

Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 1

Konstruktions-
technik/
Maschinen-
elemente

Nr. 449

Dipl.-Ing. Thilo Breitsprecher,
Zirndorf

Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktions- relevantem Fertigungs- wissen

Lehrstuhl für

Konstruktionstechnik

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg
zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.
vorgelegt von
Thilo Breitsprecher
aus Frankfurt (Oder)

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
Tag der mündlichen Prüfung: 29.10.2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Lerch

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Thilo Breitsprecher,
Zirndorf

Nr. 449

Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktions-relevantem Fertigungswissen

Breitsprecher, Thilo

Entwicklung eines selbstlernenden Assistenzsystems zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 449 . Düsseldorf: VDI Verlag 2019.

192 Seiten, 93 Bilder, 14 Tabellen.

ISBN 978-3-18344901-9 ISSN 0178-949X,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

Für die Dokumentation: Design for X – Fertigungsgerechtes Konstruieren – Blechmassivumformung – Data Mining – Selbstlernen – Automatische Wissensakquisition – Assistenzsysteme

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Wissenschaftler und Ingenieure, die an der Schnittstelle zwischen der klassischen Konstruktionstechnik und der Wissensentdeckung in Datenbanken tätig sind. Sie befasst sich mit dem Einsatz von Methoden des Data Minings zur automatischen Akquisition von konstruktionsrelevantem Fertigungswissen. Dieses benötigt der Produktentwickler zur Beurteilung der Fertigungsgerechtigkeit seiner Bauteilentwürfe. Im Fokus stehen Fertigungsverfahren, die sich in einem frühen Entwicklungsstadium befinden. Als exemplarischer Prozess wird in der Arbeit die Blechmassivumformung betrachtet. Grundlage für die automatische Wissensakquisition ist der in der Arbeit entwickelte Selbstlernprozesses. Dieser nutzt Data Mining Methoden, um aus den Daten der Fertigungsprozessentwicklung das relevante Wissen ohne Benutzereingriff zu akquirieren. Der Selbstlernprozess ist in ein prototypisches Konstruktionsassistenzsystem integriert.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie
(German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at
www.dnb.de.

Vorwort und Danksagung

Die folgenden Zeilen möchte ich nutzen, um mich bei den Menschen zu bedanken, die zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen haben. Sie ist das Ergebnis meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack. Durch die gleichermaßen fordernde wie fördernde Betreuung meines Promotionsvorhabens hat er maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz, Leiter des Instituts für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD) an der TU Stuttgart, danke ich herzlich für sein Interesse an dieser Arbeit und die Anfertigung des Zweitgutachtens.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr. Lutz Schröder für seine Bereitschaft die Funktion des fachfremden Prüfers zu übernehmen. Der fachliche Austausch mit ihm und mit Herrn Prof. Dr. Michael Kohlhase zum Thema „Wissensbasiertes Konstruieren“ haben mir neue Blickwinkel auf diese vielschichtige Thematik ermöglicht.

Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Tino Hausotte sei an dieser Stelle für die gute Zusammenarbeit im Sonderforschungsbereich Transregio 73 und für die Leitung der Disputation als Vorsitzender der Prüfungskommission gedankt.

Den ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des KTmfk danke ich für die gemeinsame Zeit, die fachlichen Kritiken und Anregungen, die Unterstützung bei anderweitigen Aufgaben und vor allem das motivierende Miteinander. Alle haben auf verschiedene Weise zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen. Besonders erwähnen möchte ich hier dennoch Sebastian Röhner („So jung komm’mer nix mehr zamml!“), Christof Küstner („Tunnel, Tunnel!“) und Michael Walter („Bilo!“). Den Mitarbeitern des IKTD Martin Kratzer, Daniel Roth und Alexander Laukemann sei zudem für den freundschaftlichen und fachlichen Austausch über Universitätsgrenzen hinweg gedankt.

Einen wichtigen Anteil an dieser Arbeit haben auch zahlreiche Studierende, denn im Rahmen von Bachelor-, Studien- und Masterarbeiten wurde wertvolle Unterstützung geleistet. Insbesondere Jürgen Mitsch, Sina Wipfel, Nico Meintker, Christopher Sauer, Sebastian Lukas, Florian Kowohl, Christian Dingfelder, Niklas Ewingmann und Christian Sperber sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Meinen Eltern Beate und Uwe sowie meinem Bruder David danke ich für das beigebrachte Rüstzeug um ein solches Vorhaben zu meistern und die familiäre Unterstützung und Motivation. Danken möchte ich auch meinen Schwiegereltern und deren Kindern, meinen

Freunden aus der Abi-Clique, den Kletterkameradinnen und -kameraden des DAV Schwabach und der Bergwacht Fürth sowie dem Kirchenchor Unterreichenbach. Ihr habt mich regelmäßig auf andere Gedanken gebracht und den Promotionsstress vergessen lassen.

Letztendlich gilt der größte Dank jedoch meiner Frau Bianca, die mir während der gesamten Entstehung der Arbeit mehr als nur viel Verständnis entgegengebracht und mich in jeder Hinsicht motiviert und unterstützt hat. Unsere Kinder Martha und Jonathan können stolz sein, eine solche Mutter zu haben :*

Zirndorf im November 2018

Thilo Breitsprecher

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Nomenklatur | VIII |
| Abstract | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Problemstellung | 3 |
| 1.2 Zielsetzungen und Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 Wissenschaftliche Grundlagen und Stand der Forschung | 6 |
| 2.1 Konstruieren als wissensintensive Tätigkeit | 6 |
| 2.1.1 Der Konstruktionsprozess | 7 |
| 2.1.2 Wissen im Konstruktionsprozess | 9 |
| 2.1.3 Wissensstrukturierung | 11 |
| 2.1.4 Wissensakquisition | 14 |
| 2.2 Wissensbasierte Systeme in der Produktentwicklung | 18 |
| 2.2.1 Wissensbasiertes Konstruieren | 19 |
| 2.2.2 Die Technologie der wissensbasierten Systeme | 23 |
| 2.2.3 Beispiele wissensbasierter Konstruktionssysteme | 26 |
| 2.3 Analyse der Fertigungsgerechtigkeit | 34 |
| 2.3.1 Fertigungsgerechtigkeit im Kontext des Design for X | 34 |
| 2.3.2 Geometriebasierte Design for Manufacture Analysen | 36 |
| 2.3.3 Rechnerunterstützung durch Prozesssimulation | 39 |
| 2.4 Wissensentdeckung in Datenbanken - KDD | 41 |
| 2.4.1 Der KDD Prozess nach Fayyad | 42 |
| 2.4.2 Darstellung der KDD-Prozessschritte | 43 |
| 2.5 Einsatz von KDD im Produktentstehungsprozess | 49 |
| 2.5.1 KDD in der Anforderungsanalyse | 49 |
| 2.5.2 Wissensbasierte Schichtentwicklung | 51 |
| 2.5.3 Stochastische Analysen in der Feinschneid-Methodenplanung | 53 |

| | |
|--|-----------|
| 3 Die Blechmassivumformung als Anwendungskontext | 55 |
| 3.1 Die Blechmassivumformung aus Sicht der Fertigungstechnologie | 55 |
| 3.2 Bedeutung der Blechmassivumformung für die Produktentwicklung | 58 |
| 3.3 Klassifikation von Nebenformelementen der Blechmassivumformung | 61 |
| 4 Ableiten des Handlungsbedarfs | 66 |
| 4.1 Fazit zum Stand der Forschung | 66 |
| 4.2 Anforderungen an ein verbessertes Konzept | 68 |
| 5 Der Selbstlernprozess | 69 |
| 5.1 Vorüberlegung zum Begriff Selbstlernen | 69 |
| 5.1.1 Menschliches Lernen | 70 |
| 5.1.2 Übertragung auf die Problemstellung | 72 |
| 5.2 Statistisch robuste Performanzbestimmung | 76 |
| 5.3 Überwachtes Lernen und Optimieren der Metamodelle | 79 |
| 5.4 Auswahl des bestgeeigneten Metamodells | 82 |
| 5.4.1 Analyse der Varianzen | 86 |
| 5.4.2 Durchführung des post-hoc Tests | 88 |
| 6 Das selbstlernende Assistenzsystem Slassy | 89 |
| 6.1 Integration in das Arbeitsumfeld der Benutzer | 89 |
| 6.2 Die Komponenten und ihr Zusammenwirken | 92 |
| 6.3 Die Selbstlernkomponente | 94 |
| 6.3.1 Auswahl der eingesetzten Metamodelle | 95 |
| 6.3.2 Vorverarbeitung der Daten | 101 |
| 6.3.3 Automatische Attributselektion | 103 |
| 6.3.4 Umsetzung des ROPE-Prozesses | 104 |
| 6.3.5 Selektion des bestgeeigneten Metamodells | 109 |
| 6.3.6 Weitere Umsetzung des Selbstlernprozesses | 110 |
| 6.4 Das Synthesewerkzeug | 112 |
| 6.4.1 Bereitstellung der Hauptformelemente | 112 |
| 6.4.2 Bereitstellung der Nebenformelemente | 114 |
| 6.4.3 Erzeugung eines Bauteilentwurfs | 116 |
| 6.5 Das Analysewerkzeug | 117 |
| 6.5.1 Verarbeitung des Konstruktionswissens | 118 |
| 6.5.2 Ergebnisdarstellung und Erklärungskomponente | 120 |

| | | |
|-----------------------------|--|------------|
| 6.6 | Das Produkt- und Prozessdatenmodell | 121 |
| 6.6.1 | Die multidimensionale Daten- und Wissensbasis | 121 |
| 6.6.2 | Strukturierung der Produkt- und Prozessdaten | 123 |
| 6.6.3 | Operative Integration der Produkt- und Prozessdaten | 128 |
| 7 | Anwendungsbeispiel: Tiefziehen-Querfließpressen | 131 |
| 7.1 | Integration des Bauteils in Slassy | 131 |
| 7.1.1 | Aufbau des Hauptformelements <i>Napf</i> | 132 |
| 7.1.2 | Aufbau des Nebenformelements <i>Sperrverzahnung</i> | 133 |
| 7.1.3 | Synthese des Bauteilmodells | 134 |
| 7.2 | Erhebung der Fertigungsdaten | 135 |
| 7.2.1 | Auswahl der relevanten Parameter und Entwicklung des Versuchsplans | 136 |
| 7.2.2 | Durchführung der Parameterstudie und Auswertung | 139 |
| 7.3 | Verarbeitung der Daten in der Selbstlernkomponente | 141 |
| 7.3.1 | Import und Vorbehandlung der Daten | 141 |
| 7.3.2 | Automatische Attributselektion | 142 |
| 7.3.3 | Durchlaufen des ROPE-Prozesses | 143 |
| 7.3.4 | Modellauswahl und -evaluierung | 145 |
| 7.4 | Analyse des Bauteilentwurfs | 151 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 154 |
| Anhang | | 157 |
| Literaturverzeichnis | | 164 |

Nomenklatur

Abkürzungen

| | |
|-------|---|
| AI | Artificial Intelligence |
| ANOVA | Analysis of Variances, Varianzanalyse |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| BMU | Blechmassivumformung |
| CAD | Computer-aided Design |
| CAE | Computer-aided Engineering |
| CAM | Computer-aided Manufacturing |
| CAPP | Computer Aided Process Planning |
| CNC | Computer Numeric Control |
| COD | Coefficient of Determination, lineares Bestimmtheitsmaß |
| CoP | Coefficient of Prognosis |
| CSG | Konstruktive Solid Geometry |
| DfX | Design for X |
| DfM | Design for Manufacture, Fertigungsgerechte Gestaltung |
| DGL | Differentialgleichung |
| DIN | Deutsche Institut für Normung e. V. |
| DoE | Design of Experiments |
| ECO | Engineering Change Order, Änderungsanträge |
| EDV | Elektronische Datenverarbeitung |
| EDM | Engineering Data Management |
| FEM | Finite Elemente Methode |
| FGK | Fertigungsgerechtes Konstruieren |
| HKA | Hauptkomponentenanalyse |
| HSD | Honest Significance Difference Test (nach TUKEY) |
| IT | Informationstechnologie |
| JT | Jupiter Tesselation |
| KBE | Knowledge-based Engineering |
| KDD | Knowledge Discovery in Databases |
| KE | Knowledge Engineering |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| KNN | Künstliches Neuronales Netz |
| KS | Konstruktionssystem |
| KSmfk | Konstruktionssystem methodisches und fertigungsgerechtes Konstruieren |
| LHS | Latin Hypercube Sampling |

| | |
|-----------|---|
| OLAP | Online Analytical Processing |
| ProKon | Proaktive Unterstützung von Konstruktionsprozessen durch Softwareagentensysteme |
| PDM | Produktdatenmanagement |
| PEP | Produktentstehungsprozess |
| PLM | Produktlebenszyklusmanagement |
| PPDM | Produkt- und Prozessdatenmodell |
| ROPE | Robust Optimization and Performance Estimation |
| RSM | Responce Surface Methode |
| RMSE | Root mean squared error, Wurzel des mittleren Fehlerquadrats |
| SFB/TR 73 | Sonderforschungsbereich Transregio 73 |
| SIT | Short Intervall Technology |
| Slassy | Selbstlernendes Assistenzsystem |
| SQL | Structured Query Language, relationale Datenbankbeschreibung |
| STEP | Standard for the exchange of product model data |
| SVM | Support Vector Machine, mathematisches Verfahren zur Mustererkennung |
| TRIP | Transformation Induced Plasticity |
| UDF | User defined feature, benutzerdefiniertes Konstruktionselement |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| WBS | Wissensbasiertes System |
| WEKA | Waikato Environment for Knowledge Analysis |
| WOP | Werkstattorientierte NC-Programmierung |
| XPS | Expertensystem |

Formelzeichen und Indizes

| | | |
|---------------|----|---|
| A | - | Anzahl der Attribute in einem Datensatz |
| D | - | Bezeichnung für einen Datensatz |
| D_k | - | k -ter Subdatensatz von D in einer Kreuzvalidierung |
| \bar{X} | - | Mittelwert der Einträge in einem Performanzvektor |
| F | - | F-Wert einer ANOVA |
| $F_{u_{max}}$ | kN | maximale Umformkraft |
| \bar{G} | - | Gesamtmittelwert aller Performanzvektoren |
| H_0 | - | Nullhypothese, die beobachteten Mittelwerte sind identisch |
| H_1 | - | Alternativhypothese |
| M | - | Anzahl der Metamodelle die im Selbstlernprozess verglichen werden |
| M_i | - | i-te Metamodell das der ROPE-Prozess ausgibt |
| N | - | Anzahl der Datentupel in einem Datensatz |
| a_i | - | Tatsächlicher (engl. actual) Wert eines Labels |
| \bar{a} | - | Mittelwert der Label im Trainingsdatensatz |
| c | - | Kontaktverhältnis zwischen Werkstoff und Umformwerkzeug |
| d_f | - | Freiheitsgrad (engl. degree of freedom) in der Statistik |
| e_i | - | Fehler (engl. error) zwischen a_i und p_i |

| | | |
|------------------|----|--|
| i | - | allgemeiner Laufindex |
| k | - | Anzahl der Teildatensätze in einer Kreuzvalidierung |
| k_H | - | Heuversfaktor |
| l | - | Anzahl der Linearkombinationen einer HKA |
| m | - | Reibfaktor, Maß für die Reibung zwischen zwei Körpern |
| n | - | Anzahl der Wiederholungen einer k-fachen Kreuzvalidierung |
| p -Wert | - | Wahrscheinlichkeit der beobachteten oder einer extremeren Prüfgröße |
| p_i | - | Vorhergesagter (engl. predicted) Wert eines Labels |
| q | - | Prüfgröße im post-hoc Test nach TUKEY |
| t | - | Prüfgröße für statistischen t-Test |
| t_{krit} | - | kritische Grenze für die Prüfgröße t , bei $t < t_{krit}$ gilt i. A. H_0 |
| $t_{\Delta,max}$ | mm | maximale Blechausdünning |
| \bar{x}_{M_i} | - | Mittelwert der geschätzten Performanz eines Metamodells |
| z | - | Anzahl der Einzelwerte in einem Performanzvektor |
| α | - | Signifikanzniveau eines statistischen Hypothesentests |
| β_{max} | - | Grenzziehverhältnis zur Beurteilung der Tiefzieheignung |
| φ_{max} | - | Umformgrad |
| φ_{vG} | - | Grenzumformgrad |

Abstract

Companies within different industries have to face several key challenges, among which the demand for shortening the time-to-market whilst decreasing costs and the strong individuality and dynamic of globalized markets are highlighted. In order to overcome those challenges companies not only have to optimize their products but also the underlying product *development* and *manufacturing* processes. The objective from engineering design point of view is the exchange of design-relevant manufacturing knowledge between both disciplines as early as possible. Especially for newly emerging manufacturing technologies common knowledge acquisition methods to assist such knowledge exchange processes fail.

This thesis proposes an approach for a self-learning engineering **assistance system** (referred to as *Slassy*) for the automatic acquisition of design-relevant manufacturing knowledge. Such knowledge is represented in terms of so-called metamodels. In the context of this thesis a metamodel is capable of predicting manufacturing process related parameter such as forming force, equivalent plastic strain, sheet thinning (and thickening) or forming tool cavity filling. The prediction depends on design related parameters such as lengths, widths, heights or angles of geometric design features. Design features that are considered in this work are for example toothings, straps or tapets. The self-learning process incorporated in Slassy's knowledge acquisition component is based on two core items: the robust optimization and performance estimation of different metamodels and a two-step inference mechanism. The former is referred to as ROPE process and ensures that the prediction quality of all metamodels is robust and reliably estimated. It facilitates methods from the field of knowledge discovery in databases (KDD). The latter enables Slassy to chose the most suitable metamodel, that is, the prediction quality of the chosen metamodel is significantly better than the remaining. This metamodel is incorporated in Slassy's knowledge base. Hence, Slassy can assist design engineers during the analysis of design concepts in terms of design-for-manufacture, an important aspect in the field of design for X (DfX).

The emerging manufacturing technology *sheet-bulk metal forming* (SMBF) creates the background for the concluding use case. Data from an exemplary SMBF process development is analysed by means of KDD methods and a set of metamodels is derived with the developed ROPE process. The selection of the most suitable metamodel by the prototypically implemented Slassy is comprehended. Afterwards the prediction of relevant manufacturing process parameters with Slassy is shown. By enabling the prediction of these process parameters the number of time-consuming iterations between product and manufacturing process development can be reduced.

