund um die Gewinnung von Personal.

4. Hauptteil

4.1. Bereich 1: Betriebswirtschaft, Verwaltung, Organisation

Der Bereich 1 des Vorhabens ist den Arbeitsprozessen innerhalb der Themen Betriebswirtschaft, Verwaltung und Unternehmens-Organisation, zum Beispiel der Büro-Umzug zum 01.07.2023, zugeordnet. Zudem wird das Innovationsmanagement als Teil der Unternehmens-Organisation gesehen und folgend exemplarisch der Prozess zur Patentanmeldung beschrieben, der sowohl zur deutschen als auch zur internationalen PCT-Anmeldung der Innovationen der Hypnetic GmbH innerhalb des Förderzeitraumes geführt hat. Die Nummer der Veröffentlichung ist **PCT/EP2022/051896**.

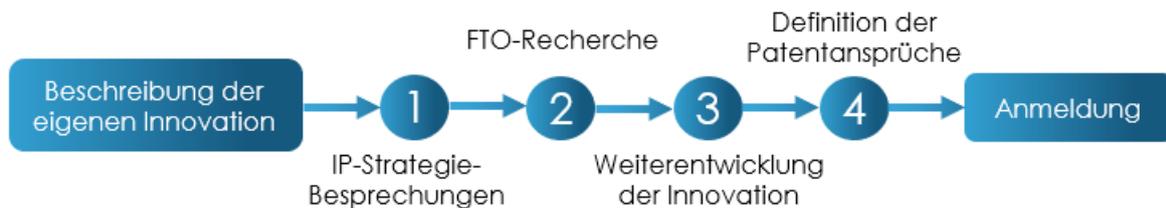


Abbildung 1: Kernprozesse zur Patentanmeldung (Bereich 1)

Zusammengefasst schützt das Patent wesentliche Aspekte der entwickelten Innovationen. Besondere Bedeutung dabei hat die Bidirektionalität des verwendeten Hydraulikmotors, sodass nur ein Maschinenstrang erforderlich ist, der sowohl für die Beladung als auch für die Entladung genutzt werden kann. Ein weiterer, zentraler Patentansprüche ist die Verwendung von Phasenwechselfpeicher-Material für die Wärmerückgewinnung.

4.2. Bereich 2: Prototyp

Der Bereich 2 beinhaltet sämtliche Arbeiten und Versuche, die mit dem Prototyp durchgeführt worden sind. Auf diese Weise konnte das Verhalten eines konventionellen Hydraulikmotors erstmalig zum Zwecke der Energiespeicherung mit Hilfe von Druckluft untersucht werden.



Abbildung 2: Prototyp der Hypnetic GmbH

Abbildung 3 visualisiert das erste Prototyp-Konzept mit zugehöriger Funktionsweise.

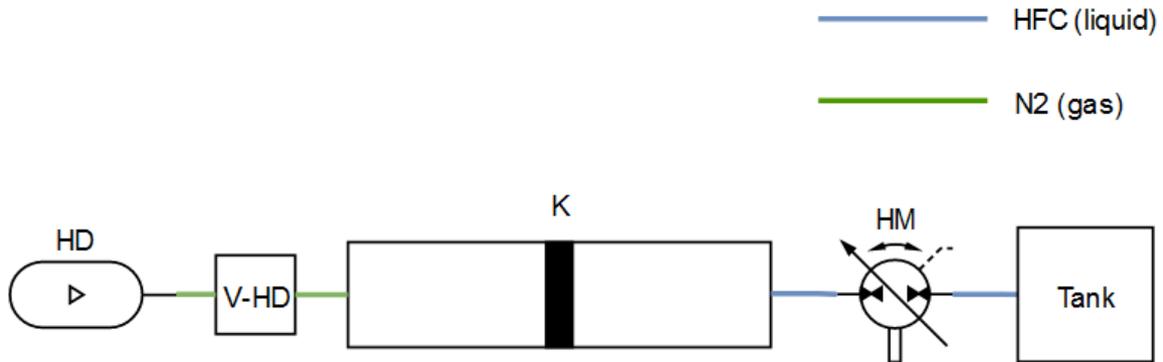


Abbildung 3: Funktionsschema des Prototyps

Um Energie einzuspeichern, pumpt der Hydraulikmotor (HM) HFC (Hydraulikflüssigkeit) aus dem Tank, welcher unter Atmosphärendruck steht, in die den Kolbenspeicher (K). Auf der N₂-Seite des Kolbenspeichers liegt ein hoher Gasdruck (z.B. Startdruck 160 bar) an. Aufgrund der Arbeit des HM bewegt sich K nach links und verdichtet durch Volumen-Verkleinerung das N₂. Der Prototyp ist voll beladen, wenn der K ganz links angekommen und der Maximaldruck erreicht worden ist. In der Entladung treibt das unter dem N₂-Druck stehende HFC den Hydraulikmotor an. Die elektrische Maschine mit der zugehörigen Leistungselektronik ist der Übersicht halber nicht dargestellt.

Ein Versuchsbeispiel ist in Abbildung 4 gezeigt. Hier wurde die Entlade-Solleleistungsrampe (rot) für die Drehzahl vorgegeben und gemessen, welche Drehzahl vom Prototyp erreicht wurde (gelb). Derartige Messungen sind grundlegende Informationen für die Anwendung der Technologie beim Kunden.

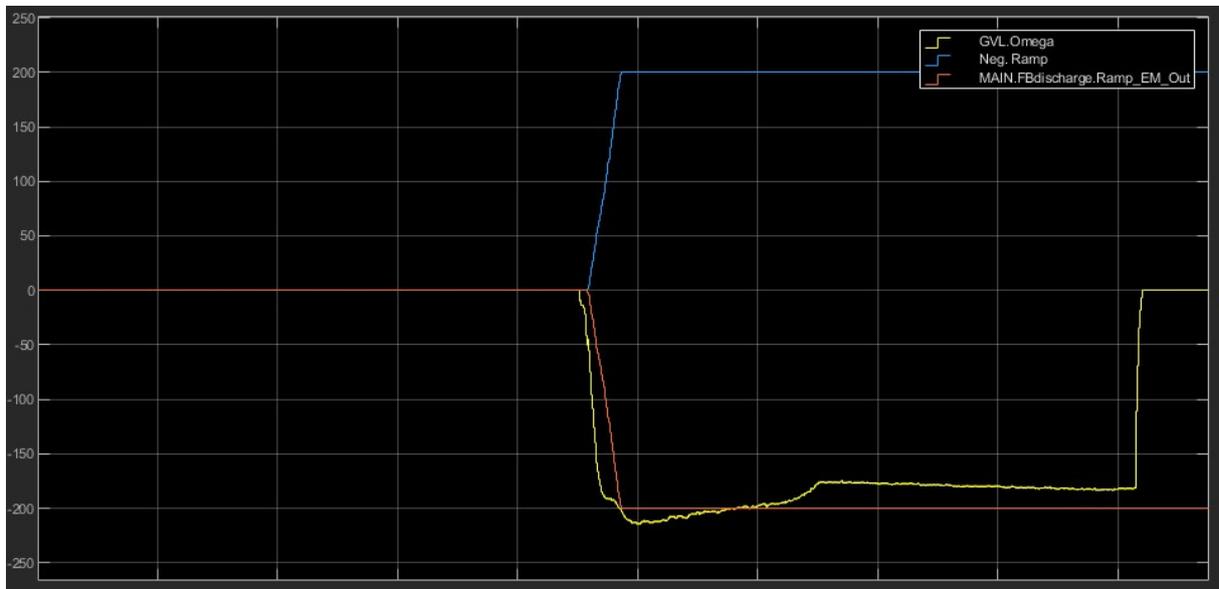


Abbildung 4: Prototyp-Versuch zur Drehzahl-Regelung

Das Haupt-Skalierungsproblem des ersten Prototypen-Konzeptes, welches auch Gegenstand von anderen Veröffentlichungen, z.B. [4] und [5], sind die hohen, kapazitätsspezifischen Kosten. Der Kolbenspeicher K hat eine sehr geringe Fertigungstoleranz („muss perfekt rund sein“), damit der Kolben zuverlässig die Gas-Seite und die Flüssigkeitsseite voneinander abdichten kann. Kleinste

Fertigungs-Fehler können dazu führen, dass permanent ein signifikanter N₂-Massestrom die Gasflaschen über die Kolbenspeicher verlässt und über den Tank in die Atmosphäre entweicht. Dieser Verlust würde das System in der Funktion als Energiespeicher stark beeinträchtigen. Aus diesem Grund sind Kolbenspeicher um ein Vielfaches teurer als volumengleiche Gasflaschen.

Dieses Haupt-Skalierungsproblem hinsichtlich der Kapazitätskosten ist die Hauptmotivation, das „Hochdruck-Niederdruck-Konzept“ (HDND) zu entwickeln. Abbildung 5 zeigt die technische Skizze dieses Konzeptes.

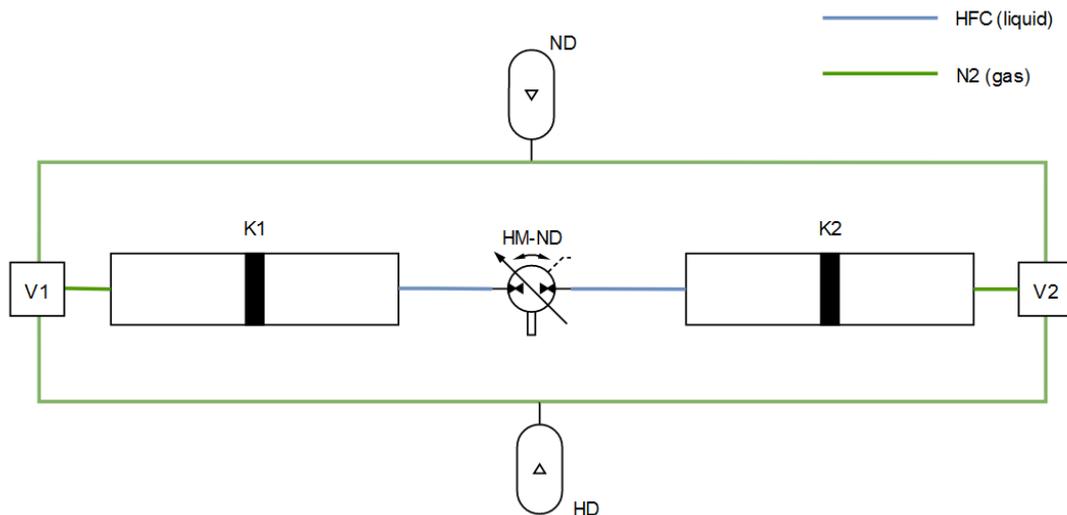


Abbildung 5: Funktionsschema NDHD-Konzept

Im HD-ND-Konzept wird der Tank, der mit der Atmosphäre verbunden ist, durch eine Niederdruckseite ersetzt, welches nach den Simulationsergebnissen in einem Druckbereich zwischen 60 bar und 90 bar (bei max. HD-Druck = 350 bar) liegen sollte. Die Hydraulikflüssigkeit wird nun nicht mehr aus dem Tank, sondern zwischen den beiden Kolbenspeichern „hin- und her gepumpt“. Ein Ventilblock pro Kolbenspeicher (V1 und V2) regelt, dass in der Beladung N₂ aus ND in HD gepumpt wird und bei der Entladung entsprechend umgekehrt aus HD in ND expandiert wird.

Grundlegend für diese Funktionsweise ist, dass der Hydraulikmotor das „Umschalten“ beim Erreichen eines vollen Flüssigkeitsstandes in einem der beiden Kolben mit gleich bleibender Drehrichtung realisieren kann. Ansonsten würden „Ausdreheffekte“ beim jedem Umschalt-Vorgang zu hohen, zeitlichen Pausen oder zu hohen energetischen Verlusten führen. Aus diesem Grund spielt die sog. Hubraum-Verstellung (eng. *Displacement*) des Hydraulikmotors eine zentrale Rolle. Die Ergebnisse eines Prototypen-Versuchs zur Zeitspanne des Umschalt-Vorgangs sind in Abbildung 6 dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass die Hubraumverstellung in angemessener Zeit mit gleicher Drehrichtung funktioniert. Aus diesem Grund konnte das NDHD-Konzept für das Pilot-Projekt weiter verfolgt werden.

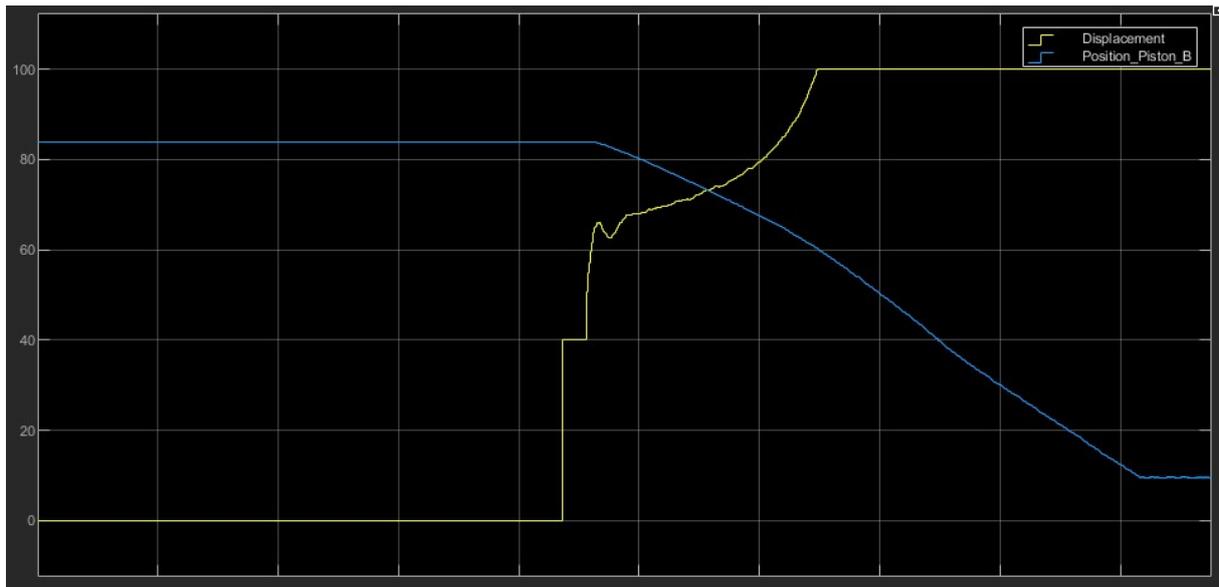


Abbildung 6: Versuchsergebnis der Hubraum-Verstellung innerhalb des NDHD-Konzeptes

4.3. Bereich 3: Seed-Finanzierung

Im Bereich 3 des Vorhabens sind jegliche Aufgabenpakete untergebracht worden, die die Ermöglichung einer Anschlussfinanzierung sicherstellen sollen. Für das Vorhaben ist dieser Aufgabenbereich besonders berücksichtigt worden, weil

- 1) Eine fehlende Anschlussfinanzierung die Hauptursache für die Beendigung derartiger Projekte sind.
- 2) Zur Markteinführung der im Fokus stehenden Energiespeicher-Technologie eine Anschluss-Finanzierung unbedingt erforderlich ist.

Abbildung 7 visualisiert den Arbeitsprozess in diesem Aufgabenpaket. Die beiden Grundvoraussetzungen für Investoren-Ansprachen sind ein funktionierendes Team und eine gewisse *Traction*, also die Erfolge, die das Team bereits zum Zeitpunkt der Ansprache erreicht hat. Als ersten Schritt müssen die Planungen, Erfolge & nächste Meilensteine in einem gut durchdachten, ansprechenden *Pitchdeck* (Unternehmenspräsentation) visualisiert werden.

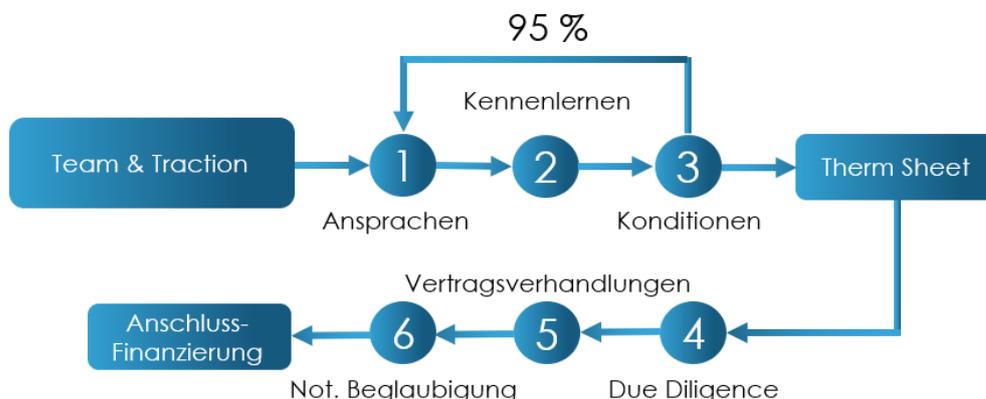


Abbildung 7: Arbeitsprozess Seed-Finanzierung

Für eine Investoren-Ansprache ist es dann erforderlich, eine Liste geeigneter Investoren zu erstellen. Dafür muss recherchiert werden, in welche Wirtschaftsbereiche/Märkte der Ziel-Investor investiert

und welcher Unternehmensphase dafür in Frage kommt. Passt beides zum eigenen Vorhaben, sollte über eigene Netzwerke ein direkter Kontakt zu dem/der richtigen Investment-Manager*in aufgebaut werden. Zusendungen von *Pitchdeck* an die allgemeinen info@-Adresse führen in den seltensten Fällen überhaupt zu einer Rückmeldung.

Ist zu einer passenden Investment-Gesellschaft ein direkter Kontakt aufgebaut und wurde das *Pitchdeck* in erster Evaluation für positiv empfunden, kann die Kennenlernphase folgen. Passt auch die persönliche Ebene, werden in weiteren Meetings die groben Konditionen des *Term Sheets* verhandelt und bei Erfolg unterschrieben. Statistisch führen etwa 5 % dieser direkten Kontaktknüpfern (bei indirekten noch bedeutend weniger) zu einem *Term Sheet*.

Nun ist es Aufgabe des Gründungsteams, mehrere *Term Sheets* von verschiedenen Investoren zu sammeln, um eine gute Verhandlungsbasis zu haben. Zusätzlich spielt die verbleibende *Runway* des Teams (Zeit bis zur Insolvenz des Gesellschaft bei geplanter Entwicklung) eine zentrale Rolle für die Verhandlungsbasis und sollte idealerweise mindestens 9 Monate in der Zukunft liegen.

Nach dem Unterschreiben der *Term Sheets* beginnt die Prüfung seitens der Investoren. Hierfür müssen verschiedene Dokumente (Gesellschaftervertrag, Arbeitsvertrag etc.) dem Investor ausgehändigt werden. In der Praxis parallel dazu beginnen die Verhandlungen des Beteiligungsvertrages. Während die groben Verhandlungen wie die Bewertung schon für das *Term Sheet* stattgefunden haben und in den meisten Fällen das Ergebnis davon nicht mehr angefasst wird, werden für die Beteiligungsverträge Details z.B. im Bereich *Vesting* und *Liquidationspräferenzen* geregelt. Dieser Arbeitsprozess kann erfahrungsgemäß der Längste sein, zudem kann er auch noch aus verschiedenen Gründen, die nicht unbedingt mit dem Start-up zusammenhängen müssen, abgebrochen werden. Das Ziel der Beteiligungsverträge und aller vorangegangenen Arbeitsschritte ist die notarielle Vertragsschließung, erst danach kann von einer gesicherten Anschlussfinanzierung gesprochen werden.

Während des Förderzeitraumes konnte die Hypnetic GmbH erfolgreich eine Seed-Finanzierungsrunde in Höhe von 1,05 Mio. € mit den Finanzierungspartnern NBank Capital, Mittelständische Beteiligungsgesellschaft und Hannover-Beteiligungsfonds abschließen.

4.4. Bereich 4: Management-System

Der Bereich 4 bezieht sich auf das für den Betrieb des Hypnetic-Energiespeichers erforderliche *Management-System*, welches Hauptgegenstand der Entwicklungsarbeiten ist. Im Allgemeinen ist es seine Aufgabe, die vom Kunden geforderte Be- bzw. Entladeleistung möglichst genau, effizient und betriebssicher zu realisieren. Dafür übernimmt es mit Hilfe verschiedener Steuer-Bausteine und einem zentralen Industrie-Computer das Auslesen sämtlicher Sensoren, die Steuerung der Ventile und die Leistungsregelung der Kombination aus Hydraulikmotor und elektrischer Maschine.

Die beiden Bereiche, in denen innerhalb des *Management Systems* der Einsatz von *Machine Learning* Algorithmen implementiert bzw. geprüft wurde, sind *Predictive Control* und *Predictive Maintenance*

Predictive Control

Die modellbasierte prädiktive Regelung (MPR, engl. MPC) basiert auf der Vorhersage des zukünftigen Systemverhaltens mittels eines mathematischen Prozessmodells. Dies ermöglicht die Berechnung der optimalen Stellgrößenverläufe durch einen Optimierer, die zu optimalen Verläufen der Regelgrößen führen. Die Optimierung berechnet für jeden Zeitschritt mit den aktuellen Zustandsgrößen das zukünftige Verhalten über einen Prädiktionshorizont voraus. Die zukünftigen Stellgrößenverläufe werden dabei so variiert, dass eine vorher definierte Gütefunktion minimiert wird. Die so gefundenen optimalen Stellgrößenverläufe werden dann auf das eigentliche System aufgeschaltet. Dieses

Vorgehen ermöglicht eine Berücksichtigung von Störungen, erfordert aber auch eine hohe Rechenleistung. Der Vorteil der MPC-Regelung liegt in der Fähigkeit, Systeme mit mehreren Stell- sowie Regelgrößen innerhalb eines Optimierungsproblems im Gesamten zu betrachten. Zudem können mehrere Systembeschränkungen vergleichsweise einfach innerhalb der Optimierung berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen ist die MPC-Regelung in der Prozessindustrie ein modernes und viel verwendetes Verfahren [6] und soll im Hypnetic-Energiespeicher zur grundlegenden Regelstrategie implementiert werden [7]. Abbildung 8 zeigt die Tabelle mit der Beschreibung der übergeordneten Regelziele.

Art des Regelziels	Beschreibung
Hauptziel	Dynamisches Folgen der vorgegebenen Sollleistung mit einer maximalen "Überschwingweite von 5 %
1. Unterziel	Wirkungsgrad der PMSM maximieren, indem eine Drehzahl von 3000 U/min beibehalten wird
2. Unterziel	Wirkungsgrad des Hydraulikmotors maximieren, indem der einstellbare Hubraum maximiert wird
3. Unterziel	Schonung der mechanischen Hubraumverstellung, indem große ruckbehaftete Verstellbewegungen vermieden werden
4. Unterziel	Schonung der elektrischen Bauteile und der Permanentmagneten, indem der Strom der PMSM dauerhaft maximal 42 A beträgt und Stromspitzen "über 80 A vermieden werden

Abbildung 8: Übergeordnete Regelziele für den Hypnetic-Energiespeicher

Für den MPC-Regler wird ein von Simulink vorgefertigter Funktionsblock verwendet. Da sich das linearisierte Prozessmodell des HPES aufgrund der sich ändernden Arbeitspunkte ebenfalls mit der Zeit ändert, wird der Funktionsblock eines adaptiven MPC-Reglers eingesetzt. Der Ansatz dieses Funktionsblocks besteht darin, dass der Reglerentwurf über die Formulierung und Parametrierung der Gütefunktion sowie der Nebenbedingungen nur einmal durchgeführt werden muss. Daraufhin passt sich der adaptive Regler mithilfe des sich aktualisierenden Prozessmodells den veränderten Betriebsbedingungen über die Zeit an. Abbildung 9 zeigt die Struktur der Adaptiven MPC-Regelung, mit der die genannten Ziele erreicht werden sollen.

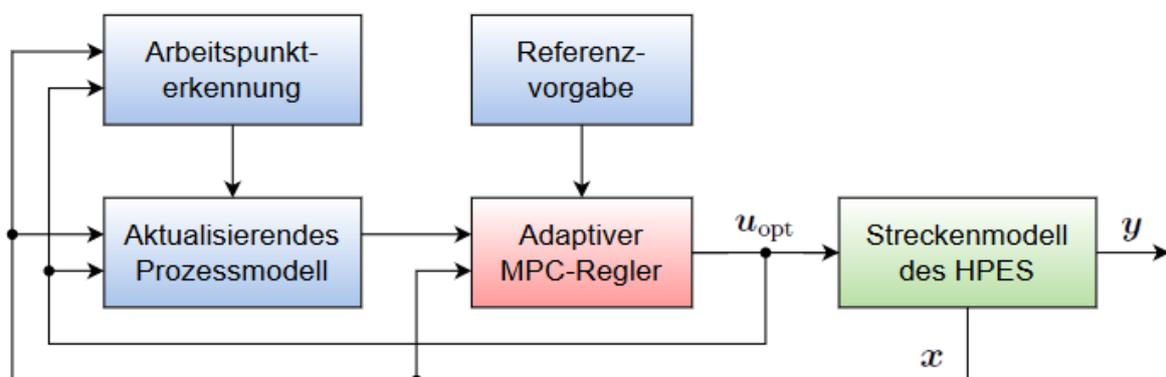


Abbildung 9: Struktur der zu implementierenden Bestandteile der MPC-Regelung in blau und rot sowie das bestehende Streckenmodell des HPES in grün

Die genaue Darstellung der Funktionsweise der einzelnen Blöcke, insbesondere das Streckenmodell des Hypnetic-Energiespeichers (HPES), würde den Rahmen dieser Abschlussarbeit sprengen. Hierfür

wird beispielhaft das Wirkungsgradkennfeld der elektrischen Maschine des Prototyps in Abbildung 10 gezeigt.

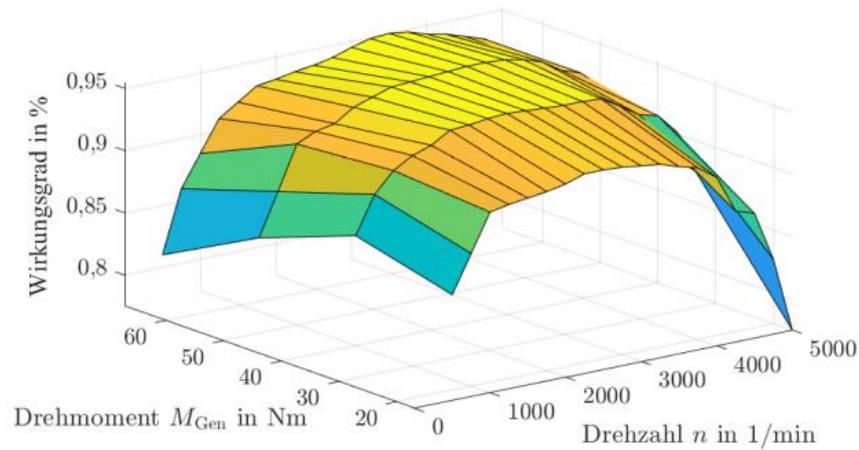


Abbildung 10: Implementiertes Wirkungsgrad-Kennfeld der elektrischen Maschine

Für die Evaluation der adaptiven MPC-Regelung für den Hypnetic-Energiespeicher wurde das Verhalten in Prototypen-Tests innerhalb des Vorhabens mit der einer Standard-PI-Regelung verglichen. Abbildung 11 zeigt die Resultate, die eine eindeutig signifikante Verbesserung des Systemverhaltens durch die adaptive MPC-Regelung erkennen lassen.

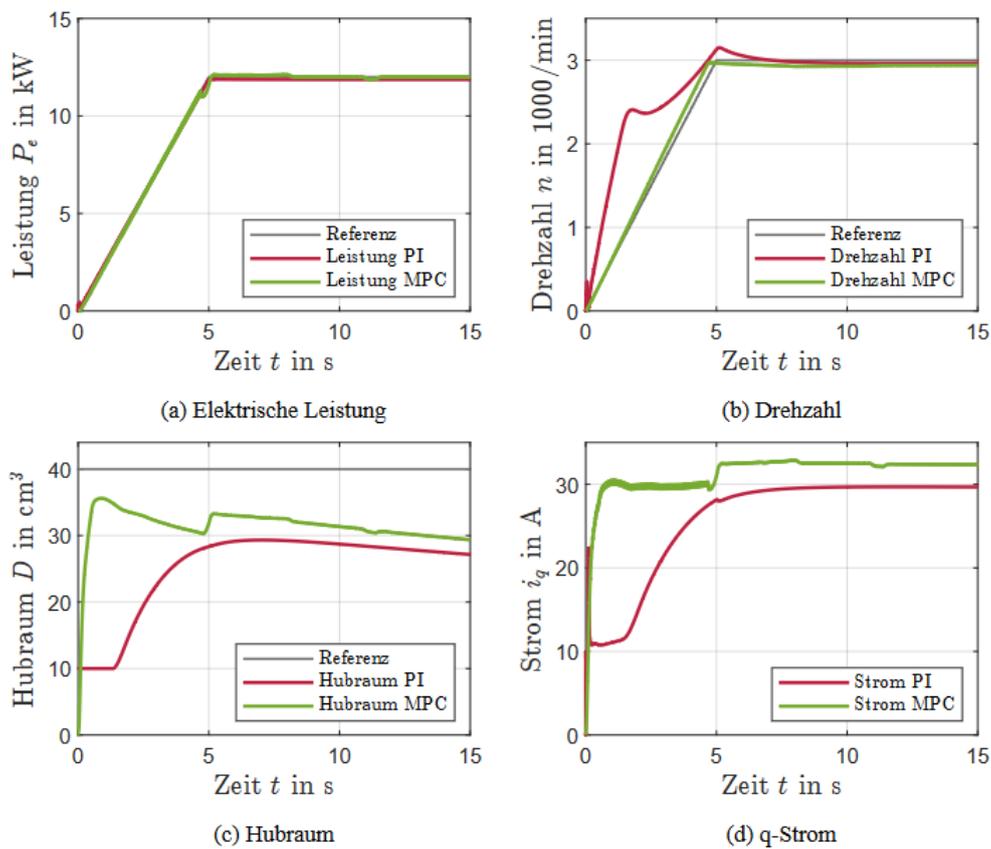


Abbildung 11: Vergleich der Verläufe zwischen der MPC-Regelung und der PI-Regelung beim Anfahrprozess s für eine geforderte Leistung von 12 kW und einer Abtastzeit von 10 ms

Predictive Maintenance

Zu den genannten Funktionen wurde innerhalb des Vorhabens der Ansatz von Predictive Maintenance in dem *Management System* integriert. Abbildung 12 zeigt die Einordnung dieser Instandhaltungsstrategie.

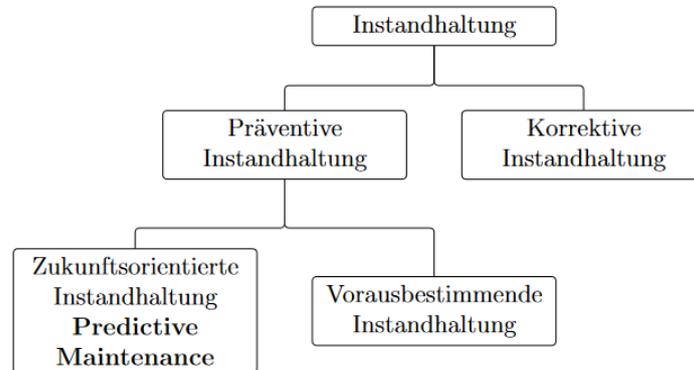


Abbildung 12: Einordnung der zukunftsorientierten Instandhaltung [8]

Die zukunftsorientierte Instandhaltung (Predictive Maintenance) macht sich zunutze, dass bei vielen Fehlerfällen die Erkennungszeichen mit der Fehlerschwere bis zum Totalausfall ansteigen. Dabei werden mithilfe eines Algorithmus schon kleine Zustandsänderungen des Systems angezeigt und auch einem Fehlerfall zugeordnet. Es kann also schon ein Wartungstermin des Systems festgelegt und auszutauschende Komponenten bestellt werden, wenn ein geplanter Stillstand in der Zukunft vorzusehen ist [9]. Da die Nutzungszeit der Komponenten optimal ist, können Kosten gespart werden. Allerdings fallen zusätzliche Kosten für z. B. Sensoren und Entwicklungszeit an. Bei Routinedurchsichten fallen nach [10] bei der vorausbestimmenden Wartung in 70 % der Fälle und bei der *Predictive Maintenance* in 90 % keine Fehler auf.

Abbildung 13 zeigt das schematische Vorgehen für das *Predictive Maintenance* Konzept innerhalb des *Management Systems* anhand der Simulation des Prototyps.

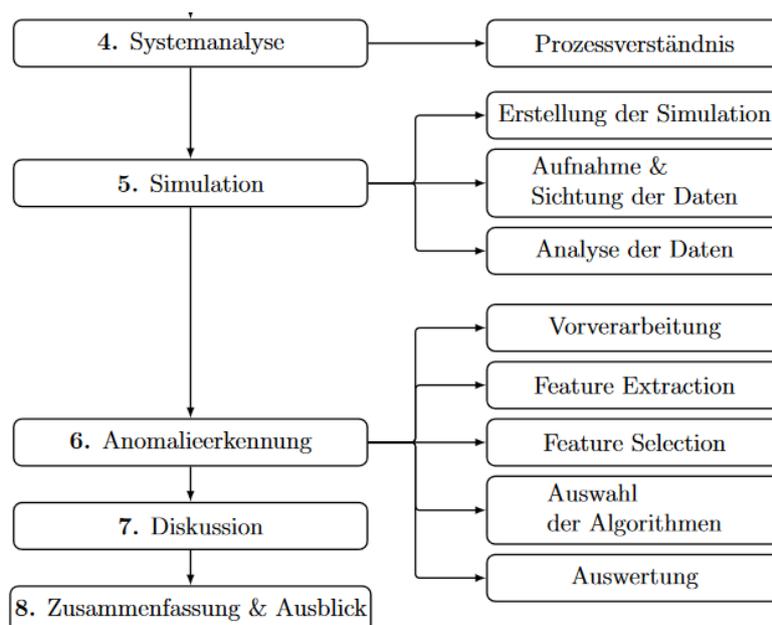


Abbildung 13: Vorgehens-Schema des Predictive Maintenance Konzeptes für das Management System

Das übergeordnete Ziel des Schemas ist die zuverlässige Anomalie-Erkennung mit entsprechend folgerichtiger Interpretation. Dafür gibt es die modellbasierte, die wissensbasierte und die signalbasierte Methode. Bei den letzten beiden Methoden wird auf *Machine Learning Algorithmen* zurückgegriffen [11].

Der Vibrations-Sensor ist eine geeignete Methode, um mit einem einzigen Sensor Anomalien erkennen zu können. Der Frequenz-Bereich im fehlerfreien Fall dient als Vergleichs-Grundlage der stetig im Betrieb aufzunehmenden Frequenzen. Der Vergleich von Simulation und Prototyp ist in Abbildung 14 dargestellt.

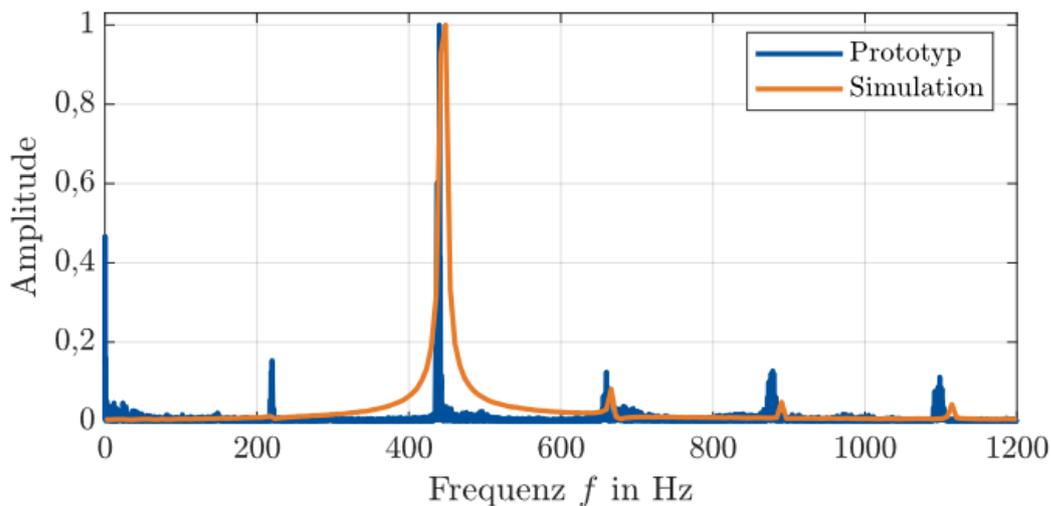


Abbildung 14: Frequenz-Spektrum im Normalzustand für Prototyp und Simulation

Im Rahmen des Trainings des *Machine Learning* Algorithmusses werden ausgehend vom Normalzustand absichtlich verschiedene, häufig vorkommende Fehlerfälle verursacht, das zugehörige Frequenz-Spektrum aufgenommen und entsprechend mit den Fehler-Eigenschaften versehen. Abbildung 15 zeigt beispielhaft das Frequenz-Spektrum in einem Betriebszustand mit einem höher als üblichen Leckage-Strom der Hydraulikflüssigkeit.

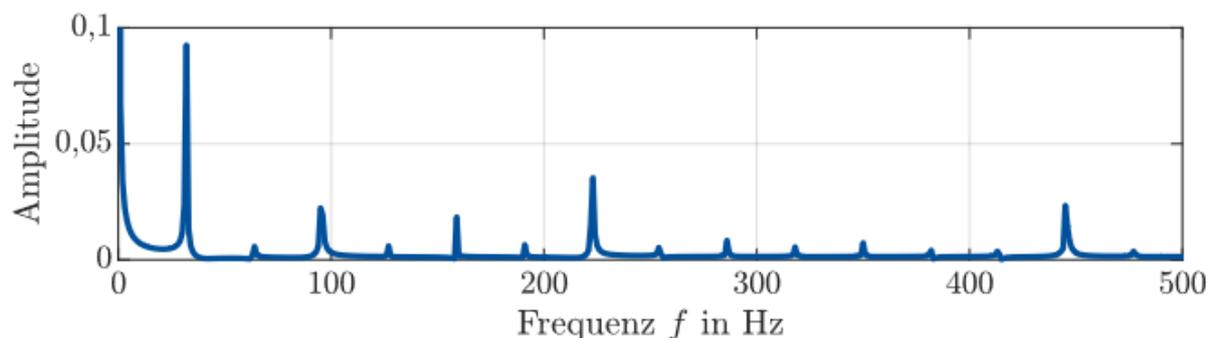


Abbildung 15: Frequenz-Spektrum in der Simulation mit dem Fehler einer erhöhten Leckage

Erkennt der Algorithmus, dass sich das Frequenz-Spektrum in diese Form entwickelt, wird eine Warnung, z.B. „Flüssigkeitsseite beginnt, undicht zu werden“.

4.5. Bereich 5: Marketing und Vertrieb

Der Bereich 5 ist den Themen Marketing und Vertrieb zugeordnet, der mit der Markteintritts-Strategie startet. Anschließend werden weitere Entwicklungen innerhalb des Marketings und des Vertriebs beschrieben und abschließend mit Angaben zum entwickelten Geschäftsmodell abgerundet.

Markteintritts-Strategie

Die Bildung der Markteintritts-Strategie mit der dazugehörigen Zielgruppen-Definition ist die Basis für Produkte, die, wie der Hypnetic-Energiespeicher, noch nicht auf dem Markt angeboten werden. Abbildung 16 zeigt die Visualisierung im *Pitchdeck* zur Beschreibung der Anwendung und des Kundennutzens der 1. Zielgruppe *Industry PV-Prosumer*. Dazu gehören Unternehmen, überwiegend aus dem produzierenden Gewerbe, die eine eigene PV-Anlage betreiben.

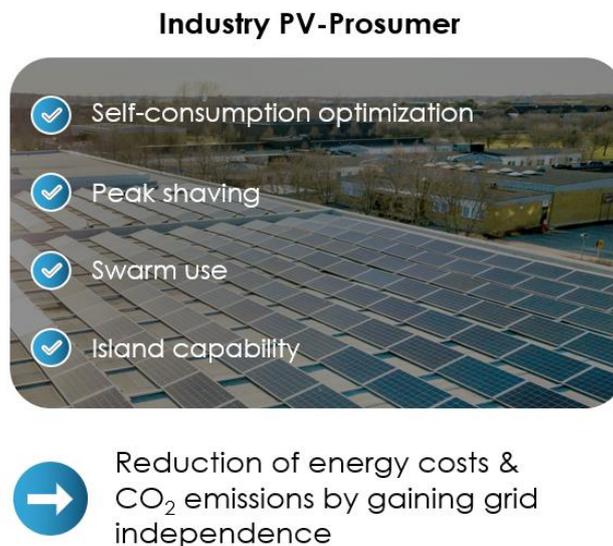


Abbildung 16: Anwendungen und Nutzen des Hypnetic-Energiespeichers für *Industry PV-Prosumer*

Zusammen mit unserem Partner, der [3Energie Consulting](#), wurde innerhalb des Vorhabens die wirtschaftlichste Energiespeicher-Anwendung für diese Zielgruppe identifiziert. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus PV-Eigenverbrauchsoptimierung, Atypische Netznutzung nach § 19 StromNEV, der Schwarmnutzung sowie einer installierten Insel-Fähigkeit. Die genaue Funktionsweise dieser Anwendungen würde den Rahmen dieses Abschlussberichtes sprengen. Innerhalb des Vorhabens konnte mit der Firma *Addinol Lube Oil* ein Pilot-Partner für die genannten Einsatzbereiche gefunden werden. Das Energienetz besteht aus dem örtlichen Verbrauch, einer PV-Anlage (installierte Leistung 750 kWp) und einem Netzanschluss.

Abbildung 17 visualisiert in entsprechender die zweite Zielgruppe für den Hypnetic-Energiespeicher. Für Windpark- und Elektrolyseur-Betreiber kann der Hypnetic-Energiespeicher als Puffer-System zwischen Erzeugung und Elektrolyseur-Verbrauch eingesetzt werden, um zum einen die Flexibilität des Elektrolyseurs zu erhöhen bzw. einen insg. günstigeren Strompreis zu erreichen sowie seine Volllaststunden und Lebensdauer zu erhöhen. Letzteres kann durch die Vermeidung ungünstiger Ab- und Anfahrprozesse realisiert werden. Innerhalb des Vorhabens konnte dieser Einsatzbereich zusammen mit der *H2DonauHub* für das „Projekt Kelheim“ entwickelt werden.

Windfarm & electrolyzer operator



➔ Reduction of electrolyzer operating costs by increasing overall efficiency & service life

Abbildung 17: Anwendungen und Nutzen des Hypnetic-Energiespeichers (HE) für Betreiber von Windkraft- und Elektrolyse-Anlagen (WES)

Das konkret geplante Energienetz ist in Abbildung 18 dargestellt.

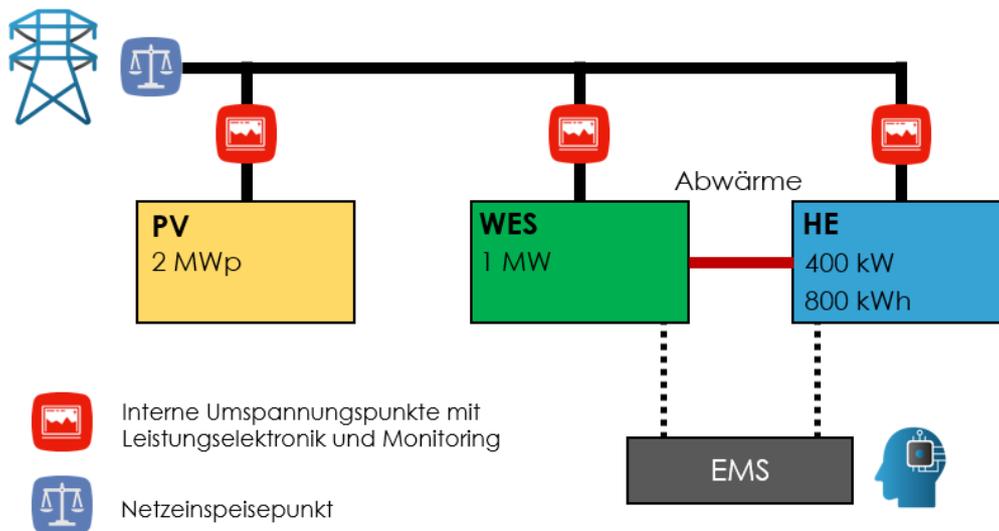


Abbildung 18: Geplantes Energienetz im Pilot-Projekt für Zielgruppe 2

Nach den beiden Pilot-Projekten für die Zielgruppe *Industry PV-Prosumer* konzentriert sich die Hypnetic GmbH auf ein Pilot-Projekt innerhalb der 2. Zielgruppe, um den adressierbaren Markt zu vergrößern. Für den Markteintritt ist der projektbasierte Direktverkauf mit Wartungsvertrag und Kooperationsvertrag inkl. Schwarm-Nutzung über einen Zeitraum von 15 Jahren geplant, wodurch erste regelmäßige Umsätze erzielt werden. Diese Vertragsstruktur konnte innerhalb des Vorhabens zusammen mit den Pilot-Partnern ausgearbeitet und final unterzeichnet werden.

Marketing

Insgesamt strebt die Hypnetic GmbH eine starke Marken-Identität für effiziente, langlebige und ressourcenschonende Energiespeicher mit dem Qualitätssiegel „Made in Germany“ an. Zu der Corporate Identity gehören besonders der Farbverlauf von dem hellen Blau des Logos zu dem dunklen Blau des Logos mit weißer Schrift. Die Hypnetic GmbH tritt vom Zielbild des Kunden als langjähriger Partner für zuverlässige Energiespeicherung in Erscheinung.

Die [Website der Hypnetic GmbH](#) wird laufend optimiert und aktualisiert. Die Aufgrund zahlreicher, externer Verlinkungen von starken Seiten wie der Leibniz Universität Hannover oder einigen Medienhäusern ist sie im Google-Ranking sehr weit oben. Im Hinblick auf die Suchmaschinen-Optimierung konzentriert sich die Hypnetic GmbH besonders auf die Schlagworte „hydropneumatischer Energiespeicher“ und „Technologie-Startup Energiespeicher“ und auf die Long Tail-Keywords „KI für mechanische Energiespeicher“, „Pumpspeicher to go“ und „Robuste und langlebige Energiespeicherlösung“.

Die Hypnetic GmbH pflegt einen LinkedIn Account [\[LinkedIn\]](#) mit aktuellen Neuheiten und spannenden Entwicklungen für interessierte Gesellschaften und Personen. Aktive Maßnahmen sind im Anschluss an die Prototyp-Entwicklungen geplant.

Ab dem Jahr 2023 ist die Hypnetic GmbH auf den wichtigsten, deutschen Energiespeichermessen in Düsseldorf (IRES) und in München (EES Europe) als Aussteller vertreten und beteiligt sich in diesem Rahmen an verschiedenen Netzwerkveranstaltungen, Podiums-Diskussionen und Präsentations-Reihen. In den ersten Jahren wird der Prototyp als Ausstellungsstück dienen, der vor Ort zu Vorführungszwecken mit anschaulichen Effekten be- und entladen werden kann. Zusätzlich wird ein Animationsvideo, ähnlich dem wie es aktuell auf der Website zu sehen ist, die Skalierungsmöglichkeiten veranschaulichen. Eine allgemeine Informationsbroschüre über die Hypnetic GmbH und über die Technologie sowie im weiteren Verlauf technische Datenblätter werden am Messestand ausliegen. Je nach Auftragslage ist ein Messerabatt bei direkter, verbindlicher Bestellung eines Hypnetic-Energiespeichers geplant.

Vertrieb

Aufgrund der relativ geringen Verkaufs-Stückzahl bzw. des relativ großen Umsatzes pro Kunde strebt die Hypnetic GmbH in der ersten Zeit einen direkten, einstufigen Vertrieb in Eigenarbeit und in Zusammenarbeit mit der 3EnergieConsulting (3EC) an. Hat ein Unternehmen Interesse an dem Hypnetic-Energiespeicher und wird über die Website, über Messen & Fachveranstaltungen oder über die gezielte, direkte Kontaktaufnahme seitens der Hypnetic GmbH über die 3EC der Kontakt aufgebaut, startet der in 19 visualisierte Vertriebsprozess.

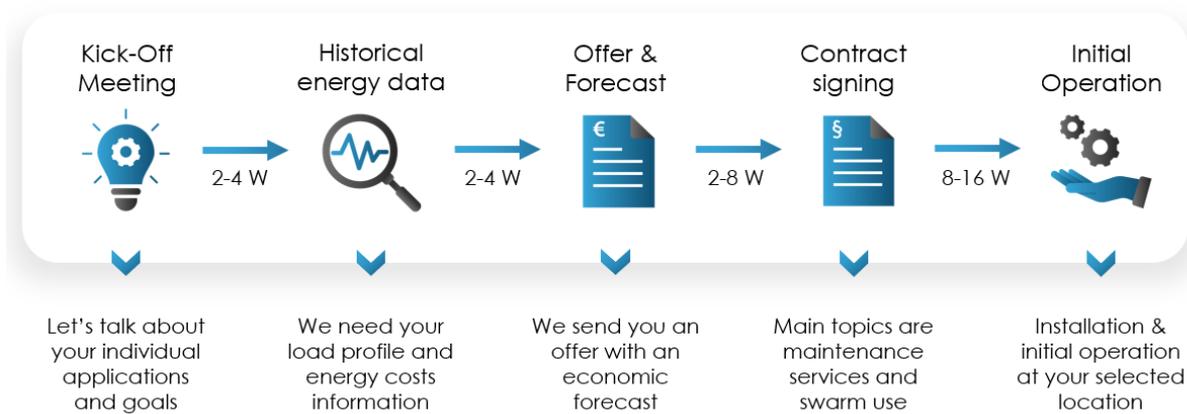


Abbildung 19: Vertriebsprozess für den Hypnetic-Energiespeicher

Die vertikale Integration bei Vertriebspartnern ist Teil der Markt-Durchdringungsstrategie und würde den Rahmen dieses Abschlussberichtes sprengen.

Im Rahmen dieses Vertriebskonzeptes waren innerhalb des Vorhabens mehrere Unternehmen in unseren Räumlichkeiten zu Besuch. In Zusammenarbeit konnten wir erschließen, welche grundsätzlichen Herausforderungen es im Rahmen der Installation und Inbetriebnahme eines Energiespeichers am öffentlichen Stromnetz gibt und auf welche Art und Weise diese zu meistern sind. Beispielhaft zeigt folgendes Foto ein umfangreiches Besprechungs-Meeting mit Mitarbeitern der Avacon Natur GmbH und Dr.-Ing. Professor Richard Hanke-Rauschenbach am Institut für elektrische Energiesysteme – Fachbereich Energiespeicher. Auch Vorführ-Versuche unseres Prototypen waren Teil des Meetings.

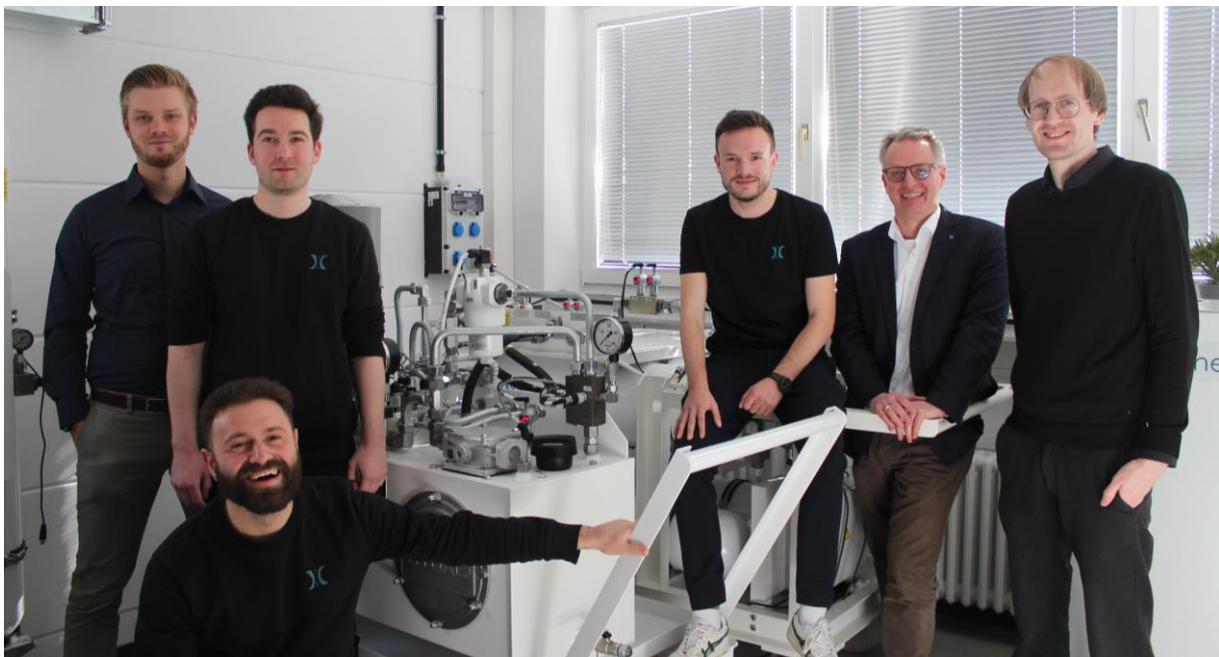


Abbildung 20: Gemeinsame Besprechung und Technologie-Begutachtung mit einem potentiellen Kunden

Die größte Hürde innerhalb des Vertriebsprozesses sind die für die verbindliche Bestellung eines Hypnetic-Energiespeichers erforderlichen Verträge. Zusammen mit unserem Pilot-Partner konnten wir innerhalb des Vorhabens ein sinnvolles Vertragswerk entwickeln. Grundlegend ist der Projektvertrag,

der sämtliche Angelegenheiten rund um Zahlungsbedingungen, Lieferzeiten, Inbetriebnahme-Abläufe, IP-Schutz u.v.m. regelt. Ergänzend dazu kommt der Wartungsvertrag, der die Abwicklungen der Dienstleistungen zur Gewährleistung der Funktionstüchtigkeit des Hypnetic-Energiespeichers gegen eine jährliche Wartungszahlungen enthält. Abschließend wird in dem Kooperationsvertrag hauptsächlich festgehalten, dass der Hypnetic-Energiespeicher in das Schwarm-Netz Dritter eingebunden wird und das daraus entstehende, zusätzliche Gewinne zwischen dem Kunden und der Hypnetic GmbH gleich aufgeteilt werden.

Weitere Aspekte des Geschäftsmodells

Ein weiterer, wichtiger Aspekt für den Markteintritt ist die **Strategie einer dezentralen Fertigung** der Energiespeicher. Dadurch benötigt Hypnetic keine zentrale, kapitalintensive und -bindende Fertigungsstätte wie eine Produktionshalle. Die Komponenten werden von dem Zulieferer-Netzwerk vormontiert und direkt zum Kunden-Aufstellort geliefert. Vor Ort übernimmt Hypnetic die Verbindung der Komponenten und komplettiert den Hypnetic-Energiespeicher mit dem firmeneigenen HEMS (Management System) und der Wärmerückgewinnung auf Basis von Phasenwechselspeichermaterial und nimmt den Energiespeicher anschließend in Betrieb.

Für die Preisstrategie wird zwischen der Leistungseinheit und der Kapazitätseinheit separiert. Die 2023 erreichbaren Kundenpreise betragen nach aktuellen Kalkulationen ca. **540 € pro Kilowatt Nennleistung** und **220 € pro Kilowattstunde Nennkapazität**, in denen eine Marge von 12% einkalkuliert ist. Zusätzlich werden 8 % dieses Speicherpreises für die Installation & Inbetriebnahme berechnet. Der erwähnte Wartungsvertrag des Kunden beinhaltet jährliche Zahlung i.H.v. 1,5 % des Anschaffungspreises. Hinzu kommt die im Kooperationsvertrag geteilte Erlös-Struktur der Schwarm-Einbindung, bei der Hypnetic die Hälfte der dadurch generierten Erlöse über 15 Jahre enthält. Diese, nach einer initialen Einrichtung vollautomatisierten, jährlichen Einnahmen durch jeden verkauften Kunden-Energiespeicher gestalten die Nachhaltigkeit und Attraktivität des angestrebten Geschäftsmodells.

4.6. Bereich 6: Human Resource

In Bereich 6 sind sämtliche Aufgaben rund um die Organisation & inhaltlichen Betreuung von Mitarbeitenden untergebracht. Abbildung 21 zeigt die Abschlussarbeiten, die während des Förderzeitraumes in Kooperation mit dem Institut für elektrische Energiesysteme – Fachbereich Energiespeicher durchgeführt wurden. Sämtliche Thematiken in den Abschlussarbeiten zielten auf die Weiterentwicklung oder auf die Marktanwendungen des hydropneumatischen Energiespeichers ab. Eine Festanstellung wurde während des Förderzeitraumes nicht realisiert.

Student*in	Betreuer	Art	Titel
Xinyue Yang	Alexander Börgel	Masterarbeit	Energiespeicher-Dimensionierung für die kombinatorische Anwendung von Eigenverbrauchsoptimierung, Spitzenlastkappung und Schwarm-Nutzung in Gebäudeenergiesystemen mit Erneuerbaren-Energie-Anlagen
Daniel Sommer	Alexander Börgel	Masterarbeit	Multi-Use Anwendung von stationären Großenergiespeichern in der Industrie
Henning Mußmann	Eugen Zukin	Masterarbeit	Konzipierung und Entwicklung einer modellbasierten prädiktiven Regelung eines hydropneumatischen Energiespeichers

Alexander Werner	Eugen Zukin	Bachelor-Arbeit	Konzipierung und Entwicklung eines Kalman-Filters zur Untersuchung nicht messbarer Größen in einem hydropneumatischen Energiespeicher
Lukas Etmann	Niko Dalke	Masterarbeit	Entwicklung eines Predictive Maintenance Konzepts für Teilsysteme eines hydropneumatischen Energiespeichers
Johannes Mellmann	Niko Dalke	Masterarbeit	Konzipierung und Entwicklung einer prädiktiven Regelung zur Erhöhung der Effizienz eines hydropneumatischen Energiespeichers

Abbildung 21: Übersicht der bei der Hypnetic GmbH absolvierten Abschlussarbeiten

5. Fazit

Die Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt schloss rückblickend betrachtet die Finanzierungslücke zwischen dem EXIST-Gründerstipendium und der Seed-Finanzierung und hatte somit große Bedeutung für die Unternehmens-Entwicklung der Hypnetic GmbH. Die Fortschritte der Technologie-Entwicklungen haben gezeigt, dass der hydropneumatische Energiespeicher eine Anwendung im Markt finden und eine sinnvolle Erweiterung der gegenwärtig verfügbaren Speicher-Technologien sein kann. Zu diesem Zweck konnten mit der Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wichtige Meilensteine wie Prototypen-Tests, Management-System-Entwicklungen, Kontaktknüpfungen zu potenziellen Anwendern und die Seed-Finanzierung erfolgreich bewältigt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer UMSICHT: *Speicher für die Energiewende*. Sulzbach-Rosenberg, 2013
- [2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154902/umfrage/strompreise-fuer-industrie-und-gewerbe-seit-2006/>, Zugriff am 21.02.2024
- [3] <https://www.kas.de/de/web/die-politische-meinung/blog/detail/-/content/ohne-energiespeicher-keine-gelingende-energiewende>, Zugriff am 21.02.2024
- [4] I. Cyphelly, A. Rufer: *Einsatz von Druckluftspeichersystemen*. Les Brenets, 2004
- [5] 4ward Energy Research GmbH: *Machbarkeitsstudie über dezentrale Hydraulik-Druckgas-Speicher*. Graz, 2017
- [6] Eduardo F. Camacho und Carlos Bordons, "Nonlinear model predictive control", 2. Aufl. Springer, isbn: 978-1-85233-694-3
- [7] K. S. Holkar und L. M. Waghmare. "An overview of model predictive control". In: International Journal of control and automation 3.4, 2010
- [8] Mobley, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Amsterdam, 2002
- [9] Gao, Yingjie ; Zhang, Qin "A Wavelet Packet and Residual Analysis Based Method for Hydraulic Pump Health Diagnosis", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 220, 2006
- [10] Hashemian, H. M. "State-of-the-Art Predictive Maintenance Techniques", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 60, 2011
- [11] Isermann, Rolf, Springer Verlag, "Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance", Berlin, 2006