
Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	2
1.2	Lösungsansatz und Zielsetzung	4
1.3	Systematischer Aufbau der Arbeit	6
2	Schaltnetzteile und Elektromagnetische Verträglichkeit	9
2.1	Sperrwandler	9
2.2	Elektromagnetische Verträglichkeit	14
2.2.1	Entstehung von Funkstörspannungen	15
2.2.2	Grenzwerte für Funkstörspannungen	17
2.3	Die Störproblematik im Sperrwandler	19
2.4	EMV-Maßnahmen	23
2.4.1	Systemtheoretische EMV-Maßnahmen	24
2.4.2	Passive Netzfilter	26
2.4.3	Schaltungsinterne Maßnahmen	32
2.5	Messtechnische Erfassung leitungsgebundener Störungen	36
2.5.1	Netzimpedanz	36
2.5.2	Netznachbildung	37
2.5.3	Separate Messung von Gleich- und Gegentaktstörungen	39
2.5.4	Funkstörmessempfänger	40
2.6	Messtechnische Charakterisierung eines EMV-Filters	41
2.6.1	Messung im 50 Ω -System	42
2.6.2	Messung bei realitätsnaher Stromquellenanregung	43
2.6.3	Alternatives Messverfahren mittels Vektor-Netzwerkanalysator	44

3 Grundlagen der Piezoelektrik	47
3.1 Piezoelektrischer Effekt	47
3.2 Mechanik und piezoelektrische Grundgleichungen	49
3.2.1 Mechanische Spannung	50
3.2.2 Dehnung	51
3.2.3 Hookesches Gesetz	51
3.2.4 Piezoelektrische Grundgleichungen	52
3.3 Piezoelektrische Keramiken	54
3.3.1 Harte und weiche Piezokeramiken	54
3.3.2 Bleifreie Piezokeramiken	54
3.4 Elektrisches Impedanzspektrum	55
3.4.1 Butterworth-Van Dyke-Ersatzschaltbild	56
3.4.2 Messtechnik	58
3.5 Piezoelektrische Kenngrößen	61
3.5.1 Elektromechanischer Kopplungsfaktor	61
3.5.2 Mechanische Güte	61
3.5.3 Curietemperatur	62
3.5.4 Frequenzkonstante	62
4 Auslegeskriterien für ein piezoelektrisches EMV-Filter	63
4.1 Funktionsweise des piezoelektrischen EMV-Filters	63
4.1.1 Filtermodell	65
4.1.2 Anwendungsgebiete für piezoelektrische EMV-Filter	69
4.2 Sperrwandler-Demonstrator und Messaufbau	70
4.3 Verwendeter piezoelektrischer Resonator	72
4.3.1 Materialauswahl	73
4.3.2 Dimensionierung der Resonatoren	75
4.4 Messtechnische Verifikation	76
4.4.1 Kenngrößen piezoelektrischer EMV-Filter	77
4.4.2 PEF als schaltungsinterne Maßnahme	78
4.4.3 PEF im Netzfilter	81
4.4.4 Temperaturabhängigkeit	84
4.4.5 Parallelschaltung von PEF	86
4.5 Sicherheitsrelevante Aspekte	88
4.5.1 Anforderungen an Kondensatoren der Klasse Y	89
4.5.2 Gehäuse und Isolationskoordination	90
4.5.3 Stoßspannungsprüfung	93
4.5.4 Mechanische Beanspruchungen	94
4.6 Kapitelzusammenfassung	96

5	Optimierung der Resonatorgeometrie	99
5.1	Rahmenbedingungen und Limitierungen der PEF-Optimierung	100
5.2	Analytische Berechnungsmethoden	102
5.2.1	Annahmen	102
5.2.2	Analytische Berechnung des Transversalschwingers	102
5.2.3	Weitere elementare Schwingungsmoden	107
5.2.4	Potentielle Resonatorgeometrien	111
5.3	Methode der Finiten Elemente	112
5.3.1	Entwurf piezoelektrischer Resonatoren mittels FEM-Simulation	115
5.3.2	Modellierung der Dämpfung	116
5.4	Bewertung und Optimierung der Resonatorgeometrien	117
5.4.1	Bewertung der Obertöne eines Transversalschwingers	117
5.4.2	Bewertung und Optimierung eines Plattenresonators (L2B4)	119
5.4.3	Weitere Plattenresonatoren und deren Parallelschaltung	122
5.5	Komplexe Resonatorgeometrien	126
5.5.1	Kombination mehrerer Plattenresonatoren (PESUF-4)	129
5.5.2	Kombination mehrerer Transversalschwinger (PESUF-3)	129
5.6	Kapitelzusammenfassung	130
6	Validierung des piezoelektrischen EMV-Filters	133
6.1	Fertigung der piezoelektrischen EMV-Filter	133
6.2	Messtechnische Validierung im Sperrwandler	136
6.3	Temperaturabhängigkeit	141
6.4	Auswirkungen auf die Dimensionierung eines Netzfilters	141
6.5	Kapitelzusammenfassung	148
7	Nachführung der Schaltfrequenz	151
7.1	PEF mit Sekundärelektrode	152
7.1.1	Fertigung des Demonstrators	154
7.1.2	Lastabhängigkeit des resonanten Verhaltens	155
7.1.3	Charakterisierung der Spannungsübertragungsfunktion	158

7.2	Oszillatoren mit piezoelektrischen Resonatoren	160
7.2.1	Übersicht ausgewählter Oszillatortopologien	161
7.2.2	Dimensionierung der Oszillatorschaltungen	165
7.2.3	Implementierung der Oszillatorschaltungen	169
7.2.4	Charakterisierung des temperaturabhängigen Verhaltens	171
7.2.5	Realisierung eines SNT mit Frequenznachführung	172
7.3	Kapitelzusammenfassung	173
8	Zusammenfassung und Ausblick	175
8.1	Zusammenfassung der Inhalte und Ergebnisse	175
8.2	Ausblick	179
Anhang A: Messtechnische Bestimmung der Einfügungsdämpfung mit dem VNA		181
Anhang B: Analytische Berechnung der cm-Einfügungsdämpfung		185
Anhang C: Technische Daten der aufgebauten Prototypen und Demonstratoren		187
Anhang D: Weiterführende Informationen zu den Oszillatorschaltungen		191
Literaturverzeichnis		195