

- Biegeknicken von Sandwichelementen
- Versuche an Sandwichfassaden zur Erdbebenbelastung
- Versuche an Leichtbauverbindungen zur Erdbebenbemessung
- Dach- und Wandbauteile mit Kern aus natürlichen Rohstoffen
- Kühlräume aus Sandwichelementen
- Architektonische Gebäudehüllen aus Metall

Architektonische Gebäudehüllen aus Metall – optimierte Formgebung doppelt gekrümmter Bauteile

Das Lehr- und Forschungsgebiet „Nachhaltigkeit im Metallleichtbau“ an der RWTH Aachen University forscht an Gebäudehüllen aus Metall und entwickelt Verfahren zur Planung und Herstellung von Systembauteilen für gestalterisch und funktional anspruchsvolle Bauwerke. Hierbei stellen insbesondere doppelt gekrümmte Fassaden und Dächer eine besondere Herausforderung an Architektur, Bauingenieurwesen, Fertigung und Bauausführung dar. In diesem Aufsatz wird die verbesserte Formgebung von doppelt gekrümmten Bauteilen aus Metall für Hochbauanwendungen vorgestellt. Diese wurde im Rahmen eines kooperativ durchgeführten Forschungsprojekts entwickelt. Dabei werden das Zusammenspiel der Umformverfahren sowie die Simulation der Formbildung und Herangehensweise zur Optimierung des Verfahrens behandelt. Einführend werden verschiedene Formungsverfahren für räumlich gekrümmte Baukomponenten betrachtet.

Stichworte Digitalisierung; gekrümmte Fassadenpaneele; Metallleichtbau; parametrisch; Umformtechnik

1 Einleitung

Mit mannigfaltigen Einsatzmöglichkeiten an Bauwerken zählen doppelt gekrümmte Metallbleche zu den gestalt- und funktionsbildenden Bestandteilen architektonisch anspruchsvoller Gebäudehüllen. Die Nachfrage der Bauwirtschaft nach gerundeten Bauteilen für Außenwände, Fassaden und Dächer ist hoch. Zu konstruktiv vielseitigen Verwendungsmöglichkeiten doppelt gekrümmter Gebäudehüllenkomponenten tragen möglichst große Formate, uneingeschränkte Lage und Form von Fügungen sowie ein breites Formenspektrum bei. Je nach Geometrie und baulichem Kontext bieten sich unterschiedliche Verfahren mit jeweils zu berücksichtigenden prozessspezifischen Eigenschaften an.

In diesem Aufsatz wird die Herangehensweise an die Optimierung eines Verfahrens zur Anfertigung von gerundeten Blechen mit Bördel-Rollformern und Kraftformern aufgezeigt. Zunächst wird von verschiedenen Umformverfahren berichtet, welche nach unterschiedlichen Kriterien untergliedert werden können. Die hier ausgewählten Beispiele beleuchten Kaltumformungsverfahren, die nach Auflage der Elemente (Individualproduktion, Serienproduktion oder massenindividualisierte Fertigung) bzw. nach Steuerungsart des Formungsprozesses (handwerkliche und analoge Verfahren, digital geführte Anlagen und CNC-Automaten oder Kombination aus analo-

Architectural building envelopes made of metal – optimized forming of double-curved components

The teaching and research unit “Sustainable Metal Building Envelopes” at RWTH Aachen University conducts research on lightweight building envelopes made of metal and develops processes for planning and manufacturing of components for bespoke designs and built structures. Double curved facades and roofs pose a particular challenge for architecture, civil engineering, fabrication and construction. In this paper, the improved shaping of double-curved metal components for building construction applications is presented, which was developed within the framework of a collaborative research project. The interaction of the forming processes as well as the simulation of shape formation and approaches to optimizing the process are discussed. In an introduction, various shaping processes for three-dimensionally curved building components are examined.

Keywords curved facade panel; digitalization; forming technology; lightweight metal construction; parametric

gen und digitalen Methoden) unterschieden werden. Weitere Selektionsgründe für ein Verfahren können das Material, die maximale Gaußsche Krümmung, die Gesamtabmessungen und die erforderliche Genauigkeit sein.

2 Auswahl anwendungsbezogener Umformverfahren

2.1 Individuelle Kunstgestaltung eines Stahlbildhauers mit Luft- und Wasserdruck

Stahlbildhauer Thomas Kühnapfel wendet eine einzigartige Technik zur Umformung von Metall an, bei der er durchweg Unikate erzeugt. In seiner Symbiose aus Kunst und Handwerk werden Skulpturen durch hohen Luft- bzw. Wasserdruck geformt. Bestimmt wird die Formgebung durch Blechzuschnitte und die Lage der Schweißnähte sowie durch die Anordnung und Volumina der wie Kissen wirkenden Bestandteile. Die Druckzufuhr – und hierdurch die resultierende Gestalt – steuert der Künstler mit seinem analogen Mischpult. Dieses besteht aus mehreren Absperrhähnen, wovon mehrere Schläuche an eingeschweißte Füllstützen führen. Im Kontrast zu geläufigen bildhauerischen Methoden, wie z. B. dem Herausarbeiten eines Werks aus massivem Rohmaterial (Abspitzen, Schlagen, Zerspanen) oder dem Umformen in weichen Aggregatzuständen (Schmelzen, Schmieden,

Kneten), nutzt Kühnapfel den eigenen Widerstand des Materials durch einen raffinierten Ansatz zur Formbildung. Die Entstehung seiner Skulpturen ist ein Vorgang, bei dem der Gestalter Luftdruck bzw. Wasserdruck mit viel Erfahrung dosiert. Dabei ist nicht nur das fertiggestellte Kunstwerk ein besonderes Highlight, sondern auch die Phase der allmählichen Inflation, während der Luftdruck die ursprünglich planen Bleche unter immenser Kraft wölbt und biegt. Das Spannungsfeld zwischen Materie und Kraft bildet gleichzeitig eine materiell glaubhafte Gestalt und wirkt als öffentliches Event. Bild 1 zeigt die in 1 mm dünnem, mattem Stahl ausgeführte Installati-

on bzw. Aufführung „Big in Japan II“ in Dresden im Jahr 2014.

Die Hüllkörper der im Jahr 2017 kreierte Wesen „Big Animal“, welche im Skulpturenpark Waldfrieden ausgestellt sind (Bild 2), bestehen aus spiegelndem Edelstahl in 3 mm Stärke. Das Wechselspiel aus Reflexionen an seiner Oberfläche mit den markanten Nähten am Rand der glänzend polierten Flächen bildet für den Betrachter eine ausgewogene Mischung aus Ruhepol und optischer Bündelung immenser Energie. Zur Ausformung dieser Skulptur wurden durch den Künstler bis zu 160 bar Wasserdruck eingesetzt [1].



Bild 1 Skulptur: Big in Japan II (Quelle: Thomas Kühnapfel)
Sculpture: Big in Japan II



Bild 2 Skulptur: Big Animal, Bildhauer: Thomas Kühnapfel
(Foto: Christoph Buckstegen)
Sculpture: Big Animal, artist: Thomas Kühnapfel

2.2 Serienfertigung mit Wiederholgenauigkeit durch Stempel-Matrize-Werkzeuge in hydraulischen Pressen und konventionelle Tiefziehmethoden

Für die Formung von Metallfassadenplatten mit doppelter Krümmung in Serienfertigung bei hoher Auflage mit hoher Wiederholgenauigkeit bietet sich der Einsatz mechanischer Form- und Tiefziehmethoden an. Eine gute Oberflächenbeschaffenheit, vergleichbar mit Automobilkarosserieteilen, ist mit entsprechender Erfahrung in der Vorproduktion passender Stempel und Matrizen machbar. In Architekturprojekten sind derartige Bauteile nur in entsprechend großer Stückzahl wirtschaftlich rentabel. Hydraulische Umformpressen (Bild 3a) können Bleche mit Stärken zwischen 0,5 mm und 10,0 mm von bis zu 5,0 m × 2,5 m Flächeninhalt repetitiv unter hohem Druck (über 1000 t) von flachen in dreidimensionale, räumlich geformte Metallplatten umwandeln.

Es ist vorteilhaft, bereits in der Entwurfsphase die Rationalisierung der Paneelgeometrie und Eigenschaften wie Material, Blechstärke, Formate und Krümmungsmaß in den Planungsprozess einzubetten. Ein architektonisches Anwendungsbeispiel ist das Projekt L'Atoll in Angers, Frankreich, entworfen von Antonio Virga Architecte in Zusammenarbeit mit AAVP (Bild 3c). Hierbei entstanden die doppelt gekrümmten Fassadenelemente durch hydraulische Pressung und anschließenden 3D-Laserkonturschnitt (Bild 3b) [2–4].



a)



b)



c)

Bild 3 a) Hydraulische Presse mit schweren Patriz- und Matrize-Werkzeugen (Foto: Whiston Industries Ltd.), b) Fassadenpaneel, hergestellt mit hydraulischer Presse (Foto: Formtexx Ltd.), c) L'Atoll; Antonio Virga Architecte in Zusammenarbeit mit AAVP (Foto: Luc Boegly)
a) Hydraulic press with heavy male and female tools, b) facade panel made with hydraulic press, c) L'Atoll; Antonio Virga Architecte in collaboration with AAVP

2.3 Hydroforming, Fluid-Cell-Forming für serielle Fertigung

Das grundlegende Wirkmedium der Umformung innerhalb einer Fluidzellenpresse ist eine hydraulische, druckresistente Flüssigkeit. Im Gegensatz zu Pressen, die mit zwei starren Werkzeugteilen arbeiten, benötigt eine Fluidzellenpresse lediglich eine untere Matrize. Als Matrize nutzt sie eine gummibasierte, elastische Membran. Wesentliche Bestandteile einer Fluidzellenpresse bilden das hydraulische System, welches den hohen Druck aufbaut, sowie die Matrize, welche die Form des Werkstücks definiert. Auf der Matrize wird das umzuformende Blech positioniert. Matrize und Blech werden anschließend in die Presse gefahren und dicht verschlossen. Die Hydraulikanlage erzeugt einen hohen Druck. Dieser wird über die flexible Membran auf das darunter befindliche Blech geleitet, welches in das formgebende Halbwerkzeug gepresst wird. Gegenüber Verfahren mit mehrteiligen Werkzeugen wird weniger Material benötigt. Das Anschmiegen der Membran beansprucht die Oberfläche des Blechbauteils kaum. Aufgrund der hohen Steifigkeit, resultierend aus der räumlichen Umformung, und der hohen Präzision etablierte sich diese Technologie ebenfalls zunächst im Fahrzeugbau. Hierdurch lassen sich kachelbare Muster in großen Fassadenelementen bis zu $4\text{ m} \times 2\text{ m}$ herstellen.

Das Studio Olafur Eliasson zeigt in der „Atmospheric wave wall“, welche im Jahr 2020 am Willis Tower in Chicago installiert wurde (Bild 4), eine besondere Verschmelzung von Funktionalität und Kreativität. Die Kunstinstallation ist aus pulverbeschichtetem Stahl, Edelstahl und Aluminium hergestellt, deren Halberzeugnisse in Fluid-Forming-Technologie geformt wurden. Der Künstler vermied hierbei durch die Segmentierung der Kugelkalotten in einem durch Penrose-Parkettierung inspirierten Projektionsmuster einen repetitiven Charakter. Durch aperiodische Kachelung, Unterteilung und abgestimmte Kolorierung entsteht ein sowohl gleichmäßig als auch zufällig anmutendes Werk, dessen Erscheinung erst



Bild 4 Olafur Eliasson, Atmospheric wave wall, 2020, Installationsansicht: Willis Tower, Chicago (Foto: Darris Lee Harris), im Auftrag von EQ Office (Quelle: Olafur Eliasson, 2020)
Olafur Eliasson, Atmospheric wave wall, 2020

recht durch den Kontext des ikonischen Hochhauses, die Bewegung von Passanten, den sich ändernden Blickwinkel des Betrachters und einfallendes Licht zu voller Geltung kommt [5].

2.4 Individuelle Kaltumformung mitteldicker Stahlbleche mit Schiffsbau-Portalpressen und Rollenstreckmaschinen

Im traditionsreichen Schiffsbau kommen Begriffe wie Straklatte vor, die sprachlich nur leicht angepasst noch heute im Modell- und Formenbau Verwendung finden. Technische und handwerkliche Methoden, mit denen seit Langem Schiffsrumpfe aus Stahl hergestellt werden, in den Hochbau zu transferieren, wurde zur Spezialisierung eines niederländischen Werftablegers, der elementierte Gebäudehüllen für Sonderbauten produziert. Durch Einsatz schwerer Schiffsbaupressen und Streckrollen (Walze und Formrolle) in großen Portalen lassen sich Stahlplatten zu Hüllflächen in Blechstärken von 6mm bis 80mm völlig individualisiert formen (Bild 5).

Um den gehobenen Anforderungen architektonischer Vorhaben an Oberflächenoptik gerecht zu werden bzw. um die verfahrensüblichen Artefakte schwerer Pressen und Walzen zu minimieren, wird weniger Druck eingesetzt und kleinere Umformungsstufen gewählt.

Zum typischen Arbeitsablauf gehören:

- Segmentieren der Fassade in große Elemente und Erzeugung von Längs- und Querschablonen im 3D-CAD
- Bestimmen der Plattengröße durch Flattening, einen der Abwicklung ähnlichen Algorithmus, welcher die angenäherte Streckung berücksichtigt
- Plattenzuschnitt einschließlich Schweißvorbereitung als abgeschrägte Kontur
- Bestimmung einer Strategie zur Formung (Werkzeugwahl, Reihenfolge, Druck usw.) nach vorwiegender Geometrie der zu erstellenden Fläche, wie z. B. antiklastische Oberfläche (Sattel), synklastische Schale (Kuppel) oder Regelschraubfläche (gedrehte Fläche)



Bild 5 Inkrementelle Umformung großer Stahlplatten in Schiffsbau-Portal-Pressen (Foto: CIG Architecture)
Incremental forming of large steel plates in shipbuilding gantry press

- Formung durch Biegung und Streckung bei schrittweisem Abgleich anhand von Kontrollschablonen und Streckungswertetabellen

Hervorgegangen aus dem Schiffsbau spezialisiert sich CIG Architecture auf das Kaltumformen mitteldicker Stahlbleche in großen Abmessungen für formenvielfältige Architektur.

2.5 Streckziehen und inkrementelle Blechumformung in Kombination mit sukzessiv anpassbarem Unterwerkzeug durch Fräsen

Das Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen University hat eine Prozesskette basierend auf den Umformtechnologien Streckziehen und inkrementelle Blechumformung (IBU) zur Kaltumformung doppelt gekrümmter Bauteile entwickelt. Prinzipiell wird zunächst in einem mehrachsigen Maschinenportal aus einem geleimten Holzblock eine Patrizie (Unterwerkzeug) gefräst. Ein Blech wird eingespannt und die globale Geometrie durch Strecken des Blechs über das Unterwerkzeug vorgeformt (Bild 6a). Nach Werkzeugwechsel erfolgt die Ausformung der nicht streckziehbaren Bereiche, indem ein hochfester Stab mit abgerun-

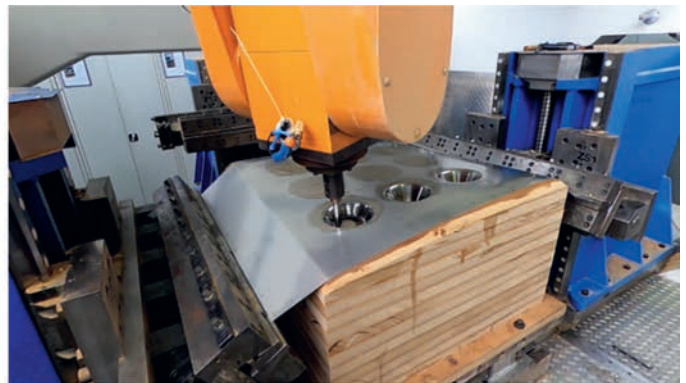
detem Umformkopf inkrementell Konturlinien formbildend entlangfährt (Bild 6b). Vorteilhaft ist, dass die Verfahrenskombination insgesamt eine geringe Werkzeugbindung aufweist sowie die Fräsung des Unterwerkzeugs im gleichen Koordinatensystem wie die Umformung stattfinden kann. Ein anschließendes Umfräsen der Holzpatrizie ermöglicht die Weiternutzung für folgende Bauteilgeometrien, wodurch Zeit und Ressource eingespart werden können. Die Verfahrenskombination zusammen mit digitalen Planungsmethoden eignet sich besonders für die Produktion von individuellen Bauteilen in geringer Stückzahl sowie von Einzelstücken. Bild 7 zeigt den Airfoil Pavilion, einen vom Lehrstuhl für Tragkonstruktionen der RWTH Aachen entworfenen und statisch nachgewiesenen freitragenden Demonstrator, dessen Fertigung aus Feinblech das Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen mit der Forschungsanlage realisierte [6–9].

2.6 Industrielles, dateigesteuertes Rollformen von Profilen mit variablen Querschnitten

Großflächige Gebäudehüllen in moderater Krümmung können durch Teilung der Außenflächen in konvex und konkav geformte Streifen abgebildet werden. Hierbei

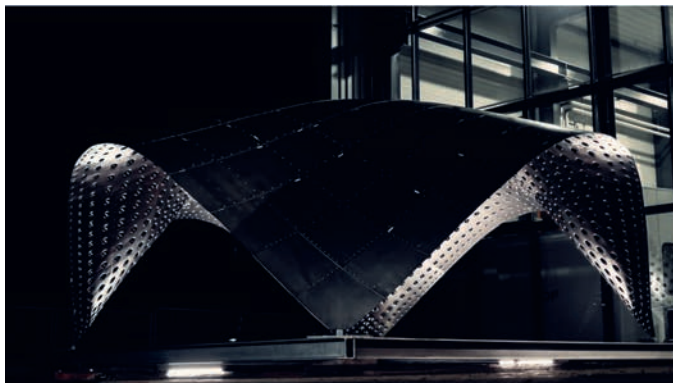


a)

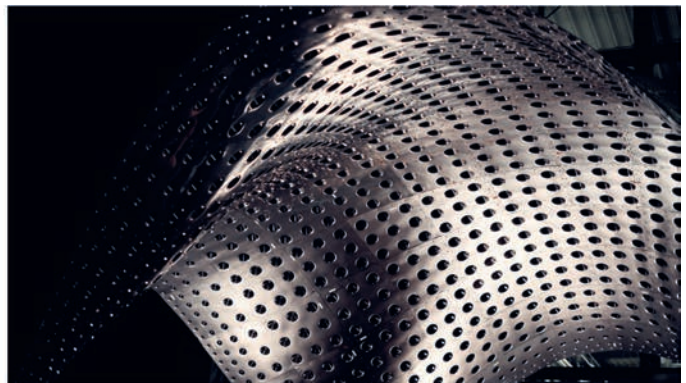


b)

Bild 6 a, b) Fertigungsanlage des IBF (Foto: Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen University)
a, b) IBF production facility



a)



b)

Bild 7 a, b) Airfoil Pavilion, Entwurf/Statik: Lehrstuhl für Tragkonstruktionen der RWTH Aachen, Fertigung: Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen (Foto: Lotte von Nessen)
a, b) Airfoil Pavilion, design/statics: Chair of Structures and Structural Design at RWTH Aachen, production: Institute of Metal Forming at RWTH Aachen University

sind die Fügungslinien deckungsgleich zur doppelt gekrümmten Fläche, während die eigentlichen Blechstreifen eine abwickelbare Annäherung ebendieser repräsentieren. Für Fassaden und Dächer lässt sich dies mittels Rollformtechnologie für variable Querschnitte und einer Abfolge mehrschichtig gesteuerter Rollensätze, wie bereits in *Stahlbau* 81 (2012), H. 12 [10] berichtet, realisieren.

2.7 Handwerkliches Rollformen mit Bördelmaschinen

Mit elektrisch motorisierten Sicken- und Bördelmaschinen lassen sich handwerklich Blechumformungen durch Umbiegen eines Rands erzielen. Diese Blechbearbeitungsmaschinen sind universell mit Standard-Rollensätzen, wie bspw. Kastensickenwalzen, einsetzbar und entfalten erst mit prozessspezifisch angefertigten Rollensätzen ihr volles Potenzial. Für nicht linear zugeschnittene Blechkonturen dient eine Anschlagplatte zur Führung des Metallblechs zwischen oberer und unterer Walze innerhalb der Maschine, sodass die Biegelinie des Flanschs bzw. Falzes als Parallelkurve zur Materialkante entstehen kann.

2.8 Kraftumformung von Blechen und Profilen

Eine Universalmaschine zur spanlosen Kaltformung von handgesteuerten Blechen oder Profilen [11] ist der sog. Kraftformer (Bild 8). Durch ein breites Spektrum an Umformwerkzeugen für Stauchen, Strecken, Glätten, Wölben, Spannen, Schweißen und Richten lassen sich graduierlich verändernde Formen individuell anfertigen. Für makellose Oberflächen ist ein feines Gespür des Maschinenführers für Material und Maschineneinstellungen wie Hubanzahl und -geschwindigkeit essenziell.



Bild 8 Historischer Kraftformer Eckold KF 400 von 1950 (Foto: Eckold GmbH & Co. KG)
Historical Kraftformer Eckold KF 400 from 1950

3 Optimierte Kombination aus Kraftumformung und Rollformung zur Anfertigung gerundeter Metallbauteile für Gebäudehüllen

3.1 Werkzeuge und traditionelle Herangehensweise

Die Herstellung von gerundeten Fenster- und Simsblechen, Mauer- oder Attikaabdeckungen und ähnlich gerundeten Metallprofilen für den Dach- und Fassadenbau erfolgt traditionell in Handwerksarbeit. Basierend auf reichhaltiger Erfahrung ließen sich bereits vor Durchführung des ZIM-Projekts „Entwicklung eines Verfahrens für das zwei- und dreidimensionale Umformen von runden Metallprofilen“ [12], welches das Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metallleichtbau der RWTH Aachen University in Zusammenarbeit mit der Krehle GmbH bearbeitete, runde Profile anfertigen. Eingesetzt wurden seitens des Industriepartners branchentypische Standardwerkzeuge für Spengler und Metallverarbeitende, sodass gerundete Blechprofile mit einer Ansichtshöhe bis 40 mm (Flanscbreite) in 1,5 mm dünnem Aluminium angefertigt werden konnten [13]. Die Zusammenarbeit entstand aufgrund der Nachfrage für größere Ansichtshöhen an gerundeten Profilen in dickeren Blechstärken in Verbindung mit dem Schwerpunkt des Fachbereichs mit dem Ziel der Optimierung bzw. Entwicklung eines Umformverfahrens für individuelle runde Profilbleche.

Für die Optimierung der stempel- und matrizenlosen Fertigung runder Profile sind die zwei wichtigsten Kaltumformungswerkzeuge die Rollformmaschine, wie in Abschn. 2.7 genannt, und moderne Kraftformer (Bild 9), wie in Abschn. 2.8 beschrieben.

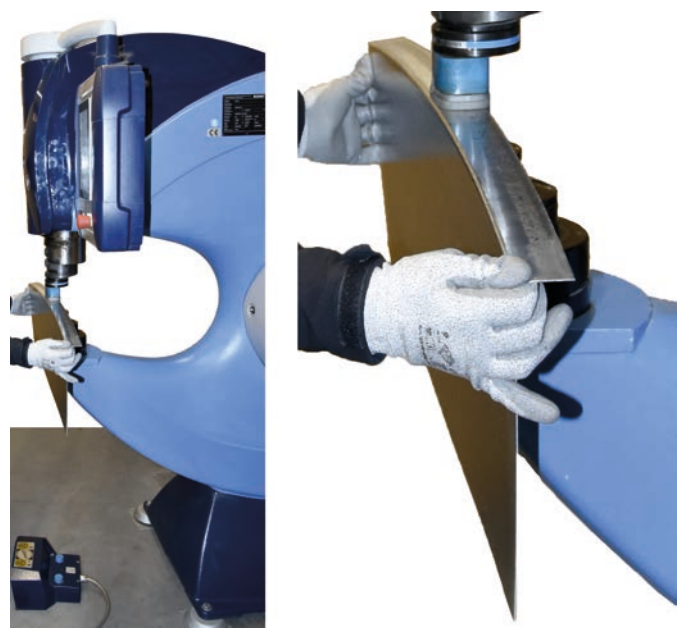


Bild 9 Kraftformer Eckold KF 675 Magnum (Foto: Krehle GmbH)
Kraftformer Eckold KF 675 Magnum

3.2 Digitale Erfassung der Prozesskette

Da Universalwerkzeuge wie Rollformer und Kraftformer in unzähliger Kombination eingesetzt werden können, handelt es sich nicht um eine lineare Optimierung. Zunächst erfolgte die digitale Erfassung der Prozesskette. Durch Fotogrammetrie wurde die bislang nicht niedergeschriebene Handwerkserfahrung an Referenzblechen vor der Verfahrensverbesserung aufgezeichnet. Um Toleranz an maschinell-handwerklichen Prozessen zu kompensieren, wurden Blechversuche und zugehörige Messungen fünffach durchgeführt und Durchschnittswerte nach Bereinigung von Ausreißern gebildet. Jede Blechprobe wurde ringsum mit hohem Bildüberlappungsanteil fotografiert (Bild 10), sodass ein Bilderdatensatz entstand, der innerhalb spezieller Fotogrammetrie-Software über das Prinzip der Triangulation zu einer räumlichen Abbildung des Werkstücks verarbeitet wurde. Für eine differenzierte Betrachtung materieller Veränderungen nach jedem Bearbeitungsvorgang wurde nach jeder Stufe der Umformung das Blech neu vermessen. Die sukzessive Aufnahme aller Formungsstufen bildet die Datengrundlage einer vollständigen Dokumentation der Materialbewegungen von der Rohplatte bis zur abgeschlossenen Formbildung (Bild 11).

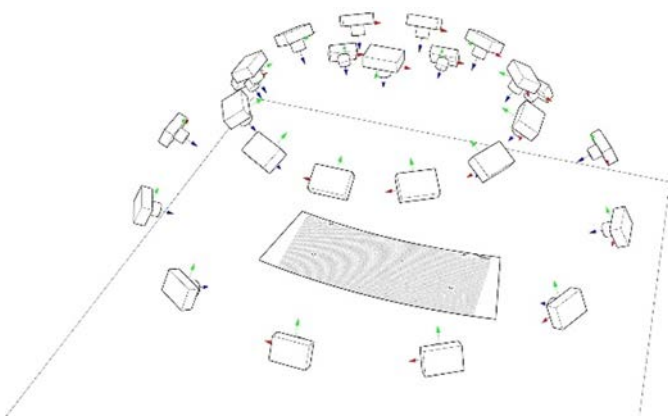


Bild 10 Kamerapositionen um Blechplatte zur fotogrammetrischen Erfassung
Camera positions around sheet metal plate for photogrammetric capturing

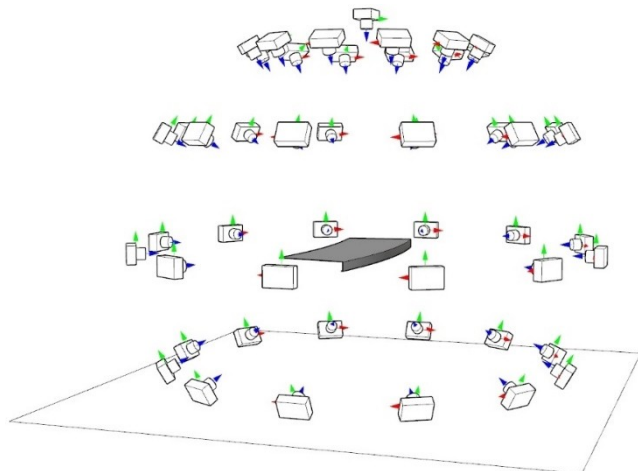


Bild 11 Positionen zur Aufnahme der letzten Formungsstufen
Positions to record the final stages of forming

Die Analyse der Materialverschiebung in jeder einzelnen Formungsstufe wird anhand auf der Blechprobe aufgetragener Muster unterstützt. Zu einer großen Herausforderung in diesem Projekt wurden die hohen Reibungskräfte der Formungswerkzeuge, welche die applizierten Raster beschädigten. In einem Vorversuch wurden Ätzung, Lasergravur, Bedruckung in verschiedenen Maßstäben und Anordnungen erprobt, bevor ein Punktraster in mattschwarzer Siebdruckfarbe mit Epoxidharzhärter gewählt wurde. Bild 12 zeigt die bereits offensichtliche Materialstreckung entlang der Biegekurve, erkennbar durch die Verzerrung der Punkte des triangulierten Musters. Zum einen sind die ursprünglich kreisförmigen Farbpunkte zu räumlich gebogenen elliptischen Formen auf der Blechoberfläche verzogen und zum anderen liegen die Mittelpunkte in den verformten Bereichen in anderen Abständen als im Ausgangszustand. Für das menschliche Auge nicht ohne Weiteres erkennbar ist die geringfügige, jedoch prozessrelevante Stauchung im unteren Bereich der Detailaufnahme, die erst durch Messung der Punktabstände auswertbar wird. Historisch wurden mit deutlich größeren auf das Metall geätzten Kreisen vergleichbare Messungen mit einem Schablonenlineal analog unter dem Kompromiss einer deutlich geringeren Informationsdichte ausgewertet [14]. Das Referenzblech wurde mit einem industriellen Metrologie-Softwarepaket [15] ausgewertet, welches die Materialcharakteristika berücksichtigt.

Um zu gewährleisten, dass die in Versuchen ermittelten Werte der technischen Dehnung und technischen Stauchung mit dem Verhalten einer Simulation korrelieren, erfolgte eine Auswertung der RWTH Aachen in derselben Entwicklungsumgebung, in welcher die nachfolgende Simulation programmiert wurde (McNeel Grasshopper und C#). Bild 13 zeigt anhand eines der Referenzbleche den metrologisch bestimmten Abstand zur Grenzformänderungskurve (FLC Forming Limit Curve), womit die Plausibilitätsprüfung der Simulation unterstützt wurde.

Nach Belichtung der Rohaufnahmen erfolgt die Rekonstruktion des Punktrasters. Hierbei werden zunächst in

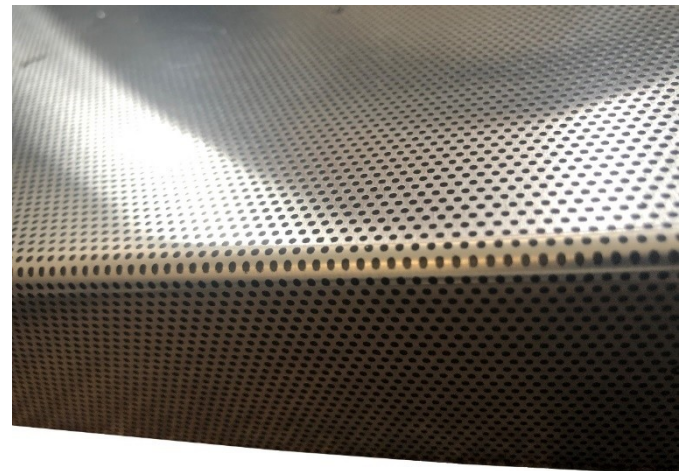


Bild 12 Materialstreckung, Detail-Fotoaufnahme
Material stretching, detailed photo shot

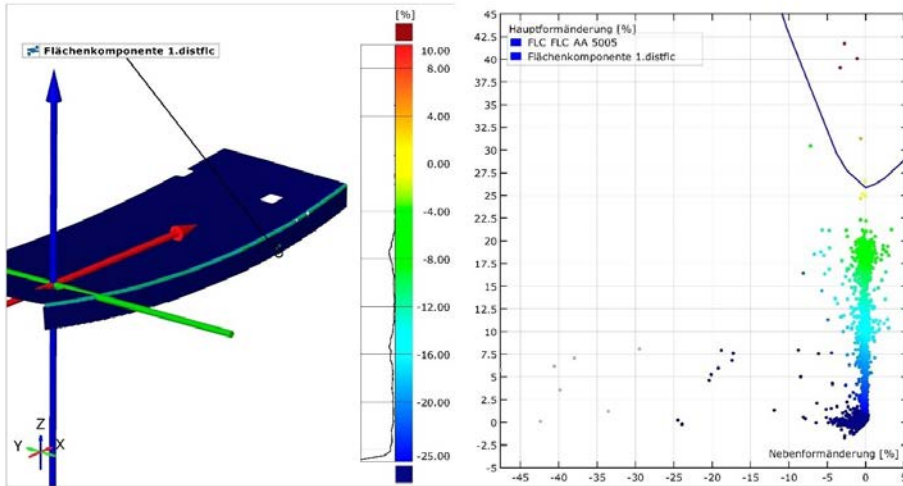


Bild 13 Abstand zur Grenzformänderungskurve – Umformungsstufe 6
Distance to the forming limit curve – forming stage 6

Stapelverarbeitung die Farbbilder in Graustufenbilder konvertiert. Bei ausreichend guter Qualität der Farbpunkte nach Umformen des Blechs lassen sich aus dem Farbgradienten die Konturen der Kreise und Ellipsen identifizieren und die Ellipsenmitten berechnen. Bild 14 veranschaulicht das Prinzip der Ellipsenrekonstruktion. Aus dem Kontrastbild der Punkte wurde die Kontur der Ellipsen gesucht, indem aus mehreren Punktproben entlang des Kontrastübergangs eine geschlossene Figur gesucht wurde, welche innerhalb einer Toleranz als Ellipse (oder Kreis) kategorisiert werden kann. An dem durch mechanische Umformung des Blechs veränderten Punktraster lassen sich Dehnung bzw. Stauchung in Relation zur Transformation von Kreis zu Ellipse bringen. In der Automobilindustrie werden bereits seit über 50 Jahren mit geätzten Kreismustern Blechverformungen betrachtet [16,17]. In diesem Projekt wird dieses Prinzip auf Bleche aus dem Bauwesen angewendet, welche ausschließlich mit Rollformern und Krafftformern bearbeitet wer-

den, wodurch die Musterbeanspruchung erheblich abweicht und die Modellierung und Analyse mit digitalen Werkzeugen stattfindet. Bild 14 zeigt einen Skriptauschnitt zur Ellipsenrekonstruktion mit Kennzeichnung der Ellipsen (blau) sowie die Hauptachse (rot) und Nebenachse (grün).

In Bild 15 wird veranschaulicht, wie aus den Mittelpunkten der Ellipsen und Kreise das topografische Netz berechnet bzw. durch Dreiecksvermaschung ermittelt werden kann, welches ursprünglich als Raster auf die Platine gedruckt wurde.

Da die Blechproben für die einzelnen Umformungsstufen bewegt werden und überhaupt in jeder Stufe eine andere geometrische Form aufweisen, ist es notwendig, die Analysen der einzelnen Bearbeitungsschritte in Zusammenhang zu bringen. Hierfür sind die deutlich größeren radialen Markierungen auf den rechteckig freigestellten Bereichen sowie die kleinen Startpunktsymbole der Metrologie-Software vorgesehen. Die Ausrichtung von Messergebnismodellen zu Simulationsmodellen aller erfassten Stufen der Formgebung ist über die Methode der kleinsten Quadrate der korrespondierenden Punktmittlenabstände möglich. Zur Eliminierung von Imperfektionen des handwerklich ausgeführten Siebdrucks (Dot-Gain, Verschiebung des Films, minimale Streckung des Films) wird die unverformte, bedruckte Platine (sog. Stu-

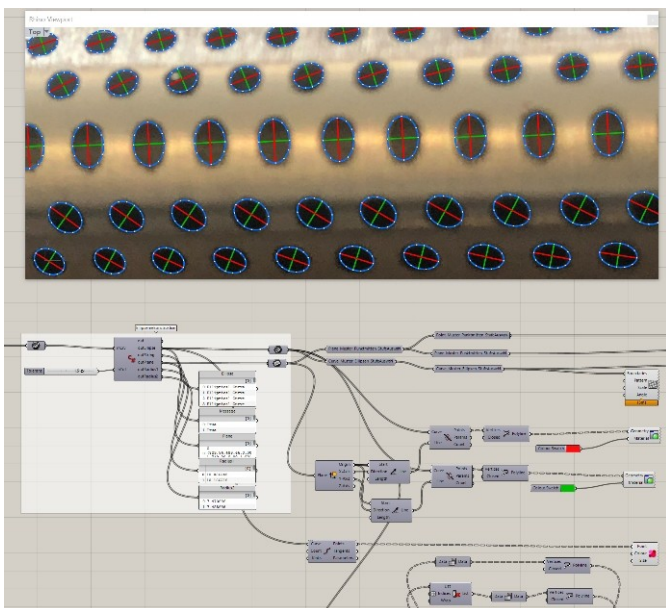


Bild 14 Skript (Auszug) zur Ellipsenfindung
Script (excerpt) for finding ellipses

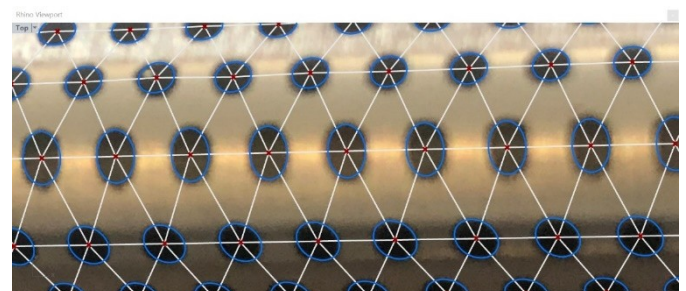


Bild 15 Erzeugung des Gitternetzes aus rekonstruierten Mittelpunkten
Generation of a mesh from reconstructed center points

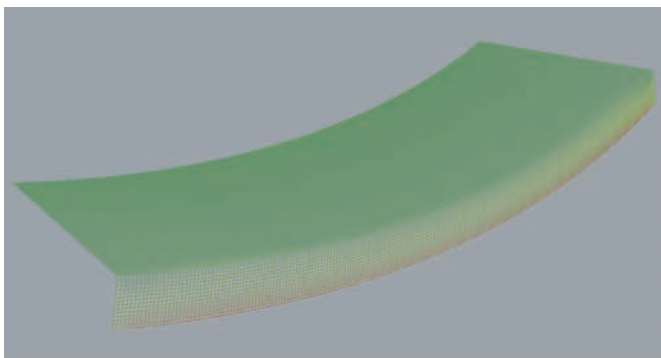
fe 0) ebenfalls erfasst und mit dem digitalen Rasterbild abgeglichen. Die relative Längendifferenz der Gitternetz-kanten entspricht der Materialverschiebung auf der Oberfläche.

3.3 Parametrische Simulation der Formungsstufen, Optimierung der Arbeitsschritte und Werkzeugköpfe zur Erweiterung des Formenspektrums

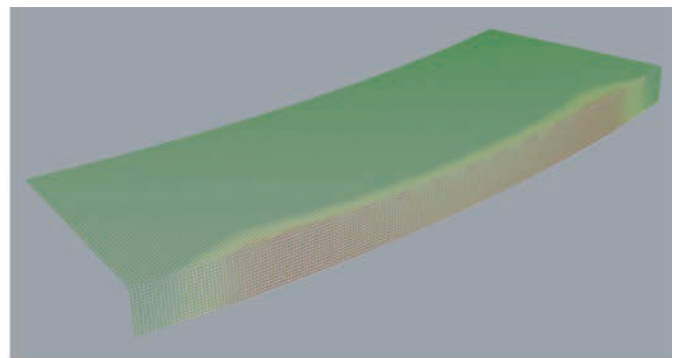
Zur Simulation der Bearbeitungsvorgänge Material-zuschnitt, Umformung durch Rollformer und Kraftformer wurde ein umfassendes parametrisches Modell entwickelt. Die zu erzielende geometrische Form ist Grundlage dieser Implementation, definiert als Verbund einzeln steuerbarer Variablen (z.B. Radien, Längen, Höhen, Breiten, Materialstärken, Rollformradien). Neben einer

Vorschau der geometrisch auszubildenden Form berechnete das Skript v. a. wesentliche Eigenschaften wie variable Untergliederung in Stufen der Umformung, Generierung eines FE-Gitternetzes mit Kolorierung zur Veranschaulichung der Stauchung und Streckung.

Bild 16 zeigt das eingefärbte Finite-Elemente-Netz zur Analyse der Stauchung nach Rollformung (Bild 16a) bzw. nach Einsatz des Kraftformers (Bild 16b). Die stufenweise gewalzte Umformung entlang der Biegekurve führt zunächst zu einer Überbiegung des Bauteils durch das überschüssige Material im Flansch. Die erforderliche Stauchung im Dünnsblech (rote Bereiche) nimmt mit zunehmendem Abstand von der Leitkurve zu, wird mittels Kraftformer in das Werkstück eingebracht und führt zu einer planen Oberfläche. Zu jeder Formungsstufe lassen sich am generierten 3D-Simulationsmodell die Werte der



a)



b)

Bild 16 Analyse der Stauchung im FE-Gitternetz: a) nach Rollformung, b) nach Kraftformung
Analysis of compression in the FE grid: a) after roll forming, b) after Kraftforming

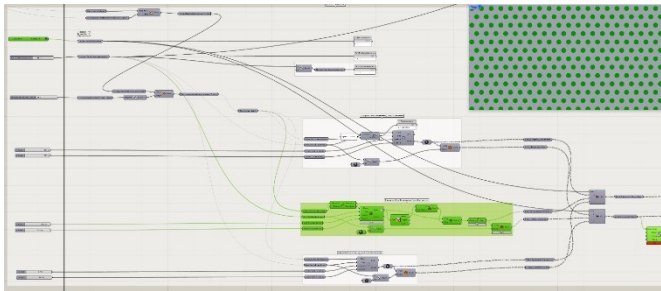


Bild 17 Applizierung des triangulierten Punktrasters auf das Simulationsmodell im parametrischen Skript
Application of the triangulated point grid to the simulation model within the parametric script

technischen Stauchung bzw. Dehnung direkt ablesen. Das triangulierte Punktraster auf den Referenzblechen wurde in der Simulation für jede Stufe der Formbildung mitgeführt (Bild 17), um einen durchgängigen Bezug zum quadrilateralen Gitternetz (Bild 16) herzustellen.

Die Umformungsstufen des Richtens werden in den Bildern 18a–18c visualisiert. Derivat der Simulation ist ein genaues 3D-CAD-Modell zu jedem Arbeitsschritt, welches sich als Volumenkörper exportieren lässt. Die vollständige Parametrisierung eröffnete die Möglichkeit, materiallos eine Vielzahl an geometrischen Abmessungen



a)

b)

c)

Bild 18 Simulation der Umformungsstufen des Richtens (Auszug): a) Anfang, b) Mitte und c) Ende der Simulation des Stauchens
Simulation of the forming stages of straightening (excerpt): a) beginning, b) middle and c) end of the simulation of shrinking procedure

und Kombinationen bzw. Anzahl von Umformungsschritten virtuell zu erproben (sowohl numerisch als auch visuell). Aus iterativ berechneten Modellen ließen sich Vorauswahlen treffen, welche anhand praktischer Versuche des Industriepartners validiert wurden.

Vergleichbar mit einem Flower-Pattern-Diagramm verdeutlicht Bild 19 räumlich die inkrementelle Umformung (vorwiegend die Stufen der Rollformung). Im Zuge der Optimierung wurden u. a. die Anzahl und Winkelsprünge der Rollformarbeitsgänge angepasst bzw. die Stufen der Formung definiert.

Der Dialog beider Projektpartner, Beobachtungen aus Versuchsreihen, Auswertung von Messungen und Simulationsergebnisse führten in enger Zusammenarbeit zur Konzeption, Entwicklung und Anfertigung spezialisierter Rollensätze und Formungswerkzeuge für den künftigen Einsatz durch die Firma Krehle. Durch Werkzeuge nach Sondermaß, wie in Form und Material veränderte Walzenpaare für Rollformer, sowie durch besonders ausgeformte Stolleneinsätze für Kraftformer (beide ohne Abbildung) wurden die krümmungsrelevanten Abmessungen der gerundeten Profile noch weiter verbessert.

3.4 Projektergebnis und Anwendung der neuen gerundeten Profile in der Fassadenbauausführung

Durch das verbesserte Verfahren lassen sich gerundete Profile mit deutlich größerem gerundetem Flansch für vielfältige Anwendungen in der Architektur anfertigen. Bild 20 zeigt die digitale Vorschau auf das tatsächlich hergestellte Bauteil (Bild 21) und stellt mit einer Verdopplung der Ansichtshöhe das gemeinsame Ergebnis der Forschungseinrichtung und des anwendungsspezialisierten Projektpartners dar.

Nicht lange nachdem das Forschungsprojekt erfolgreich abgeschlossen wurde, erhielt der Industriepartner (Krehle GmbH) einen Auftrag zur Anfertigung von Fassadenelementen für ein Bauvorhaben in der Schweiz. Bild 22 zeigt ein Bauteilmuster, welches mit der neuen Fertigungsmethode hergestellt wurde.

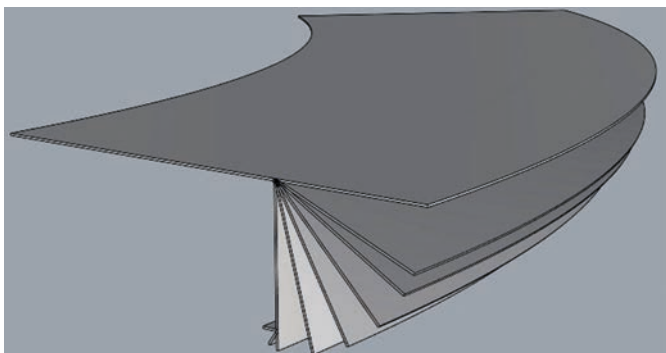


Bild 19 Überlagerte Visualisierung inkrementeller Umformungsstufen
Superimposed visualization of incremental forming stages

An diesem Bauvorhaben, entworfen von Axxess Architekten aus Zug [18], werden ca. 1600 Attika-, Simsbleche und Brüstungsverkleidungen eingebaut, welche in unterschiedlichen Abmessungen – insbesondere mit variierenden Radien – massenhaft individualisiert produziert werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch eine Kombination aus Verbesserung der Nutzung bestehender Werkzeuge, geringfügiger geometrischer Veränderung der Werkstückverrundung, intensiver Auseinandersetzung mit den Vorgängen des stufenweisen Rollprofilierens sowie der inkrementellen Kraftformung,



Bild 20 Simulation eines neuen gerundeten Profils mit 80 mm hohem Flansch (Visualisierung: RWTH Aachen University)
Simulation of a new rounded profile with 80 mm high flange



Bild 21 Fertigungsergebnis eines neuen gerundeten Profils mit 80 mm hohem Flansch (Foto: Krehle GmbH)
Production result of a new rounded profile with an 80 mm high flange



Bild 22 Gerundetes Fassadenprofil in 2-mm-Aluminium mit 75 mm hohem Flansch (Foto: Krehle GmbH)
Rounded facade profile in 2 mm aluminum with 75 mm high flange

deren Optimierung und der Entwicklung von Werkzeug-Endeffektoren konnte eine Steigerung der herstellbaren Dimensionen der runden Bleche erzielt werden. Das Entwicklungsprojekt zur verbesserten Formung runder Bleche mitsamt anschließender Ausführung an Bauwerken steht exemplarisch dafür, dass tradierte Fertigungsmethoden durch Kooperation von Forschung und Praxis anwendungsnah optimiert werden können.

In der Formbildung sowie in der Planung großformatiger, gebogener Fassadenmodule aus dünnen und mittleren Blechstärken besteht weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere bei der Integration von Tragstrukturen in Freiformelemente, die als Außenwand, Fassadenbekleidung oder Dachkonstruktionen gebaut werden. Zu mehreren der berichteten Herstellungsverfahren sind wesentliche Anteile des Wissens als Erfahrungswerte gesammelt, aber nicht ausreichend dokumentiert, um Prozess- oder Planungsautomation abzuleiten. Hier stellt sich die Frage zu weiterer Forschung, inwiefern durch betriebsbegleitende digitale Dokumentation nutzbare Datensätze zur Machbarkeitsanalyse solcher Prozesse, denen eine Viel-

zahl an Parametern zugrunde liegt, erzeugt werden können. Eine denkbare Zielstellung wäre, dass Rahmenbedingungen von Produktion und Material erfasst und so formuliert werden, dass diese in Bauwerkplanungsprozesse eingebettet werden können, damit Vor- und Entwurfsplanung einfacher intuitiv mit Konstruktionskriterien gestaltet werden kann, um weniger nachgelagerte Rationalisierung in Ausführungs- und Werkplanung zu benötigen.

Dank

Die in Abschn. 3 dieses Beitrags vorgestellten Untersuchungen sind Ergebnisse des Forschungsprojekts „Entwicklung eines Verfahrens für das zwei- und dreidimensionale Umformen von runden Metallprofilen“. Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) gefördert. Dafür bedankt sich die Forschungseinrichtung ausdrücklich.

Literatur

- [1] Kühnapfel, T. [Hrsg.] *Thomas Kühnapfel Art* [online]. Rees: Thomas Kühnapfel. <http://kuehnapfelart.com> [Zugriff am: 6. September 2023]
- [2] Whiston Industries Ltd. [eds.] *Architectural* [online]. Cradley Heath: Whiston Industries Ltd. <https://whistonindustries.com/what-we-do/architectural> [Zugriff am: 1. September 2023]
- [3] Formtexas Ltd. [eds.] *The Technology* [online]. London: Formtexas Ltd. <http://formtexas.com/technology.html> [Zugriff am: 1. September 2023]
- [4] Virga, A. [ed.] *Antonio Virga Architec* [online]. Paris: Antonio Virga. <https://www.antoniovirgaarchitecte.com/fr/projet/latoll-1> [Zugriff am: 14. September 2023]
- [5] Eliasson, O. [Hrsg.] *Atmospheric wave wall, 2020* [online]. Berlin: Studio Olafur Eliasson. <https://olafureliasson.net/artwork/atmospheric-wave-wall-2020> [Zugriff am: 7. September 2023]
- [6] Bailly, D. et al. (2015) *Flexible Manufacturing of Double-Curved Sheet Metal Panels for the Realization of Self-Supporting Freeform Structures*. Key engineering materials 639.
- [7] Reitmaier, L.-M. et al. (2019) *Prozesskette aus Streckziehen und Inkrementeller Blechumformung für die Fertigung mehrsinnig gekrümmter Feinblechpaneele* in: Hirt, G. [Hrsg.] *Ideen Form geben: 33. ASK Umformtechnik*. Institut für Bildsame Formgebung – Institut für Eisenhüttenkunde, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen, 28./29. März 2019. Aachen: Verlagshaus Mainz GmbH Aachen, S. 147–156.
- [8] Reitmaier, L.-M.; Bailly, D.; Hirt, G.; Pofahl, T.; Seiter, A.; Trautz, M. (2022) *Self-supporting freeform shell structure made from sheet metal panels: Summary of structural analysis, planning tools, production chain and assembly*. 17th Advanced Building Skins Conference. Aachen, Oct. 20/21, 2022. pp. 35–44.
- [9] Trautz, M.; Pofahl, T.; Seiter, A.; Hirt, G.; Reitmaier, L.-M.; Bailly, D. (2022) *Leichtbaukonstruktionen aus Feinblech*. Stahlbau 91, H. 6, S. 375–384. <https://doi.org/10.1002/stab.202200015>
- [10] Mehrstens, P.; Schmieder, M. (2012) *Bahn frei für die Architektur – Approximation von Freiform-Flächen durch abwickelbare Streifen*. Stahlbau 81, H. 12, S. 931–934. <https://doi.org/10.1002/stab.201201633>
- [11] Eckold, W. (1958) *Maschine zur spanlosen Formung von handgesteuerten Blechen oder Profilen*. Patent DE969993C, eingetragen 7. Aug. 1958.
- [12] Krehle GmbH; Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metallleichtbau, RWTH Aachen University (2020) *ZIM-Innovationsnetzwerk NawaMe, Projekt Entwicklung eines Verfahrens für das zwei- und dreidimensionale Umformen von runden Metallprofilen* [online]. Darmstadt: Jöckel Innovation Consulting GmbH. <https://www.nawame.de/netzwerk> [Zugriff am: 1. September 2023]
- [13] Krehle GmbH [Hrsg.] *Hallenbad Bad Wurzach DE* [online]. Landsberg am Lech: Krehle GmbH. https://krehle.de/referenzen/hallenbad-bad_wurzach [Zugriff am: 1. September 2023]
- [14] Keeler, S. P. (1968) *Circular Grid System – A Valuable Aid for Evaluating Sheet Metal Formability*. SAE Technical Paper 680092.
- [15] GOM Metrology [Hrsg.] *ARGUS – Optische Lösung für die Formänderungsanalyse* [online]. Braunschweig: Carl Zeiss GOM Metrology GmbH. <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-testing/argus> [Zugriff am: 16. März 2022]
- [16] Keeler, S. P. (1965) *Determination of Forming Limits in Automotive Stampings*. SAE Technical Paper 650535.
- [17] Goodwin, G. M. (1968) *Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop*. SAE Technical Paper 680093.
- [18] Wieser, V. (2021) *Partners Group plant extravagantes Projekt am Stadtrand in Baar* [online]. Zug: axess architekten. <https://www.axess.ch/news2/2021/3/10/zentralplus-zeitungsbericht-29012021> [Zugriff am: 14. September 2023]

Autor:innen

Peter Mehrrens, M.Sc.
pme@stb.rwth-aachen.de
RWTH Aachen University
Institut für Stahlbau
Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Kuhnhenne (Korrespondenzautor:in)
mku@stb.rwth-aachen.de
RWTH Aachen University
Institut für Stahlbau
Lehr- und Forschungsgebiet Nachhaltigkeit im Metalleichtbau
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen

Zitieren Sie diesen Beitrag

Mehrrens, P.; Kuhnhenne, M. (2023) *Architektonische Gebäudehüllen aus Metall – optimierte Formgebung doppelt gekrümmter Bauteile*. Stahlbau 92, H. 11, S. 717–727.
<https://doi.org/10.1002/stab.202300068>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 26. September 2023; angenommen: 04. Oktober 2023.