

# Untersuchung der mechanischen und akustischen Emissionen eines elektrischen Gleitboots

---

Christian Daniel, Fabian Duvigneau, Andreas Zörnig, Elmar Woschke

<http://dx.doi.org/10.25673/103519>

## Abstract

The paper shows the occurring vibrations of an electric drive in a boat. The drive motor was developed within the framework of research project at the OVGU and belongs to the family of motors with air gap winding [1]. First of all, the electric drive is considered separately from the boat on a motor test bench. Here, mechanical vibrations and acoustic emissions are measured. Various optimizations to the motor design were also investigated on this test rig, which then led to lower sound radiation in defined frequency ranges. Suitable variants were selected in advance using numerical simulation models [4]. Finally, the electric drive with propeller shaft in the boat is investigated. It is shown how the dominant vibration frequencies change and which vibration components are particularly transmitted or damped by the hull.

The coupling between electromagnetic and mechanical systems, limited to the drive train, is mapped and investigated by means of a holistic simulation [2,3]. However, since this method cannot be applied efficiently for the entire boat, this contribution is limited to the analysis of the measurement results, which were generated in the course of elaborate measurement campaigns.

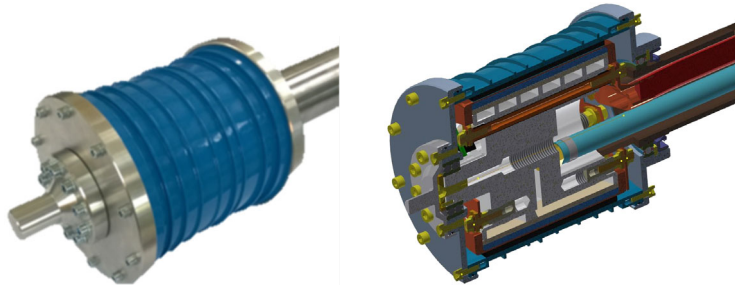
## Kurzfassung

Der Beitrag zeigt die auftretenden Schwingungen eines elektrischen Antriebs in einem Gleitboot. Der Antriebsmotor wurde im Rahmen von Forschungsprojekten an der OVGU entwickelt und gehört zu der Familie der Motoren mit Luftspaltwicklung [1]. Zunächst wird der elektrische Antrieb losgelöst vom Boot auf einem Motorprüfstand betrachtet. Hier werden mechanische Schwingungen und akustische Emissionen gemessen. An diesem Prüfstand wurden auch verschiedene Optimierungen am Motordesign untersucht, welche dann zu einer geringeren Schallabstrahlung in definierten Frequenzbereichen führten. Die Auswahl geeigneter Varianten erfolgte im Vorfeld mittels numerischer Simulationsmodelle [4]. Abschließend wird der elektrische Antrieb mit Schiffswelle im Boot untersucht. Dabei wird gezeigt, wie sich die dominanten Schwingfrequenzen ändern und welche Schwingungsanteile durch den Rumpf besonders weitergeleitet oder gedämpft werden.

Die Kopplung zwischen elektromagnetischem und mechanischem Systemen wird, beschränkt auf den Antriebsstrang, mittels einer ganzheitlichen Simulation abgebildet und untersucht [2,3]. Da diese Methode aber für das gesamte Boot nicht effizient anwendbar ist, beschränkt sich dieser Beitrag auf die Analyse der Messergebnisse, welche im Rahmen aufwändiger Messkampagnen generiert wurden.

## 1. Elektrischer Direktantrieb für Boote

Der betrachtete Motor ist ein permanenterregter Synchronmotor mit Luftspaltwicklung und außenliegendem Rotor. Der Stator liegt innen und ist am hinteren Deckel nach außen geführt. Dieser Teil dient der Befestigung und der Führung der elektrischen Phasenkabel und des Kühlwassers – Bild-1.

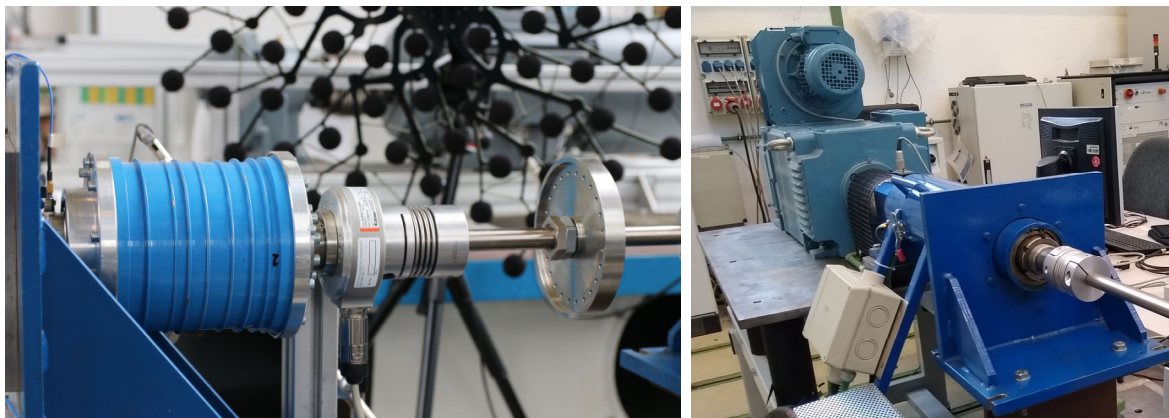


**Bild 1:** Bootsmotor

Durch die verwendete Bauform eines Außenläufers, kann bezogen auf den Gesamtdurchmesser ein hohes Drehmoment erzeugt werden. So kann auf ein Getriebe verzichtet und die Propellerwelle direkt angetrieben werden, was Kosten reduziert und die Schwingungsanregung infolge der Verzahnung vermeidet. Außerdem entfallen die Verluste im Getriebe, sodass der Gesamtwirkungsgrad günstiger ausfällt.

### 1.1 Schwingungsmessungen auf dem Lastprüfstand

Zur isolierten Betrachtung der Schwingungsanregung durch den Motor selbst werden die ersten Untersuchungen am Antriebsprüfstand (Bild-2) durchgeführt, wobei der Bootsmotor gegen eine Lastmaschine arbeitet. Drehzahl und Drehmoment können so frei eingestellt werden. Neben den typischen Messgrößen eines Motorprüfstandes, wie Phasenströme, Spannung, Drehzahl und Drehmoment werden auch mechanische Kenngrößen erfasst. So werden direkt am Stator die Beschleunigung, am Rotor die Auslenkung und der Schalldruck gemessen.

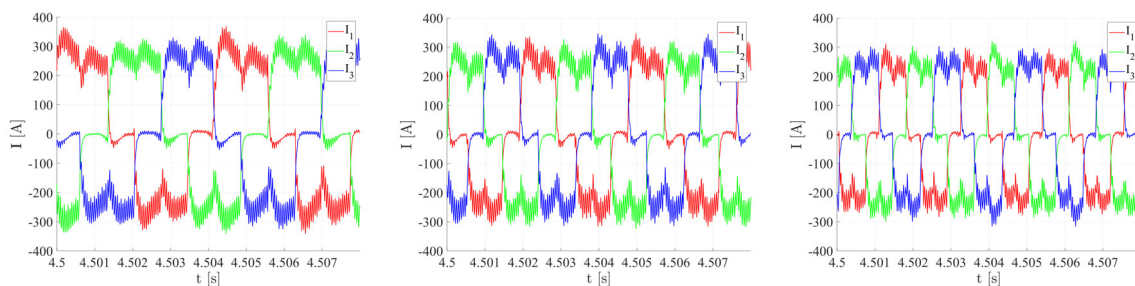


**Bild 2:** Bootsmotor auf Lastprüfstand (links: Bootsmotor, rechts: Lastmaschine)

Diese Daten werden auf einer Zeitbasis mit einem AD-Wandler aufgenommen, was es erlaubt, die Wechselwirkungen zwischen elektrischen und mechanischen Größen detailliert zu untersuchen sowie zur Validierung der Simulationsmodelle [2-3] zu verwenden. Zusätzlich wird am Prüfstand eine akustische Kamera, bestehend aus einem Mikrophon-Array (Bild-2 links im Hintergrund), verwendet. Dieses Gerät wird später ebenfalls für die Analyse des Bootes als Gesamtsystem verwendet.

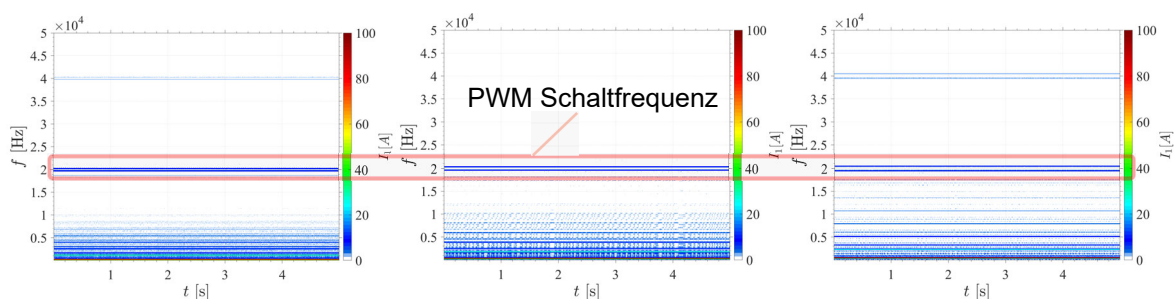
## 1.2 Phasenstrom und mechanische Schwingungen

Die Ursache von hochfrequenten Schwingungen an einer elektrischen Maschine ist die elektrische Kommutierung, also das wechselseitige Ein- und Ausschalten der Phasenströme in den Wicklungen. Beim Bootsmotor mit Luftspaltwicklung wird ein PWM Controller (HST350 von Fa. HERSI) eingesetzt der eine Schaltfrequenz von 20kHz verwendet. In Bild-3 ist der zeitliche Verlauf der Phasenströme für verschiedene Drehzahlen ersichtlich. Die Regelung des Controllers ist strombasiert, sodass mittels pulsweiten Modulation (PWM) mit einer Grundfrequenz von 20kHz ein mittlerer Strom eingestellt werden kann. Über die Pulsweite kann so der Mittelwert während eines Schaltzyklus beeinflusst werden. Die Folge der PWM Regelung ist eine hochfrequente Welligkeit im Strom, während eine Phase aktiviert ist – vgl. Bild-3.



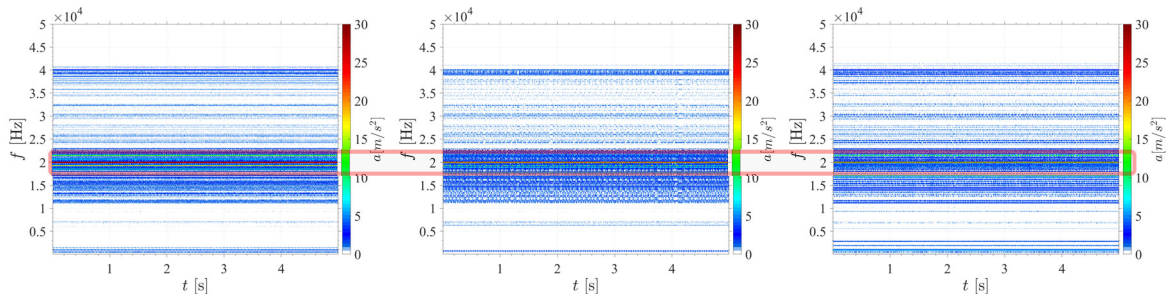
**Bild 3:** Phasenströme bei verschiedenen Drehzahlen (links:1000/ Mitte:1500/ rechts:2000 rpm)

Die PWM Frequenz in den Phasenströmen lässt sich sehr deutlich im Spektrogramm der Ströme darstellen – vgl. Bild-4. Die Schaltfrequenz ist nahezu unabhängig von der Drehzahl präsent. Bei 2000 rpm ist eine Splittung der Schaltfrequenz erkennbar. Vielfache der Drehzahl und der Polpaarzahl sind im Bereich von 0-10kHz deutlich sichtbar.



**Bild 4:** Phasenströme-Spektrogramm bei verschiedenen Drehzahlen (links:1000/ Mitte:1500/ rechts:2000 rpm)

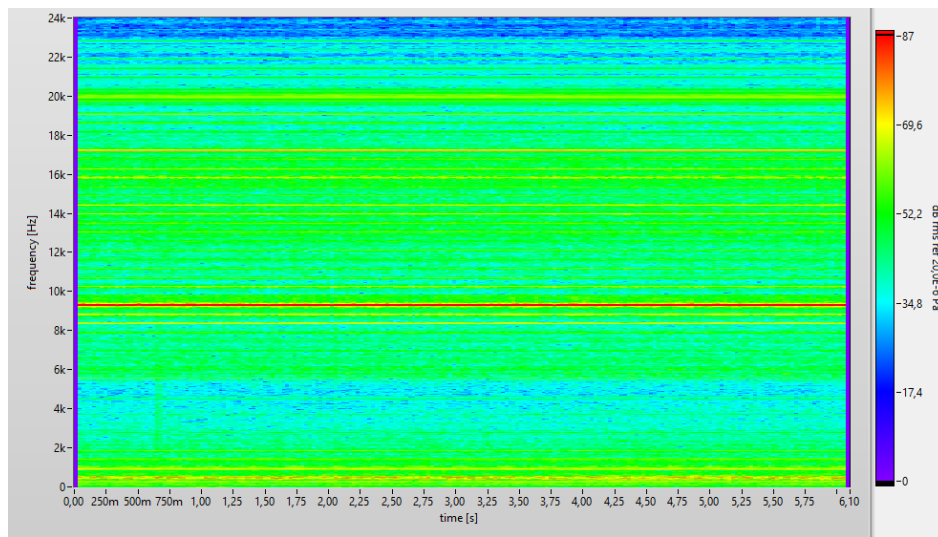
Die Phasenströme erzeugen ein elektromagnetisches Feld, welches Permanentmagnete im Rotor anziehen und abstoßen soll. Diese Einleitung von Kräften regt die mechanische Struktur des Rotors und dann durch die Lager auch den Stator zu Schwingungen an. In Bild-5 sind die Beschleunigungen am Stator im Spektrogramm ausgewertet. Die Schaltfrequenz von 20kHz ist auch hier sehr dominant, wobei die Doppelte bei 40kHz ebenfalls präsent ist.



**Bild 5:** Beschleunigung am Stator bei verschiedenen Drehzahlen (links:1000/ Mitte:1500/ rechts:2000 rpm)

### 1.3 Schallemission am Prüfstand

Für die auditive Wahrnehmung des Bootsmotors ist der emittierte Schall relevant. Daher wird am Prüfstand in unmittelbarer Nähe des Motors der Schalldruck erfasst - Bild-2 links - Mikrofonarray im Hintergrund. Bild-6 zeigt den spektralen Inhalt des Schalldrucks, wobei die Schaltfrequenz von 20kHz auch hier grundsätzlich enthalten ist, die dominanten Frequenzen aber bei 9,2kHz und 17kHz liegen. Im niederfrequenten Bereich kleiner 1kHz sind Vielfache von Drehzahl und Polpaaren ersichtlich.



**Bild 6:** Schalldruck bei 2000 rpm am Prüfstand

Dieses Ergebnis überrascht, da am Stator ein anderes Schwingungssignal vorliegt. Da der Rotor den größten Teil der schallabstrahlenden Fläche ausmacht, handelt es sich hier um angeregte Struktureigenfrequenzen.

## 2. Elektrisches Gleitboot

Der Bootsmotor wurde speziell für den Antrieb eines elektrischen Gleitboots entwickelt, welches im Rahmen eines ZIM-Projekts von regionalen Firmen und Forschungsstellen konzipiert und entwickelt wurde. Als elektrisches Gleitboot mit zwei getrennt steuerbaren Antriebsmotoren soll der E-Gleiter eine wendige Alternative für den Bootsverkehr auf Gewässern sein, auf denen ein Verbrennungsmotor aus umweltschutzgründen nicht erlaubt ist.

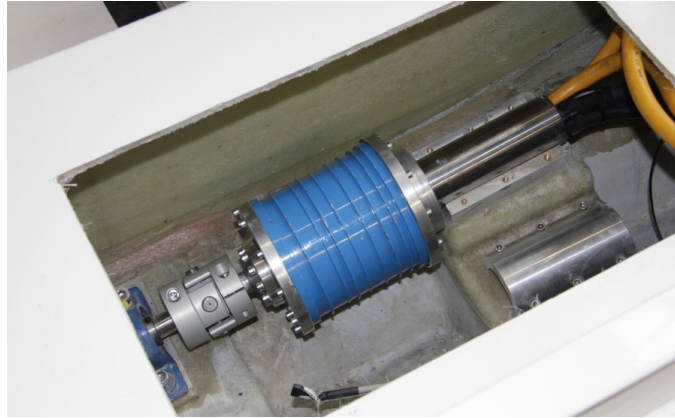
### 2.1 Einbausituation des Motors im Boot

Der Rumpf des E-Gleiters ist eine Kombination aus V-Rumpf und Trimaran. In den Aussparungen zwischen den V-Kielen ist ein Tunnel ausgeformt, um jeweils ein Luftpolster unter dem Rumpf aufzubauen. In den äußeren Kielen ist der Antrieb vorgesehen, der Bauraum in der Mitte wird für die Traktionsbatterie und für das Steuerpult benötigt. Bild 7 links zeigt den virtuellen Prototypen, noch mit einer Traktionsbatterie unter dem Steuerpult und rechts der abgeschlossene Prototyp des Gleitboots mit den Batteriemodulen vorne zentral im Rumpf untergebracht. Im finalen Prototyp wurde bei der Batterie auf ein modulares System von AENTRON zurückgegriffen, da hier mehrere 48V Module beliebig kombiniert werden können, was gerade in der Erprobungsphase von Vorteil ist, da Masse und Kapazität verändert werden können. Der Bauraum fiel dadurch etwas größer aus, weil die Module noch untereinander verbunden werden müssen.



**Bild 7:** E-Gleiter mit zwei Antriebsmotoren

In Bild-8 ist der linke Kiel mit dem linken Antriebsmotor zu sehen. Der Stator wird über eine Klemmverbindung direkt mit dem Rumpf verbunden. Diese sehr steife Anbindung sorgt für eine direkte Anregung des Rumpfs. Der Fokus lag hier auf einer platzsparenden und einfachen Anbindung des Motors an den Rumpf und nicht auf schwingungsisolierenden oder vibroakustischen Gesichtspunkten.



**Bild 8:** Anbindung des Motor im E-Gleiter

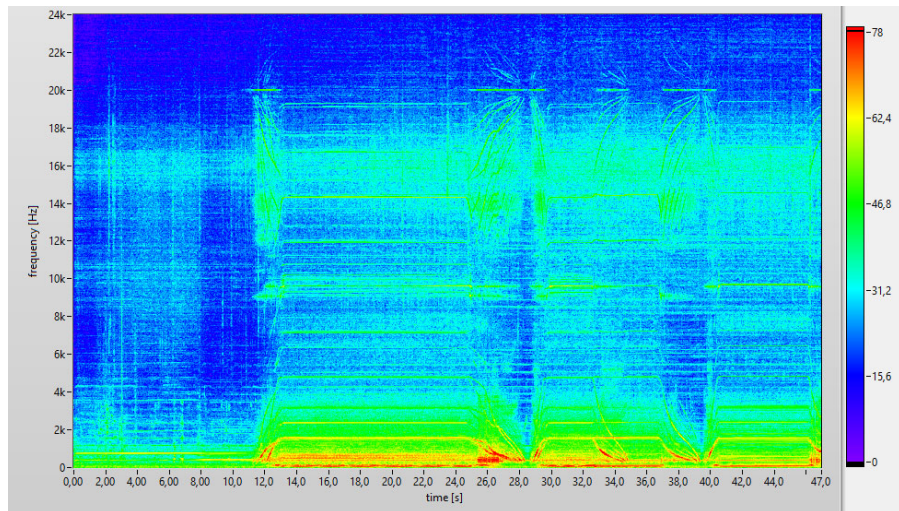
## 2.2 Vibroakustisches Verhalten im Boot

Die Bestimmung der Schallabstrahlung am Gesamtsystem erfolgt im Trockenen, d.h. das Boot befindet sich auf einem Ständer und hat keinen Kontakt zum Wasser. Die Beeinflussung der Rumpfschwingungen durch den Kontakt mit dem Wasser ist nicht unerheblich, gleichzeitig ist eine Messung im Wasser sehr aufwändig und nur schwer deterministisch durchführbar. Der Messaufbau ist in Bild-9 dargestellt.



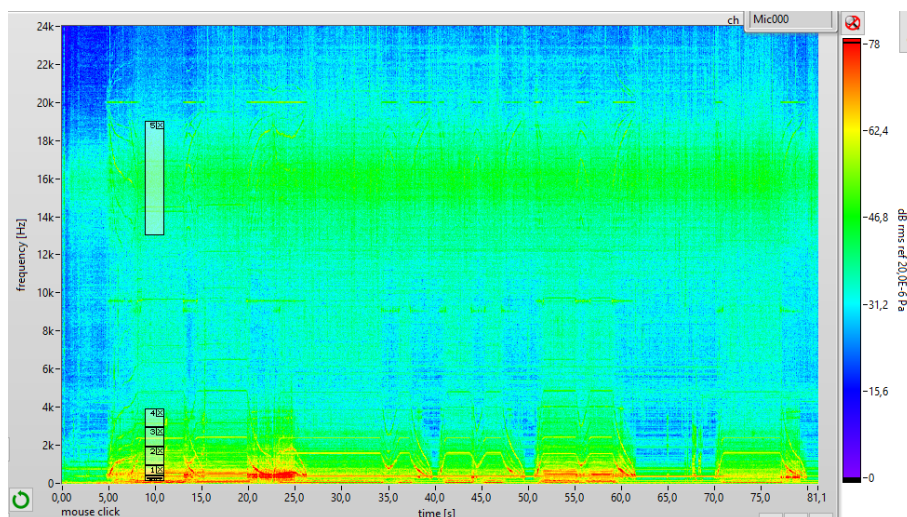
**Bild 9:** Messung mit akustischer Kamera am E-Gleiter im „Trockendock“

Die Messung von hinten zeigt zahlreiche Frequenzen zwischen 0 und 20kHz. Dominant sind die niederfrequenten Schwingungen bis 1kHz, welche auf die Motordrehzahl und deren Vielfache (1x, 2x, 3x) zurückzuführen sind – vgl. Bild-10.



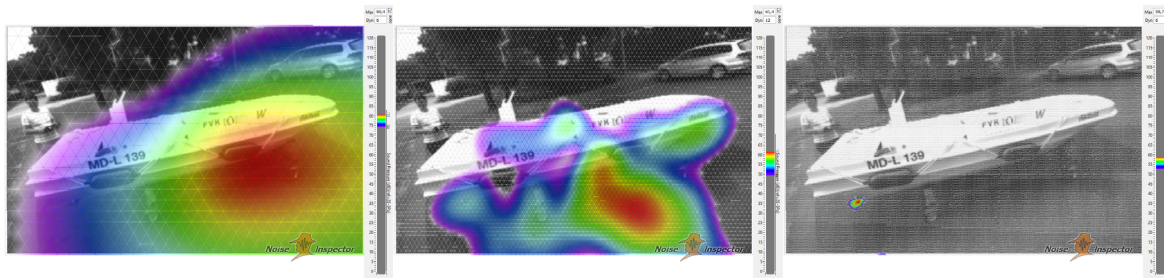
**Bild 10:** Schalldruck-Spektrogramm der akustischen Kamera am E-Gleiter von hinten

Weiterhin wurde auch von der Seite gemessen, der Frequenzinhalt ist ähnlich, nur die Frequenz bei 16kHz ist dominanter als bei der Messung von hinten – vgl. Bild-11.



**Bild 11:** Schalldruck-Spektrogramm der akustischen Kamera am E-Gleiter von der Seite

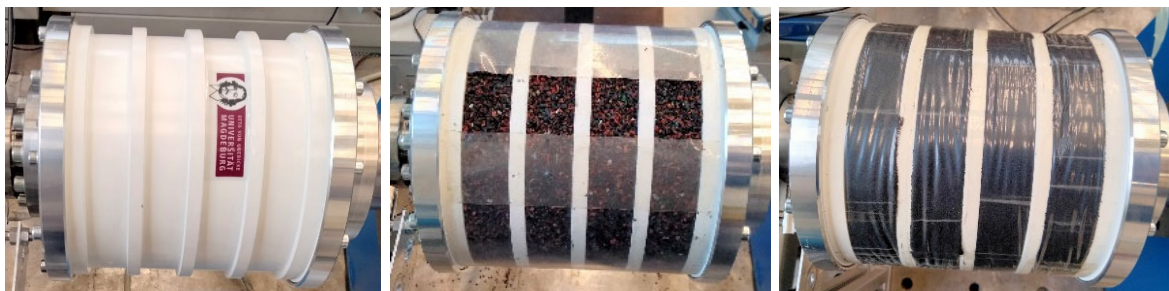
Eine Separation von verschiedenen Frequenzbändern ermöglicht eine genaue Lokalisierung der einzelnen Schallquellen (wie beispielsweise die beiden Motoren, die Kühlwasserpumpe, die Schiffsschrauben sowie spezielle Rumpfreionen), siehe Bild-12. Im niederfrequenten Bereich ergibt sich im Bugbereich ein Hotspot, der in der Nähe der Anschraubpunkte der Motoren liegt. Hier werden 1- bis 3-fachen Anteile der Motordrehzahl direkt über den Rumpf weitergeleitet und über eine große Fläche abgestrahlt. Der hohe Frequenzbereich hingegen ist nur an der Schiffsschraube sichtbar (vgl. Bild-12 rechts), welche direkt an den Motor gekoppelt ist. Biege- und Torsionsschwingungen vom Motor können hier direkt über die Schiffswelle übertragen werden und zeigen ebenfalls die am Einzelprüfstand beobachteten Eigenfrequenzen. Infolge der starken Dämpfung der GFK Teile des Rumpfes sind die Amplituden der resultierenden Schwingungen im hohen Frequenzbereich allerdings signifikant geringer als am Einzelprüfstand.



**Bild 12:** Schalldruck der akustischen Kamera am E-Gleiter von der Seite (links:0.5-1kHz/ mitte:2-3kHz/ rechts:13-19kHz)

### 3. Akustische Optimierung des Motors

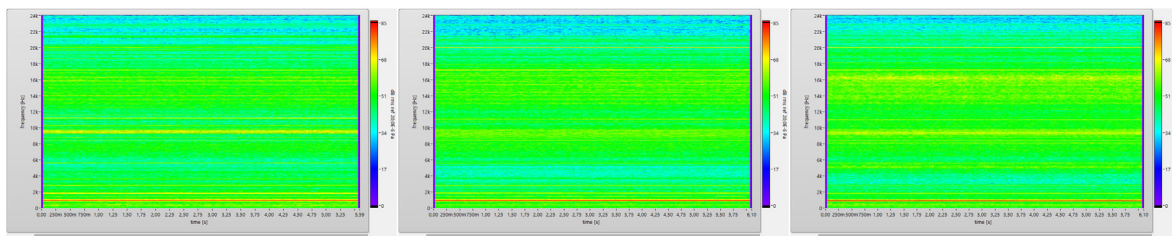
Bei den Prüfstandversuchen wurden neben den Formvarianten die in [2,3] entwickelt wurden, auch passive Dämpferstrukturen auf die Außenfläche des Rotors aufgebracht. Bild-13 zeigt drei exemplarische Varianten die experimentell untersucht worden sind.



**Bild 13:** Varianten der Rotorgestaltung (links: exemplarische Designversion/ Mitte: Partikeldämpfer/ rechts: Schaum)

Die Variante mit dem Partikeldämpfer und dem Schaum wurden noch von einer Manschette aus Kunststoff umhüllt, damit sich die Materialien nicht durch die Zentrifugalkraft vom Rotor lösen.

Bild-14 zeigt den Schalldruck aller Varianten im Vergleich, wobei die Variante mit dem Partikeldämpfer die Schwingung bei 9.2 kHz am besten reduziert. Die Schwingung bei 1kHz kann durch diese Varianten nicht signifikant beeinflusst werden, da diese von externen Prüfstandsteilen emittiert wurden.



**Bild 14:** Spektrogramm des Schalldrucks der Varianten (links: ohne passive Maßnahme/ Mitte: Partikeldämpfer/ rechts: Schaum)



## 4. Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt typische Charakteristika der Schwingungsanregung von elektrischen Maschinen. Besonders bei der aufgeführten Bauform mit einem Außenläufer und einem Controller mit PWM Stromreglung ist die Anregung mechanischer Schwingungen sehr präsent. Ohne geeignete Maßnahmen der Schwingungsreduktion oder der Schwingungsisolierung zur Bootsstruktur ist ein unauffälliger leiser Betrieb nicht möglich. Die Messungen des Antriebs auf dem Motorprüfstand liefert wichtige Zusammenhänge die bei der Entstehung der Schwingungsanregung helfen, jedoch ist eine Übertragung auf das Gesamtsystem nicht ohne weiteres möglich. Die Übertragungsstrecke vom Anbindungspunkt des Motors nach außen auf die schallabstrahlenden Flächen hat einen wesentlichen Einfluss auf die tatsächlichen akustischen Emissionen des Gesamtsystems mit elektrischem Antrieb.

## Literatur

- [1] F. Duvigneau, S. Koch, C. Daniel, E. Woschke, U. Gabbert. Vibration Analysis of an Electric Wheel Hub Motor at Stationary Operating Points. In: Cavalca K., Weber H. (eds) Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Rotor Dynamics - IFToMM. IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science, vol 63. Springer, Cham, pp.51-64, 2019, Online ISBN: 978-3-319-99272-3, Print ISBN: 978-3-319-99271-6, DOI: 10.1007/978-3-319-99272-3\_4.
- [2] S. Koch, F. Duvigneau, E. Woschke. A coupled rotor dynamic simulation of an electric drive train to investigate the acoustic behavior. eForum Acusticum 2020, Dec 2020, Lyon, France. pp.2945-2950, ff10.48465/fa.2020.0371ff. fihal-03229461f
- [3] S. Koch, F. Duvigneau, E. Woschke. A simulation of an electric machine considering the coupling of rotor- and electrodynamics. PAMM – Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, Volume 20, Issue 1, 2021, pp. 1-3. <https://doi.org/10.1002/pamm.202000080>
- [4] F. Duvigneau, S. Koch, C. Daniel, E. Woschke, D. Juhre. Acoustic analysis of an electric engine complementing to a coupled rotor- and electrodynamic simulation of an electric drive train. Proceedings of the FISITA 2021 World Congress, Prague, 13–17 September 2021.