

## Inhaltsverzeichnis

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Danksagung.....</b>   | <b>i</b>    |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>                                | <b>vii</b>  |
| <b>Formelzeichen.....</b>  | <b>viii</b> |
| <b>Kurzfassung .....</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>Abstract .....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1 Einleitung .....</b>  | <b>1</b>    |
| <b>2 Stand der Technik .....</b>                                 | <b>4</b>    |
| 2.1 Grundlagen der Gesteinsbearbeitung .....                     | 4           |
| 2.1.1 Gestein als Werkstoff.....                                 | 4           |
| 2.1.2 Werkzeuge für die Gesteinsbearbeitung .....                | 6           |
| 2.1.3 Spanbildungsmechanismen .....                              | 9           |
| 2.1.4 Verschleißmechanismen.....                                 | 10          |
| 2.1.5 Einsatz von Kühlschmiermitteln .....                       | 12          |
| 2.2 Analyse der Gesteinsbearbeitung .....                        | 13          |
| 2.2.1 Einzelkornuntersuchungen .....                             | 13          |
| 2.2.2 Mehrkornuntersuchungen.....                                | 16          |
| 2.2.3 Untersuchungen mit Ultraschallüberlagerung.....            | 18          |
| 2.3 Ultraschallsysteme in der Zerspanung .....                   | 22          |
| 2.3.1 Möglichkeiten der Schwingungserzeugung .....               | 22          |
| 2.3.2 Möglichkeiten der Schwingungseinkopplung.....              | 23          |
| 2.3.3 Funktionsprinzip piezoelektrischer Ultraschallsysteme..... | 24          |
| 2.3.4 Auslegung von piezoelektrischen Verbundschwingern .....    | 27          |
| 2.4 Modellierung der Zerspanprozesse .....                       | 28          |
| 2.4.1 Modellierung der Gesteinsbearbeitung .....                 | 30          |
| 2.5 Optimierung technischer Systeme.....                         | 31          |
| 2.5.1 Grundlagen der Optimierung .....                           | 31          |
| 2.5.2 Optimierung in der Fertigungstechnik .....                 | 34          |
| 2.6 Fazit zum Stand der Erkenntnisse .....                       | 35          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>3</b> | <b>Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>  | <b>37</b> |
| <b>4</b> | <b>Untersuchung des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses .....</b>                      | <b>40</b> |
| 4.1      | Äußere Analyse des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses .....                           | 40        |
| 4.1.1    | Versuchsmaschine.....  | 40        |
| 4.1.2    | Ultraschallsystem .....  | 41        |
| 4.1.3    | Versuchswerkzeug und Probenwerkstoff.....  | 42        |
| 4.1.4    | Messtechnik zur Erfassung der Prozessbelastungen .....   | 43        |
| 4.1.5    | Planung der Bohrschleifversuche.....   | 44        |
| 4.2      | Diskussion der Bohrschleifergebnisse .....   | 47        |
| 4.3      | Fazit zur experimentellen Untersuchung des ultraschallunterstützten<br>Bohrschleifprozesses..... | 52        |
| <b>5</b> | <b>Synthese des Optimierungsansatzes .....</b>   | <b>53</b> |
| 5.1      | Funktionale Dekomposition .....  | 53        |
| 5.2      | Definition des Optimierungssystems .....   | 60        |
| 5.3      | Definition des Optimierungsalgorithmus .....   | 63        |
| 5.4      | Fazit zur Systemanalyse des Optimierungsansatzes .....   | 65        |
| <b>6</b> | <b>Modellierung des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses .....</b>                      | <b>66</b> |
| 6.1      | Voraussetzungen und Randbedingungen der Modellierung .....                                       | 66        |
| 6.2      | Werkzeugmodellierung.....  | 68        |
| 6.2.1    | Schleifkornmodellierung.....   | 70        |
| 6.2.2    | Kornverteilung .....   | 73        |
| 6.2.3    | Kornkonzentration .....  | 75        |
| 6.2.4    | Validierung und Verifizierung des Werkzeugmodells.....   | 77        |
| 6.3      | Werkstückmodellierung.....   | 77        |
| 6.3.1    | Werkstückgeometrie .....   | 77        |
| 6.4      | Materialabtragmodellierung.....  | 79        |
| 6.4.1    | Synchronisierung der Werkzeug- und Werkstückmodelle .....  | 80        |
| 6.4.2    | Prozesskinematik / Inkrementierung des Materialabtrags .....                                     | 82        |
| 6.5      | Spanbildungsmodellierung / Materialabtragmodell.....   | 83        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 6.5.1     | Berechnung des Primärspans .....   | 86         |
| 6.5.2     | Berechnung des Sekundärspans .....   | 86         |
| 6.5.3     | Berechnung des Gesamtspans .....   | 87         |
| 6.6       | Prozesskraftmodellierung.....  | 88         |
| 6.7       | Fazit zur Modellierung des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses ..... | 91         |
| <b>7</b>  | <b>Ritzuntersuchungen .....</b>  | <b>92</b>  |
| 7.1       | Versuchsaufbau .....   | 92         |
| 7.1.1     | Linearprüfstand .....  | 93         |
| 7.1.2     | Ultraschallsystem .....  | 93         |
| 7.1.3     | Messtechnik und Analytik.....  | 94         |
| 7.2       | Vorbereitung und Durchführung der Versuche.....                                | 95         |
| 7.2.1     | Werkzeug .....   | 96         |
| 7.2.2     | Diamanten .....  | 96         |
| 7.2.3     | Werkstoff.....   | 103        |
| 7.2.4     | Methoden zur Planung und Auswertung der Ritzuntersuchungen.....                | 104        |
| 7.3       | Einfluss der Prozessgrößen .....   | 108        |
| 7.3.1     | Analyse des qualitativen Einflusses .....                                      | 108        |
| 7.3.2     | Analyse des quantitativen Einflusses .....                                     | 113        |
| 7.4       | Fazit zu den experimentellen Einkornuntersuchungen .....                       | 116        |
| <b>8</b>  | <b>Optimierung des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses .....</b>     | <b>117</b> |
| 8.1       | Optimierungsdurchführung .....   | 117        |
| 8.2       | Bohruntersuchungen mit beiden Schwingungsgebilden .....                        | 120        |
| 8.2.1     | Aufbau, Vorbereitung und Durchführung der Bohrversuche.....                    | 120        |
| 8.2.2     | Ergebnisse der Bohruntersuchungen .....  | 121        |
| 8.3       | Fazit zur Optimierung des ultraschallunterstützten Bohrschleifprozesses.....   | 123        |
| <b>9</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                      | <b>124</b> |
| 9.1       | Zusammenfassung .....  | 124        |
| 9.2       | Ausblick .....   | 125        |
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis.....</b>   | <b>127</b> |