

Inhaltsverzeichnis

1 Die bruchmechanische Behandlung rissartiger Schienenfehler	1
1.1 Grundzüge der linear-elastischen Bruchmechanik [1.1]	1
1.1.1 Die Spannungsverteilung an idealen Rissen	1
1.1.2 Rissausbreitungsphänomene und Idealisierungen der LEBM . .	6
1.1.3 Die Verschiebungen an idealen Rissen	12
1.1.4 Die Deformationsenergie im Material des Riss spitzenbereiches .	13
1.1.5 Die plastische Zone an der Riss spitze	16
1.2 Spannungintensitätsfaktoren für rissartige Schienenfehler	23
1.2.1 Methoden zur Bestimmung von Spannungintensitätsfaktoren .	23
1.2.2 Finite-Element-Berechnung von Spannungintensitätsfaktoren . .	25
1.2.3 Spannungintensitätsfaktoren für Querrisse im Schienenkopf . .	29
1.2.4 Spannungintensitätsfaktoren für Querrisse im Schienenfuß . .	39
1.2.5 Spannungintensitätsfaktoren für Stegbohrungsrisse	44
1.2.6 Vertikale Längsrisse im Schienenkopf bzw. -steg	50
1.2.7 Spannungintensitätsfaktoren für rissartige Überwalzungen . .	53
1.2.8 Anmerkungen zur Modellierung von Rollkontakteermüdungsrissen	56
1.3 Die bruchmechanischen Eigenschaften von Schienenstählen	57
1.3.1 Festlegungen im Standard DIN EN 13674-1 [1.41]	57
1.3.2 Der Schwellenwert der Ermüdungsrissausbreitung von Schienenwerkstoffen	62
1.3.3 Die Risswachstumsrate bei zyklischer Modus-I-Belastung	67
1.3.4 Die Bruchzähigkeitseigenschaften von Schienenwerkstoffen . .	98
1.4 Die Eigenschaften kaltverformten Schienenstahls	110
1.4.1 Experimentelle Kaltverformung von Schienenstahl	110
1.4.2 Die bruchmechanischen Eigenschaften von kaltgewalztem Schienenstahl 900A	120

1.4.3	Die Risswachstumseigenschaften von ECAP-umgeformtem Schienenstahl R260	127
1.4.4	Die Bruchzähigkeit von ECAP-/HPT-umgeformtem Schienenstahl R260	129
1.4.5	Bilanz bisheriger Untersuchungen an kaltverfestigtem Schienenstahl	130
1.4.6	Zur Ermüdungsrißgeometrie im perlitischen Gefüge (nach <i>Toribio</i> u.a.)	134
1.5	Bruchmechanische Analysen des Verhaltens rissartiger Schienenfehler	135
1.5.1	Rissausbreitungsphänomene und Kriterien für Eisenbahnschienen	135
1.5.2	Zur Übertragung der Bruchzähigkeit von Proben auf Schienen	138
1.5.3	Zur Berücksichtigung stochastischer Schwingweiten beim Risswachstum	141
1.5.4	Zur Berücksichtigung stochastischer Frequenzen beim Risswachstum	142
1.5.5	Zur Übertragung des Schwellenwertes von Proben auf Schienen	143
1.5.6	Betrachtung und Darstellung der Rissausbreitungsphänomene	143
1.5.7	Probabilistische Analyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation	145
1.6	Der bruchmechanische Sicherheitsnachweis	151
1.6.1	Einleitende Anmerkungen zum Sicherheitsnachweis	151
1.6.2	Die Verwendung von Sicherheitsbeiwerten in der Bruchmechanik	152
1.6.3	Schädigungsstadien, Versagensformen und zulässige Risse	155
1.6.4	Die Ableitung der Rissgrenzmaße aus probabilistischen Analysen	156
1.6.5	Anwendung der Rissgrenzmaße	170
1.6.6	Schlussfolgerungen für die bruchmechanische Sicherheitsbewertung	171
1.6.7	Bruchmechanisch berechnete und empirisch festgelegte Rissgrößen	172
1.7	Zur Anwendbarkeit der Bruchmechanik auf Eisenbahnschienen	173
1.7.1	Die Dauerfestigkeit von Überwalzungen	173
1.7.2	Das Wachstum von Rissen in Eisenbahnschienen	175
1.7.3	Das Bruchverhalten von Eisenbahnschienen	181
1.7.4	Das Wachstum von Rissen in Eisenbahnschienen unter Schubbeanspruchung	183
	Literatur	186

2 Von der Wahrscheinlichkeit der zerstörungsfreien Fehlerauffindung zur bruchmechanischen Rissbewertung bei der <i>Deutschen Reichsbahn</i>	199
2.1 Die Auffindung der Schienenfehler [2.1]	200
2.1.1 Die Effektivität der bei der <i>Deutschen Reichsbahn</i> angewendeten Methoden zur Auffindung von Schienenbrüchen	200
2.1.2 Zur Effektivität einer systematischen zerstörungsfreien Schienenprüfung	201
2.2 Analyse kritischer Querrisse bei zulässiger Biegebeanspruchung [2.8] . .	204
2.2.1 Analyse des Einflusses von Verspannungstemperatur und Bruchzähigkeit	207
2.2.2 Analyse des Einflusses des Schienenkopfverschleißes	209
2.2.3 Analyse des Einflusses des Schienenprofils	211
2.2.4 Analyse des Einflusses der jahreszeitlichen Temperaturänderungen	212
2.2.5 Anmerkungen zu den Berechnungsannahmen und -resultaten	213
2.3 Analyse des Rissverhaltens bei dynamischer Radkraftbeanspruchung [2.23]	214
2.3.1 Kritische Querrisse im Schienenfuß	215
2.3.2 Kritische Anrisse im Schienenkopf	216
2.3.3 Kritische Anrisse im Schienensesteg	220
2.3.4 Analyse des Risswachstums für Schienen und Schienenschweißungen [2.32]	231
2.4 Die Ableitung der Größe zulässiger Risse in Schienen [2.39]	237
2.4.1 Anmerkungen zur probabilistischen Analyse und Bewertung . . .	238
2.4.2 Die bruchmechanische Bewertung von Fahrflächenquerrissen . .	241
2.4.3 Die empirische Bewertung innerer Kopfquerrisse	251
2.4.4 Die bruchmechanische Bewertung vertikaler Kopflängsrisse [2.39]	255
2.4.5 Die empirische Bewertung horizontaler Kopflängsrisse	260
2.4.6 Die bruchmechanische Bewertung vertikaler Steglängsrisse . .	262
2.4.7 Die bruchmechanische Bewertung horizontaler Steglängsrisse .	265
2.4.8 Die bruchmechanische Bewertung von Stegbohrungsanrisse . .	270
2.4.9 Die bruchmechanische Bewertung von Querrissen im Stegbereich von Verbindungsschweißungen	273
2.4.10 Die Bewertung schräger Risse im Schienensesteg	276
2.4.11 Betrachtungen zur Bewertung von Fußquerrissen	277
2.4.12 Die empirische Bewertung vertikaler Fußlängsrisse	278
2.4.13 Resümee zu den Analysen und ihrer praktischen Nutzung	279

2.5 Katalog der Schienenfehler – Überarbeitete Fassung des Entwurfs von 1990 für die DR, März 1999	283
2.5.1 Vorbemerkung anlässlich der Überarbeitung 1999	283
I. Ziel der Klassifikation	285
II. Definitionen und Festlegungen	285
III. Kodierung der Schienenfehler	286
IV. Zusammenstellung der Schienenfehler	289
V. Ausführliche Beschreibung der Schienenfehler	296
V.01. Im folgenden nicht genannter Schaden	296
V.02. Herstellungs-, Bearbeitungs-, Behandlungsfehler	297
V.03. Bleibende Verformung	301
V.04. Korrosion	304
V.05. Oberflächenfehler auf der Fahrfläche	305
V.06. Abblätterung, Ausbröckelung	310
V.07. Verquetschung	314
V.08. Örtlich begrenzte Abnutzung	316
V.09. Riffel, wellenförmige Abnutzung	318
V.10. Schleuderstelle	321
V.11. Im folgenden nicht genannter Riß oder Bruch	325
V.12. Nicht wiederherstellbare Isolierfähigkeit	326
V.13. Bruch ohne erkennbaren Ausgangspunkt	328
V.14. Riß oder Bruch an Anschweißungen	330
V.15. Bruch beider Laschen	333
V.16. Querriß an der Fahrfläche	334
V.17. Innerer Kopfquerriß	339
V.18. Vertikaler Kopflängsriß	343
V.19. Horizontaler Kopflängsriß	346
V.20. Stegquerriß	351
V.21. Vertikaler Steglängsriß	353
V.22. Horizontaler Steglängsriß	356
V.23. Schräger Stegriß	362
V.24. Schräger Stegbohrungsriß	366
V.25. Horizontaler Stegbohrungsriß	369
V.26. Fußquerriß	372
V.27. Fußlängsriß	378
Literatur	382
3 Der Einfluss der Verspannungstemperatur auf die Rissausbreitung in Eisenbahnschienen	387
3.1 Zur Temperaturabhängigkeit des Versagens von Eisenbahnschienen	387
3.2 Elementare Einschätzung der durch $T_{V\max}$ veränderten Temperaturkräfte	390
3.3 Anmerkungen zur bruchmechanischen Analyse der Rissausbreitung	391

3.4	Annahmen für die Analyse der Rissausbreitung	392
3.4.1	Die radkraftabhängige Biegebeanspruchung der Schienen	392
3.4.2	Temperaturspannungen in Schienen	393
3.4.3	Idealisierung des Kopfquerrisses	395
3.4.4	Die bruchmechanischen Eigenschaften des Schienenstahls	396
3.4.5	Monte-Carlo-Simulation der Rissausbreitung	398
3.5	Simulation des Schienenbruchs [3.27]	401
3.6	Simulation des Risswachstums [3.29]	403
3.7	Ergebnisse der Simulationsrechnungen	406
3.8	Extrapolationen für amerikanische Verspannungsbedingung	408
	Literatur	411
4	Zur Rissausbreitung an Federstellen in Zungenschienen	413
4.1	Weichenschienen und Schienenfehler in Weichenschienen	413
4.1.1	Allgemeine Betrachtungen zu Weichenschienen	413
4.1.2	Qualifizierung der Schienenprüfung	415
4.1.3	Angaben zu Weichenbrüchen	415
4.1.4	Rissgeometrie im Fuß von Weichenschienen	416
4.2	Resultate von Betriebs- und Eigenspannungsmessungen	420
4.3	Die bruchmechanischen Eigenschaften der Zungenschienestähle	421
4.4	Zur Übertragung der Laborergebnisse auf rissgeschädigte Schienen	426
4.5	Anfangs- und Endgröße wachstumsfähiger Kanteneckrisse	430
4.5.1	Die Anfangsrissgröße wachstumsfähiger Kanteneckrisse	430
4.5.2	Die Endrissgröße wachstumsfähiger Kanteneckrisse	432
4.6	Monte-Carlo-Simulation der Rissausbreitung	434
4.6.1	Variation der Einflussgrößen	434
4.6.2	Die Häufigkeitsverteilung der kritischen Rissgrößen	435
4.6.3	Die Häufigkeitsverteilung der Restlebensdauer	436
4.6.4	Bewertung der bruchmechanischen Simulationsresultate	438
4.7	Analyse der Auswirkungen einer zusätzlichen Stützknagge	440
4.8	Anmerkungen zur Problematik „Mindestrestlebensdauer – Prüfzyklus“	443
	Literatur	446
5	Analyse der Rollkontaktermüdungsrisse in Eisenbahnschienen	449
5.1	FE-Modellierung der Rollkontaktermüdungsrisse [5.1, 5.2]	449
5.1.1	Stand der Forschung	449
5.1.2	Modellierung als ebenes oder räumliches System [5.1]	455
5.1.3	Modellierung als optimiertes ebenes System	461
5.2	Die rollkontakterspezifischen Beanspruchungsbedingungen	473
5.2.1	Rollkontaktermüdungsrisse und ihre bruchmechanische Idealisierung	473

5.2.2	Die Beanspruchung der Schiene mit RollkontaktermüdungsrisSEN	475
5.2.3	Die Beanspruchbarkeit betrieblich genutzten Schienenstahls 900A	479
5.2.4	Bedingungen für die Analyse des Rissverhaltens	481
5.3	Analyse der Tiefenentwicklung der Rollkontaktermüdungsrisse	483
5.3.1	Bruchmechanische Analyse der Dauerfestigkeit	483
5.3.2	Der Einfluss der Kaltverformung auf das Risswachstum	485
5.3.3	Der Einfluss des Neigungswinkels des Risses auf das Risswachstum	486
5.3.4	Die Streubreite des Risswachstums bei 15° geneigten Rissen	486
5.3.5	Das Wachstum vieler gleichartiger Risse	488
5.3.6	Das Wachstum eines vorlaufenden Risses	489
5.3.7	Das Wachstum von Einzelrissen mit normalverteilter Rissneigung	490
5.3.8	Bewertung des Wachstums von RollkontaktermüdungsrisSEN	492
5.3.9	Zur Breite und Erkennbarkeit abgeknickter Head Checks	494
5.4	Von RollkontaktermüdungsrisSEN ausgehende Querrissentwicklung	499
5.4.1	Kritische Schienentemperaturen und das simulierte Bruchverhalten	500
5.4.2	Der Einfluss der Verspannungstemperatur auf die kritische Rissgröße	502
5.4.3	Zur Bruchsicherheit durch Head Checks geschädigter Schienen UIC60	504
5.4.4	Zum Eigenspannungs- und Geometrieeinfluss auf das Bruchverhalten	506
5.4.5	Der Einfluss der Verspannungstemperatur auf das Risswachstum	510
5.4.6	Zur Sicherheit des Querrisswachstums in Schienen UIC60	510
5.4.7	Der Einfluss der Jahreszeiten auf das Risswachstum	515
5.4.8	Der Einfluss örtlich klimatischer Gegebenheiten auf das Risswachstum	516
5.5	Analyse der Lebensdauer einer durch Head Checks geschädigten Schiene	516
5.5.1	Vorberichtigungen zur Lebens-/Nutzungsdauer von Eisenbahnschienen	516
5.5.2	Ausgangsdaten für die Monte-Carlo-Simulation der Lebensdauer	521
5.5.3	Datenaufbereitung zur Analyse der Querrissentwicklung	526
5.5.4	Monte-Carlo-Simulation, Selektion und Bewertung des Risswachstums	527

5.5.5	Die Einflüsse der Jahreszeit und der zwischenzeitlichen Instabilität	530
5.5.6	Simulation des Tiefenwachstums der Head Checks	531
5.5.7	Zusammenfassung der Simulationsresultate	533
5.5.8	Aus der Simulation ableitbare risstiefenabhängige Fristen	535
5.6	Kritische Anmerkungen zur „hydraulischen Sprengwirkung“	538
5.6.1	Die „hydraulische Sprengwirkung“ und die widersprüchlichen Folgerungen	538
5.6.2	Versuche zur experimentellen Validierung des Flüssigkeitseffektes	542
5.6.3	Überdeckung des Risses beim Rad-Schiene-Kontakt	544
5.6.4	Das im Riss eingeschlossene Flüssigkeitsvolumen eines Modellrisses	546
5.6.5	Die Pressung zwischen Rad und Schiene	547
5.6.6	Die Randbedingungen der FEM-Modellierung	549
5.7	Richtungsänderung/Verzweigung der Rollkontakteermüdungsrisse	551
5.7.1	Zur Problematik der Rissausbreitungsrichtung	551
5.7.2	Experimentelle Befunde zur koplanaren Rissausbreitung	552
5.7.3	Die Änderung der Rissausbreitungseigenschaften durch Kaltverformung	555
5.7.4	Laborbefunde an RollkontakteermüdungsrisSEN	557
5.7.5	Zur Analyse der Ausbreitungsrichtung von RollkontakteermüdungsrisSEN	567
5.7.6	Zwischenbilanz und Schlussfolgerungen	576
	Literatur	578
6	Betriebsgefährdende Ausbrüche, Durchbrüche und Gleislücken	585
6.1	Festlegungen und Erfahrungen zum betriebssicheren Schienenzustand	585
6.2	Verschiebung der Querbruchflächen der Schienen	590
6.3	Betrachtungen zu Folgebrüchen	592
6.3.1	Radkräfte beim Überfahren von Schienenquerbrüchen	592
6.3.2	Die Biegebeanspruchung der Schienen am Querbruch	593
6.3.3	Die Bruchzähigkeitseigenschaften des Schienenstahls	595
6.3.4	Die kritischen Schienentemperaturen	597
6.3.5	Die näherungsweise Berücksichtigung der Eigenspannungen	599
6.3.6	Die Abhängigkeit der Spannungsintensitätsfaktoren von der Rissform	602
6.3.7	Simulation der kritischen Rissgröße von Folgebrüchen	604
6.4	Abschließende Anmerkungen zu Folgebrüchen	604
	Literatur	605

Bilanz und Danksagung	607
Inhaltsverzeichnis des Buches Schienenfehler 1	613
Stichwortverzeichnis	619