

**SCHLUSSBERICHT - VERBUNDPROJEKT:
ERA-NET MARTEC SMARTPS - SMART
PROPULSION SYSTEM;
VORHABEN ENERGY HARVESTING AND
CONTROL**

BMWi-Forschungsprogramm

„Maritime Technologien der nächsten Generation“

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. – Fraunhofer Institut LBF	Förderkennzeichen: 03SX426C
Vorhabensbezeichnung: ERA-NET MARTEC SmartPS - Smart Propulsion System; Vorhaben Energy Harvesting and Control	
Projektleiter: Dipl.-Ing. Michael Matthias Abteilungsleitung Experimentelle Analyse und Elektromechnik	Tel.: +49 6151 705 260 E- Mail: michael.matthias@lbf.fraunhofer.de
Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2017 bis 31.12.2020	Berichtszeitraum: 01.12.2017 bis 31.12.2020

Darmstadt, 22. Juni 2021
 Dipl.-Ing. Michael Matthias (Projektleiter/Abteilungsleiter)

Inhalt

1	Kurzdarstellung.....	4
1.1	Aufgabenstellung.....	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens.....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	6
2	Eingehende Darstellung.....	7
2.1	Erzielte Ergebnisse im Einzelnen.....	7
2.1.1	AP1 System und Konzept.....	7
2.1.1.1	AP 1.1 Experimentelle Untersuchungen.....	7
2.1.1.2	AP 1.2 Struktursimulation.....	8
2.1.1.3	AP 1.3 Anregungssimulation.....	10
2.1.1.4	AP 1.4 Machbarkeitsuntersuchung: Energy Harvesting (EH).....	12
2.1.1.5	AP 1.5 Machbarkeitsuntersuchung: Smart Power Control (SPC).....	15
2.1.1.6	AP 1.6 Machbarkeitsuntersuchung: Noise & Vibration Control (NVC).....	19
2.1.2	AP2 Systementwurf und Realisierung.....	23
2.1.2.1	AP 2.2 Design des Energy Harvesters (EH).....	23
2.1.2.2	AP 2.3 Design des smarten Getriebes.....	29
2.1.3	AP3 Systemvalidierung.....	30
2.1.3.1	AP3.1 Validierung des smarten Seeverhaltens.....	30
2.1.3.2	AP3.2 Validierung des Energy Harvesters (EH).....	30
2.1.3.3	AP3.3 Validierung des smarten Getriebes.....	33
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	37
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	37
2.4	voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	37
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	38
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	38
3	Nachweise.....	39

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Gesamtprojekts war es einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit und Energieeffizienz sowie zur Einbindung moderner Entwicklungsmethoden in ihren Entwurfsprozess zukünftiger Schiffsgenerationen zu leisten. Die unerwünschten, quasistatischen und dynamischen Kräfte, die aus schiffsinneren und äußeren Quellen auf den Antriebsstrang des Schiffs wirken, wurden beschrieben und ihre Auswirkung auf das Schiff und insbesondere auf den Antriebsstrang reduziert werden. Dazu wurde ein intelligenter Antriebsstrang in Zusammenhang mit einem innovativen auf ihn abgestimmten Schiffsdesign entwickelt.

Folgende übergeordnete Ziele wurden im Projekt verfolgt:

- Erhöhung der Effizienz des Antriebssystems (bis zu 10%)
- Reduktion von Umweltauswirkungen (Lärm, CO₂, NO_x, SO_x)
- Erhöhung der Lebensdauer von Komponenten (bis zu 20%)
- Erhöhung der Sicherheit während des Betriebs durch Reduktion von Ausfallrisiken
- Verminderung von Vibrationen und Lärm im und außerhalb des Schiffs
- Reduzierung der Kosten für den Betrieb und die Wartung des Antriebssystems (bis zu 5%)

Zur Effizienzsteigerung und Emissionsverringering des Antriebssystems floss zum einen eine weiterentwickelte Analyse des Seeverhaltens (Advanced Seakeeping) in den Konstruktionsprozess des Schiffs ein, die dazu beiträgt äußere Lasten, die auf das Antriebssystem wirken, zu reduzieren und dadurch bessere Betriebsbedingungen für den Antriebsstrang zu schaffen.

Zum anderen wurde im Rahmen des Projekts ein „Condition Monitoring“-Konzept entwickelt, dass insbesondere die Betriebssicherheit und Lebensdauer des Antriebs erhöht aber auch als Eingangsgröße für ein Konzept zur aktiven Regelung des Antriebssystems (Smart Power Control - SPC) genutzt wird, um ineffiziente, unkomfortable oder sogar gefährliche Betriebszustände zu vermeiden.

Zur Reduktion der Umweltauswirkungen (Lärm und Vibrationen) im Inneren und in der Umgebung des Schiffs sollte der Schwingungseintrag des Antriebssystems in die Schiffstruktur durch aktive Systeme („Noise and Vibration Control“ NVC) gemindert werden. Dazu sollte der Körperschalleintrag des Getriebes verringert und die Übertragung in den Schiffsrumpf insbesondere an den Lagerstellen des Getriebes reduziert werden.

Zum Betrieb der Aktoren (NVC) und der Sensoren (NVC und CM) sollte der intelligente Antriebsstrang bisher ungenutzte Energiequellen (z.B. Vibrationen, Abwärme) durch ein „Energy Harvesting“-Konzept nutzen. Die Themenschwerpunkte und Schnittstellen des Gesamtprojekts waren, wie in Abbildung 1 dargestellt, auf die Partner aufgeteilt.

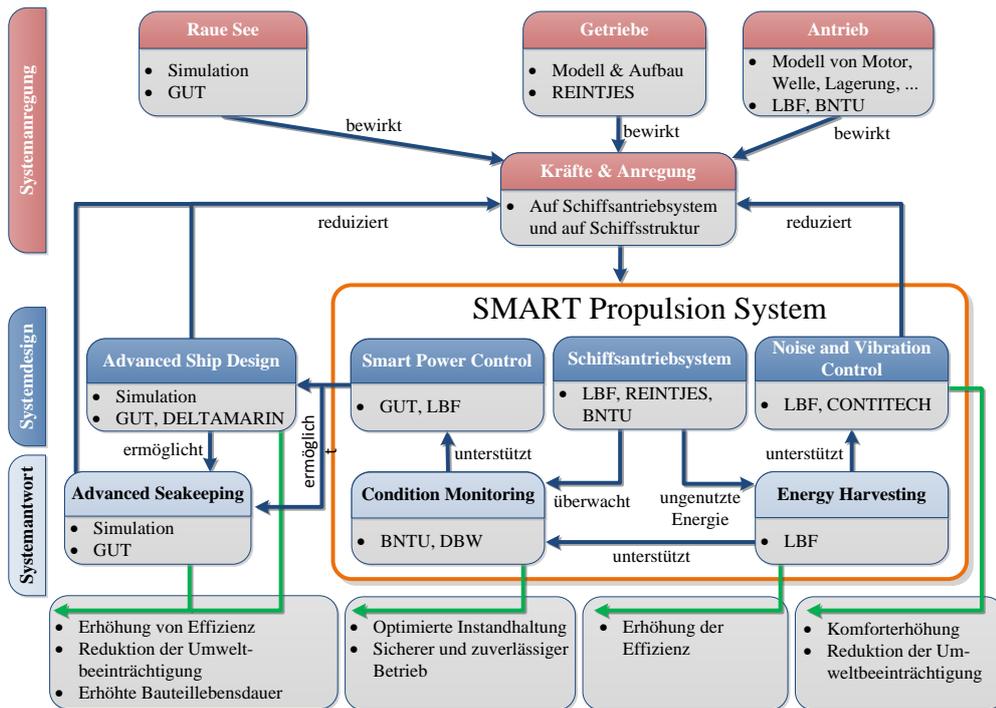


Abbildung 1 Schema der Themenschwerpunkte und der Schnittstellen des Vorhabens, sowie Ihre Aufteilung auf die Partner.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Entwicklung mechatronischer und adaptronischer Systeme sowie die Prüfung ihrer Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit sind Kernaufgaben des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF. Ziel des LBF war es, einen virtuellen Entwurfsprozess für ein intelligentes Antriebssystem zu entwerfen, seine Auswirkung auf die Effizienz des Antriebs, auf die nähere Umwelt, auf die Betriebssicherheit und auf die Lebensdauer des Antriebs zu untersuchen sowie Demonstratoren aufzubauen und experimentell zu validieren. Der Kernbeitrag des LBF zum Gesamtziel des Projekts war dabei die methodische Entwicklung und Validierung eines Energy Harvesting (EH) Konzepts zum „Ernten“ von bisher ungenutzter Energie im Bereich des Antriebsstrangs. Für das Projekt SmartPS wurden in vorangegangenen Projekten relevante Grundlagen erarbeitet. Dabei brachte das LBF unter anderem Erfahrung aus folgenden Projekten mit:

- Verbundprojekt AKTos „Aktive Kontrolle von Torsionsschwingungen durch Kupplungselemente“ (Förderkennzeichen 03SX313A) Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie –BMW i 2011-2014
- Verbundprojekt AAL „Aktive Aggregatlagerung zur Reduktion von Strukturschwingungen und Körperschallübertragung“ (Förderkennzeichen 03SX200B). Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie - BMW i 2005-2007
- Verbundprojekt EPES „Effiziente Prognose vibroakustischer Eigenschaften in der Schiffsentwurfsphase“ (Förderkennzeichen 03SX305A) Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie – BMW i 2010-2014

Die entwickelten Methoden betreffend waren die Hauptthemenfelder im Rahmen des Vorhabens für das Fraunhofer LBF numerische und experimentelle Strukturcharakteri-

2 Eingehende Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse im Einzelnen

2.1.1 AP1 System und Konzept

Im ersten Arbeitspaket wurden numerische Modelle des Antriebsstrangs und der Anregung erstellt. Die Anregung des Motors, des Getriebes und des Propellers lagen dabei im Fokus des LBF. Konzepte für Energy Harvesting sowie für das NVC und SPC wurden entwickelt und hinsichtlich ihrer grundsätzlichen Machbarkeit numerisch überprüft.

2.1.1.1 AP 1.1 Experimentelle Untersuchungen

Ziel des AP war die experimentelle Ermittlung von Daten zur Bestimmung des Ausgangszustands. Sie wurde an einem Versuchsschiff durchgeführt. Die Untersuchung dient als Grundlage zum Aufbau der numerischen Modelle in AP 1.2 und AP 1.3. Zur Ermittlung des Potentials an generierbarer Energie wurden neben den Schwingungsdaten weitere Größen wie Temperatur ermittelt.

Ergebnisse:

- Modale Charakterisierung des Antriebsstranges des ausgewählten Forschungsschiffes „Navigator XXI“ liegt vor
- Dynamisches Verhalten (Vibrationen, dyn. Momente) an Motor, Getriebe, Kupplung, und Propellerwelle im Fahrbetrieb an relevanten Messstellen liegt vor (siehe Abbildung 3).

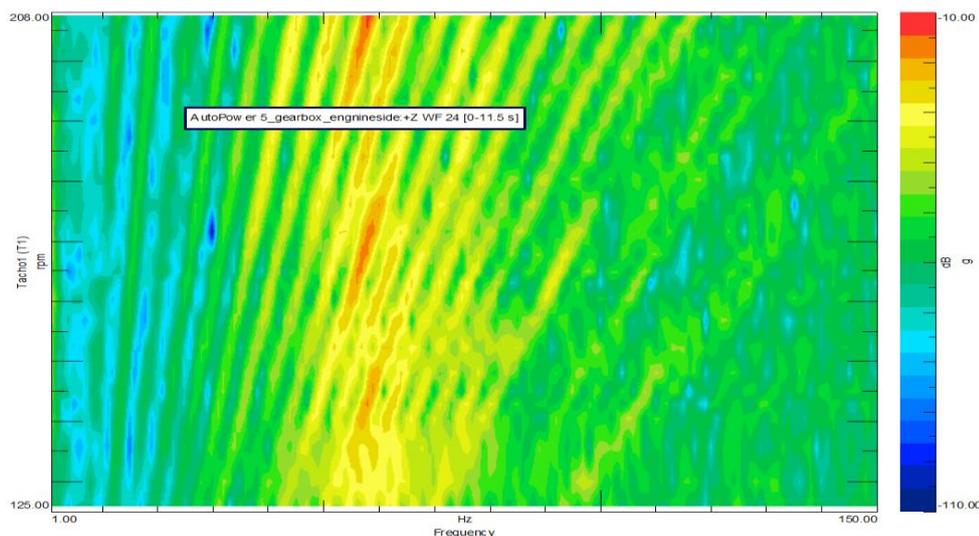


Abbildung 3 Beispiel Beschleunigungsmessung am Getriebe motorseitig in Z-Richtung bei Motorhochlauf.

Durchgeführte Arbeiten:

- Auf dem Forschungsschiff wurde experimentell eine modale Charakterisierung des Antriebsstranges insbesondere im Bereich der Motor- und Getriebelegung durchgeführt.



Abbildung 4 Forschungsschiff "Navigator XXI".

- Anschließend wurde durch diverse Messfahrten das für folgende AP relevante dynamische Betriebsverhalten des Antriebstranges und eines Komfortpunktes in unterschiedlichen Betriebszuständen messtechnisch erfasst. Die Daten wurden ausgewertet und für folgende AP aufbereitet.
-

2.1.1.2 AP 1.2 Struktursimulation

Ziel des AP war der Aufbau eines Simulationsmodells, das die Struktur­dynamik des Antriebstrangs beinhaltet. Dabei sollte vor allem das Torsionsverhalten abgebildet werden. Rotordynamische Effekte wurden betrachtet und ebenfalls berücksichtigt. Das aufgebaute Modell bildete zusammen mit der Anregungssimulation (AP 3) eine Grundlage für die Machbarkeitsuntersuchungen, die in AP 4, AP 5, AP 6 und AP 7 durchgeführt wurden.

Ergebnisse:

- Ein numerisches Modell des Antriebstrangs der „Navigator XXI“ wurde aufgebaut und Simulationsergebnisse wurden mit den experimentell ermittelten Daten aus AP 1.1 abgeglichen.
- Abbildung 5 zeigt die simulierte Winkelgeschwindigkeit am Getriebeeingang bei einem Motorhochlauf (400 – 800 U/min). Die größten Schwinggeschwindigkeiten treten bei ca. 450 U/min (1. Motorordnung trifft die 1. Eigenfrequenz des Antriebstrangs bei ca. 7,5 Hz) und bei ca. 660 U/min (2,5. Motorordnung trifft die 2. Eigenfrequenz des Antriebstrangs bei ca. 27,5 Hz) auf.

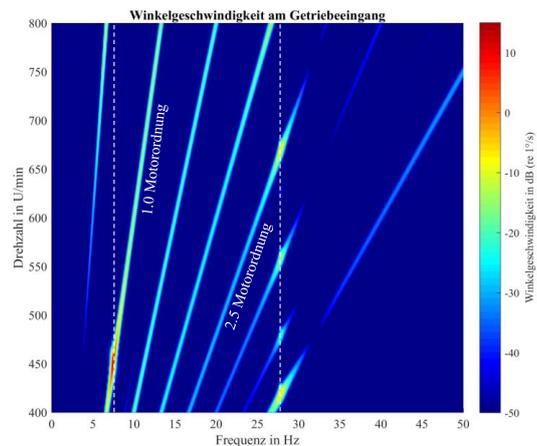


Abbildung 5 Simulierte Winkelgeschwindigkeit am Getriebeeingang bei einem Motorhochlauf.

- Die Lage der Eigenfrequenzen des Antriebsstrangs und das qualitative Strukturverhalten wurden nachgebildet und mit Messwerten validiert.
- Das Simulationsmodell des Antriebsstrangs der „Nawigator XXI“ wurde mit den experimentell erzeugten Ergebnissen aus AP 1.1 validiert und abgeglichen. Es wurden die Antriebsmaschine und der daran angebundene Antriebsstrang betrachtet.
- Das Gesamtmodell der Antriebsanlage wurde durch ergänzende Teilmodelle des Getriebes und der Getriebelagerung detailliert. Das Getriebegehäuse wurde als Starrkörper, die Getriebelager als Feder-Dämpfer-Elemente modelliert. Das Schiffsfundament wurde als starr angenommen. Das Getriebe-Modell ist in Abbildung 6 skizziert.

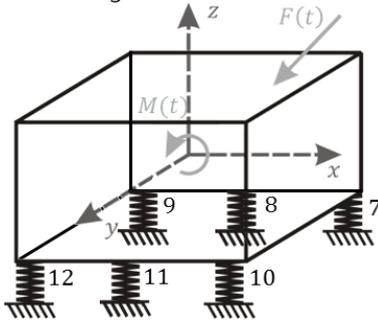


Abbildung 6 Modell des Getriebes mit Lagerungselemente

- Die gemessenen und simulierten Übertragungsfunktionen zwischen Verschiebung der Getriebeanbindungspunkte (Positionen 7-12) zur Kraft an Position 7 sind in Abbildung 7 dargestellt.

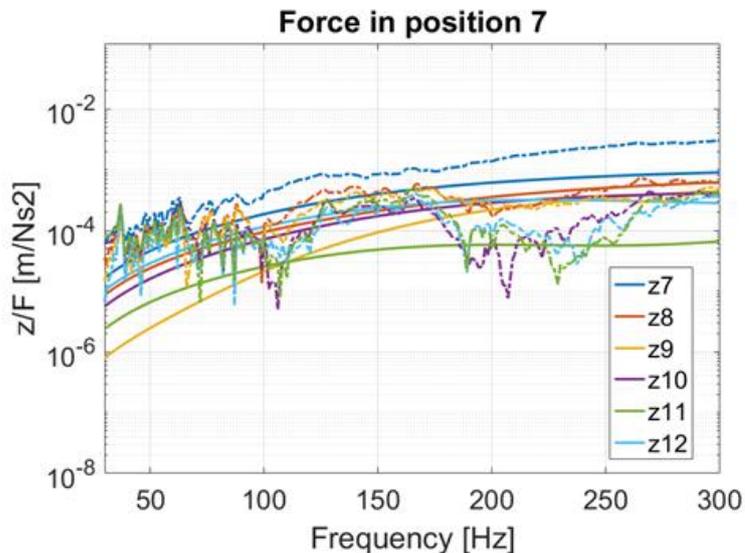


Abbildung 7 Vergleich zwischen gemessenem (gepunktete Linien) und simuliertem (durchgezogene Linien) Übertragungsverhalten.

Durchgeführte Arbeiten:

- Die verfügbaren Daten (technische Zeichnungen) der „Nawigator XXI“ wurden gesichtet und einige Parameter wurden zur Erzeugung der notwendigen Modelle abgeleitet.
- Die fehlenden Daten wurden so abgeschätzt, dass das dynamische Verhalten den Messwerten aus AP 1.1 entspricht. Hierzu wurde Betriebsmessdaten des Motorunterlaufs vor dem Auskuppeln bzw. Motorhochlaufs nach dem Ein-

kuppeln verwendet. Für den Antriebsstrang wurden Eigenfrequenzen bei 7,5 Hz und 27,5 Hz ermittelt (Vergleich Abbildung 8).

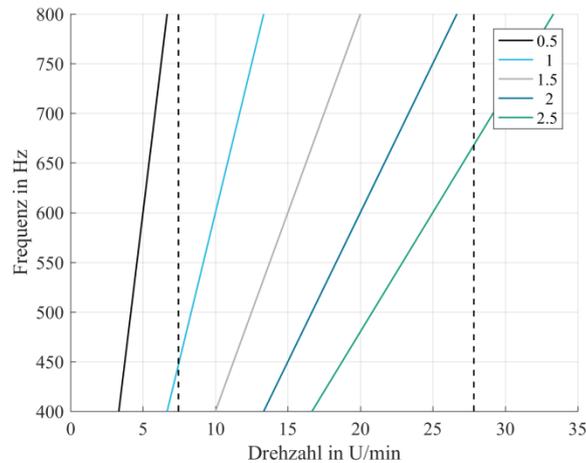


Abbildung 8 Eigenfrequenzen des Antriebsstrangs (schwarzgestrichelt) und zu erwartende Motorordnungen (Haupterreger des Gesamtsystems).

- Der Antriebsstrang wurde mit den ermittelten Parametern als Torsionsschwinger mit vier Freiheitsgraden modelliert.
- Das Getriebe wurde als Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden (alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade in den drei Raumrichtungen) modelliert.
- Der Starrkörper ist mit sechs Lagerelementen, die jeweils drei diskrete translatorische Feder- und Dämpfungsbeiwerte besitzen, an einem als starr angenommenen Schiffsfundament angebunden. Die Lagerelemente und Getriebeanbindungspunkte sind entsprechend Abbildung 6 durchnummeriert.
- Die verwendeten Steifigkeitsbeiwerte wurden aus den Messdaten (AP 1.1) an den sechs Getriebeanbindungspunkten abgeschätzt.
- Die simulierten Verschiebungen an den sechs Anbindungspunkten wurden im Frequenzbereich 0 Hz – 300 Hz abgeglichen. Dieser betrachtete Frequenzbereich wurde ausgewählt, da er von besonderem Interesse für den Komfort an Bord von Schiffen ist.

2.1.1.3 AP 1.3 Anregungssimulation

Ziel des AP war die numerische Abbildung der Anregung des Antriebstrangs. Dabei sollten die Anregung durch die Schraube, den Verbrennungsmotor und die Getriebeverzahnung betrachtet werden. Weitere Anregungseffekte, wie beispielsweise durch die Kupplung, wurden ebenfalls berücksichtigt. Das aufgebaute Modell bildete zusammen mit der Struktursimulation (AP 2) eine Grundlage für die Machbarkeitsuntersuchungen, die in AP 4, AP 5, AP 6 und AP 7 durchgeführt wurden.

Ergebnisse:

- Die Erregermodelle für Motor und Propeller wurden erzeugt und mit dem Modell der mechanischen Struktur gekoppelt.
- In Abbildung 9 sind die resultierenden Tangentialdruckverläufe für die Motordrehzahlen 500, 600, 700, 900, 1100 und 1230 U/min dargestellt.

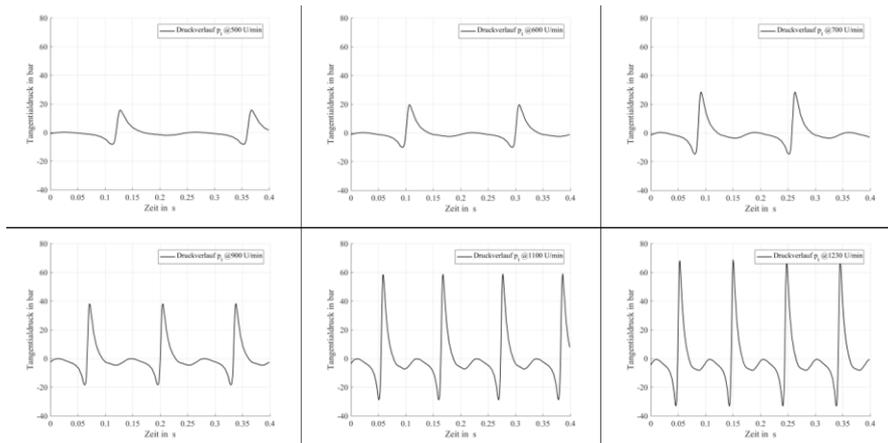


Abbildung 9 Tangentialdrücke für verschiedene Motordrehzahlen.

- Zur Berechnung realistischer Erregerdaten wurde ein Modell der Verbrennungsmaschine in das Gesamtmodell integriert.
- Die vom Verbrennungsmotor erzeugten Erregerkräfte wurden unter Verwendung des Zylinderdruckverlaufs eines Zylinders berechnet und auf den realen 8-Zylindermotor übertragen.
- Die benötigten Koeffizienten zur Parametrierung des Erregermodells wurden aus Referenzdaten einer ähnlichen Antriebsmaschine abgeleitet (siehe Abbildung 10). Die Skalierung der Koeffizienten wurde anhand der Propellerkurven, d.h. der nominellen Leistungen am Propeller, durchgeführt.

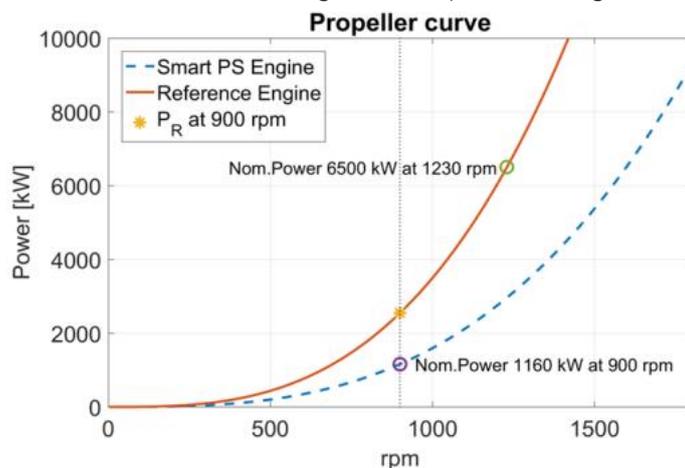


Abbildung 10 Propellerkurven der Referenz- und "Nawigator XXI"-Antriebsmaschine.

- Exemplarische Ergebnisse der Gesamtsystems simulation (Strukturmodell aus AP 1.2 und Erregermodell aus AP 1.3) sind in Abbildung 11 dargestellt. Abgebildet sind Wasserfall-diagramme des simulierten und gemessenen dynamischen Drehmoments am Getriebeeingang für einen Motorhochlauf von 400 U/min auf 750 U/min.

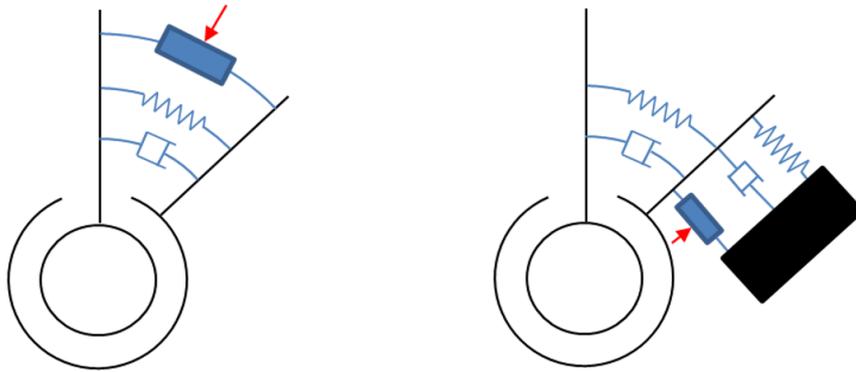


Abbildung 12 Aktive Kupplung (links) und Inertialmassenaktor (IMA, rechts).

- Zwei Energy-Harvesting-Ansätze wurden untersucht: Piezoelektrische Keramiken und Schwingspulen. Es wurden insgesamt vier Systeme modelliert und untersucht sowie die speziellen Abhängigkeiten der Parameter berücksichtigt.
- Einige Untersuchungen wurden bereits in der Konzeptphase durchgeführt. So konnte gezeigt werden, dass der IMA geeigneter ist, wenn eine relevante Absorption der vorhandenen Schwingung erzeugt werden soll (Energy Harvesting im Schwingungstilger). Dagegen kann die aktive Kupplung einfacher zu integrieren sein und zeigt weniger dynamische Auswirkungen auf das Gesamtsystem.
- Basierend auf den Vorergebnissen (siehe letzter Bericht) wurden in der Machbarkeitsstudie das piezoelektrische und das elektrodynamische Konzepte verglichen. Die jeweiligen Varianten wurden so aufgebaut, dass sie die gleiche Resonanzfrequenz besitzen. Der jeweilige Versuchsaufbau ist Abbildung 13 zu entnehmen.

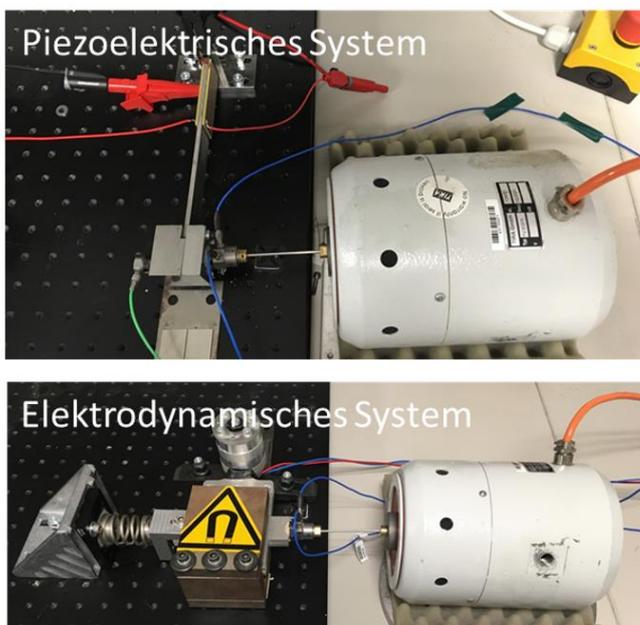
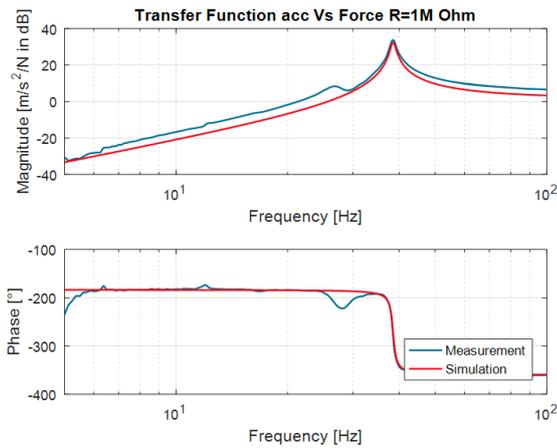


Abbildung 13 Versuchsaufbau piezoelektrischer (oben) und elektrodynamischer (unten) Energy-Harvester.

- Beide Systeme können als Einmassenschwinger modelliert werden. Bei Anregung der Systeme durch einen Schwingerreger wird ersichtlich, dass die Resonanzfrequenzen des piezoelektrischen und die des elektrodynamischen Energy Harvesters annäherungsweise übereinstimmen (Abbildung 14).

Transferfunktion des piezoelektrischen Energy-Harvesters



Transferfunktion des elektrodynamischen Energy-Harvesters

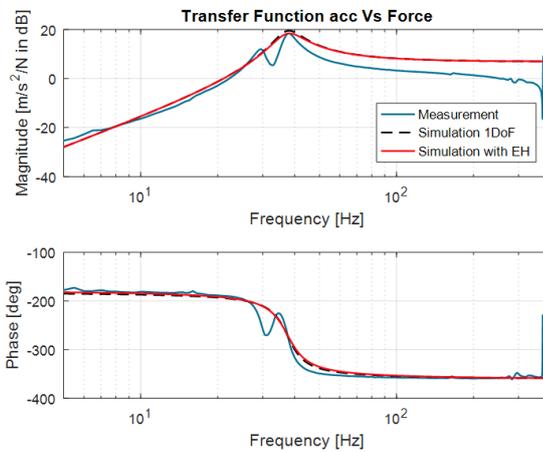
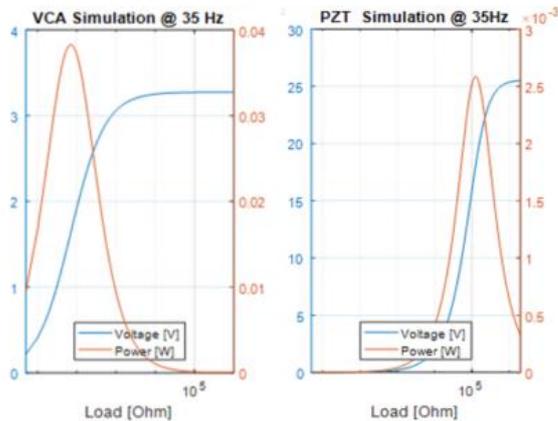


Abbildung 14 Übertragungsverhalten der Energy Harvester.

- Folglich können die Simulations- und Messergebnisse beider Systeme verglichen werden. Die Simulations- und Messergebnisse der erzielbaren Leistung in Abhängigkeit vom elektrischen Widerstand (Verbraucher) in Abbildung 15 zeigen, dass mittels eines elektrodynamischen Energy-Harvesters eine höhere elektrische Leistung generiert werden kann.

Vergleich der Simulationsergebnisse:

Elektrodynamisch (links), piezoelektrisch (rechts)



Vergleich der Messergebnisse:

Elektrodynamisch (links), piezoelektrisch (rechts)

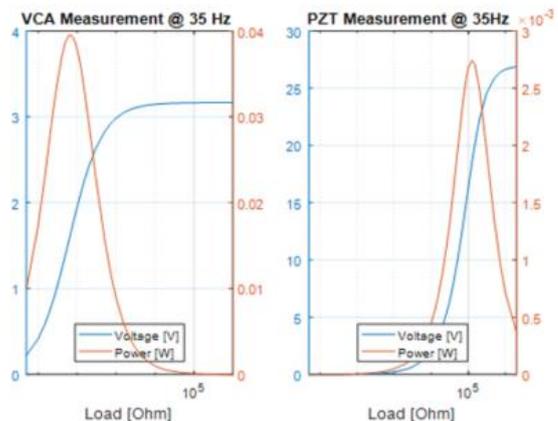


Abbildung 15 Vergleich der Simulations- und Messergebnisse beider Wandlerprinzipien.

2.1.1.5 AP 1.5 Machbarkeitsuntersuchung: Smart Power Control (SPC)

Ziel des AP war es, die Machbarkeit der SPC numerisch nachzuweisen. Voraussetzung für die Bearbeitung dieses AP waren Ergebnisse der GUT, die insbesondere die Interaktion zwischen rauen Seebedingungen, dem Antriebsstrang und dem Schiffsrumpf als Starrkörper mit sechs Freiheitsgraden sowie der Interaktion des Antriebsstrangs mit dem Schiffsrumpf beschreiben. Hier sind insbesondere quasistatische, transiente und niederfrequente Kräfte von Bedeutung.

Ergebnisse:

- Konzept zur Untersuchung der Einflussmöglichkeiten durch Smart Power Control wurde im Rahmen numerischer Simulationen validiert

Durchgeführte Arbeiten:

- Es wurde ein Konzept zur Untersuchung der Einflussmöglichkeiten durch einen regelungstechnischen oder aktorischen Eingriff in den Antriebsstrang erarbeitet (Smart Power Control, SPC). Dabei sollen in den folgenden numerischen Simulationen die Eingriffsmöglichkeiten Pitch-Verstellung (1), zusätzliche Brem-

se (2) und zusätzlicher Elektromotor (3) im Antriebsstrang untersucht werden. Zur Regelung kommen dabei Ausgangsrückführungen oder Regelungen auf Basis von Fuzzy-Netzwerken in Frage

- Für die Umsetzung der Simulationsumgebung wird das Modell des Antriebsstrangs (AP 1.2 und 1.3) und der zeitliche Verlauf des Lastmoments an der Motorwelle verwendet. Der zeitliche Verlauf des Lastmomentes wurde dabei zuvor für die störenden Effekte Ventilation, Kavitation und ein Auftauchen des Propellerblatts berechnet.
- Es wurden zwei Konzepte zur Untersuchung der Einflussmöglichkeiten durch einen aktorischen Eingriff in den Antriebsstrang (Smart Power Control, SPC) im Rahmen numerischer Simulationen untersucht. Dabei wurden eine Bremse (1) oder ein Elektromotor (2) als zusätzliche Aktorik im Antriebsstrang untersucht.

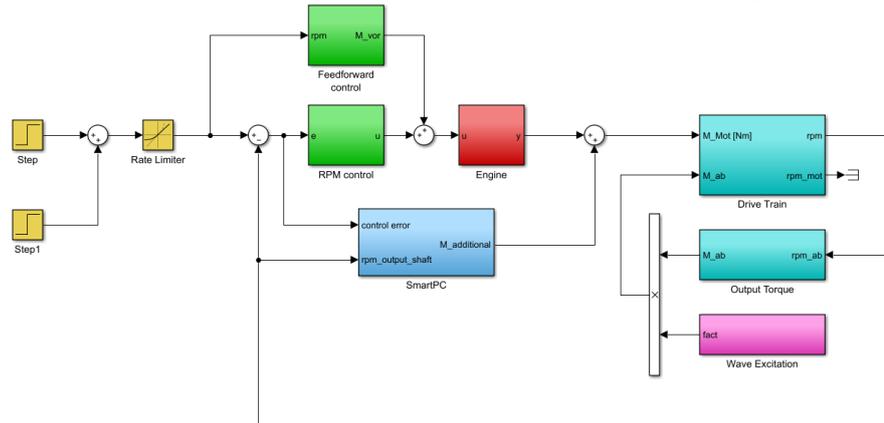


Abbildung 16 Erweitertes Simulink-Modell mit Smart Power Control.

- Zur Ansteuerung der Zusatzaktorken nutzt die SPC einen Proportional-Regler, dessen Eingriffsstärke durch einen Wellenerkennungsmechanismus selbstständig nachgeführt wird. Die Drehmomente des Verbrennungsmotors und der SPC überlagern sich im Modell. Für die Zusatzaktorken werden ein maximales Drehmoment von 1kNm und eine Bandbreite von 20 Hz vorgesehen. Die Wellenanregung wird im Simulationsmodell durch eine Abschwächung des Lastmomentes (d.h. Reduktion der Propellerkurve um bis zu 20%) vorgesehen.

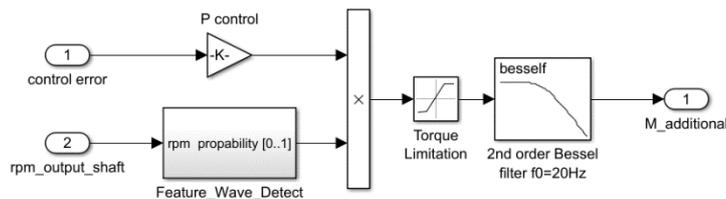


Abbildung 17 Realisierung der Smart Power Control.

- Bei der Einstellung des Regelkreises müssen hierbei die Regelverstärkung und die vier unabhängigen Parameter des Wellenerkennungsmechanismus gleichzeitig optimiert werden. Zu diesem Zweck wurde im Berichtszeitraum eine Matlab-Python-Schnittstelle implementiert, wobei die Systemsimulation in Matlab/Simulink und die Parameteroptimierung durch einen genetischen Algorithmus in Python durchgeführt wird. Zur Umsetzung des genetischen Algorithmus in Python wurde auf das bestehende Package DEAP (<https://github.com/deap>) zurückgegriffen. Der Fitnesswert der Optimierung entspricht dem dynamischen Drehmoment am Getriebeeingang, neben einem Zweipunkt-Crossover wird ebenfalls eine Mutation nach dem NSGA-II Algorithmus vorgesehen. Für die Parameteroptimierung wurden eine Populations-

größe von 50 Individuen und eine Laufzeit von zehn Generationen vorgesehen. Für die Parameteroptimierung wurde ein mittleres Anregungsszenario in der Systemsimulation gewählt.

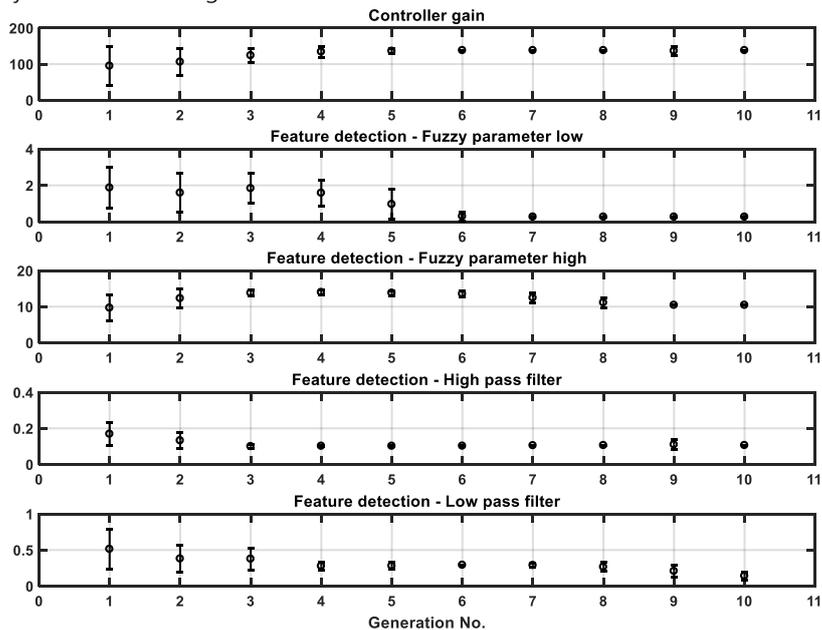


Abbildung 18 Parameterwerte der Optimierung über die verschiedenen Generationen. Die Grafik zeigt ebenfalls die mittlere Abweichung vom Mittelwert des Parameters aller Individuen einer Generation. Nach etwa zehn Generationen ist die Optimierung abgeschlossen.

- Für die Validierung beider Konzept (d.h. SPC mit zusätzlichem Elektromotor vs. SPC mit zusätzlicher Bremse im Antriebsstrang) in der numerischen Simulation wurden vier exemplarische Anregungsmechanismen untersucht. Die Anregungsdaten wurden hierbei von der GUT zur Verfügung gestellt. In den numerischen Simulationen konnte für alle betrachteten Konfigurationen (alle Anregungen und beide SPC-Konzepte) eine Reduktion des dynamischen Drehmomentes im Antriebsstrang beobachtet werden. Exemplarisch werden in diesem Bericht die Ergebnisse für eine Wellenanregung mit einer Wellenhöhe von 4 m und einer mittleren Periodendauer von 6,8 s vorgestellt.

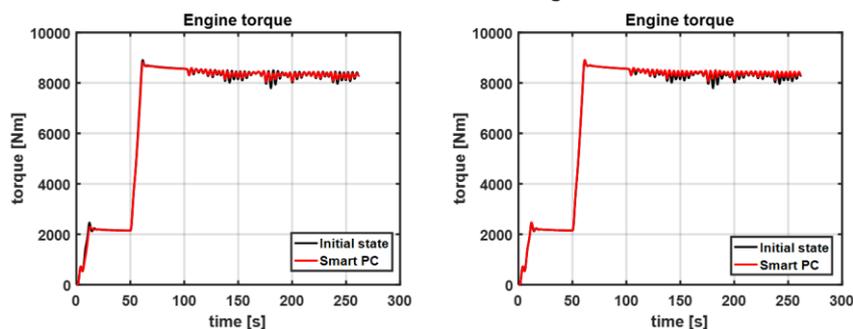


Abbildung 19 Motormoment für einen exemplarischen Hochlauf. Die Wellenanregung (4 m Wellenhöhe; 6,8 s Periodendauer) startet nach 100 Sekunden. Die mit SPC ergibt sich ein glatter Drehmomenten-verlauf. (SPC mit Elektromotor [links] und SPC mit Bremse [rechts]).

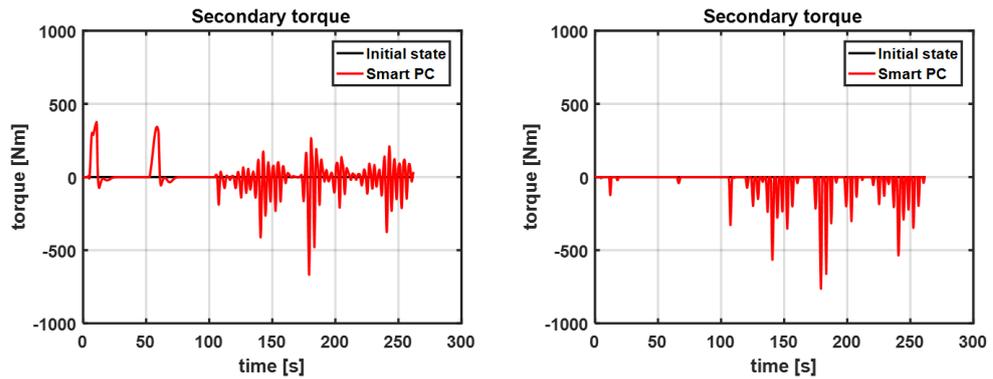


Abbildung 20 Das durch den Elektromotor eingebrachte Zusatzmoment [links] und das durch die Bremse eingebrachte Zusatzmoment [rechts].

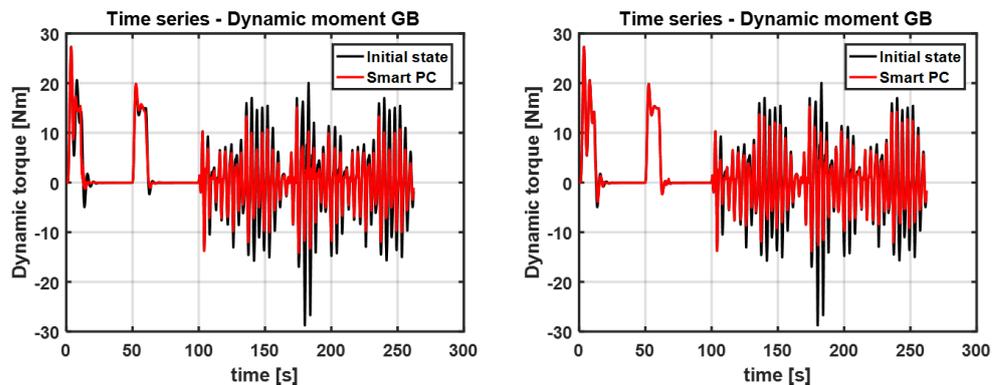


Abbildung 21 Dynamisches Drehmoment am Getriebeeingang mit und ohne SPC (SPC mit Elektromotor [links] und SPC mit Bremse [rechts]).

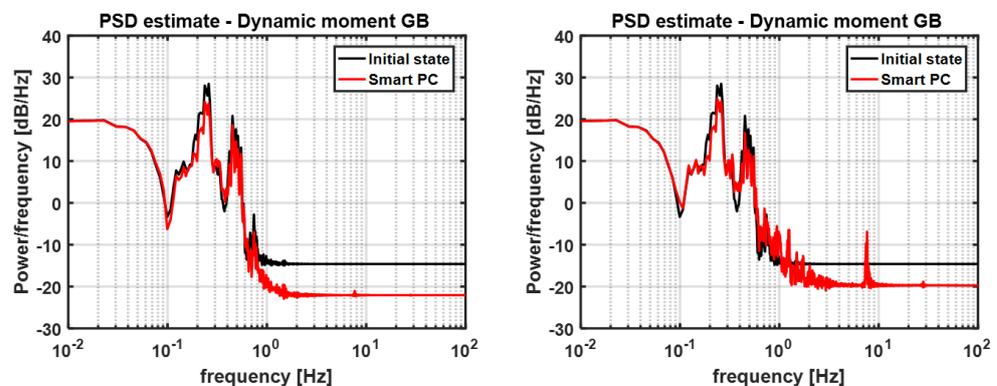


Abbildung 22 Dynamisches Drehmoment am Getriebeeingang mit und ohne SPC (SPC mit Elektromotor [links] und SPC mit Bremse [rechts]).

- Bei der Betrachtung der Ergebnisse können die folgenden Teilergebnisse festgehalten werden: Sowohl die SPC-Methode mit zusätzlichem Elektromotor als auch die SPC-Methode mit zusätzlicher Bremse im Antriebsstrang führen zu einer deutlichen Reduktion des dynamischen Drehmomentes, das durch ein schwankendes Lastmoment am Propeller (bedingt durch den Seegang) hervorgerufen wird (vgl. Abbildung 22 bei ca. 0,28 Hz). Durch die Einleitung von positiven Drehmomenten (vgl. Abbildung 5; links), gelingt es der SPC mit Elektromotor ebenfalls Drehmomentenspitzen hervorgerufen durch Drehzahländerungen des Verbrennungsmotors wirksam zu unterdrücken (vgl. Abbildung 21; links; bei ca. 20 s). Auch wenn der Energiebedarf der SPC mit zusätzlicher Bremse im Antriebsstrang deutlich niedriger ausfällt, als bei der SPC mit zusätzlichem Elektromotor, muss weiter untersucht werden, ob sich die parasitä-

ren höherfrequenten Drehmomentanteile des SPC mit zusätzlicher Bremse (vgl. Abbildung 22; rechts ab etwa 0,5 Hz) störend auf den Antriebsstrang auswirken könnten.

2.1.1.6 AP 1.6 Machbarkeitsuntersuchung: Noise & Vibration Control (NVC)

Ziel des AP war es, die Machbarkeit der NVC numerisch nachzuweisen.

Ergebnisse:

- Das Konzept für eine Machbarkeitsuntersuchung wurde anhand eines generischen Beispiels erarbeitet.
- Ermittlung einer optimalen Position für verschiedene Maßnahmen zur Schwingungsreduktion. Vergleich der Komplexität, Leistungsbedarf und Effizienz, um den besten Kompromiss für die Schwingungsreduktion zu erzielen.
- Eine numerische Untersuchung verschiedener Konzepte zur Schwingungsreduktion wurde durchgeführt. Verglichen wurden passive und aktive Maßnahmen im Hinblick auf die erreichbare Amplitudenreduktion (bei der interessierenden Frequenz), die Reduktion der kinetischen Energie und die Leistungsaufnahme.

Durchgeführte Arbeiten:

- Die Machbarkeitsstudie konzentriert sich im Wesentlichen auf eine Torsions-Resonanzfrequenz des Antriebsstrangs. Für diese Frequenz wurde für jede Masse eines Mehrkörpersystems (MDOF) ein äquivalentes Ein-Freiheitsgrad-System (SDOF) berechnet.
- Für jedes SDOF wurde ein optimal abgestimmter Tilger ausgelegt. Ein solches System zeigt eine sehr hohe Dämpfung und kann lediglich als Referenzwert herangezogen werden. Die Tilger werden an den verschiedenen Stellen des MDOFs angekoppelt und das Gesamtsystemverhalten untersucht.
- Die Kombination aus Tilger und Anbindungspunkt, die den besten Kompromiss aus Schwingungsminderung im betrachteten Frequenzbereich und Verschlechterung der Performance außerhalb zeigt, wird als optimales System definiert.

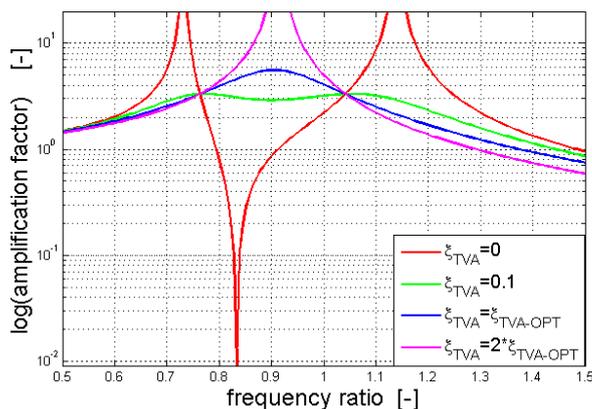


Abbildung 23 SDOF mit integriertem Tilger. Systemverhalten für verschiedene Dämpfungswerte.

- Die Auswertung eines Neutralisators, eines adaptiven und eines aktiven Systems ist für die nächste Phase geplant. Diese Ansätze werden mit dem untersuchten Tilger verglichen.
- Die Kombination aus Tilger und Anbindungspunkt, die den besten Kompromiss aus Schwingungsminderung im betrachteten Frequenzbereich und Ver-

schlechterung der Performance außerhalb zeigt, wird als optimales System definiert.

- Die kinetische Gesamtenergie und die relative Rotationsgeschwindigkeit zwischen Tilger und Struktur werden simuliert.
- Der ausgewählte Tilger (TVA2 angebracht an der Kupplung) stellt den besten Kompromiss zwischen geringerer kinetischen Energie und höchster Relativgeschwindigkeit dar (Abbildung 24). Die ermittelten mechanischen Parameter für den Tilger sind:

$$J_{TVA} = 2.599 \text{ kgm}^2 \text{ (Trägheitsmoment)}$$

$$k_{TVA} = 5.6275e4 \text{ Nm/rad (Torsionssteifigkeit)}$$

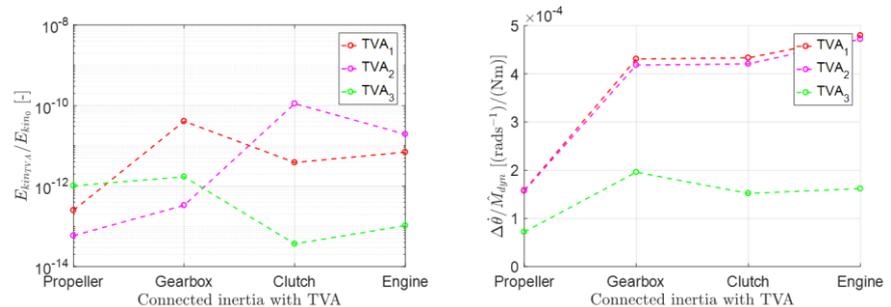


Abbildung 24 Kinetische Energie bezogen auf die ursprüngliche kinetische Gesamtenergie aller untersuchten Kombinationen (links). Relativgeschwindigkeit zwischen Tilger und Struktur bezogen auf die dynamische Last (rechts).

- Mit den ermittelten Parametern wurde eine Hochlauf-Simulation durchgeführt werden, die resultierende Schwingungsminderung kann abgeschätzt und mit dem ursprünglichen Modell verglichen werden (Abbildung 25)

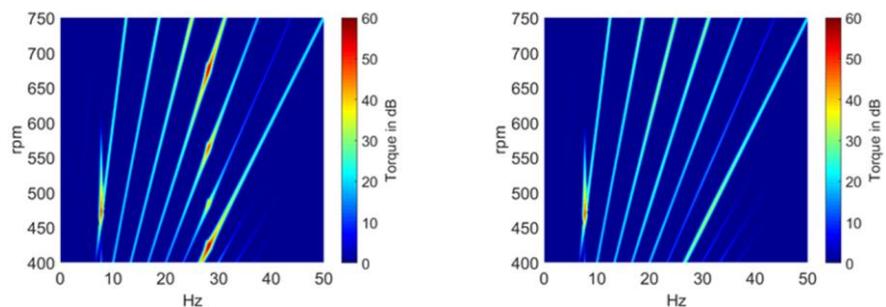


Abbildung 25 Simuliertes Drehmoment am Getriebeeingang bei einem Motorhochlauf: Referenzmodell (links) und Modell mit Tilger (rechts).

- Für den gesamten Antriebsstrang dient die Amplitudenreduktion bei 28 Hz (zweite Eigenfrequenz) als Bewertungsgrundlage für die Wirksamkeit der Maßnahme. Das gesamte Verhalten des Systems wird mittels der kinetischen Energie über dem gesamten Frequenzbereich (1 – 120 Hz) bewertet. Auch die zusätzlich eingebrachte Masse wird zur Bewertung der jeweiligen Maßnahme herangezogen.
- Aktive und passive Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung im Antriebsstrang wurden mittels numerischer Simulationen untersucht. Neben der Untergliederung in aktive und passive Maßnahmen kann eine Einteilung entsprechend deren Anordnung innerhalb bzw. außerhalb des Lastpfades vorgenommen werden (Abbildung 26). Bei Maßnahmen innerhalb des Lastpfades wird eine Dämpfung von 60 Nms/rad zwischen den jeweiligen Massenträgheitsmomenten des Antriebsstrangs eingeleitet. Im Falle der passiven Maßnahme wird hierfür ein einfaches Dämpfungsglied verwendet und im Falle der aktiven

Maßnahmen ein elektrodynamischer Aktor. Für Lösungen außerhalb des Lastpfades wird ein Tilger als passive Lösung untersucht. Die aktiven Lösungen außerhalb des Lastpfades bestehen in einem Inertialmassenaktor und einem äußeren, auf das jeweilige Massenträgheitsmoment aufgeprägten, Moment.

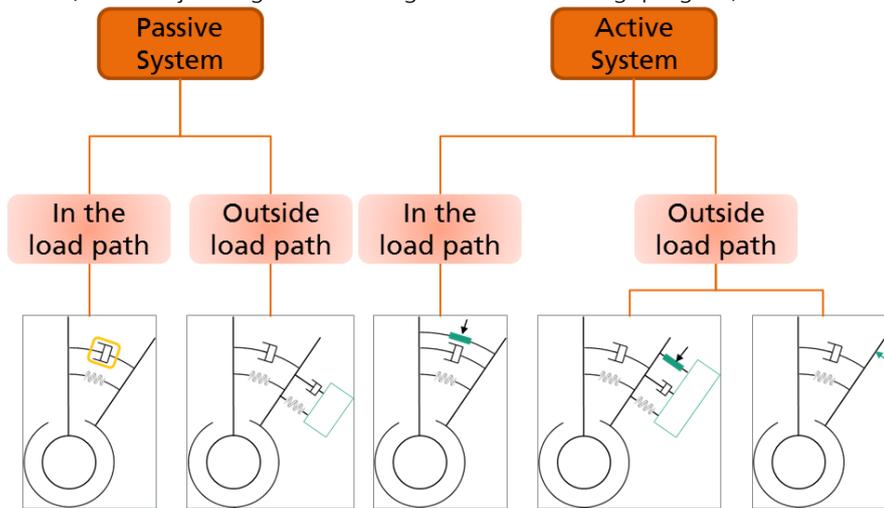


Abbildung 26 Konzepte zur Schwingungsreduktion.

- Die Berechnung der gesamten durchschnittlichen kinetischen Energie beruht auf vier Übertragungsfunktionen des Antriebsmomentes gegenüber der Winkelgeschwindigkeit. Diese werden jeweils für den Motor, die Kupplung, das Getriebe und die Schiffsschraube gebildet. Durch Multiplizieren der Übertragungsfunktion mit den jeweiligen einzelnen Massenträgheitsmomenten, werden vier kinetische Energien berechnet. Anschließend wird durch Mittelwertbildung die durchschnittliche kinetische Energie berechnet. Eine schematische Darstellung der Berechnung ist in Abbildung 27 zu sehen.

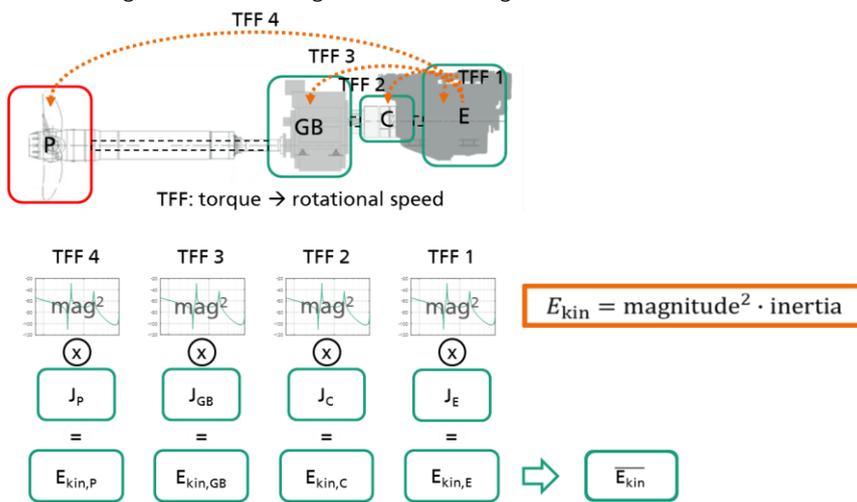


Abbildung 27 Berechnungen der mittleren kinetischen Energie.

- Zur Beurteilung der Maßnahmen innerhalb des Lastpfades werden drei verschiedene Positionen untersucht (Abbildung 28 links), welche durch die Verbindungsstellen zwischen den vier Massenträgheitsmomenten gegeben sind. Die Maßnahmen außerhalb des Lastpfades werden auf die jeweiligen Massenträgheitsmomente aufgeprägt. Insgesamt werden hierfür vier verschiedene Anordnungen untersucht (Abbildung 28 rechts).

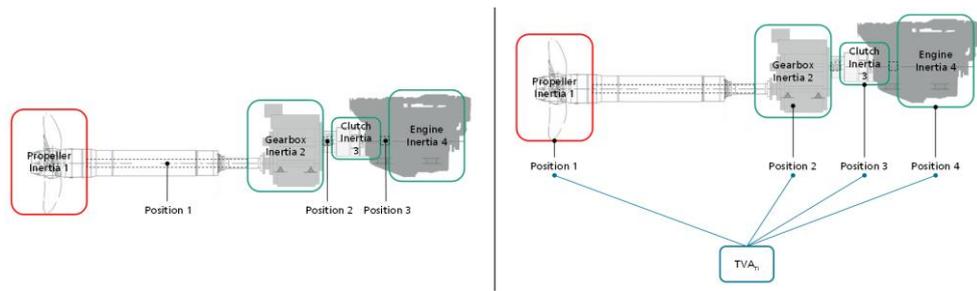


Abbildung 28 Anordnung der Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung. Links sind die drei Positionen der Maßnahmen innerhalb des Lastpfades dargestellt. Rechts sind die Positionen der Maßnahmen außerhalb des Lastpfades dargestellt.

- Im Folgenden sind einige der Simulationsergebnisse dargestellt. In Abbildung 29 sind die Ergebnisse für eine zusätzliche passive Dämpfung in Form der Amplitudenreduktion in der zweiten Resonanzfrequenz und als Reduktion der mittleren kinetischen Energie dargestellt. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse unter Verwendung drei verschiedener Tilger für vier mögliche Anbringungspositionen.

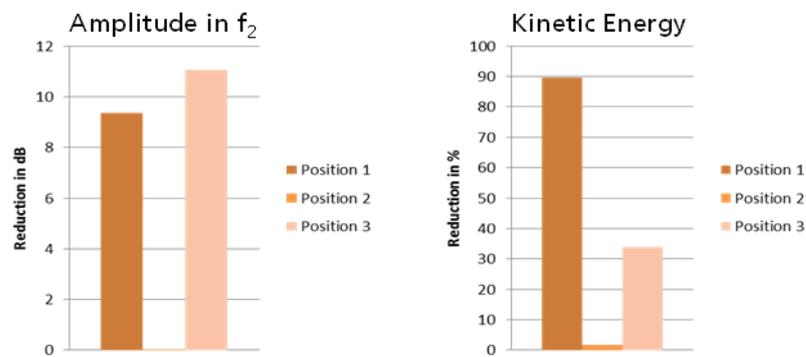


Abbildung 29 Ergebnisse der passiv wirkenden Dämpfung innerhalb des Lastpfades. Die größte Reduktion kann erzielt werden, wenn der Dämpfer zwischen dem Getriebe und der Schiffschraube angebracht wird (Position 1).

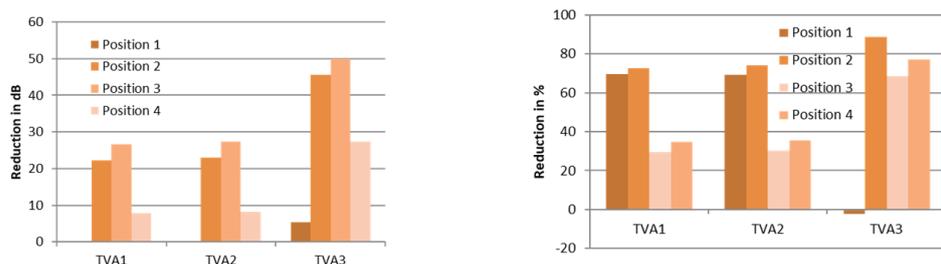


Abbildung 30 Ergebnisse der Applikation eines Tilgers außerhalb des Lastpfades. Links sind die Amplitudenreduktionen in der zweiten Resonanzfrequenz für drei verschiedene Tilger in vier unterschiedlichen Positionen dargestellt. Rechts ist für die jeweils gleichen Fälle die Reduktion der durchschnittlichen kinetischen Energie dargestellt.

- Abbildung 31 stellt die Ergebnisse der Integration eines Aktors zur Einleitung eines dämpfend wirkenden Momentes innerhalb des Lastpfades dar. Zur Simulation wurde ein generisches Model eines elektrodynamischen Aktors mit folgenden Parametern verwendet:

Torsionssteifigkeit	0.01 Nm/rad
Induktivität	4.5 mH
Widerstand	2 Ω
Koppelfaktor	10 N/A
Spannungsverstärkung	50 Vs/rad

- Der Aktor wurde in drei verschiedenen Positionen simuliert (siehe Abbildung 10). Die in Abbildung 31 (rechts) dargestellte Amplitudenreduktion ist auf die Leistungsaufnahme normiert. Folglich stellt der Graph die für eine Amplitudenreduktion von 1 dB (bei 28 Hz) benötigte Leistung dar.

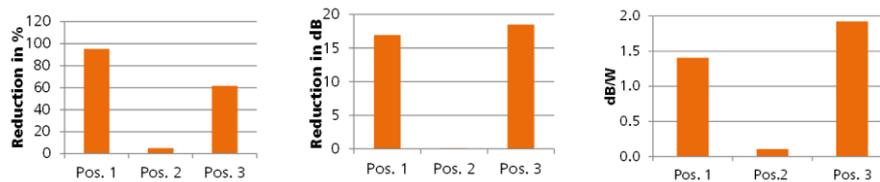


Abbildung 31 Ergebnisse der Anordnung eines Aktors innerhalb des Lastpfades. Der Darstellung links ist die Amplitudenreduktion bei 28 Hz in den drei verschiedenen Anbringungspositionen zu entnehmen. Die mittlere Darstellung zeigt die Reduktion der kinetischen Energie. Auf der rechten Seite ist die Amplitudenreduktion normiert auf die Leistungsaufnahme dargestellt.

2.1.2 AP2 Systementwurf und Realisierung

Ziel diese AP war es, das EH-Konzept in einen Demonstrator umzusetzen an dem die experimentelle Validierung in AP 3.2 durchgeführt werden konnte.

2.1.2.1 AP 2.2 Design des Energy Harvesters (EH)

Ergebnisse:

- Auslegung und Erprobung eines rotatorischen elektrodynamischen Schwingungsenergie-Generators ist noch in Arbeit
- Der elektrodynamische Schwingungsenergie-Generator wurde ausgelegt, aufgebaut und in einem Schwingungsprüfstand erprobt
- Das Design für erste Tests im Antriebsstrang wurde festgelegt
- Auswahl der elektrischen Schaltung für den Energy Harvester
- Analyse der generierten Leistung des EH mithilfe der elektrischen Schaltung
- Implementierung der Sensorschaltung und des Microcontrollers im Antriebsstrang
- Leistungsanalyse der entworfenen Schaltung

Durchgeführte Arbeiten:

- Simulation des elektrodynamischen Prinzips mittels Matlab/Simulink (Umkehrung des Modells eines Voice-Coil-Actuators zu dem Modell eines Energy Harvesters). Ziel: Das System so auszulegen, dass eine Massenträgheit von 0,0024 kgm² und eine Torsionssteifigkeit von 550 Nm/rad vorhanden sind. Somit würde die Resonanzfrequenz des EH mit der des Antriebsstrangprüfstandes übereinstimmen.

- Erarbeitung mehrerer Design-Konzepte zur Realisierung des elektrodynamischen Prinzips. Auf Basis von FEMM-Simulation und Recherchen wurde das Prinzip eines Voice-Coil-Actuators ausgewählt.
- Abgleich/Validierung von FEMM-Simulationsergebnissen mit den Messergebnissen eines bestehenden Aufbaus (Abbildung 32 und Abbildung 33) zur Grundlagenuntersuchung elektrodynamischer Aktoren (Projekt AKTos). Verwendung eines Hall-Sensors zur Messung der magnetischen Feldstärke und eines Multimeters zur Messung der maximal induzierten Spannung.

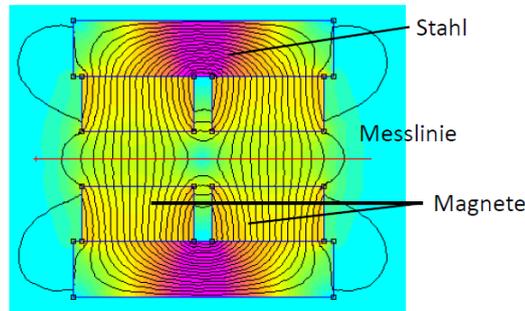


Abbildung 32 FEMM-Simulation des magnetischen Flusses.

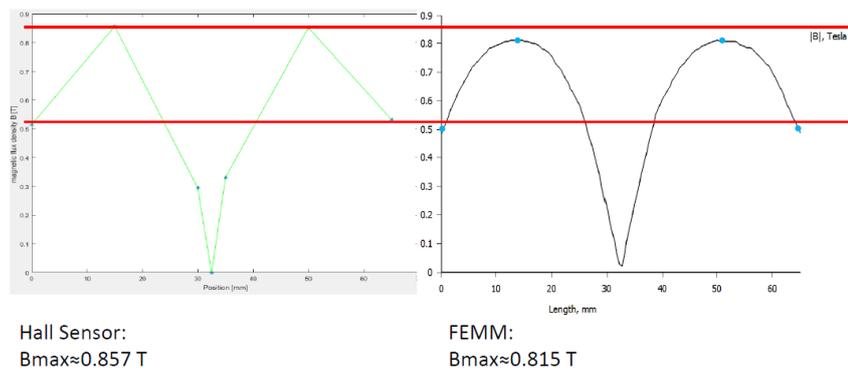


Abbildung 33 Vergleich der Messergebnisse des Hall-Sensors mit denen der FEMM Simulation.

- Konstruktion eines EH-Demonstrators (Abbildung 34), welcher als ein Teilsegment des finalen Prototypes angesehen werden kann und zur Validierung von Simulationsdaten genutzt wird.

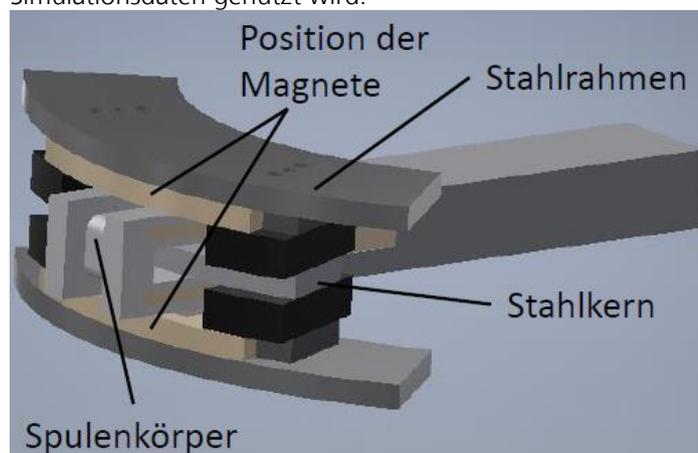


Abbildung 34 Vergleich der Messergebnisse des Hall-Sensors mit denen der FEMM-Simulation.

- Numerische Simulation des magnetischen Flusses zur Auswahl und Dimensionierung der Magnete. Einstellung einer nahezu konstanten magnetischen Flussdichte im Spulenbereich (Abbildung 35).

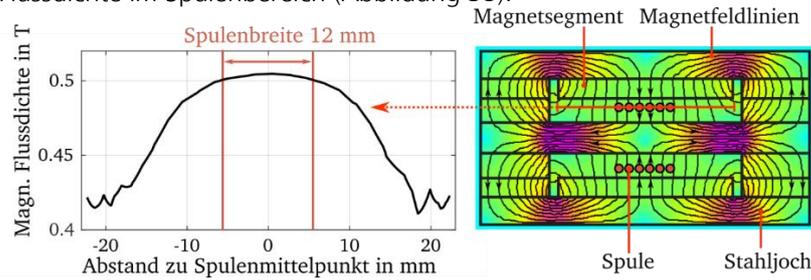


Abbildung 35 Simulation des magnetischen Flusses (rechts) und Darstellung der magnetischen Flussdichte (links) über der Spulenbreite.

- Einstellung des gewünschten Bereichs der Resonanzfrequenz von 50-60 Hz über die rotatorische Steifigkeit eines Biegebalkenelements (Federelement). Auslegung des Federelements in Ansys (Abbildung 36). In dem genannten Frequenzbereich liegt die konstante Drehzahl des Schiffsantriebsstrangs, in dem der Energy-Harvester eingesetzt werden soll. Beim Betrieb des Energy-Harvesters in seiner Resonanzfrequenz kann die maximale Relativgeschwindigkeit zwischen den schwingenden Spulenkörpern und dem magnetischen Feld erzielt werden. Somit wird aufgrund des Faraday'schen Induktionsgesetzes das Maximum an elektrischer Energie erzeugt.

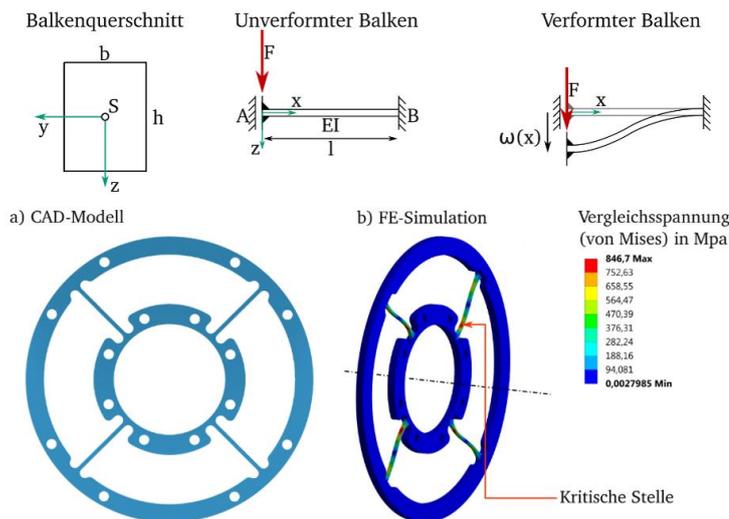


Abbildung 36 Federelement zur Lagerung des Rotors (Spulenkörpers) und zur Erzeugung der erzielten Steifigkeit des schwingenden Systems.

- Konstruktion, Fertigung und Zusammenbau des ersten Prototyps des Energy Harvesters (Abbildung 37).
- Reihenschaltung der Spulen zur Spannungsmaximierung. Um eine drahtlose Datenübertragung via Bluetooth zu realisieren ist eine Spannung von mindestens 5 V erforderlich.

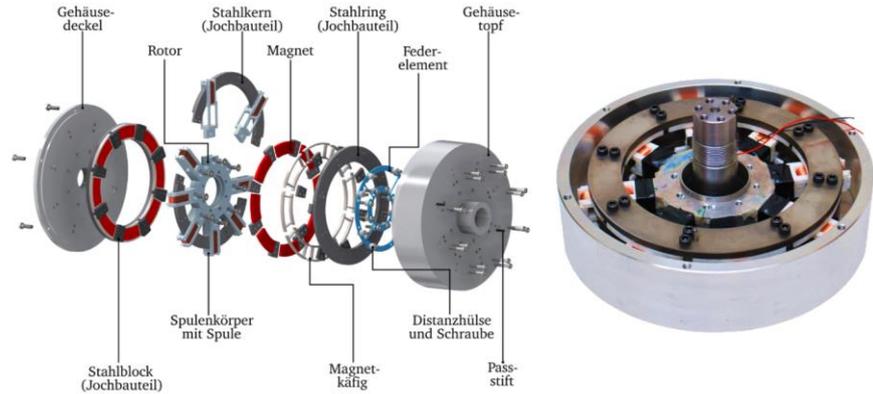


Abbildung 37 CAD Explosionsdarstellung des ersten Prototyps (links) und Abbildung des montierten realen Prototyps ohne Gehäusedeckel (rechts).

- Ermittlung der Resonanzfrequenz des Energy Harvesters von 53,8 Hz. Bei dieser Frequenz kann unabhängig von der Anregungsamplitude die maximale Spannung erzeugt werden (Abbildung 38).

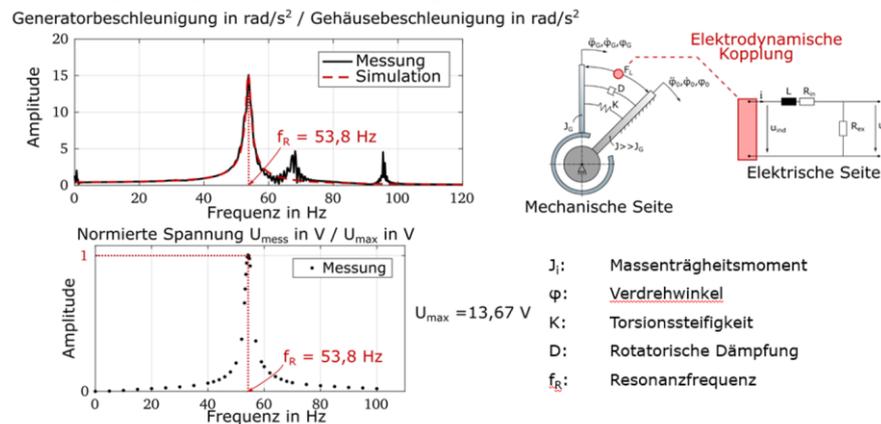


Abbildung 38 Frequenzspektrum zur Bestimmung der Resonanzfrequenz des Energy-Harvesters (oben links), Gemessene, normierte sowie frequenzabhängige erzeugte Spannung (unten links) und Ersatzschaubild zur analytischen Simulation des elektrodynamischen Energy Harvesters (oben rechts).

- Simulation des elektrodynamischen Prinzips mittels Matlab und Abgleich mit Messergebnissen aus dem Schwingungsprüfstand. Das analytische Modell kann durch die Messergebnisse verifiziert werden.
- Der Harvester-Schaltkreis LTC 3330 wird abhängig von der Art der Energiequelle ausgewählt. Der in Abbildung 1 dargestellte Schaltkreis wird verwendet, um die von einem elektrodynamischen Generator erzeugte Energie bereitzustellen. In dem Schaltkreis sind ein Vollwellenspannungsgleichrichter zur Wandlung der vom Generator erzeugten Wechselspannung in Gleichspannung und ein DC/DC Wandler integriert. Zusätzlich ist eine Batterie verbaut, sodass die Funktion des Wandlers in Testversuchen garantiert wird. Außerdem sind ein rauscharmer LDO Spannungsregler und ein Superkondensator verbaut. Somit kann das am Ausgang des Schaltkreises gewünschte Spannungslevel eingestellt werden (z.B. 1,8 V oder 3,3 V).
- Die elektrische Schaltung ist am Ausgang des Energy Harvesters angeschlossen, um die generierte Energie abhängig von unterschiedlichen Beschleunigungsamplituden zu analysieren. In Abbildung 39 ist der Ladevorgang des Superkondensators über der Zeit dargestellt.

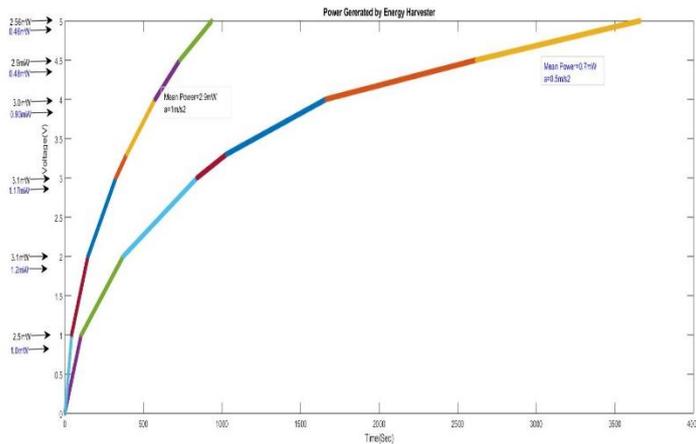


Abbildung 39 Aufladung eines Superkondensators mithilfe der generierten Energie in Abhängigkeit von der Beschleunigungsamplitude der Torsionsschwingung.

- Die Messungen wurden in einem Shaker-Prüfstand durchgeführt und mithilfe von Matlab analysiert. Wie in Abbildung 39 dargestellt, beträgt die mittlere Leistung bei einer Beschleunigung von 1 m/s² etwa 2,9 mW und bei 0,5 m/s² etwa 0,7 mW.
- Im nächsten Schritt wurde die Systemarchitektur basierend auf einem Controller, einem Beschleunigungssensor, einem Bluetooth-Modul und einem SD-Karten-Modul entworfen, was in Abbildung 40 dargestellt ist.

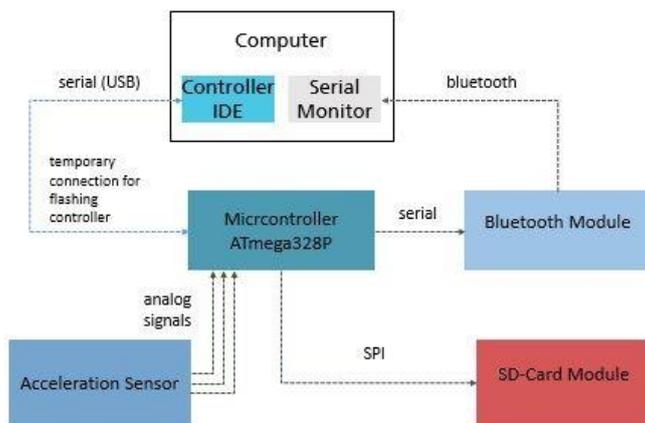


Abbildung 40 Systemarchitektur zur Messung der Torsionsschwingung im Antriebsstrang.

- Der entworfene Sensorknoten wurde in Hinblick auf die Messung der Wellenbeschleunigung bei einer Drehzahl von 3000-3600 1/min (Resonanzfrequenz des Energy Harvesters) entwickelt. Der Beschleunigungssensor ADXL377 wurde ausgewählt, um zuverlässige Messergebnisse bei hohen Beschleunigungen (g-Kräften) zu liefern. Die gemessenen Daten werden an das Computerterminal „Realterm“ via Bluetooth RN-42 gesendet und parallel auf einer SD-Karte gespeichert. Der entworfene Sensorknoten ist in Abbildung 41 dargestellt.

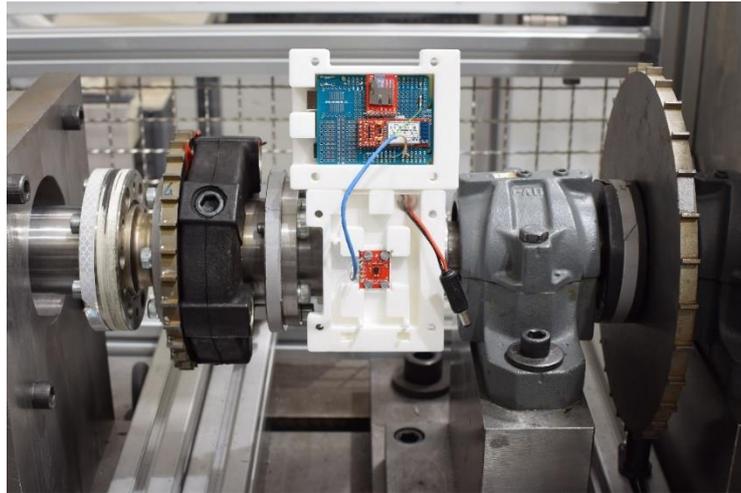


Abbildung 41 Sensorknoten zur Datenerzeugung.

- Mit dem Sensorknoten ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der Drehzahl einer Schiffsantriebswelle zu messen, wie in Abbildung 42 gezeigt, als auch die Messdaten über Bluetooth zu versenden. Für erste Versuche in einem realen Schiffsantriebsstrang wurde der Sensorknoten durch eine Batterie mit Energie versorgt.

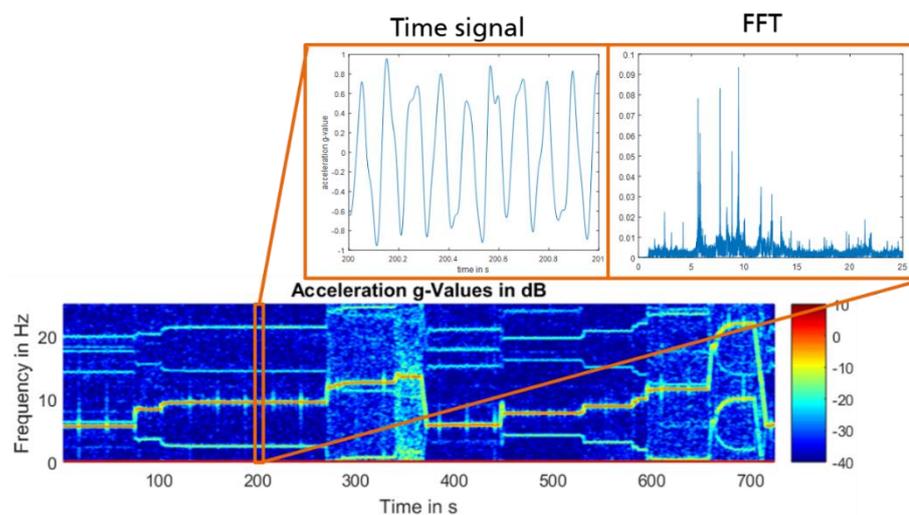


Abbildung 42 Gemessene Wellendrehzahl mithilfe des entworfenen Sensorknotens.

- Die Leistungsanalyse der entworfenen Schaltung erfolgt mit PowerScale, wodurch der Leistungsbedarf der programmierten Schaltung visualisiert werden kann. Dies hilft bei der Optimierung des Softwarecodes mit dem Ziel eines geringeren Leistungsbedarfs. Es wurde ein PowerScale-Gerät mit ACM-Technologie (ACM = Active Current Measurement) verwendet, die für den eingebetteten Microcontroller geeignet ist. Abbildung 43 zeigt den Leistungsbedarf der entworfenen Schaltung im Aktiv- und im Ruhemodus. Im Aktivmodus (Aufnahme, Verarbeitung und Übertragung der Daten per Bluetooth) liegt der durchschnittliche Leistungsverbrauch bei ca. 270 mW und im Ruhemodus bei ca. 190 mW.

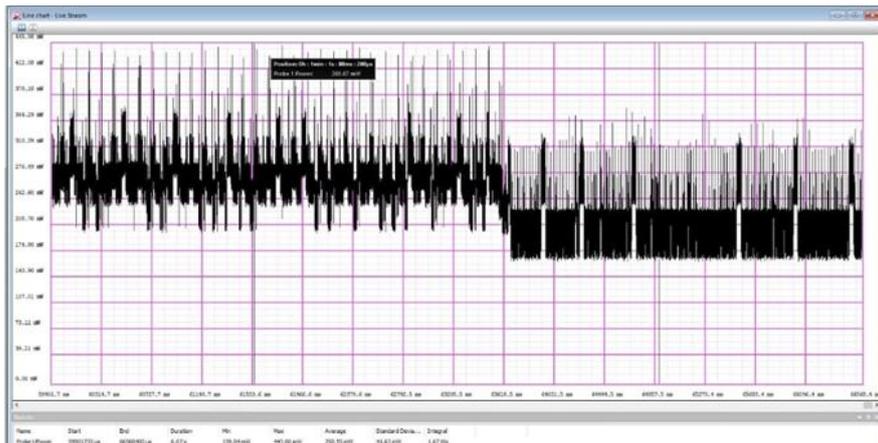


Abbildung 43 Power analysis of designed embedded circuit in active mode and in sleeping mode.

2.1.2.2 AP 2.3 Design des smarten Getriebes

In diesem AP unterstützte das LBF die Partner Reintjes und CTVC beratend. Ziel war es, die Kompetenz des LBF bei der Auslegung aktiver Systeme einfließen zu lassen.

Ergebnisse:

- Der Energie-Harvester kann unter bestimmten Betriebsbedingungen ausreichend Energie für den Betrieb des AKTIVEN SYSTEMS liefern. Jedoch kann das aktive System dann nicht die erforderliche Maximalkraft liefern. Der Energie-Harvester kann ausreichend Energie für den Betrieb eines Zustandsüberwachungs-Sensorik liefern. Ein entsprechender Demonstrator soll in AP 3.2. umgesetzt werden.
- Evaluierung der Wirkleistung des aktiven Systems gemeinsam mit CTVC und Reintjes

Durchgeführte Arbeiten:

- Unterstützung bei der Ableitung von Anforderungen an das aktive System der Getriebelagerung (Messdatenanalyse).
- Evaluierung der Wirkleistung des aktiven Systems gemeinsam mit CTVC und Reintjes

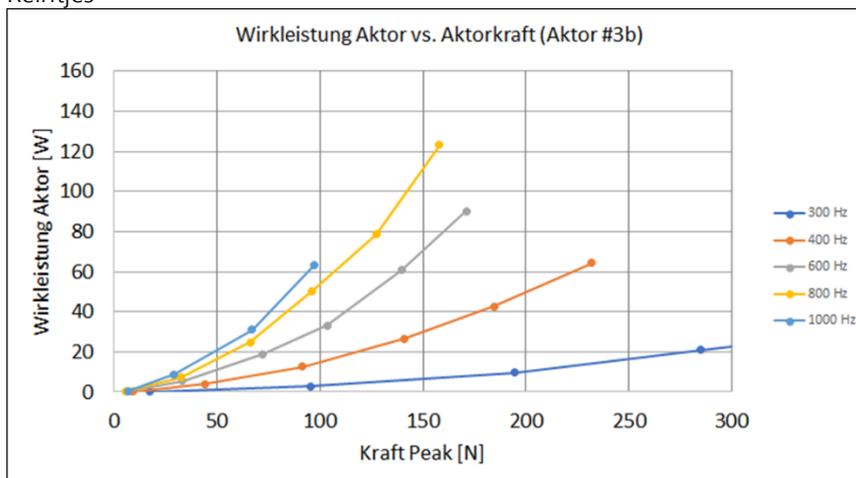


Abbildung 44 Wirkleistung des Aktors in Abhängigkeit der Wirkfrequenz und der Spitzenkraft (Quelle der Grafik: ContiTech).

- Um die zur optimalen aktiven Regelung notwendige Kraft von 200 N bei 800 Hz zu stellen, wird entsprechend der Vorauslegung von ContiTech mehr Leistung gefordert, als der Energie-Harvester bereitstellen kann (deutlich über 10 W). Je nach Auslegung des aktiven Systems, ist es aber durchaus möglich genug Leistung (max. ca. 1 W) bereits zu stellen. So kann die Erzeugung von etwa 100 N bei 300 Hz prinzipiell möglich sein.

2.1.3 AP3 Systemvalidierung

2.1.3.1 AP3.1 Validierung des smarten Seeverhaltens

Ziel dies AP war es die Validierung der SPC wird auf Prüfstandsniveau mit Hilfe des xHIL Ansatzes durchzuführen. Dazu wurde das erstellte Modell des Schiffsverhaltens im Wasser sowie die SPC als numerisches Modell auf einem Rapid Control Prototyping System (DSpace) laufen. Der reale Prüfstand wurde in die Umgebung eingebunden. Die Schnittstelle Propeller wurde über eine Wirbelstrombremse oder einen Elektromotor implementiert. Zusätzlich zum Antriebsmotor wurden die im Konzept vorgesehenen Aktoren eingebunden.

Das Arbeitspaket 3.1 wurde aufgrund von Verzögerungen in AP 1.5 und aufgrund von Prüfstandsproblemen verspätet begonnen.

Ergebnis:

Durchgeführte Arbeiten:

- Planung der konkreten Untersuchung im Antriebsstrangprüfstand am LBF
- Planung des Umbaus des Antriebsstrangprüfstand am LBF
- Planung der konkreten Untersuchung im Antriebsstrangprüfstand am LBF

2.1.3.2 AP3.2 Validierung des Energy Harvesters (EH)

Ziel des AP war die Validierung des EH-Systems. Die Validierung erfolgte zunächst auf einem Prüfstand mit idealisierten Randbedingungen. Hier konnten ausgiebige Tests durchgeführt werden und Schwächen der Lösung erkannt und iterativ Verbesserungen eingearbeitet werden. Zudem konnten zum Abgleich mit der Simulation eine Vielzahl von Messgrößen aufgezeichnet werden, die unter den Bedingungen im Testschiff nicht zugänglich sind. Die finale Validierung des EH-Systems erfolgte auf dem Testschiff. Hier wurde das EH-System unter realistischen Randbedingungen erprobt. Voraussetzung dafür waren die Kenntnisse aus den Versuchen am Prüfstand. Da EH-System musste unter den tatsächlich auftretenden Fahrbedingungen beweisen, dass genügend Energie über das Energie Management Konzept für die Versorgung der CM und NVC Systeme zur Verfügung gestellt werden konnte.

Ergebnis:

- Konzeptionierung und Design eines neuen Energy-Harvesters
- Simulation der Leistungsgenerierung
- Aufbau der Sensorschaltung und Programmierung des Mikrocontrollers
- Aufbau des Energy Harvesters mit integrierter Sensorik
- Messung der erzeugten Strangspannung
- Messung der Verlustleistung
- Erprobung des Energy Harvesters in einfachem Rotationsprüfstand

Durchgeführte Arbeiten:

- Absprachen zur Planung des Prüfstands bei Reintjes
- Die entwickelten Einzelkomponenten wurden gefertigt und zu einem Gesamtsystem bestehend aus Generator, Gleichrichter, Spannungsregler, Beschleunigungssensor und Sender zusammengeführt (siehe Abbildung 45).

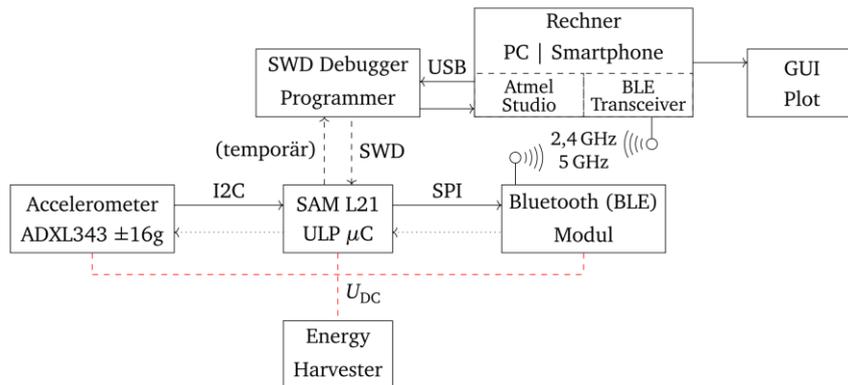


Abbildung 45 Schema und Schnittstellen der Elektronik.

- Es wurde eine Synchronmaschine in Form einer Axialflussmaschine aufgebaut, welche alle zuvor genannten Komponenten beinhaltet. (siehe Abbildung 46)

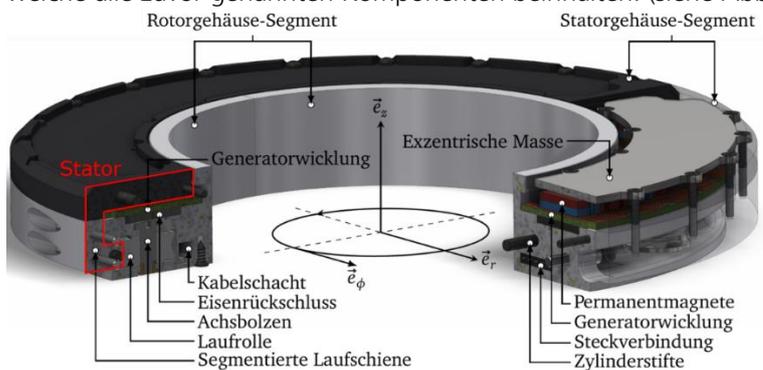


Abbildung 46 Platzierung der Komponenten im finalen Rotorgehäuse.

- Über eine Segmentierung und die dadurch ermöglichte Klemmverbindung kann der Energy Harvester auf einer Welle befestigt werden. (siehe Abbildung 47)

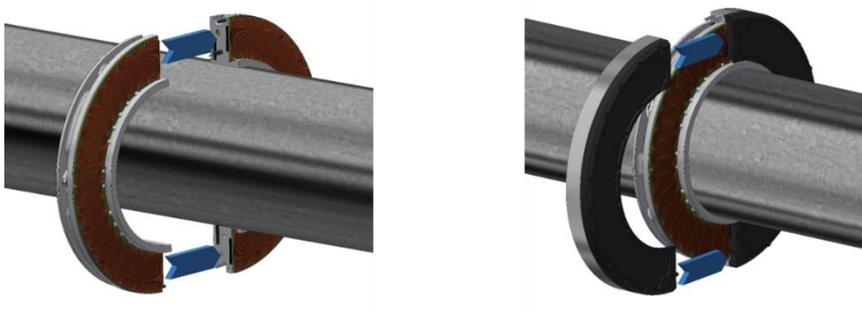


Abbildung 47 Befestigung des Energy Harvesters auf einer Welle.

- Bis zu einer Drehzahl von 1500 Umdrehungen pro Minute besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Drehzahl und der induzierten Strangspannung.
- Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Messung und der analytischen Lösung. (siehe Abbildung 48)

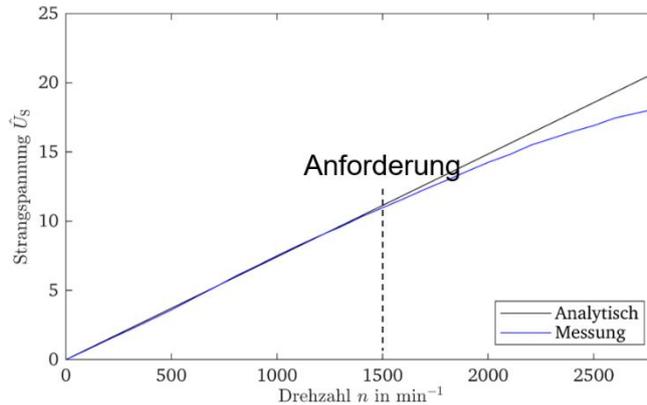


Abbildung 48 Verlauf der Normalkomponente der magnetischen Flussdichte bei Luftspalt $\delta = 1\text{mm}$.

- Das größte Verlustmoment wird durch Reibverluste zwischen der Laufschiene und den Laufrollen erzeugt (elektromagnetische Wechselwirkungen können vernachlässigt werden).
- Die Messungen wurden mit einer Aluminiumlaufschiene durchgeführt. Durch eine Zusatzmasse am Stator und den Einsatz einer Stahlschiene (16MnCr5 mit Zusatzmasse) kann der maximale Drehzahlbereich erhöht werden. (siehe Abbildung 49)

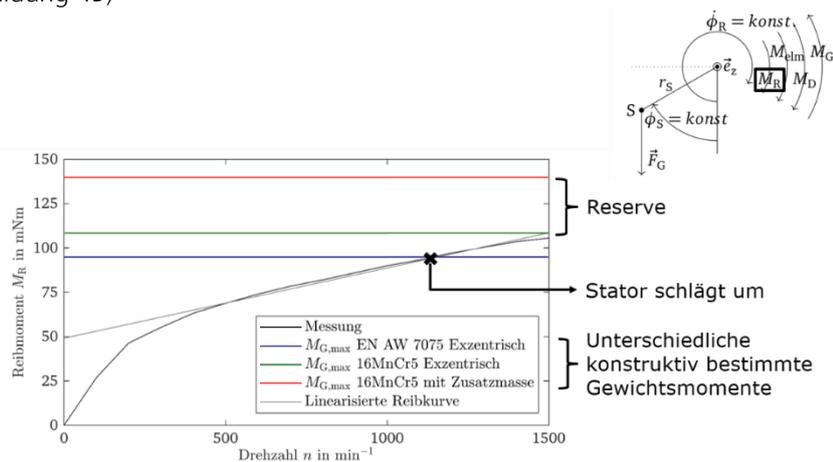


Abbildung 49 Unterseite des Energy Harvesters mit Einfassungen für die Elektronik, die durch ein flussleitendes Weicheisenblech von der Magnetanordnung getrennt ist.

- Für den Betrieb der Sensorik (Beschleunigungssensor ADXL343), der Bluetooth-Sendeinrichtung (Bluetooth Low Energy, BLE) und des Ultra Low Power (ULP) Mikrocontrollers müssen mindestens 50mW zur Verfügung gestellt werden.
- Ab einer Schwelldrehzahl von ca. 350 Umdrehungen pro Minute kann die nötige Leistung generiert werden.
- Abbildung 50 zeigt Beschleunigungsmessdaten, die in Echtzeit aus dem rotierenden Antriebsstrang bei einer Drehzahl von ca. 600 Umdrehungen pro Minute an ein externes Mobilgerät gesendet wurden.

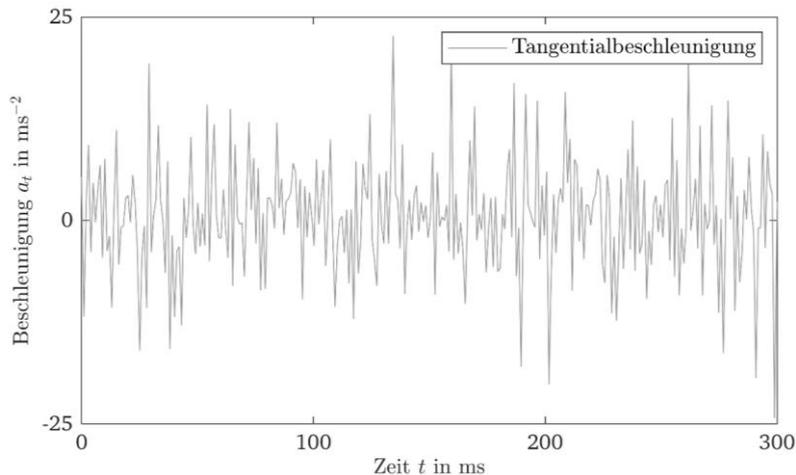


Abbildung 50 Darstellung der tangentialen Beschleunigungswerte der Welle.

2.1.3.3 AP3.3 Validierung des smarten Getriebes

Ergebnis:

- Absprachen zur Planung des Prüfstands bei Reintjes

Durchgeführte Arbeiten:

- Neben der Nutzung von Schwingungsanregungen in früheren Aufbauten wurde nun die vollständige Drehzahlnutzung für die Energieerzeugung und damit den Betrieb der Sensorik, Auswerteelektronik und des Funksenders evaluiert. Hierzu wurde das Konzept einer Axialflussmaschine miniaturisiert umgesetzt (siehe Abbildung 51), deren Rotor nicht mehr in der Art einer Feder-Masse-Dämpfung und Biegefeder mit dem Stator verbunden ist, sondern auf einer Laufrollenführung freilaufend montiert wird.
- Da das Prinzip von Synchronmaschinen weiterhin auf der elektromagnetischen Induktion nach Faraday (Bewegungsinduktion) beruht, erfolgt ein beinahe nahtloser Übergang zwischen elektrodynamischem Tauchspulenwandler und elektrischem Generator.
- Durch die exzentrische Anordnung der Masse des magnetbesetzten Rotors findet sich im Betrieb die Ruhelage des Schwerpunkts unterhalb der Welle. Die Masse wandert zur Unterseite des Rings und verweilt dort, während sich der wicklungsbesetzte Stator fest montiert mit der Antriebswelle dreht.
- Dadurch ist es möglich die vollständige Relativgeschwindigkeit zwischen Stator und Rotor zur Energiegewinnung einzusetzen und so die Effizienz zu erhöhen und eine höhere Leistungsdichte zu erreichen. Im weitesten Sinne beruht der vorgestellte Entwurf demnach auf der Erdanziehungskraft und funktioniert ohne äußere Abstützung nur bei vertikal angeordneten Wellen.

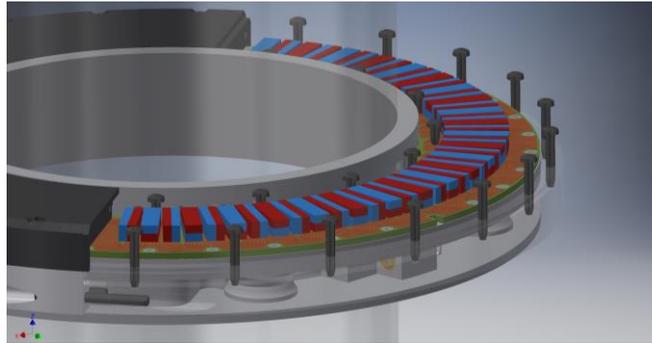


Abbildung 51 Darstellung der Anordnung von Laufrollen (unten) und PCB-Windungen (Kupferfarben) auf dem Stator und dem magnetbesetzten Rotor (schwarz) mit Führungsschiene.

- Aufgrund der geringen maximalen Bauhöhe des Systems von 25 mm wird für die Generatorwicklung ein sechslagiges PCB (siehe Abbildung 52) mit einer Bauhöhe von 1,6 mm eingesetzt, das mehrere konzentrische flache Spulen in sich aufnimmt. Da das System nachträglich von außen auf eine Welle montiert werden soll, sind das Gehäuse und seine Komponenten segmentiert. Das PCB wurde aus diesem Grund und aufgrund fertigungstechnischer Vorteile in vier Segmente geteilt. Es wurde in Standardschichtung mit 35 μm Kupferauflage und Durchkontaktierung und ohne aufwändige Nachbearbeitung umgesetzt.
- Lediglich der initiale Entwurfsprozess und eine Änderung gestaltet sich vergleichsweise komplex, da u.a. durch den Schichtenaufbau keine Überschneidungen der Stränge wie im Wickelkopf eines Motors möglich sind und nur durch Schichtwechsel (Vias) erreicht werden können.
- Gegenüber herkömmlichen Wicklungstypen hebt sich die PCB-Wicklung durch geringstmögliche Bauhöhen, die sehr gute Reproduzierbarkeit, einfache Montage und freie Ausgestaltung der Leiterbahnen in Form und Querschnitt hervor.

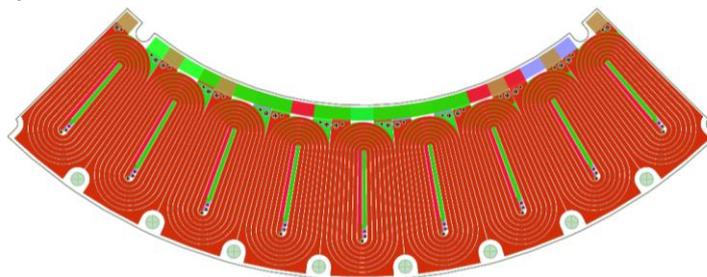


Abbildung 52 Entwurf einer sechslagigen konzentrischen PCB-Spulenordnung als Stator.

- Wird eine Anordnung von Magneten wie in Abbildung 53 ausgerichtet, dass sich die Polarisationsrichtung der einzelnen Permanentmagnete schrittweise um die Längsachse der Magnete ändert (z.B. in diskreten 45°- oder 90°-Schritten), so wird auf einer Seite der Anordnung das magnetische Feld beinahe vollständig ausgelöscht und auf der gegenüberliegenden Seite verstärkt, da eine Flussführung durch das hartmagnetische Material erfolgt.

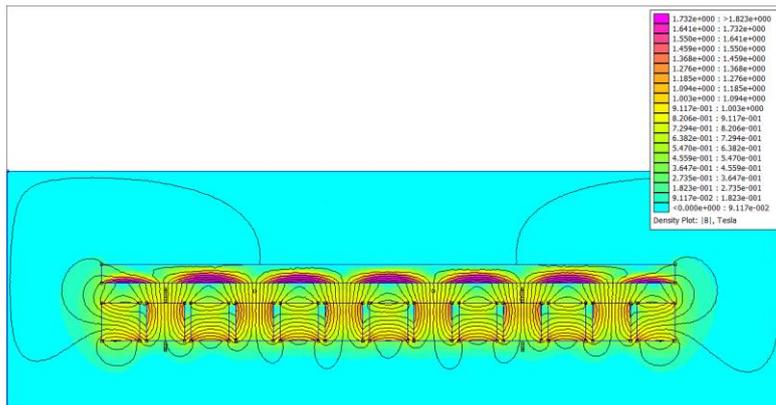


Abbildung 53 Magnetische Flussdichteverteilung mit Halbach-Array: FEM-Plot.

- Bei Optimierung der Abstände und Maße der Elemente entsteht ein nahezu perfekt sinusförmiger Verlauf der Normalen der magnetischen Flussdichteverteilung (siehe Abbildung 54), der wiederum in einer sinusförmigen Induktionsspannung resultiert.

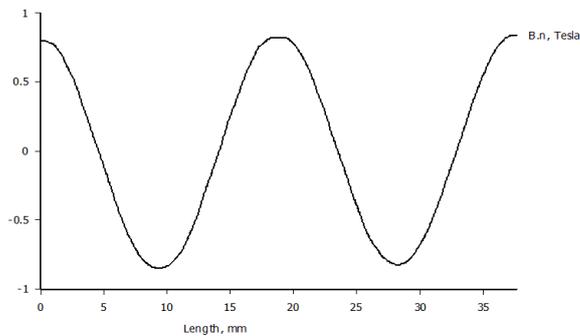


Abbildung 54 Verlauf der Normalkomponente der magnetischen Flussdichte bei Luftspalt $\delta = 1\text{mm}$.

- In dem farblich markierten Plot zur magnetischen Flussdichte (Abbildung 53) ist zu erkennen, dass die Dichte unterhalb der Anordnung im Vergleich zur sonstigen Verlauf sehr gering ist. Im Abstand von $\delta = 1\text{ mm}$ von der Magnetanordnung im Luftspalt werden Werte um 0,85 T erreicht. Dies ist der Bereich, in dem das PCB liegt. Mit einer Höhe der Magnetanordnung von 3 mm sind so bereits sehr hohe Induktionsspannungen erreichbar.
- Durch das darüber eingezeichnete weichmagnetische Rückblechpaket wird die Flussdichte weiter konzentriert und erhöht. Darüber hinaus erfüllt es den Zweck der Abschirmung der Elektronik, die im potentiell schädlichen Wirkungsbereich der NdFeB-Magnete untergebracht werden muss. Neben Weich-eisen wurden verschiedene andere weichmagnetische Legierungen (z.B. Vacodur, Vacoflex) untersucht.

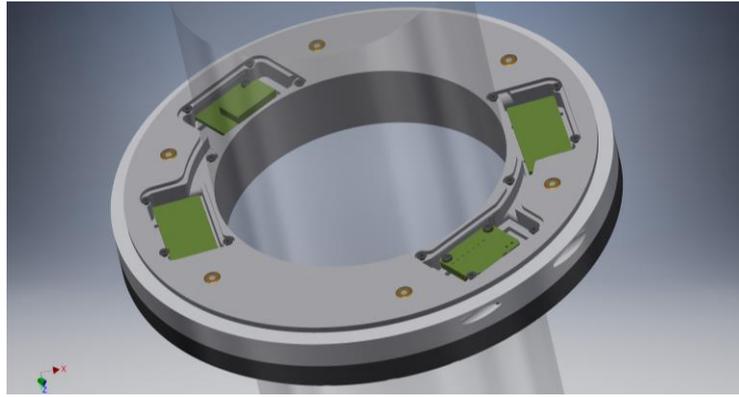


Abbildung 55 Unterseite des Energy Harvesters mit Einfassungen für die Elektronik, die durch ein flussleitendes Weicheisenblech von der Magnetanordnung getrennt ist.

- Für den Betrieb der Sensorik (Beschleunigungssensor ADXL343), der Bluetooth-Sendeeinrichtung (Bluetooth Low Energy, BLE) und des Ultra Low Power (ULP) Mikrocontrollers muss die generierte Klemmenspannung zuvor von dreiphasiger Wechselspannung auf Gleichspannung herabgesetzt werden. Hierzu wurden u.A. herkömmliche Dioden-Gleichrichter, aber auch aktive MOSFET-Gleichrichter, für einen möglichen Einsatz verglichen. Auf Grund der vergleichsweise hohen Aktivierungsspannung bei dem Einsatz von active rectification ICs (z.B. LT4320-1), dem eingeschränkteren Eingangsspannungsbereich und der typischerweise nicht ausreichenden maximalen Eingangsfrequenz, wird im vorliegenden Fall ein dreiphasiger Gleichrichter auf Basis von Schottky-Dioden umgesetzt.
- Ein dreiphasiger Aufbau, bei dem alle Stränge elektrisch jeweils um 120° phasenverschoben sind, hat u.A. den Vorteil, dass die mittlere bereitstellbare Leistung niemals Null ist. Durch elektrische Maschinen existieren bereits umfangreiche mathematische Beschreibungen und Berechnungsmethoden. So wurden anhand eines umfangreichen Matlab-Modells, abgeleitet von simulativ, analytisch und geometrisch ermittelten Werten und Randbedingungen die elektrischen Parameter des Generators bestimmt und eine elektrische Simulation mittels SPICE unter verschiedenen Lastfällen mit vereinfachtem Ersatzschaltbild durchgeführt.
- In Abbildung 56 und Abbildung 57 ist einerseits die verwendete äquivalente Schaltung und andererseits die gleichgerichtete Ausgangsspannung nach dem sechspulsigen Dioden-Gleichrichter, sowie die drei Sternspannungen, dargestellt. Ein nachgeschalteter Tiefsetzsteller bzw. Spannungsregler erzeugt aus der gleichgerichteten und mittels Sieb-Elko (nicht vollständig) geglätteten Ausgangsspannung des Gleichrichters die gewünschte Versorgungsspannung der Elektronik.

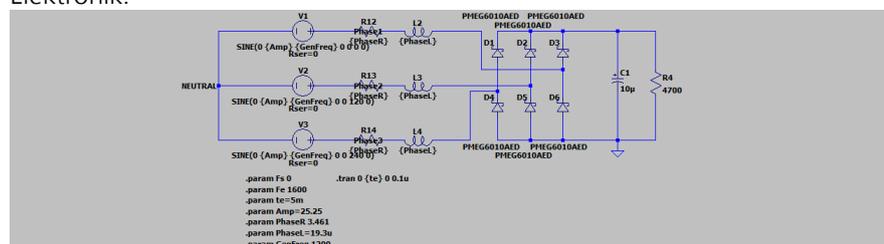


Abbildung 56 Äquivalentes Ersatzschaltbild des dreiphasigen Synchrongenerators mit nachgeschalteter Sechspuls-Gleichrichtung, Filterung und Last.

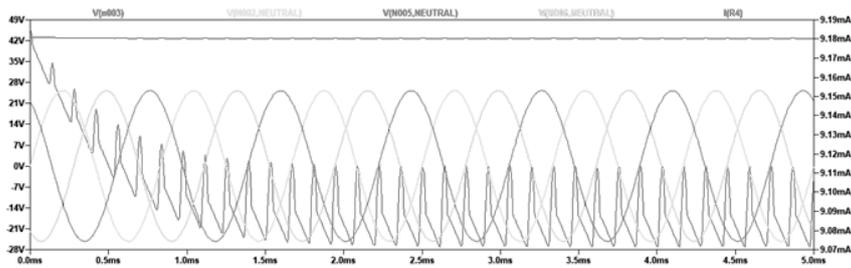


Abbildung 57 SPICE-Simulation des Diodengleichrichters mit den Strangspannungen und der geglätteten Ausgangsspannung sowie dem Laststrom.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Ein ausführlicher zahlenmäßiger Nachweis wird von der Fraunhofer Zentrale direkt an den Zuwendungsgeber geschickt.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Vorhaben leistete aufgrund seines interdisziplinären und innovativen Charakters einen erheblichen Beitrag für die Weiterentwicklung von Antriebssystemkomponenten im Schiffbau und weiteren Branchen. Das Arbeitsprogramm umfasste anspruchsvolle Forschungsaufgaben sowie methodische und technologische Entwicklungen in einem beträchtlichen Umfang, die nur in Zusammenarbeit mit dem gewählten Konsortium zu leisten waren. Innerhalb des Konsortiums wurden die maßgeblichen Komponenten der Wertschöpfungskette abbildet, zudem erlaubte die internationale Zusammenarbeit einen intensiven und nutzbringenden Austausch an Fachwissen, Methoden und Erfahrungen im Bereich der Antriebsstrang- und Komponentenentwicklung. Zur systematischen Bearbeitung dieses umfangreichen Projekts erfolgte eine Unterteilung in verschiedene Arbeitspakete (AP) die sich aus den Arbeitszielen und der Struktur des Verbundvorhabens ableiteten und entsprechend ihrer Aufteilung und ihres Umfangs notwendig waren, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Eine entsprechende kostenneutrale Verlängerung des Projekts in der Validierungsphase war notwendig, um das letzte Arbeitspaket 3 „Systemvalidierung“ entsprechend erfolgreich abzuschließen.

2.4 voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Über die im Leit Antrag (Full-Proposal) dargelegten wirtschaftlichen Erfolgsaussichten hinaus wurde das Fraunhofer LBF durch die Bearbeitung des Projektes befähigt, seine Systemkompetenz im Hinblick auf komplexe Gesamtsysteme im Bereich des Schiffbaus und der Meerestechnik konsequent weiterzuentwickeln, wodurch wiederum eine deutliche Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess insbesondere im Hinblick auf die Integration aktiver Systeme zu erwarten war. Das Fraunhofer LBF wurde somit in die Lage versetzt in Kooperation mit den Forschungspartnern, KMU, Werften und deren Zulieferern das im Projekt geschaffene Wissen in zukünftige Anwendungsfelder zu transferieren. Es wird erwartet, dass sich dadurch insbesondere das Portfolio der Forschungsdienstleistungen für die Industrie deutlich erweitern wird und sich das LBF im Bereich Schiffbau weiter als anerkannter und leistungsfähiger Partner etablieren wird. Mittelfristig (ca. 5-10 Jahre) wird erwartet, dass wichtige Teile der Projektergebnisse in neuar-

tigen intelligenten Antriebssystemen des Schiffbaus kommerzielle Anwendung finden. Neben der Verwertung der Ergebnisse innerhalb der Branche Schiffbau wird davon ausgegangen, dass die Methodik auch auf andere Anwendungsfelder (z.B. Automobil, Maschinenbau) übertragen werden kann.

Zusätzlich zu den im Leit Antrag dargestellten wissenschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten konnte das LBF durch die Bearbeitung des Projekts und die darin erarbeitete Methodik für das Energy Harvesting (EH) und Energiemanagement für einen autarken Betrieb von CM Systemen und die Versorgung von NVC-Systemen, die Beeinflussung der Interaktion zwischen Antriebsstrang und Seeverhalten mittels einer Smart Power Control und die Integration der Erkenntnisse in eine ganzheitliche Simulationsumgebung die wissenschaftlichen Grundlagen und das technische Know-How deutlich erweitern.

Insbesondere durch den Aspekt Energy Harvesting wurden neue wissenschaftliche Impulse gesetzt, die neue Forschungsvorhaben in die Richtung einer besseren Nutzung vorhandener, ungenutzter Energieströme folgen lassen werden.

Durch die Bearbeitung des Projektes konnte das Fraunhofer LBF seine wissenschaftliche Expertise wesentlich ausbauen. Es wurde während und nach der Projektlaufzeit eine Verbreitung der Ergebnisse in der Öffentlichkeit sowie eine zielgerichtete Entwicklung des wissenschaftlich-technischen Nachwuchses betrieben. Entsprechende Veröffentlichungen sind in Abschnitt 2.6 benannt.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Keine bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Im Rahmen der Polish-German Structured Conference of Acoustics wurde ein Vortrag zu „Active Vibration Reduction of Ship Propulsion Systems“ gehalten [1]
- Die Vorlesungen „Grundlagen der Adaptronik“, „Aktorwerkstoffe und –prinzipien“ sowie die Vorlesungsreihe „Maschinenakustik“ werden von Prof. Melz und Prof. Bein an der Technischen Universität Darmstadt (Fachgebiet „Systemzuverlässigkeit im Maschinenbau“) in enger Kooperation mit dem Fraunhofer LBF angeboten. Die Vorlesung „Adaptronik“ an der Hochschule Darmstadt wird ebenfalls durch das Fraunhofer LBF angeboten. Im Rahmen dieser Vorlesungen wurden den Studenten Teilergebnisse des Projekts vermittelt.
- Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei studentische Abschlussarbeiten von Matthias Gerhardt [2] sowie Manuel Weber [5] in Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer LBF und der TU Darmstadt umgesetzt.
- Pressemitteilung am 21.03.2019 [3]
- Veröffentlichung der Projektergebnisse auf der Digital-HMI 2021 [4]

3 Nachweise

- [1] Bartel, T., Herold, S., Infante, F., Käsgen, J., Matthias, M., Millitzer, J., and Perfetto, S. *Active Vibration Reduction of Ship Propulsion Systems*. Proceedings of 2018 Joint Conference - Acoustics, Acoustics 2018, 2018-10-22, p.15-20.
- [2] Gerhardt, M. 2018. *Auslegung und Erprobung eines rotatorischen Schwingungsenergie-Generators für Schiffsantriebe*. TU Darmstadt, SAM, Darmstadt.
- [3] Gerhardt, M. 2019. *Rotation angezapft: Energieautarke Sensoren im Antriebsstrang optimieren die Zustandsüberwachung*, Darmstadt.
- [4] Tamm, C. Dr.-Ing. 2021. *Energieautarke Sensoren. Produktnahe energieautarke Sensoren in rotierenden Systemen*. <https://www.hannovermesse.de/produkt/energieautarke-sensoren/269447/N1458065>. Accessed 23 June 2021.
- [5] Weber, M. 2019. *Entwicklung und Erprobung eines Energy Harvesters zum energieautarken Betrieb eines rotierenden Sensorsystems für Schiffsantriebe*. TU Darmstadt, SAM, Darmstadt.