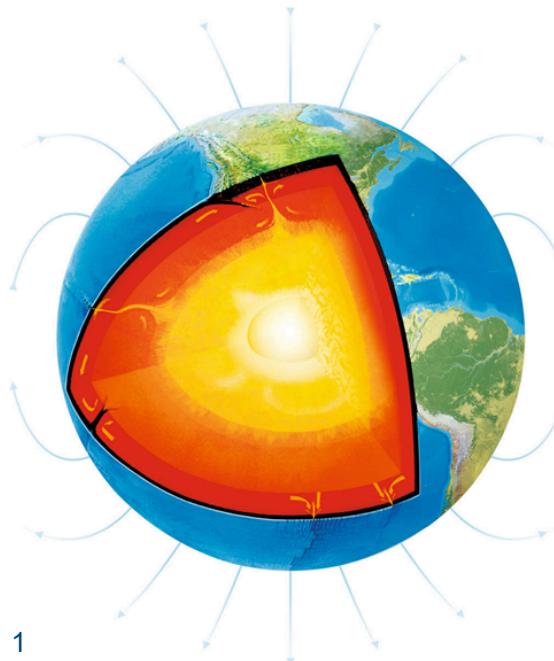


# Einführung in die Geophysik

## Teil 4: Geomagnetik

2. BSc Geophysik und Geoinformatik (BGIP)



*Thomas Günther*  
*(thomas.guenther@geophysik.tu-freiberg.de)*

# Previously on AnGy

- Gravimetrie: Störkörperperformeln Kugel vs. Zylinder
- Tiefe aus Halbwertsbreite, Äquivalenz Größe-Dichte
- Modellierung beliebiger Körper mit pyGIMLi
- Erdmagnetfeld - Dipol in erster Näherung
- Induzierte vs. Remanente Magnetisierung
- Anwendungsfälle: Lagerstätten, Tektonik, UXOs, Archäologie

# Methoden

1. ~~Gravimetrie (1.5)~~
2. Geomagnetik (1.5)
3. Geoelektrik (2)
4. Induktive Elektromagnetik (1)
5. Georadar (1)
6. Seismik (3)
7. Kombinierte Erkundung

# Gravimetrie-Praktikum 24.04.2025

- Gravimetrische Wirkung eines Bahnhohlraums
- Treffpunkt Ende Brückenstr./Claussallee
- 9:45 Uhr, Roter Caddy (J. Börner, R.-U. Börner)
- 3 Gruppen: Gravimetrie, Nivellement, DGPS
- Auswertung 2.5.2025, 8-9:30 Uhr
- Messgerät: CG-5 Autograv
- Vorüberlegungen: Profillänge, Punktabstand

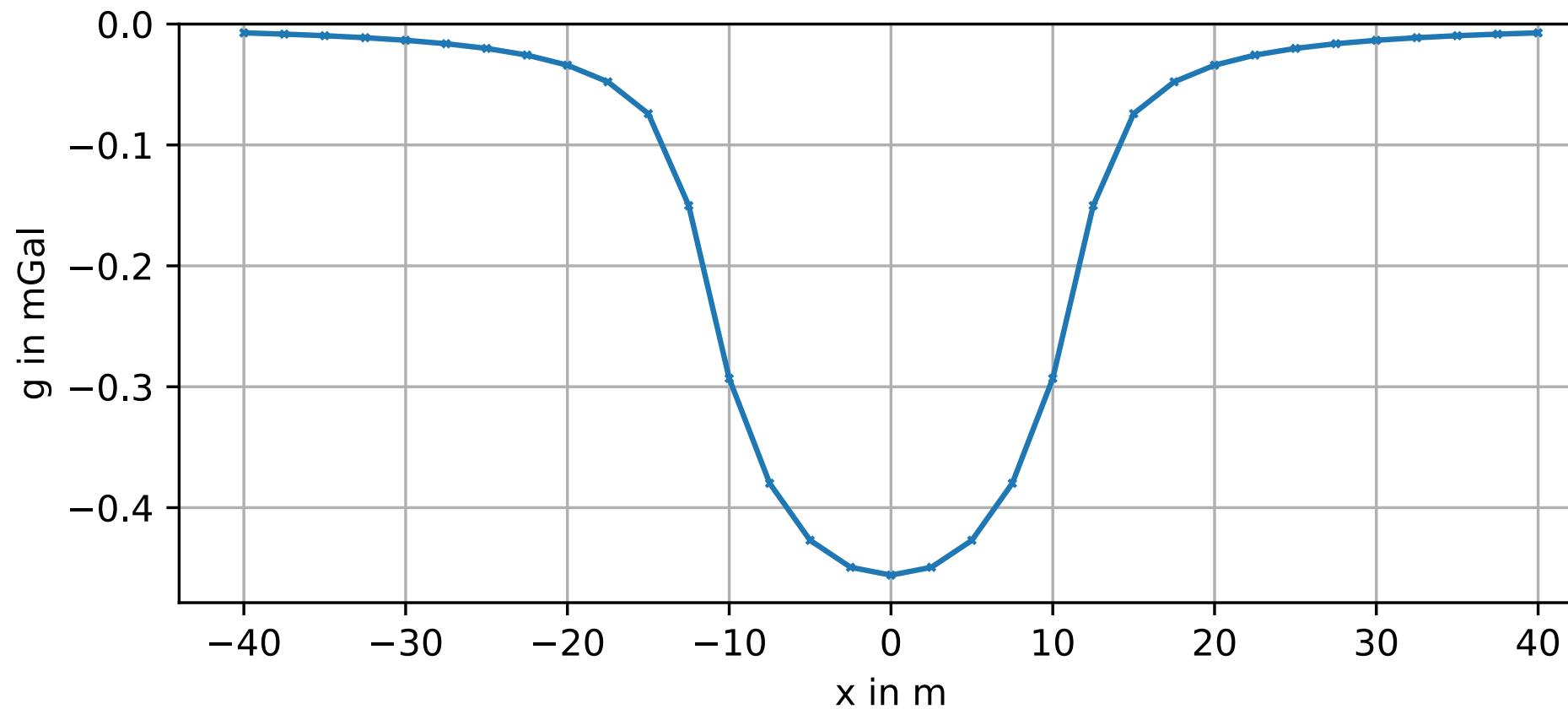
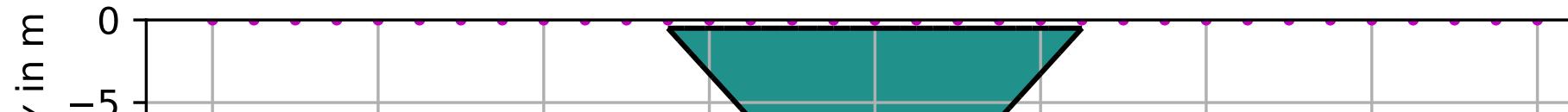
# Gravimetrie - Messgerät



## CG-5 Autograv

- Hersteller: Scintrex
- Auflösung 1  $\mu\text{Gal}$
- automatische Neigungskorrektur
- Gezeitenkorrektur

# Modellierung und Planung



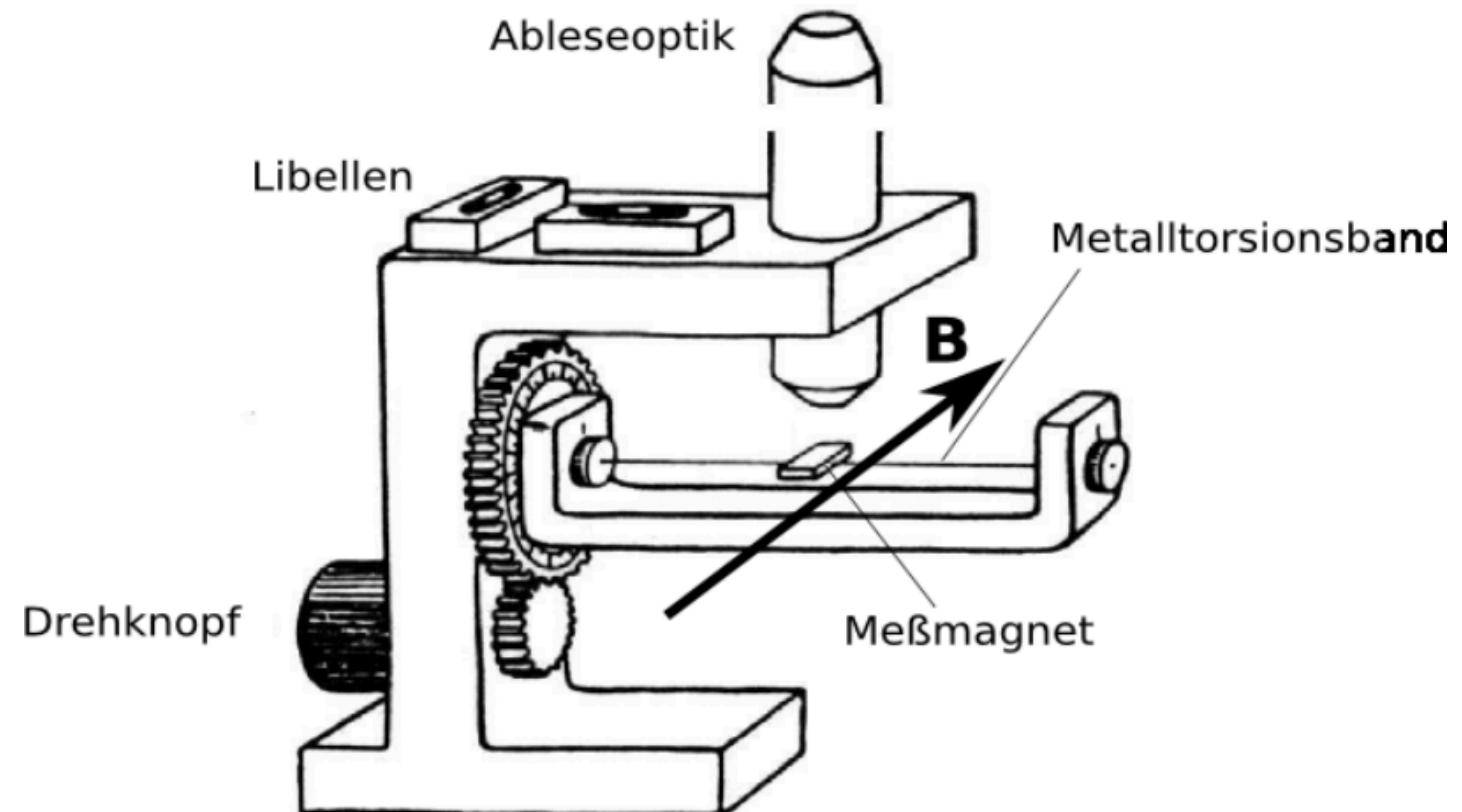
# Magnetfeld-Sensoren

- Torsionsmagnetometer/Feldwaage
- Kernsättigungs-/Fluxgate-Magnetometer
- Protonen/Kernpräzessions-Magnetometer
- Optisch gepumptes Magnetometer
- SQUID-Magnetometer
- Induktions-Spule (Wechselfeld)

# Torsionsmagnetometer

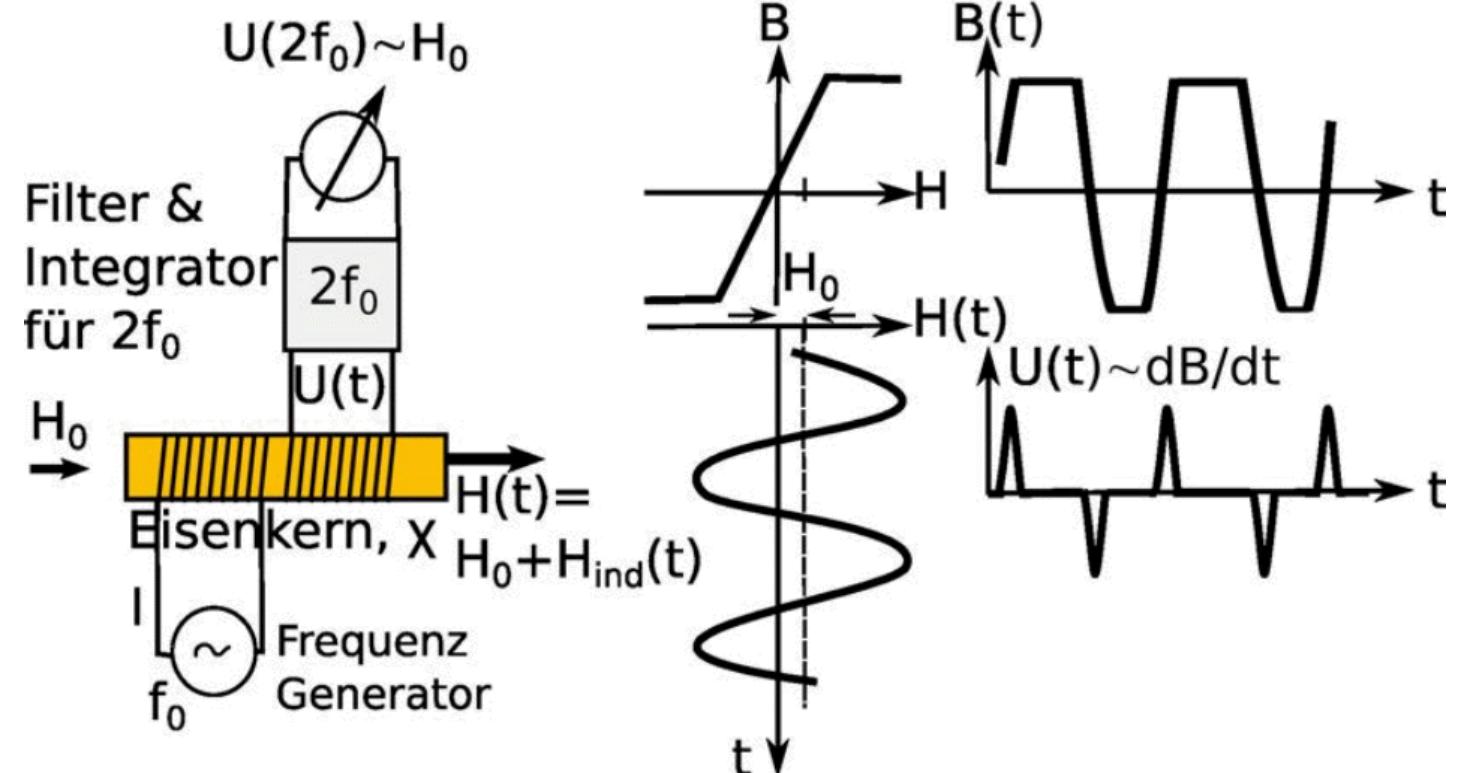
("Feldwaage")

- historisch
- 2 Metallbändchen mit Stabmagnet
- Drehwinkel  $\propto B_z$



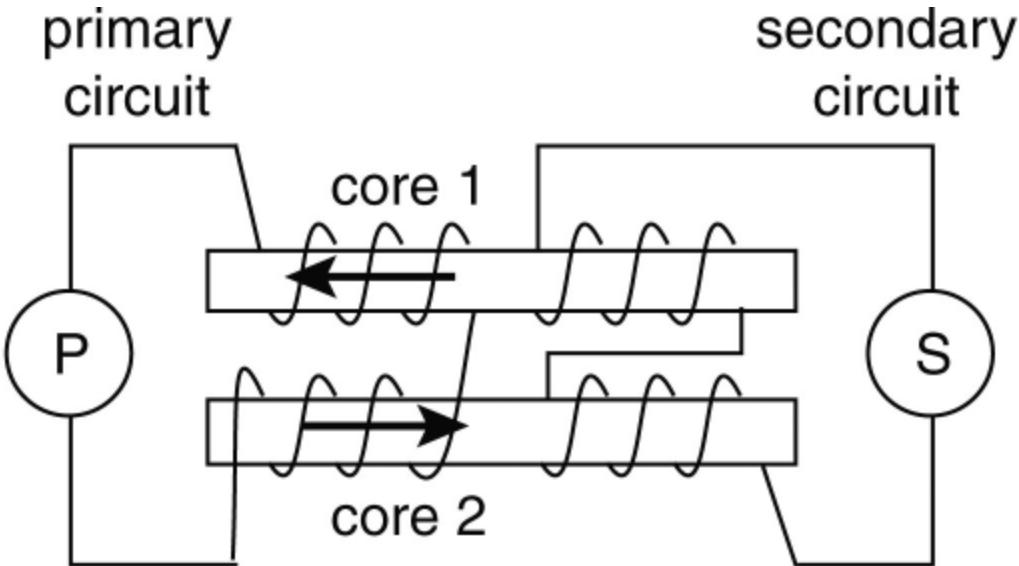
# Kernsättigungsmagnetometer

- fluxgate, “Fürster-Sonde”
- Eisenkern durch Wechselfeld gesättigt
- Erdfeld verschiebt Symmetrie der Magnetisierung
- sehr preisgünstig
- 3 Spulen: vektorielle Messung

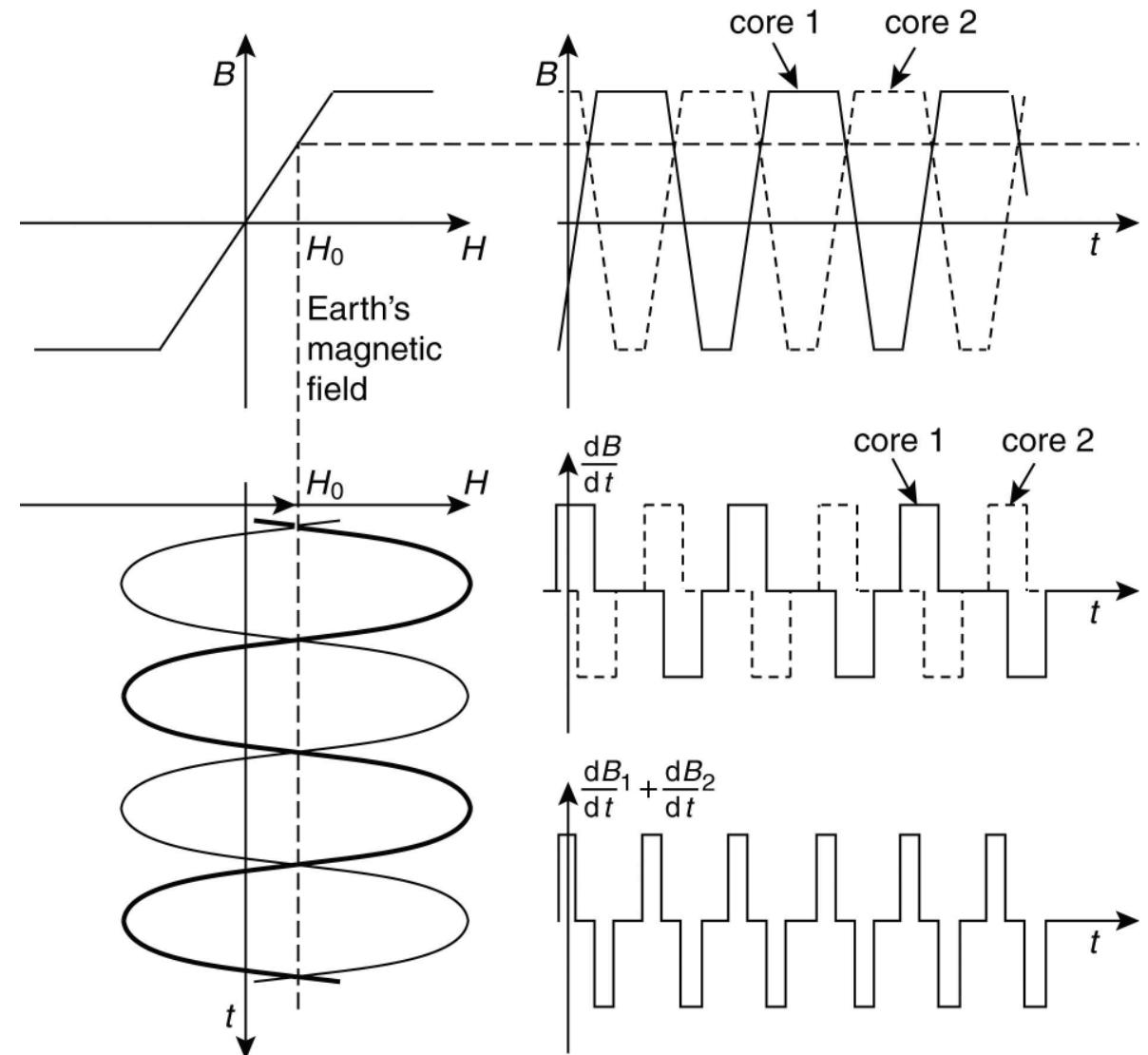


# Fluxgate-Sensor

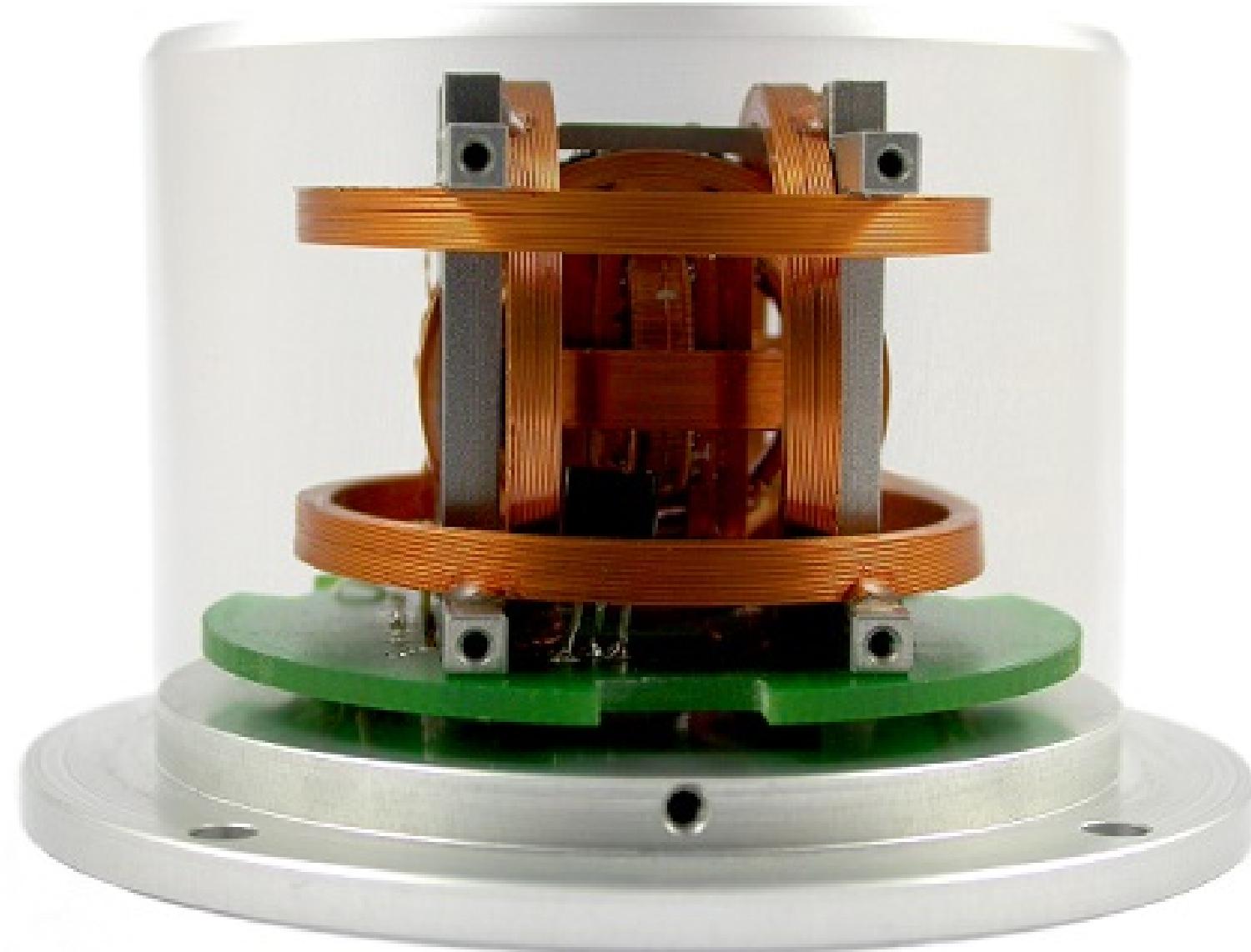
- Doppelkern mit hoher Suszeptibilität: Permalloy (Ni+Fe)



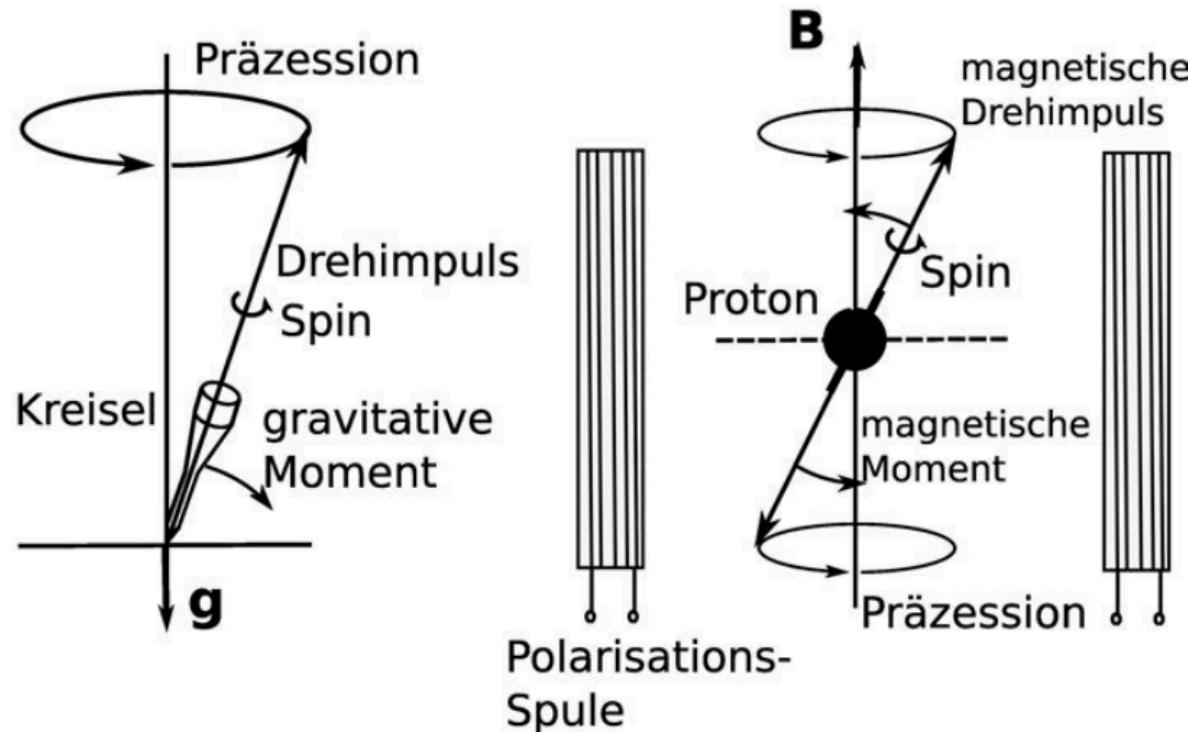
- $\delta B = 1 \text{nT}$
- Kalibrierung nötig



# 3-Achsen-Fluxgate von Magson



# Kernpräzessionsmagnetometer (KPM)



Präzession bei Kreisel und Proton

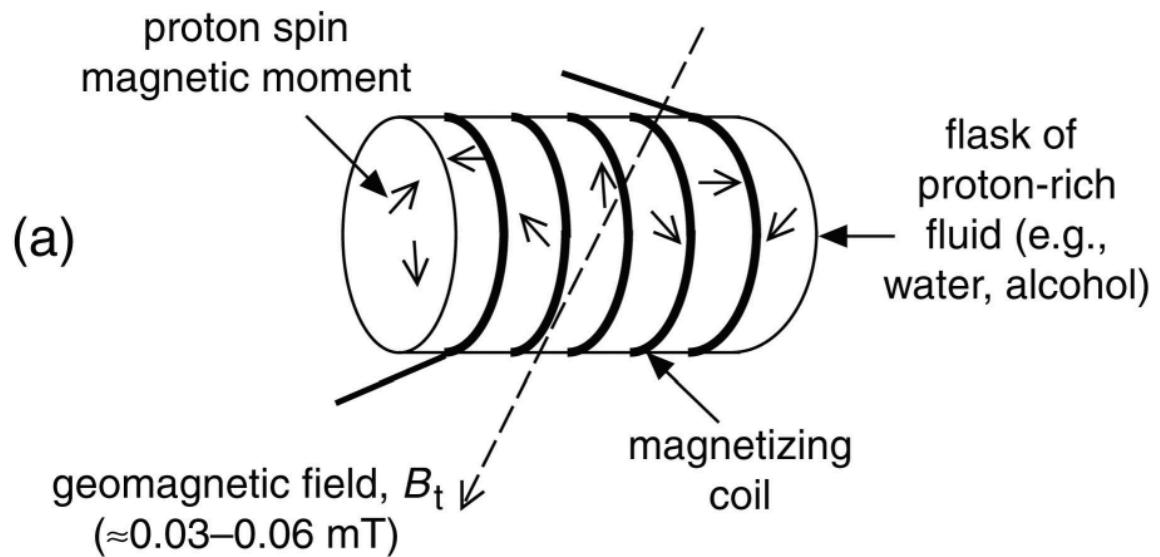
- Kernspin-Moment
- äußeres Magnetfeld: Drehmoment
- Präzession mit Frequenz

$$\omega = \gamma_p |B|$$

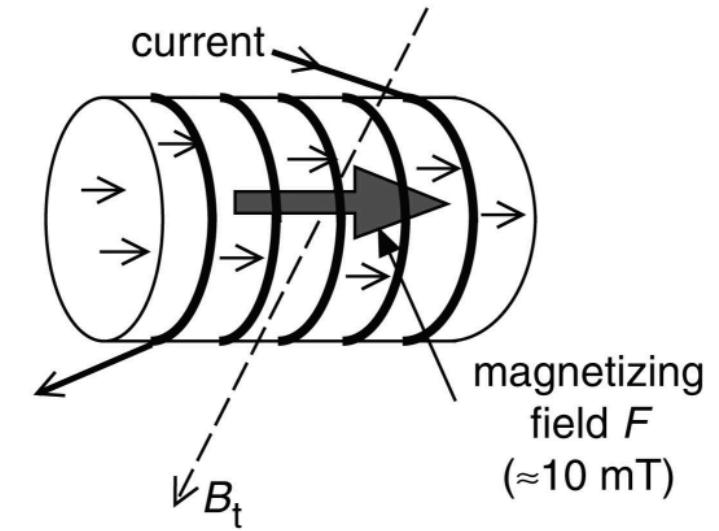
- gyromagnetisches Verhältnis  
 $\gamma_p = 2.67513e8$

# Kernpräzessionsmagnetometer (KPM)

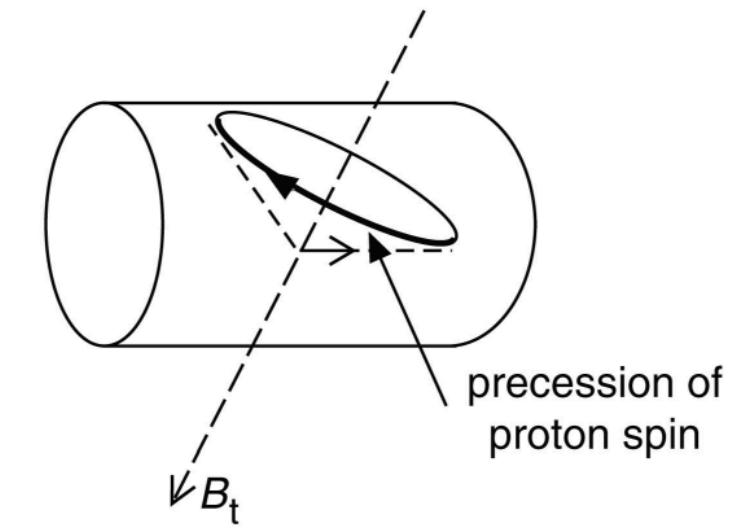
- Erdfeld  $30\text{-}60\mu\text{T} \Rightarrow 1.2\text{-}2.5\text{kHz}$
- Spule magnetisiert Behälter
- Abschalten führt zu Präzession
- Frequenz-Messung:  $\delta B=0.1\text{nT}$



(b)



(c)



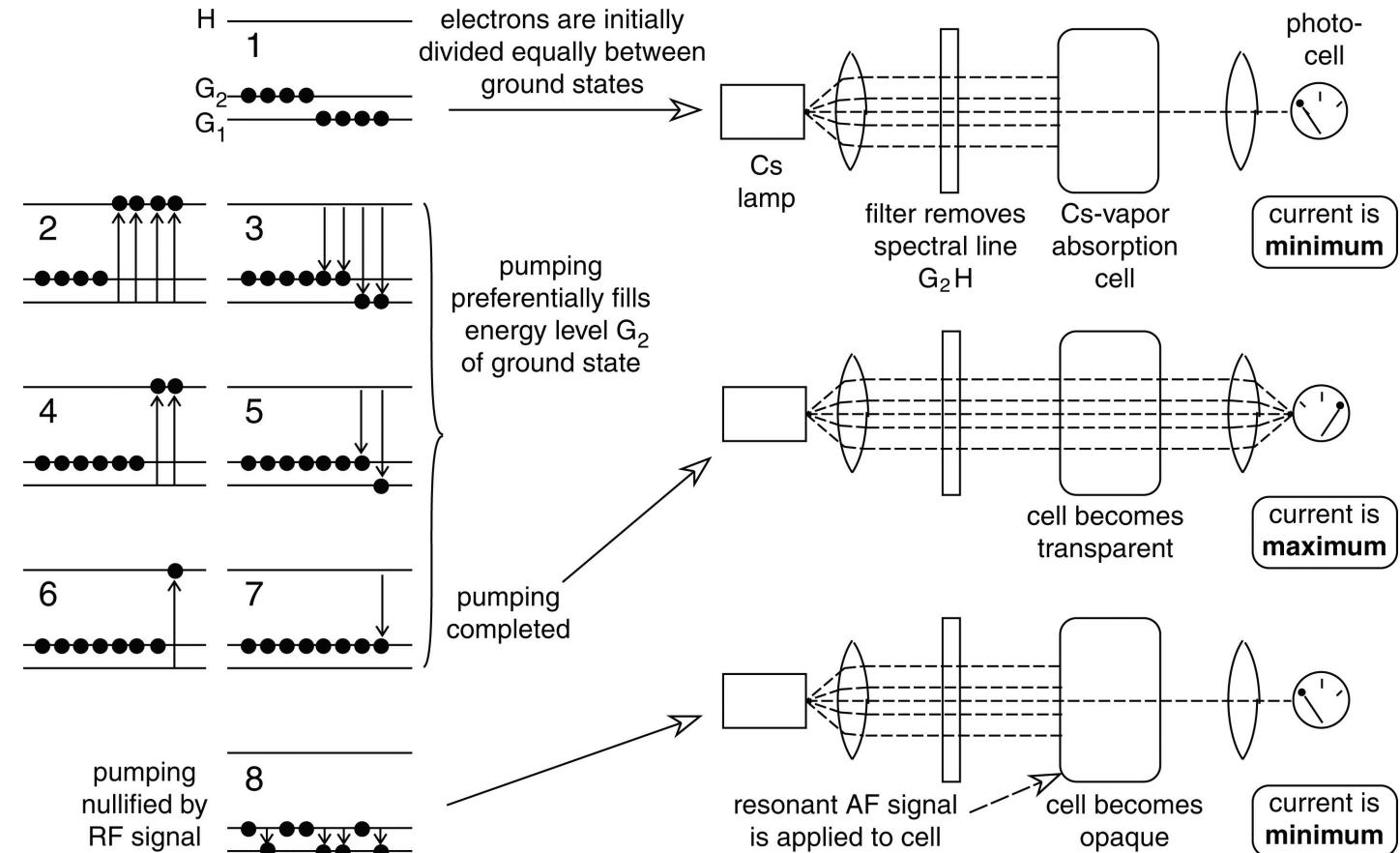


# Protonenmagnetometer von Langeo



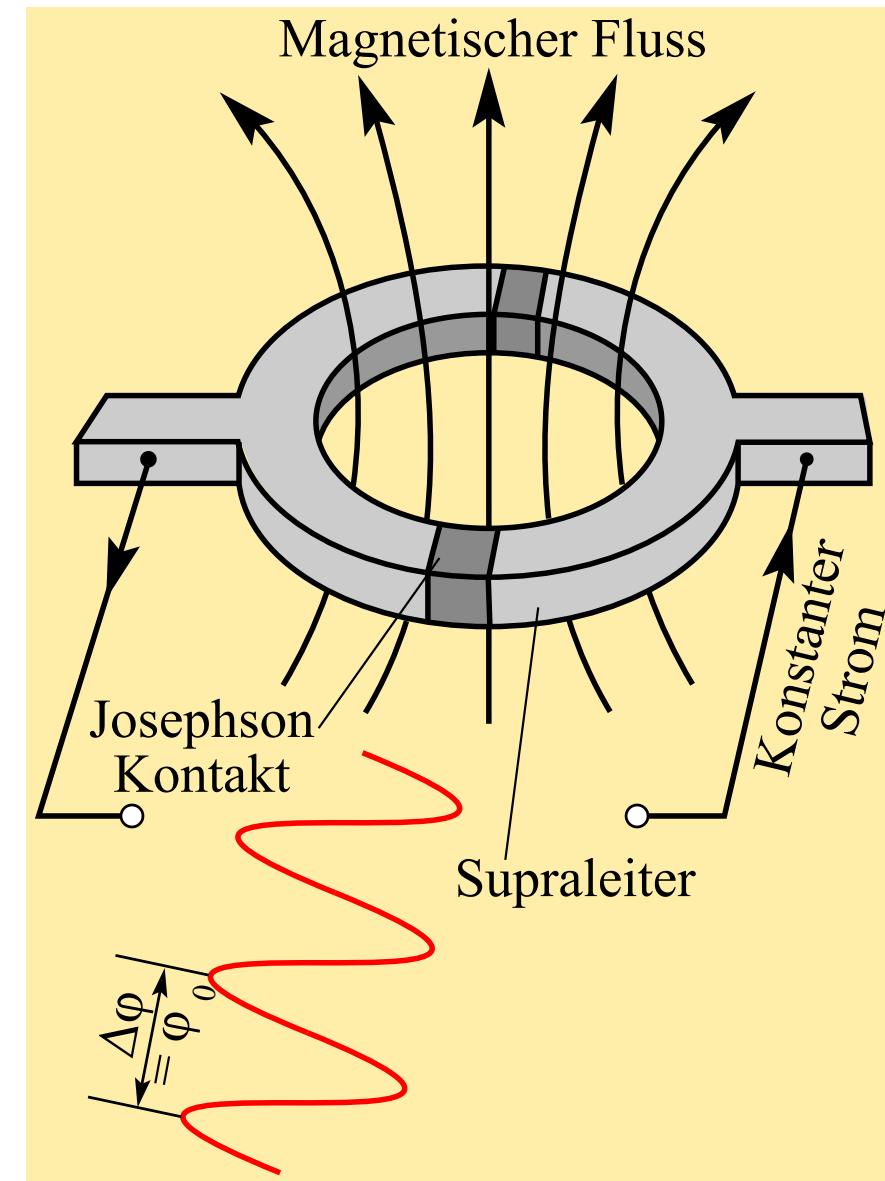
# Optisch gepumpte Magnetometer (OPM)

- Absorptionszellen-,  
“Cäsium-Magnetometer”
- Zeemann-Effekt  
(Quantenmechanik):  
Aufspaltung von Spektral-  
Linien durch Magnetfeld
- Präzessionsfrequenz des  
Elektrons  $\gamma_e = 1800\gamma_p$
- $\delta B=10\text{pT}$



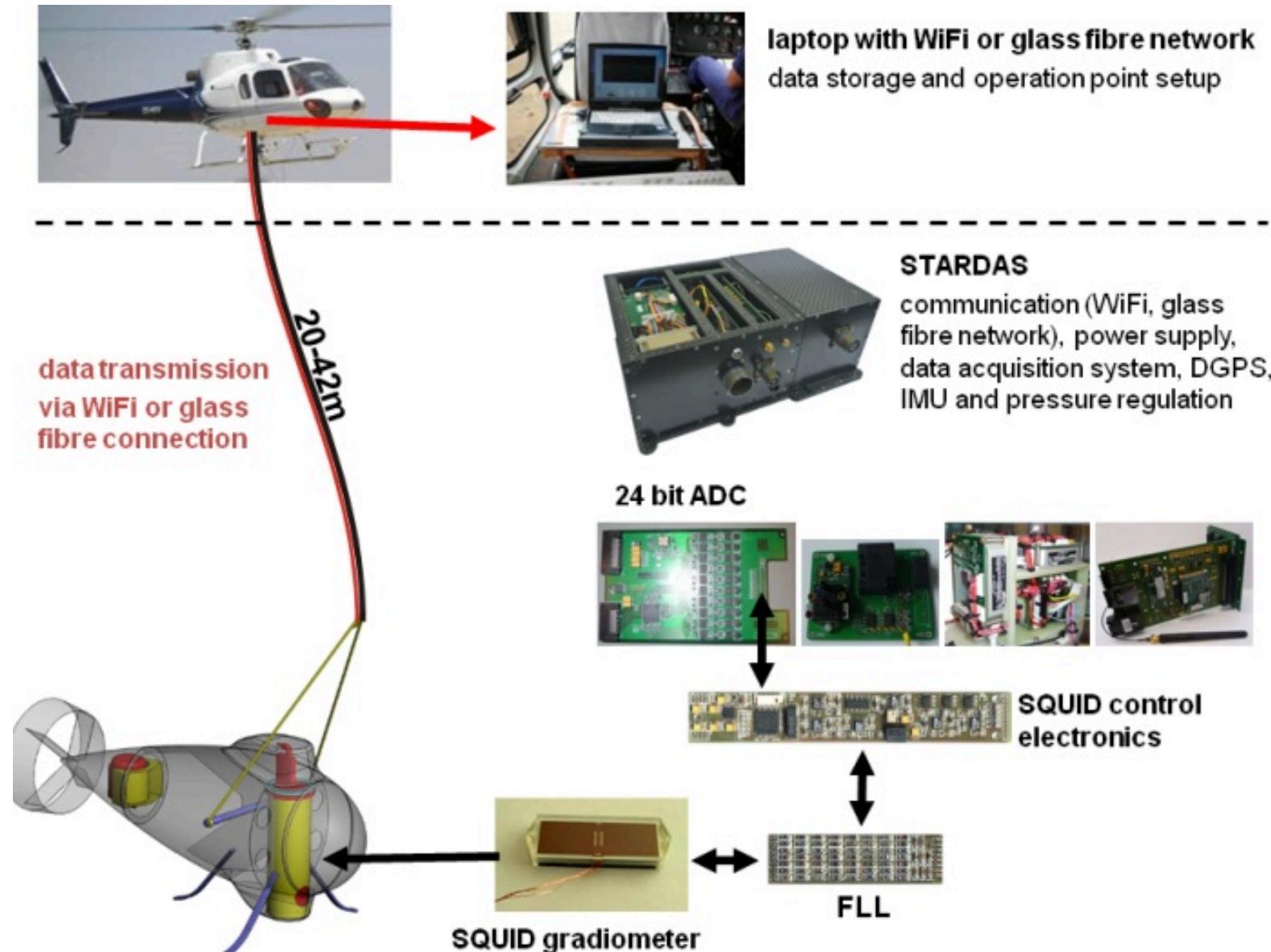
# SQUID-Magnetometer

- supraleitender Ring aus Niob oder Keramik
- Elektronen-(Cooper)-Paare tunneln durch Barriere
- Magnetfluss gequantelt  $\Rightarrow$  periodische Spannungs-Kennlinie mit  $T \propto B$
- extrem genau (1pT)
- Kühlung mit flüssigem Helium (-269°C, LTS) oder Stickstoff (-196°C, HTS)





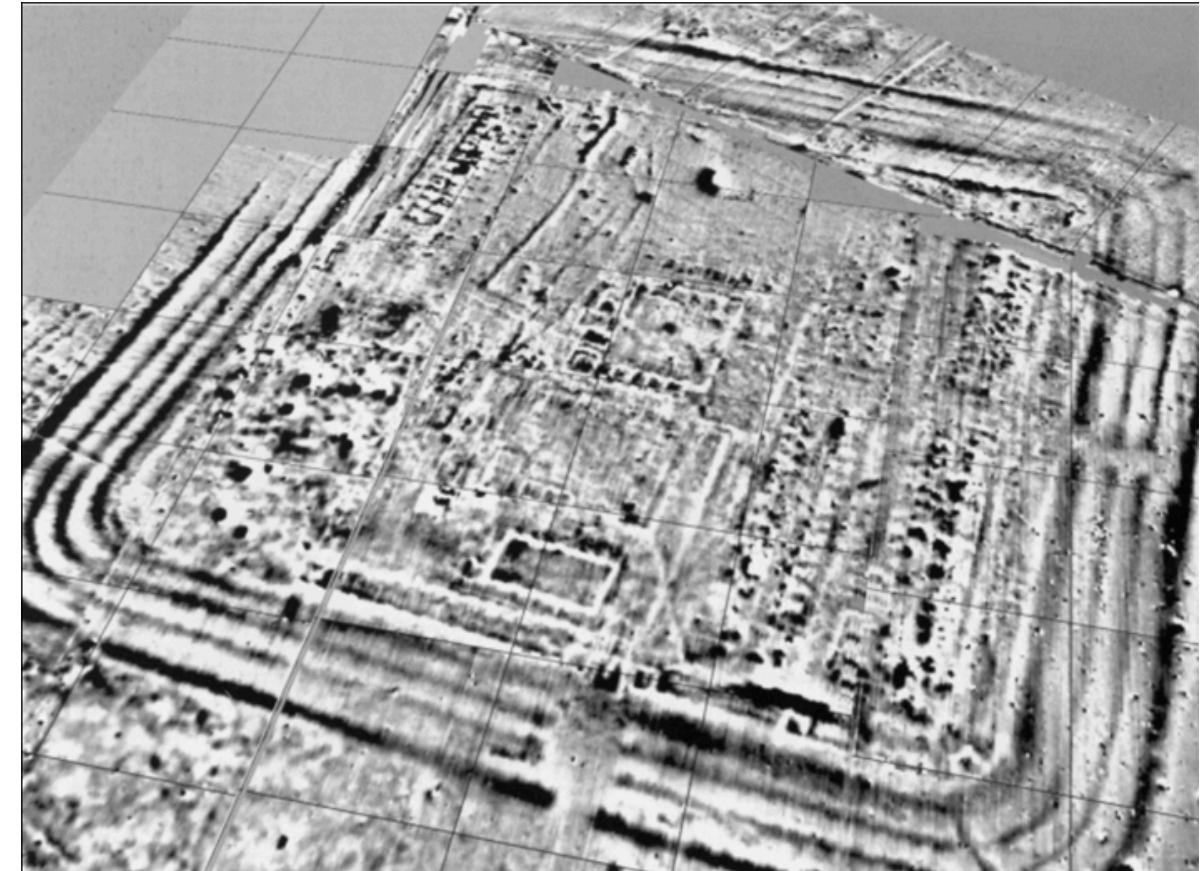
# SQUID-Bird (IPHT Jena)



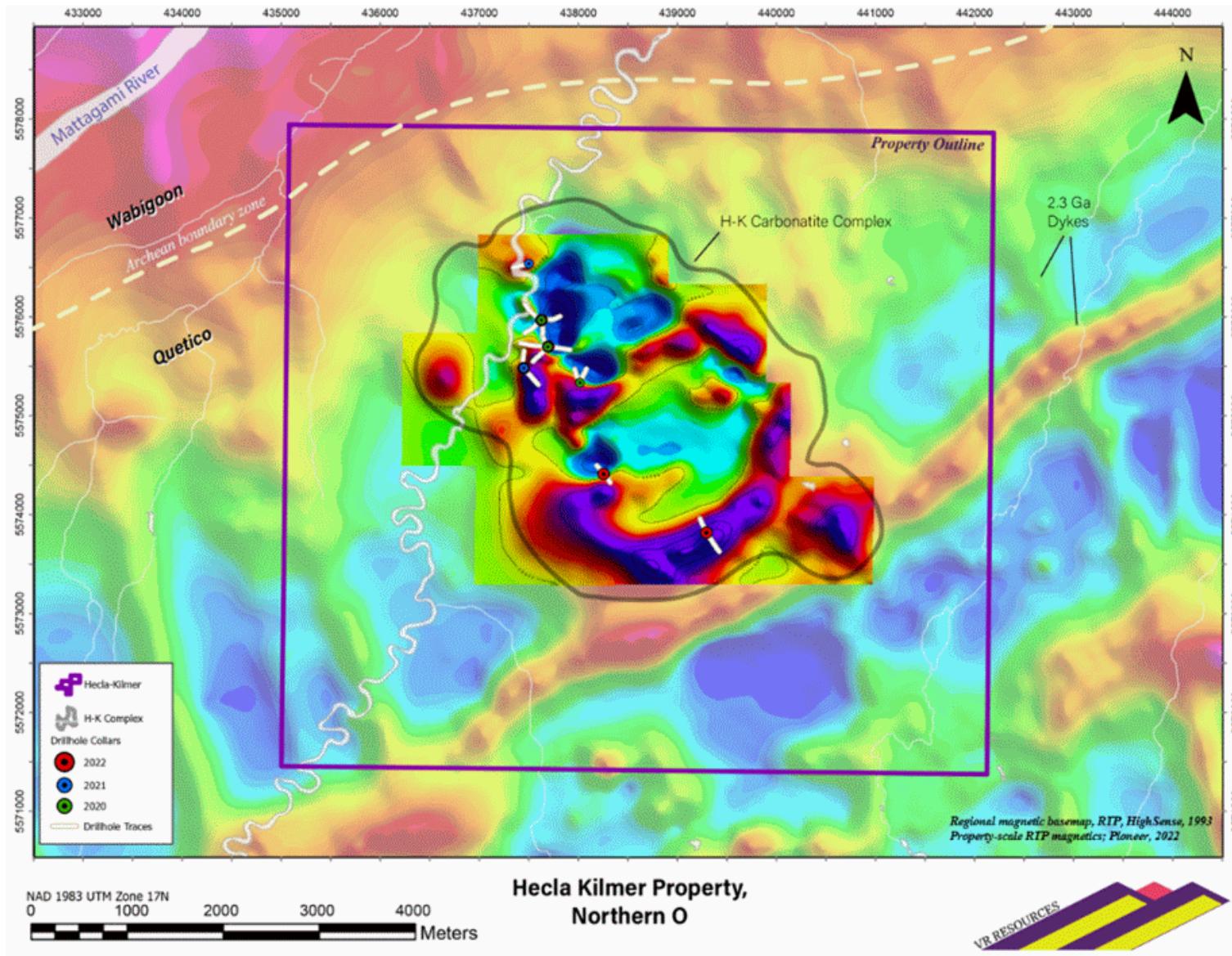
# Geomagnetik

- Zeitliche Variationen
- Magnetfeld-Karten
- Beispiele: Erzexploration, Landminen, Archäologie
- Modellierung von Störkörpern

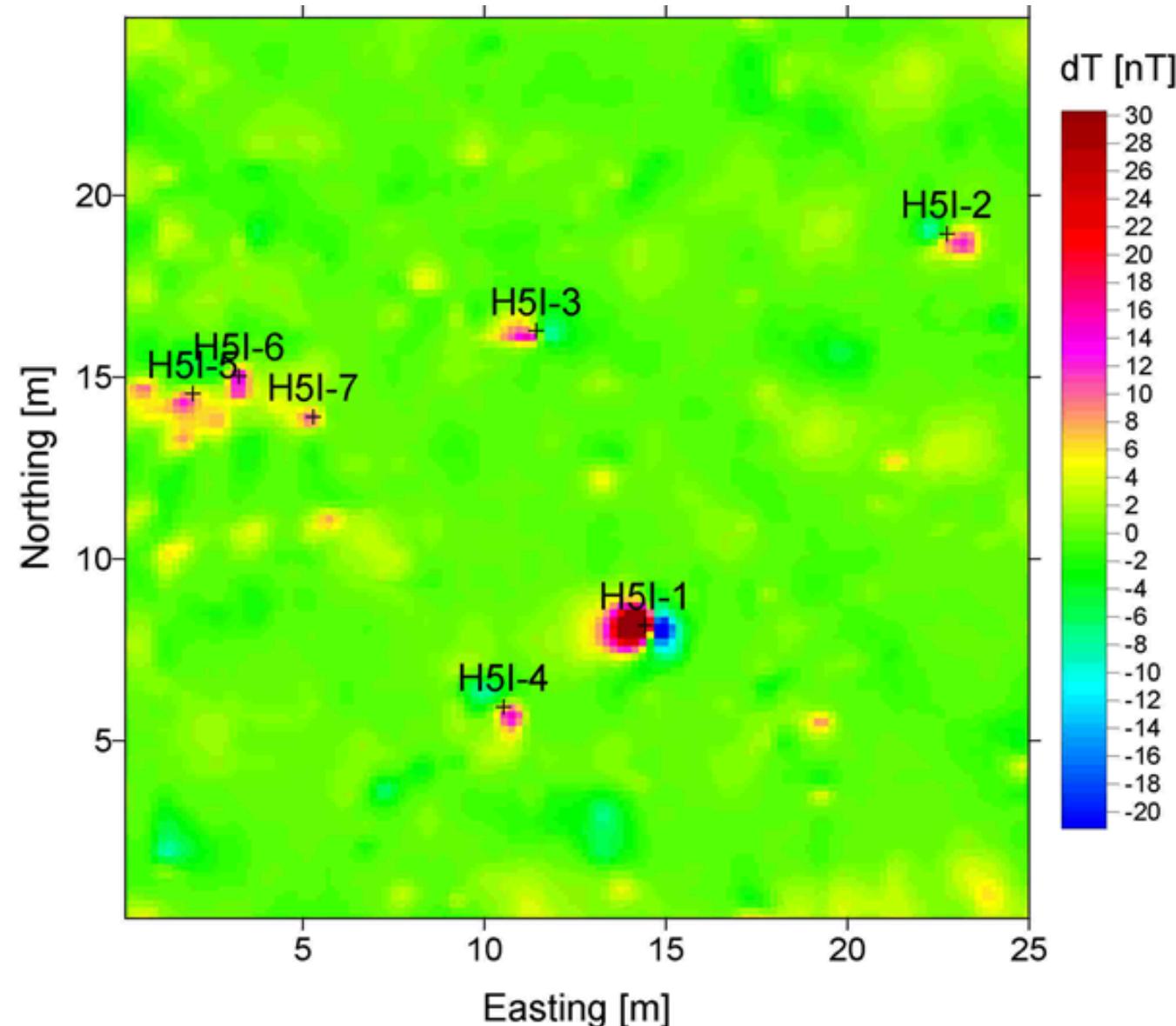
# Beispiel 1: Archäologie



# Beispiel 2: Mineral-Exploration



# Beispiel 3: Landminen/UXO-Suche

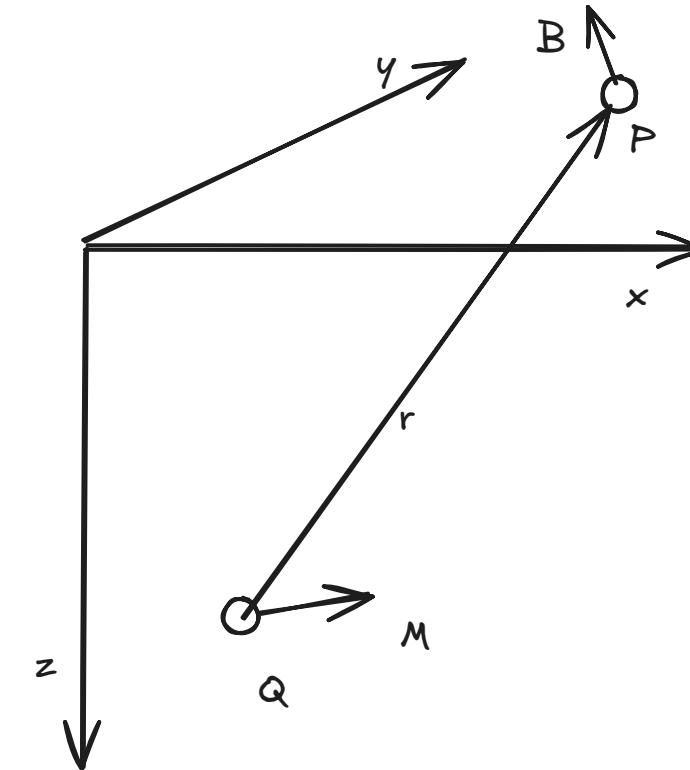


# Modelling

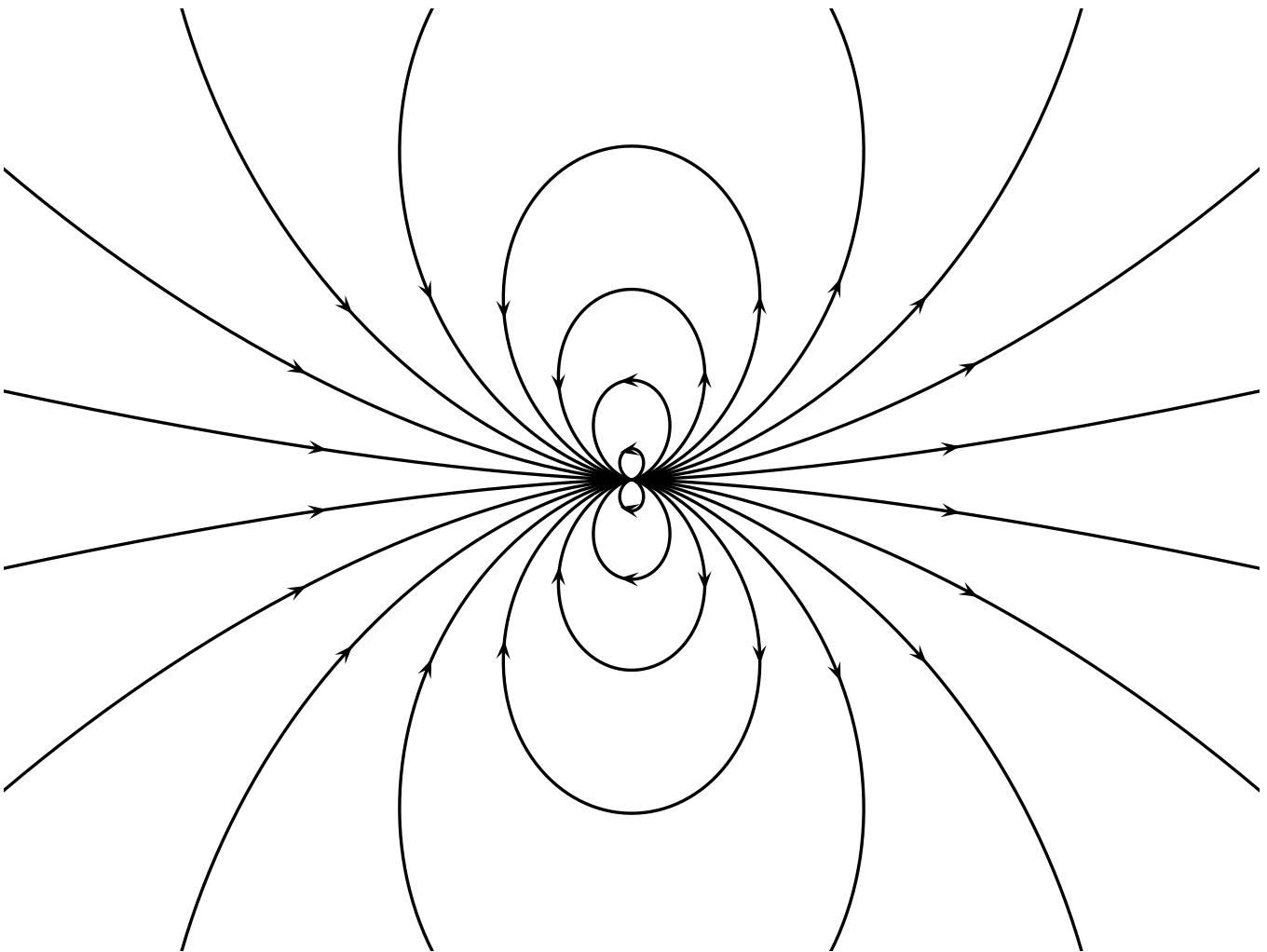
The magnetic field caused by a magnetization  $\mathbf{M}$  vector can be computed by (Blakely, 1995):

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^3} [3(\mathbf{M}' \cdot \mathbf{r}')\mathbf{r}' - \mathbf{M}']$$

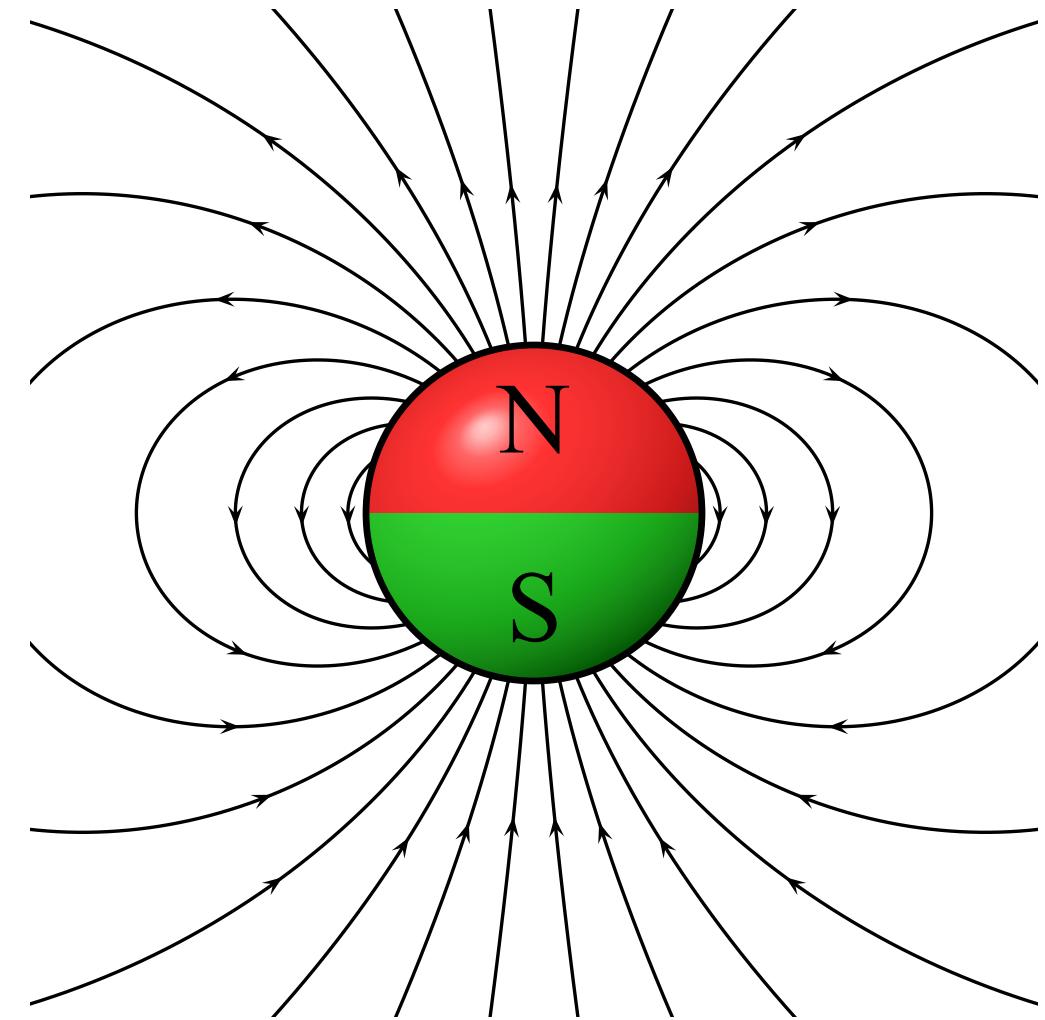
where  $\vec{r} = \vec{r}_P - \vec{r}_Q$  is the space vector between the magnetic moment Q and the measuring point P,  $r'/M'$  are unit vectors.



# Dipol-Feld



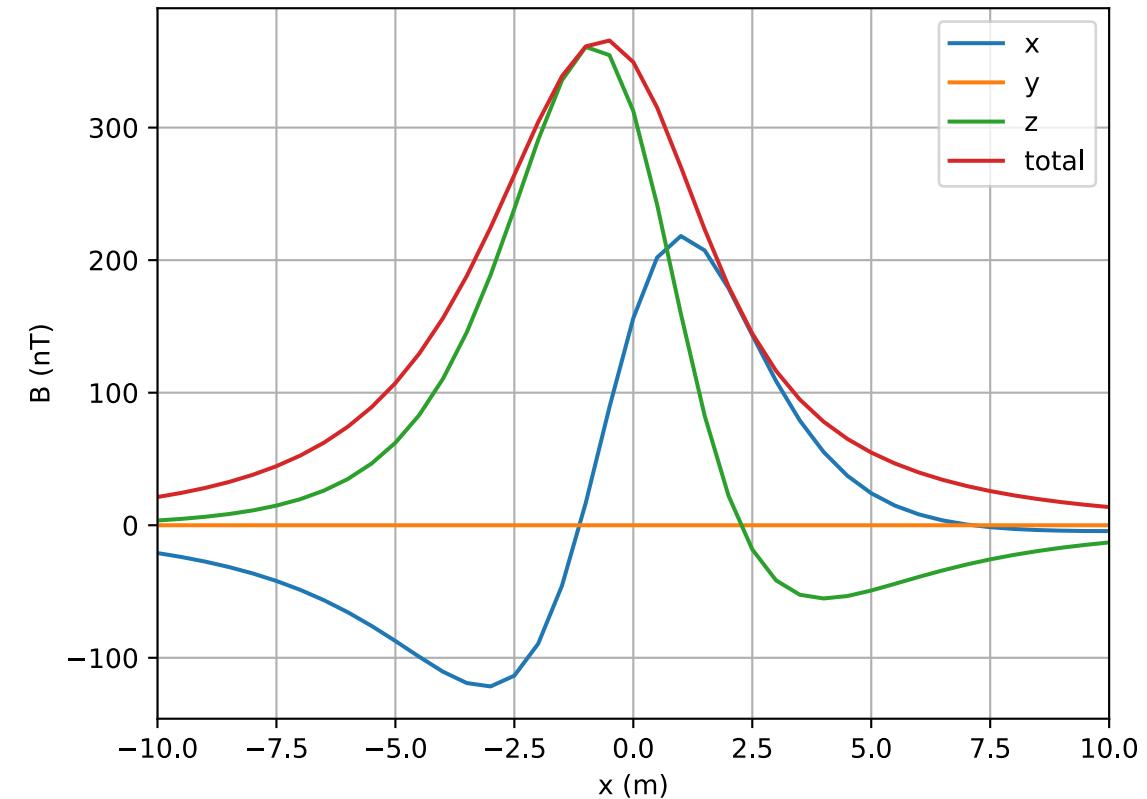
Perfekter Dipol



Magnetisierte Kugel

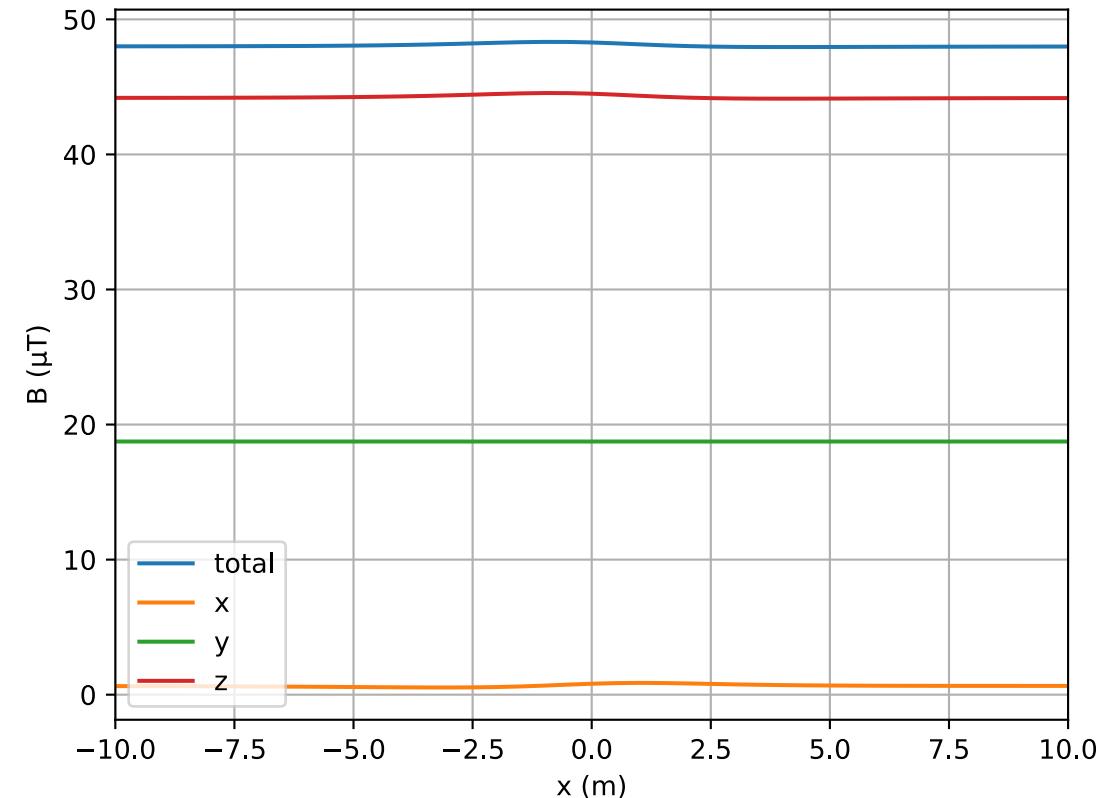
# Beispiel - Anomalie

```
1 def magneticDipole(Q, M, P=None, x=None, y=...  
2     P = np.column_stack([x * np.cos(np.deg2rad(y)), ...  
3                           y + x * np.sin(np.deg2rad(y))])  
4     P == Q  
5     r = np.sqrt(np.sum(P**2, axis=1)) # distance  
6     M0 = np.linalg.norm(M)  
7     M = np.array(M, dtype=float) / M0 # unit vector  
8     R = P / np.reshape(r, [-1, 1]) # normed position  
9     fak = np.reshape(my0 * M0 / 4 / np.pi / r**3, [1, -1])  
10    return (np.reshape(R.dot(M), [-1, 1]) * fak)  
11  
12 M = np.array([-1, 0, 1]) * 100 # magnetization  
13 Q = [0, 0, -3] # location of the source  
14 x = np.arange(-10, 10.1, 0.5)  
15 B = magneticDipole(Q, M, x=x, z=1, alpha=0)  
16 ax.plot(x, np.linalg.norm(B, axis=1)*1e9, ...  
17 for i, t in enumerate("xyz"):  
18     ax.plot(x, B[:, i]*1e9, label=t)
```



# Beispiel - Totalfeld

```
1 F = 48000 * 1e-9 # 48000 nT = 48µT
2 I = 67 # degrees
3 D = 2
4 Z = F * np.sin(np.deg2rad(I))
5 H = F * np.cos(np.deg2rad(I))
6 X = H * np.sin(np.deg2rad(D))
7 Y = H * np.cos(np.deg2rad(D))
8
9 Btotal = B + np.array([[X, Y, Z]]);
10 fig, ax = plt.subplots()
11 ax.plot(x, np.linalg.norm(Btotal,
12           axis=1)*1e9, label="total")
13 for i, t in enumerate("xyz"):
14     ax.plot(x, Btotal[:, i]*1e9, label=t)
```



# Beispiel - Totalfeld-Anomalie

```
1 fig, ax = plt.subplots()
2 TFA = np.linalg.norm(Btotal, axis=1)-F
3 ax.plot(x, np.linalg.norm(B, axis=1)*1e9,
4          label="anomaly")
5 ax.plot(x, TFA*1e9, label="total")
6 ax.legend()
7 ax.grid()
8 ax.set_xlim(-10, 10)
9 ax.set_xlabel("x (m)")
10 ax.set_ylabel("B (nT)")
```

