

# Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	I
SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	V
EXTENDED SUMMARY.....	XI
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	1
2 LEICHTBAUWERKSTOFFE FÜR DEN MOTORENBAU.....	5
2.1 ANFORDERUNGEN UND KRITERIEN FÜR DAS ALUMINIUM-MOTORBLOCK-KONZEPT.....	7
2.1.1 Konstruktive Gestaltung von Al-Motorblöcken (Bauteilkonstruktion).....	10
2.1.2 Al-Legierungswerkstoffe für Leichtbauverbrennungsmotoren.....	11
2.1.3 Gießverfahren & Wärmebehandlung.....	13
2.1.4 Zylinderlauffächentechnologie.....	15
2.2 FUNKTIONSVORTEILE (QUASI)MONOLITHISCHER MOTORBLÖCKE VS. HETEROGENER KONZEPTE.....	20
3 TERMISCHES SPRITZEN FÜR ZYLINDERLAUFLÄCHEN.....	21
3.1 VORBEHANDLUNG DER OBERFLÄCHE.....	22
3.1.1 Haftmechanismen thermischer Spritzschichten.....	23
3.1.2 Methoden für die Aktivierung der Oberfläche.....	25
3.1.3 Charakterisierung der aufgerauten Oberflächen.....	29
3.1.4 Bewertung der vorhandenen Aktivierungsmethoden.....	38
3.1.5 HVOF-Beschichtung ohne vorheriges Aufrauen der Oberfläche.....	41
3.2 BESCHICHTUNGSVERFAHREN FÜR ZYLINDERLAUFLÄCHEN.....	43
3.2.1 Verfahrensvarianten mit stehendem Motorblock und rotierendem Brenner...	43
3.2.2 Zylinderlaufflächenbeschichtung mit rotierendem Motorblock mittels des HVOF-Pulverflammspritzverfahrens.....	48
3.2.3 Anpassung der Brennergeschwindigkeit zur Erzielung einer homogenen Schichtdickenverteilung.....	50
3.3 NACHBEHANDLUNG DES BAUTEILS (HONEN).....	53
3.3.1 Grundlagen des Honens.....	54
3.3.2 Honen von thermischen Spritzschichten.....	56
4 WERKSTOFF-, SCHICHT- UND PROZESSCHARAKTERISIERUNG.....	59
4.1 SCHICHTWERKSTOFFAUSWAHL.....	59
4.1.1 Charakterisierung der Spritzzusatzwerkstoffe.....	61
4.2 ERGEBNISSE UND MESSGRÖßEN DER SCHICHTCHARAKTERISIERUNG.....	63
4.2.1 Metallographische Untersuchung und Gefügeanalyse.....	63
4.2.2 Einfluss des Spritzwinkels auf die Qualität der Spritzschicht.....	67

4.2.3	<i>Mikrohärte und Schichtporosität</i> .....	71
4.2.4	<i>Untersuchung der Schichthaftung</i> .....	72
4.2.5	<i>Untersuchung der Schichteigenspannungen</i> .....	74
4.2.6	<i>Thermoschockbeständigkeit der Schichten</i> .....	79
4.2.7	<i>Benetzungsfähigkeit der Schichten</i> .....	82
4.2.8	<i>Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit der Schichten</i> .....	83
4.3	<b>ERGEBNISSE UND MESSGRÖßEN DER OBERFLÄCHENCHARAKTERISIERUNG</b> .....	85
4.3.1	<i>Oberflächenbeschaffenheit der Probenkörper „as sprayed“</i> .....	86
4.3.2	<i>Oberflächenbeschaffenheit der Probenkörper nach dem Honen</i> .....	87
4.4	<b>BETRACHTUNGEN ZUR WIRTSCHAFTLICHKEIT UND ZUR SERIENFERTIGUNGSFÄHIGKEIT DES VERFAHRENS</b> .....	91
4.4.1	<i>Prozesstechnik, Automatisierung und Serientauglichkeit des Verfahrens</i> .....	91
4.4.2	<i>Wirtschaftlichkeit und Fertigungskosten</i> .....	98
5	<b>TRIBOLOGISCHE CHARAKTERISIERUNG THERMISCH GESPRITZTER ZYLINDERINNENBESCHICHTUNGEN</b> .....	103
5.1	<b>REIBUNG UND VERSCHLEIß IM SYSTEM ZYLINDERLAUFLÄCHE / KOLBENRING</b> .....	103
5.1.1	<i>Das System Zylinderlauflfläche / Kolbenring</i> .....	105
5.1.2	<i>Verschleißmechanismen des Zylinderlauflächen-Kolbenring-Systems</i> .....	105
5.1.3	<i>Reibung im Zylinderlauflächen-Kolbenring-System</i> .....	108
5.2	<b>BETRIEBS- UND BAUTEILEIGENSCHAFTEN UND DEREN EINFLUSS AUF DAS VERSCHLEIßVERHALTEN DES ZYLINDER-KOLBEN-SYSTEMS</b> .....	110
5.3	<b>EINFLUSS DER WERKSTOFFEIGENSCHAFTEN AUF DAS VERSCHLEIßVERHALTEN</b> .....	111
5.3.1	<i>Werkstoffgruppe, Affinität, Gefügestruktur und Phasenbildung</i> .....	112
5.3.2	<i>Mechanische Werkstoffeigenschaften</i> .....	113
5.3.3	<i>Thermodynamische Werkstoffeigenschaften</i> .....	114
5.3.4	<i>Andere relevante Werkstoffeigenschaften</i> .....	115
5.4	<b>EINFLUSS DER OBERFLÄCHENEIGENSCHAFTEN AUF DAS VERSCHLEIßVERHALTEN</b> .....	115
5.5	<b>EINFLUSS DER KONSTRUKTION UND DER GESTALTUNG DES MOTORS AUF DAS VERSCHLEIßVERHALTEN</b> .....	116
5.6	<b>VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG DER TRIBOLOGISCHEN CHARAKTERISIERUNG</b> .....	117
5.6.1	<i>Ermittlung und Auswertung der tribologischen Eigenschaften unter trockenen Bedingungen</i> .....	119
5.6.2	<i>Untersuchung zur Fressneigung unter Mangelschmierung</i> .....	124
5.6.3	<i>Zusammenfassung der tribologischen Charakterisierung</i> .....	126
6	<b>TEMPERATURVERTEILUNG IM SUBSTRAT WÄHREND DES BESCHICHTUNGSVORGANGS UND DEREN EINFLUSS AUF DIE SCHICHTEIGENSCHAFTEN</b> .....	129

6.1	EINFLUSS DES BRENNSTOFFES AUF DIE WÄRMEZUFUHR IN DAS SUBSTRAT .....	130
6.2	EINFLUSS VERSCHIEDENER BESCHICHTUNGSBEDINGUNGEN MIT PROPAN ALS BRENNSTOFF AUF DIE WÄRMEZUFUHR IN DAS SUBSTRAT .....	135
6.2.1	<i>Einfluss der Betriebsparameter der Drehvorrichtung.....</i>	<i>136</i>
6.2.2	<i>Einfluss des Substratsmaterials auf die Temperaturverteilung während des Beschichtungsvorgangs.....</i>	<i>140</i>
6.2.3	<i>Einfluss des Spritzzusatzwerkstoffes und der Prozessparameter .....</i>	<i>142</i>
7	ABSCHLIEßENDE DISKUSSION UND AUSBLICK.....	147
8	LITERATURVERZEICHNIS .....	155