



saur

Michael Dickreiter

Handbuch der Tonstudiotechnik

Band 2

Analoge Schallspeicherung, analoge Tonregieanlagen,
Hörfunk-Betriebstechnik, digitale Tontechnik, Tonmeßtechnik

Herausgegeben von der
Schule für Rundfunktechnik

5., völlig neubearbeitete und ergänzte Auflage

K·G·Saur
München·New York·London·Paris 1990

Herausgeber:
Schule für Rundfunktechnik
Aus- und Fortbildungsinstitut der
deutschen Rundfunk- und Fernseh-Anstalten
Wallensteinstr. 121, 8500 Nürnberg 80

Für die in diesem Buch enthaltenen Angaben
wird keine Gewähr hinsichtlich der Freiheit
von gewerblichen Schutzrechten
(Patente, Gebrauchsmuster, Warenzeichen) übernommen.
Auch die in diesem Buch wiedergegebenen Gebrauchsnamen,
Handelsnamen und Warenbezeichnungen
dürfen nicht als frei zur allgemeinen Benutzung
im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung betrachtet werden.
Die Verletzung dieser Rechte
ist im Rahmen der geltenden Gesetze strafbar
und verpflichtet zu Schadenersatz.

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Handbuch der Tonstudiotechnik / hrsg. von d. Schule für
Rundfunktechnik. Michael Dickreiter. – München ; New York ;
London ; Paris : Saur
ISBN 3-598-10588-6
NE: Dickreiter, Michael [Bearb.]; Schule für Rundfunktechnik
'Nürnberg'

Bd. 2. Analoge Schallspeicherung, analoge Tonregieanlagen,
Hörfunk-Betriebstechnik, digitale Tontechnik,
Tonmeßtechnik. – 5., völlig Neubearb. u. erg. Aufl. – 1990
ISBN 3-598-10590-8

Gedruckt auf säurefreiem Papier

© 1990 by K. G. Saur Verlag GmbH & Co. KG, München
(A member of the international Butterworth Group, London)
Printed in the Federal Republic of Germany
Alle Rechte vorbehalten · All rights strictly Reserved.
Jede Art der Vervielfältigung ohne Erlaubnis
des Verlages ist unzulässig

Druck: grafik + druck, München
Binden: Thomas-Buchbinderei GmbH, Augsburg
Printed in the Federal Republic of Germany

ISBN 3-598-10588-6 (Gesamt)
ISBN 3-598-10590-8 (Band 2)

Vorwort

Mit dem vorliegenden 2. Band der 5., völlig neubearbeiteten und ergänzten Ausgabe dieses Handbuchs wird die Darstellung der professionellen Tonstudioteknik zum Abschluß gebracht. Während Band 1 vorwiegend Themen behandelt, die sich um die Aufnahmetechnik gruppieren, ist Band 2 weitgehend den Geräten und Anlagen der Tonstudioteknik gewidmet: Analoge Schallaufzeichnung, Tonregieanlagen, Hörfunk-Betriebstechnik, Grundlagen der digitalen Tontechnik und der Meßtechnik sind die Themen, ergänzt durch ein englisch-deutsches Glossar. Gegenüber den bisherigen Auflagen wurde auf die Kapitel über Sychrontechnik, Schaltungstechnik und Fernsehtechnik verzichtet, dafür aber ein umfangreiches Kapitel über digitale Tontechnik hinzugefügt. Bei der Bearbeitung der 5. Auflage wurde neben der vollständigen Aktualisierung mehr Gewicht auf grundsätzliche Zusammenhänge und Fakten gelegt, firmenspezifische Lösungen treten demgegenüber in den Hintergrund. Beschrieben wird die professionelle Technik, die in den öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten Deutschlands und in Sparten mit vergleichbar hohen Qualitätsansprüchen genutzt wird.

Die technische Entwicklung hat sich beschleunigt, einerseits durch die Einführung der Digitaltechnik, andererseits aber auch in der Analogtechnik durch die qualitativen Herausforderungen der Digitaltechnik. In welchem Umfang und wann digitale Techniken analoge Techniken ersetzen werden, ist derzeit schwer vorherzusagen. Sicher ist, daß analoge Techniken wegen ihres hohen Qualitätsstandards und ihrer Verbreitung noch lange konkurrenzfähig bleiben werden. Bei Fertigstellung dieses Buchs, mehr noch während der Planung und Erstellung des Manuskripts, spielen digitale Techniken erst im Bereich der Schallaufzeichnung, der Schallübertragung und der Effektgeräte sowie bei Steuerungsaufgaben eine Rolle. Dies spiegelt sich in Kapitel 10, das diesem Thema gewidmet ist, wider.

Meinen ganz herzlichen Dank möchte ich denen sagen, die an diesem Buch mitgearbeitet haben: Armin Vögeding (Agfa) für die Durchsicht der Abschnitte über magnetische Schallaufzeichnung in Kapitel 7, Jürgen Plogstedt (Barco-EMT) für die Durchsicht der Abschnitte über mechanische Schallaufzeichnung in Kapitel 7 und 11 und Christopher Vacano (Barco-EMT) für die Überarbeitung des englisch-deutschen Glossars. An Kapitel 9 haben als Autoren im Hause SRT mitgearbeitet: Cord Meinhard (9.2 Schaltraum), Leopold Kammerer (9.3 Sendekomplex und Schallaufnahme), Rudolf Antusch (9.6.4 Funkverbindungen bei Außenübertragungen), Werner Huder (9.7 Tonleitungstern der Rundfunkanstalten), Rolf Nusser (Zusatzinformationen im Hörrundfunk) und Walter Frohneberg (9.10 Arbeitssicherheit). Ein ganz besonderer Dank gilt Manfred Dittmar (SRT), Autor von Kapitel 10 über die Grundlagen der digitalen Tontechnik, für seine Mitarbeit. Bei der Durchsicht der Manuskripte waren mit Korrekturen und ergänzenden Hinweisen behilflich meine

Vorwort

Kollegin Monika Gerber und meine Kollegen Rudolf Kalb, Cord Meinhard und Lothar Lechler. Schließlich bin ich dem Verlag K. G. Saur verbunden für die Geduld und die gute Zusammenarbeit.

Nürnberg, im Januar 1990

Michael Dickreiter

Inhalt

7. Analoge Schallspeicherung	1
<i>7.1 Magnetische Schallspeicherung</i>	1
7.1.1 Grundlagen des Magnetismus	1
Magnetisches Feld	1
Magnetische Induktion	3
Hysteresisschleife	4
7.1.2 Magnettonverfahren	6
Einführung	7
Magnettonbänder	8
Maße und Bandgeschwindigkeiten, 8 – Träger, 9 – Beschichtung, 11	
Aufzeichnungsvorgang	12
Aufzeichnung mit HF-Vormagnetisierung, 15 – Selbstentmagne-	
tisierungsverluste, 17	
Elektroakustische Eigenschaften von Bändern	18
Einfluß des Vormagnetisierungsstroms, 18 – Vormagnetisierungs-	
strombedarf und Arbeitspunkt, 20 – Bezugspegel, 21 – Frequenz-	
gang, 21 – Aussteuerbarkeit, 21 – Empfindlichkeit, 22 – Nichtlineare	
Verzerrungen, 22 – Jungfräuliches Rauschen und Betriebsrauschen,	
22 – Gleichfeldrauschen und Modulationsrauschen, 23 – Stör-	
spannungsabstand, 23 – Kopiereffekt und Echolöschung, 24 – Heim-	
ton- und Kassettengeräte, 26	
Wiedergabevorgang	26
Abstandsverluste, 28 – Spaltverluste, 28	
Entzerrung des Frequenzgangs	29
Löschvorgang	34
7.1.3 Systeme zur Rauschverminderung	36
Telcom-Verfahren	37
Dolby-Verfahren	41
7.1.4 Schnittbearbeitung von Bändern	43
Bandschnitt	43
Kennzeichnung von Bändern	44
Arbeitsverfahren beim Schnitt von Bändern	44
Schnitt von Sprachaufnahmen, 45 – Schnitt von Musikaufnahmen, 47 –	
Allgemeine Schnittverfahren, 47 – Schnitt bei Hörspielproduktionen	
und Musikmontagen, 48 – Schnitt von Mehrspuraufnahmen, 48 –	
Schnittlose Fehlerkorrektur 49	

7.1.5 Studio-Magnettonanlagen	49
Studio-Magnettonlaufwerke	51
Bandantrieb, 51 – Tonhöenschwankungen, 51 – Schlupf, 52 – Bremsen, 53 – Bandführung, 53 – Spulen, 54	
Magnettonköpfe	54
Sprechkopf, 54 – Hörkopf, 55 – Löschkopf, 55	
Mehrspur-Magnettonanlagen	56
Reportage-Magnettongeräte	56
Aufzeichnung von Mono- und Stereosignalen	57
7.2 <i>Mechanische Schallspeicherung</i>	59
7.2.1 Aufzeichnung	60
Mono- und Stereoaufzeichnung	60
Lichtbandbreite	62
Schneidkennlinien	63
7.2.2 Plattenherstellung	65
Lackplatten-Schneidverfahren	65
DMM-Schneidverfahren	66
7.2.3 Wiedergabe	67
Abtastsysteme	67
Mechanischer Aufbau und Wirkungsweise, 67 – Abtastnadeln und Auflagekraft, 69	
Tonarm	70
Geometrische Abtastverzerrungen	71
Spurverzerrungen bei Tiefenschrift, 72 – Klemmverzerrungen bei Seitenschrift, 72 – Spurverzerrungen bei Seitenschrift, 73 – Verzerrungen durch den vertikalen Spurfehlerwinkel, 73	
Laufwerk	74
Verstärker	75
Normen	76
Magnetische Schallspeicherung	76
Mechanische Schallspeicherung	77
Pflichtenhefte und Richtlinien	78
Literatur	79
 8. Analoge Tonregieanlagen	 81
8.1 <i>Historische Entwicklung</i>	84
8.2 <i>Aufbau einer Tonregieanlage</i>	85
8.3 <i>Leitungsführung und Anpassung</i>	88
8.3.1 Symmetrie und Unsymmetrie	89
8.3.2 Schirmung	90
8.3.3 Kabellänge und Kabelführung	91

8.3.4 Zusammenschaltung unterschiedlicher Ein- und Ausgangsschaltungen .	93
8.3.5 Erdung	94
8.3.6 Anpassung	96
8.4 Leitungsverbindungen	98
8.4.1 Klinken	98
8.4.2 Kreuzschienenverteiler	102
8.4.3 Steckverbindungen	105
8.4.4 Schalter	107
8.5 Mikrofonverstärker	108
8.5.1 Verstärkungseinstellung	110
8.5.2 Frequenzgang	111
8.5.3 Störpegel und Aussteuerungsfestigkeit	112
8.5.4 Mikrofon-Trennverteiler	113
8.5.5 Kommandoverstärker	114
8.6 Anschluß elektrischer Musikanlagen	114
8.6.1 Sicherheit und Anschlußtechnik	115
Schutztrennung	116
Modulationstrennübertrager	116
8.6.2 Brummstörungen	119
Brummstörungen bei Verwendung eines Netz-Trenntransformators	119
Brummstörungen durch Massenschleifen	119
Brummstörungen durch Mehrfacherdung	120
8.7 Pegelsteller	122
8.7.1 VCA- und Servomotorpegelsteller	124
8.7.2 Überblendregler	125
8.7.3 Elektronische Blender	126
8.8 Knotenpunkte	127
8.8.1 Knotenpunkte mit Spannungsanpassung	127
8.8.2 Knotenpunkte mit Stromanpassung	128
Knotenpunktverstärker	131
8.9 Hilfssummen	133
8.9.1 Schaltungen für künstliche Verhallungen	136
8.9.2 Schaltungen für Einspielwege	139
8.10 Spezial- und Universalverstärker	140
8.10.1 Spannungsverstärker	141
Aufholverstärker	143
Leitungsverstärker	143
Trennverstärker	143

8.10.2 Universalverstärker	145
Pegelverstärker	147
Knotenpunktverstärker	147
Trennverstärker	148
8.10.3 Anpaßverstärker	149
8.10.4 Leistungsverstärker	150
8.11 <i>Akustische und optische Signalüberwachung</i>	150
8.11.1 Einrichtungen und Kontrollpunkte für Abhören	151
Abhöreinheit	152
Lautstärke, 153 – Balance, 156 – Seitenwechsel, 157 –	
Mono, 157 – Phasenwechsel, 157 – Leise, Kommando-	
Dämpfung, 157	
8.11.2 Einrichtungen und Kontrollpunkte für Vorhören	158
8.11.3 Mithöreinrichtung	159
8.11.4 Pegeltongenerator	159
8.12 <i>Tonregieanlagen in Streifentechnik</i>	161
8.12.1 Streifeneinheiten	162
Eingangseinheiten	163
Gruppen- und Summeneinheiten	168
Andere Einheiten	168
Hilfssummeneinheit, 172 – Monitoreinheit, 172 – Instrumenten-	
einheit, 172 – Kommandoeinheit, 172 – Summen-Ausgangseinheit, 172	
8.13 <i>Die weitere Entwicklung</i>	172
Pflichtenhefte und Richtlinien	176
Literatur	177
 9. Hörfunk-Betriebstechnik	 179
9.1 <i>Betriebsablauforganisation im Hörfunk</i>	179
9.2 <i>Schaltraum</i>	182
9.2.1 Betriebsabwicklung	182
9.2.2 Programmführung im Kreuzschienenverteiler	183
Ortsempfangsleitungen	185
Verteilung zwischen den Technikräumen	185
Ortssendeleitungen	185
Weitere Einrichtungen	186
Kontrolleinrichtungen und Überprüfungen	186
Programmführung in rechnergesteuerten Schalträumen	187

9.2.3 Rechnergesteuerter Schaltraum	187
Aufbau	189
L-Schaltung, 190 – Doppel-L-Schaltung, 191 – Dreistufige Koppel-	
felder, 192 – Verbraucherbezogene Anordnung, 193 – Blockweise	
Anordnung, 195	
9.2.4 Postübergabestelle im Funkhaus	197
9.3 <i>Sendekomplex und Schallaufnahme</i>	198
9.3.1 Prinzipieller Aufbau einer Senderegie	199
9.3.2 Schallaufnahme	203
9.3.3 Sendungsablauf und Vorproduktion	204
Blenden	206
9.4 <i>Kommunikationseinrichtungen</i>	210
9.4.1 Kommandoanlagen	210
9.4.2 Wechsel- und Gegensprechanlagen	212
9.4.3 Konferenzanlagen	213
9.4.4 Telefonverbindungen in 2- und 4-Drahttechnik	215
9.4.5 OB-Einrichtungen	215
9.4.6 ZB-Einrichtungen	219
9.5 <i>Fernsprech-Überleiteinrichtungen</i>	220
9.6 <i>Außenübertragungstechnik</i>	223
9.6.1 Übertragungswagen	224
Akustische Gestaltung	225
Stromversorgung	226
9.6.2 Außenübertragungs-Anschlußstellen	228
9.6.3 Meldeleitungen	228
9.6.4 Funkverbindungen bei Außenübertragungen	231
Drahtlose Tonübertragungen aus dem Ü-Wagen	231
Zentraler Funkempfangsraum	234
Betriebsfunkanlagen	234
Funktelefon	235
9.7 <i>Tonleitungsstern der Rundfunkanstalten</i>	237
9.8 <i>Stromversorgung</i>	239
9.8.1 Stromnetze	239
9.8.2 Notstrombetrieb	239
9.8.3 Spannungsversorgung von Studiogeräten und -anlagen	240
9.9 <i>Programmausstrahlung</i>	241
9.9.1 Amplitudenmodulation	242

9.9.2 Frequenzmodulation	242
Hochfrequente Rundfunkübertragung	244
Zusatzinformationen im Hörrundfunk	248
Verkehrsrundfunk VRF/ARI, 248 – Radio-Daten-System RDS, 249	
9.10 Arbeitssicherheit	250
9.10.1 Produktionsstätten beim Hörfunk	251
9.10.2 Gefahren des elektrischen Stroms	251
9.10.3 Schutz gegen direktes und indirektes Berühren spannungs- führender Teile	254
Schutzkleinspannung, 254 – Schutzisolierung, 255 – Nullung mit separatem Schutzleiter, 255 – Fehlerstrom-Schutzschaltung, 257 – Schutztrennung, 258 – Schutzerdung, 258	
9.10.4 Inbetriebnahme von elektrischen Geräten und Anlagen	259
9.10.5 Anschluß ortsveränderlicher Musikanlagen	261
9.10.6 Erste Hilfe bei Stromunfällen	262
Pflichtenhefte und Richtlinien	262
Literatur	263

10. Digitale Tontechnik 265

10.1 Analog/Digital-Umsetzung	267
10.1.1 Signaleigenschaften	267
10.1.2 Abtastung der Signale	269
Darstellung im Zeitbereich	269
Darstellung im Frequenzbereich	271
Abtasttheorem	274
Oversampling, 275	
Halteschaltung	276
10.1.3 Analog/Digital-Wandlung	276
Quantisierung und Dynamik	276
Lineare und nichtlineare Wandlung	279
A/D-Wandler	281
Zählwandler, 281 – Dual-Slope- und Multi-Slope-Wandler, 282 – Wägewandler, 286 – Parallel- oder Flash-Wandler, 287	
D/A-Wandler	288
D/A-Wandler mit gewichteten Strömen, 288 – D/A-Wandler mit „R/2R“-Leiternetzwerk, 289 – 1-Bit-Wandler, 290	
Wandlungsfehler	290
10.2 Digitale Signalübertragung und Speicherung	291

10.2.1 Quelldaten, Kanaldaten, Kanalmodulation	291
Anforderungen an den Übertragungskanal	292
Höchste Übertragungsfrequenz, 293 – Tiefste Übertragungs- frequenz, 293 – Rekonstruktion des Bit-Taktes, 293	
10.2.2 Schreibcodes und Kanalmodulation	295
RZ-Codes	295
AMI-Code, 295	
NRZ-Codes	296
NRZ(L)-Code, 296 – NRZ(M)-Code, 297 – Biphas(M)-Code, 297 – Miller-Code, 298	
RLL-Codes	299
EFM-Code, 299	
10.2.3 Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	301
Addition modulo 2	301
Polynom	303
Instrumente der Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	303
Ungewichtete Summe, P-Wort, 305 – Gewichtete Summe, Q-Wort 305 – Korrektur mit P-Wort, 306 – Korrektur mit P- und Q-Wort, 306 – Fehlerzeiger, 307 – CIRC, 309 – Fehlerverschleierung, 310	
10.2.4 Datenformatierung	312
Magnetische Aufzeichnung mit rotierenden Köpfen	312
PCM-F1, 312 – PCM 1610/1630, 314 – RDAT, 316	
Magnetische Aufzeichnung mit feststehenden Köpfen	327
DASH, 327	
10.2.5 Compact Disc	330
Lesevorgang	330
Optisches Abtastsystem, 331 – Servos, 326	
Oversampling	326
1-Bit-Wandler	338
Datenformat	339
Steuerdaten im Q-Kanal	342
Modus 1, 343 – Modus 2, 344 – Modus 3, 344	
10.2.6 Signalübertragung über Leitungen	346
AES/EBU-Studio-Interface	346
DS 1-Schnittstelle	350
Rahmenstruktur, 350 – Format, 351 – ZI-Daten, 354	
 10.3 Prinzipien des digitalen Mischpults	 356
10.3.1 Aussteuerung	356
10.3.2 Mischung	357
10.3.3 Panoramasteller	357
10.3.4 Signalverzögerung	358
10.3.5 Nachhall	358

10.3.6 Filterung	359
Literatur, Normen, Richtlinien	361
11. Tonmeßtechnik	363
<i>11.1 Verstärkung und Dämpfung elektrischer Geräte</i>	<i>363</i>
11.1.1 Betriebsgrößen	365
11.1.2 Ein- und Ausgangsscheinwiderstände	366
11.1.3 Symmetrie	367
<i>11.2 Verzerrungen</i>	<i>368</i>
11.2.1 Lineare Verzerrungen	368
11.2.2 Nichtlineare Verzerrungen	368
Meßverfahren	371
Klirrfaktor, 376 – Intermodulationsfaktor, 378 –	
Differenztonfaktor, 379	
<i>11.3 Störspannungen</i>	<i>380</i>
11.3.1 Unbewertete Störspannungen	380
11.3.2 Bewertete Störspannungen	380
11.3.3 Systemrauschen und Betriebskennlinie	382
11.3.4 Tief- und Hochfrequenzfestigkeit, Knackstörungen	384
<i>11.4 Stereoparameter</i>	<i>384</i>
11.4.1 Pegeldifferenzen	384
11.4.2 Phasendifferenzen	385
11.4.3 Übersprechen	387
<i>11.5 Schallpegel</i>	<i>387</i>
11.5.1 Bewertete Schallpegel	387
11.5.2 Subjektive Bewertung des Schallpegels	389
<i>11.6 Messungen an Mikrofonen</i>	<i>390</i>
11.6.1 Feld-Übertragungsfaktor und Feld-Übertragungsmaß	391
11.6.2 Frequenzgang	391
Messung im Freifeld	391
Messung im Diffusfeld	393
11.6.3 Richtwirkung	393
Richtungsfaktor, Richtungsmaß und Richtcharakteristik	393
Bündelungsgrad und Bündelungsmaß	394
11.6.4 Klirrfaktor und Grenzschalldruck	395
11.6.5 Störpegel	396
<i>11.7 Messungen an Lautsprechern und Lautsprechersystemen</i>	<i>396</i>
11.7.1 Übertragungsmaß und Frequenzgang	396
Scheinwiderstand	398

11.7.2 Richtwirkung	398
Richtungsfaktor, Richtungsmaß und Richtcharakteristik	398
Bündelungsgrad und Bündelungsmaß	399
Kennschalldruckpegel	399
11.8 Messungen an Magnettonanlagen	399
11.8.1 Einstellungen und Prüfungen	400
Mechanische Einstellung	400
Bandzug, 400 – Bandgeschwindigkeit, 400 – Schlupf, 400 – Tonhöenschwankungen, 400 – Hochlaufzeit, 401	
Elektrische Messungen am Wiedergabekanal	401
Bezugspegel, 401 – Spaltlage (Azimut) und Phase, 401, Frequenzgang, 401 – Übersprechen, 401 – Störpegelabstand, 402 – Klirrdämpfung, 403	
Elektrische Messungen am Aufnahmekanal	403
Arbeitspunkt, 403 – Spaltlage (Azimut) und Phase, 403 – Bezugspegel, 404 – Frequenzgang, 404 – Übersprechen, 404 – Störpegelabstand, 404 – Klirrdämpfung, 404 – Löschdämpfung, 405	
Meßhilfsmittel	405
11.8.2 Messungen an Heimton- und Kassettengeräten	405
11.9 Messungen an Plattenspielern	406
Umdrehungsgeschwindigkeit	406
Gleichlauf	406
Rumpel-Störspannung	406
Auflagekraft	407
Frequenzgang	408
Übersprechdämpfung	408
Verzerrungen	408
Normen	408
Pflichtenhefte und Richtlinien	410
Literatur	410
Fachausdrücke Englisch-Deutsch	412
Blockschaltsymbole	424
Elektrische Verbindungen	424
Meßinstrumente	425
Tonstudiotechnische Geräte	426
Fernsprecheinrichtungen	429
Bauelemente	429
Sachregister Band 1 und 2	433

7. Analoge Schallspeicherung

Für die Schallspeicherung kommen eine ganze Reihe von Verfahren in Betracht. Das jeweils geeignete Verfahren richtet sich nach verschiedenen Gesichtspunkten. Beurteilungskriterien sind u.a.: Qualität, Betriebsablauf, Betriebssicherheit, Wirtschaftlichkeit. Während die digitalen Speicherverfahren heute vor allem für hochwertige, aufwendige Wort- und Musikproduktionen oder Mitschnitte verwendet werden, zunehmend aber auch als Kassettengeräte im aktuellen Bereich an Boden gewinnen, sind die analogen Verfahren bei aktuellen Beiträgen, bei Produktionen und Mitschnitten, deren Archivwert nicht höchsten Ansprüchen entspricht, geeignet. Die in den letzten Jahren entwickelten Kompanderverfahren gewährleisten auch hier eine hervorragende Tonqualität. Inwiefern sich die Nutzung der digitalen Aufzeichnungsverfahren in der Zukunft verschieben wird, ist derzeit nur schwer abzusehen.

Von den zur Verfügung stehenden analogen Verfahren wird im Tonstudiobereich in erster Linie das Magnettonverfahren eingesetzt, Speichermedien sind dabei Magnetbänder. Die Speicherung auf Magnetplatten hat im Bereich der Analogtechnik keine Bedeutung. Als direktes Aufzeichnungsmedium (Direktschnitt) ist die Schallplatte seit der Einführung der digitalen Schallspeicherung auf Magnetband heute unbedeutend. Ein weiteres Verfahren ist das Lichttonverfahren. Aus betriebstechnischen, nicht aus qualitativen Gründen, wird dieses Verfahren beim Tonfilm nach wie vor angewendet.

7.1 Magnetische Schallspeicherung

7.1.1 Grundlagen des Magnetismus

Magnetisches Feld

Ein vom Strom durchflossener elektrischer Leiter wird von einem magnetischen Feld umgeben, dessen Stärke proportional der Stromstärke I ist. Die magnetischen Feldlinien veranschaulichen die Eigenschaften des Feldes; sie sind im Gegensatz zu den elektrischen Feldlinien stets in sich geschlossen. Ihre Dichte ist ein Maß für die Stärke des Feldes. Beim geraden Einzelleiter ergeben sich bei einem den Leiter senkrecht schneidenden Feldlinienbild konzentrische Kreise um den Leiter (Abb. 7/1).

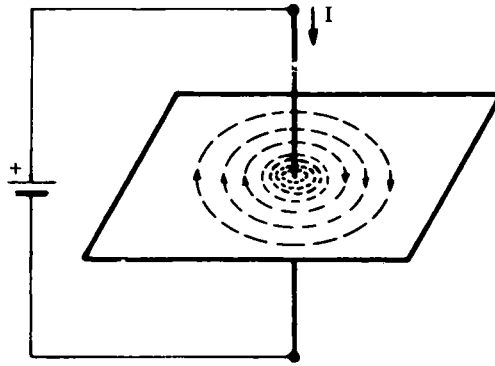


Abb. 7/1. Magnetische Feldlinien des stromdurchflossenen Einzelleiters.

Wickelt man den Leiter zu einer Spule auf, so gleicht das Feld außerhalb der Spule dem Feld eines Stabmagneten; im Inneren der Spule entsteht ein annähernd homogenes Feld, die Feldlinien verlaufen hier also weitgehend parallel und mit demselben Abstand (Abb. 7/2).

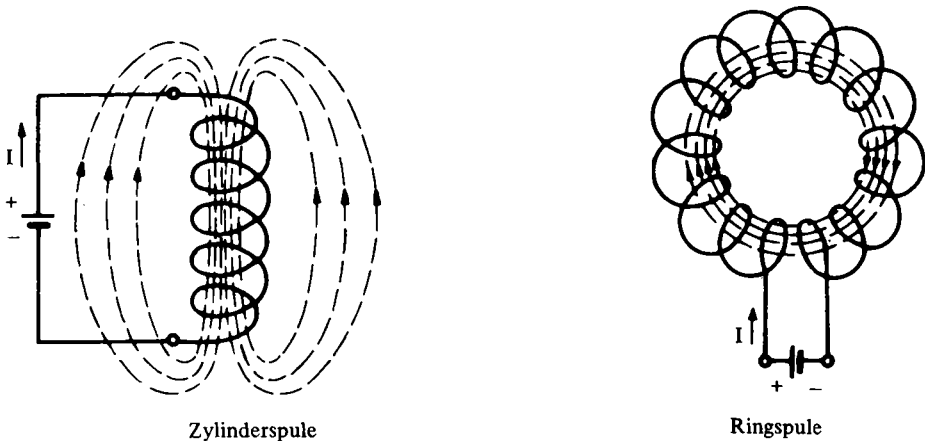


Abb. 7/2. Magnetische Feldlinien einer stromdurchflossenen Zylinderspule und einer stromdurchflossenen Ringspule.

Wird die Spule endlich zu einem geschlossenen Ring zusammengebogen (Abb. 7/2), bleibt das Feld im Inneren des Rings nahezu homogen, das äußere Feld jedoch verschwindet, da die Feldlinien jetzt im Inneren der Spule geschlossene Kreise bilden können. Die Größe der magnetischen Feldstärke H im Inneren einer Spule ist proportional der Stromstärke I und der Windungszahl N der Spule, jedoch umgekehrt

proportional zur Spulenlänge l . Die magnetische Feldstärke oder magnetische Erregung H wird in Ampere/Meter [A/m] gemessen (DIN 1325).

$$H = \frac{N \cdot I}{l}$$

H = magnetische Feldstärke oder magnetische Erregung [A/m]

N = Windungszahl [dimensionslos]

I = Stromstärke [A]

l = Länge der Spule [m]

Magnetische Induktion

Bringt man in das Innere einer stromdurchflossenen Spule einen Kern aus Eisen oder einem anderen „ferromagnetischen“ Stoff, so ändert sich die Feldstärke H nicht, da sie bei gegebener Windungszahl und Spulenlänge nur von der Stromstärke abhängt. Die magnetische Flußdichte oder Induktion B hingegen erhöht dabei ihren Wert u.U. ganz erheblich. Sie ist der Feldstärke H proportional, wird aber auch von den magnetischen Eigenschaften des Materials bestimmt, das das Magnetfeld ausfüllt. Der Zusammenhang zwischen der Flußdichte B und der Feldstärke H ist

$$B = \mu_r \cdot \mu_o \cdot H \text{ oder } B = \mu \cdot H$$

mit $\mu = \mu_r \cdot \mu_o$

B = magnetische Flußdichte oder magnetische Induktion [T], [Vs/m²]

μ_r = relative Permeabilität oder Permeabilitätszahl [dimensionslos]

μ_o = magnetische Feldkonstante [Vs/Am]

μ = Permeabilität [Vs/Am]

H = magnetische Feldstärke [A/m]

Die magnetische Flußdichte B wird in Tesla (T) gemessen ($1\text{T} = 1\text{ Vs/m}^2$), früher in Gauß (G) ($1\text{T} = 10^4\text{ G}$). μ_r ist eine materialabhängige Zahl, μ_o hingegen ist eine physikalische Konstante, die sog. magnetische Feldkonstante ($\mu_o = 1,256 \cdot 10^{-6}\text{ Vs/Am}$). Der gesamte magnetische Fluß Φ im Inneren einer Spule ergibt sich als Produkt aus der Flußdichte B und dem Querschnitt A des Kerns.

$$\Phi = B \cdot A$$

Φ = magnetischer Fluß [Wb], [Vs]

B = magnetische Flußdichte [T], [Vs/m²]

A = Kernquerschnitt [m²]

Φ wird in Weber (Wb) oder Voltsekunden (Vs) angegeben, früher in Maxwell (M) ($1\text{M} = 10^{-8}\text{ Wb}$).

Die relative Permeabilität oder Permeabilitätszahl μ_r bezeichnet die magnetischen Eigenschaften eines Materials, sie kann auch als magnetische Leitfähigkeit aufge-

faßt werden. Stoffe mit großer magnetischer Leitfähigkeit, wie z.B. Eisen, Nickel und Eisen-Nickel-Legierungen, heißen „ferromagnetische Stoffe“, für sie ist $\mu_r \gg 1$.

Läßt man im ferromagnetischen Ringkern eines Tonkopfes einen schmalen Spalt, so entsteht darin eine sehr hohe Feldstärke. Denn die magnetische Leitfähigkeit der Luftstrecke (entsprechend dem Wert von μ_r) ist sehr klein gegenüber der Leitfähigkeit des ferromagnetischen Materials. So liegt über der Strecke des Luftspaltes ein sehr hoher „magnetischer Spannungsabfall“. Wegen der geringen Leitfähigkeit im Spalt tritt sogar eine merkliche Anzahl von Feldlinien aus dem Spalt des Ringkerns heraus. (Abb. 7/3).

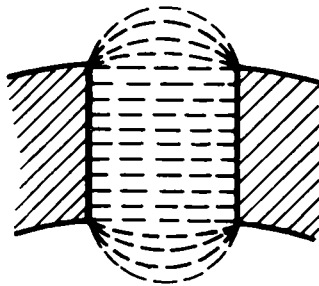


Abb. 7/3. Magnetische Feldlinien im Spalt eines Ringkerns.

Hysteresisschleife

Läßt man nun – von Null ausgehend – einen immer stärkeren Strom durch eine Spule mit einem entmagnetisierten ferromagnetischen und geschlossenen Ringkern fließen, so steigt nach der Gleichung $H = N \cdot I / l$ (siehe oben) die magnetische Feldstärke H proportional zur Stromstärke I . Die magnetische Flußdichte oder Induktion B wächst ebenfalls, aber keineswegs linear. Der Zusammenhang von H und B ist in Abb. 7/4 als gestrichelte Kurve dargestellt. Sie wird auch „jungfräuliche Kurve“ oder „Neukurve“ genannt, da der Magnetisierungsvorgang bei unmagnetisiertem Material beginnt.

Bei hoher Feldstärke H ergibt sich eine Sättigung des Materials; dort wächst B nur noch in dem Maße, wie dies auch ohne Kern der Fall wäre. Verringert man die Stromstärke I wieder, so kehrt B nicht auf der Neukurve in den Nullpunkt zurück, sondern bewegt sich auf der als „Hysteresisschleife“ bezeichneten Kurve. Auch bei abgeschaltetem Strom, also bei $H = 0$, bleibt eine magnetische Induktion B_r , die sog. Remanenz, im Kern zurück. Um sie zu beseitigen, muß ein Strom in entgegengesetzter Richtung durch die Spule fließen. Erst wenn dieser die Feldstärke H_c erzeugt, verschwindet die Induktion des Kerns. Diese „Gegen“-Feldstärke H_c , hervorgerufen durch einen Strom in entgegengesetzter Richtung, löscht die Induktion.

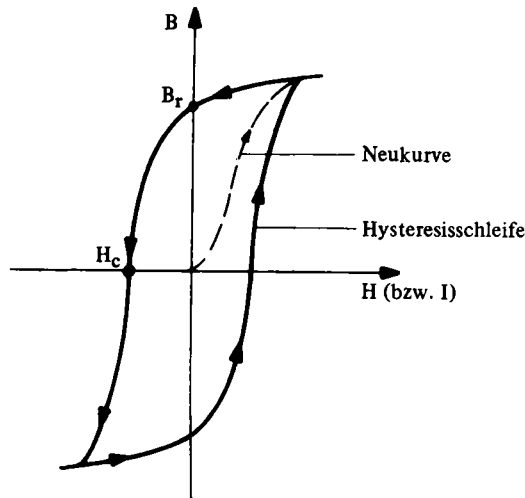


Abb. 7/4. Neukurve (-----) und Hysteresisschleife (—).

Sie heißt Koerzitivfeldstärke oder Koerzitivkraft. Steigert man die Stromstärke weiter in diese Richtung, so erreicht man wieder eine Sättigung des Kerns.

Der nach weiterem Umpolen des Stroms zu beobachtende Verlauf entspricht der bereits geschilderten Kurve. Die so entstandene Schleife heißt – wie bereits erwähnt – Hysteresisschleife. Sie läßt erkennen, daß die magnetische Induktion B in einem ferromagnetischen Stoff nicht eindeutig durch die gerade einwirkende Feldstärke H bestimmt ist, sondern weitgehend von der magnetischen Vorgeschichte des Materials abhängt.

Die Form der Hysteresiskurve ist charakteristisch für die einzelnen Materialien. „Magnetisch harte“ oder „hochkoerzitive“ Stoffe haben breite, großflächige Schleifen mit hohen Werten für Remanenz B_r und Koerzitivfeldstärke H_c , „magnetisch weiche“ Stoffe besitzen dagegen schmale Schleifen, also niedrige Werte der Koerzitivfeldstärke (Abb. 7/5).

Magnetisch harte Materialien werden in Lautsprechern, in Tauchspulmikrofonen und zur Beschichtung von Magnetbändern verwendet, magnetisch weiche Stoffe dagegen in Drosseln, Übertragern, Magnetköpfen, Relais und Elektromagneten. Da die von der Hysteresisschleife umschlossene Fläche ein Maß ist für die zur Ummagnetisierung erforderliche Arbeit, wählt man überall dort, wo eine Wechselmagnetisierung auftritt (z.B. Übertrager und Magnetköpfe), Materialien mit möglichst schmaler Schleife und damit geringer Ummagnetisierungsarbeit; die Eisenverluste können so niedrig gehalten werden. Wo es aber darauf ankommt, eine Magnetisierung zeitlich lange zu erhalten und vor einer Entmagnetisierung zu schützen, wie

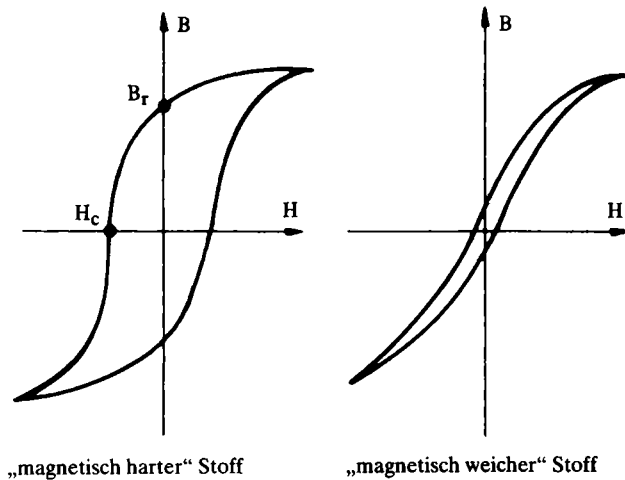


Abb. 7/5. Hysteresisschleife verschiedener Materialien.

beim Magnetband, sind magnetisch harte Materialien geeignet. Es handelt sich dabei also um Permanentmagnete.

Die Remanenz kann wieder gelöscht werden durch ein starkes magnetisches Wechselfeld, das langsam abklingt bzw. aus dem das magnetisierte Material langsam entfernt wird. Auf diese Weise wird die durchlaufene Hysteresisschleife immer kleiner und schnürt sich schließlich ganz um den Nullpunkt zusammen.

7.1.2 Magnettonverfahren

Das Magnettonverfahren ist das Verfahren, mit dem Schallsignale oder andere Signale auf magnetisierbare Materialien aufgezeichnet, gespeichert und wieder ausgelesen werden. [7.1 bis 7.4]

Das seit der Jahrhundertwende im Prinzip bekannte Magnettonverfahren wurde von C. Stille weiterentwickelt; 1923 begann die Fertigung von Stahltonmaschinen durch die Vox-Gesellschaft nach dem Stille-Verfahren. Die bald darauf auch im Rundfunk verwendeten Stahlbänder waren 0,8 mm dick und 3 mm breit; bei einer Bandgeschwindigkeit von 1,5 m/s hatte eine Bandspule bereits 30 min Spielzeit. Die Qualität der Stahltonaufzeichnung war der Aufzeichnung auf Wachsplatten unterlegen. Verbesserungen brachte die Einführung eines unmagnetischen, mit einer magnetisierbaren Schicht überzogenen Tonträgers (P. Pfeumer, 1928) und die Entwicklung ringförmiger Tonköpfe (E. Schüller, 1933). 1938 wurde das Magnetton-

verfahren in den deutschen Rundfunkanstalten eingeführt. Die Bandbreite betrug wie noch heute $1/4'$, die Bandgeschwindigkeit $30'$ entsprechend rund 76 cm/s. Aber erst die Entdeckung der hochfrequenten Vormagnetisierung durch v. Braunmühl und Weber 1941 machte das Verfahren auch für hochwertige Musikaufnahmen geeignet.

Der erreichte Entwicklungsstand des Magnettonverfahrens wurde international erst nach dem Kriege bekannt. 1952 fand in Hamburg eine UER-Fachtagung zur magnetischen Aufzeichnung statt, von der die Initiative zu einer internationalen Normung des Verfahrens durch CCIR ausging; damit war die Grundlage für einen internationalen Bandaustausch geschaffen. In den folgenden Jahren konnte das Verfahren dann in Zusammenarbeit der Entwicklungsstellen des Rundfunks und der Industrie noch erheblich verbessert werden. Damit stellt sich das Magnettonverfahren als eine der bedeutenden technischen Entwicklungen des deutschen Rundfunks dar.

Die Einführung des Magnettonverfahrens veränderte die Produktionsmethoden der Tonaufnahme grundlegend: Die Bänder konnten beliebig gelöscht und neu aufgezeichnet werden, sie konnten geschnitten und beliebig oft abgespielt werden, Produktionsmethoden, die mit der bis dahin üblichen Aufzeichnung auf Wachs- oder andere Platten nicht möglich waren.

Einführung

Bei der magnetischen Schallspeicherung (Begriffe in DIN 45 510) erfolgt die Aufzeichnung der Information dadurch, daß ein magnetisierbares Material (Tonträger) vor dem Spalt eines Sprechkopfes (Aufnahmekopf) vorbeigeführt wird, in dessen Wicklung ein dem aufzeichnenden Vorgang entsprechender Wechselstrom fließt. Das dadurch vor dessen Spalt erzeugte Wechselfeld verursacht im Tonträger eine bleibende Magnetisierung örtlich wechselnder Größe und Richtung. Wird ein so „besprochener Tonträger“ vor dem Spalt eines Hörkopfes (Wiedergabekopf) vorbeigeführt, so induziert das von dem bewegten Tonträger ausgehende magnetische Wechselfeld in der Hörkopfwicklung eine Spannung. Bevor das Band aber an den Sprech- und Hörkopf gelangt, wird vor der Aufnahme mit einem Löschkopf eine eventuell vorhandene Magnetisierung gelöscht (*Abb. 7/6*).

Von den verschiedenen Tonträgern hat das Magnettonband in der Tonstudioteknik die größte Bedeutung. Daneben spielt nur noch der Magnetfilm, ein Magnetband größerer Breite mit Filmperforation, das aus mechanischen Gründen einen stärkeren Träger besitzt, im Bereich der bildsynchronen Tonaufzeichnung eine nennenswerte Rolle.

Grundlage der heute universellen Verwendung des Magnetbandes im Tonstudio ist die allgemeingültige Festlegung der Merkmale des aufgezeichneten Signals, also des Wiedergabekanals einer Magnettonanlage. Die entsprechenden Normungen gewährleisten den uneingeschränkten Austausch bespielter Bänder. Sie sind in den verschiedenen DIN-Bezugsbändern, die mit Meßsignalen bespielt sind, und den Re-

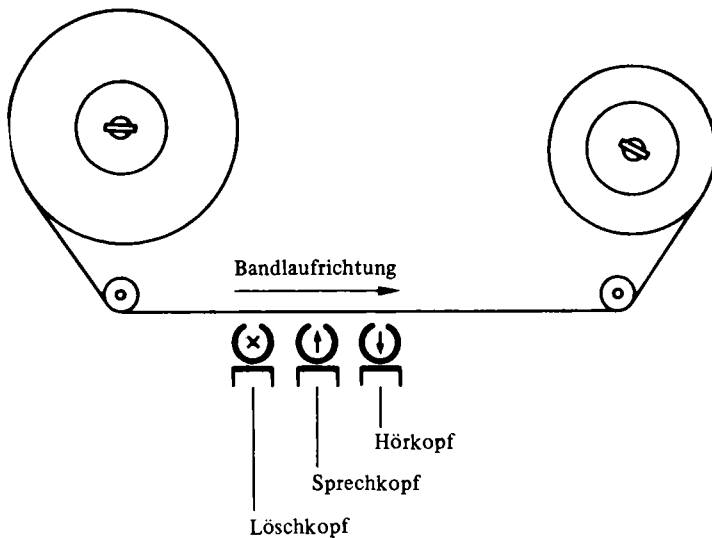


Abb. 7/6. Prinzip der Magnettonaufzeichnung.

ferenzleerbändern festgelegt. Mit der einseitigen Normung des Wiedergabekanals können im Rahmen der bestehenden Normung stets Verbesserungen an Tonbändern, aber auch unterschiedliche Bänder mit speziellen Eigenschaften nach entsprechenden Einmessungen verwendet werden. Wegen der Festlegungen des Wiedergabekanals haben Weiterentwicklungen keine Auswirkungen auf den Abspielbetrieb.

Magnettonbänder

Maße und Bandgeschwindigkeiten

Moderne Magnettonbänder nach DIN 45 512 bestehen aus einem in der Regel 6,30 mm breiten und etwa 8 bis 40 μm starken Träger aus Kunststoff, der mit einer 10 bis 15 μm (bei hochaussteuerbaren Bändern bis zu 25 μm) starken Schicht aus kleinsten Teilchen magnetisierbaren Materials (Eisenoxid, bei Kassettenbändern auch Chromdioxid, Reineisen bzw. Eisen-Chrom-Mischungen) beschichtet ist. Die Teilchen sind in ein Bindemittel („Lack“) eingebettet und nehmen 25–35% des Volumens der Beschichtung ein (Volumenfüllfaktor). Ihrer Gesamtdicke nach werden die Bänder in fünf Klassen eingeteilt (DIN 45 511).

Normalbänder	ca. 50 μm
Langspielbänder	ca. 35 μm
Doppelspielbänder	ca. 25 μm
Dreifachspielbänder	ca. 18 μm (veraltet, nicht mehr für 1/4')

Die 6,30 mm (+ 0/-0,06 mm) breiten Bänder werden auch 1/4-Zoll-Bänder genannt, da das Nennmaß ursprünglich vom Zollmaß abgeleitet wurde ($1/4'' = 6,35 \text{ mm}$). Da-

neben werden auch Bänder verwendet, deren Breite ein ganzzahliges Vielfaches von 1/4-Zoll beträgt, insbesondere sogenannte 1/2- und 1-Zoll-Bänder (12,70 mm und 25,40 mm).

Außer diesen, für die Technik mit offenen Spulen und Wickelkernen bestimmten Bändern sind auch 3,81 mm breite Bänder mit einer Gesamtstärke von 8 bis 18 μm in Kompaktkassetten in Verwendung. Im Bereich der bildsynchronen Tonaufzeichnung werden perforierte Magnetfilme mit Gesamtdicken von 8 bis 140 μm eingesetzt.

Neben der Aufzeichnung in Mono-Vollspur wird im Studiobetrieb vor allem in sog. Stereospur aufgezeichnet. Demgegenüber ist Zweispurbetrieb bei um etwa 1 dB geringerem Störabstand zwar auch für die Stereoaufzeichnung geeignet, erlaubt aber Monobetrieb mit gutem Übersprechabstand oder auch Time-code- oder Steuerungsaufzeichnungen in der größeren Trennspur (*Abb. 7/7*).

Der Abstand der Aufzeichnungsspuren beträgt bei Zweispur 2,0 mm, bei Stereospur 0,75 mm. Wegen der Ähnlichkeit und Zusammengehörigkeit der Stereospuren stört hier das höhere Übersprechen nicht. Die Abmessungen der Spuren auf Bändern für Mehrspuraufnahmen zeigt *Tab. 7/1*. Bei Heimtongeräten erfolgt keine Unterscheidung zwischen Stereo- und Zweispurgeräten; der Spurabstand beträgt hier stets 2 mm. Bei der Vierspuraufzeichnung auf 6,3 mm breites Band liegt der Spurabstand ebenfalls bei 0,75 mm, die Spurbreite bei jedoch nur 1 mm; dadurch ist der Störabstand verglichen mit der 2,75 mm-Spur merklich geringer (ca. 4 dB).

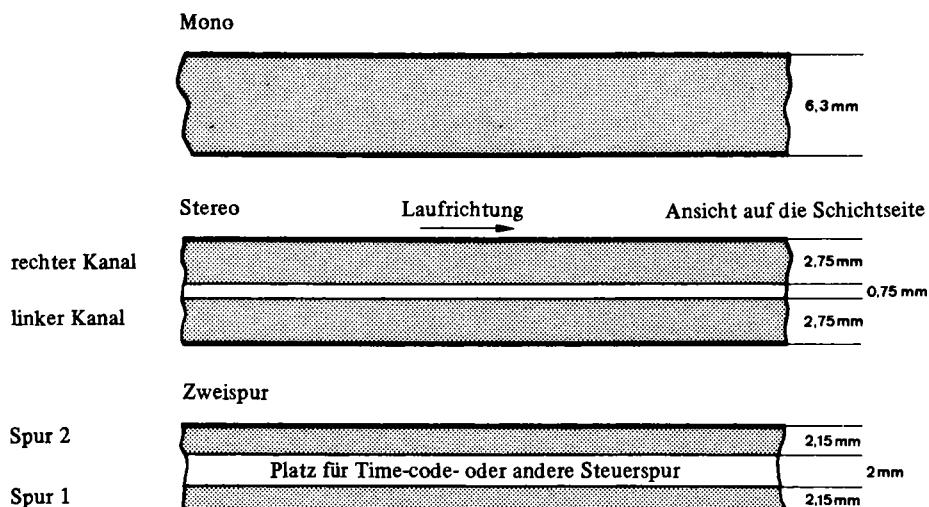
Die Bandgeschwindigkeiten sind genormt (DIN 15 573), die bevorzugte Bandgeschwindigkeit im Tonstudio beträgt 38,1 cm/s entsprechend 15'/s. Diese Bandgeschwindigkeit war zunächst aus qualitativen Gründen notwendig – nachdem in der Anfangszeit der magnetischen Aufzeichnung eine Geschwindigkeit von 76,2 cm/s üblich war –, erwies sich aber auch für die Bearbeitung von Tonaufnahmen mittels Bandschnitt als besonders geeignet. Aus wirtschaftlichen Gründen kommt schließlich die Bandgeschwindigkeit 19,05 cm/s entsprechend 7,5'/s in Betracht, wenn keine oder nur geringe Bandbearbeitungen notwendig sind; in Verbindung mit einem leistungsfähigen Kompanderverfahren ist die Tonqualität durchaus befriedigend. Für schwierige Bearbeitungen kann gelegentlich auch die Geschwindigkeit 76,2 cm/s entsprechend 30'/s in Betracht kommen. Die Tonhöenschwankungen liegen heute bei 0,04% für 38,1 cm/s und 0,06% für 19,05 cm/s (DIN 45 507).

Studiobänder werden im allgemeinen auf freitragenden Wickelkernen in einer Länge von 1000 m oder 730 m geliefert, Reportagebänder auf Dreizackspulen auf 250-m- oder ebenfalls 1000-m-Wickeln.

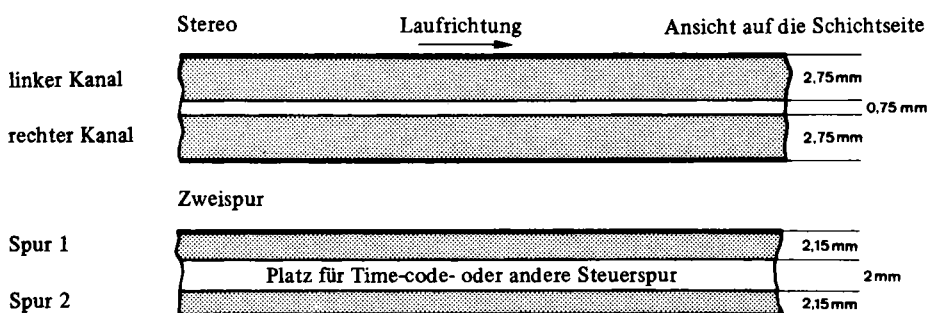
Träger

Der Träger bestimmt weitgehend die mechanischen Eigenschaften des Bandes (DIN 45 522). Als Trägermaterial wird wegen der geforderten hohen Festigkeit und

Studiogeräte mit deutscher Schichtlage



Studiogeräte mit internationaler Schichtlage



Heimgeräte (internationale Schichtlage)

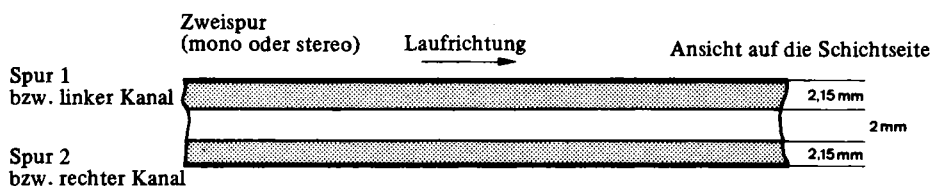


Abb. 7/7. Spurlagen und -abmessungen beim ¼-Zoll-Band (Blick auf die Schichtseite) nach DIN 45 511, Tl. 2.

Tab. 7/1. Mehrspurbänder, Breite der Spuren und Trennspuren nach DIN IEC 94, Tl. 6.

Breite des Bandes in mm	in Zoll	Zahl der Spuren	Breite der Spuren	Breite der Trennspuren
12,7	½	4	1,75 mm	1,55 mm
25,4	1	4	4,45 mm	2,20 mm
25,4	1	8	1,75 mm	1,55 mm
50,8	2	16	1,75 mm	1,475 mm
50,8	2	24	1,00 mm	1,13 mm
50,8	2	32	0,70 mm	0,88 mm

Schmiegsamkeit vor allem Polyester (PE) verwendet, früher auch Polyvinylchlorid (PVC).

Durch kräftiges Vorrecken in Quer- und Längsrichtung erreichen moderne Bänder so hohe Festigkeitswerte, daß Bandrisse und -dehnungen praktisch nicht mehr auftreten. Als Studioband wird im allgemeinen Normalband mit einer Schichtdicke von ca. 15–20 μm und einer Trägerdicke um 30 μm verwendet. Für Reportagegeräte eignet sich wegen der bei gleicher Spieldauer erforderlichen kleineren Wickel Langspielband mit einer Schichtdicke von ca. 10 μm und einer Trägerdicke von ca. 25 μm .

Beschichtung

Die magnetischen Teilchen der Schicht bestehen bei Studiobändern aus Eisenoxid ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, seltener auch Fe_3O_4). Die Teilchen werden auf eine Größe unter 1 μm gemahlen. Die relative Permeabilität μ_r der Schicht liegt bei etwa 1,5 bis 3. Zur Erhöhung der Aussteuerbarkeit werden die Bänder mit einer magnetischen Vorzugsrichtung hergestellt, indem das Band unmittelbar nach der Beschichtung in flüssigem Lackzustand einem kräftigen magnetischen Gleichfeld in Richtung der Nutzkomponente bei der späteren Aufzeichnung, also in Längsrichtung, ausgesetzt wird. Dadurch kann die Remanenz in Längsrichtung doppelt so groß wie in Querrichtung werden.

Bei kleineren Bandgeschwindigkeiten können Bänder mit dünnerer Beschichtung verwendet werden, da eine dicke Beschichtung nur für die Aufzeichnung großer Wellenlängen vorteilhaft und die aufgezeichnete Wellenlänge der Bandgeschwindigkeit proportional ist. Diese Zusammenhänge werden physikalisch mit der sog. wirksamen Schichtdicke bezeichnet. Gleichzeitig sucht man den Volumenfüllfaktor zu erhöhen und durch eine polierte Oberfläche und dünne, schmiegsame Träger den Kontakt des Bandes mit dem Kopf zu verbessern.

Bei kleinen Bandgeschwindigkeiten (4,76 und 9,5 cm/s) sind die Wellenlängen der auf dem Band aufgezeichneten Modulation sehr gering; schon bei 38 cm/s entspricht einer Frequenz von 15 kHz eine Wellenlänge von 25 μm , bei 4,76 cm/s beträgt die Wellenlänge gerade ca. 3 μm . Bestmöglicher Kopf-Bandkontakt ist deshalb Voraussetzung für eine gute Qualität der Bandaufzeichnung; sie wird durch hohe Elastizität des Trägers, also besonders dünne Träger, und durch besonders glatte Oberflächen erreicht. Durch die Verwendung von Chromdioxid (CrO_2) oder Reineisen (Fe) kann der Füllfaktor, also die Packungsdichte der Magnetschichten, erheblich gesteigert werden. Dies gilt insbesondere für das Reineisenband, dessen magnetische Partikel längs ausgerichtete Nadeln sind.

Aufzeichnungsvorgang

Fließt durch die Wicklung eines Sprechkopfes ein Wechselstrom, so entsteht zwischen den Polschuhen des Kerns im Arbeitsspalt ein entsprechendes magnetisches Wechselfeld. Wegen der hohen Permeabilität des Eisenkerns, die man sich als hohe magnetische Leitfähigkeit vorstellen kann, und der geringen Permeabilität des Luftspaltes (geringe magnetische Leitfähigkeit) verursacht der Spalt einen hohen magnetischen Widerstand, der ein kräftiges magnetisches Streufeld zur Folge hat. Begünstigt durch eine starke Verjüngung der Polschuhe am Spalt treten Feldlinien auch aus dem Spalt heraus und dringen in die Magnetschicht des vorbeigleitenden Bandes ein (Abb. 7/8) [7/4].

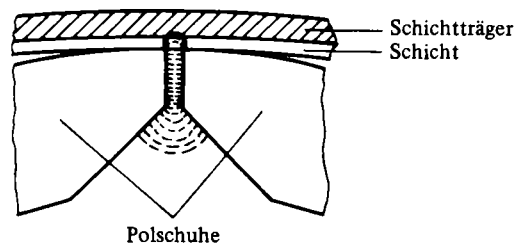


Abb. 7/8. Spaltfeld.

Die magnetischen Partikel des Bandes, das vor dem Spalt vorbeigeführt wird, behalten einen remanenten Fluß. So entsteht auf dem Band ein Abbild des Wechselfeldes vor dem Spalt. Die Wellenlänge λ einer auf das Band gebrachten Schwingung ist direkt abhängig von der Bandgeschwindigkeit v und umgekehrt abhängig von der Frequenz f des Wechselfeldes:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

λ = Wellenlänge [cm]
 v = Bandgeschwindigkeit [cm/s]
 f = Frequenz [Hz], [1/s]

Bei $v = 38 \text{ cm/s}$ beträgt die aufgesprochene Wellenlänge also zwischen etwa 1 cm bei 40 Hz und $25 \mu\text{m}$ bei 15 kHz . Das Band wird vor allem in Längsrichtung magnetisiert, es ergibt sich aber auch eine senkrecht zur Bandoberfläche stehende Komponente. Da für die nachfolgende Abtastung mit einem weiteren Ringkopf hauptsächlich die Längskomponente wirksam ist, wird bei der folgenden Betrachtung nur diese Komponente berücksichtigt. Abb. 7/9 zeigt schematisch anhand eines Stabmagnetenmodells das auf Band aufgezeichnete Signal.

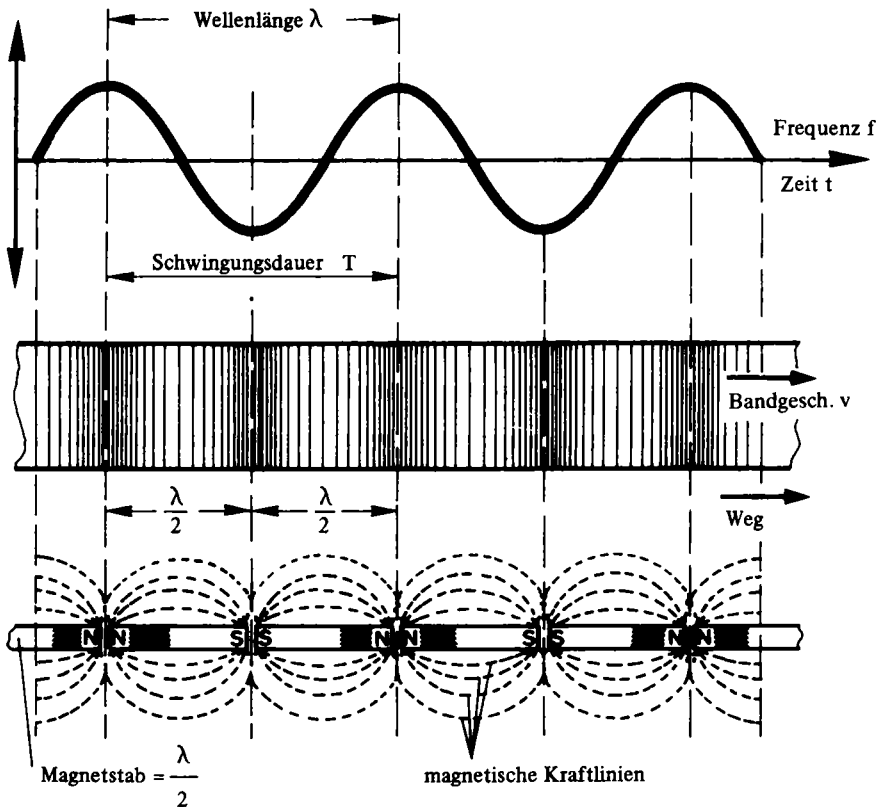


Abb. 7/9. Magnetisch aufgezeichnetes Signal.

Ausgangspunkt aller Überlegungen zum Aufnahmevorgang ist die Remanenzkurve des Magnettonbandes (Abb. 7/10, dick ausgezogen). Mit Annäherung eines Bandabschnitts an den Spalt, der zunächst nur ein stationäres Magnetfeld besitzen soll, folgt die magnetische Flußdichte oder Induktion B auf dem Band zunächst der Neu-kurve (Abb. 7/10 gestrichelt), da die Feldstärke H mit sich verringerndem Abstand zunimmt.

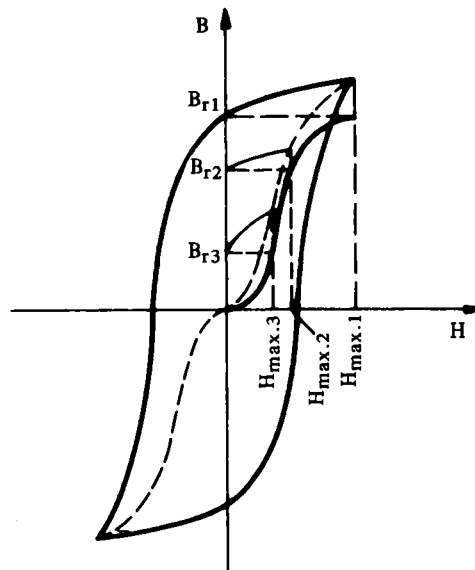


Abb. 7/10. Hysteresiskurve (—)
 Neukurve (---)
 Remanenzkurve (—) des Magnetbandes.

Nach Überschreiten des Maximums der Feldstärke $H_{\max 1}$ kehrt die Flußdichte B auf die B -Achse, entsprechend $H = 0$, zurück. Für $H = 0$ ist der betreffende Bandabschnitt auch bereits am Spalt vorbei. Auf dem Band zurückgeblieben ist dabei die remanente Induktion B_{r1} . Verfolgt man diesen Vorgang für verschiedene, aber immer kleinere Feldstärken $H_{\max 2}$, $H_{\max 3}$ usw., so ergeben sich die Remanenzen B_{r2} , B_{r3} usw. Werden alle Punkte $H_{\max}/B_{\max}$ miteinander verbunden, so erhält man die Remanenzkurve (dick ausgezogen), die somit angibt, wie die Remanenz auf einem vorher entmagnetisierten Band von der jeweils höchsten einwirkenden Feldstärke H abhängt.

Da diese Kurve sowohl in der Umgebung des Nullpunktes als auch an ihren Enden stark gekrümmt ist, besteht eine ausgesprochene Nichtlinearität zwischen dem Aufsprechstrom und der remanenten Magnetisierung, die damit untragbare Verzerrungen erzeugt; die Direktaufzeichnung (Abb. 7/11) kommt also für die magnetische Tonaufzeichnung nicht in Betracht. Bei der magnetischen Bildaufzeichnung stören diese Verzerrungen allerdings nicht, da hier das Signal in Frequenzmodulation aufgezeichnet wird mit all den Vorteilen, die auch der frequenzmodulierte Rundfunk (UKW) bietet.

Es gibt grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die Verzerrungen auf ein akzeptables Maß zu reduzieren: Man verlegt entweder den Arbeitspunkt in den geraden Teil der

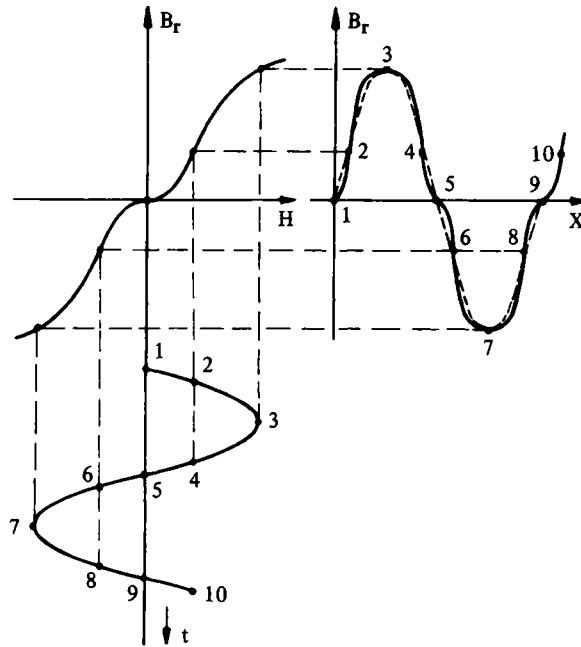


Abb. 7/11. Direktaufzeichnung ohne Vormagnetisierung.

Remanenzkurve (Gleichstromvormagnetisierung) bei entsprechend reduzierter Nutzamplitude oder man linearisiert die Remanenzkurve (HF-Vormagnetisierung). Das zweite Verfahren hat erst den heutigen hohen Stand der analogen Magnetton-technik ermöglicht (von Braunmühl, Weber, 1941). Bei der analogen Schallaufzeichnung wird heutzutage ausschließlich dieses Verfahren eingesetzt.

Schon der Erfinder des Magnettonverfahrens, Poulsen, wandte die Gleichstrommagnetisierung an, um den Arbeitspunkt in den linearen Bereich der Remanenzkurve zu verlegen. Dieses Verfahren hat jedoch nicht nur den Nachteil, daß der nutzbare Teil der Remanenzkurve auf etwa ein Drittel reduziert wird (Verzerrungen bei großen Amplituden bzw. geringe Dynamik), sondern daß das Band zudem in den Modulationspausen einen starken Gleichfluß erhält, der wegen der unvermeidbaren Inhomogenität der Magnetschicht ein starkes Bandrauschen verursacht. Aus diesen Gründen wird die Gleichstromvormagnetisierung nicht mehr angewandt.

Aufzeichnung mit HF-Vormagnetisierung

Die bei der Aufzeichnung mit HF-Vormagnetisierung ablaufenden Vorgänge sind sehr kompliziert und werden von einer Vielzahl von Faktoren mitbestimmt. Eine vollständige theoretische Beschreibung dieses Aufnahmeverfahrens ist schwierig.

Es gibt zwar verschiedene Modellvorstellungen über den Ablauf des Aufnahmevorgangs, keine wird aber allen Erscheinungen, die dabei auftreten, voll gerecht. Teils gehen diese Modellvorstellungen von der Hysteresiskurve eines Magnettonbandes aus [7.6], [7.7], [7.8], [7.9], [7.10], [7.11], teils von den Vorgängen in den einzelnen Magnetpartikeln, deren statistische Überlagerung dann den gesamten Aufnahmevorgang beschreibt [7.10], [7.11]; trotz des unbefriedigenden Stands der theoretischen Kenntnisse beherrscht man in der Praxis die Technologie des Aufnahmevorgangs mit HF-Vormagnetisierung. Dem NF-Strom des Sprechkopfes wird ein sinusförmiger HF-Strom mit einer Frequenz von 80–150 kHz überlagert; diese HF wird also nicht moduliert, sondern der NF zuaddiert. Die Amplitude dieses HF-Stroms ist ca. zehnmal größer als die des NF-Stroms bei Bezugspegel. Die Wellenlänge der HF-Aufzeichnung ist dabei jedoch so gering, daß sie infolge von Selbstentmagnetisierung und Spaltdämpfungsverlusten (siehe unten) vom Hörkopf praktisch nicht mehr abgetastet werden kann. Neben den Modellvorstellungen von Preisach [7.12] und Westmijze [7.13] erlaubt die Remanenzkurventheorie nach Camras eine einigermaßen anschauliche Darstellung der Aufnahmevorgänge, wenn auch keine theoretische Erklärung; sie liegt den folgenden Ausführungen zugrunde.

Die Remanenzkurve hat drei verschiedene Bereiche (vgl. Abb. 7.10): Im Bereich des Nullpunktes besteht zwischen der Remanenz B_r und der einwirkenden Feldstärke H ein nichtlinearer Zusammenhang an. Es folgen symmetrisch zum Nullpunkt zwei Bereiche linearer Abhängigkeit. Daran schließt sich an den beiden Enden der Kurve wieder ein Bereich mit nichtlinearem Zusammenhang. Bei der Gleichstromvormagnetisierung arbeitet man nur in einem der beiden linearen Bereiche. Bei der Wechselstromvormagnetisierung gelingt es, in beiden linearen Bereichen zu arbeiten, die beiden linearen Bereiche praktisch zu einer einzigen geraden Kennlinie zusammenzufügen. Die HF-Vormagnetisierung verschiebt die NF-Modulation bis jeweils in den linearen Kurvenbereich hinein. Aufgezeichnet wird damit eine hochfrequente Schwingung, deren beide Einhüllende im Rhythmus der Tonfrequenz wie in Abb. 7.12 dargestellt schwanken. Die HF wird dabei verzerrt, die NF bleibt unverzerrt. Da bei der Wiedergabe aber wegen der geringen Wellenlänge der HF-Modulation von wenigen μm nicht genau der Verlauf der HF-Modulation abgetastet werden kann, findet eine Mittelwertbildung aus den beiden Umhüllenden statt (Abb. 7.12):

$$B_{\text{NF}} = \frac{B_{r1} + B_{r2}}{2} \quad \begin{array}{l} B_{\text{NF}} = \text{remanente Induktion der Tonfrequenz [T]} \\ B_{r1,2} = \text{Einhüllende der aus NF und HF zusammenge-} \\ \quad \text{setzten Induktion [T].} \end{array}$$

Diese gemittelte, abgetastete Modulation B_{NF} liegt symmetrisch zum Nullpunkt und erscheint also gerade im Bereich größter Nichtlinearität der Remanenzkurve. D.h. aber praktisch, daß gerade in diesem Bereich durch die HF-Vormagnetisierung eine Linearisierung stattfindet. Man kann das dadurch darstellen, daß man entsprechend der Mittelwertbildung bei der Abtastung zwei hypothetische Remanenzkurven B_{r1}

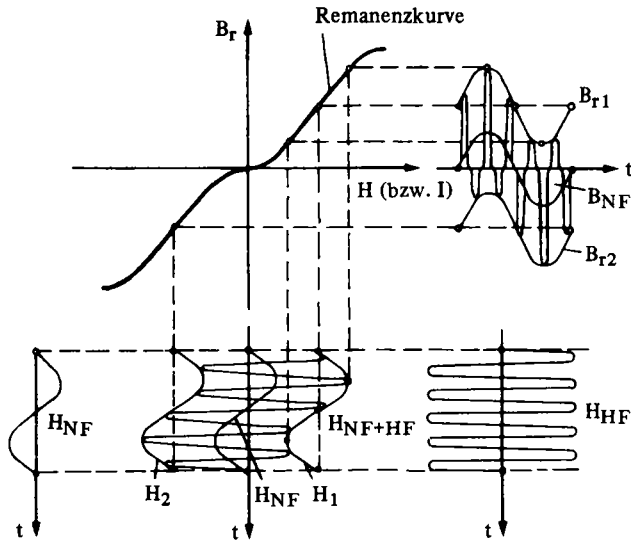


Abb. 7/12. Aufzeichnungsprozess mit HF-Vormagnetisierung.

und B_{r2} konstruiert und danach die gemittelte Kurve B_{NF} , Arbeitskennlinie genannt (Abb. 7/13, dick ausgezogen). Ein Nachteil der Darstellung nach der Remanenzkurventheorie ist, daß hierbei nicht das tatsächliche Amplitudenverhältnis von HF zu NF berücksichtigt wird.

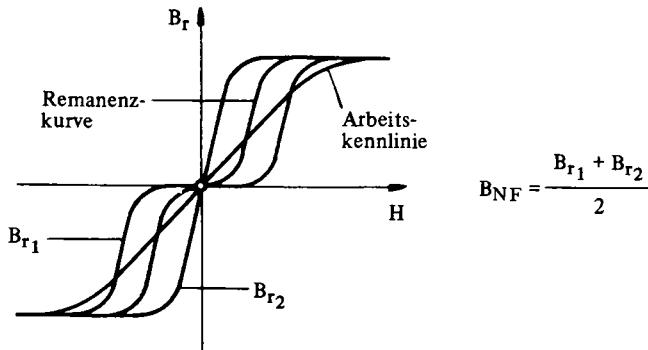


Abb. 7/13. Darstellung der Arbeitskennlinie nach Camras [6.7].

Selbstentmagnetisierungsverluste

Im Band tritt schon unmittelbar nach der Aufzeichnung eine entmagnetisierende Wirkung dadurch auf, daß Abschnitte entgegengesetzter Magnetisierungsrichtungen dicht aufeinanderfolgen. Stellt man sich dies in einem vereinfachten Modell so

vor, daß das Band aus einer Kette aneinandergereihter Permanentmagnete wechselnder Polarität besteht, so wird verständlich, daß die Verluste bei gegebener Banddicke mit kleiner werdender Wellenlänge der Aufzeichnung bzw. mit steigender Frequenz infolge Selbstentmagnetisierung ansteigen müssen. Man bezeichnet dies auch als Bandflußdämpfung. Hochkoerzitive Bänder, bei denen zur Löschung einer Magnetisierung starke Gegenfelder einwirken müssen, sind dieser entmagnetisierenden Wirkung weniger ausgesetzt. Moderne Bänder, besonders für kleine Bandgeschwindigkeiten, haben deshalb hohe Koerzitivfeldstärken.

Elektroakustische Eigenschaften von Bändern

Die Anforderungen an Magnettonbänder richten sich nach der Gerätekategorie, für die ein Magnettonband bestimmt ist. Man unterscheidet die Gerätekategorien hauptsächlich nach den Bandgeschwindigkeiten:

Studiogeräte 38 und 19s

Heimgeräte 19 h, 9,5 und 4,76

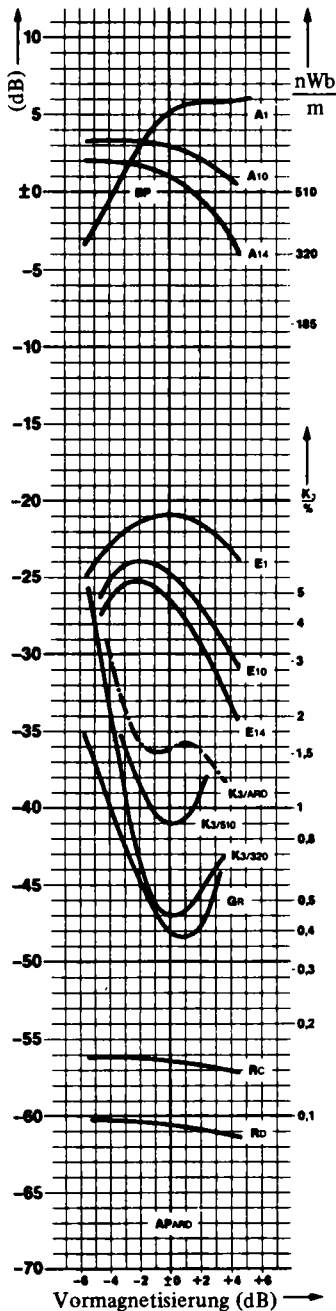
Kassettengeräte 4,76

HiFi-Kassettengeräte 4,76

Die elektroakustischen Eigenschaften des Bandes, die für die Qualität einer Tonaufnahme und -archivierung wesentlich sind, werden vor allem durch die Aussteuerbarkeit für hohe und tiefe Frequenzen, den Geräuschspannungsabstand und die Kopierdämpfung bestimmt. Die Qualität eines Bandes stellt einen Kompromiß zwischen diesen Größen dar. In der Regel geht eine Verbesserung einer dieser Größen zu Lasten einer oder der beiden anderen. Die Eigenschaften eines Bandes werden in einem Datenblatt erfaßt. Im einzelnen werden dabei die unten genannten Meßgrößen angegeben, und zwar einmal als Werte, die für den sog. ARD- Arbeitspunkt gelten, zum anderen als Diagramm in Abhängigkeit vom HF- Vormagnetisierungsstrom. Die Magnetbandgeräte müssen auf die jeweils verwendete Bandsorte eingemessen werden und zwar durch die jeweils optimale Einstellung des HF-Vormagnetisierungsstroms, des sog. Arbeitspunkts und des NF-Aufsprechstroms. Im Rahmen dieser Darstellungen werden allerdings keine detaillierten Einmeßanweisungen gegeben; siehe dazu Kapitel 11.

Einfluß des Vormagnetisierungsstroms

Die Qualität der magnetischen Aufzeichnung hängt wesentlich von der richtigen Bemessung des Vormagnetisierungsstroms ab. *Abb. 7/14* zeigt am Beispiel eines Studiobandes für 38 cm/s die Abhängigkeit der wichtigsten für das Band charakteristischen elektroakustischen Daten vom Vormagnetisierungsstrom. Bezugswert (OdB) der Abbildung ist der in den öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten (ARD) für das Band empfohlene Wert. Die elektroakustischen Größen werden unten definiert.



Meßbedingungen

Bandgeschwindigkeit	38,1 cm/s
Spurbreite (Wiedergabekopf)	2,75 mm
Sprechkopf-Spaltbreite	18 μ m
Wiedergabe-Entzerrung	35 μ s
Bezugspegel (1 kHz)	510 nWb/m
ARD-Arbeitspunktdefinition	K_3 -minimum
Arbeitspunkt	+1,0 dB
(bezogen auf ARD-Referenzleerband)	
BP	Bezugspegel
AP_{ARD}	ARD-Arbeitspunkt
A_1	Aussteuerbarkeit bei 1 kHz, $k_3 = 3\%$
A_{10}	max. Aussteuerbarkeit bei 10 kHz
A_{14}	max. Aussteuerbarkeit bei 14 kHz
a_{d3}	Differenztondämpfung nach DIN 45 403
E_1	Empfindlichkeit bei 1 kHz
E_{10}	Empfindlichkeit bei 10 kHz
E_{14}	Empfindlichkeit bei 14 kHz
$k_{3/320}$	Klirrdämpfung bei 320 nWb/m
$k_{3/ARD}$	$K_{3/510}$ des ARD-Referenzleerbandes
$k_{3/510}$	Klirrdämpfung bei ARD-Bezugspegel 510 nWb/m
G_R	Gleichfeldrauschspannungsabstand, bewertet
R_C	Störspannungsabstand rel. zu BP, bewertet mit CCIR-Filter 468-I
R_D	wie vor, jedoch nach DIN 45 405 bewertet
A_1/R_C	Störspannungsabstand (Dynamik) rel. zur Aussteuerbarkeit 1 kHz (CCIR-Filter)
A_1/R_D	wie vor, jedoch nach DIN 45 405 bewertet
KO	Kopierdämpfung

Abb. 7/14. Abhängigkeit einiger elektroakustischer Bändeigenschaften von der Größe des Vormagnetisierungsstroms (Erläuterung der Größen im Text).

Die empfohlene Einstellung des Arbeitspunktes führt zu geringen Verzerrungen (große Dämpfung des kubischen Klirrfaktors) und niedrigem Rauschpegel (großer Modulationsrauschspannungsabstand) – bei manchen Bändern allerdings auf Kosten einer an sich möglichen besseren Aussteuerbarkeit bei hohen Frequenzen. Die richtige Einstellung des Arbeitspunktes hängt vom Bandtyp ab, aber auch von der Sprechkopfspaltbreite und vom Kopfkernmaterial. Eine Deutung der zunächst empirisch gefundenen, ziemlich verwickelten Zusammenhänge ist näherungsweise möglich [7.1], [7.10]. Auch die Frequenz des Vormagnetisierungsstroms beeinflusst die Qualität der Aufnahme. Für hochwertige Aufzeichnungen wird der Bereich von 80 bis 150 kHz bevorzugt, um auch bei hoher Aussteuerung hörbare Differenztöne zwischen HF und NF zu vermeiden. Je höher die Frequenz ist, um so größer muß jedoch wegen der frequenzabhängigen Verluste im Lösch- und Sprechkopf der HF-Energieaufwand sein.

Vormagnetisierungsstrombedarf und Arbeitspunkt

Der Vormagnetisierungsstrom wird zunächst so eingestellt, daß der maximale NF-Ausgangspegel erreicht wird. In der Studiogeräteklasse wird dann der Vormagnetisierungsstrom weiter erhöht, bis der Ausgangspegel um 2 dB abfällt. Die Aufzeichnungsfrequenz beträgt 10 kHz, ca. 20 dB unter Vollaussteuerung. Der Unterschied im Strombedarf für den Prüfling gegenüber dem Strom für das DIN-Referenzleerband wird als Vormagnetisierungsstrombedarf in dB angegeben.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, werden Bandmessungen mit dem Vormagnetisierungsstrom des DIN-Referenzleerbandes vorgenommen. Im Betrieb sind die Studiomaschinen jedoch oft auf einen davon abweichenden Wert einzustellen. Der optimale Wert, der bei unterschiedlichen Bandsorten anders sein kann, liegt dort, wo Klirrfaktor und Gleichfeldrauschen möglichst gering sind.

Der Empfindlichkeitsabfall für den empfohlenen Arbeitspunkt ΔE_{10} gibt deshalb an, um wieviel dB der Ausgangspegel bei der Einstellung des Vormagnetisierungsstroms nach dem Maximum abfallen soll.

Manchmal wird auch ein „empfohlener Arbeitspunkt“ angegeben. Hierunter versteht man die Abweichung des Vormagnetisierungsstroms vom DIN-Arbeitspunkt beim DIN-Referenzleerband, also in der Studiogeräteklasse der Unterschied gegenüber dem „2-dB-Abfall“.

Bezugspegel

Nach DIN 45 513 ist der Bezugswert des Bandflusses bei Studiobändern mit den Bandgeschwindigkeiten 38 cm/s, 19 cm/s und 76 cm/s auf 320 nWb/m entsprechend 320 pW/mm festgelegt. Dieser Wert wurde als Kompromiß zwischen der Forderung nach einem möglichst großen Störabstand und möglichst geringen Verzerrungen gewählt. Bei Einführung der Stereophonie und der damit verbundenen Reduzierung der Spurbreite von 6,3 auf 2,75 mm wurde in den öffentlich-rechtlichen Rundfunkan-

stalten der Bezugswert um 4,05 dB auf 514 nWb/m hinaufgesetzt. Dies mußte geschehen, um die Lautstärke einer Stereoaufnahme derjenigen einer Monoaufnahme, die über dieselbe Wiedergabeordnung gehört wird, anzugleichen (+ 3dB) und die Leerspur auf dem Band auszugleichen (+ 1,05 dB). Dies war möglich, weil inzwischen auch die Aussteuerbarkeit der Bänder verbessert werden konnte. Dieser erhöhte Bezugswert von 514 nWb/m wird ARD-Bezugswert genannt und ist die derzeitige Aussteuerungsgrenze entsprechend 6 dBu, 0 dB, 100% bzw. 1,55 V. Für Bandmessungen gilt aber weiterhin der Bezugswert 320 nWb/m.

Mit Einführung des Rauschverminderungssystems Telcom c4 wurde der Störspannungsabstand ganz erheblich vergrößert. Deshalb wurde in fast allen Rundfunkanstalten der Bezugswert für Aufnahmen mit Telcom wieder auf den genormten Bezugswert 320 nWb/m zurückgenommen. Die Herabsetzung des Pegels bei Telcomaufnahmen um 4 dB in dem Rauschunterdrückungssystem vorgenommen. Zu Lasten eines an sich größer möglichen Störabstands wird sowohl das Maß an Verzerrungen reduziert als auch der Abstand zwischen Höhen- und Tiefenaussteuerbarkeit.

Für Heimton- und Kassettenbänder gelten niedrigere Bezugswerte nach DIN 45 513: für die Bandgeschwindigkeiten 9,5 cm/s und für 4,76 cm/s 250 nWb/m.

Frequenzgang

In der Studiogerätekategorie wird der Frequenzgang von Magnetbändern als Unterschied des Ausgangspegels des Prüflings zum Ausgangspegel des DIN-Referenzbandes bei der Aufzeichnung von 14 kHz angegeben. Das verwendete Magnetbandgerät muß so eingemessen sein, daß der Frequenzgang bei der Aufzeichnung auf das Referenzband geradlinig ist. Der Aufzeichnungspegel soll etwa 20 dB unter Vollaussteuerung liegen.

Aussteuerbarkeit

Die Aussteuerbarkeit eines Bandes ist der maximal mögliche Wiedergabepegel bei der angegebenen Frequenz (1, 10 und 14 kHz) relativ zum jeweiligen Bezugspegel (514 oder 320 nWb/m). Das Verhalten des Bandes bezüglich Aussteuerbarkeit zeigt gerade entgegengesetztes Verhalten bei 1 kHz und bei hohen Frequenzen, wenn der Vormagnetisierungsstrom erhöht wird. Die Lage des Arbeitspunktes stellt auch diesbezüglich einen Kompromiß dar (*Abb. 7/14*).

Bei 1 kHz wird die Aussteuerbarkeit angegeben als Unterschied zwischen dem Eingangspegel, der einen Klirrfaktor von 3% vom Band erzeugt, und dem Bezugspegel. Der gefundene Wert gibt den Bandfluß relativ zum Bezugsband, also relativ zu 320 nWb/m an und wird als Bandfluß bei Vollaussteuerung bezeichnet.

Da hohe Frequenzen (10 bis 14 kHz) wegen der geringeren wirksamen Schichtdicke wesentlich niedrigere Wiedergabepegel ergeben, ist die Aussteuerbarkeit bei den hohen Frequenzen (kleinen Wellenlängen) von besonderer Bedeutung. Dazu wird

das zu prüfende Band mit dem DIN-Referenzband verglichen: In der Studiogerätekategorie wird bei einer Frequenz von 14 kHz die Eingangsspannung bei der Aufnahme jeweils so weit erhöht, bis die Ausgangsspannung des Wiedergabeverstärkers nicht mehr ansteigt. Der Pegelunterschied zwischen dem Prüfling und dem Leerteil des DIN-Referenzbandes wird dann als maximale Aussteuerbarkeit bei hohen Frequenzen bezeichnet. Diese Angabe dient nur Bandvergleichen. Praktisch nutzbar ist die Aussteuerbarkeit bei hohen Frequenzen nicht, weil längst die Sättigungsmagnetisierung erreicht ist mit all ihren hörbaren Verzerrungs- und Begrenzungerscheinungen. Auf das Magnetband kann im praktischen Aufnahmebetrieb bei hohen Frequenzen höchstens bis 4 dB unter dem Wert für maximale Aussteuerbarkeit aufgezeichnet werden.

Empfindlichkeit

Der Vormagnetisierungsstrom, der für das jeweilige Bezugsband nach DIN 45 513 notwendig ist, erzeugt bei einigen Bandsorten einen anderen Ausgangspegel als beim DIN-Referenzband. Der Unterschied dieses Ausgangspegels gegenüber dem des Referenzbandes wird als Empfindlichkeit bezeichnet. In der Studiogerätekategorie beträgt die Meßfrequenz 1 kHz bei einem Pegel von etwa 20 dB unter Vollaussteuerung; gemessen wird allerdings bei gleichem Strom auch bei den Frequenzen 10 und 14 kHz.

Nichtlineare Verzerrungen

Da die Remanenzkennlinie symmetrisch zum Nullpunkt ist, entstehen als Verzerrungsprodukte zunächst nur die ungeradzahigen Harmonischen, vor allem k_3 . Wird jedoch durch eine Unsymmetrie des Vormagnetisierungsstroms (Gleichstromkomponente) der Arbeitspunkt verschoben, so treten zusätzlich geradzahige Harmonische auf. Eine magnetische Remanenz der Köpfe führt ebenfalls zu geradzahigen Verzerrungskomponenten. k_3 liegt bei modernen Bändern auch bei einem Bezugspegel von 514 nWb/m unter 1 %, bei einem Bezugspegel von 320 nWb/m unter 0,5 %. Nichtlineare Verzerrungen werden auch als Klirrdämpfung a_k in dB angegeben (Differenz von Pegel des Gesamtsignals und des Anteils der Verzerrungen); demnach liegt a_{k_3} bei etwa 40 dB, a_{k_2} soll über 50 dB liegen.

Jungfräuliches Rauschen und Betriebsrauschen

Bei einem neuen oder gut entmagnetisierten Band sind die Magnetisierungsrichtungen der einzelnen Partikel statistisch verteilt. Die Magnetisierung kompensiert sich daher in kleinen Bereichen weitgehend; das am Hörkopf vorbeigleitende Band gibt nur ein relativ geringes Rauschen ab, das sog. jungfräuliche Rauschen. Durch Einwirkung der HF-Vormagnetisierung wird dieses Rauschen um ca. 4,5 dB erhöht und ergibt das sog. Betriebsrauschen [7.14], [7.15]. Jungfräuliches und Betriebsrauschen enthalten vor allem hohe Frequenzen. Die Störpegel können auf den Bezugspegel 320 nWb/m oder auf Vollaussteuerung, d.h. auf den Pegel bei 3% Klirrfaktor bezo-

gen werden. Dazu wird ein Bewertungsfilter benutzt (DIN 45 405 bzw. CCIR 468-1 oder IEC 179, Kurve A, siehe Abb. 7/15).

Gleichfeldrauschen und Modulationsrauschen

Befindet sich auf dem Band ein magnetisches Gleichfeld, so entsteht aufgrund der unvermeidbaren Inhomogenität der Schicht im Hörkopf eine Rauschspannung. Im gleichen Sinne wirkt die Rauigkeit der Bandoberfläche, die zu Schwankungen des Abstandes zwischen Kopf und Band und damit zu entsprechenden Schwankungen des magnetischen Gleichfeldes im Kopf führt. Das Gleichfeld würde im Prinzip nicht rauschen, wenn es völlig gleichmäßig wäre. Seine Schwankungen führen vor allem zu dem tieffrequenten „Poltern“ gleichstrommagnetisierter Bänder. [7.15], [7.16]

Das Gleichfeldrauschen wird durch eine Unsymmetrie des Lösch- und Vormagnetisierungsstroms sowie eine Gleichfeldvormagnetisierung der Magnetköpfe und Bandführungsteile verursacht. Es ist also – im Gegensatz zum jungfräulichen und Betriebsrauschen – durchaus vermeidbar. Die Unterdrückung des Gleichfeldrauschens erfordert eine regelmäßige, sorgfältige Entmagnetisierung der Köpfe und Bandführungsteile sowie eine Symmetrierung des Vormagnetisierungsstroms.

Da auch die Nutzmodulation im Bereich jeweils einer halben Wellenlänge der aufgezeichneten Modulation eine Ausrichtung der Magnetisierung in nur einer Richtung hervorruft, ergibt sich in diesen kleinen Bereichen jeweils ein Gleichfeldrauschen, das sich der Modulation überlagert, das sog. Modulationsrauschen. Es ist der aufgezeichneten Amplitude etwa proportional. Glücklicherweise wird das Modulationsrauschen jedoch durch die Nutzaufzeichnung akustisch weitgehend verdeckt. Die Messung erfolgt nach DIN 45 519, Tl. 2 mit einem Geräusch- und Fremdspannungsmesser nach DIN 45 405 in Stellung „Fremdspannung“ unter Vorschaltung eines Filters, das die Verdeckungswirkung des Gehörs berücksichtigt. Angegeben wird der Gleichfeldrauschspannungsabstand bezogen auf den Bezugspegel.

Störspannungsabstand

Der Stör- oder Geräuschspannungsabstand wird bei einem gelöschten und vormagnetisierten Band ohne NF gemessen, es handelt sich also um das Betriebsrauschen, das alle Rauschquellen bei der magnetischen Bandaufzeichnung zusammenfaßt. Angegeben wird der Pegelabstand zum Bezugspegel oder zur Aussteuerbarkeit bei 1 kHz (Klirrfaktor 3%). Die Messung wird bewertet; derzeit sind Messungen nach drei unterschiedlichen Bewertungskurven in den Datenblättern angegeben (Abb. 7/15). Wegen der verschiedenen Möglichkeiten des Bezugswertes und der Bewertung muß beim Vergleich von Meßdaten sorgfältig auf die Meßbedingungen geachtet werden. Differenzen in den Meßergebnissen durch unterschiedliche Bewertungen bis etwa 10 dB sind möglich.

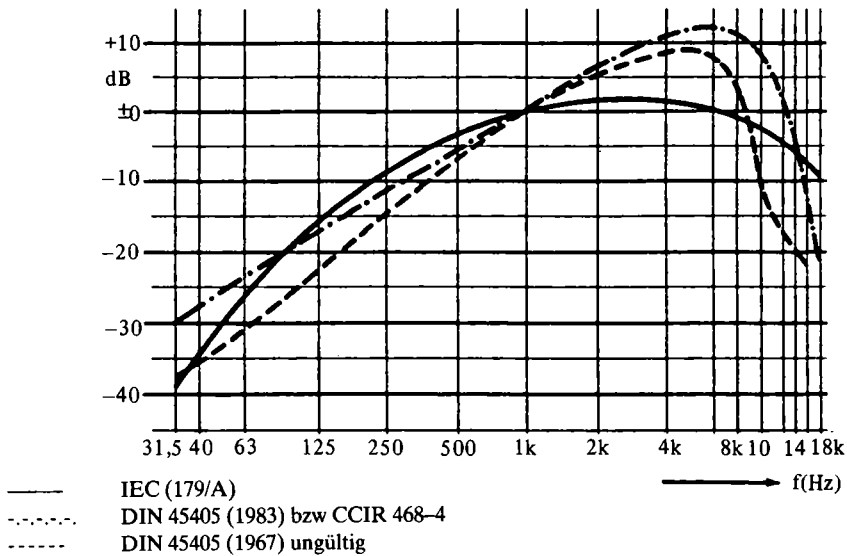


Abb. 7/15. Bewertungskurven für Störspannungsmessungen.

Seit Beginn der achtziger Jahre wurden für Produktionen im Bereich der E-Musik und für Wortproduktionen, die nicht nur Aktualitätswert haben, Rauschverminderungssysteme eingeführt, die zu einer ganz erheblichen Qualitätssteigerung des Magnettonverfahrens geführt haben. Damit können Störabstände erreicht werden, die diejenigen bei Aufnahmen ohne solche Systeme bis um etwa 20 dB übersteigen (siehe dazu 7.1, 3).

Kopiereffekt und Echolöschung

Im Bandwickel ist jede Windung den von benachbarten Windungen ausgehenden Magnetfeldern ausgesetzt. Bei längerem Lagern entsteht dadurch ein magnetisches Abbild der Modulation der Nachbarwindungen, vor allem wenn äußere magnetische Felder, höhere Temperaturen oder mechanische Erschütterungen die Ummagnetisierungsprozesse begünstigen [7.17], [7.18]. Beim Abspielen des Bandes hört man dabei, besonders wenn ein sehr lautes Schallereignis (z. B. ein Schuß) in eine Pause fällt, im Abstand jeweils einer Umdrehungsdauer des abwickelnden Tellers vor und nach dem Originalereignis ein oder mehrere sog. Echos, die außerordentlich stören können (Abb. 7/16). Aus Gründen der Geometrie des Bandwickels sind Vor- und Nachechos ungleich (Abb. 7/17).

Psychologisch stören die Vorechos mehr als die Nachechos. Die deutsche Schichtlage des Bandes berücksichtigt dies (Abb. 7/18), indem die Archive „Programm-anfang außen“ lagern; die Vorechos sind so geringer als die Nachechos. Bei internationaler Schichtlage muß für gleiche Verhältnisse „Programmende außen“ gelagert werden.

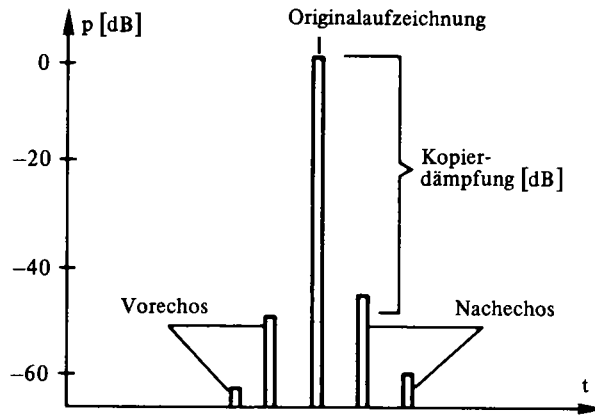


Abb. 7/16. Kopiereffekt bei deutscher Schichtlage des Bandes („Schichtaußen-Wicklung“).

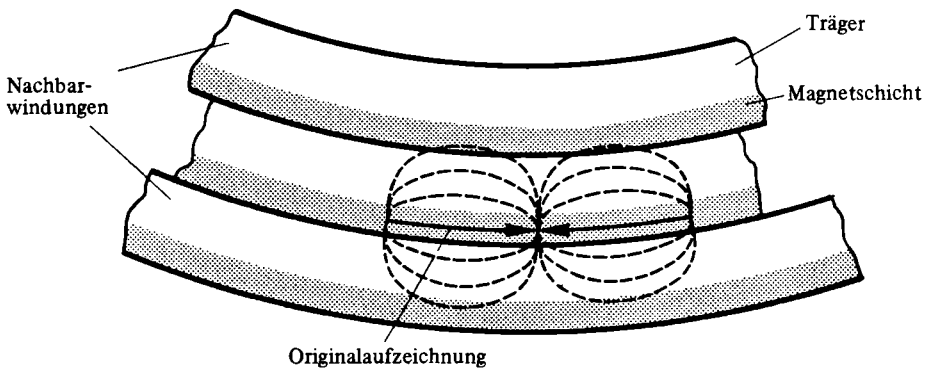


Abb. 7/17. Magnetfeld des bespielten Bandes bei deutscher Schichtlage.

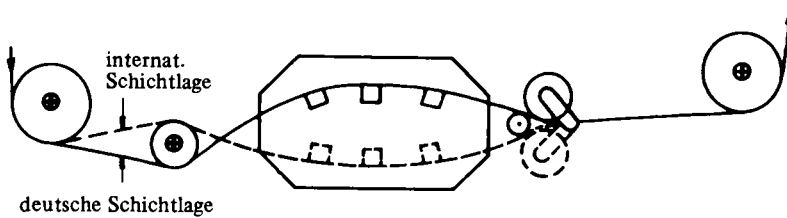


Abb. 7/18. Schichtlagen des Magnetbands.

Besonders kritisch sind bei 38 cm/s Bandgeschwindigkeit die mittleren Frequenzen, die im Bereich guter Hörbarkeit liegen und bei denen außerdem die Wellenlängen bei höheren Bandgeschwindigkeiten so groß sind, daß die Feldlinien aus dem Band heraustreten und sich über die benachbarten Windungen schließen. Ferner begünstigen geringe Trägerstärke, hohe Permeabilität der Schicht und großer Volumenfüllfaktor diesen Kopiereffekt, ebenso der Anteil „magnetisch weicher“ Partikel. Der Kopiereffekt wird meßtechnisch durch die Kopierdämpfung erfaßt; sie ist definiert als der Pegelunterschied eines mit Bezugspegel aufgezeichneten 1 kHz-Signals zu dem größten auf die Nachbarwicklung kopierten Signal nach 24 Stunden Lagerung bei 20 °C (Messungen nach DIN 45 519 Tl. 1).

Die ungünstigsten geometrischen Bedingungen für Echos bestehen dann, wenn die Wellenlänge etwa 6 mal größer ist als die Banddicke. Bei einer Bandgeschwindigkeit von 38 cm/s und der üblichen Dicke eines Studiobandes von 50 μm ergibt sich ein Maximum um 1 kHz. Da hohe Temperaturen den Kopiereffekt erheblich beschleunigen, sollten Bänder stets vor Wärmeeinwirkung geschützt werden.

Obwohl es in den letzten Jahren gelungen ist, die Kopierdämpfung durch Verringerung des Anteils magnetisch extrem weicher Teilchen wesentlich zu verbessern, ist jedoch in bestimmten Fällen eine weitere Verringerung dieser Echos wünschenswert und auch möglich. Dazu wird das Band vor der Wiedergabe einem schwachen magnetischen Wechselfeld ausgesetzt, das so bemessen ist, daß es die instabilen, durch die schwachen Magnetfelder erzeugten Echos wirksam löscht, ohne die stabilere Nutzaufzeichnung merklich anzugreifen. Das erforderliche Löschfeld kann durch einen mit schwachem Wechselstrom gespeisten Kopf erzeugt werden oder auch dadurch, daß das Band an einem schwachen Permanentmagneten mit örtlich nach Richtung und Betrag wechselndem Feld vorbeigeführt wird. In einer besonders einfachen Ausführung kann dieser Magnet aus einem zweiten, mit einem Sinus-signal stark angesteuerten Magnetband bestehen, das auf einer nierenförmigen Halterung aufgebracht ist. Bei einem Verlust an Nutzpegel von 1–2 dB lassen sich so zusätzlich Echodämpfungen von etwa 12 dB erreichen. Die Echolöschung ist eine Maßnahme, die nur in Ausnahmefällen angewandt wird.

Heimton- und Kassettengeräte

Die Meßbedingungen der Heimton- und Kassettengeräte zeigt *Tab. 7/2* im Vergleich zur Studiogeräteklasse.

Wiedergabevorgang

Wird ein besprochenes Band an einem Wiedergabekopf vorbeigeführt, so schließt sich ein Teil der aus der Bandoberfläche austretenden Feldlinien wegen der viel höheren magnetischen Leitfähigkeit des Kernmaterials über den Kopf. Der wechselnde magnetische Fluß induziert damit in der Wicklung des Hörkopfes eine Spannung, die der Änderung des magnetischen Flusses proportional ist (Induktionsgesetz). Φ_R ist der den Kopf durchsetzende Anteil des Flusses des Bandes (*Abb. 7/19*).

Tab. 7/2. Meßbedingungen bei Heimton- und Kassettengeräten.

Meßbedingungen für die Messung von Magnetbändern		Studiogeräteklasse 38/19s	Heimgeräteklasse 19h/9,5/4,76	Kassettengeräteklasse 4,76	HiFi-Kassettengeräteklasse 4,76	
Arbeitspunkt- einstellung	Frequenz Pegelabfall	10 2	6,3 3,5	6,3 2,5	6,3 3,5	kHz dB
Empfindlichkeit	Frequenz	1000	19/1000 333	333	333	Hz
	Bandfluß	320	19/320 250	250	250	pWb/mm
Frequenzgang	Frequenz	14	10	8	10	kHz
Bandfluß bei Vollaussteuerung	Klirrfaktor	3	5 HiFi 3	5	3	%
Nichtlineare Verzerrungen	Meßfrequenz	1000	333	333	333	Hz
Aussteuerbarkeit bei kleinen Wellenlängen	Frequenz	14	10	8	10	kHz
Kopierdämpfung	Frequenz	1000	500	500	500	Hz

$$U = - \frac{d\Phi_R}{dt}$$

U = Spannung [V]
 Φ_R = magnetischer Fluß [Wb]
 t = Zeit [s]

Bei für alle Frequenzen konstantem sinusförmigen Wechselfluß auf dem Band ist die Ausgangsspannung am Hörkopf proportional der Frequenz f , d.h., sie steigt mit der Frequenz an. Wegen dieser Proportionalität sagt man, die Hörkopfspannung habe einen „Omegagang“ ($\omega = 2\pi f$). Die abgetastete Frequenz ist der Bandgeschwindigkeit direkt, der aufgezeichneten Wellenlänge also umgekehrt proportional. Im Bereich niedriger und mittlerer Frequenzen erfolgt der Anstieg tatsächlich aber langsamer und bei hohen Frequenzen sinkt die Ausgangsspannung sogar ab.

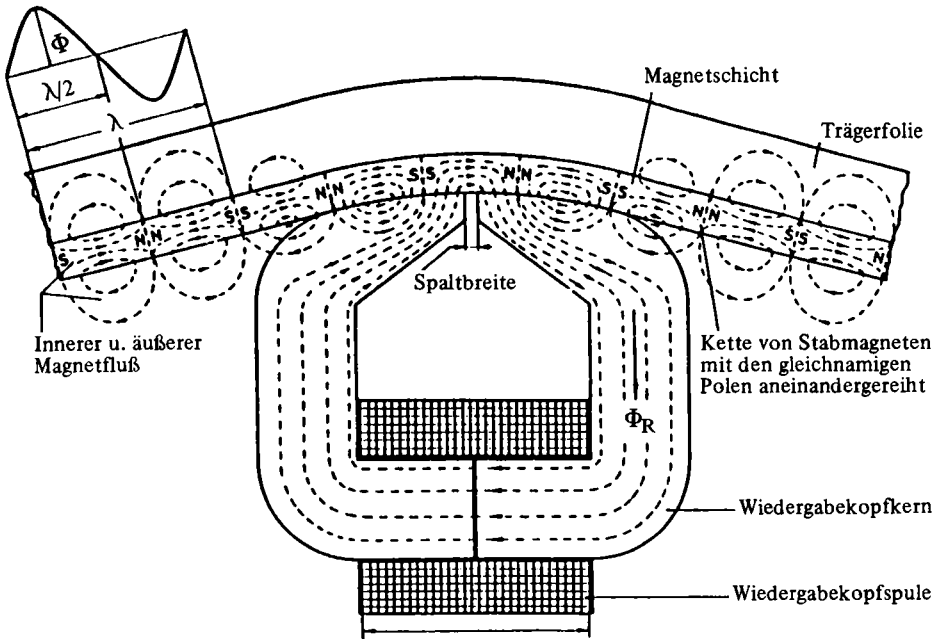


Abb. 7/19. Wiedergabevorgang.

Diese Erscheinung ist vor allem durch die Selbstentmagnetisierung des Bandes (s.o.) bedingt. Zusätzlich treten aber eine Reihe von Einflüssen bei der Wiedergabe hinzu, die den Frequenzgang beeinflussen: Abstands- und Spaltverluste werden im folgenden beschrieben.

Abstandsverluste

Bei der Abtastung ist am Hörkopfspalt immer ein kleiner Abstand der magnetischen Teilchen von der Oberfläche vorhanden, der durch die Oberflächenrauigkeit, mitgerissene Luft und vor allem durch die Dicke der Schicht bedingt ist. Diese Tatsachen wirken sich bei kleineren Wellenlängen, d.h. bei hohen Frequenzen, in einer Verringerung der in den Hörkopf induzierten Spannung aus. Die Dämpfung durch Abstands- und Schichtdickenverluste wird auch Bandflußdämpfung genannt.

Spaltverluste

Nähert sich die Wellenlänge der Aufzeichnung der Größenordnung der effektiven Spaltbreite, so tritt eine sog. Spaltbreitendämpfung auf, da stets der Mittelwert des magnetischen Feldes über die gesamte Spaltbreite abgetastet wird. Die Spaltbreitendämpfung D_{sb} ist von der Spaltbreite d und der Wellenlänge λ abhängig:

$$D_{sb} = 20 \lg \frac{\sin \pi d / \lambda}{\pi \cdot d / \lambda} \quad \begin{array}{l} D_{sb} = \text{Spaltbreitendämpfung [dB]} \\ d = \text{Spaltbreite [\mu m]} \\ \lambda = \text{Wellenlänge [\mu m]} \end{array}$$

Bei den üblichen Magnettonanlagen sind die Spaltbreitenverluste wesentlich geringer als die Selbstentmagnetisierung und die Abstandsverluste, jedoch setzen sie der Abtastung hoher Frequenzen eine prinzipielle Grenze, da die induzierte Hörfkopfspannung mit kleiner werdender Wellenlänge immer geringer wird und bei $\lambda = d$ ganz zu Null wird (Abb. 7/20).

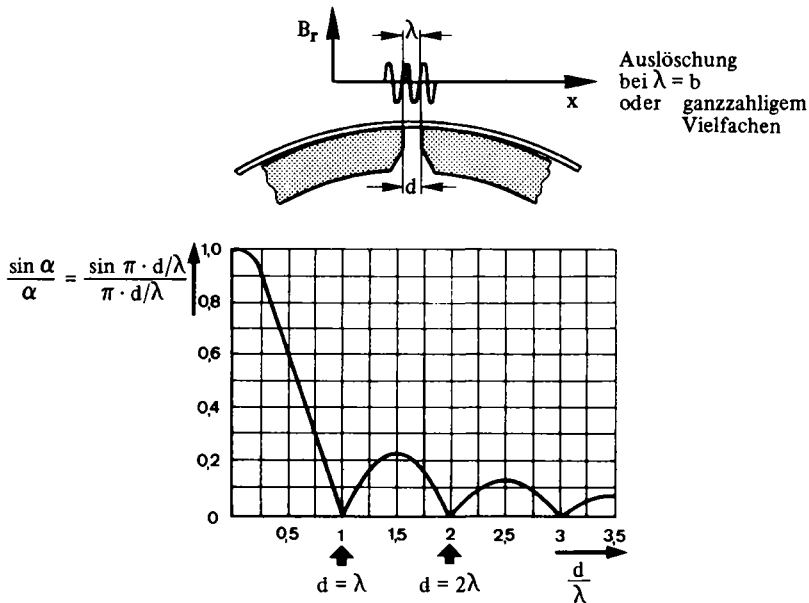


Abb. 7/20. Spaltfunktion (Verlauf des abgetasteten Bandflusses).

Stehen aufzeichnender und abtastender Spalt nicht völlig parallel, so ergeben sich ebenfalls Verluste bei kurzen Wellenlängen, die sog. Spaltwinkeldämpfung D_{sw} . Sie wirkt sich wie die Spaltbreitendämpfung aus und kann wie eine Verbreiterung des Hörfkopfspaltes behandelt werden. In der obigen Formel erscheint dann $(b \cdot \tan \alpha + d)$ anstelle von d (b = Spurbreite, α = Winkel zwischen den Spalttrichtungen).

Entzerrung des Frequenzgangs

Aufgrund des Induktionsgesetzes steigt die Spannung, die in den Hörfkopf induziert wird, bei konstantem Bandfluß linear mit der Frequenz an; sie besitzt wie gesagt

einen Omega-Gang. Dieser Frequenzgang wird im Wiedergabeverstärker begradigt. Die Verluste bei hohen Frequenzen – Selbstentmagnetisierung des Bandes, Abstandsverluste, Spaltverluste – werden durch eine Anhebung sowohl durch den Aufsprechtverstärker als auch durch den Wiedergabeverstärker ausgeglichen. Bei modernen Bändern ist die Anhebung im Aufsprechtverstärker relativ gering verglichen mit der Anhebung im Wiedergabeverstärker. Eine ausschließliche Kompensation beim Aufsprechtverstärker würde zwar den Störspannungsabstand verbessern, gleichzeitig aber bei Modulation mit starken Anteilen hoher Frequenzen eine Übersteuerung und damit starke Verzerrungen erzeugen. Ein ausschließlicher Ausgleich bei der Wiedergabe dagegen würde zwar sehr geringe nichtlineare Verzerrungen ergeben, dafür jedoch das Rauschen im oberen Übertragungsbereich erheblich verstärken.

Der Verlauf des Bandflusses ist in DIN 45 513 genormt. Die Normung stellt sicher, daß bei der Wiedergabe alle Bandsorten, die nicht für besondere Betriebsfälle entwickelt wurden, austauschbar sind. Die Bandflußkurven sind für die einzelnen Bandgeschwindigkeiten optimiert, ferner wird zwischen Studio- und Heimtonanwendung unterschieden.

Ein wichtiges Kriterium bei der Festlegung des Bandflusses und der Entzerrungen ist die Pegel-Frequenzstatistik üblicher Tonsignale. Die Durchschnittsspektren und ihre zugehörigen Pegel zeigt *Abb. 7/21*. Daraus wird ersichtlich, daß die größten Pegel zwischen 200 und 2000 Hz liegen, darunter und darüber fällt der Pegel ab, bei 10 000 Hz z.B. um rund 8 dB.

Bei der Festlegung vor allem der Wiedergabeentzerrung und des Bandflußfrequenzgangs wurde diese Tatsache berücksichtigt. *Abb. 7/22* zeigt schematisch die Frequenzgänge vor und hinter dem Aufnahmeverstärker für Meßpegel und Musik sowie den dazugehörigen Bandfluß.

Die Normung des Bandflusses definiert Frequenzgangkurven für den Bandfluß, die Frequenzkurven entsprechen, wie sie von einfachen RC-Gliedern erzeugt werden. Für die Anhebung bei tiefen Frequenzen legt man dabei die Reihenschaltung, für die Absenkung bei den hohen Frequenzen die Parallelschaltung eines Widerstands mit einem Kondensator zugrunde. Durch das Produkt $R \cdot C$, das als Zeitkonstante τ bezeichnet wird, kann der Frequenzgang definiert werden (*Abb. 7/23*). Die Zeitkonstante wird im Tonfrequenzbereich in μs angegeben.

Reihenschaltung:

$$D_R = 20 \log \left(\frac{1}{2 \pi f \cdot \tau} \cdot \sqrt{1 + (2 \pi f \cdot \tau)^2} \right) [\text{dB}]$$

$$\tau = R \cdot C \qquad f_o = \frac{1}{2 \pi \tau}$$

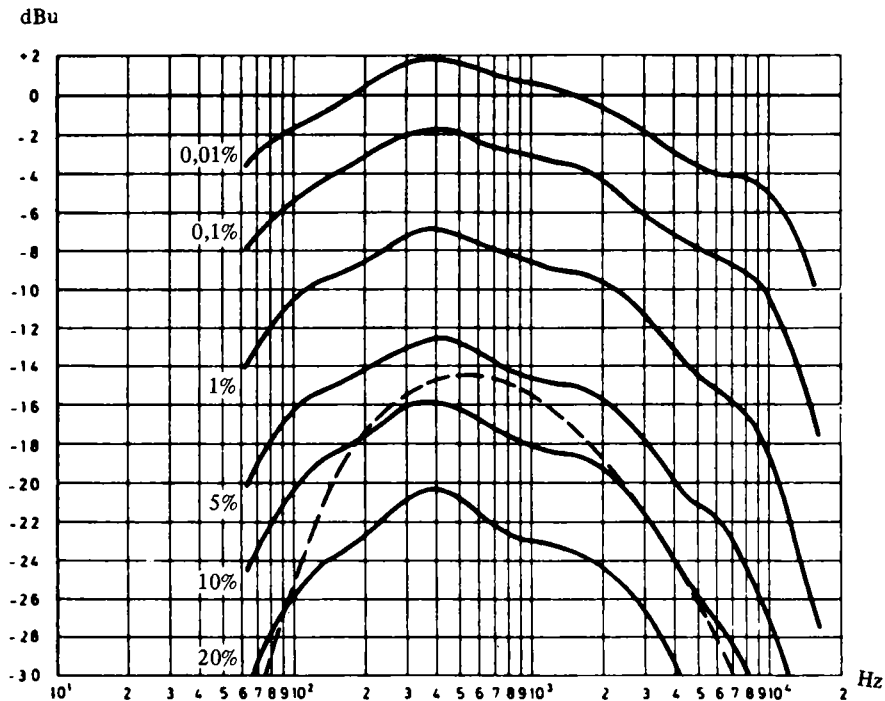


Abb. 7/21. Spektrale Amplitudenverteilung des Mittelwerts über 24 Stunden, Parameter: verschiedene Zeitprozent, gestrichelt: UER-Rauschen.

Parallelschaltung:

$$D_p = 20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (2 \pi f \cdot \tau)^2}} \right) [\text{dB}]$$

$$\tau = R \cdot C \quad f_o = \frac{1}{2 \pi \tau}$$

Tab. 7/3 nennt die Zeitkonstanten und Bezugsbandflußwerte nach DIN 45 513 für die verschiedenen Magnetbänder, Abb. 7/24 zeigt die wichtigsten Kurven.

Die nach DIN 45 513 genormte Bandflußkurve und die Bezugswerte folgen einer Empfehlung nach IEC. Neben dieser Normung gibt es international noch eine Normung der Bandflußkurven nach NAB. Tab. 7/4 gibt für die wichtigsten Studiobänder die DIN- und NAB-Entzerrung im Vergleich an.

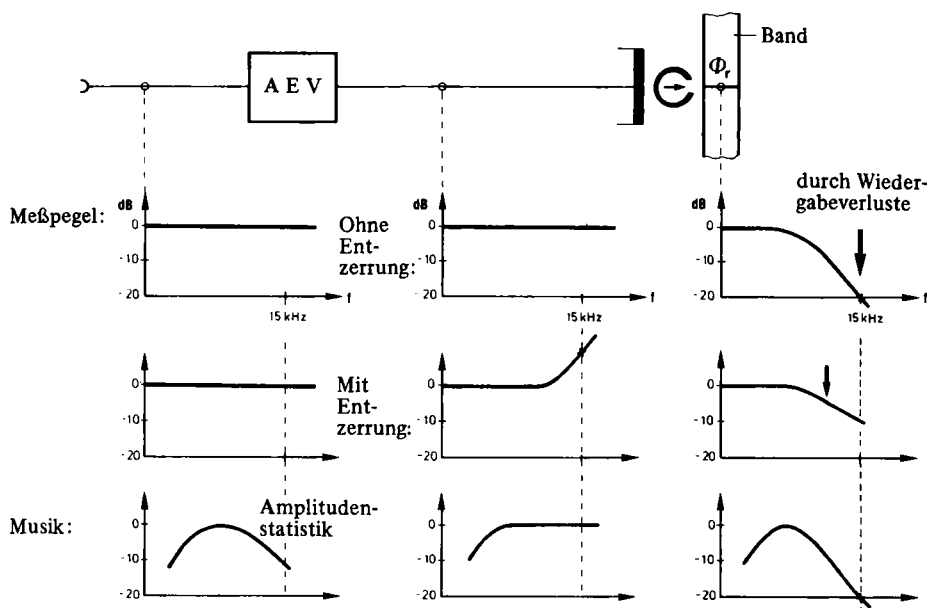


Abb. 7/22. Schematische Darstellung der Frequenzgänge vor und nach dem Aufnahme-Entzerrverstärker (AEV) sowie des Bandflusses auf dem Magnetband mit Meßpegel und Musik.

Tab. 7/3. Bezugswerte und Zeitkonstanten für die verschiedenen Magnetbänder nach DIN 45 513. Bei Kassettenbändern sind zwei verschiedene Zeitkonstanten möglich: die Entzerrung 3180/70 μs für Chrombänder, 3180/120 μs für Eisenbänder.

Bandklasse	Bandfluß pro mm Spurbreite	Wiedergabe-Entzerrung Zeitkonstante τ für Magnetflußverlauf	
		Tiefen	Höhen
76	320 pWb	—	17,5 μs
38	320 pWb	—	35 μs
19 s	320 pWb	—	70 μs
19 h	320 pWb	3180 μs	50 μs
9,5	250 pWb	3180 μs	90 μs
4,76/6,3 mm	250 pWb	3180 μs	120 μs
Cr 4,76/3,8 mm	250 pWb	3180 μs	70 μs
Fe 4,76/3,8 mm	250 pWb	3180 μs	120 μs