

**Analyse des Systemverhaltens hydrostatischer Triebstränge  
für Meereswellenenergieanlagen**

**Analysing the Systems Response of Hydrostatic  
Transmissions for Marine Wave Energy Plants**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule  
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dominic Andreas Tiffin, geborener Dießel

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Murrenhoff  
Univ.-Prof. Dr. ir. Dr. h.c. Rik W. De Doncker

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2019

## **Kurzfassung**

Zurzeit besteht eine weitreichende politische Einigkeit dazu CO<sub>2</sub> Emissionen zu reduzieren. Dies mündet unter anderem in die Förderung der Erforschung von Quellen erneuerbarer Energie. Die Energie in Meereswellen ist eine solche Quelle. Sie weist das Potential auf für die Erzeugung elektrischer Energie genutzt zu werden. Bisherige Systeme zur Umwandlung der Wellenenergie in elektrische Energie bestehen üblicherweise aus zwei Subsystemen. Im ersten, dem sogenannten Wellenenergiekonverter, wird die Bewegung der Wellen in eine mechanische Bewegung umgewandelt. Im zweiten wird eine dieser Bewegung entgegengesetzte Kraft aufgeprägt, wodurch Leistung entzogen wird. Die Leistung wird anschließend in elektrische Leistung umgewandelt. Dieses zweite Subsystem wird Power Take-Off genannt. Manchmal wird die Kombination beider Subsysteme gemeinschaftlich als Wellenenergiekonverter bezeichnet.

Forschungsarbeiten zur Nutzung von Meereswellenenergie begannen in den 1970er Jahren. Dennoch ist kein System auf dem Markt verfügbar, welches einen wirtschaftlichen Betrieb verspricht. Bisherige Systeme erzeugen nicht genug elektrische Energie, um die Kosten der Herstellung, Installation und Wartung über die Lebensdauer zu kompensieren. Um eine wirtschaftliche Lösung zu finden, werden daher immer neue Wellenenergiekonverter entwickelt.

Nach Neuentwicklungen von Wellenenergiekonvertern müssen passende Power Take-Offs gefunden werden. Entsprechende Forschungsarbeiten wurden bereits veröffentlicht. Sie basieren allerdings immer auf konkreten Wellenenergiekonverterbeispielen und vergleichen verschiedene Power Take-Off Technologien in reduzierter Detaillierung. Folglich wird in dieser Arbeit ein hydraulisches Power Take-Off detailliert untersucht, welches an vielen verschiedenen Wellenenergiekonvertern einsetzbar ist. So können relevante Aspekte identifiziert werden, um Nutzern zu ermöglichen ein hydraulisches Power Take-Off zu entwickeln und dessen Eignung für ihr System zu prüfen. Trotz der Fokussierung auf das Power Take-Off könnte dies die Entwicklungskosten des gesamten Wandlungssystems reduzieren und die Wirtschaftlichkeit verbessern.

Das Ziel dieser Arbeit umfasst die Identifizierung wichtiger Aspekte des hydraulischen Power Take-Offs. Dies beinhaltet eine detaillierte Modellierung des Systems, um dessen grundlegende Beziehungen zu verstehen. Zur Validierung wird ein Prüfstand genutzt, der das komplette Power Take-Off von realistischen Wellenenergiekonverterbewegungen bis zur elektrischen Leistungsübertragung an das elektrische Netz enthält. Durch die Validierung des detaillierten Modells anhand der Messergebnisse können die wesentlichen dynamischen und energetischen Aspekte identifiziert werden. Dies ermöglicht Empfehlungen für den Entwicklungsprozess. Der Fokus liegt auf einzelnen Komponenten sowie auf dem Gesamtsystem und dessen Steuerung.

## **Abstract**

Currently, a wide spread political commitment exists to reduce CO<sub>2</sub> in the atmosphere. This leads to support and encouragement of research in various renewable energy sources. The energy in marine waves is one of these sources, which might be utilised for electric power production in future. Systems developed for this transformation of wave power to electric power commonly consist of two major subsystems. The first subsystem uses waves to create a mechanical motion. They are called Wave Energy Converters. The second subsystem damps this motion and transforms the resulting mechanical power into electric power. These subsystems are called Power Take-Off. Sometimes, the term Wave Energy Converter is used for the complete system including both subsystems.

Scientific research on the use of marine wave energy started in the 1970s. Nevertheless, no system is on the market promising an economically feasible operation. So far the systems developed do not produce enough electric energy in relation to their costs for build, installation and maintenance over the expected respectively achieved life time. To overcome this problem, new Wave Energy Converters are proposed again and again in order to find promising solutions.

After early stage developments of new Wave Energy Converters fitting Power Take-Offs have to be found. Research on the differences of various Power Take-Off technologies has been published already. However, the according research works were carried out for certain Wave Energy Converter examples and considered the various Power Take-Off technologies only with reduced detail to enable a comparison. Accordingly, in this work the use of a hydraulic transmission as a Power Take-Off is analysed in detail. This technology is applicable to a wide range of different Wave Energy Converters. The intention is to identify the important aspects of the technology and thus to enable readers to develop a hydraulic Power Take-Off and to evaluate its suitability. Despite the focus on the Power Take-Off, this might reduce development costs and errors of the overall conversion system and support to find economically feasible solutions for tapping the power of the marine waves and transforming it into electric power.

The aim of this work is to identify important aspects of a hydraulic Power Take-Off. This includes detailed modelling of the aspects to understand the basic relationships. Accordingly, a test-rig is used, which covers the complete Power Take-Off from the Wave Energy Converter motion to the electric power, which is fed to the grid, and includes a realistic modelling of the Wave Energy Converter motion. A detailed simulation model is validated with its measurement results. Thus, all aspects, which need to be considered, can be identified. This includes dynamic

and energetic aspects and enables recommendations for the design process. The focus is put on the included components as well as on the control required to operate the Power Take-Off.