

# INHALTSVERZEICHNIS

|   |           |
|---|-----------|
| KURZFASSUNG .....   | v         |
| ABSTRACT .....  | vii       |
| INHALTSVERZEICHNIS .....  | xi        |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....   | xv        |
| FORMELZEICHEN .....   | xvii      |
| <b>1 Einleitung .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile .....</b>      | <b>5</b>  |
| 2.1 Präzisionsschmieden .....   | 6         |
| 2.2 Einsparpotential gegenüber spanenden Herstellungsverfahren .....          | 7         |
| 2.3 Eigenschaften präzisionsgeschmiedeter Bauteile .....                      | 9         |
| 2.4 Einschränkungen beim Präzisionsschmieden .....                            | 10        |
| 2.5 Beispiele für präzisionsschmiedetechnische Prozessketten .....            | 12        |
| 2.5.1 Zahnrad .....   | 12        |
| 2.5.2 Ritzelwelle .....   | 13        |
| 2.5.3 Kurbelwelle .....   | 14        |
| <b>3 Problemdefinition .....</b>  | <b>15</b> |
| 3.1 Ausgangssituation .....   | 15        |
| 3.2 Zielsetzung .....   | 16        |
| 3.2.1 Entwicklung von Mess- und Auswertemethoden .....                        | 16        |
| 3.2.2 Aufbau eines Messsystems zur prozessbegleitenden Geometrieprüfung ..... | 17        |
| <b>4 Optische Methoden zur Formerrfassung .....</b>                           | <b>19</b> |
| 4.1 Messbarkeit technischer Oberflächen .....                                 | 21        |
| 4.1.1 Transparente Objekte .....  | 22        |
| 4.1.2 Volumenstreuende Objekte .....  | 22        |
| 4.1.3 Lichtundurchlässige Objekte .....                                       | 22        |
| 4.2 Lichtlaufzeitverfahren .....  | 24        |
| 4.3 Interferometrische Verfahren .....  | 25        |
| 4.3.1 Distanzinterferometrie .....  | 26        |
| 4.3.2 Weißlichtinterferometrie .....  | 27        |
| 4.3.3 Formprüfinterferometrie .....   | 27        |
| 4.4 Konoskopische Holographie .....   | 28        |
| 4.5 Triangulationsverfahren .....   | 30        |
| 4.5.1 Lasertriangulation .....  | 30        |
| 4.5.2 Lichtschnittverfahren .....   | 32        |
| 4.5.3 Photogrammetrie .....   | 32        |
| 4.6 Streifenprojektion .....  | 33        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.6.1    | Aufbau und Funktionsweise .....                                      | 34        |
| 4.6.2    | Phase-Shift-Verfahren .....  | 34        |
| 4.6.3    | Graycode-Verfahren .....   | 36        |
| 4.6.4    | Anwendungsbereiche .....   | 37        |
| 4.7      | Schattenprojektion .....   | 38        |
| <b>5</b> | <b>Auswahl der Sensorik .....</b>                                    | <b>41</b> |
| 5.1      | Erfassung der Funktionsflächen .....                                 | 42        |
| 5.2      | Bestimmung von Form-, Maß- und Lageparametern .....                  | 42        |
| 5.3      | Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen .....                   | 43        |
| <b>6</b> | <b>Flächenhafte Geometrieprüfung von Zahnrädern .....</b>            | <b>45</b> |
| 6.1      | Mathematische Beschreibung von Evolventenverzahnungen .....          | 46        |
| 6.1.1    | Die ebene Evolvente .....  | 46        |
| 6.1.2    | Evolventenflächen von Grad- und Schrägverzahnungen .....             | 48        |
| 6.2      | Systemaufbau zur flächenhaften Geometrieprüfung von Zahnrädern ..... | 50        |
| 6.2.1    | Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems .....        | 51        |
| 6.2.2    | Beschreibung der verwendeten Drehachse .....                         | 52        |
| 6.2.3    | Spezifikation der Linearachse .....                                  | 53        |
| 6.3      | Erfassung der Verzahnungsgeometrie .....                             | 53        |
| 6.4      | Bestimmung der Drehachse .....                                       | 55        |
| 6.5      | Erstellung eines Geometriemodells der gemessenen Verzahnung .....    | 56        |
| 6.5.1    | Messdatenvorverarbeitung .....                                       | 57        |
| 6.5.2    | Rekombination der Verzahnungsgeometrie .....                         | 60        |
| 6.6      | Abweichungsanalyse .....   | 62        |
| 6.6.1    | Einpassung der Funktionsflächen auf die Referenzgeometrie .....      | 63        |
| 6.6.2    | Visualisierung der Verzahnungsabweichungen .....                     | 66        |
| 6.6.3    | Quantifizierung der Abweichungen .....                               | 73        |
| 6.7      | Verzugsuntersuchungen an präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern .....    | 73        |
| 6.7.1    | Entstehung von Härteverzügen .....                                   | 74        |
| 6.7.2    | Methoden zur Charakterisierung von Härteverzügen an Zahnrädern ..... | 75        |
| <b>7</b> | <b>Flächenhafte Geometrieprüfung von Ritzelwellen .....</b>          | <b>81</b> |
| 7.1      | Systemaufbau zur flächenhaften Erfassung von Ritzelwellen .....      | 82        |
| 7.1.1    | Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems .....        | 83        |
| 7.1.2    | Beschreibung der verwendeten Drehachse .....                         | 84        |
| 7.1.3    | Beschreibung des Koordinatenmessgerätes .....                        | 84        |
| 7.2      | Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Ritzelwellen .....   | 85        |
| 7.2.1    | Koordinatensystemabgleich .....                                      | 85        |
| 7.2.2    | Messablauf .....   | 88        |
| 7.3      | Auswertung der Messdaten .....                                       | 89        |
| 7.3.1    | Rekombination der Messdatensätze .....                               | 89        |
| 7.3.2    | Festlegung der Bauteilachse .....                                    | 90        |
| 7.3.3    | Geometrieprüfung des Lagersitzes .....                               | 90        |
| 7.3.4    | Geometrieprüfung der Verzahnung .....                                | 92        |
| 7.3.5    | Betrachtung des gesamten Bauteils .....                              | 92        |
| 7.3.6    | Quantifizierung der Abweichungen .....                               | 94        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.4      | Verzugsuntersuchungen an Ritzelwellen .....                          | 95         |
| <b>8</b> | <b>Geometrieprüfung von Kurbelwellen im Multisensorsystem .....</b>  | <b>99</b>  |
| 8.1      | Systemaufbau .....   | 100        |
| 8.1.1    | Beschreibung des optischen Wellenmesssystems .....                   | 102        |
| 8.1.2    | Beschreibung des verwendeten Streifenprojektionssystems .....        | 104        |
| 8.1.3    | Beschreibung des Vier-Achs-Positioniersystems .....                  | 104        |
| 8.2      | Geometrieerfassung von Kurbelwellen mittels Multisensortechnik ..... | 106        |
| 8.2.1    | Koordinatensystemabgleich .....                                      | 107        |
| 8.2.2    | Flächenhafte Erfassung der Funktionsflächen von Kurbelwellen .....   | 108        |
| 8.2.3    | Erfassung einer Werkstückeinhüllenden .....                          | 110        |
| 8.3      | Abweichungsanalyse .....   | 111        |
| 8.3.1    | Rekombination der Messdaten .....                                    | 111        |
| 8.3.2    | Flächenhafte Geometrieprüfung der Lagersitze .....                   | 115        |
| 8.3.3    | Auswertung der Werkstückeinhüllenden .....                           | 117        |
| 8.3.4    | Fusion der Messdaten .....   | 118        |
| 8.3.5    | CAD-Vergleich .....  | 119        |
| 8.4      | Volumetrische Untersuchungen an Kurbelwellen .....                   | 121        |
| 8.4.1    | Substitution der Hinterschnittbereiche der Kurbelwangen .....        | 121        |
| 8.4.2    | Approximation des Werkstückvolumens und der Werkstückmasse .....     | 123        |
| 8.4.3    | Bestimmung des Bauteilschwerpunkts und Unwuchtberechnung .....       | 125        |
| 8.4.4    | Volumetrische Analyse einer Einzylinderkurbelwelle .....             | 128        |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>   | <b>131</b> |
|          | <b>LITERATUR .....</b>   | <b>135</b> |
|          | <b>WISSENSCHAFTLICHER WERDEGANG .....</b>                            | <b>145</b> |