



Michael Kühn (Autor)

# Auswirkungen der Kontaktierung von isotropen und anisotropen Materialien auf die elektromagnetische Schirmdämpfung von Gehäusen

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

**ENERGIE & NACHHALTIGKEIT**  
Elektromobilität & Batterietechnologie

Michael Kühn

**Auswirkungen der Kontaktierung von isotropen und anisotropen Materialien auf die elektromagnetische Schirmdämpfung von Gehäusen**

Elektrische  
Energiespeichersysteme



Nachhaltige  
CO<sub>2</sub>-Kreisläufe



Elektromobilität &  
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8872>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>vii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Definition der Elektromagnetischen Verträglichkeit . . . . .	1
1.2. Herausforderungen durch die Elektromobilität . . . . .	2
1.3. Anforderungen an Schirmgehäuse im Automobilbereich . . . . .	4
1.4. Auftretende Störgrößen im Fahrzeug . . . . .	6
1.5. Zielsetzung . . . . .	8
1.6. Inhaltsübersicht . . . . .	9
<b>2. Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1. Die Maxwell'schen Gleichungen . . . . .	11
2.1.1. Ladungen als Ursache des elektrischen Feldes . . . . .	11
2.1.2. Quellenfreiheit des magnetischen Feldes . . . . .	12
2.1.3. Induktionsgesetz . . . . .	12
2.1.4. Durchflutungsgesetz . . . . .	13
2.2. Definition Nahfeld/Fernfeld . . . . .	14
2.2.1. Fernfeld . . . . .	15
2.2.2. Nahfeld . . . . .	15
2.3. Die Materialgleichungen . . . . .	16
2.4. Verhalten von elektrischen und magnetischen Feldern an Grenzflächen . .	17
2.5. Skin-Effekt (Eindringtiefe) . . . . .	19
2.6. Schirmdämpfung . . . . .	19
2.6.1. Definition Schirmfaktor und Schirmdämpfung . . . . .	20
2.6.2. Schirmung von statischen elektrischen Feldern . . . . .	21
2.6.3. Schirmung von statischen magnetischen Feldern . . . . .	22
2.6.4. Schirmdämpfung von quasistationären Feldern . . . . .	23
2.6.5. Schirmdämpfung von elektromagnetischen Wellen . . . . .	25
2.7. Analytische Modelle zur Prädiktion der Schirmdämpfung . . . . .	25
2.7.1. Parallelplattenschirm nach Kaden . . . . .	25
2.7.2. Schirmdämpfung inhomogener Metallgehäuse beliebiger Kontur .	28
2.7.3. Modell nach Moser für niederfrequente Magnetfelder . . . . .	29

2.7.4.	Impedanzkonzept von Schelkunoff . . . . .	30
2.7.5.	Erweitertes Impedanzkonzept . . . . .	32
<b>3.</b>	<b>Klassifikation und Messverfahren auf Materialebene</b>	<b>37</b>
3.1.	Klassifikation der Materialien . . . . .	37
3.1.1.	Aluminium . . . . .	37
3.1.2.	Polyamid 6 . . . . .	38
3.1.3.	Polyamid 6.6 . . . . .	39
3.1.4.	Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) . . . . .	39
3.1.5.	CFK-Tapes . . . . .	41
3.1.6.	Carbon Nano Tube (CNT) verstärkte Kunststoffe . . . . .	41
3.2.	Messverfahren für die elektrische Leitfähigkeit . . . . .	43
3.3.	Dielektrische Spektroskopie . . . . .	45
3.3.1.	Kapazitive Messungen . . . . .	45
3.3.2.	Koaxiale TLM . . . . .	46
3.3.3.	Koaxiale Reflektometrie . . . . .	46
3.4.	Messverfahren für die Schirmdämpfung von Materialien . . . . .	47
3.4.1.	Transmission Line Holder-Messverfahren . . . . .	47
3.4.2.	Spulenmethode in Anlehnung an IEEE-299 . . . . .	62
<b>4.</b>	<b>Analyse und Auswertung auf Materialebene</b>	<b>65</b>
4.1.	Messung der elektrischen Leitfähigkeit . . . . .	65
4.2.	Messung der Permittivität . . . . .	67
4.3.	Messergebnisse Schirmdämpfung mit dem TLH-Verfahren . . . . .	69
4.3.1.	TLH nach ASTM D4935-10 . . . . .	69
4.3.2.	TEM-2000 . . . . .	70
4.4.	Messergebnisse der magnetischen Schirmdämpfung (Spulenmethode) . . . . .	72
4.5.	Analytische Berechnung der magnetischen Schirmdämpfung . . . . .	74
4.5.1.	Isotrope Materialien . . . . .	74
4.5.2.	Anisotrope Materialien . . . . .	76
4.6.	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	80
<b>5.</b>	<b>Vorbereitungen auf Gehäuseebene</b>	<b>83</b>
5.1.	Schirmdämpfungsmessverfahren . . . . .	83
5.1.1.	Messverfahren nach DIN EN 61000-5-7 . . . . .	83
5.1.2.	Diskussion der Schirmdämpfungsanforderung . . . . .	86
5.2.	Einflussfaktoren auf die Schirmdämpfung . . . . .	87
5.2.1.	Kontaktierung der Gehäuseteile . . . . .	87
5.2.2.	Resonanzstelle durch Kontaktierung . . . . .	88
5.2.3.	Messverfahren für Gehäusewiderstand und -impedanz . . . . .	91
5.3.	Impedanz- und Schirmdämpfungsmessvorbereitung . . . . .	93
5.3.1.	Aufbau Demonstratorgehäuse . . . . .	93
5.3.2.	Elektrische Feldquelle für Gehäusemessungen . . . . .	94

---

5.3.3.	Anpassung des Schirmdämpfungsmessverfahrens . . . . .	97
5.3.4.	Übersicht der Gehäusemessungen . . . . .	98
5.4.	Abschätzung der Gehäuseimpedanz und -schirmdämpfung . . . . .	99
5.4.1.	Analytische Berechnung der Gehäuseimpedanz . . . . .	99
5.4.2.	Simulationsmodell zur Bestimmung der Gehäuseimpedanz . . . . .	102
5.4.3.	Numerische Berechnung der Gehäuseimpedanz . . . . .	105
5.4.4.	Simulationsmodell zur Bestimmung der Schirmdämpfung . . . . .	106
<b>6.</b>	<b>Analyse und Diskussion auf Gehäuseebene</b>	<b>107</b>
6.1.	Widerstands- und Impedanzmessungen an den Demonstratorgehäusen . . .	107
6.1.1.	Induktivitätsbestimmung . . . . .	107
6.1.2.	Messung des Gehäusewiderstands . . . . .	109
6.1.3.	Messung der Gehäuseimpedanz . . . . .	110
6.1.4.	Vergleich mit den analytischen und numerischen Berechnungen . . .	115
6.2.	Auswertung der Schirmdämpfungsmessungen . . . . .	118
6.2.1.	Aluminiumgehäuse . . . . .	118
6.2.2.	CFK-Gehäuse . . . . .	121
6.3.	Einfluss der Parameter . . . . .	122
6.3.1.	Variation des Abstands . . . . .	122
6.3.2.	Anzahl der Kontaktierungspunkte . . . . .	123
6.3.3.	Korrelation Impedanz- und Schirmdämpfungsmessung . . . . .	124
6.4.	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	128
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
7.1.	Zusammenfassung . . . . .	131
7.2.	Ausblick . . . . .	134
<b>A.</b>	<b>Spulenmethode</b>	<b>135</b>
<b>B.</b>	<b>Messergebnisse elektrische Leitfähigkeit und Permittivität</b>	<b>137</b>
<b>C.</b>	<b>Messergebnisse TEM-2000</b>	<b>141</b>
<b>D.</b>	<b>Technische Zeichnungen Demonstratorgehäuse</b>	<b>145</b>
<b>E.</b>	<b>Mess- und Simulationsergebnisse monokonische Antenne</b>	<b>149</b>
<b>F.</b>	<b>Mess- und Simulationsergebnisse Gehäuseimpedanz</b>	<b>153</b>
<b>G.</b>	<b>Mess- und Simulationsergebnisse Schirmdämpfung</b>	<b>163</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>179</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>181</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>187</b>