

WHITE PAPER



Affektiv-motorische Modulation und probabilistische Variabilität

**Eine neurophysiologische Einordnung
probabilistischer Reaktionsmuster bei
isometrischer Kraftmessung**

Abstract

Affektiv-motorische Testparadigmen zeigen häufig (1) reduzierte Klassifikationsraten ($\sim 65\text{--}75\%$) bei semantisch klaren, affektiv neutralen Aussagen sowie (2) Test-Retest-Variabilität bei wiederholter Präsentation identischer Stimuli. Diese Arbeit diskutiert beide Phänomene im Lichte etablierter neurophysiologischer Modelle, insbesondere affektiver Modulation kortikospinaler Erregbarkeit, stochastischer Variabilität motorischer Systeme und allostatischer Dynamik. Die Analyse zeigt, dass reduzierte Deterministik unter biologischen Bedingungen erwartbar ist und keine inhärente Inkonsistenz darstellt.

1. Einleitung

Affektive Prozesse beeinflussen motorische Systeme nachweislich. Studien zeigen, dass emotional valente Reize die kortikale Erregbarkeit sowie Motor-Evoked Potentials (MEP) modulieren können (Coombes et al., 2009). Gleichzeitig unterliegt die kortikale Erregbarkeit spontanen intraindividuellen Schwankungen (Hallett, 2007).

Vor diesem Hintergrund sind zwei beobachtete Phänomene zu diskutieren:

1. Warum erreichen affektiv neutrale Aussagen keine 100-% Klassifikationsrate?
2. Warum treten Unterschiede bei wiederholter Testung identischer Aussagen auf?

Diese Arbeit liefert eine theoretische Einordnung.

2. Theoretischer Hintergrund

2.1 Affektive Modulation motorischer Systeme

Emotionale Stimuli beeinflussen die motorische Vorbereitung und kortikospinale Erregbarkeit. Transkranielle Magnetstimulationsstudien zeigen, dass affektiv negative oder positive Stimuli signifikante Veränderungen der MEP-Amplitude erzeugen (Coombes et al., 2009; Hajcak et al., 2007).

Die zugrunde liegende Verschaltung umfasst:

- Amygdala
- Insula
- präfrontalen Cortex
- Supplementärmotorisches Areal
- primären Motorcortex
- kortikospinale Projektionen

Diese Architektur ist konsistent mit der somatischen Marker-Hypothese (Damasio, 1996).

2.2 Kortikale Variabilität

Die Erregbarkeit des Motorcortex schwankt spontan. Selbst unter konstanten experimentellen Bedingungen zeigen MEP-Messungen substanzielle intraindividuelle Variabilität (Hallett, 2007).

Motorische Systeme sind probabilistisch organisiert, da:

- Motoneuron-Rekrutierung nicht vollständig deterministisch erfolgt
- kortikale Aktivität zustandsabhängig ist
- autonome Aktivierung Einfluss nimmt

2.3 Allostatistische Dynamik

McEwen beschreibt das Gehirn als Organ allostatistischer Anpassung. Kontext, Stress und Bewertung verändern kontinuierlich neuronale Aktivierungsmuster (McEwen, 2007).

Somit ist neuronale Stabilität kein statischer Zustand, sondern dynamisch reguliert.

3. Methodische Einordnung (theoretisches Modell)

Zur Einordnung der beobachteten Klassifikationsraten kann ein Signal-zu-Rausch-Modell herangezogen werden:

Messwert = $S + N$

S = affektive Modulation

N = neuronale und motorische Variabilität

Bei affektiv neutralen Aussagen ist S gering. Somit liegt S nahe N, wodurch sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis reduziert.

Eine Klassifikationsrate im Bereich von $\sim 70\%$ ist unter diesen Bedingungen erwartbar.

4. Diskussion

4.1 Reduzierte Trefferquoten bei neutralen Aussagen

Semantisch klare, emotional neutrale Aussagen aktivieren limbische Systeme nur geringfügig.

Die resultierende motorische Modulation ist minimal.

Da N (Variabilität) konstant vorhanden ist, ergibt sich keine deterministische 100-%-Trennung.

In affektiv stärker aktivierenden Kontexten wäre eine größere Modulation zu erwarten.

4.2 Test-Retest-Variabilität

Mehrere Faktoren erklären die Unterschiede bei mehrfacher Wiederholung semantisch identischer Stimuli:

- die spontane Schwankungen kortikaler Erregbarkeit
- vorhandene Habituationseffekte
- veränderte Aufmerksamkeitszustände
- kontextabhängige affektive Neuinterpretation

Habituation ist ein gut dokumentierter Mechanismus neuronaler Anpassung.

Die wiederholte Reizpräsentation führt häufig zu reduzierter Reaktionsamplitude.

4.3 Determinismus vs. Probabilismus

Biologische Systeme sind stochastisch organisiert. Eine perfekte Reproduzierbarkeit wäre bei sensibler physiologischer Messung ungewöhnlich.

In der Neurophysiologie gilt nicht absolute Identität, sondern statistische Stabilität als Reliabilitätsmaß.

5. Limitationen

Diese Arbeit stellt eine theoretische Einordnung dar und es wurden keine neuen experimentellen Daten erhoben.

Die Argumentation basiert auf:

- etablierten Modellen affektiver Modulation
- kortikospinaler Variabilität
- allostatischer Dynamik

Zukünftige Forschung sollte:

- systematische d' -Analysen durchführen
- emotionale vs. neutrale Stimuli experimentell vergleichen
- Test-Retest-Korrelationen quantifizieren
- größere Stichproben einsetzen

6. Schlussfolgerung

Die reduzierten Klassifikationsraten bei affektiv neutralen Aussagen sowie Test-Retest-Variabilität sind:

- neurophysiologisch plausibel
- konsistent mit affektiv-motorischer Modulation
- erwartbar unter probabilistischen Bedingungen

Affektiv-motorische Systeme messen keine Wahrheit, sondern modulierte Reaktionswahrscheinlichkeiten. Die deterministische Perfektion ist kein realistischer Maßstab für biologische Systeme.

Literatur

Coombes, S. A., Tandonnet, C., Fujiyama, H., & Janelle, C. M. (2009). Emotion and motor preparation: A transcranial magnetic stimulation study. *Neuropsychologia*, 47(5), 1327–1334.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.01.033>

Damasio, A. R. (1996). The somatic marker hypothesis and the possible functions of the prefrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 351(1346), 1413–1420.

<https://doi.org/10.1098/rstb.1996.0125>

McEwen, B. S. (2007). Physiology and neurobiology of stress and adaptation. *Physiological Reviews*, 87(3), 873–904.

<https://doi.org/10.1152/physrev.00041.2006>

Hallett, M. (2007). Transcranial magnetic stimulation: a primer. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 597–607.

<https://doi.org/10.1038/nrn2168>

Hajcak, G., Molnar, C., George, M. S., et al. (2007). Emotion facilitates action: A transcranial magnetic stimulation study. *Psychophysiology*, 44(1), 91–97.

<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2006.00466.x>

Anhang A

Signal-Detection-Modell

Grundannahmen

Ein kontinuierlicher interner Evidenzwert X entsteht durch:

$$X = S + N$$

S = affektive Modulation

N = neuronales und motorisches Rauschen

Angenommen:

$$\rightarrow N \sim \text{Normal}(0, \sigma^2)$$

$\rightarrow S$ verschiebt die Mittelwerte zweier Verteilungen

Es ergeben sich zwei Verteilungen:

$\rightarrow$ „Signal“-Verteilung (z. B. kongruente Aussage)

$\rightarrow$ „Noise“-Verteilung (z. B. inkongruente Aussage)

Beide mit gleicher Varianz σ^2 , aber unterschiedlichem Mittelwert μ .

Klassifikationsentscheidung

Ein Schwellenwert c trennt:

$$X \geq c \rightarrow \text{„Ja“}$$

$$X < c \rightarrow \text{„Nein“}$$

d' -Herleitung

Seien:

μ_1 = Mittelwert Signal

μ_0 = Mittelwert Noise

σ = Standardabweichung

Dann:

$$d' = (\mu_1 - \mu_0) / \sigma$$

Alternativ operationalisierbar über Treffer- (H) und Fehlalarmrate (F):

$$d' = Z(H) - Z(F)$$

mit Z als Inverse der Standardnormalverteilung.

Interpretation

→ $d' = 0$ → keine Trennbarkeit

→ $d' \approx 0.5$ → kleiner Effekt

→ $d' \approx 1.0$ → mittlerer Effekt

→ $d' \geq 2.0$ → großer Effekt

Bei affektiv neutralen Aussagen ist $\mu_1 - \mu_0$ klein, somit ist d' moderat oder gering.

Eine Gesamtgenauigkeit von $\sim 70\%$ ist konsistent mit einem d' im Bereich ~ 0.8 – 1.1 (bei balancierten Klassen und geringem Bias).

Warum keine 100 %?

Begrenztes Signal-Rausch-Verhältnis

Wenn S klein ist, dann ist:

$$|\mu_1 - \mu_0| \approx \sigma$$

Die Verteilungen überlappen sich und Überlappung impliziert unvermeidliche Fehlklassifikationen.

Perfekte Trennung (100 %) würde erfordern:

$$\mu_1 - \mu_0 \gg \sigma$$

Dies ist unter biologischen Bedingungen jedoch unrealistisch.

Zustandsabhängigkeit (State Dependency)

σ ist nicht konstant, da die Kortikale Erregbarkeit spontan schwankt (Hallett, 2007). Somit variiert d' über Zeit.

Test-Retest-Variabilität im SDT-Rahmen

5.1 Dynamische Parameter

Bei Wiederholung können sich ändern:

→ μ_1

→ μ_0

→ σ

→ Schwellenwert c

Veränderungen in Aufmerksamkeit, Habituation oder affektiver Kontextualisierung verschieben Parameter.

Test-Retest-Variabilität entsteht, wenn:

$$d'_1 \neq d'_2 \text{ oder } c_1 \neq c_2$$

5.2 Habituation

Wiederholte Stimuli reduzieren limbische Aktivierung.

→ $S \downarrow$

→ $\mu_1 - \mu_0 \downarrow$

→ $d' \downarrow$

Das System wird weniger trennscharf.

5.3 Kontextuelle Rekodierung

Identische Aussagen können unterschiedliche mentale Referenzen aktivieren. Sind:

→ Semantik konstant und

→ Affektive Bedeutung variabel

wird μ_1 kontextabhängig moduliert.

Reliabilität in probabilistischen Systemen

Reliabilität bedeutet hier:

- stabile Mittelwerte von d' über viele Durchgänge
- signifikante Abweichung von $d' = 0$
- robuste Konfidenzintervalle

Dagegen nicht:

- deterministische Einzelentscheidung

Diskussion

Die Kombination aus:

- affektiv-motorischer Modulation
- kortikospinaler Variabilität
- allostatischer Dynamik (McEwen, 2007)
- somatischer Marker-Hypothese (Damasio, 1996)

stützt ein probabilistisches Modell.

Reduzierte Genauigkeit bei neutralen Aussagen und Test-Retest-Varianz widersprechen nicht der Theorie, sondern folgen logisch aus dem Signal-Rausch-Verhältnis.

Limitationen

- Keine empirische Datenerhebung in dieser Arbeit
- Annahme normalverteilter Evidenz
- Keine direkte MEP-Messung im Paradigma
- Kontext- und Erwartungseffekte nicht isoliert quantifiziert

Schlussfolgerung

Affektiv-motorische Testverfahren operieren in einem stochastischen Rahmen.

Deterministische Perfektion ist neurophysiologisch nicht erwartbar.

Die beobachteten ~70 % sowie Test-Retest-Variabilität sind konsistent mit einem moderaten d' unter realistischen Signal-Rausch-Bedingungen.

Anhang B

Begriffserklärungen und theoretische Einordnung

Affektive Modulation

Beschreibt die Veränderung physiologischer oder neuronaler Prozesse infolge emotionaler Bewertung.

Die affektive Modulation bedeutet nicht bewusste Emotion im Alltagssinn, sondern jede Form von valenzbezogener Aktivierung (positiv/negativ, relevant/irrelevant), welche die neuronale Aktivität beeinflusst.

Im Kontext dieses White Papers bezieht sich affektive Modulation auf Veränderungen der kortikospinalen Erregbarkeit infolge der Bewertung einer Aussage.

Motorische Modulation

Beinhaltet die Veränderung der Aktivität des Motorcortex oder der kortikospinalen Bahn, die zu messbaren Veränderungen in Muskelspannung oder Muskelkraft führen kann. Diese Modulation ist graduell (stufenweise) und probabilistisch (Wahrscheinlichkeit bezogen).

Kortikospinale Erregbarkeit

Ist das Maß für die Aktivierbarkeit des primären Motorcortex und seiner Projektionen über die Pyramidenbahn* in das Rückenmark. Sie kann durch emotionale, kognitive und kontextuelle Faktoren beeinflusst werden.

* wichtigste absteigende Nervenbahn des Zentralnervensystems für die bewusste Steuerung der Skelettmuskulatur, insbesondere der Feinmotorik der Gliedmaßen)

Signal-Detection-Theorie (SDT)

Ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung von Entscheidungsprozessen unter Unsicherheit.

Es unterscheidet zwischen:

→ Signal (S)

→ Rauschen (N)

und beschreibt, wie ein kontinuierlicher interner Evidenzwert durch einen Schwellenwert in eine binäre Entscheidung überführt wird.

d' (d-prime)

Ist das Maß der Trennschärfe zweier überlappenden Verteilungen im Rahmen der Signal-Detection-Theorie.

Formal:

$$d' = (\mu_1 - \mu_0) / \sigma$$

oder operationalisiert über:

$$d' = Z(H) - Z(F)$$

d' beschreibt, wie gut Signal und Rauschen voneinander unterscheidbar sind.

$d' = 0$ bedeutet keine Trennbarkeit.

Bias (Kriterium c)

Ist der Schwellenwert, ab dem eine Entscheidung als „Ja“ oder „Nein“ klassifiziert wird.

Ein verschobenes Kriterium kann zu systematischen Verzerrungen führen, ohne dass sich die Trennschärfe ändert.

Signal-zu-Rausch-Verhältnis (S/N)

Beschreibt das Verhältnis zwischen der Stärke des relevanten Signals (affektive Modulation) und der Variabilität des Hintergrundrauschens (neuronale und motorische Schwankungen).

Ein geringes S/N-Verhältnis führt zu überlappenden Verteilungen und damit zu unvermeidlichen Fehlklassifikationen.

Biologisches Grundrauschen

Verweist auf die spontanen Schwankungen neuronaler und motorischer Aktivität, die auch ohne externen Stimulus auftreten.

Ursachen können sein:

- spontane kortikale Fluktuationen
- autonome Aktivierung
- Atemmuster
- Muskelrekrutierungsvariabilität

Biologisches Grundrauschen ist kein Fehler, sondern ein Merkmal lebendiger Systeme.

Habituation

Beschreibt die Reduktion der neuronalen oder physiologischen Reaktion bei wiederholter Präsentation desselben Stimulus. Habituation zeigt somit auch den grundlegenden Lern- und Anpassungsmechanismus des Nervensystems.

Allostase

Beinhaltet das Konzept der dynamischen Stabilisierung durch Veränderung.

Unser Gehirn reguliert kontinuierlich physiologische Parameter in Abhängigkeit von Kontext, Stress und Bewertung. Allostase impliziert die Zustandsabhängigkeit neuronaler Aktivierung.

Somatische Marker

Sind physiologische Zustände, die mit emotionalen Bewertungen verknüpft sind und Entscheidungsprozesse beeinflussen können. Sie wirken häufig implizit und modifizieren das Verhalten und die motorischen Reaktionen.

Probabilistische Systeme

Biologische Systeme arbeiten nicht deterministisch, sondern mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Identische Stimuli können unterschiedliche Reaktionen hervorrufen, da die neuronale Ausgangslage variabel ist.

Determinismus

Bezeichnet vollständig reproduzierbare, identische Reaktion auf eine identische Eingabe. Ein solches Verhalten ist typisch für digitale Systeme, nicht jedoch für komplexe biologische Netzwerke.

Glossar – Kurzform

Begriff	Kurzdefinition	Relevanz für QUESS / I.G.T
Affektive Modulation	Veränderung physiologischer Reaktion durch emotionale Bewertung	Grundlage für körperbasierte Entscheidungsrückmeldung
Kortikospinale Erregbarkeit	Aktivierbarkeit der motorischen Nervenbahn vom Gehirn zum Muskel	Neurophysiologischer Mechanismus hinter messbarer Muskelreaktion
Signal-Detection-Theorie	Mathematisches Modell zur Entscheidungsanalyse unter Unsicherheit	Erklärt probabilistische Trefferquoten
d' (d-prime)	Maß für Trennschärfe zwischen zwei Reaktionsverteilungen	Quantifiziert Differenzierbarkeit von „Ja“ vs. „Nein“
Signal-zu-Rausch-Verhältnis	Verhältnis zwischen relevanter Reaktion und biologischer Variabilität	Erklärt warum keine 100 % Deterministik vorliegt
Biologisches Grundrauschen	Spontane neuronale Schwankungen	Natürliche Variabilität, kein Messfehler
Habituation	Abschwächung bei Wiederholung desselben Reizes	Erklärung für Test-Retest-Unterschiede
Allostase	Dynamische Anpassung des Nervensystems an Kontext	Kontextabhängigkeit der Messung
Somatische Marker	Körperliche Signale, die Entscheidungsprozesse beeinflussen	Theoretische Basis für Körperfeedback
Probabilistische Systeme	Systeme, die mit Wahrscheinlichkeiten arbeiten	Neurobiologischer Standard, kein Defizit