Implanterade hjärn–datorgränssnitt: möjligheter och etiska utmaningar

Thomas Skoglund, adjungerad professor, neurokirurgi, överläkare, neurokirurgiska kliniken, Sahlgrenska universitetssjukhuset, Göteborg; sektionen för klinisk neurovetenskap, institutionen för neurovetenskap och fysiologi, Sahlgrenska akademin, Göteborgs universitet
● thomas.skoglund@gu.se

Giacomo Valle, doktor i biorobotik, biträdande universitetslektor, Signalbehandling och medicinsk teknik, Elektroteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

Asgeir S Jakola, professor, neurokirurgi, överläkare, neurokirurgiska kliniken, Sahlgrenska universitetssjukhuset, Göteborg; sektionen för klinisk neurovetenskap, institutionen för neurovetenskap och fysiologi, Sahlgrenska akademin, Göteborgs universitet

Katharina Stibrant Sunnerhagen, professor, överläkare, neurorehabilitering, sektionen för klinisk neurovetenskap, institutionen för neurovetenskap och fysiologi, Sahlgrenska akademin, Göteborgs universitet; Rehabiliteringsmedicin, Sahlgrenska universitetssjukhuset, Göteborg

Brain–computer interfaces (BCI), på svenska hjärn-datorgränssnitt, är en framväxande teknik som möjliggör direkt kommunikation mellan hjärnan och externa enheter. Syftet är att återge förlorade funktioner genom att ge patienter möjlighet att styra rörelser, kommunicera eller återfå känsel eller syn. Tekniken kan både registrera nervsignaler från hjärnbarken och stimulera den för att återskapa sensorisk funktion. Patientgrupper som kan ha nytta av detta är exempelvis personer med ryggmärgsskada, stroke eller ALS.

BCI kan vara antingen icke-invasiva, då signaler registreras utanför kroppen, eller implanterade. De implanterade systemen har hittills visat störst potential, eftersom de ger högre upplösning i tid och rum och därmed kan följa nervaktivitet med större precision och särskilja signaler från små, avgränsade områden i hjärnbarken. De öppnar också för sensorisk återkoppling, men innebär samtidigt kirurgiska risker och långsiktiga etiska utmaningar.

Tekniken är fortfarande i ett tidigt skede, men kliniska prövningar visar att BCI kan förbättra funktion och delaktighet hos patienter med svåra funktionsnedsättningar. Erfarenheterna understryker samtidigt att framgångsrik behandling kräver ett multidisciplinärt team: neurokirurgi, neurovetenskap, robotik och ingenjörskompetens måste kombineras med specialiserad neurorehabilitering och aktivt deltagande av en motiverad patient. I denna översikt sammanfattar vi det aktuella kunskapsläget om främst implanterade BCI och diskuterar deras kliniska tillämpningar, etiska utmaningar och framtida betydelse.

BAKGRUND

De första försöken med BCI gjordes på 1970-talet, då EEG-signaler användes för att styra enkla datorprogram. Dessa tidiga system var icke-invasiva och visade att hjärnaktivitet kunde användas som styrsignal, men precisionen var begränsad.

Implanterade neurostimulatorer har använts kliniskt i flera decennier. Djup hjärnstimulering (deep brain stimulation, DBS) är etablerad vid rörelsestörningar, ryggmärgsstimulering (spinal cord stimulation, SCS) används vid behandling av kronisk smärta och kokleaimplantat gör det möjligt för patienter med grav hörselnedsättning att uppfatta ljud genom direkt stimulering av hörselnerven. Även om vissa moderna DBS-system nu även kan registrera hjärnans elektriska aktivitet för att anpassa stimuleringen, räknas de inte som BCI i egentlig mening. De har dock visat att implanterade elektroder kan användas långsiktigt inom rutinsjukvården och har därmed banat väg för utvecklingen av implanterade BCI.

De första kliniska implantationerna av intrakortikala BCI, där elektroder placeras i hjärnbarken, gjordes i slutet av 1990-talet efter flera decenniers djurförsök som visade att intrakortikala elektroder kunde registrera stabila och användbara styrsignaler. Sedan dess har tekniken utvecklats i flera akademiska projekt, till exempel inom Braingate-konsortiet [1] och andra grupper som Cortical Bionics Research Group [2], där långvarig uppföljning visat att implanterade elektroder kan ge tillförlitliga signaler under många år. Under senare år har även industridrivna satsningar bidragit till snabb teknisk utveckling, men ofta med begränsad vetenskaplig insyn trots omfattande medial exponering [3].

HUVUDBUDSKAP

- Implanterade hjärn–datorgränssnitt har i forskningsstudier visat potential att delvis återge förmågan till motorik, tal och känsel hos selekterade patienter med svåra funktionsnedsättningar.
- Tekniken kan inte bara kompensera för bortfall utan även främja rehabilitering genom att stimulera neuroplasticitet.
- Kirurgiska risker, långsiktigt ansvar för implantat och omfattande träningskrav utgör viktiga begränsningar.
- Etiska frågor kring samtycke, integritet och jämlik tillgång måste lösas för en trovärdig klinisk utveckling.

TEKNISK ÖVERSIKT

Implanterade BCI kan konstrueras på olika sätt beroende på var elektroderna placeras. Vid elektrokortikografi ligger elektroderna antingen direkt på hjärnytan eller på den hårda hjärnhinnan, vilket ger stabila signaler men med måttlig upplösning [4]. Ett alternativ är mikroelektroder placerade i hjärnbarken, som kan registrera aktivitet från enskilda nervceller eller små nervcellsgrupper och därmed ge möjlighet till mer exakt avläsning och stimulering [5]. Tekniken täcker dock endast en mycket begränsad del av hjärnbarken och medför också större risk för signalbortfall över tid. En tredje metod är endovaskulära system, där elektroder placeras i hjärnans blodkärl via kateterisering [6]. Dessa kräver ett något mindre omfattande kirurgiskt ingrepp, men den kliniska erfarenheten är fortfarande liten och möjligheten att välja område på hjärnbarken begränsas av blodkärlens anatomi. Oavsett metod krävs att de aktuella områdena av hjärnbarken är intakta och således kan generera igenkännbara signalmönster.

Gemensamt för alla system är att de registrerade nervsignalerna måste tolkas. Detta görs med en avkodare (decoder), det vill säga en algoritm som kopplar mönster i nervsignalen till en viss avsikt, exempelvis en rörelse eller ett ord. För detta ändamål kalibreras avkodaren individuellt genom en träningsperiod där

användaren försöker utföra, eller föreställer sig att utföra, relevanta uppgifter. Sambandet mellan den registrerade nervaktiviteten och den tilltänkta handlingen ligger sedan till grund för styrningen av det externa hjälpmedlet. De senaste årens framsteg på området beror i stor utsträckning på utvecklingen av mer avancerade avkodningsalgoritmer. Med hjälp av AI-baserade metoder kan systemen snabbare och mer stabilt översätta nervsignaler till avsedda rörelser eller ord, även när signalerna varierar över tid.

EXEMPEL PÅ KLINISKA TILLÄMPNINGAR

Implanterade BCI är fortfarande i ett tidigt skede och har hittills prövats uteslutande i forskningsstudier. En nyligen publicerad översikt identifierade 21 forskargrupper som fram till 2023 genomfört 28 studier med totalt 67 deltagare [7]. Nedan följer exempel på kliniskt inriktade tillämpningar inom ramen för dessa studier, vilka även illustreras översiktligt i Figur 1.

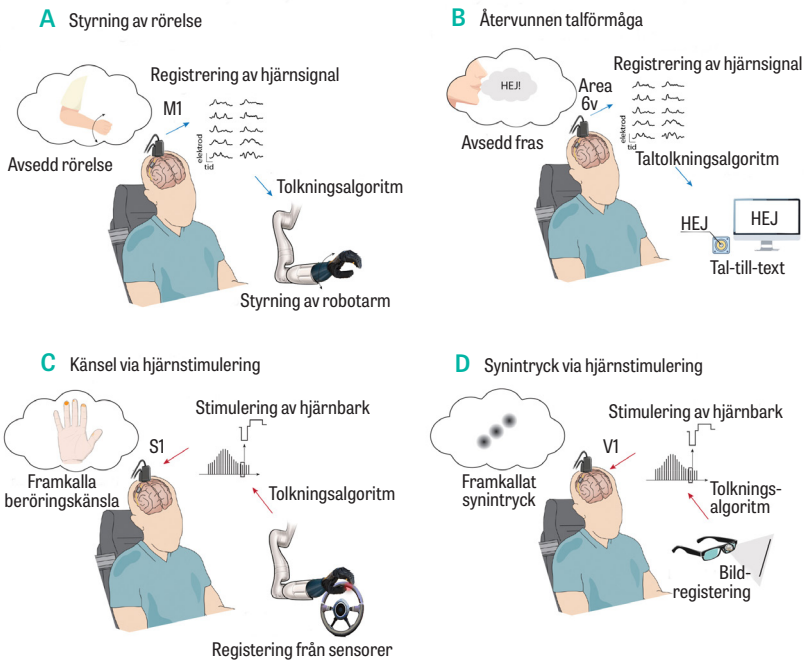
Motorisk kontroll och återställande av rörelseförmåga

Återställande av motorisk funktion är det område där implanterade BCI har studerats mest. Hos patienter med tetraplegi (förlamning i både armar och ben) har man visat att nervsignaler från hjärnbarkens motoriska områden kan användas för att styra externa enheter. Detta kan innebära att flytta en markör på en datorskärm, styra en robotarm eller kontrollera ett exoskelett [8]. Samma princip har även använts för att aktivera elektrisk stimulering av patientens egna muskler, vilket kan återskapa viss rörelseförmåga i förlamade extremiteter.

Ett illustrativt exempel på återställande av rörelseförmåga är det så kallade »brain-spine interface« (hjärn-ryggmärgsgränssnitt) som utvecklats i Lausanne. Här kunde forskarna hos en person med tetraplegi på grund av en ryggmärgsskada koppla hjärnaktivitet till elektrisk stimulering av ryggmärgen. Systemet bestod av fullt implanterade registrerings- och stimuleringsenheter som översatte nervsignaler från hjärnbarkens motoriska områden till elektrisk stimulering av ryggmärgens gångnätverk. På detta sätt kunde deltagaren stå upp och gå med naturliga rörelser även i vardagliga miljöer, och kontrollen kvarstod stabilt under mer än ett års uppföljning. Dessutom uppnåddes en rehabiliteringseffekt: patienten återfick viss förmåga att gå med kryckor även när systemet var avstängt [9]. Detta visar att motoriska BCI inte enbart kan kompensera för en förlorad funktion, utan även bidra till rehabilitering, sannolikt genom att stimulera neuroplasticitet. På detta sätt kan systemen fungera både som hjälpmedel och som ett träningsredskap för att bevara eller återvinna motoriska nätverk [10]. Det är dock viktigt att notera att dessa resultat har uppnåtts inom ramen för mycket resurskrävande forskningsmiljöer, där ett stort antal specialister har arbetat med en noggrant selekterad patient med inkomplett ryggmärgsskada som kunde genomgå långvarig intensiv träning.

Tal och språk

Kommunikation är ett annat centralt mål för implanterade BCI. Den vanligaste lösningen i dag är att systemet gör det möjligt för patienter att styra en markör på en skärm, till exempel över ett virtuellt tangentbord. Även moderna implantat, som Neuralink, bygger fortfarande på denna princip [11].



Figur 1. Implanterade hjärn–datorgränssnitt (BCI): fyra tillämpningsområden. A. Rörelse: Aktivitet i hjärnbarkens motoriska områden registreras och används för att styra exempelvis en robotarm. B. Tal: Aktivitet i områden som styr mun- och ansiktsrörelser kan avkodas och omvandlas till text eller syntetiskt tal. C. Känsel: Sensorer i ett hjälpmedel registrerar beröring och stimulering av de delar av hjärnbarken som bearbetar känsel och kan skapa känselupplevelser som återkoppling. D. Syn: Stimulering av synbarken kan framkalla enkla synintryck i form av ljuspunkter.

Figuren är omarbetad av författarna, med vissa delar baserade på [13] (Valle G, et al. Science. 2025;387:315-22).

En mer direkt ansats är att avkoda talintentioner från områden i hjärnbarken som styr mun- och ansiktsrörelser och därigenom översätta dem till text eller syntetiskt tal. I Bravo-projektet vid University of California, San Francisco, kunde forskare med hjälp av elektrokortikografiregistreringar och språkmodeller generera tal i nära realtid hos patienter som förlorat talförmågan efter en hjärnstamsinfarkt. Hastigheter på upp till omkring 70–80 ord per minut har uppnåtts, och även patientens egen röst har återskapats. Detta har kombinerats med en virtuell avatar som förmedlar mimik och icke-verbala signaler för mer naturlig kommunikation [4].

Utöver den funktionella nyttan innebär återvunnen kommunikation en avgörande förbättring av patientens delaktighet och autonomi vid sjukdomar som ALS eller locked-in-syndrom, där många lever i flera år med bevarad kognitiv förmåga [12].

Sensorisk återkoppling

Effektiv motorisk kontroll förutsätter sensorisk återkoppling, och utan sådan blir rörelser klumpiga. Därför utvecklas BCI som inte bara registrerar hjärnaktivitet, utan även stimulerar nervsystemet för att återskapa upplevelsen av beröring [13].

I kliniska försök har elektrisk stimulering av de de-

lar av hjärnbarken som bearbetar känsel framkallat upplevelser av beröring. Patienter som använt avancerade handproteser med sensorer och motorer – så kallade bioniska händer – och som fått sådan återkoppling har kunnat reglera greppstyrka bättre, känna skillnad på olika ytor och upplevt att protesen blivit en mer naturlig del av kroppen (Figur 1). Denna känsla av integration mellan kropp och hjälpmedel, ofta benämnd »embodiment« (förkroppsligande), är viktig både för funktionen och för rehabiliteringen. När hjärnan återfår kopplingen mellan intention, rörelse och känsel kan neuroplasticitet stimuleras och återhämtningen stödjas.

Principen har även prövats för syn, där stimulering av hjärnbarkens synområden kan framkalla enkla visuella intryck i form av ljuspunkter (fosfener), men tekniken är ännu på pilotstadiet [14].

De kliniska resultaten är fortfarande begränsade till små studier, men de illustrerar att tekniken inte bara kan kompensera för och delvis återge förlorade funktioner utan även bidra till återhämtning genom neuroplasticitet. Detta gör BCI till ett forskningsfält med utvecklingspotential inom neurorehabilitering.

ETISKA ASPEKTER

Implanterade BCI väcker en rad etiska frågor [15]. Det kirurgiska ingreppet är förenat med risk för komplikationer, framför allt hjärnblödning och infektion. När implantation sker i forskningssyfte, innan den kliniska nyttan är säkerställd, blir risk-nyttabalansen särskilt känslig. Ett växande problem är implantat som blir kvar i kroppen när forskningsprojekt avslutas eller tekniken överges. Dessa kan innebära medicinska risker och väcker frågor om långsiktigt ansvar: ska forskargruppen, vården eller industrin stå för uppföljning och eventuell borttagning av implantatet?

Hjärnsignaler är en unik och känslig informationskälla. Insamlade data måste skyddas på samma sätt som annan patientinformation. Eftersom BCI innebär kontinuerlig kommunikation mellan hjärnan och externa system väcks frågor om obehörig åtkomst, manipulation och missbruk av data, även om de tekniska detaljerna fortfarande är otillräckligt utredda.

Informerat samtycke är en särskild utmaning i denna patientgrupp. Personer med kommunikationssvårigheter kan ha begränsad möjlighet att förstå och uttrycka sitt samtycke. Det finns risk att svårt sjuka patienter överskattar nyttan eller känner sig pressade att delta. Många timmars träning och testning i laboratoriemiljö är ofta nödvändiga för att systemen ska fungera och kan innebära att värdefull tid i livet ägnas åt forskningsdeltagande snarare än åt vardag och familj. Samtidigt kan deltagande upplevas som meningsfullt för rätt patient om insatsen leder till förbättrad funktion eller ökad delaktighet.

I takt med att tekniken utvecklas kan användningsområdet förskjutas från terapi till icke-medicinska eller så kallade förstärkande syften. Detta väcker frågor om jämlikhet och risk för att resurser riktas till grupper utan medicinska behov.

Sammanfattningsvis kräver BCI-forskningen inte bara teknisk utveckling, utan också en tydlig etisk ram. Kirurgiska risker, långsiktigt ansvar, integritet och samtycke måste integreras redan i forskningsfasen för att tekniken ska kunna utvecklas trovärdigt och med patienternas bästa i centrum.

FRAMTID OCH SLUTSATSER

Implanterade hjärn–datorgränssnitt har på kort tid gått från experimentella prototyper till kliniska prövningar med lovande resultat. Motorisk kontroll, återvunnen förmåga att styra teknik och kommunicera samt sensorisk återkoppling framstår i dag som viktiga tillämpningsområden. Utöver att delvis kompensera för förlorade funktioner kan tekniken även ha betydelse för rehabiliteringen genom att stimulera neuroplasticitet, vilket kan bidra till återhämtning efter exempelvis stroke eller ryggmärgsskada.

Samtidigt kvarstår flera avgörande utmaningar. Kirurgiska risker måste vägas mot potentiell nytta, det långsiktiga ansvaret för implantat behöver tydliggöras och de omfattande träningskraven kan vara betungande för patienter. Därtill krävs öppenhet och vetenskaplig transparens även i industridrivna projekt för att fältet ska kunna utvecklas på ett trovärdigt sätt.

För svensk sjukvård är det viktigt att följa utvecklingen, både för att kunna värdera tekniken kritiskt och för att säkerställa att patienter får tillgång till framtida behandlingar på ett säkert, etiskt och jämlikt sätt. ○

● Potentiella bindningar eller jävsförhållanden: Giacomo Valle äger aktier i Mynerva AG och är konsult för Neuroone Medical Technologies Corporation.

Citera som: Läkartidningen. 2026;123:25136

REFERENSER

1. Braingate. https://www.braingate.org
2. Cortical Bionics Research Group. https://www.corticalbionics.com
3. Hedbom P/TT. Fick chip från Musk inopererat i hjärnan. Svenska Dagbladet. 30 jan 2024. https://www.svd.se/a bgEMBv/forsta-manniskan-har-fatt-musks-hjarnimplantat
4. Metzger SL, Littlejohn KT, Silva AB, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. Nature. 2023;620(7976):1037-46. Erratum: 2024;631(8021):E13.
5. Flesher SN, Downey JE, Weiss JM, et al. A brain-computer interface that evokes tactile sensations improves robotic arm control. Science. 2021;372(6544):831-6.
6. Mitchell P, Lee SCM, Yoo PE, et al. Assessment of safety of a fully implanted endovascular brain-computer interface for severe paralysis in 4 patients: the Stentrode with thought-controlled digital switch (SWITCH) study. JAMA Neurol. 2023;80(3):270-8. Erratum: 2023;80(5):533.
7. Patrick-Krueger KM, Burkhart I, Contreras-Vidal JL. The state of clinical trials of implantable brain–computer interfaces. Nat Rev Bioeng. 2025;3:50-67.
8. Benabid AL, Costecalde T, Eliseyev A, et al. An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration. Lancet Neurol. 2019;18(12):1112-22.
9. Lorach H, Galvez A, Spagnolo V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface. Nature. 2023;618(7963):126-33.
10. Young MJ, Lin DJ, Hochberg LR. Brain-computer interfaces in neurorecovery and neurorehabilitation. Semin Neurol. 2021;41(2):206-16.
11. Neuralink. Breakthrough technology for the brain. https://neuralink.com/technology/
12. Nilsen HW, Martinsen ACT, Johansen I, et al. Demographic, medical, and clinical characteristics of a population-based sample of patients with long-lasting locked-in syndrome. Neurology. 2023;101(10):e1025-35.
13. Valle G, Alamri AH, Downey JE, et al. Tactile edges and motion via patterned microstimulation of the human somatosensory cortex. Science. 2025;387(6731):315-22.
14. Fernández E, Alfaro A, Soto-Sánchez C, et al. Visual percepts evoked with an intracortical 96-channel microelectrode array inserted in human occipital cortex. J Clin Invest. 2021;131(23):e151331.
15. Wilkins RB, Coffin T, Pham M, et al. Mind the gap: bridging ethical considerations and regulatory oversight in implantable BCI human subjects research. Front Hum Neurosci. 2025;19:1633627.

SUMMARY

Implantable brain–computer interfaces – clinical applications and ethical challenges

Brain–computer interfaces (BCIs) enable direct communication between the brain and external devices. Implantable BCIs have shown the greatest potential, enabling improvement or partial recovery of lost motor, communication, and sensory functions. Clinical trials have demonstrated that BCIs can enable people with tetraplegia to control robotic limbs or re-activate their own muscles, that communication can be partially regained in patients with severe speech loss, and that sensory feedback can improve the embodiment of prostheses. Beyond functional gains, BCIs may also promote neuroplasticity and rehabilitation. However, surgical risks, long-term responsibility for implanted devices, and the burden of extensive training remain major challenges. Ethical concerns include informed consent in vulnerable patient groups and the handling of highly sensitive neural data. While still experimental, BCIs represent a rapidly developing field with significant promise for neurorehabilitation, provided clinical benefit, patient safety, and ethical integrity remain central.