
Inhalt

Vorwort	9
Einleitung	11
1 Verbindung zum Messobjekt – passive Tastköpfe	15
1.1 Sicherheitskategorien – Anwendungsbereiche in Niederspannungsnetzen bis 1000 V	17
1.2 Passiver Standardtastkopf	18
1.3 Impedanzverlauf	19
1.4 Das Tastkopfkabel – es nimmt wesentlichen Einfluss auf die Tastkopfparameter	20
1.5 Die Eigenansteigszeit des Tastkopfes	22
1.6 Bandbreite aus Sicht der Messung von Impulsflanken	24
1.7 Bandbreite aus Sicht der Messung von Sinus-Signalen – die 3-dB-Bandbreite	24
1.8 Der individuelle Tastkopfabgleich für den passiven Standardtastkopf	24
1.8.1 Der LF-Abgleich	24
1.8.2 Der HF-Abgleich	27
1.9 Passiver Hochspannungstastkopf Teilverhältnis 100:1 und 1000:1	29
1.9.1 Der LF und HF-Abgleich am passiven Hochspannungstastkopf	32
1.9.2 Der DC-Abgleich am passiven Hochspannungstastkopf	32
1.10 Passiver Tastkopf zur Messung an 50-Ohm-Systemen, Breitbandtastkopf	32
1.11 Der Durchgangsabschluss am vermeintlich hochohmigen Oszilloskopeingang	37
1.12 E- und H-Feld-Sonden, EMV-Fehlersuche	38
2 Verbindung zum Messobjekt – aktive Tastköpfe	42
2.1 Aktiver Tastkopf – massebezogen	43
2.1.1 Eigenschaften aktiver massebezogener Tastköpfe aus dem Profisegment	44
2.2 Aktiver Differenz-Tastkopf aus dem Profisegment	46
2.2.1 Differenz-Tastkopf im Profisegment – erweiterte DM-Offset Einstellungen	50
2.2.2 Differenz-Tastkopf im Profisegment – erweiterte CM-Offset Einstellungen	51
2.2.3 Bandbreite bzw. Eigenansteigszeit von hochwertigen Differenz-Tastköpfen	55
2.2.4 Aktive Differenz-Tastköpfe - Erweiterung des zulässigen Spannungsbereichs durch Aufsteck-Vorteiler	55
2.2.5 Der Abgleich eines Aufsteck-Vorteilers	58
2.3 Aktive Differenz-Tastköpfe aus dem Niedrigpreissegment	59
2.4 Hochspannungs Differenz-Tastkopf	62
2.4.1 Offset Abgleich	66
2.5 Stromzangen – Strommessungen mit dem Oszilloskop	66
2.5.1 Grundlegende Hinweise zur Handhabung von Stromzangen	70
3 Das Vertikalsystem – Frontend und Analog-Digital-Converter	71
3.1 Frontend des analogen Oszilloskops	71
3.2 Frontend des digitalen Oszilloskops	73

3.3	Der Grundprozess der Analog-Digital-Wandlung	74
3.4	Statische Fehler bei der Digitalisierung	74
3.5	Die vertikale Auflösung – Reduzierung aufgrund unerwünschter Effekte	75
3.5.1	Quantisierungsrauschen – der elementare dynamische Parameter	76
3.5.2	Wechselwirkung zwischen Quantisierungsrauschen und thermischem Rauschanteil	77
3.5.3	Einflüsse im Frontend durch Harmonische höherer Ordnung – SFDR	79
3.5.4	Das umfassende Signal-Rauschverhältnis – SINAD	82
3.5.5	Die effektive Auflösung – ENOB	84
3.6	Die 8-Bit-Nennauflösung in der Praxis	87
3.7	Die Anforderung – mehr Flexibilität in der vertikalen Auflösung	88
3.8	Die Stellschrauben zur Steigerung des SINAD	90
3.9	Ansätze zur Reduzierung von Quantisierungsrauschen – Filterkonzepte	91
3.9.1	Gleitende Mittelwertbildung – Steigerung der effektiven Converter Resolution	93
3.9.2	Oversampling und Mittelwertbildung – High-Resolution-Modus	93
3.9.3	Oversampling und erweitertes Filterkonzept – High-Definition-Modus	95
3.10	Dezimation aus Sicht der vertikalen Auflösung – Reduzierung des Datenvolumens	99
4	Das Horizontalsystem – Sampling und Akquisition	101
4.1	Horizontalsystem im analogen Oszilloskop	101
4.2	Die Digitalisierung der horizontalen Achse	102
4.3	Die ADC-Taktrate – horizontale Auflösung	103
4.4	Das Grundkonzept – präsentiert am digitalen Speicheroszilloskop	104
4.5	Die horizontale Auflösung von konventioneller Bildröhre oder Display	105
4.6	Grundsätzliche Zusammenhänge zwischen Erfassungszeit und Rekordlänge	106
4.7	Die Blindzeit – der Akquisitionszyklus	109
4.8	Die Weiterentwicklungen des Grundkonzepts	112
4.9	Die Akquisition – Zyklen der Echtzeitverarbeitung und Nichtechtzeitverarbeitung	114
4.10	Konzepte zur Reduzierung der Blindzeit – Optimierung der Zyklen	116
4.11	Abhängigkeiten zwischen einstellbarer Rekordlänge und konstantem ADC-Sampling	118
4.12	Eine zusammenfassende Darstellung der Akquisitionsparameter	121
4.13	Die verbreiteten Dezimationsformen – aus Sicht der horizontalen Auflösung	122
4.14	Das Gegenstück zur Dezimation – Verdichtung der Samples	126
4.15	Rekonstruktion des Signalverlaufs durch Interpolation	127
4.16	Rekonstruktion durch lineare Interpolation	128
4.17	Rekonstruktion durch Interpolation mit Funktion $\sin(x)/x$	129
4.18	Rekonstruktion durch Sample-Hold	130
4.19	Steigerung der Samplingrate durch Verdichtung der Samples	131
4.20	Steigerung der Samplingrate – verdichtende Interpolation mit Funktion $\sin(x)/x$	131
4.21	Steigerung der Samplingrate – lineare Interpolation	133
4.22	Equivalent-Time Sample, ETS-Modus	133
5	Trigger-System	135
5.1	Die Funktionseinheiten des Triggersystems	135
5.2	Digitales Triggersystem für hochwertige Konzepte	137
5.3	Die Systemgrenzen des digitalen Trigger	139
5.4	Pre-Trigger Funktion und blindzeitfreier Erfassungszyklus	141
5.5	Trigger-Formen – erweiterte Schwellwertbedingungen	142
5.5.1	EDGE	142

5.5.2	RUNT	144
5.5.3	WINDOW	146
5.5.4	SLEW-RATE, Transition Trigger	148
5.5.5	TIMEOUT	150
5.5.6	WIDTH (Duration)	150
5.5.7	GLITCH	152
5.5.8	INTERVAL	152
5.5.9	Serial PATTERN – Triggern auf Bitmuster	154
6	Frequenzanalysefunktion – FFT	156
6.1	Der Zusammenhang zwischen Zeit- und Frequenzbereich	156
6.2	Die klassische Methode im Frequenzbereich – der Spektrumanalysator	157
6.3	Grundlagen der FFT aus Sicht der Praxis	158
6.4	Die Umsetzung der FFT im Oszilloskop	161
6.5	Blindzeit – Wechselwirkungen der FFT	169
6.6	Geschwindigkeitsoptimierung der FFT bei hochwertigen Konzepten	170
6.7	Fenstertyp – Bedeutung für die Praxis	172
6.8	Frequenzanalyse durch Oszilloskop mit FFT versus Spektrumanalyzer	172
6.9	Gated FFT-Funktion	176
7	Praxis-Demonstrationen – „Hands on Workshop“	178
7.1	Der Umgang mit Taktsignalen – Einflussfaktor Tastkopfimpedanz	179
7.1.1	Hintergrundwissen – Belastung der Signal-Quelle durch den Tastkopf	179
7.1.2	Zwei unterschiedliche Szenarien zum Quell- und Lastwiderstand	180
7.1.3	Hintergrundwissen – Einfluss des Impedanzverlaufs auf das dargestellte Frequenzspektrum	181
7.1.4	Praktische Demonstration – Einfluss des Impedanzverlaufs auf das Frequenzspektrum	185
7.1.5	Einflussfaktor Tastkopfimpedanz reduzieren – Auswahlstrategie und Faustformel	188
7.2	Der Umgang mit Taktsignalen – Einflussfaktor „Sünden“ beim Masseanschluss	190
7.2.1	Die parasitären Anteile des Masseanschlusses – konkret vermessen	190
7.2.2	Die Auswirkungen der parasitären Anteile auf die Messergebnisse	192
7.2.3	Fotoserie zum Thema (Masse)anschluss und Anschlusszubehör von Tastköpfen	197
7.2.4	Flachbandleitung zum Tastkopf – Heranführen von Signalen aus erschwert zugänglichen Stellen	201
7.3	Die Bandbreite von Oszilloskop und Tastkopf	205
7.3.1	Der Umgang mit Taktsignalen – Einflussfaktor Oszilloskop-Bandbreite	208
7.4	Die Akquisition und Einstellung der Dezimation	209
7.4.1	Hintergrundwissen Dezimation	209
7.4.2	Praktisches Messbeispiel zu verschiedenen Einstellungen der Dezimation	209
7.5	Wahl der Abtastrate – Aliasing	214
7.5.1	Hintergrundwissen zur Entstehung von Aliasing	214
7.5.2	Praktische Messbeispiele zur Entstehung von Aliasing	218
7.6	Die Signalrekonstruktion – Auswahl der Interpolation	221
7.6.1	Hintergrundwissen zur Rekonstruktion des Signalverlaufs	221
7.6.2	Praktische Messbeispiele zu verschiedenen Einstellung der Rekonstruktion	222
7.6.3	Praktische Messbeispiele zu Einstellungen der Verdichtung von Stützpunkten	224
7.7	Die Blindzeit – Auswirkungen erkennen	227
7.7.1	Blindzeit Anteil – ermittelt aus der Performanceanzeige am Display	230
7.7.2	Blindzeit Anteil – ermittelt durch Messung der Triggerwiederholrate	231

7.7.3	Blindzeit Anteil – Demonstration anhand eines Testsignals	231
7.7.4	Auswirkungen der Blindzeit und Gegenmaßnahmen	234
7.7.5	History Mode – bewirkt eine Reduzierung der Blindzeit	238
7.8	Die Wirksamkeit von Methoden zur Steigerung der vertikalen Auflösung	241
7.8.1	Der High-Resolution Mode	241
7.8.2	Demonstration von Einstellgrenzen des High-Resolution Modus	243
7.8.3	Erweitertes Filterkonzept zur Steigerung der vertikalen Auflösung	243
7.9	Flexible Messkurvenanordnung unter Beibehaltung der Skalierung – Smart Grid	248
7.10	Mehr Transparenz durch leistungsfähige Grafikfunktionen	251
7.11	FFT-Anwendung – EMV-Voruntersuchungen	255
7.11.1	Vorbereitung der Messung und Sicherheitshinweis	255
7.11.2	Vereinbarungen als Basis zur Bewertung der Messergebnisse	255
7.11.3	Praktische Demonstration der leitungsgebunden Störaussendungen eines Schaltnetzteils	258
7.12	FFT-Anwendung Harmonische Verzerrungen	262
7.13	FFT-Anwendung: Kanalleistung	268
7.14	FFT-Anwendung Gating	271
7.15	Der Umgang mit Taktsignalen – Einflussfaktor Sampling	275
7.15.1	Hintergrundwissen zur Erfassung von Taktwiederholraten	275
7.15.2	Hintergrundwissen zur Erfassung von Impulsflanken	278
7.15.2.1	Die fundamentale Frequenz einer Flanke	280
7.15.3	Die Wahl der Samplingrate zur korrekten Erfassung einer Flanke	281
7.15.4	Praktische Messung der Anstiegsflanke	283
7.15.5	Eine Systemgrenze des Oszilloskops – Eigenanstiegszeit	288
7.15.6	Untersuchung der Anstiegsflanke auf ihr Frequenzspektrum	288
7.16	Die Anwendung von erweiterten Triggerformen – clever Triggern	292
7.16.1	Stabile Darstellung von nicht periodischen Signalverläufen – Triggerform – WIDTH	293
7.16.2	Trigger bei Abweichungen in der Impulsbreite bzw. dem Tastverhältnis -Triggerform – WIDTH	299
7.16.3	Trigger auf Grenzen zur Einhaltung von definierten Logikpegelbereichen – Triggerform – RUNT	299
7.16.4	Triggerauswahl auf maximalen oder minimalen Logikpegel im Signalverlauf – Triggerformen EDGE und RUNT	304
7.16.5	Triggerauswahl in Abhängigkeit von der Anstiegszeit einer Flanke – Triggerform SLEW-RATE –	306
7.16.6	Überwachung der Flankenzeit bei Taktsignalen – SLEW-RATE outside –	309
7.16.7	Überwachung der Ein- bzw. Ausschaltvorgänge einer Spannungsversorgung – WINDOW –	310
7.16.8	Überwachung einer Spannungsversorgung am Beispiel eines Kfz-Bordnetzes – WINDOW –	312
7.16.9	Triggern auf Taktausfälle – TIMEOUT	313
7.16.10	Triggern auf Veränderungen in der Periodendauer – INTERVAL –	314
7.16.11	Gezielter Trigger auf Störimpulse – GLITCH –	318
7.17	CAN Bus – Trigger am seriellen Bus und Datenanalyse	320
7.17.1	Potentiale auf der Busleitung – die physikalische Ebene im OSI Schichtenmodell	320
7.17.2	Praktische Messbeispiele auf der Busleitung, CAN-C Bus (OSI-Schicht 1)	324
7.17.3	Aufbau des CAN-Bus Frames – die höhere Protokoll-Ebene im OSI Schichtenmodell	326
7.17.4	Praktische Messbeispiele, Protokollanalyse mit dem Oszilloskop, CAN-C Bus (OSI Schicht 2)	328
8	Mixed Signal Oszilloskop – MSO	331
8.1	Analoge und digitale Eingangskanäle – die Unterschiede	331

8.2	Verbindung zum Messobjekt – Digital Probe	333
8.3	Sampling und Akquisition der digitalen Kanäle	336
8.3.1	Asynchrone oder synchrone Erfassung – Sampling	339
8.3.2	Akquisition – Speichertiefe, Rekordlänge	340
8.4	Die Triggermöglichkeiten der digitalen Kanäle	345
8.4.1	EDGE	347
8.4.2	WIDTH (Duration)	348
8.4.3	TIMEOUT	348
8.4.4	DATA2CLOCK	349
8.4.5	SERIAL PATTERN	351
8.4.6	PATTERN (parallele Gruppierung)	353
8.4.7	STATE (paralleler Bus)	353
8.5	Die wichtigsten Fakten zu den Einstellungen des MSO-Betriebs	355
8.6	Praxisdemonstration – Zusammenwirken von digitaler und analoger Auswertung	355
A1	Hintergrundwissen – Filterkonzepte zur Reduzierung von Quantisierungsrauschen	359
A1.1	Das Konzept des 1-Bit-Wandlers	359
A1.2	Der Inhalt des digitalen Bitstroms – die Rekonstruktion des Ursprungssignals	362
A1.3	Grundlegende Überlegungen zur Energiedichte im Bitstrom bzw. Bitmuster	363
A1.4	Die Methoden zur Steigerung der effektiven Converter-Resolution am Beispiel einer 1-Bit-Wandler Architektur	364
A1.5	Oversampling –Verteilung der Energiedichte von Quantisierungsrauschen	365
A1.6	Das Filterkonzept, Noise-Shaping – Umsetzung am Beispiel der Delta-Sigma Architektur	367
	Zusammenfassung und Fazit	369
A2	Eigenschaften Checkliste	371
A3	Zusammenstellung der verwendeten Formeln	373
Index	377