

# 1 Einleitung

## *Introduction*

Hohe Schadstoffemissionen und Umweltbelastungen durch den Einsatz fossiler Brennstoffe erfordern Veränderungen bestehender Mobilitätskonzepte. Der Verkehrssektor war 2020 für über 19 % der deutschlandweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich [UMWE21]. Politische Zielvorgaben für Emissionen im Transportwesen erfordern technische Lösungen für eine nachhaltige Mobilität sowie für die energieeffiziente Produktion von Fahrzeugen und deren Komponenten. In der Mobilitätsbranche ist ein anhaltender Trend zum Leichtbau zu beobachten. Durch die verringerte zu bewegendende Masse wird weniger Energie im Betrieb der Fahrzeuge benötigt. Leichtbau stellt dabei durch den Einsatz optimierter Werkstoffe eine vielversprechende Maßnahme dar. Durch hochfeste Werkstoffe können geringere Bauteildicken bei gleichen oder verbesserten Festigkeitseigenschaften erzielt werden. Im Bereich der Antriebs-technologien werden gleichzeitig mit batterie- und wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen alternative Konzepte entwickelt und am Markt angeboten.

Hochfeste Stähle finden im Automobilbau zum Beispiel im Bereich der Sitzstrukturen, B-Säulen, Querlenker und weiterer Bauteile des Fahrwerks sowie der Karosserie Anwendung [GANZ09; KLIG17; SCHM18a; TAKA15; THYS14]. Beispielsweise konnte Arcelor Mittal durch den Einsatz hochfester Stähle im Chassis eines Sattelauflegers eine Reduktion des Fahrwerksgewichts um 39 % erreichen [STEP14, S. 26]. Diese Gewichtsreduktionen werden durch werkstoffseitige Entwicklungen von Stahlsorten in Richtung steigender Festigkeiten ermöglicht, wie z. B. bei Dualphasen- oder Restaustenitstählen. Der Einsatz hochfester Stähle hängt maßgeblich von den Produktionsverfahren ab, an die hohe Anforderungen hinsichtlich der Qualität und Wirtschaftlichkeit gestellt werden. Die geforderte Bauteilqualität und geometrische Bauteilkomplexität können bei einer konventionellen Bearbeitung aufgrund der geringen Bruchdehnung von hochfesten Stählen häufig nicht erreicht werden [GLÄS15]. Die Umformbarkeit der Stähle steigert sich bei erhöhter Temperatur, wodurch sich Verfahren der Warmumformung wie das Presshärten mit einer Erwärmung im Ofen für die Bearbeitung dieser Werkstoffe etabliert haben [KLIG17]. Dabei wird das gesamte Bauteil erwärmt, sodass viel Energie für die thermische Behandlung benötigt wird und höhere Kosten durch verlängerte Bearbeitungszeiten entstehen. In Stanz-Biege-Prozessen ermöglicht z. B. die laserunterstützte Blechbearbeitung als alternatives Verfahren zur Ofenerwärmung die Bearbeitung hochfester Stähle im Folgeverbundwerkzeug durch eine lokale Erwärmung mittels Laserstrahlung. Durch die Erwärmung lassen sich eine optimierte Schnittqualität sowie ein höherer Umformgrad an den Bauteilen erzielen [SCHM18b; STOR21].

Hohe Umformgrade sind auch bei der Herstellung von Bipolarplatten (BPP) für wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Fahrzeuge relevant. Die Umformung von BPP, die bezogen auf die Masse und die Herstellungskosten einer Brennstoffzelle eine bedeutende Komponente darstellen, geschieht überwiegend in mehrstufigen Tief- oder einstufigen Hydroforming-Prozessen. Als Grundmaterial werden austenitische Edelstähle

wie 1.4404 sowie Titanwerkstoffe in Blechdicken von 0,05 bis 0,1 mm eingesetzt, um hohe Leistungsdichten zu erreichen. Aufgrund der Kombination aus geringer Blechstärke und hohem Umformgrad sind die Umformtiefen durch konventionelle Prozesse begrenzt [HU14; LIU10]. Die herstellbaren Kanalgeometrien limitieren die Verteilung von Reaktionsmedien im Betrieb und damit die Leistungsdichte sowie den Wirkungsgrad der Brennstoffzellen.

Dieses Dissertationsvorhaben setzt sich mit der Optimierung von umformenden Bearbeitungsprozessen für Stahlbleche durch lokale Widerstandserwärmung mittels elektrischen Stroms, im Folgenden auch konduktive Erwärmung genannt, auseinander. Der Schwerpunkt liegt auf der Bearbeitung hochfester Stähle. Zusätzlich wird am Beispiel der metallischen BPP die Eignung der elektrischen Widerstandserwärmung für die erweiterte Umformung dünner Stahlbleche untersucht. Durch die thermische Behandlung sollen die Prozesskräfte reduziert und die Umformbarkeit erweitert werden.

Zu diesem Ziel wird zunächst der Stand der Technik mit dem Schwerpunkt auf Umformung und Erwärmungstechnologien aufbereitet, auf dem die Inhalte dieser Arbeit und die definierten Forschungsfragen aufgebaut werden. Um die Randbedingungen und Prozessparameter des zu entwickelnden Verfahrens abschätzen zu können, folgt eine Auslegung des Erwärmungsprozesses für hochfeste Bleche, die sowohl analytisch als auch in Form einer numerischen Simulation durchgeführt wird. Zur Validierung der Ergebnisse soll ein Prüfstand entwickelt und aufgebaut werden, mit dem eine experimentelle Prozessentwicklung möglich ist.

Da der produzierten Stückzahl eine wesentliche Rolle für die Wirtschaftlichkeit in der Blechbearbeitung zukommt, soll die Technologie nach dem Machbarkeitsnachweis in einen Produktionsprozess nach industriellen Standards überführt werden. Dazu wird der Aufbau eines Folgeverbundwerkzeugs angestrebt, in das die Technologie der Erwärmung mechanisch sowie steuerungstechnisch integriert werden kann. Die industrielle Einsatzfähigkeit soll auf einer Servopresse im getakteten Erwärmungs- und Umformprozess nachgewiesen werden.

In zusätzlichen experimentellen Untersuchungen wird die elektrische Widerstandserwärmung mit dem Umformen von metallischen BPP für Brennstoffzellen aus dünnem Stahlblech zu einem Warmumformprozess kombiniert. Durch die angestrebte Erweiterung der Umformbarkeit können geometrische Strukturen der BPP gefertigt werden, die eine höhere Effizienz des Brennstoffzellensystems ermöglichen. Mit diesem weiteren Anwendungsgebiet soll die Eignung der elektrischen Widerstandserwärmung für ein breites Spektrum bezüglich der Bauteile in unterschiedlichen Blechstärken und Größen demonstriert und validiert werden.

## Introduction

Constant emissions and increasing environmental pollution due to fossil fuels demand changes in existing mobility concepts. In 2020, the transport sector was responsible for more than 19 % of Germany's greenhouse gas emissions [UMWE21]. Political restrictions regarding these emissions require technical solutions for a sustainable mobility as well as energy efficient production of vehicles and their components. In the mobility sector, a persistent trend towards lightweight design can be observed. Less weight using optimized materials leads to reduced energy demand for the movement of vehicles and lightweight design is a promising measure. High strength steels allow a reduction of the material's thickness with similar or even better properties regarding strength. Future concepts are also developed for drive units. Battery and fuel cell driven vehicles enable a locally emission-free mobility and are offered in growing numbers on the market.

In automotive engineering, high strength steels are utilized for example for seat structures, B-pillars, wishbones and further parts of the chassis and the body in white [GANZ09; KLIG17; SCHM18a; TAKA15; THYS14]. As an example, Arcelor Mittal could reduce the weight of a semitrailer by 39 % using high strength steels in its chassis [STEP14, S. 26]. These weight reductions are possible due to developments of steels towards higher strengths, for example with dual phase or retained austenite steels. The production processes strongly influence the utilization of these materials, as they are facing high requirements in terms of quality and economic efficiency. Due to a limited elongation at break, the required parts' quality and geometrical complexity are often not reached with conventional process technologies [GLÄS15]. In general, the formability increases with higher temperatures, so technologies of hot forming with oven heating have established in processing high strength materials [KLIG17]. Applying these technologies, the entire part is usually heated which causes high energy consumption and high costs due to longer processing times. In punching and forming processes, laser assisted heating as an exemplary alternative to oven heating offers the possibility of processing high strength steels in progressive die tools applying local heating. After heating, optimized cut surface quality and higher degrees of deformation without cracks can be realized [SCHM18b].

High degrees of deformation are also relevant for the forming of metallic bipolar plates for hydrogen driven fuel cell vehicles. Bipolar plates are important components in terms of weight and manufacturing costs of fuel cell systems. They are formed in multi-stage stamping or single-stage hydroforming processes. Austenitic stainless steels as 1.4404 serve as base material as well as titanium with thicknesses between 0.05 and 0.1 mm to reach high power density. As a result of the combination of small sheet thickness and high degrees of deformation, the forming depth using conventional processes are limited [HU14; LIU10]. During operation, these channel geometries limit the distribution of reactants and as a result the efficiency of the fuel cell stack.

This thesis therefore deals with the optimization of forming processes for steel sheets using local resistance heating with electrical current, also referred as conductive heating. The focus is on processing high strength steels. Additionally, the suitability of electrical resistance heating for improving the forming of thin steel sheets is analyzed at the example of metallic bipolar plates. The thermal treatment is intended to reduce the process forces and enhance formability.

To this objective, the current state of the art is presented, focusing on forming processes and heating technologies. The state of the art is the basis for the further work in this thesis and the definition of research questions. It is followed by a theoretical process design for the heating of high strength steels, which is done analytically and in form of a numerical simulation. These results help to estimate the necessary boundary conditions and process parameters of the heating and forming process, which is to be developed. For the validation of the results, a test bench is built up, before a detailed process development is done experimentally.

As the produced number of parts is crucial for economic manufacturing, the technology will be demonstrated in an industrial production process after its feasibility is proven. Therefore, the development and operation of a progressive die tool is planned, including mechanical and control integration of electrical resistance heating. The industrial applicability is to be demonstrated in a servo press during an intermittent heating and forming process.

In additional experimental analysis, the electrical resistance heating is added to the forming of thin metallic bipolar plates for fuel cells. This results in a combined hot forming process. The targeted increased formability enables the manufacturing of geometrical structures of bipolar plates, that can lead to higher efficiency of the fuel cell system. With this further field of application, the suitability of electrical resistance heating is demonstrated and validated for parts of a wide range of applications, different thickness and parts' sizes.