

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
2	AUSGANGSSITUATION UND ZIELSETZUNG.....	2
3	STAND DER FORSCHUNG UND TECHNIK.....	5
3.1	Der Spritzgießprozess	5
3.2	Werkzeugsensorik.....	6
3.2.1	Druckmessung im Spritzgießwerkzeug.....	6
3.2.2	Temperaturmessung im Spritzgießwerkzeug.....	10
3.3	Die Zustandskurve beim Spritzgießen	13
3.4	Rückblick auf Untersuchungen mit thermoelektrischen Dünnschichten	15
4	ENTWICKLUNG UND HERSTELLUNG DES TEMPERATURSENSITIVEN SCHICHTSYSTEMS	18
4.1	Definition der Anforderungen und der Rahmenbedingungen eines sensorischen Dünnschichtsystems für Spritzgießwerkzeuge	18
4.2	Messprinzip.....	21
4.2.1	Thermoelektrischer Effekt	22
4.2.2	Seebeck-Koeffizienten und deren Zusammenhang mit der Thermospannung	23
4.2.3	Temperaturmessung mit (Dünnschicht-) Thermoelementen	25
4.3	Vorüberlegungen zum Aufbau und zur Herstellung des sensorischen Schichtsystems	28
4.3.1	Grundsätzlicher Schichtaufbau	28
4.3.2	Auswahl des Substratmaterials	29
4.3.3	Auswahl der Schichtmaterialien und der Beschichtungsverfahren	30
4.4	Verfahren zur Schichterzeugung.....	32
4.4.1	PVD-Technik (Kathodenerstäubung)	33
4.4.2	Schichtwachstum und Schichthaftung	35
4.5	Methoden zur Charakterisierung dünner Schichten.....	39
4.5.1	Oberflächentopographie- und Schichtdickenmessung	39
4.5.2	Bestimmung des elektrischen Isolationsvermögens	41
4.5.3	Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM/EDX)	43
4.5.4	Kalottenschliff	43

4.6 Herstellung der Dünnschichtsensoren	45
4.6.1 Integration des Dünnschichtsensordsystems in ein Spritzgießwerkzeug	45
4.6.1.1 Flächige Variante	46
4.6.1.2 Modulare Variante	47
4.6.2 Elektrische Isolationsschicht	48
4.6.2.1 Untersuchungen zu Aluminiumoxid durch reaktives Magnetronspütern	48
4.6.2.2 Untersuchungen zu Aluminiumoxid durch HF-Sputtern	52
4.6.2.3 Multilayerbeschichtungen	53
4.6.3 Aufnehmerschicht	57
4.6.3.1 Strukturierung mittels Schattenmasken	57
4.6.3.2 Strukturierung mittels Freilasern einer Abdeckbeschichtung	60
4.6.4 Geometrische Sensorstrukturierung mittels Freilasern einer Abdeckbeschichtung	62
4.6.4.1 Verfahrensablauf	62
4.6.4.2 Versuchsrahmenbedingungen und Vorversuche	63
4.6.4.3 Versuche zur Ermittlung eines optimalen Arbeitspunktes	68
4.6.5 Schutzschicht	75
4.6.6 Verschleißmessung	76
4.6.7 Kontaktierung der Aufnehmerschicht	76
4.7 Charakterisierung des thermoelektrischen Sensorverhaltens	79
4.7.1 Vorgehensweise bei der Kennlinienermittlung	79
4.7.2 Ergebnisse der Kalibrierung	82
4.7.2.1 Flächige Varianten	82
4.7.2.2 Modulare Varianten	85
4.7.3 Messunsicherheitsanalyse bei der Kalibrierung von Dünnschicht-Thermoelementen	87
4.7.3.1 Grundlagen zur Bestimmung der Messunsicherheit	87
4.7.3.2 Aufstellen des Messunsicherheitsbudgets	89
4.7.3.3 Resümee zur Messunsicherheitsbetrachtung	93
5 THEORETISCHE BETRACHTUNG DER THERMISCHEN VERHÄLTNISSE IM SENSORBEREICH	94
5.1 Grundlagen zur Berechnung von Wärmetransportvorgängen	94
5.2 Berechnung der Sprungantwort	95
5.3 Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen der realen Oberflächentemperatur und der interpretierten Sensortemperatur	99

6	EINSATZ DER HERGESTELLTEN DÜNNSCHICHTSENSOREN IN EINEM SPRITZGIEßWERKZEUG	112
6.1	Versuchsaufbau.....	112
6.2	Versuchsplan	113
6.3	Versuchsdurchführung und -auswertung	114
6.4	Vorversuche.....	114
6.5	Analyse des Temperaturverhaltens bei Prozessbeginn und Prozessunterbrechung	117
6.6	Einfluss der Verfahrensparameter.....	119
6.6.1	Modulare Varianten	119
6.6.2	Flächige Varianten	128
6.7	Lebensdauer der Dünnschichtsensoren	137
6.8	Abformverhalten des Kunststoffes im Sensorbereich	137
7	ZUSAMMENFASSUNG	141
8	AUSBLICK.....	144
9	LITERATURVERZEICHNIS	147
10	Liste der Vorveröffentlichungen und Patente.....	152
11	ANHANG.....	153