

**Entwicklung eines Konzeptes zur recyclinggerechten  
Teppichkonstruktion**

**Development of a Concept for Recycling Compatible  
Carpet Construction**

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

vorgelegt von

Ulrike Margarete Lützow geb. Rübsam

Berichter: Privatdozent Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing Gunnar Seide

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2016



Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

Univ. Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

**Ulrike Lützwow**

**Entwicklung eines Konzeptes  
zur recyclinggerechten Teppichkonstruktion**

Development of a Concept  
for Recycling Compatible Carpet Construction

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5116-2

ISSN 1618-8152

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.



## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Beschäftigung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik und Lehrstuhl für Textilmaschinenbau der RWTH Aachen University entstanden. Hier möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei allen Personen zu bedanken, die zu der vorliegenden Dissertation beigetragen haben.

Meinem Doktorvater Herrn Privatdozent Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing Gunnar Seide danke ich für die Gespräche und die Betreuung. Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz möchte ich mich für den Einblick in die Recyclingwelt bedanken und bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen für die spontane Berichterätigkeit bei der Prüfung.

Ein besonderer Dank gilt den vielen Wegbegleitern, die diese Dissertation erst ermöglicht haben. Hierzu zählen die Partner des Projektes EcoMeTex im Besonderen Herr Dr. Vankann, Herr Dr. Schröter, Herr Dr. Wynendaele und Frau Dr. Finetti-Imhof aber auch zahlreiche Partner außerhalb des Projektes wie Herr Dr. Fahr oder Herr Goetz. Weiterhin möchte ich meinen Kollegen Frau Dr. Lemm, Herr Dr. Pico und Herr Stolz für das konstruktive Feedback und die Unterstützung danken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und besonders bei meinem Mann für die Rücksicht, Geduld und Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	6
2	Stand der Technik bei Teppichböden	10
2.1	Aufbau und Zertifizierung von Teppichböden	10
2.2	Motivation für die Entwicklung nachhaltiger Teppichböden	15
2.2.1	Große Abfallmengen	15
2.2.2	Politische Förderung	16
2.2.3	Verbrauchernachfrage	19
2.2.4	Rohstoffpreise	20
2.2.5	Ökologische Relevanz	21
2.3	Zwischenfazit	24
3	Stand der Technik beim Teppichrecycling	26
3.1	Recyclingsysteme in Deutschland	26
3.2	Herausforderungen des Teppichrecyclings	28
3.2.1	Materialkombinationen im Teppich	29
3.2.2	Aktuelle Verwertung von Teppichabfällen	30
3.2.3	Logistik von Teppichabfällen	31
3.2.4	Kosten und Erlöse im Recycling	34
3.3	Recyclingvarianten für Chemiefasern	38
3.3.1	Faserrecycling	39
3.3.2	Physikalisches Recycling	40
3.3.3	Exkurs: Anwendbarkeit des physikalischen Recyclings auf Teppichabfälle	41
3.3.4	Chemisches Recycling	46
3.4	Teppichrecycling in der Vergangenheit und Gegenwart	48
3.5	Zusammenfassung	51
4	Grundprinzipien des Design for Recycling	54
4.1	Grundprinzip 1: Wiederverwendbarkeit	54
4.2	Grundprinzip 2: Monomaterial	55
4.2.1	Exkurs: Monomaterialansatzes für PA - Teppiche	57
4.3	Grundprinzip 3: Trennbarkeit	58
4.4	Zwischenfazit	60

5	Methoden des Design for Recyclings	62
5.1	Bewertungskriterien für die Entwicklungsmethoden	64
5.2	Planen und Analysieren	68
5.2.1	Life Cycle Analysis oder Ökobilanz (LCA)	68
5.2.2	Ecodesign - Methode nach Wimmer	69
5.2.3	Recycling- bzw. Umwelt-FMEA	71
5.2.4	Checklisten	73
5.2.5	Bewertung der Methoden für die Phase Planen und Analysieren	76
5.3	Konzipieren	77
5.3.1	Nutzwertanalyse	78
5.3.2	Recycling-Index	79
5.3.3	Bewertung der Methoden für die Entwicklungsphase Konzipieren	81
5.4	Entwerfen	82
5.4.1	Richtlinien/Leitfaden	82
5.4.2	House of Environmental Quality (HoEQ)	84
5.4.3	Umwelt-Technik-Markt-Matrix (UTeMa-Matrix)	86
5.4.4	Bewertung der Methoden für die Entwicklungsphase Entwerfen	88
5.5	Ausarbeiten	89
5.5.1	Innerbetriebliche Systeme des klassischen Rechnungswesens	89
5.5.2	Öko-Portfolio	90
5.5.3	Bewertung der Methoden für die Entwicklungsphase Ausarbeiten	92
5.6	Methoden für den gesamten Entwicklungsprozess	92
5.6.1	Fraunhofer IZM-Ökodesignstrategie	93
5.6.2	VDI-Richtlinie 2243 Recyclingorientierte Produktentwicklung	96
5.6.3	Entwicklungsmethodik zur umwelt- und recyclinggerechten Produktgestaltung	98
5.6.4	Bewertung der Methoden für den gesamten Prozess	101
5.7	Bewertung der Methoden	102
5.8	Fazit	105
6	Konzeption eines Design-for-Recycling-Netzwerkes	107

6.1	Stand der Technik Im Bereich der Unternehmensnetzwerke	107
6.1.1	Theoretische Grundlagen von Unternehmensnetzwerken	108
6.1.2	Vor- und Nachteile von Unternehmensnetzwerken	110
6.1.3	Lebensphasen von Unternehmensnetzwerken	113
6.1.4	Erfolgsfaktoren für Unternehmensnetzwerken	114
6.1.5	Beispiele für erfolgreiche Unternehmensnetzwerke	117
6.2	Entwicklung der Struktur des DfR-Netzwerkes	119
6.3	Stand der Technik bei Trennschichten in Textilien	122
6.4	Trennschichtentwicklung	124
6.4.1	Bewertung und Auswahl möglicher Auslöseprinzipien	126
6.4.2	Mögliche Umwandlungszustände der Trennschicht nach der Auslösung	131
6.4.3	DfR-Netzwerk, basierend auf Trennschichten	134
6.5	Stand der Technik bez. der Identifizierung von recycelbaren Teppichen	136
6.5.1	Notwendigkeit einer Identifizierung	136
6.5.2	Projekt zur Teppichcodierung (COCARE)	139
6.5.3	Potentielle Codierungstechnologien	141
6.5.4	Zwischenfazit	145
6.6	Entwicklung einer Codierung für recycelbare Teppiche	146
6.6.1	Herausforderungen und Anforderungen einer Codierung	146
6.6.2	Information der Codierung	148
6.6.3	Aufbau der Codierung	151
6.6.4	Implementierung des Codes in Teppiche	159
6.6.5	Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der Codierung	161
6.6.6	Proof of Concept: Codierung von Teppichen	163
6.6.7	DfR-Netzwerk, basierend auf Trennschichten und Codierung	177
6.7	Aktuelle Kundenkommunikation	180
6.8	Weiterentwicklung der Kundenkommunikation hinsichtlich des Recyclings	182
6.8.1	Recycling-Label	182
6.8.2	Recyclingdatenbank	184
6.9	Einführungsstrategie für das DfR-Netzwerk	186
6.9.1	Analyse der Vor- und Nachteile des DfR-Netzwerkes	186

6.9.2	Lösungsansatz zur Einführung des DfR-Netzwerkes	193
6.10	Zusammenfassung	201
7	Eingliederung des DfR-Netzwerkes in den Entwicklungsprozess	204
7.1	Spiralmodell der Chemiefaserentwicklung	204
7.2	Einschränkungen und Voraussetzungen	206
7.3	Schritt 1: Vorarbeiten	207
7.3.1	Materialfestlegung durch Rohstoffklassen	208
7.3.2	Trennschichtkonzeption	208
7.3.3	Zielabgleich Recycling	214
7.4	Schritt 2: Labormaßstab	216
7.4.1	Ergänzung der Checkliste mit Teppichanforderungen	216
7.4.2	Versuchsplanung, -durchführung und Zielabgleich mit Teppichanforderungen	219
7.4.3	Zielabgleich Recycling	220
7.5	Schritt 3: Technikumsmaßstab	221
7.5.1	FMEA	221
7.5.2	Versuchsplanung, -durchführung und Zielabgleich mit Teppichanforderungen	222
7.5.3	Zielabgleich Recycling und Anfordern des Codes	222
7.6	Schritt 4: Produktionsmaßstab	223
7.6.1	Erweiterte FMEA, Produktionsplanung und Implementierung des Codes	224
7.6.2	Versuchsdurchführung und Zielabgleich mit Teppichanforderungen inklusive Kostenkalkulation	224
7.6.3	Zielabgleich Recycling durch das Netzwerk	224
7.7	Zusammenfassung	225
7.8	Bewertung der theoretischen Anwendung	229
8	Beispielhafte Teppichentwicklung mit dem Spiralmodell	233
8.1	Schritt 1 Vorarbeiten	233
8.1.1	Materialfestlegung durch Rohstoffklassen	233
8.1.1	Trennschichtkonzeption	238
8.1.2	Zielabgleich Recycling	242
8.2	Schritt 2: Labormaßstab	245
8.2.1	Ergänzung der Checkliste mit Teppichanforderungen	245

8.2.2	Versuchsplanung und -durchführung	249
8.2.2.1	Versuchsplanung und -durchführung Trennschicht	249
8.2.2.2	Auslösung der Trennschicht	252
8.2.2.3	Polyolefin- bzw. Polyamid- Dispersion	256
8.2.3	Zielabgleich Produkt und Recycling	257
8.3	Schritt 3: Technikumsmaßstab	262
8.3.1	FMEA	262
8.3.2	Versuchsdurchführung	267
8.3.2.1	Erste Versuchsreihe mit Aktion-Back-Rücken	268
8.3.2.2	Zweite Versuchsreihe mit Bitumen-Rücken	269
8.3.3	Zielabgleich Produkt	273
8.3.4	Zielabgleich Recycling	283
8.4	Fazit	283
9	Wirtschaftliche Bewertung	285
9.1	Abfallmengen	285
9.2	Kapitalkosten	286
9.3	Betriebskosten	289
9.4	Erlöse aus Polymerverkauf	293
9.5	Entsorgungskosten für nicht recycelbare Materialien	295
9.6	Fazit	298
10	Zusammenfassung	299
11	Summary	302
12	Ausblick	304
13	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	306
13.1	Abbildungen	306
13.2	Tabellen	310
14	Literatur	313
14.1	Studentische Arbeiten	351
Anhang:	Abkürzungsverzeichnis, Formelzeichen	352