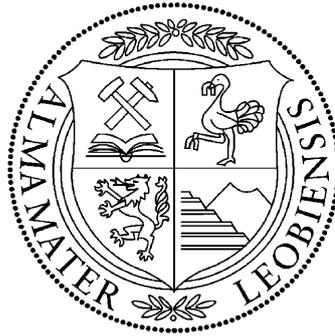


# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering

Montanuniversität Leoben - Österreich



## DISSERTATION

### AUSGEWÄHLTE FERTIGUNGSTECHNISCHE METHODEN ZUR VERBESSERUNG DES STABILITÄTSVERHALTENS VON RECHTECKPLATTEN

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER MONTANISTISCHEN WISSENSCHAFTEN

**Dipl.-Ing. Gerald Figala**

Mai 2012

### **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 11.5.2012

Dipl.-Ing. Gerald Figala

# Danksagung

An dieser Stelle darf ich mich für die Ermöglichung dieser Arbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben, für die wohlwollende Förderung und für die wissenschaftliche Unterstützung bei meinem Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr sehr herzlich bedanken.

Weiters möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz Kessler vom Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre der Montanuniversität Leoben für die Begutachtung dieser Dissertation meinen Dank aussprechen.

In meine Danksagung beziehe ich ganz besonders das Materials Center Leoben (MCL) und die Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Ermöglichung der wissenschaftlichen und finanziellen Rahmenbedingungen ein.

Mein besonderer Dank gilt den Projektpartnern der Technischen Universität Wien, Herrn O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Franz Rammerstorfer und Herrn DI Dr. Christian Bilik, mit denen ein gelungener Projektabschluss möglich war.

Weiters gilt mein Dank Herrn DI (BA) Rainer Hank der Firma Trumpf sowie Herrn Ing. Erich Bernsteiner und Herrn DI Andreas Buchner der Firma Senoplast, die mich in Form von Probenmaterial und bei der Probenherstellung kostenlos unterstützten.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Umformtechnik danke ich für die herzliche Einbindung und für die äußerst gute Zusammenarbeit.

Im Speziellen gilt mein Dank Herrn Lukas Wunsch, meinem studentischen Mitarbeiter, der das Projekt von Anfang an mit viel persönlichem Einsatz und Begeisterung begleitete.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, Ing. Christine und DI DDr. Gerd Figala, die mich auf meinem beschrifteten Lebensweg stets unterstützten.

Für die schönen Zeiten in der Montanstadt Leoben sowie für die Unterstützung auch in schwierigen Lebenslagen möchte ich mich bei meiner zukünftigen Frau, DI Susanne Priesch, meinen Freunden und meinen Kommilitonen bedanken.

# Offizielle Danksagung

Der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) sowie dem Land Steiermark, vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH, wird für die finanzielle Unterstützung der Forschungsarbeiten im Rahmen des von der Materials Center Leoben Forschung GmbH abgewickelten K2 Zentrums für „Materials, Processing und Product Engineering“ im Rahmen des Österreichischen COMET Kompetenzzentren Programms sehr herzlich gedankt.

Financial support by the Austrian Federal Government (in particular from the Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie and the Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend) and the Styrian Provincial Government, represented by Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH and by Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH, within the research activities of the K2 Competence Centre on “Integrated Research in Materials, Processing and Product Engineering”, operated by the Materials Center Leoben Forschung GmbH in the framework of the Austrian COMET Competence Centre Programme, is gratefully acknowledged.

# Kurzfassung

Aus dem COMET K2 Forschungsprojekt A3.9 „Fertigungstechnischer Leichtbau - Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures“ wurden die Ergebnisse der Stabilitätssteigerung von dünnen Rechteckplatten durch fertigungstechnische Methoden für die vorliegende Dissertation herangezogen.

Das Grundlagenforschungsprojekt „Fertigungstechnischer Leichtbau“ wurde in den Jahren 2008 bis 2011 vom Lehrstuhl für Umformtechnik (LUT) der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit dem Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien (ILSB) und dem Materials Center Leoben (MCL) verfolgt.

Das mehrjährige Forschungsprojekt gliederte sich in mehrere Arbeitspakete, die eine Optimierung von Bauteilen in Hinblick auf ihr Stabilitätsverhalten und die Verbesserung ihrer Material- und/oder ihrer Bauteileigenschaften zum Ziel hatten.

Bei der vorliegenden Dissertation wurden drei verschiedene Methoden zur Verbesserung des Stabilitätsverhaltens von dünnen Rechteckplatten für eine nähere Untersuchung ausgewählt.

Bei der Wahl der Methodik zur Verbesserung der Platteneigenschaften lag spezielles Augenmerk auf der Umsetzung der Ziele durch den fertigungstechnischen Leichtbau. Dabei galt es, die Verbesserung des Stabilitäts- und Schwingungsverhaltens der Plattenstrukturen ohne Gewichtserhöhung des Bauteils zu bewerkstelligen.

Zu den Konzepten der lokalen Verstärkung von Platten wurden zum einen die Einbringung von Eigenspannungen in das Material und zum anderen die gezielte Veränderung des Trägheitsmomentes herangezogen.

Dabei galt es, die theoretischen Ansätze durch das Herbeiführen von Eigenspannungen mittels thermomechanischer Plastifizierungsvorgänge im Material, durch das mechanische Wölbstrukturieren der Platten in Form von Hohlprägungen und durch das Verlegen von Sicken in berechneten Verläufen umzusetzen.

Es erfolgte eine getrennte Untersuchung der beiden Konzepte, deren fertigungstechnisch umgesetzten Herstellungsmethoden sowie einer Analyse der Zusammenhänge und Auswirkungen auf die Beulsteifigkeit sowie der ersten Eigenfrequenz der Rechteckplatten.

# Abstract

This doctoral thesis deals with the increase of the stability behaviour of thin rectangular plates by application of manufacturing methods.

It has been written within the COMET K2 research project A3.9 „Fertigungstechnischer Leichtbau - Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures“.

The basis research project „Fertigungstechnischer Leichtbau - Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures“ has been carried out from 2008 till 2011. The project partners have been the chair of metal forming of the Montanuniversität Leoben (LUT), the Institute of Lightweight Design and Structural Biomechanics of the Vienna University of Technology (ILSB) and the Materials Center Leoben (MCL).

The project has been splitted in several work packages which were focused on the optimization of the stability behaviour of thin plates and the improvement of material and/or component properties.

Three different possibilities of increasing the stability behaviour of thin rectangular plates have been subjected to an intensive investigation. Hereby a special emphasis has been put on the applicability of the results with respect to the production orientated lightweight construction. Furthermore, the improvement of the stability and dynamic behaviour of the plate structures without weight increase had to be managed.

On the one hand the implementation of residual stresses and on the other hand the systematic modification of the moment of inertia has been used to strengthen the plates locally.

It was a special task to fulfil the theoretical approaches by inducing residual stresses through thermo mechanical plasticising of the material, by mechanical up arching of the plates making embossing patterns and by applying preconceived beads, respectively.

Both, the implementation of residual stresses and the modification of the moment of inertia, as well as their manufacturing methods have been investigated separately. Interdependencies and effects on the buckling strength as well as the fundamental frequencies of the rectangular plates have been analysed.

# Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung . . . . .	I
Persönliche Danksagung . . . . .	II
Offizielle Danksagung . . . . .	III
Kurzfassung . . . . .	IV
Abstract . . . . .	V
Inhaltsverzeichnis . . . . .	VI
Abkürzungs- und Formelverzeichnis . . . . .	IX
<b>1 Einleitung und Zielsetzung . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen des Leichtbaus . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Definition und Ziele des Leichtbaus . . . . .	3
2.2 Unterteilung der Leichtbaustrategien . . . . .	4
2.3 Konstruktionsprinzipien des Leichtbaus . . . . .	9
2.4 Leichtbauweisen . . . . .	13
2.5 Kriterien bei der Werkstoffwahl für Leichtbauanwendungen . . . . .	18
2.5.1 Werkstoffe im Vergleich . . . . .	18
2.5.2 Werkstoffkennzahlen . . . . .	19
2.5.3 Kostenentwicklung bei Leichtbauanwendungen . . . . .	22
<b>3 Grundlagen zum Stabilitätsverhalten von Platten . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1 Stabilitätsverhalten von isotropen Rechteckplatten . . . . .	25
3.2 Schwingungsverhalten von isotropen Rechteckplatten . . . . .	32
3.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften von Rechteckplatten . . . . .	35

<b>4</b>	<b>Fertigungstechnische Methoden zur Verbesserung des Stabilitätsverhaltens von Rechteckplatten . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1	Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung . .	38
4.1.1	Motivation zur Eigenspannungseinbringung in Platten . . . . .	38
4.1.2	Simulationsmodell einer punktförmigen Lasereinwirkung . . . . .	38
4.1.3	Einbringung der Eigenspannungen durch Laserbestrahlung . . . . .	41
4.1.4	Eingebrachte Lasermuster und angewandte Lasersequenzen . . . . .	44
4.1.5	Untersuchungen zur Beulstabilität von laserbehandelten Platten . .	49
4.1.6	Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von laserbehandelten Platten . . . . .	53
4.2	Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen	56
4.2.1	Motivation zur Anwendung von Hohlprägestrukturen . . . . .	56
4.2.2	Simulationsmodell der Einbringung von Hohlprägestrukturen . . . .	58
4.2.3	Herstellungsprozess der Hohlprägungen . . . . .	59
4.2.4	Eingebrachte Hohlprägemuster . . . . .	60
4.2.5	Untersuchungen zur Beulstabilität von wölbstrukturierten Platten .	63
4.2.6	Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von wölbstrukturierten Platten . . . . .	63
4.3	Sickeneinbringung in Platten . . . . .	63
4.3.1	Motivation zur Anwendung von Sicken . . . . .	63
4.3.2	Simulationsmodell des Herstellungsprozesses einer Halbrundsicke . .	67
4.3.3	Herstellungsprozess der Halbrundsicken . . . . .	67
4.3.4	Eingebrachte Sickengeometrien . . . . .	69
4.3.5	Untersuchungen zur Beulstabilität von versickten Platten . . . . .	75
4.3.6	Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von versickten Platten .	75
<b>5</b>	<b>Ergebnisse des Simulations- und Experimentalteils . . . . .</b>	<b>76</b>
5.1	Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung . .	76
5.1.1	Simulationsmodell einer punktförmigen Lasereinwirkung . . . . .	76
5.1.2	Lasermuster und Lasersequenzen . . . . .	87
5.1.3	Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von laserbehandelten Platten . . . . .	91
5.2	Wölbstrukturierungen durch Hohlprägungen . . . . .	95
5.2.1	Simulationsmodell der Einbringung von Hohlprägestrukturen . . . .	95

5.2.2	Herstellungsprozess der Hohlprägungen . . . . .	96
5.2.3	Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von wölbstrukturierten Blechen . . . . .	97
5.3	Sickeneinbringung in Platten . . . . .	102
5.3.1	Simulationsmodell des Herstellungsprozesses einer Halbrundsicke . .	102
5.3.2	Herstellungsprozess der Halbrundsicken . . . . .	105
5.3.3	Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von versickten Rechteckplatten . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Diskussion der erzielten Ergebnisse . . . . .</b>	<b>113</b>
6.1	Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung . .	113
6.2	Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen	117
6.3	Sickeneinbringung in Platten . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>123</b>
7.1	Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung . .	123
7.2	Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen	124
7.3	Sickeneinbringung in Platten . . . . .	125
7.4	Fazit der Untersuchungen der Beulstabilität und der 1. Eigenfrequenz von Rechteckplatten . . . . .	126
	<b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>	<b>128</b>
	<b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>	<b>133</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>134</b>
<b>A</b>	<b>Publizierte Veröffentlichungen . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>B</b>	<b>Quellcode für die experimentelle Ermittlung von Eigenfrequenzen . . .</b>	<b>147</b>

# Abkürzungs- und Formelverzeichnis

**Tabelle 1:** Tabelle der verwendeten Abkürzungen.

Abkürzung	Bedeutung
AFK	aramidfaserverstärkter Kunststoff
Al.-Leg.	Aluminiumlegierungen
BRD	Bundesrepublik Deutschland
BSI	Beulstabilitätsindex
bzw.	beziehungsweise
CAD	computer-aided design (rechnerunterstützte Konstruktion)
CFK	carbon-fiber-reinforced plastic (kohlefaserverstärkter Kunststoff)
CNC	Computerized Numerical Control (computergestützte numerische Steuerung)
d.h.	das heißt
DMS	Dehnmessstreifen
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
FFG	Forschungsförderungsgesellschaft
FFT	Fast Fourier Transformation
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	glass-fibre reinforced aluminium (glasfaserverstärktes Aluminium)
ILSB	Institut für Leichtbau und Biostrukturmechanik
LBK	Leichtbaukennzahl
LKW	Lastkraftwagen
LUT	Lehrstuhl für Umformtechnik
MCL	Materials Center Leoben
Mg.-Leg.	Magnesiumlegierungen
Mio.	Millionen
MUL	Montanuniversität Leoben
Nd-YAG Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
RT	Raumtemperatur
Ti.-Leg.	Titanlegierungen
TU	Technische Universität
u.ä.	und ähnliches
WEZ	Wärmeeinflusszone
z.B.	zum Beispiel
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional

**Tabelle 2:** Tabelle der verwendeten lateinischen Formelzeichen.

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$a$	Seitenlänge	m
$B$	Biegesteifigkeit von isotropen Hautfeldern	$\text{N} \cdot \text{mm}$
$b$	Seitenlänge	m
$c_p$	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$
$d$	Abstand der Atomgitterebenen	m
$E$	Elastizitätsmodul	$\text{N}/\text{mm}^2$ bzw. MPa
$F$	Kraft	N
$F_E$	Gewichtskraft der Eigenlast	N
$F_G$	Gewichtskraft der maximal zulässigen Gesamtlast	N
$f_{rmn}$	Eigenfrequenz der Platte	Hz
$g$	Erdbeschleunigung	$\text{m}/\text{s}^2$
$h$	Krümmungshöhe einer Schale	m
$K_{Ic}$	Bruchzähigkeit	$\text{MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$
$k$	Beulfaktor	1
$k_{fmn}$	Frequenzfaktor	1
$L_T$	Leichtbaugüte bezogen auf Torsionssteifigkeit	$\frac{\text{kg}}{\text{Nm}/^\circ \cdot \text{m}^2}$
$m$	Halbwellenzahl entlang der Seitenlänge a	1
$n$	Halbwellenzahl entlang der Seitenlänge b	1
$p$	Druck	$\text{N}/\text{mm}^2$ bzw. MPa
$R_e$	Streckgrenze	$\text{N}/\text{mm}^2$ bzw. MPa
$R_m$	Zugfestigkeit	$\text{N}/\text{mm}^2$ bzw. MPa
$R_{p0,2}$	0,2 % Dehngrenze	$\text{N}/\text{mm}^2$ bzw. MPa
$t$	Plattendicke	m
$T$	Temperatur	$^\circ\text{C}$
$t$	Zeit	s
$w$	Weg	mm
$\bar{x}_{\text{arithm}}$	arithmetisches Mittel	

**Tabelle 3:** Tabelle der verwendeten griechischen Formelzeichen.

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Temperaturausdehnungskoeffizient	1/°K bzw. 1/°C
$\alpha$	Winkel	°
$\varepsilon$	Dehnung	1
$\varepsilon_{v, plast}$	plastische Vergleichsdehnung	1
$\theta$	Winkel	°
$\kappa$	Beiwert	1
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)
$\lambda$	Wellenlänge	m
$\mu$	Reibkoeffizient	1
$\nu$	Querkontraktionszahl bzw. Poissonzahl	1
$\rho$	Dichte	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Spannung	N/mm <sup>2</sup> bzw. MPa
$\sigma_1$	1. Hauptnormalspannung	N/mm <sup>2</sup> bzw. MPa
$\sigma_2$	2. Hauptnormalspannung	N/mm <sup>2</sup> bzw. MPa
$\sigma_{xx}$	Spannung in x-Richtung	N/mm <sup>2</sup> bzw. MPa
$\sigma_{yy}$	Spannung in y-Richtung	N/mm <sup>2</sup> bzw. MPa
$\varphi$	Umformgrad	1
$\dot{\varphi}$	Formänderungsgeschwindigkeit	s <sup>-1</sup>
$\varphi$	Vergleichsumformgrad	1
$\omega$	Kreisfrequenz	Hz
$\psi$	Winkel	°
$\omega_{fmn}$	Kreisfrequenz der Schwingung	Hz

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Lehrstuhl für Umformtechnik (LUT) der Montanuniversität Leoben entwickelte gemeinsam mit seinen Kooperationspartnern, dem Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik (ILSB) der Technischen Universität Wien und dem Materials Center Leoben (MCL) im Zuge des COMET K2 Grundlagenforschungsprojektes A3.9 „Fertigungstechnischer Leichtbau - Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures“ neue Leichtbaukonzepte.

Bei diesem mehrjährigen Grundlagenforschungsprojekt lag der Fokus auf fertigungstechnischen Methoden, die die statischen und/oder dynamischen Eigenschaften eines Bauteils oder dessen Materialcharakteristika im Herstellungsprozess verbessern, ohne dabei die Gesamtmasse zu erhöhen [1].

Dabei lag der simulationstechnische Teil, d.h. die numerische Abbildung des Fertigungsprozesses und der Stabilitätsanalysen bei der TU Wien. In Leoben wurden die so erzielten Ergebnisse im Labor experimentell analysiert und verifiziert sowie neue Strategien entwickelt, um die Effizienz der Optimierungsmaßnahmen weiter zu steigern.

Die vorliegende Dissertation spiegelt einen Teil des Forschungsprojektes „Fertigungstechnischer Leichtbau - Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures“ wider. Bei der Dissertationsschrift wird im Speziellen auf fertigungstechnische Methoden eingegangen, die zur Verbesserung des Stabilitätsverhaltens von dünnen Plattenbauteilen führen, ohne deren Bauteilgewicht zu erhöhen.

Die Umsetzung der Aufgabenstellung, die Steigerung des Beulwiderstands und der Grundfrequenz erfolgte über die Einbringung von lokalen Verstärkungen wie die gezielte Veränderung von Spannungszuständen in den untersuchten Plattenbauteilen und/oder über die stellenweise Beeinflussung des Trägheitsmomentes.

Die erste fertigungstechnische Methode zielt auf die Veränderungen der Spannungen im Material ab. Dabei erfolgt eine Einbringung von Eigenspannungen durch eine lokale thermomechanische Plastifizierung, die durch Laserstrahlung hervorgerufen wird.

Durch die mechanische Einbringung von kreisrunden Hohlprägungen in definierten regelmäßigen Mustern ist eine Kombination von Eigenspannungseinbringung und Veränderung des Trägheitsmomentes möglich. Zum einen können beim Hohlprägeprozess gezielt Eigenspannungen eingebracht werden und zum anderen erfolgt ähnlich wie bei Sicken eine Steigerung des Flächenmomentes 2. Grades.

Unter Berücksichtigung der Systembedingungen, im Speziellen der Einspannungsbedin-

gungen und der Belastungen bei der experimentellen Untersuchung, erfolgte von den Projektpartnern der TU Wien die Berechnung optimierter Sickenverläufe, durch die das Trägheitsmoment gezielt verändert werden kann. Dieser dritte theoretische Ansatz wurde experimentell verifiziert und die berechneten Modelle auf ihre Wirkungsweise hin untersucht.

Die Herangehensweise bei der Untersuchung der drei Methoden beinhaltet anfänglich die simulationstechnische Abhandlung der Vorgänge im Material während des Fertigungsprozesses und die Veranschaulichung der bleibenden Effekte im Plattenbauteil.

Die Umsetzung und die Verifikation der gewonnenen Simulationsergebnisse erfolgten unter spezieller Berücksichtigung der praktischen Fertigbarkeit im Labormaßstab.

Die Charakterisierung der statischen und dynamischen Eigenschaften der originalen und der technisch veränderten Platten wurde über einen eigens dafür konstruierten Beulprüfstand und andere dafür abgestimmte Messaufbauten durchgeführt.

Über einen begleitenden iterativen Prozess wurde eine schrittweise Verbesserung der Platteneigenschaften durch eine stetige Überarbeitung der Anwendungsmuster und Mechanismen ermöglicht.

Anwendungsgebiete von Plattenstrukturen mit erhöhtem Beulwiderstand und verbesserten Schwingungseigenschaften finden sich im Bereich von Fahrzeug- und Flugzeugbau sowie im Fassaden- und Gebäudebau. Speziell bei diesen Anwendungen kommen beplankte Rahmen- und Skelettbauweisen zum Einsatz, bei denen durch den hohen Leichtbaugrad der Gesamtstruktur und die teils großflächigen, versteifend wirkenden Außenhautstrukturen die dynamischen und statischen Eigenschaften der Struktur eine große Rolle spielen. Bei diesen Konstruktionen ist weniger die Auslegung auf Festigkeit entscheidend als die auf Stabilität und Steifigkeit.

Herkömmliche dem Stand der Technik entsprechende Versteifungsmaßnahmen von Platten wie Finnen oder Stringer bewirken einen beachtlichen Anstieg des Trägheitsmoments. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der kritischen Beullast der Plattenstruktur. Nachteilig wirkt sich jedoch der hohe Anstieg des Gesamtgewichts der Konstruktion aus [2–4]. Gerade in diesem Bereich der Technik finden die in der Dissertation untersuchten Methoden der Stabilitätssteigerung ihr industrielles Umsetzungspotential, ohne dabei das Gesamtgewicht der Konstruktion zu beeinflussen.

## 2 Grundlagen des Leichtbaus

### 2.1 Definition und Ziele des Leichtbaus

Leichtbau ist gesamtheitlich gesehen eine Bauweise, welche das Ziel verfolgt, bei der Gestaltung von einzelnen Bauteilen, Baugruppen und des Endproduktes, das Gewicht bzw. die Masse des Produktes zu reduzieren, ohne dabei die Qualität, die Sicherheit oder spezifische Bauteileigenschaften während der gesamten Lebensdauer zu beeinträchtigen [5, 6].

*Demnach ist das Gewichtsminimum des Ganzen nur dadurch zu erreichen, dass jedes Einzelteil nur ein Minimum erfordert oder zum Minimum einer größeren Einheit optimal beiträgt. Es darf also nirgends, auch nicht im Kleinsten, etwas an Gewicht „verschenkt“ werden [7].*

Leichtbaustrategien lassen sich in Anwendungen für statische und dynamische Systeme unterteilen.

Der statische Leichtbau bezieht sich auf Anwendungsfälle ohne bewegte Massen, wie z.B. in der Architektur und der Bauwirtschaft. Dabei kann durch die Umsetzung von Leichtbaustrategien nicht nur beim Gewicht der Gesamtkonstruktion eingespart werden, sondern es bietet sich auch bei den Materialkosten großes Einsparungspotential an [8, 9]. Der effiziente Umgang mit Konstruktionsmaterialien führt dabei zu kreativeren Möglichkeiten in der Bauteilgestaltung und zu erheblichen Einsparungen an Materialkosten.

Beim Leichtbauanwendungen innerhalb dynamischer Systeme stehen Beschleunigungen, Steigerung der Nutzlast und die Reduzierung der aufzuwendenden Energie für die Bewegung im Vordergrund. Besonders am Sektor der Güter- und Personenbeförderung, wie bei Nutz-, Luft- oder Schienenfahrzeugen, stehen diese Optimierungsziele im Fokus.

Neben diesen seit jeher verfolgten Zielen zwingt der Gesetzgeber sowohl Hersteller als auch Endverbraucher durch CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> äquivalente Abgaben und Besteuerungsmodelle zu einem wirtschaftlich orientierten Umdenken beim Energie- und Ressourcenverbrauch. Gerade in der Automobilbranche und in der Flugzeugindustrie bedarf es moderner Lösungen, um Endprodukte leichter zu machen und dem entsprechenden Kundensegment Transport- und Fortbewegungsmittel mit einem geringen bzw. wirtschaftlichen Betriebsmittelverbrauch zu bieten.

Der zukunftsweisende Trend geht in Richtung eines nachhaltigen Ressourcenmanagements, das Rohstoffgewinnung und -veredelung, Produktfertigung, Einsatz- und Betriebs-

dauer sowie Rezyklierung beinhaltet und in jedem Einzelschritt eine Umsetzung von ökologischen und ökonomischen Zielvorgaben verlangt. Dadurch muss es zu einer Steigerung der Materialeffizienz und zu einem produktspezifisch angepassten Werkstoffeinsatz in einer durchgehenden, interdisziplinären und industrieübergreifenden Wertschöpfungskette kommen [10].

## 2.2 Unterteilung der Leichtbaustrategien

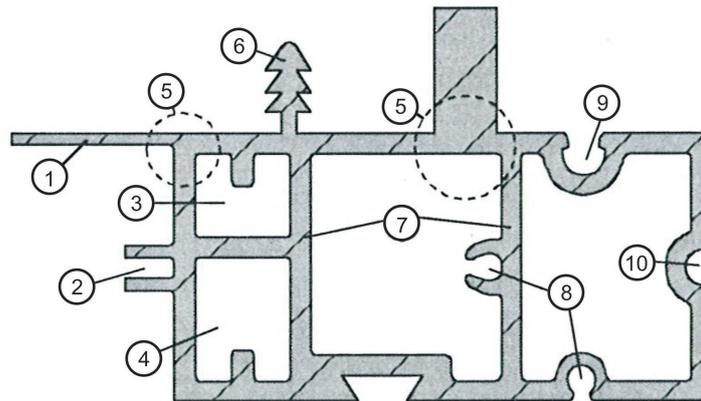
Um die Ziele des Leichtbaus an einem Produkt umzusetzen, bieten sich vier verschiedene Strategien an, die von der Konzeptphase bis hin zur Produktfertigung reichen.

In der gängigen Literatur wird dabei zwischen den folgenden vier Leichtbaustrategien unterschieden [5]:

- Konzeptleichtbau

Der konzeptionelle Leichtbau beinhaltet ein maßgeschneidertes Grund- und Gesamtkonzept des Endproduktes. Die Konzeption erfolgt über die Einbindung der Kundenanforderungen wie z.B. über die Auswertung von Target Costing und House of Quality Untersuchungen [11]. Zusätzlich zur Reduktion von Funktionen erfolgt die multifunktionale Anwendung von Einzelbauteilen.

Beispiele hierfür wären der Verzicht auf ein Reserverad im Personenkraftwagen oder die Zusammenlegung von verschiedensten Funktionen, wie Abbildung 2.1 am Beispiel eines Aluminiumprofils zeigt [4].



**Abbildung 2.1:** Beispiel Konzeptleichtbau - multifunktionelles Aluminium Strangpressprofil: Der konzeptionelle Leichtbau sieht ein maßgeschneidertes Grund- und Gesamtkonzept vor, in dem Funktionen reduziert oder zusammengelegt werden, wie an einem multifunktionalen Aluminiumstrangpressprofil erläutert. (1) Trägerflansch; (2) Gewindekanal für metrische oder zöllige Gewinde; (3) Kabelkanal; (4) Montagekanal für Eck- oder Längsverbindungen; (5) Wandstärkenreduktion; (6) Befestigungsleiste für Gummidichtungen; (7) Versteifungselemente; (8) Schrauben- oder Gewindestiftarretierung; (9) Kederhalterung; (10) Führungsschiene [4, 12].

Wie aus dem Vergleich zwischen den Ansätzen des konzeptionellen Leichtbaus von heute und jenen aus den 1950er und 1960er Jahren (siehe Abbildung 2.2) hervorgeht, unterliegt der konzeptionelle Leichtbau einem permanenten Veränderungsprozess und muss auf die Bedürfnisse und Wünsche der Endverbraucher abgestimmt werden.



(a)



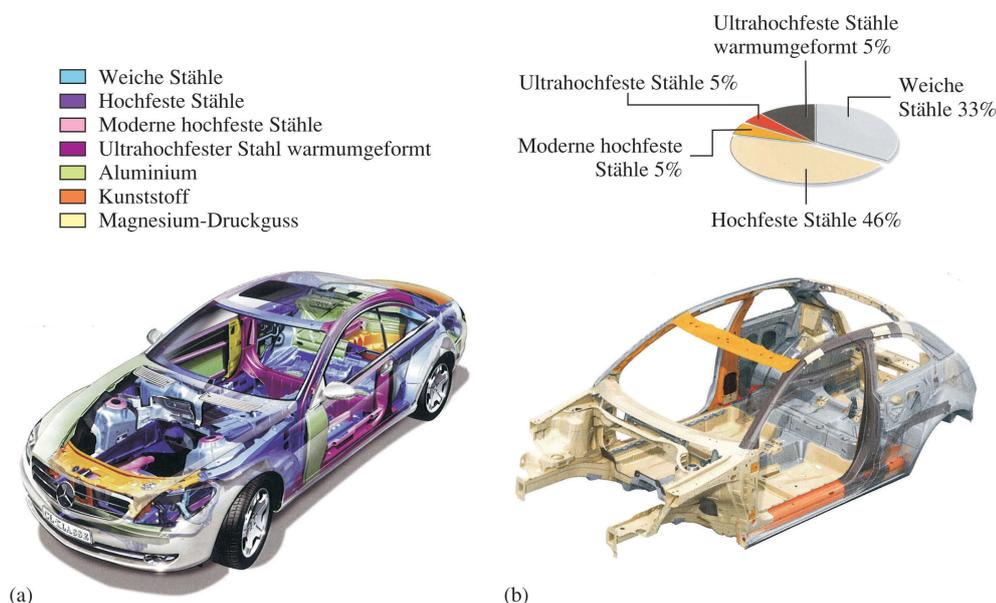
(b)

**Abbildung 2.2:** Beispiele Konzeptleichtbau: Im Vergleich zu den 1950er / 1960er Jahren und heute unterliegt der konzeptionelle Leichtbau einem permanenten Veränderungsprozess, der auf die jeweiligen Bedürfnisse der Zeit angepasst ist. Dargestellt ist (a) [13] das Kleinstfahrzeug P50 von Peel Engineering Company aus Großbritannien und (b) das Kleinfahrzeug Isetta von BMW. Der Peel P50 wird seit 2011 wieder als Elektro- oder Vierzylinder Viertaktmotor angeboten [14].

- Stofflicher Leichtbau

Der Einsatz von maßgeschneiderten Werkstofflösungen, die dem jeweiligen Anforderungsprofil gerecht werden, wird unter stofflichem Leichtbau verstanden. Neben hochlegierten Stählen und Nichteisenlegierungen gewinnen die Verbund- und Hybridwerkstoffe immer mehr an Bedeutung.

Aktuelle Beispiele finden sich dabei häufig in der Automobilindustrie, wie Abbildung 2.3 am Beispiel der Rohkarosserie eines Mercedes-Benz S-Klasse und eines Audi A1 darstellt.



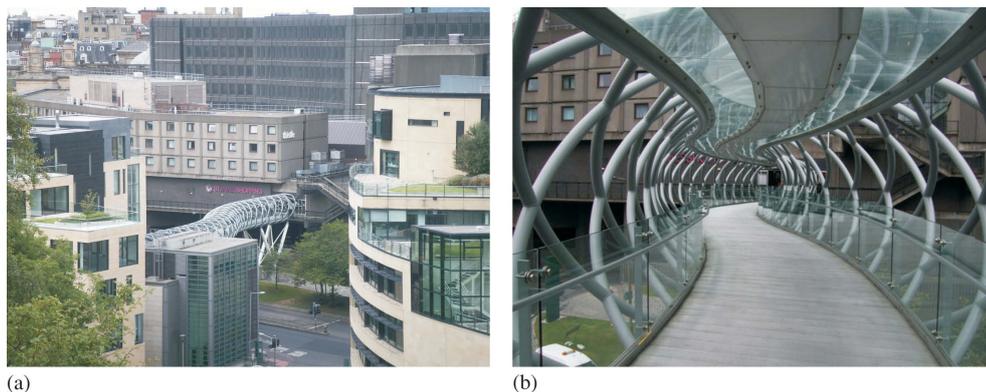
**Abbildung 2.3:** Beispiele stofflicher Leichtbau: (a) [15] Explosionszeichnung eines S-Klasse Mercedes-Benz mit farblicher Darstellung der verwendeten Werkstoffe und (b) [16] Rohkarosserie eines Audi A1 mit farblich abgegrenzter und prozentuell aufgeschlüsselter Zusammensetzung der verbauten Stahlsorten.

- Konstruktiver Leichtbau

Der konstruktive Leichtbau hat eine materialsparende und kraftflussgerechte Konstruktion zum Ziel, welche Spannungskonzentrationen und Überdimensionierungen vermeidet.

Dabei gehen die theoretischen Grundsätze der computerunterstützten Gestalt- und Topologieoptimierung beim konstruktiven Leichtbau auf C. Maxwell und A. Michell zurück, die die Ansätze über optimale Kräftepfade für einen minimalen Volumenaufwand formulierten [2].

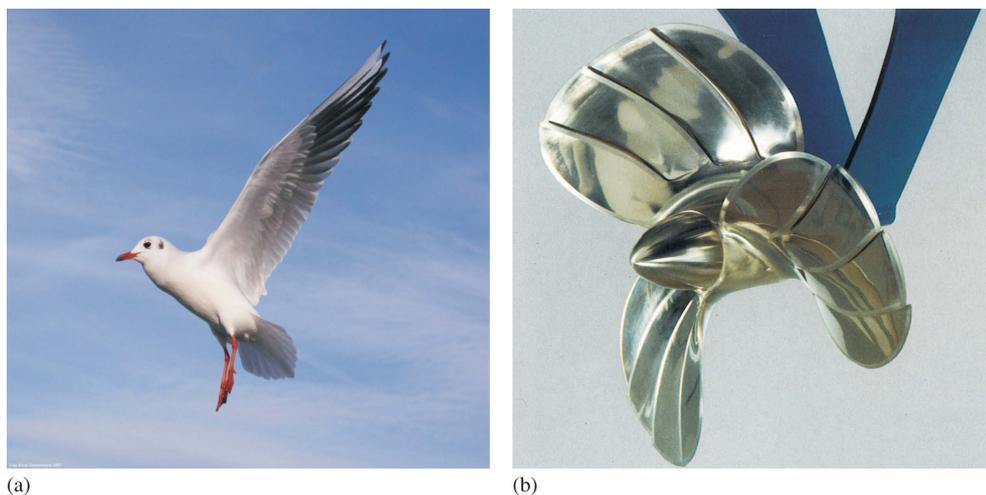
Speziell dazu finden sich aktuelle Anwendungen im Fahrzeug- und Flugzeugbau sowie in der Bautechnik, wie in Abbildung 2.4 dargestellt.



**Abbildung 2.4:** Beispiel konstruktiver Leichtbau: Die gestalt- und topologieoptimierte Fußgängerbrücke über die Leith Street zum St. James Shopping Centre in Edinburgh ist ein Beispiel für die Umsetzung des konstruktiven Leichtbaus im Bereich des Brückenbaus. (a) Fußgängerbrücke zum St. James Shopping Centre; (b) [17] Innenansicht der Fußgängerbrücke.

Wichtige Impulse zur konstruktiven Umsetzung von Leichtbauzielen gibt die Bionik, die den Brückenschlag zwischen Biologie und Technik darstellt. Dabei werden „konstruktive“ Prinzipien der Natur, die durch Mutation und Selektion genetisch entstanden sind, als Vorbilder für neue Entwicklungen herangezogen.

In Abbildung 2.5 ist ein Beispiel aus der Bionik abgebildet, in dem ein Flügel einer Möwe als Vorbild für die Strömungsoptimierung einer Schiffsschraube diente [18, 19].

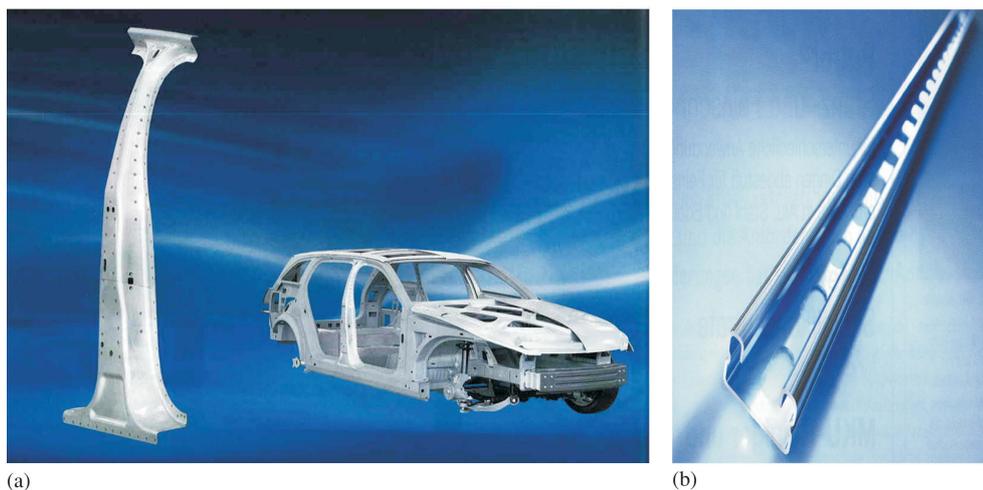


**Abbildung 2.5:** Beispiel konstruktiver Leichtbau - Bionik: Der Hamburger Ingenieur Günther Spanger nahm sich den Flügel einer Möwe (a) [20] für die Konstruktion einer zwölfblättrigen Schiffsschraube (b) [18] zum Vorbild. Durch diese neue Konstruktion sind Kraftstoffeinsparungen von bis zu 18 % möglich [18].

- Fertigungstechnischer Leichtbau

Allgemein ausgedrückt ist es die Aufgabe des fertigungstechnischen Leichtbaus, ein Zusammenspiel der einzelnen vorgeschalteten Verbesserungsansätze, wie Lösungen des konzeptionellen, konstruktiven und werkstofftechnischen Leichtbaus, zu ermöglichen. Bei der praktischen Umsetzung gilt es, einerseits die technische Herstellbarkeit von Leichtbaulösungen im Produktionsprozess zu verwirklichen und andererseits die wirtschaftliche Fertigung des Produktes umzusetzen.

Zu Produkten, bei denen die Ansätze des fertigungstechnischen Leichtbaus zur Anwendung kommen, sind beispielsweise Tailored Blanks, Tailored Tubes, Tailored Rolled Coils oder strukturierte Plattensegmente. Zusätzlich zu den angeführten Beispielen können Produkteigenschaften durch Zusatzmechanismen, wie die Veränderung des Gefüges und der Materialcharakteristik durch Kugelstrahlen, Wärmebehandlung oder lokale Kaltverfestigung, positiv beeinflusst werden. Anwendungsbeispiele dazu finden sich in Abbildung 2.6.



**Abbildung 2.6:** Beispiele fertigungstechnischer Leichtbau: (a) [21, 22] B-Säule des InCar Projekts der Firma ThyssenKrupp AG aus dem Warmumformstahl MBW<sup>®</sup> 1900, der einer lokalen Wärmebehandlung unterzogen wurde, um das Gefüge gezielt zu verändern; (b) [23] lasergeschweißtes Tailored Rolled Coil mit variabler Wandstärke der Firma Tillmann Profil GmbH.

Bei der Umsetzung von Leichtbaustrategien ist jedoch eine strikte Abgrenzung der angewandten Maßnahmen oft schwierig, da es sehr häufig zum „Verschmelzen“ von mehreren Leichtbauansätzen kommt, um bestmögliche Resultate zu erzielen.

## 2.3 Konstruktionsprinzipien des Leichtbaus

Bei der technischen Umsetzung der Aufgabenstellung geht es auch im Leichtbau primär um die Funktionserfüllung. Als Sekundärziel ist - ganz im Sinne des Leichtbaus - die Reduktion des Gesamtgewichts auf ein Gewichtsminimum zu verstehen. Zusätzlich sind die nachstehend angeführten Nebenbedingungen bei der Konzeption und Konstruktion maßgebend [2, 3, 24]:

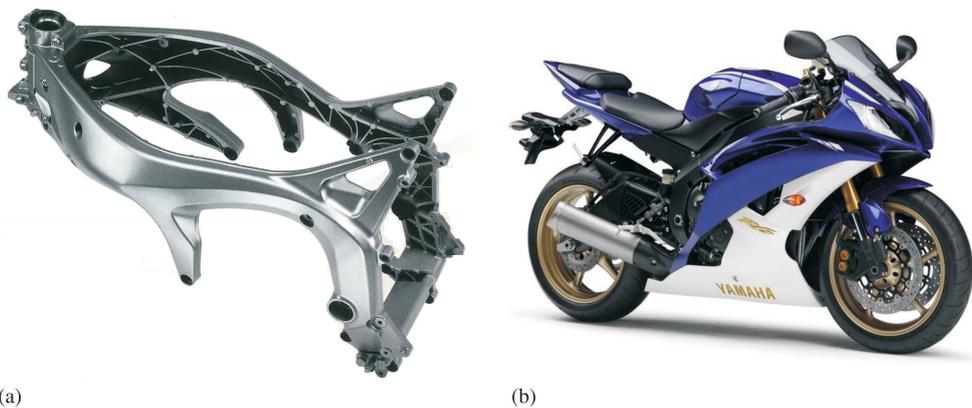
- der Kraftflussverlauf,
- die Eigenschaften des Werkstoffes,
- die Umgebungsbedingungen,
- die Sicherheitsanforderungen,
- die Zuverlässigkeit der Fügestellen,
- die Ästhetik,
- der Komfort für die Nutzung,
- die Wartbarkeit und Reparierbarkeit und
- die Möglichkeit der wirtschaftlichen Fertigung.

Neben diesen angeführten Bedingungen, die rein die Nutzungs- bzw. die Betriebsphase des Bauteils betreffen, rücken immer mehr auch Fragen rund um die Entsorgungs- und Rezyklierungsproblematik der Bauteile und der Bauteilgruppen in den Vordergrund. Das ambitionierte Ziel, den Ressourcenbedarf in der Betriebsphase zu senken, muss auch auf die Herstellungs- und Entsorgungsphase erweitert werden. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung eines Produktzykluses ist eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Gestaltung der Wertschöpfungskette möglich.

Bei der Verwirklichung von Leichtbaukonstruktionen müssen im Wesentlichen folgende Prinzipien umgesetzt werden, um zu einem technisch einwandfreien und gewichtsoptimierten Bauteil oder einer Bauteilgruppe zu kommen [24–27]:

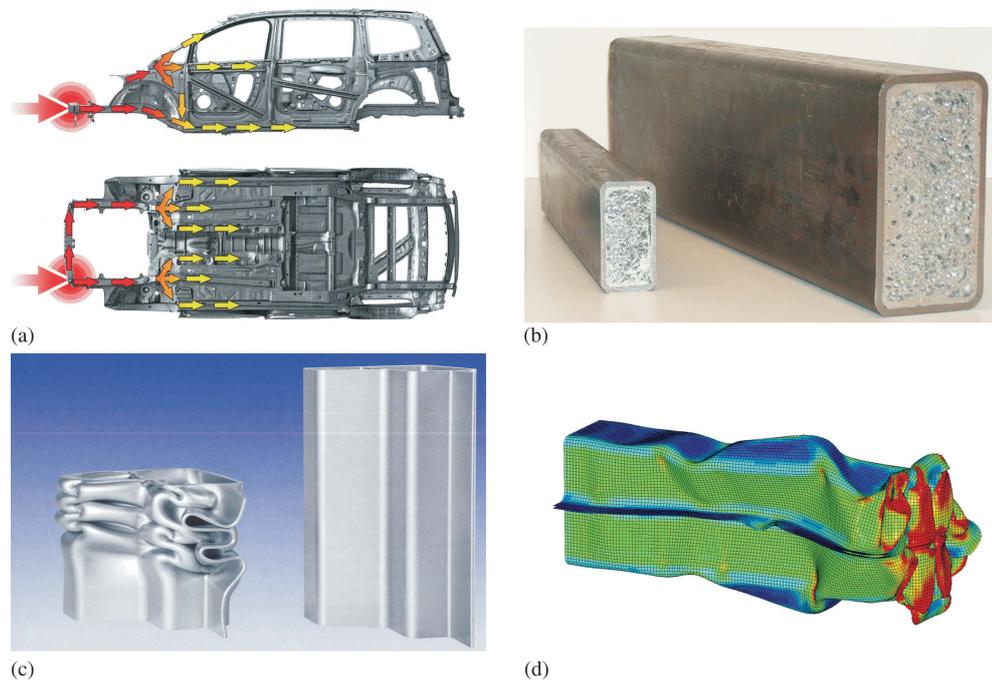
- Die aufzunehmenden Lasten der einzelnen Betriebsfälle sollten möglichst direkt in Auflager, Steifen, Spanten oder in entsprechende dafür ausgelegte Strukturen eingeleitet werden.

- Bei Lasteinleitungsstrukturen, die aus Stäben bestehen, ist darauf zu achten, dass gerade Stäbe zu Anwendung kommen. Bei gekrümmten Stäben kommt es durch das auftretende Biegemoment zu massiven Stabilitätsverlusten infolge der Gefahr auf Knicken.
- Bei auf Torsion beanspruchte Querschnitte sind geschlossene Profile zu bevorzugen und Krafteinleitungspunkte sowie Kraftlinien von Einzelkräften sind bei Möglichkeit durch den Schubmittelpunkt zu legen. Dadurch gewinnt die Struktur eine höhere Torsionssteifigkeit und ist weniger anfällig auf das Biegedrillknicken [28].  
Eine andere Möglichkeit, die Torsionssteifigkeit von Profilen zu erhöhen, ist die Anordnung von Streben im Profil - siehe Abbildung 2.7.



**Abbildung 2.7:** Leichtbaukonstruktionsbeispiel eines torsiionssteifen Rahmenprofils: (a) [29] torsiionssteifer Aluminium Motorradrahmen einer Yamaha R6 mit Streben an den Innenseiten des Rahmenprofils; (b) [30] Rennmotorrad Yamaha R6.

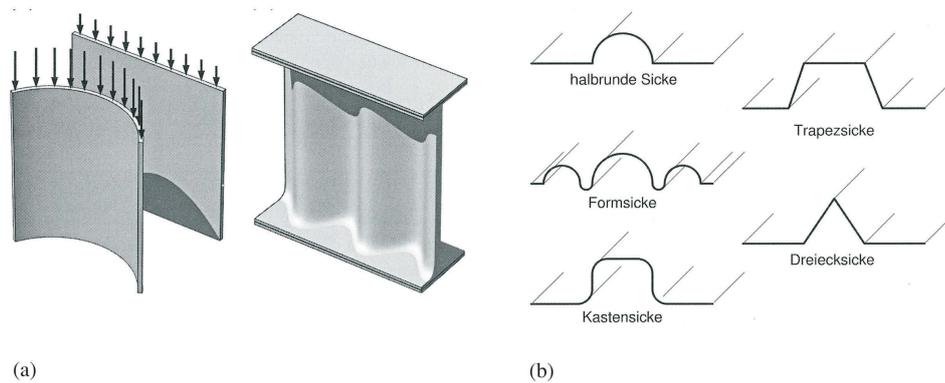
Weiters besitzen gestaltoptimierte Aluminiumhohlprofile und im Speziellen ausgeschäumte Hohlprofile, wie in Abbildung 2.8 veranschaulicht, eine größere Sicherheit gegen lokale Instabilitäten und weisen ein höheres Energieabsorptionsvermögen auf, so wie es bei Crashbauteilen gefordert wird.



**Abbildung 2.8:** Leichtbaukonstruktionsbeispiel modifizierter Profile: (a) [31] dargestellt ist der Lastpfad in der Vorderwagenkarosseriestruktur eines VW Sharan bei einem Unfall. In derartigen Fällen wird ein Teil der kinetischen Energie in dafür speziell vorgesehenen Profilen aufgenommen. Diese sicherheitsrelevanten Bauteile können aus (b) [32, 33] ausgeschäumten Profilen mit einer hohen Sicherheit gegen lokale Instabilitäten oder aus (c) [34] gestaltoptimierten Aluminiumhohlprofilen, die ein ausgeprägtes Energieabsorptionsvermögen besitzen, verwirklicht werden. In (d) [35] ist die Crashsimulation eines Aluminiumhohlprofils abgebildet, wobei die plastischen Dehnungen dargestellt sind. Durch solche Simulationen und praktische Versuche lassen sich derartige Bauteile im Entwicklungsstadium einer Rohkarosserie optimal auslegen.

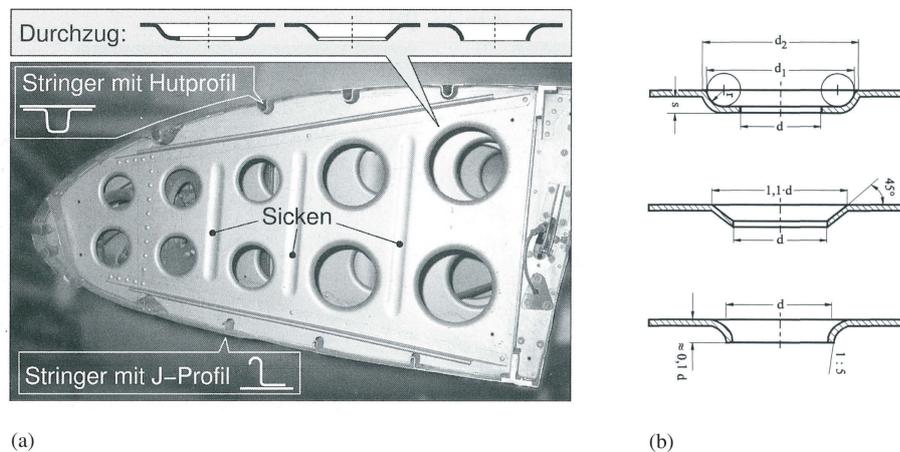
- Scheiben- oder Plattenbauteile, die parallel zu ihrer planen Ebene mit Druckkräften belastet werden, neigen zum Beulen. Eine Krümmung des Bauteils erhöht dabei die Beulsteifigkeit - siehe Abbildung 2.9 (a).

Belastungen normal zur Plattenebene haben denselben Effekt. Die Anhebung des Widerstandsmoments durch die Einbringung von Sicken (siehe Abbildung 2.9 (b)) oder die Anordnung von Steifen kann die Beulstabilität um ein vielfaches angehoben werden.



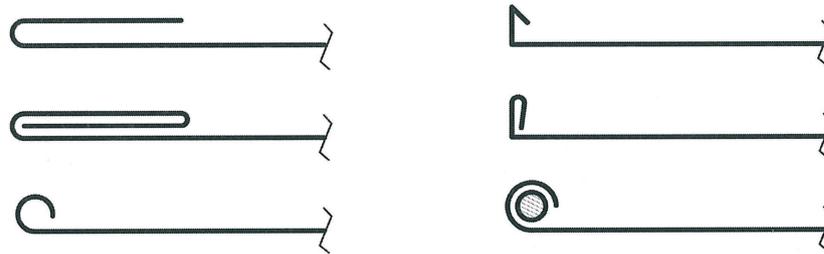
**Abbildung 2.9:** Leichtbaukonstruktionsbeispiel Scheibe/Platte: (a) um den Beulwiderstand von Scheiben und Platten, die unter Druckbeanspruchung stehen, zu steigern sind diese in gekrümmter Form oder in gewellter Form anzuordnen; (b) denselben Zweck erfüllt das Einbringen von verschiedenen Sickenformen [24].

- Freie Ränder und Durchlässe an flächigen Plattenbauteilen sind stets in un- oder wenig belasteten Zonen vorzusehen - siehe Abbildung 2.10.



**Abbildung 2.10:** Leichtbaukonstruktionsbeispiel Durchlässe: (a) [24] Innenkonstruktion einer Flugzeugtragfläche in der Differentialbauweise mit Stringern, Sicken und Durchlässen, die in verschiedenen Bördelungsformen ausgeführt werden können; (b) [3] detaillierte Darstellung von mehreren Bördelungsformen.

Um freien Rändern mehr Stabilität zu verleihen, sind diese zusätzlich, wie in Abbildung 2.11 dargestellt, aufzubördeln oder mit speziellen Abschlüssen zu versehen.



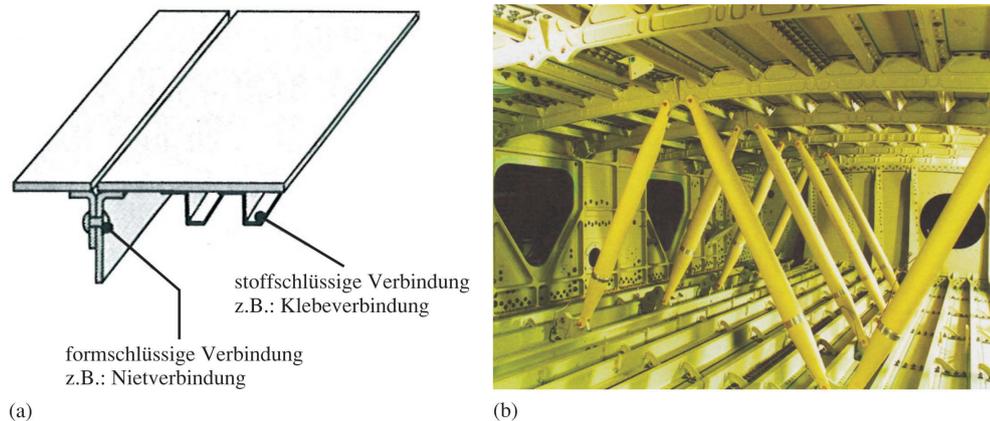
**Abbildung 2.11:** Leichtbaukonstruktionsbeispiel freie Ränder: Abgebildet sind verschiedene Möglichkeiten, freie Ränder zusätzlich zu versteifen [24].

- Durch eine kraftflussgerechte Konstruktion, die Kerben mit geringen Radien und drastischen Querschnittsveränderungen vermeidet, lassen sich multiaxiale Spannungskonzentrationen vermeiden bzw. verhindern.

## 2.4 Leichtbauweisen

Für den Zusammenbau von auf Leichtbau optimierten Einzelsegmenten zu Bauteilgruppen oder fertigen Endprodukten stehen im Allgemeinen vier verschiedene Bauweisen zur Auswahl [2–4, 7, 36–38]:

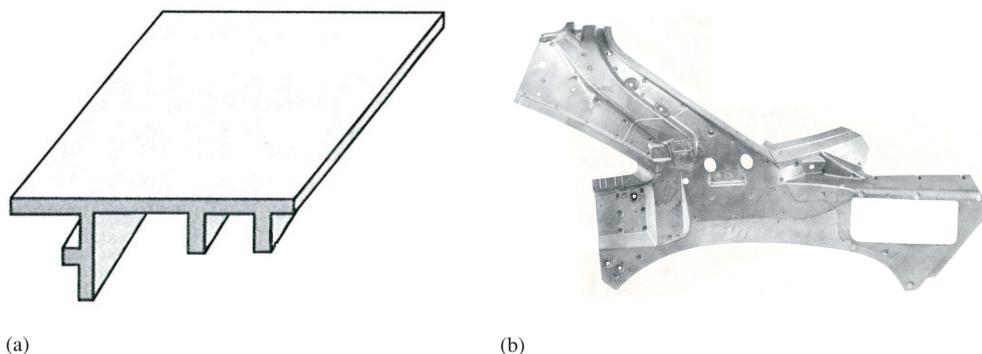
- Differentialbauweise  
Das differentielle Prinzip sieht die additive Verbindung von mehreren Bauteilen durch den Einsatz von formschlüssigen Verbindungsmethoden, wie Niet- und Clinchverbindungen, oder stoffschlüssiger Verbindungsmethoden, wie Klebe- und Schweißverbindungen, vor - siehe Abbildung 2.12.  
Probleme bei der Differentialbauweise liegen im hohen Fertigungsaufwand und in der Kontaktkorrosion.



**Abbildung 2.12:** Differentialbauweise: (a) [4] schematische Darstellung der Differentialbauweise, die sich durch die Addition von mehreren Einzelbauteilen zu einem Gesamtbauteil auszeichnet; (b) [39] angewandte Differentialbauweise bei der Flugzeugtragfläche einer Boeing A320.

- Integralbauweise

Bei der integrativen Leichtbauweise wird eine Minimierung von Einzelteilen angestrebt. Dabei werden Funktionalität und Geometrie zusammengefasst, wie beispielsweise bei Platten mit gefrästen Stegen und Rippen (siehe Abbildung 2.13). Nachteilig wirken sich höhere Herstellungskosten und das Schädigungsverhalten aus, da durch den gleichartigen Materialeinsatz dem Rissfortschritt in der homogen gestalteten Struktur keinerlei Widerstand entgegengesetzt wird.

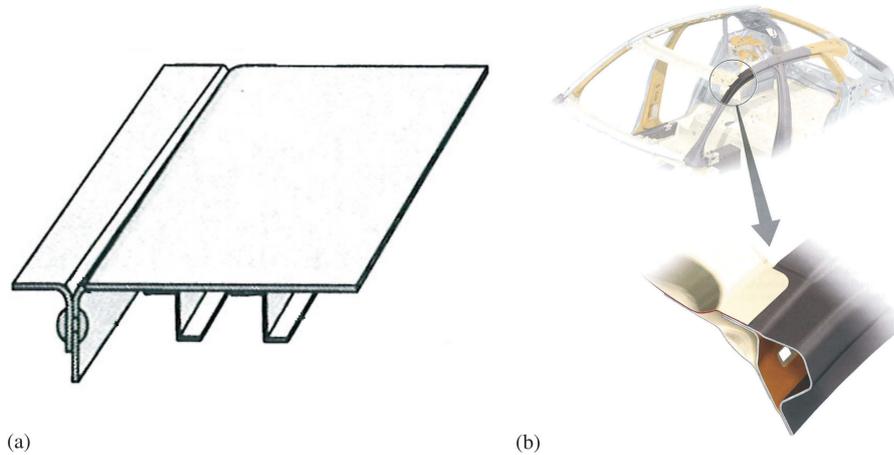


**Abbildung 2.13:** Integralbauweise: (a) [4] schematische Darstellung der Integralbauweise; (b) [40] Knotenpunkt der C-Säule eines Mercedes-Benz S-Klasse Coupes in Integralbauweise.

- Integrierte Bauweise

Die integrierende Bauweise, dargestellt in Abbildung 2.14, verbindet die Vorteile der Differentialbauweise mit der Integralbauweise. Bei dieser Bauweise werden Platten oder Schalen mit steifigkeitssteigernden Verstärkungselementen, wie z.B. Stringer,

verklebt. Damit lassen sich Probleme, die durch Kerbwirkung, Korrosion und Rissausbreitung entstehen, eingrenzen.



**Abbildung 2.14:** Integrierte Bauweise: (a) [4] schematische Darstellung der Integrierten Bauweise von Leichtbaukomponenten; (b) [41] beim Audi Q3 wird die A-Säule mit dem Dachträger mittels der Integrierten Leichtbauweise verbunden.

- Modulbauweise

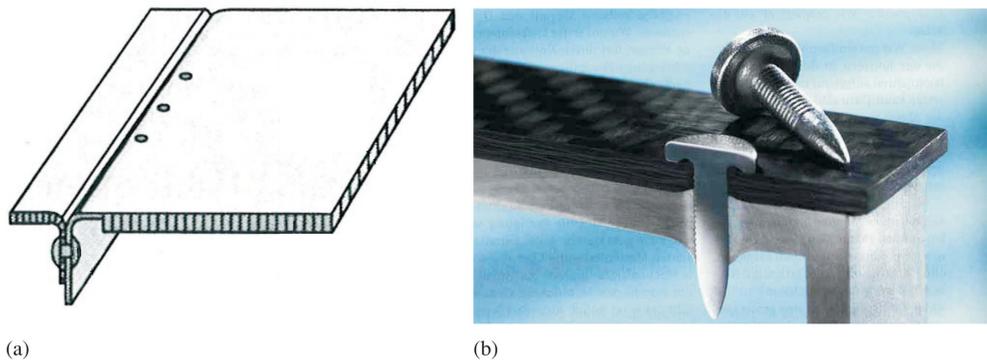
Ein Modul ist eine in sich abgeschlossene Baugruppe, wie in Abbildung 2.15 anhand der Frontpartie des VW Polo gezeigt, die in einer übergeordneten Gesamtkonstruktion verbaut ist. Durch eine optimale Integration von Funktionen, Prozessen oder Strukturen innerhalb eines Moduls und die mechanische Verbindung zur Gesamtkonstruktion ergibt sich eine effiziente Übertragung aller geforderten Leistungsmerkmale. Zusätzlich ist ein wirtschaftlicher Zusammenbau und eine rasche Austauschbarkeit bei Betriebsstörungen gegeben [36].



**Abbildung 2.15:** Modulbauweise: Modulare Bauweise am Beispiel der Frontpartie des VW Polo [42].

- Verbundbauweise

Anzusiedeln ist die Verbundbauweise bei der Differentialbauweise. Allerdings werden bei dieser Art Bauteile aus verschiedensten Materialien und Verbundwerkstoffen, wie Sandwich- und Faserverbundwerkstoffe, mit unterschiedlichen Eigenschaften verbaut (siehe Abbildung 2.16). Probleme liegen hier in der aufwändigen Fertigung und in den Krafteinleitungspunkten.



**Abbildung 2.16:** Verbundbauweise: (a) [4] schematische Darstellung der Verbundbauweise; (b) [43, 44] mögliche Verbindungsmethode bei hybriden Leichtbauteilen, die in der Verbundbauweise hergestellt wurden. Bei dem abgebildeten Materialverbund zwischen CFK und Aluminium kam zusätzlich zum Klebstoff ein Rivtac Bolzen zum Einsatz, der ohne Vorlochen verbaut werden kann.

Für die genannten Bauweisen stellt im Besonderen die Wahl des Tragelements bzw. des Lastaufnahmeelements und die Verbindung von diesem zu anderen Elementen, wie versteifende Scheiben- oder Plattenbauteilen, eine der technischen Schlüsselstellen dar.

In Abbildung 2.17 wird zu dieser Problematik ein Überblick über das Verhalten von verschiedenen Trägerprofilen und unterschiedlichen Verbindungsmethoden mit einer Außenhautstruktur gegeben. Dabei geht klar hervor, dass sich Profile mit einem Schubmittelpunkt durch die Schwerachse und/oder Randverstärkungen sowie Profile mit geschlossenem Profilquerschnitt bei weitem besser eignen als asymmetrische, drill- und biegedrillempfindlichen Querschnitte. Weiters sind flächige Verbindungsmethoden wie Klebeverbindungen rein auf Krafteinleitung reduziert betrachtet den punktwise gefügten vorzuziehen [7].

Anschluss- element	Profilquer- schnitt	Beulform (stark überzeichnet)	Profil	Querwand- anschluss	Hautfeld- anschluss
Nietver- bindung			⊖	-	-
Nietver- bindung			+	⊖	-
Nietver- bindung			+	+	⊖
Klebever- bindung			+	+	+
Klebever- bindung			+	+	+

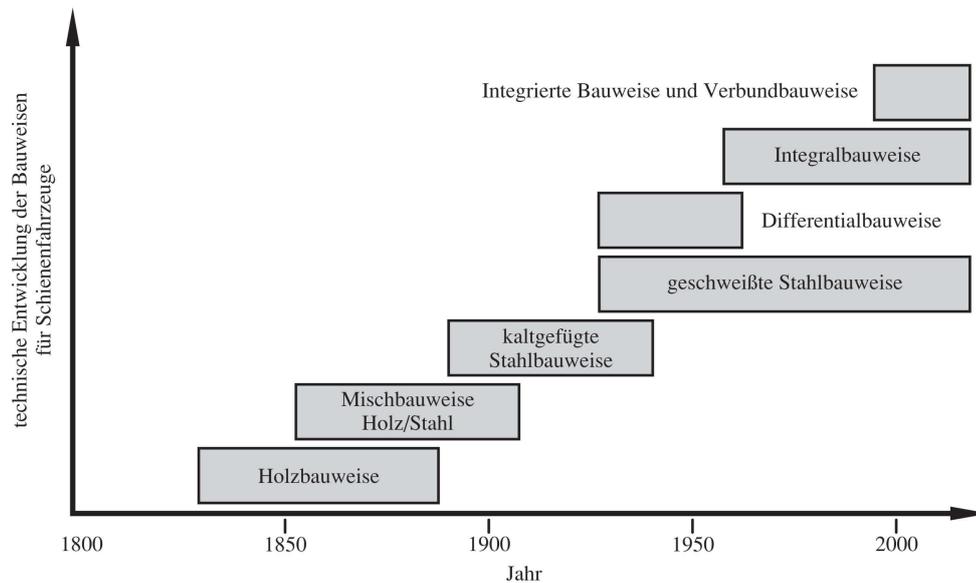
⊖	maßgebende Schwäche	+	gut	-	schlecht
---	---------------------	---	-----	---	----------

**Abbildung 2.17:** Vergleich von Profilquerschnitten und deren Anbindungen an Außenhautfeldern: Charakterisierung und Vergleich von Verbindungsmethoden zwischen Profilquerschnitten und Hautfeldern wie Scheiben- oder Plattenelementen sowie die grafische Darstellung des Bauteilverhaltens beim Beulen dieser Struktur [7].

In der Anwendung und der technischen Umsetzung der Leichtbauweisen bei Automobilen sind additive Bauweisen zu bevorzugen. Zum einen erlauben sie einen lokal angepassten Werkstoffeinsatz und zum anderen ist eine Rezyklierung laut EU-Altautorichtlinie sehr gut anwendbar. In Bezug auf die Altfahrzeugverwertung schreibt die EU-Altautorichtlinie vor, dass ab 1.1.2006 mindestens 85 % des Fahrzeuggewichtes verwertet werden müssen. Diese Quote steigt ab 2015 auf 95 % [45].

Aus der geschichtlichen Entwicklung heraus, wie am Beispiel von Schienenfahrzeugen in Abbildung 2.18 erläutert, ist erkennbar, dass sich die angeführten und heute gängigen Leichtbauweisen aus der Differentialbauweise entwickelten [46, 47].

Allgemein gesehen sind die integrierte Bauweise und die Verbundbauweise als additive Bauweisen als Stand der Technik und als generelle Bauweise für zukünftige Entwicklungen anzusehen. Weiters wird auf diesem Sektor die Art und Ausführung der Fügetechnik eine entscheidende Rolle spielen.



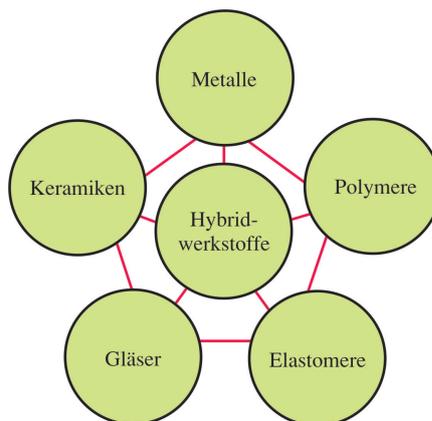
**Abbildung 2.18:** Geschichtliche Entwicklung der Leichtbauweisen: Dargestellt ist die geschichtliche Entwicklung der Bauweisen am Beispiel von Schienenfahrzeugen [46].

## 2.5 Kriterien bei der Werkstoffwahl für Leichtbauanwendungen

### 2.5.1 Werkstoffe im Vergleich

Dem Ingenieur stehen heute rund 80.000 verschiedene Werkstoffe zur Verfügung, um Leichtbaukonzepte, wie die Leichtbauweisen und die Leichtbaustrategien, umzusetzen. Dabei unterscheidet sich jeder Werkstoff durch mechanische, chemische und physikalische Eigenschaften.

Grundsätzlich lassen sich die Ingenieurwerkstoffe in sechs Hauptgruppen unterteilen. Neben den Metallen, den Polymeren, den Elastomeren, den Gläsern und den Keramiken bilden die Hybridwerkstoffe eine Kombination aus zumindest zwei oder mehreren der genannten Hauptgruppen - siehe Abbildung 2.19 [48, 49].



**Abbildung 2.19:** Werkstoffgruppen: Die Werkstoffgruppen gliedern sich in Metalle (z.B. Stähle und Nichteisenmetalle und deren Legierungen), Polymere (z.B. PET, Polyester), Elastomere (z.B. Kautschuk, Silikone), Gläser (z.B. Silikatglas, Duranglas) und in Keramiken (z.B. Siliziumdrit, Aluminiumoxid). Aus mindestens zwei oder mehreren Materialien der genannten Grundgruppen setzen sich die Hybridwerkstoffe, wie Compositwerkstoffe oder spezielle Schäume, zusammen [48].

Bei Leichtbauanwendungen finden vor allem Werkstoffe der Hauptgruppen Metalle, Polymere und der Hybride Verwendung.

Abgesehen von Spezialanwendungen gehören die Dichte  $\rho$  und die lineare Wärmeausdehnung  $\alpha$  zu den wichtigsten physikalischen Werkstoffkenngrößen. Bei den mechanischen Werkstoffkennwerten sind für den Ingenieur die Streckgrenze  $R_e$  oder die Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , der Elastizitätsmodul  $E$ , die Querkontraktionszahl  $\nu$  und die Bruchzähigkeit  $K_{Ic}$  die Bedeutendsten zur Auslegung von Konstruktionen [3].

## 2.5.2 Werkstoffkennzahlen

Neben dem unmittelbaren Vergleich von physikalischen und mechanischen Materialgrößen besteht die Bewertungsmöglichkeit von Werkstoffen anhand von Gütezahlen. In die Gütezahlen fließen die Beanspruchungsart, der jeweils für die Belastung relevante Materialkennwert und die Dichte des Materials sowie die Erdbeschleunigung  $g$  ein. Weiters ist Voraussetzung, dass bei dieser Art des Werkstoffvergleichs eine zumindest geometrisch ähnliche Form vorliegt. Bei Abweichungen der Form muss in diesem Vergleich das entsprechende Flächenmoment 2. Grades einbezogen werden. Die Herstellbarkeit des Bauteiles wird in dieser Betrachtungsform nicht berücksichtigt. Die Tabelle 2.1 fasst die wichtigsten Konstruktionsmaterialien und die gebräuchlichsten Belastungsfälle sowie ihre Gütezahlen zusammen. Je größer die Gütezahl desto geeigneter ist der gewählte Werkstoff [3].

**Tabelle 2.1:** Gütekennzahlen zur Beurteilung der Leichtbaueignung: Zusammenfassung der wichtigsten Belastungsfälle, Berechnungsformeln der Gütezahlen und der typischen Konstruktionswerkstoffe. Bei der Angabe der Gütezahlen wurde eine Normierung auf den Werkstoff Aluminium vorgenommen [3].

Belastungsfall	Gütezahl- berechnung	Holz	Mg. -Leg.	Al. -Leg.	Ti. -Leg.	Stahl	GFK	CFK	AFK
stat. Festigkeit Zug/Druck	$\left[ R_m / (g \cdot \rho) \right]$	1,54	1,46	1	1,54	0,49	3,17	5,52	8,58
Längssteifigkeit Zug/Druck	$\left[ E / (g \cdot \rho) \right]$	0,93	0,89	1	0,87	1,03	0,79	6,88	1,86
Schubsteifigkeit Torsion	$\left[ G / (g \cdot \rho) \right]$	-	0,9	1	0,89	1,06	0,32	0,37	0,15
Knicksteifigkeit von Stäben	$\left[ \sqrt{E} / (g \cdot \rho) \right]$	2,24	1,17	1	0,72	0,60	1,05	3,64	1,93
Biegesteifigkeit von Platten	$\left[ \sqrt[3]{E} / (g \cdot \rho) \right]$	3,05	1,31	1	0,69	0,5	1,17	3,0	1,98

Gemäß dem Wunsch, die tatsächlichen Belastungsverhältnisse noch besser erfassen zu können, wurde die Leichtbaukennzahl definiert. Die dimensionslose Leichtbaukennzahl (*LBK*) stellt das Verhältnis zwischen maximal laut Festigkeitsnachweis aufnehmbarer Gewichtskraft ( $F_G$ ) [N] und der Gewichtskraft der Eigenlast der Gesamtkonstruktion ( $F_E$ ) [N] dar - siehe Gleichung (2.1) [3].

$$LBK = \frac{F_G}{F_E} \quad (2.1)$$

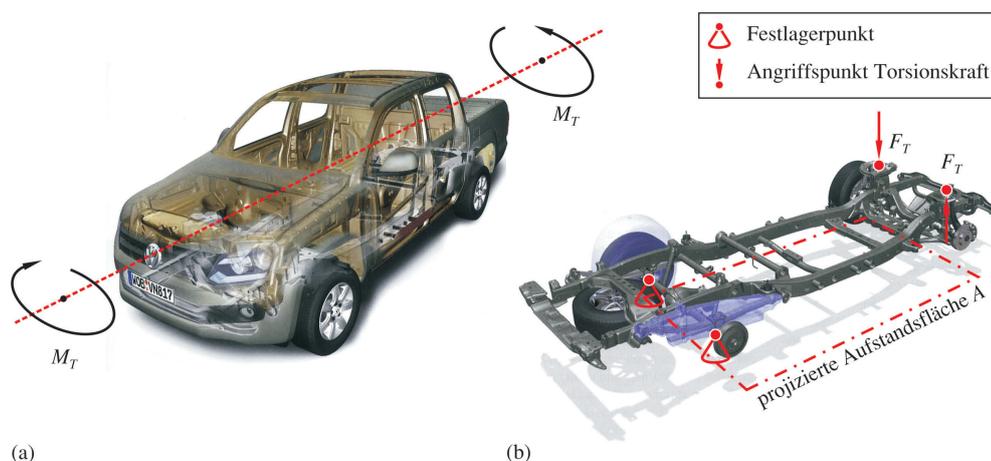
Je größer die Leichtbaukennzahl desto geeigneter ist der gewählte Werkstoff. Die Leichtbaukennzahl bezieht sich lediglich auf die maximale Dehn- bzw. Streckgrenze des gewählten Materials. Der Elastizitätsmodul und die auftretenden Durchbiegungen werden bei dieser Art des Werkstoffvergleichs außer Acht gelassen.

Bei größeren Strukturen und einer Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens ganzer Konstruktionen, wie z.B. Karosserien im Automobilbau, lassen sich Leichtbaukennzahlen über experimentelle Analysen ermitteln. Dabei spricht man von der Ermittlung der Leichtbaugüte, deren Ermittlung in Abbildung 2.20 am Beispiel einer VW Amarok Rohkarosserie erläutert wird [3].

Bei dieser Beurteilung errechnet sich die Leichtbaugüte für Torsionssteifigkeit ( $L_T$ ) einer Rohkarosserie mit der Gleichung (2.2) [50, 51]:

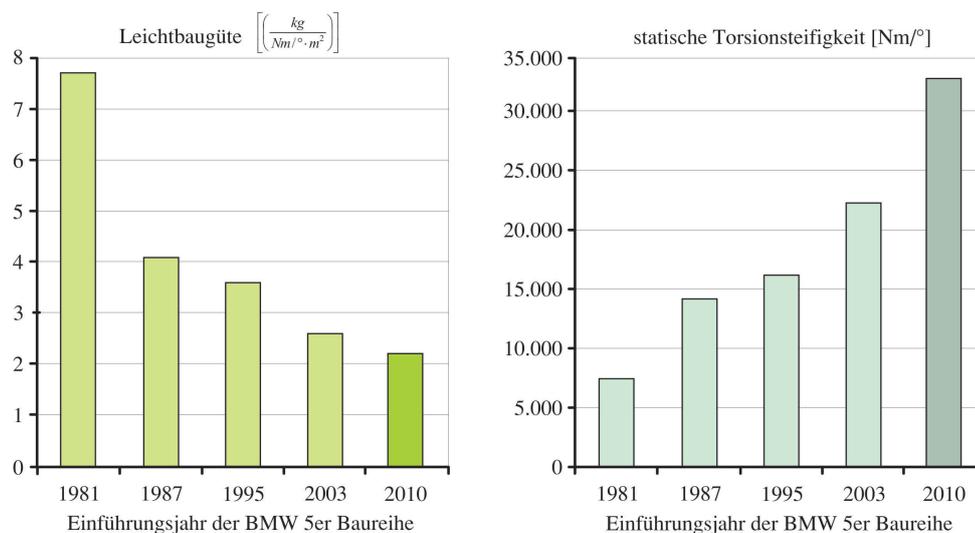
$$L_T = \frac{m_{RK}}{c_T \cdot A} \cdot 10^3 \quad (2.2)$$

Wobei  $L_T$  [ $\frac{\text{kg}}{\text{Nm}/^\circ \cdot \text{m}^2}$ ] für die Leichtbaugüte bezogen auf die Torsionssteifigkeit,  $m_{RK}$  [kg] für die Masse der Rohkarosserie,  $c_T$  [Nm/°] für die Torsionssteifigkeit und  $A$  [m<sup>2</sup>] für die projizierende Aufstandsfläche der Reifen steht.



**Abbildung 2.20:** Ermittlung der Leichtbaugüte: Gemäß der Gleichung (2.2) wird die Leichtbaugüte von Bauteilen, wie Karosserien oder Türen ermittelt. Bei der Berechnung der Leichtbaugüte einer Karosserie wird die Rohkarosserie ohne Türen und Interieur in einem Prüfstand um die Fahrzeuglängsachse tordiert, wie in (a) [52] an einem VW Amarok schematisch dargestellt; (b) [52] bei dem Versuch werden die heckseitigen Stoßdämpfer und Federelemente bzw. die Blattfedern (blau schattiert) blockiert und durch Festlager fixiert (rote Drehkegelsymbole). Die Torsionskräfte (rote, schematische Vektorpfeile mit Angriffspunkten) werden im Bereich der vorderen Domlager aufgebracht, um damit die Karosserie um die Längsachse zu tordieren. Weiters fließt die projizierende Aufstandsfläche der Reifen, d.h. Achsabstand multipliziert mit der Spurbreite, in die Berechnung ein (rote, strichpunktierte Linie).

In Abbildung 2.21 ist die Entwicklung der Leichtbaugüte und der statischen Torsionssteifigkeit der BMW 5er Baureihe von 1981 bis 2010 dargestellt. Durch eine systematische Optimierung der Lastpfadtopologie, einer Homogenisierung der Tragstrukturverläufe und einer beanspruchungsgerechten Knotengestaltung konnte die Leichtbaugüte bei dem aktuellen Modell um rund 21 % gegenüber dem Vorgängermodell von 2003 verbessert werden [53].



**Abbildung 2.21:** Ermittlung der Leichtbaugüte für die BMW 5er Baureihe: Durch stetig weiterentwickelte Fahrzeugkonzepte und forciertem Leichtbau konnte die Leichtbaugüte für die BMW 5er Baureihe im Laufe von 29 Jahren von 7,7 auf 2,15 verbessert werden. Die statische Torsionssteifigkeit wurde dabei um einen rund 4,4 fachen Wert erhöht [53].

Neben der Werkstoffauswahl über Leichtbaukennzahlen oder mittels systematischer Auswahlhilfen, wie den Ashby-Maps, in denen auf der Abszisse und der Ordinate verschiedenste Werkstoffkennwerte aufgetragen und miteinander verglichen werden können, spielen vor allem die Gesamtkosten eine übergeordnete Rolle [54, 55].

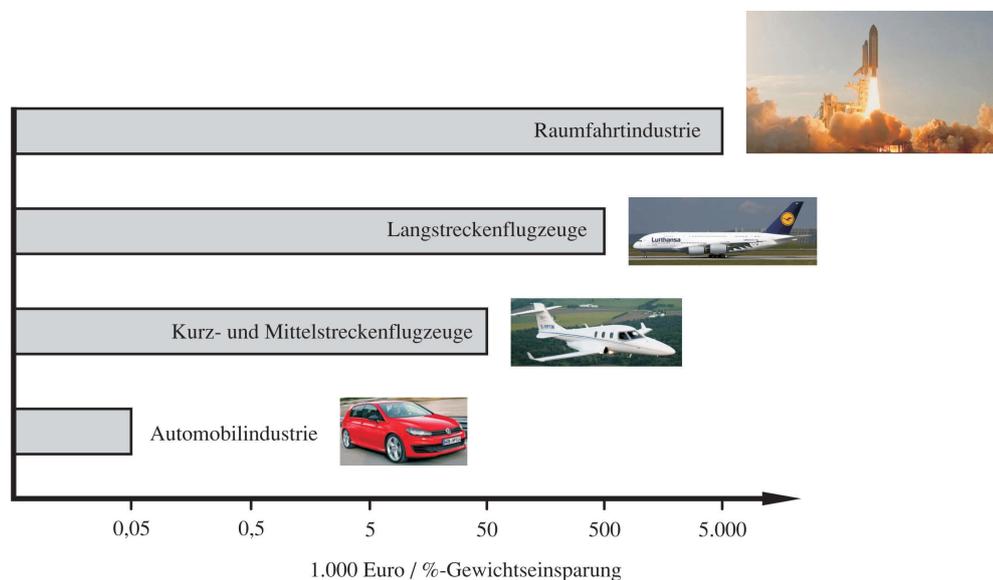
Beim Vergleich der Werkstoffe über Kennzahlen wird in der gängigen Literatur die Fertigbarkeit und die Fertigungsmethoden vernachlässigt. Diese Betrachtungsweise der Werkstoffauswahl führt zum Ausschluss von Materialien, die sich bei der reinen Beurteilung durch die beschriebenen Kennzahlen als sehr gut erwiesen. Die Ausschlusskriterien sind dabei von wirtschaftlicher Natur, wenn der Herstellungsprozess zu teuer wird, oder haben technische Gründe, wenn die Materialeigenschaften und der Fertigungsprozess nicht kompatibel sind.

### 2.5.3 Kostenentwicklung bei Leichtbauanwendungen

Für die materialtechnische Umsetzung von modernen Leichtbauanwendungen bietet sich ein großes Werkstoffspektrum an. Die wirtschaftlich vorteilhaften Stahl- und Aluminiumlegierungen sind aufgrund des Preis-, Technologie- und Fertigungsvorteiles nach wie vor im Fahrzeugbau die führenden Konstruktionswerkstoffe - siehe Abbildung 2.3. Bei höherpreisigen Leichtbaufahrzeugen kommen zu einem geringen, aber stetig wachsenden Teil,

Magnesium- und Titanlegierungen zum Einsatz. Verbundwerkstoffe, wie GLARE, GFK oder CFK, spielen zurzeit lediglich in der Luft- und Raumfahrt eine bedeutende Rolle. Für die Verbundwerkstoffe ergibt sich das eingegrenzte Anwendungsfeld aus den hohen Rohstoff- und Fertigungskosten. Durch die angestrebte Anhebung des Automationsgrades in der Fertigung ist ein verstärkter Einsatz bei Transport- und Personenkraftfahrzeugen möglich [3].

Die Abbildung 2.22 zeigt die tolerierbaren Kosten pro % an eingespartem Gewicht. Aus der Graphik geht eindeutig hervor, dass je nach Anwendungsfall nur ein gewisser Betrag von den potentiellen Kunden akzeptiert wird. Somit liegt der Grad der Umsetzung von Leichtbaulösungen nicht nur in der technischen Machbarkeit sondern in der wirtschaftlichen Vertretbarkeit [4].



**Abbildung 2.22:** Tolerierbare Kosten bei Leichtbauanwendungen: Je nach Marktsegment bewegen sich die vom Hersteller bzw. vom Kunden tolerierbaren Kosten pro % Gewichtseinsparung zwischen 50 Euro pro eingespartem Gewichtsprozent beim Automobil und 5 Mio. Euro pro eingespartem Gewichtsprozent bei der Raumfahrt (Bildentnahme aus [56–59]).

Die immense Gesamtkostenexplosion bei steigendem Leichtbaugrad, wie Abbildung 2.22 am Beispiel der Luft- und Raumfahrtindustrie zeigt, ergibt sich aus mehreren Gründen [3, 4]:

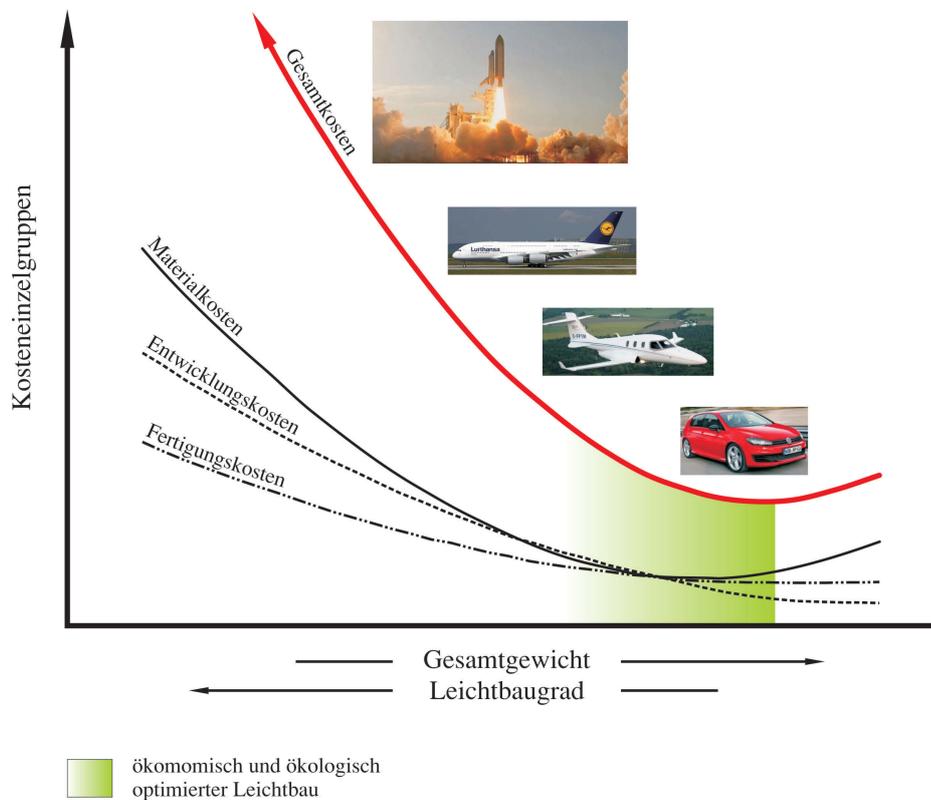
- Die Entwicklungskosten können bei steigendem Leichtbaugrad um den Faktor 5 bis Faktor 10 höher liegen.

- Mit sinkendem spezifischen Gewicht werden die Werkstoffe enorm teuer. Die Materialkosten verhalten sich etwa folgendermaßen :

$$\text{Stahl} : \text{Aluminium} : \text{GKF} : \text{AFK} : \text{CFK} = 1 : 5 : 10 : 100 : 500$$

- Die Fertigungskosten können durch die steigenden Werkzeug- und Prozesskosten um das 3fache höher sein.

In Abbildung 2.23 sind die beschriebenen Zusammenhänge zwischen Leichtbaugrad und der Entwicklung der einzelnen Kostengruppen grafisch dargestellt [3, 4].



**Abbildung 2.23:** Entwicklung der einzelnen Kostengruppen bei steigendem Leichtbaugrad: Durch den steigenden Leichtbaugrad kommt es aufgrund der höheren Material-, Entwicklungs- und Fertigungskosten zu einem immensen Anstieg der Gesamtkosten. Das ökonomische und ökologische Optimum liegt im Tiefpunkt und im Bereich links neben dem Tiefpunkt der Gesamtkostenkurve (grün schattierter Bereich) (Bildentnahme aus [56–59]).

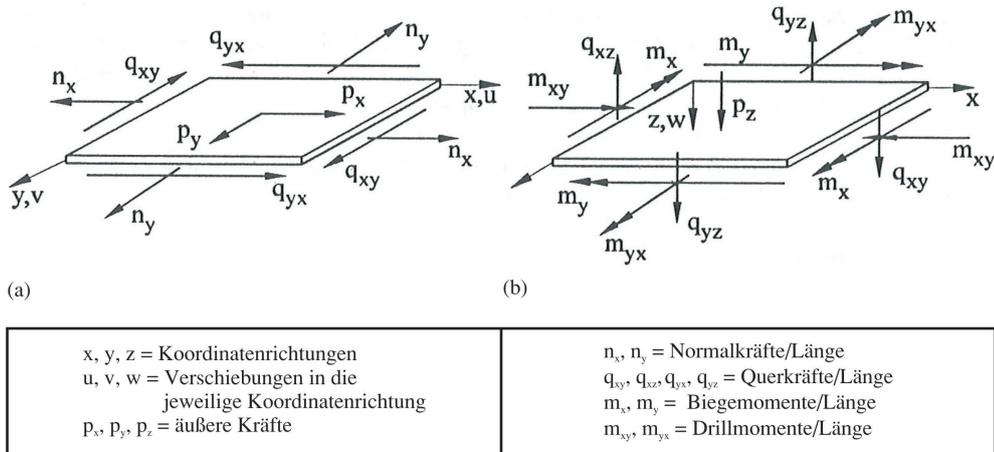
## 3 Grundlagen zum Stabilitätsverhalten von Platten

Die Verwirklichung von Leichtbaukonstruktionen, im Besonderen bei Rahmen- oder Skelettstrukturen, deren Schubfelder mit Blechen versteift sind, führt direkt zur extremen Dünnwandigkeit der Bleche. Für diese Konstruktionen spielt weniger die Auslegung auf Festigkeit eine Rolle als die der Stabilität, da das Bauteilversagen aufgrund von äußeren Belastungen auf einen Stabilitätsverlust zurückzuführen ist.

Verglichen mit der Natur kommen ebene isotrope Plattenstrukturen sehr selten vor. Vielmehr kommen gewölbte Formen, sogenannte Schalenstrukturen, vor, da sie den Vorteil bieten, dass die Querkräfte zur Wölbungsebene zum Teil in Form von Normalkräften in der Schalenhautdicke abgeleitet werden. Beispiele aus der Evolution wären der Panzer einer Schildkröte, die menschliche Schädelform oder die Gestalt einer Wassermelone [60, 61]. Wenn aus Gründen der Ästhetik und der technischen Sinnhaftigkeit die Verwirklichung der Leichtbaustrukturen durch die Ausnutzung von Schalenformen nicht möglich ist, bedarf es Alternativen, die die Steifigkeit der eingesetzten dünnwandigen Strukturen erhöhen.

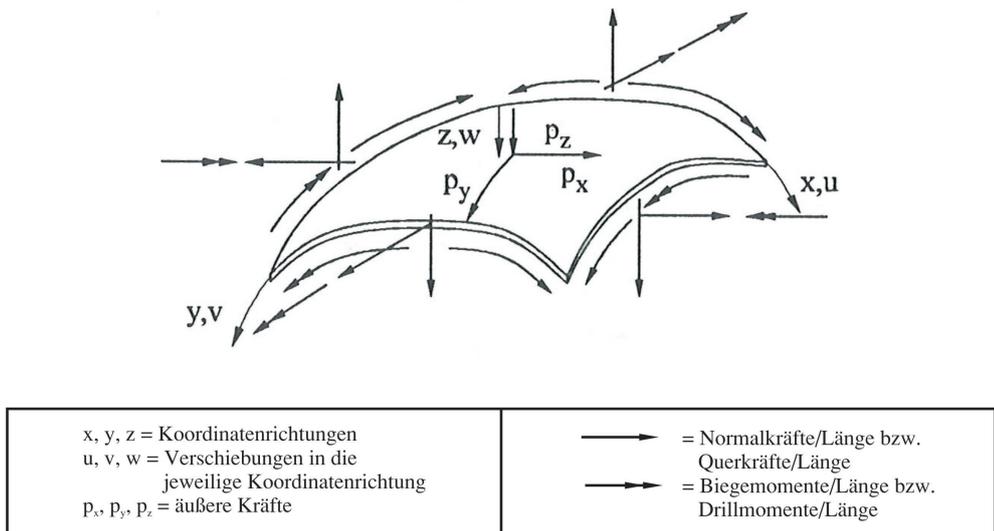
### 3.1 Stabilitätsverhalten von isotropen Rechteckplatten

Allgemein ausgedrückt sind Platten und Scheiben Flächentragwerke, deren Elementdicke bei weitem geringer ist als die Seitenlängen. Wenn die Mittelfläche eben ist und alle Kräfte in dieser Mittelfläche als Schubkräfte wirken, so wird das Element als Scheibe bezeichnet (siehe Abbildung 3.1 (a)). Treten Kräfte senkrecht zur Mittelebene auf oder kommt es zur Belastung der Ränder durch Momente, so liegt laut Definition eine Platte vor (siehe Abbildung 3.1 (b)) [3, 62, 63].



**Abbildung 3.1:** Unterscheidungsmerkmale von Scheiben- und Plattenelementen: (a) Scheibenelement mit äußeren Kräften in der Mittelflächenebene; (b) Plattenelement mit äußeren Kräften normal zur Elementebene und Momenten an den Seitenrändern [3].

Als Schalen werden einfach oder doppelt gekrümmte Flächenelemente bezeichnet, welche sowohl Kräfte in der Mittelebene als auch senkrecht zu dieser aufnehmen können. In Abbildung 3.2 ist ein doppelt gekrümmtes Schalenelement dargestellt, das durch Kräfte und Momente belastet wird [3, 62, 63].



**Abbildung 3.2:** Belastungen an einem Schalenelement: Äußere Kräfte und Momente an einem doppelt gekrümmten Schalenelement [3].

An den beschriebenen dünnwandigen Flächenelementen, die in der Fachliteratur auch als Hautebenen oder als Hautfelder bezeichnet werden, können die nachstehend angeführten äußeren Belastungen einen beulkritischen Spannungszustand hervorrufen [7]:

- reine Biegung,
- reiner Schub,
- reiner Druck und
- deren Kombinationen.

Die ebenen Hautebenen sind unter Belastung in der Lage, diese bis zum Erreichen der kritischen Membranspannung  $\sigma^*$  ohne Deformationen aufzunehmen. Wird die kritische Membranspannung  $\sigma^*$  überschritten, kommt es zum spontanen Verlust der Stabilität und je nach Art der Belastung zur Bildung von Beulen oder Falten.

Liegt die auftretende Membranspannung unterhalb der Streckgrenze  $R_p$  bzw. der Ersatzstreckgrenze  $R_{p0,2}$  des Materials, so liegt stabiles elastisches Beulen vor. Dementsprechend nimmt die deformierte Platte nach der Entlastung wieder die ursprüngliche plane Form an. Beim Überschreiten der elastischen Dehngrenze tritt ein instabiles Nachbeulverhalten mit irreparabler Werkstoffverformung auf.

Die beulkritischen Spannungen und die Form der Beulen bzw. Falten sind bei Rechteckplattenfeldern von folgenden Faktoren abhängig [7]:

- Dem Seitenverhältnis der Rechteckplattenfelder, welches sich aus  $b/a$  berechnet, wobei  $b$  die kürzere und  $a$  die längere Seitenlänge des Rechtecks ist.
- Den Randbedingungen an den vier Rändern des Feldes mit der Unterscheidung in gelenkiger Lagerung, fester Einspannung und freier Seitenfläche.
- Der relativen Plattendicke, die sich aus  $t/b$  berechnet, wobei  $t$  die Plattendicke und  $b$  die kürzere Seitenlänge der Platte ist.
- Dem Elastizitätsmodul des jeweiligen Werkstoffes sowie den äußeren Belastungen.

Da sich alle durchgeführten Untersuchungen und Experimente mit ebenen Rechteckplatten unter Druckbeanspruchung befassen, wird weiterführend nur auf diesen speziellen Fall und dessen theoretischen Grundlagen eingegangen.

Analog zum Knicken von Stäben kann bei der Instabilität von dünnen Rechteckplatten unter Berücksichtigung der Randbedingungen von der Differentialgleichung der Plattenbiegung nach der Theorie II. Ordnung ausgegangen werden. Dabei kann jener Membranspannungszustand bzw. jene Belastung als kritisch bezeichnet werden, die erstmals eine nichttriviale Lösung der linearisierten und auf reine Scheibenbelastung spezialisierte von Kármán'schen Plattengleichung hervorruft - siehe Gleichung (3.1). In diesem Fall werden die Druck-Membranspannungen  $N_{ij} = -n_{ij}$  als Druck positiv angenommen [24, 64].

$$K \Delta \Delta w + N_{xx} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_{yy} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0 \quad (3.1)$$

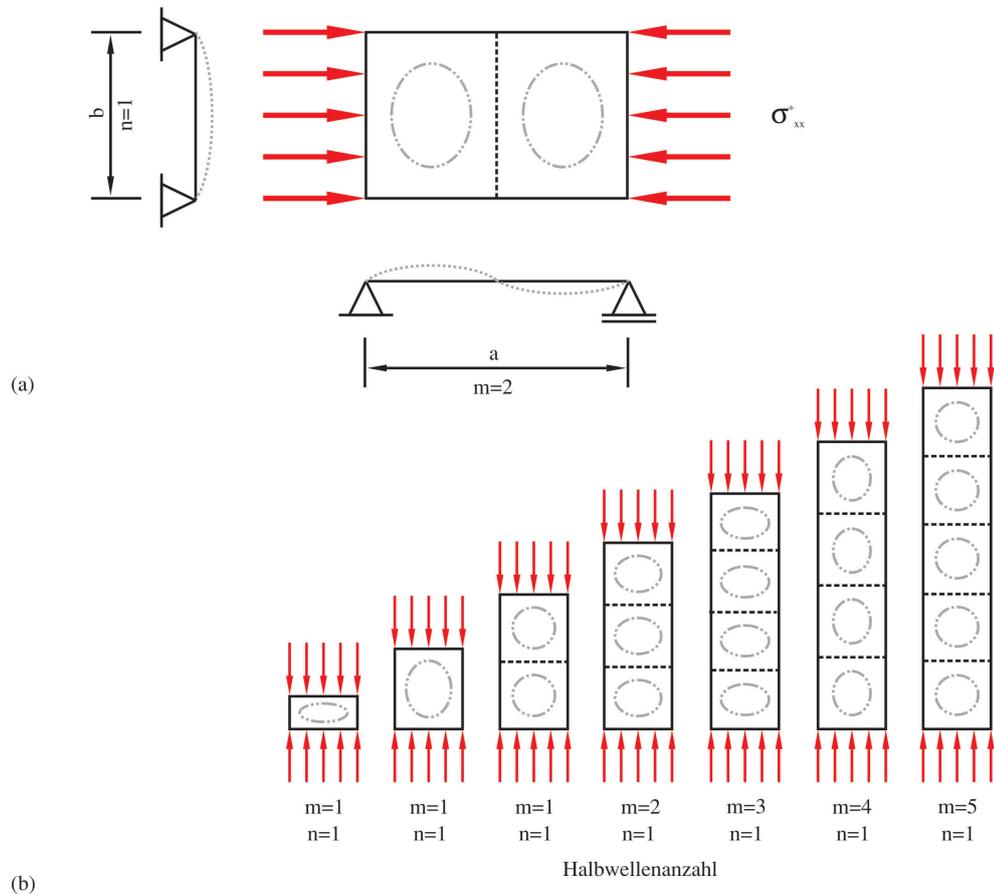
$K$  entspricht der Plattenbiegesteifigkeit ( $K = E \cdot t^2 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$ ),  $w$  ist die Verschiebung in z-Richtung und  $N_{ij}$  steht für die Membranspannungen. Die Variablen  $x$ ,  $y$  und  $z$  stehen für die Raumrichtungen.

So ist für die allseitig gelenkig gelagerte Rechteckplatte unter Druckbeanspruchung folgender Ansatz geeignet [64]:

$$w(x, y) = a_{mn} \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi \cdot y}{b}\right). \quad (3.2)$$

Damit entsteht eine Bestimmungsgleichung für den von den Halbwellenzahlen  $m$  und  $n$  der Beulfigur abhängigen kritischen Membranspannungszustand  $N_{ij}^*(m, n)$ .

In Abbildung 3.3 sind die Halbwellenzahlen  $m$  und  $n$ , die jeweiligen Beulfiguren und das Seitenlängenverhältnis  $b/a$  sowie deren Zusammenhänge anhand einer rechteckigen und allseitig gelenkig gelagerten unter Druck belasteten Platte grafisch erläutert.



**Abbildung 3.3:** Ermittlung der Halbwellenanzahl: (a) Prinzipskizze einer allseits gelenkig gelagerten homogenen Platte mit isotropen Eigenschaften, die einer einachsigen Druckspannung ausgesetzt ist. Dabei ist  $a$  die längere Seitenlänge mit der Halbwellenzahl  $m=2$  und  $b$  die kürzere Seitenlänge mit der Halbwellenzahl  $n=1$ ; (b) Veränderung der Halbwellenzahl  $m$  und der Beulfiguren bei sinkendem Seitenlängenverhältnis  $b/a$ , wobei die Seitenlänge  $b$  und somit auch  $n$  gleich bleiben [2].

Als Ergebnis solcher Eigenwertanalysen lässt sich bei einachsiger Belastung die kritische Druckspannung  $\sigma^*$  in folgender Form darstellen [64]:

$$\sigma^* = \kappa \cdot \pi^2 \cdot \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{t \cdot b^2} = \kappa \cdot \frac{\pi^2}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2. \quad (3.3)$$

Dabei hängt der  $\kappa$ -Wert neben den Halbwellenzahlen  $m$  und  $n$  auch von den Randbedingungen, dem Seitenlängenverhältnis  $b/a$  und der Belastungsart ab. Bei der mathematischen Formulierung der kritischen Beulspannung  $\sigma^*$  steht  $E$  für den E-Modul,  $t$  für die

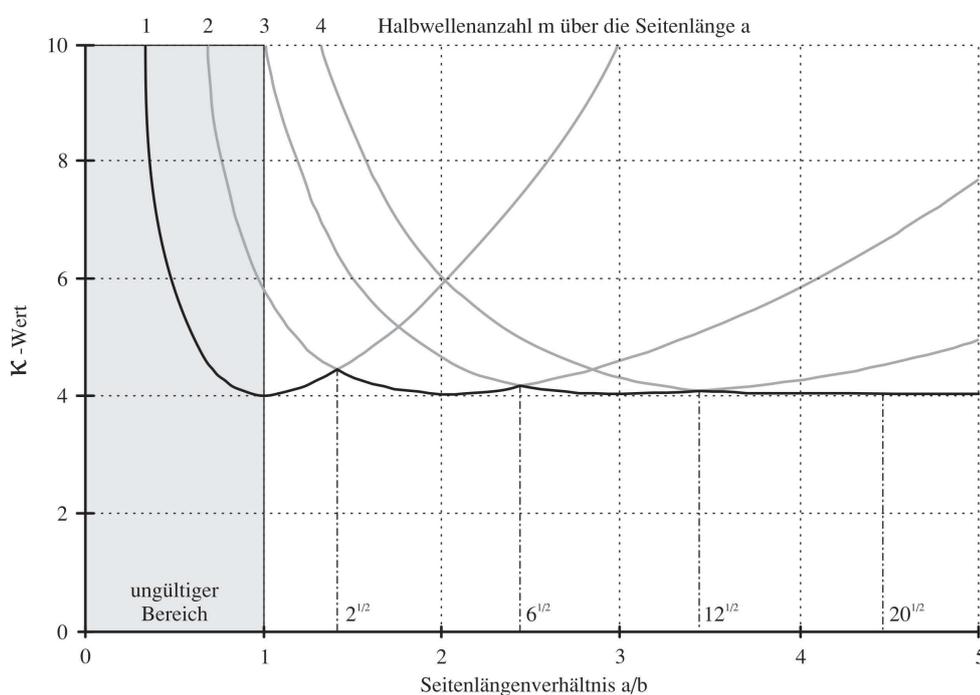
Plattendicke und  $\nu$  für die Poissonzahl.

Unter Anwendung der nachstehenden Gleichung (3.4):

$$\kappa(m, n = 1) = \left[ \frac{m \cdot b}{a} + \frac{a}{m \cdot b} \right]^2 \quad (3.4)$$

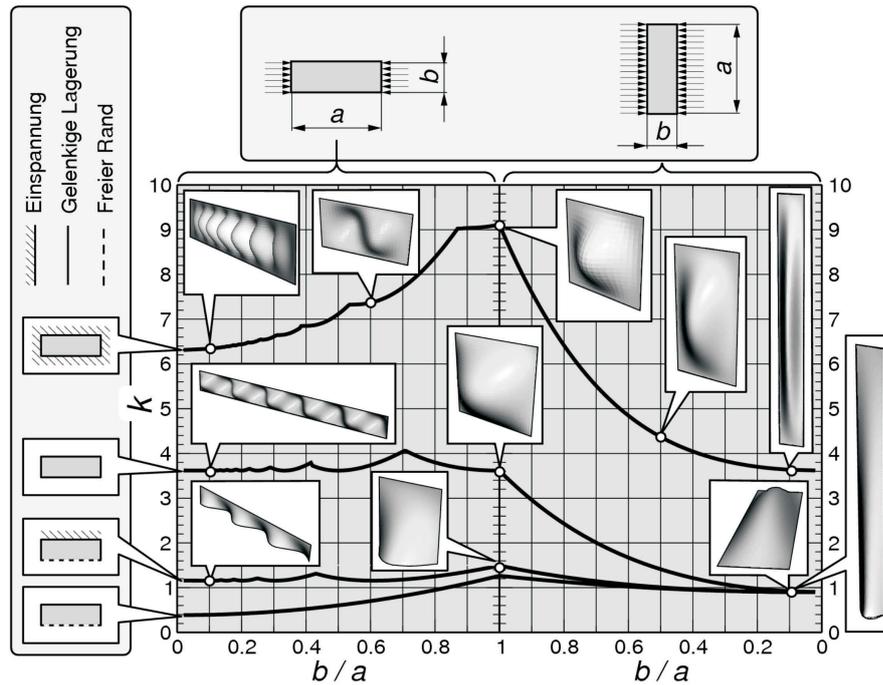
ist die Berechnung des  $\kappa$ -Wertes für lange allseits gelenkig gelagerte Plattenstreifen möglich.

Alternativ dazu kann der  $\kappa$ -Wert auch grafisch ermittelt werden - siehe Abbildung 3.4.



**Abbildung 3.4:** Diagramm zur grafischen Ermittlung des  $\kappa$ -Wertes: Der Wert  $\kappa$  für die Berechnung der kritischen Membranspannung  $\sigma^*$  ist von der Halbwellenzahl  $m$  über die Seitenlänge  $a$ , der Halbwellenzahl  $n$  über die Seitenlänge  $b$ , den Randbedingungen, dem Seitenlängenverhältnis  $a/b$  und von der Art der Belastung abhängig. Mit dem dargestellten Diagramm ist eine grafische Ermittlung des  $\kappa$ -Wertes für lange, allseits gelenkig gelagerte Plattenstreifen unter Längsdruck und einer Halbwellenzahl  $n=1$  möglich [64].

Weiters ist eine Zusammenfassung des Terms der Plattenbiegesteifigkeit für homogene, linear elastische und isotrope Platten  $\kappa \cdot \pi^2 / 12 \cdot (1 - \nu^2)$  aus Gleichung (3.3) zum Beulfaktor  $k$  zulässig und kann über das Diagramm in Abbildung 3.5 bestimmt werden [7, 24, 64, 65].



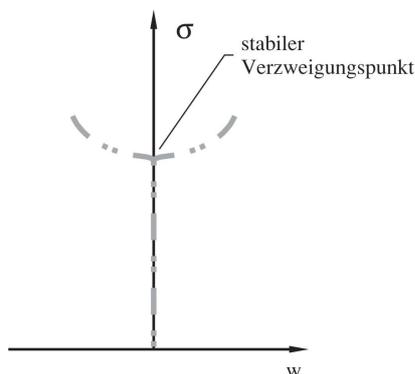
**Abbildung 3.5:** Diagramm zur grafischen Ermittlung des Beulfaktors  $k$ : Das angeführte Beulfaktordiagramm zur grafischen Ermittlung des  $k$ -Wertes hat seine Gültigkeit für rechteckige Platten unter einachsiger Druckbelastung. Dabei ist das Seitenverhältnis  $b/a$  auf der Abszisse aufgetragen und die Art der Lagerung auf der linken Seite des Diagramms dargestellt. Zusätzlich sind die unterschiedlichen Beulfiguren unter einachsigem Druck abgebildet [24].

Damit lässt sich unter der Voraussetzung des elastischen Beulens, d.h.  $\sigma^* < R_{p0,2}$  bzw.  $\sigma^* < R_e$ , für festgelegte Belastungsarten und den verschiedenen Randbedingungen die für den beulkritischen Zustand charakterisierende Membranspannung durch die Gleichung (3.5) [7, 24, 64]:

$$\sigma^* = k \cdot E \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3.5)$$

bestimmen.

Bei der experimentellen Darstellung der auftretenden Instabilitäten unter einachsiger Druckbeanspruchung von allseitig gelenkig gelagerten Rechteckplatten, die ein Seitenverhältnis von 1 aufweisen, kommt es bei der Auswertung der Last/Verschiebungskurve zu den selben Kurvenverläufen wie bei Stäben - siehe Abbildung 3.6. Während des Versuchs wächst die vertikal aufgebrachte Druckspannung, ohne dass die Platte eine horizontale und normal auf die Plattenebene stehende Verschiebung erfährt, bis zum Erreichen der kritischen Druckspannung  $\sigma^*$  an. An diesem Punkt kommt es zum spontanen Verlust der Stabilität, d.h. die Platte beult in eine Richtung aus. Die Richtung der Beulfigur ist dabei nicht vorhersehbar.



**Abbildung 3.6:** Kraft/Verschiebungsdiagramm einer Rechteckplatte: Bei der kontinuierlichen Steigerung der Druckspannung  $\sigma$  kommt es bei idealen Platten oder auch bei idealen Stäben beim Erreichen der kritischen Druckspannung  $\sigma^*$  zum spontanen Beulen der Platte bzw. zum Knicken des Stabes im Bereich des Verzweigungspunktes. Die Richtung ( $\pm w$ ), in die die Beulfigur ausbeult bzw. der Stab ausknickt, unterliegt dem Zufallsprinzip [24].

## 3.2 Schwingungsverhalten von isotropen Rechteckplatten

Dünnwandige Hautfelder geraten unter aerodynamischer oder akustischer Anfachung oder durch Erregung der Randlager schon bei verhältnismäßig geringen Frequenzen in Schwingungen. Dabei kommt es im harmloseren Fall zu störenden Vibrationen in der Gesamtstruktur oder zu ungewollten Dröhngeräuschen. Anderenfalls kann es auch zur Ermüdung in Kerbzonen, z.B. im Bereich von Nietverbindungen, die bei Flugzeugen oder im LKW üblich sind kommen [2, 66].

Bei dieser Problemstellung sollte nicht auf das dynamische Verhalten der Gesamtstruktur eingegangen werden, sondern nur auf die Eigenfrequenz der ungedämpften isotropen Flächen und ihren Randbedingungen. Die Eigenfrequenzen von Platten oder auch Scheiben lassen sich in der Auslegungsphase durch die richtige Wahl der Hautfeldgröße und dem gezielten Verbau von Versteifungen beeinflussen. Weiters hängt die Eigenfrequenz vom Membranspannungszustand ab und kann somit durch die Einbringung von Eigenspannungen angehoben werden [2].

Durch die genannten Maßnahmen ist es möglich, die Eigenfrequenzen von Plattenstrukturen aus den kritischen Frequenzbereichen, die durch die verschiedenen Betriebsfälle auftreten, herauszunehmen. Sollte dies nicht realisierbar sein, ist zumindest darauf zu achten, dass die Felder nur kurzzeitig in Schwingung versetzt werden, wie z.B. beim Anlaufen einer Kraftmaschine bis zum Erreichen der Nenndrehzahl. Bei diesen technischen

Anwendungen kann es zur kurzzeitigen Anregung einzelner Bauteile kommen, da ein verhältnismäßig großes Frequenzband bis zur Betriebsdrehzahl durchlaufen wird.

Ebenso bietet sich durch die Lastabhängigkeit der Frequenz die Möglichkeit einer zerstörungsfreien experimentellen Abschätzung der Beullast [2].

Die Lastabhängigkeit der Eigenfrequenz und der elastischen kritischen Beulgrenze  $\sigma^*$  ergibt sich aus dem Phänomen, dass, wenn der für Druck positiv definierte Lastfaktor den beulkritischen Wert  $k$  annimmt, die Frequenz gemäß der Gleichung (3.6) gegen Null geht [2].

$$\omega_{fmn}^2 = \frac{B}{\rho \cdot t} \cdot \left(\frac{\pi}{b}\right)^4 \left\{ \left[ m^2 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2 \right]^2 - k \cdot m^2 \cdot \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right\} \quad (3.6)$$

Dabei errechnet sich die Biegesteifigkeit  $B$  aus [2]:

$$B = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (3.7)$$

und dem Beulwert  $k$  aus [2]:

$$k \equiv \frac{p_{xx}}{B} \cdot \left(\frac{b}{\pi}\right)^2 = \frac{12 \cdot (1 - \nu^2)}{\pi^2} \cdot \frac{p_{xx}}{E} \cdot \frac{b^2}{t^3}, \quad (3.8)$$

wobei  $p_{xx}$  als der einachsige Druck in x-Richtung definiert ist.

Da die Platte aber immer mit dem niedrigsten Lastwert ausbeult, gilt dies nur für diejenige Frequenz  $\omega_{fmn}$ , deren Schwingungsform der 1. Beulform entspricht, d.h. bei einer quadratischen oder quergedrückten Platte für die Grundfrequenz ( $m=n=1$ ) [2].

Solange die Schwingungsamplituden klein sind, ist der Zusammenhang von Frequenzquadrat und Belastung in jedem Fall linear. Dies kann zu einer zerstörungsfreien Versuchsbestimmung der Beulgrenze genützt werden, was besonders bei analytisch schwer zu definierenden Randbedingungen Vorteile bietet.

Hat man bei wenigstens zwei Lastniveaus die Frequenzen  $\omega_{fmn}^2$  ermittelt, so erhält man durch die Verbindung dieser Punkte durch eine Verbindungsgerade und deren Schnitt mit der Abszisse ( $\omega_{fmn}^2 = 0$ ) auf grafischem Weg die eigentliche Beulgrenze  $\sigma^*$  [2].

Mit der Formel (3.9) lässt sich die Eigenfrequenz  $f_{rmn}$  einer isotropen Platte analytisch berechnen [2]:

$$f_{rmn} = \frac{\omega_{fmn}}{2 \cdot \pi} = k_{fmn} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \frac{t}{b^2}. \quad (3.9)$$

Der in Formel (3.9) angeführte Frequenzfaktor  $k_{f_{mn}}$  erfasst die Geometrie und die Randbedingungen des Hautfeldes und lässt sich mit Formel (3.10) berechnen [2]:

$$k_{f_{mn}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi^4 \cdot n^4}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left\{ \left[ \left( \frac{m \cdot b}{n \cdot a} \right)^2 + 1 \right]^2 + \frac{\Omega}{\pi^4 \cdot n^4} \cdot \left[ \left( \frac{n \cdot a}{m \cdot b} \right)^2 + 1 \right]^{-2} \right\} + \frac{\sigma_{xx}}{E} \cdot \left( m \cdot \pi \cdot \frac{b^2}{a \cdot t} \right)^2} . \quad (3.10)$$

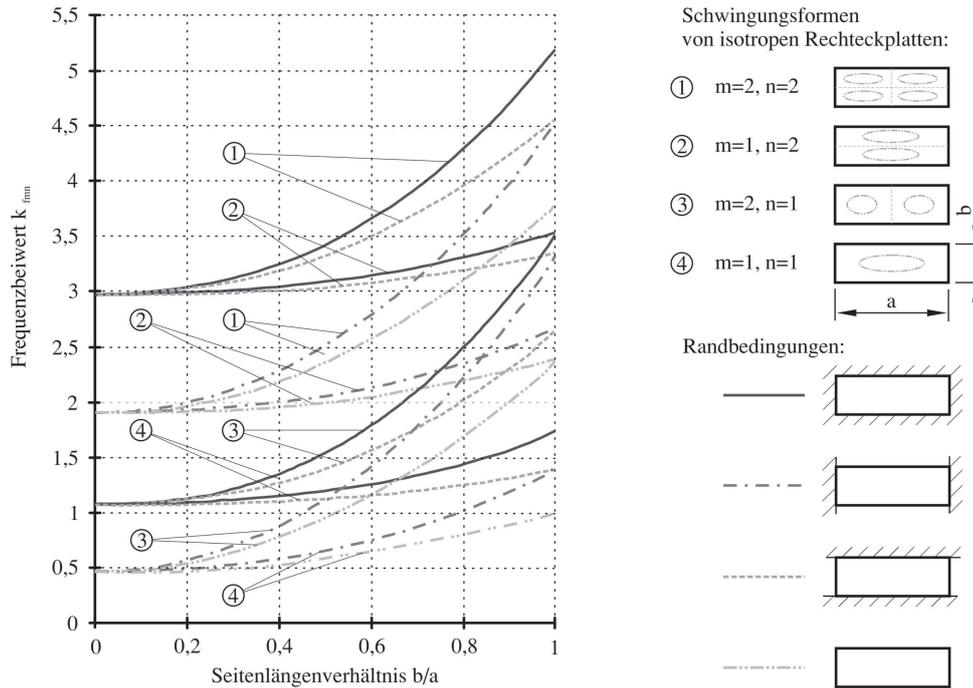
Das Formelzeichen  $\Omega$  steht dabei für die Krümmung der Schale und berechnet sich aus [2]:

$$\Omega \equiv \frac{D \cdot b^4}{B \cdot r^2} = 12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left( \frac{b^2}{r \cdot t} \right)^2 \approx 700 \cdot \left( \frac{h}{t} \right)^2 . \quad (3.11)$$

Die verwendete Variable  $D$  entspricht der Membransteifigkeit ( $D = E \cdot t$ ),  $r$  entspricht dem Krümmungsradius und  $h$  beschreibt die Krümmungshöhe. Bei ebenen Platten ist  $\Omega$  gleich Null zu setzen.

In Formel (3.10) bezeichnet der erste Term unter der Wurzel den Anteil der Biegestützung und der zweite Term die Membranstützung.

Der Frequenzfaktor  $k_{f_{mn}}$  kann ebenso graphisch anhand eines Diagramms für isotrope Rechteckplatten ermittelt werden - siehe Abbildung 3.7 [2].



**Abbildung 3.7:** Diagramm zur grafischen Ermittlung des Frequenzbeiwertes: In die grafische Ermittlung des Frequenzbeiwertes  $k_{f_{mn}}$  fließen das auf der Abszisse aufgetragene Seitenverhältnis  $b/a$ , die Schwingungsformen, die über die Anzahl der Halbwellen  $m$  und  $n$  definiert werden und in Kategorien 1 bis 4 unterteilt sind sowie die Art der Randeinspannung ein, wobei zwischen fester und gelenkig gelagerter Einspannung und freien Seitenflächen unterschieden wird [2].

Somit ist die Eigenfrequenz einer isotropen Rechteckplatte proportional zur Hautdicke  $t$  und zur Materialschallgeschwindigkeit  $(E/\rho)^{1/2}$ . Diese für das Schwingungsverhalten maßgebende Materialkenngröße ist für die Leichtbauwerkstoffe Aluminium, Magnesium, Titan, Stahl und Holz übereinstimmend und beträgt  $\approx 5.000$  m/s. Durch den Frequenzfaktor  $k_{f_{mn}}$  werden Geometrie und Randbedingungen der Platte in der Berechnung der Eigenfrequenz berücksichtigt.

### 3.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften von Rechteckplatten

Im Allgemeinen wird unter der Verbesserung der statischen Eigenschaften von Platten die Steigerung der Beulstabilität und unter den dynamischen Eigenschaften die Verminderung der Schwingungsanfälligkeit verstanden. Der Stand der Technik zielt dabei auf

die Erhöhung des Trägheitsmomentes der Gesamtstruktur ab. Speziell für Blechbauteile kommen die folgenden Versteifungsmaßnahmen zur Anwendung [3]:

- Versteifung durch schalenförmige Gestaltung des Plattenbauteils,
- Anordnung von Sicken im Blech,
- Anordnung von form- und/oder stoffschlüssig verbundenen Stringern,
- spezielle Verformung der Randbereiche, der Durchzüge und der Falze,
- Steigerung der Plattendicke durch Innenkernstrukturen und versteifend wirkende Deckflächen, oder
- Steigerung der Plattendicke.

Zusätzlich zu den genannten konstruktiven Möglichkeiten werden Werkstoffverbunde, wie GLARE oder anderer Sandwichkonstruktionen angewendet. Vorteil dieser Lösung ist ein maßgeschneidertes Bauteil, welches nicht nur isotrope sondern auch je nach Anwendungsfall anisotrope Werkstoffeigenschaften besitzt.

Ob oder um wie viel das Gesamtgewicht gesteigert wird, richtet sich nach der Art und der Ausführung der konstruktiven Versteifungsmöglichkeit. Im ökonomisch optimalen Fall des fertigungstechnischen Leichtbaus werden die Maßnahmen zur Verbesserung der Eigenschaften der Platten direkt während des Fertigungsprozesses eingebracht.

Detaillierte Ausführungen zu diesem Themenbereich, d.h. zu den Versteifungsmaßnahmen und den Konstruktionsprinzipien finden sich in Kapitel 2.3 und in Kapitel 2.4.

## 4 Fertigungstechnische Methoden zur Verbesserung des Stabilitätsverhaltens von Rechteckplatten

Ziel der Untersuchungen war es, mit Hilfe von fertigungstechnischen Methoden, die keinen Anstieg der Gesamtmasse einer quadratischen Platte aus handelsüblichem Tiefziehstahl hervorrufen, das Stabilitäts- und Schwingungsverhalten maßgeblich zu verbessern.

Dabei kamen drei verschiedene Methoden zum Einsatz, die die lokale Einbringung von Eigenspannungen in das Material und/oder die punktförmige und linienartige Veränderung des Trägheitsmomentes beinhalten.

Zu den angewandten Methoden gehören:

- die gezielte Eigenspannungseinbringung durch thermomechanische Plastifizierung mittels Lasereinwirkung,
- die Veränderung des Trägheitsmomentes durch Wölbstrukturierung der Bleche und
- die generische und die FEM unterstützte Verlegung von Halbrundsicken in den Platten.

Allen untersuchten Methoden ging im Vorfeld eine Simulation des Herstellungsprozesses voraus, um die Vorgänge während der Herstellung zu visualisieren und die verbleibenden Effekte in den Bauteilen untersuchen zu können.

Durch die reale Bauteilfertigung und die Umsetzung sowie die Variation der beschriebenen Methoden konnten die Simulationsergebnisse verifiziert und mit alternativen Untersuchungsmethoden verglichen werden.

Eine abschließende Stabilitätsuntersuchung und eine Ermittlung der 1. Eigenfrequenz machten eine Charakterisierung der Methoden und der Versuchsvarianten sowie deren Auswirkungen und Zusammenhänge auf das statische und dynamische Verhalten objektiv erfassbar.

## 4.1 Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung

### 4.1.1 Motivation zur Eigenspannungseinbringung in Platten

Die Einbringung von Eigenspannungen in Strukturen kann das Stabilitätsverhalten und/oder die Eigenfrequenz maßgeblich verändern. Die Verbesserung der statischen Eigenschaften, d.h. die Erhöhung der Beullast bei plattenartigen Bauteilen und der dynamischen Eigenschaften, wie die Erhöhung der 1. Eigenfrequenz, kann durch die gezielte Einbringung von Eigenspannungen ohne eine Steigerung der Gesamtbauteilmasse und ohne maßgebliche Veränderung der Bauteilform erreicht werden [67, 68].

Bei der lokalen Eigenspannungseinbringung kamen ein Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser, kurz Nd-YAG Laser, und ein Diodenlaser zum Einsatz. Die gezielte Einbringung von Eigenspannungen durch Laserbestrahlung wurde im Zuge der Untersuchungen simuliert und den analytischen Verfahren gegenübergestellt.

Weiters erfolgte ein Vergleich von verschiedenen vordefinierten Linien- und Punktemustern wie auch von unterschiedlichen Einbringungsabfolgen der Lasereinzelpunkte. Mit den laserbestrahlten Probeblechen konnten abschließend die Auswirkungen auf das Beulverhalten und das Schwingungsverhalten aufgezeigt werden [69].

### 4.1.2 Simulationsmodell einer punktförmigen Lasereinwirkung

Um die Spannungsverläufe bei der Entstehung von Eigenspannungen während des Prozesses visualisieren und untersuchen zu können, wurde ein Simulationsmodell erstellt. Weiters lassen sich anhand der Simulationsergebnisse die Laserparameter zielgerichtet variieren. Für das nichtlineare Finite Elemente Modell wurden die Simulationsprogramme Deform 2D<sup>TM</sup> und Deform 3D<sup>TM</sup> in Kombination mit dem Vernetzungsprogramm M23<sup>TM</sup> eingesetzt [70].

Für die Simulation der Auswirkungen der Lasereinzelpunktbestrahlungen wurden die Laserstrahlparameter und die nichtlinearen temperaturabhängigen physikalischen Materialeigenschaften des Stahles DC01, der auch im Experiment Verwendung fand, für die Abbildung des Prozesses herangezogen [71–73].

Das Simulationsmodell der Laserbestrahlung wurde auf einer Platte in den Dimensionen 50 mm x 50 mm x 0,75 mm und den temperaturabhängigen physikalischen Materialdaten des Tiefziehstahls DC01 mit der Werkstoffnummer 1.0330 erstellt.

Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse der chemischen Analyse, die mit Hilfe der funktenspektrometrischen Untersuchung von vier verschiedenen Werkstoffproben gewonnen wurden, zusammen [74, 75].

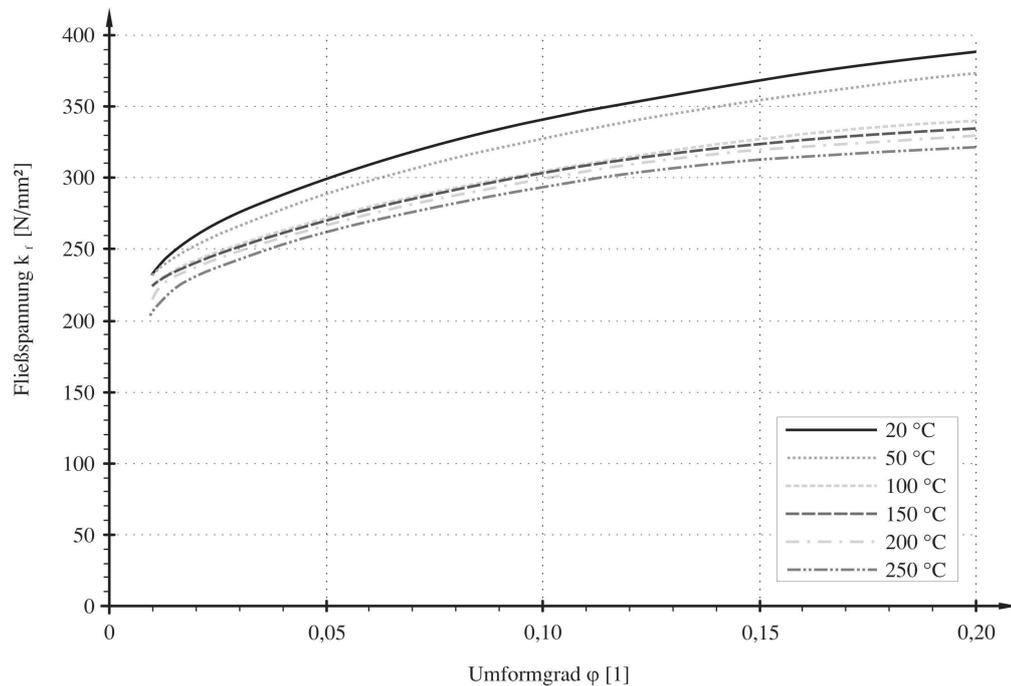
**Tabelle 4.1:** Chemische Zusammensetzung vom Werkstoff 1.0330: Angeführt ist die chemische Zusammensetzung des Tiefziehstahls DC01 [75].

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr
Einheit	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}_{arithm}$	0,067	0,025	0,190	0,0049	0,0046	0,048

Element	Ni	Mo	Al	Cu	N	Fe
Einheit	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}_{arithm}$	0,041	0,0036	0,048	0,125	0,0102	99,391

Weiters wurden die folgenden temperaturabhängigen metallphysikalischen Werkstoffkennwerte, die für niedriglegierte Kohlenstoffstähle ihre Gültigkeit besitzen, in das Simulationsmodell implementiert [71, 76]:

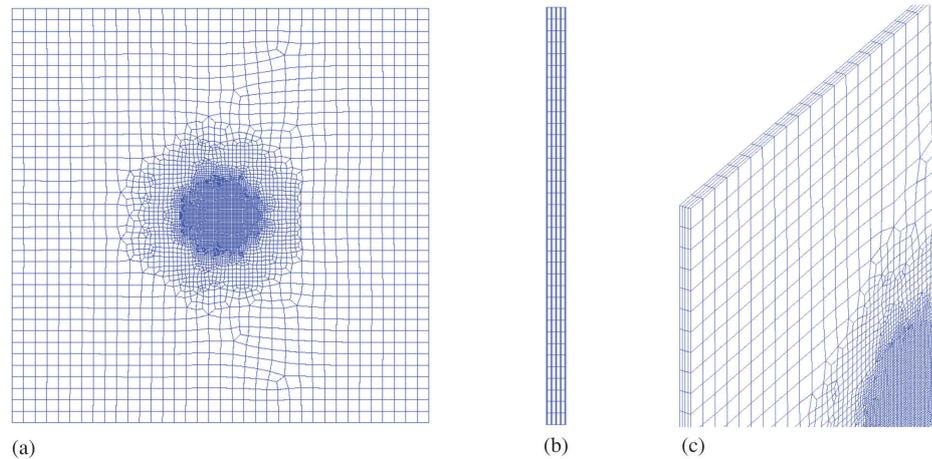
- Dichte  $\rho$
- E-Modul  $E$
- Querkontraktionszahl nach Poisson  $\nu$
- Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$
- Wärmekapazität  $c_p$
- Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- Fließkurve des Tiefziehstahls DC01 - siehe Abbildung 4.1



**Abbildung 4.1:** Fließkurven des DC01 bei verschiedenen Temperaturen: Dargestellt sind die im Zugversuch experimentell ermittelten Fließkurven bei verschiedenen Temperaturen und einer Umformgeschwindigkeit von weniger als 0,1 1/s.

Die Vernetzung des Modells erfolgte in zwei Abschnitten. Im Softwareprogramm Deform 2D<sup>TM</sup> wurde die Metallplatte zweidimensional mit Quadelementen und Triaelementen vernetzt. Im Nahbereich des Zielgebietes des Laserpunktes erfolgten zwei Netzfeinungen, um eine möglichst exakte Berechnung der gewünschten Ergebnisse garantieren zu können - siehe Abbildung 4.2 (a).

Mittels vier weiterer Netzebenen im Abstand von jeweils 0,1875 mm erfolgte durch das Softwareprogramm M23<sup>TM</sup> die Erstellung des dreidimensionalen Modells mit der Gesamtdicke von 0,75 mm. Wie in Abbildung 4.2 (b) und (c) dargestellt, ergibt sich ein dreidimensionales Modell der DC01 Platte mit insgesamt 20812 Elementen.



**Abbildung 4.2:** Vernetzung der DC01 Platte für die Simulation einer punktförmigen Laserbestrahlung: (a) zweidimensionale Vernetzung der DC01 Platte mit zwei unterschiedlichen Netzfeinungen in einem Radius von 5 mm und 10 mm um das Zentrum der Laserpunktmitte; (b) dreidimensionale Vernetzung durch regelmäßige Vervielfältigung des 2D Netzes über die Plattdicke; (c) isometrische Ansicht des dreidimensionalen Netzes.

In der Simulation wurde die Energie des Laserstrahls in der Höhe von 520 W zentrisch auf die oberflächlichen Knotenpunkte der Platte in einem Radius von 4,5 mm für 0,5 s aufgebracht. Der Emissionsgrad wurde mit 0,97 angenommen [70, 72, 77].

### 4.1.3 Einbringung der Eigenspannungen durch Laserbestrahlung

Der experimentelle Teil der Einbringung von Eigenspannungen mit gezielter Laserbestrahlung wurde in drei verschiedenen Versuchsserien durchgeführt.

Bei der 1. und 2. Serie kam ein in Lage und Position CNC gesteuerter Nd-YAG Laser zur Anwendung. Die 3. Serie wurde mit einem in der vertikalen z-Achse beweglichen aber sonst starren Diodenlaser bewerkstelligt.

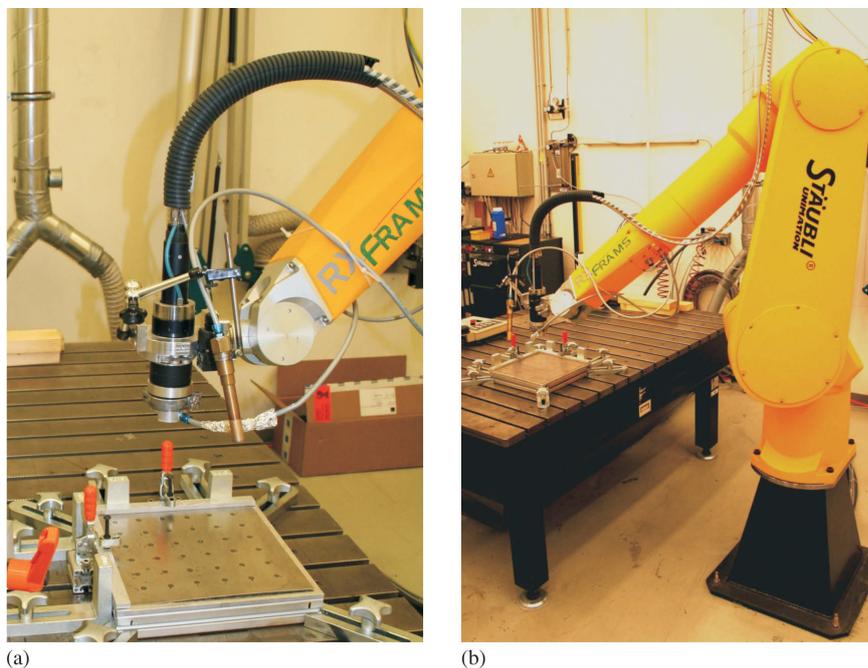
Der Wechsel zwischen Nd-YAG Laser und Diodenlaser war notwendig, um ein möglichst großes Leistungsspektrum abzudecken. Somit konnten mit dem Diodenlaser Leistungen bis 580 W und mit dem Nd-YAG Laser ein Leistungsspektrum von 670 W bis 2 kW erreicht werden [77–79].

Als Probenmaterialien wurden DC01 Bleche mit einer Dicke von 0,75 mm verwendet, die durch eine Wasserstrahlschneideanlage in Quadrate mit einer Seitenlänge von 280 mm geschnitten wurden. Die verwendete Zuschneidemethode mit einem Wasserstrahl, der zusätzlich Quarzsand als Schneidmittel enthält, bietet den Vorteil, dass keine weiteren Eigenspannungen in die Randbereiche der Bleche eingebracht werden.

Nach der Entgratung der Seitenkanten erfolgte die Reinigung von korrosiven Erscheinungen an der Blechoberfläche mit einem in Mehrzweckmaschinenöl getränkten Schleifvlies. Die Endreinigung wurde mit handelsüblichem Zellstoffpapier vorgenommen. Durch diese Behandlung konnte sichergestellt werden, dass keinerlei Verschmutzungen oder Flugrost großflächig oder stellenweise den Emissionskoeffizienten verändern.

Hinsichtlich der Fixierung der Bleche während der Laserpunkteinbringung wurde eine L-förmige Einspannung aus Aluminium gewählt, die einerseits die Bleche vor unerwünschtem Verrutschen sichert und andererseits eine möglichst freie wärmebedingte Materialdehnung gewährleistet.

Die 1. Herstellungsserie von Blechen wurde mit einem Nd-YAG Laser des Laserzentrums Leoben der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH durchgeführt, der über eine Maximalleistung von 2 kW verfügt - siehe Abbildung 4.3. Der vom Gerät erzeugte 670 W starke Laserstrahl erzielt an der Blechoberfläche eine eingehende Leistung von ca. 590 W. Der Fokusbereich des Lasers wurde auf 9 mm und die Bestrahlungsdauer mit 2,1 s festgelegt. Die Abkühldauer betrug mindestens 20 s bevor der nächste Einzelpunkt eingebracht wurde [78].

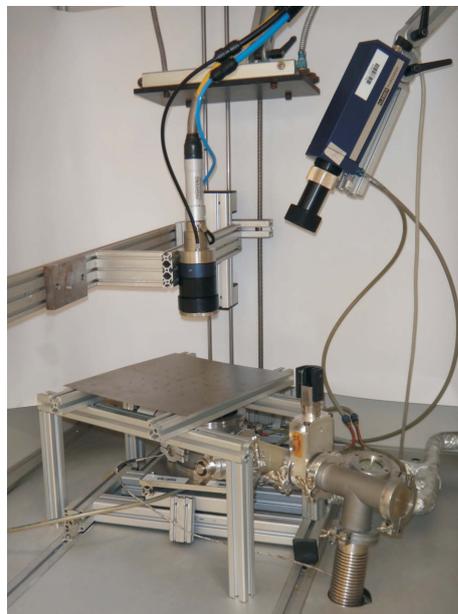


**Abbildung 4.3:** Nd-YAG Laser: Festkörperlaser mit einer maximalen Leistung von 2 kW, der durch einen CNC gesteuerten Roboterarm in alle Raumrichtungen beweglich ist. Zur Temperaturmessung wurde zusätzlich ein Pyrometer installiert. (a) Laserquelle über einem Versuchsblech, in das ein regelmäßiger 6x6 Einzellaserpunkteraster eingebracht wurde. Weiters ist die L-förmige Platteneinspannung entlang der linken und der oberen Plattenseite zu erkennen; (b) Laserquelle mit CNC gesteuertem Roboterarm zur Einbringung der Linien- und Punktemuster.

Bei der 2. Herstellungsserie wurde derselbe Lasertyp wie bei der ersten Serie verwendet, jedoch mit einer auf 580 W reduzierten Leistung. Durch die Senkung der eingesetzten Energie konnten Auswirkungen unterschiedlicher Leistungsniveaus auf die Eigenspannungsentwicklung, das Plattenverhalten während der Einbringung und das Stabilitätsverhalten bei der anschließenden Beulprüfung untersucht werden. Eine weitere Senkung der Laserleistung ist bei diesem Lasertyp aus technischen Gründen nicht möglich.

Die Leistung von 580 W entspricht etwa einer Leistung von 515 W bis 520 W an der Blechoberfläche. Weiters wurde die Bestrahlungsdauer bei den Einzelpunkten von 2,1 s auf 0,5 s verringert. Der Fokusbereich von 9 mm und die Abkühlzeit zwischen zwei Bestrahlung von mindestens 20 s blieben unverändert [77].

Die 3. Herstellungsserie wurde mit einem 1,8 kW starken Diodenlaser des Material Center Leoben (MCL) durchgeführt, der in Abbildung 4.4 dargestellt ist. Aufgrund des Lasertyps war es möglich, die Leistung auf 300 W zu reduzieren [73, 79]. Der Fokusbereich beschränkte sich aus anlagentechnischen Gründen auf 6 mm, da der Laser nicht in der vertikalen z-Achse justierbar ist [79]. Die Bestrahlungsdauer wurde durch Erkenntnisse aus Vorversuchen auf 0,9 s beschränkt, da sich laut geeichtem Pyrometer bereits Temperaturen von 500 °C bis 550 °C einstellen [80].



**Abbildung 4.4:** Diodenlaser: In x-/y-Ebene starr montierter Diodenlaser mit einer Maximalleistung von 1,8 kW und einem aus anlagentechnischen Gründen auf maximal 6 mm beschränkten Laserstrahldurchmesser. Im oberen rechten Anlagenteil befindet sich ein Pyrometer, das die Temperaturkurve während der Laserbestrahlung aufzeichnet. Die Versuchsplatten werden per Hand und mit Hilfe einer optischen Positionsanzeige in die entsprechende Lage gebracht. Dabei liegt die Platte unfixiert auf einem Aluminiumarbeitstisch auf.

Die einzelnen Laserparameter der drei Herstellungsserien sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

**Tabelle 4.2:** Laserparameter der Herstellungsserien: In der Tabelle sind die verwendeten Lasertypen und die Lasereinstellungen der drei Versuchsserien zusammengefasst.

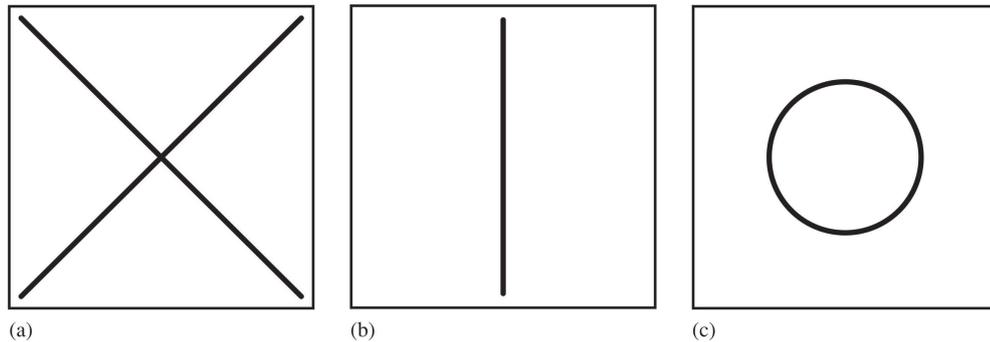
Herstellungsserie	Lasertyp	Leistung	Bestrahlungsdauer	Laserstrahldurchmesser
1	Nd-YAG Laser	670 W	2,1 s	9 mm
2	Nd-YAG Laser	580 W	0,5 s	9 mm
3	Diodenlaser	300 W	0,9 s	6 mm

#### 4.1.4 Eingebachte Lasermuster und angewandte Lasersequenzen

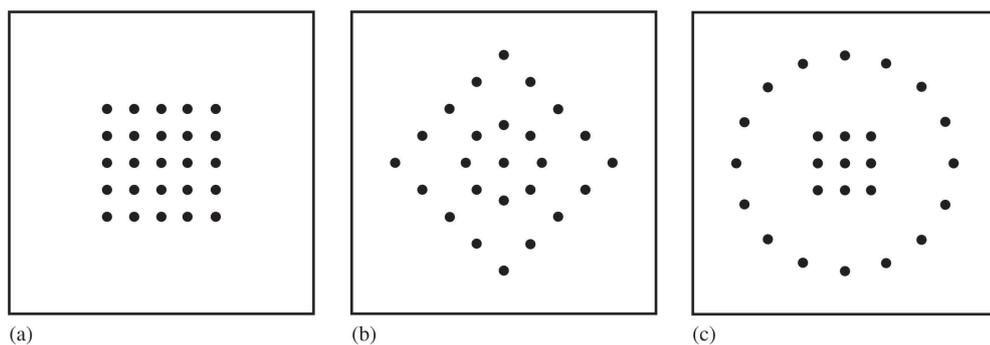
Bei der experimentellen Untersuchung zur Steigerung der Beulsteifigkeit und der Auswirkungen auf die Eigenfrequenz von Platten, in denen mittels Lasertechnik Eigenspannungen induziert wurden, kamen zwei verschiedene Mustertypen zur Anwendung. Zum einen wurden durchgängige Linienmuster eingebracht und zum anderen wurden die Auswirkungen von Punktemustern auf die Platten und deren statische und dynamische Eigenschaften analysiert.

In Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 sind die eingebrachten Linien- und Punktemuster dargestellt und näher beschrieben.

Da der Diodenlaserkopf nicht an einem CNC gesteuerten Roboterarm montiert war, sind bei diesem Lasertyp generell keine durchgängigen Linienmuster möglich.



**Abbildung 4.5:** Linienmuster der Laserbestrahlungen: Durch den CNC gesteuerten Nd-YAG Laser wurden die dargestellten Linienmuster eingebracht. Dabei handelt es sich um eine (a) X-, (b) um eine I- und (c) um eine O-förmige Linienanordnung. Die X-förmige Anordnung beinhaltet zwei zentrisch eingebrachte Linien mit einer Länge von jeweils 276 mm. Die I-förmige Laserlinie wurde ebenso durch das Plattenzentrum verlaufend gefertigt und hat eine Länge von 260 mm. Die O-förmige Anordnung besteht aus einem zentrisch eingebrachten Kreis mit einem Durchmesser von 70 mm.



**Abbildung 4.6:** Punktemuster der Laserbestrahlungen: Mit beiden Lasertypen wurden in allen drei Herstellungsserien die Punktemuster (a) 5x5 Punkteraster, (b) Kreis in Rhombus und (c) Quadrat in Kreis in die quadratischen DC01 Platten eingebracht. Alle Punkteraster sind um das Plattenzentrum angeordnet. Der Durchmesser des Kreises in Muster (b) mit 70 mm und in Muster (c) mit 100 mm sowie die Diagonale des Rhombuses von 200 mm blieben während der gesamten Untersuchungen gleich.

Die Abbildung 4.7 gibt bezüglich der drei verschiedenen Herstellungsverfahren und der angewandten Muster, die mit dem Nd-YAG und dem Diodenlaser eingebracht wurden, einen Überblick über sämtliche Versuchsreihen.

Herstellungsserie						
1	•	•	•	•	•	•
2	•	•	•	•	•	•
3				•	•	•

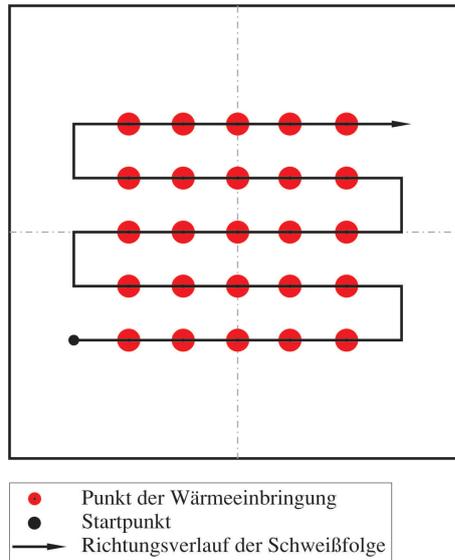
**Abbildung 4.7:** Übersichtsdarstellung der eingebrachten Lasermuster: Veranschaulicht sind in tabellarischer Form die mit dem Nd-YAG Laser in Herstellungsserie 1 und 2 eingebrachten Linien- und Punktemuster. Die in Herstellungsserie 3 eingebrachten Punktemustern wurden mit einem Diodenlaser durchgeführt. Bei der Darstellung sind die hergestellten Muster mit einem • gekennzeichnet.

Da zum thermomechanischen Plastifizieren lokal ein hoher Energieeintrag nötig ist, kann bei den verwendeten Blechdicke von 0,75 mm von einem teils beachtlichen Schweißverzug ausgegangen werden [81]. Diese Deformationen und Abweichungen von der Planheit der Bleche wirken sich in weiterer Folge negativ auf das Stabilitätsverhalten aus.

Mit diesem Hintergrund wurden vier verschiedene Punktfolgen definiert, um dadurch den Zusammenhang zwischen Laserpunktemusterfolge und dem Schweißverzug zu untersuchen. Dazu wurde jeweils ein 5x5 Punkteraster, wie in Abbildung 4.6 (a) dargestellt, axialsymmetrisch in die Blechmitte mit folgenden Abfolgen der Einzelpunkteinbringung experimentell ausgewertet:

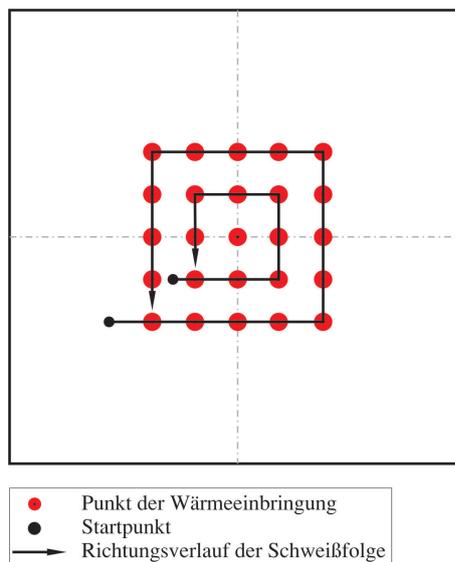
- Sinussequenz,
- Ringsequenz,
- Spiralsequenz und
- Pilgerschrittsequenz.

Bei der Sinussequenz werden, wie in Abbildung 4.8 dargestellt, die 25 Punkte reihenweise und Punkt für Punkt mit einer Abkühlzeit von jeweils mindestens 20 Sekunden eingebracht. Dabei wechselt die Richtung der Einbringung nach jeder Reihe.



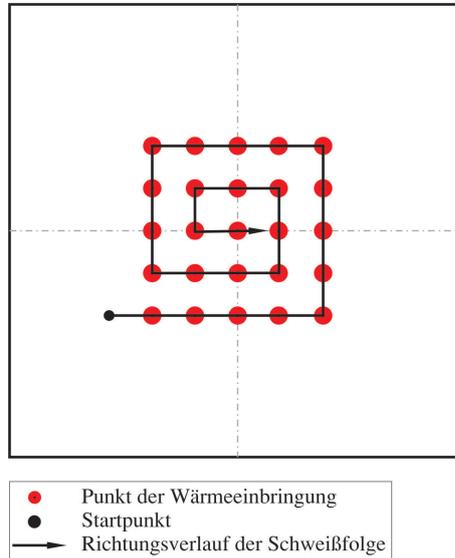
**Abbildung 4.8:** Sinussequenz: Die Laserpunkte werden einzeln der Reihe nach mit wechselnder Richtung eingebracht.

Bei dem in Abbildung 4.9 dargestellten Einbringungszyklus werden die einzelnen Punkte des äußersten Rings nacheinander eingebracht. Dieser Vorgang wird nach Fertigstellung des äußeren Rings beim nächsten weiter innen liegenden Ring wiederholt und zieht sich bis zum Zentrum des Rasters durch.



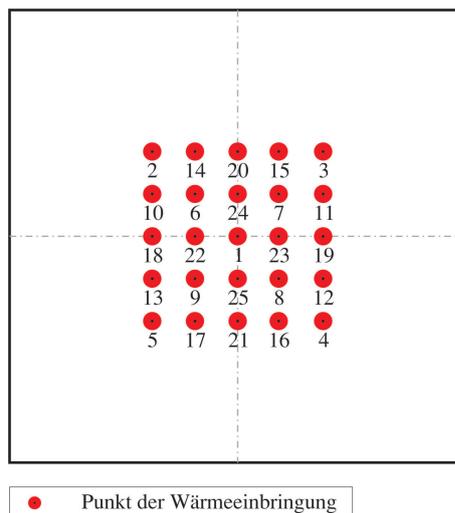
**Abbildung 4.9:** Ringsequenz: Die Laserpunkte werden ringförmig vom äußersten Ring beginnend bis zum innersten Ring nacheinander eingebracht. Der Punkt im Zentrum des 25 Punkterasters wird am Schluss eingebracht.

Bei der Spiralsequenz (Abbildung 4.10) erfolgt die Punkteinbringung spiralförmig gegen den Uhrzeigersinn von außen nach innen bis zum Zentrum des 5x5 Punkterasters.



**Abbildung 4.10:** Spiralsequenz: Beim Spiralverfahren werden die Laserpunkte von außen nach innen bis zum Rastermittelpunkt eingebracht.

Bei der Pilgerschrittsequenz werden die Laserpunkte, wie in Abbildung 4.11 gezeigt, systematisch nach einem vordefinierten Abfolgeplan eingebracht.



**Abbildung 4.11:** Pilgerschrittsequenz: Beim Pilgerschrittverfahren werden die Laserpunkte nach einem vorgegebenen Abfolgeplan eingebracht.

Zusätzlich zur Untersuchung der verschiedenen Abfolgen und deren Auswirkungen auf die Deformation der Bleche wurde auch der Punkteabstand im 25 Punkteraster zwischen 25 mm und 40 mm variiert, um dessen Auswirkungen und Zusammenhänge auf die Vordeformationen zu analysieren.

#### 4.1.5 Untersuchungen zur Beulstabilität von laserbehandelten Platten

In den Untersuchungen zur Beulsteifigkeit wurde vor allem das Verhalten der laserbehandelten Bleche in Bezug auf die kritischen Beulspannungen  $\sigma^*$  und ihrem Kraft/Verschiebungsverhalten experimentell analysiert.

Dabei wurde nur das stabile elastische Beulverhalten berücksichtigt, bei dem keine plastischen Verformungen auftreten. Das instabile Nachbeulverhalten ist nicht Teil der Untersuchungen, da beim Aufkommen dieses Instabilitätsverhaltens bereits ein Bauteilversagen vorliegt.

Theoretisch lässt sich die kritische elastische Beulspannung  $\sigma^*$  mit der Formel (3.3) bzw. mit der Formel (3.5) unter Zuhilfenahme des Diagramms in Abbildung 3.5 berechnen [5, 64].

An einer unbehandelten DC01 Platte in den Dimensionen 280 mm x 280 mm x 0,75 mm entspricht bei allseitig gelenkiger Einspannung die kritische Beulspannung  $\sigma^*$  laut Gleichung (3.5):

$$\sigma^* = 3,6 \cdot 210.000 \text{ N/mm}^2 \cdot \left( \frac{0,75 \text{ mm}}{280 \text{ mm}} \right)^2 = 5,42 \text{ N/mm}^2. \quad (4.1)$$

Das heißt, dass die im Experiment verwendeten DC01 Platten laut Berechnung bei einer Kantenbelastung von

$$\text{Kantenbelastung} = \sigma^* \cdot t = 5,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,75 \text{ mm} = 4,01 \text{ N/mm} \quad (4.2)$$

beziehungsweise bei einer Beulkraft von

$$\text{Beulkraft} = \sigma^* \cdot b \cdot t = 5,42 \text{ N/mm}^2 \cdot 280 \text{ mm} \cdot 0,75 \text{ mm} = 1.138,2 \text{ N} \quad (4.3)$$

einen spontanen, wie in Kapitel 3 beschriebenen, Stabilitätsverlust erleiden [82].

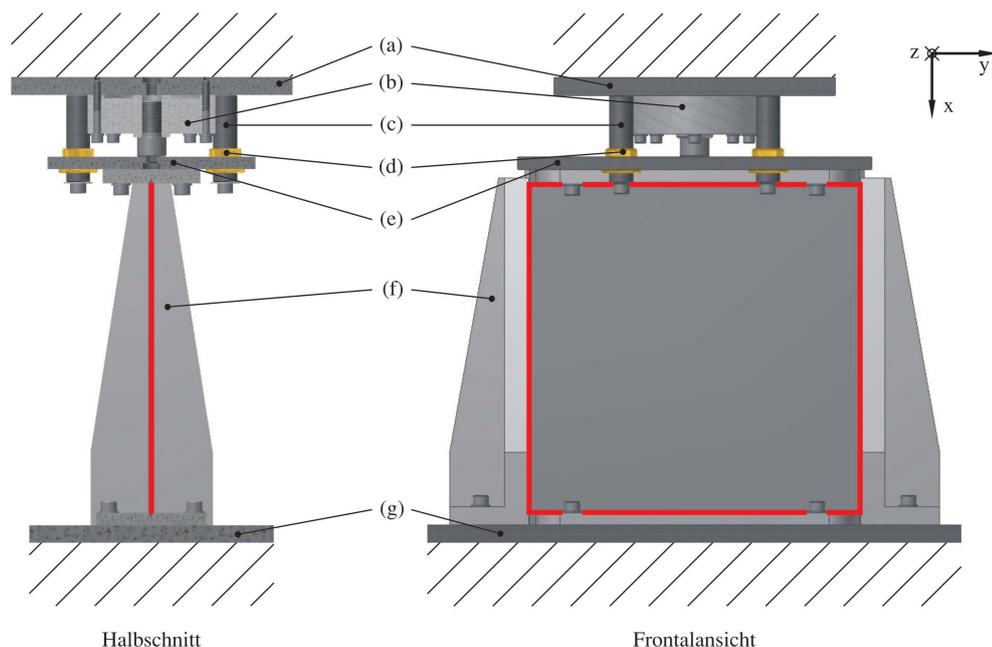
Für den experimentellen Nachweis der Beulstabilität wurde ein eigens dafür konstruierter Beulprüfstand eingesetzt. Die experimentelle Versuchsanordnung sah eine allseitig

gelenkige Einspannung der Platten in eine  $60^\circ$  V-Nut vor, ähnlich wie in Literatur [83] beschrieben (siehe Abbildung 4.12).

Die beiden seitlichen Steher sind für einen Platteneinbau bzw. Plattenwechsel entfernbar und werden über Schraubverbindungen arretiert.

Die untere Nutenplatte ist auf vier Kautschukpuffern gelagert und mit vier Schrauben in der Grundplatte des Prüfstandes fixiert. Die obere Nutenplatte ist in derselben Art und Weise wie die untere gelagert und mit der vertikal verfahrbare Führungsplatte verschraubt.

Die Führungsplatte ist durch Bronzegleitlagerbuchsen, die durch Gleitbahnenöl geschmiert werden, vertikal verschiebbar an vier geschliffenen und polierten Führungssäulen angebracht. Durch diese Konstruktion werden die Vertikalkräfte mit möglichst geringen Reibungseinflüssen übertragen. Mittels einer Kraftmessdose werden die auftretenden Kräfte über eine Vollmessbrückenschaltung mit einer Abtastfrequenz von 50 Hz aufgenommen.

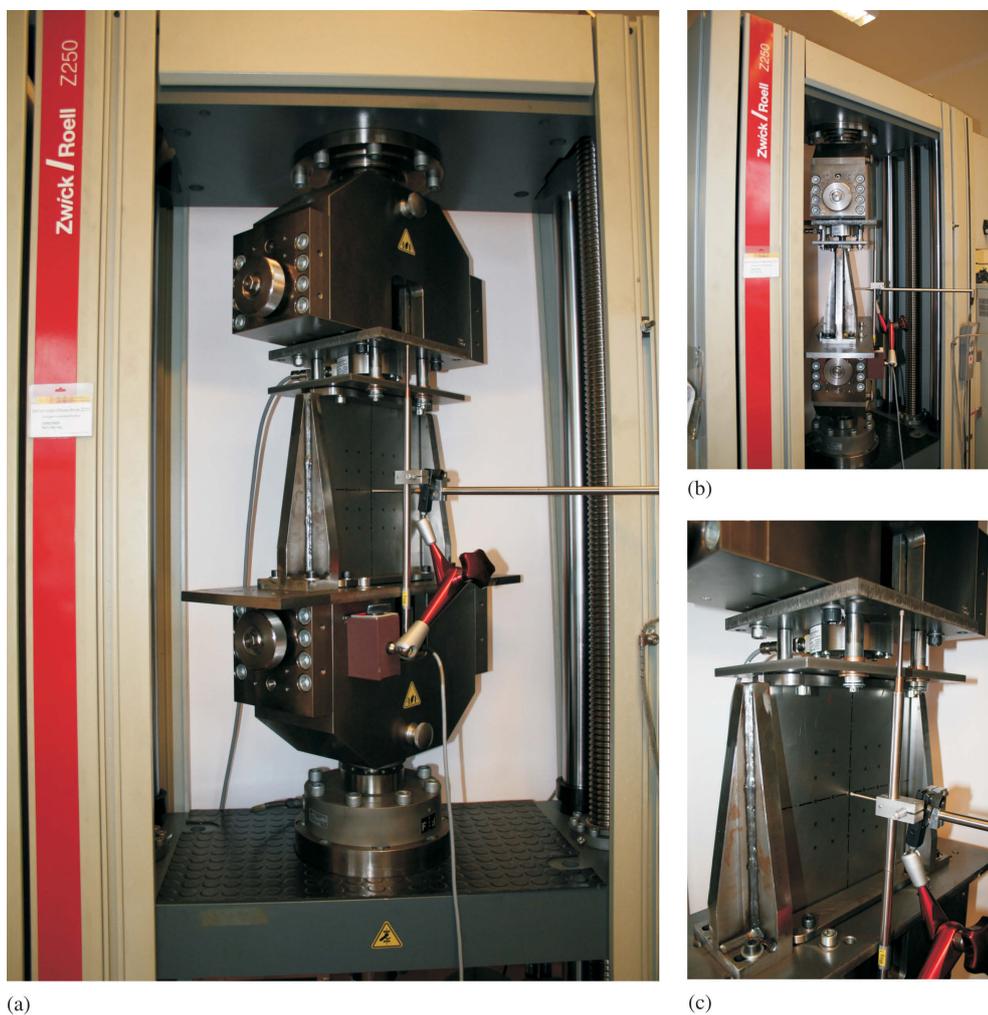


**Abbildung 4.12:** Konstruktionszeichnung Beulprüfstand: Dargestellt sind die Halbschnitt- und die Frontalansicht der CAD Konstruktionszeichnung des Beulprüfstandes, der aus folgenden Hauptkomponenten besteht: (a) obere Trägerplatte; (b) Kraftmessdose für statische oder dynamische Zug- und Druckkräfte; (c) geschliffene Führungssäulen; (d) Gleitlagerbuchsen aus Bronze; (e) verschiebbare Nutenplatte mit V-Nut Lagerung; (f) seitliche Steher mit V-Nut Lagerungen; (g) untere Nutenplatte mit V-Nut Lagerung. Weiters sind in roter Farbe die Seitenränder der Versuchsplatten markiert.

Die horizontale und vertikale Wegmessung erfolgte über zwei induktive Wegaufnehmer mit einem Nennweg von 0 mm bis 100 mm, wobei die Messdatenerfassung mit denselben

Einstellungen und Geräten wie bei der Kraftmessung durchgeführt wurde. Die horizontale Wegmessung beinhaltet die Erfassung der Plattenausbeulung in Richtung der z-Achse, wobei der Wegaufnehmer orthogonal zum Zentrum der Platte angeordnet ist. Vertikal wird die Verschiebung der oberen Nutenplatte zur Grundplatte aufgezeichnet.

Die Prüfdruckkraft selbst und die eigentliche Versuchssteuerung wurden mit der Zugprüfanlage Z 250 von Zwick/Roell bewerkstelligt, in die der Beulprüfstand implementiert ist - siehe Abbildung 4.13. Diese Anlage ist im Stande, über einen Spindelantrieb Zug- und Druckkräfte bis 250 kN aufzubringen.



**Abbildung 4.13:** Beulprüfstand: Der eigentliche Beulprüfstand ist in die kombinierte Zug- und Druckprüfanlage Z 250 von Zwick/Roell integriert, mit der die Druckkraft zur Beulprüfung auf die Platten aufgebracht wird. (a) und (b) isometrische Übersichtsaufnahmen des Beulprüfstands und der horizontalen und vertikale Wegaufnehmer; (c) Detailansicht des Prüfstands und der Messaufnehmer.

Durch die vertikale Druckbelastung der Platten während des Experiments treten im Bereich der seitlichen Einspannungen durch den Poissoneffekt unerwünschte horizontale Kräfte auf, die gegen die seitlichen Steher wirken.

Ausgehend von der Systemskizze in Abbildung 4.12 und den Gleichungen (4.4), (4.5) und (4.6)

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{E} \cdot \left[ \sigma_{xx} - \nu \cdot (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \right] \quad (4.4)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{E} \cdot \left[ \sigma_{yy} - \nu \cdot (\sigma_{zz} + \sigma_{xx}) \right] \quad (4.5)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{E} \cdot \left[ \sigma_{zz} - \nu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \right] \quad (4.6)$$

sowie den Randbedingungen

$$\epsilon_{yy} \equiv 0 \quad (4.7)$$

und

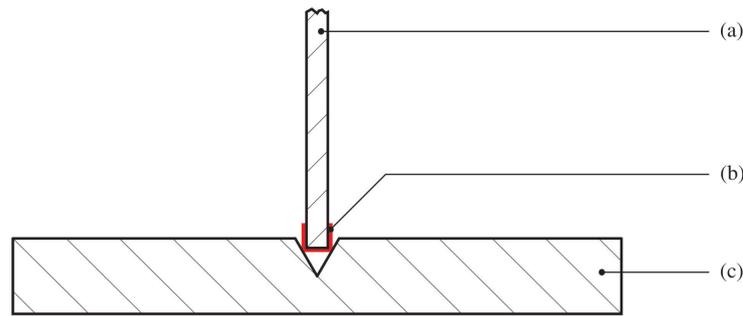
$$\epsilon_{zz} \leq 0 \quad (4.8)$$

kommt es während des Versuchs auf Grund der vertikalen Druckspannungen  $\sigma_{xx}$  zu Spannungen  $\sigma_{yy}$  zwischen Platte und den vertikalen Einspannungen in der Höhe von

$$\sigma_{yy} = \nu \cdot \sigma_{xx}. \quad (4.9)$$

Dabei entsprechen die Dehnungen  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$  den Dehnungen in den entsprechenden Raumrichtungen,  $E$  entspricht dem E-Modul des Werkstoffes und  $\nu$  der Querkontraktionszahl nach Poisson [82, 84].

Um die dadurch auftretenden Reibkräfte möglichst gering zu halten, wurde der Reibkoeffizient zwischen der Platte und den Einspannungen, d.h. den 60 ° V-Nuten, minimiert. Wie die Abbildung 4.14 zeigt, erfolgte die Realisierung durch eine allseitige Teflummantelung der Platten und einer Schmierung durch Gleitbahnenöl zwischen der Teflonschicht und den geschliffenen V-förmigen Nuten.



**Abbildung 4.14:** Platteneinspannung in den V-Nuten: Zur Verminderung des Reibungskoeffizienten wurden die Platten mit einer Teflonschicht ummantelt. Zusätzlich erfolgte eine Schmierung zwischen der Teflonschicht und der geschliffenen V-Nut. (a) Versuchsplatte; (b) rot markierte Teflonummantelung mit Gleitfilm aus Gleitbahnenöl; (c) geschliffene 60 ° V-Nut Führung.

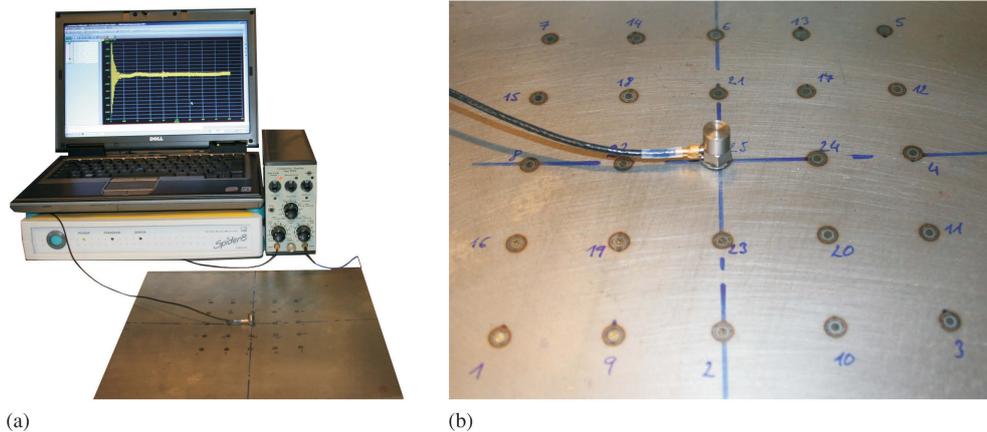
#### 4.1.6 Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von laserbehandelten Platten

Zusätzlich erfolgte eine Klassifizierung der laserbehandelten Bleche bezüglich ihrer 1. Eigenfrequenz.

Die Eigenfrequenzanalyse bietet in zweierlei Hinsicht Anhaltspunkte zur Charakterisierung der in den Versuchsserien hergestellten Blechen. Zum einen gibt die 1. Eigenfrequenz eines Hautfeldes eine qualitative Aussage über die Steifigkeit der Struktur und zum anderen lassen sich durch den Verlauf der Grundfrequenz bei steigender Belastung Aussagen über die kritische Beullast treffen [2, 67, 85–87].

Weiters ist die 1. Eigenfrequenz für die Auslegung von dynamisch beanspruchten Bauteilen, wie bei Blechen im Automobil- oder im Schienenfahrzeugbau, von großer Bedeutung. Sollte speziell bei diesen Anwendungen die Eigenfrequenz von Einzelteilen im Betriebsfrequenzbereich der Anlage bzw. der Maschine liegen, kommt es zu unerwünschten Vibrationen und Dröhngeräuschen oder im schlimmsten Fall auch zu Beschädigungen der Hautfelder [2, 66].

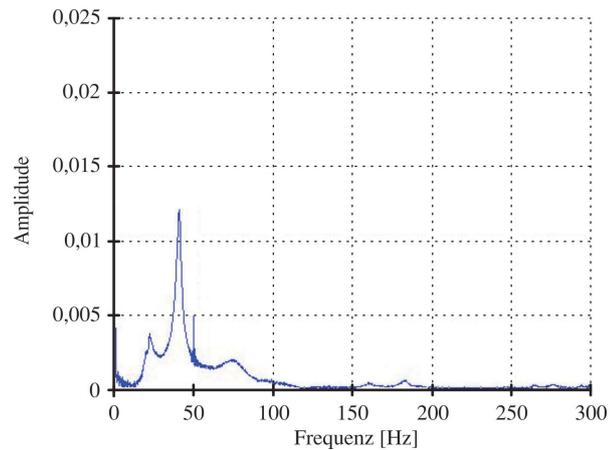
Die Messung der 1. Eigenfrequenz der Bleche erfolgte im unbelasteten, punktgelagerten Zustand, d.h. bei freier Biegeschwingung auf vier pyramidenförmigen Punktauflagen aus Kautschuk, wie in Abbildung 4.15 dargestellt. Durch einen mit Bienenwachs orthogonal zur Blechoberfläche im Zentrum der Platte angebrachten Beschleunigungsaufnehmer, erfolgte die Messung der zeitlichen Änderung der elektrischen Spannung, die durch eine erzwungene Beschleunigung hervorgerufen wurde [88–90].



**Abbildung 4.15:** Eigenfrequenzmessung bei den untersuchten Rechteckplatten: Bei der Messung der 1. Eigenfrequenz wurde die unbelastete Platte auf vier pyramidenförmigen Auflagerpunkten aus Kautschuk gelagert und ein Beschleunigungsaufnehmer im Zentrum der Platte mit Bienenwachs befestigt. Mit diesem Messaufbau erfolgte die Messung des Beschleunigungs- und Zeitsignals der erzwungenen Schwingung. (a) Messaufbau bei der Grundfrequenzermittlung; (b) Detailaufnahme des Beschleunigungsaufnehmers auf einem mit Lasereinzelpunkten versehenen Blech.

Um den Frequenzbereich von 0 Hz bis zu 100 Hz genau untersuchen zu können, erfolgte die Messung mit einer Abtastfrequenz von 600 Hz [88–90].

Die Auswertung des Beschleunigungssignals über die Zeit erfolgte durch das Programm MATHLAB<sup>®</sup> der Firma MathWorks<sup>®</sup> mit einer eigens dafür entwickelten Software - siehe Anhang B [91]. Die Software transformiert über die Fast Fourier Transformation (FFT) die gemessenen Zeit-/Spannungsverläufe in ein Frequenzsignal. Aus dieser Darstellung lassen sich die Eigenfrequenzen im untersuchten Frequenzbereich als Amplitudenerhöhungen, d.h. als deutliche Signalspitzen, ablesen - siehe Abbildung 4.16.



**Abbildung 4.16:** Beispiel einer Eigenfrequenzauswertung: Die Eigenfrequenzen eines Bauteils zeigen sich in deutlichen Ausschlägen der Amplitude, wie beispielhaft bei der Messauswertung an einem I-förmigen Laserlinienmuster gezeigt wird. Die 1. Eigenfrequenz liegt in diesem Fall bei 22,3 Hz. Der Ausschlag bei 50 Hz ist durch die Netzspannung bedingt.

## 4.2 Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen

### 4.2.1 Motivation zur Anwendung von Hohlprägestrukturen

Bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Leichtbauweisen und bei der Umsetzung von anspruchsvollen ökologischen und ökonomischen Zielen zeichnet sich besonders bei Außenhautbeplankungen im Luft- und Schienenfahrzeugbau ein Trend zu immer dünneren Feinblechkonstruktionen ab [92–95].

Durch die Abnahme der Wanddicke und die damit verbundene Gewichtsreduktion in der Außenhülle verliert die Gesamtkonstruktion an Steifigkeit und wird anfälliger gegenüber Instabilitäten. Zusätzlich werden die Hautfelder labil gegen Vibrationen und Dröhnegeräuschen, da sie durch den Masseverlust sensibler gegenüber dynamischen Beanspruchungen werden [96].

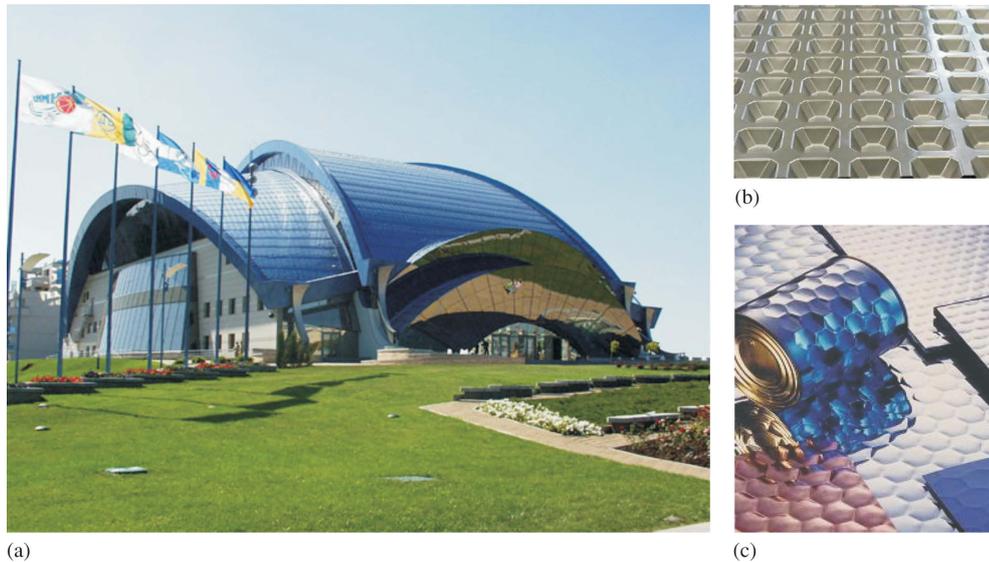
Durch den Einsatz von Steifen, Finnen, Sicken oder Wölbstrukturierungen lässt sich der Steifigkeitsverlust ausgleichen [2, 4, 97]. Im Sinne des fertigungstechnischen Leichtbaus sind Sicken oder Wölbstrukturierungen vorzuziehen, da sie das Gesamtgewicht nicht steigern.

Als Wölbstrukturierungen werden im Allgemeinen regelmäßig angeordnete Hohlprägungsmuster wie beispielsweise Waben oder hexagonale Höckergeometrien bezeichnet, die in das Blech eingebracht werden [92, 98–100].

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Strukturen aus Metall, wie z.B. Hohlzylinder, durch die Beaufschlagung von Außendruck zu spontanem Implodieren, d.h. zu einem Stabilitätsverlust, zu bringen. Als Resultat stellt sich ein „selbstorganisiertes“ regelmäßiges Wölbstrukturmuster ein [97]. Dieses Wölbstrukturmuster ist vergleichbar mit einem instabilen Nachbeulverhalten, bei welchem die Beullast weiter gesteigert werden kann.

Anders als bei der kritischen Beulspannung können die Beulspannungen im Nachbeulverhalten nicht mehr exakt mit analytischen Methoden berechnet werden [2, 24].

In Abbildung 4.17 sind Beispiele von wölbstrukturierten Blechen aus mehreren Anwendungsbereichen dargestellt.



**Abbildung 4.17:** Beispiele von wölbstrukturierten Blechen: (a) [101] wölbstrukturierte Blechdachdeckung einer Mehrzwecksporthalle in Odessa; (b) [98] Höckerblech Borit, wie es z.B. im Automobilbau eingesetzt wird; (c) [102, 103] bionische Strukturen auf Basis der Selbstorganisation.

Primär resultiert die Steifigkeitssteigerung wölbstrukturierter Bleche aus der lokalen Beeinflussung des Trägheitsmomentes, d.h. aus der Veränderung der Plattengeometrie [104]. Zusätzlich kann die Erhöhung der Beulfestigkeit von Feinblechen durchaus ohne eine Veränderung der Blechgeometrie bewerkstelligt werden. Zu diesen festigkeitssteigernden Mechanismen gehören laut [105]:

- die Mischkristallverfestigung,
- die Dispersions-Ausscheidung,
- die Feinkornhärtung und
- die Kaltverfestigung.

Im Speziellen kann durch eine lokale Kaltverfestigung, die durch eine mechanische Vorverfestigung des Werkstoffes hervorgerufen wird, die Beulfestigkeit um 100 % gesteigert werden [93, 105].

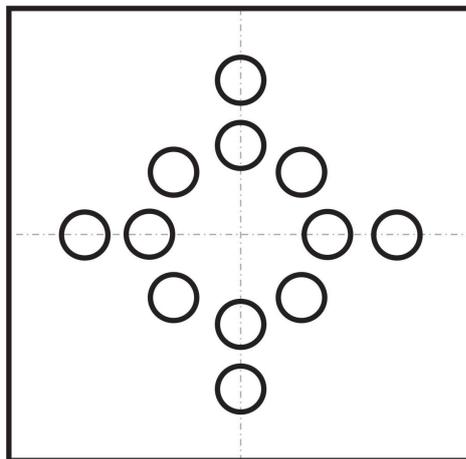
Ziel ist es, durch eine Kombination von vordefinierten kreisrunden Hohlprägern, die die Plattentopologie nur gering verändern und durch eine Kombination von Kaltverfestigung und Eigenspannungsfeldern die statischen und/oder dynamischen Eigenschaften von quadratischen Rechteckplatten zu verbessern.

## 4.2.2 Simulationsmodell der Einbringung von Hohlprägestrukturen

Das Simulationsmodell baut, wie das in Kapitel 4.1.2 beschriebene Modell zur Eigenspannungseinbringung durch Laserbestrahlung auf dieselben Werkstoffparameter auf.

Da der formgebende Prozess unter Kaltverformung einzuordnen ist, wurde dabei allerdings auf die Implementierung von temperaturabhängigen Werkstoffparametern verzichtet.

Die Modellierung der quadratischen Feinblechplatten mit den Abmessungen von 280 mm x 280 mm und einer Dicke von 0,75 mm wurde auf eine Viertelsymmetrie beschränkt. Diese Einschränkung war möglich, da das zu simulierende Prägemuster eine zentrische Kombination zwischen den Mustern Kreuz und Kreis (siehe Abbildung 4.18) war. Der Vorteil der Viertelsymmetrie liegt in der verkürzten Rechenzeit [70].

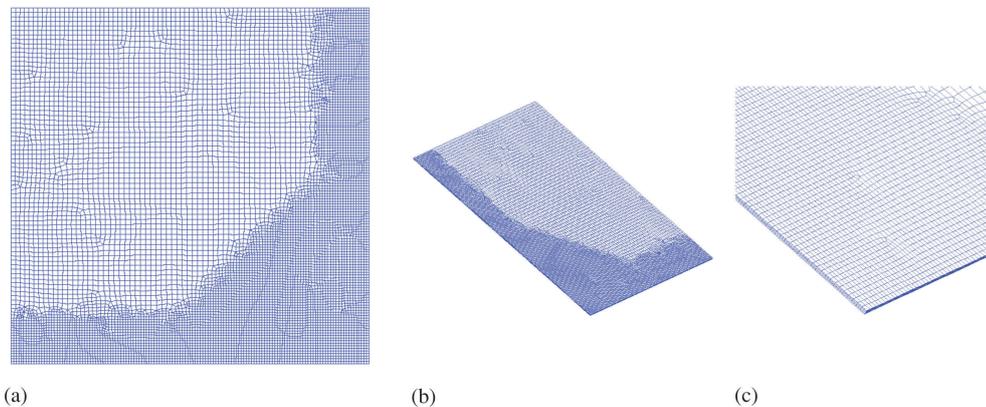


**Abbildung 4.18:** Kombination der Prägemuster Kreuz und Kreis: Das Muster besteht aus einem zentrisch eingebrachten Kreis mit einem Durchmesser von 140 mm, um den regelmäßig 8 Hohlprägungen angeordnet sind. An den horizontalen und vertikalen Hohlprägungen, die auf den Schwerachsen liegen, sind in einem Abstand von jeweils 50 mm weitere Hohlprägungen vorgesehen.

Der Netzaufbau der Platte erfolgte ähnlich wie bei dem Modell der Lasereinwirkung in Kapitel 4.1.2 erläutert. Wie in Abbildung 4.19 dargestellt, wurde das zweidimensionale Netz mit einer Netzfeinung im Bereich der Hohlprägungen modelliert und durch vier weitere Netzebenen zu einem dreidimensionalen Modell mit einer Materialdicke von insgesamt 0,75 mm erweitert.

Die Prägewerkzeuge wurden als starre Körper nach den Plänen der Originalwerkzeuge in das Simulationsmodell implementiert.

Mit Hilfe des Simulationsprogramms Deform 3D<sup>TM</sup> konnte der gesamte Herstellungsprozess abgebildet werden [70].



**Abbildung 4.19:** Vernetzung DC01 Platte für die Simulation des Hohlprägeprozesses: (a) zweidimensionale Vernetzung der Viertelsymmetrie; (b) isometrische Darstellung des dreidimensionalen Netzes mit fünf Netzebenen; (c) Detailabbildung des 3D Netzes.

### 4.2.3 Herstellungsprozess der Hohlprägungen

Die Prägungen wurden mit einer pneumatischen Umformmaschine, einem Kraftformer KF 170 der Firma Eckold AG, eingebracht (siehe Abbildung 4.20). Der Kraftformer 170 ist eine Universalumformmaschine für die spanlose Kaltverformung von Blechen und Profilen. Dieses Gerät ist in der Lage, im Einzel- oder Dauerhub mit einer maximalen Druckkraft von 60 kN und einer Taktzahl von bis zu 250 Arbeitstakten pro Minute Werkstücke zu bearbeiten. Das Arbeitsspektrum reicht von Stauchen, Strecken, Korrigieren, Anpassen, Bombieren, Glätten, bis hin zum Stanzen und Clinchen [106].



**Abbildung 4.20:** Kraftformer KF170: Pneumatisch betriebene Umformmaschine, mit der die Hohlprägungen eingebracht wurden.

Die Herstellung der wölbstrukturierten Bleche aus DC01 Platten der Abmessungen von 280 mm x 280 mm und einer Dicke von 0,75 mm wurde mit einem Bombierwerkzeug mit einem Durchmesser von 40 mm und einer gekrümmten Bombierfläche mit einem Radius von 50 mm durchgeführt.

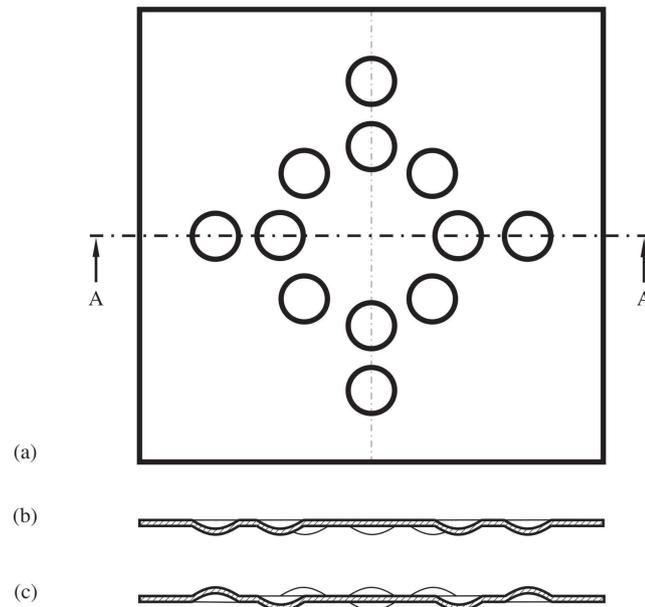
Der eigentliche Hohlprägevorgang wurde im Einzelhubmodus per Hand in den vordefinierten Mustern vorgenommen.

#### 4.2.4 Eingebrachte Hohlprägemuster

Bei der 1. Versuchsserie wurden die folgenden Hohlprägemuster eingebracht:

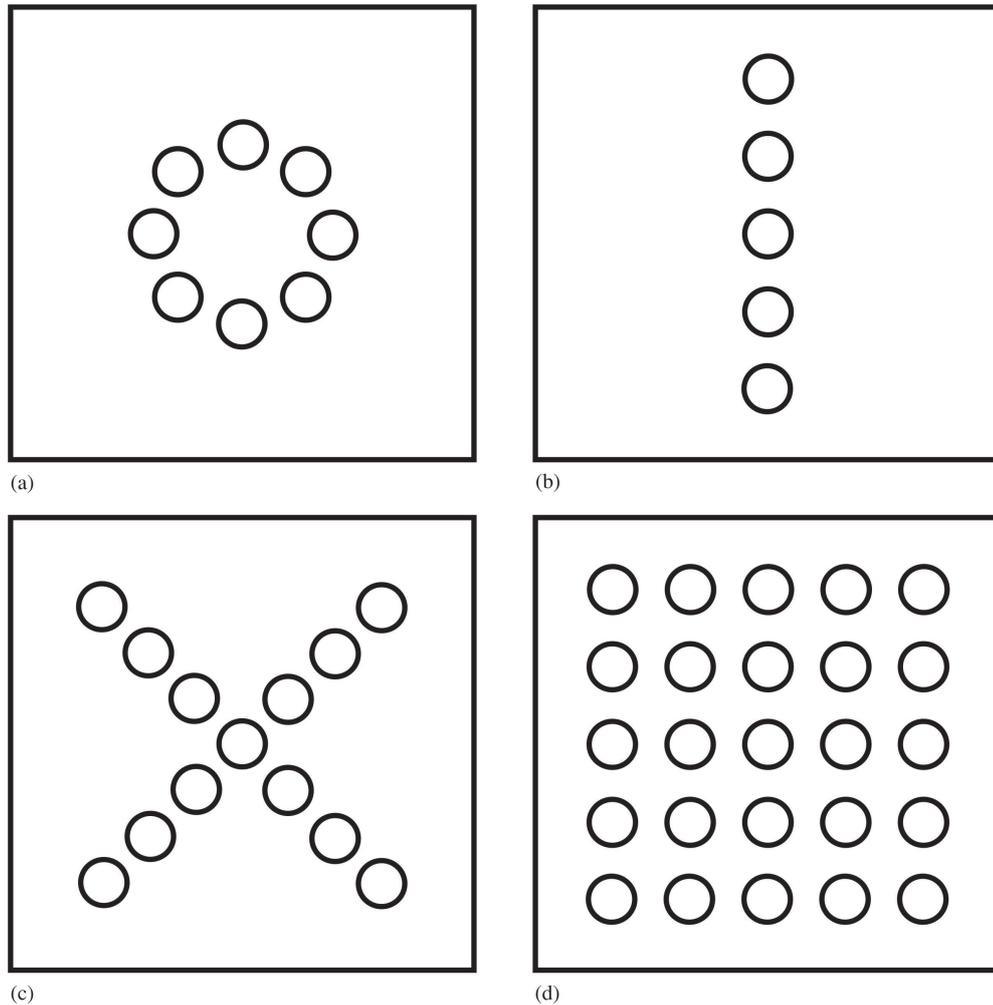
- Kreisgeometrie mit wechselnder und gleicher Einbringungsrichtung,
- I-Geometrie mit wechselnder und gleicher Einbringungsrichtung,
- X-Geometrie mit wechselnder und gleicher Einbringungsrichtung und
- 5x5 Punkteraster mit wechselnder und gleicher Einbringungsrichtung.

Bei gleicher Einbringungsrichtung wurden alle Hohlprägungen von der selben Platten-  
 seite hergestellt - siehe Abbildung 4.21 (b). Unter wechselnder Einbringungsrichtung  
 wird das regelmäßige wechselseitige Bearbeiten der Metallplatte verstanden - siehe Ab-  
 bildung 4.21 (c).



**Abbildung 4.21:** Definition der Einbringungsrichtung von Hohlprägestrukturen: Alle unter-  
 suchten Hohlprägemuster wurden mit gleicher und wechselnder Einbringungsrichtung in die  
 DC01 Platten geprägt. Die Art und Weise der unterschiedlichen Bearbeitung ist anhand der  
 Grafiken (b) und (c) erläutert. (a) Prägemuster Kreuz und Kreis, das in der Simulation ab-  
 gebildet wurde. Dabei ist in der Skizze die Schnittlinie A-A strichpunktirt eingezeichnet; (b)  
 Schnittdarstellung A-A bei gleichseitiger Einbringungsrichtung; (c) Schnittdarstellung A-A bei  
 wechselnder Einbringungsrichtung.

In der Abbildung 4.22 sind die angeführten Prägemuster grafisch dargestellt. Bei den ein-  
 gebrachten Hohlprägungen handelt es sich um kreisrunde Prägungen mit einem Durch-  
 messer von 28 mm und einer Tiefe von 2,5 mm in gleicher und regelmäßig wechselnder  
 Einbringungsrichtung.



**Abbildung 4.22:** Hohlprägemuster: (a) Kreisgeometrie: kreisrunde Anordnung mit einem Durchmesser von 140 mm, die aus acht Hohlprägungen um das Zentrum der Platte besteht; (b) I-Geometrie: fünf Hohlprägungen in vertikaler Anordnung mit einem Hohlprägungsabstand von 50 mm durch die vertikale Schwerachse der Platte; (c) X-Geometrie: X-förmige Einbringung von 13 Hohlprägungen durch den Mittelpunkt der Platte. Dabei weisen die einzelnen Hohlprägungen einen Abstand von 60 mm auf; (d) 5x5 Punkteraster: Regelmäßige, zentrische Anordnung von 25 Punkten mit einem Abstand von 50 mm.

### 4.2.5 Untersuchungen zur Beulstabilität von wölbstrukturierten Platten

Die Wölbstrukturen wurden unter denselben Bedingungen und mit derselben Beulprüfvorrichtung wie in Kapitel 4.1.5 beschrieben auf ihr Stabilitätsverhalten hin untersucht.

### 4.2.6 Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von wölbstrukturierten Platten

Auch bei der Ermittlung der 1. Eigenfrequenz wurde mit denselben Mitteln und der identen Auswertesoftware gearbeitet wie bereits in Kapitel 4.1.6 beschrieben.

## 4.3 Sickeneinbringung in Platten

### 4.3.1 Motivation zur Anwendung von Sicken

Bei der Umsetzung des Leichtbaus durch Rahmen- oder Skelettbauweisen werden Böden und Wände aus Blechtafeln gefertigt. Dabei kommen immer dünnere Feinblechkonstruktionen zur Anwendung. Zum einen ergibt sich eine Kostenersparnis, da ein dünnes Blech billiger, als ein dickeres bei gleicher Zuschnittsfläche ist und mitunter den gleichen Zweck erfüllt. Zum anderen wirkt sich die Gewichtersparnis vorteilhaft auf die Gesamtkonstruktion aus, da dadurch besonders im Frachtverkehr die Nutzlast und die Wirtschaftlichkeit gesteigert werden können [25, 104].

Feinbleche in diesem Anwendungsbereich müssen jedoch meist versteift werden. Dabei bieten sich

- das form- oder stoffschlüssige Verbinden mit Stegblechen in Form von Winkeln, U-Profilen, u.ä.,
- das Versteifen der Blechkanten und/oder
- das bewusste Verändern der Blechgeometrie durch das Einbringen von Sicken oder Bombierungen bzw. biegesteifen Schalen besonders an [104, 107].

Diese genannten Methoden zielen auf eine Vergrößerung des Trägheitsmoments bzw. des Widerstandsmoments ab, da folgendes gilt:

Je größer das Trägheitsmoment, desto geringer ist die Durchbiegung und je größer das Widerstandsmoment, desto geringer ist die Werkstoffbeanspruchung [104].

Für die Einbringung von Sicken, die in DIN 8585 als rinnenartige Vertiefungen oder Erhöhungen in ebenen oder gekrümmten Blechflächen, mit relativ kleiner Tiefe gegenüber der Länge, definiert werden, sprechen fertigungstechnische Vorteile, minimaler Werkstoffeinsatz sowie Multifunktionalität. In Abbildung 4.23 sind mehrere Anwendungsbeispiele dargestellt [26, 107, 108].



(a)



(b)



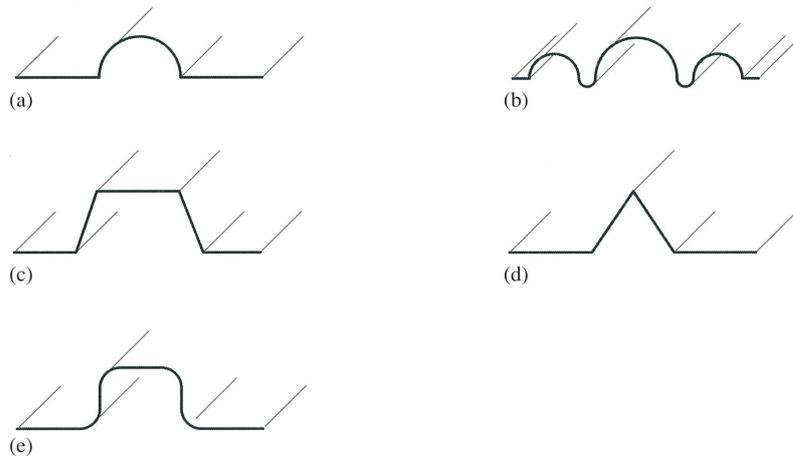
(c)



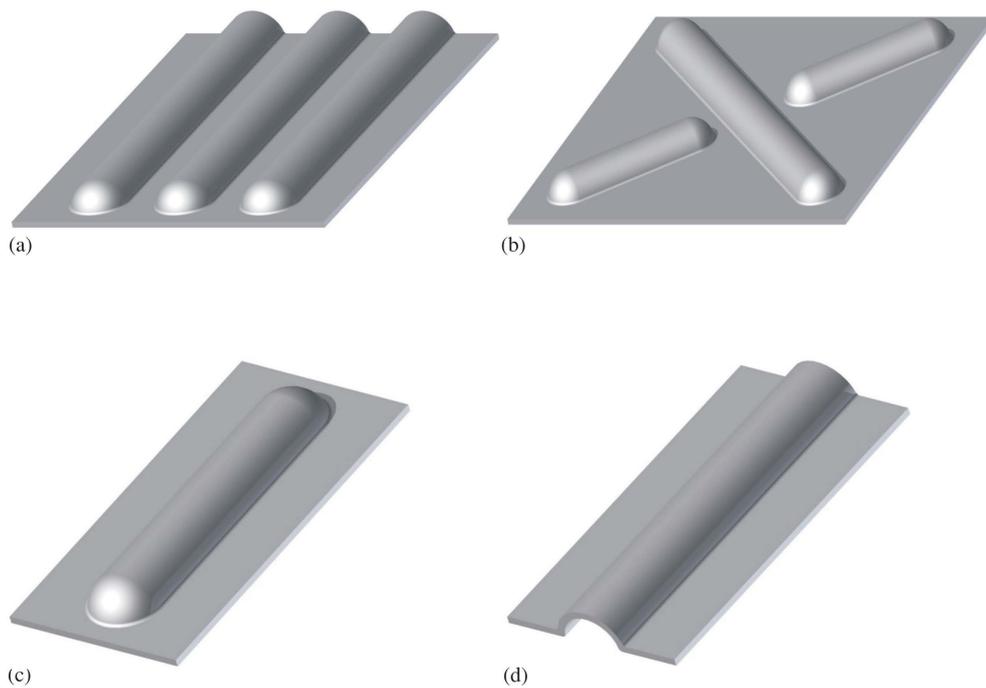
(d)

**Abbildung 4.23:** Anwendungsbereiche von Sicken: (a) [109] Flugzeugaußenhaut einer Junkers JU 52; (b) [110] Dose mit Halbrundsicken im Bereich des Deckels und des Mantels; (c) [111] Chassisverkleidung eines Citroën HY; (d) [112] 30 Schuss Magazin einer AK-47 aus Stahlblech.

Sicken lassen sich in ihrer Querschnittsform, ihrer Art und ihrer Anordnung unterscheiden - siehe Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25 [113].

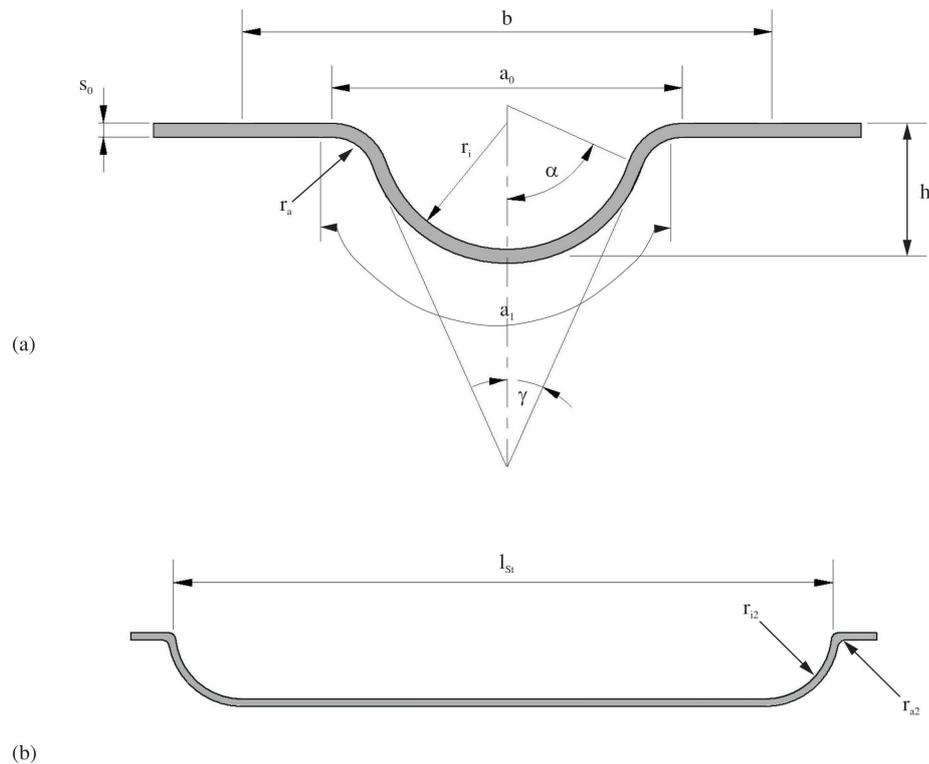


**Abbildung 4.24:** Sickenquerschnitte: Allgemein wird zwischen (a) Halbrundsicke, (b) Formsicke, (c) Trapezsicke, (d) Dreiecksicke und (e) Kastensicke unterschieden. Jedoch sind andere Sondersickenformen, die sich aus ähnlichen Querschnitten zusammensetzen, möglich [24, 26].



**Abbildung 4.25:** Sickenanordnung und Sickenarten: Bei der Sickenanordnung wird in (a) Mehrfachsicken und (b) Sickengruppe unterschieden. Die Sickenarten werden in (c) geschlossene Sicke und (d) offene Sicke unterteilt [113].

Eine detaillierte Benennung und Beschreibung der Sickengeometrie ist in Abbildung 4.26 zusammengefasst [113].



**Abbildung 4.26:** Halbrundsicke - Nomenklatur: (a) Hauptabmessungen im Querschnitt einer Halbrundsicke mit folgenden Variablen:  $a_0$  Sickenbreite;  $a_1$  gestreckte Länge des Sickenquerschnittes bei Sickenhöhe  $h$ ;  $h$  Sickenhöhe oder auch als Sickentiefe bezeichnet;  $r_a$  Sickenradius außen;  $r_i$  Sickenradius innen;  $s_0$  Ausgangsblechdicke;  $\alpha$  Tangentenschnittwinkel des Innenradius und des Außenradius der Sicke ( $\alpha = 90^\circ - \gamma$ );  $\gamma$  Neigungswinkel der Flanke. (b) Hauptabmessungen im Längsschnitt einer Halbrundsicke:  $l$  Sickenlänge;  $r_{a2}$  Sickenradius der Auslaufzone außen;  $r_{i2}$  Sickenradius der Auslaufzone innen, der dem Radius des Rollwerkzeuges entspricht [113].

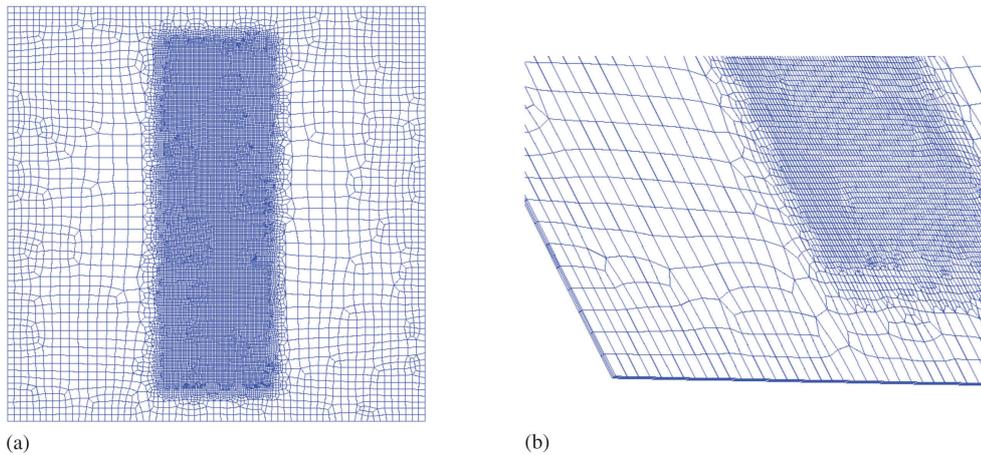
In der Literatur werden Richtlinien zur Verlegung von Sicken in geometrisch einfachen und isotropen Platten beschrieben. Dabei sind die Empfehlungen für unterschiedlichen Randbedingungen und Belastungen sehr eingeschränkt. Die veröffentlichten Richtlinien reichen von experimentell ermittelten Empfehlungen [25, 26, 104, 107] bis zur mittels FEM in der topologie- und gestaltoptimierten Sickenauslegung [114].

In den hier dargestellten Untersuchungen wurden umgesetzte Richtlinien der für den Stand der Technik geltenden Literatur analysiert.

Weiters galt es, die Ergebnisse eines neuen Sickenalgorithmus zu verifizieren, der in der Lage ist, automatisch Sicken in Platten mit ungleichen Randbedingungen und unterschiedlichen Beulformen in durch Druckspannungen beaufschlagten Platten zu verlegen [115–118].

### 4.3.2 Simulationsmodell des Herstellungsprozesses einer Halb- rundsicke

Das Simulationsmodell des Herstellungsprozesses einer Halbbrundsicke, die mit einem Rollwerkzeug hergestellt wird, ist von der dreidimensionalen Vernetzung her ähnlich wie das Netz bei der Simulation einer punktförmigen Lasereinwirkung, das in Kapitel 4.1.2 bereits beschrieben wurde - siehe Abbildung 4.27.



**Abbildung 4.27:** Vernetzung einer DC01 Platte für die Simulation des Herstellungsprozesses einer Halbbrundsicke: (a) zweidimensionale Vernetzung der DC01 Platte mit lokaler Netzfeinung; (b) isometrische Detaildarstellung des dreidimensionalen Netzes.

Die Werkstoffparameter des DC01 sind, wie bei der Simulation der Laserbestrahlung in Kapitel 4.1.2 erläutert, experimentell bei Raumtemperatur gewonnen worden oder wurden aus der Literatur [71] übernommen.

Die Firma Trumpf in Deutschland, ein weltweit führendes Unternehmen bei der Herstellung von Umformmaschinen, stellte die Werkstattzeichnungen der Rollwerkzeuge zur Verfügung, welche als Festkörper in die Simulation implementiert wurden [70].

Die Simulation bildet den gesamten Fertigungsvorgang einer Halbbrundsicke mit einer Breite von 6 mm, einer Länge von 130 mm und einer Rollengeschwindigkeit von 0,5833 m/s ( $\hat{=}$  35 m/min) ab.

### 4.3.3 Herstellungsprozess der Halbbrundsicken

Bei der ersten Herstellungsmethode von Halbbrundsicken kam eine handbetriebene Sickenmaschine zum Einsatz - siehe Abbildung 4.28. Die Maschine wird mit einer Handkurbel

bedient und ist in der Lage, verschiedene Sickenformen mit unterschiedlichen Tiefen einzubringen [119].

Die Höhe der Sicke wird über die Zustellung, d.h. über den Abstand des Oberwerkzeuges zum Unterwerkzeug, eingestellt. Durch die stufenlos einstellbare Zustellung sind mehrstufige Umformprozesse möglich, die den Verzug des Werkstückes so gering wie möglich halten sollten. Die Maschine besitzt keinen Niederhalter.



**Abbildung 4.28:** Sickenmaschine: Handbetriebene Sickenmaschine ohne Niederhalter zur Herstellung von unterschiedlichsten Sickenformen in Blechbauteilen.

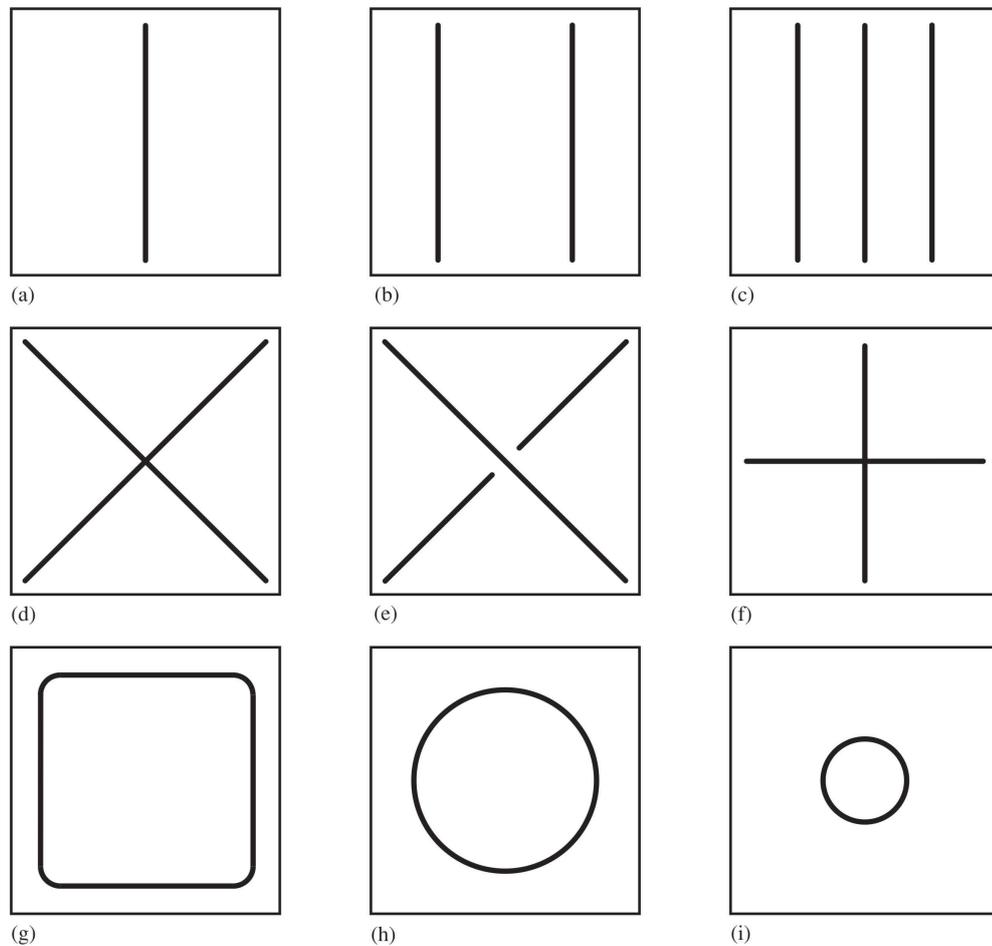
Die 2. Herstellungsmethode von Halbrundsicken erfolgte durch eine CNC gesteuerte Metallbearbeitungsanlage der Firma Trumpf, wie in Abbildung 4.29 dargestellt.



**Abbildung 4.29:** Blechbearbeitungsanlage TruPunch 5000: CNC gesteuerte Blechbearbeitungsanlage TruPunch 5000 der Firma Trumpf.

#### 4.3.4 Eingebachte Sickengeometrien

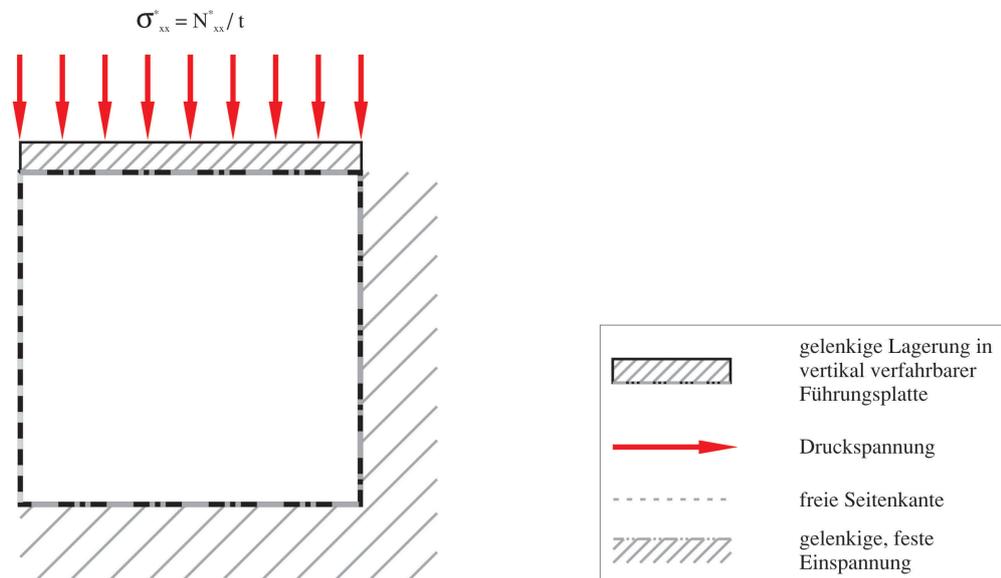
In der 1. Versuchsserie wurden 6 mm Halbrundsicken mit verschiedenen Höhen in 0,75 mm dicke DC01 Bleche in den Dimensionen 280 mm x 280 mm eingebracht. Die generischen Sickenmuster beschränkten sich auf Kreis-, I- und X-Geometrien sowie auf artverwandte Varianten. Diese regelmäßigen Mustereinbringungen zielen auf eine Beulkraftsteigerung an einer allseitig eingespannten Platte ab und gelten teilweise als Stand der Technik.



**Abbildung 4.30:** Sickenmuster der 1. Herstellungsserie: In der 1. Herstellungsserie wurden die folgenden Halbrundsicken in DC01 Bleche eingebracht: (a) vertikal und zentrisch verlaufende Halbrundsicke in I-Form mit einer Länge von 250 mm; (b) zwei vertikale, parallel zueinander stehende und zentrisch eingebrachte Sicken in einer I-Geometrie mit einer Länge von 250 mm; (c) Kombination aus (a) und (b); (d) X-Geometrie mit durchgezogenen Sicken, die eine Länge von 249 mm aufweisen, (e) X-Geometrie mit einer durchgezogenen und einer unterbrochenen Sicke, wobei die durchgezogene Sicke mit einer Länge von 249 mm eingebracht wurde und die abgesetzte einen Abstand von 20 mm zu dieser besitzt; (f) kreuzförmige Sicke mit einer Länge von jeweils 250 mm; (g) quadratische Sicke mit den Abmessungen von 176 mm x 176 mm und abgerundeten Ecken mit einem Radius von 20 mm; (h) Kreis mit einem Durchmesser von 191 mm; (i) Kreis mit einem Durchmesser von 96 mm.

Bei der 2. Versuchsserie wurden die Ergebnisse eines durch FEM unterstützt arbeitenden Sickenalgorithmus umgesetzt [115–118]. Der Sickenalgorithmus wurde entwickelt, um gezielt Sickenverläufe zu generieren und damit eine Steigerung der Beullast bzw. eine Erhöhung der Eigenfrequenz einer Plattenstruktur mit einer dreiseitigen gelenkigen Einspannung herbeizuführen. Bei der dreiseitigen gelenkigen Einspannung wurde auf eine der

beiden seitlichen Abstützungen verzichtet - siehe Abbildung 4.31.



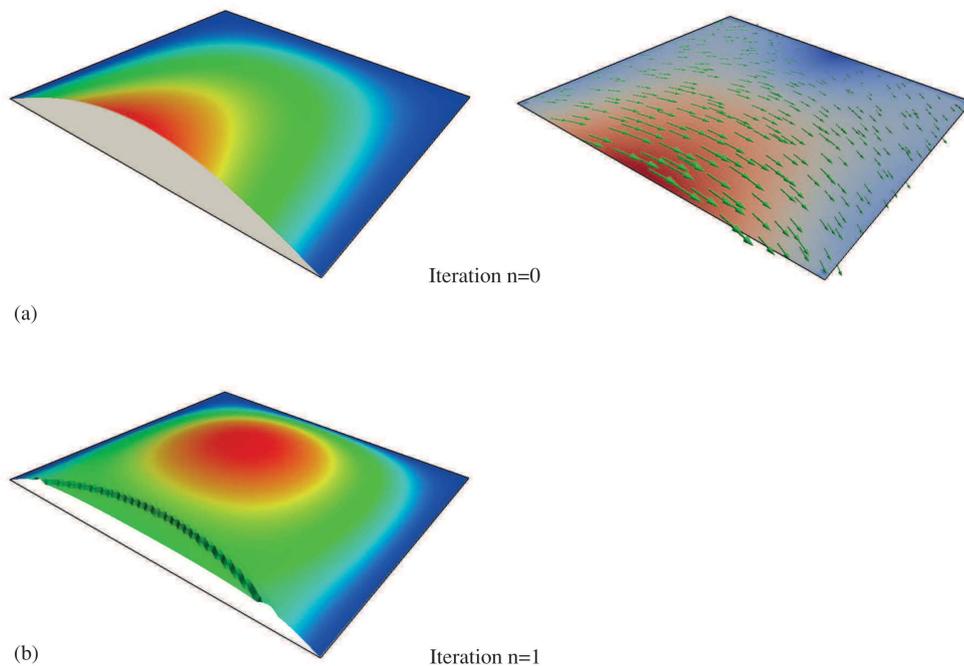
**Abbildung 4.31:** Dreiseitige gelenkige Lagerung der versickten Platten: Bei dieser Versuchsanordnung sind der untere und der rechte Plattenrand in der V-Nut gelenkig eingespannt. Die obere Plattenseite ist ebenso gelenkig in der vertikal verfahrbaren Führungsplatte, mit der die Vertikalkraft auf die Plattenkante aufgebracht wird, gelagert. Die linke Plattenseite ist völlig frei.

Der Algorithmus basiert auf der Anbringung von Versteifungen an jenen Stellen einer Beulfigur, wo diese möglichst effektiv gestört wird. Dabei entsprechen die effektivsten Stellen jenen der größten Krümmungsradien.

Der Sickenalgorithmus bilden mit Hilfe der FEM-Analyse der Beulfigur an jedem Knotenpunkt einen Krümmungstensor, der aus dem Eigenwert der Krümmung, d.h. aus dem Betrag des Eigenvektors der Krümmung und der Richtung, besteht. Dabei ergeben sich ein maximaler Eigenwert der Krümmung sowie ein minimaler Eigenwert der Krümmung, die mathematisch gesehen die beiden orthogonalen Hauptkrümmungen ergeben.

Der Algorithmus legt ausgehend von einem oder mehreren ermittelten Startpunkten entlang der maximalen Hauptkrümmungsvektoren den Verlauf der Sicke fest. Eingeschränkt wird der Verlauf von Kreuzungspunkten mit anderen schon vorhandenen Sicken oder von aus fertigungs- oder einspannungstechnischen Gründen ausgegliederten Zonen. Ausgehend von der primär verlegten Sicke wird eine um die horizontale Achse gespiegelte Sicke verlegt, wie in Abbildung 4.32 ersichtlich.

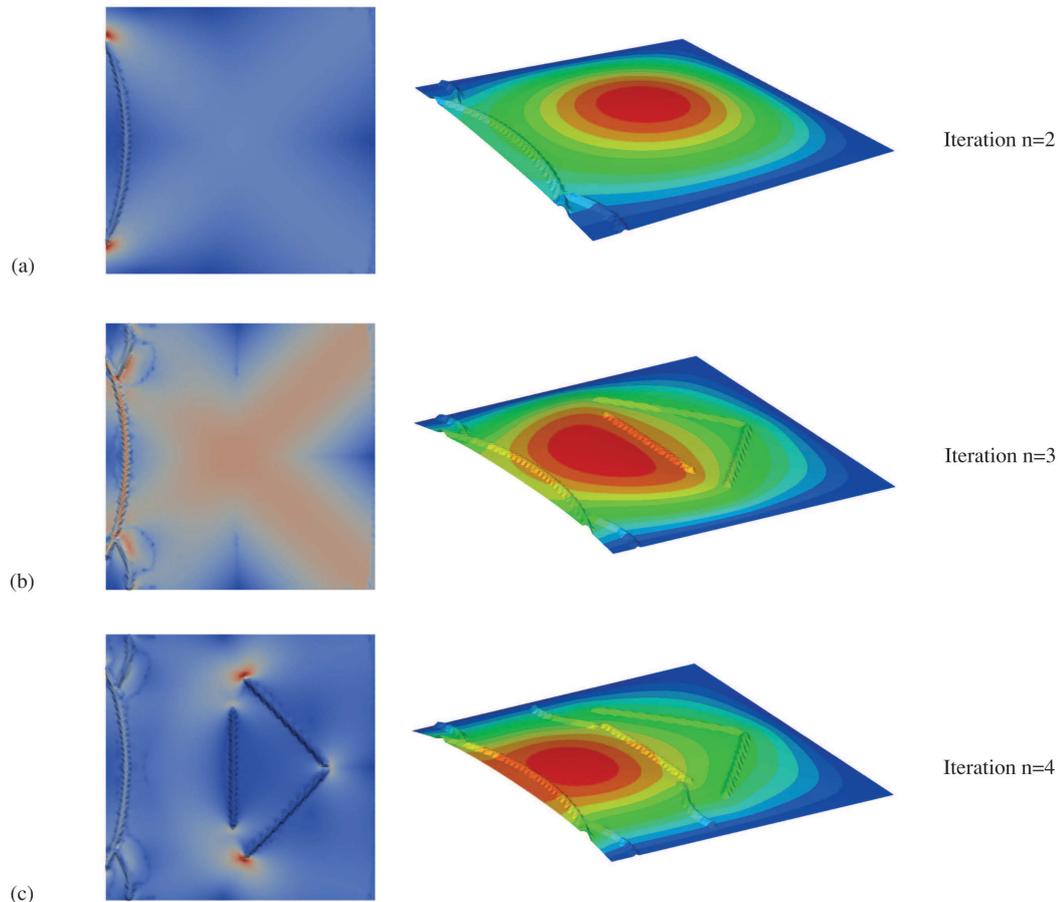
Nach diesem ersten Iterationsschritt erfolgt eine neue Beul- oder Frequenzanalyse, je nach Zielfunktion, durch die ein neuer Krümmungstensor errechnet wird [115–118].



**Abbildung 4.32:** Sickenalgorithmus - 1. Iteration zur Verbesserung der Beulsteifigkeit: (a) gezeigt ist in der linken Bildhälfte die Beulfigur einer unversickten dreiseitig gelenkig eingespannten Platte unter einachsiger Druckspannung nach dem Iterationsschritt  $n=0$ . In der rechten Bildhälfte sind die Richtung und der Betrag der Hauptkrümmungen der Beulfigur in Vektordarstellung visualisiert; (b) erste vom Algorithmus verlegte Sicke. Bei den Abbildungen (a) und (b) sind die Verschiebungen der Platte in  $z$ -Richtung farblich skaliert, wobei blau die minimale und rot die maximale Verschiebung darstellt [115–118].

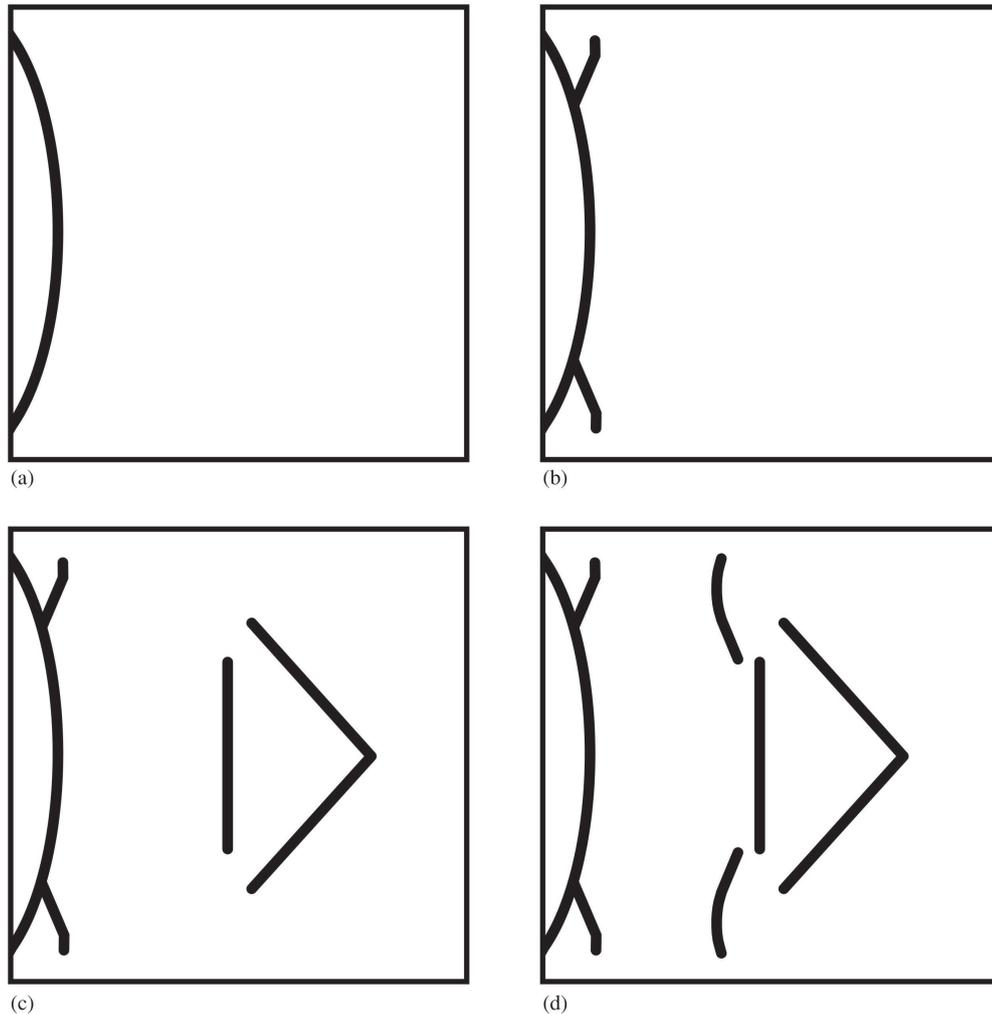
Mit diesen Informationen und der ersten verlegten Sicke beginnt der Algorithmus einen weiteren Iterationsschritt  $n=2$ . Durch diese Ablauffolge wären beliebig viele Verbesserungsschritte möglich, welche jedoch nicht zielführend sind, da der Steifigkeitsgewinn oder die Anhebung der 1. Eigenfrequenz von Iterationsschritt zu Iterationsschritt geringer ausfällt, die Fertigungskosten dennoch weiter steigen.

In Abbildung 4.33 sind die Simulationsergebnisse der Iterationen  $n=2$  bis  $n=4$  dargestellt. Die Ergebnisse beinhalten die vier verschiedenen Sickenformen und die unter Belastung auftretenden Beulformen mit den grafisch dargestellten Verschiebungen aus der Plattenebene [115–118].



**Abbildung 4.33:** Sickenalgorithmus - 2. bis 4. Iteration zur Verbesserung der Beulsteifigkeit: Der Sickenalgorithmus führt nach jeder verlegten Sicke eine neue Beul- bzw. eine Eigenfrequenzanalyse durch. Dabei werden wieder mit Hilfe der berechneten Hauptkrümmungen weitere Sicken verlegt, wie für Iterationsschritt  $n=2$  bis Iterationsschritt  $n=4$  dargestellt. In Einzelabbildung (a) bis (c) sind auf der linken Hälfte die maximalen Krümmungen, wobei die farbliche Skalierung von blau bis rot reicht und rot das Maximum ist, dargestellt. Die rechten Darstellungen beinhalten die vom Algorithmus verlegten Sicken und die dazugehörigen Beulfiguren. Die farbliche Skalierung reicht von blau bis rot, wobei rot die maximalen Auslenkungen aus der Plattenebene darstellt [115–118].

In Abbildung 4.34 sind die vier vom Sickenalgorithmus errechneten Sickengeometrien der 2. Herstellungsserie abgebildet.



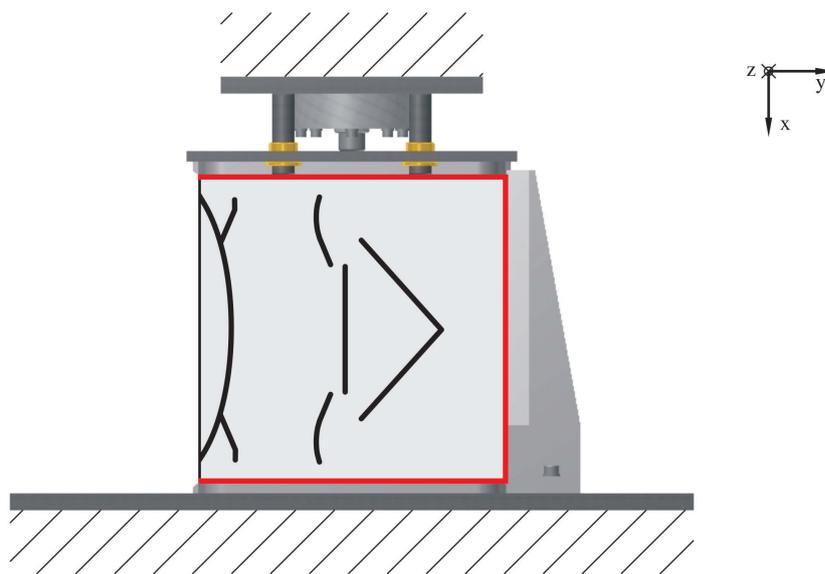
**Abbildung 4.34:** Sickenmuster der 2. Herstellungsserie: Dargestellt sind die Ergebnisse des Sickenalgorithmus der ersten vier Iterationsschritte. Dabei handelt es sich um die geometrischen Verläufe der Halbrundsicken mit einer Breite von 6 mm. (a) Sickengeometrie aus Iterationsschritt  $n=1$ ; (b) Sickengeometrie aus Iterationsschritt  $n=2$ ; (c) Sickengeometrie aus Iterationsschritt  $n=3$ ; (d) Sickengeometrie aus Iterationsschritt  $n=4$  [115–118].

Der beschriebene Algorithmus, der auf eine gezielte Verbesserung der Beulsteifigkeit ausgelegt ist, erzielt in der Simulation in jedem Iterationsschritt eine Steigerung der kritischen elastischen Beulspannung  $\sigma^*$  für dreiseitig eingespannte dünne Rechteckplatten mit isotropen Eigenschaften. Diese Simulationsergebnisse gilt es, in der 2. Versuchsserie zu verifizieren.

### 4.3.5 Untersuchungen zur Beulstabilität von versickten Platten

Wie in Kapitel 4.1.5 beschrieben, erfolgt die Charakterisierung der versickten Bleche hinsichtlich ihrer Beulstabilität durch eine experimentelle Untersuchung im Beulprüfstand. Dabei ist für die versickten Bleche in Kreis-, I- und X-Geometrie eine allseitige Einspannung vorgesehen, wie in Abbildung 4.12 dargestellt.

Bei den versickten Platten, deren Sickenverläufe durch den Sickenalgorithmus berechnet wurden, kam eine dreiseitige Platteneinspannung zur Anwendung - siehe Abbildung 4.35.



**Abbildung 4.35:** Beulprüfstand für dreiseitige Platteneinspannung: Bei der Verifikation des Sickenalgorithmus wurde die allseitige Platteneinspannung auf eine dreiseitige Einspannung abgeändert. Die dreiseitige gelenkige Lagerung der Platten ist rot umrandet dargestellt.

### 4.3.6 Untersuchungen zum Schwingungsverhalten von versickten Platten

Die Ermittlung der 1. Eigenfrequenz erfolgt in derselben Art und Weise, wie in Kapitel 4.1.6 beschrieben.

# 5 Ergebnisse des Simulations- und Experimentalteils

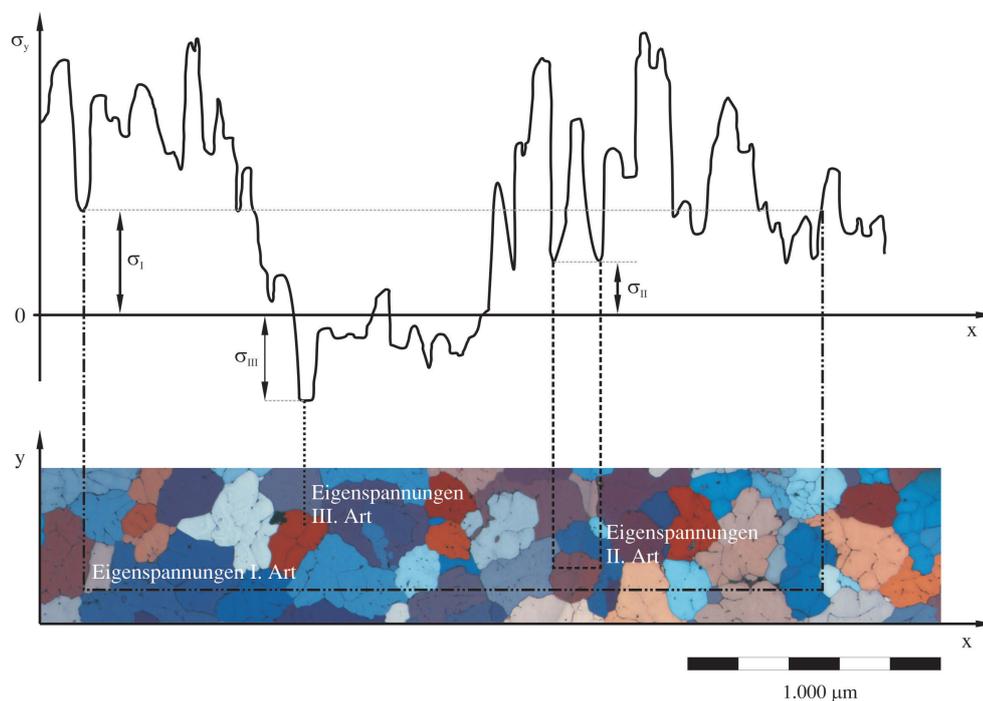
## 5.1 Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung

### 5.1.1 Simulationsmodell einer punktförmigen Lasereinwirkung

Als Eigenspannungen werden laut Definition Spannungen, die in Bauteilen ohne Einwirkung von äußeren Kräften und Momenten wirksam sind, bezeichnet [120].

Eigenspannungen werden in Eigenspannungen der I., II. und III. Art unterteilt und wie folgt bzw. wie in Abbildung 5.1 dargestellt klassifiziert [120, 121]:

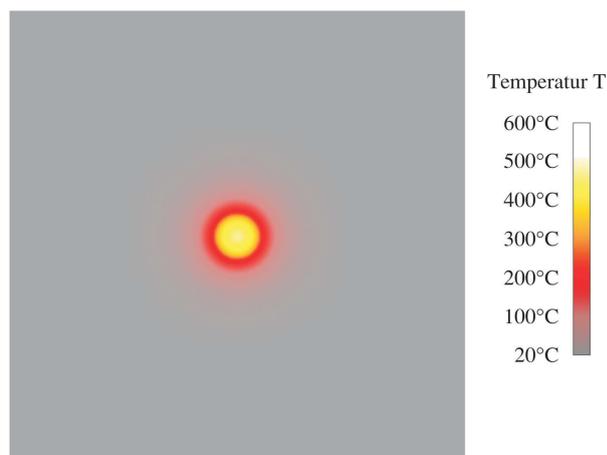
- Eigenspannungen I. Art  
sind über größere Werkstoffbereiche d.h. mehrere Körner nahezu homogen. Die mit den Eigenspannungen I. Art verbundenen inneren Kräfte sind bezüglich jeden Schnittes durch den ganzen Körper im Gleichgewicht. Ebenso verschwinden die mit ihnen verbundenen inneren Momente bezüglich jeder Achse. Bei Eingriffen in das Kräfte- und Momentengleichgewicht von Körpern, in denen Eigenspannungen I. Art vorliegen, treten immer makroskopische Maßänderungen auf.
- Eigenspannungen II. Art  
sind über kleine Werkstoffbereiche, wie ein Korn oder Kornbereiche, nahezu homogen. Die mit Eigenspannungen II. Art verbundenen inneren Kräfte und Momente sind über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht können makroskopische Maßänderungen auftreten.
- Eigenspannungen III. Art  
sind über kleinste Werkstoffbereiche (mehrere Atomabstände) inhomogen. Die mit Eigenspannungen III. Art verbundenen inneren Kräfte und Momente sind in kleinen Bereichen - Teile eines Kornes - im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht treten keine makroskopischen Maßänderungen auf.



**Abbildung 5.1:** Klassifizierung der unterschiedlichen Arten von Eigenspannungen: Bei der Einteilung von Eigenspannungen wird zwischen Eigenspannungen I. Art, die über mehrere Körner, Eigenspannungen II. Art, die über ein Korn oder Kornbereiche, und zwischen Eigenspannungen III. Art, die über Atomabstände wirken, unterschieden (Bildentnahme aus [122]) [120, 121].

Da die thermomechanische Eigenspannungsbildung, die unter Eigenspannungen der I. Art einzuordnen ist, primär von den Werkstoffeigenschaften und der Temperatur abhängt, lag der Fokus der FEM-Untersuchungen auf der Temperaturentwicklung und der Ausbildung der unterschiedlichen Spannungszustände während und nach der Laserbestrahlung.

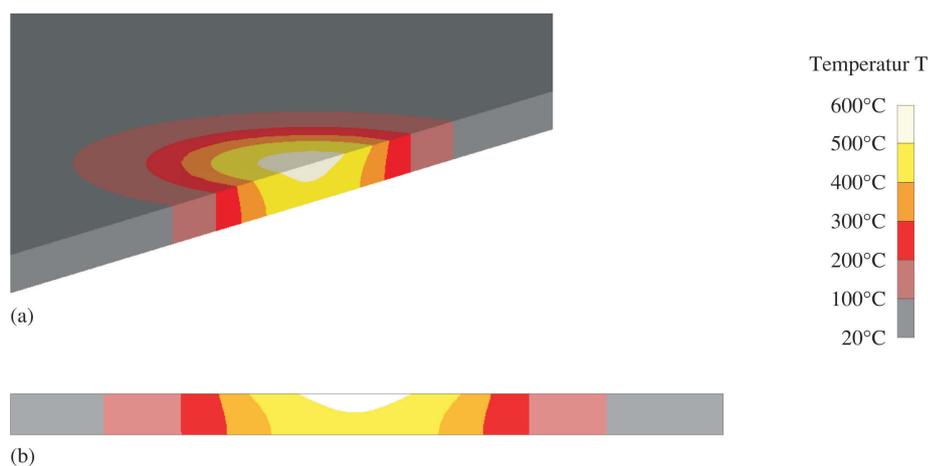
Bei der simulierten Lasereinwirkung auf ein DC01 Blech durch einen Nd-YAG Laser mit einer Leistung von 580 W und einem Fokussdurchmesser von 9 mm stellten sich laut den Simulationsergebnissen Maximaltemperaturen von rund 550 °C im Zentrum des Laserpunktes ein. In Abbildung 5.2 ist das Temperaturfeld nach 0,5 s Laserbestrahlung dargestellt. Die Abkühlgeschwindigkeit beträgt während der ersten 5 s 102,8 °C/s und sinkt gegen Erreichen der Raumtemperatur stark ab.



**Abbildung 5.2:** Maximaltemperaturverteilung unmittelbar nach der Lasereinwirkung: Abgebildet ist das simulierte Temperaturfeld, das sich nach Abschluss der Laserbestrahlung einstellt. Die aufgetretenen Temperaturen sind farblich skaliert und in der Legende ausgewiesen. Die Maximaltemperatur beträgt im Zentrum des Laserpunktes 550 °C.

Durch die einseitige Laserbestrahlung entsteht über die Blechdicke von 0,75 mm ein Temperaturgradient. Der Temperaturgradient in der Höhe von 76°C/mm ruft wiederum einen Spannungsgradienten über die Dicke und somit auch Verwerfungen in der Blechebene hervor.

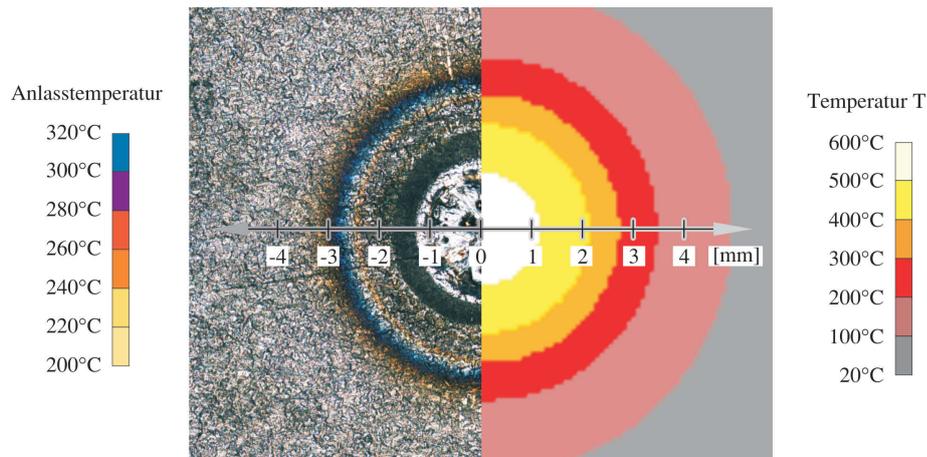
Abbildung 5.3 zeigt die Temperaturverteilung über die Plattendicke bei der punktwoisen Laserbestrahlung.



**Abbildung 5.3:** Temperaturverteilung über die Plattendicke während der Laserbestrahlung: (a) isometrische Ansicht und (b) Schnittdarstellung durch den Lasereinzelpunkt wobei die simulierte Temperaturverteilung farblich skaliert dargestellt ist.

Die Maximaltemperaturen der Simulation konnten durch Temperaturmessungen mit Thermoelementen und optische Messungen mit Hilfe eines Pyrometers während eines realen Versuches verifiziert werden.

In Abbildung 5.4 ist der Vergleich zwischen Maximaltemperaturen des Simulationsmodells nach der Laserbestrahlung und der Auswertung der Anlassfarben, die sich an der Blechoberfläche bildeten, dargestellt [123, 124].



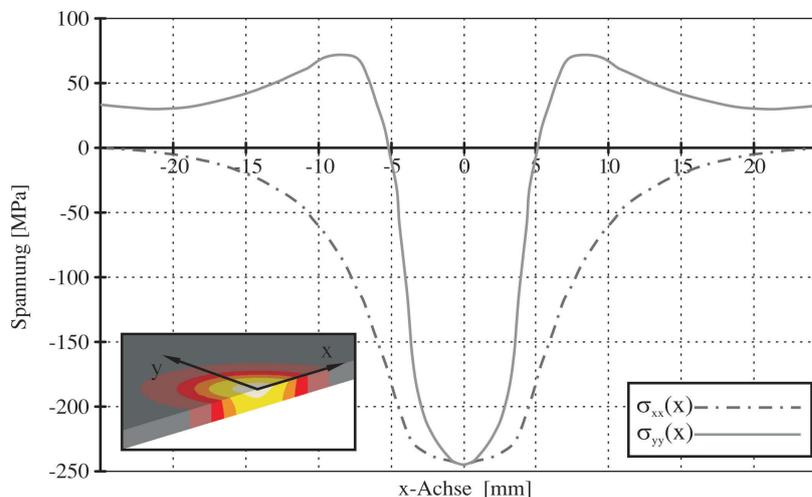
**Abbildung 5.4:** Vergleich der Maximaltemperaturverteilung nach der Lasereinwirkung mit den verbliebenen Anlassfarben: In der linken Hälfte der Abbildung sind die durch die Oxidschichtbildung entstandenen Anlassfarben nach der Laserbestrahlung dargestellt. In der rechten Hälfte sind zum Vergleich die simulierten Maximaltemperaturen visualisiert. Die beiden unterschiedlichen farblichen Skalierungen und deren zugeordnete Temperaturen sind aus den jeweiligen Legenden zu entnehmen [123, 124].

Mit der Einbringung der Wärmeenergie ist auch die lokale Einbringung von thermomechanisch hervorgerufenen Eigenspannungen verbunden. Bei den Untersuchungen wurden zwei Fälle - die Spannungen unmittelbar vor der Laserabschaltung und die Spannungen nach der Abkühlung auf Raumtemperatur - verglichen. Zusätzlich erfolgte eine Referenzmessung mit der Bohrlochmethode, um die errechneten Spannungen im Bereich des Laserpunktes zu verifizieren.

Bei der Untersuchung der Spannungen, wie in der Abbildung 5.5 und der Abbildung 5.6 dargestellt, wurden die Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse ermittelt.

In Abbildung 5.5 sind die Spannungsverläufe grafisch dargestellt, die unmittelbar für das thermomechanische Plastifizieren, d.h. für die Eigenspannungsentwicklung, verantwortlich sind.

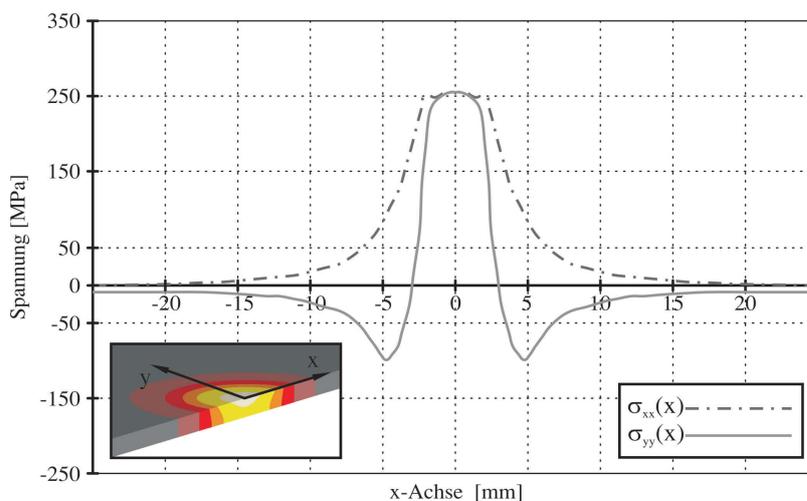
Dabei zeigen sich im Zentrum des Laserpunktes nach 0,499 s Bestrahlungsdauer auftretende Druckspannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  in der Größe von -245 MPa.



**Abbildung 5.5:** Spannungen während der Laserbestrahlung: Das Diagramm zeigt die simulierten Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse nach 0,499 s Laserbestrahlung durch den simulierten Nd-YAG Laser mit einer angewandten Leistung von 580 W.

Nach Abschaltung der Laserquelle und der Abkühlung an Luft tritt nach etwa 0,7 s im Bereich des Laserpunktzenters ein Wechsel der Druckspannungen zu Zugspannungen auf - siehe Abbildung 5.6.

Die verbleibenden Zugeigenspannungen nehmen im Zentrumsbereich Werte um 250 MPa an, wobei die Spannungen  $\sigma_{xx}$  ab einem Abstand von 15 mm von der Laserpunktmitte gegen Null gehen. Die Spannungen  $\sigma_{yy}$  wechseln in einem Radius von 0,3 mm von Zug- zu Druckeigenspannungen und gehen ab einem Radius von 16 mm gegen Null.



**Abbildung 5.6:** Spannungen nach der Laserbestrahlung: Das Diagramm zeigt die simulierten Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse nach der Abkühlung auf Raumtemperatur.

Zusätzlich zu den Simulationen der Auswirkungen einer Laserbestrahlung mit einer Leistung von 580 W auf eine 0,75 mm dicke DC01 Platte wurde mit Hilfe der Bohrlochmethode der Spannungsverlauf zur Verifizierung der Ergebnisse vorgenommen.

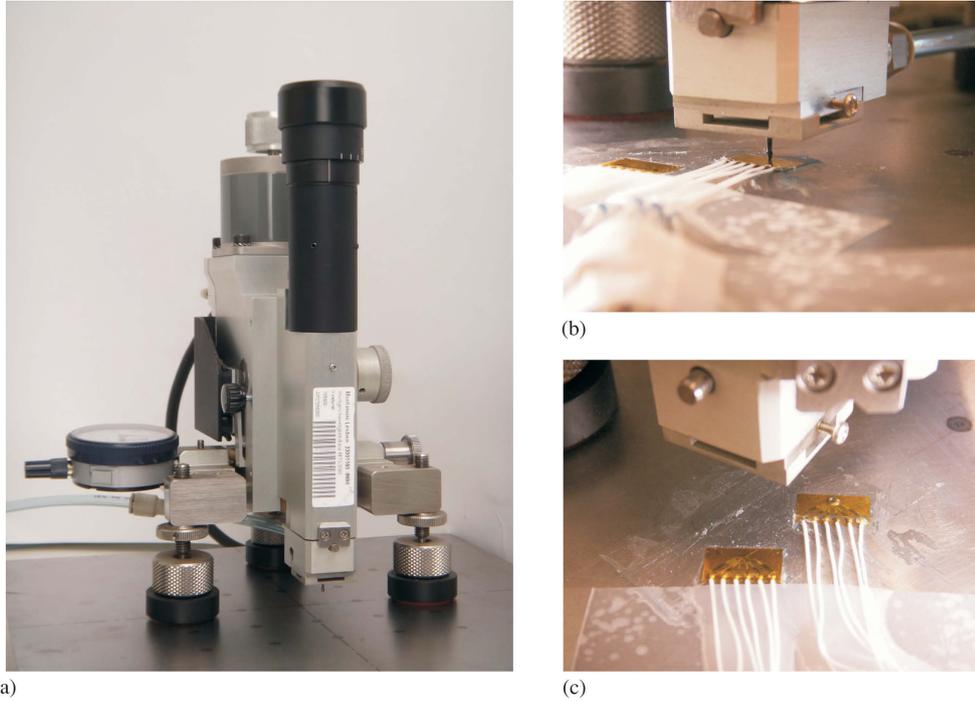
Die Bohrlochmethode erfordert vor der Messung eine mechanische Oberflächenaufrauung und eine Reinigung des zu untersuchenden Laserpunktes. Das eigentliche Messinstrument, die Dehnmessstreifenrosette (DMS-Rosette), die die Dehnungen durch eine Widerstandsveränderung in metallischen Messdrähten aufnimmt, wird direkt auf die Oberfläche des Bauteils aufgeklebt. Die Anordnung von drei mäanderförmigen Messdrahtpaaren, die in einem Winkel von jeweils  $45^\circ$  zueinander stehen, macht die Ermittlung der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$ , deren Winkel  $\alpha$  sowie in weiterer Folge eine Spannungsermittlung von  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  in beliebigen Winkeln möglich [125].

Vor der Messung erfolgt die lotrechte Positionierung einer Hochgeschwindigkeitsfräse oberhalb vom Zentrum der Messrosette, um durch eine zylindrische Bohrung Material zu entnehmen und somit die Eigenspannungen „freizuschneiden“ - siehe Abbildung 5.7.

Die pneumatisch betriebene Hochgeschwindigkeitsfräse verfügt über eine Drehzahl von  $400.000 \text{ min}^{-1}$  und eine variable Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 mm/min bis zu 0,25 mm/min [126].

Durch die hohe Drehzahl und einer angepassten Vorschubgeschwindigkeit kann sichergestellt werden, dass keine weiteren Veränderungen des Spannungszustandes durch die spanende Bearbeitung herbeigeführt werden. Da das Plattenbauteil nur eine Dicke von 0,75 mm aufwies, wurde das gesamte Blech durchbohrt und eine Messung über die gesamte Plattendicke vorgenommen.

Die beschriebene Vorgehensweise, das Blech komplett zu durchfräsen, bietet den Vorteil, dass keine Verfälschungen vom eigentlichen Messpunkt im Material über die Bohrungstiefe zum Messaufnehmer, der Messrosette, erfolgen und durch Korrekturwerte angeglichen werden müssen [125].



**Abbildung 5.7:** Bohrlochmethode: (a) Hochgeschwindigkeitsfräse vom Typ SINT RESTAN MTS3000; (b) Detailaufnahme der in regelmäßigen Abständen vom Laserpunkt geklebten DMS-Messrosetten vom Typ 1.5/120R RY61 und des Fräasers der pneumatisch betriebenen Hochgeschwindigkeitsfräse; (c) Detailaufnahme zweier Messrosetten, wovon die rechte durchfräste Messrosette zur Messung der Eigenspannungen im Zentrum des Laserpunktes verwendet wurde.

Über die gemessenen Dehnungen in den drei Messgittern der Messrosette erfolgte die Berechnung der Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  und des Winkels  $\alpha$  mit den Gleichungen

$$\sigma_{1,2} = -\frac{E}{4 \cdot A} \cdot (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c) \pm \frac{E}{4 \cdot B} \cdot \sqrt{(\Delta\varepsilon_c + \Delta\varepsilon_a)^2 + (\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b)^2} \quad (5.1)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \cdot \frac{\Delta\varepsilon_a + \Delta\varepsilon_c - 2 \cdot \Delta\varepsilon_b}{\Delta\varepsilon_c + \Delta\varepsilon_a}. \quad (5.2)$$

Dabei stehen  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$  und  $\varepsilon_c$  für die ermittelten Dehnungen in der DMS-Messrosette in den Richtungen von  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $90^\circ$ . Die Variablen  $A$  und  $B$  sind abhängig von den verwendeten DMS-Messrosetten sowie von Probenwerkstoff. Für DMS-Messrosetten vom

Typ 1.5/120R RY61 entspricht  $A = 0,04735 \cdot (1 + \nu)$  und  $B = 0,1894 - 0,01515 \cdot (1 + \nu)$ .  
Durch die beiden Gleichungen

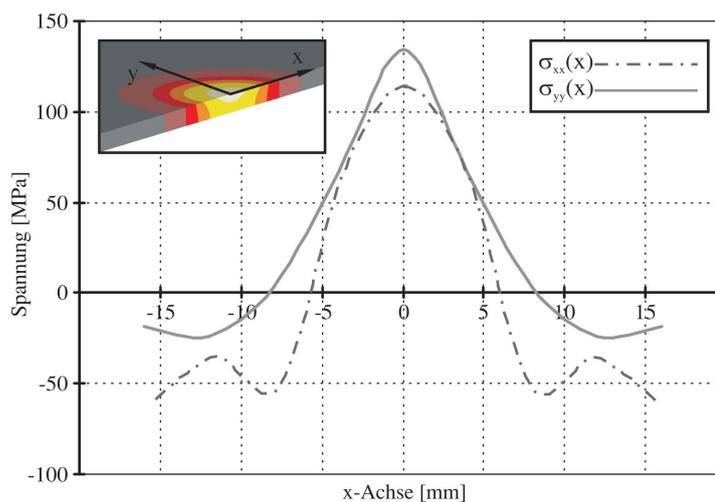
$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos \cdot 2 \cdot \alpha \quad (5.3)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos \cdot 2 \cdot \alpha \quad (5.4)$$

können die Spannungsermittlung von  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  im gewählten Koordinatensystem berechnet werden [125].

Mit Hilfe der Bohrlochmethode und über die beschriebenen Beziehungen wurden die in Abbildung 5.8 dargestellten Spannungsverläufe ermittelt.

Die Messungen ergaben Unterschiede in der maximalen Höhe der Spannungen und im Spannungsverlauf über die x-Achse - siehe Abbildung 5.6.



**Abbildung 5.8:** Gemessene Spannungen nach der Laserbestrahlung - Bohrlochmethode: Dargestellt sind die durch die Bohrlochmethode ermittelten Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse nach der Abkühlung auf Raumtemperatur [127].

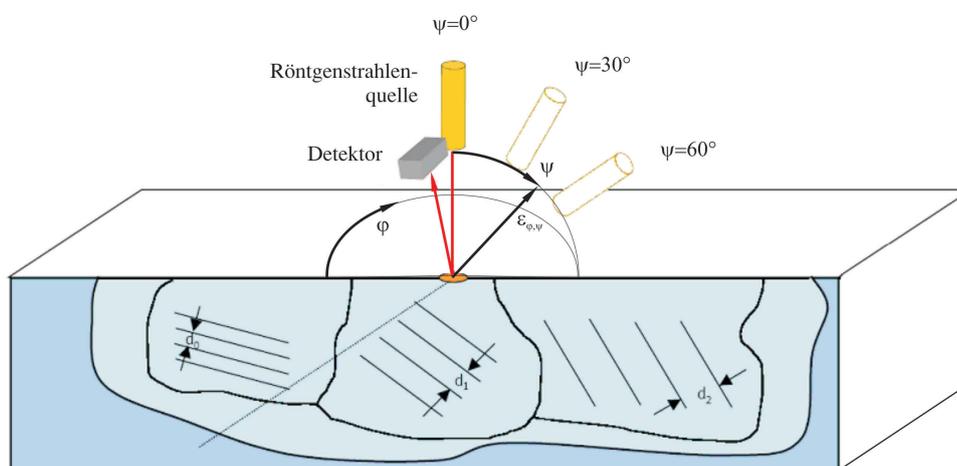
Zur weiteren Verifikation der Simulationsdaten wurden für die Eigenspannungsermittlung die zerstörungsfreie Röntgendiffraktometrie sowie eine alternative optische Messmethode mit dem ARAMIS<sup>®</sup> Messsystem herangezogen [128].

Die Röntgendiffraktometrie nach EN 15305, die auch Röntgenbeugungsverfahren genannt wird, arbeitet mit einer Röntgenquelle, die die laserbehandelten Platten punktuell unter verschiedenen Winkeleinstellungen bestrahlt. Dabei erfolgt eine Beugung der elektromagnetischen Strahlen an den Gitteratomen bis in eine Tiefe von  $2 \mu\text{m}$  bis  $3 \mu\text{m}$ . Dieses

Beugungsverhalten lässt sich in kristallin aufgebauten Werkstoffen durch das Bragg'sche Beugungsgesetz beschreiben (siehe Formel (5.5)), bei welchem  $\lambda$  der Wellenlänge,  $d$  dem Abstand der Gitterebenen und  $\theta$  dem Einfallswinkel der Strahlung entspricht [129].

$$\lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \cdot \theta \quad (5.5)$$

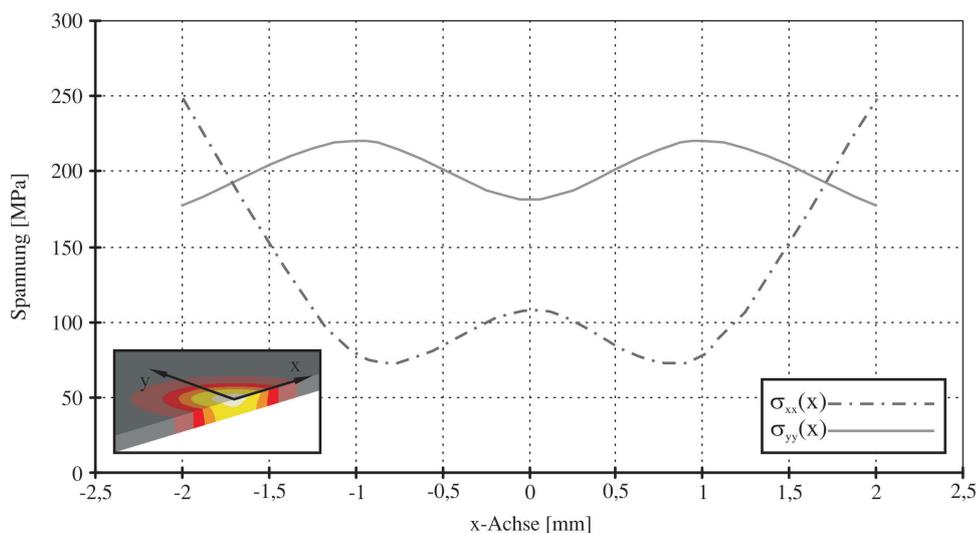
Bei der Eigenspannungsermittlung werden, wie in Abbildung 5.9 gezeigt, in mehreren Einzelmessungen die Gitterabstände  $d$  als Funktion des Winkels  $\psi$  ermittelt und mit den Gitterabständen einer neutralen, unverspannten Probe verglichen.



**Abbildung 5.9:** Röntgendiffraktometrie - Messkonzept: Die Röntgendiffraktometrie arbeitet mit einer Röntgenstrahlenquelle und einem Detektor mit deren Hilfe in mehreren Winkeln die Gitterabstände in einem Punkt gemessen werden. Durch den Vergleich der gemessenen Abstände in der eigenspannungsbehafteten Probe mit einer unverspannten Probe lassen sich der Spannungszustand und dessen Richtung ermitteln [129].

Durch den in Abbildung 5.9 veranschaulichten Vergleich der Gitterabstände können die Eigenspannungen und ihre Hauptspannungsrichtung in einem beliebigen Koordinatensystem punktuell ermittelt werden [129].

Das Ergebnis der Untersuchungen der Spannungsverläufe von  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse ist in Abbildung 5.10 gezeigt [127, 130].



**Abbildung 5.10:** Gemessene Spannungen nach der Laserbestrahlung - Röntgendiffraktometrie: Dargestellt sind die durch das Röntgenbeugungsverfahren ermittelten Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse nach der Abkühlung auf Raumtemperatur [127, 130].

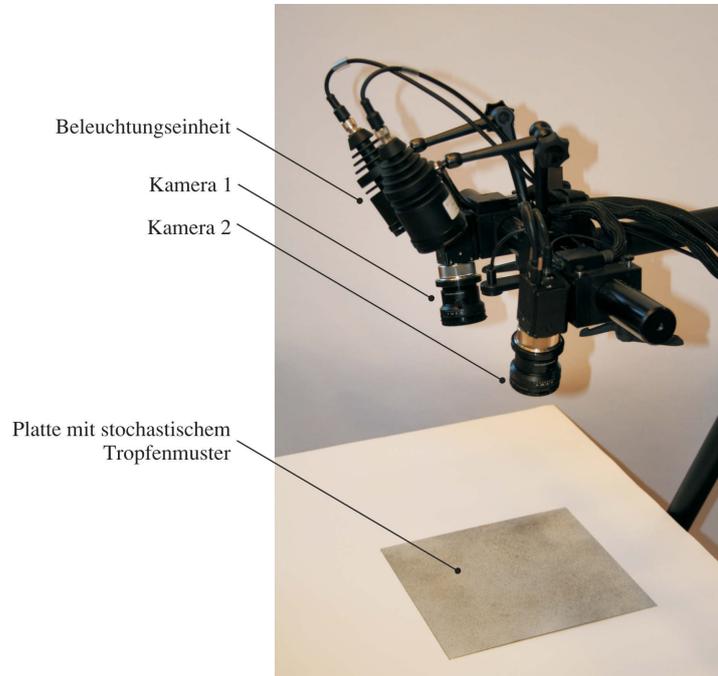
Zur optischen Bestimmung der Eigenspannungen wurde alternativ das Messsystem ARAMIS<sup>®</sup> verwendet - siehe Abbildung 5.11. ARAMIS<sup>®</sup> ist ein System zur optischen dreidimensionalen Verformungsanalyse. Es eignet sich besonders dazu, mit hoher Zeit- und Ortsauflösung sowie hoher Genauigkeit dreidimensionale Verformungen und Dehnungen an realen Bauteilen und Werkstoffproben zu messen [131].

Für statisch oder dynamisch belastete Probenkörper ermöglicht ARAMIS<sup>®</sup> die berührungslose und materialunabhängige Bestimmung von:

- 3D-Koordinaten und deren 3D-Verschiebungen,
- 3D-Geschwindigkeiten und Beschleunigungen,
- ebenen Dehnungstensoren und ebenen Dehnungsraten sowie
- Ermittlung von Materialkennwerten.

ARAMIS<sup>®</sup> erfasst in digitalen Bildern die Oberflächenstruktur der Probe und ordnet Bildpixeln Koordinaten zu. Dafür werden die Messobjekte zuvor mit einem weißen Lack grundiert und mit einem schwarzen Lack besprüht, um ein stochastisches Tropfenmuster zu erhalten. Die ersten Koordinaten entstehen bereits bei der Aufnahme des Referenzzustandes. Diese Aufnahme stellt im Messprojekt den unverformten Zustand dar. Nach oder während der Verformung der Messprobe erfolgen weitere Aufnahmen. Das optische Messsystem vergleicht nun die digitalen Aufnahmen und berechnet die Verschiebung und

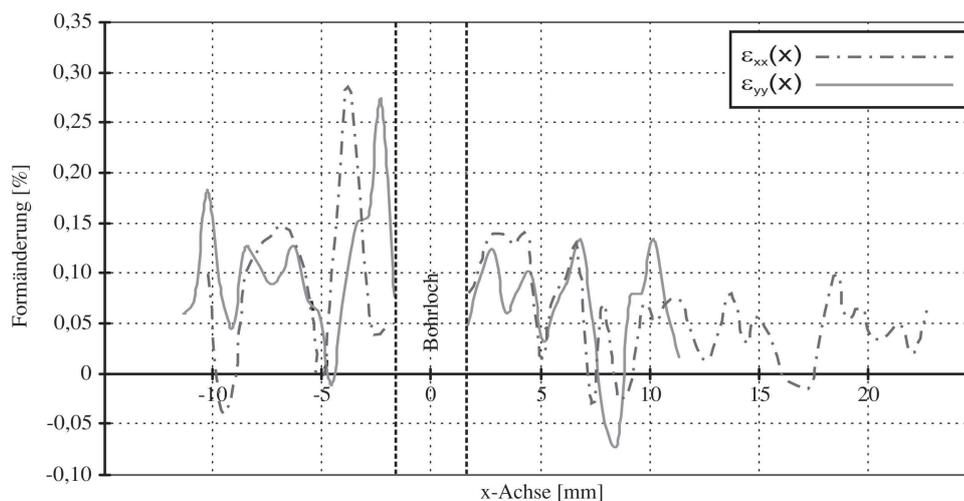
Verformung der Objektmerkmale. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.11 dargestellt.



**Abbildung 5.11:** ARAMIS® Messsystem: Optisches Messsystem ARAMIS® bestehend aus einer Beleuchtungseinheit, zwei Kameras sowie Hard- und Software zur Berechnung der Verzerrungen. Weiters ist das laserbestrahlte Blech mit dem stochastischen Tropfenmuster abgebildet.

Zur Bestimmung der Eigenspannungen mit ARAMIS® wurde die Messung mit dem Bohrlochverfahren kombiniert. Konkret wurde auf einer Seite des Bleches, die nicht mit Dehnungsmessrosetten beklebt wurde, ein stochastisches Muster aufgetragen und nach jedem durch die Hochgeschwindigkeitsfräse gefertigten Loch eine Aufnahme und rechnerische Auswertung der Daten des verzerrten Musters durchgeführt.

Abbildung 5.12 zeigt die ausgewerteten Formänderungen entlang der x-Achse.

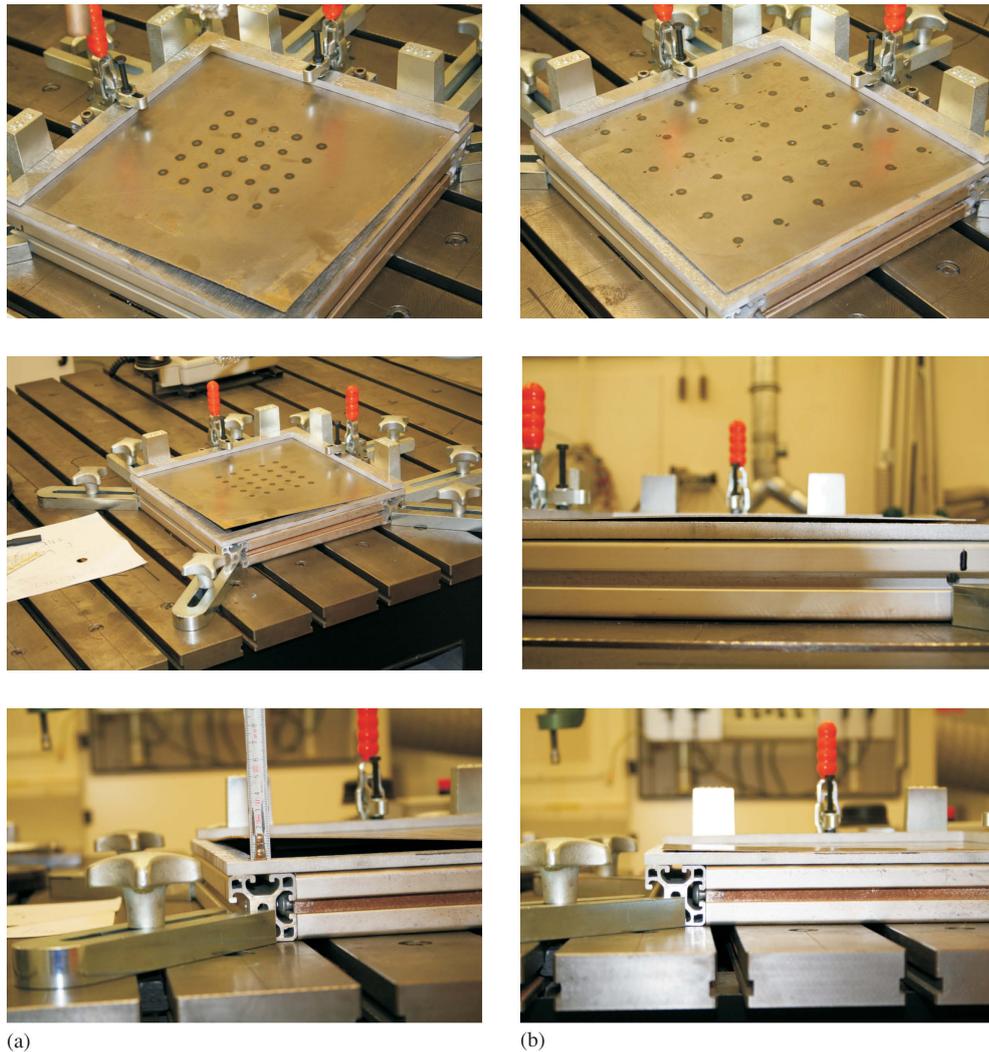


**Abbildung 5.12:** Gemessene Formänderungen nach der Laserbestrahlung - ARAMIS<sup>®</sup> System: Dargestellt sind die durch eine optische Analyse ermittelten Formänderungen  $\epsilon_{xx}$  und  $\epsilon_{yy}$  entlang der x-Achse nach der Abkühlung auf Raumtemperatur. Weiters ist mit strichlierten Linien die Lage der Bohrung, die durch die Bohrlochmethode erforderlich war, eingezeichnet [127, 130].

### 5.1.2 Lasermuster und Lasersequenzen

Nach der 1. Herstellungsserie, die mit einem Nd-YAG Laser mit einer Leistung von 670 W, einem Laserstrahldurchmesser von 9 mm und einer Bestrahlungsdauer von 2,1 s durchgeführt wurde, konnte festgestellt werden, dass die eingebrachte Energie für die Blechdicke von 0,75 mm zu hoch ist.

Dies äußerte sich in einem lokalen und oberflächlichen Aufschmelzen des Materials im Zentrum des Laserpunktes. Weiters stellte sich sowohl bei den Linienmustern als auch bei den Punktemustern ein unzulässiger Verzug der Blechoberfläche ein. Dieser Verzug ist zum einen durch die Form der Eigenspannungseinbringung thermisch bedingt und zum anderen das Resultat der verbleibenden Restspannungen im ausgekühlten Material - siehe Abbildung 5.13.

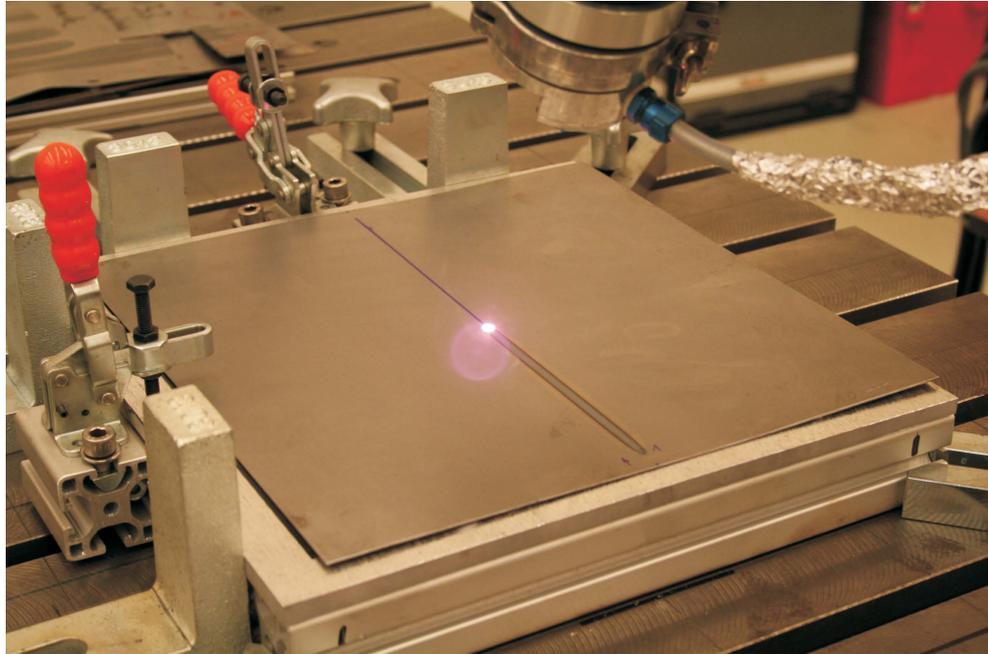


**Abbildung 5.13:** Verzug der laserbestrahlten Bleche aus der 1. Herstellungsserie: Thermischer Verzug und Resultat der eingebrachten Spannungen an zwei beispielhaft verwendeten Blechen der 1. Herstellungsserie. (a) 25 Punktemuster mit einem Punkteabstand von 25 mm und (b) mit einem Abstand von 35 mm zwischen den einzelnen Punkten. Die Bildfolgen (a) und (b) zeigen die jeweiligen Platten mit den unterschiedlichen Laserpunktemustern und die dadurch entstandenen Deformationen in drei verschiedenen Perspektiven. Besonders markant sind dabei die Deformationen im Bereich der freiliegenden Ecken.

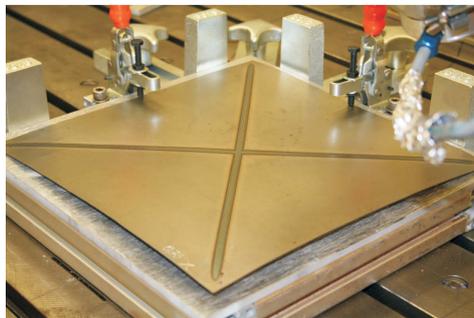
Da laut den verifizierten Simulationsergebnissen auch mit den Lasereinstellungen der 2. Herstellungsserie genügend Energie zur thermomechanischen Eigenspannungseinbringung vorhanden ist, beschränken sich alle weiteren Ergebnisse auf die 2. und 3. Herstellungsserie.

Auch in der 2. Herstellungsserie mit einer Laserleistung von 580 W über eine Dauer von 0,5 s zeigte eine optische Klassifizierung, dass sich bei den durchgehenden Linienmustern,

wie in Abbildung 5.14 angeführt, ein zu großer Verzug einstellt. Diese Art von Vorverformung führt zu einer Herabsetzung der Beulstabilität.



(a)



(b)



(c)

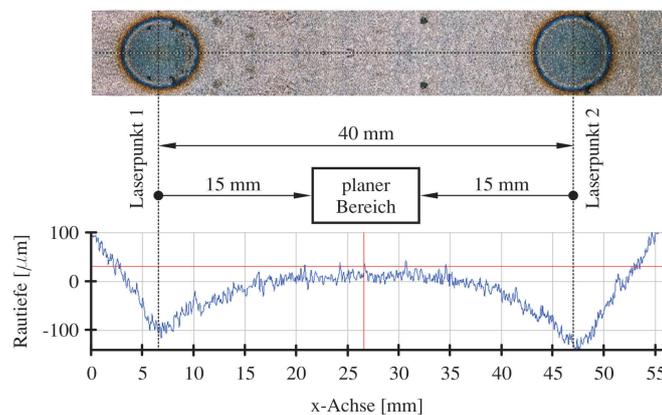
**Abbildung 5.14:** Verzug der laserbestrahlten Bleche mit Linienmustern aus der 2. Herstellungsserie: Thermischer Verzug und Resultat der eingebrachten Spannungen an Blechen der 2. Herstellungsserie, in denen linienartige Eigenspannungszustände erzeugt wurden. (a) Laserquelle während der Herstellung der I-Geometrie; (b) Verzug des Bleches mit X-Geometrie und (c) Blechdeformation nach einer Laserbestrahlung in O-Form.

Aus diesem Grund beschränkten sich sämtliche Untersuchungen auf die Einzelpunktmuster, da lediglich durch ein lokales und punktuell Herbeiführen von Eigenspannungen negative Randerscheinungen wie Verwölbungen des Bleches vermieden bzw. eingeschränkt werden können.

Weitere Untersuchungsergebnisse zeigten während der Bestrahlung in Form von Lasereinzelpunkten zusätzlich zum thermischen Verzug eine Korrelation zwischen Punkteabstand, der Reihenfolge der Punktemustereinbringung und dem Grad der Blechdeformation. Der Zusammenhang des Punkteabstandes und des Blechverzuges ist in Abbildung 5.13 ersichtlich.

Da laut der Simulation die im Material verbliebenen Eigenspannungen ab einem radialen Abstand von ca. 15 mm gegen Null gehen und das Blech ab diesem Abstand bei weitem weniger Verwölbung aufweist, kann von einem idealen Punkteabstand von 30 mm ausgegangen werden.

Durch eine berührungslose Vermessung der Oberfläche durch das Messsystem Alicona<sup>®</sup> kann dieser Abstand, wie in Abbildung 5.15 dargestellt, bestätigt werden.

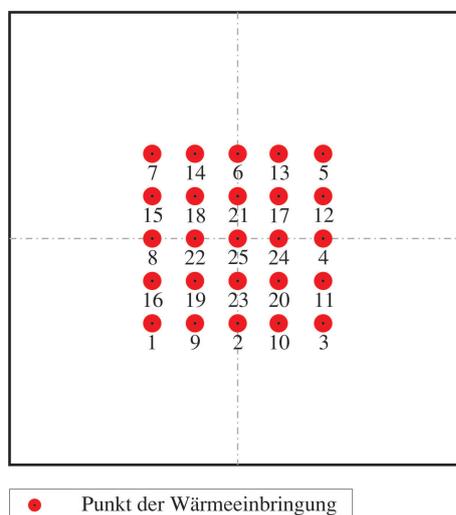


**Abbildung 5.15:** Vermessung der Topographie im Bereich der Laserpunkte: Durch eine berührungslose Oberflächenvermessung erfolgte die Ermittlung der Topographie und der Oberflächenrauheit (blaue Diagrammlinie) zwischen zwei 40 mm voneinander entfernten Laserpunkten. Dabei stellte sich nach einem Radius von 15 mm um jeden Laserpunkt ein planer Bereich ein. Demnach gehen die eingebrachten Eigenspannungen nach einem Abstand von 15 mm gegen Null und das Blech erfährt keinen Verzug mehr.

Zusätzlich zu dem ermittelten Idealabstand von 30 mm zeigte sich eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen Schweißfolge und der Verwölbung des Bleches. Die zur Untersuchung der Punktefolge herangezogenen Sequenzen

- Sinussequenz,
- Ringsequenz,
- Spiralsequenz und
- Pilgerschrittsequenz

ergaben, dass eine Kombination aus Ring- und Pilgerschrittsequenz mit einem Punkteabstand von 30 mm und einer Abkühldauer zwischen den Laserbestrahlungen von 10 s zum geringsten Verzug führt. Der Schweißfolgeplan ist in Abbildung 5.16 detailliert dargestellt.



**Abbildung 5.16:** Schweißfolgeplan der Lasereinzelpunktemuster: Der abgebildete Schweißfolgeplan erwies sich in Bezug auf die Vermeidung von thermischem Verzug als am besten geeignet.

Andere Versuche, um den Herstellungsprozess zu verbessern, wie die beidseitige Laserbestrahlung eines Punktes oder die alternierende Bestrahlung der Blechoberseite und der Blechunterseite, erwiesen sich als nicht zielführend. Diese Verbesserungsversuche führten lediglich zu einer verlängerten Prozessdauer, zu teilweise größerem Verzug oder in anderen Fällen zu nicht nachweisbaren Verbesserungen.

Die in der 2. Herstellungsserie gewonnenen Ergebnisse wurden bei der 3. Herstellungsserie weiter umgesetzt.

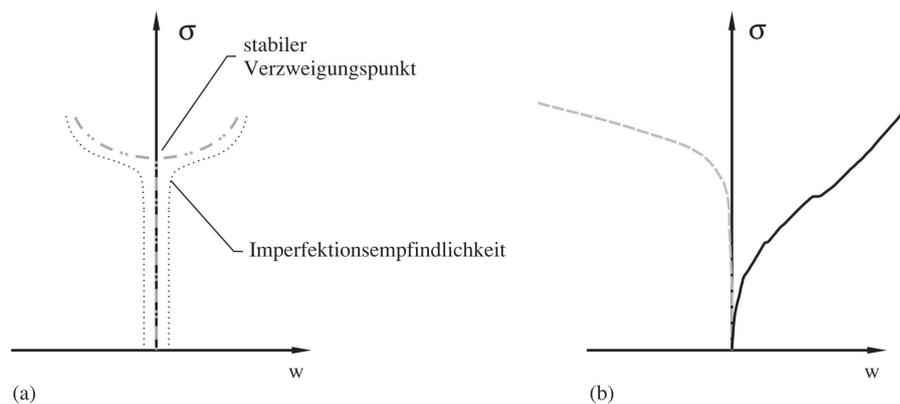
### 5.1.3 Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von laserbehandelten Platten

Die Untersuchungsergebnisse zur Beulstabilität von handelsüblichen DC01 Blechplatten und von Platten mit lokal eingebrachten Eigenspannungen der 2. und 3. Herstellungsserie zeigten in allen Fällen Abweichungen des Kraft/Verschiebungsverhaltens von den idealisierten Modellen, welche in Kapitel 3 beschrieben sind.

Der Vergleich des realen Kraft/Verschiebungsverhaltens, in dem die gemessene Vertikal- kraft über die Horizontalverschiebung im Plattenzentrum aufgetragen wird, mit dem idea-

lisierten Modell, in dem es zum spontanen Verlassen der Gleichgewichtslage am Verzweigungspunkt beim Erreichen der kritischen Beullast kommt, zeigt, dass im Experiment das idealisierte Verhalten nur ansatzweise erreicht werden kann.

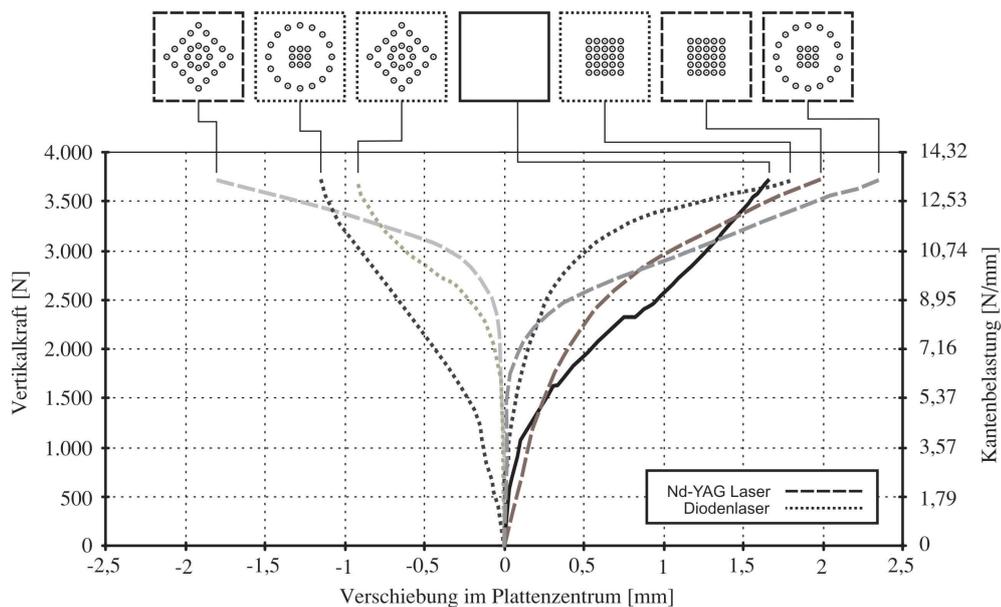
Diese Abweichung zwischen Theorie und praktischem Versuch ist in Abbildung 5.17 dargestellt.



**Abbildung 5.17:** Kraft/Verschiebungsverlauf - Vergleich Theorie mit praktischem Versuch: (a) [39] Darstellung des theoretischen Verlaufs der Vertikalkraft  $\sigma$  über die Verschiebung  $w$  von Platten, die einer vertikalen Druckkraft ausgesetzt sind. Beim Erreichen der kritischen Beullast kommt es am Verzweigungspunkt zu einem spontanen Stabilitätsverlust und somit zum Beulen der Platte. Allerdings ist es durch Imperfektionen in der Platte möglich, dass es zu Abweichungen von der idealen Kraft/Verschiebungskurve kommt. Somit ist durch die Imperfektionen ein Verlauf bzw. eine vertikale Verschiebung des Verzweigungspunktes innerhalb der punktierten Linie möglich. Unter (b) sind praktisch ermittelte Verläufe abgebildet, die sich aufgrund von vorhandenen Imperfektionen und Fertigungsungenauigkeiten ergeben können.

Gründe für dieses Abweichen liegen in der herstellungsbedingten Unebenheit der Platten und in den Fertigungstoleranzen bei der Prüfstandsfertigung.

Weiters zeigte der direkte Vergleich des unbehandelten mit den laserbehandelten Blechen und deren Kraft/Verschiebungsverhalten im Beulprüfstand unterschiedlich stark variierende Steifigkeiten - siehe Abbildung 5.18. D.h. die Blechsteifigkeit kann sich im unteren Prüfkraftbereich ( $\leq 1.200$  N), im mittleren Prüfkraftbereich (1.200 N bis 2.400 N) und im oberen Bereich ( $\geq 2.400$  N) verändern. Dadurch ist eine objektive Beurteilung und Charakterisierung der verschiedenen Punktemuster schwierig.



**Abbildung 5.18:** Kraft/Verschiebungsverlauf der laserbehandelten Bleche der 2. und 3. Herstellungsserie: Im Diagramm sind die Ergebnisse der Beulsteifigkeitsuntersuchungen von Blechen mit Lasereinzelpunkten dargestellt, die mit einem Nd-YAG Laser mit 580 W und einem Diodenlaser mit 300 W eingebracht wurden. Zusätzlich wurde zum Vergleich der Kraft/Verschiebungsverlauf eines unbehandelten Bleches abgebildet.

Southwell [132] vergleicht die berechneten Stabilitätsgrenzen mit experimentellen Ergebnissen. Eine andere grafische Möglichkeit besteht durch Anlegen einer Tangente an die experimentell ermittelte Kraft/Verschiebungskurve. Im Schnittpunkt der Tangente mit der Ordinate wird die theoretische kritische Beullast abgelesen.

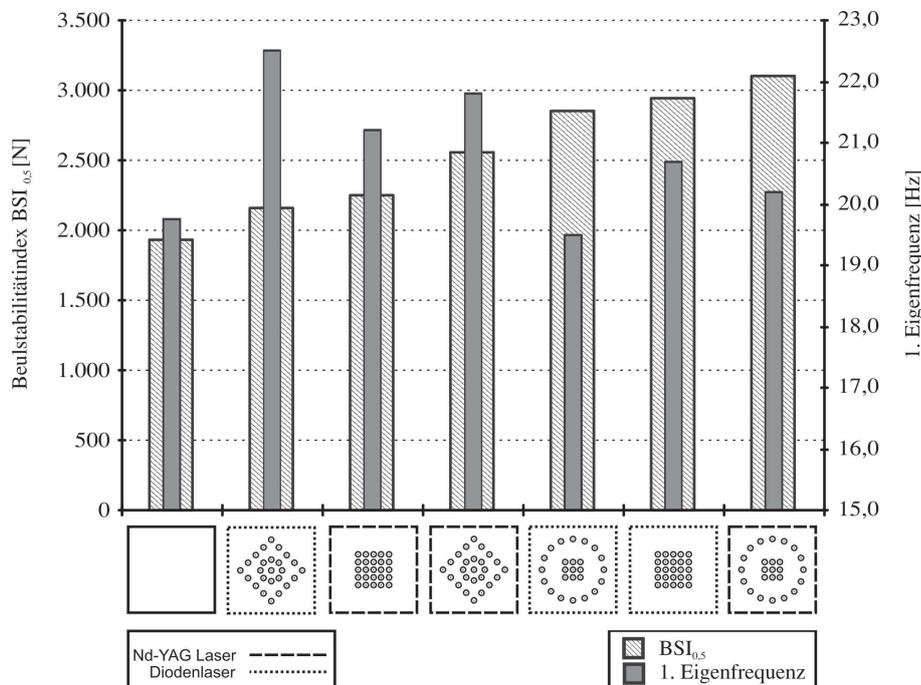
Da diese Modelle für die durchgeführten Experimente nicht anwendbar sind, wurde ein neuer Bewertungsindex eingeführt.

Bei der Bewertung der Steifigkeiten der einzelnen Lasermuster kann durch die Einführung des Beulstabilitätsindex ein direkter Vergleich vorgenommen werden.

Der Beulstabilitätsindex oder kurz  $BSI_{0,5}$  ist durch die aufgebrachte Vertikalkraft bei einer Ausbeulung im Plattenzentrum von 0,5 mm definiert. Dabei wird der Kraft/Verschiebungsverlauf zwischen einer Verschiebung von 0 mm bis 0,5 mm ignoriert, da speziell dieser Bereich imperfektionsempfindlich ist - siehe Abbildung 5.17. Der Stabilitätsindex ist somit die Kraft bei einer Verschiebung des Plattenzentrums von 0,5 mm.

Demnach ergeben sich bei einem unbehandelten DC01 Stahlblech der Abmessungen 280 mm x 280 mm x 0,75 mm ein  $BSI_{0,5}$  von 1.931,25 N und die anschließend ermittelte Eigenfrequenz vom 19,75 Hz.

Die weiteren Ergebnisse des  $BSI_{0,5}$  und der ersten Eigenfrequenz der mit dem Nd-YAG Laser und dem Diodenlaser bestrahlten Bleche sind in Abbildung 5.19 dargestellt.



**Abbildung 5.19:** Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der laserbehandelten Bleche der 2. und 3. Herstellungsserie: Dargestellt sind der Beulstabilitätsindex  $BSI_{0,5}$ , der durch die Vertikalkraft ab einer Ausbeulung des Plattenzentrums von 0,5 mm definiert ist, und die Messwerte der 1. Eigenfrequenz der unterschiedlichen Lasermuster, die mit einem Nd-YAG Laser und einem Diodenlaser eingebracht wurden.

Bei dieser Betrachtungsweise kristallisieren sich die Muster Kreis mit innenliegendem Viereck des Nd-YAG Lasers und das 25 Punkte Diodenlasermuster als die Lasermuster heraus, die den größten Steifigkeitsgewinn ermöglichen.

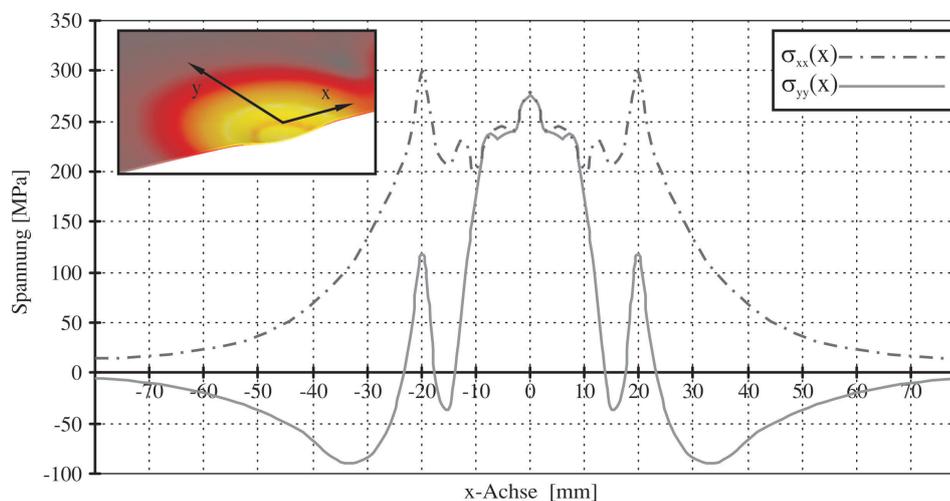
Das Muster Raute mit innenliegendem Kreis ist jenes, das den größten Grundfrequenzzuwachs gegenüber dem unbehandelten Blech erreicht. Dieses Ergebnis konnte bei der Behandlung mit beiden Lasertypen erzielt werden.

Detaillierte Untersuchungen zeigten, dass die Walzrichtung der Bleche und die damit verbundene Kornlängung keinen Einfluss auf das Beulverhalten haben. Demnach sind bei den durchgeführten Untersuchungen Einflüsse durch die bestehende Anisotropie auszuschließen.

## 5.2 Wölbstrukturierungen durch Hohlprägungen

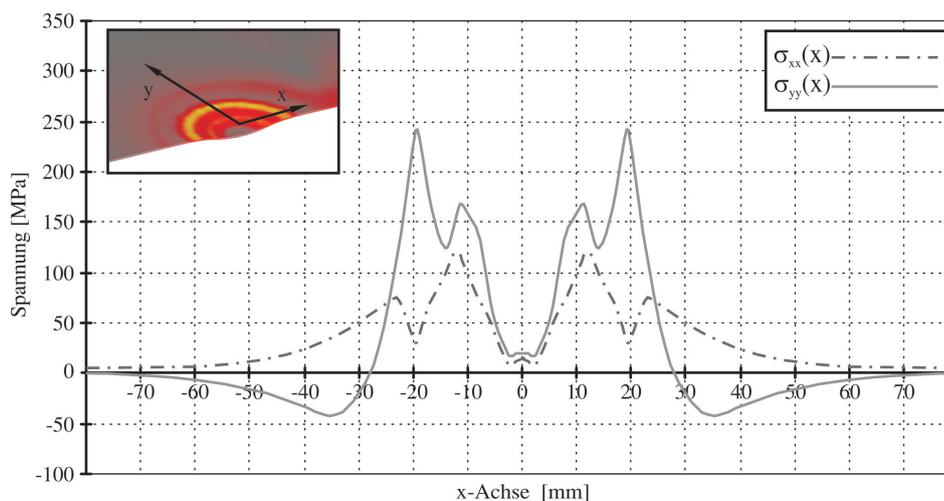
### 5.2.1 Simulationsmodell der Einbringung von Hohlprägestrukturen

Die Simulation des Herstellungsprozesses der Hohlprägungen zeigt am Ende der Umformung, d.h. am unteren Totpunkt der pneumatischen Umformmaschine, Zugspannungen bis zu 300 MPa in einem Radius von 20 mm um das Zentrum der kreisrunden Hohlprägung, was dem Werkzeugradius entspricht - siehe Abbildung 5.20.



**Abbildung 5.20:** Simulation der Spannungen während der Herstellung von Hohlprägungen: Dargestellt sind die Spannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der axialsymmetrisch angeordneten x-Achse am unteren Totpunkt der pneumatischen Umformmaschine.

Nach dem Prägevorgang bilden sich laut Simulation Zugspannungen bis 245 MPa aus, die ringförmig um das Zentrum der Hohlprägung wirken. Die beschriebenen Spannungsausbildungen sind in Abbildung 5.21 graphisch veranschaulicht.



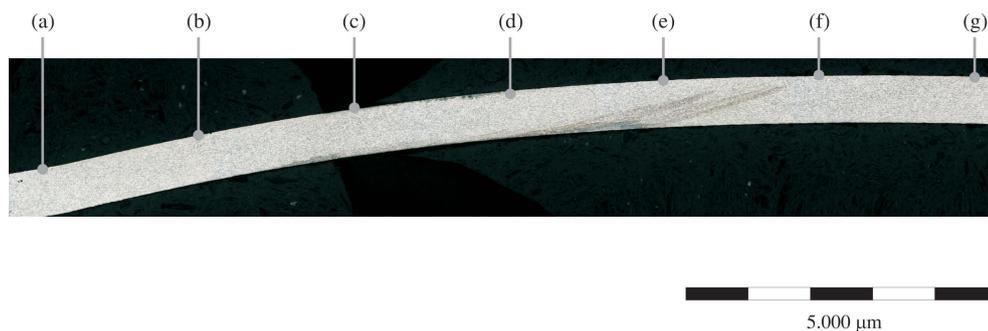
**Abbildung 5.21:** Simulation der Eigenspannungen im Bereich der Hohlprägung: Dargestellt sind die verbliebenden Eigenspannungen  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse nach Abschluss des Prägevorganges.

Auf weitere experimentelle Vergleiche der Spannungszustände im Blech musste verzichtet werden, da eine Applikation von Dehnungsmessstreifen und eine lotrechte Positionierung der Hochgeschwindigkeitsfräse in den Radien der Hohlprägungen nicht möglich sind.

### 5.2.2 Herstellungsprozess der Hohlprägungen

Weder die einseitige noch die wechselseitige Einbringung der Hohlprägestrukturen zeigten gravierende Veränderungen in der Geometrie oder in der Planheit der Bleche.

Die Untersuchungen an den Blechquerschnitten nach dem Prägeprozess (siehe Abbildung 5.22) zeigten eine Blechdickenabnahme der Ausgangsdicke von 0,75 mm um 3,02 % auf eine Enddicke von 0,728 mm am Mittelpunkt der Hohlprägung. Dieses Ergebnis und zusätzliche Messungen ergaben, dass es lediglich zu einer Ausdünnung des Bleches kommt und nicht zu einer Veränderung der Ausgangsdimension von 280 mm x 280 mm.



**Abbildung 5.22:** Vermessung der Blechdicke im Bereich einer Hohlprägung: Schlifffarbe bis zur Mittelachse einer Hohlprägung. Durch die Umformung wurde die ursprüngliche Blechdicke von 0,75 mm auf die folgenden Dicken reduziert: (a) 0,75 mm; (b) 0,748 mm; (c) 0,746 mm; (d) 0,743 mm; (e) 0,739 mm; (f) 0,736 mm; (g) 0,728 mm.

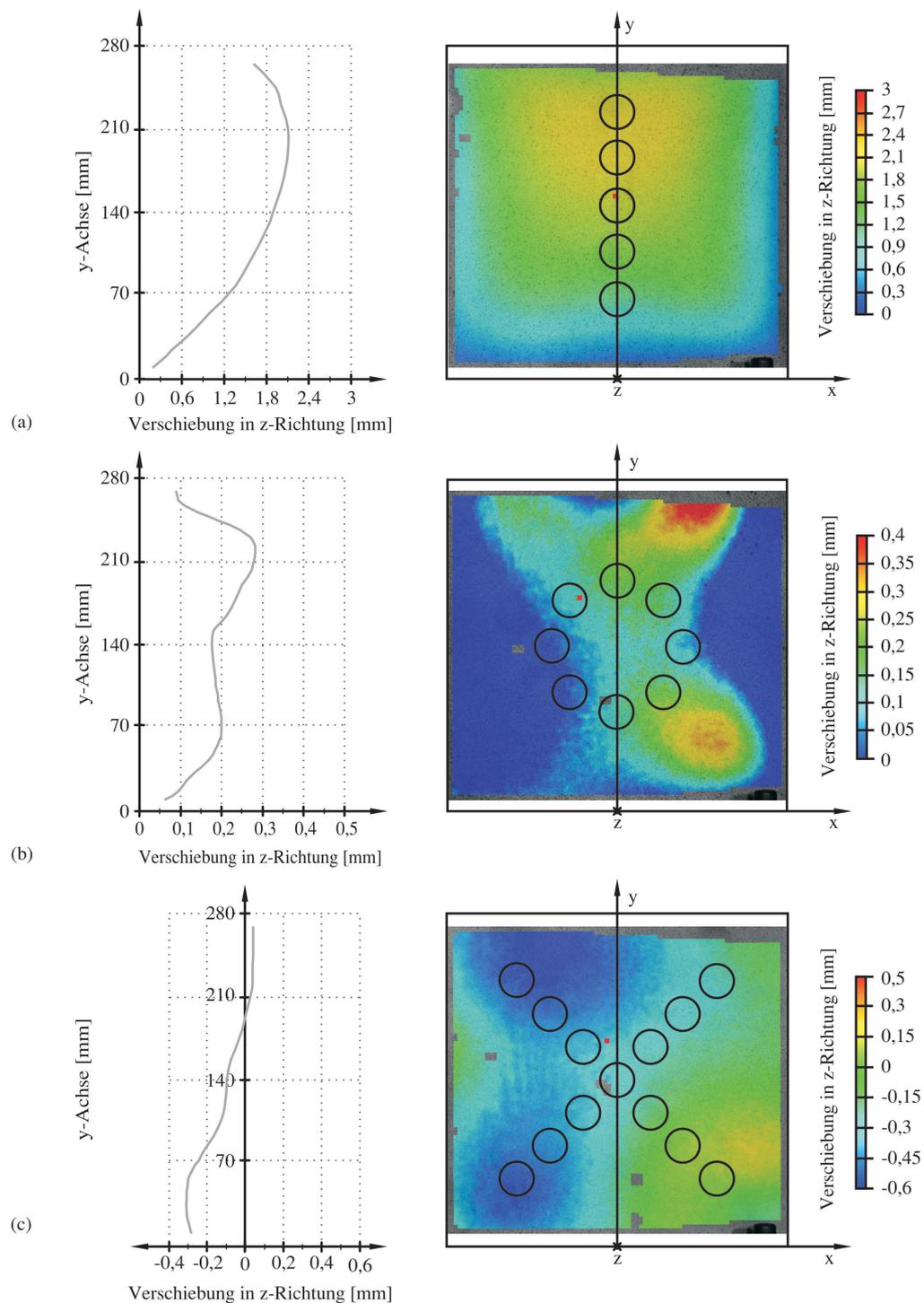
### 5.2.3 Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von wölbstrukturierten Blechen

Die statischen Untersuchungen der Hohlprägungsmuster zeigen keine regelmäßigen Beulformen der 1. Beulfigur für quadratische Rechteckplatten - d.h. es kommt nicht wie bei den laserbehandelten Blechen zur Ausbildung einer Halbwellenbeulfigur der Halbwellenzahl  $m=n=1$ .

Dies wurde durch Messungen mit einem zweiten induktiven Wegaufnehmer bestätigt. Die Abweichungen von der 1. Beulfigur, der Halbwellen, erklären sich aus dem massiven Einwirken auf das Trägheitsmoment aufgrund der Topographieveränderungen durch die Hohlprägungen an der Blechoberfläche.

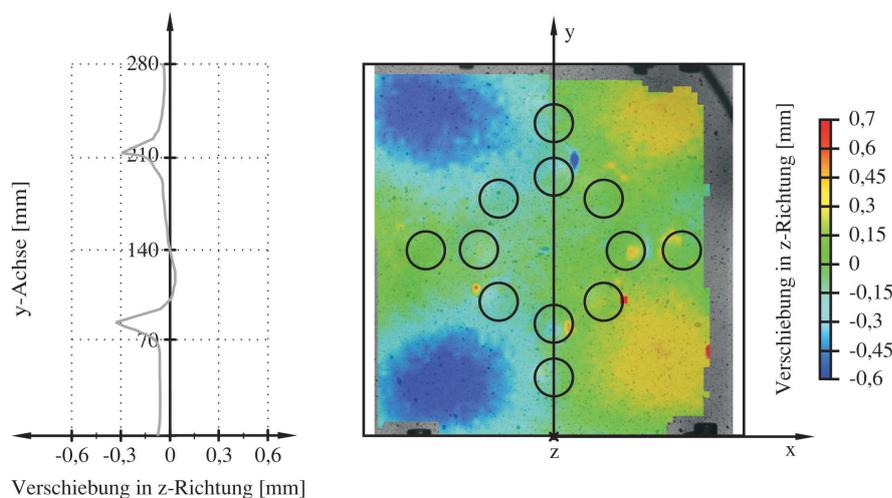
Daher wurde die statische Beuluntersuchung mit einer dreidimensionalen optischen Verzerrungsanalyse - dem Messsystem ARAMIS<sup>®</sup> kombiniert. Diese Art der Untersuchung bietet den Vorteil, dass jeder Punkt auf der Blechoberfläche und dessen Bewegungen im Raum während des Beulversuches verfolgt werden können.

Abbildung 5.23 zeigt die durch Farben optisch kenntlich gemachten Verschiebungen bei den wölbstrukturierten Blechen der 1. Versuchsserie.



**Abbildung 5.23:** ARAMIS<sup>®</sup> Analyse der Beulstabilitätsuntersuchungen von wölbstrukturierten Blechen: Die statische Analyse der mit Hohlprägungsmustern versehenen Bleche ergab verschiedene Beulfiguren aufgrund der lokalen Trägheitsmomentenbeeinflussung. Durch die ARAMIS<sup>®</sup> Analyse dieser Beulfiguren bei einer Prüfkraft von maximal 3.000 N konnten die Verschiebungen aus der Plattenebene (z-Achse) farblich sichtbar gemacht und in Diagrammen abgebildet werden. Dargestellt sind die Verschiebungsdiagramme und die farblich abgestuften Beulfiguren von (a) I-Geometrie, (b) Kreisgeometrie und (c) X-Geometrie.

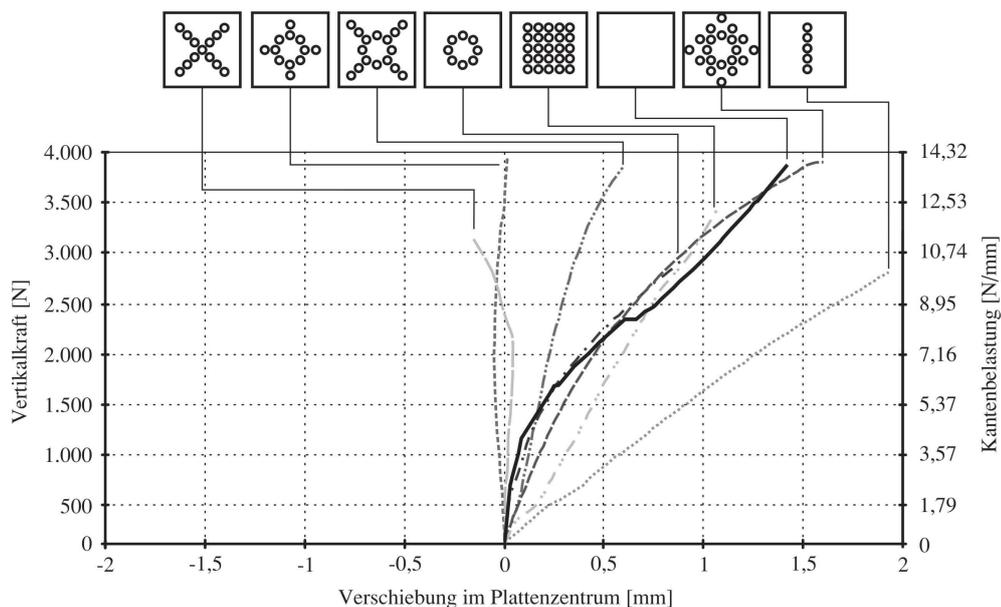
Aufgrund der Ausbildung der verschiedenen Beulfiguren aus der 1. Versuchsserie konnten durch eine Kombination der bestehenden Muster iterativ weiterentwickelte Hohlprägungsgeometrien eingebracht werden. Dabei wurden Muster und die dazu charakteristischen Beulfiguren derart kombiniert, dass sich im Idealfall die Maxima der Ausbeulung des einen durch die Minima der Ausbeulung des anderen Beulmusters nahezu kompensieren. Die Abbildung 5.24 veranschaulicht die Vorgehensweise der genetischen Weiterentwicklung der 2. Versuchsserie.



**Abbildung 5.24:** ARAMIS<sup>®</sup> Analyse der Beulstabilitätsuntersuchungen von genetisch verbesserten wölbstrukturierten Blechen: Durch die Kombination von verschiedenen Hohlprägungsstrukturen, wie die I-Geometrie bzw. deren Abwandlungen mit der Kreisgeometrie (siehe Abbildung 5.23) lassen sich neue Geometrien entwickeln. Durch diese gezielte Kombination lassen sich weitere Verbesserungen der statischen und dynamischen Eigenschaften erzielen.

Die angewandte Vorgehensweise führte zu den Mustern Kreis in Raute, Kreis in X und Kreis in Kreuz.

Die Abbildung 5.25 zeigt das Kraft/Verschiebungsverhalten der im Beulprüfstand getesteten wölbstrukturierten Bleche. Im Besonderen stehen die Bleche mit den Hohlprägungsmustern X und die Bleche mit den genetisch verbesserten Kombinationsmustern Kreis in X und Kreis in Kreuz durch ein hohes Beulstabilitätsverhalten hervor.

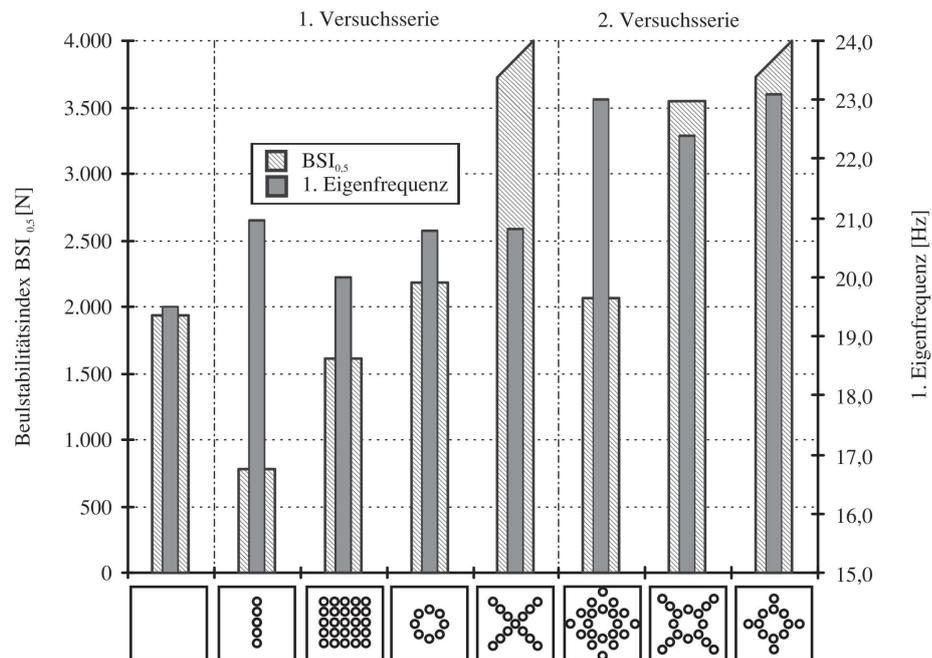


**Abbildung 5.25:** Kraft/Verschiebungsdiagramm der wölbstrukturierten Bleche: Die statischen Beulstabilitätsuntersuchung der wölbstrukturierten Bleche mit einer Dicke von 0,75 mm ergab die dargestellten Kraft/Verschiebungsverläufe. Zusätzlich sind in der Sekundärachse die entsprechenden Kantenbelastungen vermerkt.

Die Bewertung der Bleche durch den Beulstabilitätsindex  $BSI_{0,5}$  führte zu den in Abbildung 5.26 gezeigten Ergebnissen.

Bei den speziell durch einen abgeschrägten Balken gekennzeichneten Messwerten der Hohlprägungsmuster X und Kreis in Kreuz konnte keine Verschiebung des Plattenzentrums um 0,5 mm nachgewiesen werden, da diese Geometrien den  $BSI_{0,5}$  innerhalb der Beulprüfung, die eine maximale Prüfkraft von 4.000 N vorsieht, nicht erreichten.

Die Weiterentwicklungen der Prägemusterveränderungen zeigten nicht nur eine Verbesserung der Beulstabilität sondern auch, wie in der Abbildung 5.26 dargestellt, ein Anstieg der 1. Eigenfrequenz.

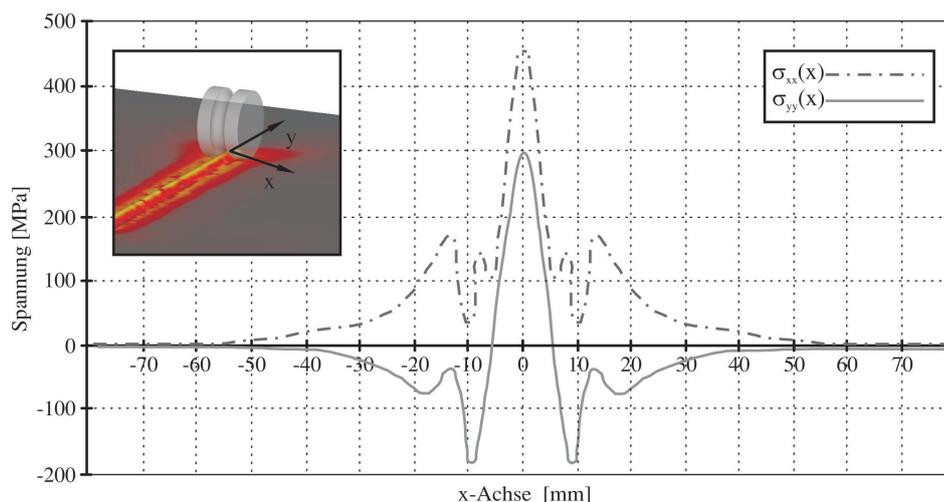


**Abbildung 5.26:** Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der wölbstrukturierten Bleche der 1. und 2. Versuchsserie: Im Diagramm sind der Beulstabilitätsindex  $BSI_{0,5}$  und die erste Eigenfrequenz der wölbstrukturierten Bleche dargestellt. Dabei sind die Hohlprägungsmuster in die 1. und 2. Versuchsreihe unterteilt und in ansteigender Reihenfolge des  $BSI_{0,5}$  gegliedert. Die 2. Versuchsserie entstand durch die genetische Weiterentwicklung der 1. Versuchsserie.

## 5.3 Sickeneinbringung in Platten

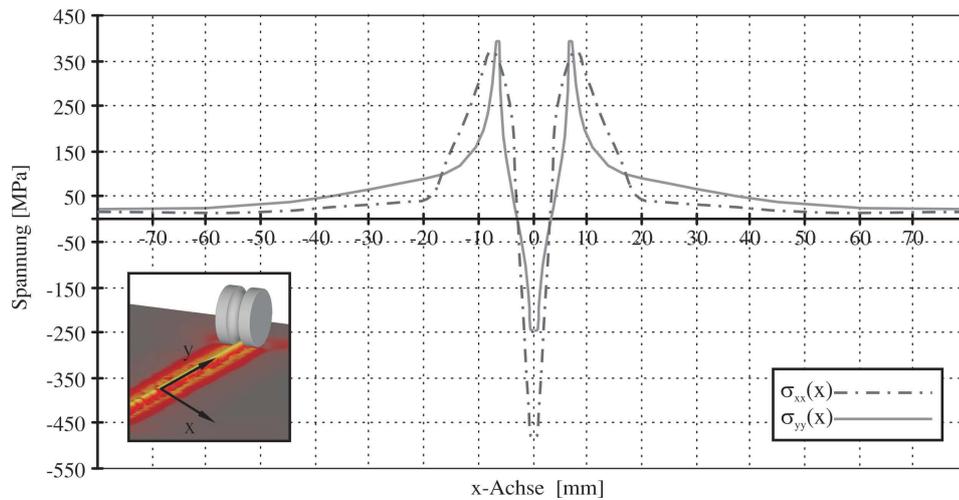
### 5.3.1 Simulationsmodell des Herstellungsprozesses einer Halbbrundsicke

Bei der Ermittlung der vorliegenden Spannungszustände entlang der x-Achse, die rechtwinklig zum geradlinigen Verlauf der Sicke angeordnet ist, zeigt die Simulation des Herstellungsprozesses den in Abbildung 5.27 und Abbildung 5.28 dargestellte Spannungsverlauf. Abbildung 5.27 zeigt den Spannungsverlauf  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse während der Umformung, d.h. bei der unmittelbaren Erzeugung der Sickengeometrie durch die Rollwerkzeuge. Die auftretenden Spannungen bewegen sich im Bereich von 300 MPa bis 460 MPa. Ab einem Abstand von der Längssymmetrielinie von 50 mm gehen die Spannungen im Blech gegen Null.



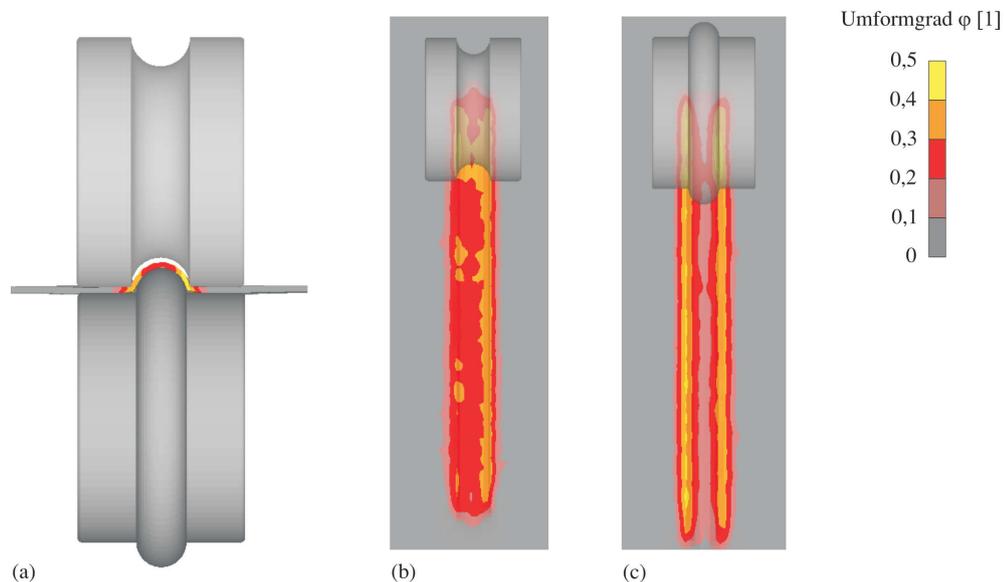
**Abbildung 5.27:** Simulation der Spannungen während der Herstellung einer Halbbrundsicke durch Rollwerkzeuge: Dargestellt sind die Spannungsverläufe  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse, wie in der Skizze veranschaulicht.

Die Abbildung 5.28 bildet die Spannungen nach dem Herstellungsprozess ab.



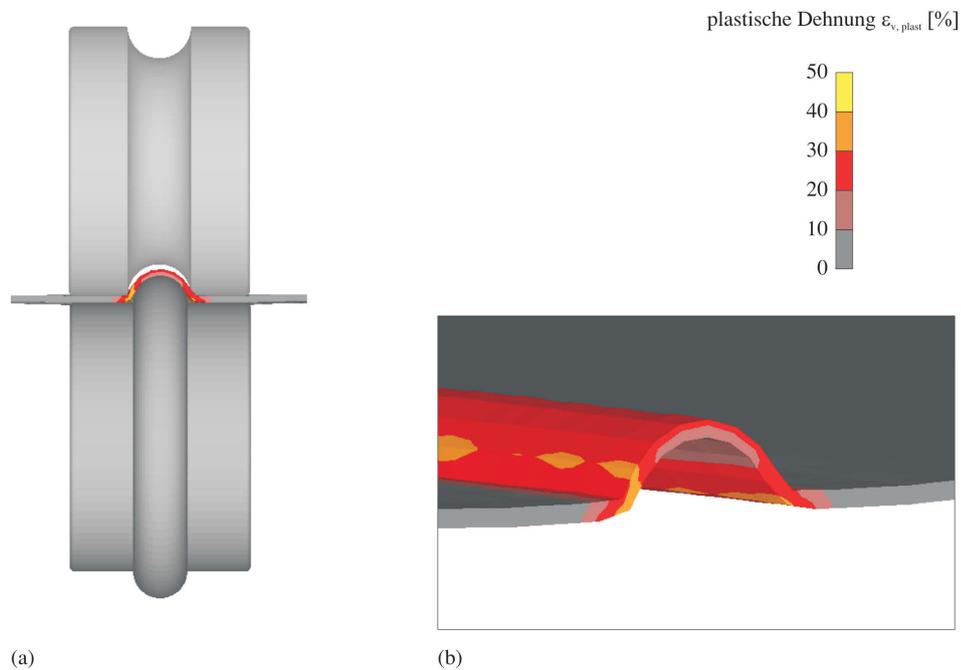
**Abbildung 5.28:** Simulation der Eigenspannungen im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke: Nach der Einbringung der Sicke entsteht der dargestellte Spannungsverlauf  $\sigma_{xx}$  und  $\sigma_{yy}$  entlang der x-Achse, deren Lage in der Systemskizze detailliert dargestellt ist.

Wie in Abbildung 5.29 gezeigt, wird das Blech im Bereich der Halbrundsicke mit einem Umformgrad  $\varphi$  von 0,2 bis zu stellenweise 0,5 verformt.



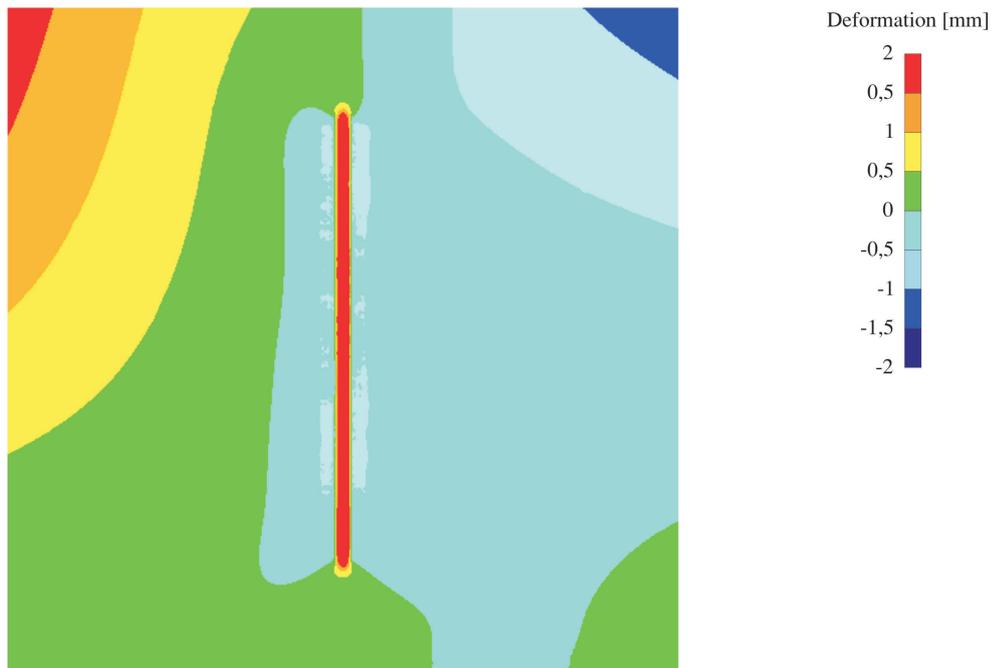
**Abbildung 5.29:** Simulation des vorherrschenden Umformgrades  $\varphi$  im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke: (a) Darstellung des Umformgrades im Querschnitt des Bleches in der Zone der Halbrundsicke zwischen dem Ober- und Unterwerkzeug. Weiters sind in (b) und (c) die Umformgrade an der Blechoberfläche an der dem Oberwerkzeug bzw. dem Unterwerkzeug zugewandten Seite dargestellt.

Durch diesen Prozess entstehen im DC01 Blech plastische Vergleichsdehnungen  $\epsilon_{v, plast}$  von 10 % bis maximal 40 % - siehe Abbildung 5.30.



**Abbildung 5.30:** Simulation der vorherrschenden plastischen Vergleichsdehnungen im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke: (a) Darstellung der plastischen Vergleichsdehnungen  $\epsilon_{v, plast}$  im Querschnitt des DC01 Bleches unmittelbar nach der Umformung durch die Rollwerkzeuge; (b) Detaildarstellung der plastischen Vergleichsdehnungen in einer isometrischen Ansicht, wobei die Umformwerkzeuge ausgeblendet wurden. Die plastischen Vergleichsdehnungen liegen laut Simulation in einem Bereich von 10% bis 40%.

Die Simulationsergebnisse ergaben einen verhältnismäßig leichten Verzug, der sich in Form einer biaxialen Aufschüsselung äußert - siehe Abbildung 5.31.

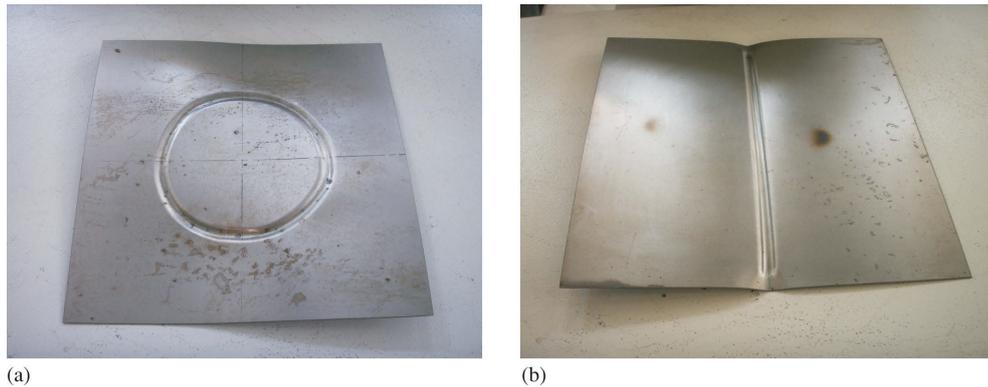


**Abbildung 5.31:** Simulation der Blechdeformationen nach der Herstellung einer Halbrundsicke mit Rollwerkzeugen: Die Simulation zeigt, dass beim Herstellungsprozess einer Halbrundsicke mit Rollwerkzeugen mit einem Verzug an den Blechrändern von  $\pm 2$  mm zu rechnen ist.

### 5.3.2 Herstellungsprozess der Halbrundsicken

Da die durchgeführten Vorversuche zeigten, dass die Herstellung von geradlinigen oder gekrümmten Halbrundsicken ohne Niederhalter in den festgelegten Dimensionen der quadratischen DC01 Blechtafeln von 280 mm Seitenlänge nicht möglich ist, wurde die Herstellung ausschließlich mit CNC gesteuerten Industriemaschinen durchgeführt.

Abbildung 5.32 zeigt Teile der durchgeführten Vorversuche. Dabei ist der große Verzug der Bleche nach dem Herstellungsverfahren ohne Niederhalter gut zu erkennen.

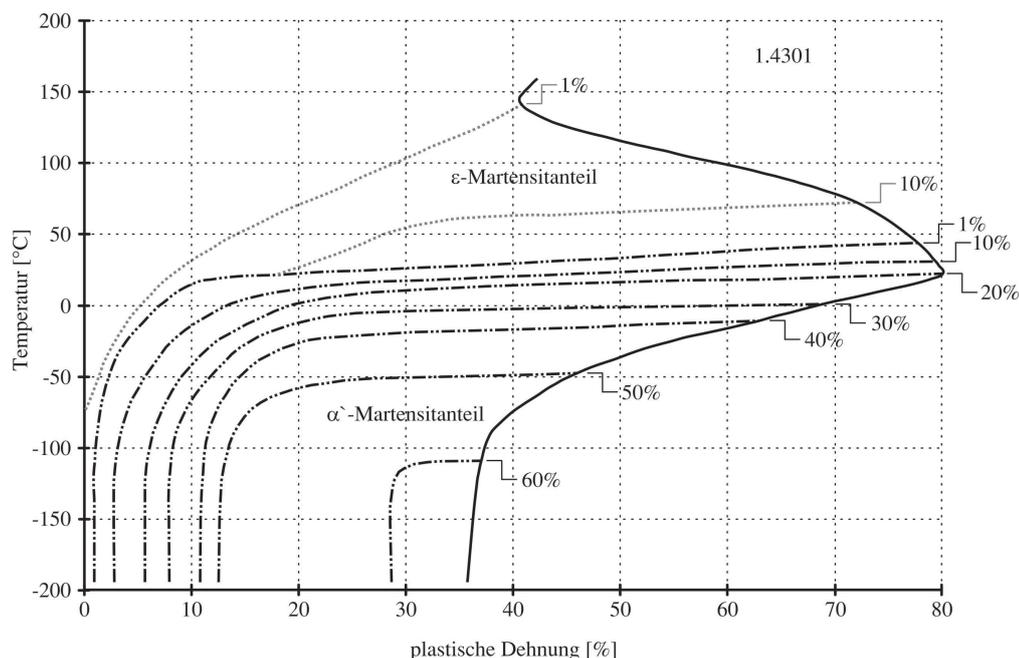


**Abbildung 5.32:** Blechverzug beim Rollformverfahren: Bei der Herstellung von Sicken kommt es ohne spezielle Niederhalter in den getesteten Blechdimensionen zu inakzeptablem Blechverzug. Unter (a) ist eine zentrische Kreissicke und unter (b) eine mittige, geradlinige Halbrundsicke mit deren Verzugsformen abgebildet.

Trotz der negativen Versuchsergebnisse bezüglich der Blechdeformationen ging aus den Simulationsdaten und den praktischen Vorversuchen an den DC01 Blechen eine weitere Versuchsvariante hervor - die Herstellung von Sicken mit lokal ausgebildetem dehnungsinduziertem Martensit.

Neben der bewussten Einbringung von Druckeigenstressungen durch das größere Volumen des Martensits gegenüber dem Austenit bietet diese Anwendung den Vorteil, einer lokal in den Radien der Halbrundsicke ausgebildeten verschleißfesten Schicht.

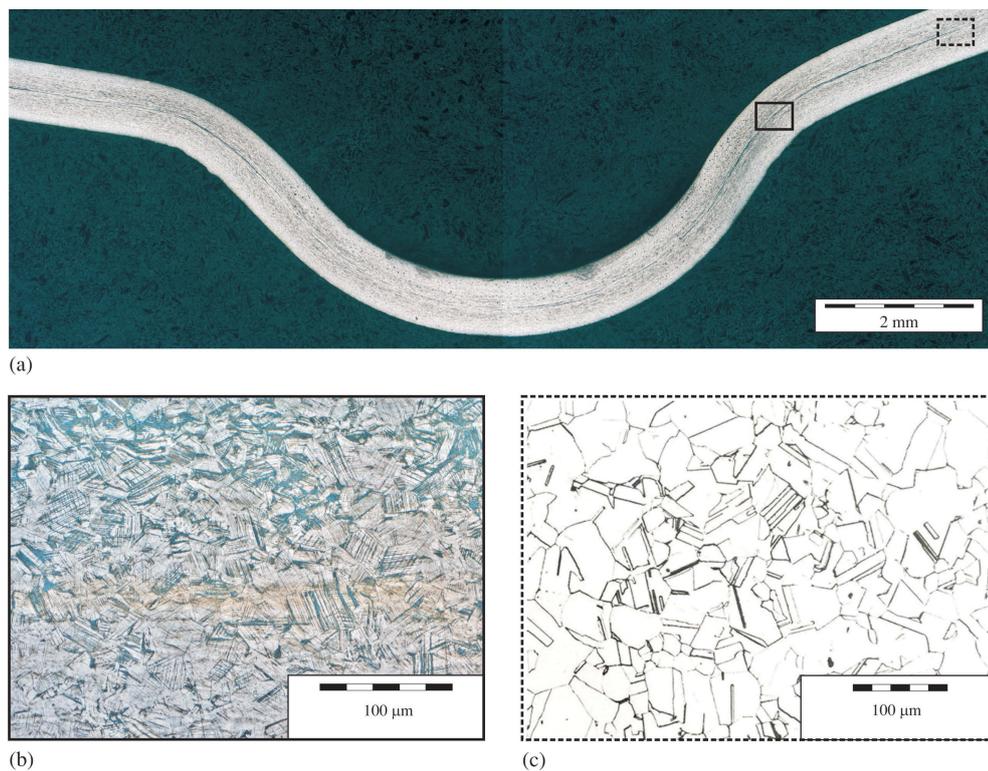
Die Simulation der Herstellung von Halbrundsicken mit Rollwerkzeugen in einem DC01 Blech und den dabei auftretenden plastischen Vergleichsdehnungen  $\epsilon_{v, plast}$  von 10 % bis maximal 40 % ermöglicht in einem metastabilen austenitischen Stahl mit den gegebenen Material- und Umformparametern keine dehnungsinduzierte Umwandlung zu Martensit bei Raumtemperatur - siehe Abbildung 5.33 [10, 105, 133, 134].



**Abbildung 5.33:** Umwandlungsschaubild von metastabilem Austenit in Martensitformen für den Werkstoff X5CrNi18-10: Im Diagramm sind die Abhängigkeiten zwischen Temperatur, plastischer Dehnung und dehnungsinduzierten Martensitanteils für den Werkstoff 1.4301 dargestellt [133].

Daher erfolgte anhand dieser Grundlagen eine Abkühlung des metastabil austenitischen Versuchsbleches X5CrNi18-10 mit flüssigem Stickstoff auf ca.  $-196\text{ °C}$  und eine sofortige Umformung des Edelstahlbleches. Die metallurgischen Untersuchungen zeigten im Schlibbild und in den Härteuntersuchungen nach Vickers eine martensitische Umwandlung des Gefüges im Bereich der Übergangsradien. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 5.34 dargestellt.

Die martensitische Umwandlung hatte jedoch keinerlei Auswirkung auf den immensen Verzug der Bleche.



**Abbildung 5.34:** Metallurgische Schliffaufnahme einer Halbrundsicke mit dehnungsinduziertem Martensit: (a) Gesamtaufnahme einer Halbrundsicke in einem metastabilen austenitischen Blech der Werkstoffnummer 1.4301, die bei einer Temperatur von  $-196\text{ °C}$  hergestellt wurde; (b) Detailschliffaufnahme eines martensitischen Gefüges aus dem Bereich, der in (a) durch eine Volllinie dargestellt ist und (c) Detailschliffaufnahme eines metastabilen austenitischen Gefüges, das in (a) durch eine strichlierte Linie dargestellten Bereiches.

Als Alternative zu den Herstellungsversuchen mit einer handbetriebenen Sickeneinbringung ohne Niederhalter kam eine TruPunch Blechbearbeitungsanlage mit Niederhalter und CNC geführten Rollwerkzeugen der Firma Trumpf aus Ditzingen/BRD zum Einsatz. Auch bei diesem Anlagentyp stellte sich ein zu großer Verzug für die quadratischen Bleche mit einer Seitenlänge von 280 mm und einer Dicke von 0,75 mm ein.

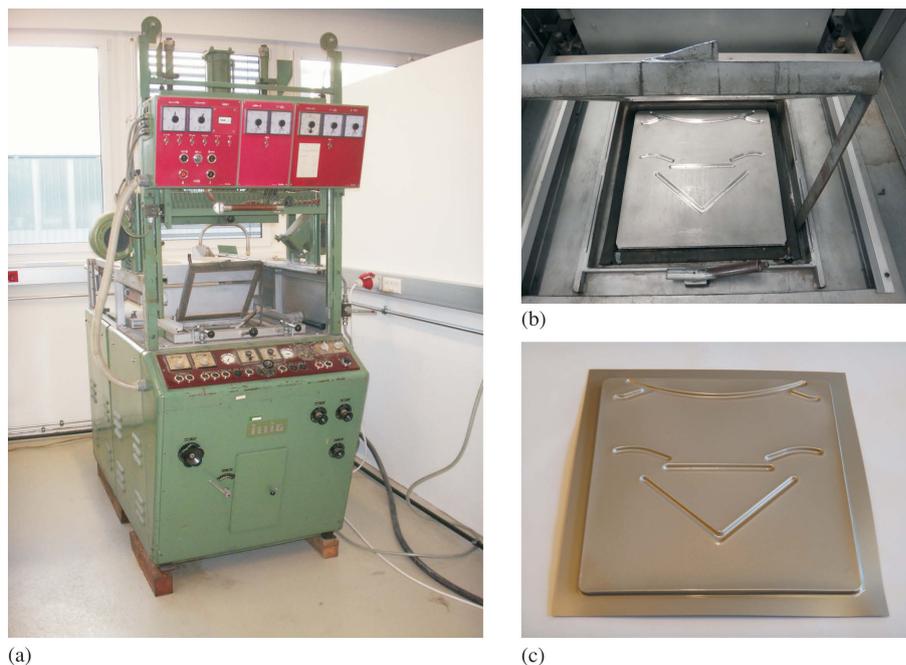
Ab einem Randabstand von 60 mm ergeben sich für die Versuchsplattendimensionen annehmbare Ergebnisse in Bezug auf ihre Planheit, welche aber das Einbringungsfeld für die Sicken auf 160 mm x 160 mm einschränken. Auch Versuche mit einem mehrstufigen Einbringungsprozess führten zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen.

Da sowohl bei den verwendeten Blechen aus Kohlenstoffstählen als auch bei den austenitischen Edelstählen keine Herstellungsmethode zu brauchbaren Ergebnissen führte, wurden der Werkstoffes und der Herstellungsprozess abgeändert und die Untersuchungen auf den Sickenalgorithmus fokussiert.

Mit dem gewählten Alternativverfahren, dem Tiefziehen von Sicken in Kunststoffplatten, konnten bei weitem bessere Ergebnisse erzielt werden. Es wurden Kunststoffplatten aus coextrudiertem ABS/PMMA (AM1500X) der Firma Senoplast/Österreich mit einer Dicke von 1 mm erwärmt und durch ein Vakuum über Luftkanäle in CNC gefertigte Negativplatten gezogen. Somit konnten die vier verschiedenen Sickenmuster des Sickenalgorithmus eingebracht werden - siehe Abbildung 5.35.

Die Qualität der Mustereinbringung und die Maßhaltigkeit waren sehr zufriedenstellend. Bei der Herstellung der verschiedenen Sickenmuster laut den berechneten Iterationsschritten konnten gute Ergebnisse und vor allem eine gute Formfüllung im Bereich der Halbrundsicken erreicht werden.

Prozessbedingt erfolgte nach der Sickenbringung ein weiterer Zuschnittschritt, um die Platten in die Dimensionen 280 mm x 280 mm zu bringen.

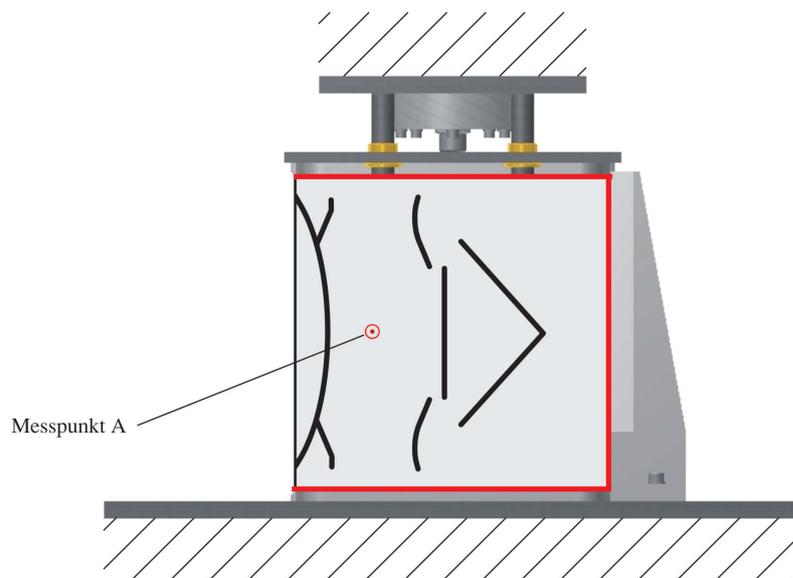


**Abbildung 5.35:** Tiefziehprozess von Kunststofffolien in Sickenformen: (a) Tiefziehmaschine für Kunststofffolien, in der die Folie beidseitig erwärmt wird und anschließend über ein angelegtes Vakuum in die entsprechende Werkzeugform tiefgezogen wird; (b) Tiefziehwerkzeug der Sickenformen von Iterationsschritt  $n=4$  mit Luftkanälen zur Aufbringung des Vakuums; (c) versickte Kunststoffplatte unmittelbar nach dem Tiefziehprozess.

### 5.3.3 Untersuchungen der Beulstabilität und der dynamischen Eigenschaften von versickten Rechteckplatten

Alle durch Rollformen hergestellten Sickenmuster konnten aufgrund des immensen Verzugs nicht in der vorliegenden Versuchseinrichtung untersucht werden.

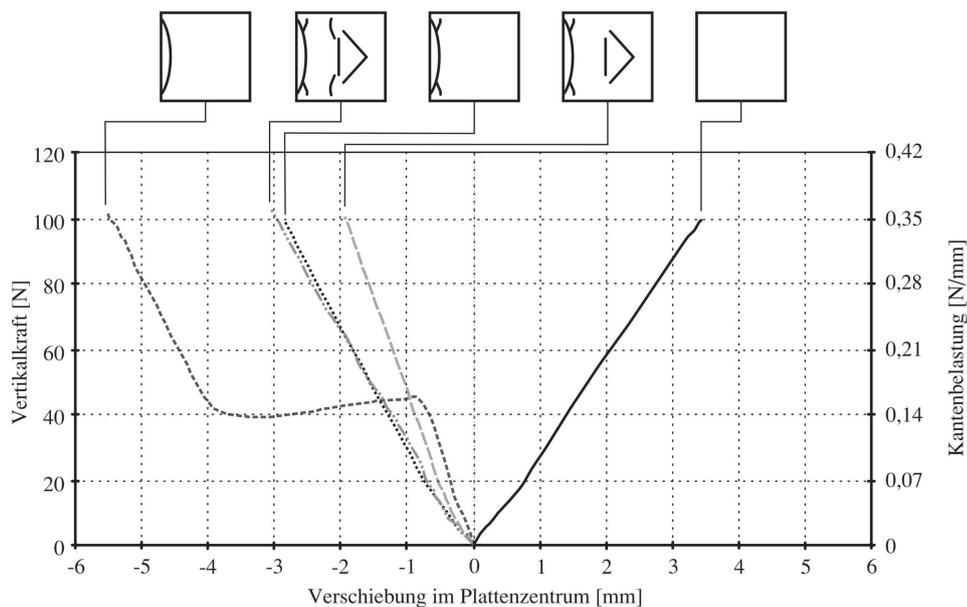
Bei der Untersuchung der tiefgezogenen Sickengeometrien zeigten sich bei den dreiseitig eingespannten Platten im Beulprüfstand keinerlei Probleme. Da die versickten Platten lediglich an drei Seiten gelagert wurden, ist eine Auswertung der Kraft/Verschiebungsverläufe im Zentrum der Platte nicht zielführend. Daher wurde sowohl die Berechnung der Sickenverläufe als auch die experimentelle Beurteilung der Beulsteifigkeit auf den Messpunkt A bezogen, der in Abbildung 5.36 gekennzeichnet ist.



**Abbildung 5.36:** Übersichtsskizze des Messaufbaus der Beulanalyse von versickten Kunststoffplatten: Gekennzeichnet ist der Messpunkt der Verschiebungen bei den Beulversuchen von den versickten Kunststoffplatten. Der Messpunkt A liegt auf der horizontalen Schwerachse in einem Abstand von 70 mm vom freien Plattenrand entfernt.

Die entsprechenden Versuche zur Ermittlung des Kraft/Verschiebungsverlaufs, des Beulstabilitätsindex und der 1. Eigenfrequenz blieben unverändert.

Die Kraft/Verschiebungsverläufe sind in Abbildung 5.37 dargestellt und weisen, verglichen mit den laserbehandelten Blechen bzw. mit den wölbstrukturierten Blechen aufgrund des Materials und dessen Eigenschaften bei weitem geringere Steifigkeiten auf.

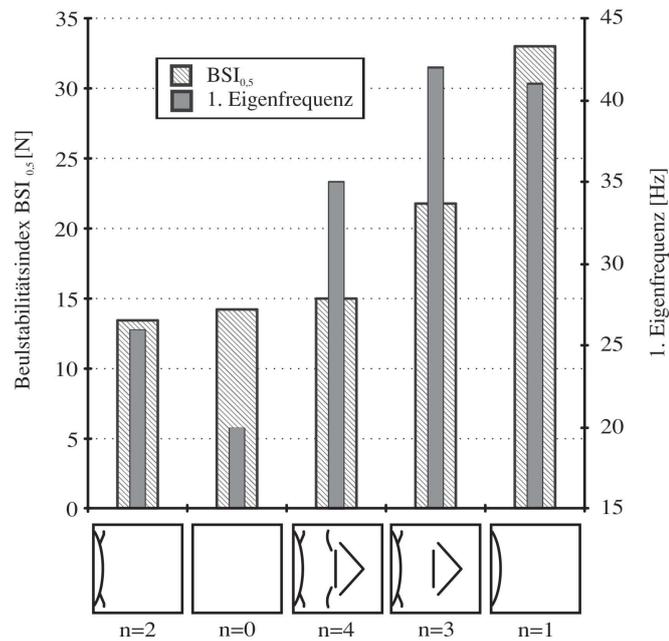


**Abbildung 5.37:** Kraft/Verschiebungsdiagramm der versickten Rechteckplatten: Die statische Beulstabilitätsuntersuchung der versickten Kunststoffplatten mit einer Stärke von 1 mm ergab die dargestellten Kraft/Verschiebungsverläufe. Zusätzlich sind in der Sekundärachse die entsprechenden Kantenbelastungen vermerkt.

In Abbildung 5.38 sind die Beulstabilitätsindexwerte und die Messergebnisse der 1. Eigenfrequenz zusammengefasst. Ein direkter Vergleich mit den laserbehandelten Blechen und den wölbstrukturierten Blechen ist nicht zulässig, da der verwendete Kunststoff eine andere Materialcharakteristik als die Stahlbleche aufweist und die Sicken für eine dreiseitige gelenkige Lagerung berechnet wurden - siehe Abbildung 5.36.

Der Vergleich der vier Sickenmuster mit der unversickten Kunststoffplatte zeigt, dass laut den Untersuchungen nicht jeder Iterationsschritt eine Verbesserung der Eigenschaften des vorhergehenden Iterationsschritts herbeiführt - siehe Abbildung 5.38.

In Bezug auf die Beulstabilitätssteigerung sowie auf die 1. Eigenfrequenz konnten der Iterationsschritt  $n=3$  und Iterationsschritt  $n=1$  die größten Steigerungen erzielen. Die Sickengeometrien des 2. Iterationsschritts wiesen eine höhere Grundfrequenz als die unversickte Platte auf. Allerdings ist keine Erhöhung des  $BSI_{0,5}$  zu erkennen.



**Abbildung 5.38:** Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der versickten Rechteckplatten: Im Diagramm sind der Beulstabilitätsindex  $BSI_{0.5}$  und die 1. Eigenfrequenz der versickten Kunststoffplatten dargestellt.

## 6 Diskussion der erzielten Ergebnisse

### 6.1 Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung

Die Untersuchungen, inwieweit die Beulstabilität und die Grundfrequenz von gezielt eingebrachten Eigenspannungen abhängen, brachten klare Ergebnisse.

Durch Eigenspannungen, die durch eine thermomechanische Plastifizierung durch eine Laserquelle hervorgerufen wurden, können sowohl die Beulsteifigkeit als auch die 1. Eigenfrequenz gesteigert werden.

Grundlegend ist festzuhalten, dass genügend Wärme pro Zeiteinheit in die Stahlblechplatte eingebracht werden muss, um eine thermomechanische Plastifizierung herbeizuführen. Dabei ist speziell ein Aufschmelzen von dünnen Feinblechplatten zu vermeiden.

Weiters muss ein Konsens zwischen der Steigerung der Steifigkeit und der Erhöhung der Grundfrequenz von Platten durch die Einbringung von Eigenspannungen gefunden werden.

Die Erhöhung der 1. Eigenfrequenz einer Rechteckplatte ist direkt proportional zur Höhe und Anzahl der eingebrachten Eigenspannungsfelder. Diese Beziehung wirkt sich allerdings negativ auf die Planheit der Platten aus, da besonders dünne Platten zu massiven Verwerfungen und einem unerwünschten Plattenverzug neigen. Diese Imperfektionen führen zu einer Herabsetzung der kritischen Beulkraft und somit zu einem früheren Erreichen des Verzweigungspunktes (siehe Abbildung 5.17). Andererseits können die Imperfektionen so groß werden, dass es zu keiner Ausbildung eines Verzweigungspunktes kommen kann. Das ist der Fall, wenn sich aufgrund der Deformationen eine Art einachsige Schalenform einstellt, die um die horizontale Achse gebogen ist.

Da sich durch den Blechverzug die Beulsteifigkeit der Platten massiv verschlechtert, sind Punktemuster den zu massiven Verzug führenden Linienmustern vorzuziehen.

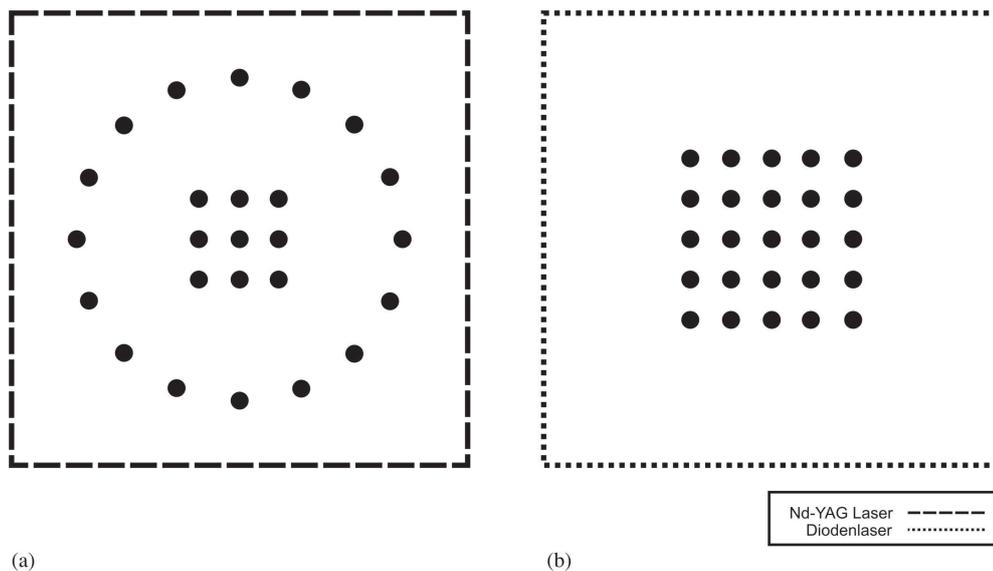
Die Steigerung der Beulsteifigkeit hängt primär von der Einbringung von Eigenspannungen im Plattenzentrum ab. Die Eigenspannungen in den Randbereichen wirken in Kombination mit einem Einbringungsfolgeplan dem Verzug entgegen. Beim Schweißfolgeplan erwies sich die Kombination aus Ring und Pilgerschrittverfahren als die günstigste Kombination, um den Plattenverzug zu vermindern - siehe Abbildung 5.16.

Die Musterwahl basiert auf einer iterativen Weiterentwicklung und ist von den Blechdimensionen, den Randbedingungen, den auftretenden Kräften und der eingebrachten Energie abhängig.

Für die untersuchten Platten in den festgelegten Dimensionen und den definierten Prüfbedingungen stellte sich durch den Vergleich des Beulstabilitätsindex  $BSI_{0,5}$  das Muster Kreis mit innenliegendem 3x3 Punkteraster, das durch die Bestrahlung mit dem 580 W starken Nd-YAG Laser hergestellt wurde, als das Punktemuster heraus, das am meisten Steifigkeitsgewinn gegenüber der unbehandelten Platte erzielen konnte (siehe Abbildung 6.1 (a)).

Bei der Versuchsserie mit dem 300 W starken Diodenlaser erwies sich das zentrierte 5x5 Punktemuster, wie in Abbildung 6.1 (b) dargestellt, als am effektivsten.

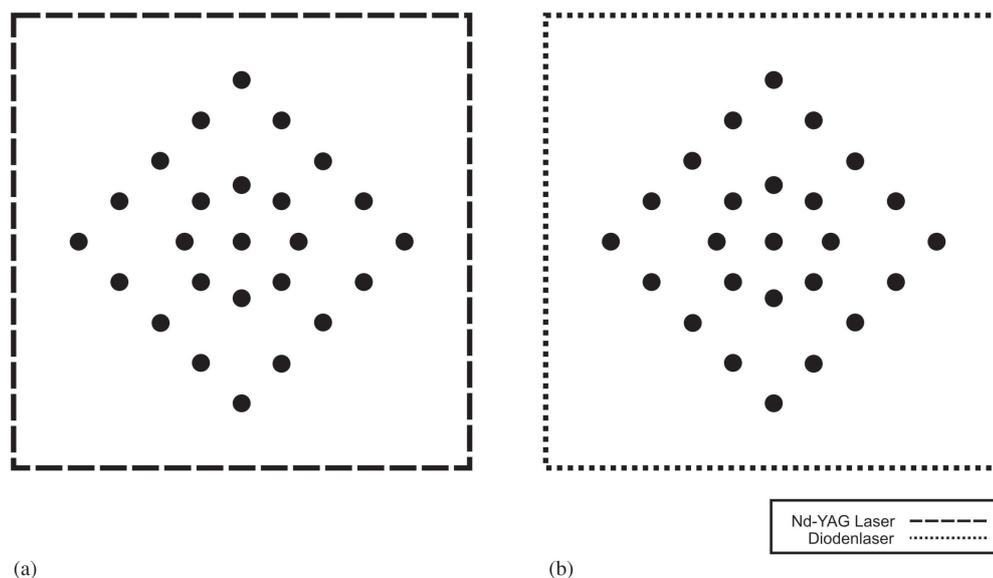
Das unbehandelte Blech erzielte einen  $BSI_{0,5}$  von 1.931,25 N. Bei der Geometrie Kreis mit innenliegendem 3x3 Punktemuster stellte sich ein  $BSI_{0,5}$  von 3.106,5 N ein. Die mit dem Diodenlaser gefertigte Geometrie mit 5x5 Einzelpunkte erreichte einen  $BSI_{0,5}$  von 2.943 N.



**Abbildung 6.1:** Laserpunktemuster mit der höchsten Beulsteifigkeitssteigerung: Dargestellt sind jene Punktemuster der untersuchten Versuchsserien, die den höchsten Steifigkeitszuwachs erzielen konnten. Durch das mit dem Nd-YAG Laser erzeugte Punktemuster in (a) war es möglich, den Beulstabilitätsindex  $BSI_{0,5}$  um 60,85 % zu steigern. In (b) ist das Punktemuster des Diodenlasers dargestellt, mit welchem der  $BSI_{0,5}$  um 52,38 % angehoben werden konnte. Die unbehandelte Platte wies einen  $BSI_{0,5}$  von 1.931,25 N auf.

Die 1. Eigenfrequenz im unbelasteten Zustand der Platten konnte mit beiden Lasertypen gegenüber der unbehandelten Platte durch Punktemuster, die die Form eines Karos mit

einem innenliegendem Kreis haben, am meisten erhöht werden. Wie in Abbildung 6.2 (a) dargestellt, konnte mit der abgebildeten Punktemustergeometrie eine um 10,37 % höhere Grundfrequenz erzielt werden. Weiters ist in Abbildung 6.2 (b) das mit dem Diodenlasers eingebrachte Muster angeführt, durch das die Grundfrequenz um 13,92 % gesteigert werden konnte. Die 1. Eigenfrequenz der unbehandelten Platte betrug dabei 19,75 Hz.



**Abbildung 6.2:** Laserpunktemuster der höchsten Steigerung der 1. Eigenfrequenz: In beiden Versuchsserien, die mit einem Nd-YAG Laser und einem Diodenlaser durchgeführt wurden, konnte mit dem Punktemuster Karo mit innenliegendem Kreis der größte Zuwachs der 1. Eigenfrequenz gegenüber der unbehandelten Blechplatte erzielt werden. In der mit dem Nd-YAG Laser behandelten Platte (a) konnte eine um 10,37 % höhere und in der mit dem Diodenlaser behandelten Platte (b) konnte eine um 13,92 % höhere 1. Eigenfrequenz gegenüber der unbehandelten Platte erzielt werden. Die 1. Eigenfrequenz der unbehandelten Platte betrug dabei 19,75 Hz.

Da sich durch die einseitige Laserbestrahlung ein Temperaturgradient über die Plattendicke ausbildet, entsteht ein Spannungsgradient über die Plattendicke. Laut Berechnungen führt der auftretende Temperaturgradient erst ab einer Plattendicke von 2 mm zu merklichen Unterschieden im Spannungsverlauf über die Dicke und zur Veränderung des Steifigkeitsverhaltens. Bis zu dieser Dicke kann von einem Membranspannungszustand ausgegangen werden [115].

Im Laborversuch konnte zwischen einseitiger und beidseitiger Bestrahlung im selben Punkt der Platte kein signifikant messbarer Unterschied im Beulverhalten ermittelt werden. Weiters konnte kein Einfluss der Walzrichtung d.h. der Richtung der Kornstreckung

und der Ausbildung von anisotropen Eigenschaften auf die Beulstabilität gefunden werden.

Alternativ zur Steigerung der Beulsteifigkeit und der 1. Eigenfrequenz durch die gezielte Einbringung von Eigenspannungen bietet sich abgesehen von der Erhöhung der Plattendicke und somit der resultierenden Gewichtserhöhung die Veränderung der Platteneinspannung an. Gegenüber einer gelenkigen Lagerung sind mit der starren Lagerung Steigerungen der kritischen Beulkraft  $F_{krit}$  um bis zu 98 % möglich, ohne das Gewicht der Platte zu verändern.

Da es allerdings galt, die Auswirkungen von Eigenspannungen auf das statische und dynamische Verhalten von Platten zu ermitteln, wurde von dieser Variation der Randbedingungen abgesehen und die gelenkige Lagerung durch eine allseitige V-Nut beibehalten. Durch die gelenkige Lagerung kann der Einfluss der Eigenspannungen in verschiedenen Mustern am besten untersucht werden.

## 6.2 Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen

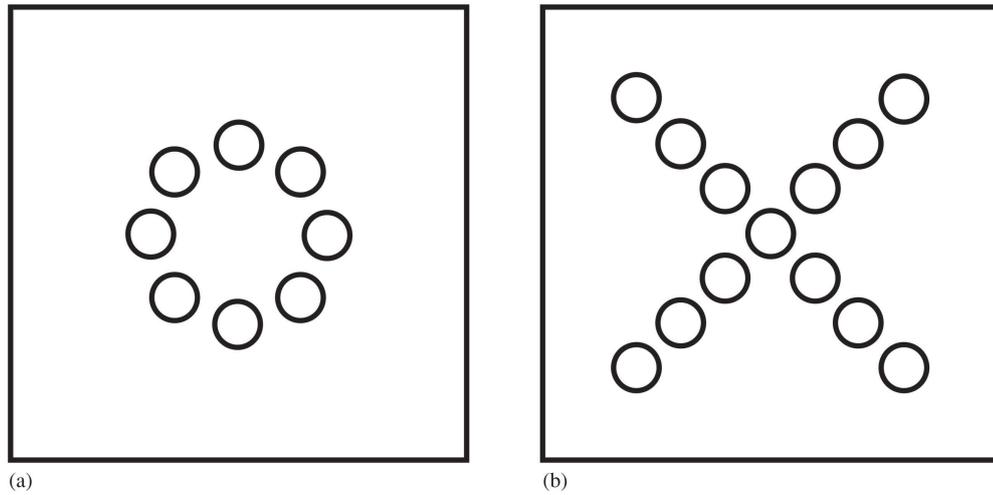
Durch Kombination von Geometrieänderung in der Plattenebene mittels Hohlprägungen und die daraus resultierende Trägheitsmomentenveränderung sowie den Restspannungen am Rand der Wölbstrukturierungen sind sehr gute Ergebnisse in Bezug auf die Beulstabilitätssteigerung und die Anhebung der 1. Eigenfrequenz erzielbar.

Die iterative Weiterentwicklung, die durch eine ARAMIS<sup>®</sup> Analyse unterstützt wurde, brachte in Bezug auf die Beulsteifigkeit und die 1. Eigenfrequenz noch zusätzliche Verbesserungen im Bauteilverhalten.

Entscheidend für diese Verbesserungen ist die Kombination von Mustern der 1. Versuchsserie, wobei das eine Muster die „Schwächen“ d.h. die auftretende Beulfigur bzw. die Bereiche der maximalen Ausbeulung des anderen Musters ausgleicht. Durch eine optische dreidimensionale ARAMIS<sup>®</sup> Analyse des Bauteilverhaltens während der Beulprüfung konnte eine ideale Kombinationsauswahl getroffen werden.

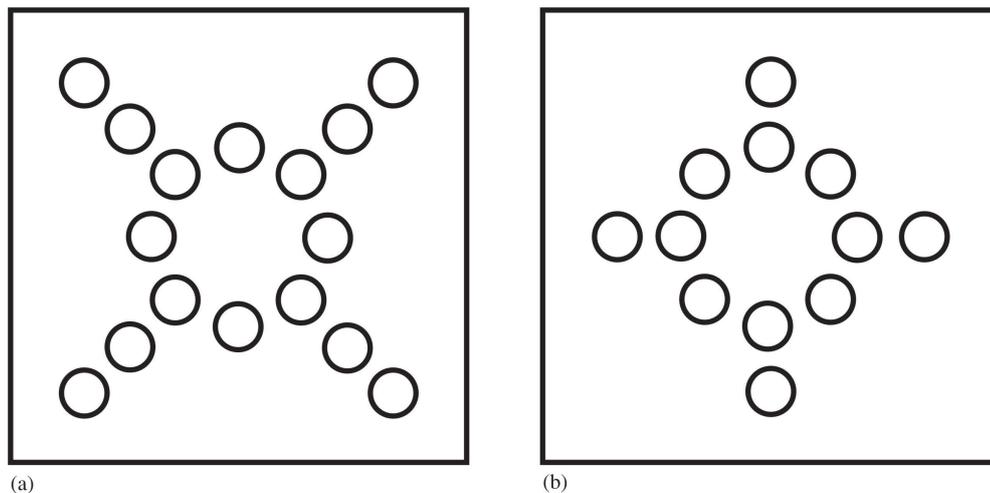
Die auftretenden Beulfiguren oder Zonen des Verschiebungsmaximums ergeben sich aus Trägheitsmomentenachsen ähnlich wie in den Konstruktionsrichtlinien für Sicken von Oehler beschrieben an denen es zum Stabilitätsverlust kommt.

Bei der Untersuchung der 1. Versuchsserie zeigte die Anordnung von 8 Hohlprägungen in einer Kreisform - siehe Abbildung 6.4 (a) - einen  $BSI_{0,5}$  von 2.185,5 N. Mit der Anordnung von 13 Hohlprägungen in X-Form, wie in der Abbildung 6.4 (b) dargestellt, konnte bis zum Erreichen der festgelegten maximalen Prüflast von 4.000 N kein Versagen durch Beulen festgestellt werden. Bei einer weiteren Steigerung der Last auf über 4.000 N würden bei dieser Anordnung der Prägungen plastische Deformationen auftreten.



**Abbildung 6.3:** Hohlprägungsmuster der höchsten Steifigkeitssteigerung - 1. Versuchsserie: Gegenüber der unbehandelten Platte mit einem  $BSI_{0,5}$  von 1.931,25 N konnte die Beulstabilität durch die kreisförmige Anordnung (a) um 13,16 % gesteigert werden. Bei der X-förmigen Anordnung (b) konnte bis zum Erreichen der festgelegten maximalen Prüfkraft kein Beulen festgestellt werden.

Durch die Erkenntnisse aus der 1. Versuchsserie und der Kombination und der Variation der in Abbildung 6.4 dargestellten Muster lässt sich der in Abbildung (a) dargestellte Kreis in X-Form auf 3.546,75 N steigern. Bei der Kreis in Kreuzform (siehe Abbildung (b)) konnte kein Beulen bis zu einer Prüflast von 4.000 N festgestellt werden.



**Abbildung 6.4:** Hohlprägemuster der höchsten Steifigkeitssteigerung - 2. Versuchsserie: Durch Erkenntnisse aus der 1. Versuchsserie konnte der Beulsteifigkeitsindex um 83,65 % in der Anordnung der Hohlprägungen in Kreis in X-Form (a) angehoben werden. In der Anordnung Kreis in Kreuz (b) konnte bis zum Erreichen der festgelegten maximalen Prüfkraft kein Beulen festgestellt werden.

Ausgehend von der Grundfrequenz der unbehandelten Platte, die bei 19,75 Hz liegt, konnte eine bemerkenswerte Steigerung der 1. Eigenfrequenz in der gesamten 2. Versuchsserie festgestellt werden.

Das Prägemuster Kreuz in Kreis weist eine Grundfrequenz von 22,4 Hz, das Muster Kreis in Raute eine von 23 Hz und das Muster X in Kreis eine von 23,1 Hz auf - siehe Abbildung 5.26. Ein Ansteigen der 1. Eigenfrequenz geht mit der Anzahl der eingebrachten Hohlprägungen einher. Ein vergleichsweise zu den Lasermustern großer Verzug stellt sich an den Seitenkanten ein, der durch die Geometrieänderung bedingt ist. Dieser Verzug bewirkt nach dem Platteneinbau keinerlei negative Beeinflussung der Beulstabilität.

Eine Verbesserung zwischen einseitiger und wechselnder Einbringungsrichtung konnte nicht gefunden werden.

Der Nachteil gegenüber den laserbehandelten Blechen liegt in der geometrischen Veränderung der Blechoberfläche. Andererseits kann dieser Nachteil speziell in der Architektur z.B. bei Fassadenverkleidungen als optisch ansprechendes Element eingesetzt werden.

### 6.3 Sickeneinbringung in Platten

Große Probleme ergaben sich bei der Einbringung der Sicken durch das Rollverfahren in die vergleichsweise kleinen Probepplatten der Dimension 280 mm x 280 mm, da sich bei dieser Plattengröße ein nicht tolerierbarer Verzug einstellt. Dieser Verzug führt zu Vordeformationen, die die Beulstabilität herabsetzt und eine weitere Untersuchung hinfällig machen.

Mit der alternativen Sickeneinbringungsmethode, dem Tiefziehen von Kunststoffplatten, konnten gute Ergebnisse in Bezug auf die Formfüllung und die Maßhaltigkeit erreicht werden.

Aufgrund der geringen Grundsteifigkeit, die vom geringeren E-Modul des verwendeten Kunststoffes herrührt, ist eine klare Interpretation der Ergebnisse schwierig.

Der aufgrund der technischen Machbarkeit notwendige Materialwechsel von DC01 Feinblech auf den Kunststoff ABS/PMMA (AM1500X) der Firma Senoplast/Österreich und der veränderten Einspannungsbedingungen ist ein Vergleich zwischen den einzelnen Methoden der Steifigkeits- und Eigenfrequenzerhöhung nicht zulässig.

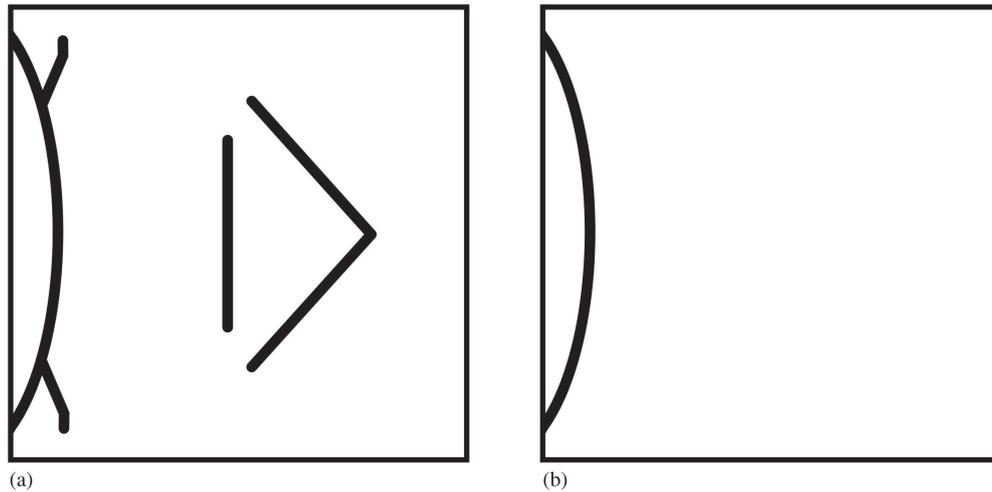
Wie in Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38 veranschaulicht, ergeben die errechneten Sickenverläufe in den vier Iterationsstufen nicht die erwarteten Ergebnisse in Bezug auf die Steigerung der Beulstabilität.

Allerdings ergibt der Vergleich des Beulstabilitätsindex zwischen den einzelnen Iterationsschritten und der unversickten Platte Aufschluss über das tendenzielle Beulstabilitätsverhalten der verschiedenen Platten.

Die Iterationsschritte  $n=2$  und  $n=4$  erreichten lediglich einen  $BSI_{0,5}$  Wert, der sich im Bereich der unversickten Platte befindet, wobei der  $BSI_{0,5}$  der unversickten Platte bei 14,25 N liegt.

Lediglich die berechneten Sickenverläufe der Iterationsschritte  $n=1$  und  $n=3$  erzielten einen merklichen Zuwachs an Beulstabilität. In den Untersuchungen stellte sich bei Iterationsschritt  $n=3$  ein  $BSI_{0,5}$  Wert von 21,75 N ein. Dieser Wert wurde lediglich von der Sickenform des Iterationsschritts  $n=1$  mit einem  $BSI_{0,5}$  von 33 N übertroffen.

In Abbildung 6.5 sind die beiden Sickenverläufe abgebildet, die zur höchsten Verbesserung der Beulsteifigkeit der Kunststoffplatten führte.



**Abbildung 6.5:** Sickenverläufe der höchsten Steifigkeitssteigerung: Lediglich durch die Sickenverläufe der Iteration  $n=3$  (a) bzw. der Iteration  $n=1$  (b) konnte der Beulstabilitätsindex verglichen mit der unversickten Kunststoffplatte merklich gesteigert werden. Bei der Iteration  $n=3$  (a) ist eine Beulstabilitätsindexsteigerung von 52,63 % und bei der Iteration  $n=1$  (b) von 131,57 % gegenüber der unversickten Kunststoffplatte, die einen  $BSI_{0,5}$  Wert von 14,25 N aufweist, möglich.

Ein Vergleich der vier Iterationsformen der Sickenverlegung und der unversickten Kunststoffplatte in Bezug auf die 1. Eigenfrequenz zeigt für alle Sickengeometrien einen Anstieg. Besonders heben sich wie bei der Steigerung der Beulsteifigkeit die Sickengeometrien aus den Iterationen  $n=1$  und  $n=3$  hervor - siehe Abbildung 6.5. Die unversickte Platte besitzt eine Grundfrequenz von 20 Hz. Die Sickenform aus Iteration  $n=1$  weist eine um 105 % höhere 1. Eigenfrequenz auf. Die Grundfrequenz von Iterationsschritt  $n=3$  ist um 110 % höher als die der unversickten Kunststoffplatte.

Weiters ist auffällig, dass sich bis auf Iterationsschritt  $n=1$  bei jedem Iterationsschritt eine Eigenfrequenzsteigerung in Bezug auf die vorhergehende abzeichnet. Gründe für diese Abweichung könnten unter anderem thermisch bedingte Restspannungen in der Platte sein, die durch die fertigungsbedingte Abkühlung auf Raumtemperatur entstanden sind.

Generell sind durch den Sickenalgorithmus große Steifigkeitszuwächse und eine Anhebung der 1. Eigenfrequenz möglich. Über den  $BSI_{0,5}$  Wert ausgedrückt sind Steigerungen bis zu 131,57 % realisierbar.

Auch die 1. Eigenfrequenz steigt um 105 % und 110 % bei den Sickenformen von Iterationsschritt  $n=1$  bzw.  $n=3$  ab.

Dahingehend ist die mathematische Methodik des Sickenalgorithmus und die technische Umsetzbarkeit im Laborversuch eindeutig bestätigt.

Lediglich die Iterationsschritte  $n=2$  und  $n=4$  zeigen bezüglich ihres Steifigkeitsverhaltens geringere Werte als die vorhergehend berechnete Sickengeometrie.

Die Sicken mit lokalen Martensitzonen eignen sich besonders bei Anwendungen unter korrosiver Umgebung, die zusätzlich Festigkeit und vor allem Verschleißfestigkeit fordern. Nutzbare Anwendungsbereiche dafür wären zum Beispiel Bodenbeläge und Wandverkleidungen im Güterverkehr oder in der Lebensmittelindustrie.

Nachteilig stellte sich allerdings der schwierige Herstellungsprozess unter Tieftemperaturbedingungen heraus.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die untersuchten Konzepte und deren Varianten zielten auf die fertigungstechnische Umsetzung von Verbesserungen des Stabilitätsverhaltens von dünnen Rechteckplatten ab. Zusätzlich stand bei der Umsetzung das gleichbleibende Bauteilgewicht im Vordergrund. Zur Verwirklichung dieser Ziele und zur Untersuchung der Wirkungsweisen auf die Platteneigenschaften kamen drei verschiedene Mechanismen zur Anwendung:

- die gezielte Eigenspannungseinbringung durch thermomechanische Plastifizierung mittels Lasereinwirkung,
- die Wölbstrukturierung durch die Einbringung von Hohlprägungen und
- eine Topologieveränderung von Rechteckplatten durch die Sicken einbringung in berechneten Verläufen.

Die Untersuchungen dieser drei Mechanismen beschränkten sich nicht nur auf die statischen und dynamischen Eigenschaften der Bleche sondern beinhalteten auch die Optimierung des Fertigungsprozesses. Weiters wurden die Vorgänge im Material durch den Einsatz der Finite Elemente Methode analysiert.

### 7.1 Gezielte Eigenspannungseinbringung in Platten mittels Lasereinwirkung

Bei der gezielten Einbringung von Eigenspannungen durch Laserstrahlung, wobei durch rein thermomechanisches Plastifizieren Eigenspannungen induziert werden, kommt es je nach Einbringungsmuster zu merklichen Erhöhungen der Beulstabilität und zu Steigerungen der Grundfrequenz. Dabei wurde weder das Bauteilgewicht gesteigert oder die Topographie der Rechteckplatte verändert.

Wechselwirkungen zwischen den angewandten Mustern, in denen die Eigenspannungen eingebracht wurden, der Energiedichte des Lasers und der Einbringungsabfolge wurden beobachtet.

Die linienartige Einbringung von Eigenspannungen erwies sich als nicht zielführend.

Ebenso die beidseitige Laseranwendung bei gleichbleibender Punktegeometrie zur Sicherstellung eines Eigenspannungszustandes ohne Spannungsgradienten über die Plattendicke. Ein Einfluss der Anisotropie durch die Kornstreckung, die durch den Walzvorgang bei der Blechherstellung hervorgerufen wird, konnte in den durchgeführten Untersuchungen nicht nachgewiesen werden.

Die Anwendung von lokal induzierten Eigenspannungsfeldern eignet sich für eine automatisierte industrielle Serienfertigung sehr gut. Speziell im Rahmenbau bzw. bei Konstruktionen, in denen Schubfelder verbaut werden, liegen die industriellen Anwendungsgebiete, da dieses Konzept eine Bauteileigenschaftsverbesserung ohne Gewichtssteigerung oder Beeinflussung der Oberflächenoptik möglich macht.

Weiters gehören stark dynamisch belastete Bauteile wie z.B. Verkleidungen von Maschinen oder Hautfelder von Fahrzeugen zu den Anwendungsnischen, da speziell bei diesen Bauteilen die Höhe der 1. Eigenfrequenz eine große Rolle spielt.

## 7.2 Wölbstrukturierung von Platten durch die Einbringung von Hohlprägungen

Bei der Kombination gezielter Trägheitsmomentenbeeinflussung und Eigenspannungseinbringung durch die Wölbstrukturierung mittels Hohlprägestrukturen sind ähnliche Erfolge wie bei den laserbehandelten Platten zu verzeichnen. Die erzielten Resultate fallen bei weitem deutlicher aus, da nicht nur mit Eigenspannungen sondern auch mit geometrieverändernden Maßnahmen gearbeitet wurde, die sich auf das Trägheitsmoment der Rechteckplatten auswirken.

Durch den Einsatz der Finiten Elemente Methode und durch eine optische dreidimensionale Analyse des Bauteilverhaltens während der Beulprüfung konnten Abhängigkeiten und Zusammenhänge der einzelnen Muster visualisiert und untersucht werden. Aufgrund einer iterativen Weiterentwicklung der Muster gelang eine Beulstabilitätssteigerung sowie eine Grundfrequenzanhebung durch die punktweise Einbringung von Hohlprägungen.

Verglichen mit der Einbringung von Eigenspannungen durch thermomechanisches Plastifizieren mittels Laserstrahlung liegen die messbaren Erfolge bei den Zielgrößen Beulstabilität und Eigenfrequenz auf einem höherem Niveau - siehe Abbildung 5.19 und Abbildung 5.26.

Grund dafür ist die Veränderung der Blechoberfläche durch die Einbringung der Wölbstrukturen, deren Höhe sich zur 3. Potenz auf das Trägheitsmoment auswirken.

Was sich in diesem Fall sehr positiv auf die Anhebung der Zielgrößen auswirkt, ist für die Optik des Bauteils nachteilig, wenn plane Oberflächen gefordert werden. Anderenfalls können die Hohlprägungen als Stilelement und visueller Anreiz genutzt werden. Zusätzlich zeichnen sich die wölbstrukturierten Bleche durch einen erhöhten Normalkraftwiderstand aus.

Anwendungsbereiche sind wie bei den laserbehandelten Blechen Schubfeldkonstruktionen oder Verkleidungen im Maschinen-, Anlagen oder Verkehrsfahrzeugbau.

### 7.3 Sickeneinbringung in Platten

Aus den Grundlagenuntersuchungen von Oehler und aus anderen technischen Anwendungen heraus ist die große Steigerung der Beulsteifigkeit und der 1. Eigenfrequenz durch die Einbringung von Sicken bekannt.

Die gewonnenen Ergebnissen des Sickenalgorithmus belegen eindeutig, dass die linienartige Trägheitsmomentensteigerung durch die Anordnung von Sicken die effektivste der drei untersuchten Methoden ist, um die statischen und dynamischen Bauteileigenschaften von Plattenbauteilen zu verbessern.

Als nachteilig erwiesen sich die geringen Dimensionen der Versuchsbleche. Sowohl bei der händisch als auch bei der CNC unterstützten industriellen Sickeneinbringung konnte in Bezug auf die geforderte Planheit kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden.

Aus diesem Grund musste für den praktischen Nachweis der Arbeitsweise des Sickenalgorithmus das Fertigungsverfahren und dadurch auch das Material geändert werden.

Durch das alternativ gewählte Herstellungsverfahren, dem Tiefziehen von Kunststoffplatten, waren prozentuell gesehen die höchsten Steigerungen der Beulsteifigkeit und der 1. Eigenfrequenz möglich. Dabei stellte sich eine Anhebung des Beulstabilitätsindex von 131,57 % und der 1. Eigenfrequenz von 110 % ein.

Der stetige Anstieg der Stabilität und der Grundfrequenz von Iterationsschritt zu Iterationsschritt konnte nicht nachgewiesen werden.

Die Einbringung von Sicken ist mit Abstand die effektivste Methode, das Stabilitätsverhalten von dünnen Blechkonstruktionen zu verbessern. Typische Anwendungsgebiete sind wie bei den beiden anderen Methoden Hautfelder bei Rahmenbauweisen.

Wie auch bei den wölbstrukturierten Blechen muss sich die Veränderung der Oberfläche nicht zwingend negativ auf das Erscheinungsbild auswirken.

Weiters lassen sich durch den stellenweise hohen Umformgrad bei der Herstellung im Rollverfahren gezielt die mechanischen Eigenschaften verändern, wie die austenitisch bzw.

martensitische Halbrundsicke zeigte. Dadurch können tribologisch beanspruchte Bauteile verschleißfester gestaltet werden.

## 7.4 Fazit der Untersuchungen der Beulstabilität und der 1. Eigenfrequenz von Rechteckplatten

Vom wissenschaftlichen Standpunkt aus gesehen ist die Methode der durch thermomechanischen Plastifizierens eingebrachter Eigenspannung zur Verbesserung der mechanischen und dynamischen Eigenschaften von Plattenbauteilen am wertvollsten.

Nicht nur wegen der unterschiedlichen Eigenspannungsmuster und deren Einbringungsabfolge sondern aufgrund der Eigenschaftsverbesserungen, ohne die Geometrie oder das Gesamtgewicht der Platte zu verändern.

Dahingehend steckt weiteres Entwicklungspotential in der Anordnung der Eigenspannungsfelder sowie deren Weiterentwicklung in Bezug auf die Einbringungsabfolge und die Energieeinbringung.

Weiters bietet sich die Entwicklung eines Eigenspannungsalgorithmus an, der auch in der simulationsunterstützten Sickenverlegung zum Einsatz kam.

Vom fertigungstechnischen Aspekt her betrachtet ist die Sickeneinbringung entlang berechneter Pfade zu favorisieren. Dies liegt an der vergleichsmäßig höchsten Steigerung der Beulsteifigkeit sowie der 1. Eigenfrequenz. Weiters liegt in diesem Verfahren das größte Umsetzungspotential in der industriellen Anwendung.

Bei einer Weiterentwicklung des Sickenalgorithmus ist auf eine technisch möglichst einfache Umsetzung zu achten und eine Implementierung von äußeren Gegebenheiten wie Bauteildimensionen oder Betriebsbelastungen einzubeziehen.

Abgesehen vom fertigungstechnischen Leichtbau, dessen Aufgabe es nach wie vor ist, die einzelnen Disziplinen und Herangehensweisen des Leichtbaus zu verbinden und möglichst ökonomisch umzusetzen, zeichnen sich am Leichtbausektor immer stärkere Trends Richtung Verbundmaterialien, Hybridverbunde und Multimaterialprodukte ab.

Bei der computerunterstützten Konstruktion von Bauteilen oder Baugruppen ergeben sich schnell Grenzen zwischen Gestalt- und Topologieoptimierung sowie der technischen Realisierbarkeit.

Hingegen birgt die Sparte des gezielten Materialeinsatzes und dessen Fügetechnik einen großen Entwicklungsspielraum. Der selektive und maßgeschneiderte Einsatz von Werkstoffen und neu entwickelten Verbunden ist speziell im höheren Preissegment von Produkten,

wie z.B. im Automobil, seit Jahren fest verankert. Dabei sind vor allem die mechanischen Füge-technologien und die Klebverfahren extrem gefordert, da verschiedenste metallische und nichtmetallische Komponenten mit oft sehr unterschiedlichen Eigenschaften betriebsfest vereint werden müssen. Neben der Weiterentwicklung am Material- und Füge-techniksektor stehen die Fertigungstechnik und deren Automatisierung vor enormen Herausforderungen. Gerade bei den schichtweise hergestellten Verbundmaterialien sind durch die Steigerung des Automationsgrades eine Kostensenkung und in weiterer Folge ein Wettbewerbsvorteil möglich. Dadurch ist marktwirtschaftlich gesehen eine Etablierung im Mittelpreissegment von Produkten möglich.

Demnach liegen die Herausforderungen des Leichtbaus und dessen Fertigungsverfahren nicht nur in der Gewichtsreduktion bei gleichen oder sogar verbesserten Bauteileigenschaften sondern vielmehr in der Herausforderung, die Entwicklungen einem breiten Marktsegment zugänglich zu machen.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Beispiel Konzeptleichtbau - multifunktionelles Aluminium Strangpressprofil	5
2.2	Beispiele Konzeptleichtbau . . . . .	5
2.3	Beispiele stofflicher Leichtbau . . . . .	6
2.4	Beispiel konstruktiver Leichtbau . . . . .	7
2.5	Beispiel konstruktiver Leichtbau - Bionik . . . . .	7
2.6	Beispiele fertigungstechnischer Leichtbau . . . . .	8
2.7	Leichtbaukonstruktionsbeispiel eines torsionssteifen Rahmenprofils . . . . .	10
2.8	Leichtbaukonstruktionsbeispiel modifizierter Profile . . . . .	11
2.9	Leichtbaukonstruktionsbeispiel Scheibe/Platte . . . . .	12
2.10	Leichtbaukonstruktionsbeispiel Durchlässe . . . . .	12
2.11	Leichtbaukonstruktionsbeispiel freie Ränder . . . . .	13
2.12	Differentialbauweise . . . . .	14
2.13	Integralbauweise . . . . .	14
2.14	Integrierte Bauweise . . . . .	15
2.15	Modulbauweise . . . . .	15
2.16	Verbundbauweise . . . . .	16
2.17	Vergleich von Profilquerschnitten und deren Anbindungen an Außenhautfeldern . . . . .	17
2.18	Geschichtliche Entwicklung der Leichtbauweisen . . . . .	18
2.19	Werkstoffgruppen . . . . .	19
2.20	Ermittlung der Leichtbaugüte . . . . .	21
2.21	Ermittlung der Leichtbaugüte bei der BMW 5er Baureihe . . . . .	22
2.22	Tolerierbare Kosten bei Leichtbauanwendungen . . . . .	23
2.23	Entwicklung der einzelnen Kostengruppen bei steigendem Leichtbaugrad . . . . .	24

---

3.1	Unterscheidungsmerkmale von Scheiben- und Plattenelementen . . . . .	26
3.2	Belastungen an einem Schalenelement . . . . .	26
3.3	Ermittlung der Halbwellenanzahl . . . . .	29
3.4	Diagramm zur grafischen Ermittlung des $\kappa$ Wertes . . . . .	30
3.5	Diagramm zur grafischen Ermittlung des Beulfaktors $k$ . . . . .	31
3.6	Kraft/Verschiebungsdiagramm einer Rechteckplatte . . . . .	32
3.7	Diagramm zur grafischen Ermittlung des Frequenzbeiwertes . . . . .	35
4.1	Fließkurven des DC01 bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	40
4.2	Vernetzung der DC01 Platte für die Simulation einer punktförmigen Laserbestrahlung . . . . .	41
4.3	Nd-YAG Laser . . . . .	42
4.4	Diodenlaser . . . . .	43
4.5	Linienmuster der Laserbestrahlungen . . . . .	45
4.6	Punktemuster der Laserbestrahlungen . . . . .	45
4.7	Übersichtsdarstellung der eingebrachten Lasermuster . . . . .	46
4.8	Sinussequenz . . . . .	47
4.9	Ringsequenz . . . . .	47
4.10	Spiralsequenz . . . . .	48
4.11	Pilgerschrittsequenz . . . . .	48
4.12	Konstruktionszeichnung Beulprüfstand . . . . .	50
4.13	Beulprüfstand . . . . .	51
4.14	Platteneinspannung in den V-Nuten . . . . .	53
4.15	Eigenfrequenzmessung bei den untersuchten Rechteckplatten . . . . .	54
4.16	Beispiel einer Eigenfrequenzauswertung . . . . .	55
4.17	Beispiele von wölbstrukturierten Blechen . . . . .	57
4.18	Kombination der Prägemuster Kreuz und Kreis . . . . .	58
4.19	Vernetzung der DC01 Platte für die Simulation des Hohlprägeprozesses . . . . .	59

---

4.20	Kraftformer KF170 . . . . .	60
4.21	Definition der Einbringungsrichtung von Hohlprägestrukturen . . . . .	61
4.22	Hohlprägemuster . . . . .	62
4.23	Anwendungsbereiche von Sicken . . . . .	64
4.24	Sickenquerschnitte . . . . .	65
4.25	Sickenanordnung und Sickenarten . . . . .	65
4.26	Halbrundsicke - Nomenklatur . . . . .	66
4.27	Vernetzung einer DC01 Platte für die Simulation des Herstellungsprozesses einer Halbrundsicke . . . . .	67
4.28	Sickenmaschine . . . . .	68
4.29	Blechbearbeitungsanlage TruPunch 5000 . . . . .	69
4.30	Sickenmuster der 1. Herstellungsserie . . . . .	70
4.31	Dreiseitige gelenkige Lagerung der versickten Platten . . . . .	71
4.32	Sickenalgorithmus - 1. Iteration zur Verbesserung der Beulsteifigkeit . . . . .	72
4.33	Sickenalgorithmus - 2. bis 4. Iteration zur Verbesserung der Beulsteifigkeit . . . . .	73
4.34	Sickenmuster der 2. Herstellungsserie . . . . .	74
4.35	Beulprüfstand für dreiseitige Platteneinspannung . . . . .	75
5.1	Klassifizierung der unterschiedlichen Arten von Eigenspannungen . . . . .	77
5.2	Maximaltemperaturverteilung unmittelbar nach der Lasereinwirkung . . . . .	78
5.3	Temperaturverteilung über die Plattendicke während der Laserbestrahlung . . . . .	78
5.4	Vergleich der Maximaltemperaturverteilung nach der Lasereinwirkung mit den verbliebenen Anlassfarben . . . . .	79
5.5	Spannungen während der Laserbestrahlung . . . . .	80
5.6	Spannungen nach der Laserbestrahlung . . . . .	81
5.7	Bohrlochmethode . . . . .	82
5.8	Gemessene Spannungen nach der Laserbestrahlung - Bohrlochmethode . . . . .	83
5.9	Röntgendiffraktometrie - Messkonzept . . . . .	84
5.10	Gemessene Spannungen nach der Laserbestrahlung - Röntgendiffraktometrie . . . . .	85

---

5.11	ARAMIS <sup>®</sup> Messsystem . . . . .	86
5.12	Gemessene Formänderungen nach der Laserbestrahlung - ARAMIS <sup>®</sup> System	87
5.13	Verzug der laserbestrahlten Bleche aus der 1. Herstellungsserie . . . . .	88
5.14	Verzug der laserbestrahlten Bleche mit Linienmustern aus der 2. Herstellungsserie . . . . .	89
5.15	Vermessung der Topographie im Bereich der Laserpunkte . . . . .	90
5.16	Schweißfolgeplan der Lasereinzelpunktemuster . . . . .	91
5.17	Kraft/Verschiebungsverlauf - Vergleich Theorie mit praktischem Versuch .	92
5.18	Kraft/Verschiebungsverlauf der laserbehandelten Bleche der 2. und 3. Herstellungsserie . . . . .	93
5.19	Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der laserbehandelten Bleche der 2. und 3. Herstellungsserie . . . . .	94
5.20	Simulation der Spannungen während der Herstellung von Hohlprägungen .	95
5.21	Simulation der Eigenspannungen im Bereich der Hohlprägung . . . . .	96
5.22	Vermessung der Blechdicke im Bereich einer Hohlprägung . . . . .	97
5.23	ARAMIS <sup>®</sup> Analyse der Beulstabilitätsuntersuchungen von wölbstrukturierten Blechen . . . . .	98
5.24	ARAMIS <sup>®</sup> Analyse der Beulstabilitätsuntersuchungen von genetisch verbesserten wölbstrukturierten Blechen . . . . .	99
5.25	Kraft/Verschiebungsdiagramm der wölbstrukturierten Bleche . . . . .	100
5.26	Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der wölbstrukturierten Bleche der 1. und 2. Versuchsserie . . . . .	101
5.27	Simulation der Spannungen während der Herstellung einer Halbrundsicke durch Rollwerkzeuge . . . . .	102
5.28	Simulation der Eigenspannungen im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke . . . . .	103
5.29	Simulation des vorherrschenden Umformgrades $\varphi$ im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke . . . . .	103
5.30	Simulation der vorherrschenden plastischen Vergleichsdehnungen im Bereich einer durch Rollwerkzeuge hergestellten Halbrundsicke . . . . .	104

---

5.31	Simulation der Blechdeformationen nach der Herstellung einer Halbrundsicke mit Rollwerkzeugen . . . . .	105
5.32	Blechverzug beim Rollformverfahren . . . . .	106
5.33	Umwandlungsschaubild von metastabilem Austenit in Martensitformen für den Werkstoff X5CrNi18-10 . . . . .	107
5.34	Metallurgische Schliffaufnahme einer Halbrundsicke mit dehnungsinduziertem Martensit . . . . .	108
5.35	Tiefziehprozess von Kunststofffolien in Sickenformen . . . . .	109
5.36	Übersichtsskizze des Messaufbaus der Beulanalyse von versickten Kunststoffplatten . . . . .	110
5.37	Kraft/Verschiebungsdiagramm der versickten Rechteckplatten . . . . .	111
5.38	Beulstabilitätsindex und 1. Eigenfrequenz der versickten Rechteckplatten .	112
6.1	Laserpunktemuster mit der höchsten Beulsteifigkeitssteigerung . . . . .	114
6.2	Laserpunktemuster der höchsten Steigerung der 1. Eigenfrequenz . . . . .	115
6.3	Hohlprägemuster der höchsten Steifigkeitssteigerung - 1. Versuchsserie . . .	118
6.4	Hohlprägemuster der höchsten Steifigkeitssteigerung - 2. Versuchsserie . . .	119
6.5	Sickenverläufe der höchsten Steifigkeitssteigerung . . . . .	121

# Tabellenverzeichnis

1	Tabelle der verwendeten Abkürzungen . . . . .	IX
2	Tabelle der verwendeten lateinischen Formelzeichen . . . . .	X
3	Tabelle der verwendeten griechischen Formelzeichen . . . . .	XI
2.1	Gütekennzahlen zur Beurteilung der Leichtbaueignung . . . . .	20
4.1	Chemische Zusammensetzung vom Werkstoff 1.0330 . . . . .	39
4.2	Laserparameter der einzelnen Herstellungsserien . . . . .	44

# Literaturverzeichnis

- [1] B. Buchmayr und F. G. Rammerstorfer: *K2 MPPE Projektantrag: Metal Forming Concepts for Manufacturing of Light Weight Structures (Fertigungstechnischer Leichtbau)*, Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben und Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik der Technischen Universität Wien, 2007.
- [2] J. Wiedemann: *Leichtbau: Elemente und Konstruktion*, Springer Verlag, 3. Aufl., 2006, ISBN 9783540336563.
- [3] B. Klein: *Leichtbau-Konstruktion - Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*, Vieweg+Teubner Verlag, 8. Aufl., 2009, ISBN 9783834807014.
- [4] S. Chatti: *Production of Profiles for Lightweight Structures*, Books on Demand GmbH, Germany, 2004, ISBN 3-8334-4929-2.
- [5] H. P. Degischer und S. Lüftl: *Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, ISBN 978-3-527-32372-2.
- [6] N.N.: “Leichtbau”, 2012, URL [http://tu-dresden.de/die\\_tu\\_dresden/fakultaeten/vkw/sft/download/TW1%2040%20Leichtbau.pdf](http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/sft/download/TW1%2040%20Leichtbau.pdf).
- [7] H. Hertel: *Leichtbau - Flugzeuge und andere Leichtbauwerke*, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1960.
- [8] N.N.: “Das Impulsprogramm "Materialeffizienz"des BMWi”, 2010, URL <http://www.demea.de/was-ist-materialeffizienz>.
- [9] O. Paulssen: “Grundlagen des Leichtbaues (II. Teil)”, *STAHL UND EISEN - Zeitschrift für das Deutsche Eisenhüttenwesen*, 4/1936, S. 81–86, 1936.
- [10] B. Buchmayr, G. Figala und L. Wunsch: “Lokale fertigungstechnische Verstärkungskonzepte zur Erhöhung der Materialeffizienz”, *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte - Ausgabe Juli 2010*, Springer Verlag Wien, S. 307–312, 2010.
- [11] R. Boutellier und A. Biedermann: *Handbuch Qualitätsmanagement - Qualitätsgerechte Produktionsplanung*, Carl Hanser Verlag München, 5. Aufl., 2007, ISBN 978-3-446-40752-7.

- [12] R. Knüppel, G. Brockmann, C. Deiters und H. Wähling: “Leichtbaulösungen im PKW anhand ausgewählter Beispiele”, *4th Colloquium Aachen: "Fahrzeug- und Motorentchnik"*, Aachen RWTH / Deutschland, S. 521–534, 1993.
- [13] T. Trautwein, S. Henn und K. Rother: “Stellhebel in der Fahrzeugauslegung”, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 5/2011*, S. 390–394, 2011.
- [14] N.N.: “Peel P50: Das kleinste Auto der Welt ist zurück”, 2012, URL [http://www.krone.at/Auto-Motorrad/Peel\\_P50\\_Das\\_kleinste\\_Auto\\_der\\_Welt\\_ist\\_zurueck-Mit\\_Tragegriff-Story-308960](http://www.krone.at/Auto-Motorrad/Peel_P50_Das_kleinste_Auto_der_Welt_ist_zurueck-Mit_Tragegriff-Story-308960).
- [15] N.N.: “Einsatz für tragende Teile im Automobil - Magnesium-Aluminium-Kombination”, *lightweightdesign, Ausgabe 6/2008*, S. 15, 2008.
- [16] F. Traub, D. Busch und M. Dobler: “Audi A1 Karosserie”, *ATZextra, Ausgabe 6/2010*, S. 50–55, 2010.
- [17] N. Barker: “Bridge over Leith Street linking to St. James Shopping Centre”, 2012, URL <http://www.geograph.org.uk/photo/1084049>.
- [18] R. Witt und C. Lieckfeld: *BIONIK - Patente der Natur*, PRO FUTURA Verlag GmbH, 1991.
- [19] C. Mattheck: *Design in der Natur*, Rombach Verlag Freiburg, 1992, ISBN 3-7930-9076-0.
- [20] E. Zimmermann: “Möwe”, 2012, URL <http://www.ernst-zimmermann.ch/seite3.htm>.
- [21] N.N.: “Warmumformung weiterentwickelt: Tailored Tempering für B-Säule”, *ThyssenKrupp: Der Innovative Lösungsbaukasten für die Automobilindustrie - InCar - Projekt, Ausgabe 10/2009*, 2009.
- [22] A. Breidenbauch, R. Dams, T. Gerber, S. Reiter, S. Sikora und O. Straube: “Sechs Wege zur optimalen B-Säule”, *ATZextra - ThyssenKrupp / InCar - Projekt, Ausgabe 11/2009*, S. 56–71, 2009.
- [23] N.N.: “Profile aus tailored rolled Coils”, *BLECHE ROHRE PROFILE, Ausgabe 11/2009*, S. 28, 2009.
- [24] F. G. Rammerstorfer und T. Daxner: *Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsverfahren*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, S. 14-49, 2009, ISBN 978-3-527-32372-2.

- [25] G. Oehler und F. Garbers: “Untersuchung der Steifigkeit und Tragfähigkeit von Sicken”, *Deutsche Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung und Oberflächenbearbeitung e. V., Düsseldorf - Westdeutscher Verlag Köln und Opladen*, 1968.
- [26] G. Oehler und E. Draeger: “Versteifung von Stahlblechteilen”, *Beratungsstelle für Stahlverwendung*, 1971.
- [27] P. Ermanni: *Flugzeugstrukturen - Grundlagen des Leichtbaus*, ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2009.
- [28] G. Ramberger und S. Schnaubelt: *Stahlbau*, MANZ Verlag, 5. Aufl., 1998, ISBN 3-7068-0384-4.
- [29] N.N.: “Hütten - Aluminium Druckguss Legierungen”, *Aluminium Rheinfelden GmbH - Produktkatalog, 2. Auflage 05/2007*, S. 13, 2007.
- [30] N.N.: “Yamaha R6”, 2012, URL <http://www.yamaha-motor.eu/at/products/motorcycles/supersport/yzf-r6.aspx?view=media>.
- [31] N.N.: “Der VW Sharan - Schutz auf allen Plätzen”, *ATZextra - Der VW Sharan, Ausgabe 6/2010*, S. 34–38, 2010.
- [32] J. Hohlfeld und C. Lies: “Leichtbau mit zellularen metallischen Werkstoffen und ausgewählte Anwendungen im Werkzeugmaschinenbau”, *EUROLIGHT Kongress - Salzburg*, 2009.
- [33] N.N.: “Mit Metallschaum ausgeschäumte Profile”, 2012, URL <http://www.welt.de/wissenschaft/innovationen/article4598881/Metallschaum-fuer-die-geplagte-Wirbelsaeule.html>.
- [34] H. Gers: “Hochfeste Aluminiumprofile für den Spaceframe der nächsten Generation”, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 12/2009*, S. 908–913, 2009.
- [35] N.N.: “Crashsimulation eines Profils”, 2012, URL [http://www.lkr.at/de/news\\_--publikationen/pressefach/fotoarchiv](http://www.lkr.at/de/news_--publikationen/pressefach/fotoarchiv).
- [36] G. Kopp, N. Burkardt und N. Majic: *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoff, Fertigung*, Carl Hanser Verlag München Wien, 2011, ISBN 978-3-446-42267-4.
- [37] W. Sobek: *Entwerfen im Leichtbau*, Themenheft Forschung - Leichtbau, 2010.
- [38] H. Kossira: *Grundlagen des Leichtbaus - Einführung in die Theorie dünnwandiger stabförmiger Tragwerke*, Springer-Verlag Berlin / Heidelberg, 1996.

- [39] F. G. Rammerstorfer und T. Daxner: “Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten”, *Austrian Light Weight Structures (ALWS) - Ranshofen*, 2007.
- [40] N.N.: “Hütten - Aluminium Druckguss Legierungen”, *Aluminium Rheinfelden GmbH - Produktkatalog, 2. Auflage 05/2007*, S. 10, 2007.
- [41] J. Rodriguez, D. Seibert, D. Koschitzky, T. Hahn und J. Kürschner: “Intergrale Sicherheit”, *ATZextra - Der neue Audi Q3, Ausgabe 5/2022*, S. 96–103, 2011.
- [42] J. Henning: “Modulare Karosseriekonzepte”, *2. Braunschweiger Symposium, 25. Jänner 2005, Braunschweig/Deutschland*, 2005.
- [43] T. Draht: “Fügen in der Automobilindustrie - Einseitig verbinden ohne Vorlochen”, *lightweightdesign, Ausgabe 6/2008*, S. 20–23, 2008.
- [44] S. Schlott: “Fügetechnik für hybride Leichtbauweisen”, *ATZ produktion, Ausgabe 2/2009*, S. 58–59, 2009.
- [45] N.N.: “Gesetzgebung der Europäischen Union: EG-Richtlinie über Altfahrzeuge - Stand 2009”, 2012, URL [http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/abfallarten\\_abfallstroeme/altfahrzeuge/doc/print/2984.php](http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/abfallarten_abfallstroeme/altfahrzeuge/doc/print/2984.php).
- [46] J. Nickel: “Faserverbundbauweisen für den Next Generation Train (NGT)”, *Institut für Faserverbandleichtbau and Adaptronik Braunschweig*, 2009.
- [47] E. Kreissig: “Grundlagen des Leichtbaues (I. Teil)”, *STAHL UND EISEN - Zeitschrift für das Deutsche Eisenhüttenwesen, 2/1936*, S. 33–39, 1936.
- [48] M. Ashby, H. Shercliff und D. Cebon: *Materials - engineering, science, processing and design*, Bd. 2nd Edition, ELSEVIER, 2010, ISBN 978-1-85617-895-2.
- [49] K. Weidenmann und A. Wanner: *Handbuch Leichtbau - Methoden, Werkstoff, Fertigung*, Carl Hanser Verlag München Wien, 2011, ISBN 978-3-446-42267-4.
- [50] H.-H. Braess und U. Seiffert: *Handbuch der Kraftfahrzeugtechnik*, vieweg Verlag - ATZ/MTZ Fachbuch, 2007, ISBN 978-3-8348-0222-4.
- [51] H. Dubbel: *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011.

- [52] W. Schreiber, J. Hadler, H. Westendorf, W. Netuschil und M. Bauer: “Der neue Pickup VW Amarok”, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 6/2010*, S. 412–419, 2010.
- [53] R. Krenn und O. Mayer: “Die Karosserie des neuen BMW 5er”, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 5/2010*, S. 316–323, 2010.
- [54] M. F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design*, Pergamon Press - Oxford/New York/Seoul/Tokyo, 1992, ISBN 0 08 041907 0.
- [55] M. F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design - Appendix C*, Pergamon Press - Oxford/New York/Seoul/Tokyo, 1992, ISBN 0 08 041907 0.
- [56] N.N.: “VW Golf VII”, 2012, URL <http://www.autozeitung.de/auto-neuheiten/neue-kompakte-vw-golf-vii-audi-a3-skoda-octavia-und-felicia>.
- [57] N.N.: “Diamond D-Jet”, 2012, URL <http://www.austrianwings.info/2011/06/neue-finanzierung-fur-diamond-d-jet/>.
- [58] N.N.: “Lufthansa A380”, 2012, URL <http://austrianaviation.net/news-regional/news-detail/datum/2011/08/05/lufthansa-a380-fluege-ab-sofort-buchbar.html>.
- [59] N.N.: “Space Shuttle”, 2012, URL <http://de.euronews.net/2011/07/05/letzter-flug-fuer-das-space-shuttle/>.
- [60] R. Allen: *Das kugelsichere Federkleid – wie die Natur uns Technologie lehrt*, Spektrum Verlag, 2010.
- [61] H. Krause: *Natur – Vorbild der Technik*, Verlag Harri Deutsch, 1986.
- [62] A. Pflüger: *Einführung in die Schalenstatik*, Wolfenbüttler Verlagsanstalt, 1948.
- [63] A. Pflüger: *Elementare Schalenstatik*, Springer-Verlag Berlin / Heidelberg / New York, 1981.
- [64] F. G. Rammerstorfer: *Repetitorium Leichtbau*, R. Oldenbourg Verlag Wien München, 1992.
- [65] A. Pflüger: *Stabilitätsprobleme der Elastostatik*, Springer-Verlag Berlin / Heidelberg / New York, 1975.

- [66] H. Dresig und F. Holzweißig: *Maschinendynamik*, Springer Verlag, 10. Aufl., 2011, ISBN 9783642160097.
- [67] F. G. Rammerstorfer und R. Beer: “Die Erhöhung der Grundfrequenz und der Beulast von Kreisplatten durch geeignete plastische Verformung”, *Forsch.Ing.-Wes., Ausgabe Nr. 42*, S. 168–172, 1976.
- [68] F. G. Rammerstorfer: “Increase of the First Natural Frequency and Buckling Load of Plates by Optimal Fields of Initial Stresses”, *Acta Mechanica, Ausgabe Nr. 27*, S. 217–238, 1977.
- [69] G. Figala und B. Buchmayr: “Improvement of buckling resistance of thin sheets by local laser treatment”, *13th ESAFORM conference, Brescia, Italy*, 2010.
- [70] N.N.: *Deform Intergrated 2D-3D Version 10.1.2 - User's Manual*, Scientific Forming Technilolgies Corporation, 2010.
- [71] F. Richter: *Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen*, Mannesmann Forschungsberichte, 1973, ISBN 3-514-00141-3.
- [72] F. Vollertsen: *Laserstrahlumformen - Lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen, Modellierung*, Meisenbach Bamberg, 1996, ISBN 3-87525-071-0.
- [73] R. Poprawe: *Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur*, Springer Verlag, 2005, ISBN 3-540-21406-2.
- [74] N.N.: *Stahlschlüssel-Taschenbuch*, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH - D-71672 Marbach/N., 21. Aufl., 2007, ISBN 3-922 599-22-2.
- [75] N.N.: “Untersuchungsbericht über die chemische Zusammensetzung einer DC01 Materialprobe”, 2008.
- [76] E. Doege, H. Meyr-Nolkemper und I. Saeed: *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1986, ISBN 3-446-14427-7.
- [77] R. Krenn: “Arbeitsprotokoll zur 2. Herstellungsserie von Eigenspannungsfeldern in DC01 Blechen mit einem Nd-YAG Laser”, *Laserzentrum Leoben - Joanneum Forschungsgesellschaft mbH*, 2008.
- [78] R. Krenn: “Arbeitsprotokoll zur 1. Herstellungsserie von Eigenspannungsfeldern in DC01 Blechen mit einem Nd-YAG Laser”, *Laserzentrum Leoben - Joanneum Forschungsgesellschaft mbH*, 2008.

- [79] S. Marsoner: "Datenblatt Diodenlaser DF 018 der Firma Roфин", *Materials Center Leoben (MCL)*, 2008.
- [80] H. Parizek: "Arbeitsprotokoll zur 3. Herstellungsserie von Eigenspannungsfeldern in DC01 Blechen mit einem Diodenlaser", *Material Center Leoben Forschungs GmbH*, 2008.
- [81] H. Fahrenwaldt und V. Schuler: *Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe, Verfahren, Fertigung*, vieweg, 2003.
- [82] V. Läßle: *Einführung in die Festigkeitslehre*, VIEWEG + TEUBNER Verlag, 2. Aufl., 2008, ISBN 978-3-8348-0452-5.
- [83] J. Singer, J. Arbocz und T. Weller: *The Buckling Experiments: Experimental Methods in Buckling of Thin-Walled Structures*, JOHN WILEY & SONS, INC., 1998.
- [84] F. G. Rammerstorfer: "Reibungseffekte einer Platte im Beulprüfstand", *Persönliche Notiz*, 2009.
- [85] C. Bilik, F. G. Rammerstorfer, G. Figala und B. Buchmayr: "Improving the dynamic and stability behaviour of plates by laser treatment", *ICCSM 2009, Dubrovnik, Croatia*, 2009.
- [86] C. Bilik, F. G. Rammerstorfer, G. Figala und B. Buchmayr: "Investigations of the stability and dynamic behaviour of plates subjected to laser treatment", *Junior Scientist Conference 2010, Vienna, Austria*, 2010.
- [87] C. Bilik, F. G. Rammerstorfer, G. Figala und B. Buchmayr: "Computational Modelling of Laser Treatment of Plates for Increased Buckling Loads and Natural Frequencies", *Journals of Mechanical Engineering Science*, 2011.
- [88] N.N.: "Introduction to Shock and Vibration", *Brüel & Kjaer Sound und Vibration Measurement A/S*, 1998.
- [89] N.N.: "Vibration Transducers and Signal Conditioning", *Brüel & Kjaer Sound und Vibration Measurement A/S*, 1998.
- [90] N.N.: "Vibration Measurement and Analysis", *Brüel & Kjaer Sound und Vibration Measurement A/S*, 1998.
- [91] C. Bilik: "Quellcode zur computerunterstützten Auswertung von Eigenfrequenzen", 2008.

- [92] L. Schleuß, R. Ossenbrik und V. Michailov: “Widerstandspunktschweißen strukturierter Bleche - Schweißbereiche, Prüfung, Anwendung”, *12. Kolloquium "Widerstandsschweißen und alternative Verfahren"*, Halle/Saale, Germany, 2010.
- [93] D. Vlahovic, R. Schleich und M. Liewald: “Beulen von Feinblechen unter einachsiger Zugbeanspruchung”, *UFT science, Ausgabe IV*, 2007.
- [94] B. Viehweger: “Umformverhalten strukturierter Feinbleche”, *Forschungsberichte Leichtbau*, 2002.
- [95] A. Sterzing: *Bewertung von Leichtbaupotential und Einsatzfähigkeit wölbstrukturierter Feinbleche*, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU - Chemnitz, Verlag Wissenschaftlicher Scripten Zwickau, 2005, ISBN 937524-32-0.
- [96] X. Ding und K. Yamazaki: “Stiffer layout design for plate structures by growing and branching tree model (application to vibration-proof design)”, *Struct Multidisc Optim, Numer 26*, S. 99–110, 2004.
- [97] F. Mirtsch, N. Weinert, M. Pech und G. Seliger: “Vault Structures Enabling Sustainable Products”, *13th CIRP INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIFE CYCLE ENGINEERING*, S. 629–633, 2006.
- [98] B. Rauscher: “Herstellung leichter, mehrzelliger Blechstrukturen für den Nutzfahrzeugbau mittels innovativer wirkmedienbasierter Umformverfahren”, *4. Landshuter Leichtbau Colloquium*, 2009.
- [99] M. Trompeter, B. Rauscher und E. Tekkaya: “Wirkmedienbasierte Herstellung mehrzelliger Blechstrukturen für den Nutzfahrzeug-Leichtbau”, *lightweightdesign, Ausgabe 3/2010*, S. 53–58, 2010.
- [100] H. Tschätsch: *Taschenbuch Umformtechnik - Verfahren Maschinen Werkzeuge*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1977, ISBN 3-446-12151-X.
- [101] F. R. Pohl: “Futuristisches Sportzentrum am Schwarzen Meer”, *Baumetall, Ausgabe 4*, 2006.
- [102] N.N.: “Wölbstrukturierte Bleche - PowerStruct”, 2011, URL <http://www.woelbstruktur.de/index.html>.
- [103] N.N.: “Wölbstruktur / PowerStruct - Versteifende, biologische Strukturen auf Basis der Selbstorganisation”, *Kurzprofil der Firma Dr. Mirtsch*, 2011.

- [104] O. Kienzle: “Die Versteifung ebener Böden und Wände aus Blech”, *Mitteilungen der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung, Düsseldorf*, 1955.
- [105] B.-A. Behrens, S. Hübner und J.-W. Yun: “Erhöhung der Beulfestigkeit von Blechteilen durch lokale Vorverfestigung der Platinen”, *UFT science, Ausgabe I*, 2006.
- [106] N.N.: “Firmenprospekt Kraftformer KF 170 PD”, *Eckold AG Schweiz, Trimis/Schweiz*, 2008.
- [107] E. Dannemann und M. Widmann: “Fertigungsgerechte Konstruktion von Versteifungssicken in Blechteilen”, *VDI Berichte*, 1984.
- [108] M. Widmann: *Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen Halbrundsicken*, Springer-Verlag Berlin / Heidelberg / New York / Tokyo, 1984, ISBN 3-540-13172-8.
- [109] S. Krause: “Wellblechstruktur des Rumpfes und der Tragfläche bei der Junkers JU-52”, 2012, URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Wellblech>.
- [110] N.N.: “Blechdose”, 2012, URL <http://www2.vobs.at/rikki/metall/weiblech.html>.
- [111] S. Storbeck: “Citroen HY”, 2012, URL <http://de.wikipedia.org/wiki/Wellblech>.
- [112] N.N.: “30 Schuss Magazin AK-47”, 2012, URL <http://www.starshooter.de/AK47-30-Schuss-Magazin>.
- [113] M. Widmann: “Optimierte Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen Halbrundsicken”, *Blech Rohr Profil, Ausgabe Nr. 32*, 1985.
- [114] D. Schwarz: *Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas)*, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen- und Metallverarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), 2002.
- [115] C. Bilik: *Lightweight Structural Methodes for Increasing the Buckling Load and Fundamental Frequency of Thin-walled Structures*, Dissertation, Technische Universität Wien, 2011.
- [116] C. Bilik, D. H. Pahr und F. G. Rammerstorfer: “A Bead Laying Algorithm for Enhancing the Dynamic and Stability Behaviour of Thin Shell Structures”, *37th SolMech 2010 Book of Abstracts, Polish Academy of Science, Warsaw, Poland*, S. 302 – 303, 2010.

- [117] C. Bilik, D. H. Pahr und F. G. Rammerstorfer: “A Bead Laying Algorithm for Enhancing the Dynamic and Stability Behaviour of Thin Shell Structures”, *37th Solid Mechanics Conference, Warsaw, Poland*, 2010.
- [118] C. Bilik, D. H. Pahr und F. G. Rammerstorfer: “A bead laying algorithm for enhancing the stability and dynamic behavior of thin walled structures”, *Acta Mechanica, Ausgabe Nr. 223*, 2012.
- [119] G. Lausen, M. Erhardt, H. Raschke und B. Winkler: *Fahrzeugtechnik - Karosserie- und Fahrzeugtechnik*, Verlag Handwerk und Technik - Hamburg, 2005.
- [120] U. Wolfstieg und E. Macherauch: “Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen”, *Chemie-Ing.-Techn., Ausgabe Nr.11*, S. 760–770, 1973.
- [121] E. Macherauch: “Neuere Untersuchungen zur Ausbildung und Auswirkung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen”, *Zeitschrift für Werkstofftechnik, Ausgabe Nr. 10*, S. 97–111, 1979.
- [122] M. Tauschauer und B. Buchmayr: “Einflüsse auf die Umformbarkeit von Aerosolspraydosen”, *4. Sommerschule Umformtechnik, Leoben, Austria*, 2009.
- [123] N.N.: *VEW Praxis-Service - Erfolgreiche Edelstahlverarbeitung*, Böhler Gesellschaft m.b.H.
- [124] E.-G. Paland: *Technisches Taschenbuch*, INA-Schaeffler KG, 2002.
- [125] K. Hoffmann: *Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*, Hotting Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1987.
- [126] N.N.: “RESTAN - System for Measuring Residual Stress by the Hole-Drilling Method - Operating and Maintenance Manual,”, *SINT Technology srl., Italy*, 2009.
- [127] K. Forstner, G. Figala, T. Hatzenbichler und B. Buchmayr: “Analyse und Diskussion verschiedener Verfahren der Eigenspannungsmessung anhand von laserbehandelten dünnwandigen Blechen”, *29. Verformungskundliches Kolloquium, Planneralp, Austria*, 2010.
- [128] E. Roos und K. Maile: *Werkstoffkunde für Ingenieure*, Springer, 2. Aufl., 2005, ISBN 3-540-22034-8.
- [129] N.N.: “X-ray Defraction - The method of residual stress testing”, *STRESSTECH OY Finland*, 2000.

- 
- [130] S. Marsoner: “Untersuchungsbericht: Eigenspannungsanalyse an einem Blech mit 16 Messpositionen”, *Materials Center Leoben (MCL)*, 2008.
- [131] N.N.: “ARAMIS Benutzerhandbuch - ARAMIS v6.1”, *GOM mbH, Germany*, 2007.
- [132] E. Mazza: *Methoden der Strukturanalyse*, ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2008.
- [133] A. Weiß, W. Lehnert, H. Gutte und P. R. Scheller: “Verbesserung der Kaltumformbarkeit austenitischer CrNi-Stähle durch Nutzung des Trip-Effektes”, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, Ausgabe 1/2005*, S. 68–72, 2005.
- [134] B.-A. Behrens, S. Hübner, K. Voges-Schwieger und K. Weilandt: “Verformungsinduzierte Martensitevolution zur lokalen Festigkeitssteigerung”, *UFT science, Ausgabe II*, 2007.

# A Publierte Veröffentlichungen

## **Veröffentlichte Bücher:**

G. Figala: „Kombinierte Torsions- und Reibschweißanlage - Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme“, VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, Germany, 2011, ISBN 978-3-639-35023-4.

## **Veröffentlichungen in Journalen:**

C. Bilik, F.G. Rammerstorfer, G. Figala and B. Buchmayr: „Computational Modelling of Laser Treatment of Plates for Increased Buckling Loads and Natural Frequencies“, Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 225, Issue 10, SAGE, 2011.

B. Buchmayr, G. Figala and L. Wunsch: „Lokale fertigungstechnische Verstärkungskonzepte zur Erhöhung der Materialeffizienz“, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte - Ausgabe Juli 2010, Springer Verlag Wien, Vienna, Austria, 2010.

## **Veröffentlichungen bei fach einschlägigen Konferenzen:**

G. Figala, M. Taschauer, S. Wallner and B. Buchmayr: „Metallurgical and mechanical analyses of dissimilar friction weldments of ferrous and non-ferrous metals for lightweight components“, 14<sup>th</sup> ESAFORM conference, Belfast, Northern Ireland, UK, 2011.

K. Forstner, G. Figala, T. Hatzenbichler und B. Buchmayr: „Analyse und Diskussion verschiedener Verfahren der Eigenspannungsmessung anhand von laserbehandelten dünnwandigen Blechen“, 29. Verformungskundliches Kolloquium, Plannersalm, Austria, 2010.

C. Bilik, F.G. Rammerstorfer, G. Figala and B. Buchmayr: „Investigations of the stability and dynamic behaviour of plates subjected to laser treatment“, Junior Scientist Conference 2010, Vienna, Austria, 2010.

G. Figala and B. Buchmayr: „Improvement of buckling resistance of thin sheets by local laser treatment“, 13<sup>th</sup> ESAFORM conference, Brescia, Italy, 2010.

C. Bilik, F.G. Rammerstorfer, T. Daxner, G. Figala and B. Buchmayr: „Improving the dynamic and stability behaviour of plates by laser treatment“, ICCSM 2009, Dubrovnik, Croatia, 2009.

**Posterpräsentationen:**

G. Figala: „Fertigungstechnischer Leichtbau“, WerWasWo. Forschung@MUL, Leoben, Austria, 2012.

G. Figala, B. Buchmayr, C. Bilik und F.G. Rammerstorfer: „Fertigungstechnischer Leichtbau - Verbesserung der statischen und dynamischen Eigenschaften von Platten durch lokale Laserbestrahlung“, Workshop Schmiedewerkzeuge - Technologie / Entwicklungen / Analysen, Salzburg, Austria, 2011.

## B Quellcode für die experimentelle Ermittlung von Eigenfrequenzen

Die experimentelle Ermittlung der Grundfrequenz erfolgte durch das Programm MATHLAB<sup>®</sup> der Firma MathWorks<sup>®</sup> mit dem nachstehen angeführten Quellcode [91]. Die Software transformiert über die Fast Fourier Transformation (FFT) die gemessenen Zeit-/Spannungsverläufe in ein Frequenzsignal. Aus dieser Darstellung lassen sich die Eigenfrequenzen im untersuchten Frequenzbereich als Amplitudenerhöhungen, d.h. als deutliche Signalspitzen, in den jeweils ausgegebenen Diagrammen ablesen [91].

Verwendeter MATHLAB<sup>®</sup> Quellcode [91]:

```
% FFT ANALYSIS OF THE INPUT SIGNAL
%
clear all
close all
%
% Loading of the signal data from file
load 'file_name.mat'
% SETTINGS (Measurement):
Fs = 600;                % Sampling frequency
T = 1/Fs;                % Sample time
L = length(time);       % Length of signal
voltperg=0.1;           % transmission factor
%
% transforming the signal into acceleration
% signal in g
accel_g=accel/voltperg;
%
% PLOTS
% original signal in [V] {3 impacts}
figure
plot(time, accel)
xlabel('time in [s]')
```

```
ylabel('signal in [V]')
legend('accel signal in [V]')
title('Original-signal in time domain')
grid on
%
% transformed signal in [g]=[9.81m/s^2]
figure
plot(time, accel_g)
xlabel('time in [s]')
ylabel('signal in [g]')
legend('accel signal in [g]')
title('Acceleration-signal in time domain')
grid on
%
% Calculation of DISCRETE FOURIER TRANSFORMATION FFT
NFFT=2^nextpow2(L) % Next power of 2 from length of y
Y = fft(accel_g,NFFT)/L; % FFT Transformation of signal
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2);
%
% Plot single-sided amplitude spectrum.
figure
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')
grid on
%
%Calculation of the POWER SPECTRAL DENSITY with pwelch
%
%AUTOMATIC
figure
pwelch(accel_g,[],[],[],Fs,'onesided')
%
%Applying different WINDOWS - for testing purpose
%figure
%pwelch(accel_g,[256],[],[],Fs,'onesided')
```

```
%figure  
%pwelch(accel_g,[512],[[]],[[]],Fs,'onesided')  
%figure  
%pwelch(accel_g,[1024],[[]],[[]],Fs,'onesided')
```