

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Motivation der Arbeit	1
2 Grundlagen zu den untersuchten Wärmestrommessmethoden und der ALTP-Technik	3
2.1 Indirekte Wärmestrommessmethoden	3
2.1.1 Massenk calorimeter	3
2.1.2 Koaxiale Thermoelemente und Oberflächenthermoelemente	4
2.1.3 Numerische Wärmestrombestimmung auf Temperaturbasis	6
2.2 Direkte Messmethoden	7
2.2.1 Rundflächensensor	7
2.2.2 Differenzschichtsensoren	8
2.2.3 Die Atomlagenthermosäule und der transversale Seebeck- effekt	9
Sensormodul für hohe Belastungen und aktiver Kühleinheit	11
Vorverstärkereinheit	12
3 Kalibrierung von Wärmestromsensoren	17
3.1 Statische strahlungsbasierte Kalibrierung	18
3.1.1 Umgebung und Kalibrierprozess	19
3.1.2 Ungenauigkeit des Mess- und Kalibriervorgangs	20
3.1.3 Kalibrierung der ALTP-Sensoren	20
3.1.4 Vergleich mit anderen Wärmestrommessmethoden	23
3.2 Statische Konvektionskalibrierung	26
3.2.1 Kalibriereinrichtung und Prozedur	27
3.2.2 Strömungseigenschaften des Prüfaufbaus	28
3.2.3 Sensorkalibrierung und Vergleich	31
Fester Düsenabstand	32
Variabler Düsenabstand	33
3.2.4 Signaleigenschaften und Sensorcharakteristiken	36
4 Temperaturabhängigkeit der ALTP-Sensorik	41
4.1 Temperatureigenschaften der Seebeck-Koeffizienten	41
4.2 Temperaturabhängige Sensitivitätsformulierung und -regression .	43
4.3 Temperaturabhängigkeit des Schichtwiderstands	49

5	Simulative Untersuchung der ALTP-Technik mit thermisch-transienten Lasten	51
5.1	Materialeigenschaften	52
5.2	Randbedingungen und synthetische Lasten	53
5.3	Diskretisierung und Modellerstellung	55
5.4	Analyse des Funktionsprinzips	58
5.5	Netzstudie	64
5.6	Invasivität der ALTP-Sonde im motorischen Betrieb	66
5.7	Theoretische Untersuchung der ALTP Zeitauflösung für motorische Anwendungen	67
6	Die ALTP-Technik im Verbrennungsmotor	71
6.1	Motorprüfstand und Motorparameter	71
6.2	Messinstrumentierung und Testkonditionen	72
6.3	Motormessergebnisse	74
6.3.1	Vergleich von Einzelzyklusdaten und zyklusgemittelten Messdaten	75
6.3.2	Wandwärmestrommessungen	79
6.3.3	Einordnen der Messdaten anhand Literaturdaten	81
6.3.4	Frequenzbereichsanalyse des Messsignals	87
6.3.5	Detailanalyse der Motorzyklen	92
6.3.6	Energiebilanzierung	99
6.4	Konsistenz- und Wiederholbarkeitsuntersuchung	100
6.5	Fehlerrechnung und Ungenauigkeitsanalyse	103
7	Entwicklung einer kombinierten Temperatur- und Wärmestrommessung für ALTP-Sensoren	107
7.1	Theoretischer Ansatz	107
7.2	Methodikaufbau und elektrische Schaltung	108
7.3	Schaltungstechnische Simulation der Methodik	112
7.4	Kalibrierung der Messmethodik	115
7.5	Signalzeitverläufe in den Kalibrierprüfständen	116
7.5.1	Wärmelast durch Strahlung	117
7.5.2	Konvektive Wärmelast	118
7.6	Vergleich von direkten und indirekten Wärmestromsignalen	120
7.6.1	Wärmelast durch Strahlung	121
7.6.2	Konvektive Wärmelast	122
7.6.3	Nusseltzahlbestimmung und direkte Bestimmung von hochfrequenten Wärmeübergangsgrößen	127
7.7	Vorteile der kombinierten Methodik	131
8	Ausblick und Zusammenfassung	133
	Literaturverzeichnis	139