

1 Einleitung

Introduction

Die Erreichung der Klimaziele ist im Industriestandort Deutschland von zunehmender Bedeutung. So gilt es gemäß des europäischen *Green Deal* die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % im Vergleich zu 1990 zu senken und bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen [EURO19]. Dazu ist es notwendig, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz mehrdimensional tiefgreifend zu reflektieren und neu zu interpretieren. Als eine der einflussreichsten deutschen Schlüsselindustrien ist es erforderlich, dass die Automobilindustrie im Kontext des Wandels zu einer nachhaltigen Produktion eine Vorreiterrolle einnimmt. Seit dem Jahr 1990 ist der Ausstoß an CO₂-Emissionen im Verkehrssektor jedoch trotz Maßnahmen zur Reduktion fast unverändert [STAT24b]. Dies lässt sich insbesondere auf zwei wesentliche Faktoren zurückführen: Einerseits auf die wachsende Anzahl an Fahrzeugen auf den Straßen [STAT24a], andererseits auf steigende Fahrzeuggewichte [STAT22], die auf strengere Sicherheitsanforderungen sowie höhere Komfortanforderungen der Kunden zurückzuführen sind. Beides führt zwangsläufig zu einem insgesamt höheren Treibstoffverbrauch und somit zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen. Die steigenden Fahrzeuggewichte wiederum sind mit einem verstärkten Einsatz an Stahl in der Fahrzeugproduktion gekoppelt. In der Konsequenz steigt die Nachfrage nach Stahl in der Automobilindustrie kontinuierlich an, was wiederum die CO₂-Emissionen aufgrund der Produktionsprozesse in der Stahlindustrie beeinflusst. Darüber hinaus sieht sich die Automobilindustrie gegenwärtig mit der Herausforderung steigender Stahlpreise konfrontiert [STAT23]. Die Hauptgründe für diese Entwicklung sind externe Faktoren, wie Handelsbeschränkungen, Engpässe in der Rohstoffversorgung und geopolitische Spannungen. Dabei können sich Preiserhöhungen negativ auf die Rentabilität der Unternehmen in der Automobilindustrie auswirken und zu höheren Produktionskosten führen, wodurch die internationale Wettbewerbsfähigkeit eingeschränkt wird. Folglich gilt es Strategien zu entwickeln, um den genannten Herausforderungen zu begegnen. Eine der möglichen Strategien, hin zu einer effizienteren und ressourcenschonenderen Fertigung, stellt die Leichtbauweise dar [BUND23]. Hierbei wird durch die Optimierung von Bauteilen, z.B. durch den Einsatz hochfester Stähle, die geforderte Bauteilleistungsfähigkeit mit minimalem Werkstoffeinsatz erreicht. Dies erhöht die Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz der Produktion, indem der Einsatz von Halbzeugen reduziert, das Bauteilgewicht gesenkt und gleichzeitig die Erfüllung der stetig steigenden Sicherheitsanforderungen gewährleistet wird.

Hochfeste Stähle, wie Dualphasenstähle, werden häufig in Karosseriestrukturen von Fahrzeugen eingesetzt, mit dem Ziel die Blechdicke zu reduzieren und Leichtbauweisen zu ermöglichen. Allerdings können bei hochfesten Stählen, die häufig einen hohen Martensitanteil besitzen, beispielsweise durch Schädigung während der Herstellung von Karosseriestrukturen, unvorhergesehene Ausfälle durch Versagen auftreten [MARD82]. Dies führt dazu, dass die breite Anwendung insbesondere aufgrund

des begrenzten Wissens über Schädigungs- und Versagensmechanismen entlang der Prozesskette der entsprechenden Bauteile begrenzt ist [HOEF15].

Das Tiefziehen ist eines der wichtigsten Fertigungsverfahren bei der Herstellung von Karosseriestrukturen [KLOC17]. Als Blechumformverfahren erfüllt das Tiefziehen durch die optimale Ressourcennutzung in hohem Maße die stetig wachsenden Anforderungen an eine nachhaltige und ressourceneffiziente Produktion und ermöglicht die endkonturnahe Fertigung von Blechbauteilen mit komplexen Geometrien in hohen Stückzahlen. Die effiziente Werkstoffnutzung bei hervorragenden Bauteileigenschaften sichert eine hohe Wirtschaftlichkeit des Verfahrens und bietet darüber hinaus die Möglichkeit, Leichtbaupotenziale zu erschließen. Die enormen Stückzahlen im Automobilbereich führen dabei zu einer hohen ökonomischen und ökologischen Attraktivität tiefgezogene Blechbauteile hinsichtlich einer noch höheren Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz zu optimieren.

Ein möglicher Ansatz durch Tiefziehen hergestellte Karosseriestrukturen im Sinne der Leichtbauweise zu verbessern, stellt der derzeit nur begrenzt erforschte Ansatz dar, die duktile Schädigung im Werkstoff zu beeinflussen [TEKK20]. Hierbei liegt die Prämissen zugrunde, dass jedes Fertigungsverfahren entlang der Prozesskette die Mikrostruktur des Bauteils verändert und dadurch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Neben den positiven Effekten, wie der Kaltverfestigung, stellt sich dabei eine duktile Schädigung in Form von Poren ein, die sich negativ auf die Bauteilleistungsfähigkeit auswirken kann. Unter der Bauteilleistungsfähigkeit wird dabei die Beanspruchbarkeit eines Bauteils im für die Auslegung relevanten Lastfall bezogen auf seine Masse verstanden. Die Veränderung der Mikrostruktur des Bauteils wird dabei sowohl durch die werkstoffspezifischen Eigenschaften als auch die Prozesseinflussgrößen, wie den Prozessparametern und der Prozessführung, der Prozesskette bestimmt. Die Vision der Beeinflussung der duktilen Schädigung ist es, die Bauteilleistungsfähigkeit durch die gezielte Einstellung der duktilen Schädigung der Bauteile mittels der Prozesseinflussgrößen der Prozesskette zu erhöhen.

Gegenstand dieser Arbeit ist daher, die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Prozesseinflussgrößen beim Tiefziehen als Fertigungsverfahren der Prozesskette von Karosseriestrukturen und der induzierten Schädigung am Beispiel eines Dualphasenstahl zu analysieren. Hierfür werden die duktile Schädigung beeinflussenden Prozesseinflussgrößen beim Tiefziehen identifiziert und deren Auswirkungen auf den sich einstellenden Schädigungszustand quantifiziert. Damit wird die Grundlage geschaffen, die duktile Schädigung gezielt zur Steigerung der Bauteilleistungsfähigkeit zu nutzen und die Möglichkeiten zur Leichtbauweise von Bauteilen, wie Karosseriestrukturen, zu erweitern.

Introduction

The achievement of climate targets is becoming increasingly important for Germany as an industrial location. As part of the European *Green Deal*, greenhouse gas emissions must be reduced by 55% by 2030 in comparison to 1990 levels, and climate neutrality must be achieved by 2050 [EURO19]. To this end, sustainability and resource efficiency must be reflected upon and reinterpreted in a multi-dimensional and profound manner. As one of the most influential german key industries, the automotive industry must play a pioneering role in the context of the transition to sustainable production. However, since 1990, CO₂-emissions in the transport sector have remained almost unchanged despite measures to reduce them [STAT24b]. This can be attributed to two main factors in particular: On the one hand, the growing number of vehicles on the roads [STAT24a], and on the other hand, increasing vehicle weights [STAT22] due to stricter safety requirements and higher comfort demands from customers. Both of these factors inevitably lead to higher fuel consumption overall and thus to an increase in CO₂-emissions. The increasing vehicle weights are in turn linked to the increased use of steel in vehicle production. Consequently, the demand for steel in the automotive industry is persistently on the rise, which in turn has an impact on CO₂-emissions due to the production processes in the steel industry. Furthermore, the automotive industry is currently confronted with the challenge of rising steel prices [STAT23]. The principal factors driving this development are external influences such as trade restrictions, bottlenecks in the supply of raw materials and geopolitical tensions. Price increases can have a detrimental impact on the profitability of companies in the automotive industry and lead to higher production costs, thereby limiting international competitiveness. Consequently, strategies must be developed to counter the challenges mentioned. One of the potential strategies for more efficient and resource-saving production is lightweight design [BUND23]. By optimizing components, for instance through the use of high-strength steels, the required performance can be achieved with minimal use of materials. This increases the sustainability and resource efficiency of production by reducing the use of semi-finished products, lowering the component weight and at the same time ensuring fulfilment of the ever-increasing safety requirements.

High-strength steels, such as dual-phase steels, are frequently employed in vehicle body structures with the objective of reducing sheet thickness and enabling lightweight designs. However, unanticipated failures can occur in high-strength steels, which often exhibit a high martensite content, for instance due to damage during the manufacture of vehicle body structures [MARD82]. Consequently, the extensive application of these materials is constrained, particularly due to the limited understanding of the damage and failure mechanisms that occur throughout the manufacturing process of the relevant components [HOEF15].

Deep drawing is a key manufacturing process in the production of vehicle body structures [KLOC17]. As a sheet metal forming process, deep drawing fulfills the constantly growing requirements for sustainable and resource-efficient production to a

high degree thanks to the optimal use of resources and enables the near-net-shape production of sheet metal components with complex geometries in large quantities. The process is highly cost-effective due to the efficient utilization of materials and the superior quality of the components produced. Furthermore, it offers the potential to tap into the growing market for lightweight design. The automotive sector is particularly attractive for the optimization of deep-drawn sheet metal components with regard to greater sustainability and resource efficiency, given the vast quantities involved.

One potential approach to enhancing the lightweight design of vehicle body structures produced by deep drawing is the current limited research into the influence of ductile damage in the material [TEKK20]. This is based on the premise that each manufacturing process along the process chain alters the microstructure of the component, thereby influencing the mechanical properties of the component. In addition to beneficial effects, such as work hardening, ductile damage manifests in the form of voids, which can have a detrimental impact on component performance. In this context, component performance refers to the ability of a component to withstand loads in the load case relevant for the design in relation to its mass. The change in the microstructure of the component is determined by both material-specific properties and process-specific parameters. Thereby, the vision is to influence the ductile damage in order to enhance component performance. This is achieved by adjusting the ductile damage of the components through the process-specific parameters of the process chain.

The subject of this thesis is therefore to analyse the cause-effect relationships between the process-specific parameters during deep drawing as a manufacturing process in the process chain of vehicle body structures and the induced ductile damage using the example of dual-phase steel. For this purpose, the process-specific parameters influencing the ductile damage during deep drawing are identified and their effects on the ductile damage that occurs are quantified. This will create the basis for utilizing ductile damage in a targeted manner to increase component performance and expand the possibilities for lightweight design of sheet metal components such as car body structures.