

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der evozierten Potentiale

3.1.1 Festlegung der Peaks anhand des Grand Average (GA)

Im pORT fielen in den Kurven des Grand Average (interindividuelle Mittelung) der evozierten Potentiale nach Präsentation der Rückmeldung (Belohnung, Bestrafung, neutral) drei prominente positive Peaks auf, die an den Elektroden Fz und Pz (siehe Abbildung 4) besonders deutlich ausgeprägt waren.

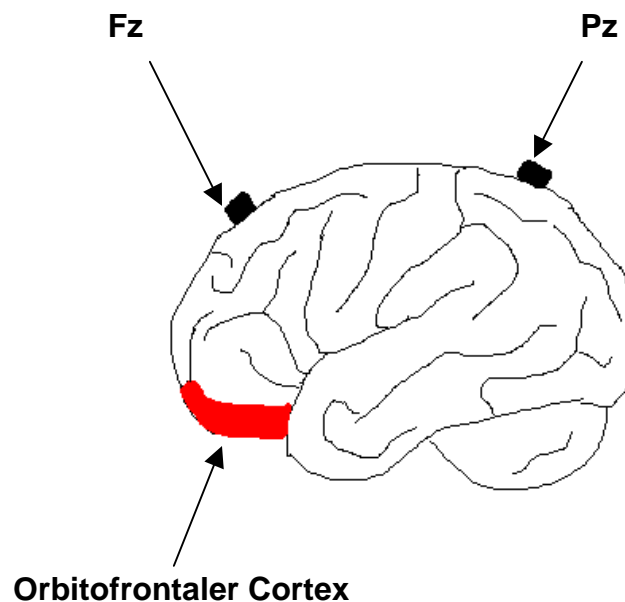


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Elektrodenlokalisierung von Fz und Pz in Bezug auf die Hirnrinde und den orbitofrontalen Bereich

Diese Peaks wurden definiert als P90, mit einem Zeitabschnitt von 70-130 ms post Stimulus, P150 (130-250 ms post Stimulus) und P350 (250-700 ms post Stimulus), siehe Abbildung 5.

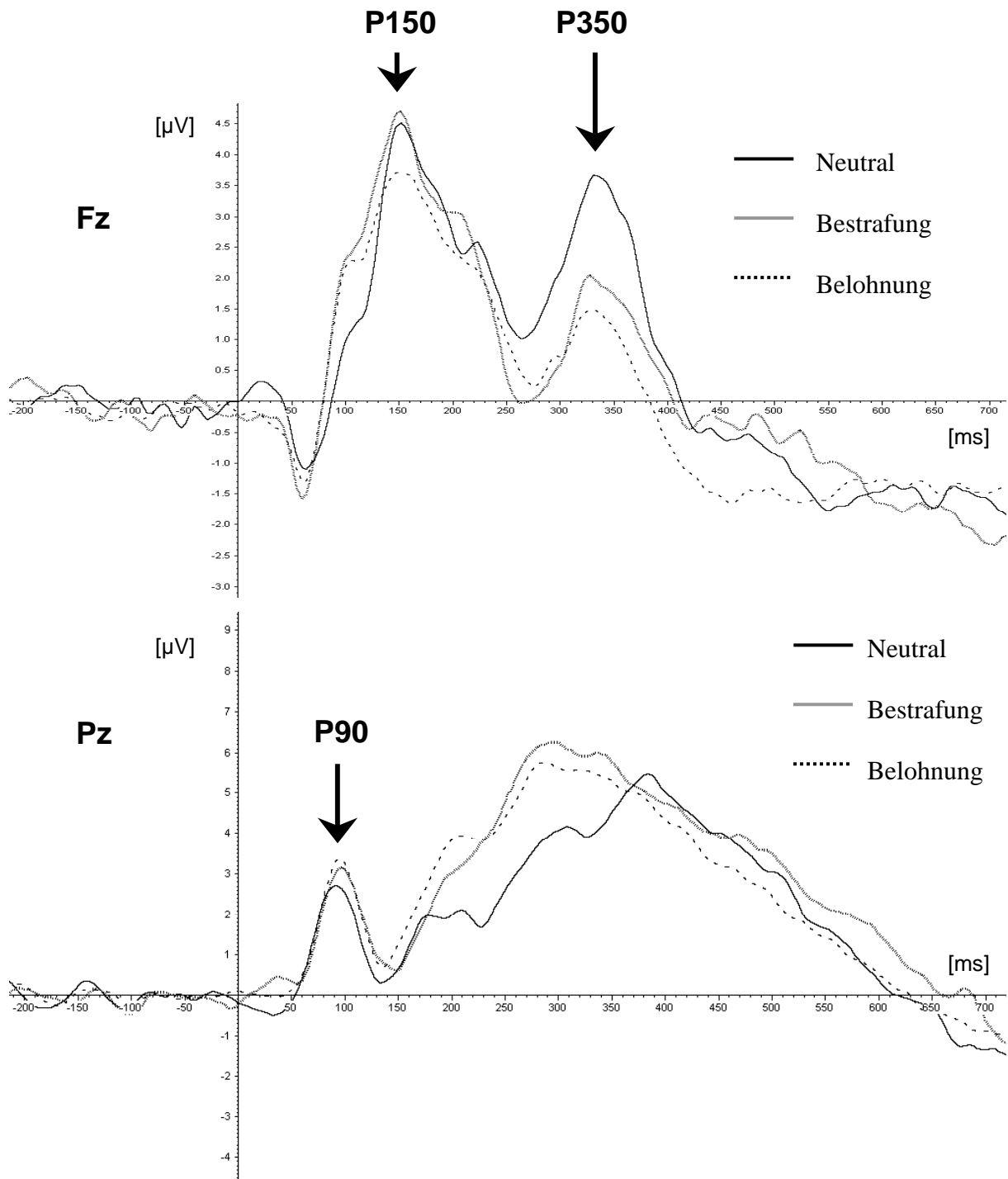


Abbildung 5: Grand Averages (interindividuelle Mittelungen) an den Elektroden Fz und Pz für neutral (schwarze Linie), Bestrafung (graue Linie) und Belohnung (gestrichelte Linie). Die Pfeile weisen auf die Peaks P90, P150 und P350.

Da für die Elektrode Fz der größte Einfluss orbitofrontaler Aktivität vermutet wurde, fand die Analyse der Peaks P150 und P350 an dieser Elektrode statt. Auf die Analyse der P90 konnte verzichtet werden, da vor 100 ms noch keine orbitofrontale Aktivität zu erwarten war.

3.1.2 Peakanalyse von P150 und P350

In der deskriptiven Statistik zeigte sich sowohl für P150 als auch für P350 die höchste Amplitude bei neutraler Rückmeldung, gefolgt von Bestrafung und Belohnung. Demnach waren die größten Unterschiede zu erwarten für den Vergleich Belohnung versus neutral. Weiterhin fiel auf, wie sich aus den Kurven des Grand Average schon vermuten ließ, dass die Unterschiede an P350 größer ausfielen als an P150 (siehe Tabelle 3 und Abbildung 6). Zu beachten ist hierbei, dass die Kurven des Grand Average die Amplitude der Peaks lediglich annäherungsweise widerspiegeln, so dass direkte Rückschlüsse auf die Höhe der Amplitude nicht gezogen werden können, da für die statistischen Berechnungen die Amplituden der Einzelableitungen mit unterschiedlichen Latenzen herangezogen wurden (für P350 beispielsweise im Zeitbereich 250-700 ms post Stimulus, siehe Kapitel Methoden).

Peak	Bedingung	Mittelwert der Amplitude in μV	Standardabweichung	Anzahl
P150	neutral	5,4928	2,45564	29
	Bestrafung	5,4277	2,26848	
	Belohnung	4,9503	1,84477	
P350	neutral	4,9503	2,92112	29
	Bestrafung	3,9892	2,81248	
	Belohnung	2,7357	2,09315	

Tabelle 3: deskriptive Statistik der Peakanalyse

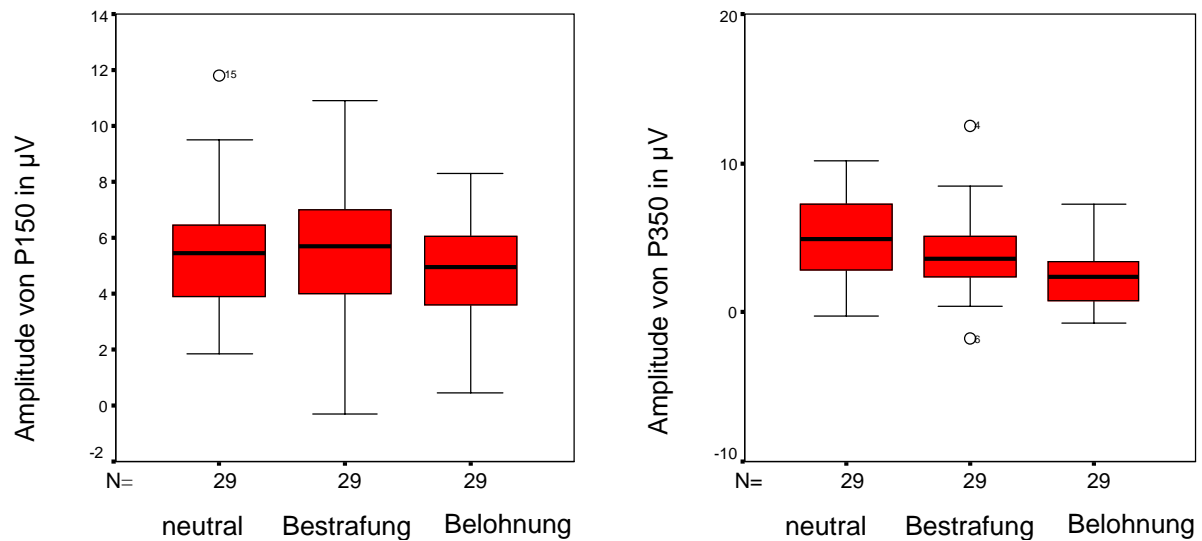


Abbildung 6: Boxplotdarstellung - Amplituden der Peaks P150 und P350 bei neutral, Bestrafung und Belohnung

In der multivariaten Analyse mit Messwiederholung zeigte sich im Wilks-Lambda-Test ein hochsignifikanter Einfluss der Bedingung (Belohnung, Bestrafung, neutral) auf die Amplitude des Peaks P350, der Einfluss der Bedingung auf die Amplitude des Peaks P150 war hingegen nicht signifikant (siehe Tabelle 4). Ein signifikanter Einfluss von Geschlecht oder Alter bestand nicht.

Peak	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
P150	0,854	2,309	2,0	27,0	0,119
P350	0,521	12,402	2,0	27,0	0,000

Tabelle 4: multivariate Analyse der Peaks P150 und P350

Zur Beantwortung der Frage nach Unterschieden zwischen den drei verschiedenen Bedingungen wurden für P350 Innersubjekt Kontraste ermittelt. Dabei zeigte sich eine signifikante Verringerung der Amplitude sowohl bei Belohnung als auch bei Bestrafung verglichen mit neutraler Bewertung. Darüber hinaus wurde eine signifikant niedrigere Amplitude bei Belohnung im Vergleich zu Bestrafung festgestellt (siehe Tabelle 5).

P350	F	ds	P
Bestrafung vs neutral	4,350	1	0,046
Belohnung vs neutral	25,185	1	0,000
Bestrafung vs Belohnung	8,357	1	0,007

Tabelle 5: Innersubjektkontraste für P350

3.2 Quellenanalyse: LORETA-t-Test

3.2.1 Festlegung des Zeitfensters und Überblick über die Vorgehensweise

Die LORETA Quellenanalyse diente der Lokalisation der (mittels Peakanalyse festgestellten) Aktivitätsunterschiede nach Belohnung, Bestrafung und neutraler Bewertung.

Als Grundlage für die Auswahl des Zeitfensters dienten dabei die Ergebnisse der Peakanalyse. Da der Belohnungswert der Rückmeldung signifikanten Einfluss auf die Amplitude des Peaks P350 hatte, wurde für die LORETA-Quellenanalyse ein Zeitabschnitt ausgewählt, der diesen Peak abdeckte: 302-450 ms post Stimulus (siehe Abbildung 7).

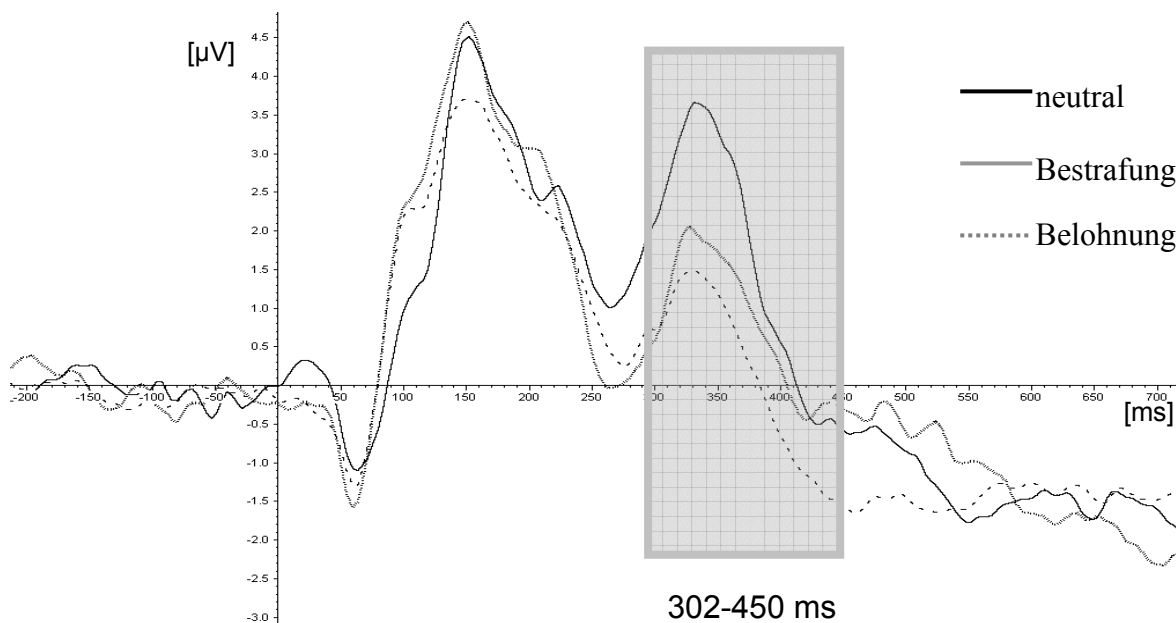
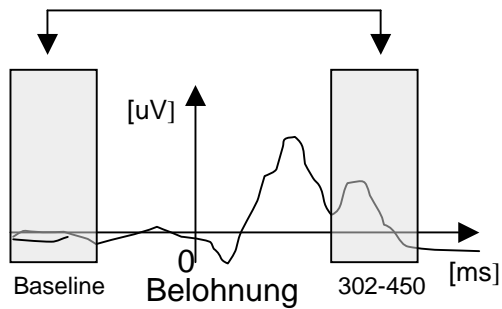


Abbildung 7: Grand Average der Evozierten Potentiale für neutral (schwarze Linie), Bestrafung (graue Linie) und Belohnung (gestrichelte Linie) an Fz. Grau hinterlegt ist der Zeitbereich für die LORETA-Quellenanalyse.

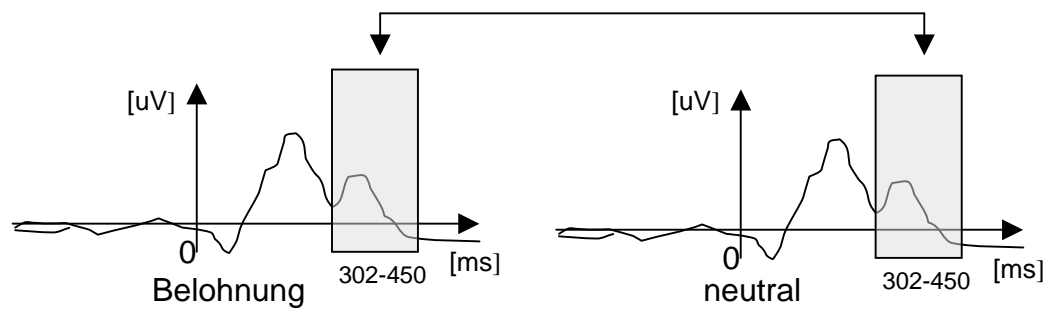
Zunächst sollte nachgewiesen werden, ob sich die orbitofrontale Aktivität nach Präsentation der Belohnung im pORT (302-450 ms) signifikant von der Aktivität vor Stimuluspräsentation (Baseline) unterscheidet (siehe Abbildung 8, Punkt 1). Danach erfolgte ein Vergleich der orbitofrontalen Aktivität im gleichen Zeitfenster (302-450 ms) für die Bedingungen Belohnung und neutral (siehe Abbildung 8, Punkt 2). Dieser Zeitbereich wurde schließlich unterteilt in kürzere Abschnitte, um einen Überblick über die orbitofrontale Aktivität im Zeitverlauf zu erhalten.

Entsprechend dazu war die Vorgehensweise bei Bestrafung. Zunächst erfolgte der Nachweis, dass sich die orbitofrontale Aktivität nach Präsentation der Bestrafung signifikant von der Aktivität vor Stimuluspräsentation (Baseline) unterschied (siehe Abbildung 8, Punkt 3). Danach wurde die orbitofrontale Aktivität im gleichen Zeitfenster für die Bedingungen Bestrafung und neutral verglichen (siehe Abbildung 8, Punkt 4). Wiederum folgte eine Unterteilung dieses Zeitbereichs in kürzere Abschnitte.

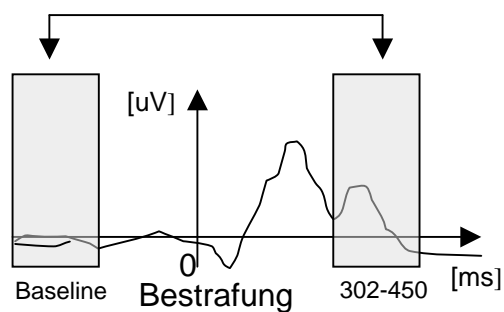
1) Vergleich Belohnung post Stimulus - Baseline



2) Vergleich Belohnung - neutral



3) Vergleich Bestrafung post Stimulus - Baseline



4) Vergleich Bestrafung - neutral

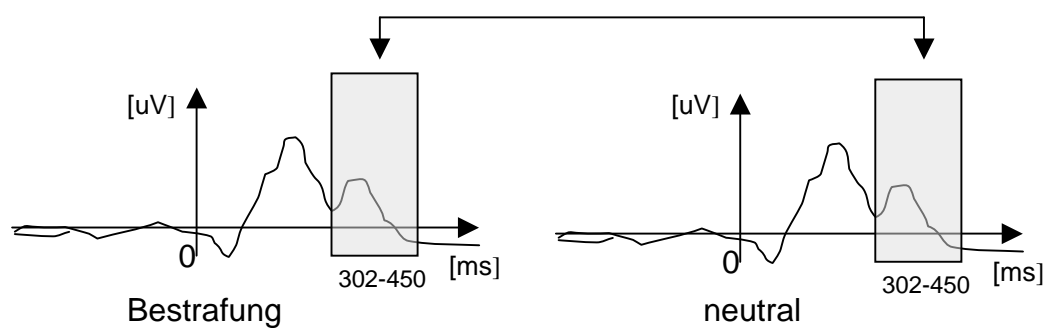


Abbildung 8: Übersicht über die Vorgehensweise bei der Quellenlokalisierung mittels LORETA (siehe Text). Grau hinterlegt sind die Zeitbereiche, die mittels LORETA verglichen wurden (Pfeile). Zur Veranschaulichung dienen die grob vereinfacht dargestellten Kurven des Grand Average.

3.2.2 Belohnung post Stimulus versus Baseline

Mittels des LORETA-t-Tests wurde ein statistischer Vergleich durchgeführt für Belohnung 302-450 ms post Stimulus versus Baseline im Zeitbereich -270 bis -122 ms (siehe Punkt 1 in Abbildung 8). Dabei zeigte sich im Bereich des orbitofrontalen Cortex signifikant erhöhte Aktivität in beiden Hemisphären (siehe Abbildung 9).

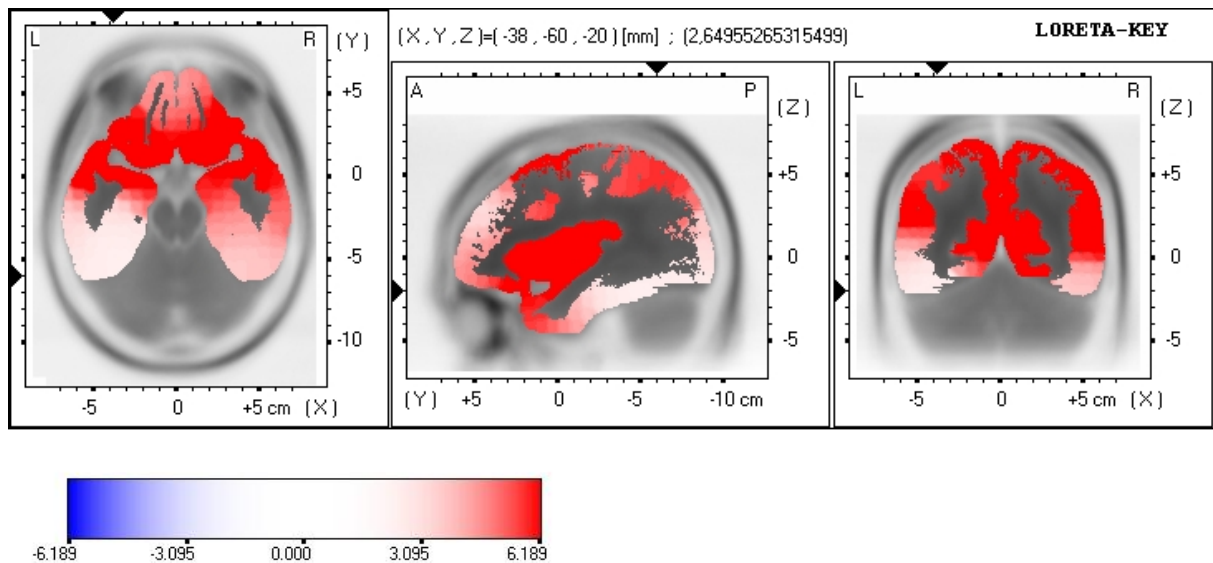


Abbildung 9: statistischer Vergleich (LORETA-t-Test) der orbitofrontalen Aktivität nach Belohnungsstimulus (302-450 ms) versus Baseline (-270 bis -122 ms). Signifikant höhere Aktivität ($p < 0,05$) nach Präsentation des Belohnungsstimulus ist hell- und dunkelrot dargestellt. 5%-p-Wert-Schwelle: $t = 2,882$. Die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC.

Wie aus Abbildung 9 ebenfalls ersichtlich wird, bestand jedoch auch für fast den gesamten übrigen Cortex eine Aktivitätserhöhung post Stimulus. Um eine Reaktion abzugrenzen, die spezifisch war für den Belohnungswert der Rückmeldung, wurde daher die Aktivität bei Belohnung mit der Aktivität bei neutraler Bewertung statistisch verglichen.

3.2.3 Belohnung versus neutral

Der statistische Vergleich (LORETA-t-Test) für die Bedingungen Belohnung versus neutral wurde im oben dargestellten Zeitabschnitt von 302-450 ms durchgeführt (Punkt 2 in Abbildung 8). Dabei fiel im orbitofrontalen Cortex eine signifikante Minderaktivität bei Belohnung

gegenüber neutraler Bewertung auf. Diese Minderaktivität war im medialen OFC lokalisiert und betraf hauptsächlich, aber nicht ausschließlich die rechte Hemisphäre (siehe Abbildung 10).

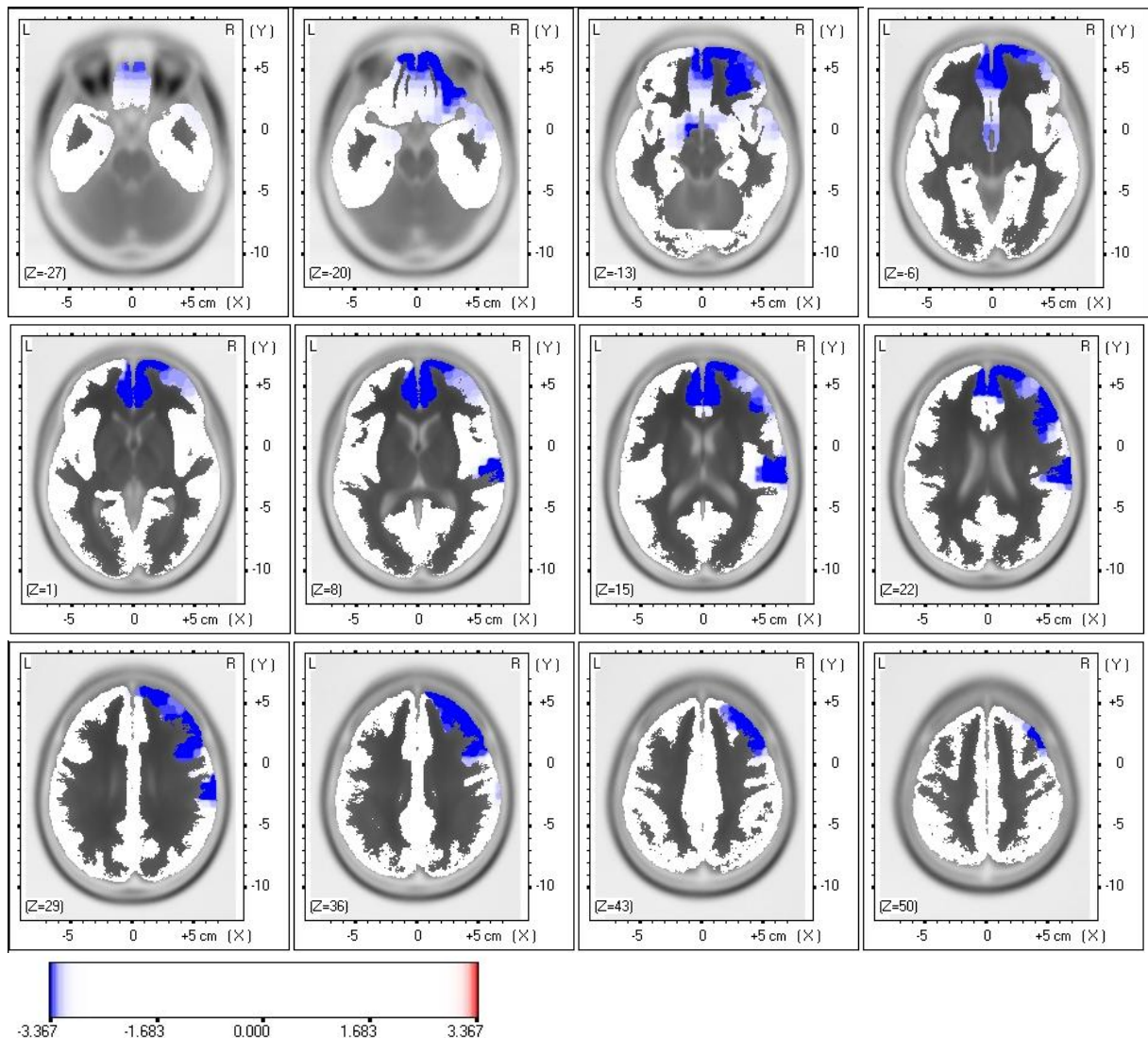


Abbildung 10: statistischer Vergleich (LORETA-t-Test) der orbitofrontalen Aktivität bei Belohnung (302-450 ms) versus neutral (302-450 ms). Signifikant geringere Aktivität ($p < 0,05$) bei Belohnung ist dunkelblau dargestellt. 5%-Signifikanz-Schwelle: $t = 3,254$. Der OFC ist an einer Stelle beispielhaft mit einem Pfeil markiert.

Aus Abbildung 10 wird deutlich, dass signifikante Aktivitätsänderungen hauptsächlich in zwei größeren zusammenhängenden Regionen auftraten, zum einen im OFC und angrenzenden frontalen Gebieten wie dem dorsolateralen präfrontalen Cortex und dem anterioren Cingulum, zum anderen in einer Region, die parietale, temporale und postcentrale Anteile beinhaltete. Hierbei handelte es sich durchweg um eine Minderaktivität bei Belohnung im Ver-

gleich zu neutral, welche überwiegend in der rechten Hemisphäre lokalisiert war. Eine zusammenfassende Übersicht der Lokalisation der Aktivitätsminima gibt Tabelle 6.

Lokalisation (Brodmann Area)	Talairach Koordinaten			t-Wert
	X	Y	Z	
OFC				
OFC re (11)	25	31	-13	-3.526540
Frontal				
Medialer frontaler Gyrus re (10)	4	59	15	-3.757248
DLPFC re (8)	46	31	36	-4.185706
Postcentral/temporal				
Gyrus postcentralis re (40)	67	-18	15	-3.790206
subcallosal				
Subcallosale Area li (25)	-3	3	-13	-3.295832

Tabelle 6: Lokalisation der Aktivierungs-Minima (Talairach-Koordinaten) bei Belohnung versus neutral (302-450 ms). 5%-Signifikanz-Schwelle: $t=3,254$.

Eine zeitlich detailliertere Darstellung ergab sich aus der Aufteilung des Zeitfensters von 302-450 ms in kleinere Abschnitte mit einer Länge von 16 ms. Für jeden dieser Zeitabschnitte erfolgte ein LORETA-t-Test. Hierbei ist zu beachten, dass für jeden Zeitabschnitt zwar ein Signifikanzniveau von $p<0,5$ festgesetzt wurde und die Abbildungen 11-13 dem entsprechend dargestellt sind, jedoch muss diese Signifikanz relativiert werden aufgrund der hier durchgeführten multiplen Testungen. Daher lassen sich die Ergebnisse der Zeitfenster von 16 ms nur als Hinweis für möglicherweise auftretende orbitofrontale Minderaktivität werten.

Wie den Abbildungen 11-13 zu entnehmen ist, begann die orbitofrontale Minderaktivität bei 378-394 ms post Stimulus und fand sich weiterhin in den drei Zeitfenstern von 410 bis 458 ms post Stimulus. Hinsichtlich der Lokalisation der orbitofrontalen Aktivitätsminderung bestätigte sich das Ergebnis des Vergleichs im großen Zeitfenster (302-450 ms): auch in der zeit-

lich detaillierten Auswertung fanden sich die Aktivitätsunterschiede im medialen OFC und überwiegend rechtsseitig.

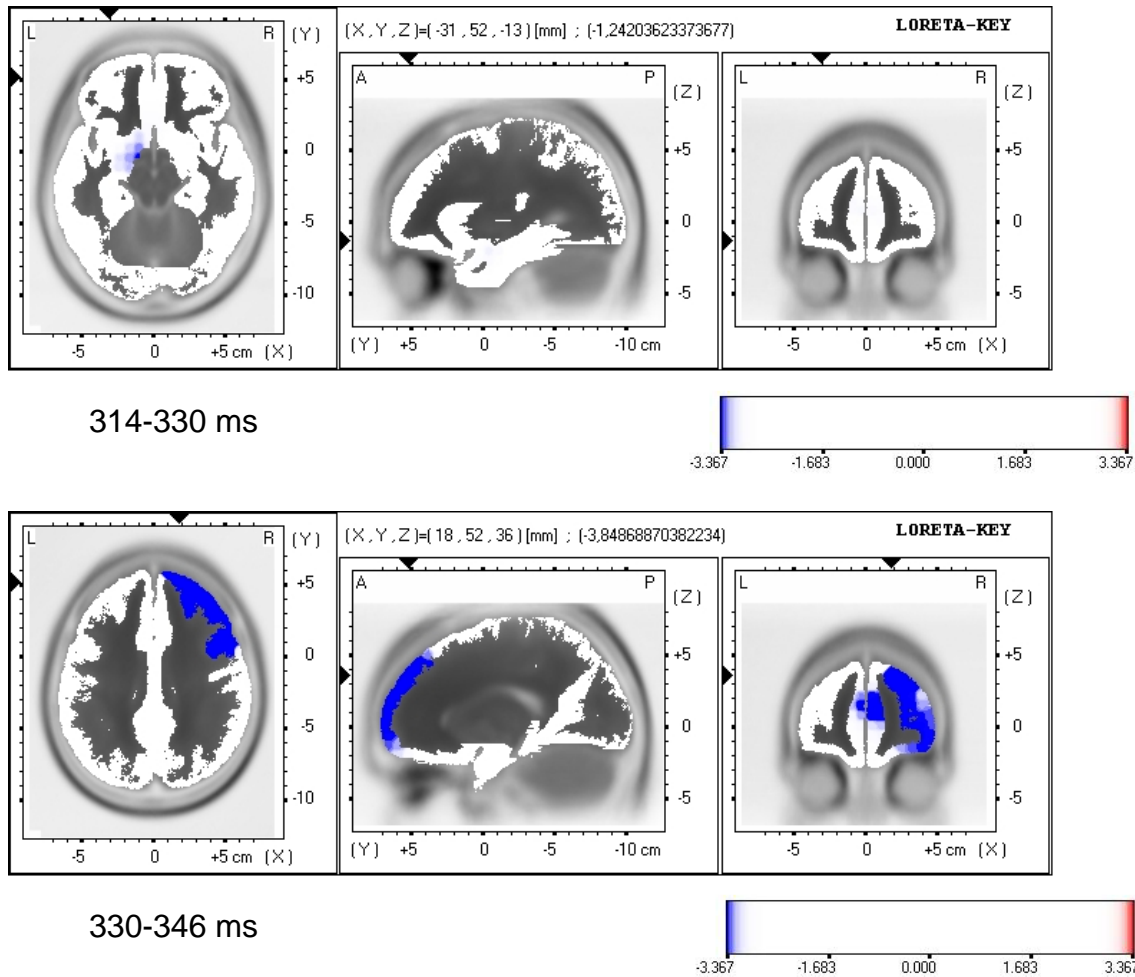


Abbildung 11: Statistischer Vergleich Belohnung versus neutral in Zeitabschnitten von 16 ms: dunkelblau dargestellt ist Minderaktivität bei Belohnung ($p < 0,05$). Der Zeitbereich ist jeweils angegeben, die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC. Dargestellt sind nur diejenigen Zeitfenster mit Aktivitätsunterschieden.

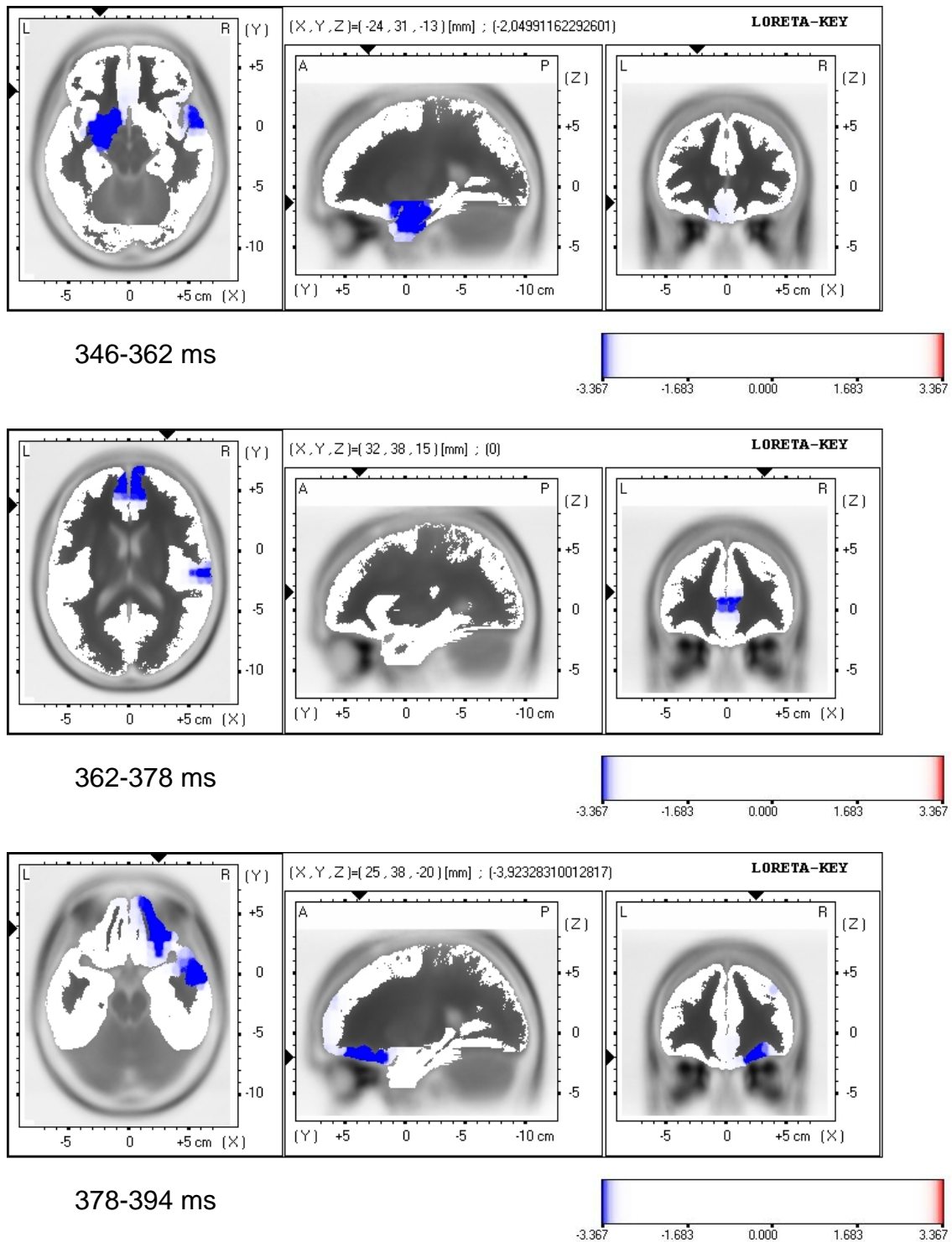


Abbildung 12: Statistischer Vergleich Belohnung versus neutral in Zeitabschnitten von 16 ms: dunkelblau dargestellt ist Minderaktivität bei Belohnung ($p < 0,05$). Der Zeitbereich ist jeweils angegeben, die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC. Dargestellt sind nur diejenigen Zeitfenster mit Aktivitätsunterschieden.

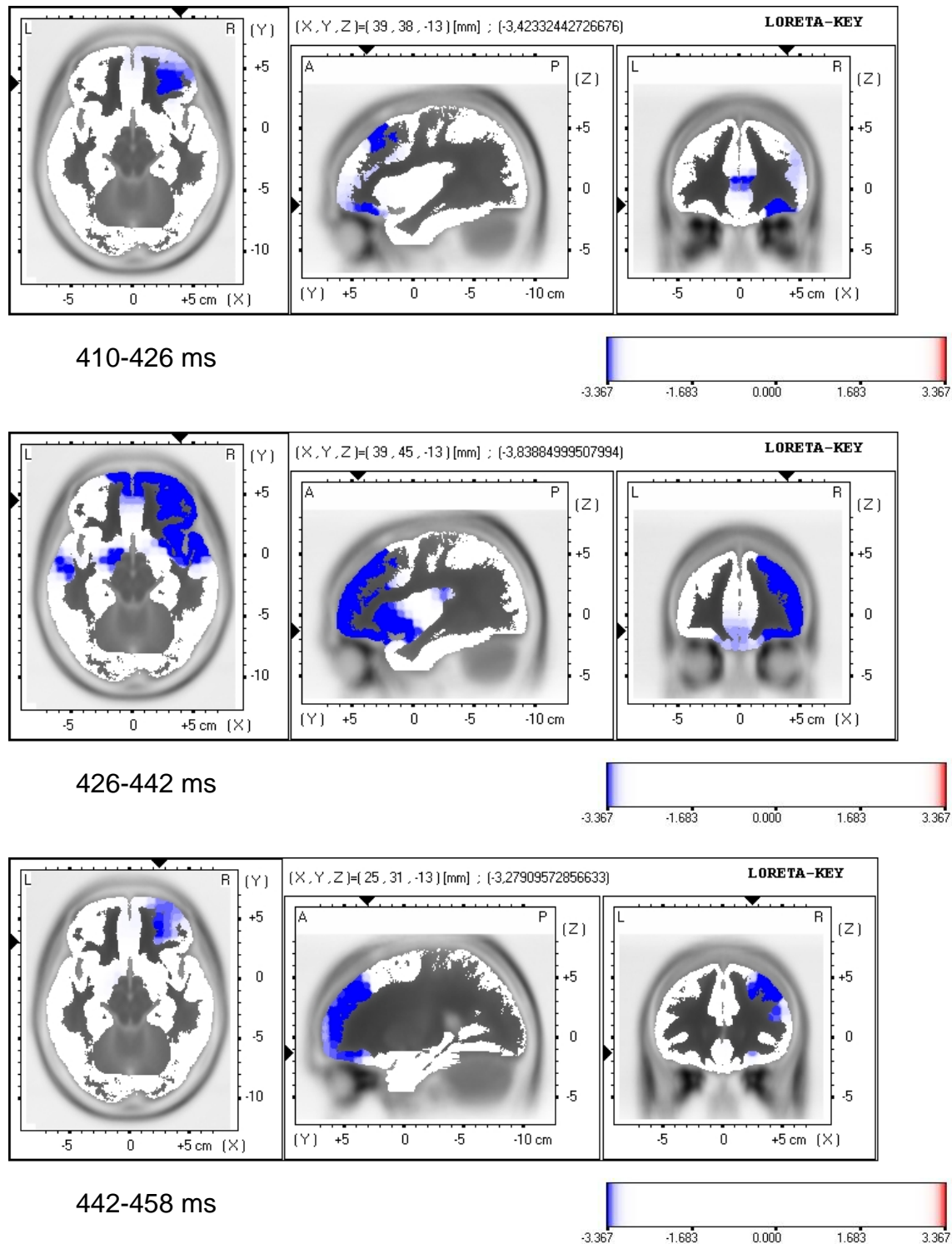


Abbildung 13: Statistischer Vergleich Belohnung versus neutral in Zeitabschnitten von 16 ms: dunkelblau dargestellt ist Minderaktivität bei Belohnung ($p < 0,05$). Der Zeitbereich ist jeweils angegeben, die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC. Dargestellt sind nur diejenigen Zeitfenster mit Aktivitätsunterschieden.

3.2.4 Bestrafung post Stimulus versus Baseline

Entsprechend der Vorgehensweise bei Belohnung, wurde auch bei Bestrafung zunächst das Zeitfenster 302-450 ms post Stimulus statistisch mit einem Zeitbereich vor Stimulus verglichen (-270 bis -122 ms). Auch bei Bestrafung unterschied sich die orbitofrontale Aktivität im Zeitabschnitt 302-450 ms signifikant von der orbitofrontalen Aktivität vor Stimulus (Baseline, siehe Abbildung 14). Wiederum war jedoch fast der gesamte restliche Cortex ebenfalls signifikant stärker aktiv. Um eine Reaktion abzugrenzen, die spezifisch war für den Aspekt der Bestrafung der Rückmeldung, wurde daher die Aktivität nach Bestrafung mit der Aktivität nach neutraler Bewertung statistisch verglichen.

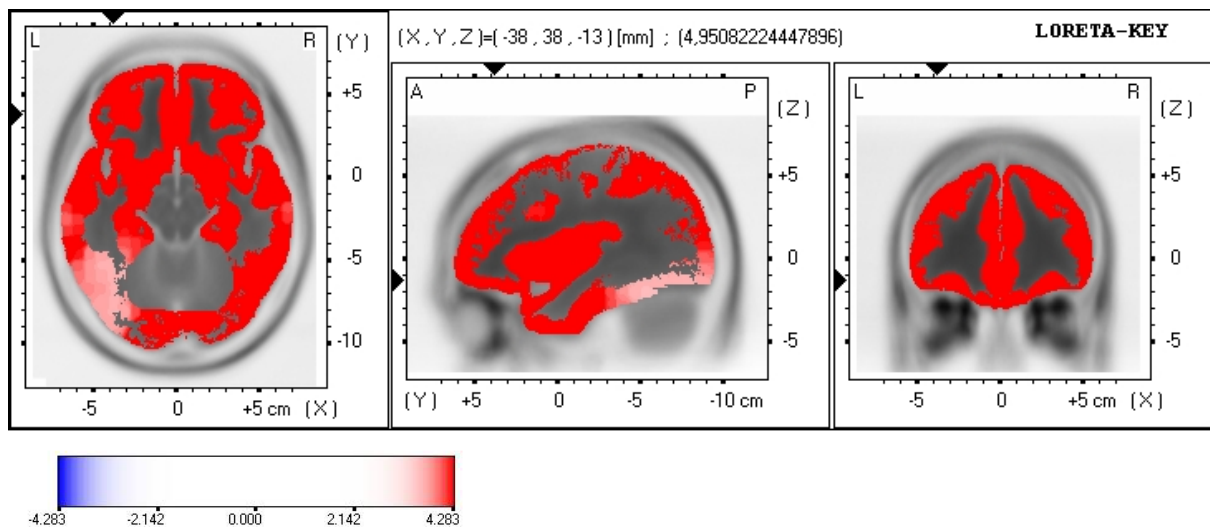


Abbildung 14: statistischer Vergleich (LORETA-t-Test) der orbitofrontalen Aktivität nach Bestrafungsstimulus (302-450 ms) versus Baseline (-270 bis -122 ms). Signifikant höhere Aktivität ($p < 0,05$) nach Präsentation des Bestrafungsstimulus ist hell- und dunkelrot dargestellt. 5%-p-Wert-Schwelle: $t = 2,950$. Die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC.

3.2.5 Bestrafung versus neutral

Entsprechend dem Vorgehen beim Vergleich Belohnung versus neutral wurde mittels LORE-TA-t-Test für das Zeitintervall 302-450 ms die Aktivität bei Bestrafung verglichen mit der Aktivität bei neutraler Bewertung. Hier ergaben sich keine signifikanten Aktivitätsunterschiede ($p < 0,05$).

Wiederum wurden kleinere Abschnitte von 16 ms Dauer analysiert. Dabei zeigten sich in drei der Zeitfenster signifikante Aktivitätsunterschiede, nämlich bei 314-330 ms, 346-362 ms und 362-378 ms nach Rückmeldung (siehe Abbildung 15). Auch hier gilt, dass aufgrund der multiplen Testung kein statistisch signifikantes Ergebnis vorliegt und die Ergebnisse nur als Hinweis gewertet werden können auf möglicherweise auftretende orbitofrontale Defizite in der Aktivität.

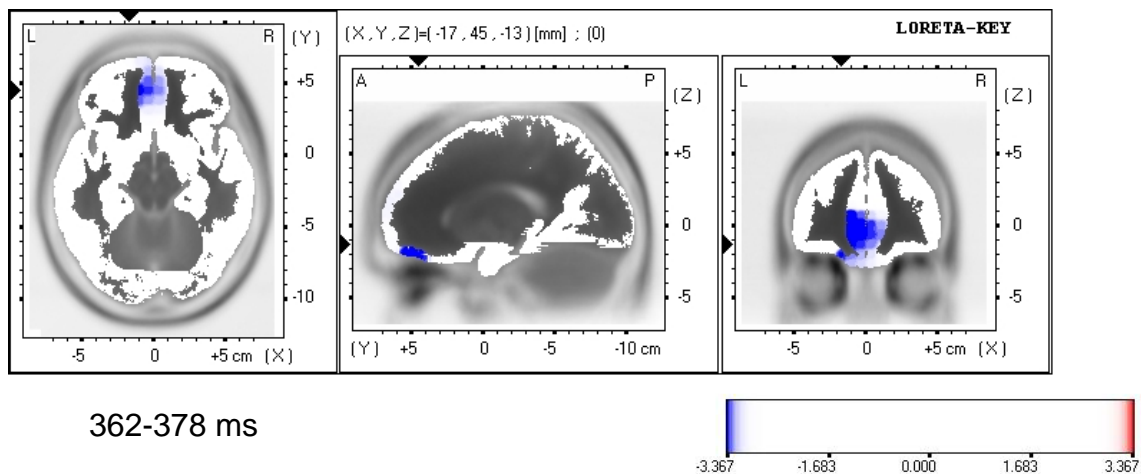
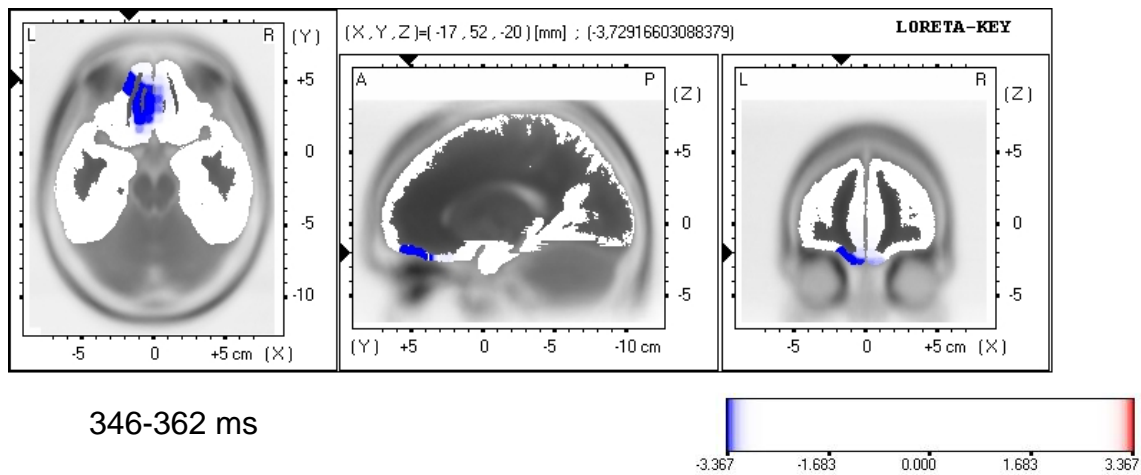
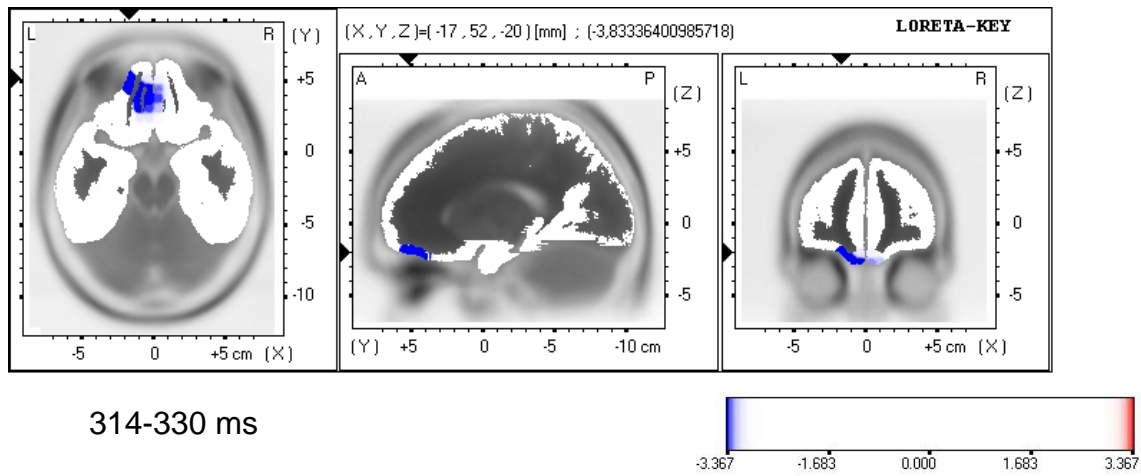


Abbildung 15: Statistischer Vergleich Bestrafung versus neutral in Zeitfenstern von 16 ms: dunkelblau dargestellt ist Minderaktivität bei Bestrafung ($p < 0,05$). Der Zeitbereich ist jeweils angegeben, die schwarzen Pfeile zeigen die Lokalisation der Schnittebenen, ausgewählt ist eine Schnittebene durch den OFC. Dargestellt sind alle Zeitfenster mit Aktivitätsunterschieden.

3.2.6 Vergleich von Belohnung und Bestrafung

Beim LORETA-t-Test für Belohnung versus Bestrafung im Zeitfenster 302-450 ms zeigten sich keine statistisch signifikanten Aktivitätsunterschiede ($p < 0,05$).

Eine Übersicht über die orbitofrontale Minderaktivität im Zeitverlauf vergleichend für Belohnung versus neutral und Bestrafung versus neutral zeigt Tabelle 7. Zugrunde liegen jeweils die oben beschriebenen multiplen LORETA-t-Tests für Zeitabschnitte von 16 ms.

Zeit in ms post Stimulus	Belohnung versus neutral: Talairach-Koordinaten des orbitofrontalen Minimums				Bestrafung versus neutral: Talairach-Koordinaten des orbitofrontalen Minimums			
	X	Y	Z	Seite	X	Y	Z	Seite
298-314		-				-		
314-330		-			-17	52	-20	li
330-346		-				-		
346-362		-			-17	52	-20	li
362-378		-			-17	52	-20	li
378-394	25	38	-20	re		-		
394-410		-				-		
410-426	25	38	-13	re		-		
426-442	32	38	-13	re		-		
442-458	25	45	-13	re		-		

Tabelle 7: Übersicht über orbitofrontale Aktivitätsminima bei Belohnung versus neutral und Bestrafung versus neutral anhand der Ergebnisse der multiplen LORETA-t-Tests.

Es fällt auf, dass bei Bestrafung versus neutral die orbitofrontale Minderaktivität früher im Zeitverlauf auftrat, nämlich im Zeitfenster 314-378 ms post Stimulus, während sie sich bei Belohnung versus neutral erst ab 378 ms zeigte. Darüber hinaus war sie bei Belohnung versus neutral überwiegend rechts, dagegen bei Bestrafung versus neutral überwiegend links lokalisiert.

3.3 Exkurs 1: Aktivitätsunterschiede weiterer Hirnbereiche nach Belohnung und Bestrafung

Bei multiplen LORETA-t-Tests (58 bis 458 ms nach Stimulus in Zeitabschnitten von 16 ms) zwischen den Bedingungen Belohnung bzw. Bestrafung und neutral zeigten mehrere Hirnareale Aktivitätsunterschiede. Eine Übersicht geben die Abbildungen 16 und 17.

Minderaktivität bei Belohnung (versus neutral)

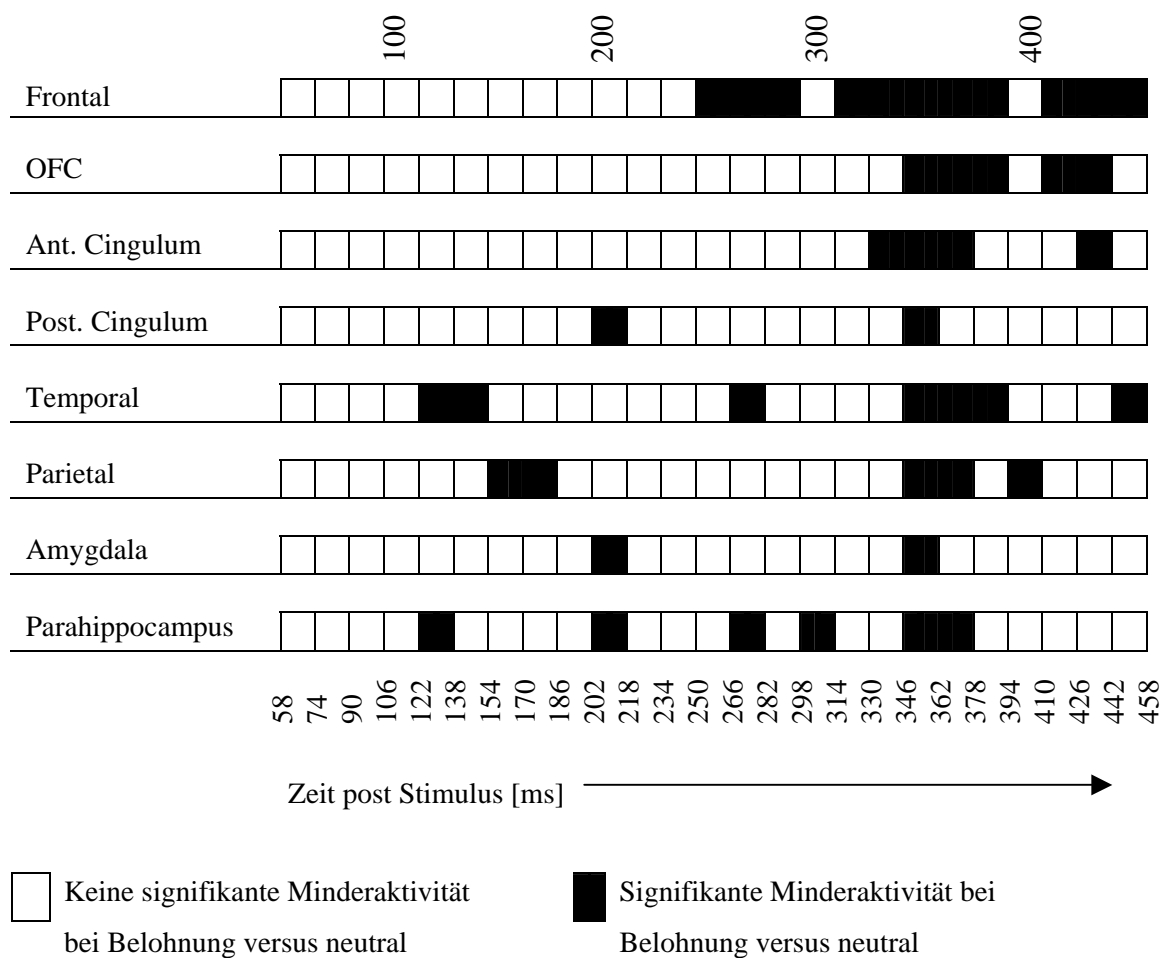


Abbildung 16: Übersicht über signifikante Minderaktivität (schwarz gefüllte Felder) bei Belohnung im Vergleich zu neutral bei multiplen LORETA-t-Tests in Zeitabschnitten von 16 ms. Berücksichtigt wurden Regionen, die in mehr als einem Zeitabschnitt Minderaktivität zeigten.

Minderaktivität bei Bestrafung (versus neutral)

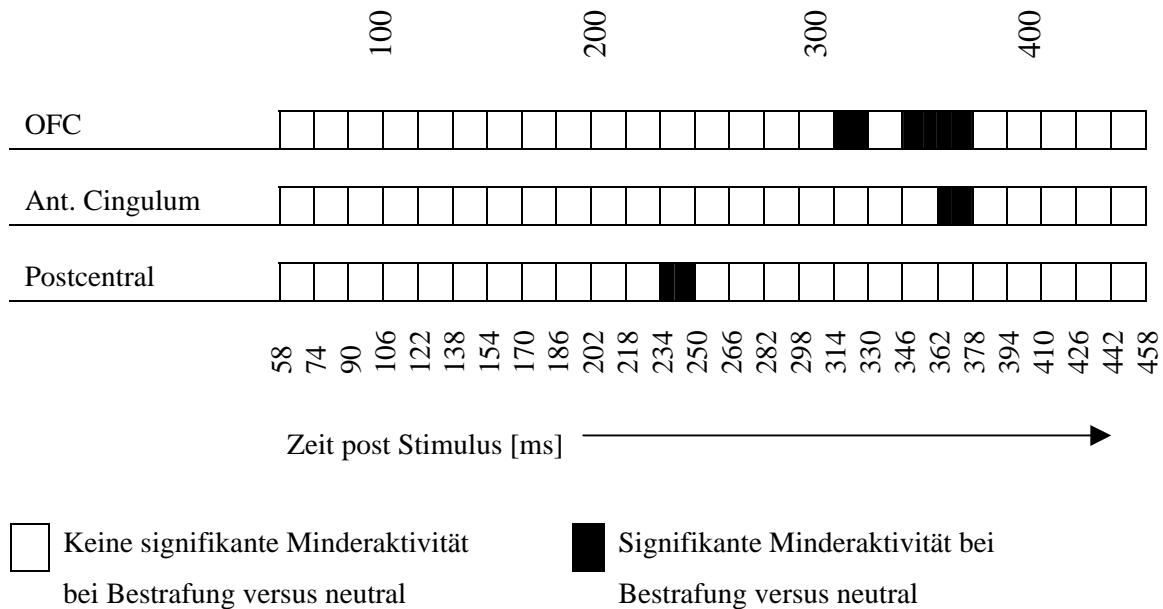


Abbildung 17: Übersicht über signifikante Minderaktivität (schwarz gefüllte Felder) bei Bestrafung im Vergleich zu neutral bei multiplen LORETA-t-Tests in Zeitabschnitten von 16 ms.

3.4 Exkurs 2: pORT versus Kontrolle

Der Kontrolltest sollte ursprünglich als neutrale Rückmeldung dienen für den Fall, dass die Bewertung 0 Punkte sich als nicht ausreichend „neutral“ herausstellen sollte. Dabei zeigten sich zwischen den evozierten Potentialen von Kontrolltest und pORT relativ große Unterschiede, die die Vermutung nahe legten, dass sich Ablauf und Handlungsanweisung von pORT und Kontrolle in zu vielen Variablen unterscheiden, als dass man sie sinnvoll vergleichen könnte. Zudem bestanden sehr wohl signifikante Aktivitätsunterschiede zwischen der „neutralen“ Bewertung 0 Punkte und Belohnung bzw. Bestrafung (siehe oben). Daher konnte auf die weitere vergleichende Auswertung von pORT und Kontrolle verzichtet werden. Eine Abbildung der Evozierten Potentiale von pORT und Kontrolle findet sich im Anhang 5.