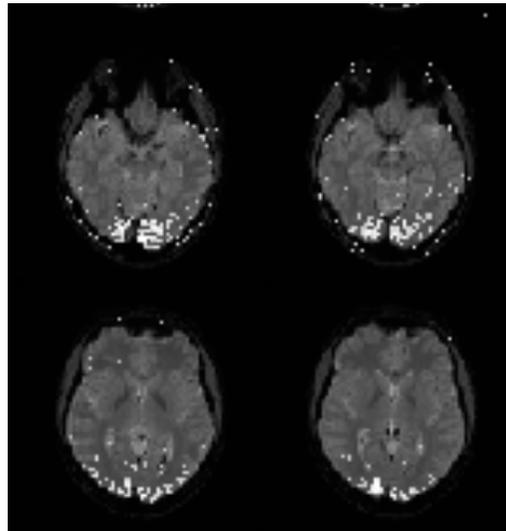




## Funktionelle MR-Bildgebung: Wichtige Grundlagen und Messverfahren



Jürgen Finsterbusch

Institut für Systemische Neurowissenschaften

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

Hamburg

- Grundlagen MR-Bildgebung
  - Grundlagen
  - Kontrast
  - Ortskodierung
  - Bildgebungsverfahren
  - Messparameter
  - BOLD-Kontrast und fMRI
- Methoden für bessere räumliche und zeitliche Auflösung
  - Motivation und Limitierungen
  - parallele Bildgebung
  - simultane Mehrschichtmessungen (“Multi-Band”-Bildgebung)
  - kleine Messfelder

# MR-Bildgebung

## Zutaten ...

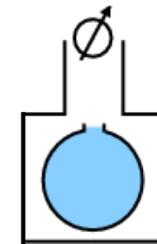
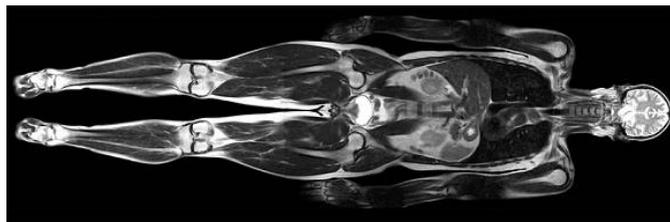
- starkes Magnetfeld



- Antenne / Spule für Radiowellen



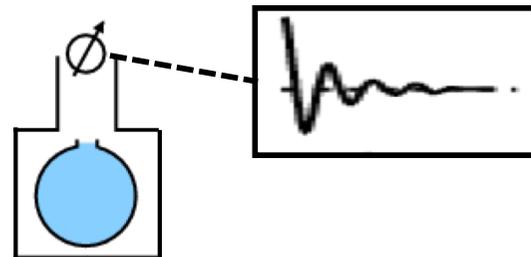
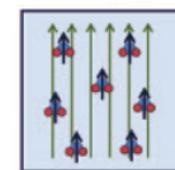
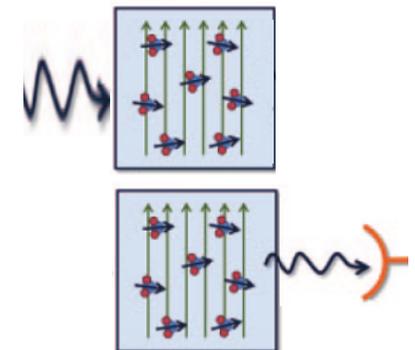
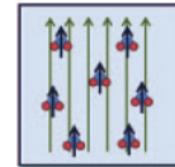
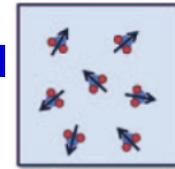
- Atomkerne mit magnetischem Moment  
Wasser(-stoffkerne)



# MR-Bildgebung

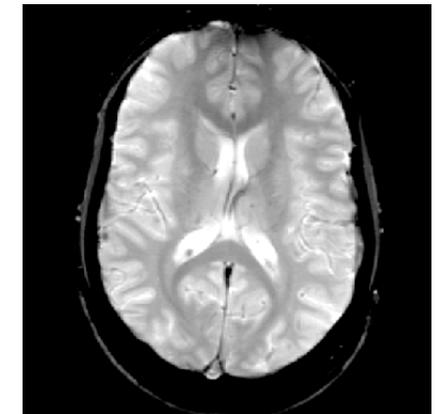
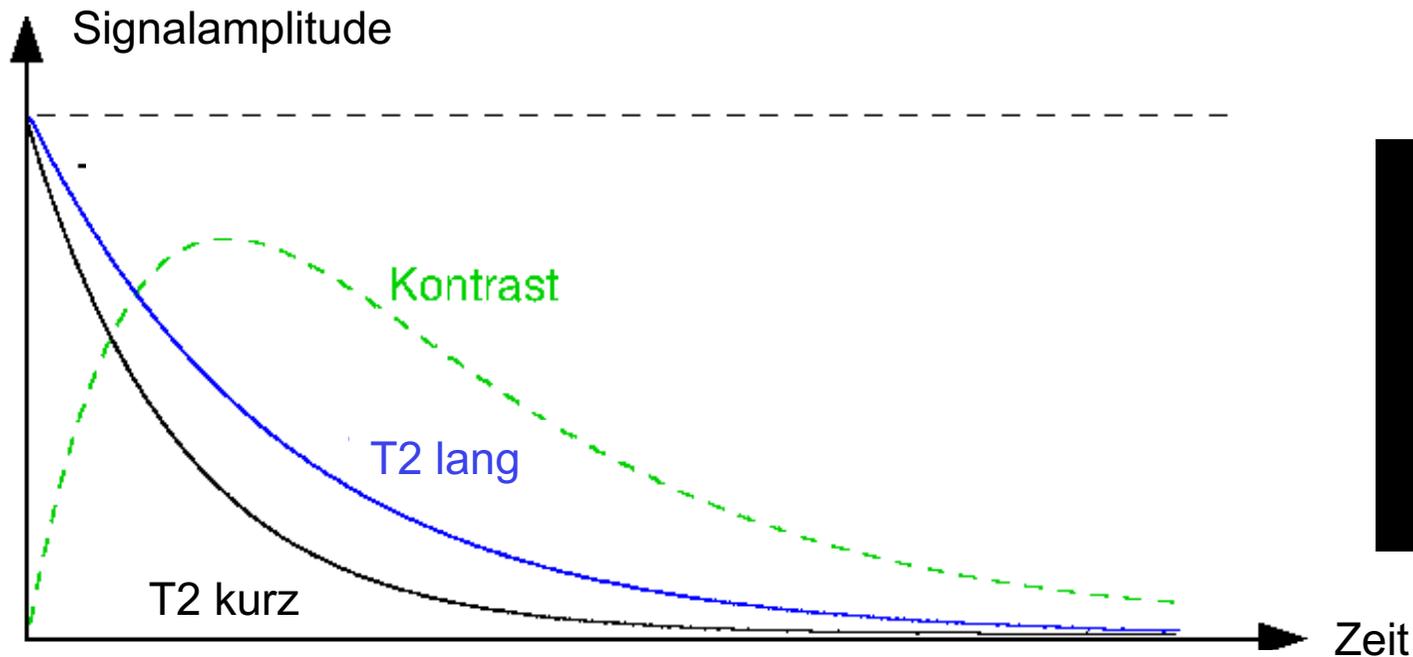
## So funktioniert's, in etwa ...

- Wasserstoffkerne richten sich im Magnetfeld aus ("Kompassnadeln")
- Magnetisierung entlang des starken Magnetfeldes, praktisch nicht messbar
- kurzer Radiowellenpuls kippt die Magnetisierung ("Hochfrequenz-Anregung")
- Induktion einer Wechselspannung (ähnlich Dynamo) in Spule (= MR-Signal)
- Frequenz des Signals abhängig von Stärke des Magnetfeldes
- Signal fällt ab, Magnetisierung kehrt zurück in Ausgangszustand (Relaxation)



## Relaxation und Kontrast

- verschiedene Prozesse mit spezifischen Zeitkonstanten (T1, T2)
- Zeitkonstanten abhängig von Gewebeeigenschaften: Signalunterschied / Kontrast
- Beispiel: T2

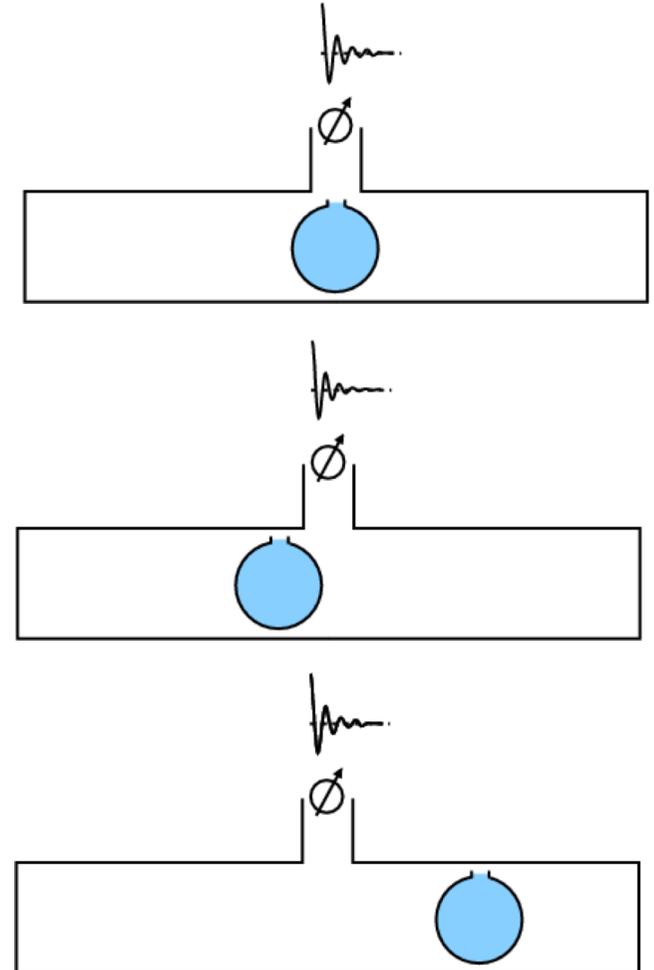


- T2\*: T2 plus Einfluss von Magnetfeldinhomogenitäten ( $T2^* < T2$ )

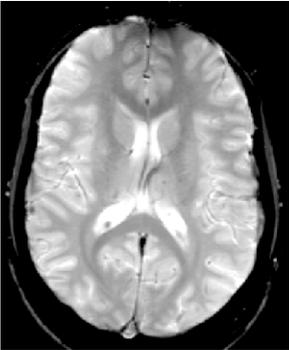
# MR-Bildgebung

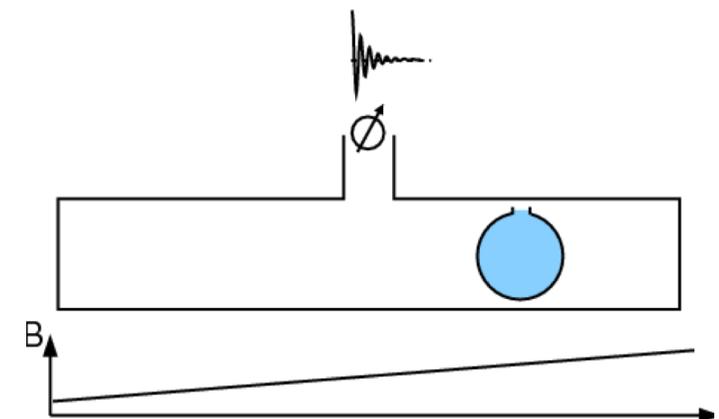
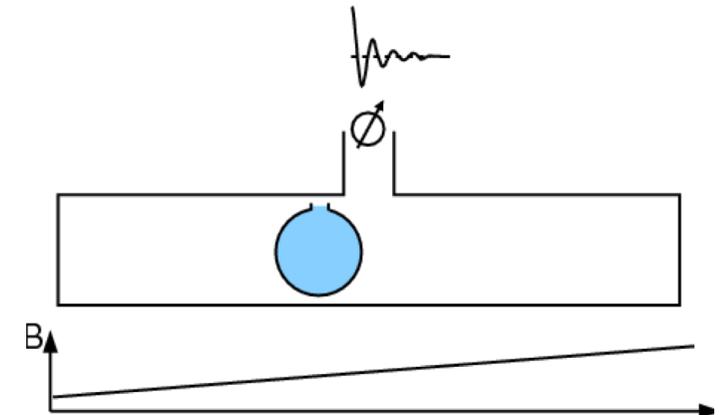
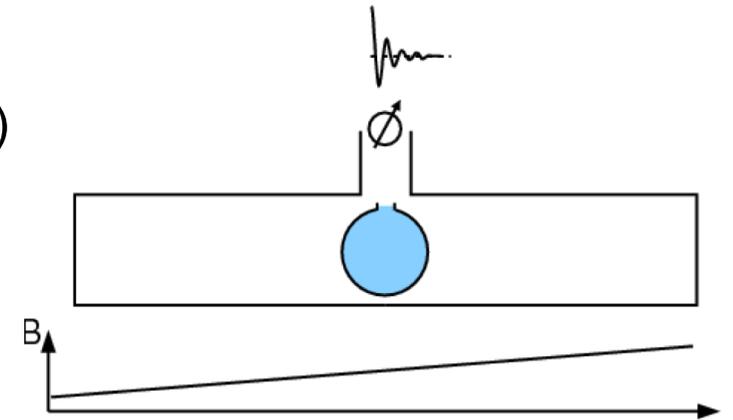
## Starkes Magnetfeld

- möglichst homogen
- Frequenz des Signals unabhängig vom Ort



## Gradientenfelder

- unabhängig in drei orthogonalen Richtungen (x, y, z)
  - können schnell an- und ausgeschaltet werden
  - Magnetfeldstärke / Signalfrequenz  
linear abhängig von Ortskoordinate
- 
- Frequenzkodierung
  - Phasenkodierung
  - Schichtselektion
- technische und physiologische Limitierungen  
(Stimulation peripherer Nerven)

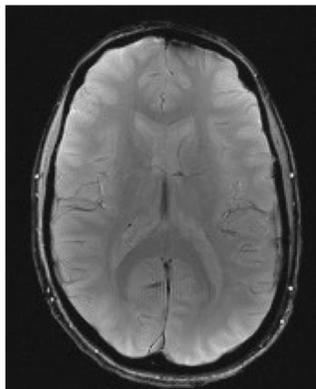


## Bildgebungsverfahren

- Ortskodierverfahren können auf vielfältige Weise kombiniert werden
- wichtig für Neurowissenschaften
  - schnelle Gradientenecho-Bildgebung (“FLASH”/“FFE”) und Varianten (v.a. MPRAGE)
  - Echo-Planar-Bildgebung (EPI)

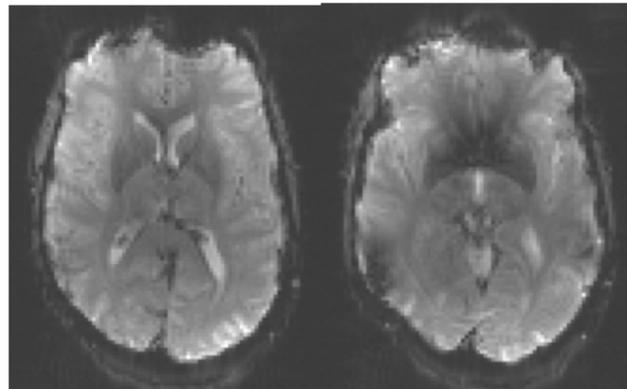
### FLASH / MPRAGE

Auflösung: sehr gut (1.0 mm)  
Messzeit: ok (s pro Schicht)  
anfällig für: v.a. Bewegung  
Einsatz: Anatomie (T1)



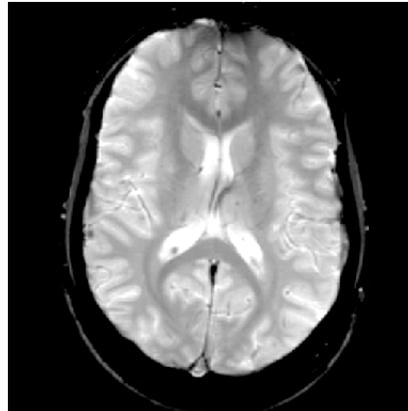
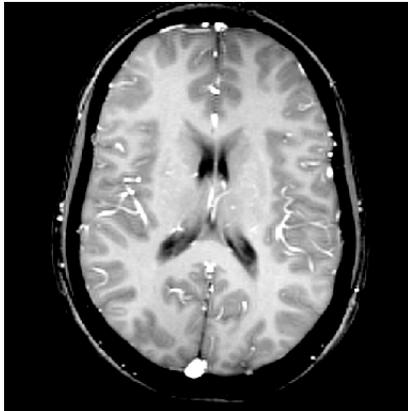
### EPI

mäßig (2.0 mm)  
sehr kurz (<100ms pro Bild)  
Auslöschungen (fMRI), geometrische Verzerrungen,  
fMRI (FID), diffusionsgewichtete Messungen (SE)



## Messparameter und Kontrast

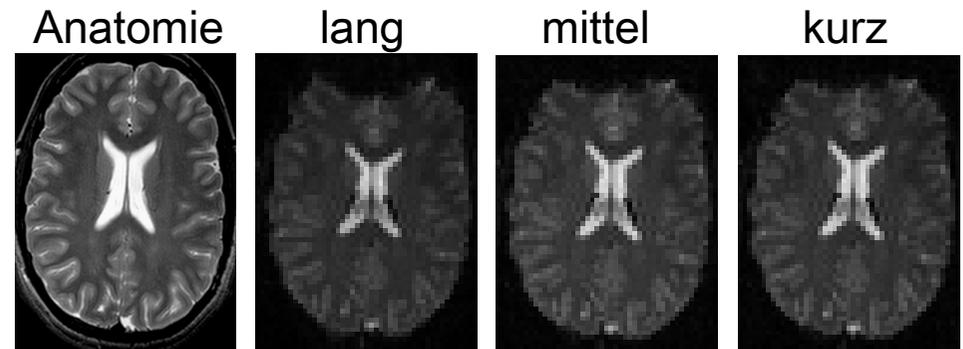
- Bildkontrast hängt ab vom Bildgebungsverfahren und von den Messparametern
- wichtige Messparameter
  - Repetitionszeit (TR): Abstand der HF-Anregungen für eine Schicht
  - Echozeit (TE): Abstand zwischen HF-Anregung und Datenaufnahme
  - Kippwinkel
- Beispiel (FLASH):



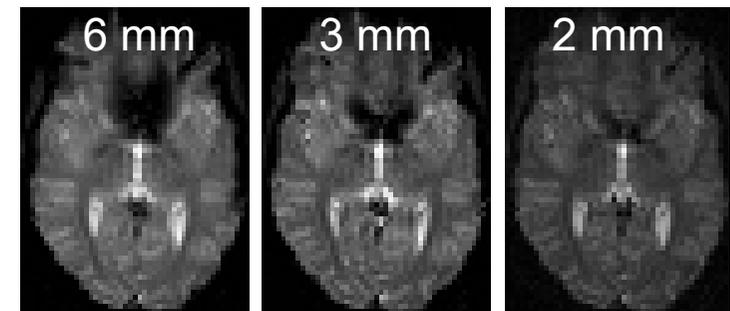
## EPI: Messparameter und Bildqualität

- alle Daten nach einer HF-Anregung (“single-shot”)

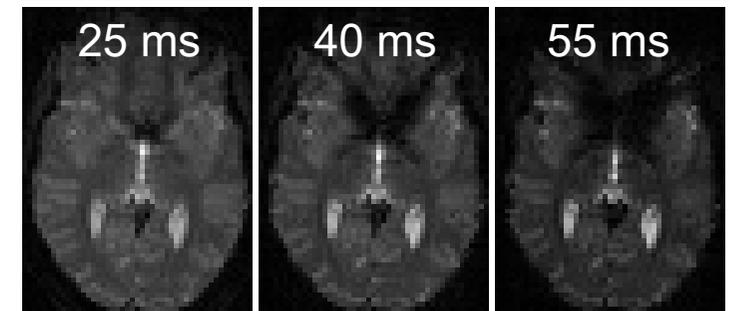
- geometrische Verzerrungen  
nehmen zu mit
  - Echoabstand / Länge des Echozuges
  - räumlicher Auflösung



- Signalauslöschungen (fMRI)  
nehmen zu mit
  - Schichtdicke
  - Echozeit

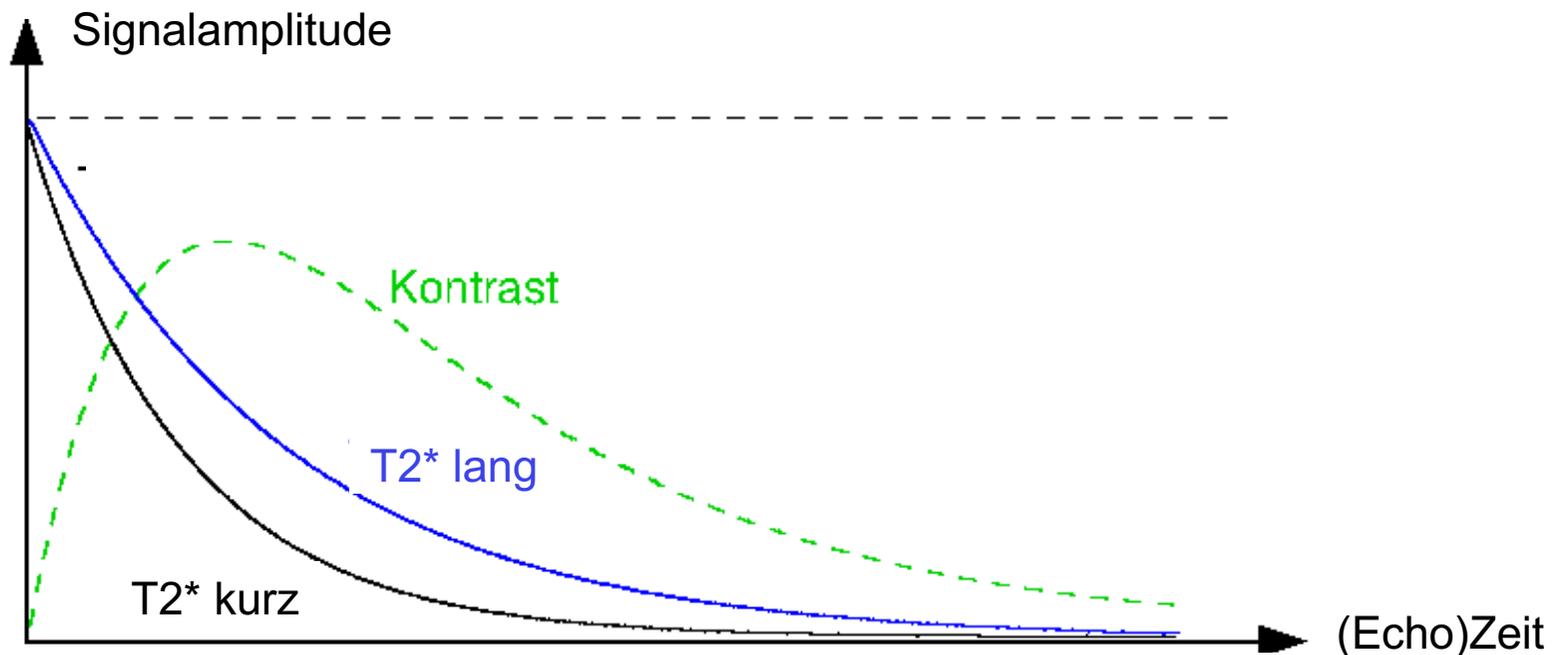
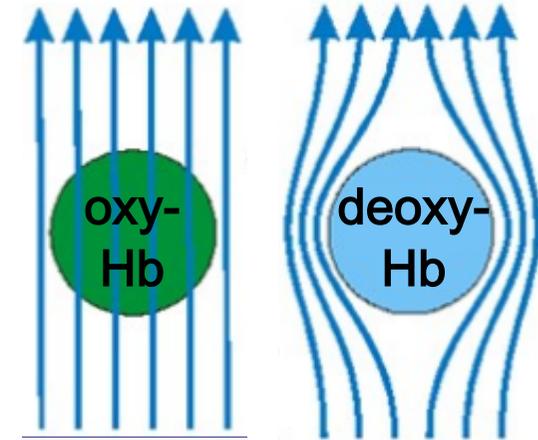


- Abwägung Auflösung – Messzeit – Bildqualität
  - typisch:  $2.0 \times 2.0 \times 2.0 \text{ mm}^3$  in 2-3 s



## BOLD-Kontrast

- oxy-Hämoglobin nur schwach magnetisch, kaum Einfluss auf das Magnetfeld
- deoxy-Hämoglobin stärker magnetisch, verzerrt das Magnetfeld (Inhomogenität)
- Relaxationszeit  $T2^*$  abhängig von Sauerstoffgehalt der Kapillaren
- optimaler Kontrast für "mittlere" Echozeiten (30-45 ms @ 3T)



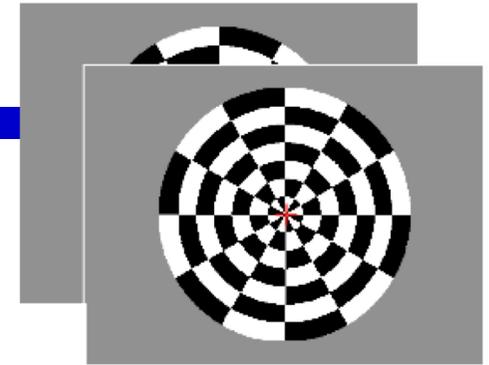
## fMRI

- bei Aktivierung von Hirnarealen
  - werden die Blutgefäße lokal dilatiert und die Durchblutung steigt an
  - die Konzentration von deoxy-Hb sinkt
  - Signalintensität auf T2\*-gewichteten Bildern nimmt zu
- Einschränkungen
  - indirekter Nachweis der Aktivierung,  
kann beeinflusst / gestört werden (z.B. durch Medikamente)
  - typische Signaländerung sehr klein (<2-5%)
  - Signaländerung ist verzögert (typische Latenzzeit 2-4s)
- Praxis
  - viele Messungen erforderlich für überzeugenden Nachweis
  - v.a. Echo-Planar-Bildgebung (sehr kurze Messzeit pro Schicht)

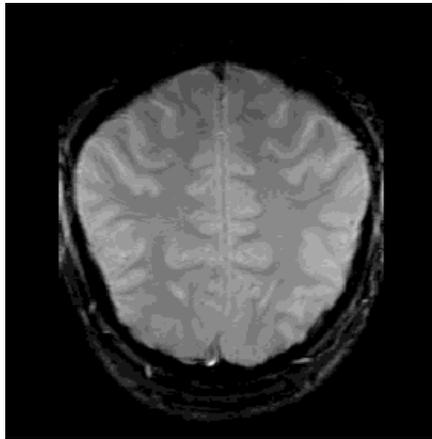
# MR-Bildgebung

## fMRI

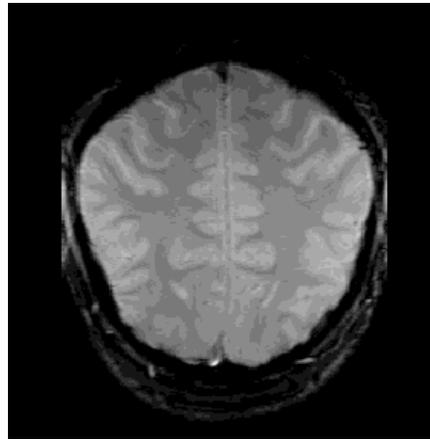
- Beispiel: visuelle Stimulation (Blockdesign)



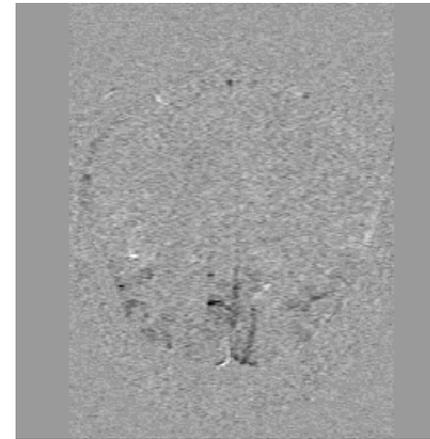
Aktivierung



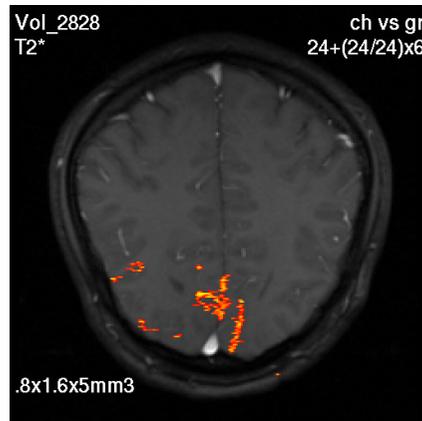
Kontrolle



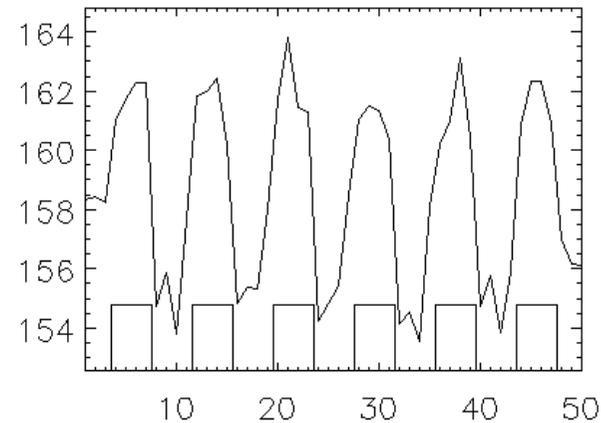
Differenz



Aktivierungskarte



Zeitverlauf des Signals

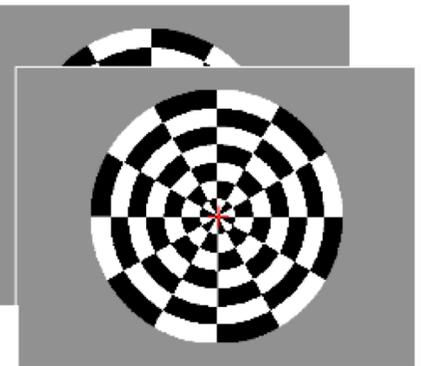
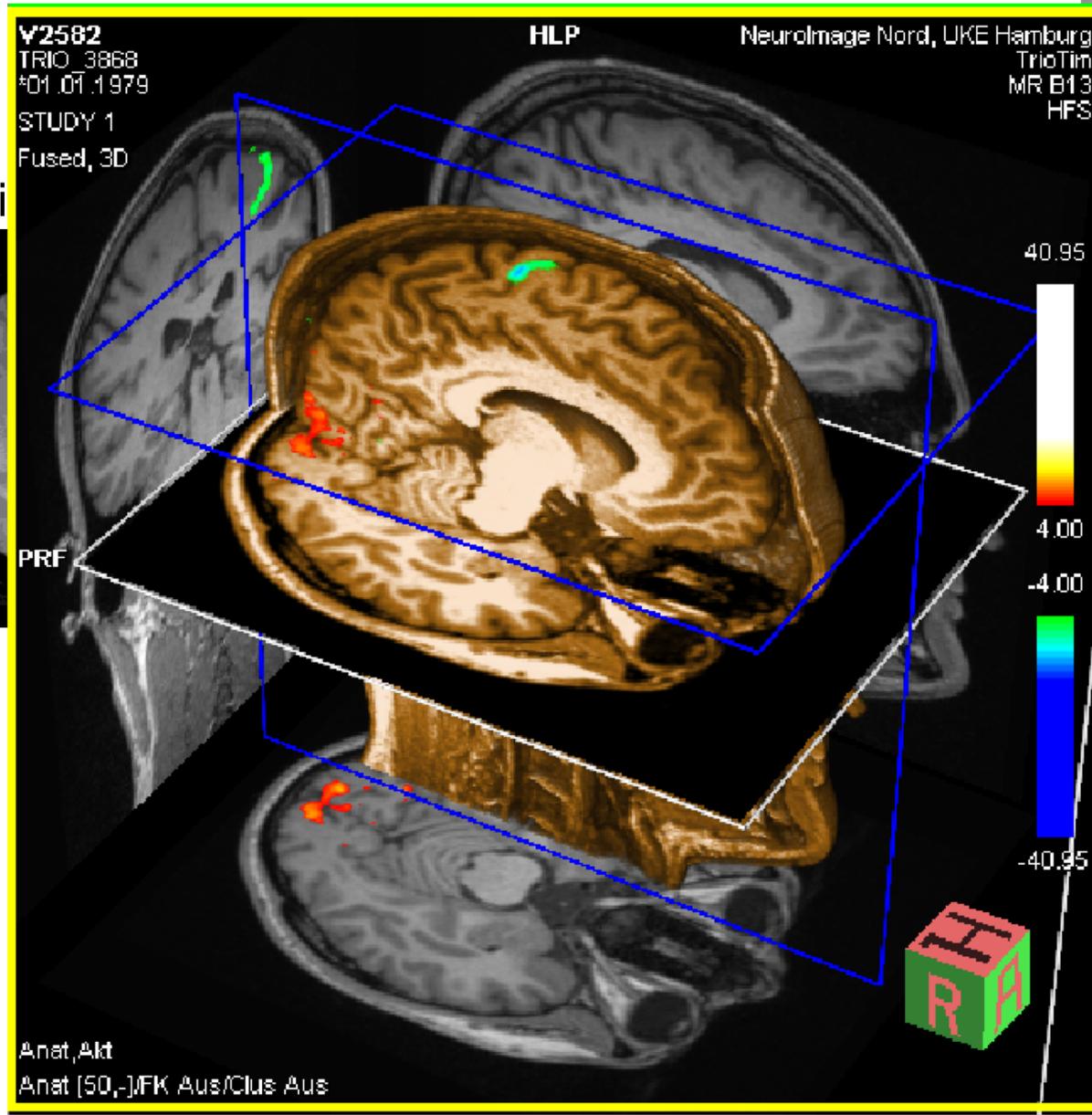
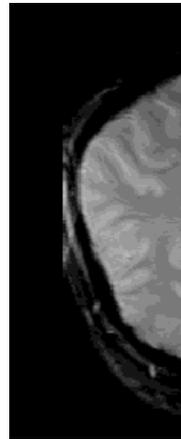


# MR-Bildgebung

## fMRI

- Beispiel:

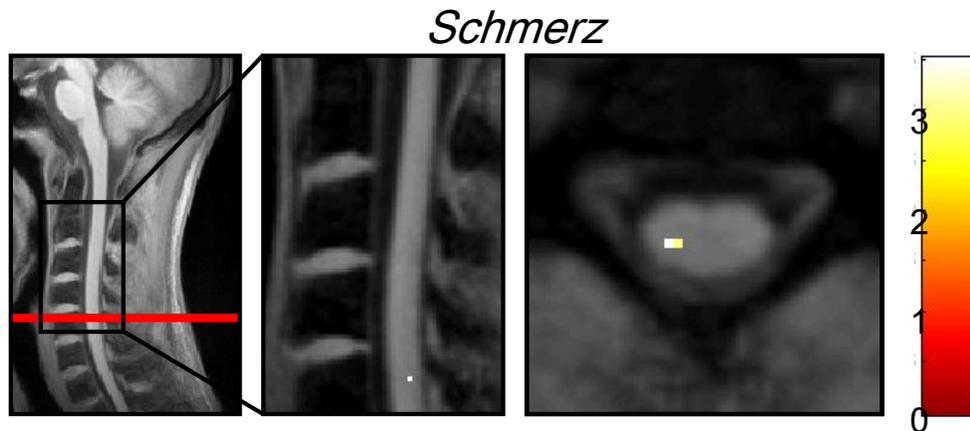
Akti



- Grundlagen MR-Bildgebung
  - Grundlagen
  - Kontrast
  - Ortskodierung
  - Bildgebungsverfahren
  - Messparameter
  - BOLD-Kontrast und fMRI
- Methoden für bessere räumliche und zeitliche Auflösung
  - Motivation und Limitierungen
  - parallele Bildgebung
  - simultane Mehrschichtmessungen (“Multi-Band”-Bildgebung)
  - kleine Messfelder

## Motivation

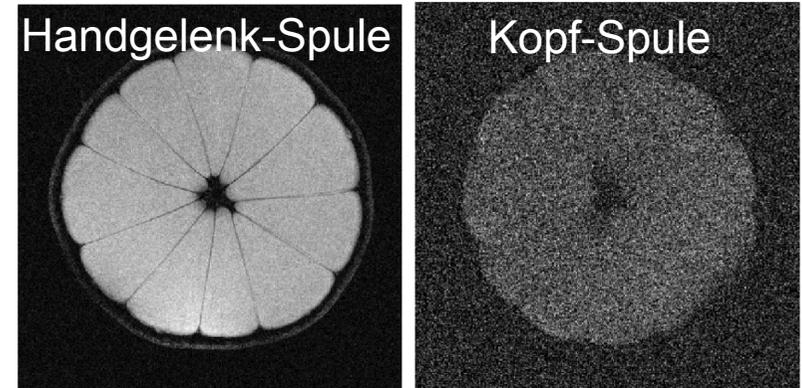
- räumliche Auflösung
  - bessere Lokalisierung, Verringerung von Partialvolumeneffekten
  - Zugang zu / Differenzierung kleiner Strukturen (z.B. Hirnstamm, Rückenmark)
  - “Trennung” von Faserkreuzungen (diffusionsgewichtete Bildgebung)



- zeitliche Auflösung
  - Abtastung BOLD-Antwort (Amplitude, Zeitpunkt, Dauer)
  - Dynamik funktioneller Prozesse (z.B. DCM, PPI)

## Limitierungen: MRI

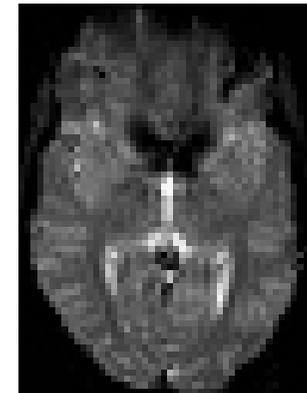
- räumliche Auflösung
  - Messzeit
  - Signal-Rausch-Verhältnis / Bildqualität
- zeitliche Auflösung
  - Schichtdicke / Volumenabdeckung



0.2×0.2 mm<sup>2</sup>

## Limitierungen: EPI

- räumliche Auflösung
  - Echoabstand / längerer Echozug (Verzerrungen)
  - Echozeit (Auslöschungen für fMRI)



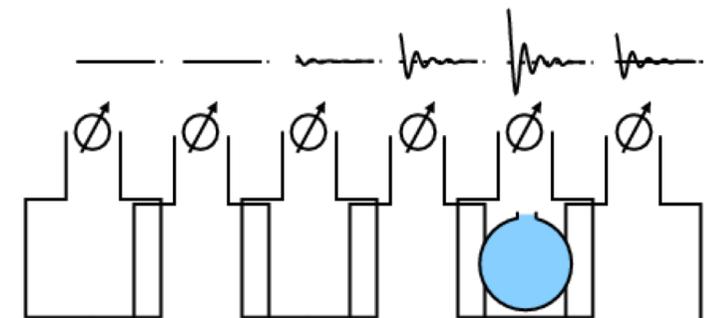
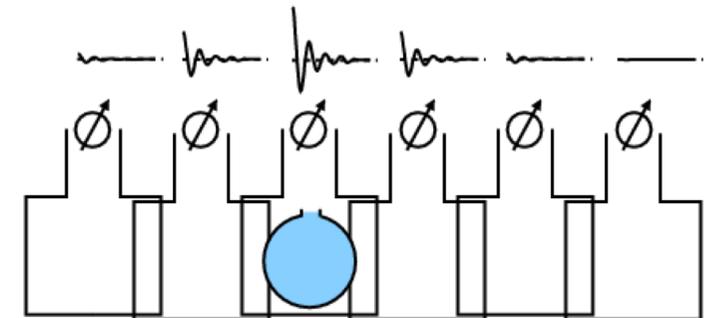
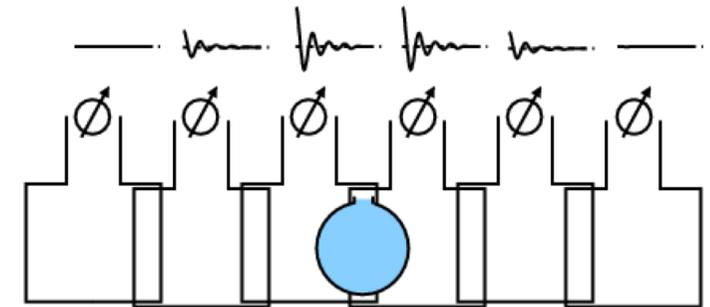
## Hilfreiche Methoden

- parallele Bildgebung
- simultane Mehrschichtmessungen (“Multi-Band”-Bildgebung)
- kleine Messfelder

# Parallele Bildgebung (PAT)

## Idee

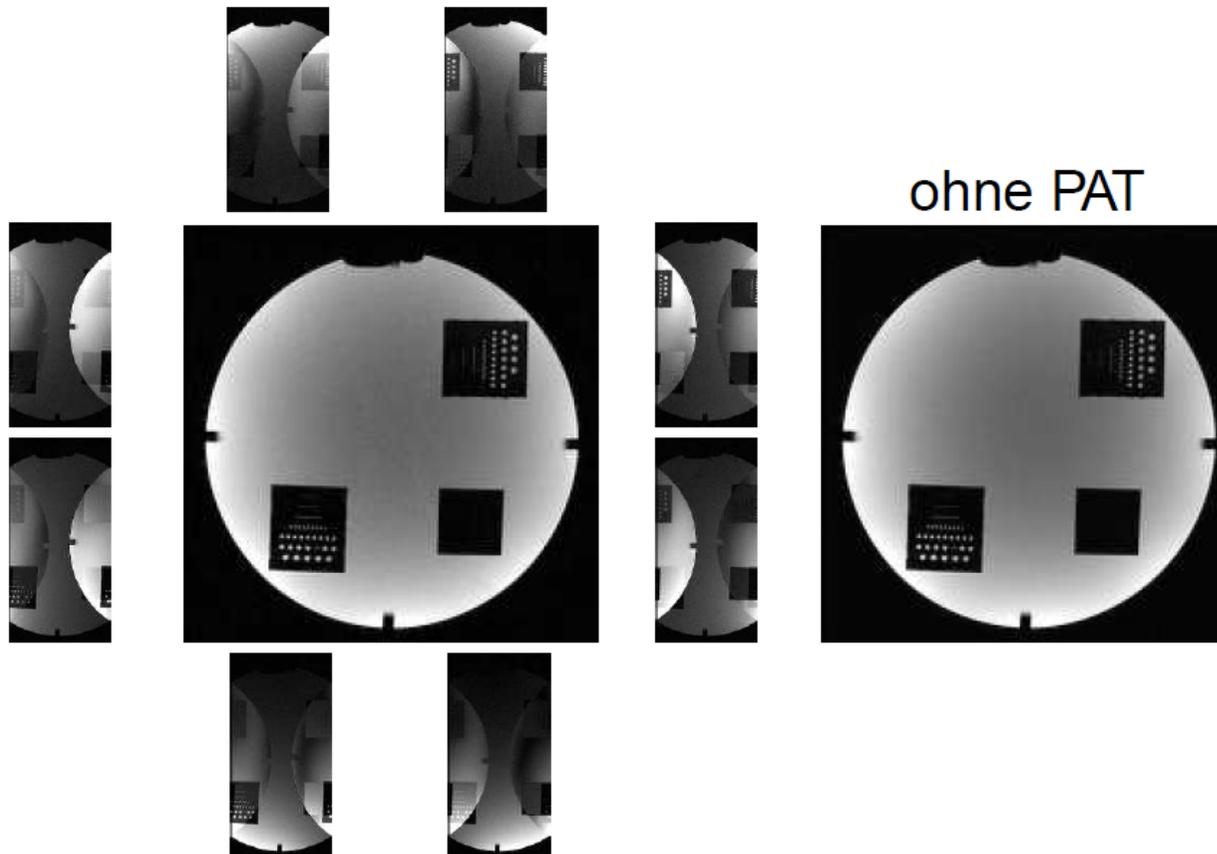
- mehrere Spulen(elemente), mit räumlich unterschiedlicher Empfangsempfindlichkeit
- getrennte (“parallele”) Aufnahme der Signale
  - relative Signalstärken liefern grobe Ortsinformation
  - Verzicht auf Teil der Ortskodierung möglich entlang der Spulenanordnung
- Beschleunigungsfaktor abhängig von Spulenzahl, -größe und -anordnung



# Parallele Bildgebung (PAT)

## Beispiel

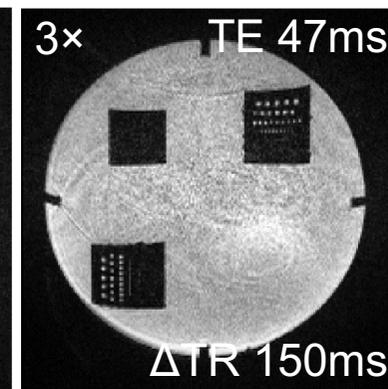
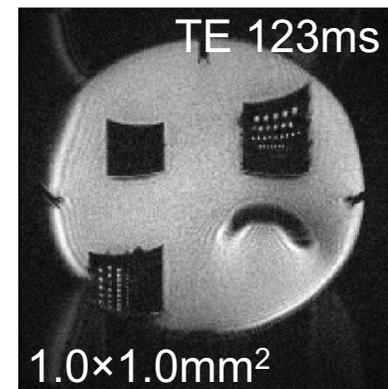
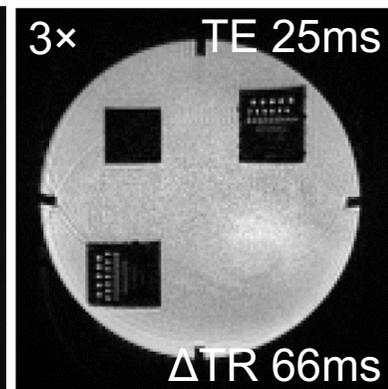
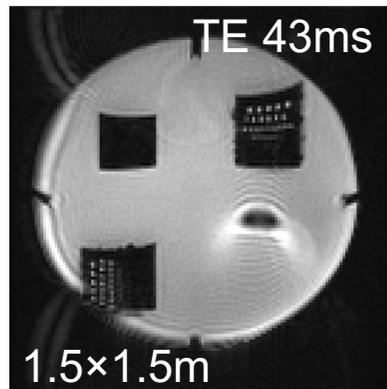
- acht Elemente, Beschleunigungsfaktor 2



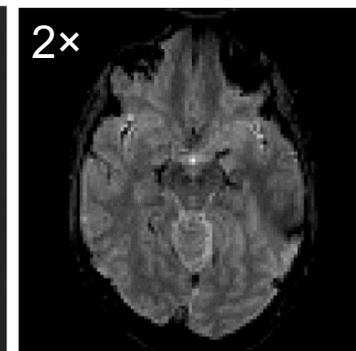
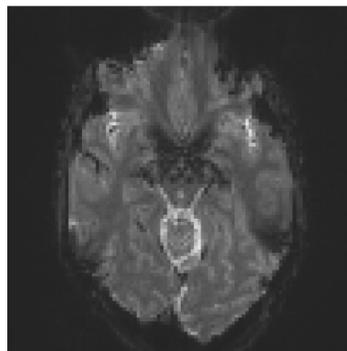
# Parallele Bildgebung (PAT)

## EPI

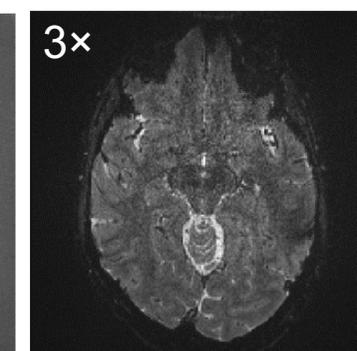
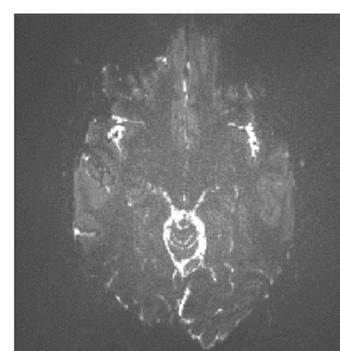
- kürzerer Echoabstand, kürzerer Echozug
- kürzere Echozeit, kürzere Messzeit
- weniger Verzerrungen, weniger Auslöschungen
- Beispiele



2.0×2.0mm<sup>2</sup>



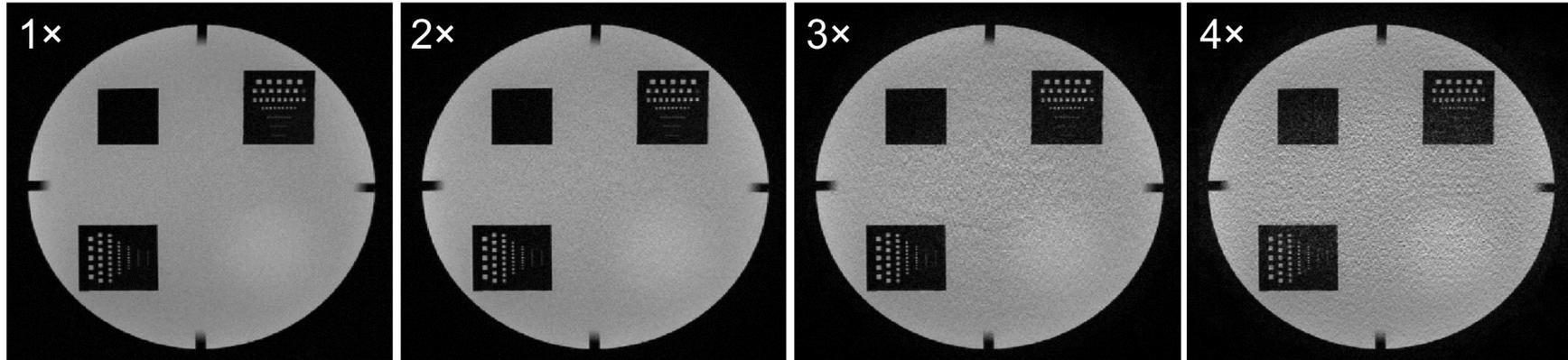
1.0×1.0mm<sup>2</sup>



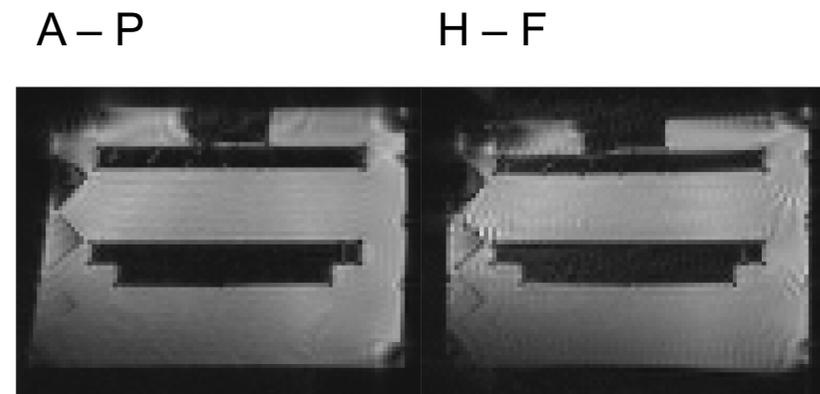
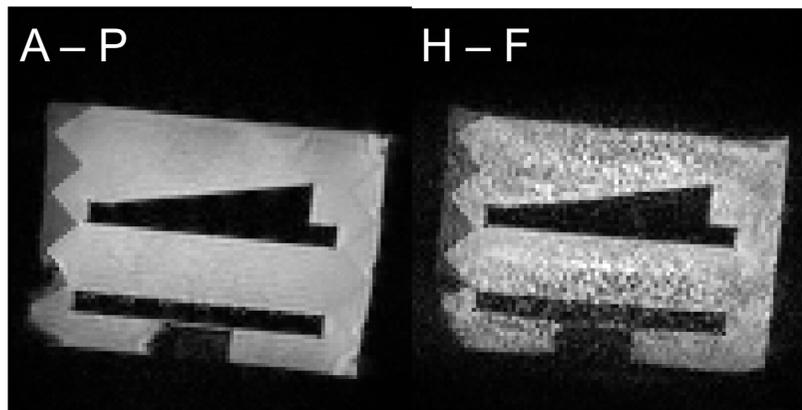
# Parallele Bildgebung (PAT)

## Wichtige Eigenschaften

- Anfälligkeit für Rauschen / Artefakte



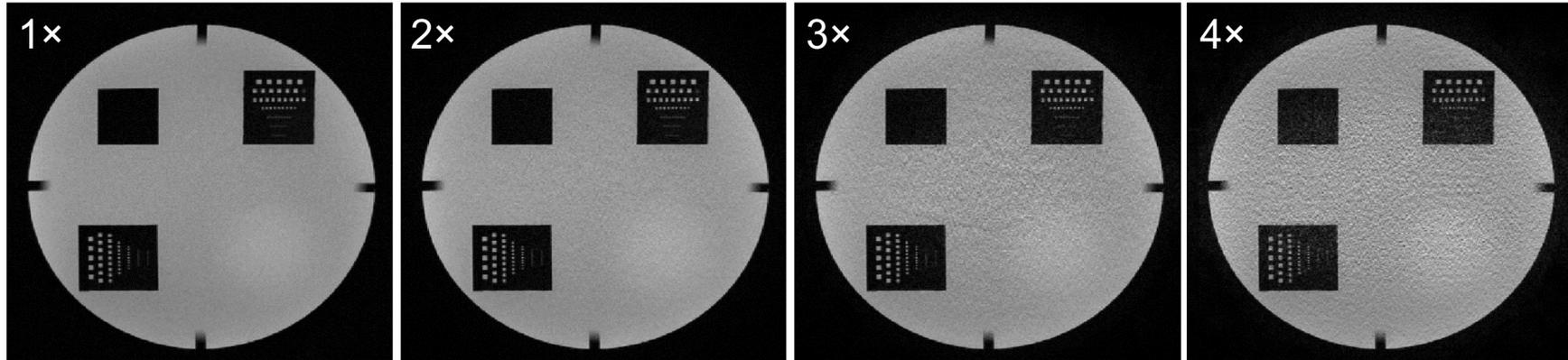
- Bildqualität abh. von Anzahl der Spulenelemente, Spulengeometrie, Richtung der Beschleunigung



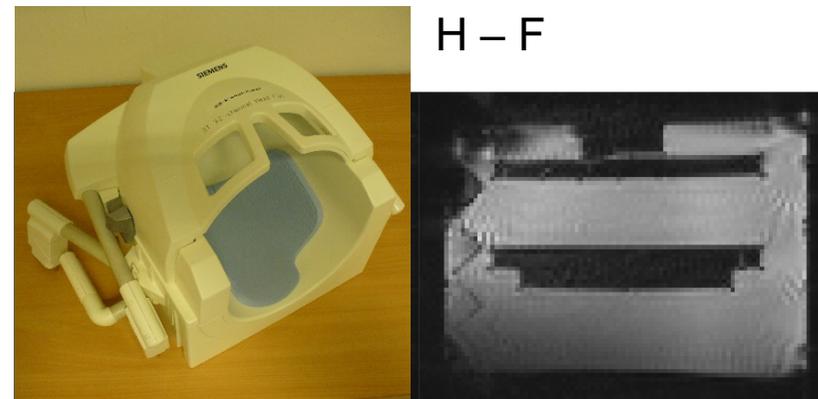
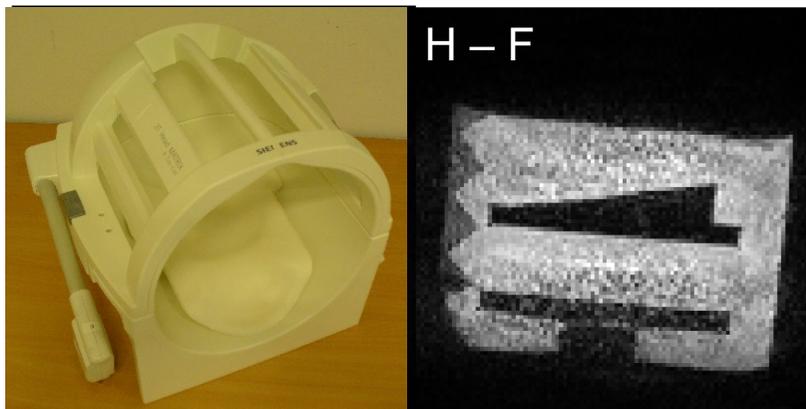
# Parallele Bildgebung (PAT)

## Wichtige Eigenschaften

- Anfälligkeit für Rauschen / Artefakte



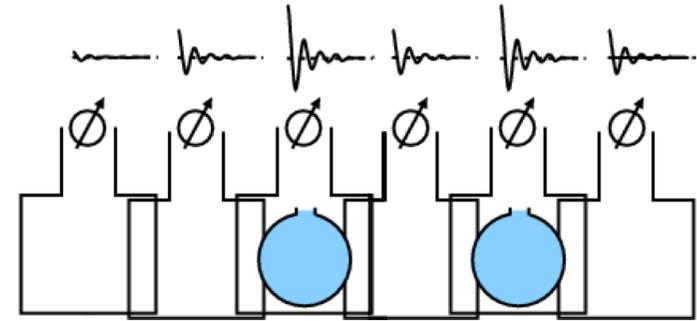
- Bildqualität abh. von Anzahl der Spulenelemente, Spulengeometrie, Richtung der Beschleunigung



# “Multi-Band”-Bildgebung (MB)

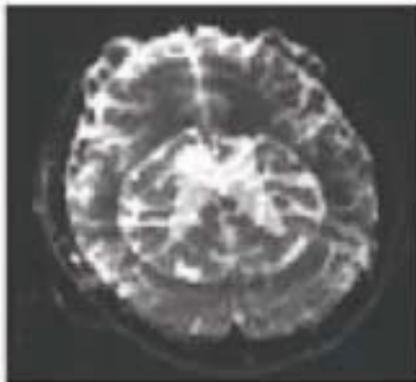
## Idee

- simultane Messung mehrerer Schichten
- separiere Schichten anhand der relativen Signalbeiträge der einzelnen Elemente
- vereinfacht: “parallele Bildgebung in Schichtrichtung”
- Beschleunigungsfaktor abhängig von Spulenanzahl, -größe und -anordnung

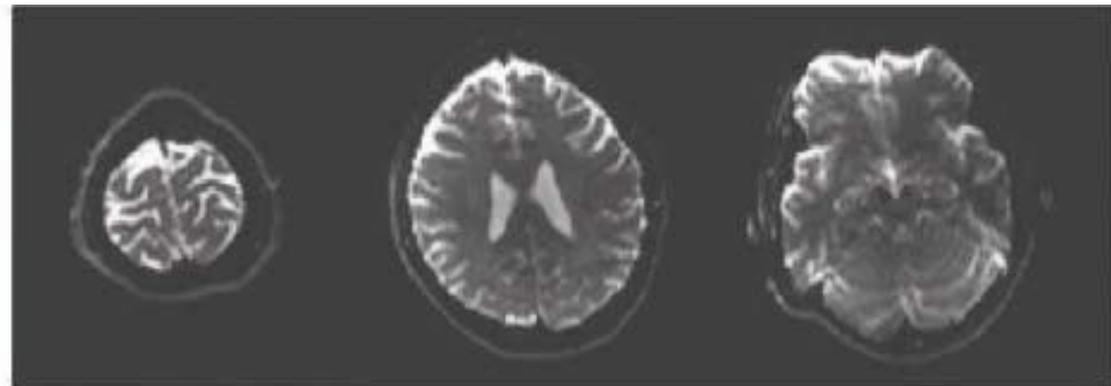


## Beispiel

gemessen



rekonstruiert



# “Multi-Band”-Bildgebung (MB)

## Wichtige Eigenschaften

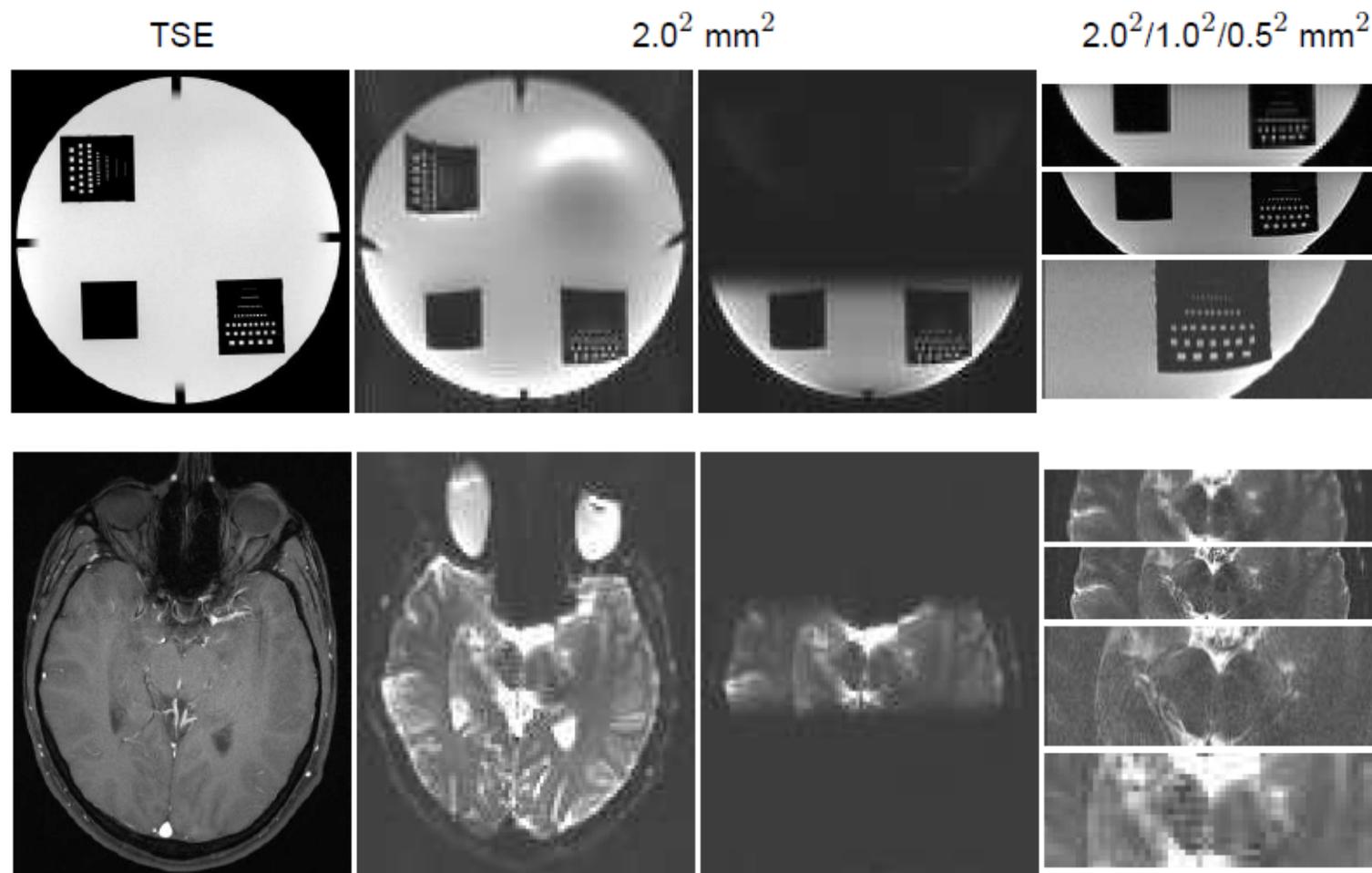
- Verkürzung der “gesamten” Messzeit, nicht nur der Datenaufnahme (PAT)
- keine “speziellen” Vorteile für EPI
- Einfluss der Spuleneigenschaften/-geometrie (vgl. PAT)
- Artefakte bei zu kleinem Bandabstand (Dicke Schichtstapel / Anzahl der Bänder)
- u.U. Kippwinkelanpassung bei kurzen TR erforderlich
- stärkere Variation der Signalamplitude bei schnellen Bewegungen
- “konkurriert” mit paralleler Bildgebung in Bildebene,  
Abwägung PAT (Verzerrungen/Auslöschungen) – “Multi-Band” (TR)

# Innere Messfelder ("ZOOM")

## Idee

- beschränkte Messung auf kleinen räumlichen Bereich in der Bildebene

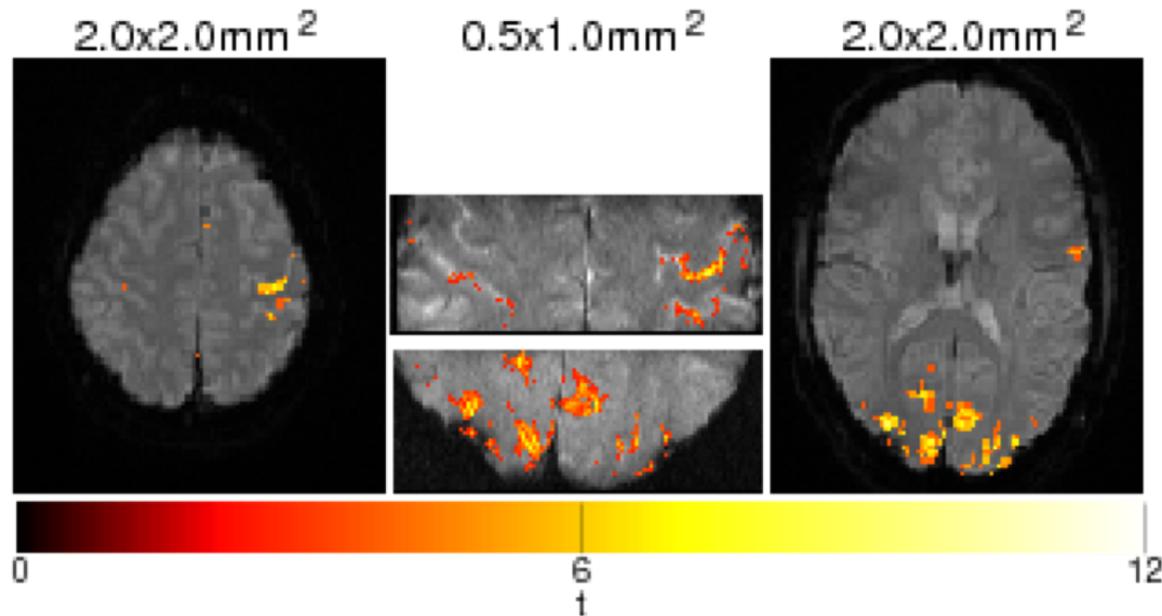
## Beispiel



# Innere Messfelder (“ZOOM”)

## Wichtige Eigenschaften

- verkürzte Datenaufnahme / Messzeit
- “konkurriert” mit PAT
- für EPI
  - weniger Verzerrungen / Auslöschungen
  - höhere räumliche Auflösung
  - Beispiel



# Zusammenfassung

