

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Durchführung von stochastischen Simulationen
zur Sensitivitätsanalyse und Robustheitsbewertung
in der Blechumformung

VDI 3420

Implementation of stochastic simulations
for sensitivity analysis and robustness evaluation
in sheet metal forming

Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	3
2 Begriffe	4
3 Vorgehen und Methoden der stochastischen Simulation	8
3.1 Beschreibung der Methodik – Globale Sensitivitätsanalyse	8
3.2 Beschreibung der Methodik – Robustheitsbewertung	10
3.3 Theoretischer Hintergrund – Zufallsfelder	11
4 Empfehlungen zur Vorgehensweise	12
4.1 Aufbau der Basissimulation für eine Bauteil- oder Werkzeuggeometrie	12
4.2 Systematische Prozessverbesserung	12
4.3 Analyse der Prozessrobustheit	18
4.4 Nachweis der Prozess-/Bauteilqualität (Dokumentation)	21
Schrifttum	22
Benennungsindex englisch – deutsch	23

Contents	Page
Preliminary note	2
Introduction	2
1 Scope	3
2 Terms and definitions	4
3 Procedure and methods of stochastic simulation	8
3.1 Description of the methodology – Global sensitivity analysis	8
3.2 Description of the methodology – Robustness assessment	10
3.3 Theoretical background – Random fields	11
4 Recommendations on how to proceed	12
4.1 Structure of the basic simulation for a component or tool geometry	12
4.2 Systematic process improvement	12
4.3 Process robustness analysis	18
4.4 Proof of process/component quality (documentation)	21
Bibliography	22
Term index English – German	23

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL)

Fachbereich Produktionstechnik und Fertigungsverfahren

VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 1: Grundlagen und Planung
VDI-Handbuch Produktionstechnik und Fertigungsverfahren, Band 2: Fertigungsverfahren

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Weitere aktuelle Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3420.

Einleitung

Mithilfe der computergestützten Simulation können Blechformteile virtuell gefertigt werden. Die Kombination der Umformsimulation mit stochastischen Verfahren unterstützt die Beurteilung der Bauteilqualität und zeigt Optimierungspotenzial des Prozesses auf. Diese Technologie, eingesetzt in der frühen Entwurfsphase, ermöglicht die Reduktion des Umfangs kostenintensiver Praxisversuche und Änderungen an den realen Werkzeugen. Die wichtigsten Ziele sind dabei die Überprüfung der Herstellbarkeit der Blechformteile, die Gewinnung wichtiger Hinweise bezüglich der wesentlichen Einflussfaktoren für eine optimale Werkzeuggestaltung sowie Hinweise zur Robustheit des Prozesses im Hinblick auf die Qualität des werkzeugfallenden Fertigteils, z. B. hinsichtlich Blechdickenverteilung oder Faltenbildung im Blechformteil. Durch die Ermittlung des Einflusses der Entwurfs- und Prozessparameter auf relevante Kenngrößen können die wichtigsten Parameter für die Werkzeugoptimierung abgeleitet werden. Hierbei ergeben **Sensitivitätsanalysen**, die mithilfe der **stochastischen Simulation** den **Designraum** erkunden, oft wesentliche Einblicke auch für eine anschließende **Optimierung** des Werkzeugs.

Umformprozesse unterliegen Streuungen (z.B. Blechdickentoleranzen und Schwankungen der Materialeigenschaften des eingesetzten Blechs, Parameter des Umformprozesses selbst, Verschleiß der Werkzeuge), die sich auf die Umformergebnisse nennenswert auswirken können. Ob der Umformprozess „robust“ ist und damit die Streuung der Umformergebnisse in tolerablen Maßen bleibt, ist ein entscheidendes Qualitätskriterium. Zur Prognose, ob Eingangsstreuungen von Prozessparametern zu signifikanten Streuungen der Umfor-

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Further current information is available on the Internet at www.vdi.de/3420.

Introduction

With the help of computer-aided simulation, sheet metal formed parts can be manufactured virtually. The combination of stamping simulation with stochastic methods supports the assessment of component quality and reveals optimisation potential of the process. This technology, used in the early design phase, makes it possible to reduce the scope of cost-intensive practical tests and modifications to the real tools. The most important goals are to check the feasibility of the sheet metal parts, to obtain important information regarding the main influencing factors for an optimal tool design, as well as information on the robustness of the process, with regard to the quality of the finished part produced with the tool, e.g., concerning sheet metal thickness distribution or wrinkling in the sheet metal part. By determining the influence of the design and process parameters on relevant characteristics, the most important parameters for tool optimisation can be derived. **Sensitivity analyses** that explore the **design space** with the help of **stochastic simulation** often provide essential insights for a subsequent **optimisation** of the tool.

Forming processes are subject to scatter (e.g., sheet thickness tolerances and fluctuations in the material properties of the sheet used, parameters of the forming process itself, wear of the tools), which can have a significant effect on the forming results. Whether the forming process is “robust” and thus the scatter of the forming results remains within tolerable limits is a decisive quality criterion. **Statistical analyses** of stamping simulations are used in a suitable manner to predict whether input scatter of process parameters leads to significant scat-

mergebnisse führen, werden in geeigneter Weise **statistische Analysen** von Umformsimulationen eingesetzt. Diese Prognosemöglichkeiten können sowohl in der virtuellen Produktentwicklung als auch produktionsbegleitend eingesetzt werden. Dabei werden **Robustheitsbewertungen** auf wichtige **Ergebnisgrößen** durchgeführt. Wichtig ist es hierfür, eine möglichst realistische Annahme über die Eingangsstreuungen bezüglich des **Verteilungstyps, stochastischer Momente und Korrelationen** der Eingangsparameter zu treffen.

Robustheitsbewertungen basierend auf stochastischen Simulationen ermöglichen schon in der frühen Entwicklungsphase die Definition geeigneter Maßnahmen zur Sicherung der Prozess- und damit der Produktqualität. Die numerische Robustheitsbewertung gewinnt dabei im virtuellen Entwicklungsprozess zunehmend an Bedeutung, besonders im Hinblick auf die Verbesserung von Eigenschaften und zur Reduzierung von Produktionskosten.

Bei der Umformsimulation ist oft auch die räumliche Verteilung streuender Ergebnisgrößen relevant. Solche räumlich verteilten Streuungen können mithilfe der Methodik der **Zufallsfelder** analysiert werden. Damit ist es sowohl möglich, statistische Eigenschaften, z.B. Streuungen von **Ergebnisgrößen** (wie Blechdicken, Eigenspannungen), auf der Struktur darzustellen, als auch durch statistische Zusammenhangsanalysen Hinweise zu erhalten, welche **Eingangsgrößen** die Streuungen der Ergebnisgrößen in bestimmten Bereichen des Bauteils verursachen. Weiteres zur Definition von Zufallsfeldern siehe in Abschnitt 3.3.

Diese Richtlinie soll einen Leitfaden für die Einführung und Durchführung der stochastischen Simulation in der Blechumformung darstellen, in dem allgemeine Vorgehensweisen, wie der Einsatz von Sensitivitätsanalysen, beschrieben und die dabei verwendeten Begriffe erklärt und auch die dabei angewandte Systematik, die Auswertungen und möglichen Interpretationen dargestellt werden.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie bietet einen Leitfaden bei der Einführung und Durchführung der stochastischen Simulation in der Blechumformung. Im Fokus stehen dabei die Methodenplaner und -planerinnen, die einen zu entwickelnden Prozess zunächst so weit optimieren müssen, dass kein Versagen (z.B. Reißen, Falten) auftritt. Dazu müssen sie wissen, welche Eingangs- oder Prozessparameter (Radien, Ziehstreckenhöhen, Niederhalter- bzw. Blechhalterkräfte usw.) den größten Einfluss auf das Ergebnis haben. Hier kommt die **Sensitivitätsanalyse** zum Einsatz.

ter of the forming results. These prognosis options can be used in virtual product development as well as during production. **Robustness assessments** are carried out on important **result variables**. For this purpose, it is important to make an assumption about the input scatter as realistic as possible with regard to the **distribution type, stochastic moments and correlations** of the input parameters.

Robustness assessments based on stochastic simulations enable the definition of suitable measures to ensure process and thus product quality already in the early development phase. Numerical robustness assessment is becoming increasingly important in the virtual development process, especially with regard to improving properties and reducing production costs.

In stamping simulation, the spatial distribution of scattering result variables is often relevant. Such spatially distributed scatter can be analysed using the **random field** methodology. This makes it possible to display statistical properties, e.g., scatter of **result variables** (such as sheet thicknesses, residual stresses) on the structure, as well as to obtain information through statistical correlation analyses as to which **input variables** cause the scatter of the result variables in certain areas of the component. For further information on the definition of random fields see Section 3.3.

This standard is intended as a guideline for the introduction and implementation of stochastic simulation in sheet metal forming, describing general procedures such as the use of sensitivity analyses, explaining the terms used, and also presenting the systematics used, the evaluations and possible interpretations.

1 Scope

This standard provides a guideline for the introduction and implementation of stochastic simulation in sheet metal forming. The focus is on the method planners, who must first optimise a process to be developed to such an extent that no failure (e.g., crack/fracture) occurs. To do this, they need to know which input or process parameters (radii, draw bead heights, blank holder forces, etc.) have the greatest influence on the result. This is where **sensitivity analysis** comes in.

Wurde der Umformprozess hinsichtlich der Herstellbarkeit erfolgreich optimiert (Gutteilfenster wird für den simulierten Einzelfall erreicht), müssen die Methodenplaner und -planerinnen ermitteln, ob der Umformprozess robust gegen die in der Serienfertigung zu erwartenden Streuungen von Blechdicken, Streckgrenzen usw. ist. Hierfür kann die **Robustheitsanalyse** verwendet werden.

Beide oben genannten Analysen und Ihre Zielsetzungen bei der Anwendung werden im Abschnitt 3 detaillierter dargestellt.

Kern dieser Richtlinie ist Abschnitt 4, der konkrete Anwendungsempfehlungen zur Vorgehensweise enthält. Abschnitt 2 enthält Begriffsdefinitionen und Abschnitt 3 enthält theoretische Hintergründe, die zum tieferen Verständnis erforderlich sein können.

If the forming process has been successfully optimised with regard to feasibility (go part window is achieved for the simulated individual case), the method planners must determine whether the forming process is robust against the scatter of sheet thicknesses, yield strengths, etc. to be expected in series production. For this purpose, the **robustness analysis** can be used.

Both of the above analyses and their objectives in application are presented in more detail in Section 3.

The core of this standard is Section 4, which contains concrete application recommendations on how to proceed. Section 2 provides definitions of terms, and Section 3 provides theoretical background that may be required for deeper understanding.