

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

1. PtU (TU Darmstadt), 2. PhM (TU Darmstadt), 3. Fraunhofer IST, Braunschweig

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **357 ZN**

Maschinelle Oberflächeneinglättung für den effizienten Werkzeug- und Formenbau

(Bewilligungszeitraum: 01.06.2010 - 30.11.2012)

der AiF-Forschungsvereinigung

Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB)

M.Sc. Manuel Steitz
(PtU, TU Darmstadt)

Dipl.-Ing. Jan Scheil
(PhM, TU Darmstadt)

Dipl.-Ing. Kai Weigel
(Fraunhofer IST, Braunschweig)

Darmstadt, 25.01.2013

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	7
1. Zusammenfassung	9
2. Ausgangssituation und Anlass für das Forschungsprojekt	10
2.1. Ausgangssituation	10
2.2. Anknüpfungspunkte aus vorausgegangenen Forschungsprojekten	10
3. Zielsetzung	11
4. Stand der Technik	12
4.1. Werkstoffverhalten	12
4.1.1. Kinematische Verfestigung	12
4.1.2. Dehnratenabhängigkeit	13
4.2. Tribologie	13
4.2.1. Tribologisches System	13
4.2.2. Tribologie bei Ziehprozessen	13
4.2.3. Verschleißmechanismen	14
4.3. Maschinelle Oberflächeneinglätting	14
4.3.1. Wirkungsweise	15
4.3.2. Festwalzen	15
4.3.3. Festklopfen	16
4.4. Finite-Elemente-Methode	17
4.4.1. Grundlagen	17
4.4.2. Simulation von Festwalzprozessen	17
4.4.3. Simulation von Festklopfprozessen	18
4.5. Beschichtungen	18
5. Vorgehensweise	18
5.1. Arbeitspakete	19
5.2. Beschreibung der Werkzeuge	20
5.2.1. Festwalzwerkzeug	20
5.2.2. Festklopfwerkzeug	21
5.2.3. Bearbeitungszentrum	21
5.3. Messmethoden und Messmittel	22
5.3.1. Metallografische Werkstoffpräparation und -charakterisierung	22
5.3.2. 3D-Vermessung der Oberflächentopografie	22
5.3.3. Bestimmung der Rauigkeit mittels konfokalen Weißlichtmikroskopie	22
5.3.4. Bestimmung der Rauigkeit mittels taktiler Messung	23
5.3.5. Mechanische Charakterisierung der Werkstoffe	23
5.3.6. Untersuchung der Schichthaftung	24
5.3.7. Streifenziehversuch	24
5.3.8. Verschleißmessung	25
6. Analyse der Einglättingmechanismen durch Festwalzen und Festklopfen	27
6.1. Untersuchte Werkstoffe	27
6.1.1. Hochlegierter Werkzeugstahl 1.2379	27
6.1.2. Lamellarer Grauguss EN-GJL-250	29
6.1.3. Globularer Grauguss EN-GJS-HB265	29
6.1.4. GP4M	30
6.1.5. Blechwerkstoffe	30
6.2. Versuchspläne	32
6.2.1. Optimierung der Versuchspläne zur Analyse der Einglättingmechanismen	32
6.2.2. Resultierende Versuchspläne zur Analyse der Einglättingmechanismen	33

6.3.	Beschreibung der Probenkörper	38
6.3.1.	Geometrie	38
6.4.	Ergebnisdarstellung zur Analyse der Einglättungsmechanismen	39
6.4.1.	Ergebnisse: Einglättung durch Walzen	39
6.4.2.	Ergebnisse: Einglättung durch Klopfen	45
6.4.3.	Ergebnisse: Untersuchung des Anstellwinkels α	52
6.4.4.	Ergebnisse: Untersuchung des Bahnwinkels β	53
6.4.5.	Ergebnisse: Untersuchung des Bearbeitungsaufmaßes	54
6.4.6.	Ergebnisse: Härtesteigerung durch Festklopfen	56
6.4.7.	Diskussion: Härtesteigerung durch Festklopfen	59
6.4.8.	Ergebnisse: Härtesteigerung durch Festwalzen	60
6.4.9.	Diskussion: Härtesteigerung durch Festwalzen	62
6.5.	FE-Simulation	62
6.5.1.	Modellaufbau	62
6.5.2.	Validierung	64
6.5.3.	Spannungen bei der Bearbeitung besondere Bahnpunkte	64
6.5.4.	Materialflussanalyse	65
6.6.	Streifenziehversuche	70
6.6.1.	Auslegung des Versuchsplans	70
6.6.2.	Ergebnisdarstellung	72
6.7.	Schlussfolgerung Arbeitspaket 1	74
7.	Untersuchung der Schichthaftung auf mechanisch randschichtverfestigten Oberflächen	75
7.1.	Versuchsplan	75
7.2.	Ergebnisdarstellung	76
7.2.1.	Schichthaftungsprüfung mit dem Rockwell-Test	76
7.2.2.	Schichthaftungsprüfung mit dem Scratch-Test	82
7.2.3.	Fazit der Schichthaftungsbeurteilung	86
7.2.4.	Verfestigungswirkung der Verfahren Festwalzen und Festklopfen	88
7.3.	Streifenziehversuche	88
7.3.1.	Auslegung des Versuchsplans	89
7.3.2.	Ergebnisdarstellung	92
7.4.	Schlussfolgerungen Arbeitspaket 2	100
8.	Einwalzen/ Einklopfen dotierter Schmierstoffe	102
8.1.	Verwendete Schmierstoffe und Nanopartikel	102
8.2.	Durchführung Einwalzen und Einklopfen	102
8.3.	Ergebnisdarstellung	103
8.4.	Streifenziehversuche	106
8.4.1.	Auslegung des Versuchsplans	106
8.4.2.	Ergebnisdarstellung	107
8.5.	Schlussfolgerung Arbeitspaket 3	108
9.	Mechanische Oberflächenlegierung	109
9.1.	Durchführung mechanisches Legieren	109
9.2.	Ergebnisanalyse	109
9.3.	Streifenziehversuche	110
9.4.	Schlussfolgerung Arbeitspaket 4	111
10.	Absicherung der Prozesskette unter Produktionsbedingungen	111
10.1.	Durchführung	111
11.	Ableitung von Handlungsrichtlinien	112
11.1.	Optimierung der Oberflächentopologie	112
11.1.1.	Vorbehandlung des Grauguss	112

11.1.2.	Anstellwinkel α zur Flächennormalen beim Festklopfen	112
11.1.3.	Bearbeitungswinkel β zur Fräsrichtung	112
11.1.4.	Wahl der Verfahrensparameter	112
11.1.5.	Erforderliches Bearbeitungsaufmaß	113
11.1.6.	Anzahl der Überwalzungen/ Überklopfungen	113
11.2.	Aufhärtung des Oberflächenbereiches	113
11.3.	Einbringen von Schmierstoffdepots	113
11.4.	Mechanisches Legieren	114
12.	Nutzen der Ergebnisse für KMU	115
13.	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	116
13.1.	Durchgeführte Transfermaßnahmen	116
13.2.	Geplante Transfermaßnahmen	116
12.	Literaturverzeichnis	117

1. Zusammenfassung

Die hohen Qualitätsanforderungen an die Endprodukte in der Automobilindustrie bedingen hohe Qualitätsanforderungen an die Oberflächengüte von Umformwerkzeugen beim Tiefziehen. Gleichzeitig ist ein stetiger Anstieg des Kostendrucks in der durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägten Branche des Werkzeug- und Formenbaus zu beobachten. Um diesen Anforderungen erfolgreich zu begegnen, besteht ein Ansatz in der Optimierung der Prozesskette im Werkzeug- und Formenbau. Diese ist vor allem durch die abschließende manuelle Polierarbeit geprägt. Mittels Anwendung von Verfahren der maschinellen Oberflächeneinglätting besteht das Potenzial diesen Prozessschritt signifikant zu verkürzen. Die innovativen Fertigungstechnologien Festwalzen und Festklopfen bieten in diesem Zusammenhang die Vorteile einer erhöhten Produktivität bei gleichzeitiger Kostenersparnis.

Gegenstand des vorliegenden Forschungsvorhabens war daher die Untersuchung der Verkürzung der Prozesskette im Werkzeugbau durch Einsparung bzw. Verkürzung von einzelnen Prozessschritten. Neben der Oberflächeneinglätting zählte dazu auch die Nutzung der Randschichtverfestigung zur Steigerung der Belastbarkeit von Werkzeugbeschichtungen. Weiterhin wurde das Potenzial verschiedener Verfahrenserweiterungen analysiert. Gegenstand der Untersuchungen waren hier Abriebuntersuchungen von Blechen mit einer Magnesium-Zink-Schicht, das Einwalzen/Einklopfen dotierter Schmierstoffe und das mechanische Oberflächenlegieren.

In Arbeitspaket 1 konnte gezeigt werden, dass durch das Festklopfen und Festwalzen von Werkzeugoberflächen eine signifikante Einglätting der Frässtruktur möglich ist. Diese geht einher mit einer zusätzlichen Aufhärtung. Hierbei konnte der Einfluss industrierelevanter Prozessparameter hinsichtlich Einglätting und Aufhärtung für verschiedene Materialien geklärt werden. Die gewonnenen Daten bilden die Grundlage zur Ableitung von Handlungsrichtlinien für eine wirtschaftliche Anwendung beider Technologien im Werkzeug- und Formenbau. Das Verständnis der Einglättingmechanismen konnte schließlich mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen erweitert werden. Der Materialfluss beim Festwalzen und Festklopfen wurde durch eine dreidimensionale Simulation analysiert. Ebenso wurden Bahnstrategien für die Bearbeitung von exponierten Geometrieelementen abgeleitet. In experimentellen Untersuchungen unter tiefziehähnlichen Belastungen wurde das verbesserte tribologische Verhalten von maschinell eingelättingten Werkzeugen gegenüber konventionell behandelten Proben aufgezeigt.

Ziel der Haftfestigkeitsuntersuchungen in Arbeitspaket 2 war der Nachweis einer den polierten Oberflächen ebenbürtigen oder verbesserten Beschichtbarkeit. Weiterhin sollte die durch die maschinelle Einglätting erzielte Verfestigung hinsichtlich ihrer Eignung zur Stützung des Schichtsystems untersucht werden. Die mittels Festklopfen und Festwalzen jeweils in einer Variante „maximale Einglätting“ und maximale Aufhärtung“ vorbereiteten Proben wurden mit händisch polierten sowie gebrauchstüblich nitrierten und gehärteten Varianten gemeinsam mit drei verschiedenen, für die Umformtechnik entwickelten, Beschichtungen versehen. Die Untersuchungen zur Schichthaftung ergaben, dass die Oberflächen im maschinell eingelättingten Zustand, nahezu unabhängig von Methode und Variante, ebenso oder besser beschichtbar sind als die händisch polierten Oberflächen. Im Falle der Gusseisen GJL-250 und GJS-HB265 werden zum Teil verbesserte Haftungseigenschaften durch die maschinelle Einglätting erreicht. Eine den etablierten Verfahren Vergüten und Nitrieren gleichrangige Stützwirkung der Beschichtung, zur Vermeidung des Eierschaleneffektes, konnte nicht nachgewiesen werden. Es findet zwar eine Verfestigung statt, die jedoch schwächer ausgeprägt ist als die Härtung durch die oben genannten Verfahren. Beim Streifenziehen mit maschinell eingelättingten und beschichteten Proben konnte in keinem Fall ein Defekt der Beschichtung durch den Eierschaleneffekt erkannt werden. Die Proben wiesen das gleiche Verschleißverhalten auf, wie die konventionell nach dem Stand der Technik gefertigten Werkzeuge. Es kann somit erwartet werden, dass zu beschichtende Werkstoffe mit der Verkürzung der Prozesskette durch maschinelle Einglätting keine Qualitätseinbußen der Schichtfunktionen einhergehen. Weiterhin liegt die Vermutung nahe, dass die preisgünstigen Werkstoffe GJS-HB265 und GJL-250 durch die maschinelle Einglätting für eine Beschichtung besser qualifiziert werden, was deren Einsatzbereich erweitern kann.

In einer Erweiterung der Anwendungsfelder für die Verfahren Festwalzen und Festklopfen wurden im dritten Arbeitspaket Schmierstoffdepots in die Werkzeugoberflächen eingebracht. Zwar konnten die dafür genutzten Nanopartikel nicht in die randschichtnahe Grundmatrix der Werkstoffe eingebacht werden. Speziell beim globularen Grauguss verblieben die Nanopartikel jedoch auch nach Reinigung auf der Oberfläche und in den Sphärolyttaschen. Im darauf folgenden Streifenziehversuch zeigt sich das Potenzial, dass die Partikel eine reibungsmindernde Wirkung bei Tiefziehprozessen haben können.

Das Einbringen von Y_2O_3 Nanopartikeln in die Oberfläche von GP4M, welches Ziel von Arbeitspaket 4 war, konnte nicht erreicht werden. Allerdings konnte nachgewiesen werden, dass eine Schicht von abgeflachten Y_2O_3 -Partikeln haftend auf der Oberfläche verbleibt. Um die Auswirkung dieser Partikelschicht auf das Abrieb- und Verschleißverhalten zu klären, sind weitere Untersuchungen nötig.

Bei der Absicherung der Prozesskette unter Produktionsbedingungen im fünften Arbeitspaket wurde das Verfahren Festklopfen im industriellen Umfeld getestet. Die im ersten Arbeitspaket erarbeiteten Parameterkombinationen wurden unter wirtschaftlichen Aspekten optimiert und konnten bei der Daimler AG in die industrielle Praxis überführt werden. Das in Arbeitspaket 2 erfolgreich getestete tribologische System zur Aluminiumumformung wird in weitergehenden Untersuchungen durch die Seidel GmbH (KMU) eingehender analysiert.

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete 1 bis 5 wurden in Arbeitspaket 6 die Handlungsrichtlinien für die Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis ausgearbeitet. Die Handlungsrichtlinien lassen sich entsprechend der angestrebten Forschungsergebnisse in Optimierung der Oberflächentopologie, Aufhärtung des Oberflächenbereiches, Einbringen von Schmierstoffdepots und mechanisches Legieren aufteilen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.