

Lecture Notes in Physics

Edited by J. Ehlers, München, K. Hepp, Zürich and
H. A. Weidenmüller, Heidelberg
Managing Editor: W. Beiglböck, Heidelberg

26

Alex Hubert

Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart/BRD

Theorie der Domänenwände
in geordneten Medien



Springer-Verlag
Berlin · Heidelberg · New York 1974

ISBN 3-540-06680-2 Springer-Verlag Berlin · Heidelberg · New York
ISBN 0-387-06680-2 Springer-Verlag New York · Heidelberg · Berlin

This work is subject to copyright. All rights are reserved, whether the whole or part of the material is concerned, specifically those of translation, reprinting, re-use of illustrations, broadcasting, reproduction by photocopying machine or similar means, and storage in data banks.

Under § 54 of the German Copyright Law where copies are made for other than private use, a fee is payable to the publisher, the amount of the fee to be determined by agreement with the publisher.

© by Springer-Verlag Berlin · Heidelberg 1974. Library of Congress Catalog Card Number 74-396. Printed in Germany.

Offsetprinting and bookbinding: Julius Beltz, Hemsbach/Bergstr.

INHALTSVERZEICHNIS

I	EINFÜHRUNG	1
II	WÄNDE IN FERROMAGNETISCHEN MATERIALIEN	4
1	Grundlagen des Ferromagnetismus	4
1.1	Die mikroskopischen Gesetze des Ferromagnetismus	4
1.2	Begründung der Existenz von Bereichen und Wänden	8
	Literatur	9
2	Ebene Wände und eindimensionale Probleme, Einführung	10
2.1	Berechnung einer 180° -Wand in einem einachsigen Ferromagneten	10
2.2	Definition und Berechnung der Wandweite	13
	Literatur	14
3	Allgemeine Theorie der eindimensionalen und ebenen Wände	16
3.1	Formulierung des Variationsprinzips zur Berechnung einer Wand	16
3.2	Lösung für den Spezialfall nur einer Variablen	17
3.3	Lösungsmethoden für den Fall mehrerer Variabler	18
	a) Lösung bei Kenntnis des Magnetisierungspfad	18
	b) Bestimmung des Wandverlaufs durch Linearisierung in der Umgebung einer Näherungslösung	19
	c) Untersuchung des Verhaltens in der Nähe der Randpunkte	22
3.4	Wechselwirkungen zwischen ebenen Blochwänden	25
3.5	Andere Formen der Austauschenergie	27
	a) Höhere Glieder in der Taylorentwicklung	27
	b) Diskrete Berechnung von Blochwänden	29
	Literatur	32
4	Blochwände in einachsigen Kristallen	33
4.1	Berücksichtigung höherer Glieder in der Kristallenergie	33
4.2	Wirkung eines äußeren Feldes	34
	Literatur	36
5	Wände in kubischen Kristallen	38
5.1	Kristallenergie und leichte Richtungen	38
5.2	180° -Wände	39
	a) Positive Anisotropie	39
	b) Negative Anisotropie	40

VI

5.3	90°-Wände	40
5.4	Zickzackfaltung von 90°-Wänden	42
	Literatur	44
6	Magnetische Streufelder in Blochwänden	47
6.1	Die Streufeldenergie	47
6.2	Auswirkungen der Streufeldkopplung auf die Randbedingungen	48
6.3	Berechnung der inneren Streufelder in 90°-Wänden	50
	Literatur	51
7	Néelwände	53
7.1	Definition der Néelwände	53
7.2	Blochwände, Néelwände und Übergangsstrukturen in einachsigen Kristallen	54
	a) Berechnung der verallgemeinerten Kristallenergie	54
	b) Berechnung beliebiger Wände mit einem kreisförmigen Magnetisierungspfad	55
	c) Untersuchung der Randpunkte	57
	d) Exakte numerische Berechnung einiger Magnetisierungspfade	58
7.3	Zickzackfaltung als Alternative zum Bloch-Néelwand-Übergang	59
	Literatur	60
8	Wechselwirkungen von Wänden mit elastischen Spannungen	66
8.1	Die elastische Energie und das Hookesche Gesetz	66
8.2	Magnetoelastische Wechselwirkungsenergien	68
	a) Wechselwirkungen der Magnetisierung mit den elastischen Deformationen	69
	b) Die Wechselwirkung der Magnetisierung mit Gitterrotationen	70
8.3	Die spontane Magnetostriktion	71
8.4	Der Einfluß äußerer Spannungen auf die Wandstruktur	72
8.5	Die magnetostriktive Eigenenergie in Blochwänden	73
	a) Qualitative Einführung und Übersicht	73
	b) Die Definition der magnetostriktiven Eigenenergie	75
	c) Die Berechnung der magnetostriktiven Eigenenergie für eindimensionale Probleme	76
8.6	Die magnetischen Eigenspannungen	79
8.7	Die magnetostriktive Wechselwirkung von magnetischen Strukturen mit Versetzungen	81
8.8	Die Einbeziehung der magnetostriktiven Eigenenergie in die Berechnung von Wandstrukturen	82
	Literatur	84

VII

9	Beispiele für Wandberechnungen unter Berücksichtigung der magnetostriktiven Eigenenergie	86
9.1	(100)-180°-Wände in Eisen	86
9.2	180°-Wände in Nickel	87
9.3	(110)-90°-Wände in Eisen	89
9.4	71°-Wände in Nickel	90
9.5	109°-Wände in Nickel	91
10	Variation des Betrages der Magnetisierung innerhalb von Blochwänden	96
10.1	Mikromagnetismus bei variablem magnetischen Moment	96
	a) Allgemeines	96
	b) Ableitung des Zusatzpotentials e_M für kleine Abweichungen von $I=I_c$	97
	c) Ableitung des Potentials e_M aus der Landau-schen Theorie der Phasenübergänge 2. Art	98
	d) Ableitung des Potentials e_M aus der Theorie der kritischen Phänomene	99
	e) Geltungsbereich der mikromagnetischen Theorie	101
10.2	Berechnung von Blochwänden mit Hilfe der linearisierten Theorie	101
10.3	Der lineare Modus der Blochwand	103
10.4	Der Übergang von der Blochwand zur linearen Wand	103
10.5	Quantitative Abschätzungen der Variation des magnetischen Moments innerhalb von Wänden	105
	Literatur	106
11	Die Dynamik von Blochwänden	108
11.1	Überblick	108
11.2	Die Landau-Lifshitz-Gleichung ohne Dämpfungsterm	109
11.3	Berechnung der Struktur bewegter Blochwände durch Linearisierung	111
11.4	Die exakte Lösung von Walker für bewegte 180°-Wände in einachsigen Materialien	112
	a) Ableitung des Walkerschen Ergebnisses aus der allgemeinen Theorie der Wände in einachsigen Kristallen (Abschn. 7.2)	113
	b) Die geschwindigkeitsinduzierte Faltung der Blochwand	115
11.5	Die Dynamik von Wänden in einachsigen Kristallen unter der Wirkung äußerer Magnetfelder	119
	a) Berechnung der allgemeinen Lagrangefunktion	119
	b) Gleichförmig bewegte Wände in äußeren Feldern senkrecht zur leichten Richtung	120
	c) Die oszillierende Wandbewegung nach Slonczewski	121
11.6	Die Landau-Lifshitz-Gleichung mit Dämpfungsterm	123

VIII

11.7	Der Einfluß des Dämpfungsterms auf die Bewegung von Wänden in einachsigen Kristallen	124
a)	Exakte Lösung nach Walker für gleichförmig bewegte 180° -Wände	124
b)	Verallgemeinerung auf nicht gleichförmig bewegte Wände und Wände geringeren Wandwinkels	126
c)	Die Lösung der Bewegungsgleichung für nicht gleichförmig bewegte 180° -Wände	128
d)	Mögliche Bewegungsmoden im Bereich negativer Wandbeweglichkeit	131
11.8	Geltungsbereich und Erweiterungen der entwickelten Formeln für die Wandbeweglichkeit	133
a)	Die Wandbeweglichkeit bei beliebiger Wandstruktur	133
b)	Die Bewegungsgleichung der Blochwand unter Benutzung des Begriffs der effektiven Masse	134
c)	Hinweise auf andere Dämpfungsmechanismen	135
	Literatur	137
12	Blochwände als Sonden für Relaxationsvorgänge	142
12.1	Einführung	142
12.2	Wechselwirkungen zwischen Gitterfehlern und der Magnetisierung	142
a)	Die magnetostriktive Wechselwirkung der Magnetisierung mit Punktfehlern	143
b)	Die aus der Kristallenergie abzuleitende direkte Kopplungsenergie zwischen Punktfehlern und dem Magnetisierungsfeld	144
c)	Die Wechselwirkung von Punktfehlern mit Magnetisierungsgradienten	145
12.3	Durch Gitterfehler induzierte Nachwirkungserscheinungen	146
12.4	Die Stabilisierungsenergie der Blochwände	147
a)	Allgemeine Formulierung	147
b)	Die Stabilisierungsenergie von 90° -Wänden in Eisen	149
c)	Die Stabilisierungsenergie von 180° -Wänden und tetragonalen Gitterfehlern in Eisen	151
12.5	Die Stabilisierungsfeldstärke und die Anfangsuszeptibilität	151
12.6	Die Wandbeweglichkeit unter dem Einfluß von Relaxationsvorgängen	153
12.7	Der Einfluß von Blochwandbewegungen auf andere Relaxationsvorgänge	156
	Literatur	157
13	Wände in dünnen magnetischen Schichten - Überblick	162
13.1	Definition der dünnen magnetischen Schicht	162
13.2	Anisotropien in dünnen Schichten	162
13.3	Wände in einachsigen Schichten mit der leichten Richtung in der Schichtebene - Allgemeines	164
13.4	Der Ansatz von Néel zur Berechnung von 180° -Bloch- und Néelwänden	165
13.5	Wände mit beliebigen Wandwinkeln	167

13.6	Die Stachelwand	168
	Literatur	169
14	Genauere Untersuchung der Néelwände in dünnen Schichten	174
14.1	Historischer Überblick	174
14.2	Die Grundgleichungen für die eindimensionale Néelwand	176
14.3	Die Näherungsmethode von Riedel und Seeger	178
	a) Lösung der Differentialgleichung für den Kernbereich	178
	b) Lösung der Integralgleichung für den Ausläuferbereich	179
	c) Berechnung des Streufeldes	180
	d) Berechnung der Wandenergie	181
	e) Der logarithmische Ausläufer	182
	f) Zusammenfassung und Vergleich mit anderen Methoden	183
14.4	Zur zweidimensionalen Struktur der Néelwand	184
	a) Zweidimensionale Struktur im Kernbereich	184
	b) Zweidimensionale Struktur im Ausläuferbereich	185
14.5	Wechselwirkungen zwischen Néelwänden	187
14.6	Geladene Néelwände	189
	Literatur	190
15	Genauere Untersuchung der Blochwand in dünnen Schichten	197
15.1	Historischer Überblick	197
15.2	Die Randbedingungen für zweidimensionale Blochwände	198
15.3	Die Konstruktion streufeldfreier Modelle für Wände in dünnen Schichten	200
15.4	Streufeldfreie Blochwände in dünnen Schichten	202
	a) Die streufeldfreie Wand minimaler Austauschenergie	202
	b) Die Wandenergie als Funktion der Schichtdicke	203
	c) Der Übergang zur Blochwand im massiven Material	204
	d) Blochwände in äußeren Feldern	205
15.5	Experimentelle Beobachtungen der Blochwand	206
	Literatur	207
16	Die asymmetrische Néelwand	213
16.1	Die Entdeckung des neuen Wandtyps	213
16.2	Mathematisches Modell für die asymmetrische Néelwand	214
16.3	Allgemeine Eigenschaften der asymmetrischen Néelwände	216
	a) Der symmetrische Beitrag zur Wandstruktur	216
	b) Die Wandenergie der asymmetrischen Néelwand	217

16.4	Übergänge zwischen verschiedenen Wandtypen und ihre experimentelle Beobachtung	218
16.5	Wechselwirkungen zwischen asymmetrischen Néelwänden	220
	Literatur	221
17	Wände in Schichten senkrechter Anisotropie	226
17.1	Einführung	226
17.2	Ein einfaches zweidimensionales Wandmodell	226
18	Dynamik von Wänden in dünnen magnetischen Schichten	234
18.1	Die Wandbeweglichkeit im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten	234
18.2	Die effektive Wandmasse von Blochwänden in dünnen Schichten	236
18.3	Die effektive Masse und die Struktur bewegter asymmetrischer Néelwände	237
18.4	Der Geschwindigkeits-induzierte Bloch-Néelwand-Übergang	238
18.5	Bewegte eindimensionale Néelwände	239
	Literatur	240
19	Übergangslinien zwischen Domänenwänden verschiedenen Drehsinns	246
19.1	Einführung	246
19.2	Streufeldfreie Übergangslinien innerhalb von 180° -Wänden	247
	Literatur	250

III DOMÄNENWÄNDE IN SUPRALEITERN

1	Grundlagen der phänomenologischen Theorie der Supraleitung	254
1.1	Die Ginzburg-Landau-Gleichungen	254
1.2	Geltungsbereich und Erweiterungen des Ginzburg-Landau-Funktional	257
1.3	Kristallanisotropie in Supraleitern	260
1.4	Die Magnetisierungskurve und der Zwischenzustand in Typ-I-Supraleitern	261
	Literatur	264
2	Berechnung von ebenen S-N-Wänden	267
2.1	Berechnung im Rahmen der GL-Theorie	267
	a) Allgemeine Beziehungen	267
	b) Analytische Berechnung in den Grenzfällen $\kappa \ll 1$ und $\kappa \rightarrow \infty$	268
	c) Die Nullstelle der Wandenergie	269
	d) Numerische Berechnungen der S-N-Wand für beliebige κ	270

2.2	Berechnung von S-N-Wänden mit Hilfe des Funktionals von Neumann und Tewordt	272
	a) Allgemeine Beziehungen	272
	b) Analytische Berechnung in den beiden Grenzfällen $\kappa \ll 1$ und $\kappa \rightarrow \infty$	273
	c) Numerische Berechnungen für beliebige κ und kleine δ	275
2.3	Anisotropie der Wandenergie	277
	a) Hexagonale Kristalle	277
	b) Kubische Kristalle	278
	c) Die anisotrope Aufweitung einer Flußröhre	280
	Literatur	281
3	Domänenwände in Typ-II-Supraleitern	287
3.1	Einführung	287
3.2	Die Differentialgleichungen und Randbedingungen für rotationssymmetrische Flußlinien	288
	a) Die Kreiszellennäherung	288
	b) Die Differentialgleichung für rotationssymmetrische Flußlinien	290
3.3	Das Verhalten der Funktionen $f(r)$ und $h(r)$ für große r	292
3.4	Berechnung der oberen kritischen Feldstärke H_{c2}	293
3.5	Die Eigenschaften des Flußliniengitters im Bereich anziehender Wechselwirkungen	295
3.6	Abschätzung der Wandenergie zwischen Flußliniengitter und Meissnerzustand als Folge der anziehenden Wechselwirkung	297
3.7	Möglichkeiten der Verallgemeinerung der Rechnungen auf tiefere Temperaturen	299
	Literatur	300

IV ANDERE DOMÄNENWÄNDE UND PHASENGRENZFLÄCHEN

1	Überblick	306
2	Domänenwände in antiferromagnetischen Materialien	308
2.1	Antiferromagnetische Spinstrukturen	308
2.2	Begründung der Existenz von Bereichen und Wänden in Antiferromagnetika	309
2.3	Domänenwände in einachsigen Antiferromagneten	312
2.4	Wände in "schwach ferromagnetischen" Materialien	316
2.5	Wände in kubischen Antiferromagneten vom Typ NiO	320
	a) Der Grundzustand und die freie Energie des NiO	320
	b) Berechnung einer T-Wand in NiO	324
	c) S-Wände in NiO	327

2.6	Wände in Antiferromagnetika mit Schraubenstruktur	327
	a) Einführung	327
	b) Kontinuumstheoretische Behandlung der Schraubenstrukturen	329
	c) Die Übergangswand zwischen Gebieten verschiedenen Drehsinns	330
	d) Der Übergang von der Schrauben- zur Fächerstruktur	331
	e) Die Domänenwand zwischen Schrauben- und Fächerbereichen	333
2.7	Domänenwände in Chrom	334
	Literatur	336
3	Domänenwände in ferroelektrischen Materialien	342
3.1	Parallelen und Unterschiede zwischen Ferroelektrizität und Ferromagnetismus	342
3.2	Begründung der Existenz von Bereichen und Wänden in Ferroelektrika	344
3.3	Allgemeine Überlegungen und Beobachtungen zu Domänenwänden in ferroelektrischen Kristallen	345
3.4	Die Korrelations- oder Steifigkeitsenergie in Ferroelektrika	346
	a) Frühere Ansätze	346
	b) Der Vorschlag von Kittel	348
	Literatur	351
4	Verschiedene Domänenwände	355
4.1	Kristallographische Grenzflächen	355
4.2	Phasengrenzflächen in geordneten Legierungen und äquivalenten Systemen	356
4.3	Domänenwände in diamagnetischen Stoffen unter den Bedingungen des de-Haas-van-Alphen-Effekts	358
4.4	Domänenwände in Flüssigen Kristallen	358
	Literatur	360
	Autorenverzeichnis	364
	Liste der Bezeichnungen	368