

# *Gehirn-Muster-Erkennung*



Dr. Felix Putze

# Willkommen!

Felix – Postdoctoral Researcher, am CSL seit 2009



## Forschungsschwerpunkte

### ■ Sprache und Kommunikation

- Automatische Spracherkennung
- Multilingualität, Schnelle Portierung
- Silent Speech Interfaces (Muskelaktivität, EMG)

### ■ Biosignale und Benutzerschnittstellen

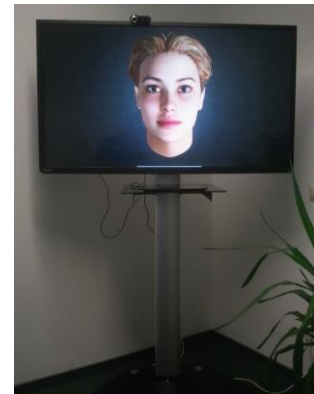
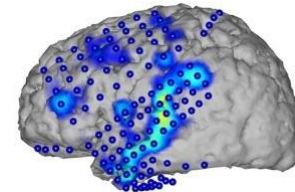
- Biosignale: Muskel- und Hirnaktivität, Bewegung

### ■ Gehirnaktivitätsmodellierung

### ■ Kognitive adaptive Interaktionssysteme

- Interaktionsstrategien, Autonomes Lernen
- Kognitive Benutzermodellierung

### ■ Systeme für Menschen mit Demenz und die gesamte Lebensspanne



*Ihr seid dran.*



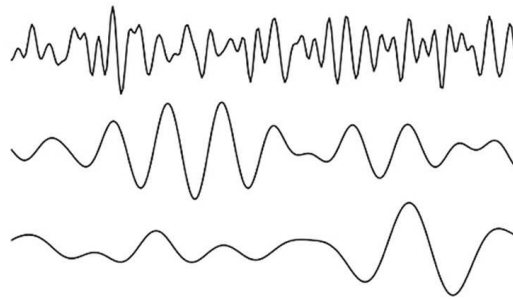
# *Organisatorisches*



- Termine: Montag 19.9.2022 bis Mittwoch 28.02.2022
- Täglich (außer am Wochenende) ca. 9:00-16:00
- Raum 2.43 und Labor des Cognitive Systems Labs
- Die meiste Zeit eigenständige Arbeit in Gruppen („Hackathon“)
- Bei Fragen sind wir aber jederzeit da

- Morgens um 9 Uhr: „Check-In“ → Neue Aufgaben und Theorie, Fragen und Präsentation des Stands
- Während des Tages: Selbstständige Arbeit, vor Ort oder remote. Ich stehe immer in Person und auf Discord für Fragen zur Verfügung
- Bei Bedarf weitere gemeinsame Termine
- Keine feste Arbeitszeit, aber auf Vollzeit ausgelegt → bitte innerhalb eurer Gruppe koordinieren
- Mittwoch: Präsentation der Ergebnisse

## Gehirn – Muster – Erkennung

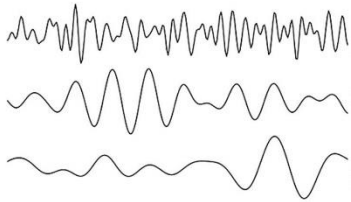




## Gehirn – Muster – Erkennung



Prozesse im Gehirn messen und darstellen lassen

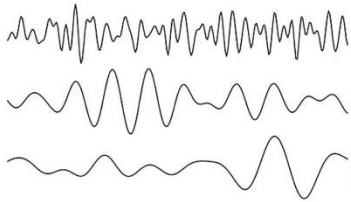


Die resultierenden Muster analysieren



Das Gehirn-Muster klassifizieren  
(einteilen in eine bestimmte Kategorie)

## Gehirn – Muster – Erkennung



Das Umwandeln der Gehirnaktivität in  
ein lesbares Muster

→ EEG

Das Umwandeln des Musters in  
eine verständliche Aussage über den Zustand

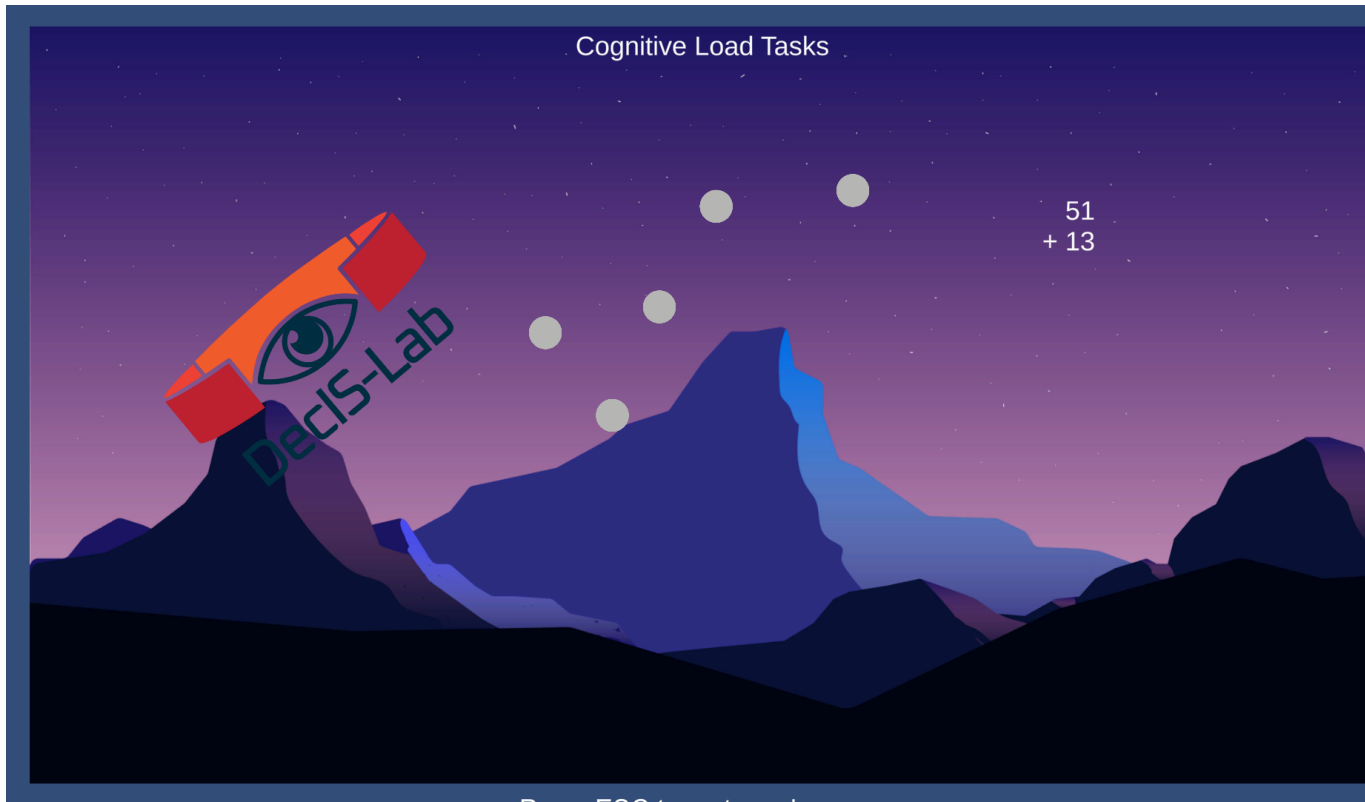
→ Eure Aufgabe

## *Mental Workload*

- Ein Experiment durchführen, in dem gemessen werden kann ob der Teilnehmer gerade aufmerksam bei der Aufgabe ist oder nicht
- EEG Daten während des Tasks aufzeichnen
- Die aufgenommenen Daten verarbeiten
- Einen Klassifikator trainieren der in den EEG Daten „hoher Workload“ von „niedriger Workload“ unterscheiden kann

# Das Experiment

- Verschiedene Workload-Level durch Parallelität von Aufgaben (Multitasking)
- Implementiert in Unity

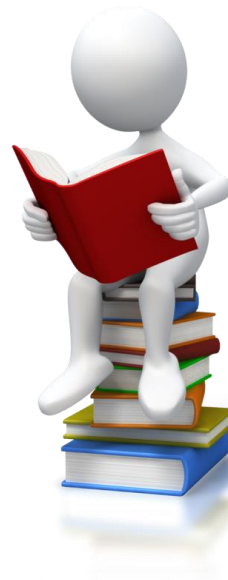


- Montag & Dienstag: Theorie, Experiment-Ablauf, EEG-Einarbeitung, Datenaufzeichnung, Datenaufbereitung
- Mittwoch-Freitag: Implementierung und Optimierung Brain-Computer-Interface, Auswertung & Analyse
- (Wochenende)
- Montag: Abschluss Implementierung, Online-System oder weitergehende Analysen
- Dienstag: Vorbereitung Präsentation
- Mittwoch: Abgabe & Präsentation

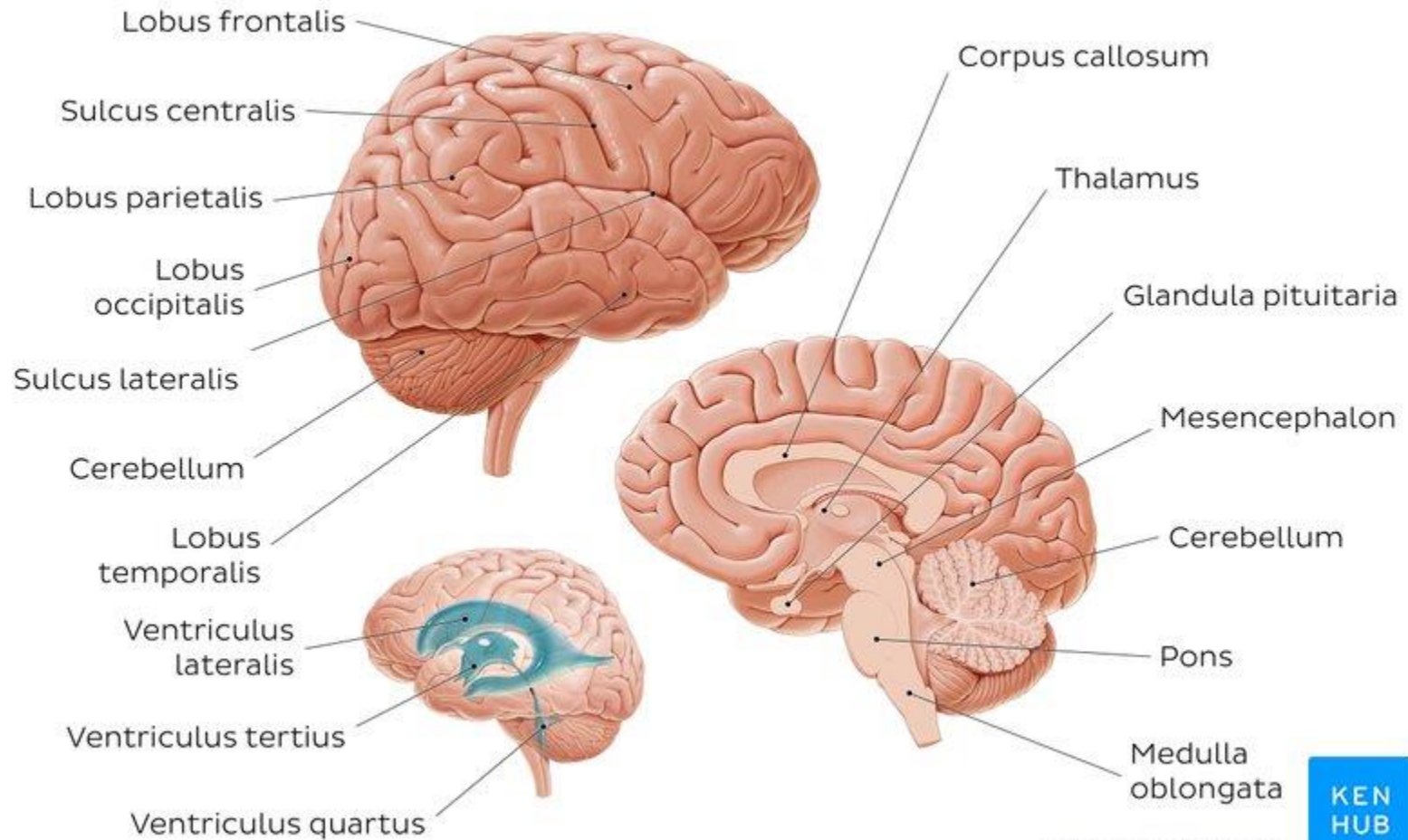
- ✓ Aktive Mitarbeit in der Gruppe bei den Programmieraufgaben
- ✓ Jeder ist einmal Teilnehmer im Experiment
- ✓ Jeder hilft bei den Experimenten seiner Gruppe
- ✓ Ein Abschlussbericht pro Gruppe über die Datenanalyse (aufbereitet aus dem Analyse-Notebook)
- ✓ Eine Abschlusspräsentation pro Gruppe über das gesamte Experiment mit Auswertung



# *Die Grundlagen*

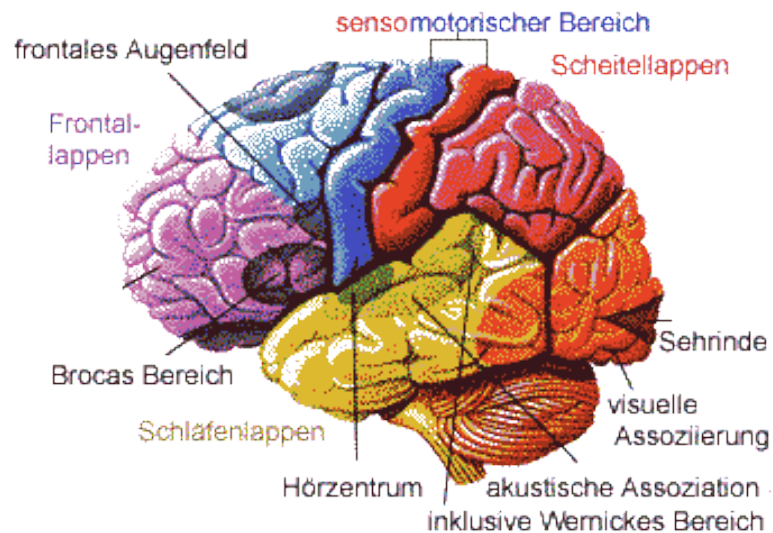






© www.kenhub.com





Verschiedene „Gründe“ für  
Aufmerksamkeit entscheidend

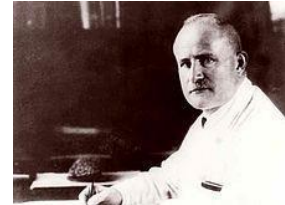
Bewusste Aufmerksamkeit:  
Präfrontale Aktivität

Höhere Aktivierung je nach Modalität  
auf der die Aufmerksamkeit liegt

- Brain-Computer-Interface (BCI)
  - Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf Messung von Gehirn-Aktivität
  - Aktive BCIs: „Mentale Kommandos“ steuern den Cursor, betätigen Buttons
  - Passive BCIs: Kontinuierliches Monitoring des Benutzer-Zustands (z.B. der mentalen Auslastung)
- Bestandteile eines BCIs
  - Paradigma: Art der Aufgabe, Art der Kommandos
  - Daten Akquisition: Positionierung der Sensoren
  - Datenverarbeitung: Artefaktbereinigung, Normalisierung
  - Merkmalsextraktion: Relevante Deskriptoren
  - Klassifikation: Statistische Modellierung
  - Auswertung: Accuracy

# Das Elektroenzephalogramm (EEG)

- Erfassung der Gehirnaktivität durch Elektroden am Kopf
- Erste nicht-invasive Messungen elektrischer Gehirnaktivität  
Hans Berger (Jena, 1924)



- EEG heute (Beispiel)

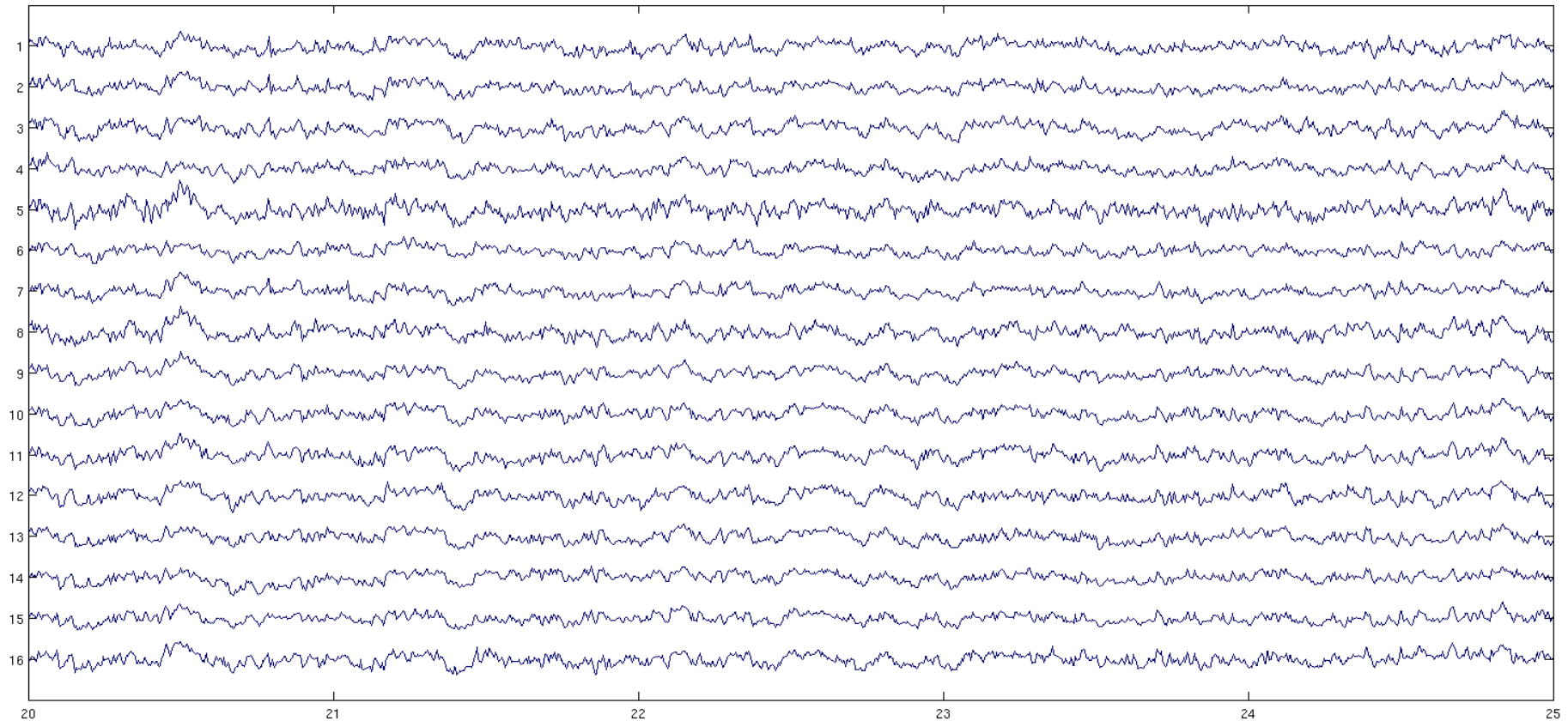
Elektroden-Kappe

EEG Verstärker



- Anwendungsbereiche
  - Klinischer Einsatz
  - Kognitive Neurowissenschaften
  - Benutzerschnittstellen: Brain Computer Interfaces

- Typisches EEG Signal (wacher, gesunder, erwachsener Mensch, 5 Sekunden, 16 Kanäle)



- Untersuchung anhand der Interpretation von EEG Zeitreihen durch Experten
- Auswertung von pathologischen Veränderung im EEG für Diagnose und Therapie
- Aussagen über funktionelle Störungen im Gehirn
  - Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP)
  - Evozierte Potentiale
  - Untersuchung von Schlafphasen
  - Anästhesie (Überwachung der Narkosetiefe)
  - Feststellung von irreversiblen Hirnfunktionsverlust
  - Etc
- Überprüfung von sensorischer Verarbeitung und kognitiver Funktionen



# EEG basierte Brain Computer Interfaces (BCIs)

- BCI: Benutzerschnittstelle basierend auf Hirnaktivität

- Erkennung von Benutzerzuständen

- Emotionen, Intentionen, mentale Auslastung, etc.
- Natürliche Schnittstelle für die Mensch-Maschine-Interaktion
- Forschungsinstrument um neurowissenschaftliche Vorgänge zu untersuchen und zu verstehen

- Steuerung von externen Geräten

- Bewegungsvorstellung
- Kommunikationsmöglichkeit für Locked-in Patienten

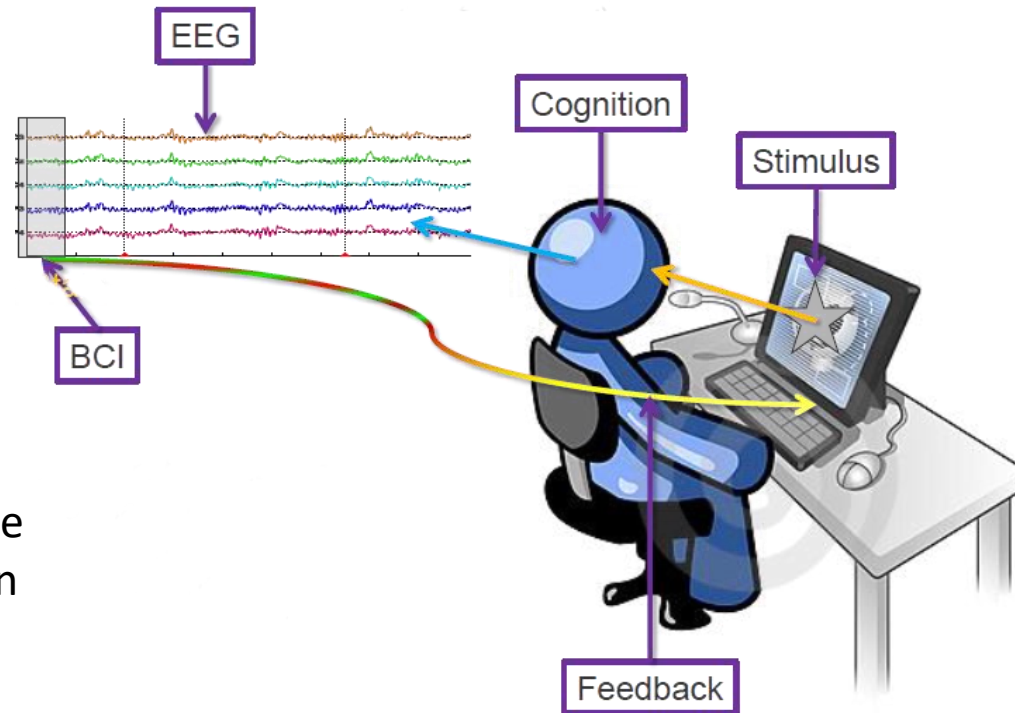


Bild basierend auf Zander 2013



# Was ist das EEG?

- Elektrische Spannungsschwankungen werden an der Kopfoberfläche gemessen
- EEG kann man als Summe kortikaler Feldpotentiale verstehen
  - D.h. jede EEG Elektrode misst die Summe einer Vielzahl von Potentialen die in Signalquellen im Kortex entstehen
  - Volume Conduction: elektrische Potentiale breiten sich von ihrer Quelle (im Kortex) bis zum Ort der Messung (Kopfoberfläche) stark aus
  - An Kopfoberfläche messbare Spannung von Hirnaktivität ist sehr schwach ( $< \pm 100 \mu V$ )
  - Signal-Rausch-Abstand sehr klein

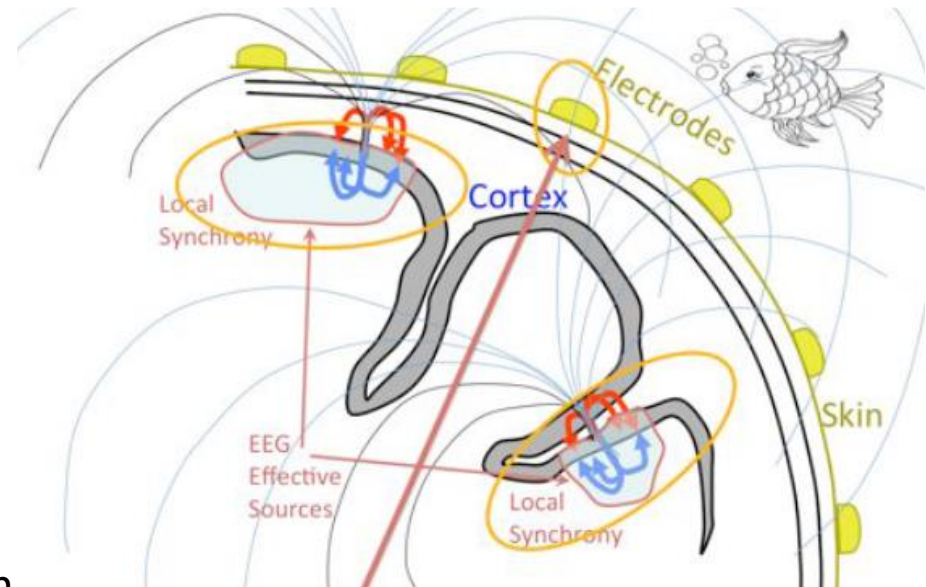


Image: Scott Makeig 2007

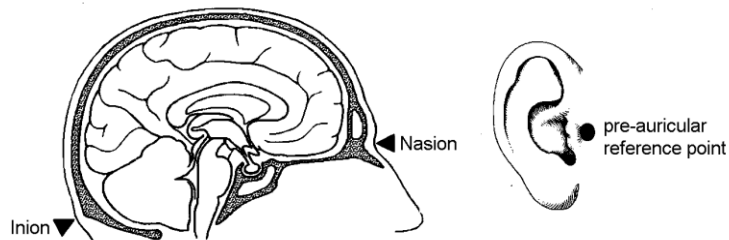


- Was sind die Potentialquellen des EEG (kortikalen Feldpotentiale)?
  - Nicht die Aktionspotenziale der Neuronen
    - Nur 1-2ms Dauer
    - Außerhalb der Zelle nur geringe Stärke
  - Postsynaptische Potenziale liegen dem EEG zugrunde
    - EPSP: Exitatorische (erregende) postsynaptische Potentiale
    - IPSP: Inhibitorische (hemmende) postsynaptische Potentiale
- Synchronisation und Desynchronisation der EPSP und IPSP können an der Kopfoberfläche messbare EEG-Aktivität hervorrufen

# EEG-Erfassung: Elektrodenpositionen

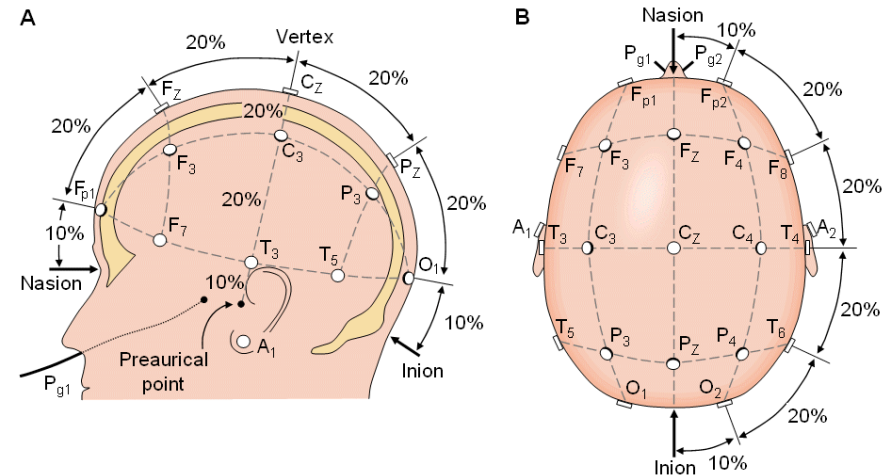
- Die Positionen der Elektroden sollten die relevanten Hirnareale abdecken
- Internationaler Standard für die Platzierung von Elektroden:  
**10-20 System** (1957 von der International EEG Federation)
- Schädelasymmetrien entsprechen meist Hirnasymmetrien, daher ist die Zuordnung der Elektroden zur Anatomie relativ zuverlässig

## 1. Bestimme Nasion, Inion, Prä-auricularen Referenzpunkt



2.

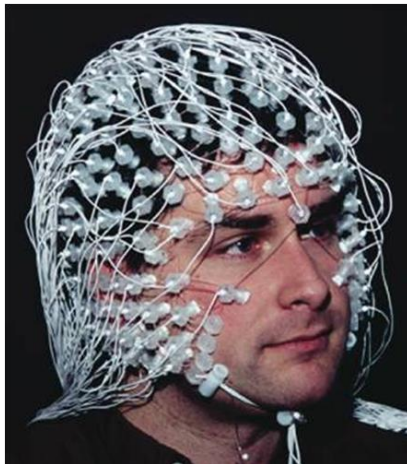
reflektieren anatomische Region auf dem Kortex (Fp = frontopolar, F = frontal, T = temporal, C = central, P = parietal, O = occipital; A=Auricular)



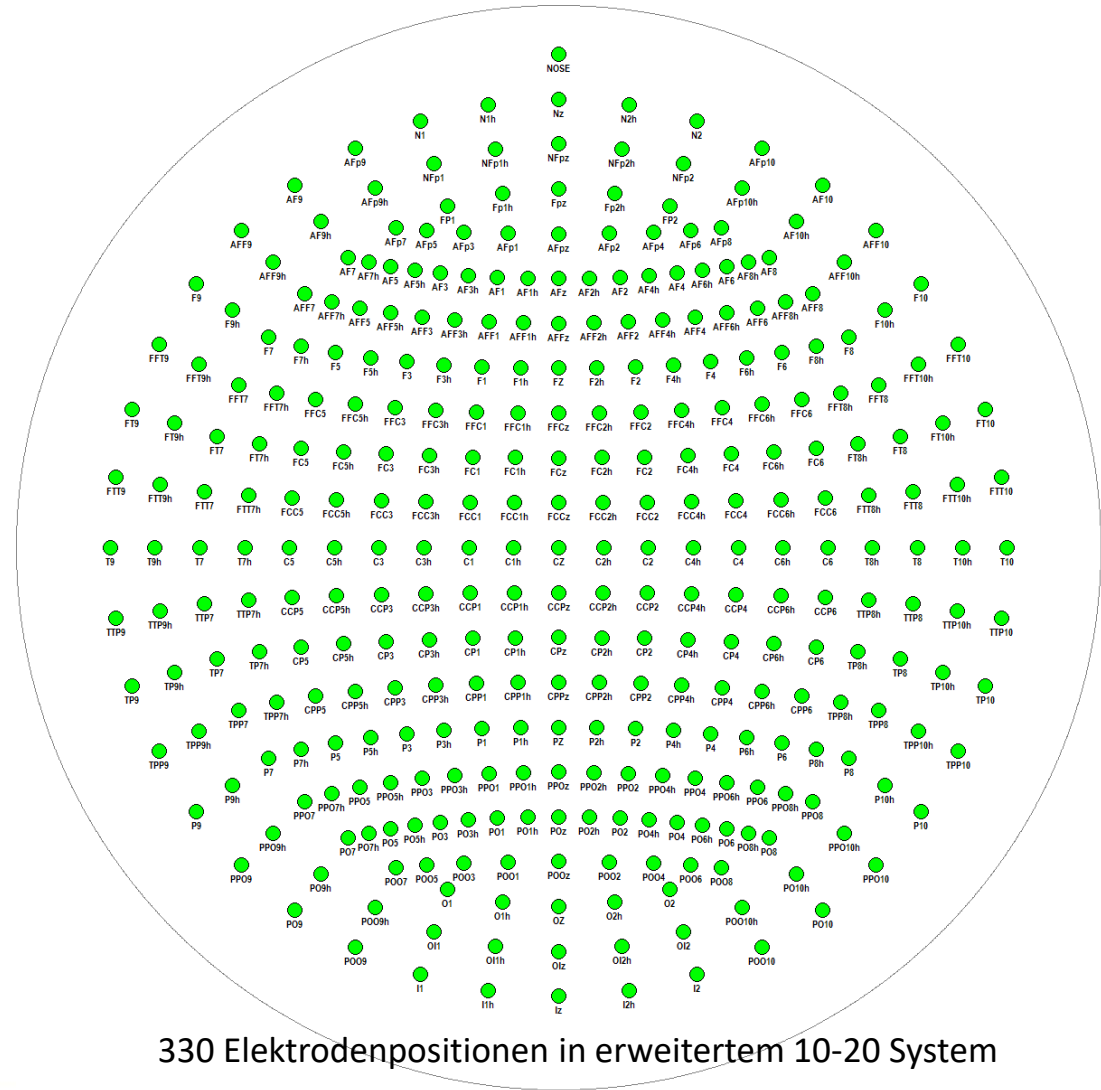
Quelle <http://www.bem.fi/book/13/13x/1302ax.gif>

# Erweitertes 10-20 System

- Neben den 19 Positionen des ursprünglichen 10-20 Systems gibt es erweiterte Versionen
- High density EEG/EMG



256 Elektroden (EGI, Inc)



330 Elektrodenpositionen in erweitertem 10-20 System

- Standard EEG-Kappen/Head-Sets verwenden meist das 10-20 Layout
- 16 – 256 Elektroden sind üblich  
(meist 32 oder 64 sonst sehr lange Setup Zeit)
- Kappe hat den Vorteil, dass nicht jedes Mal alle Elektrodenpositionen vermessen werden müssen (Kappen für unterschiedliche Kopfgrößen)
- Für EEG Benutzerschnittstellen sollte die Positionierung schnell und leicht sein
  - Flexible Kappen
  - (trage-) komfortable Lösungen
  - Evtl. ohne Elektrodengel (z.B. Trockenelektroden)



Dry electrode head-set DSI-24  
[wearablesensing.com](http://wearablesensing.com)

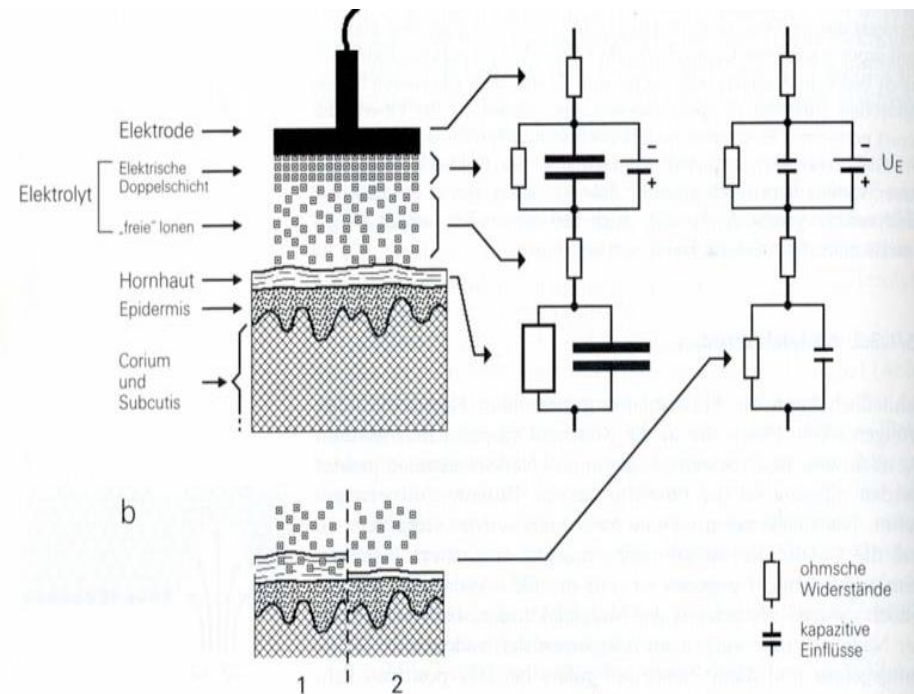
actiCap BrainProducts



- Kommerziell verfügbare Peripheriegeräte konzipiert für Computerspiele
  - Emotionserkennung (Aufregung, Frustration, Engagement,...)
  - Erkennung von Gesichtsausdrücken (Blinzeln, Lachen,...)
  - Steuerung (12 verschiedene Bewegungen)



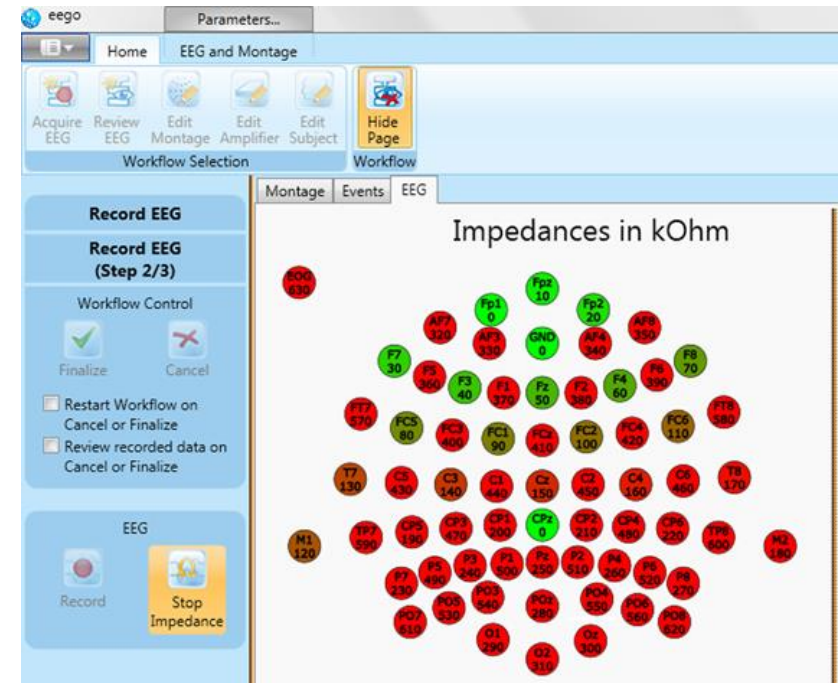
- Häufig werden Silber/Silberchlorid (Ag/AgCl)-Elektroden eingesetzt
- Zwischen Elektrode und Kopfhaut wird Elektrolyt/Elektrodengel/Paste mit **gelösten NaCl** appliziert
- Durch Kombination mit positiven Metallionen bildet sich ein Potenzial
- Elektrolyt reduziert Hautwiderstand um Größenordnungen
- Elektrodenwiderstand kann durch Hornhaut und Fett erhöht werden (sehr viele Haare oder Glatze sind auch nicht optimal)





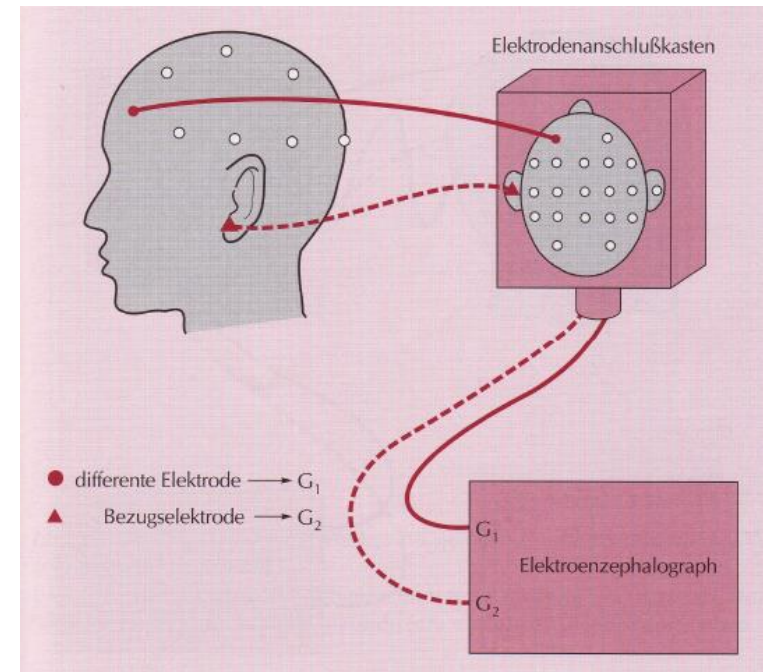
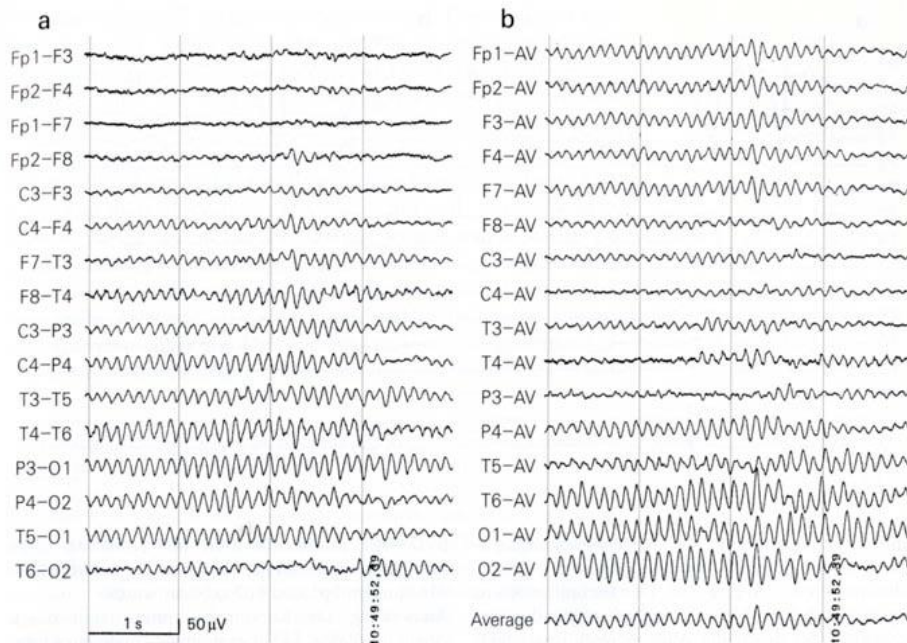
# EEG-Erfassung: Setup

- EEG Setup Prozedur (normale EEG Kappe)
  - Geeignete Kappe für die Kopfgröße finden (z.B. für 58 cm Kopfumfang)
  - Kappe aufziehen und richtig positionieren (evtl. Maßband verwenden)
  - Impedanzmessung starten
  - Gel in jede Elektrode applizieren bis alle hohe Leitfähigkeit erreicht haben (Widerstand < Schwellwert, z.B. 20 kΩ)
- Niedrige Impedanzwerte zu erreichen kann pro Elektrode bis zu mehreren Minuten dauern



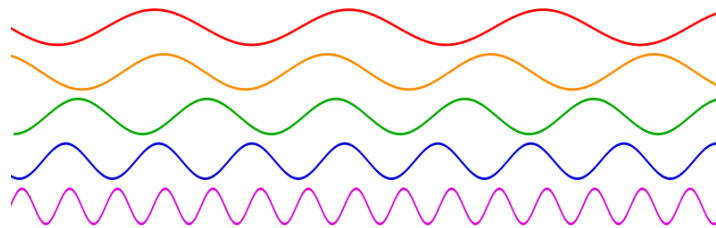
# Referenzableitung und Durchschnittsreferenz

- Natürliche Referenz am Probanden
- Durchschnitts- oder Mittelwertreferenz
  - Vorteil: Artefakte einzelner Elektroden haben geringeren Einfluss,
  - Nachteil: Aktivität jeder Elektrode wird mit kleiner Amplitude auf alle anderen Kanäle





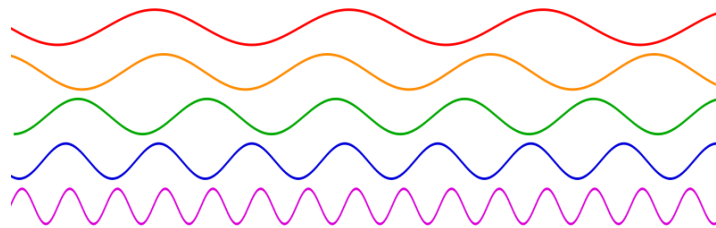
- Bisher Signal nur im *Zeitbereich* betrachtet,
  - Amplitude (Signalstärke) als Funktion der Zeit dargestellt
- Signal im *Frequenzbereich*,
  - Welche Frequenzanteile im Signal in welcher „Stärke“ vorkommen
  - Nützlich für Signalverarbeitung
  - Hilft beim Verstehen des Signals
  - Frequenzrepräsentation eines Signals: **Spektrum**
    - Hier erst einmal: **Amplitudenspektrum**, Phase: Später



Quelle: Wikipedia (englisch, "Frequency")

# Der Frequenzbereich

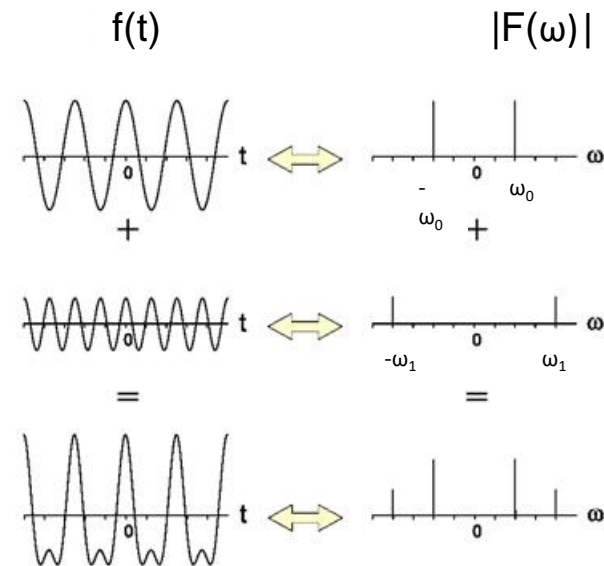
- Frequenz: "Schwingungen pro Zeiteinheit",
  - Bei Zeiteinheit 1 Sekunde: Einheit Hertz
  - 1 Hertz = 1 Schwingung pro Sekunde.
- Beispiel: Die Frequenz der Sinuswellen steigt von oben nach unten. x ist die Zeitachse.



Quelle: Wikipedia (englisch, "Frequency")

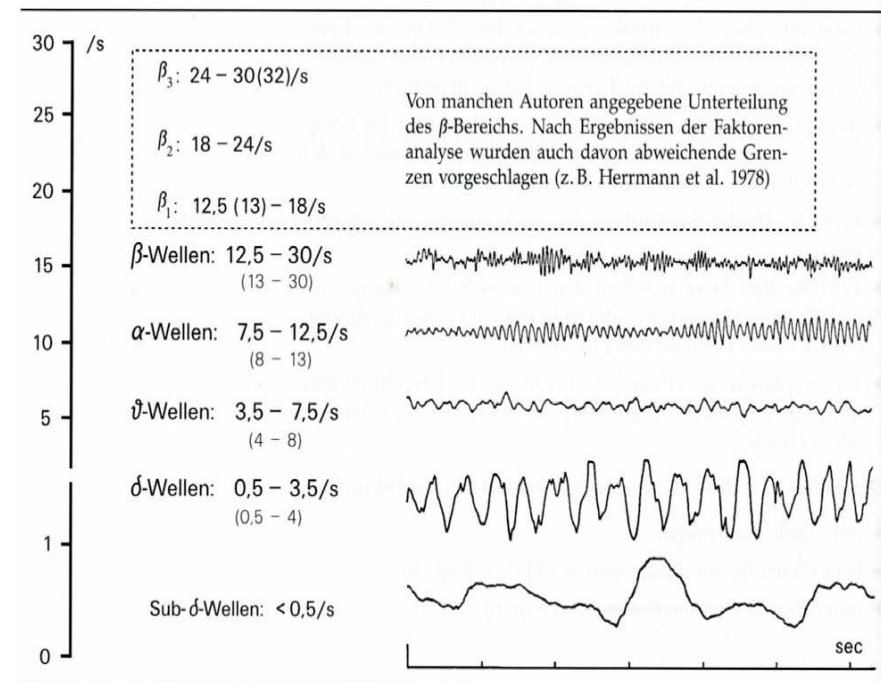
# Frequenzbereich

- Beispiel: Links Signale im Zeitbereich, rechts Signale im Frequenzbereich.
  - Oben: Frequenz  $\omega_0$
  - Mitte: Frequenz  $\omega_1$ .
- Reelle Signale: Frequenzdarstellung symmetrisch.
- Unten: Summe der Signale.
  - Kompliziertes Signal besteht aus mehreren Frequenzen.
  - Sinusschwingungen haben eine reine Frequenz.
- **Frequenzbereich**: Die x-Achse zeigt die *Frequenz*! (rechts)



# EEG-Frequenzbänder

- EEG wird häufig in Frequenzbereiche mit den Namen delta, theta, alpha, beta, und gamma bezeichnet (Nomenklatur)
- Frequenzeinteilung ist empirisch entstanden
- Synchronisierung der Gehirnpotentiale über größere Kortexareale
- Bänder haben unterschiedlichen neurowissenschaftlichen Hintergrund (teilweise nicht vollständig bekannt)
- Anzahl der Bänder und genaue Grenzen variieren je nach Autor
- Grenzen und Intensität der Rhythmen sind personenspezifisch
- Amplituden werden relativ zum zugrundeliegenden Rhythmus betrachtet



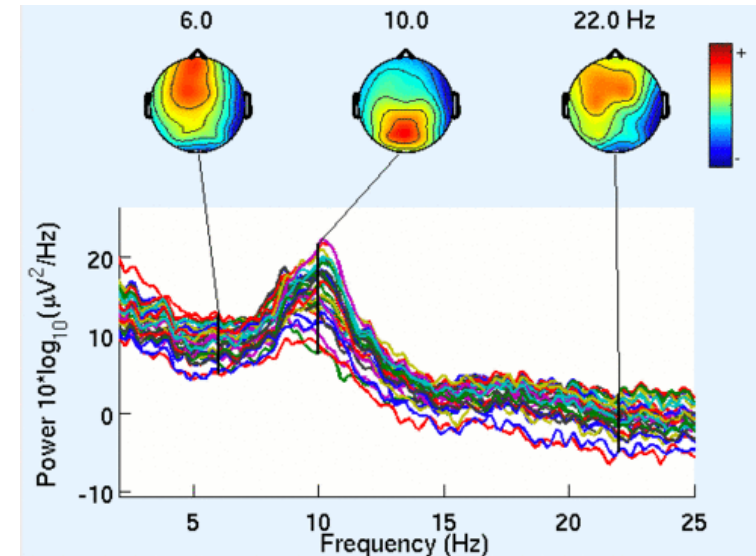
# EEG-Frequenzbänder

- Unterschiedliche Wachheitsgrade führen zu Änderungen des EEG Frequenz-Spektrums

Alpha	8 – 13 Hz	20 – 120 $\mu$ V	Wach, entspannt, Augen geschlossen
Beta	13 – 30 Hz	5 – 50 $\mu$ V	Augen offen, Aufmerksamkeit
Gamma	31 – 60 Hz	< 10 $\mu$ V	Anspruchsvolle Tätigkeiten, Konzentration, Lernen
Theta	4 – 8 Hz	20 – 100 $\mu$ V	Übergang zum Schlaf, leichte Schlafphase, Reaktion nur noch auf starke Umweltreize
Delta	0.5 – 4 Hz	5 – 250 $\mu$ V	Traumlose Tiefschlafphase (ansonsten Hinweis auf patholog. Veränderungen)

# Topographie von Gehirnaktivität im EEG

- EEG hat schlechte räumliche Auflösung
- Trotzdem häufig hilfreich die grobe topographische Struktur des EEG zu analysieren
- **Scalp maps:** Grafischen Darstellung der Hirnaktivität an der Kopfoberfläche (Energie interpoliert zwischen den Elektroden)
- Plot zeigt
  - Spektren der einzelnen Kanäle
  - Örtliche Energieverteilung bei 6, 10 und 22Hz durch scalp maps
- Komplexere Verfahren zur Quellenlokalisierung aus EEG existieren haben aber eine räumliche Auflösung von einigen Zentimetern

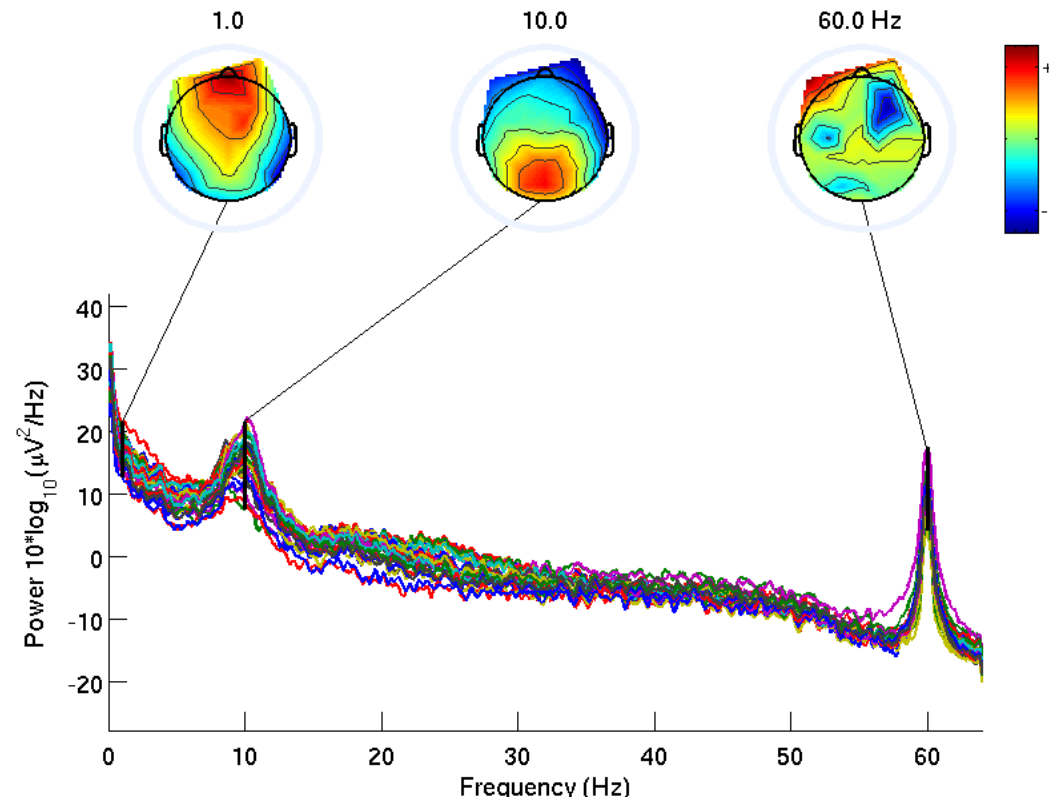


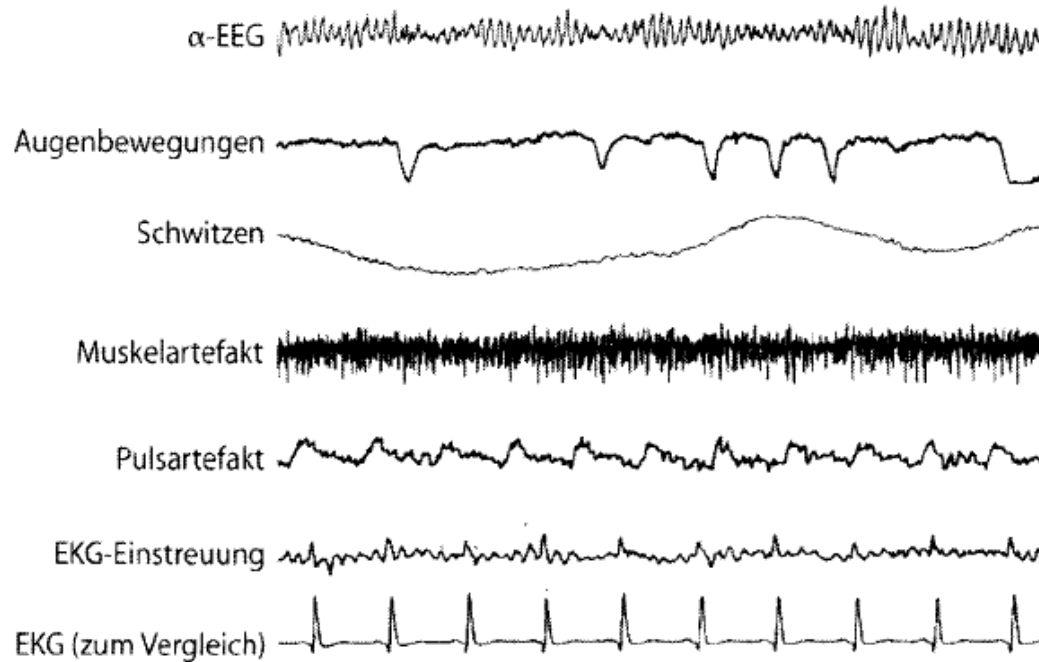
# EEG im Frequenzbereich

- Spektrale Leistung (d.h. Amplitude im Zeitbereich) nimmt mit steigender Frequenz ab (y-Achse ist logarithmisch)
- Deutlich im Spektrum erkennbar
  - 1 Hz: stark Frontale Aktivität vmtl. Augenartefakte
  - 10 Hz: okzipitale Alpha Aktivität
  - 60 Hz: Netzbrummen (USA)
- Beispiel: Visueller Aufmerksamkeitstask
 

(Makeig et al. J Neurosci. 19:2665-80, 1999)

  - 128 Hz Sampling Rate
  - 32 Kanäle







- Aktivität die ihren Ursprung nicht in der neuronalen Aktivität des Gehirns hat
  - Biologische Artefakte (erzeugt durch menschlichen Organismus)
  - Technische Artefakte (durch Geräte, die direkt oder indirekt an der Messung beteiligt sind)
- Die Amplitude von Artefakten kann die der Gehirnaktivität im EEG um ein Vielfaches übersteigen
- Biologische Artefakte:
  - Einstreuung von Muskelaktivität (EMG in EEG)
  - Augenbewegungen, Blinzeln (EOG in EEG)
  - Elektrische Aktivität des Herzens (EKG in EEG)
  - Zungenbewegungen (Glossokinetische Artefakte)
  - Haareigenschaften (Haarspray, Gel, ...)
  - Hautpotentiale (z.B. Schwitzen)
  - Andere physiologische Faktoren (z.B. Atmung)
  - Unerwünschte Gehirnaktivität wird teilweise auch als Artefakt angesehen

- Technische Artefakte:
  - Defekte oder verschmutzte Elektroden, korrodierte Kontakte, Kabel
  - Bewegung von Elektroden
  - Bewegung von Kabeln
  - Schlechter Elektroden-Haut Kontakt
  - Elektromagnetische Felder (z.B. 50Hz)
  - Elektrostatische Aufladungen (Reibungselektrizität)
  - Verstärkerrauschen
  - Aliasing
  - Quantisierung
- Artefakte bei der EEG Aufzeichnung (soweit möglich) vermeiden
  - Kontrollierte Experimente: Keine unnötigen Muskelbewegungen
  - Signal-Störquellen identifizieren und entfernen

Einige Artefakte im EEG können durch Frequenzfilter entfernt werden

# Was ist ein Filter?

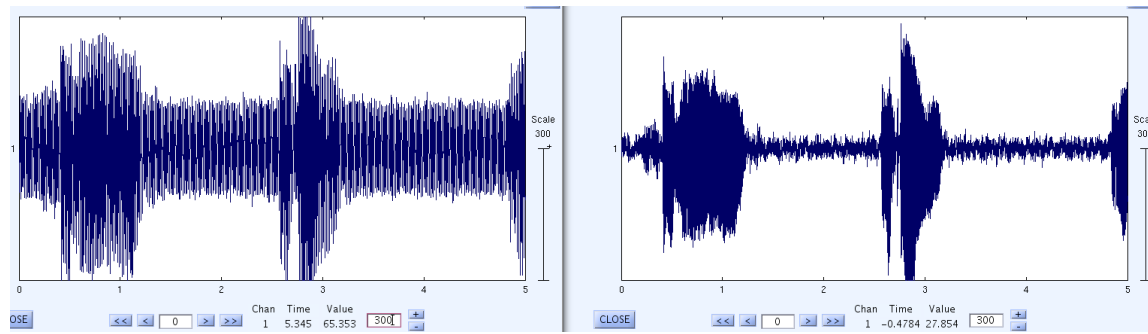
- Ein Filter transformiert ein Eingangssignal in ein Ausgangssignal
- Filter treten in der Natur/Technik „überall“ auf!
- Beispiele:
  - Akustisches Filter (z.B. Auspuff eines Autos, Konzertsaal, menschlicher Mund)
  - Analoges (elektrisches) Filter (Kombination von Widerständen, Kondensatoren und Spulen)
  - Digitales Filter (ein Programm, oder einfach eine Koeffizientenfolge)
  - Filtereigenschaften von Objekten (z.B. wirkt bei der Messung von elektrischen Biosignalen die Haut als Tiefpassfilter)
- Wir beschäftigen uns an dieser Stelle nur mit digitalen Filtern.
- Grammatik: der Kaffee-Filter, aber das digitale Filter

# Warum filtern wir?

- In der Natur auftretenden Filter können durch digitale Filter beschrieben werden.
- Filterung ist eine wichtige Operation der Signalverarbeitung, um die Entstehung eines Signals zu modellieren
- Mit Filterung können wir (im Idealfall) mathematisch beschreiben, welche Einflüsse ein Signal geformt haben.
- Filter wirken auf die Frequenzen des Eingangesignals
  - Wichtiger Signalverarbeitungsschritte (Modulation, Rauschunterdrückung, ...) durch Filter repräsentieren.
- Impulsantwort und Frequenzantwort (Übertragungsfunktion) eines Filters charakteristisch

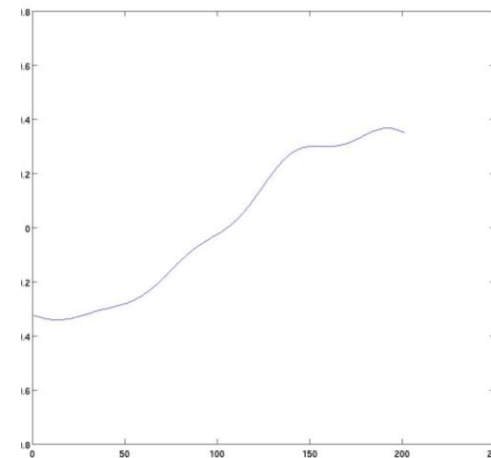
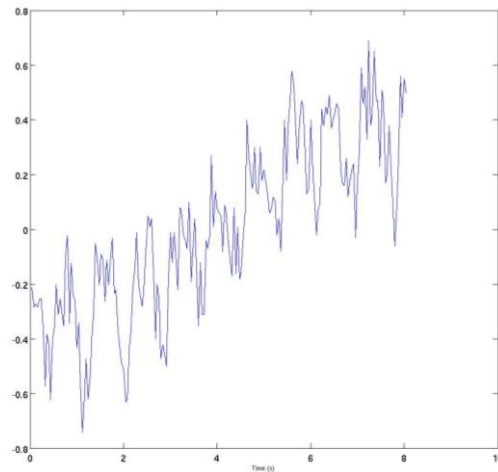
# Beispiel Bandstopp-Filter

- Audio Signal mit 50 Hz Netzbrummen
- Bandstopp-Filter: Sperren von 50 Hz



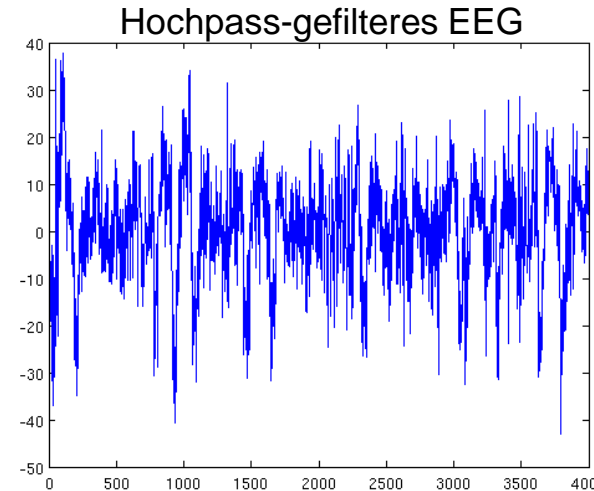
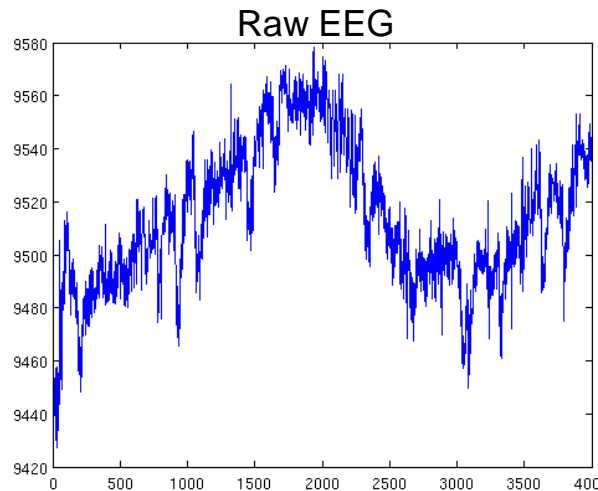
# Beispiel Tiefpass-Filter

- Funktionale Nah-Infrarot Spektroskopie
- Misst Konzentrationen von Sauerstoff armen/reichem Blut im Gehirn
  - Änderungen mit mentalen Aufgaben
- Puls (mechanische Auswirkungen von Herzaktionen) enthält keine Information über Gehirnaktivierungen, ca. 50 Schläge/min
- Tiefpassfilter mit 0.5 Hertz: lässt nur Frequenzen  $< 0.5$  Hertz durch



# Beispiel Hochpass-Filter

- EEG Signal enthält niedrigfrequente Anteile
  - Enthalten keine relevante Information
- Hochpassfilter mit Cut-Off 1Hz: lässt nur Frequenzen  $>1\text{Hz}$  durch



*Jetzt haben wir schön vorverarbeitete EEG Daten.  
Können wir irgendwas „erkennen“?*





1. ~~Daten vorverarbeiten~~
2. Merkmale generieren und auswählen (Features)
3. Klassifikator mit einem Trainingsdatenset „trainieren“ (Fit)
4. Testdaten-Label vorhersagen mit dem Model (Predict)
5. Übereinstimmung von Vorhersage und Wahrheit analysieren (Evaluation)

- Daten für Machine Learning
- Einzelner Datenpunkt: Sample
- Beschrieben durch Attribut – Wert Paare → **Features**
- Alle Samples sollten gleiche Attribute haben

*Eure Aufgabe:*

- Was für Merkmale eignen sich für unser BCI?
- Ist eine Selektion nötig/hilfreich?

- ~~1. Daten vorverarbeiten~~
- ~~2. Merkmale generieren und auswählen (Features)~~
3. Klassifikator mit einem Trainingsdatenset „trainieren“ (Fit)
4. Testdaten-Label vorhersagen mit dem Model (Predict)
5. Übereinstimmung von Vorhersage und Wahrheit analysieren (Evaluation)

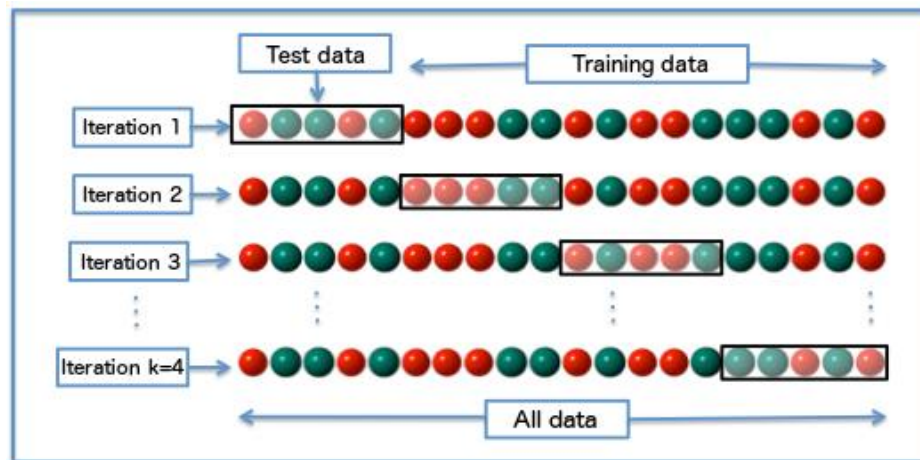
# Trainings- und Testset

- Suchen Funktionen, die uns für **neue** Daten eine Prädiktion gibt
- Daher muss Funktion auf anderen Daten gelernt, als getestet werden
- Wenn keine neuen Daten gesammelt werden können Aufspalten in Trainings- und Testset
  
- Training Set:
  - Daten und Label gegeben
- Test Set:
  - Benutze nur Daten und vergleiche Ausgabe des Klassifikators mit echten Labels

- Einteilen der Daten in komplementäre Subsets
- Training auf einem Subset (Trainingset), Validierung auf dem anderen (Testset)
- Um Variabilität zu reduzieren, mehrere Runden mit verschiedenen Partitionierungen ausführen
- Sehr gut geeignet, wenn nicht genug Daten vorhanden sind um echte separate Sets zu definieren

# K-Fold Kreuzvalidierung

- k-fold cross-validation
- Datenmenge mit N Elementen, wird in  $k \leq N$  möglichst gleich große Teilmengen  $T_1, \dots, T_k$  aufgeteilt.
- k Testdurchläufe gestartet, bei denen die jeweils i – te Teilmenge  $T_i$  als Testmenge und die verbleibenden  $k - 1$  Teilmengen  $\{T_1, \dots, T_k\} \setminus \{T_i\}$  als Trainingsmengen verwendet werden.
- Gesamfehlerquote = Durchschnitt aus den Einzelfehlerquoten der k Einzeldurchläufe



- ~~1. Daten vorverarbeiten~~
- ~~2. Merkmale generieren und auswählen (Features)~~
- ~~3. Klassifikator mit einem Trainingsdatenset „trainieren“ (Fit)~~
4. Testdaten-Label vorhersagen mit dem Model (Predict)
5. Übereinstimmung von Vorhersage und Wahrheit analysieren (Evaluation)

## *Das Experiment*

