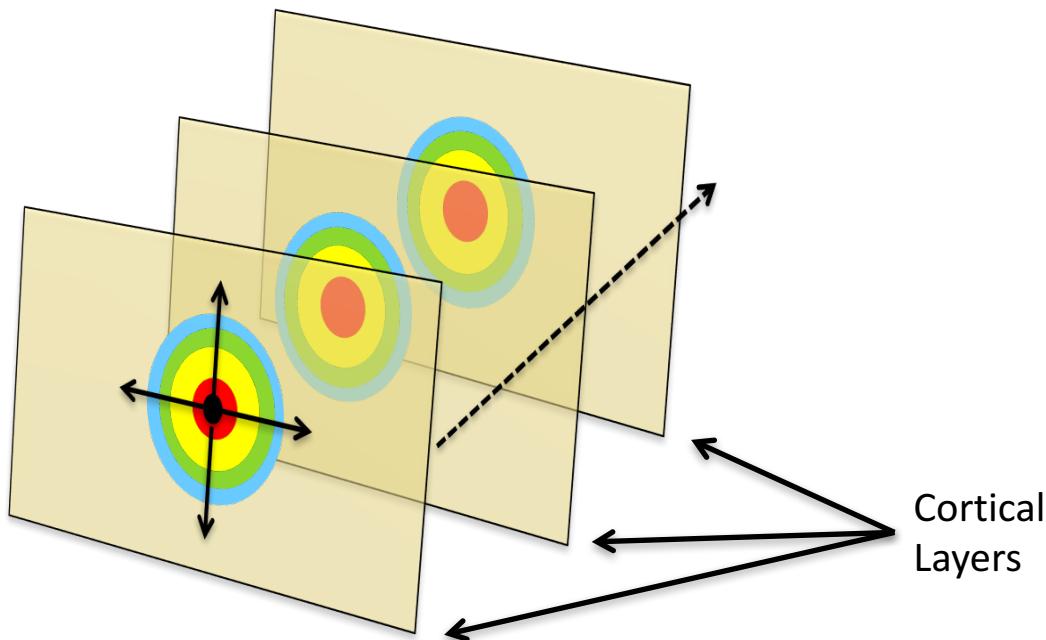
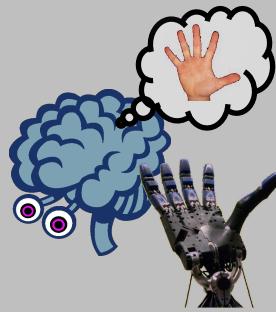


Das “local” in LFP

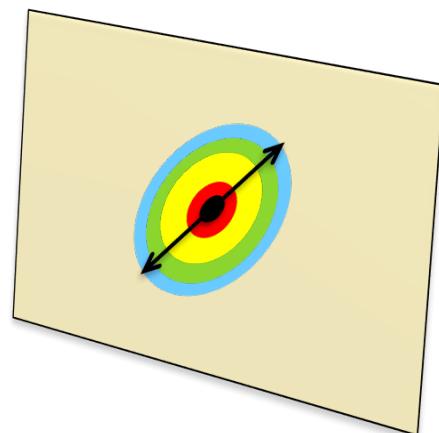
- Die räumliche Auflösung von LFP beschreibt das Volumen bzw. die Neuronen darin , die zu dem an einer Elektrode gemessenen Signal beitragen, also deren Aktivität sich in dem LFP summiert.
- Die Auflösung ist unterschiedlich in **laterale Richtungen** und in die **Tiefe**, d.h. **vertikal** durch die Layer des Kortex.



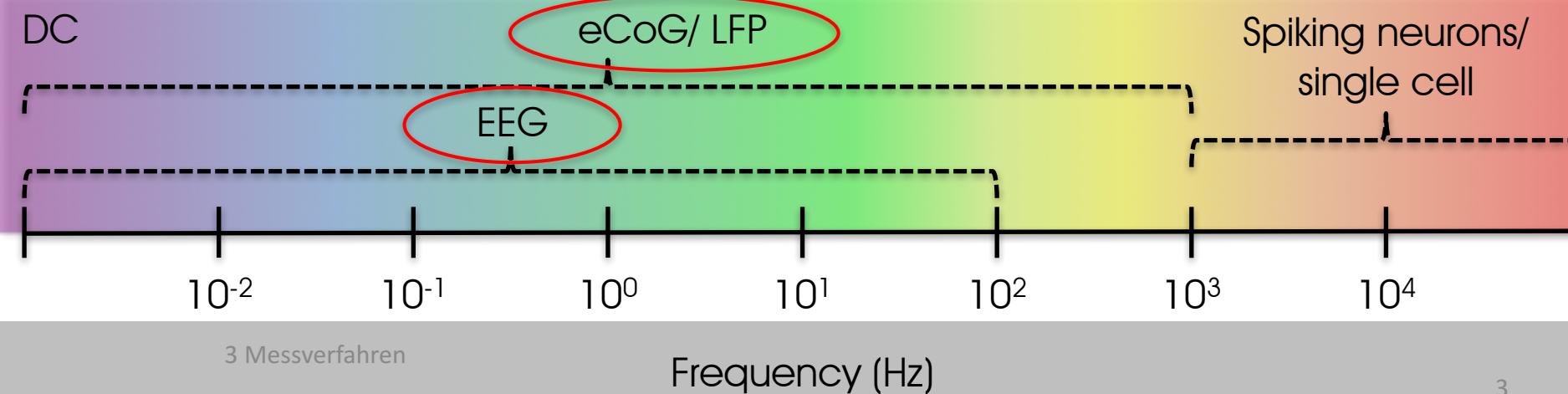
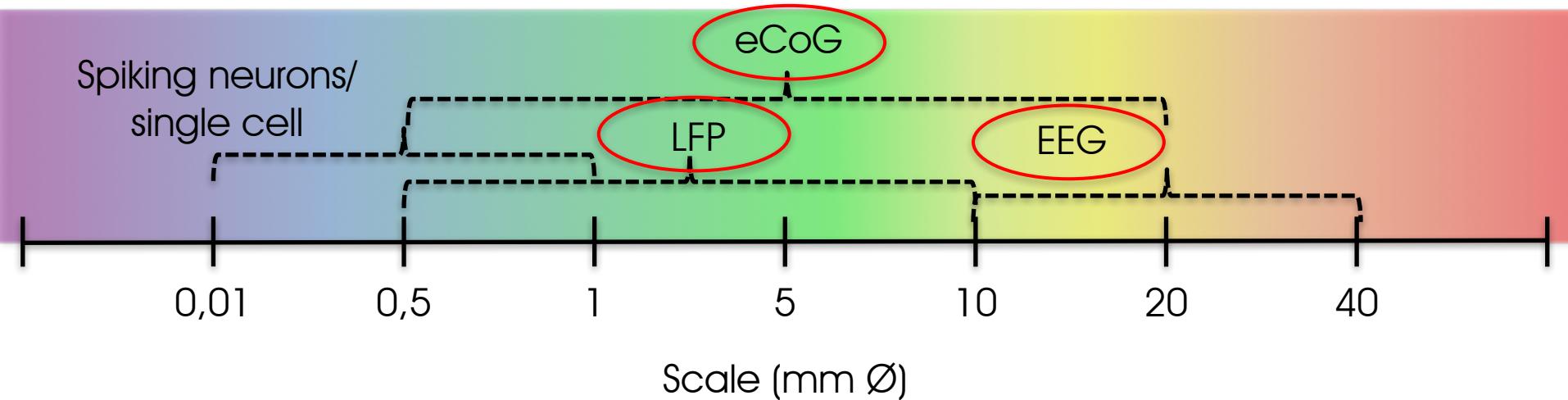
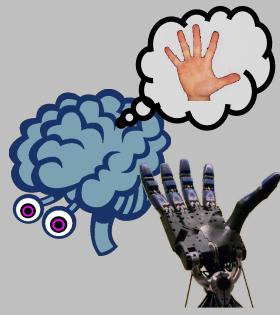
Das “local” in LFP



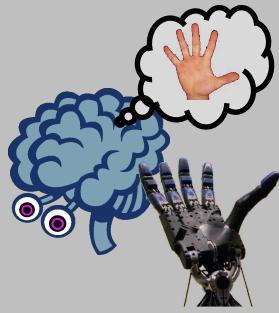
- Die räumliche Auflösung bei intra-kortikalen Messungen wird in aktuellen Studien unterschiedlich angegeben.
- Dabei werden Werte **lateral** zwischen 500 µm und 5 mm angegeben; **vertikal** von >1 mm bis zu >1 cm (Angabe in Durchmesser).
- Konsistent ist aber in allen Studien die Relation **lateral << vertikal**.
- Zur Zeit lässt sich jedenfalls sicher sagen, dass intra-kortikal gemessene LFP eine sehr kleine räumliche Auflösung haben.
- Fallstricke beim Vergleich der Studien:
Kortexareal der Messung (z.B. visueller, auditorischer oder motorischer Kortex), Ort der Referenzelektrode, Berücksichtigung der vertikalen Ausbreitung (oft nur lateral), ...



LFP in Raum und Zeit



Die Frequenzen im LFP/ EEG

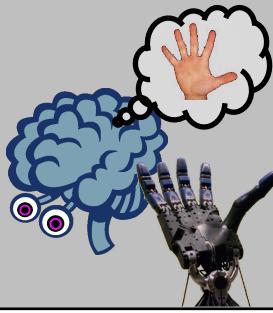


δ	Delta	< 4 Hz
θ	Theta	4 – 7 Hz
α / μ	Alpha/ Mu	8 – 12 Hz
β	Beta	13 – 30 Hz
γ	Gamma	> 30 Hz (im EEG bis ca. 100 Hz, invasiv bis max. 300 Hz)

Diese Frequenzbänder wurden zunächst im EEG identifiziert und sind in der EEG Forschung fest verankert. Sie gelten aber auch für die anderen Messverfahren, die LFP messen.

Bei invasiven LFP wird man häufig auf allgemeinere Begriffe wie “low-frequency components” oder “high-frequency components” stoßen. Das Gamma-Band wird (fast) immer namentlich erwähnt.

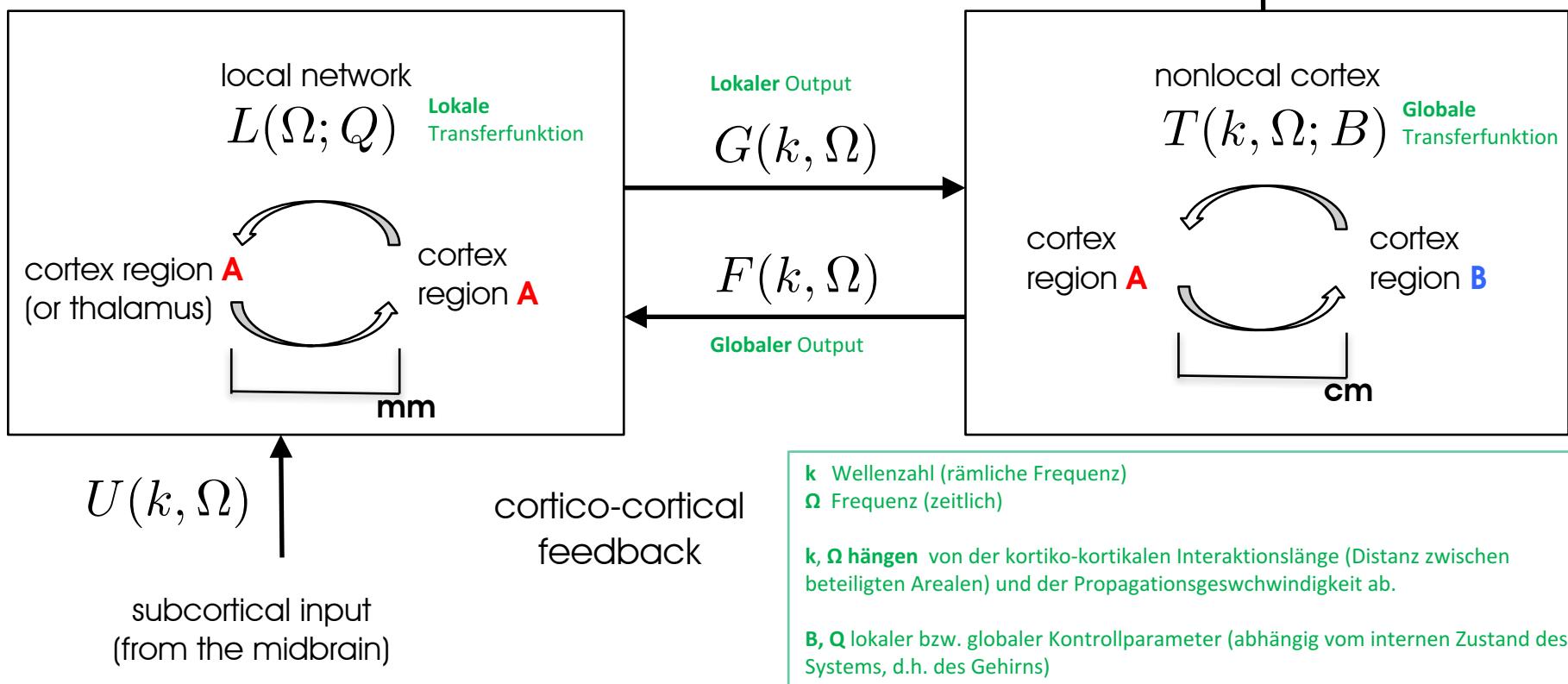
Einfaches Modell kortikaler Dynamik (Nunez, 2000)



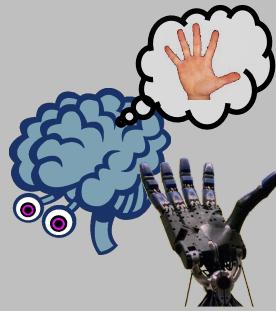
non-invasive macroelectrode recordings (EEG)



$$\hat{F}(k, \Omega)$$



Bewegungsparameter aus LFP dekodieren



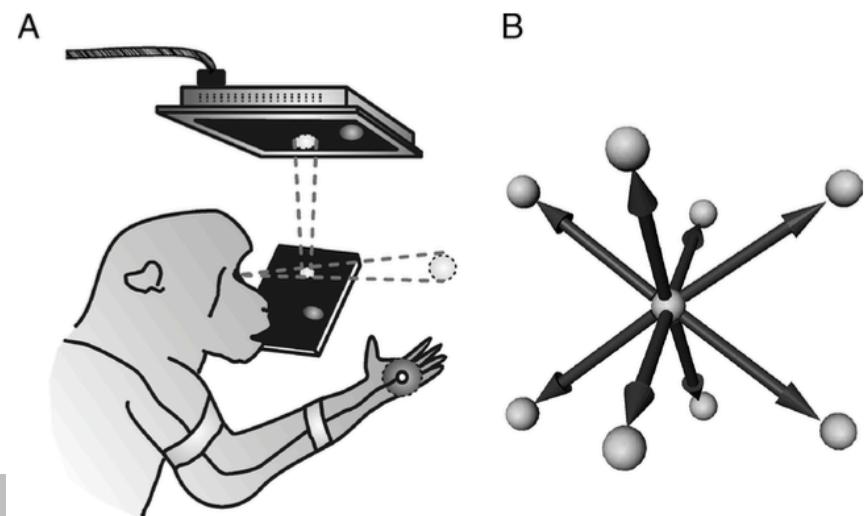
- Als Beispiel betrachten wir diesmal die Kodierung von Handpositionen (3D) [Heldman et al., IEEE TNSRE 2006]
- Auch dieses Verfahren ist für unterschiedliche Bewegungsparameter anwendbar.
- Es handelt sich wiederum um ein lineares Modell, das dem gleichen Grundgedanken folgt (wie beim Population Coding).

Messung

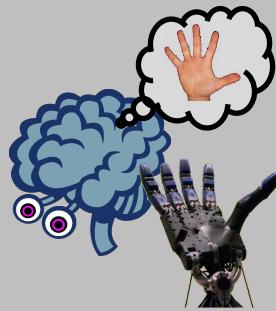
- Standard-Mikroelektrodenarray (823 Elektroden) im Motorkortex, contra-lateral zum bewegten Arm.
- Versuchstiere: Macaque Affen
- Maß: LFP

Versuchsaufbau

Die Aufgabe der Versuchstiers ist annähernd Identisch mit den zuvor betrachteten Studien. ("Center Reach Out Task")

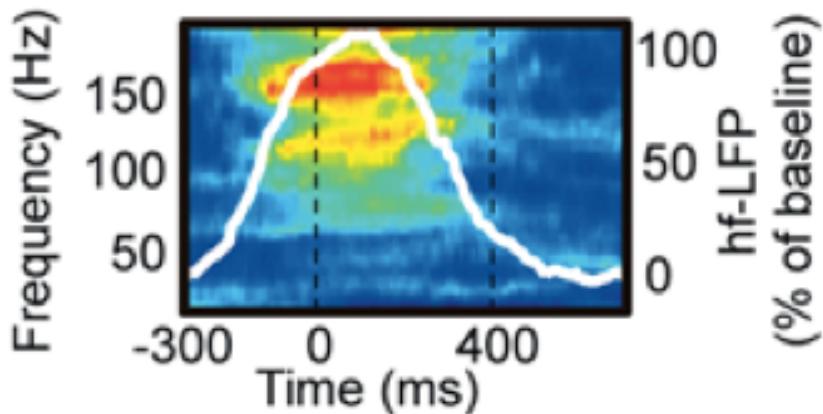


Dekodierungsmodell



Das lineare Modell:

$$P = b + b_x x + b_y y + b_z z$$



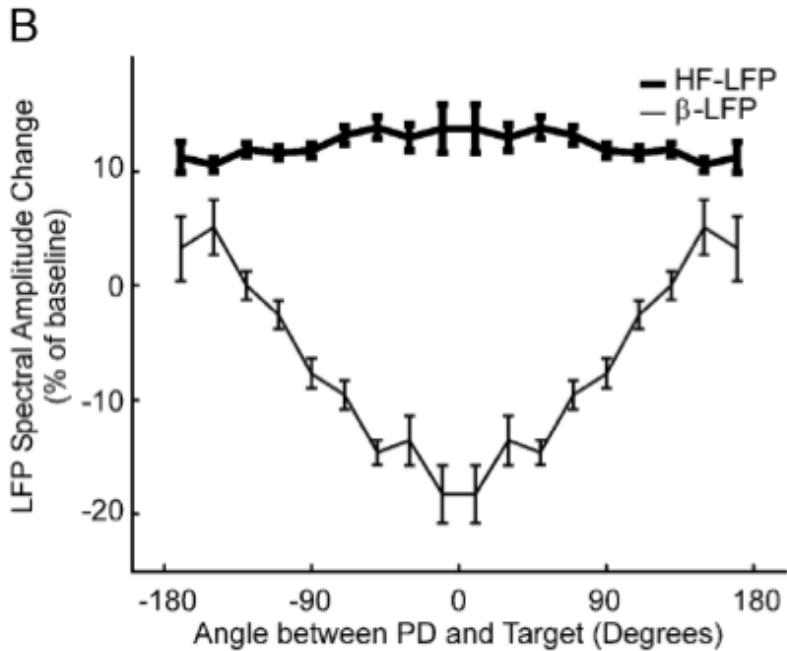
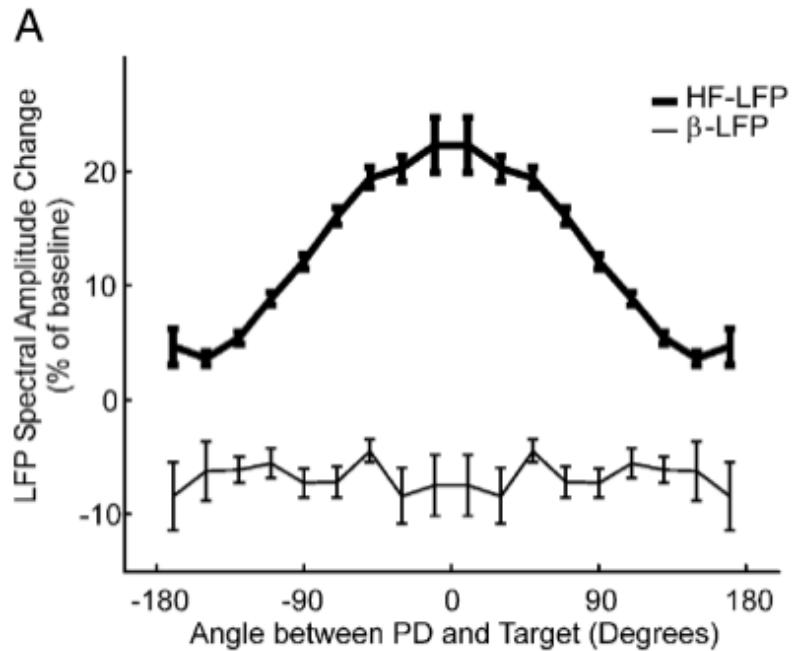
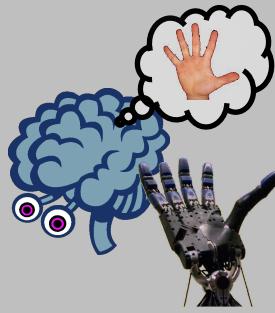
Dabei ist **P** die **gemittelte spektrale Amplitude**, **x**, **y**, und **z** sind die kartesischen Handkoordinaten während des Haltens der Zielposition. Die **b's** sind wiederum Koeffizienten, die mit linearer Regression zu bestimmen sind.

Es werden **2 Frequenzbänder** betrachtet : 10-60 Hz und 60-200 Hz.

Elektroden-Frequenzbandpaare werden separat betrachtet.

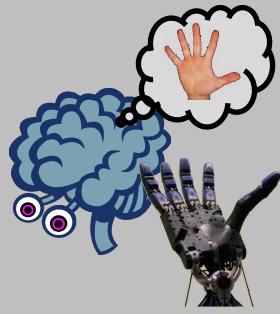
Auch hier kann wieder nach Bestimmen der Koeffizienten eine “**bevorzugte Richtung**” für solche Paare bestimmt werden.

Ergebnisse



Die beiden Graphiken zeigen die Veränderung der spektralen Amplitude geplottet gegen den Winkel zwischen der bevorzugten Richtung und dem tatsächlichen Target.
Beide Frequenzbänder zeigen eine hohe Spezifität für eine bestimmte Richtung.

Kontinuierliche vs. diskrete Dekodierung



Kontinuierliche Parameter

- Gelenkwinkel
- Bewegungsrichtung
- Öffnungswinkel der Hand
- Kraft
- ...

$$\Phi_{cont} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$$

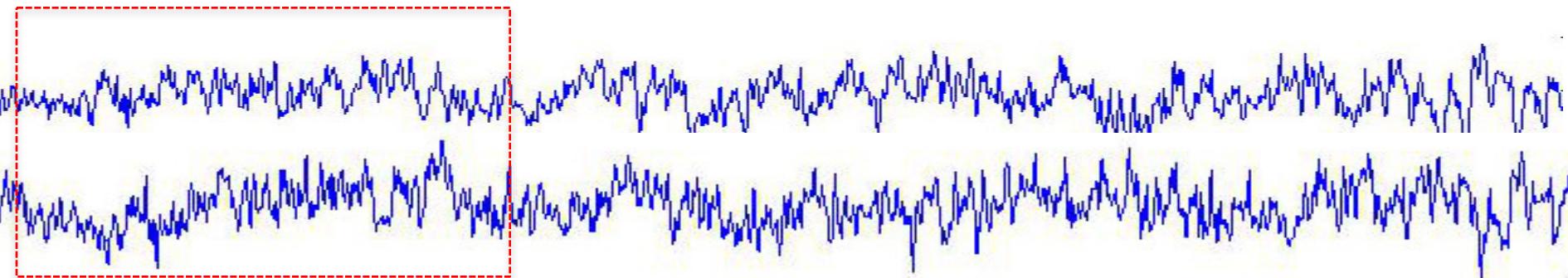


Diskrete Parameter

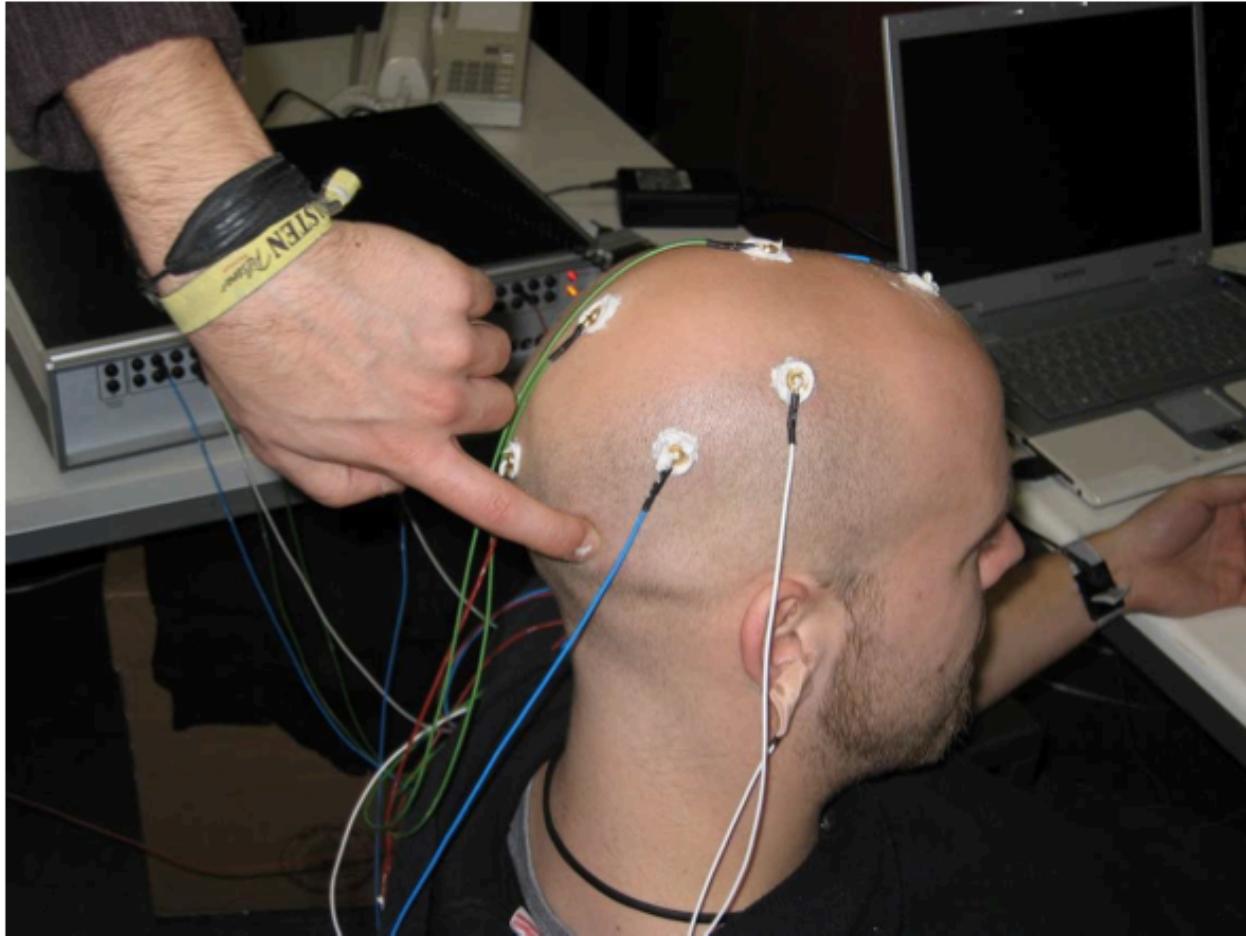
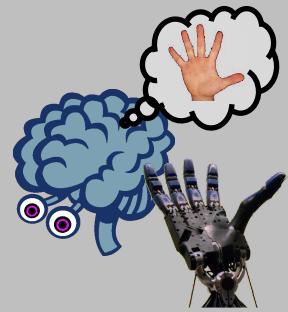
- Rechte oder linke Hand
- Hand geöffnet oder geschlossen
- Grifftyp
- Zu wählendes Objekt
- ...

$$\Phi_{dis} : \mathbb{R}^n \rightarrow \{C_i\}_{i=1, \dots, N}$$

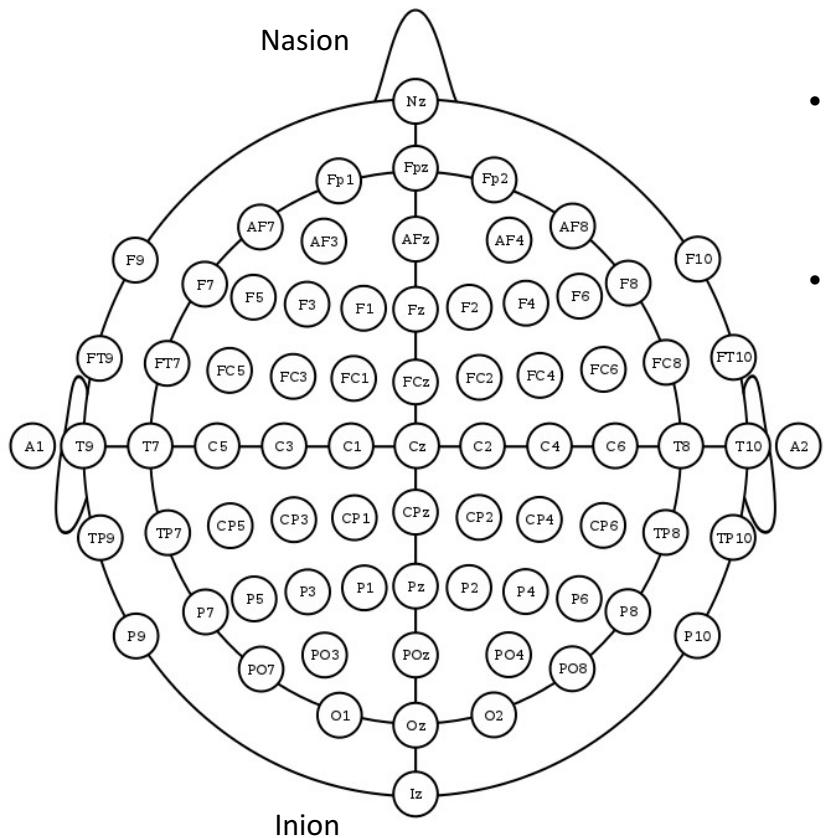
Ein Modell oder ein Klassifikator ist eine Abbildung eines (mehrkanaligen) Datensegments entweder auf einen reellwertigen Vektor oder eine diskreten Klasse.



EEG (Elektroenzephalogramm)



EEG – 10/20 System



- Elektroden werden zwischen Nasion und Inion in Schritten von 20/10/5 % angebracht
- Die Elektrodenpositionen haben ein festes Benennungsschema:

F Frontal

C Central

P Parietal

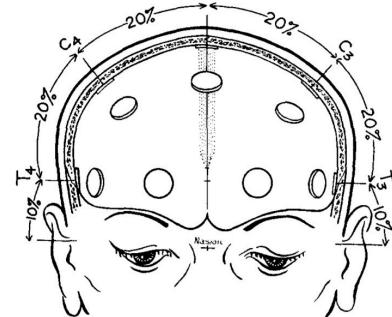
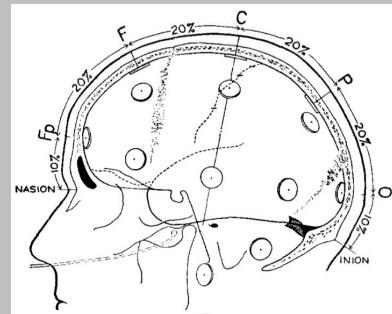
T Temporal

O Occipital

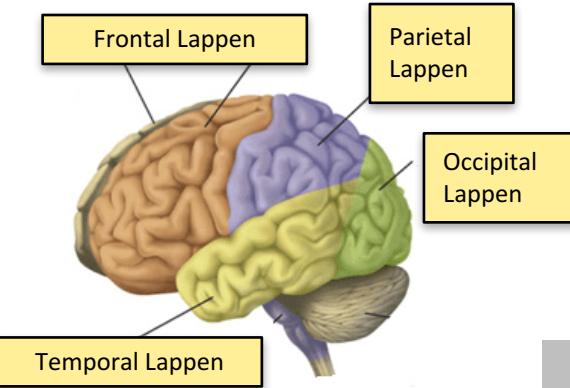
z
gerade
ungerade

zentral
rechte Hemisphäre
linke Hemisphäre

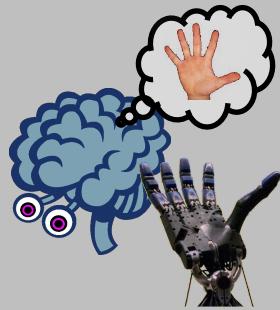
z.B. F4, Cz, P7, ...



Nach Karl Jasper (1958)



Spontan EEG vs. Potentiale



Spontaneous EEG

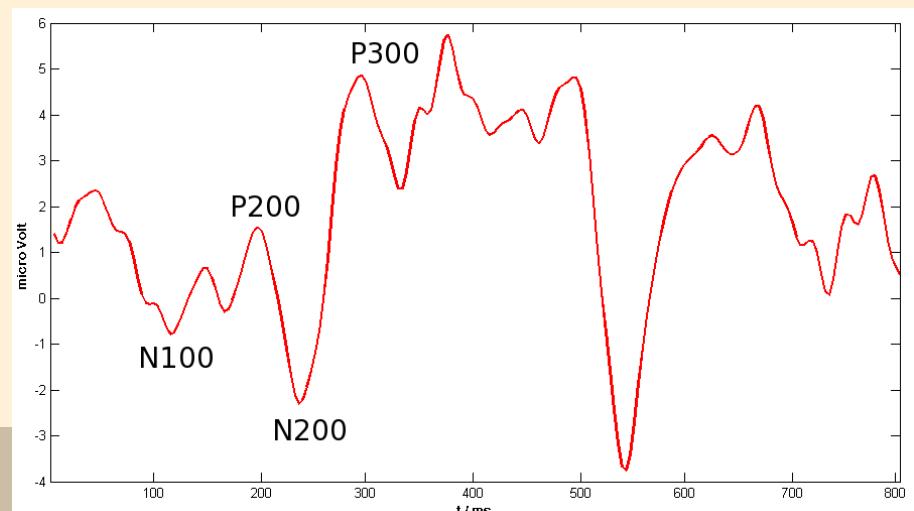
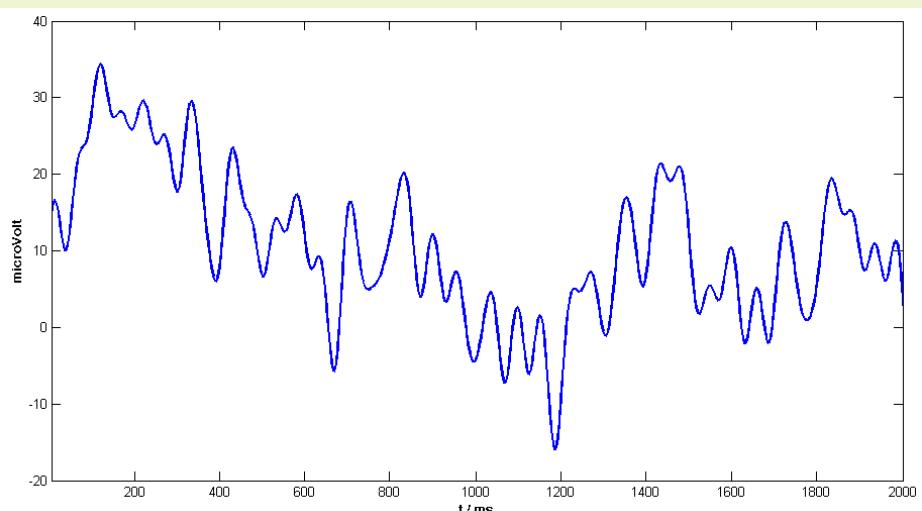
Characterized by **frequency bands**:

- delta 1 – 4 Hz
- theta 5 – 7 Hz
- alpha 8 – 12 Hz
- beta 13 – 30 Hz
- gamma >30 Hz

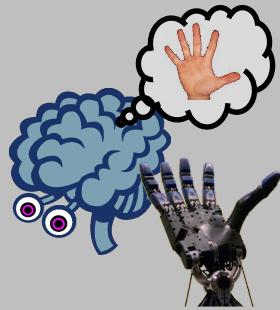
Event-related potentials (ERP)

Characterized by **amplitude** and **latency**:

- Time-locked to stimulus
- Naming convention:
e.g. P300: positive, 300 ms post-stimulus

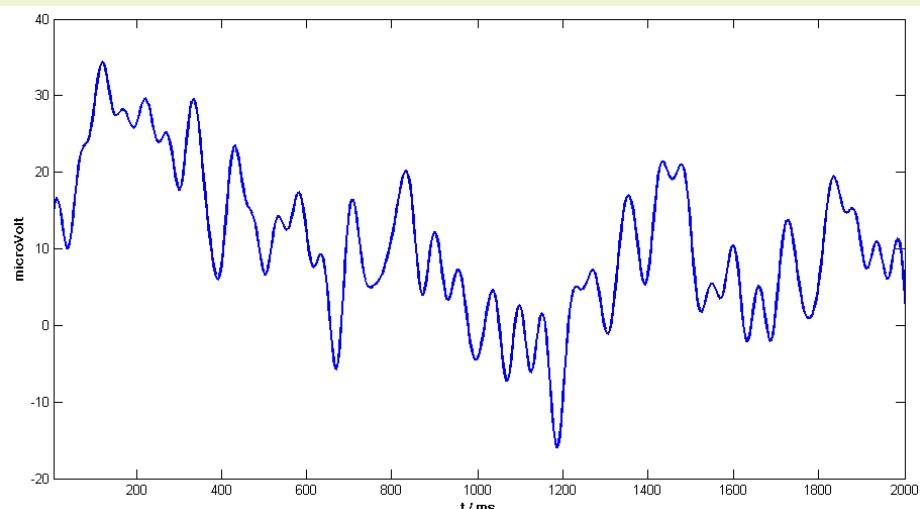


Spontan EEG vs. Potentiale



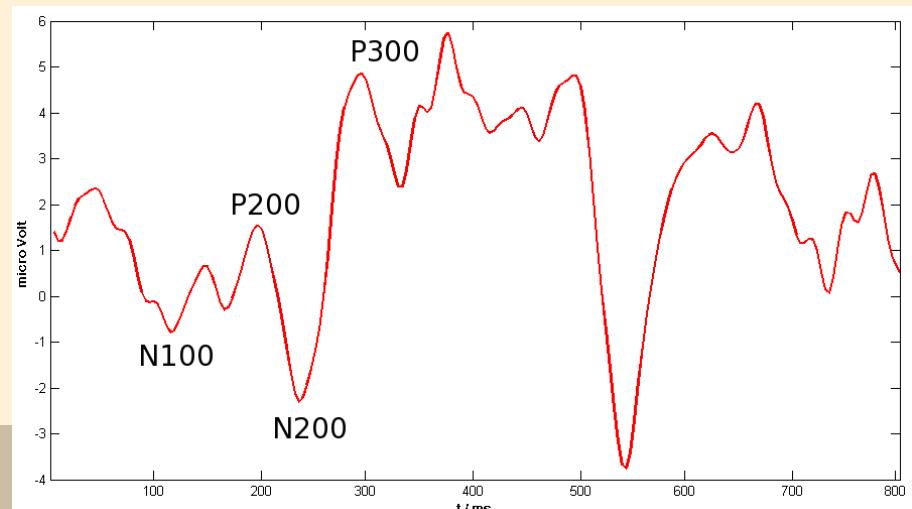
Spontaneous EEG

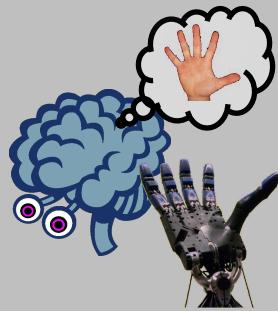
- Ist als Hintergrundaktivität immer vorhanden.
- Die Anteile der Frequenzbänder variieren je nach Zustand.



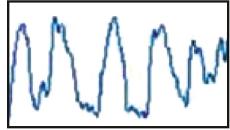
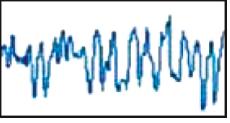
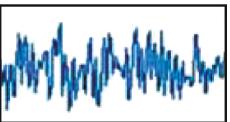
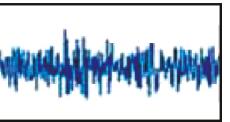
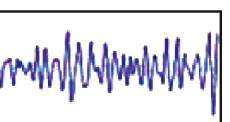
Event-related potentials

- Ist immer von einem Stimulus abhängig.
- Das Evozieren bestimmter ERP hängt vom gewählten experimentellen Paradigma ab.



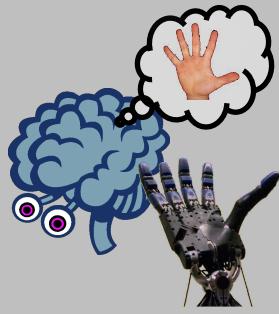


Zuordnung der Frequenzbänder

Delta		Delta	< 4 Hz	Tiefschlaf, Bewusstlosigkeit, Koma
Theta		Theta	4 – 7 Hz	in Schlafstadien, Meditation, Kurzzeit-Gedächtnis
Alpha		Alpha/ Mu	8 – 12 Hz	Entspannung, Müdigkeit, Augen geschlossen (aber wach)
Beta		Beta	13 – 30 Hz	wach, konzentriert, aktiv
Gamma		Gamma	> 30 Hz	bewusster Wachzustand, Gedächtnis, ...

EEG-Komponenten in BMI

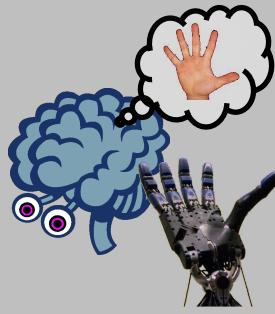
(hier meist BCI – Brain Computer Interface)



- 1.) Motor Imagery (Vorstellung von Bewegung)
→ Event-Related Desynchronization (ERD) and Lateralized Readiness Potential (LRP, Bereitschaftspotential)
- 2.) P300 Event-Related Potential (ERP) [Ereignis-korrelierte Potentiale]
2.a) Fixation-Related Potential (FRP) [Fixations-Korrelierte Potentiale]
- 3.) Slow Cortical Potentials (SCP) [Langsame kortikale Potentiale]
- 4.) Steady-State Visually Evoked Potentials (SSVEP)
4.a) Codebook Visually Evoked Potentials (CVEP)
- 5.) Error Potentials (ErrP) [Fehlerpotentiale]

EEG-Komponenten in BMI

(hier meist BCI – Brain Computer Interface)



1.) Motor Imagery (Vorstellung von Bewegung)

→ Event-Related Desynchronization (ERD) and Lateralized Readiness Potential (LRP, Bereitschaftspotential)

2.) P300 Event-Related Potential (ERP) [Ereignis-korrelierte Potentiale]

2.a) Fixation-Related Potential (FRP) [Fixations-Korrelierte Potentiale]

3.) Slow Cortical Potentials (SCP) [Langsame kortikale Potentiale]

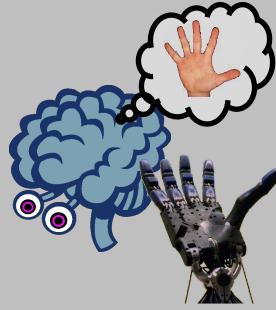
4.) Steady-State Visually Evoked Potentials (SSVEP)

4.a) Codebook Visually Evoked Potentials (CVEP)

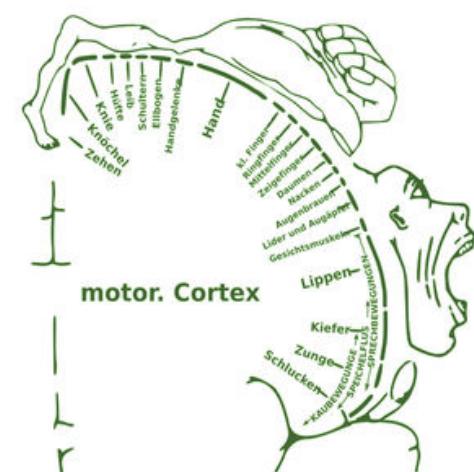
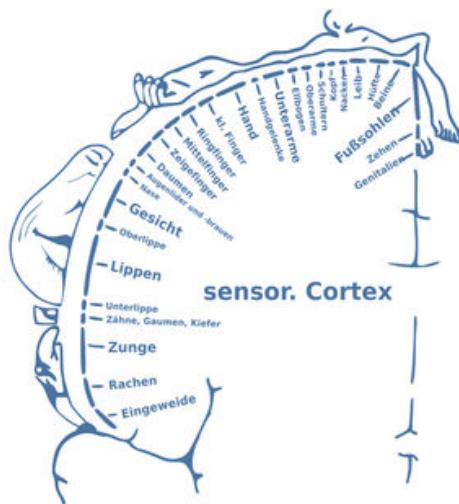
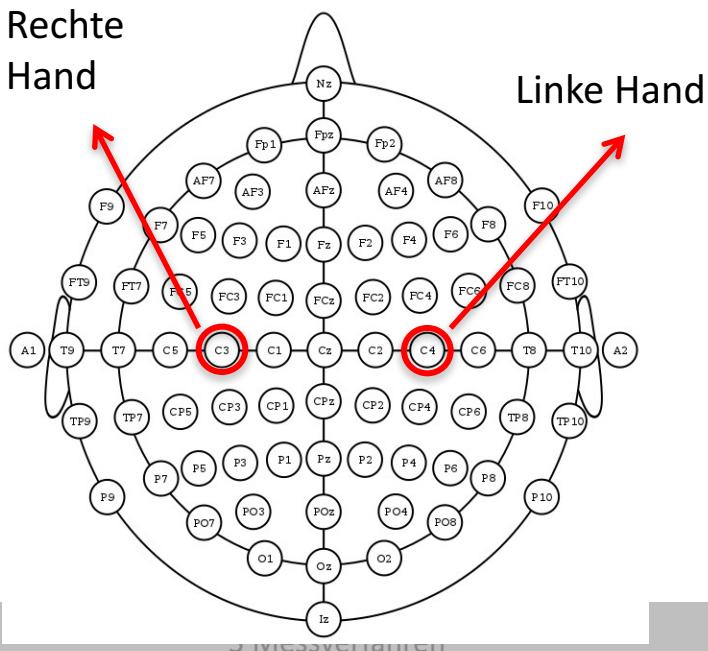
5.) Error Potentials (ErrP) [Fehlerpotentiale]

- Müssen **gelernt** werden, aber benötigen **keine Stimuli**.
- **Kein Lernen**, aber aktive Aufmersamkeitslenkung erforderlich. **Stimulus-abhängig**.
- "Passiv" bzw. "Reaktiv" - Keine aktive Aufmersamkeitslenkung nötig.

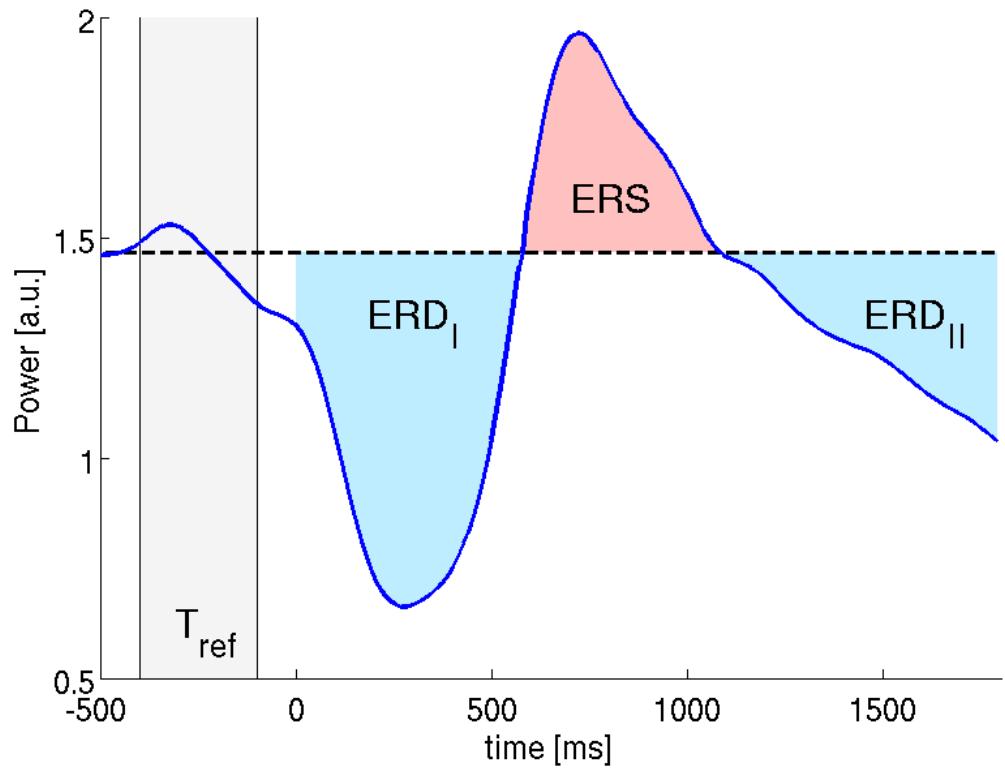
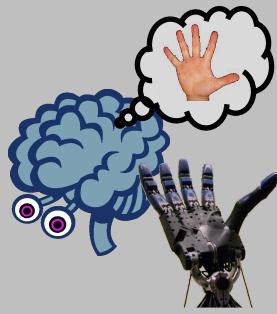
Motor Imagery (MI)



- Basiert auf dem Phänomen, dass die **reine Vorstellung** einer Bewegung zu den (annähernd) gleichen kortikalen Aktivierungsmustern führt wie eine tatsächlich ausgeführte Bewegung.
- Die Aktivierung ist Dank des “Homunculus” gut lokalisiert.

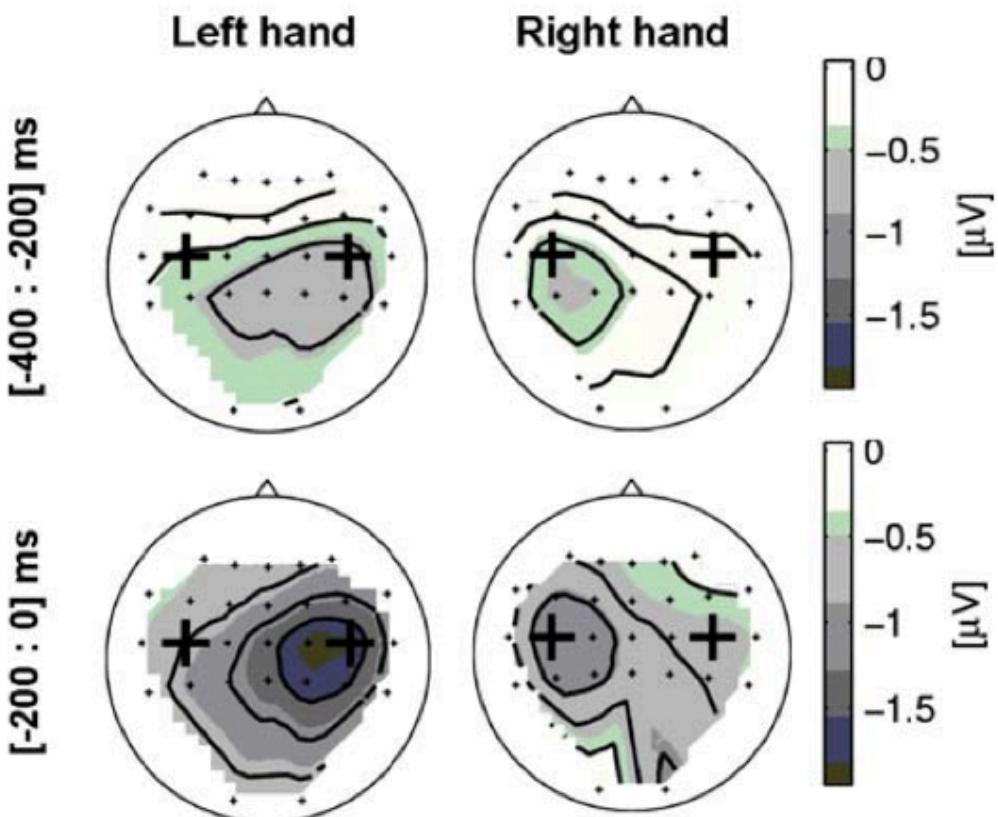
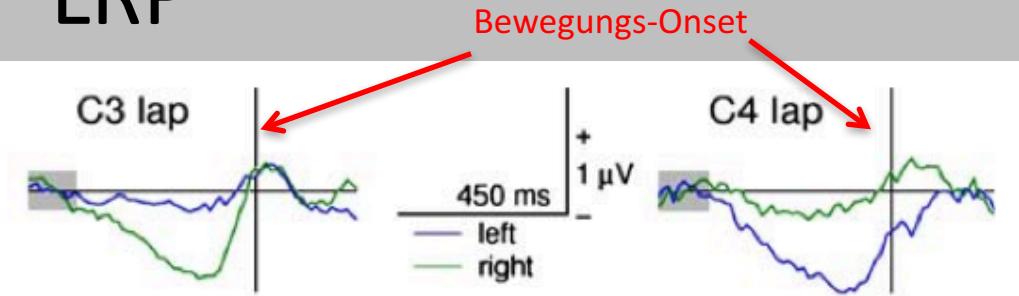
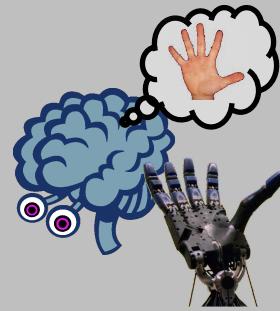


Event-related (de)synchronization- ERD



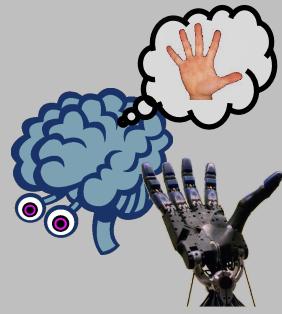
- Desynchronisation in den Frequenzbändern mu (8-12 Hz) und beta (13-30 Hz) bei Planung einer Bewegung.
- Lokal über dem entsprechenden Motorkortex-Areal (Homunculus)
- Desynchronisation = Abnahme der Bandpower
- Nach Beendigung der Bewegung Resynchronisation (=Zunahme der Bandpower)
- ERD ist der “prominentere” Anteil der MI Aktivierung, d.h. die stärkere der beiden Effekte (ERD und LRP).

Lateralized Readiness Potential - LRP



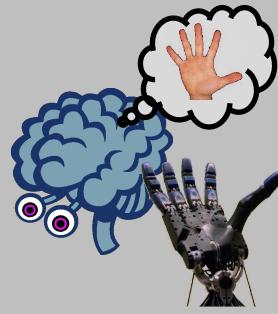
- Negatives Potential bei Planung einer Bewegung.
- Wie ERD lokal im entsprechenden Areal des motorischen Kortex.
- Bei Start der Bewegungsausführung Abklingen des Potentials.

MI in der Praxis



- Übliche Klassen sind rechte Hand, linke Hand, Füße und Zunge
- Die meisten Systeme verwenden nur 2 Klassen von den o.g.
- MI ist eine mentale Fähigkeit, die erlernt werden muss, ähnlich wie ein physischer Sport
- Dies erfordert, MI zu trainieren, bevor tatsächlich ein BMI benutzt werden kann.
- Auch hier co-adaptive Systeme möglich
- Ca. 30% aller Personen sind s.g. “BCI Illiterates”, d.h. sie erlernen wenig bis gar keine Kontrolle über die MI Aktivität.

MI Training – das Neurofeedback Prinzip

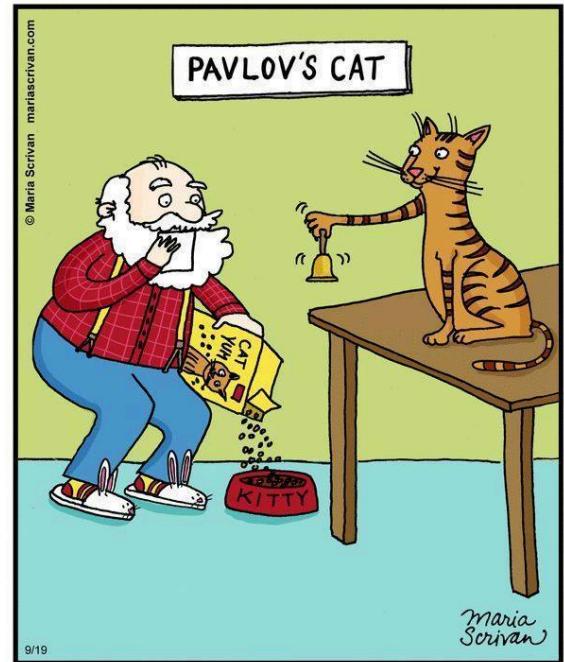


Biofeedback / Neurofeedback sind Methoden, die dem Bereich der **Operanten Konditionierung** zuzuordnen sind.

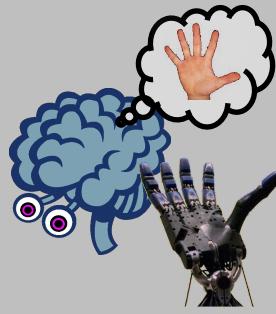
4 Typen von Operanter Konditionierung (nach Skinner, 1950):

- Positive Reinforcement
- Negative Reinforcement
→ Verstärkung eines bestimmten Verhaltens

- Punishment
- Extinction
→ Vermeidung eines bestimmten Verhaltens

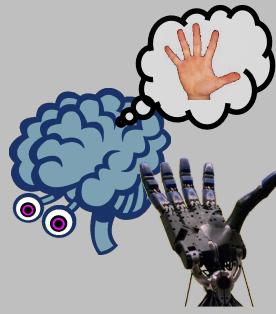


MI Training – das Neurofeedback Prinzip



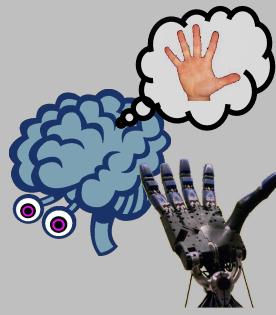
- Im Fall von MI wird durch positives Reinforcement die bewusste Steuerung der MI Komponenten (ERD, LRP) gelernt.
- Das Reinforcement geschieht mittels visuellen (oder akustischem) Feedback.
- Das visuelle Feedback kann graphisch minimalistisch sein, z.B. ein sich entsprechend vorgestellter Handbewegungen nach rechts und links bewegender Balken, oder aber auch komplexes Setting wie ein Computer-Spiel.
- In diesem Sinne ist ein Neurofeedback-System immer ein Closed-Looped System, bei dem die Daten online ausgewertet werden.
- Das Feedback muss unmittelbar und leicht verständlich sein, so dass der Benutzer eine direkte Kopplung seiner kortikalen Aktivierung mit dem Reinforcement spürt.
- Die kortikale Aktivierung wird hier vom Benutzer indirekt kontrolliert, indem eine besonders „geeignete“ Vorstellung der Bewegung (z.b. Hand kreisen vs. Greifbewegung) gelernt wird.

MI Training – Das Prinzip mentaler Simulation



- Bei MI hat sich eine kinestäthische Vorstellung der Bewegung gegenüber einer visuellen Simulation als vorteilhaft herausgestellt.
- Grundsätzlich ist MI ein Teilbereich des Bereichs „Mentale Simulation“ (Mental Imagery)
- Allgemein stellt Mental Imagery das Erleben und Verarbeiten von Eindrücken dar, die nicht durch die realen Sinnesorgane aufgenommen, sondern nur aus dem Gedächtnis abgerufen wurden.
- Mental Imagery stellt eine eigene, zweite Art von Denkprozess dar, in Ergänzung zur Verbalisierung.
- Bei Motor Imagery unterscheidet man zwischen „visueller“ und „kinästhetischer“ Vorstellung (letzteres lt. Studien effektiver).

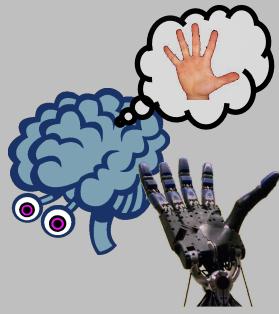
MI Training – Lernerfolg durch Training



- Der Lernerfolg bei MI Training ist zwischen Personen extrem variabel.
- Etwas 30% aller Menschen gelten z.Z. als s.g. „BCI Illiterates“, d.h. sie sind nicht in der Lage, eine stabile und verlässliche Kontrolle über MI zu erlernen.
- Grundsätzlich ist MI Training eine recht langwierige Angelegenheit, die wiederholtes Training in mehreren Sessions an unterschiedlichen Tagen erfordert.

Beispiel aus einer Diplomarbeit in AG NI: (nächste Folie)

MI Training – Lernerfolg durch Training



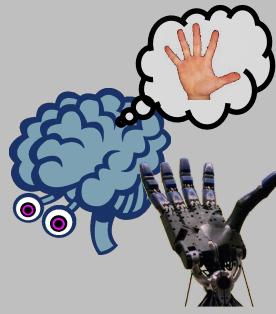
Alle
Probanden

Versuchsperson	FFT(Hz)	Training 2	Training 3	Training 4
AV	0.5-14	0,335	0,511	0,451
AW	1-7	0,260	0,469	0,21
BH	0.5-11	0,232	0,177	0,295
BN	1-7	0,0936	-	0,479
BR	1-7	0,160	0,125	0,01
CK	0.5-21	0,15	0,114	0,03
HJ	0.5-12	0,227	0,162	0,01
NR	10-29	0,25	0,26	0,191
SB	1-7	0,270	0,510	0,435
SJ	1-15	0,097	0,205	0,285
SK	0-11	0,09,2	0,46	0,041
TW	4-29	0,115	0,14	0,275
Ø		0,2123±0,0824	0,2848±0,166	0,226±0,175

Die 2 Diplomanden (Entwickler)

VP/Sessions	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BR	0,16	0,125	0	0	0,05	0,05	0,05	0,085	0,05	0,01	0,04	0,01
HJ	0,227	0,162	0,038	0,033	0,01	0,225	0,01	-	-	-	-	-

Slow Cortical Potentials (SCP)

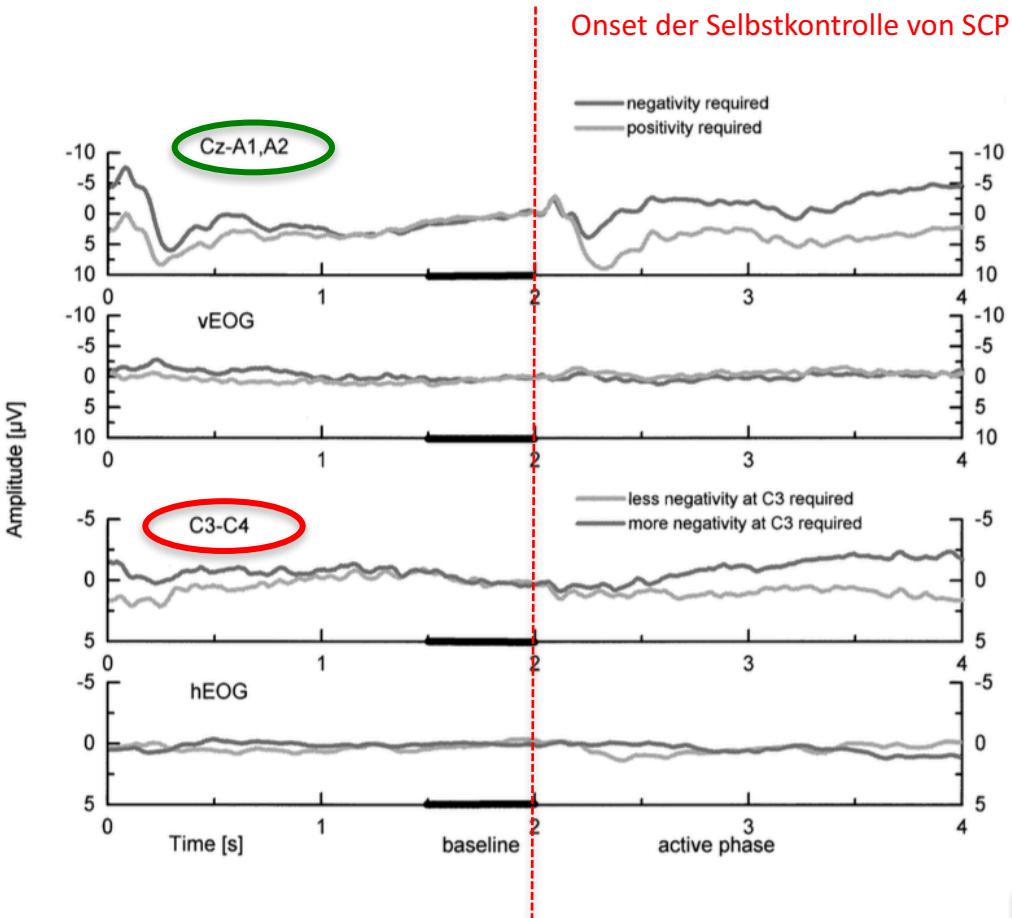
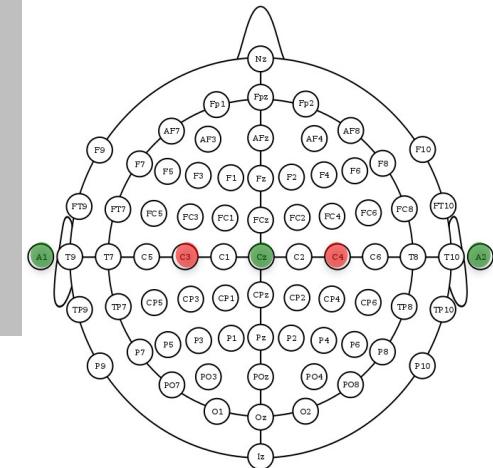


- Sind mit der P300 verwandt.
- Treten ca. 600 ms nach einem Stimulus auf, sofern der Stimulus relevant für das Lösen einer Aufgabe war.
- Die Selbstregulierung von SCP ist **erlernbar**, d.h. die bewusste Steuerung von Zu- bzw. Abnahme der Komponente. → Hier gilt das gleiche Neurofeedback-Prinzip wie bei MI
- Für BMI als Assistenzsysteme sind SCP mittlerweile bedeutungslos, weil sie schlicht zu langsam sind.
- Sie finden jetzt aber erfolgreich Anwendung im Bereich des **Neurofeedbacktraining**, vor Allem bei Kindern mit AD(H)S.

Aufmerksamkeitsdefizit (Hyperaktivität)
Störung



SCP - Zeitverlauf



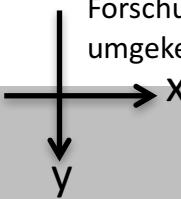
EOG Elektrookulogramm

vEOG vertikale Augenbewegungen

hEOG horizontale Augenbewegungen

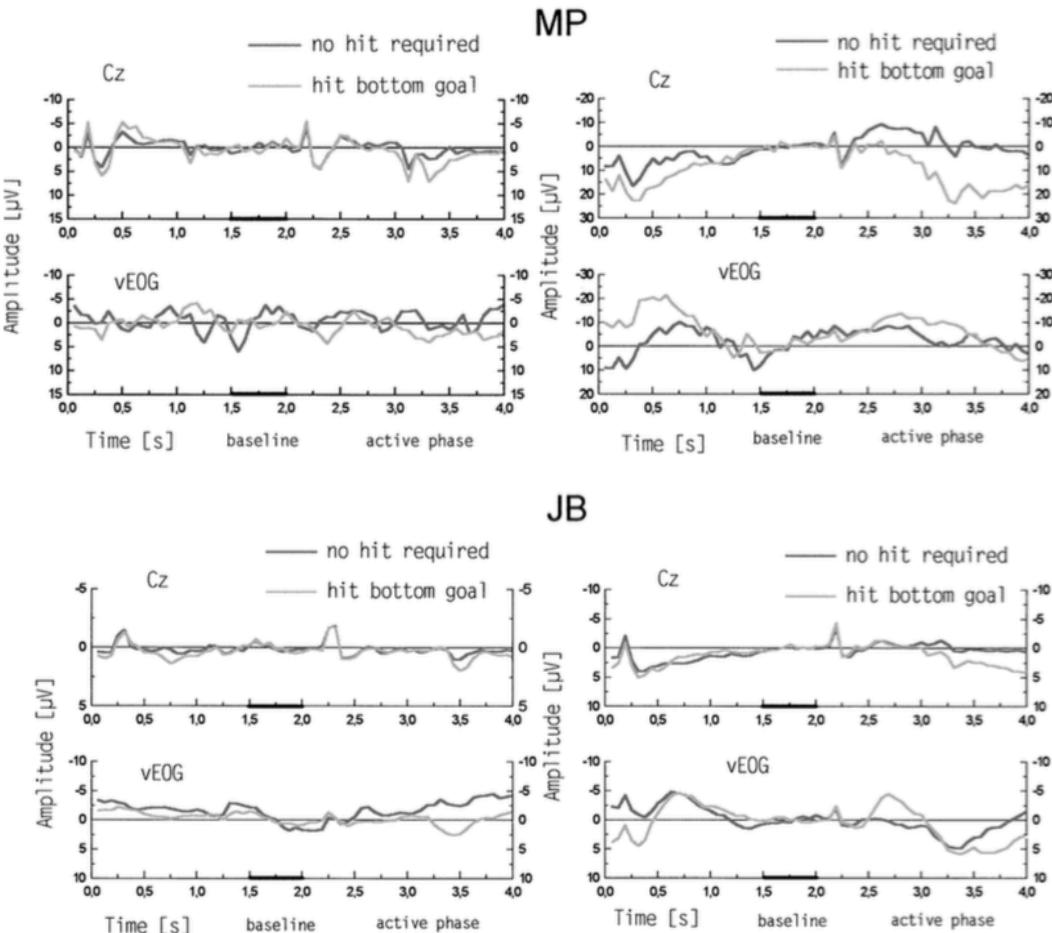
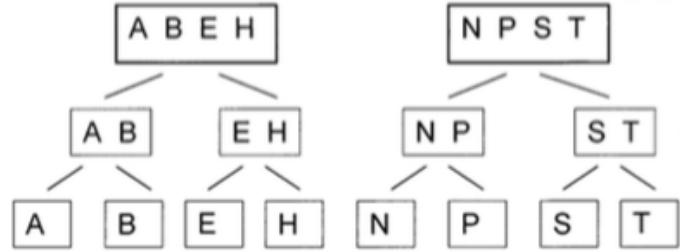
- SCP erlauben die Unterscheidung von 2 Zuständen (Klassen):
 - Positives Potential
 - Negatives Potential

Achtung!
Y-Achsenrichtung
wird in der EEG
Forschung häufig
umgekehrt



Aus Kübler et al., 1999

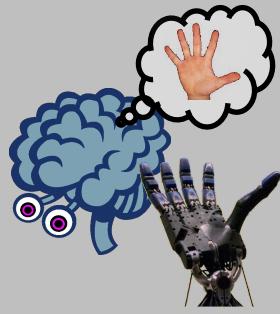
SCP – ALS Patienten



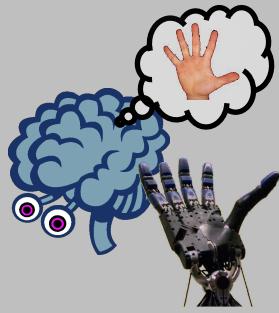
- SCP waren vor 20 Jahren, die ersten BMI Systeme, die bei ALS (Amyotrophe Lateral Sklerose) Patienten erfolgreich eingesetzt wurden, insbesondere mit dem Tübinger Thought Translation Device

- Wurden für Spelling Applikationen eingesetzt

SCP – Neurofeedback bei ADHS

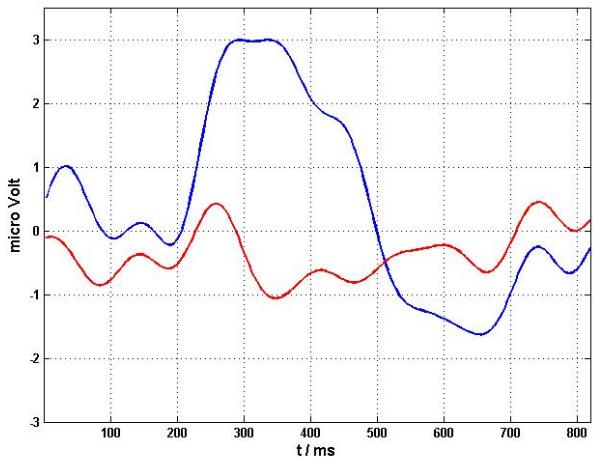
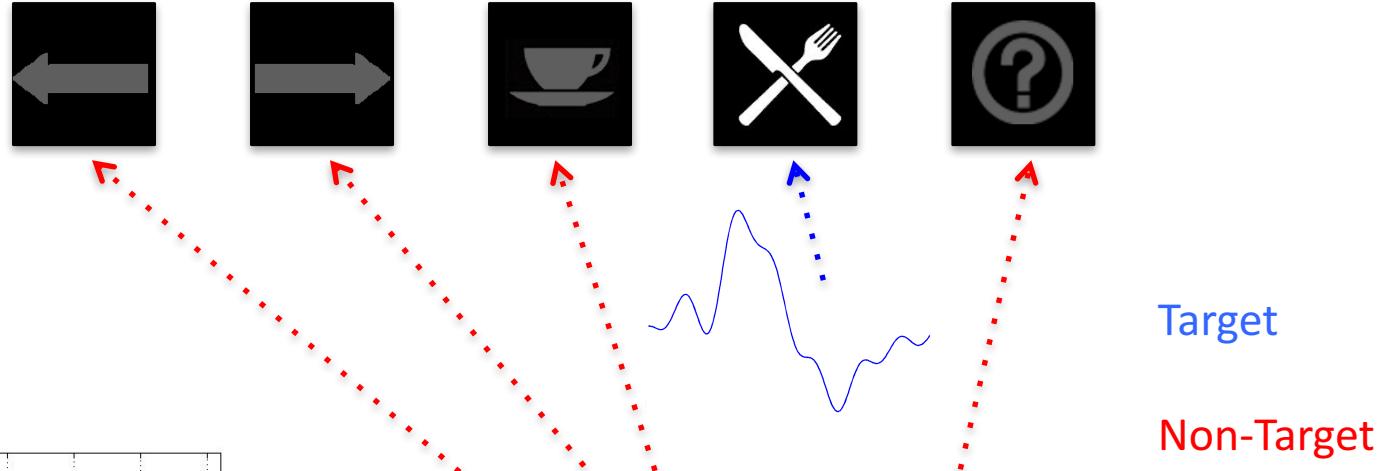
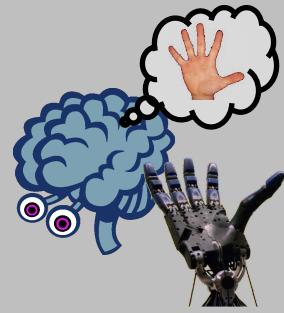


Das P300 Potential

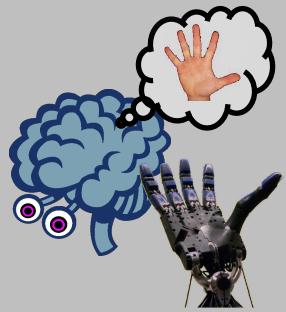


- Wird durch eine Oddball Sequenz ausgelöst, daher nennt man die Stimulus-Präsentation auch Oddball-Paradigma.
- Ein Oddball ist ein relevanter Reiz (“Target”) in einer Reihe von Hintergrundreizen (“Background”).
- Die Relevanz wird durch den Benutzer selbst bzw. eine gegebene Aufgabe bestimmt.
- Die Stimuli müssen in zufälliger Reihenfolge aufleuchten.
- Der Inhalt der Stimuli ist gleichgültig, solange sie für den Benutzer relevant sind (allerdings funktionieren “leere” Felder sehr schlecht).

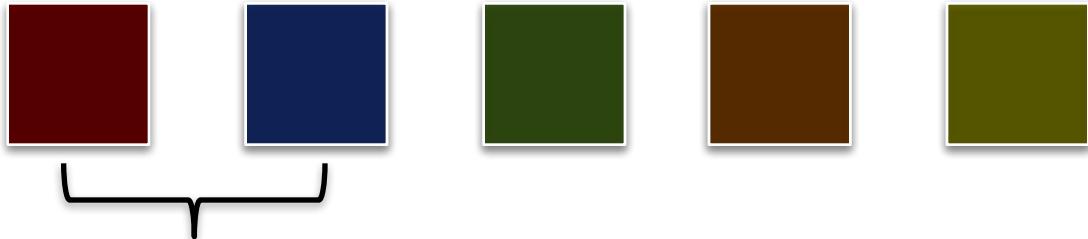
Das P300 Potential



- Maximale Amplitude bei ca. t=300ms nach Stimulus Onset
- Hält für ca. 300 ms an
- Die Varianz zwischen Personen ist sehr hoch.



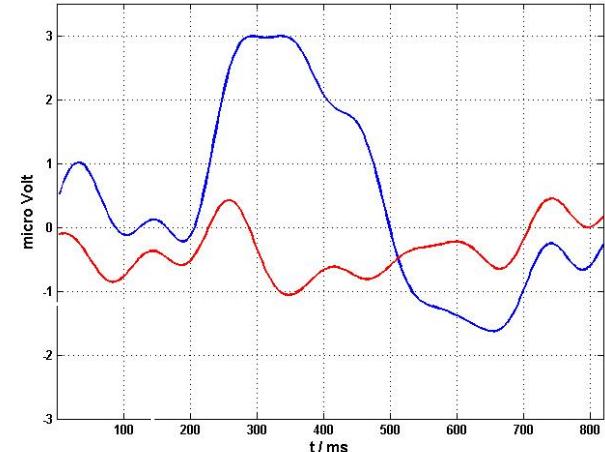
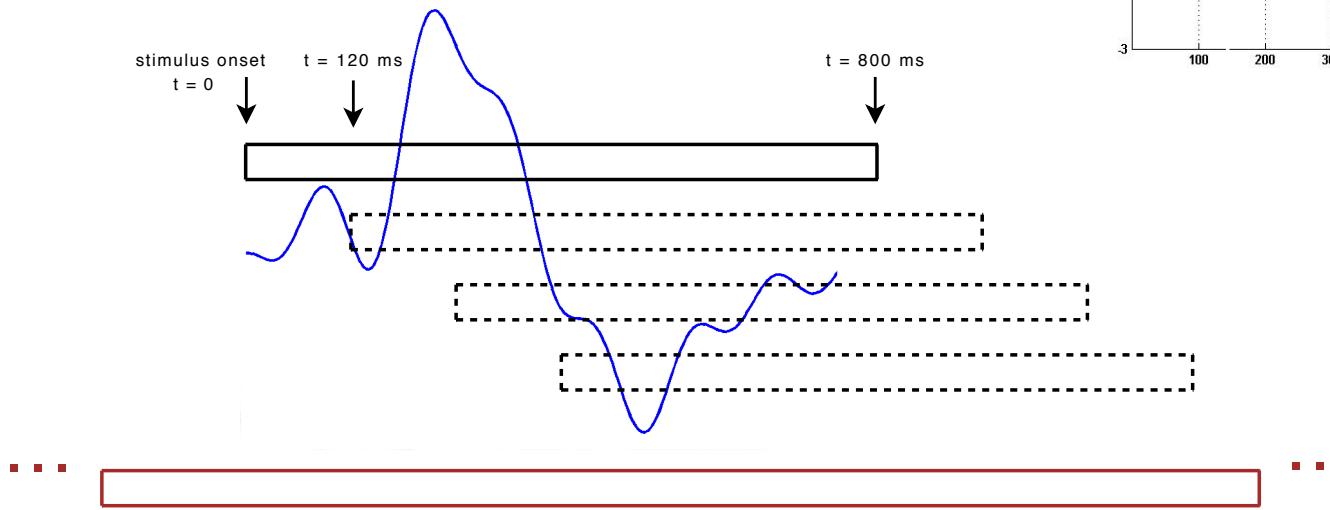
Das P300 Potential



ISI = Inter-Stimulus Intervall

- Das P300 Potential begründet einen Auswahlmechanismus, pro Durchgang kann 1 Symbol aus N gewählt werden.
- Je kürzer der ISI, desto schneller kann ein Symbol ausgewählt werden.
- Üblich sind Werte um 100 ms. Dies führt beim Erzeugen von Datensegmenten zu Überlappungen.

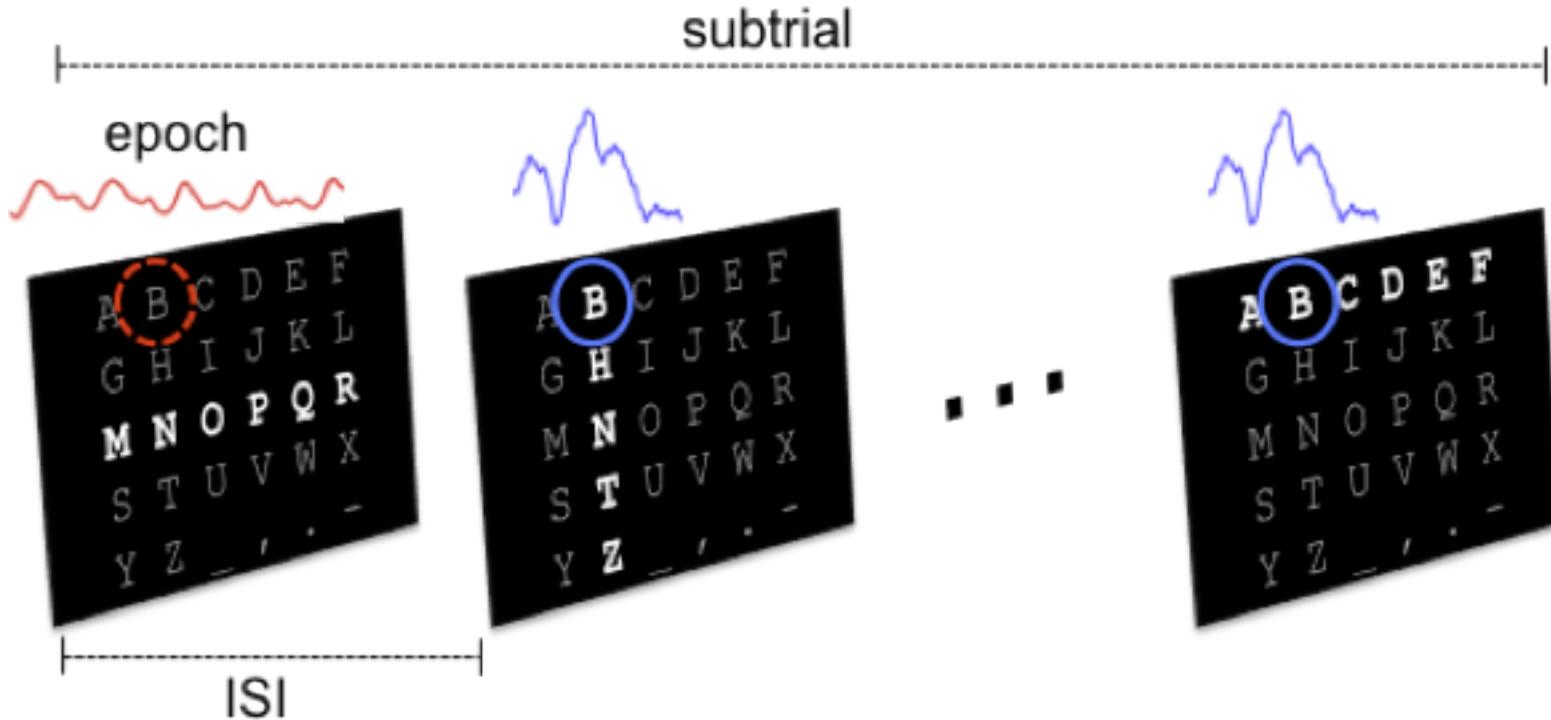
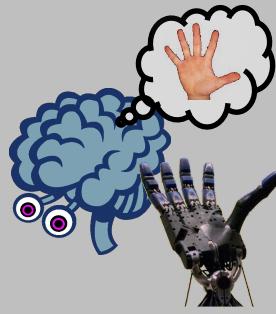
Das P300 Potential



Das Erzeugen überlappender Datensegmente.

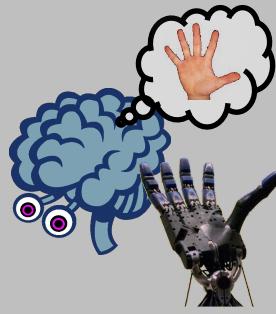
Der P300 Speller

(Farwell und Donchin, 1989)



Frühes, mittlerweile berühmtes, BCI System zum Buchstabieren von Texten. --> Das erste P300-BCI der Wissenschaftsgeschichte.

Der P300 Speller

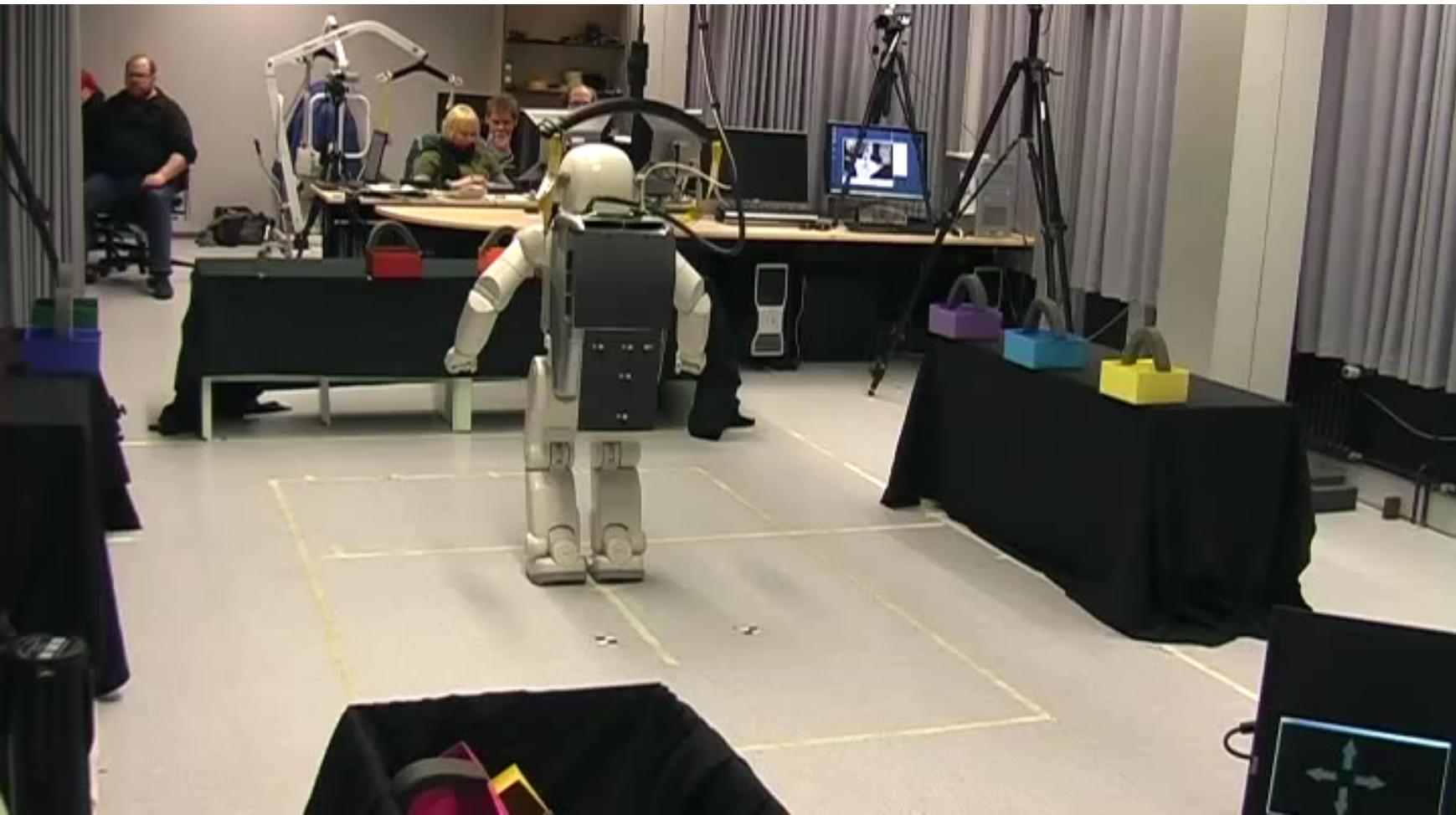
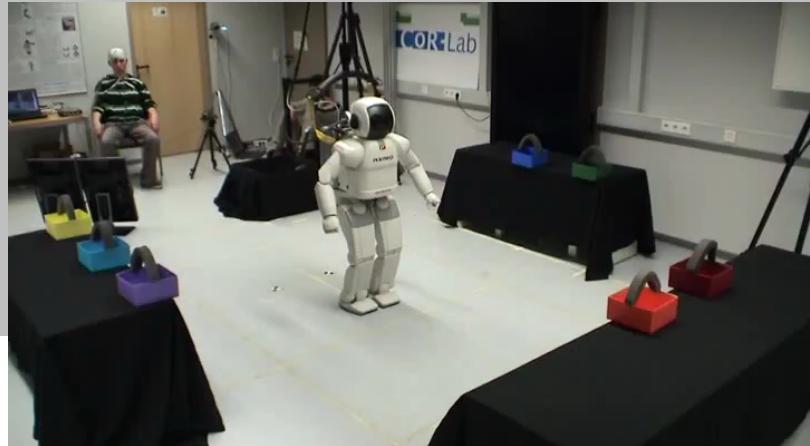


- Führte eine bestimmte Terminologie für den Ablauf ein:

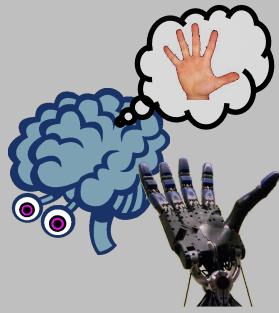
- Epoch Ein Datensegment, dass zu einem Stimulus gehört.
- Subtrial Das Aufleuchten aller Stimuli bzw. Zeilen und Spalten.
- Trial Mehrfache Wiederholungen eines Subtrials. Ein gesamter Trial wird zur Bestimmung eines Symbols herangezogen.
→ Die Anzahl der Subtrials pro Trial kann statisch oder dynamisch sein.



Beispiel: Mi und P300 in einem hybriden BMI

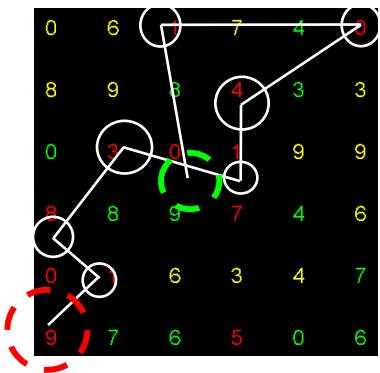


Fixation-Related Potential

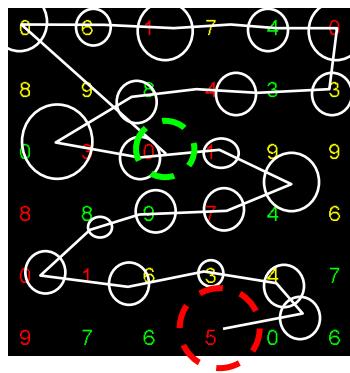


- Die 2 elementaren Augenbewegungen: Fixationen und Sakkaden
- **Eye-Mind Hypothese:** “high-level” Verarbeitungsstrategien sind an den Blickbewegungen ablesbar
- Blickbewegungen sind aufgabengeleitet

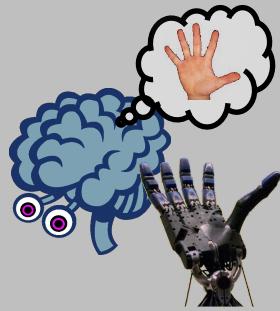
Finde die rote 9!



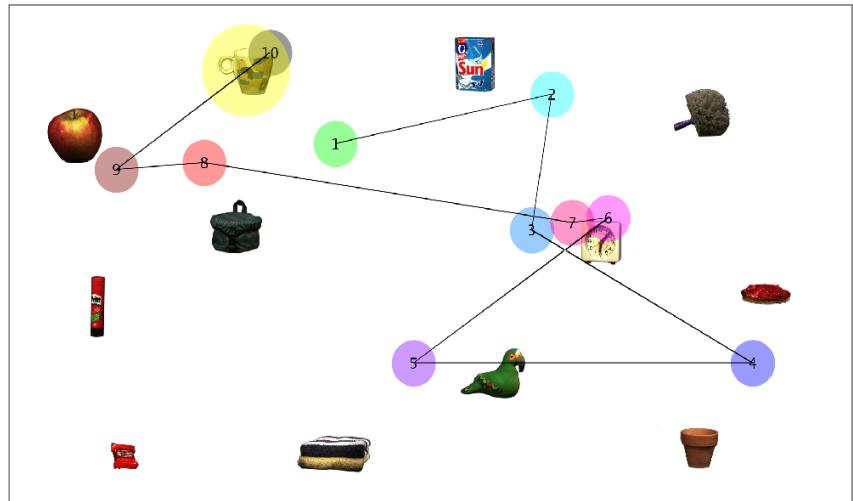
Finde die 5!



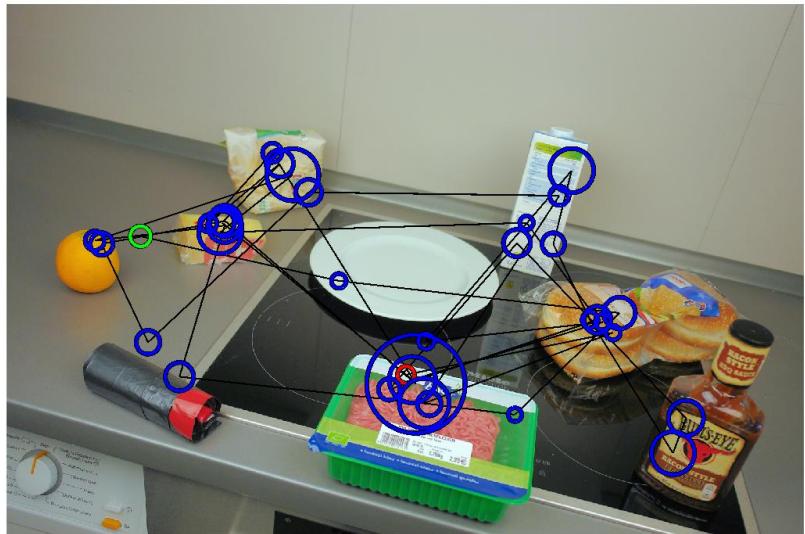
Fixation-Related Potential



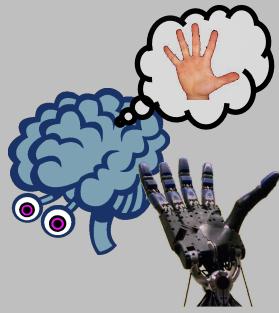
Einfache Suchaufgabe



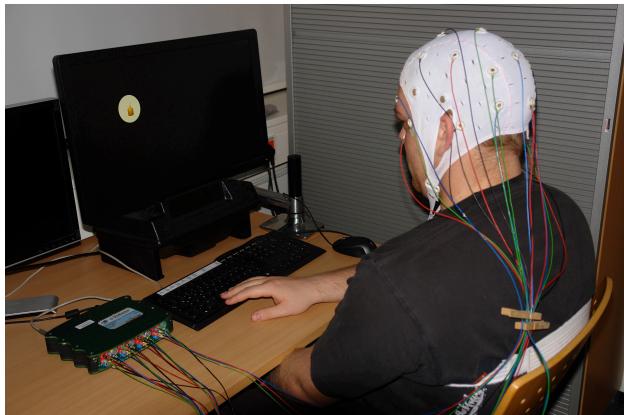
Komplexe Aufgabe ("Mache einen Hamburger")



Fixation-Related Potential



- FRP sind eng mit der P300 verwandt.
- Sind an die Onsets einer Fixation gelockt, nicht an Stimuli.
- Erfordern die gleichzeitige Messung von EEG und Blickbewegungsdaten → Eyetracking

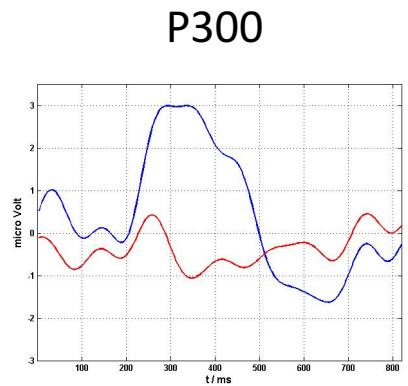
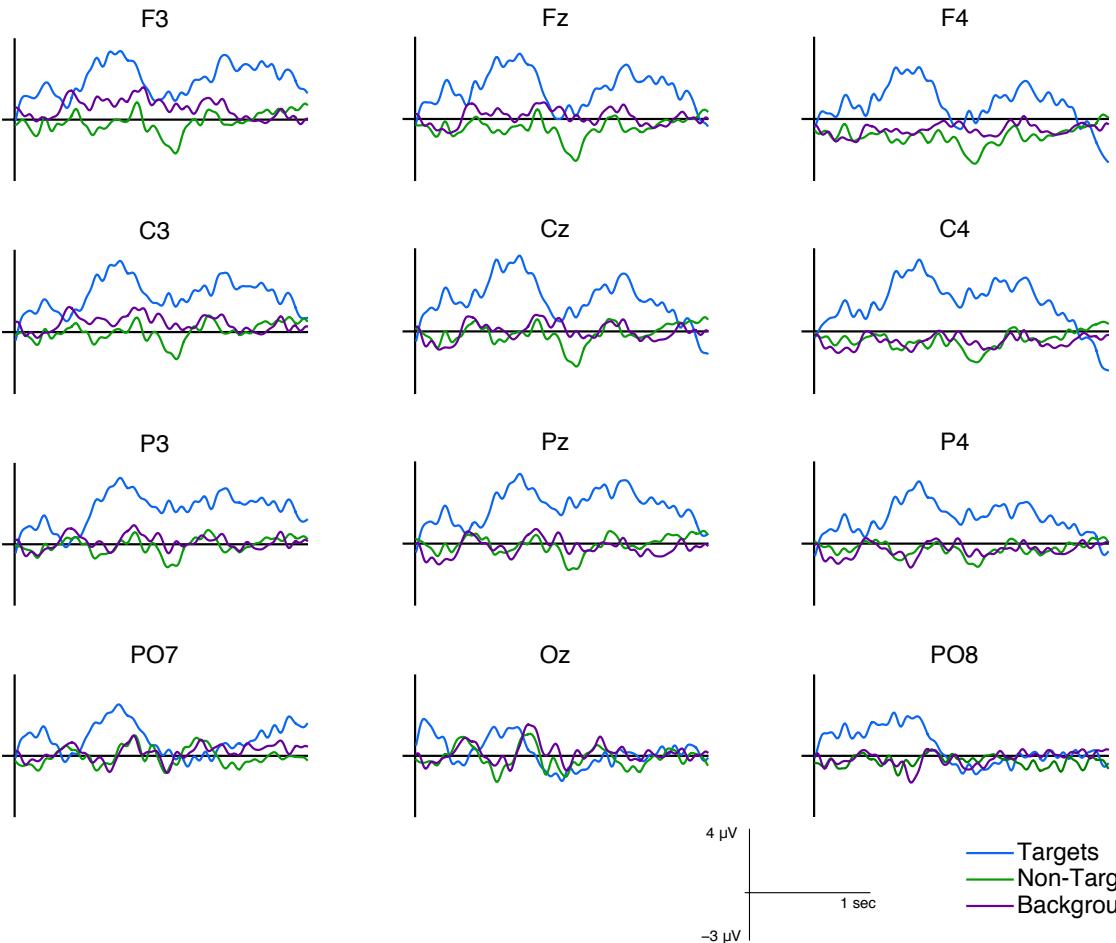
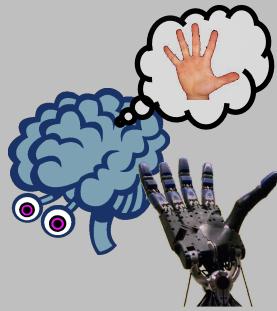


Remote Eyetracker

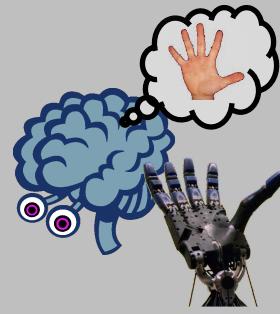


Head-Mounted Eyetracker

Fixation-Related Potential

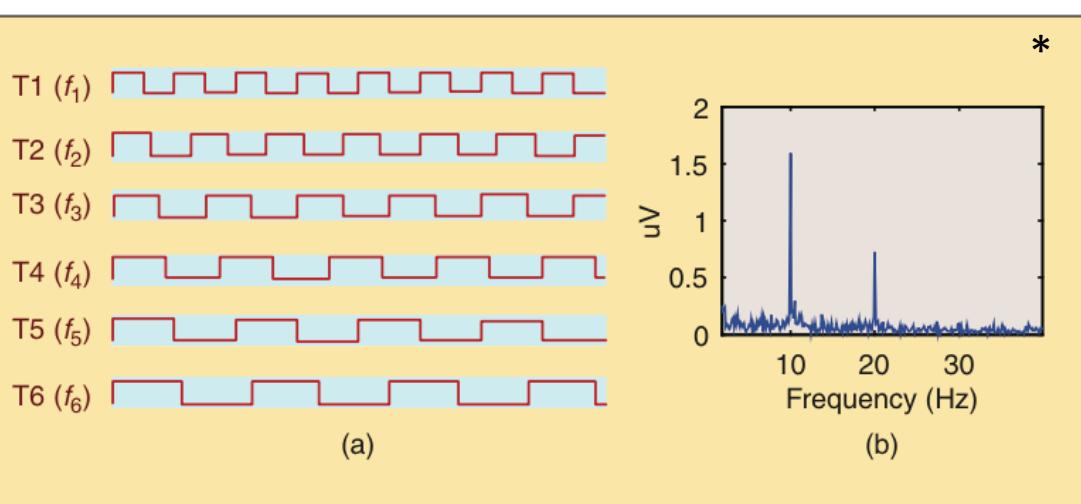
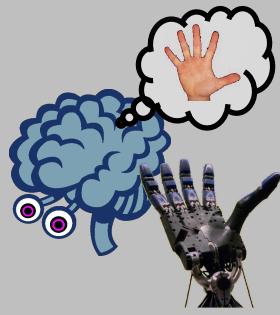


Steady State Visually Evoked Potentials (SSVEP)



- Sind eine neuronale low-level Antwort des primären visuellen Kortex auf visuelle Stimuli.
- Wenn diese in einer bestimmten Frequenz flickern, z.b. bei 17 Hz, findet man die gleiche Frequenz und ihre Harmonischen*, im EEG Signal über dem visuellen Kortex.
- Das Flickern geschieht (meist) entweder mittels
 - Schachbrettmustern auf dem Bildschirm ([Beispiel](#))
 - Leuchtdioden ([Beispiel](#))
 - Flickernde Objekte ([Beispiel](#))

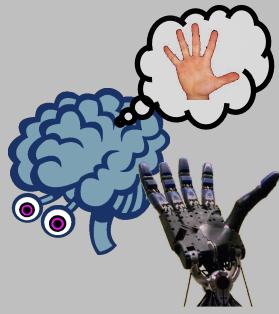
Steady State Visually Evoked Potentials (SSVEP)



(a) Beispiel für Frequenzen in einem SSVEP-basierten BMI

(a) Antwort auf einen Stimulus, der mit 10 Hz flackert.

Steady State Visually Evoked Potentials (SSVEP)



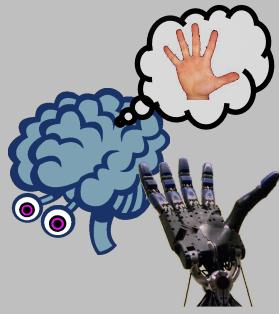
Vorteile

- SSVEPs sind besonders einfach zu dekodieren, ein simple Fouriertransformation (FFT) reicht aus.
- Keine komplizierten maschinellen Lernverfahren für die Klassifikation notwendig.
- Sie sind besonders robust, da das Signal ein (für EEG Verhältnisse) sehr gutes SNR hat.
- Sie müssen nicht erlernt werden (kein Benutzer-Training notwendig). *
- „Ready-to-use“ System

Nachteile

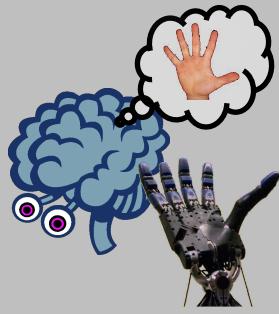
- Sie hängen vollständig von visuellen Stimuli ab, dieser muss mit den Augen fixiert werden.
→ Benutzer dieses Systems müssen noch über die Kontrolle der Augenmuskulatur verfügen.
- In diesem Sinne ist ein SSVEP-basiertes System ein **abhängiges** (dependent) BMI.
MI und SCP Systeme sind dagegen unabhängig (independent).
- Nur eingeschränkt viele Auswahlmöglichkeiten (Anzahl gleichzeitig flackernder Stimuli) verwendbar.
- Das Flackern kann epileptische Anfälle auslösen.

Codebook Visually Evoked Potentials (cVEP)



- cVEP sind eng mit den SSVEP verwandt
- Stellen wiederum eine low-level Antwort des primären visuellen Kortex auf einen flickernden Stimulus dar.
- Daraus ergibt sich wiederum ein abhängiges BMI.
- Unterschied zu SSVEP: Das Flickern ist nicht durch Frequenzen definiert, sondern durch einen **binären Codebook Vektor**.
- Dieser Codebook Vektor bestimmt, wann ein Stimulus „an“ (hell) bzw. „aus“ (dunkel) ist.
- Die binäre Zahlenfolge ist eine m-Sequenz – diese ist zu jeweils zyklisch „verschobenen“ Folgen maximal unkorreliert.

Codebook Visually Evoked Potentials (cVEP)



Beispiel

Stimulus	Frames							=Darstellungsframes des Monitors, z.B. 60 Hz)
	0	1	2	3	4	5	6	
0	0	1	0	0	1	1	1	Initialer Codebook Vektor
1	0	0	1	1	1	0	1	Zyklisch geshiftete Versionen des initialen Vektors (Faktor 2)
2	1	1	1	0	1	0	0	
3	1	0	1	0	0	1	1	

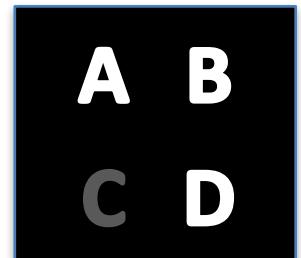
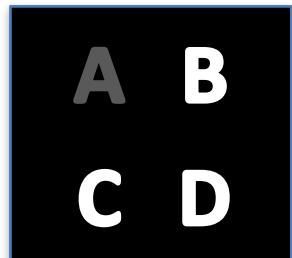
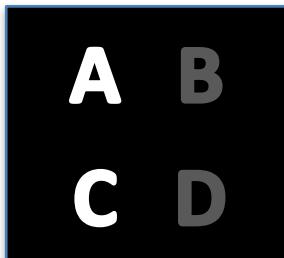
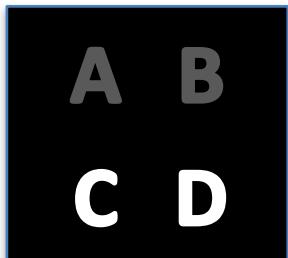
Frame 0

Frame 1

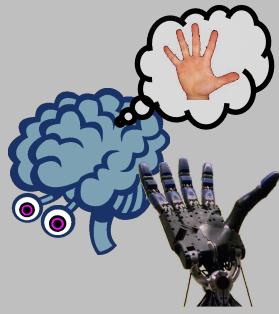
Frame 2

.....

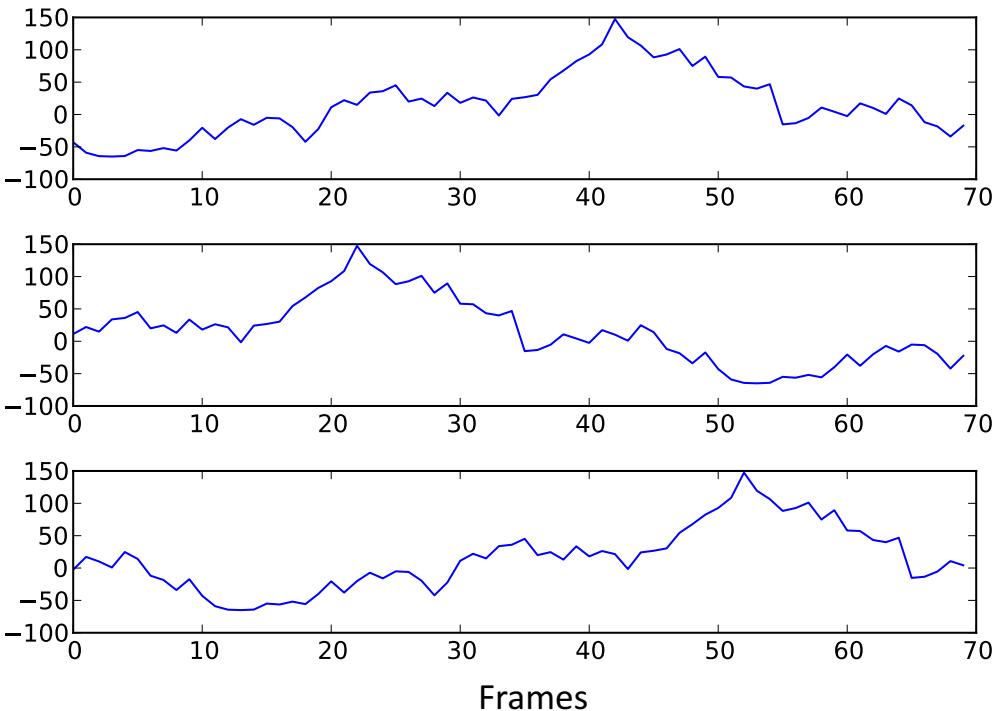
Frame 6



Codebook Visually Evoked Potentials (cVEP)



- Die EEG Daten, also die kortikale Antwort auf die Stimuli, sind analog zu den verschobenen Codebook Vektoren sind ebenfalls (zeitlich) verschoben.

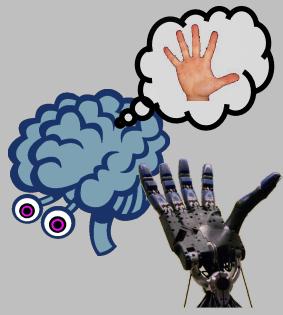


→ Diese Eigenschaft erlaubt es, das Datensegment des ersten Stimulus als Template zu verwenden.

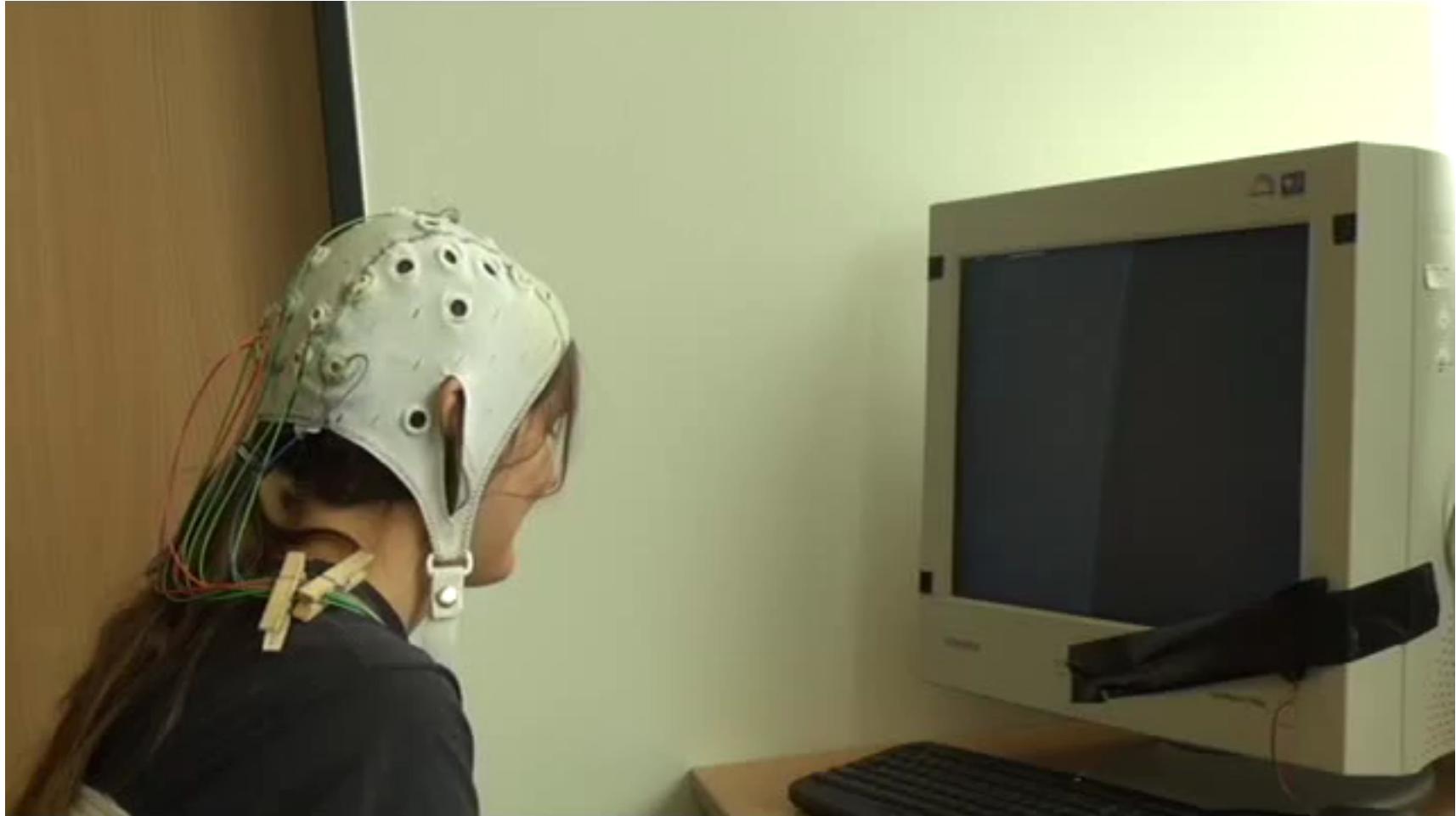
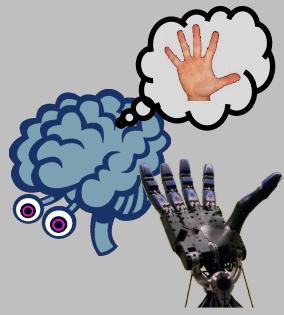
→ Das Dekodieren des Zielstimulus geschieht durch Bestimmung des passenden Shifts.

Ein cVEP BMI muss allerdings für jeden Benutzer kalibriert werden.

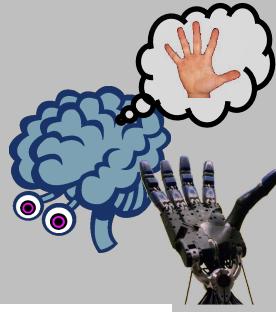
Beispiel: cVEP - Speller



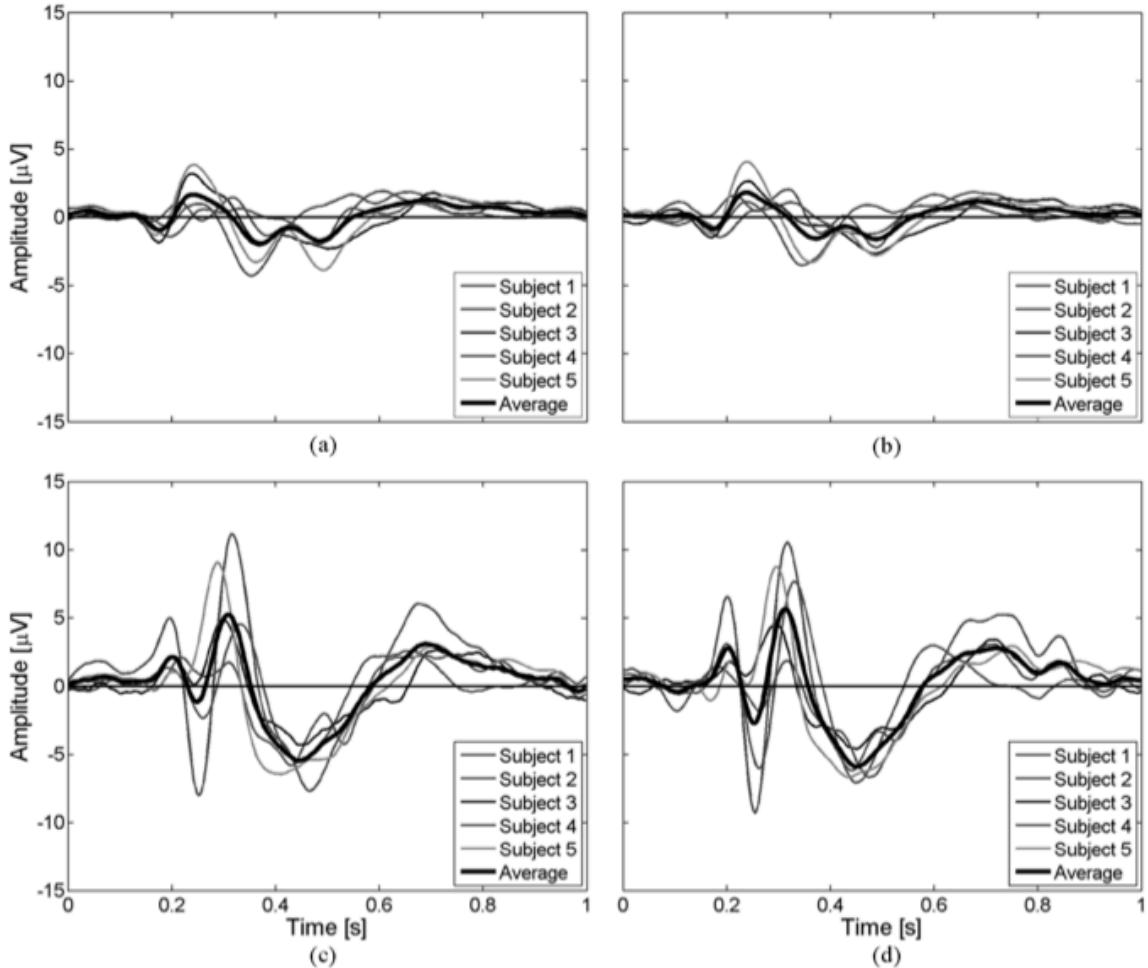
Beispiel: cVEP - virtual Agent



Error Potentials (ErrP)

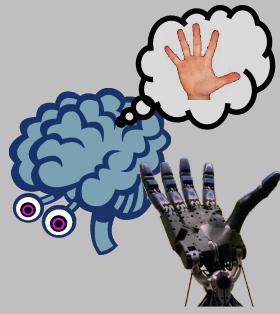


Korrekte
Antwort des
Systems (BMI:
Dekodierung
korrekt)



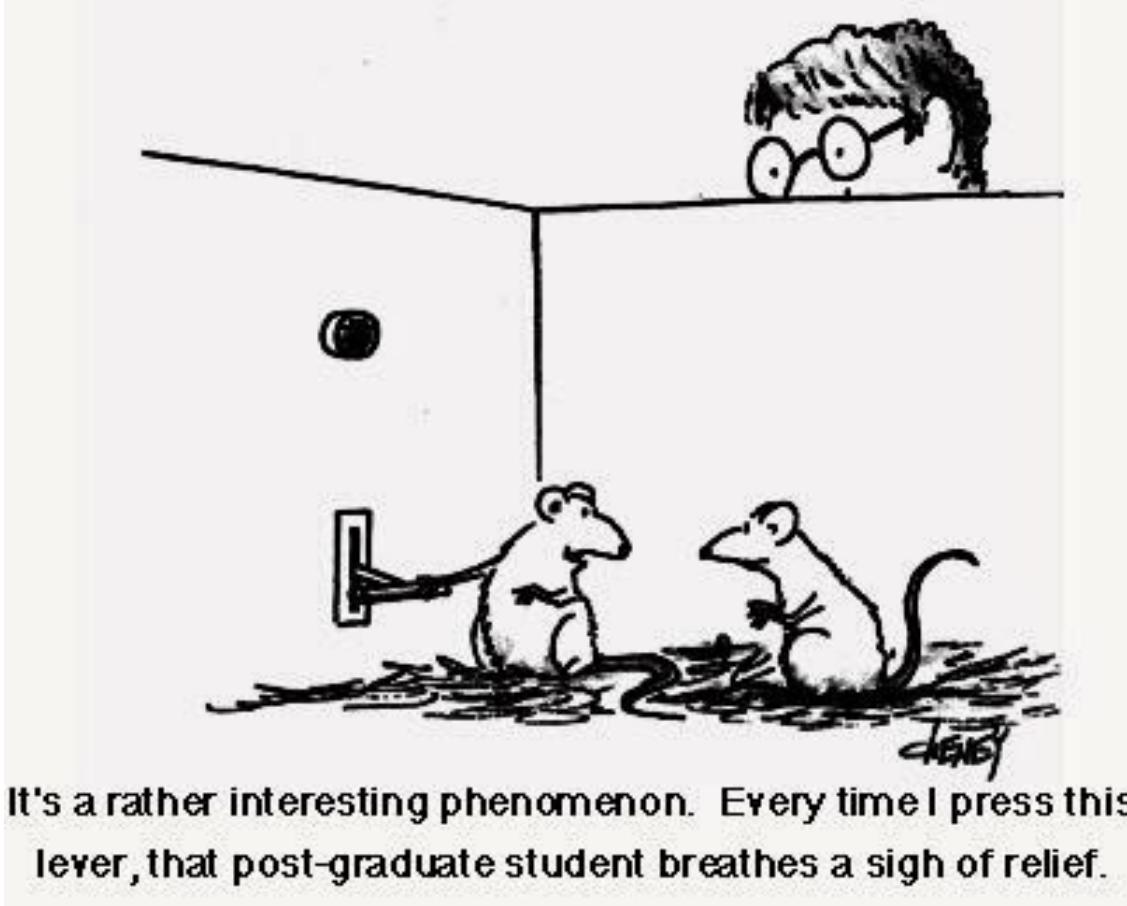
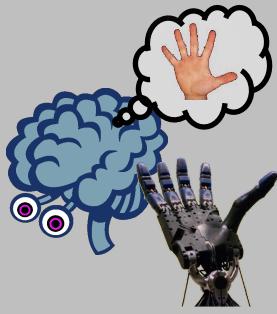
Fehlerhafte
Antwort des
Systems
(Dekodierung
fehlerhaft, z.B.
links statt rechts
bei MI)

Wichtige Begriffe



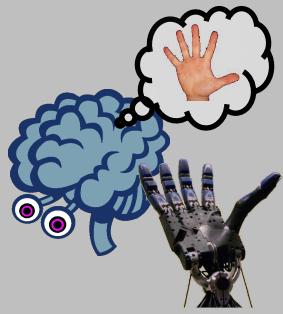
- **Asynchrones BCI**
 - Benutzer kann Zeitpunkt des Befehls selbst bestimmen
- **Self-paced Operation**
 - Benutzer kann BCI selbst an- und abschalten
- **Aktives vs. passives BCI**
 - Aktiv → Benutzer versucht aktiv Muster zu erzeugen bzw. lenkt seine (meist visuelle) Aufmerksamkeit (zB. MI, P300, VEP)
 - Passiv → Zustand des Benutzer wird passiv gemessen, ohne bewusste Aktivität des Benutzers
- **Abhängiges vs. unabhängiges BCI**
 - Erfordert (oder nicht) Kontrolle über die Augenbewegungen.

Design und Durchführung von Experimenten



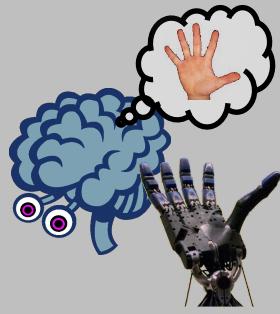
It's a rather interesting phenomenon. Every time I press this lever, that post-graduate student breathes a sigh of relief.

Der Ausgangspunkt: Die Hypothese



- Vermutung über Ursache-Wirkung Zusammenhänge
- Basierend auf bestehender Evidenz, die neue Fragestellungen aufwirft
- Hypothesen sollten über den aktuellen Forschungsstand hinausgehen
- z.B.:
 - Aus einer bestehenden Theorie abgeleitete Aussagen („Erweiterung“)
 - Aus einer noch nicht abgesicherten Theorie abgeleitete Aussagen („Verbesserung“)
 - Zu einer bestehenden Theorie widersprüchliche Aussagen („Alternative“)
- Wichtig: Hypothese ≠ Theorie !

Abhängige und unabhängige Variablen



Ursache

Koffein

Gewaltfilme

Müdigkeit

verbessert

führen zu

verschlechtert

Wirkung

Kurzzeitgedächtnis

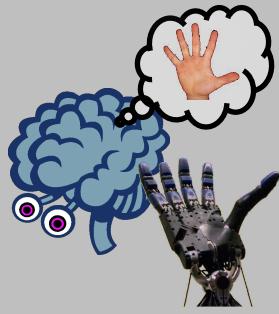
aggressivem Verhalten

BMI Klassifikation

Unabhängige Variablen (UV)
Faktoren

Abhängige Variablen (AV)

Operationalisierung



Koffein



Gedächtnis

Kein Kaffee
vor dem Experiment

Zwei Tassen Kaffee
vor dem Experiment

Anzahl erinnerter Items von einer
Liste mit 8 Wörtern

Gute Operationalisierung ???

Koffein



Gedächtnis

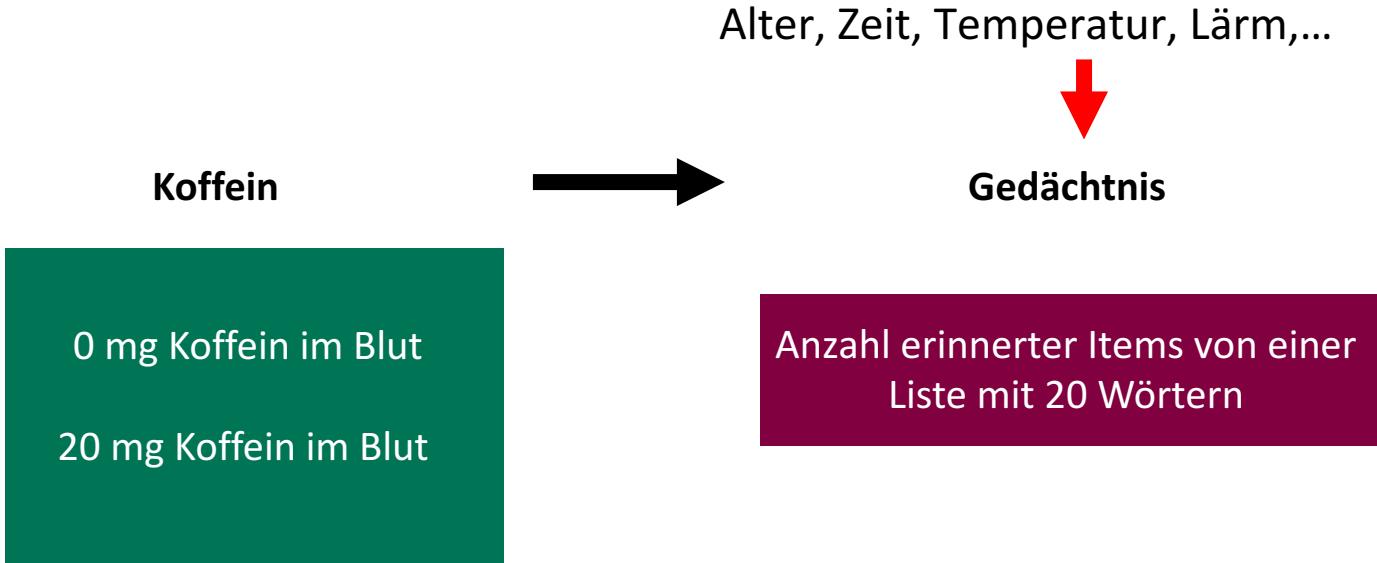
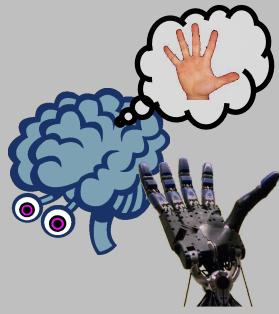
2 Stufen
einer UV,
nicht
mehrere!

0 mg Koffein im Blut

20 mg Koffein im Blut

Anzahl erinnerter Items von einer
Liste mit 20 Wörtern

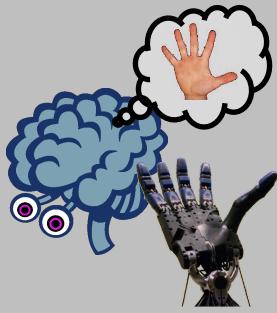
Operationalisierung



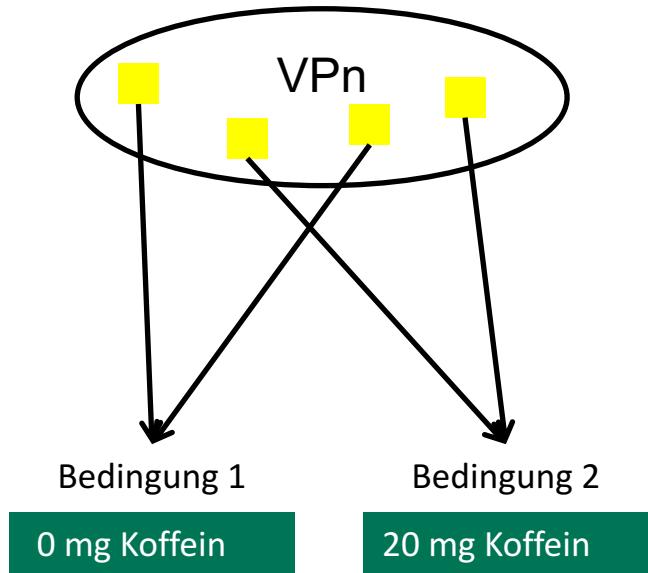
Störvariablen:

- Weitere Variablen beeinflussen AV → experimentelle Kontrolle durch Eliminierung, Konstanthaltung, Randomisierung, ...

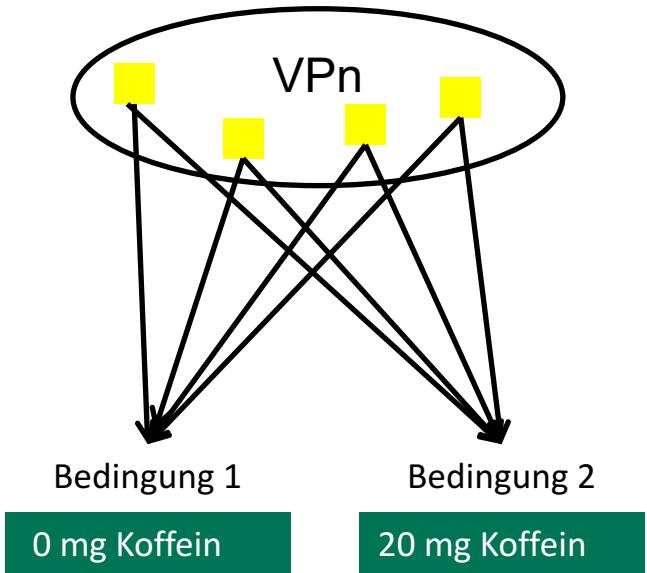
Bedingungen und Zuordnung von VPn



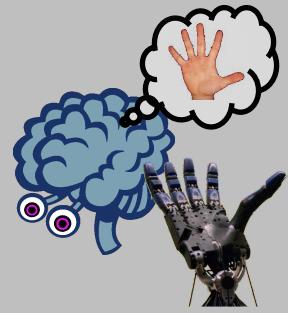
Between-subject Design



Within-subject Design



Kontrollbedingung / “Placebo-Effekt”



Koffein



Gedächtnis

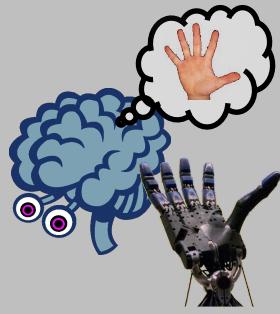
0 mg Koffein im Blut

20 mg Koffein im Blut

Anzahl erinnerter Items von einer
Liste mit 20 Wörtern

z.B. eine Tasse entkoffeinerter
Kaffee

Übungen



- 15 SWS → 2 Tage als Block

Terminvorschläge (es werden 4 Termine gebraucht, aktuell 36 Teilnehmer)

Mo + Di 22. + 23. Februar (2. Woche nach Ende der Vorlesungen)

29. + 30. Februar

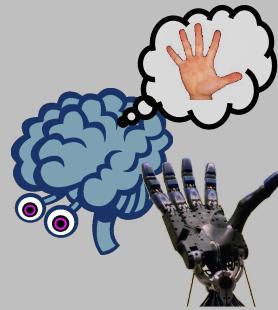
07. + 08. März

14. + 15. März

21. + 22. März (letztmöglicher Termin)

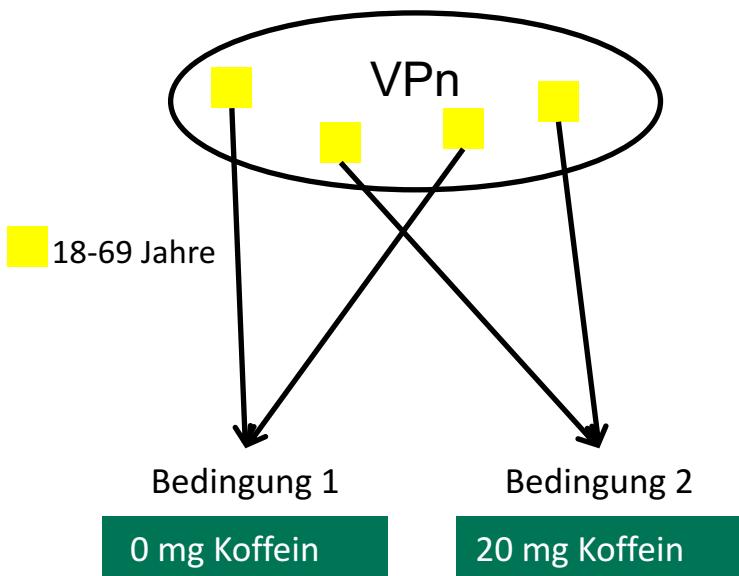
Die Übungen werden im CITEC im EEG-/ Eyetrackinglabor stattfinden (3.044/45).

Randomisiertes vs. parallelisiertes Design (within-sbj)



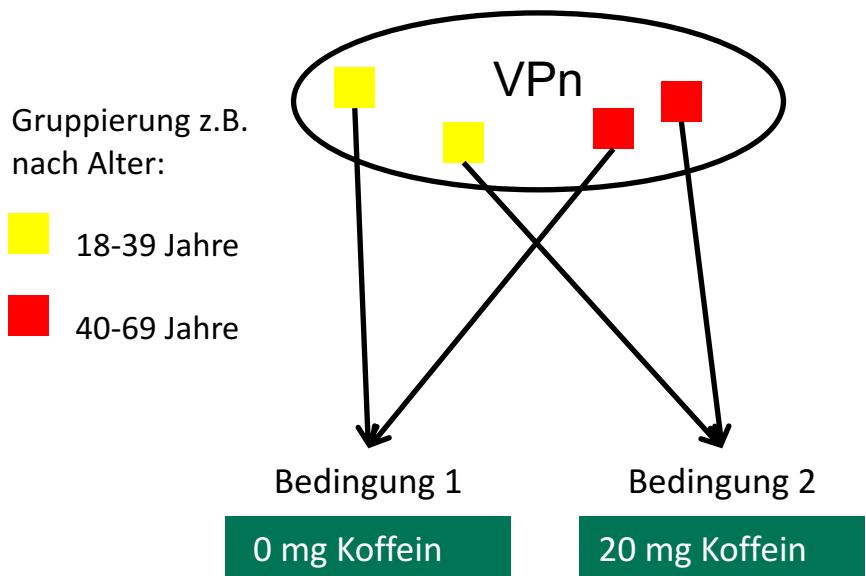
Vollständig randomisierte Zuteilung der VPn zu den Versuchsgruppen

Annahme: Die Gesamtgruppe der VPn ist homogen*, Unterschiede sind rein zufällig und haben keinen Einfluss auf die AV



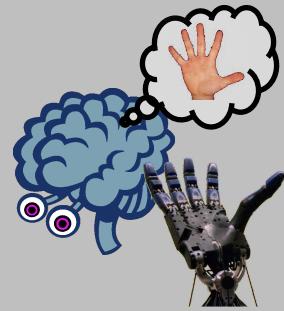
Einteilung der VPn in Gruppen („Blocks“) und anschließend randomisierte Zuteilung aus jedem Block zu jeder Bedingung.

Annahme: Die Gesamtgruppe der VPn ist nicht homogen*, Unterschiede sind echt und beeinflussen die AV



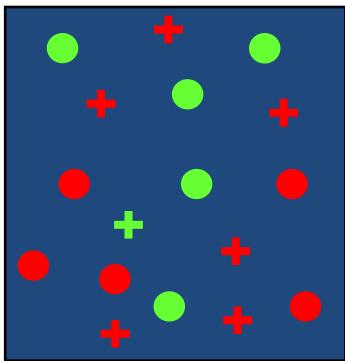
*mit Bezug auf die AV

Messwiederholungen (Beispiel)

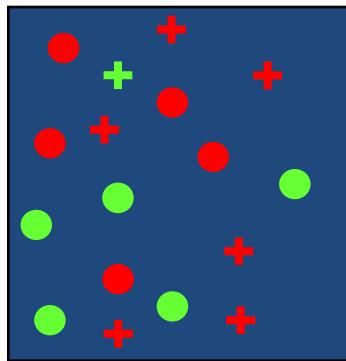


Aufgabe: „Finde das grüne Kreuz“

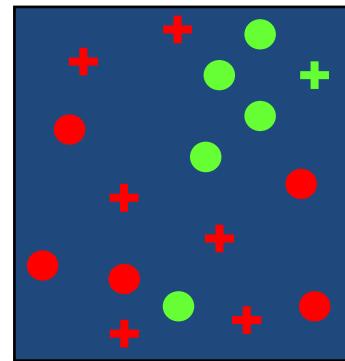
Trial 1



Trial 2

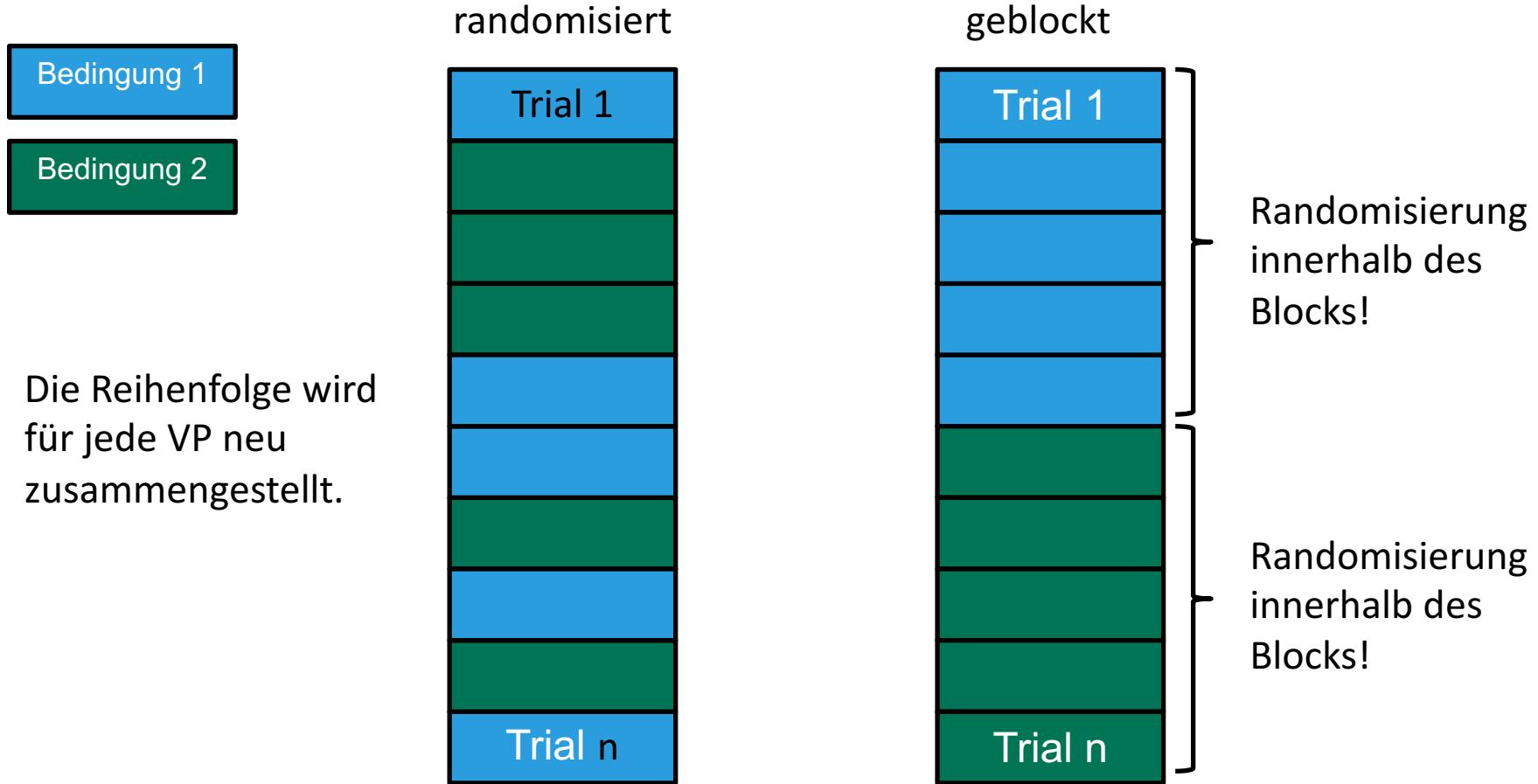
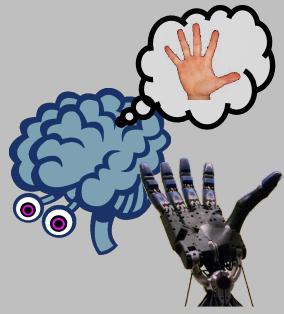


Trial 3

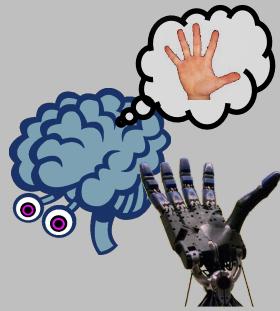


- Bei nur einem Durchlauf können Faktoren wie Position des Zielstimulus im Bild, Art/ Farbe der Nachbarn usw. das Ergebnis beeinflussen, die nicht direkt mit der Aufgabe zusammen hängen.
- Wiederholungen der Aufgabe (Trials) mit zufälligen, verschiedenen Anordnungen der Objekte im Bild beseitigen im Mittel solche unerwünschten Effekte.

Blockdesign vs. Randomisierung

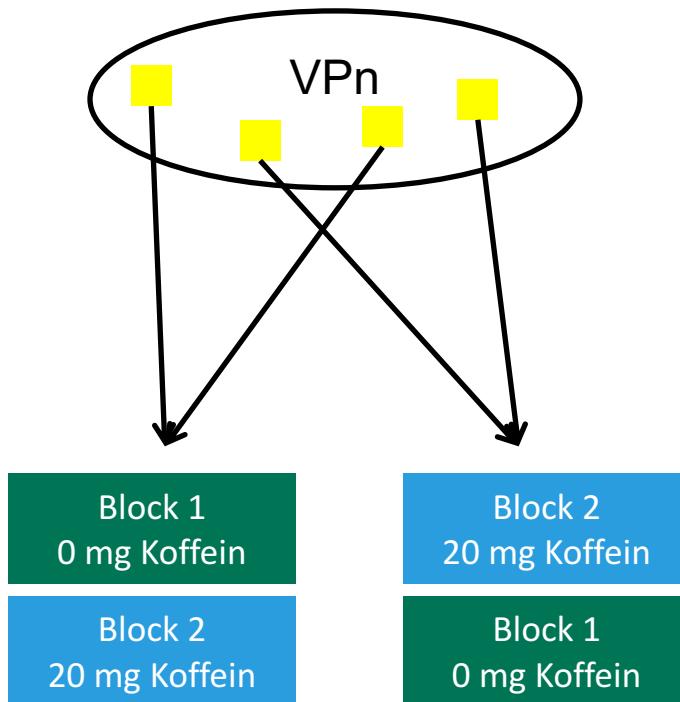


Counterbalancing im within-sbj. Design

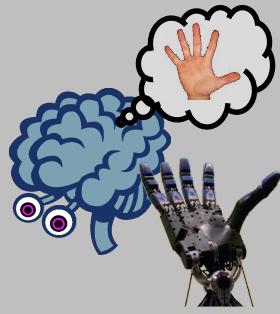


- Führen die VPn jeweils alle Bedingungen durch, muss man ausschließen, dass die **Reihenfolge** der Durchführung nicht ungewollt einen Effekt erzeugt, der nichts mit den eigentlichen Bedingungen zu tun hat.

Bei einem geblockten Design:

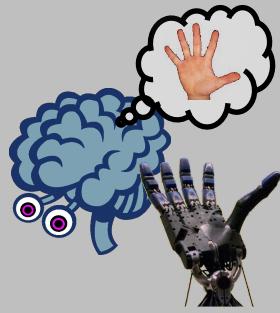


Vorteile des **within-subject** Designs



- Bessere Kontrolle der (zufälligen) Unterschiede zwischen den VP
- → in unserem Kaffee-Bespiel haben einige VP generell ein besseres Gedächtnis als andere
- Das Ergebnis der VP in einer Bedingung wird direkt mit dem Ergebnis der selben VP in der 2. Bedingung verglichen
- Jede VP ist quasi ihre eigene „Kontrolle“
- Die Wahrscheinlichkeit statistisch signifikante Effekte zwischen den Bedingungen zu finden ist bei within-sbj. Designs höher als bei inbetween-sbj. Designs.
- Within-sbj. Designs werden auch „repeated-measures“ Designs genannt.

Multi-faktorielles Design (Faktor = UV)



Design mit mehreren UV, z.B.

UV 1: Koffein

0 mg Koffein im Blut
20 mg Koffein im Blut

UV 2: „Sattheits-Grad“

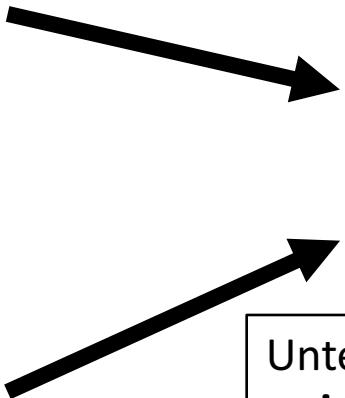
70 mg Glucose im Blut
100 mg Glucose im Blut

2 UV mit jeweils 2 Stufen:

2 x 2 Design

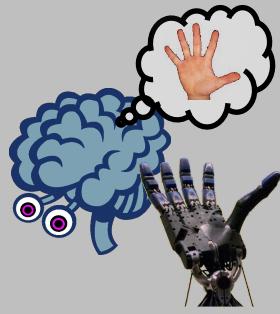
Gedächtnis

Anzahl erinnerter Items von einer
Liste mit 20 Wörtern

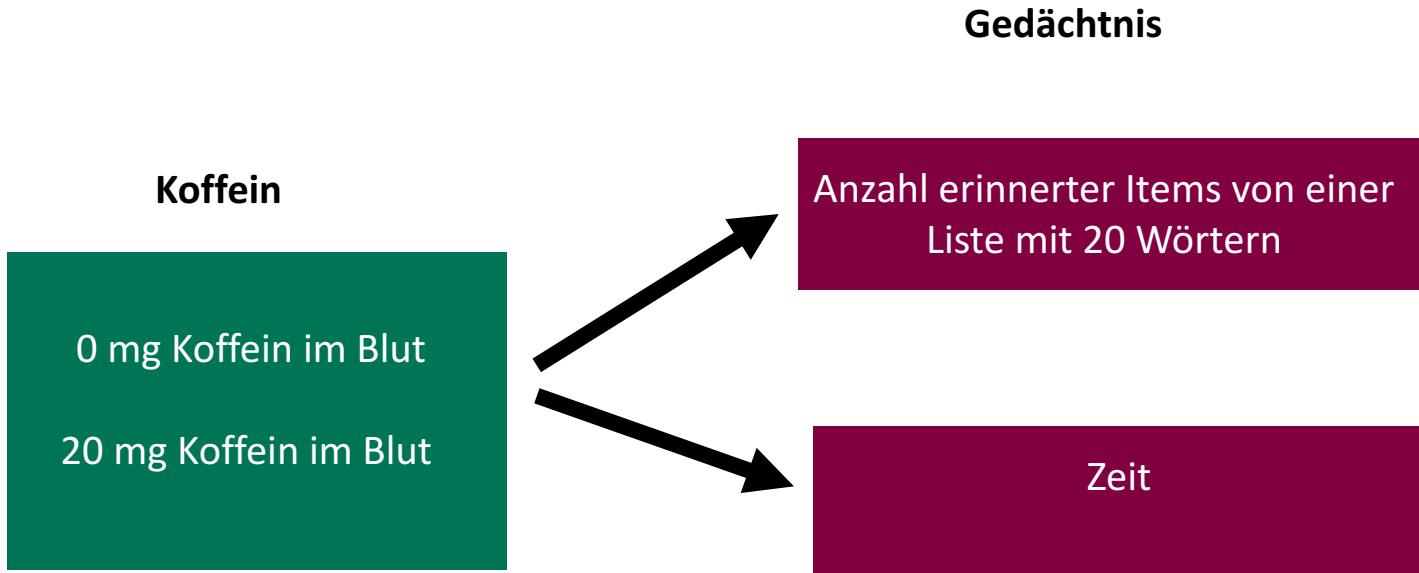


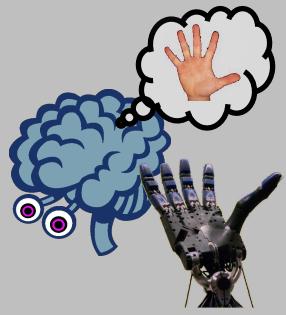
Untersucht wird hier, ob es eine **Interaktion zwischen den Faktoren** (UV) gibt, also z.B. ob eine „satte“ VP mit Koffein mehr Items erinnert als eine „hungriige“ mit Koffein.

Multi-variates Design



Design mit mehreren AV, z.B.

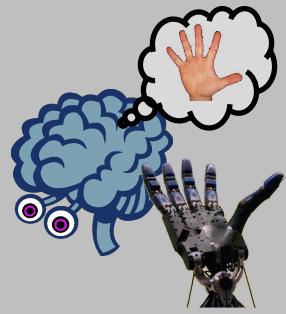




Weitere relevante Fragen für die Durchführung von Experimenten

- Anzahl der Vpn ? **Bestimmung der optimalen Stichprobengröße**
- **Abhängige/unabhängige** Messungen: Die gleichen Vpn für die Bedingungen?
- Übungsdurchgänge ?
- Messwiederholung: Ein oder mehrere Durchgänge pro Bedingung?
- Reihenfolge der Trials → geblockt oder randomisiert ?
- Reihenfolge der Blöcke → variieren
- Reihenfolge der Trials innerhalb der Blöcke → randomisieren

Blind- und Doppelblind Studien



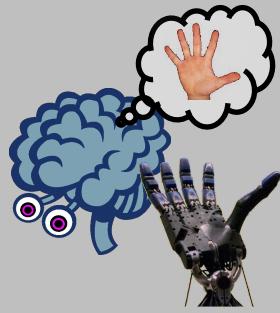
Problem

- VPn können durch
 - das Wissen um die Fragestellung/Methodik einer Studie
 - wissentliche und/oder unwissentliche Hinweise des Experimentators bei der Beschreibung/ Erklärung der Aufgabe

beeinflusst werden → Ergebnisse können so „verfälscht“ werden.

Beispiel:

Blind- und Doppelblind Studien



Lösung

- Blindes oder doppelblindes Studiendesign.

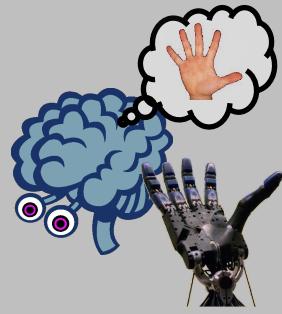
Einfach blindes Design

- Der VP wird keinerlei Information über das Ziel, den Zweck oder die Fragestellung der Studie gegeben. Der Experimentator selbst kennt jedoch alle Fakten.

Doppelblindes Design

- Wie oben, jedoch hat der Experimentator selbst keinerlei Wissen über die Hintergründe der Studie. Der Designer der Studie darf die Experimente also nicht selbst durchführen.

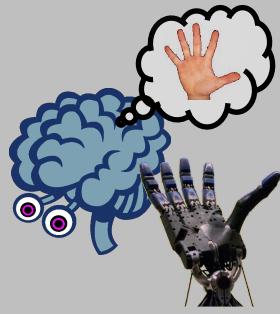
Video (Stress Studie an der ETH Zürich)



- **Einfach-blinde** Studie zum „Stress-Level“
- **Fragestellung des Experiments:**
Wie verändern sich verschiedene physiologische Parameter bei unterschiedlichen Graden von Stress
- **Aber - Information für VP:**
Es geht nur um das Lösen von arithmetischen Aufgaben.



Stichproben



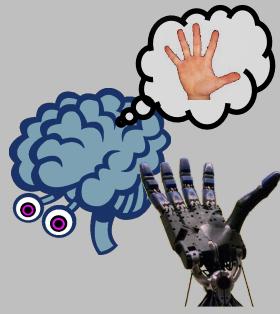
Grundgesamtheit (Population)

- Alle potentiell untersuchbaren Einheiten, die ein gemeinsames Merkmal aufweisen, z.B. alle Studierenden der Uni Bielefeld

Stichprobe

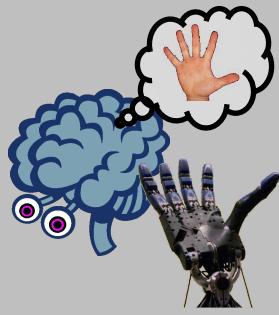
- Teilmenge einer Population, die die untersuchungsrelevanten Eigenschaften möglichst genau abbildet → „Miniaturbild“ der Population
- Zufallsstichprobe: Zufällige Auswahl von Individuen aus der Population ohne Berücksichtigung spezifischer Merkmale (jedes I. hat die gleiche Wahrscheinlichkeit aus der Population gezogen zu werden)

Von der wissenschaftlichen zur statistischen Hypothese



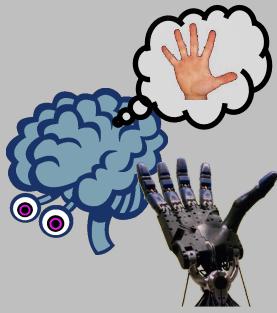
- Wissenschaftliche (inhaltliche) Hypothese:
Koffein verbessert das Kurzzeitgedächtnis.
- Übertragung in die „Sprache“ der Statistik (informell)
 - Die Anzahl erinnerter Items wird in Bedingung 1 (0 mg Koffein) im Mittel kleiner sein als in Bedingung 2 (20 mg Koffein)
- Dies führt zu 2 statistischen Hypothesen für diese Studie: H_0 und H_1 .
 $H_0 : \mu_0 = \mu_1$ Nullhypothese
 $H_1 : \mu_0 < \mu_1$ Alternativhypothese
- H_1 ist somit das statistische Pendant der wissenschaftlichen Hypothese.

Die Nullhypothese



- Die Nullhypothese ist eine **Negativ-Hypothese**, die behauptet, dass gerade die zur Alternativhypothese (also der eigentlichen Fragestellung) komplementäre Aussage richtig ist.
- Sie drückt also nur aus, **dass die aufgestellte Annahme falsch ist**.
- Die Nullhypothese beinhaltet keinen weiteren, konkurrierenden Zusammenhang (z.B. „Koffein fördert die Geschwindigkeit der Erinnerung“). Dies wäre dann eine weitere Alternativhypothese.
- Die Nullhypothese selbst hat im Prinzip keinerlei Informationsgehalt.
- Die Nullhypothese ergibt sich zwingend aus der Alternativhypothese.

Überprüfung der Hypothesen

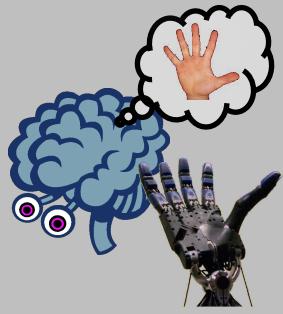


- Wie kann man ausschließen, dass **die Mittelwerte μ_0 und μ_1 sich aufgrund der experimentellen Bedingungen**, und nicht rein zufällig unterscheiden, also dass die Alternativhypothese H_1 als richtig akzeptiert werden kann?

→ **statistische Tests**

Wichtig: Experimentplanung an sich bezieht immer auch statistische Überlegungen mit ein!

Elementare statistische Kenngrößen



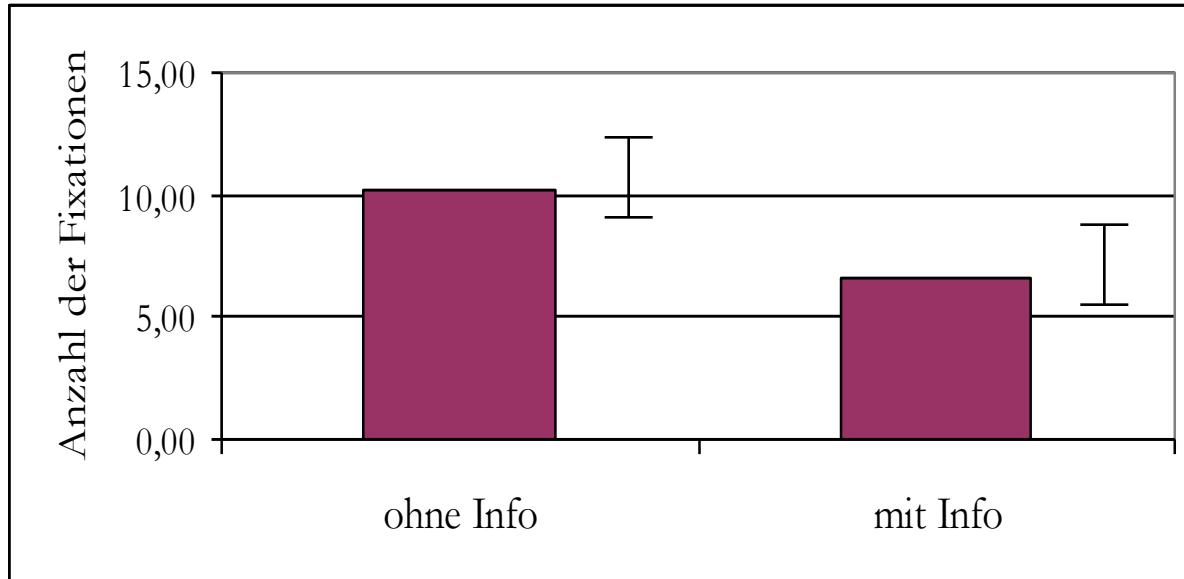
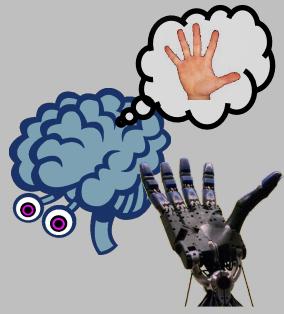
Mittelwert $\mu = \frac{1}{n} \sum x_i$

Varianz $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum (x_i - \mu)^2$

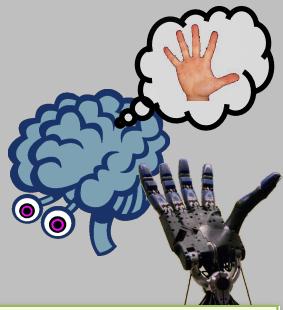
Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$

Standardfehler $SE = \sigma / \sqrt{n}$

Graphische Darstellung



Rohdaten zum Experiment



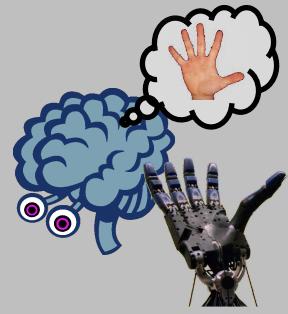
Trial-Nr.	Ohne Vorinformation über Farbe									Mit Vorinformation über Farbe								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		

Vp-Nr.
↑

Mittelwerten für Bedingungen

	Ohne Vorinformation über Farbe	Mit Vorinformation über Farbe
1		
2		
3		
4		
5		

Test der Unterschiedshypothese (Anzahl der Fixationen sinkt mit Info)



	Ohne Info (Merkmal A)	Mit Info (Merkmal B)
1	9	7
2	11	7
3	9	7
4	14	6
5	8	6

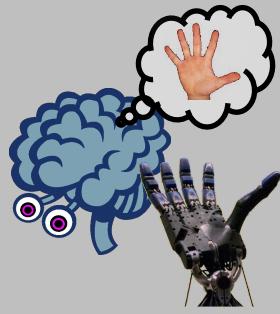
Problem

Ist der numerische Unterschied

durch Zufall bedingt

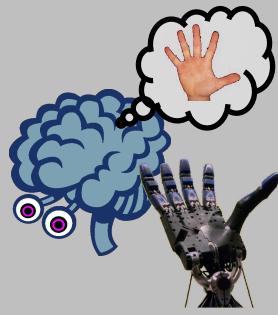
durch Variation der UV bedingt

T-Test für abhängige Stichproben



Problem

- Wir messen Merkmal A und B an n Individuen aus einer Population.
- Wie können wir aufgrund dieser Stichprobe prüfen, ob die Mittelwerte von A und B in der Population gleich sind?
- Die Hypothese, daß kein Unterschied vorhanden ist, nennt man die *Nullhypothese*.
- Die Nullhypothese lautet also: $E(A) = E(B)$, wobei $E(A)$ und $E(B)$ die Mittelwerte von A und B in der Population sind (E ist *Erwartungswert*).
- Diese Nullhypothese wollen wir prüfen.

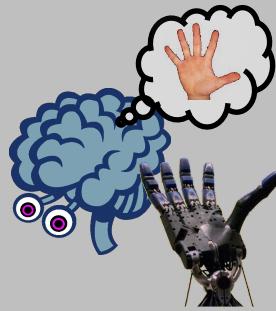


T-Test für abhängige Stichproben

Verfahren

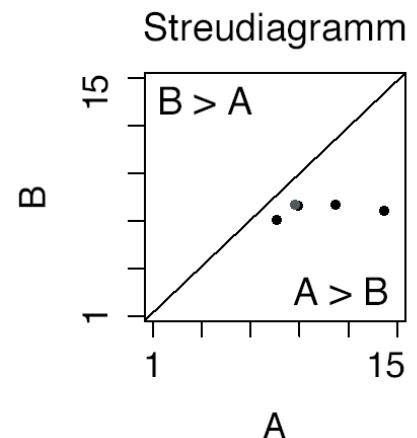
- Man berechne die Differenzen $D = A - B$. Warum?
 - Weil die Differenzen unter der Nullhypothese einen Mittelwert von Null haben sollten.
- Wenn die Nullhypothese allerdings nicht zutrifft, weicht der Mittelwert der Differenzen systematisch von der Null ab:
- Wenn die Populationsmittelwerte gleich sind, erwarten wir eine Differenz von Null. Sonst jeweils eine positive oder der negative Differenz:
 - Wenn $\mu_A = \mu_B$, so erwarten wir: $D= 0$
 - Wenn $\mu_A > \mu_B$, so erwarten wir: $D>0$
 - Wenn $\mu_A < \mu_B$, so erwarten wir: $D<0$.
- Die beiden letzten Fälle unterscheiden wir nicht, sondern wir untersuchen nur, ob der Mittelwert der Differenzen von Null abweicht.

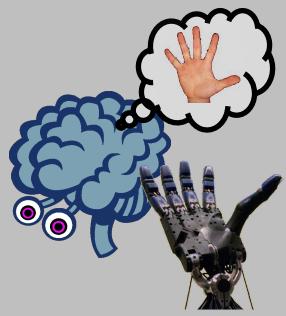
T-Test für abhängige Stichproben



Verfahren

- Um die Unterschiede zwischen den Merkmalen A und B einschätzen zu können, sollten die x- und y-Achse des Streudiagramm die gleiche Skala haben. Die Hauptdiagonale (dort ist $A=B$) erleichtert die Interpretation: Für die Punkte links oberhalb gilt $B > A$, für die Punkte rechts unterhalb gilt $A > B$.
- Wenn die Mittelwerte von A und B in der Population gleich sind, erwarten wir annähern gleich viele Punkte links oberhalb wie rechts unterhalb der Diagonalen und etwa gleiche Abstände von der Diagonalen.
- Um die Abstände von der Diagonalen zu quantifizieren bilden wir Differenzen





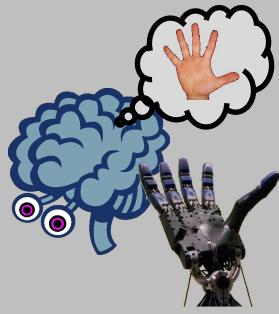
T-Test für abhängige Stichproben

Verfahren

- Wir bilden also den
 - Mittelwert der Differenzen m (bei n Messwerten),
 - ihre Standardabweichung s
 - und den Standardfehler $s_n = s / \text{sqr}(n)$
- **Teststatistik t berechnen**
 - Wie weit weicht der Mittelwert m von 0 ab?
 - Da wir Schwankungen in m mit dem Standardfehler messen, berechnen wir die Abweichung von m von der Null in Einheiten des Standardfehlers.
 - Die entsprechende *Teststatistik* nennen wir t :

$$t = m / s_n = m / (s / \text{sqr}(n))$$

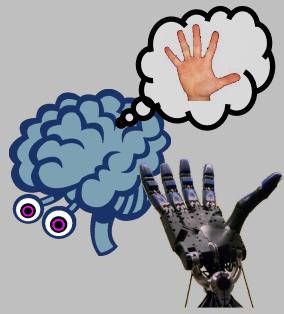
T-Test für abhängige Stichproben



p-Wert ermitteln

- Ist die Abweichung von m (bzw. von t) von der **Null statistisch signifikant?**
- Das bedeutet: Wie leicht können Abweichungen in t , die mindestens so groß sind wie die Beobachtete, durch Zufall auftreten (d. h. wenn die Nullhypothese zutrifft)?
- Wenn die beobachteten Abweichungen unter der Nullhypothese leicht auftreten können, bezeichnet man die Abweichung als **nicht signifikant**.
- Wenn sie aber unter der Nullhypothese sehr unwahrscheinlich sind, bezeichnet man sie als **signifikant**.
- Um dies zu beurteilen, müssen den **p -Wert** bestimmen.

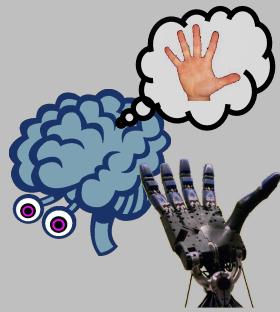
T-Test für abhängige Stichproben



p-Wert ermitteln

- Der p -Wert bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, einen im Betrag mindestens so großen Wert von t zu beobachten, wenn die Nullhypothese zutrifft.
- Diese Wahrscheinlichkeit kann man mit Hilfe der Verteilung von t (der sog. t - Verteilung mit $(n - 1)$ Freiheitsgraden (df ‘degrees of freedom’)) ermitteln.
- Die relevanten p -Werte dieser Verteilung findet man entweder in einer Tabelle oder mit Hilfe eines Statistikprogramms (oder Matlab, ...).

T-Test für abhängige Stichproben



Kritische Werte für t

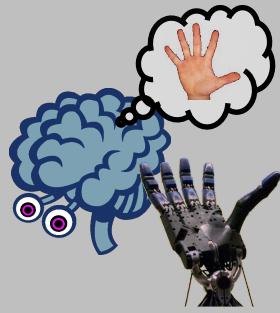
Wenn man den p -Wert nicht explizit ermitteln will, kann man umgekehrt fragen:

→ Wie groß muß $|t|$ sein, damit der p -Wert höchstens 0.05 ist - d.h. damit das beobachtete Ereignis unter der Nullhypothese höchstens mit Wahrscheinlichkeit 5% auftritt?

Dieser *kritische t-Wert (t^*)* bezeichnet also einen Schwellenwert, den t (Absolutbetrag) überschreiten muss, um ein statistisch signifikantes Ergebnis zu liefern.

t^* hängt von der Stichprobengröße n (also von den Freiheitsgraden, $n - 1$) ab.

T-Test für abhängige Stichproben



Formulierung der Ergebnisse

Falls $p > 0.05$: „Der Unterschied zwischen den Mittelwerten war nicht signifikant ($p > 0.05$).“

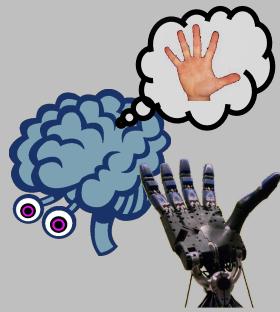
Falls $p < 0.05$: „Die Differenz der Mittelwerte war auf dem 5%-Niveau signifikant ($p = 0.02$).“

Interpretation der Ergebnisse

Nicht signifikantes Ergebnis: Dieses Ergebnis könnte durch Zufall zustande gekommen sein: Auch wenn die Nullhypothese stimmt, wäre ein so großer Wert von t leicht denkbar bar (z.B. in mindestens 5% der Fälle bzw. mit einer Wahrscheinlichkeit von >0.05).

Achtung! „Kann Zufall sein“ bedeutet nicht: „war Zufall“

T-Test für abhängige Stichproben



Interpretation der Ergebnisse

Signifikantes Ergebnis: Dieses Ergebnis ist unwahrscheinlich, wenn die Nullhypothese stimmt.

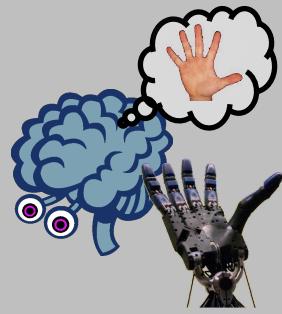
Wenn es unter der Nullhypothese (durch Zufall) in weniger als 5% der Fälle auftritt, nennen wir es signifikant auf dem 5%-Niveau.

Häufige Irrtümer

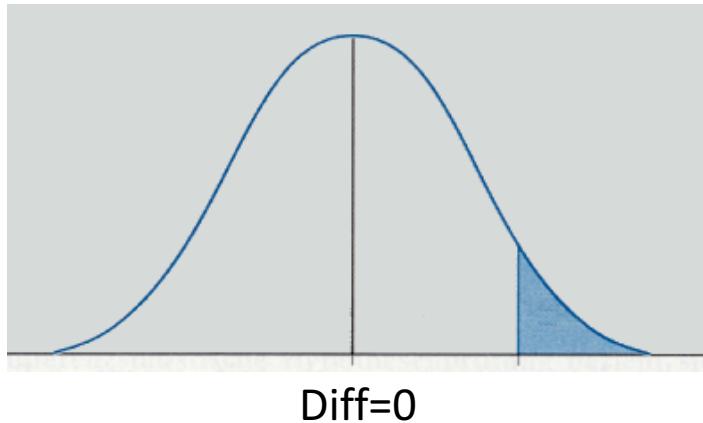
Ausschließlich *Beobachtungen* können wir Wahrscheinlichkeiten zuordnen (z.B. die Wahrscheinlichkeit, unter der Nullhypothese einen mindestens so großen Wert von t zu beobachten).

Hypothesen können wir *keine* Wahrscheinlichkeiten zuordnen! („Die Nullhypothese ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% richtig“ stimmt nicht)

T-Test für abhängige Stichproben

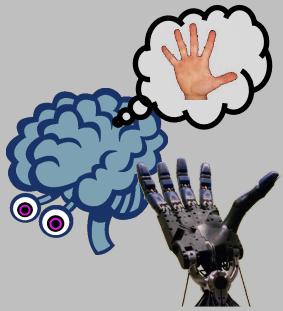


Wahre Differenz = 0 → Normalverteilung mit einer bestimmten Varianz



Test, ob gefundene Differenz zu dieser Verteilung gehört (zufällige Differenz) oder nicht (Differenz ist Effekt der Faktor-Variation)

Irrtumswahrscheinlichkeit (meist 5%) → Tabellenwert

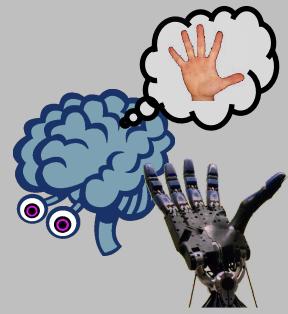


T-Test für abhängige Stichproben

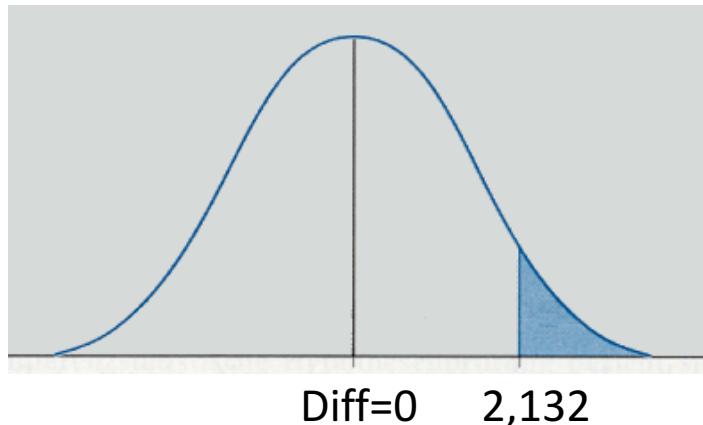
Tabelle D. Verteilungsfunktion der t-Verteilungen und zweiseitige Signifikanzgrenzen für Produkt-Moment-Korrelationen (zit. nach Glass, G.V., Stanley, J.C.: Statistical methods in education and psychology, p. 521. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs 1970)

Fläche* df															$r_{0,05}$	$r_{0,01}$
	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,990	0,995	0,9995			
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619	0,997	1,000	
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598	0,950	0,990	
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,941	0,878	0,959	
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610	0,811	0,917	
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,859	0,754	0,874	
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959	0,707	0,834	
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,405	0,666	0,798	
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041	0,632	0,765	
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781	0,602	0,735	
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587	0,576	0,708	

T-Test für abhängige Stichproben

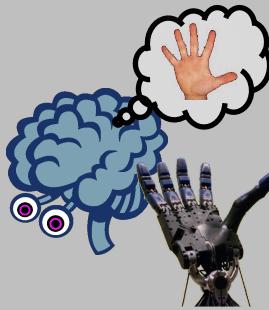


Wahre Differenz = 0 → Verteilung mit einer bestimmten Varianz



Test, ob gefundene Differenz zu dieser Verteilung gehört (zufällige Differenz) oder nicht (Differenz ist Effekt der Faktor-Variation)

Irrtumswahrscheinlichkeit (meist 5%) → Tabellenwert
→ liegt Testwert für die Differenz des Experimentes außerhalb dieser Grenze??? → ja: Test ist signifikant



T-Test für abhängige Stichproben

	Ohne Info	Mit Info
1	9	7
2	11	7
3	9	7
4	14	6
5	8	6

Differenz d_i	$d_i - x_d$	$(d_i - x_d)^2$
2	-1,6	2,56
4	0,4	0,16
2	-1,6	2,56
8	4,4	19,36
2	-1,6	2,56

$$X_d = 3,6$$

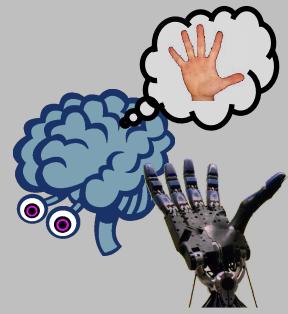
$$\sum = 27,2$$

Geschätzte Streuung der Differenzen = $\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - x_d)^2}{n-1}} = 2,6$

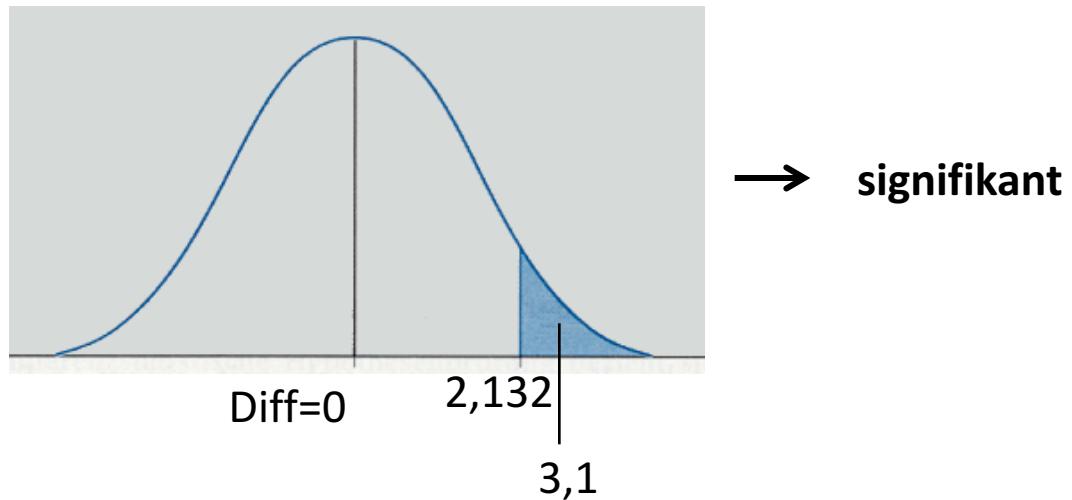
Geschätzte Streuung der Mittelwerte von Differenzen = $\sigma_{X_d} = \frac{\sigma_d}{\sqrt{n}} = 1,16$

Testgröße $t = \frac{X_d}{\sigma_{X_d}} = 3,1$??? > Tabellenwert $t(4; 0,95) = 2,132$

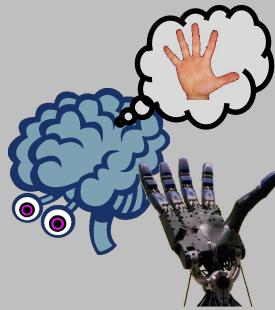
T-Test für abhängige Stichproben



Testgröße $t = 3,1 >$ Tabellenwert $t(4; 0,95) = 2,132$

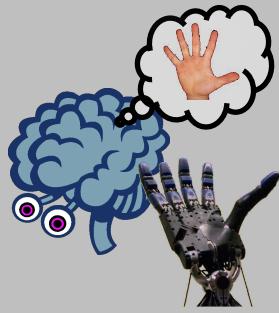


ANOVA (Analysis of Variance)



- Der t-Test ist nur für die Auswertung von Studien mit genau 2 Bedingungen (Gruppen, Faktorstufen) geeignet. Liegen mehr als 2 Bedingungen vor, verwendet man stattdessen eine **ANOVA**.
- Bei einem multivariaten Design (mehrere *abhängige* Variablen) spricht man von einer MANOVA.
- Eine ANOVA ist ein Spezialfall eines linearen Modells.
- Ein-faktorielles Design: **One-Way** ANOVA $y_{ij} = a_j + \varepsilon_j$ y_{ij} Beobachtung (i Index, j Faktorstufe)
 a_j Populations-Mittelwert der Faktorstufe j
 ε_j Fehler mit $\varepsilon_j \sim N(0, \sigma^2)$
- Nullhypothese $H_0: a_1 = a_2 = \dots = a_l$
- H_0 : Die Nullhypothese wird zurückgewiesen, wenn nicht alle Mittelwerte der Gruppen (Bedingungen) gleich sind.
- Interpretation als lineares Modell: Gesucht wird eine Linearkombination zur Modellierung der einzelnen Beobachtungen, die den Fehler, hier: die Varianz innerhalb einer Gruppe, minimiert. Dieses ist offensichtlich der Fall, wenn die Varianz in der Gruppe besonders klein ist.

ANOVA (Analysis of Variance)



- Es werden 3 Varianzen berechnet:
 - Abweichungen aller Beobachtungen vom Gesamtmittelwert
 - Abweichungen der Beobachtungen innerhalb einer Bedingung vom Gruppenmittelwert (Fehlervarianz)
 - Abweichung dieses Gruppenmittelwertes vom Gesamtmittelwert.

Faktorstufen

Beobachtungen(z.B.
Versuchspersonen, hier 3)

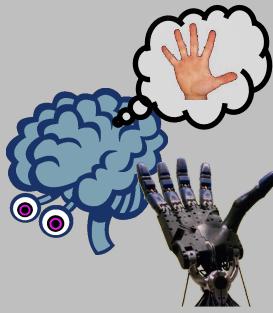
Mittelwerte

Fehler (Varianze)

A1	A2	A3
y_{11}	y_{12}	y_{13}
y_{21}	y_{22}	y_{23}
y_{31}	y_{32}	y_{33}
a_1	a_2	a_3
ε_1	ε_2	ε_3

$$F = \frac{\text{Varianz zwischen den Gruppen}}{\text{Varianz innerhalb einer Gruppe}}$$

Two – Way ANOVA bei mehrfaktoriellem Design



Modell: $y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + (a b)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$

	Spaltenfaktor B	
	B1	B2
y_{ijk}	Eine Beobachtung einer abhängigen Variable	
μ	Gesamtmittelwert	
a_i	Abweichung der i-ten Gruppe in Zeilenfaktor A mit $i=1,2,\dots,l$ von μ	
b_j	Abweichung der j-ten Gruppe in Spaltenfaktor B mit $j=1,2,\dots,J$ von μ	
$(a b)_{ij}$	Interaktionen der 2 Faktoren	
ε_{ijk}	Fehler (Mittelwert 0, konstante Varianz)	
r	Index der Wiederholung (z.B. Versuchsperson, im Tabellenbsp. r=2)	

Zeilenfaktor A	B1	B2
A1	y_{111}	y_{121}
	y_{112}	y_{122}
A2	y_{211}	y_{221}
	y_{212}	y_{222}
A3	y_{311}	y_{321}
	y_{312}	y_{322}

Diese Variante testet Hypothesen über die Effekte der Faktoren A und B sowie ihre Interaktion auf die abhängige Variable y.

Nullhypothese $H_0: a_1=a_2=\dots=a_l$
Wird zurückgewiesen wenn (H_1)

$H_0: b_1=b_2=\dots=b_J$
mind. 1 a_i bzw. b_j ist verschieden, mind. 1 $(a b)_I \neq 0$