PROJEKTBERICHT

VERSCHLEIßBESTÄNDIGE, ENERGIEEFFIZIENTE UND ZUVERLÄSSIGE KOMPONENTEN FÜR SUBSEA-ANWENDUNGEN

Förderkennzeichen 03SX508 (BMWK)
Projektlaufzeit 01.09.2020 - 29.02.2024

Autorenliste

Michael Döring	(Qsil Ingenieurkeramik, Frankenblick)
Andreas Kailer	(Fraunhofer IWM, Freiburg)
Björn Matthey	(Fraunhofer IKTS, Dresden)
Steffen Kuntze	(Fraunhofer IKTS, Dresden)
Caroline Tschirpke	(EagleBurgmann Germany GmbH & Co.KG, Wolfratshausen)
Frank Schaht	(Sulzer Pumpen (Deutschland) GmbH, Bruchsal)
Eckhard Schüler	(Miba Industrial Bearings Germany Osterode GmbH)
Andreas Meudtner	(LCP Laser Cut Processing GmbH, Hermsdorf)
Robert Bösinger	(KSF – Hochschule Furtwangen)
Bahman Azarhoushang	(KSF – Hochschule Furtwangen)

1. MOTIVATION UND ZIELSTELLUNG

Neue Technologien, insbesondere auch die Elektromobilität, führen zu einem rasant steigenden Bedarf an Ressourcen, deren Versorgungssicherheit aus verschiedenen Gründen immer kritischer wird. Daher gewinnen Technologien enorm an Bedeutung, mit denen Rohstoffe ökonomisch und umweltschonend aus dem Meer gefördert werden können. Eine große Herausforderung ist dabei die Absicherung störungsfreier Abläufe, da durch Stillstand, Wartung und Reparatur mariner Anlagen und Systeme enorme Kosten verursacht werden. Daraus resultiert der dringende Bedarf an Werkstoffen und Komponenten, die unter extremen Bedingungen zuverlässig funktionieren und möglichst nicht gewartet werden müssen.

Schlüsselkomponenten sind in solchen Systemen häufig Lagerungen und dynamische Dichtungen, da diese zusätzlich hohen Reibungs- und Verschleißbeanspruchungen ausgesetzt sind. SiC-gebundene Diamantwerkstoffe sind extrem belastbar und verschleißbeständig. Sie zeigen weder korrosive Schädigungen noch eine nachweisbare zeit- und belastungsabhängige Abnahme der Festigkeit. Ziel des Verbundvorhabens war die Entwicklung und Qualifizierung von höchst leistungsfähigen und zuverlässigen Komponenten für Pumpen und anderen Aggregaten für Subsea-Anwendungen. Gleitlager und Gleitringdichtungen sind Schlüsselkomponenten in Pumpen, die die Zuverlässigkeit und Betriebsdauer von Subsea-Anlagen begrenzen. Es besteht ein beträchtlicher Entwicklungsbedarf für einsatzsichere und langlebige Komponenten, um die Rohstoffförderung aus

größeren Meerestiefen leistungsfähiger und sicherer zu machen. Im Rahmen des Projekts sollten extrem verschleiß- und korrosionsbeständige Werkstoffe aus keramisch gebundenem Diamant eingesetzt werden. Daraus wurden die für Subsea-Pumpen benötigten Komponenten entwickelt, gefertigt und erprobt. Durch die enge Kooperation von Industriepartnern und Forschungsinstituten wurde eine zielgerichtete Entwicklung gewährleistet, wobei die Entwicklungskette von den Werkstoff- und Fertigungstechnologien bis zur Systemintegration und -qualifizierung vollständig abgebildet wurde.

Der angestrebte Lösungsweg ist in der nachfolgenden Abb. 1 dargestellt. Nach einer Abstimmung der Anforderungen auf den verschiedenen Ebenen war der Projektverlauf in eine Konzeptphase und eine Umsetzungs- bzw. Evaluierungsphase unterteilt. Hierbei wurden ausgehend von der Systemebene die Anforderungen an die Komponenten und Werkstoffe abgeleitet, sodass in der Konzeptphase die Arbeiten auf allen Ebenen parallel laufen konnten – zunächst auf Basis der definierten Anforderungen und anschließend in der Umsetzungsphase dann auch unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Konzeptphase.

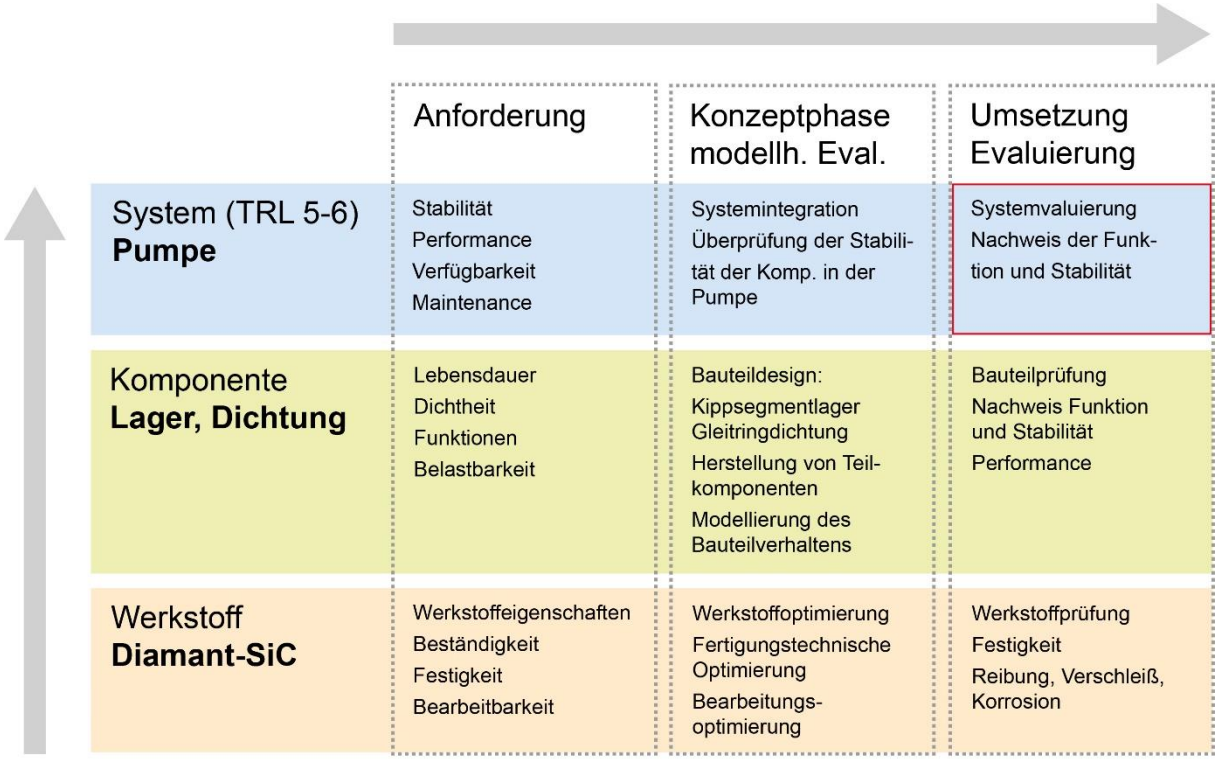

Abb. 1: Darstellung des Lösungsansatzes zur Erreichung des angestrebten TRL 5-6 (entsprechend der Einstufung des Horizon 2020 Work Programme[1])

In den nachfolgenden Abschnitten sind einige der wichtigsten Ergebnisse dargestellt. Im letzten Kapitel wird eine Einschätzung zum Nutzen der Ergebnisse der Projekts beschrieben und ein Ausblick für weitere Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

[1] https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2018-2020/annexes/h2020-wp1820-annex-ga_en.pdf

2. ANPASSUNG DER WERKSTOFFE

Ziele der Arbeiten waren zunächst die Werkstoffoptimierung und Anpassung der SiC-gebundenen Diamantwerkstoffe sowie die Entwicklung von Fertigungsprozessen für Near-Net-Shape Bauteile. Im Rahmen des Projekts war es möglich, Bauteile mit Diamantgehalten bis etwa 60 Vol.-% herzustellen. Abb. 2 zeigt die Mikrostruktur eines solchen Werkstoffs, in dem drei verschiedene Diamant-Körnungen genutzt wurden. Darüber hinaus wurde eine Intarsientechnologie entwickelt, mit der keramische Bauteile aus Siliciumcarbid (SiC) nur lokal an erforderlichen Oberflächen mit Diamant versehen werden, wodurch Rohstoffkosten und auch Kosten für die Bearbeitung der Bauteile erheblich gesenkt werden konnten.

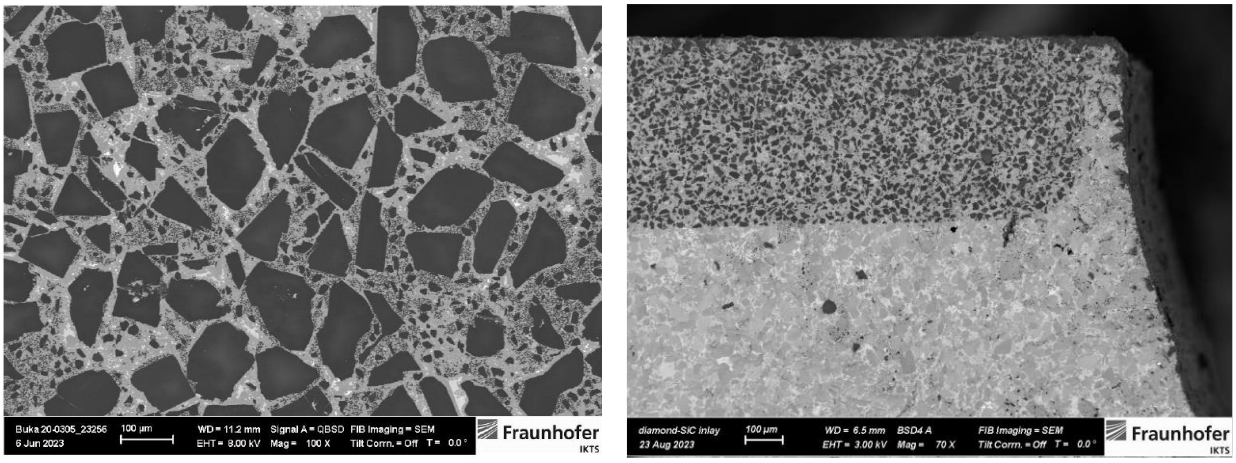

Abb. 2: Mikrostruktur eines Vollmaterials aus Diamant-SiC (links) sowie einer Intarsie mit einer lokalen Diamanteinlagerung (rechts)

Abb. 3: Gleitring mit einer Diamant-SiC-Intarsie (linkes Bild, matter Bereich); Gleitlager-Spurscheibe mit keramischer Gleitfläche aus einer Diamant-SiC-Intarsie (rechtes Bild)

In Abb. 3 sind Beispiele für die im Projekt entwickelten Komponenten zu sehen. Im Rahmen des Projekts ist es gelungen, die Herstellverfahren so zu optimieren, dass eine Endmaß-nahe Fertigung bei hoher Werkstoffqualität und Festigkeit möglich ist. Bedarf bestand noch hinsichtlich einer

weiteren Verbesserung der Bearbeitbbarkeit. Ein Lösungsansatz sind elektroerosiv bearbeitbare Diamant-SiC-Keramiken, wobei durch die Verwendung von Bor-dotierten Diamanten eine für die Elektroerosivbearbeitung ausreichende elektrische Leitfähigkeit erreicht werden kann.

Im Rahmen das Projekts wurde eine industrielle Fertigungsmöglichkeit der Diamant-SiC Komponenten erreicht. Mit angepassten Prozessparametern können auch große und dickwandige Keramikbauteile gefertigt werden, wie sie für die Herstellung von Gleitlagerscheiben und Hülsen benötigt werden.

3. BEARBEITUNGSTECHNOLOGIEN FÜR DIAMANT-SIC BAUTEILE

Aufgrund ihrer extremen Härte und Verschleißbeständigkeit sind Diamant-SiC-Keramiken sehr schwierig zu bearbeiten. Bei herkömmlichen Schleifprozessen mit Diamantschleifmitteln ist der Verschleiß inakzeptabel hoch. Im Rahmen des Projekts wurden als Lösungsansatz zunächst das laserunterstützte Schleifen und Schneiden (Trennen) verfolgt. In einer späteren Projektphase wurden außerdem Elektroerosivverfahren erprobt.

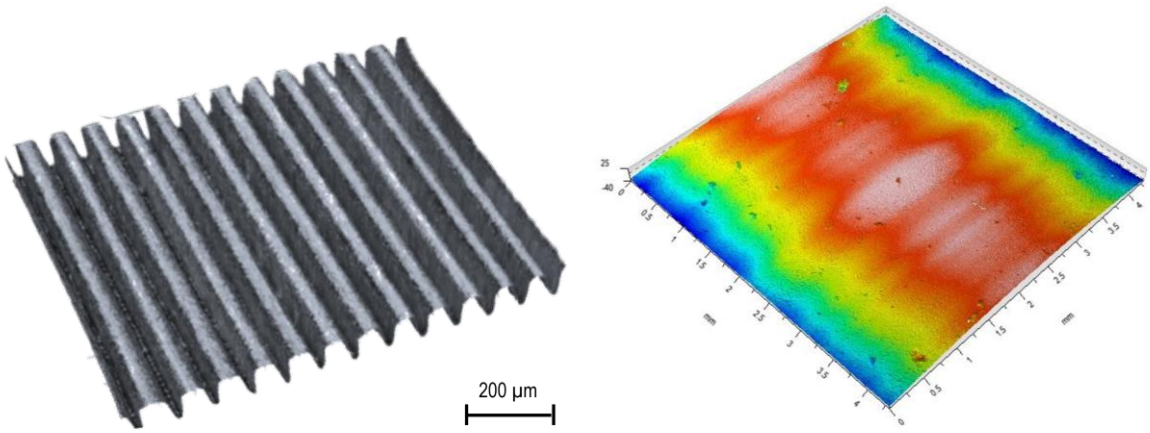

Abb. 4: Beispiel für eine Laservorstrukturierung einer SiC-Diamant-Oberfläche (links) Topografieaufnahme einer Oberfläche nach dem Einstichrundschleifen einer mittels Laser vorstrukturierten Oberfläche.

Untersuchungen mit vielen Parametervariationen und unterschiedlichen Schleifscheiben ergaben, dass sich Diamant-SiC durch hybride Verfahren bearbeiten lässt. Mit laserunterstützter Zerspanung ist es möglich, Kräfte deutlich zu reduzieren und einen gute Abtrag bei geringer Schädigungstiefe und einem akzeptablen Verschleiß der Schleifscheiben zu erzielen. Solche Schleifparameter sind erforderlich, damit die Werkstücke nicht aufgrund hoher Schleifkräfte brechen. Ein verringertes Bruchrisiko und eine höhere Präzision wurden auch durch angepasste Haltesysteme (Aufspannungen) für die Bauteile aus Diamant-SiC erreicht.

Bearbeitungsversuche mit Drahterosion erwiesen sich unter Kühlschmierung mit Öl als erfolgversprechend. Wenn es gelingt Werkstoffe mit ausreichender elektrischer Leitfähigkeit zu fertigen, sollte dieser Prozess ebenfalls für eine industrielle Umsetzung geeignet sein. Auch das Läppen und Polieren von Diamant-SiC-Oberflächen ist möglich, um die für Gleitringdichtungen erforderlichen hohen Anforderungen an Ebenheit und Rauheit zu erfüllen. Schließlich wurde auch gezeigt,

dass mit Laser bzw. Wasserstahl-Laser-Prozessen auch das Treffen von Diamant-SiC-Oberflächen möglich ist und dass beispielsweise auch Nuten und Bohrungen erzeugt werden können.

4. DESIGN UND FERTIGUNG VON GLEITLAGERN

Für die für den Subsea-Bereich entwickelten Pumpen werden Axial- und Radiallager benötigt, die mit Medienschmierung, d.h. stark partikelhaltigen wässrigen Fluiden oder Wasser-Öl-Gemischen betrieben werden können. Ausgehend von der Expertise für ölgeschmierte Kippsegmentlager wurden im Projekt solche Lager entwickelt, deren Gleitflächen durch Diamant-SiC so verstärkt werden, dass sie für mehrere Jahre wartungsfrei, d.h. mit möglichst geringem Verschleiß betrieben werden können. Dazu mussten zunächst Designs entwickelt werden, bei denen anstatt der üblicherweise eingesetzten Stahl- bzw. Kunststoffkomponenten Kippsegmente, Spurscheibe und Wellenhülse aus Diamant-SiC Keramiken eingesetzt werden. Aufgrund des vergleichsweise hohen Bearbeitungsaufwands des diamantverstärkten Werkstoffs sollten dazu insbesondere günstige Herstellgeometrien dieser Bauteile gewählt werden. Weiterhin zu berücksichtigen war der Schutz der metallischen Lagerkomponenten vor partikelinduziertem Verschleiß. Zudem sind die Sprödigkeit, die im Vergleich zu Metall niedrige thermische Ausdehnung sowie die nicht vorhandene plastische Verformbarkeit der Keramik zu beachten. Nach Erstellung und simulativer Überprüfung verschiedener Designs hinsichtlich der Eignung für den geforderten Betriebsbereich wurden Demonstratoren für ein Axial-Kippsegmentlager sowie ein Radiallager konstruiert und gefertigt. Abb. 5 zeigt zwei Varianten des Axiallagers mit diamantkeramischen Kippsegmenten. Der dazu passende Gegenläufer (Spurscheibe) ist in Abb. 3 (rechts) zu sehen. Alle Komponenten, mit Ausnahme der in Abb. 3 dargestellten Spurscheibe wurden für Prüfstandsversuche zur Verfügung gestellt.

Abb. 6 zeigt das Radiallager und die zugehörige Wellenhülse, die mit metallischen Klemmringen (nicht dargestellt) auf der Welle befestigt wird.

Abb. 5: Axiallager mit zwei verschiedenen Segmentvarianten: Trapezförmig (links) und rund (rechts). Spurscheibe: s. Abb. 3.

Abb. 6: Radiallager keramischen Kippsegmenten (links) und Wellenhülse aus Diamant-SiC (rechts)

5. EVALUIERUNG

5.1. UNTERSUCHUNGEN ZUM REIBUNGS- UND VERSCHLEIßVERHALTEN

Grundlegende Untersuchungen zum tribologischen Verhalten unter Medienschmierung wurden zunächst in Modellprüfungen durchgeführt, in denen ein Kippsegment in verkleinertem Maßstab gegen einen entsprechend verkleinerte Spurring getestet wurde (Abb. 7). Ziel war hierbei zu untersuchen, wie das Reibungsverhalten der Diamant-SiC-Werkstoffe von den Belastungsparametern (Gleitgeschwindigkeit, Kontaktdruck, Temperatur) sowie von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt.

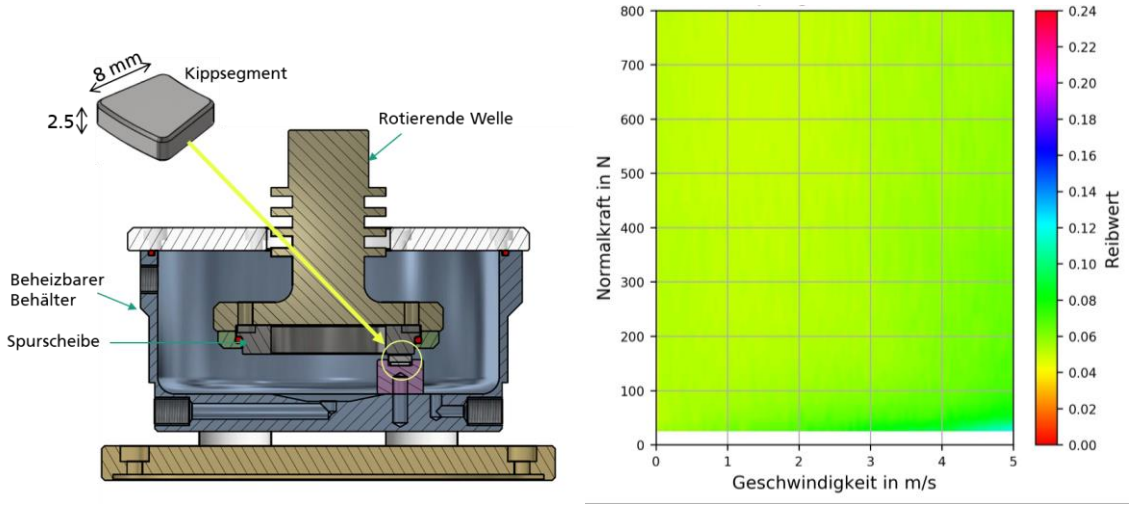

Abb. 7: Prüfaufbau für die Modellprüfung eines Kippsegments gegen einen Spurring (links); repräsentatives Ergebnis einer Prüfung mit einem Kippsegment und einem Spurring aus Diamant-SiC in Wasser bei Raumtemperatur

In einer Reihe von Prüfungen wurde für Diamant-SiC ein außergewöhnlich stabiles Reibungsniveau beobachtet. Wie in Abb. 7 rechts beispielhaft dargestellt ist, ist das Reibungsniveau über den gesamten Beanspruchungsbereich, d.h. bis 5 m/s Gleitgeschwindigkeit und bis 15 MPa (800 N) Flächenpressung, nahezu konstant zwischen 0,04 und 0,06. Darüber hinaus hat sich auch gezeigt, dass sich auch sehr raue (sandgestrahlte) Oberflächen innerhalb kürzester Zeit an dieses Reibniveau anpassen. Durch die Gleitreibungsbeanspruchungen wurden lediglich leichte topografische Veränderungen der Oberflächen beobachtet, wobei keine kritische Schädigungen, z.B. Kornausbrüche zu finden waren. Auch die systemnahe Prüfung von Gleitringdichtungen ergab außerordentlich konstante und stabile Reibwerte, während beim Vergleichsmaterial SiC, das als Standardwerkstoff für Gleitringdichtungen anzusehen ist, wesentlich stärkere Veränderungen und teilweise wesentlich höhere Reibwerte gemessen wurden (Abb. 8). Ausführliche Informationen zum tribologischen Verhalten sind bereits veröffentlicht [1].

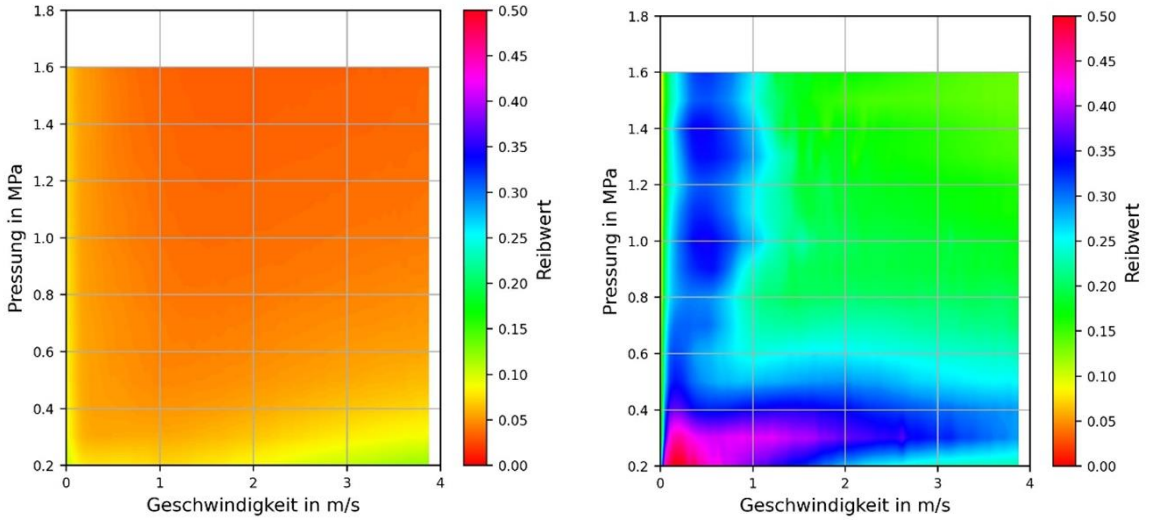

Abb. 8: Friction Maps für Gleitringdichtungen bei anwendungsnaher Prüfung (Medium: Vollentsalztes Wasser, Raumtemperatur, 2 bar Mediumsdruck). Links: Daiamant-SiC Selbstpaarung; Rechts: Referenzpaarung aus diamantfreiem SiC

5.2. SYSTEMPRÜFUNG MEDIENGESCHMIERTER GLEITLAGER

Für die anwendungsnahe Prüfung wurde zunächst ein Prüfstand entwickelt und gebaut, der für partikelhaltige Medien ausgelegt ist. Eine solche Prüfung erfordert Drehzahlen bis 4000 U/min bei Axiallagerkräften bis 21 kN. Ein einfacher Umbau des Prüfstands ermöglichte auch die Prüfung der Radiallager, wobei Drehzahlen bis 3000 U/min und Radialkräfte bis 2 kN erreicht werden können. Um eine erhöhte Belastung durch Partikel zu erreichen, wurden Partikelgehalte zwischen 1000 und 10.000 ppm eingestellt. Prüfungen wurden zunächst mit einer Designvariante durchgeführt, bei der noch trapezförmige Gleitpads verwendet wurden. In Abb. 8 ist der Lagerring nach einem Prüflauf zu abgebildet. In der Übersichtsaufnahme deutet bereits die Fleckigkeit der Gleitpads auf stellenweise Veränderungen der Oberfläche hin. Bei weiteren Untersuchungen wurden an den Gleitflächen stellenweise Einglättungen beobachtet. Außerdem waren die Vorderkanten der Gleitpads durch Erosion abgerundet. Weitere kritische Schädigungen gab es an den Keramikkomponenten nicht. Allerdings zeigte sich an den Stahlkomponenten stellenweise deutlicher Verschleiß aufgrund des hohen Partikelgehalts.

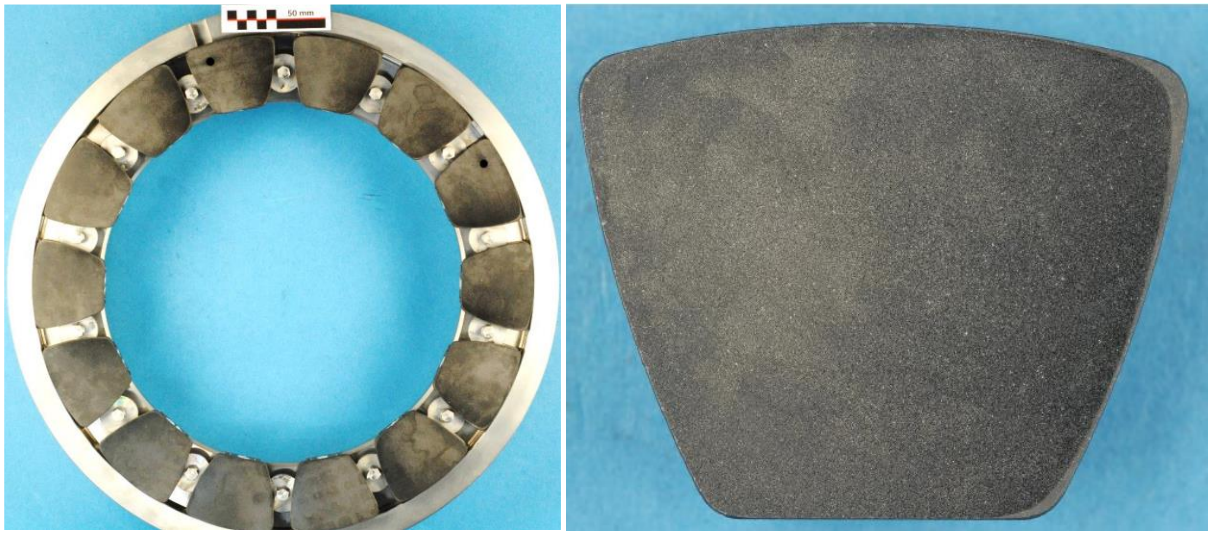

Abb. 9: Makroaufnahmen des Axiallagers (links) und eines einzelnen Gleitpads (rechts) nach der Systemprüfung

Auch das Radiallager (s. Abb. 6) wurde im Rahmen der Prüfstandsversuche mit teilweise sehr hohen Partikelgehalten geprüft. Hierbei ergab sich ein ähnliches Bild: Das Laufverhalten während der Prüfungen war stabil, und die Keramikoberflächen zeigten im Wesentlichen nur geringfügige lokale Veränderungen an den Oberflächen.

5.3. SYSTEMPRÜFUNG VON GLEITRINGDICHTUNGEN

Die tribologischen Anforderungen an Gleitringdichtungen sind sehr hoch, da aufgrund der erforderlichen Dichtfunktion die Menge an Flüssigkeit im Gleitkontakt sehr gering ist und kaum für stabile hydrodynamische Trennung der Oberflächen ausreicht. Mit Diamant-SiC soll ein höchst verschleißbeständiger Werkstoff genutzt werden, der auch unter solchen Mangelschmierungsbedingungen ein langzeitstabiles Betriebsverhalten der Pumpen ermöglicht. Dazu wurden Gleitringdichtungen mit Diamant-SiC-Intarsie (s. Abb. 3) in verschiedenen Geometrien und Einsatzbedingungen erprobt. Darüber hinaus wurden mit einem Laser Nuten in die Gleitfläche eingebracht, die zu einer Verbesserung der Schmierungsbedingungen führen sollten (Abb. 9). Für die Evaluierung der Gleitringdichtungen wurden verschiedenen Prüfstände genutzt (Abb. 10), die die Einsatzbedingungen genau nachbilden können.

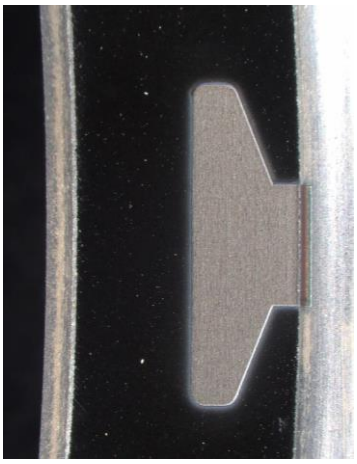

Abb. 1: Aufnahme einer Gleitringoberfläche mit einer Diamant-SiC-Intarsie und einer Schmiernut

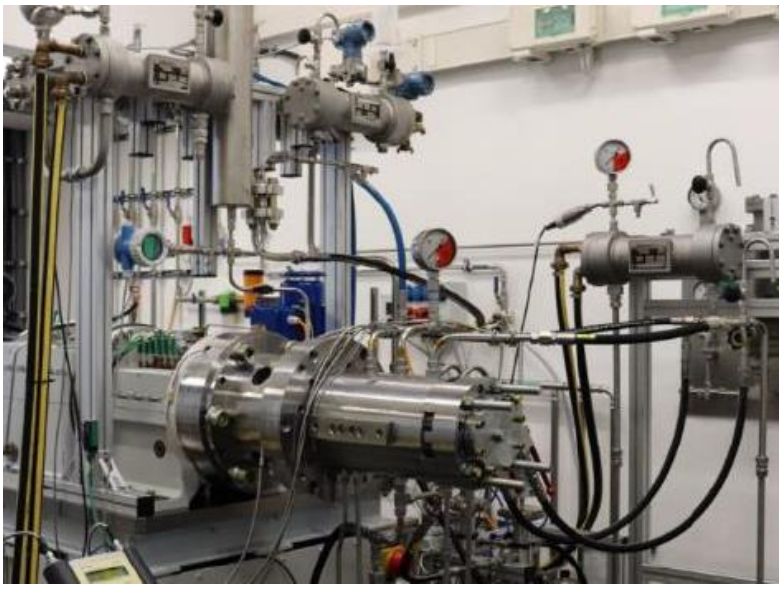

Abb. 2: Hochgeschwindigkeits-Prüfstand für die Evaluierung von Gleitringdichtungen unter sehr hohen Beanspruchungen

Die Prüfungen ergaben teilweise ein vielversprechendes Verhalten, indem die Gleitringdichtungen bis zu sehr hohen Belastungen betrieben werden konnten, ohne Schaden zu nehmen. Allerdings waren teilweise die Gleitflächentemperaturen und die Leckage höher als bei den Referenzversuchen mit Gleitringdichtungen aus SiC. Problematisch waren teilweise auch Langzeitversuche, bei denen nach etwa 500 Stunden die SiC-Anteile abgetragen wurden und dadurch Ausbrüche entstanden sind. Für den Einsatz in Subsea- oder anderen industriellen Anwendungen besteht somit noch Verbesserungsbedarf.

6. FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen des Projekts wurden große Fortschritte und Erkenntnisse hinsichtlich der Entwicklung, Fertigung und Evaluierung von höchst verschleißbeständigen Gleitkomponenten für Subsea-Pumpen erhalten. Diese umfassen:

- Entwicklung und Bereitstellung von angepassten Werkstoffen und einer Intarsientechnologie, mit der diamanthaltige Keramiken lokal auf einem keramischen Grundkörper aufgebracht werden können.

- Laserunterstützte Prozesse sind eine geeignete Möglichkeit, mit der diese Werkstoffe bearbeitet werden können. Auch elektroerosive Prozesse sind ggf. nutzbar. Jedoch ist die Bearbeitungstechnologie noch immer sehr anspruchsvoll. Insbesondere müssen Finishprozesse für Gleitringdichtungen noch weiter verbessert werden, um bei Gleitringdichtungen eine geringere Leckage zu erreichen.

- Es wurden Designs für Radial- und Axial-Kippsegmentlager entwickelt, die sich in der Evaluierung auch unter erhöhten Partikelbelastungen im Fluid bewährt haben. Es sind hier noch Anpassungen erforderlich, um Brüche an den Keramikelementen im Betrieb sicher auszuschließen und die Verschleißbeständigkeit der metallischen Trägerelemente zu verbessern.

- Die Evaluierung der Gleitringdichtungen zeigt, dass mit Intarsien aus Diamant-SiC eine sehr hohe Belastbarkeit erreicht werden kann. Weitere Verbesserungsbedarf besteht hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Stabilität der Keramikkomponenten. Eine geringere Leckage kann durch erreicht werden, wenn es gelingt, die Rauheit der Oberflächen der Diamant-SiC Intarsien noch weiter zu verringern.

- Laborversuche zum tribologischen Verhalten von Diamant-SiC haben gezeigt, dass das Reibungsverhatlen auch unter Mangelschmierungsbedingungen außerordentlich stabil ist. Auch die Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit sind extrem hoch. Somit dieses ist aus werkstofftechnischer Sicht dieses Material ideal für solche tribologischen Beanspruchungen in Subsea-Pumpen geeignet.

- Im Rahmen des Projekts war es nicht mehr möglich, die Langzeitstabilität der Gleitlager und Gleitringdichtungen ausreichend zu überprüfen. Entsprechende Untersuchungen müssen nach Projektende gemacht werden.

- Betreiber von Subsea-Analgen werden sich nur dann überzeugen lassen, solche Komponenten einzusetzen, wenn diese kein erhöhtes Ausfallrisiko und damit Betriebsrisiko darstellen. Dafür müssen noch weitere Anpassungen und Untersuchungen erfolgen.

7. DANKSAGUNG

Das Konsortialprojekt wurde mit finanzieller Unterstützung des BMWK durchgeführt (Förderkennzeichen: 03SX508) und vom Projektträger Jülich, Bereich Meeresforschung, Geowissenschaften, Schiffs- und Meerestechnik, begleitet.