

Magnetresonanzbildgebung: Eine historische Einführung	1
1 Die Magnetresonanztomografie und ihre Hardware	9
1.1 Einleitung	9
1.1.1 Spin und Magnetisierung	9
1.1.2 Präzession: Rotierendes Bezugssystem	10
1.1.3 Rotation: Anregung durch RF-Pulse	11
1.1.4 Die Anregung einer selektierten Schicht: Das Gradientenfeld	14
1.1.5 Der freie Induktionsabfall (FID)	16
1.2 Spin-Echo	17
1.2.1 Bestimmung der Position in Ausleserichtung	19
1.2.2 Lagebestimmung in Phasenkodierrichtung	20
1.2.3 Messsequenz	20
1.2.4 Objektschicht: Voxel und Bildpixel	21
1.3 Systemarchitektur	22
1.3.1 Magnete	26
1.3.1.1 Supraleitende Magnete	28
1.3.1.2 Andere Magnettypen	30
1.3.2 Abweichungen vom homogenen Magnetfeld	34
1.3.3 Die Gradientenkette	37
1.3.3.1 Gradientenenergie und Anstiegszeit	40
1.3.3.2 Wirbelströme	41
1.3.4 Die RF-Kette	43
1.3.4.1 RF-Spulen	44
1.3.4.2 Der Empfangskreis	51
1.3.5 Physiologische Signale	54
1.3.6 Das Back-End System	56
2 Konventionelle Bildgebungsmethoden	59
2.1 Einleitung	59
2.2 Die Blochsche Gleichung	59
2.2.1 Präzession	62
2.3 Anregung	63
2.3.1 Nichtselektive RF-Pulse	63

2.3.2	Schichtselektive RF-Pulse	64
2.3.3	Andere RF-Pulse	67
2.3.4	Verlustleistung in einem RF-Puls	68
2.4	Die Spin-Echo-Sequenz	69
2.4.1	Die \vec{k} -Ebene	73
2.4.1.1	Diskrete Messwerterfassung	75
2.4.1.2	Die Punktbildfunktion	78
2.4.1.3	Betrachtungen in \vec{k} -Raum-Begriffen	78
2.4.1.4	Reduzierung der Messzeit	82
2.4.2	Kontrast in Spin-Echo-Sequenzen	83
2.4.3	Scanparameter und Systemgestaltung	84
2.4.3.1	Praktisches Beispiel	85
2.4.4	Mehrschicht-Datenerfassung	87
2.4.5	Bildgebung mit dreidimensionaler Dekodierung	88
2.5	Die Gradientenecho-Sequenz	89
2.6	Artefakte	91
2.6.1	Geisterbilder	95
2.7	Magnetische Präparation	96
2.7.1	T_1 -Präparationspuls: Inversion-Recovery	97
2.7.2	Andere Arten der magnetischen Präparation	98
3	Bildgebende Methoden	
	mit erweiterten \vec{k}-Raum-Trajektorien	147
3.1	Einleitung	147
3.2	Turbo-Spin-Echo (TSE)	149
3.2.1	Profilreihenfolge	152
3.2.2	Ursachen von Artefakten in TSE-Bildern	154
3.3	Echoplanare Bildgebung (EPI)	157
3.3.1	Praktisches Beispiel	159
3.3.2	Artefakte durch T_2^* -Zerfall und Feldinhomogenitäten ..	161
3.3.2.1	Artefakte, die auf dem T_2^* -Zerfall beruhen ...	162
3.3.2.2	Artefakte durch Resonanzoffset	164
3.3.2.3	Artefakte durch Eigenheiten und Fehler von Gradientenfeldern	165
3.4	Kombination von TSE und EPI: GRASE	168
3.5	Quadratische Spiralbildgebung	170
3.6	Beliebige \vec{k} -Raum-Wege	171
3.6.1	Spiralbildgebung	172
3.6.1.1	Ein praktisches Beispiel	175
3.6.1.2	Rekonstruktion mit Hilfe von Gridding	177
3.6.1.3	Artefakte in der Spiralbildgebung	178
3.6.2	„Rosettenförmiger“ Weg	180
3.6.3	Radialscan	181
3.6.4	Einige Anmerkungen zur Rekonstruktion von exotischen Scans	181
3.7	Zweidimensionale Anregungspulse	183

4	Stationäre Gradientenecho-Bildgebung	209
4.1	Einleitung	209
4.2	Über FIDs und ECHOs	212
4.2.1	Das Spin-Echo	212
4.2.2	Das „Eight-Ball“-Echo	215
4.2.3	Das stimulierte Echo	216
4.2.4	Die RF-Phase	217
4.2.5	Die Reaktion auf RF-Pulse mit $\alpha < 90^\circ$	219
4.2.6	Echos als Resultat vieler Anregungen	220
4.2.7	ECHO-Komponenten in Gradientenecho-Sequenzen ...	222
4.2.7.1	ECHO-Komponenten	222
4.2.7.2	Phasenvariationen der RF-Pulse	225
4.2.8	Unterdrückung von räumlichen Signalschwankungen ..	227
4.2.9	Schlussfolgerungen aus der qualitativen Beschreibung .	228
4.2.9.1	N-FFE und T_2 -FFE	228
4.2.9.2	T_1 -FFE	228
4.2.9.3	R-FFE	229
4.3	Mathematisches Modell	229
4.3.1	Rotations- und Präzessionsmatrix	230
4.3.2	Relaxationsmatrix	231
4.4	Der Gleichgewichtszustand	232
4.5	Gradientenechoverfahren im stationären Fall (steady-state) (FE und FFE)	239
4.5.1	Sequenzen mit sehr großer TR	239
4.5.2	Sequenzen mit $T_1 > TR > T_2$	240
4.5.3	Sequenzen mit kleinem TR ($TR \cong T_2$)	240
4.5.3.1	Große Nettogradientenfläche	240
4.5.3.2	Rephasierendes FFE	244
4.5.3.3	FID-Messungen mit gespoiltem M_T^- : T_1 -FFE (FLASH)	248
4.5.4	FFE mit kurzer TR im stationären Fall	249
4.5.4.1	N-FFE, T_2 -FFE und R-FFE mit $TR \ll T_2$...	250
4.5.4.2	T_1 -FFE mit $TR \ll T_2$	252
4.5.5	Schichtprofil	253
4.5.6	Eine Übersicht über FFE-Verfahren	254
5	Nichtstationäre Gradientenecho-Bildgebung	267
5.1	Einleitung	267
5.2	Signalpegel im Übergangsbereich	269
5.2.1	Annäherung an den Gleichgewichtszustand im Fall von RF-Spoiling	270
5.2.2	Annäherung an den Gleichgewichtszustand ohne RF-Spoiling	273

5.3	Magnetische Präparation	275
5.3.1	Vorpulse zur Vermeidung eines Nichtgleichgewichtszustandes bei T_1 -TFE-Sequenzen ..	276
5.3.2	Balanced (ausgeglichene) TFE-Sequenzen	277
5.4	Die Profilreihenfolge	278
5.5	Überblick über Transient-Field-Echo-Verfahren	280
6	Kontrast und Signal-zu-Rausch-Verhältnis	291
6.1	Einleitung	291
6.2	Kontrast in MR-Bildern	291
6.3	Die physikalischen Grundlagen der Relaxation in Gewebe	294
6.3.1	Die BPP-Theorie der Relaxation in einer homogenen Substanz	294
6.3.2	Relaxationseffekte im Gewebe	296
6.3.2.1	Schneller Austausch	296
6.3.2.2	Kompartimente und langsamer Austausch ...	297
6.3.3	Magnetisierungsübertragung (magnetization transfer) .	298
6.3.4	Kontrastmittel	302
6.4	Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR)	304
6.4.1	Fundamentale Gleichung für das SNR	305
6.4.2	Patientenlast des Empfangskreises	307
6.4.3	Niedrig- und Hochfeldsysteme	309
6.5	Ein praktischer Ausdruck für das SNR	310
6.5.1	Einführung von Scanparametern	311
6.5.2	Einfluss des Empfangskreises auf das SNR	312
6.5.3	Der Einfluss der Relaxation auf das SNR	313
6.6	Praktische Anwendungen	314
6.7	SNR bei nicht gleichförmiger Auffüllung der k -Ebene	319
6.7.1	Einseitiger Partialscan	319
6.7.2	Ungleichförmige Datenauffüllung mit nichtlinearen Abtastwegen	321
6.7.3	Datenerfassung bei reduzierter Matrix	322
6.7.4	Andere Teilscanverfahren	323
7	Bewegung und Fluss	343
7.1	Einleitung	343
7.2	Bewegte Strukturen, Artefakte und Bildgebungsverfahren	344
7.2.1	Herzbewegung	345
7.2.2	Atembewegung	346
7.2.2.1	Phasenkodierreihenfolge	346
7.2.2.2	Atemanhaltetechnik	347
7.2.2.3	Atemtriggerung	347
7.2.2.4	Korrektur der Atmung durch Navigatorechos .	348
7.2.3	Markierung (tagging)	349

7.3	Phasenverschiebung durch Fluss in Gradientenfeldern	351
7.3.1	Die Geschwindigkeitsmessung unter Zuhilfenahme eines bipolaren Gradienten	353
7.3.2	Geschwindigkeitsunempfindliche Gradientenformen ...	355
7.3.3	Beschleunigter Fluss	356
7.3.4	Der Einfluss von Feldinhomogenitäten und Wirbelströmen	358
7.4	Flussartefakte	359
7.4.1	Geisterartefakte durch pulsatilen Fluss	359
7.4.2	Flussauslöschungen	359
7.4.3	Verschiebungen in Phasenkodierrichtung durch Fluss..	360
7.4.4	Geschwindigkeitsunempfindliche Sequenzen: Flusskompensation	360
	7.4.4.1 Schichtselektionsrichtung	361
	7.4.4.2 Ausleserichtung.....	361
	7.4.4.3 Phasenkodierrichtung: Korrektur der Fehlregistrierung.....	363
7.5	Flussbildgebung	364
7.5.1	Phasenkontrastverfahren	365
	7.5.1.1 Phasenkontrastangiografie	365
	7.5.1.2 Quantitative Flussbestimmung mittels Phasenkontrastverfahren	367
7.5.2	Moduluskontrastverfahren	369
	7.5.2.1 Inflow-Angiografie (Angiografie von einströmendem Blut).....	369
	7.5.2.2 Kontrastverstärkte MR-Angiografie	372
	7.5.2.3 MR-Angiografie mittels magnetischer Präparation	374
	7.5.2.4 Black-Blood-Angiografie (Schwarzblutangiografie).....	380
	7.5.2.5 Artefakte beim Einsatz der Modulus-Kontrast-Angiografie	381
	7.5.2.6 Quantitative Flussmessungen mittels Moduluskontrast	383
7.6	Perfusion	384
7.6.1	MR-Perfusionsbildgebung mittels dynamischer Bolusstudien	385
7.6.2	Arterielle Spinmarkierung	388
7.7	Diffusion	391
7.7.1	Diffusionsempfindliche Messung in einer Richtung ...	393
7.7.2	Diffusionsbildgebung des Hirns	395
7.7.3	Q-Raum Bildgebung	398

8 Zerlegung der Magnetisierung in Konfigurationen	453
8.1 Einleitung	453
8.1.1 Spinkonfigurationen und Phasendiagramme	453
8.2 Die Konfigurationstheorie	460
8.2.1 Die Beschreibung der Magnetisierung durch diskrete Fourierserien	461
8.2.2 Rotation	462
8.2.3 Der Einfluss der Rotation und der Präzession auf die Konfigurationen	465
8.2.3.1 Die Präzessionsmatrix mit (freier) Diffusion ..	467
8.2.4 Die Verwendung der Konfigurationstheorie zur Beschreibung der Beispiele aus Abschn. 8.1.....	469
8.2.4.1 Das Beispiel der multiplen Spin-Echo-Sequenz	470
8.2.4.2 Beispiele von Eight-Ball-Echo und stimuliertem Echo	472
8.3 Pulssequenzen mit Vielfachanregungen	473
8.3.1 SE-BURST-Bildgebung	475
8.3.1.1 Das Anregungsprofil bei einer BURST- Sequenz mit Einphasenanregung	479
8.3.1.2 Optimierte BURST-Anregung mit Phasenmodulation	480
8.3.1.3 Die Kombination von BURST mit TSE.....	484
8.3.1.4 BURST-Sequenzen mit Gradientenecho.....	485
8.3.1.5 QUEST und PREVIEW	487
8.4 Die Anwendung der Konfigurationstheorie auf gut bekannte schnelle Bildgebungssequenzen	488
8.4.1 Die Anwendung auf die TSE	488
8.4.2 Anwendung auf FFE-Sequenzen	491
8.5 Rotations- und Präzessionsmatrizen und das Design des RF-Pulses	496
8.5.1 Shinnar-Le Roux (SLR) Transformation	497
8.5.1.1 Die inverse Shinnar-Le Roux Transformation (ISLR Transformation)	499
Anhang	507
A.1 Anschauliche Beschreibungen von MR Scanverfahren	507
A.1.1 Begriffsbestimmungen	507
A.1.2 Charakteristiken	508
A.1.3 Beispiele	510
Literaturverzeichnis	511
Liste der (englischen) Abkürzungen	527
Sachverzeichnis	529

Liste der Bildserien

II.1	Kontrast in Spin-Echo-Bildern des Hirns: Variation der Repetitionszeit TR	104
II.2	Kontrast von Spin-Echo-Bildern des Hirns: Der Einfluss der Echozeit TE und des Raumprofils der Refokussionspulse ..	108
II.3	Das Kontrastverhalten bei der Gradientenecho-Bildgebung der Halswirbelsäule: Variation von TR und Flipwinkel	111
II.4	Verschiebung zwischen Wasser und Fett in Gradientenechobildern	114
II.5	Die Fettunterdrückung bei der Spin-Echo- und Gradientenecho-Bildgebung	118
II.6	Verzerrungen in einem Phantom	121
II.7	Aliasing und Interferenz bei koronaren Bildern des Abdomens: SE und FE	124
II.8	Verzerrungen in einem Bild eines Phantoms mit Stäben schwankender Suszeptibilität	126
II.9	Phasenverteilung in Gradientenechobildern als Zeichen einer Hauptmagnetfeldinhomogenität	129
II.10	Der Einfluss der Suszeptibilität bei FE-Bildern des Hirns bei drei Hauptmagnetfeldstärken	132
II.11	Übersprecherscheinung bei der Mehrschicht-Spin-Echo- und Gradientenecho-Bildgebung	134
II.12	Übersprechen beim Mehrschicht-Inversion-Recovery- SE-Verfahren	138
II.13	Empfindlichkeitskodierung (sensitivity encoding, SENSE) in einem Empfangsspulenarray zur Reduktion der Anzahl der Phasenkodierschritte	141
II.14	Scanzeitverkürzung durch nichtgleichförmiges Sampling	144
III.1	Der Einfluss der Echozwischenräume auf den Kontrast bei der TSE-Bildgebung	188
III.2	Unschärfe und Geisterbilder durch T_2 -Abfall während eines TSE-Schusses	191
III.3	3D TSE-DRIVE, TSE mit Resetpulsen	194
III.4	Kontrast bei IR-TSE	196

III.5	Vergleich des Kontrastes bei FE-EPI, SE-EPI und GRASE ...	198
III.6	Spiralbildgebung	200
III.7	Störungen in der Umgebung der Nasenhöhlen bei drei Feldstärken	202
III.8	Praktische Aspekte von 2D selektiven Anregungspulsen	205
IV.1	Vergleich zweier schneller Gradientenechoverfahren (FFE) zur Bildgebung des Hirns	256
IV.2	Kontrastdifferenz bei 2D und 3D T_1 -verstärkter Gradientenecho-Bildgebung des Hirns	259
IV.3	In Phase und entgegengesetzte Phase von Wasser und Fett bei der Gradientenecho-Bildgebung	262
IV.4	Die exakte Darstellung von Knorpel durch N-FFE in Kombination mit selektiver Wasseranregung	264
V.1	Inversionspulse bei der TFE-Bildgebung: Differente Schusslängen	284
V.2	Inversionspulse bei der nichtstationären Gradientenecho- Bildgebung: Unterschiedliche Verzögerungszeiten	287
V.3	Balanced-FFE und Balanced-TFE	289
VI.1	Die Messung von T_1	326
VI.2	Die Kontrastverstärkung bei SE- und Liquor-unterdrückten TSE-Bildern	329
VI.3	Das dynamische Verhalten der Kontrastmittelverteilung	331
VI.4	Die Auswirkung der Mehrschicht-Bildgebung auf die Magnetisierungsübertragung in SE	333
VI.5	Die Abhängigkeit des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses bei der Auswahl der Pixelgröße	335
VI.6	Signal-zu-Rausch-Abhängigkeit von der Auswahl der Oberflächenspule	337
VI.7	Der Zusammenhang zwischen Signal-zu-Rausch-Verhältnis und Feldstärke	339
VI.8	Der Einfluss des Magnetisierungstransfer bei der T_1 -FFE-Bildgebung im Hirn	341
VII.1	Ein- und Ausflussphänomene bei der getriggerten Mehrschicht-SE-Technik in der abdominalen Aorta	404
VII.2	Signalverlust durch flussinduzierte Spindephasierung	408
VII.3	Geistartefakte durch pulsatilen Fluss bei der nichtgetriggerten SE-Bildgebung im Abdomen	410
VII.4	Ausbildung von Ringartefakten durch schrittweise Fußbewegung	412
VII.5	Flussverursachte Fehldarstellung von Hirngefäßen	414
VII.6	Atemartefakt bei der SE-Bildgebung	416

VII.7	Die Stärke des Atmungsartefaktes bei der SE- und SE-EPI-Bildgebung der Leber	419
VII.8	Unterdrückung von Flussauslöschungen in Turbo-Spin-Echo-Bildern der HWS	420
VII.9	Die Verhinderung von CFS-Flussartefakten bei Flüssigkeit unterdrückter IR-TSE	422
VII.10	Spinmarkierung im Herzmuskel durch komplementäre räumliche Modulation der Magnetisierung (C-SPAMM)	424
VII.11	Phasenkontrast-MR-Angiografie: Kontrast und Flussempfindlichkeit	427
VII.12	Getriggerte und Gated-Inflow-MR-Angiografie	430
VII.13	Bildgebung der Koronararterien	434
VII.14	Kontrastverstärkte MR-Angiografie der unteren Extremitäten .	437
VII.15	Flussunabhängige Angiografie von abdominalen Aortenaneurysmen	440
VII.16	Parameterkarten aus dynamischen Scans nach Injektion eines Kontrastmittelbolus	443
VII.17	Perfusionsbildgebung durch arterielle Spinmarkierung mittels TILT (Transfer Insensitive Labelling Technique)	445
VII.18	Diffusionsgewichtete Bildgebung im Hirn	448
VII.19	Die quantitative Diffusionsbildgebung des Hirns	450
VIII.1	Magnetresonanz Cholangio-Pankreatografie (MRCP) und der Einfluss des Flipwinkels auf die Refokussierungspulse .	504