

# Innhold

<b>1</b>	<b>Forord</b> .....	11
1.1	Takk! .....	11
<b>2</b>	<b>Hvorfor en egen bok om MR?</b> .....	13
2.1	Forskjell mellom hva som sendes inn og hva som kommer ut...	13
2.2	MR registrerer et bevegelig mål. ....	13
2.3	Hvor ble det av geometrien? .....	13
2.4	MR-signaldata er komplekse .....	14
<b>3</b>	<b>Om boka</b> .....	15
3.1	Begreper og ordbruk .....	15
3.2	Referanser .....	16
3.3	Avgrensning .....	16
3.4	Begrensning .....	16
<b>4</b>	<b>Strøm, magnetisme, og elektromagnetiske bølger.</b> .....	17
4.1	Elektrisk ladning og elektriske felt .....	17
4.2	Elektrisitet og magnetisme. ....	17
4.3	Elektromagnetisk stråling og nærfelt .....	18
4.4	Magnetfelt og magnetfeltgradienter .....	19
4.5	Frekvens .....	20
4.6	Vektorer, vektoraddisjon og dekomponering .....	20
<b>5</b>	<b>MR-maskinen og MR-laboratoriet</b> .....	23
5.1	MR-maskinen .....	23
5.2	MR-rommet .....	24
5.3	Operatørkonsollen .....	24
5.4	Teknisk rom .....	26
5.5	Spoler .....	26
<b>6</b>	<b>Hydrogenprotoner + MR-maskin = sant</b> .....	27
6.1	Spinn .....	27
6.2	Magnetisering og magnetisme .....	29
6.3	Hydrogenprotoner i MR-magnetfelt .....	30
6.4	Presesjon .....	30
6.5	Presesjonsfrekvens .....	31

6.6	Parallell nettomagnetisering .....	32
6.6.1	Modell 1: parallelt eller antiparallelt orienterte hydrogenprotoner .....	32
6.6.2	Modell 2: kompasser i en tørketrommel .....	34
6.7	Hydrogenprotoner i magnetfelt: hva trenger vi å vite? .....	34
6.8	Referanse .....	36
7	<b>Flere begreper</b> .....	37
7.1	Fase .....	37
7.2	Sinuskurve .....	38
7.3	Frekvensområde og båndbredde .....	38
7.4	Piksel, voxel, bilder og snitt. ....	40
8	<b>Noen hovedprinsipper for MR-opptak</b> .....	41
8.1	Hvordan påvirker MR-maskinen hydrogenprotonene? .....	41
8.2	Hvordan gir hydrogenprotonene signal tilbake til maskinen? ..	42
8.3	MR-sekvenser og rekkefølgen i et MR-opptak .....	43
8.3.1	Eksitasjonspuls. ....	43
8.3.2	Posisjonsinnkoding. ....	43
8.3.3	Signalregistrering .....	44
9	<b>Signalopptak: Hva skjer egentlig?</b> .....	45
9.1	Figurkonvensjon: roterende referanseramme .....	45
9.2	RF-eksitasjon .....	45
9.3	Hva er det vi lager bilde av? .....	48
9.4	Todimensjonale og tredimensjonale MR-opptak .....	48
9.5	Et todimensjonalt MR-opptak .....	49
9.5.1	Pasienten plasseres i MR-maskinen .....	49
9.5.2	Snittseleksjon .....	49
9.5.3	Faseinnkoding og frekvensinnkoding .....	52
9.5.4	Hvor mye signaldata trenger vi? .....	53
9.6	Tredimensjonalt MR-opptak .....	53
9.7	Oppsummering .....	54
10	<b>Fra ekkodata til MR-bilde</b> .....	55
10.1	Oppvarming .....	55
10.2	Historikk .....	56
10.3	K-space .....	56
10.4	Fra k-space til MR-bilde .....	57
10.5	Fouriertransformasjon .....	59
10.6	Sammenheng mellom gradienter, ekko og k-space .....	61
10.7	Lineær k-space-fylning .....	64
	Referanse .....	69

<b>11</b>	<b>Flere begreper</b> .....	70
	11.1 Eksitasjon og flippvinkel .....	70
	11.2 Ekkotid .....	70
	11.3 Repetisjonstid .....	71
	11.4 Signal-støy-forhold .....	71
	11.5 Kontrast-støy-forhold .....	72
<b>12</b>	<b>Hvordan får vi ulikt signal fra forskjellige vev?</b> .....	73
	12.1 Protontetthet .....	73
	12.2 Relaksasjon .....	73
	12.3 T2-relaksasjon .....	74
	12.4 T2*-relaksasjon .....	79
	12.5 T1-relaksasjon .....	80
	12.6 Hvem er raskest av T1- og T2-relaksasjonen? .....	85
	12.7 T1-vekting og T2-vekting .....	86
	12.8 Sammenheng mellom sekvensvekting, ekkotid og repetisjonstid .....	87
	12.9 Referanser .....	89
<b>13</b>	<b>MR-sekvenser</b> .....	90
	13.1 T1-vektet gradientekkoopptak .....	90
	13.2 T2-vektet spinnekkkoopptak .....	92
	13.3 Inversjonssekvenser .....	96
	13.3.1 Short Tau Inversion Recovery (STIR) .....	97
	13.3.2 Fluid Attenuated Inversion Recovery (FLAIR) .....	98
<b>14</b>	<b>Mer om T1-vekting: flippvinkel, repetisjonstid, steady state og inversjon</b> .....	99
	14.1 Steady state .....	100
	14.2 Inversjonspuls for å gi T1-kontrast .....	101
	14.3 Kombinasjon av parallell og antiparallell nettomagnetisering ...	102
	14.4 Referanse .....	104
<b>15</b>	<b>Sekvensdiagrammer</b> .....	105
	15.1 Vanlig sekvensdiagram .....	105
	15.2 Vektingsdiagram .....	107
<b>16</b>	<b>Raskere opptak: varianter av k-space-fylning</b> .....	111
	16.1 Echo-Planar Imaging (EPI) .....	111
	16.2 Utnytte k-space-symmetri .....	112
	16.3 Deling av k-space-data .....	113

<b>17</b>	<b>Andre metoder for å spare tid</b> . . . . .	114
	17.1 Avbilde flere snitt samtidig . . . . .	114
	17.2 Hente ut flere ekko i hver repetisjon. . . . .	114
	17.3 Utnytte signalforskjeller mellom flere opptakspoler. . . . .	117
	17.4 Referanser. . . . .	117
	17.4.1 Klassiker . . . . .	117
<b>18</b>	<b>Varianter av ekko: «Å, det var ikke så ille ...»</b> . . . . .	118
	18.1 Hahn-ekko og spinnekk . . . . .	118
	18.2 Stimulerte ekko . . . . .	118
	18.3 Spoiling. . . . .	119
	18.4 Fasekoherens, transversal koherens . . . . .	120
	18.5 Steady State med balanserte gradienter; gjenbruk av transversal magnetisering . . . . .	120
	18.6 Referanser. . . . .	121
	18.6.1 Klassikere . . . . .	121
<b>19</b>	<b>Vannsignal og fettsignal</b> . . . . .	122
	19.1 Kjemisk skift. . . . .	122
	19.2 Frekvensspesifikk fettsuppresjon. . . . .	123
	19.3 Forskjell mellom STIR og frekvensspesifikk fettsuppresjon . . . . .	123
	19.4 Dixon. . . . .	124
	19.4.1 Dixon variant 1. Motsatt fase-effekt . . . . .	124
	19.4.2 Dixon variant 2: vannbilder og fettbilder. . . . .	125
	19.5 Vanneksitasjon. . . . .	127
	19.6 Gradientreversering . . . . .	128
	19.7 Referanser. . . . .	130
	19.7.1 Klassiker . . . . .	130
<b>20</b>	<b>Diffusjon</b> . . . . .	131
	20.1 «Ti tu sjain thru» . . . . .	132
	20.2 Diffusion Tensor Imaging . . . . .	133
	20.3 Intra-Voxel Incoherent Motion (IVIM). . . . .	133
	20.4 Referanser. . . . .	134
<b>21</b>	<b>Kontrastmidlene vi ikke kan se</b> . . . . .	135
	21.1 T1-kontrastmidler . . . . .	135
	21.2 T2/T2*-kontrastmidler. . . . .	139
	21.3 Referanser. . . . .	140
<b>22</b>	<b>MR-angiografi.</b> . . . . .	141
	22.1 Kontrastforsterket MR-angiografi. . . . .	141
	22.1.1 Måling av sirkulasjonstid . . . . .	142

22.1.2	Registrering av kontrastpassasje i sanntid . . . . .	143
22.1.3	Flere opptaksposisjoner med samme kontrastdose . . . . .	143
22.2	Time-of-flight-MR-angiografi . . . . .	144
22.2.1	Magnetization Transfer Contrast . . . . .	145
22.3	Fasekontrast-MR-angiografi . . . . .	146
22.3.1	Faseinformasjon i MR-signaler . . . . .	146
22.3.2	Registrering av blodstrøms hastighet med todimensjonalt fasekontrastopptak . . . . .	146
22.3.3	Tredimensjonal fasekontrastangiografi . . . . .	150
<b>23</b>	<b>Susceptibilitet: venn og fiende . . . . .</b>	<b>151</b>
23.1	Kjemisk skift versus susceptibilitet . . . . .	151
23.2	Susceptibilitet som fiende . . . . .	152
23.3	Susceptibilitet som venn . . . . .	152
23.3.1	T2*-effekt 1: perfusjonsavbildning . . . . .	152
23.3.2	T2*-effekt 2: funksjonell MR . . . . .	153
23.3.3	Susceptibilitetsavbildning . . . . .	153
23.4	Referanser . . . . .	155
<b>24</b>	<b>Spektroskopi . . . . .</b>	<b>156</b>
24.1	Kjemisk skift en gang til . . . . .	156
24.2	Spektrum av kjemisk skift . . . . .	157
24.3	Enkeltvoxelspektroskopi . . . . .	158
24.3.1	Stimulated Echo Acquisition Mode – STEAM . . . . .	158
24.3.2	Point Resolved Spectroscopy – PRESS . . . . .	158
24.4	Kjemisk skift-avbildning . . . . .	159
24.5	Andre utfordringer med spektroskopi . . . . .	159
24.6	Fosforspektroskopi . . . . .	159
24.7	Referanser . . . . .	160
<b>25</b>	<b>Bevegelse og MR-signal . . . . .</b>	<b>161</b>
25.1	Flow void . . . . .	161
25.2	Gradient moment nulling . . . . .	162
25.3	Black Blood Double Inversion . . . . .	162
25.4	Respirasjonstrigging . . . . .	163
25.5	Avbildning av hjertebevegelse . . . . .	163
25.6	Avbildning av tarmperistaltikk . . . . .	165
25.7	Radial k-space-fylning . . . . .	165
<b>26</b>	<b>MR-artefakter . . . . .</b>	<b>167</b>
26.1	Statistiske magnetfeltujevnheter: B <sub>0</sub> -inhomogenitet og susceptibilitet . . . . .	167
26.2	Ujevn RF-effekt: B <sub>1</sub> -inhomogenitet . . . . .	168

26.3	Kjemisk skift-artefakt .....	168
26.4	Overfolding .....	171
26.4.1	Overfolding i faseinnkodingsretningen .....	171
26.4.2	Overfolding i frekvensinnkodingsretningen .....	171
26.5	Bevegelsesartefakter .....	172
26.5.1	Pulsasjonsartefakter .....	173
26.5.2	Peristaltikk .....	175
26.6	Uønsket elektromagnetisk påvirkning .....	175
26.7	Ringning .....	176
26.8	Magic angle .....	177
26.9	Cross talk .....	177
26.10	Referanser .....	177
<b>27</b>	<b>Parametervalg og sekvensoptimalisering .....</b>	<b>178</b>
27.1	Mottakerbåndbredde, signal–støy-forhold, ekkotid og kjemisk skift-artefakt .....	178
27.2	Geometrisk oppløsning, signal–støy-forhold og opptakstid. ....	179
<b>28</b>	<b>MR-sikkerhet .....</b>	<b>181</b>
28.1	Det sterke, statiske magnetfeltet .....	181
28.1.1	Dreining .....	182
28.1.2	Tiltrekning: Spatial Gradient Field .....	182
28.1.3	Effekt på bevegelse: Lenz' lov .....	183
28.2	Krise! .....	183
28.3	Tidsvarierende gradienter .....	184
28.4	Radiobølgene .....	186
28.5	Referanser .....	187
<b>29</b>	<b>Anbefalinger til annen lesning .....</b>	<b>188</b>
29.1	Bøker .....	188
29.2	Nettadresser .....	188
	<b>Stikkord .....</b>	<b>190</b>

# 1 Forord

Min viktigste motivasjon for å skrive denne boka er at pasientene får bedre MR-undersøkelser hvis radiografene og radiologene har god forståelse av MR. Det gir bedre bilder og riktigere bildetolkning.

Når radiografer og radiologer skal lære seg MR, er MR-fysikken ofte en stor utfordring. I denne boka prøver jeg å presentere og forklare den delen av MR-fysikken som er mest relevant for radiografer og radiologer, og sette den i sammenheng med praktisk bruk av maskinen, sekvenstyper og sikkerhetsaspekter. I dette inngår også fysiologikunnskaper.

Det er vel litt dristig at en radiolog uten formelle fysikkunnskaper skriver en bok med «fysikk» i tittelen. Men jeg har et ganske praktisk fokus på dette; hvordan vi som MR-brukere kan nyttiggjøre oss de spennende fysiske fenomenene i MR-opptakene til beste for pasientene. Fra et pedagogisk perspektiv tillater jeg meg å tenke at jeg har en fordel; jeg har slitt såpass med MR-fysikken at jeg definitivt vet noe om hva som er vanskelig å forstå for andre ikke-fysikere.

Bruk av «radiografer» og «radiologer» i tittelen er ikke ment å være ekskluderende. Det ville være hyggelig hvis andre yrkesgrupper som befatter seg med MR (for eksempel psykologer) kan ha nytte av boka.

Jeg mottar veldig gjerne tilbakemeldinger, særlig om feil og misforståelser, men gjerne også om ting som er tungvint forklart, temaer som savnes eller hva som helst annet. Det er alltid moro å diskutere MR-mekanismer.

## 1.1 Takk!

Først en stor takk til to sentrale personer i etableringen og utviklingen av MR-virkosomhet på Rikshospitalet; professor og radiolog Hans-Jørgen Smith og radiograf Eldrid Winther-Larssen. Jeg har hatt det store privilegiet å få jobbe lenge sammen med dem, og de har lært meg mesteparten av det jeg kan om MR. Deres faglige entusiasme, grundighet og nysgjerrighet har blitt videreført i et stadig voksende MR-miljø ved avdelingen.

Mange takk til alle radiografer og radiologer (Bac, Jane, Ailo, Elin, Åsmund, Anders, Ida og Ida, Sigurd, Anne Kristin, Hege, Geir, Vanja, Dag Tallak, Gaute, Einar, Rolf, Anna, Ane Julie og andre) som har hjulpet meg med faglige innspill og meget nyttige tilbakemeldinger på teksten. Bac Nguyen og Geir Ringstad har også hjulpet til med figurer.

En spesiell takk til MR-fysikerne som generøst har hjulpet meg; professor Atle Bjørnerud, og Øystein Bech Gadmar, Frédéric Courivaud og Oliver Geier (som også

har laget figur 10.1 og 10.2). Med stor tålmodighet har de forsøkt å korrigere mine feiloppfatninger og svare på mine rare spørsmål. De har også lest store deler av manus og gitt livreddende tilbakemeldinger. Takk også til MR-fysiker Lars G. Hanson ved Danish Research Centre for Magnetic Resonance, Hvidovre, for nyttig hjelp.

Takk til Mariann Bakken og de andre i Universitetsforlaget for profesjonell og hyggelig hjelp.

Og takk til Christina, Ingrid, Olav Andreas og Øyvind for motiverende entusiasme og stor fleksibilitet. Vi er i resonans!