

**Trockenumformung
von Aluminium**

Von phänomenologischen
Ansätzen zu einer
modellbasierten
Prozessauslegung

Felix Flegler

BAND
129

Trockenumformung von Aluminiumlegierungen

–

Von phänomenologischen Ansätzen zur modellbasierten Prozessauslegung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

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

genehmigte

Dissertation

von

Felix Flegler

aus Wiesbaden-Dotzheim

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner

Tag der Einreichung: 07.04.2021

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2021

Darmstadt 2021

D17

Trockenumformung von Aluminium

**Von phänomenologischen Ansätzen zu einer
modellbasierten Prozessauslegung**

Felix Flegler

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

BAND
129

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

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 978-3-8440-8319-4

ISSN 0949-4952

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit, für das entgegengebrachte Vertrauen sowie für die Anfertigung des Hauptgutachtens. Ferner gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, für Ihr Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Außerdem möchte ich allen Kolleg*innen sowie administrativen und technischen Mitarbeiter*Innen für die fruchtbaren Diskussionen und die großartige Unterstützung in allen Bereichen des Institutslebens danken. Besonderen Dank richte ich an Lukas Schell für die kritische Auseinandersetzung mit dieser Arbeit. Mein Dank richtet sich auch an alle Studierenden, die im Rahmen einer Abschlussarbeit oder einer hilfswissenschaftlichen Tätigkeit wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allen gilt Thorben Burmeister und Tim Berg mein besonderer Dank. Ich danke außerdem meinem Projektpartner Tim Abraham und seinen Kolleg*innen am Fraunhofer IST für den fachlichen Austausch und die institutsübergreifende Unterstützung dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich auf meinem gesamten Lebensweg stets unterstützt und gefördert haben.

Mit Worten lässt sich mein Dank für die bedingungslose Unterstützung durch meine Frau kaum ausdrücken. Saskia, für alles was du getan hast, vor allem die Entbehrungen der letzten Jahre, danke ich dir von ganzem Herzen.

Darmstadt, im März 2021

Felix Flegler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen und Abkürzungen	V
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen der Tribologie.....	5
2.1.1 Adhäsionsverschleiß	8
2.1.2 Verschleißmodellierung	12
2.1.3 Technische Oberflächenmodifikationen und ihre Beschreibung.....	13
2.1.4 Reibung und Verschleiß in Abhängigkeit halbzeugseitiger Oberflächenmodifikationen.....	18
2.2 Trockenes Tiefziehen von Aluminium	20
2.2.1 Tribologie und Verschleiß.....	20
2.2.2 Trockenumformung und ihre Realisierung	22
2.3 Grundlagen zu Aluminiumknetlegierungen	26
2.3.1 Verschleiß in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften	27
2.3.2 Natürliche Oxidschicht des Aluminiums	30
2.3.3 Verfahren zur Manipulation der Oxidschicht.....	32
2.3.4 Einfluss auf das Verschleißverhalten	38
2.4 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik.....	40
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	43
3.1 Zielsetzung	43
3.2 Vorgehensweise.....	43
4 Versuchseinrichtungen, Materialien und Simulationsmodelle	46

4.1	Anlagen	46
4.1.1	Kombinierte Streifenziehanlage.....	46
4.1.2	Kugel-Scheibe-Tribometer.....	47
4.1.3	Konfokales Weißlichtmikroskop μ -surf	48
4.1.4	Zug-Druck-Prüfmaschine Zwick Roell	48
4.2	Versuchsmaterialien.....	49
4.2.1	Verwendeter Werkzeugstahl	49
4.2.2	Aluminiumwerkstoffe und Oberflächenbehandlung.....	49
4.3	Numerische Modellbildung und Validierung.....	51
5	Modellvorstellung und ihre Abbildung.....	53
5.1	Rissbildung der Aluminiumoxidschicht.....	53
5.1.1	Berechnung der Rissdichte	54
5.1.2	Messung von Rissen auf eloxierten Blechen	56
5.1.3	Fazit aus der Betrachtung der Rissentstehung	60
5.2	Makroskopische Dehnung während der Umformung.....	60
5.2.1	Dehnungsverhalten im Streifenziehversuch.....	60
5.2.2	Dehnungsverhalten im Tiefziehen.....	63
5.3	Mikroskopische Dehnung während der Umformung.....	67
5.3.1	Beschreibung der Referenzoberfläche.....	68
5.3.2	Numerische Simulation der Oberflächendeformation.....	70
5.3.3	Auswertung des Dehnungsverhaltens.....	74
5.4	Einordnung in die Theorie zur Rissentstehung	76
6	Einfluss der halbzeugeitigen Mikrotextrur	78
6.1	Experimentelle Untersuchung.....	78
6.1.1	Verfahren zur Einstellung des Materialanteils	79
6.1.2	Streifenziehversuche	82
6.1.3	Diskussion der Ergebnisse.....	85

6.1.4	Reibwertermittlung und Minimalmengenschmierung	88
6.2	Numerische Variation des Materialanteils	92
6.2.1	Dehnungsverhalten der polierten Blechoberfläche	92
6.2.2	Variation des Materialanteils analytischer Oberflächen.....	94
6.3	Fazit über den Einfluss mikroskopischer Rauheit	97
7	Einfluss der Aluminiumoxidschicht.....	99
7.1	Verfahren zur Manipulation der Oxidschicht	99
7.1.1	Auswahlkriterien zur Veränderung der Oxidschicht.....	100
7.1.2	Eloxalverfahren.....	102
7.1.3	Verdichtungsverfahren und Böhmitschichten	103
7.1.4	Schichtanalytik.....	106
7.2	Einfluss auf die tribologischen Eigenschaften	109
7.2.1	Kugel-Scheibe-Tribometer.....	110
7.2.2	Streifenziehversuche im Einzelhub	118
7.2.3	Dauerversuche	121
7.3	Fazit und Einordnung in die Verschleißtheorie.....	126
8	Einfluss des Blechwerkstoffs.....	129
8.1	Verschleißverhalten.....	129
8.1.1	Gesamtbetrachtung des Verschleißverhaltens.....	129
8.1.2	Beurteilung der vorliegenden Verschleißmechanismen	131
8.2	Einfluss auf Verschleißgrößen	135
8.2.1	Numerisches Einglättungs- und Dehnungsverhalten der Blechoberfläche	136
8.2.2	Verhalten der Oxidschicht	139
8.3	Einordnung in die Verschleißtheorie und Zusammenfassung.....	140
9	Modellbasierte Prozessauslegung.....	141
9.1	Auswahl geeigneter Systeme	141

9.2 Tiefziehversuche	144
10 Zusammenfassung und Ausblick	149
11 Abbildungsverzeichnis.....	152
12 Tabellenverzeichnis.....	158
13 Anhang	160
13.1 Fließkurven verwendeter Werkstoffe.....	160
13.2 Konvergenz- und Einflussanalyse der Oberflächensimulation.....	160
13.3 Fließspannungsbezogene Oberflächendeformation	164
14 Quellenverzeichnis	166
14.1 Betreute studentische Arbeiten des Autors.....	181
14.2 Veröffentlichungen unter Mitwirkung des Autors.....	182