



Technische
Universität
Braunschweig

INSTITUT FÜR
mobile Maschinen
und Nutzfahrzeuge



Forschungsberichte

Hagen Neurath

Synthese und Konzeptionierung
domänenübergreifender Antriebssysteme

Herausgeber:
Freundes- und Förderkreis des Instituts
für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge e.V.

Shaker Verlag

Synthese und Konzeptionierung domänenübergreifender Antriebssysteme

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Hagen Neurath
geboren in:	Freiburg im Breisgau
eingereicht am:	08.06.2021
mündliche Prüfung am:	04.02.2022
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor
Gutachter:	Prof. Dr. Ludger Frerichs Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

2022

Forschungsberichte aus dem
Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge

Hagen Neurath

**Synthese und Konzeptionierung
domänenübergreifender Antriebssysteme**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8556-3

ISSN 2196-7369

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge (IMN) der Technischen Universität Braunschweig und basiert im Wesentlichen auf einem durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Forschungsprojekt. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich unterstützt und somit zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. Frerichs, der mir die Rahmenbedingungen für die Erstellung dieser Arbeit gegeben hat. Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. Küçükay, Leiter des Instituts für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Koreferats sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Vietor, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meinen ehemaligen Kollegen am IMN. Danken möchte ich dabei nicht nur den direkten Kollegen aus der Arbeitsgruppe Antriebssysteme und Mobilhydraulik für die fachlichen Gespräche, sondern allen wissenschaftlichen Mitarbeitern, mit denen ich Zeit am Institut und im privaten Kreis verbringen konnte. Die gegenseitige Unterstützung und freundschaftliche Atmosphäre sind zwei der unzähligen Gründe, weshalb ich die Zeit am Institut und in Braunschweig in sehr guter Erinnerung behalten werde.

Mein größter Dank gilt allen voran meinen Eltern, die mich stets wie selbstverständlich und auf unterschiedlichste Art und Weise unterstützt, gefördert und motiviert haben. Ihr habt mir die besten Rahmenbedingungen geschaffen, um nicht zuletzt diese Arbeit zu schreiben. Meinen engsten Freunden, die stets Verständnis für viel Arbeit und wenig Zeit hatten, möchte ich an dieser Stelle ebenfalls danken. Insbesondere gilt mein Dank meinem langjährigen Trainer Gerhard, der mir in unzähligen Trainingseinheiten mehr vermittelt hat als nur den Zehnkampf. Auch meiner Partnerin möchte ich herzlich für die Unterstützung in den letzten arbeitsintensiven Monaten danken. Euch allen verdanke ich mehr, als ich es vermag in diesen Zeilen auszudrücken.

Kurzfassung

Die stetige Weiterentwicklung technischer Produkte führt zu einer steigenden Anzahl von Lösungsmöglichkeiten technischer Fragestellungen. Die zunehmenden Lösungsmöglichkeiten beruhen zum einen auf einer steigenden Anzahl von zur Verfügung stehenden Komponenten, zum anderen ermöglichen diese aber auch neue Systemaufbauten. Im Bereich der Antriebstechnik verdeutlicht das der Trend hin zu elektrischen Antrieben. Diese stellen nicht nur eine Alternative zu verbrennungsmotorischen Lösungen dar, sondern ermöglichen auch den Aufbau von neuen Antriebssystemen, die aus einer Kombination von elektrischen und mechanischen Komponenten bestehen. Im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen führt die Elektrifizierung zu einer noch ausgeprägteren Zunahme der Lösungsmöglichkeiten, da neben elektrischen und mechanischen Komponenten die hydraulische Antriebstechnik eingesetzt wird. Im Rahmen der Produktentwicklung gilt es damit eine steigende Anzahl an Lösungsmöglichkeiten zu betrachten, um hieraus die besten Lösungsmöglichkeiten abzuleiten. Zur möglichst umfassenden Lösungsraum Betrachtung, werden virtuelle Entwickler-Werkzeuge eingesetzt, da der resultierende Entwicklungsaufwand mit konventionellen Methoden kaum mehr handhabbar zu gestalten ist. Neben einer computergestützten Dimensionierung, die insbesondere zur Komponentenentwicklung von Bedeutung ist, stehen zunehmend auch Entwickler-Werkzeuge zur Verfügung, die eine digitale Unterstützung im konstruktiv-kreativen Bereich auf der Systemebene bieten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Ableitung einer Entwicklungsmethodik, die insbesondere durch eine computergestützte Lösungssuche Entwicklungsingenieure bei der Systemauslegung unterstützt. Hierzu wurde anhand von etablierten Hilfsmitteln des Produktentstehungsprozesses, wie etwa Richtlinien und Normen, ein Vorgehen abgeleitet, das eine automatisierte Systemauslegung ermöglicht. Das hierzu aufgebaute Entwickler-Werkzeug nutzt eine vereinfachende und domänenübergreifende Modellierung, um auf Basis von Messdaten relevante Antriebskomponenten auszuwählen sowie Antriebssysteme zu konzeptionieren und auszulegen. Zur Ableitung möglichst vielversprechender Antriebssysteme werden sowohl technische Rahmenbedingungen als auch Produktanforderungen genutzt, um die Anzahl der Lösungsmöglichkeiten sukzessive zu reduzieren. In einem abschließenden Entwicklungsschritt des Entwickler-Werkzeugs wird der Lösungsraum anhand eines adaptiven Suchalgorithmus sowie eines implementierten Bewertungssystems auf vielversprechende Lösungen eingegrenzt und auf eine handhabbare Größe reduziert. Diese Auswahl an Lösungsmöglichkeiten stellt eine belastbare Entscheidungsbasis zur weiteren Detailauslegung dar.

Abstract

The constant further development of technical products leads to an increasing number of possible solutions to technical problems. The growing amount of possible solutions is based on the one hand on a rising number of available components, on the other hand these can also be used to build new systems. In the field of drive technology, this can be illustrated by the trend toward electric drives. Electric drives not only represent an alternative to internal combustion engine solutions, but also enable the construction of new drive systems by the combination of electrical and mechanical components. In the field of mobile machinery, electrification is leading to an even more distinct increase in the number of possible solutions, as hydraulic drive technology is being used in addition to electrical and mechanical components. In the context of product development, it is therefore necessary to consider an increasing number of possible solutions in order to determine the best solutions. Virtual developer-tools are used for a comprehensive solution space analysis, since the resulting development effort is hardly manageable with conventional development approaches. In addition to computer-aided design, which is particularly important for the component development, developer-tools that offer digital support in the constructive-creative area at system level are increasingly available.

This thesis deals with the design of a development methodology that supports development engineers in the system design process, by means of a computer-aided solution search. For this purpose a procedure was derived on the basis of established tools of the product development process, such as guidelines and standards, which enables an automated system design. The evolved developer-tool uses a simplifying and cross-domain modeling to identify relevant drive components on the basis of measurement data in order to conceptualize and design drive systems. Technical boundary conditions as well as product requirements are used to successively reduce the number of possible solutions and derive the most promising drive systems. In a final development step of the developer-tool, the solution space is reduced to a manageable size using an adaptive search algorithm and an implemented evaluation system to find promising solutions. This selection of possible solutions represents a reliable decision basis for further detailed development steps.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	V
Abkürzungen und Indizes	XIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Die mobile Antriebstechnik	3
2.1.1 Antriebstechnologien	5
2.1.2 Anforderungen an die Antriebstechnik auf mobilen Arbeitsmaschinen . . .	17
2.2 Methodische Produktentwicklung	19
2.2.1 Vorgehensmodelle und Methodiken	20
2.2.2 Berechnungs- und Synthesewerkzeuge	22
2.2.3 Bewertung technischer Systeme	24
2.3 Modellbildung und Simulation	26
2.3.1 Modellbildung	26
2.3.2 Systemtheorie	28
2.3.3 Simulationstechniken	32
2.4 Such- und Optimierungsverfahren	33
3 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	41
4 Ableitung einer Entwicklungsmethodik	45
4.1 Transfer der Lösungsstrategie in ein Vorgehen	45
4.2 Vorstellung der Methodik	46
4.3 Resultierende Anforderungen	51
5 Aufbau eines Entwickler-Werkzeugs	53
5.1 Theoretische Vorüberlegungen zum Werkzeug	53
5.1.1 Bewertungssystem	53
5.1.2 Modellierung und Darstellung der Antriebskomponenten	57
5.1.3 Abzubildende Antriebssysteme	61
5.1.4 Strategie zur Lösungsraumeingrenzung	65
5.2 Umsetzung der theoretischen Vorarbeiten in ein Entwickler-Werkzeug	71
5.2.1 Erstellung einer Komponentendatenbank	72
5.2.2 Analyse der aktuellen Antriebstopologie	76
5.2.3 Bewertungskriterien definieren und Aufspannen des Lösungsraums	79
5.2.4 Bildung von Abtriebs- und Versorgungssystemen	80
5.2.5 Implementierung eines Optimierungsverfahrens	87
5.3 Umsetzung der theoretischen Vorarbeiten in ein Bewertungs-Werkzeug	98
5.3.1 Bewertung anhand der Leistung	98
5.3.2 Bewertung anhand von Leistungsgrößen	100

6 Anwendung der Methodik	103
6.1 Vorstellung des Anwendungsbeispiels und abgeleiteter Konzepte	103
6.2 Methodikverifizierung an einem Beispielantrieb	109
6.2.1 Lösungsraumeingrenzung	110
6.2.2 Lösungssuche und Vergleich der Optimierungsverfahren	117
6.3 Exemplarische Validierung am Abtriebssystem der Trenngeräte	118
7 Praktischer Nutzen und Fazit	121
8 Zusammenfassung und Ausblick	123
Literaturverzeichnis	127
A Anhang zu Kapitel 2	141
B Anhang zu Kapitel 5	143
C Anhang zu Kapitel 6	155