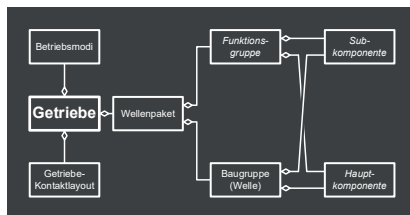
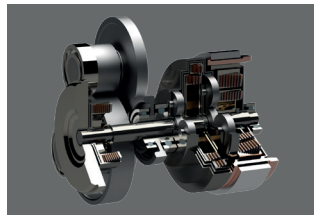


# Automatisierter Variantenentwurf elektrifizierter Getriebekonzepte

Autor: Marco Giannantonio  
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT





# Automatisierter Variantenentwurf elektrifizierter Getriebekonzepte

Am Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Marco Antonio Reinhold Giannantonio**

aus Erlenbach bei Marktheidenfeld

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl
Tag der Einreichung:	22.04.2022
Tag der mündlichen Prüfung:	14.06.2022

Darmstadt 2022

D17



Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

**Marco Giannantonio**

**Automatisierter Variantenentwurf  
elektrifizierter Getriebekonzepte**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, 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 978-3-8440-8757-4

ISSN 2198-8536

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Kurzfassung

Die wesentliche Herausforderung in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses für elektrifizierte Antriebsstränge liegt in der Identifizierung vielversprechender Konzepte in möglichst kurzer Entwicklungszeit. Gleichzeitig wird zur Sicherstellung des Markterfolgs des zukünftigen Produktes eine nahezu vollständige Abdeckung des multidimensionalen Lösungsraumes sowie ein hoher Konzept-Reifegrad angestrebt. Diese teils gegensätzlichen Ziele sind mit dem konventionellen, wenig automatisierten Entwicklungsprozess kaum noch erreichbar. Ein Beitrag zur Auflösung dieses Zielkonfliktes wird im Rahmen dieser Dissertation präsentiert: Ein vollständig automatisierter Ansatz für den Variantenentwurf elektrifizierter Getriebekonzepte.

Der Ansatz zeichnet sich durch eine gesamtheitliche Methodik zur automatisierten, rechnergestützten Erzeugung und Optimierung von hochintegrierten 3D-Konzeptentwürfen für Getriebelayouts komplexer Bauart, bestehend aus mehreren Wellenpaketen und bis zu drei Antriebsquellen, aus. Durch den Einsatz geeigneter Optimierungsalgorithmen erfolgt eine rechenzeiteffiziente Suche und Identifikation des bestmöglichen Konzeptdesigns für das zugrundeliegende multidimensionale Optimierungsproblem. Bisherige Ansätze eignen sich lediglich für Layouts geringer Komplexität mit einer Antriebsquelle und erfordern anschließende manuelle Schritte zur Erreichung eines vergleichbar hohen Reifegrades. Die vorgestellte Methodik setzt hierbei auf eine dynamische Einschränkung des Lösungsraumes durch Einbeziehung technischer Restriktionen bei der Dimensionierung der Komponenten und verknüpft diese zusätzlich mit einer prädiktiven Kollisionsanalyse. Technisch nicht plausible oder unzulässige Varianten werden so frühzeitig vom Lösungsraum ausgeschlossen. Ein weiterer wesentlicher Baustein liegt in der Identifikation von Möglichkeiten zur Optimierung des axialen Bauraumbedarfes. In Summe wird eine hochintegrierte und kollisionsfreie Anordnung aller Getriebekomponenten im 3D-Fahrzeugbauraum bei gleichzeitiger Sicherstellung einer belastungskonformen Auslegung des Aggregates erzielt. Als Basis der Methodik dient ein hier vorgeschlagenes objektorientiertes und wissensbasiertes Getriebemodell. Dieses zeichnet sich durch eine gesamtheitliche Abbildung aller Getriebekomponenten, deren vollständigen geometrischen und funktionalen Daten sowie deren Beziehungen zueinander aus.

Die Leistungsfähigkeit und Praxisrelevanz der Methodik wird anhand zweier Anwendungsbeispiele demonstriert. Der Beitrag der Methodik zur ressourcen- und belastungsgerechten Auslegung der Aggregate sowie der Einfluss insbesondere hinsichtlich der Bauraumintegration unterschiedlicher Anbindungsarten der E-Maschine (achsparell und koaxial) wird diskutiert. Der vorgeschlagene Ansatz bietet somit die Chance zeitaufwändige Schritte während des Konzeptentwurfs zu automatisieren und zu parallelisieren, den Lösungsraum systematisch abzusuchen und somit die Konzeptfindungsphase für ein zukünftiges Aggregat schneller abschließen zu können.



---

## Abstract

The primary challenge during the early phase of the concept design process for electrified drivetrains is to identify viable concepts in a development time as short as possible. Simultaneously, a high degree of concept maturity and the greatest possible degree of coverage of the multi-dimensional solution space are pursued to ensure the market success of the future product. These partially incompatible goals are difficult to achieve in the conventional development process with a low degree of automation. This dissertation presents a contribution to resolving this conflict of objectives: a fully automated approach for the variant design of electrified transmission concepts.

The approach is characterized by a holistic method for the automated, computerized generation and optimization of densely packed 3D design concepts for complex transmission layouts comprising multiple shaft packages and up to three power sources. The use of suitable optimization algorithms ensures the resource-optimized search for and identification of the best possible concept design for the underlying multi-dimensional optimization problem. Existing approaches are applicable only for low-complexity layouts with one power source and, in particular, do not ensure the high degree of concept maturity pursued with this new approach. The proposed method is based on the dynamic limitation of the solution space under consideration of technical constraints in the dimensioning of the components and additionally combines these with a predictive collision analysis. This means that technically non-feasible or impermissible variants are excluded from the solution space at an early stage. Another crucial building block is the identification of possibilities to optimize the axial length through the nesting of components. Overall, this method results in the densely packed and collision-free arrangement of all the transmission components in the vehicle installation space. Simultaneously, all components are dimensioned in accordance with load capacity requirements. The method is based on an object-oriented, knowledge-based, holistic transmission model containing all the transmission components along with all their geometrical and functional data and their relations to each other.

The effectiveness and practical relevance of the method are demonstrated using two application examples. The contribution to the resource-friendly and load-capacity-compliant dimensioning and the effect of differently connected electrical machines (axis-parallel and coaxial), especially in terms of integration in the installation space, is discussed. The proposed approach enables the automation and parallelization of formerly time-consuming steps in order to accelerate the concept identification phase for future drivetrains. Furthermore, a systematic scan of the solution space can be performed.





---

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	I
Abstract.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XII
Ablaufdiagramme .....	XIII
Übersicht Algorithmen .....	XIV
Abkürzungsverzeichnis .....	XV
Symbolverzeichnis.....	XIX
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung .....	2
1.2 Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>7</b>
2.1 Komponenten elektrifizierter Getriebe .....	9
2.1.1 Stirnradstufe .....	9
2.1.2 Planetenradsatz .....	12
2.1.3 Schaltelement .....	16
2.1.4 Welle .....	17
2.1.5 Lager.....	18
2.1.6 Antriebsquellen.....	20
2.1.7 Weitere Komponenten .....	22
2.2 Eigenschaften elektrifizierter Getriebe .....	24
2.2.1 Klassifizierung Hybridgetriebe .....	24
2.2.2 Ausgeführte Getriebekonzepte.....	28
2.2.3 Ausgewählte Konzepte.....	32
2.3 Optimierung.....	34
2.3.1 Allgemeine Optimierungsprobleme .....	34
2.3.2 Multikriterielle Optimierungsprobleme .....	36
2.3.3 Restringierte Optimierungsprobleme.....	37
2.3.4 Optimierung mit Metamodellen.....	38

2.3.5	Optimierungsverfahren .....	39
<b>3</b>	<b>Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>43</b>
3.1	Identifikation Forschungslücke .....	43
3.2	Modellbildung System Getriebe .....	48
<b>4</b>	<b>Zielsetzung und methodisches Vorgehen .....</b>	<b>51</b>
4.1	Zielsetzung der Arbeit .....	51
4.2	Methodisches Vorgehen .....	54
<b>5</b>	<b>Getriebemodell .....</b>	<b>57</b>
5.1	Standardisiertes Eingabeformat .....	58
5.1.1	Teil 1: Wellenstrukturcodierung .....	58
5.1.2	Teil 2: Komponentenanordnung .....	61
5.2	Detektion Betriebsmodi .....	63
5.3	Getriebe-Kontaktlayout .....	65
5.3.1	Klassifizierung .....	65
5.3.2	Detektion .....	68
5.4	Wissensbasiertes Getriebemodell .....	73
5.4.1	Anforderungen .....	73
5.4.2	Struktur und Aufbau .....	75
<b>6</b>	<b>Dimensionierung .....</b>	<b>81</b>
6.1	Belastungsanalyse .....	83
6.2	Zentralwellen .....	85
6.3	Entscheidungsbasierte Dimensionierung .....	90
6.3.1	Schaltelemente .....	92
6.3.2	Evolventenverzahnungen .....	94
6.3.3	Planetenradsätze .....	97
6.3.4	Stirnradsätze .....	101
6.4	Lager .....	103
<b>7</b>	<b>Räumlicher Modellaufbau .....</b>	<b>109</b>
7.1	Axiale Bauraumoptimierung .....	110
7.1.1	Bausteine des Getriebemodells .....	112
7.1.2	Analyse .....	113
7.1.3	Ausführung einfache Verschachtelung .....	117
7.1.4	Ausführung mehrfache Verschachtelung .....	119
7.2	Gestaltung außenliegende Hohlwellen .....	120
7.3	Räumliche Positionierung Wellenpakete .....	122
7.4	Kollisionen .....	124

7.4.1	2D-Kollisionsanalyse .....	125
7.4.2	Klassifizierung .....	126
7.4.3	Konstellationen mit prädiktiven Abhilfemaßnahmen .....	127
7.4.4	Konstellationen mit reaktiven Abhilfemaßnahmen .....	130
7.4.5	Integration in den Gesamttablauf – Präventivmaßnahmen .....	132
7.4.6	Integration in den Gesamttablauf – Reaktivmaßnahmen .....	140
7.5	Aufbau und Analyse CAD-Modell .....	146
<b>8</b>	<b>Anwendung der Methodik.....</b>	<b>147</b>
8.1	Modellbewertung .....	147
8.2	Gesamttablauf Optimierung .....	151
8.3	Geeignete Optimierungsalgorithmen .....	154
8.4	Anwendungsbeispiele .....	155
8.4.1	Fallstudie A: Auslegungsphilosophie.....	155
8.4.2	Fallstudie B: Variation E-Maschine .....	164
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>173</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>179</b>
	<b>Verzeichnis studentischer Arbeiten .....</b>	<b>195</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>197</b>
<b>A</b>	<b>Beispielkonzepte .....</b>	<b>201</b>
A.1	Konzept A .....	201
A.1.1	Betriebsmodus .....	201
A.1.2	Drehzahl-Gleichung .....	201
A.2	Konzept B.....	202
A.2.1	Anordnungsskizzen Konzept B1 und B2 .....	202
A.2.2	Betriebsmodi und Schaltmatrix.....	203
A.2.3	Drehzahl-Gleichung .....	203
<b>B</b>	<b>Dimensionierung.....</b>	<b>205</b>
B.1	Analyse Betriebsmodi.....	205
B.2	Wellen.....	206
B.2.1	Torsionsbelastung.....	206
B.2.2	Torsions- und Biegebelastung.....	206
B.3	Lamellenkupplungen.....	207
B.3.1	Übertragbares Drehmoment .....	207
B.3.2	Geometrie .....	207
B.3.3	Übersicht Parameter .....	208

B.4	Evolventenverzahnungen.....	209
B.4.1	Geometrie und Zähnezahlen.....	209
B.4.2	Flankentragfähigkeit.....	210
B.4.3	Zahnfußtragfähigkeit.....	213
B.5	Planetengetriebe.....	216
B.5.1	Übersetzung und Zähnezahlen.....	216
B.5.2	Drehmomente.....	216
B.5.3	Drehzahl Planet.....	217
B.5.4	Einbaubedingung: Zähnezahl.....	217
B.6	Wälzlager.....	218
B.6.1	Lager-Außengeometrie.....	218
B.6.2	Lager-Innengeometrie.....	218
B.6.3	Tragzahlen.....	219
B.6.4	Dynamisch äquivalente Lagerbelastung.....	220
B.6.5	Lagerkräfte – Verfahren der Übertragungsmatrizen.....	221
<b>C</b>	<b>Räumlicher Modellaufbau.....</b>	<b>225</b>
C.1	Axiale Bauraumpotentiale.....	225
C.1.1	Einfache Komponenten-Verschachtelung (EKV).....	225
C.1.2	Mehrfache Komponenten-Verschachtelung (MKV).....	229
C.2	Präventivmaßnahme Maximalachsabstand.....	231
C.3	Kollisionsfreiheit getriebeintern.....	233
<b>D</b>	<b>Anwendung der Methodik.....</b>	<b>235</b>
D.1	Übersicht Parameter.....	235
D.2	Fallstudie A.....	237
D.3	Fallstudie B.....	239
<b>E</b>	<b>Algorithmen.....</b>	<b>241</b>
E.1	Optimierung.....	241
E.1.1	Trust-Region-Verfahren.....	241
E.1.2	RBFOpt-Verfahren.....	243
E.2	Skyline-Algorithmus.....	244