

# Bibliographische Beschreibung

Sterzing, Andreas

## Thema

Bewertung von Leichtbaupotenzial und Einsatzfähigkeit wölbstrukturierter Feibleche  
Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz,  
Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse

- 202 Seiten
- 157 Abbildungen
- 18 Tabellen
- 130 Literaturzitate

## Referat

Die Hauptzielstellung der vorliegenden Arbeit bestand im Nachweis des Leichtbaupotenzials wölbstrukturierter Feibleche und in der Definition wissenschaftlich abgesicherter Grundlagen für deren umformtechnische Verarbeitung.

Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die Ermittlung und Darstellung der Auswirkungen des Strukturierungs- und des anschließenden Richtprozesses auf den Ausgangszustand des Blechwerkstoffes. In einem ersten Untersuchungsschwerpunkt erfolgte deshalb eine umfassende wissenschaftliche Charakterisierung der Halbzeugform „wölbstrukturiertes Feiblech“. Um die Allgemeingültigkeit der Untersuchungsergebnisse gewährleisten zu können, wurden verschiedene Werkstoffe, Strukturgrößen, -ausbildungen und -geometrien in die Untersuchungen einbezogen.

Basierend auf der Bestimmung von Blechdicken- und Härteverteilungen innerhalb der Wölbstrukturen konnten die Bereiche identifiziert werden, in denen es durch den Strukturierungsprozess zu einer signifikanten Beeinflussung, das heißt Plastifizierung, des Ausgangswerkstoffes kommt. Mit Hilfe von Zugversuchen wurden anschließend die mechanischen Eigenschaften der wölbstrukturierten Feibleche im Vergleich zu den unstrukturierten Ausgangsblechen ermittelt. Dadurch konnten weitere Aussagen hinsichtlich der Beeinflussung des Werkstoffes durch die Wölbstrukturierung abgeleitet sowie funktionale Zusammenhänge zwischen der Strukturausbildung und den mechanischen Eigenschaften hergestellt werden.

In einem anschließenden Untersuchungskomplex wurde das Verhalten wölbstrukturierter Feinbleche bei verschiedenen umformtechnischen Beanspruchungsarten untersucht. Im Rahmen von Tief- und Streckziehuntersuchungen erfolgte zum Beispiel die Bestimmung der erreichbaren Umformgrenzen. Als Vergleichsbasis dienten wiederum Versuche mit dem jeweiligen unstrukturierten Ausgangsblech. Dabei zeigte es sich, dass halbzeug-spezifische Besonderheiten berücksichtigt werden müssen, um die Umformung wölbstrukturierter Feinbleche zu ermöglichen. So konnte erst durch eine im Vergleich zur konventionellen Blechumformung deutliche Erhöhung des Niederhalterdruckes  $p_{NH}$  das Fließen des Werkstoffes in die Werkzeuggravur gewährleistet werden. Die Ursache dafür lag darin, dass nur bei einer kompletten Struktureinebnung in den Bereichen, in denen tangential Druckspannungen wirken, die Bildung von Falten 1. Ordnung vermieden werden kann. Andererseits war es erforderlich, den Ziehspalt des Werkzeuges unter Berücksichtigung der Ausgangsblechdicke  $s_0$  und der Strukturausbildung bzw. -höhe  $h_{Struktur}$  ausulegen, um das Einfließen des Werkstoffes entlang des gesamten Bauteilumfanges nicht zu behindern. Bei Beachtung dieser Besonderheiten konnten Umformergebnisse erzielt werden, die sich trotz der signifikanten Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften nur geringfügig von denen unterscheiden, die unter Anwendung der unstrukturierten Ausgangsbleche erreicht wurden. Als eine wesentliche Ursache hierfür konnte das Ausrecken der Wölbstruktur bzw. der Strukturstege ermittelt werden, wodurch der Umformung in den kritischen Bauteilbereichen zusätzlicher Werkstoff zur Verfügung gestellt wird. Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen ließ sich deshalb schlussfolgern, dass die Realisierung komplexer Bauteile aus wölbstrukturiertem Feinblech durch eine umformtechnische Verarbeitung möglich ist.

Anschließend erfolgte eine Bewertung möglicher Strategien, die zur Erhaltung der Wölbstrukturen in relevanten Bauteilbereichen beitragen können. Als entscheidende Einflussgrößen, die sich unmittelbar auf die Strukturausbildung im umgeformten Bauteil auswirken, konnten dabei die tribologischen Verhältnisse und die Auslegung des Umformwerkzeugs identifiziert werden.

Um Bauteile aus wölbstrukturiertem Feinblech herstellen zu können, ist es weiterhin erforderlich, die umformtechnischen Grenzen beim Biegen zu kennen. Deshalb erfolgte in Abhängigkeit der Strukturgeometrie, -ausbildung, -ausrichtung und -orientierung die Bestimmung der minimal realisierbaren Biegeradien. Im Hinblick auf die Anforderungen beim Fügen wurden weiterhin Möglichkeiten zur Struktureinebnung aufgezeigt. Im Ergebnis konnten Aussagen abgeleitet werden, wie Fügstellen bzw. -bereiche zu gestalten sind, um z. B. die Durchführbarkeit von Laserschweißoperationen zu gewährleisten.

Ein wesentlicher Anspruch wölbstrukturierter Feibleche besteht darin, die Bauteileigenschaften, das heißt insbesondere die Bauteilsteifigkeit, signifikant zu verbessern. Mit Hilfe von Biege- und Beuluntersuchungen konnten entsprechende Potenziale und Effekte in Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffes und der strukturspezifischen Einflussgrößen wie Strukturgeometrie, -ausbildung, -orientierung und -ausrichtung nachgewiesen werden. Im Ergebnis dieser Versuche wurden Einsatzfälle definiert, bei denen die Anwendung von wölbstrukturierten Feiblechen zu deutlichen Verbesserungen der Bauteilsteifigkeit führen kann, was eine Voraussetzung für die Reduzierung der Ausgangsblechdicke darstellt. Basierend auf grundlegenden Zusammenhängen und Gleichungen konnte weiterhin das Leichtbaupotenzial wölbstrukturierter Feibleche bewertet und abgeschätzt werden. Andererseits erfolgte die Ermittlung von Anwendungsgrenzen, wo der Einsatz dieser Halbzeuge nicht zu den gewünschten Effekten führt.

Basierend auf den erzielten Untersuchungsergebnissen konnten Richtlinien abgeleitet werden, wie Umformprozess, Bauteil und Werkzeug zu gestalten sind, um eine umformtechnische Verarbeitung zu ermöglichen und maximale Steifigkeitseffekte zu gewährleisten. Am Beispiel von Realbauteilgeometrien wurden die Anwendbarkeit und Allgemeingültigkeit dieser Aussagen überprüft, und es erfolgte, wenn es erforderlich war, eine Präzisierung dieser Hinweise. Im Ergebnis der Untersuchungen war es letztendlich möglich, die Bauteile herzustellen. Dabei ließ sich der Nachweis sowohl für eine prozesssichere umformtechnische Verarbeitung als auch für die positive Beeinflussung der Bauteilsteifigkeit durch die Wölbstrukturen erbringen.

## **Schlagworte**

Leichtbau, Stoffleichtbau, modifizierte Blechhalbzeuge, wölbstrukturierte Feibleche, Umformverhalten, Leichtbaupotenzial, Tief-/Streckziehen, Biegen, Prägen

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abbildungen .....</b>	<b>11</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Leichtbau, Stand der Erkenntnisse.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Motivation .....</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Arten des Leichtbaus.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Einsatzpotenziale ausgewählter Leichtbau-Blechwerkstoffe....</b>	<b>21</b>
2.3.1	Aluminium und seine Legierungen .....	21
2.3.2	Magnesium .....	23
2.3.3	Titan.....	25
2.3.4	Höher- und hochfeste Stahlwerkstoffe .....	26
2.3.5	„Blechähnliche“ Kunststoffe .....	27
2.3.6	Metall-Kunststoff-Verbunde.....	29
2.3.7	Bewertung der ausgewählten Leichtbau-Blechwerkstoffe .....	31
<b>3</b>	<b>Zielstellung .....</b>	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Leichtbau mit Hilfe modifizierter Halbzeuge .....</b>	<b>39</b>
<b>4.1</b>	<b>Analyse und Bewertung verfügbarer Lösungen .....</b>	<b>39</b>
4.1.1	Vorbemerkungen.....	39
4.1.2	Tailored Blanks .....	39
4.1.2.1	<i>Charakterisierung und Einsatzpotenziale .....</i>	<i>39</i>
4.1.2.2	<i>Hemmnisse und Herausforderungen .....</i>	<i>41</i>
4.1.3	Patchwork-Strukturen.....	43
4.1.3.1	<i>Charakterisierung und Einsatzpotenziale.....</i>	<i>43</i>
4.1.3.2	<i>Hemmnisse und Herausforderungen .....</i>	<i>45</i>
4.1.4	Tailor Rolled Blanks.....	45
4.1.4.1	<i>Charakterisierung und Einsatzpotenziale .....</i>	<i>45</i>
4.1.4.2	<i>Hemmnisse und Herausforderungen .....</i>	<i>46</i>

4.1.5	Konventionell strukturierte Feibleche.....	47
4.1.5.1	<i>Charakterisierung und Einsatzpotenziale</i> .....	47
4.1.5.2	<i>Hemmnisse und Herausforderungen</i> .....	51
4.1.6	Bewertung der betrachteten Halbzeuge .....	51
<b>4.2</b>	<b>Wölbstrukturierte Feibleche als neue Lösung .....</b>	<b>53</b>
4.2.1	Allgemeine Beschreibung.....	53
4.2.2	Prinzip der Wölbstrukturierung .....	54
4.2.2.1	<i>Elementarer Wölbstrukturierungsprozess</i> .....	54
4.2.2.2	<i>Wölbstrukturierung von Blechen</i> .....	55
4.2.3	Wölbstrukturierte Feibleche – bisherige Anwendungen und Untersuchungen .....	56
4.2.4	Präzisierung des weiteren Vorgehens .....	60
<b>5</b>	<b>Charakterisierung wölbstrukturierter Feibleche .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Geometrische Beschreibung der Wölbstrukturen .....</b>	<b>65</b>
<b>5.2</b>	<b>Ermittlung des Blechdickenverlaufes .....</b>	<b>69</b>
5.2.1	Messeinrichtung und Messstrategie .....	69
5.2.2	Messergebnisse .....	71
5.2.3	Bewertung der Messergebnisse.....	72
<b>5.3</b>	<b>Ermittlung des Härteverlaufes.....</b>	<b>74</b>
5.3.1	Messeinrichtung und Messstrategie .....	75
5.3.2	Messergebnisse .....	76
5.3.3	Bewertung der Messergebnisse.....	79
<b>5.4</b>	<b>Ermittlung der mechanischen Eigenschaften strukturierter Feibleche im Zugversuch.....</b>	<b>80</b>
5.4.1	Versuchsprinzip .....	80
5.4.2	Versuchseinrichtung .....	82
5.4.3	Versuche .....	83
5.4.3.1	<i>Zugversuche mit genormten Zugproben</i> .....	83
5.4.3.2	<i>Versuche mit modifizierter Probenbreite</i> .....	88
5.4.3.3	<i>Versuche mit Berücksichtigung der Strukturgeometrie</i> ..	91
5.4.4	Bewertung der Zugversuche .....	93
5.4.5	Zusammenhang von Strukturausbildung und Dehn- bzw. Streckgrenze .....	94

<b>6</b>	<b>Verhalten der Wölbstrukturen unter relevanten Umformbedingungen.....</b>	<b>97</b>
<b>6.1</b>	<b>Tief- und Streckziehen .....</b>	<b>97</b>
6.1.1	Auswirkungen des Wölbstrukturierungsprozesses auf die Umformgrenzen .....	97
6.1.1.1	<i>Ermittlung des Grenzziehverhältnisses <math>\beta_{0max}</math> .....</i>	<i>97</i>
6.1.1.2	<i>Modifizierter Beulversuch zur Bewertung des Streckziehverhaltens wölbstrukturierter Feinbleche.....</i>	<i>104</i>
6.1.1.3	<i>Tiefziehverhalten wölbstrukturierter Feinbleche bei der Herstellung von Rechteckteilen .....</i>	<i>109</i>
6.1.1.4	<i>Schlussfolgerungen .....</i>	<i>115</i>
6.1.2	Auswirkungen des Tief- bzw. Streckziehprozess auf die Strukturausbildung .....	117
6.1.3	Untersuchungen zur Vermeidung der Struktureinebnung im umgeformten Bauteil.....	119
6.1.3.1	<i>Flansch- und Zargenbereich .....</i>	<i>119</i>
6.1.3.2	<i>Bodenbereich .....</i>	<i>121</i>
<b>6.2</b>	<b>Biegen / Abkanten.....</b>	<b>123</b>
6.2.1	Orientierung der Biegeachse „längs zur Strukturierungsrichtung“ .....	123
6.2.2	Orientierung der Biegeachse „quer zur Strukturierungsrichtung“ .....	125
6.2.3	Schlussfolgerungen.....	130
<b>6.3</b>	<b>Prägen .....</b>	<b>131</b>
<b>7</b>	<b>Beeinflussung der Biege- und Beulsteifigkeit durch die Wölbstrukturen .....</b>	<b>135</b>
<b>7.1</b>	<b>Versuchsvorbereitung .....</b>	<b>135</b>
<b>7.2</b>	<b>Untersuchungen .....</b>	<b>136</b>
7.2.1	„Freies Biegen“ (3-Punkt-Biegeversuch) .....	136
7.2.2	Einseitig eingespannte Biegeproben .....	148
7.2.3	Zweiseitig fest eingespannte Biegeproben.....	154
7.2.4	„Freies Beulen“ .....	157
7.2.5	Vierseitig eingespannte Beulproben .....	159
7.2.6	Beeinflussung der Biege- und Beulsteifigkeit wölbstrukturierter Feinbleche durch Vordehnung .....	162
<b>7.3</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>167</b>

<b>8</b>	<b>Herstellung von Realbauteilen auf Basis der Untersuchungsergebnisse.....</b>	<b>169</b>
<b>8.1</b>	<b>Gestaltungshinweise für Bauteil, Werkzeug und Prozess .....</b>	<b>169</b>
<b>8.2</b>	<b>Umsetzung der Ergebnisse für die Realisierung einer Abdeckwanne .....</b>	<b>172</b>
8.2.1	Zielstellung .....	172
8.2.2	Bauteilrealisierung .....	173
8.2.3	Schlussfolgerungen.....	175
<b>8.3</b>	<b>Realisierung eines Bodenbleches (Variante I) .....</b>	<b>176</b>
8.3.1	Zielstellung .....	176
8.3.2	Bauteilrealisierung .....	176
8.3.3	Schlussfolgerungen.....	180
<b>8.4</b>	<b>Realisierung eines Bodenbleches (Variante II).....</b>	<b>181</b>
8.4.1	Zielstellung .....	181
8.4.2	Bauteilrealisierung .....	182
8.4.3	Schlussfolgerungen.....	184
<b>8.5</b>	<b>Bewertung der Anwendbarkeit und Eignung der Hinweise .....</b>	<b>185</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>187</b>
<b>10</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>191</b>