

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Magnetresonanzbildgebung: Eine historische Einführung</b>         | <b>1</b>  |
| <b>1 Die Magnetresonanztomografie und ihre Hardware</b>              | <b>9</b>  |
| 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:<br>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        |
| <b>2 Konventionelle Bildgebungsmethoden</b>                          | <b>59</b> |
| 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

|   |     |
|---|-----|
| <b>mit erweiterten <math>\vec{k}</math>-Raum-Trajektorien</b> .....           | 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<br>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<br>von exotischen Scans .....     | 181 |
| 3.7 Zweidimensionale Anregungspulse .....                                     | 183 |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>4</b> | <b>Stationäre Gradientenecho-Bildgebung</b>                        | 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<br>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 |
| <b>5</b> | <b>Nichtstationäre Gradientenecho-Bildgebung</b>                   | 267 |
| 5.1      | Einleitung   | 267 |
| 5.2      | Signalpegel im Übergangsbereich                                    | 269 |
| 5.2.1    | Annäherung an den Gleichgewichtszustand<br>im Fall von RF-Spoiling | 270 |
| 5.2.2    | Annäherung an den Gleichgewichtszustand<br>ohne RF-Spoiling        | 273 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.3      | Magnetische Präparation . . . . .  | 275        |
| 5.3.1    | Vorpulse zur Vermeidung eines<br>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        |
| <b>6</b> | <b>Kontrast und Signal-zu-Rausch-Verhältnis . . . . .</b>                                  | <b>291</b> |
| 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<br>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<br>mit nichtlinearen Abtastwegen . . . . .                 | 321        |
| 6.7.3    | Datenerfassung bei reduzierter Matrix . . . . .  | 322        |
| 6.7.4    | Andere Teilschanverfahren . . . . .  | 323        |
| <b>7</b> | <b>Bewegung und Fluss . . . . .</b>  | <b>343</b> |
| 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<br>eines bipolaren Gradienten . . . . . | 353 |
| 7.3.2 | Geschwindigkeitsunempfindliche Gradientenformen . . .                                  | 355 |
| 7.3.3 | Beschleunigter Fluss . . . . .   | 356 |
| 7.3.4 | Der Einfluss von Feldinhomogenitäten<br>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:<br>Flusskompensation . . . . .               | 360 |
|       | 7.4.4.1 Schichtselektionsrichtung . . . . .  | 361 |
|       | 7.4.4.2 Ausleserichtung . . . . .  | 361 |
|       | 7.4.4.3 Phasenkodierrichtung:<br>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<br>mittels Phasenkontrastverfahren . . . . .      | 367 |
| 7.5.2 | Moduluskontrastverfahren . . . . .   | 369 |
|       | 7.5.2.1 Inflow-Angiografie<br>(Angiografie von einströmendem Blut) . . . . .           | 369 |
|       | 7.5.2.2 Kontrastverstärkte MR-Angiografie . . . . .                                    | 372 |
|       | 7.5.2.3 MR-Angiografie<br>mittels magnetischer Präparation . . . . .                   | 374 |
|       | 7.5.2.4 Black-Blood-Angiografie<br>(Schwarzblutangiografie) . . . . .                  | 380 |
|       | 7.5.2.5 Artefakte beim Einsatz<br>der Modulus-Kontrast-Angiografie . . . . .           | 381 |
|       | 7.5.2.6 Quantitative Flussmessungen<br>mittels Moduluskontrast . . . . .               | 383 |
| 7.6   | Perfusion . . . . .  | 384 |
| 7.6.1 | MR-Perfusionsbildgebung<br>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 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>8 Zerlegung der Magnetisierung in Konfigurationen</b>   | 453 |
| 8.1 Einleitung   | 453 |
| 8.1.1 Spinkonfigurationen und Phasendiagramme  | 453 |
| 8.2 Die Konfigurationstheorie  | 460 |
| 8.2.1 Die Beschreibung der Magnetisierung<br>durch diskrete Fourierserien                        | 461 |
| 8.2.2 Rotation   | 462 |
| 8.2.3 Der Einfluss der Rotation und der Präzession<br>auf die Konfigurationen                    | 465 |
| 8.2.3.1 Die Präzessionsmatrix mit (freier) Diffusion   | 467 |
| 8.2.4 Die Verwendung der Konfigurationstheorie<br>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<br>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-<br>Sequenz mit Einphasenanregung                    | 479 |
| 8.3.1.2 Optimierte BURST-Anregung<br>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<br>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<br>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<br>(ISLR Transformation)                      | 499 |
| <b>Anhang</b>  | 507 |
| A.1 Anschauliche Beschreibungen von MR Scanverfahren   | 507 |
| A.1.1 Begriffsbestimmungen   | 507 |
| A.1.2 Charakteristiken   | 508 |
| A.1.3 Beispiele  | 510 |
| <b>Literaturverzeichnis</b>  | 511 |
| <b>Liste der (englischen) Abkürzungen</b>  | 527 |
| <b>Sachverzeichnis</b>   | 529 |

Magnetresonanzbildgebung

Theorie und Praxis

Vlaardingerbroek, M.T.; Boer, J.A.

2004, XIX, 535 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-20028-4