

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>1 Kurzfassung</b>	<b>VII</b>
1.1 Kurzfassung . . . . .	VII
1.2 Abstract . . . . .	VIII
<b>2 Einleitung</b>	<b>1</b>
2.1 Bedeutung der dynamischen Kraftmessung . . . . .	1
2.2 Motivation und Aufgabenstellung . . . . .	2
2.3 Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>3 Grundlagen</b>	<b>5</b>
3.1 Stand der Technik . . . . .	5
3.2 Messprinzipien . . . . .	7
3.2.1 Dehnungsmessstreifen . . . . .	8
3.2.2 Piezoelektrische Sensorelemente . . . . .	10
3.2.3 Optische Messverfahren . . . . .	11
3.2.4 Induktive Sensoren . . . . .	12
3.2.5 Kapazitive Sensoren . . . . .	13
<b>4 Theoretische Betrachtungen</b>	<b>15</b>
4.1 Struktur einer elektrischen Kraftmesskette . . . . .	15
4.2 Feder-Masse-Modelle zur Beschreibung von Kraftaufnehmern . .	15
4.2.1 Einfaches Feder-Masse-Modell / Verfahren „Schwing- erreger mit Zusatzmasse“ . . . . .	16
4.2.2 Feder-Masse-Modell unter Berücksichtigung der Kraft- einleitung . . . . .	22
4.3 Berechnungen von Verformungskörpern mittels der Finiten- Elemente-Methode . . . . .	24
4.3.1 Erläuterung der durchgeführten Berechnungen . . . . .	25
4.3.2 Aufstellen von parameterabhängigen Funktionen . . . . .	27
<b>5 Konstruktion der Kraftaufnehmer</b>	<b>33</b>
5.1 Implementierte Sensorik . . . . .	33
5.2 Aufbau der Verformungskörper . . . . .	34

III

## Inhaltsverzeichnis

5.3 Montage der Kraftaufnehmer . . . . .	36
<b>6 Messeinrichtungen</b>	<b>39</b>
6.1 Darstellung statischer Kräfte . . . . .	39
6.2 Darstellung dynamischer Kräfte . . . . .	41
6.3 Statische Messungen an der 20 kN-Kraft-Normal-Messeinrichtung	42
6.3.1 20 kN-Kraft-Normal-Messeinrichtung . . . . .	42
6.3.2 Messwerterfassung . . . . .	43
6.3.3 Vibrometereinrichtung zur Messung der Verformung eines Kraftaufnehmers . . . . .	43
6.4 Dynamische Messungen am elektrodynamischen Schwingerreger	44
6.4.1 Elektrodynamischer Schwingerreger . . . . .	45
6.4.2 Messwerterfassung . . . . .	46
6.4.3 Vibrometereinrichtung zum dynamischen Messen der Verformung . . . . .	47
<b>7 Messungen</b>	<b>49</b>
7.1 Kalibrierung der Messeinrichtungen . . . . .	49
7.1.1 Ladungsverstärker des piezoelektrischen Kraftaufnehmers	49
7.1.2 DMS-Brückenverstärker . . . . .	51
7.1.3 Vibrometeraufbau . . . . .	52
7.1.4 Beschleunigungsmesskette . . . . .	52
7.2 Statische Messungen . . . . .	53
7.3 Dynamische Messungen . . . . .	55
<b>8 Diskussion der Messergebnisse</b>	<b>57</b>
8.1 Statische Messungen . . . . .	57
8.1.1 Vergleich der DMS mit dem piezoelektrischen Sensor . .	57
8.1.2 Wegmessung . . . . .	60
8.2 Dynamische Messungen . . . . .	61
8.2.1 Ermittlung der Eigenmasse . . . . .	61
8.2.2 Linearität der kraftdetektierenden Sensorik . . . . .	63
8.2.3 Dynamische Empfindlichkeiten von DMS und piezoelektrischem Sensor . . . . .	63
8.2.4 Wegmessung . . . . .	65
8.3 Vergleich der experimentell und numerisch gewonnenen Ergebnisse . . . . .	71
8.3.1 Resonanzfrequenzen . . . . .	71
8.3.2 Steifigkeit . . . . .	72
8.3.3 Diskussion der Abweichungen . . . . .	74
8.4 Zusammenfassung der Messergebnisse . . . . .	75

<b>9 Unsicherheitsbetrachtung</b>	<b>79</b>
9.1 Messunsicherheiten nach GUM . . . . .	79
9.2 Unsicherheitsbetrachtung der dynamischen Messungen . . . . .	80
<b>10 Zusammenfassung</b>	<b>85</b>
<b>11 Ausblick</b>	<b>87</b>
<b>Literatur</b>	<b>89</b>
<b>Danksagung</b>	<b>97</b>