

Eine neue Interpretation von Libets Experimenten aus der Analyse einer Wahlreaktionsaufgabe

*Christoph S. Herrmann, Michael Pauen, Byoung Kyong Min,
Niko A. Busch und Jochem W. Rieger*

Wir möchten in diesem Artikel ein Experiment vorstellen, dessen Resultate eine neue Interpretation der bereits in anderen Kapiteln dargestellten Libet-Experimente erlauben.¹ Benjamin Libet hatte experimentelle Daten erhoben, die nahe legen, dass die Willensfreiheit des Menschen eine Illusion ist. Wenn Probanden eine motorische Reaktion ihrer Hand einleiten sollen, stellte Libet fest, dass das im Elektroenzephalogramm (EEG) gemessene Bereitschaftspotenzial früher auftrat als die bewusste Entscheidung, den Knopf zu drücken. Wir führten ein Experiment durch, in dem die Probanden einen Reiz auf einem Computerbildschirm wahrnahmen und dann in Abhängigkeit vom Reiztyp einen von zwei Knöpfen entweder mit der rechten oder der linken Hand drücken sollten. Wir konnten vor der motorischen Reaktion eine ähnliche neuronale Aktivität wie in Libets Experimenten feststellen. Diese Aktivität setzte jedoch schon ein, bevor die Reize dargeboten wurden, und somit bevor die Versuchspersonen wissen konnten, welchen Knopf sie drücken sollten. Aus diesem Grund argumentieren wir, dass diese Aktivität nicht auf spezifische Weise bestimmt, was der Handelnde tut; es ist plausibler, diese Aktivität als Widerspiegelung einer allgemeinen Erwartung aufzufassen. Diese Interpretation würde der Vorstellung der Willensfreiheit nicht widersprechen.

¹ Wir danken Yvonne Wolff für die Datenerfassung und Burkhard Maess für hilfreiche Diskussionen des Manuskripts.

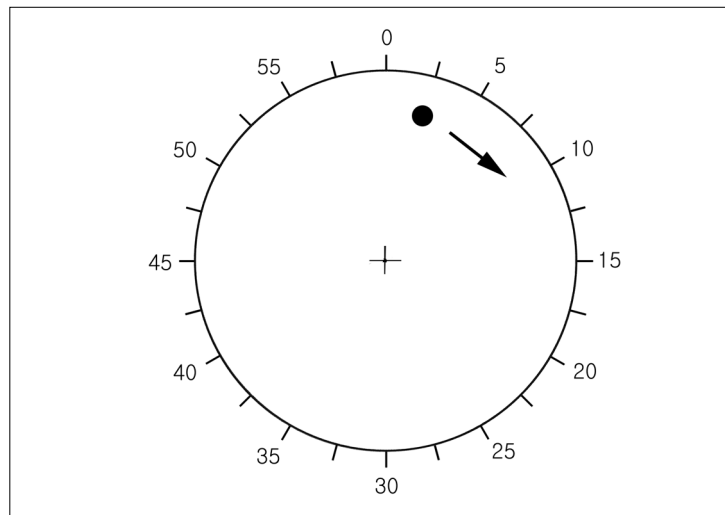


Abb. 1: Während der Libet-Experimente sollten die Versuchspersonen zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Beugung der Hand durchführen. Die Versuchspersonen beobachteten in dem Experiment einen rotierenden Punkt auf einer Art Uhr. Sie sollten sich dabei den Zeitpunkt merken, zu dem sie die bewusste Entscheidung trafen, eine Bewegung durchzuführen.

1. Libets Experimente

In verschiedenen Experimenten haben Benjamin Libet und seine Mitarbeiter die Reihenfolge bei der Vorbereitung einer motorischen Handlung im Gehirn, der bewussten Handlungsabsicht und der tatsächlichen motorischen Handlung untersucht (Libet et al. 1982, 1983). In den entscheidenden Bedingungen bekamen die Versuchspersonen die Instruktion, ihre Hand zu beugen, wann immer sie das zu tun wünschten, und den Zeitpunkt des damit verbundenen bewussten Willensakts (*W*) anhand eines schnell rotierenden Punktes auf einer Uhr zu bestimmen und sich zu merken (siehe Abbildung 1).

Zugleich wurden von den Versuchspersonen Hirnpotenziale in Form eines so genannten Elektroenzephalogramms (EEG) registriert und da-

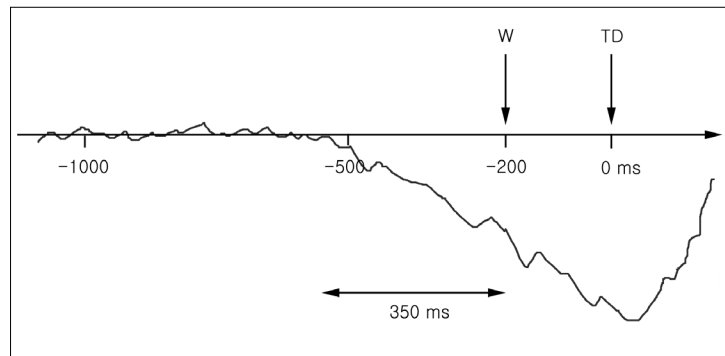


Abb. 2: Zeitlicher Ablauf eines typischen Libet-Experiments. Der Zeitpunkt der tatsächlichen Bewegung ist als TD markiert, da es sich bei heutigen Replikationen meist um einen Tastendruck handelt. Der von den Versuchspersonen auf der Uhr abgelesene Zeitpunkt W, zu dem sie sich zu der Bewegung entschlossen hatten, ging der motorischen Handlung ca. 200 ms voraus. Das Bereitschaftspotenzial, das hier prototypisch als Kurve dargestellt ist, geht dem Zeitpunkt W um ca. 350 ms voraus. Libet schloss daraus, dass die bewusste Entscheidung zur Bewegung nicht frei erfolgte, sondern die Konsequenz aus vorausgehender Hirnaktivität war.

raus das Bereitschaftspotenzial (BP; Kornhuber/Deecke 1965) berechnet (siehe Abbildung 2). Diese Art der Hirnaktivität geht bekanntlich motorischen Handlungen voraus und kann dargestellt werden, wenn der Mittelwert der gemessenen EEGs für viele Versuchsdurchgänge berechnet wird. Es wird dabei vom Zeitpunkt der tatsächlichen Bewegung (heute oft ein Tastendruck, TD) rückwärts gemittelt. Libets Ergebnisse zeigten, dass solche BPs dem Zeitpunkt W um circa 350 ms vorangingen. Die tatsächliche motorische Handlung folgte etwa 200 ms nach W (Libet 1985). Libet zog daraus den Schluss, dass W und folglich die motorische Handlung »vom Gehirn« unbewusst eingeleitet wurden, bevor die Person sich des Wunsches, die Hand zu bewegen, bewusst wurde. Umgekehrt wurde gefolgert, dass der bewusste Wille der Versuchsperson keine kausale Rolle bei der Einleitung einer motorischen Handlung spielt (Libet et al. 1983; Libet 1985). Diese Interpretation war provokant und löste eine immer noch andauernde Debatte aus (die

in Libet 1993 zusammengefasst ist); vor kurzem wurde eine ganze Ausgabe der Fachzeitschrift *Consciousness and Cognition* Libet und seinen Kritikern gewidmet (Libet 2002).

Das zunehmende Interesse an neurophysiologischen Befunden und ihrer Interpretation in der Philosophie sowie der Populärwissenschaft und die normativen Schlussfolgerungen, welche Neurophysiologen aus Libets Ergebnissen gezogen haben (Libet 1993), machen deutlich, dass diese Ergebnisse einen starken Einfluss auf das menschliche Selbstverständnis haben können. Deshalb sollten Libets Experimente und ihre Voraussetzungen sorgfältig geprüft werden.

2. Überprüfung von Libets Interpretation

Selbst wenn man die fragwürdige Verallgemeinerung eines Befundes im Bereich von Millisekunden auf die langfristige Planung von Verhalten beiseite lässt, hängen Libets Folgerungen immer noch entscheidend von mehreren Annahmen ab. Eine davon ist die Vorstellung, dass das BP die spezifische Willkürbewegung bestimmt und nicht nur eine allgemeine Vorbereitung zu irgendeiner Bewegung anzeigt. Bridgeman (1985) hat jedoch schon darauf hingewiesen, dass die Bewegungen der Versuchspersonen in Libets Experimenten vom Versuchsleiter festgelegt wurden. Die Versuchspersonen konnten nur »frei« entscheiden, *wann* sie die festgelegte Bewegung innerhalb eines begrenzten Zeitrahmens von einigen Sekunden und nur einmal pro Versuchsdurchgang ausführen wollten. Dieser Umstand wirft die Frage auf, ob das, was Libet untersucht, wirklich eine Entscheidung ist, schließlich gibt es keine Alternativen, zwischen denen gewählt werden kann. Ein entscheidender Punkt ist, dass die Instruktion festlegte, was die Versuchspersonen zu tun hatten, und daher ist es unklar, ob das BP wirklich spezifisch für die nachfolgende Bewegung ist, das heißt, ob das BP wirklich bestimmt, was die Versuchspersonen tun werden – möglicherweise lässt es einen Spielraum für verschiedene Handlungen, einschließlich etwa einer Bewegung der anderen Hand. Das würde die Möglichkeit bieten, anders zu handeln, eine Fähigkeit, die von vielen als einer der wichtigsten Bestandteile freier Handlungen betrachtet wird.

Dieses Problem wird auch von Haggard und Eimer diskutiert (1999). Entsprechend konnten die Versuchspersonen in einem ihrer Experi-

mente zwischen einer Bewegung der linken und der rechten Hand wählen. Die Autoren maßen zusätzlich zum BP das lateralisierte BP (LBP; Eimer 1998). Während das BP symmetrisch über den Kopf verteilt ist und die Anfangsphase der Bewegungen repräsentiert, die der motorischen Aktivität vorausgehen, stellt das LBP eine spätere Phase dar. Es ist in der Hemisphäre lokalisiert, die kontralateral zur Seite der Bewegung liegt. Haggard und Eimer (1999) suchten nach Kovariationen zwischen dem Zeitpunkt *W* und den Anfangszeitpunkten des BP und LBP. Es stellte sich heraus, dass der Anfangszeitpunkt des BP nicht mit dem *W*-Zeitpunkt kovarierte, während es eine Korrelation mit dem Anfangszeitpunkt des LBP gab. Aufgrund der Annahme, dass kausal verknüpfte Prozesse zeitlich kovariieren sollten, folgerten die Autoren, dass nur das LBP, aber nicht das BP die unbewusste Ursache des bewussten Willensakts sein kann.

Es gibt jedoch einige Gründe dafür, dass Haggards und Eimers Ergebnisse keinen zwingenden Schluss auf die Zusammenhänge zwischen BP und *W* zulassen. Erstens räumen die Autoren ein, dass sie keine klare *Baseline*² für das BP innerhalb des untersuchten Zeitraums von 2600 ms bestimmen konnten, und folgern, dass sie eine Kovariation zwischen BP und *W* nicht ausschließen können. Nach ihren eigenen Maßstäben wäre eine solche Kovariation ein Beleg für eine kausale Verknüpfung zwischen BP und *W*. Zweitens ist die kausale Verknüpfung zwischen LBP und *W* fragwürdig. Zwei von acht Versuchspersonen in der Bedingung eines frühen *W* (die Versuchspersonen 5 und 8; Haggard/Eimer 1999: 132, Tab. 2) gaben *W*-Zeitpunkte an, die vor dem Beginn des LBP lagen. Obwohl es immer noch eine statistisch signifikante Kovarianz zwischen LBP und *W* gibt, wirft diese Beobachtung Zweifel an einer kausalen Interpretation dieser Kovariation auf, es sei denn, man nimmt an, dass Wirkungen vor ihrer Ursache auftreten können. Außerdem liefert die Experimentalanordnung keine schlüssigen Belege für den Zeitpunkt der Entscheidung zwischen den beiden Wahlmöglichkeiten. Es könnte gut sein, dass die Versuchspersonen ihre Wahl zwischen der linken und rechten Handbewegung kurz nach Beendigung des vorangehenden Versuchs und lange

2 Die Baseline definiert eine Grundaktivität im EEG. Als Beginn des BPs oder des LBPs würde dann die erste Abweichung von der Baseline festgelegt.

vor *W* getroffen haben. In diesem Fall würde der *W*-Bericht nur den Zeitpunkt widerspiegeln, zu dem die vorherbestimmte Handlung ausgeführt wird. Schließlich scheinen *W*-Berichte im Allgemeinen unzuverlässig zu sein. Es wurde gezeigt, dass Versuchspersonen systematische Fehler bei der Einschätzung der Zeitpunkte ihrer Handlungen und äußerer Ereignisse machen, wenn diese gekoppelt sind, wie im Fall der Reaktion auf einen Reiz (Haggard et al. 2002). Das gilt auch für Haggards und Eimers Experimente: Die *W*-Zeitpunkte variierten zwischen 984 und 4 ms vor der Bewegung. Noch interessanter ist die Tatsache, dass in einem ähnlichen Experiment von Keller und Heckhausen (1990) die Versuchspersonen *W*-Zeitpunkte berichteten, die bis zu 806 ms nach (!) der Bewegung lagen. In Übereinstimmung mit diesen Befunden wurden 40 Prozent der *W*-Zeitpunkte, die von Trevena und Miller (2002) berichtet wurden, später als die Bewegung angegeben.

Aus diesen Beobachtungen lassen sich zwei Folgerungen ziehen: Erstens sind *W*-Berichte problematisch bei Aufgaben, in denen die Zeit eine entscheidende Rolle spielt. Zweitens ist die Spezifität des BP (und des LBP) im Verhältnis zu *W* und die nachfolgende Bewegung immer noch unklar. Obwohl die Ergebnisse von Haggard und Eimer (1999) sowie Trevena und Miller (2002) Zweifel aufwerfen, ob das BP wirklich *W* und die Bewegung determiniert, liefern sie im Hinblick auf dieses Problem keine schlüssigen Belege.

Ein kritischer Test der Spezifität der kausalen Rolle des BP, der nicht von Problemen mit *W*-Berichten betroffen ist, würde darin bestehen, ein BP zu einer Zeit auszulösen, zu der es noch nicht feststeht, welche motorische Handlung ausgeführt werden soll. Wenn verschiedene Bewegungen nach dem Beginn eines BP ausgeführt werden können, würde das die Annahme in Frage stellen, dass das BP die spezifische Bewegung bestimmt oder mit *W* verbunden ist.

3. Das Wahlreaktionsparadigma

Wir verwendeten ein Wahlreaktionsparadigma, in dem die Versuchspersonen einen Knopf mit entweder der rechten oder der linken Hand drücken mussten, nachdem sie einen entsprechenden visuellen Reiz wahrgenommen hatten. Natürlich trafen die Versuchspersonen in un-

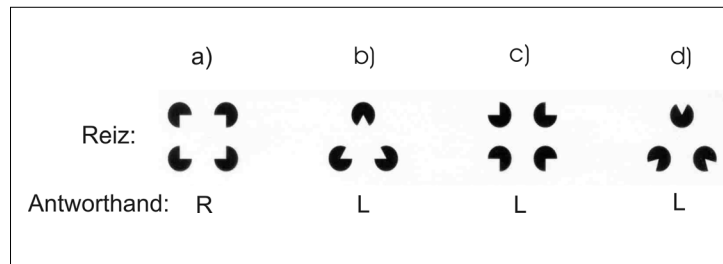
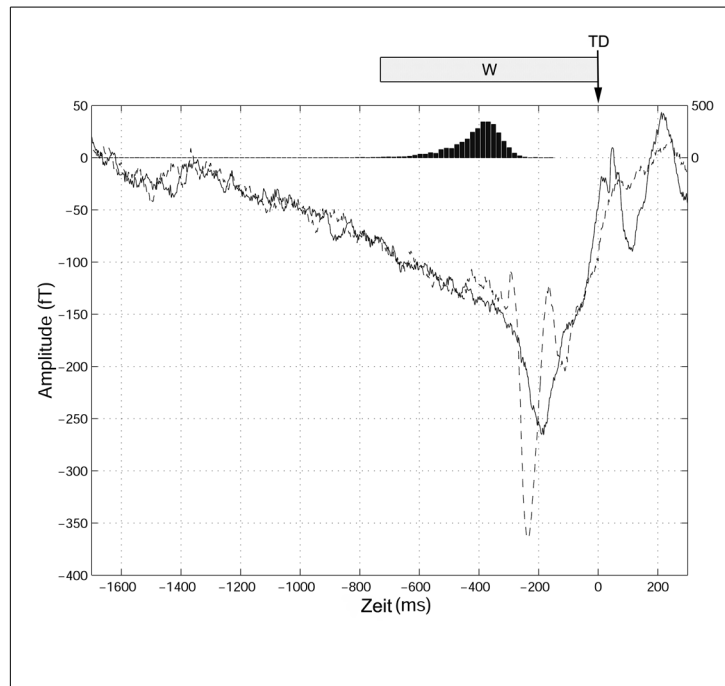


Abb. 3: Die vier im Experiment verwendeten Reiztypen: a) Kanizsa-Quadrat (Zielreiz), b) Kanizsa-Dreieck, c) anderes Quadrat, d) anderes Dreieck. Die Buchstaben R und L geben an, mit welcher Hand auf den jeweiligen Reiz reagiert werden sollte. Das Kanizsa-Quadrat diente in unserem Experiment als Zielreiz, während die anderen drei Reize die Rolle von Vergleichsreizen spielten. Die Versuchspersonen wurden instruiert, mit ihrem rechten Zeigefinger einen Knopf zu drücken, wenn ein Zielreiz erschien (mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,25), und einen anderen Knopf mit ihrem linken Zeigefinger zu drücken, wenn einer der drei Vergleichsreize erschien (mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,75). Die mittlere Reaktionszeit für Reaktionen der linken Hand betrug 414 ms (107 ms Standardabweichung), d.h. die Reizdarbietung ging dem Knopfdruck im Durchschnitt um 414 ms voraus. Zur Darstellung des BP wählten wir einen MEG-Kanal, der besonders starke Felder zeigte (Kanal A127).

serem Experiment keine freie Wahl, aber das ist irrelevant, weil wir nur an der Rolle eines Bestandteils von Willenshandlungen interessiert sind, nämlich am BP. Der Vorteil einer Wahlreaktionsaufgabe besteht darin, dass die Darbietung des Reizes uns einen klaren frühestmöglichen Zeitpunkt im Hinblick auf das Wissen der Versuchsperson über die auszuführende Option gibt, wodurch alle Schwierigkeiten mit *W*-Berichten vermieden werden. Wenn die Versuchsperson entsprechend reagiert und das BP der Darbietung des Reizes vorangeht, spricht das gegen die Interpretation, dass die Reaktion der Versuchsperson durch das gemessene BP festgelegt wird. Wir werden dafür argumentieren, dass das BP einem allgemeinen Erwartungsprozess zugeschrieben werden muss. Die Gehirnaktivität haben wir mit einem Magnetenze-

phalographen (MEG) gemessen, da das BP auch bei einem MEG sichtbar ist und vom Schädel und der Kopfhaut weniger verzerrt wird (Kristeva-Feige et al. 1997). Als Reizmaterial verwendeten wir so genannte Kanizsa-Figuren (siehe Abbildung 3 a und b) und andere Figuren, die durch eine Rotation der Eckelemente der Kanizsa-Figuren erstellt wurden (siehe Abbildung 3 c und d) und diesen damit physikalisch sehr ähnlich waren. Der Ablauf des Experiments und die Datenanalyse sind im Anhang dargestellt. Ergebnisse des Experiments aus einem anderen Kontext wurden bereits in einer Fachzeitschrift publiziert (Herrmann/Mecklinger 2000). Hier soll nur das BP betrachtet werden.

Abbildung 4 zeigt die *ereigniskorrelierten Felder* (EKFs) des Experiments. Der Tastendruck (TD) fand bei 0 ms statt. Neuronale Aktivität geht dem Knopfdruck um mindestens 1,3 Sekunden voraus. Die Reizdarbietung geht jedoch dem Knopfdruck durchschnittlich nur um 414 ms (107 ms Standardabweichung) voraus (Histogramm der Zeitpunkte des Reizbeginns in Abbildung 4 oben). Damit liegt also ereigniskorrelierte neuronale Aktivität bereits vor der frühesten Reizdarbietung vor. Um bewegungsbezogene und wahrnehmungsbezogene EKFs zu vergleichen, werden jeweils rückwärts gemittelte und vorwärts gemittelte EKFs gezeigt. Ein reaktionsbezogen gemitteltes EKF ist auf den Zeitpunkt des Tastendrucks gemittelt und zeigt die neuronale Aktivität, die dem Tastendruck vorausgeht (Rückwärtsmittelung, siehe Anhang für genaue Beschreibung der verschiedenen Mittelungen). Dadurch ist die bewegungsbezogene Aktivität im EKF dominanter, da es beim Zeitpunkt des Knopfdrucks keine zeitliche Verschwommenheit gibt. Reizbezogen vorwärts gemittelte EKFs sind auf den Zeitpunkt der Reizdarbietung gemittelt und zeigen deutlicher die neuronale Aktivität, die sich nach der Darbietung des Reizes ereignet (Vorwärtsmittelung), da es bezüglich des Reizbeginns kein zeitliches Verschwimmen gibt. Das steile negative Feld bei etwa -250 ms im vorwärts gemittelten und zeitlich verschobenen EKF (gestrichelte Linie) spiegelt wahrscheinlich das magnetische Gegenstück der durch den visuellen Reiz ausgelösten Negativität bei circa 170 ms (414 ms $-$ 250 ms = 164 ms) wider, das bei einem identischen Paradigma im EEG beobachtet wurde (Herrmann et al. 1999). Sowohl die reaktions- als auch die reizbezogenen EKFs zeigen deutlich die Aktivität, die der Darbietung der Reize vorangeht.



Unsere Ergebnisse zeigen, dass die neuronale Aktivität, die vor den motorischen Reaktionen auftritt, bereits zu einem Zeitpunkt einsetzen kann, an dem die Versuchspersonen noch gar nicht wissen konnten, ob sie den Knopf mit der linken oder mit der rechten Hand drücken sollten. Deshalb kann die beobachtete Aktivität nicht als eine spezifische Vorbereitung aufgefasst werden, einen der beiden Knöpfe zu drücken. Es scheint plausibel anzunehmen, dass die Aktivität das Ergebnis einer unspezifischen Erwartung der Versuchspersonen ist, die in die eine oder die andere der beiden Handlungen einmünden kann. Das Phänomen beobachtet man typischerweise, wenn die Versuchspersonen erwarten, dass sie gleich eine Aufgabe ausführen sollen. Tatsächlich gibt es, wie Trevena und Miller (2002) berichtet haben, einige Belege dafür, dass das BP »zumindest teilweise auch von kognitiven oder perzeptuellen Aspekten der Bewegungsvorbereitung, wie beispielsweise der Antizipation oder der Motivation, verursacht werden kann.« (Ebd.: 169).

Abb. 4: Rückwärts gemittelte, ereigniskorrelierte Felder, die dem Tastendruck (TD) mit der linken Hand bei 0 ms vorhergingen, zeigen ein kontinuierlich ansteigendes negatives Feld ähnlich wie in Libets Experimenten (durchgezogene Linie, Einheiten der EKF's in femto Tesla auf der linken Skala). Das Histogramm der Zeitpunkte für den Reizbeginn (oben) wurde berechnet, indem die Reaktionszeiten von den Zeiten des Knopfdrückens subtrahiert wurden. Es zeigt, zu welchem Zeitpunkt auf dem Monitor der visuelle Reiz erschien (Einheiten ausgedrückt in der Häufigkeit des Auftretens eines Reizes zu dem jeweiligen Zeitpunkt auf der rechten Skala). Der Zeitpunkt der bewussten Entscheidung, ob die linke oder die rechte Taste gedrückt werden soll (*W*), liegt in dem Intervall zwischen dem frühesten Reizbeginn (linkes Ende des Histogramms) und dem Tastendruck (TD). Die beobachtete Aktivität zeigte sich schon in den EKF's, bevor das Bild auf dem Monitor dargeboten wurde, also vor *W* – wie bei Libet. Das vorwärts gemittelte EKF wird zum Vergleich angegeben (unterbrochene Linie; dieses EKF wurde auf den Reizbeginn gemittelt und dann um die durchschnittliche Reaktionszeit von 414 ms zeitlich nach hinten verlagert). Es zeigt zusätzlich die vom Reiz ausgelöste Gehirnaktivität, die in der ersten Analyse durch die Variabilität der Reaktionszeit verwaschen wurde. Wichtig ist hier jedoch, dass beide EKF's deutlich zeigen, dass die Gehirnaktivität bereits vor Reizbeginn stetig ansteigt.

Auch Libets Versuchspersonen sollten in vielen nachfolgenden Durchgängen ebenfalls die Hand bewegen. Deshalb kann man annehmen, dass sie auch eine unspezifische Erwartung bezüglich ihrer Handbewegung entwickelten. Es erscheint uns aus diesen Gründen plausibler, die von Libet beobachtete Aktivität als Indiz einer allgemeinen Erwartung und nicht als spezifische Determination der bewussten Bewegungsentscheidung zu interpretieren.

Unsere Resultate legen außerdem eine neue Einschätzung der Bedeutung von Libets Experimenten für die Debatte über die Willensfreiheit nahe. Nach Libets eigener Interpretation zeigen seine Ergebnisse, dass »die Einleitung des freien Willensakts unbewusst im Gehirn anzufangen scheint, und zwar deutlich bevor die Person bewusst weiß, dass sie handeln will!« (1999: 51) In einem früheren Aufsatz machte Libet sogar die stärkere Behauptung, dass »das Gehirn entscheidet, die Handlung einzuleiten oder zumindest die Einleitung vorzubereiten,

bevor es irgendein subjektives, berichtbares Bewusstsein gibt, dass eine solche Entscheidung stattgefunden hat« (1985: 536). Diese Aussagen sowie die zugrunde liegenden Ergebnisse sind zweideutig im Hinblick auf die Spezifität der unbewussten, neuronalen Vorbereitung der Willenshandlung. Einer schwachen Interpretation zufolge zeigen Libets Ergebnisse, dass eine Körperbewegung durch unbewusste Gehirnaktivität vorbereitet wird, bevor die bewusste Entscheidung fällt. Diese Vorbereitung kann schließlich zu verschiedenen Bewegungen führen. Einer stärkeren Interpretation zufolge bestimmt jedoch die unbewusste Gehirnaktivität genau vorher, welche Bewegung ausgeführt werden wird. Da die Willensfreiheit bewusste Entscheidungen zwischen verschiedenen verfügbaren Alternativen betrifft, hängt die Relevanz von Libets Experimenten für diese Debatte vom Zutreffen der zweiten Interpretation ab. Schließlich steht es sogar bei Dualisten nahezu außer Frage, dass irgendeine Gehirnaktivität für die Vorbereitung einer freien Handlung notwendig ist. Umgekehrt würden naturwissenschaftlich orientierte Philosophen, die behaupten, dass Freiheit und Determinismus kompatibel sind, darauf bestehen, dass die Freiheit gefährdet ist, wenn eine Handlung von einem Gehirnprozess bestimmt wird, der sich der Kontrolle des Handelnden entzieht. Demnach stellten Libets Daten nur dann eine »Gefahr« für die Willensfreiheit dar, wenn gezeigt werden könnte, dass das unbewusste BP eine *bestimmte* Bewegung festlegen könnte. Wenn jedoch das BP mit verschiedenen Ausgängen kompatibel ist, dann könnte man vermuten, dass die Auswahl zwischen diesen Ausgängen in einem anderen Prozess erfolgt, möglicherweise in der bewussten Entscheidung des Handelnden, die ihrerseits natürlich wieder neuronal realisiert sein kann. Unsere Ergebnisse stellen Belege gegen die stärkere Hypothese dar. Da das BP vor der Reizdarbietung einsetzt und die Versuchspersonen angemessen reagieren, kann das BP nicht determinieren, welche der beiden verfügbaren Alternativen (Bewegung der rechten oder der linken Hand) ausgeführt wird. Stattdessen scheint das BP eine allgemeine Erwartung widerzuspiegeln. Libets Versuchspersonen führten nur eine spezifische Bewegung aus. Aber dieser Umstand war eine Folge der Instruktion. Unter der Voraussetzung einer Instruktion, die zwei verschiedene Alternativen zulässt, wie es in unserem Experiment realisiert wurde, kann eine Entscheidung für eine der beiden Alternativen auch nach dem Beginn des Bereitschaftspotenzials getroffen werden. Es scheint also, dass es Gründe

dafür gibt, die stärkere Hypothese zu verwerfen und zu bezweifeln, ob Libets Ergebnisse als eine Widerlegung der Willensfreiheit interpretiert werden können.

4. Anhang

Die Reize wurden jeweils für 700 ms präsentiert. Zwischen zwei Reizen lagen randomisierte Interstimulusintervalle, die zwischen 1000 und 1500 ms andauerten. Die Figuren wurden in schwarzer Farbe mit einem zentralen Fixationskreuz auf weißem Hintergrund gezeigt. An der Untersuchung nahmen 16 Versuchspersonen teil. Sechs davon mussten aufgrund von Artefakten durch übermäßige Augenbewegungen, Artefakten durch hochfrequente Störsignale (die möglicherweise das Ergebnis einer Verunreinigung durch das EMG waren) oder deshalb ausgeschlossen werden, weil die Verhaltensmaße (Reaktionszeit oder Fehlerrate) nicht innerhalb 2,5 Standardabweichungen vom Mittelwert lagen. Daten von zehn Versuchspersonen mit einem Durchschnittsalter von 21,7 Jahren (von 18 bis 25 Jahren, sechs davon weiblich) wurden analysiert. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder korrigiert normalsichtig. Sie zeigten keinerlei Anzeichen von neurologischen oder psychiatrischen Störungen, und alle gaben schriftlich ihre informierte Zustimmung zur Teilnahme an der Untersuchung. Das MEG wurde mit einem BTI-148-Kanal-Ganzkopfsystem gemessen (MAGNES WHS 2500). Da so genannte Trigger sowohl bei der Reizdarbietung als auch bei den Knopfdrücken aufgezeichnet wurden, war sowohl eine Mittelung ausgehend von den Reizen als auch ausgehend von den Tastendrücken möglich. Die rechte Hand wurde bei Reaktionen auf Zielreize eingesetzt (1/4 der Reize). Wir analysierten nur die Reaktionen der linken Hand (3/4 der Reize), um einen möglichen Einfluss der Zielreizverarbeitung auf unsere Ergebnisse zu vermeiden.

Die Daten aus Libets Experimenten wurden relativ zu den Reaktionen über den Beginn der elektromyographischen Aktivität gemittelt (rückwärts gerichtete Mittelung), da es keinen äußeren Reiz gab. Wir führten eine ähnliche Analyse durch, indem wir vom Zeitpunkt des Knopfdrucks aus rückwärts mittelten. Baselines wurden für das Zeitintervall von 1700 bis 1600 ms vor dem Knopfdruck

berechnet. Ereigniskorrelierte Felder wurden rückwärts bis 1700 ms vor dem Knopfdruck berechnet. Zusätzlich wurden reizbezogene EKFs für den Zeitbereich von 1300 ms vor bis 700 ms nach dem Reizbeginn berechnet (vorwärts gerichtete Mittelung). Reizbezogene Mittelwerte wurden zum besseren Vergleich relativ zu reaktionsbezogenen Mittelwerten um die mittlere Reaktionszeit von 414 ms zeitlich nach hinten verlagert. Baselines wurden anhand des Zeitintervalls von 1286 ms bis 1186 ms vor der Reizdarbietung berechnet, um kompatibel mit der reaktionsbezogenen Mittelung zu sein (414 ms mittlere Reaktionszeit plus 1286 ms bzw. 1186 ms ergibt wieder 1700 ms bzw. 1600 ms).

Bereitschaftspotenzial versus Bereitschaftsfeld

Streng genommen werden mit einem Elektroenzephalographen (EEG) Potenziale und mit einem Magnetenzephalographen (MEG) Felder gemessen. Das Bereitschaftspotenzial (BP) kann man also nur mit dem EEG messen, während mit dem hier verwendeten MEG das magnetische Pendant, das Bereitschaftsfeld (BF), gemessen werden kann. Unsere Daten zeigen ein magnetisches Feld, das dem Drücken von Knöpfen bei einem Wahlreaktionsparadigma vorangeht und mit der Zeit langsam stärker wird. Deecke et al. (1984) haben zwar argumentiert, dass BPs beziehungsweise BFs nur vor Willkürbewegungen (Handlungen), aber nicht, oder nur zu einem geringeren Grad, vor Reaktionen, wie etwa der Reaktion auf einen visuellen Reiz, messbar sind. Inzwischen wurde jedoch gezeigt, dass eine ähnliche vorbereitende motorische Aktivität messbar war, bevor Versuchspersonen durch Knopfdruck auf einen visuellen Reiz reagieren sollten (Endo et al. 1999). In dieser Untersuchung dauerte das BP jedoch nur einige hundert Millisekunden, was wahrscheinlich damit zu tun hatte, dass die Baseline direkt vor dem Beginn des visuellen Reizes korrigiert wurde. Nachfolgestudien haben auch deutliche, lang andauernde BPs in solchen Paradigmen nachgewiesen, in denen auf auditive (Leocani et al. 2001) und visuelle Reize (Endl et al. 1999) reagiert werden musste.

Aufgrund der Tatsache, dass der Zeitverlauf des von uns gemessenen MEG-Signals denjenigen ähnelt, die für BFs typisch sind, und

dass BPs in Reaktionszeitparadigmen gemessen werden können, gehen wir davon aus, dass die Aktivität, die in unserem Paradigma gemessen wurde, ebenfalls ein BF ist.

Literatur

- Bridgeman, B. (1985), Free will and the function of consciousness, *Behavioral and Brain Sciences*, 8: 540.
- Deecke, L./Weinberg, H./Brickett, P. (1982), Magnetic fields of the human brain accompanying voluntary movement: Bereitschaftsmagnetfeld, *Experimental Brain Research*, 48: 144-148.
- Deecke, L./Bashore, T./Brunia, C.H./Grunewald-Zuberbier, E./Grunewald, G./Kristeva, R. (1984), *Movement-associated potentials and motor control*, Report of the EPIC VI Motor Panel, Annals of the New York Academy of Sciences.
- Eimer, M. (1998), The lateralized readiness potential as an on-line measure of selective response activation, *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 30: 146-156.
- Endl, W./Walla, P./Lindinger, G./Deecke, L./Lang, W. (1999), Event-related potential correlate of false recognition of faces, *Neuroscience Letters*, 265: 115-118.
- Endo, H./Kizuka, T./Masuda, T./Takeda, T. (1999), Automatic activation in the human primary motor cortex synchronized with movement preparation, *Cognitive Brain Research*, 3: 229-239.
- Haggard, P./Eimer, M. (1999), On the relation between brain potentials and the awareness of voluntary movements, *Experimental Brain Research*, 126: 128-133.
- Haggard, P./Clark, S./Kalogeras, J. (2002), Voluntary action and conscious awareness, *Nature Neuroscience*, 5(4): 382-385.
- Herrmann, C.S./Mecklinger, A. (2000), Magnetoencephalographic responses to illusory figures: Early evoked gamma is affected by processing of stimulus features, *International Journal of Psychophysiology*, 38(3): 265-281.
- Herrmann, C.S./Mecklinger, A./Pfeifer, E. (1999), Gamma responses and ERPs in a visual classification task, *Clinical Neurophysiology*, 110(4): 636-642.

- Keller, I./Heckhausen, H. (1990), Readiness potential preceding spontaneous motor acts: voluntary vs. involuntary control, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 76: 351-361.
- Kornhuber, H.H./Deecke, L. (1965), Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale, *Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie*, 284: 1-17.
- Kristeva-Feige, R./Rossi, S./Feige, B./Mergner, T./Lüicking, C.H./Rossini, P.M. (1997), The Bereitschaftspotential paradigm in investigating voluntary movement organization in humans using magnetoencephalography (MEG), *Brain Research Protocols*, 1(1): 13-22.
- Leocani, L./Toro, C./Zhuang, P./Gerloff, C./Hallett, M. (2001), Event-related desynchronization in reaction time paradigms: a comparison with event-related potentials and corticospinal excitability, *Clinical Neurophysiology*, 112: 923-930.
- Libet, B. (1985), Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action, *Behavioral and Brain Sciences*, 8(4): 529-539.
- Libet, B. (1993), *Neurophysiology of consciousness*, Boston.
- Libet, B. (1999), Do we have free will?, *Journal of Consciousness Studies*, 6: 47-57.
- Libet, B. (2002), The timing of mental events: Libet's experimental findings and their implications, *Consciousness and Cognition*, 11: 291-299.
- Libet, B./Wright, E.W./Gleason, C.A. (1982), Readiness-potentials preceding unrestricted ›spontaneous‹ vs. pre-planned voluntary acts, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 54: 322-335.
- Libet, B./Gleason, C.A./Wright, E.W./Pearl, D.K. (1983), Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activities (readiness-potential): The unconscious initiation of a freely voluntary act, *Brain*, 106: 623-642.
- Trevena, J. A./Miller, J. (2002), Cortical movement preparation before and after a conscious decision to move, *Consciousness and Cognition*, 11: 162-190.