

Schriftenreihe
des Instituts für
Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig



Nr: 69

**M.Sc.
Lin Li
2021**

Systematische Synthese und Bewertung der Mehrwellen- und Planetengetriebe

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Systematische Synthese und Bewertung der Mehrwellen- und Planetengetriebe

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Lin Li
aus Hunan

eingereicht am: 07.05.2020
mündliche Prüfung am: 18.11.2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay
Prof. Dr.-Ing. P. Eilts

2021

Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik
TU Braunschweig

Band 69

Lin Li

**Systematische Synthese und Bewertung der
Mehrwellen- und Planetengetriebe**

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7804-6

ISSN 1619-6325

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

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig.

Die Arbeit wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay angeregt, der das Institut für Fahrzeugtechnik seit 1997 leitet. Bei der Durchführung dieser Arbeit habe ich von ihm vielseitige Unterstützung erhalten. Durch seine engagierte Betreuung trug er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Ich danke Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay für seine stetige Förderung, vorbildliche Betreuung und aktive Unterstützung in allen Bereichen.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Mitberichterstattung und Herrn Prof. Dr.-Ing. Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der Technischen Universität Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Weiterhin möchte ich ausnahmslos den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik für ihre Hilfsbereitschaft und stets gute Zusammenarbeit danken. Besonderer Dank gilt meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Gunther Alvermann für seine stets offene Art in allen Gesprächen und seine Geduld beim Korrekturlesen der Arbeit. Meiner Dank gilt auch meinem Kollegen Herrn Haijun Chen für seine stets konstruktive Ratschläge und seine Unterstützungen bei der Korrektur der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich auch insbesondere bei meinem privaten Umfeld und den Freunden, die mir stets zur Seite standen. Meiner Frau Jue danke ich sehr für ihre selbstlose Unterstützung und Hilfe über all die Jahre.

Braunschweig, im November 2020

Lin Li

Systematische Synthese und Bewertung der Mehrwellen- und Planetengetriebe

von Lin Li

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer Methodik zur Synthese moderner Getriebekonzepte. Dabei sollen sämtliche potentielle Konzepte im Lösungsraum berücksichtigt werden. Die technischen Bewertungskriterien in der Getriebeentwicklung sollen in die Synthese integriert und automatisiert angewandt werden, um die erfolgversprechendsten Konzepte im gesamten Lösungsraum zu identifizieren. Die zugehörigen Komponenten in den Getriebekonzepten sollen möglichst detailliert konkretisiert werden, um den Entwicklungsprozess bereits in der frühen Phase zu unterstützen.

Für Mehrwellen- und Planetengetriebe wurde in der vorliegenden Arbeit jeweils ein Synthesevorgang erarbeitet.

Für Mehrwellengetriebe wird die Radsatzstruktur als zweidimensionaler Graph behandelt, der aus Knoten und Verbindungen besteht. In dem Graph werden sämtliche mögliche Leistungspfade zwischen Getriebeeingang und -ausgang ermittelt, die anschließend zur Realisierung der Zielübersetzungen systematisch zusammengesetzt werden. Dabei entstehen Getriebetopologien. In einzelnen Getriebetopologien werden Getriebekomponenten wie Zahnräder, Wellen und Lager konkretisiert und zu Getriebekonzepten zusammengebaut.

Für Planetengetriebe werden, ausgehend von einem Basisradsatz, feste Wellenkopplungen sowie Schaltelemente im Getriebe verbaut und sogenannte Übersetzungsgetriebe generiert. Durch systematisches Zusammensetzen der Übersetzungsgetriebe werden Getriebekonzepte generiert, die die Zielübersetzungen aufweisen. Für Hybridgetriebe werden zusätzlich noch E-Maschinen im Getriebe verbaut. Die realisierbaren Fahrmodi wie elektrisches Fahren, eCVT oder Parallelhybrid werden ermittelt.

Alle generierten Getriebekonzepte werden parallel zum Synthesevorgang hinsichtlich ihrer Effizienz, des Bauraums sowie der Konstruktion bewertet. Die Bewertungen erfolgen einerseits anhand der Getriebeeigenschaften – z. B. der Radsatz-Komplexität bzw. den Belastungen an den Komponenten – und andererseits im Kontext des Gesamtfahrzeugs, z. B. anhand des Kraftstoff- und Energieverbrauchs im Fahrzyklus. Als Ergebnisse der Synthese stehen die erfolgversprechendsten Getriebekonzepte mit konkreter Getriebestruktur sowie den verbauten Komponenten, der Schaltmatrix und weiteren wichtigen Auslegungsdaten zur Verfügung.

Systematic synthesis and evaluation of multi-shaft and planetary transmission

by Lin Li

Abstract

The aim of the present work was the development of a methodology for the synthesis of modern transmission concepts. All potential concepts in the solution space should be taken into account. The technical evaluation criteria in transmission development should be integrated into the synthesis and applied automatically in order to identify the most promising concepts in the entire solution space. The transmission components in the synthesized concepts should be specified as detailly as possible in order to support the development process in the early phase.

In the present work, a synthesis process was developed for multi-shaft and planetary transmissions respectively.

For multi-shaft transmissions, the structure of the gearset is treated as a two-dimensional graph, consisting of nodes and edges. In the graph, all possible power transfer paths between the transmission input and output are determined, which are then systematically combined together to achieve the target gear ratios. In this process, transmission topologies are generated. In each individual transmission topologies, the transmission components such as gears, shafts and bearings are specified and assembled into transmission concepts.

For planetary gears, starting from a basic gearset, shaft couplings and shift elements are installed in the gearset to generate the so-called ratio-gearset. By systematically assembling the ratio-gearsets together, transmission concepts are generated, which have the target gear ratios. For hybrid transmissions, electric machines are integrated in the transmission additionally. The realized driving modes such as electric driving, eCVT and parallel hybrid are determined.

All generated transmission concepts are evaluated in parallel with the synthesis process with regard to their efficiency, packaging and construction. On the one hand, the evaluations are based on the transmission properties – e.g. the gearset complexity and the loads on the components – and on the other hand in the context of the whole vehicle, e.g. based on fuel and energy consumption in driving cycles. The results of the synthesis are the most promising transmission concepts with the concrete transmission structure as well as the installed components, the shift matrix and other important design data.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	IV
1 Einführung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Gliederung der Arbeit	4
2 Stand der Forschung	5
2.1 Mehrwellengetriebe	5
2.2 Planetengetriebe	8
2.2.1 Planetenradsatz und Schaltelement	8
2.2.2 Zusammengesetzte Planetengetriebe	9
2.2.3 Moderne konventionelle und hybridisierte Planetengetriebe	10
2.3 Synthese der Fahrzeuggetriebe	12
3 Synthese konventioneller und hybrider Mehrwellengetriebe	15
3.1 Getriebetopologie und Leistungspfadanalyse	15
3.2 Synthese der Leistungspfade	18
3.3 Zusammensetzung der Leistungspfade und Ermittlung der Getriebetopologie	24
3.4 Ganganordnung	26
3.5 Ermittlung des Getriebekonzeptes	28
3.5.1 Konkretisieren der Getriebekomponenten	28
3.5.2 Überschlägige Berechnung der Abmessung der Getriebekomponenten	33
3.5.2.1 Achsabstand	34
3.5.2.2 Zahnbreite	35
3.5.2.3 Getriebelager	39
3.6 Virtueller Zusammenbau des Getriebes	41
3.7 Zusammenfassung der Synthese der Mehrwellengetriebe	42
4 Bewertung der Mehrwellengetriebekonzepte	44
4.1 Effizienz	44
4.2 Bauraum	46
4.2.1 Anzahl der Getriebekomponenten	46
4.2.2 Getriebe-Abmessungen	47
4.3 Konstruktion	48
4.3.1 Belastungen an den Zahnrädern	49

4.3.2	Belastungen an den Wellen	52
4.4	Zusammenfassung der Bewertung der Mehrwellengetriebe	53
5	Synthese konventioneller und hybrider Planetengetriebe	58
5.1	Freiheitsgrade und Wellenkoppelungen im Planetengetriebe	58
5.1.1	Ein-Gang-Getriebe mit einem Planetenradsatz	58
5.1.2	Mehrgang-Getriebe mit einem Planetenradsatz	59
5.1.3	Mehrgang-Getriebe mit mehreren Planetenradsätzen (PRS)	59
5.1.4	Vielfältigkeit der Übersetzungsrealisierung	61
5.2	Drehzahlen im Planetenradsatz	62
5.3	Drehmomente im Planetenradsatz	63
5.4	Mathematische Beschreibung der Planetengetriebestruktur	64
5.4.1	Struktur der konventionellen Planetengetriebe	64
5.4.2	Struktur des hybridisierten Planetengetriebes	66
5.5	Synthese konventioneller Planetengetriebe	67
5.5.1	Grundgetriebe	67
5.5.2	Schaltelemente und Übersetzungsgetriebe	68
5.5.3	Gruppierung der Übersetzungsgetriebe	72
5.5.4	Ermittlung der Getriebekonzepte	74
5.5.5	Konstruktive Umsetzbarkeit der Getriebekonzepte	80
5.5.6	Ermittlung der Schaltmatrix	84
5.5.7	Zusammenfassung der Synthese konventioneller Planetengetriebe	86
5.6	Hybride Planetengetriebe	87
5.6.1	Add-on-Hybridgetriebe	87
5.6.2	Dedizierte Hybridgetriebe (DHT)	88
5.7	Synthese der DHTs	90
5.7.1	Ermittlung der Getriebekonzepte für den VKM-Solo-Modus	91
5.7.2	Integration der E-Maschinen und Ermittlung der Hybridgetriebe	92
5.7.3	Ermittlung des Parallelhybrid-Modus	94
5.7.4	Ermittlung des rein elektrischen Modus	95
5.7.5	Ermittlung des eCVT-Modus	98
5.7.6	Zusammenfassung der Synthese der DHTs	100
6	Bewertung der konventionellen Planetengetriebe und DHT	103
6.1	Bewertung der Einsatzbereiche der Getriebekonzepte	103
6.2	Bewertung des Bauraums	106

6.2.1	Untersuchung des mechanischen Aufwands	107
6.2.2	Untersuchung des elektrischen Aufwands	108
6.3	Kraftstoffverbrauch und Fahrleistung	110
6.4	Konzeptoptimierung und Ergebnisse der Bewertung	113
6.5	Zusammenfassung der Bewertung der DHTs	117
7	Zusammenfassung	121
	Literaturverzeichnis	124