

1	Einleitung, Motivation und Zielsetzung	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Motivation und Anforderungen	3
1.3	Zielsetzung	4
2	Stand der Forschung und Technik	7
2.1	Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen hoher Brillanz	7
2.2	Energieeinkopplung und -transport beim Laserstrahlschweißen	8
2.2.1	Prozessregime Warmleitungs- und Tiefschweißen	10
2.2.2	Dynamik und Geometrie der Dampfkapillare	12
2.2.3	Fluidodynamik im Schmelzbad	14
2.3	Laserstrahl-Mikroschweißen mit Leistungsmodulation	16
2.4	Laserstrahl-Mikroschweißen von Aluminium-Kupfer-Verbindungen	21
2.4.1	Grundlagen des Fügens artungleicher Verbindungen	22
2.4.2	Analyse der intermetallischen Phasenbildung bei Aluminium-Kupfer-Verbindungen	25
2.5	Bestimmung der Einschweißtiefe beim Laserstrahlschweißen	28
2.5.1	Einschweißtiefenanalyse mittels optischer Kohärenztomographie	31
2.5.2	Spektrometerbasierte Überwachung von Laserstrahlschweißprozessen	32
2.6	Prozessanalyse mit Röntgenstrahlung	33
3	Messtechnische Grundlagen	35
3.1	Messung elektrischer Kontaktwiderstände	35
3.1.1	Widerstandsmessung mit einer Vierleitermesstechnik	35
3.1.2	Elektrischer Widerstand von Verbindungen	36
3.2	Optische Kohärenztomographie	40
3.3	Emissionsspektroskopie	41
3.4	Prozessanalyse mit Rontgenstrahlung	44

4	Analyse elektrischer Übergangswiderstände bei Schweißverbindungen	47
4.1	Elektrische Modellierung von Schweißverbindungen	47
4.2	Messaufbau zur experimentellen Validierung anhand von Aluminium-Kupfer-Verbindungen	52
4.3	Verifizierung des Simulationsmodells mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen	54
4.4	Einfluss verschiedener Schweißnahtgeometrien auf den Übergangswiderstand	59
4.4.1	Analyse artgleicher Verbindungen	59
4.4.2	Analyse artungleicher Verbindungen	61
5	Laserstrahl-Mikroschweißen von Aluminium-Kupfer-Verbindungen	65
5.1	Untersuchungen im Stumpfstoß	65
5.1.1	Ausgleich der Materialeigenschaften mit Asymmetrie der kreisförmigen Oszillation	66
5.1.2	Steuerung der Energieeinbringung durch einen Zwei-Strahl-Aufbau	70
5.2	Untersuchungen im Überlappstoß	72
5.2.1	Analyse der Nahtausformung mit kreisförmiger örtlicher Leistungsmodulation	73
5.2.2	Analyse alternativer Oszillationsgeometrien	79
5.3	In situ Analyse mittels Synchrotron-Röntgenstrahlung	83
5.3.1	Systemtechnik und Auswertung der experimentellen Versuche mit Synchrotron-Röntgenstrahlung	83
5.3.2	Porenentstehung und Bewegung im Schmelzbad	85
5.3.3	Dynamik und Durchmischung in der Aluminium-Kupfer-Schmelze	89
5.4	Funktionsorientierte Analyse von Aluminium-Kupfer-Verbindungen	93
5.4.1	Mechanische Belastung der Verbindungen im Betrieb	93
5.4.2	Thermische Belastung der Verbindungen im Betrieb	95
5.4.3	Elektrische Belastung der Verbindungen im Betrieb	99
6	Prozessbegleitende Bestimmung der Einschweißtiefe	103
6.1	Theoretische Betrachtung der interferometerbasierten Dampfkapillarmessung mit örtlicher Leistungsmodulation	103
6.2	Experimentelle Untersuchung mit OCT-Systemen beim Mikroschweißen	105

6.2.1	Datenanalyse und -aufbereitung des OCT-Signals	106
6.2.2	Analyse und Diskussion des OCT-Signals mit örtlicher Leistungsmodulation	113
6.2.3	Untersuchung der Einschweißtiefe bei Aluminium-Kupfer-Verbindungen	115
6.3	Bewertung und Ausblick zur Fähigkeit der OCT-Systeme beim Laserstrahl-Mikrofügen	118
6.4	Theoretische Betrachtung und Grundlagen der spektrometerbasierten Bestimmung der Einschweißtiefe	119
6.5	Identifikation und Auswahl der materialcharakteristischen Plasmaemissionsspektren	120
6.5.1	Systemtechnik für die spektrometerbasierte Untersuchung	120
6.5.2	Datenaufbereitung	123
6.5.3	Identifikation der charakteristischen Emissionspektren von Kupfer und Aluminium	123
6.5.4	Einfluss der Positionierung der Spektrometeroptik	125
6.5.5	Datenverarbeitung	127
6.6	Experimentelle Untersuchung von Überlappverbindungen mit Spektrometrie	128
6.6.1	Einfluss der Laserleistung auf die Messwerte	129
6.6.2	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Messwerte	130
6.6.3	Einfluss der örtlichen Leistungsmodulation	131
6.6.4	Analyse der Messwerte beim Einsatz von Leistungsrampen	134
6.7	Bewertung und Ausblick zur Fähigkeit einer spektrometerbasierten Einschweißtiefenanalyse	135
6.8	Vergleich von Spektrometrie und Interferometrie bei der Einschweißtiefenmessung	136
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
8	Abbildungsverzeichnis	IX
9	Tabellenverzeichnis	XV
10	Literaturverzeichnis	XVII
10.1	Eigene Veröffentlichungen	XXVI
10.2	Videos der Synchrotronaufnahmen	XXVII
11	Anhang	XXIX
11.1	Graphische Darstellung der Einordnung der Arbeit in den Stand der Technik	XXIX

11.2	Grundlagen elektrischer Widerstände	XXIX
11.3	Aufbereitung der Übergangswiderstandsmessungen	XXX
11.4	Bestimmung der Brückenwiderstände für das Simulationsmodell	XXXI
11.5	Korrektur der Messwerte bei Schweißnähten längs zur Stromrichtung	XXXIII
11.6	Vergößerte Darstellungen ausgewählter Synchrotronaufnahmen	XXXIV
11.7	Aufbau des Systems bei den Untersuchungen mit Spektrometer	XXXV