

Mensch-Maschine-Schnittstellen Tor zur virtuellen Welt der Zukunft



**Wir
gestalten
Zukunft**

VDI Research

Bild: © peterschreiber.media/gettyimages.com

Mensch-Maschine-Schnittstellen, Tor zur virtuellen Welt der Zukunft

Digitale Technologien werden immer stärker Teil unseres Lebens. Das Smartphone als ständiger Begleiter, Online-Marktplätze oder die Video-Konferenz auf der Arbeit, all das ist aus modernen Gesellschaften nicht mehr wegzudenken. Dabei formieren sich über all diese Zugänge virtuelle Welten, an denen wir partizipieren und mit denen wir interagieren. Allmählich entsteht auf diesem Weg eine Welt, in der physische und virtuelle Realität zu einer Gesamtheit verschmilzt und sich zukünftig ein Großteil heutiger Realität im umfassenden **Metaversum** wiederfinden wird (Zweck & Braun et al., 2023). In diesem Zusammenhang kommt einer bestimmten technologischen Komponente, die dieser Verschmelzung ihre Form und Struktur verleiht, eine besondere Bedeutung zu: der **Mensch-Maschine-Schnittstelle, kurz MMS**. Sie übersetzt Informationen aus der analogen Welt ins Digitale und vice versa und bestimmt dabei über vordefinierte Übergangs- und Zutrittsmechanismen, welche Interaktionen zwischen Mensch und Technik möglich sind (Dickel, 2023). Da diesem "Gatekeeper" eine hohe Bedeutung zukommt, wirft das vorliegende VDI Research-Paper einen Blick auf die bisherige Entwicklung und die Zukunft der MMS.

Die Mensch-Maschine-Interaktion wird definiert als „das zielgerichtete Zusammenwirken von Personen mit technischen Systemen zur Erfüllung eines fremd- oder selbstgestellten Auftrages“ (Timpe & Kolrep, 2002) und diese wiederum realisiert sich über die MMS. Die **Anfänge der MMS** liegen in einem einfachen **Schalter**, der eine Maschine an- und ausschaltet – eine simple und leicht nachvollziehbare Interaktion. Im Verlauf der weiteren Entwicklung wurden die MMS komplexer, vor allem, weil sie eine immer größere Vielfalt von Aufgaben erfüllen sollen: Aus einem monofunktionalen Schalter wurden **Schnittstellen mit zahlreichen Funktionen**. Hier wird die Herausforderung für eine MMS deutlich: eine Vielfalt von Funktionen möglichst einfach und intuitiv, mit geringer kognitiver Beanspruchung steuern zu können. Diese an den Menschen angepasste Gestaltung von MMS ist

nach wie vor ein aufwendiger zentraler Entwicklungsgegenstand.

In der Entwicklung der Computerhardware galt das **Pointing Device**, besser bekannt als die Maus, in Verbindung mit dem Monitor, welche Ende der 1960er Jahre als Interaktionsmedien in Verbindung mit dem Personal Computer erschienen, als kleine Revolution (Myers, 1998). Die Funktionen dieser zwei Komponenten sind klar definiert und eindimensional: Die **Maus (Input-Komponente)** ist ein taktiles Eingabemedium und das **Display (Output-Komponente)** dient der visuellen Darstellung der Daten und Informationen. Hier haben wir es mit zwei angesprochenen Sinnen – dem visuellen und taktilen – und einem kleinen geschlossenen Interaktionskreis zu tun.

Bis heute hat sich das Display als ein Hauptvertreter der MMS behauptet, jedoch hat es seither große Veränderungen vollzogen und ist nun in unterschiedlichsten Varianten vertreten. Ob als Touchscreen am Tablet oder Smartphone implementiert, welches als Eingabe- und Ausgabemedium gleichzeitig dient, oder als visuelles Assistenzsystem zur Darstellung physischer Räume – es findet breite Anwendung. Eine Variante davon ist das **Head-Mounted-Display (HMD)**, ein auf dem Kopf getragenes Anzeigegerät, das zusätzliche digitale Informationen in die reale Welt des/der Nutzenden einblendet oder uns auch gänzlich in eine virtuelle Welt „entführt“. Die **Augmented-Reality-Brille (AR, Erweiterte Realität)** ist eine Ausprägung des HMD und ermöglicht eine Überlagerung bzw. Erweiterung der analogen Welt um ergänzende digitale, meist visuelle Informationen. Durch die Projektion virtueller Elemente auf die analoge Welt wird ein **Gefühl der Fusion beider Welten** suggeriert. Google Glass, als einer der bekanntesten Vertreter dieser Technologie, versprach beim Markteintritt im Jahr 2013 bahnbrechende Veränderungen für die Wahrnehmung und Verarbeitung digitaler Informationen (Miller, 2013). Das Auslösen von Funktionen erfolgte u. a. über eine **Sprachsteuerung**, ebenfalls ein wesent-

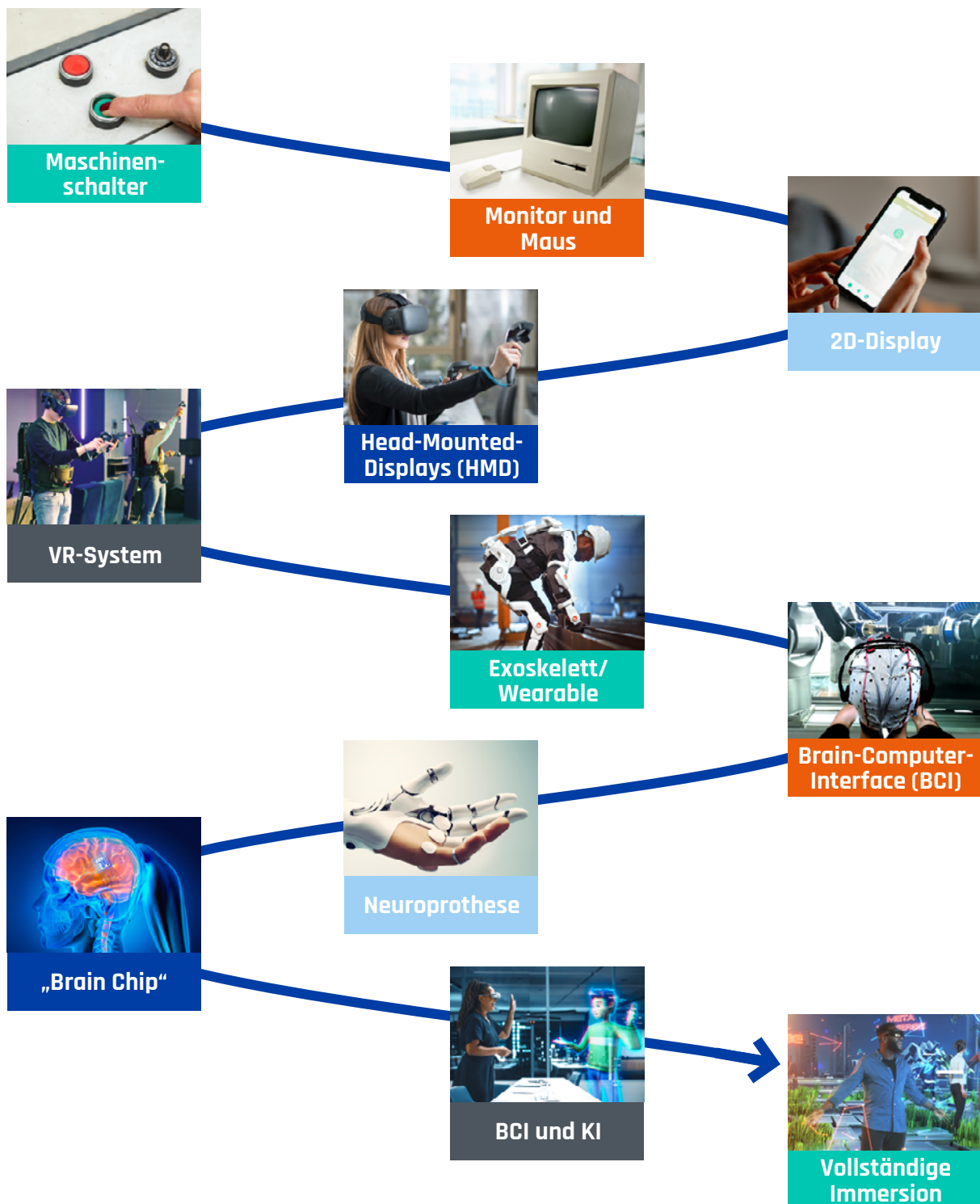


Abbildung 1: „Meilensteine der Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle“
 Übersicht über wesentliche Meilensteine der Entwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die in diesem Paper skizziert werden.

liches MMS-Element zur berührungslosen Bedienung technischer Systeme über die natürliche Sprache. Das Projekt wurde jedoch nach kurzer Zeit wegen datenschutzrechtlicher Bedenken sowie technischer Probleme eingestellt, später temporär wiederbelebt und 2023 endgültig vom Markt genommen.

Der anvisierte gesteigerte Realismus wird mit VR-Brillen weiter verstärkt. Mithilfe der Stereoskopie, d. h. der künstlichen Erzeugung leicht unterschiedlicher Bilder auf den beiden Displays der Brille, wird ein Tiefeneindruck des visualisierten Bewegtbildes vermittelt. Kombiniert wird dies mit dem **Headtracking**, bei dem die Position und Bewegung des Kopfes in sechs Freiheitsgraden erfasst werden. Durch die Anpassung der Displayanzeige entsprechend der Kopfbewegung entsteht das Gefühl, sich in der virtuellen Welt zu bewegen. Mit der zusätzlichen Eigenschaft einer unmittelbaren Nähe der Displays zum Auge und einer visuellen Abschirmung der analogen Welt wird ein **Gefühl der Immersion** geschaffen. In diesem Zusammenhang beschreibt dieser Begriff die **Art des Eintauchens in die Virtualität**, bei der virtuelle Artefakte nicht mehr als solche wahrgenommen werden und **der virtuelle Raum die Illusion der Realität vermittelt** (Wölfel, 2023). Mit zunehmendem Grad an Immersion wird der Eindruck einer als real empfundenen Anwesenheit in einer entfernten (virtuellen) Umgebung ermöglicht – die sogenannte **Telepräsenz**. Das typische Eingabe-Medium ist der **VR-Hand-Controller**, welcher ebenfalls wie die Brille in sechs Freiheitsgraden getrackt wird. Ergänzt werden klassische VR-Anwendungen durch Töne, Klänge und Geräusche synchron zu den visualisierten Bildern.

Vor kurzem Schlagzeilen machte die Apple Vision Pro, ein **Mixed-Reality-Headset**, das sowohl AR- als auch VR-Elemente vereint (Apple Inc., 2024). Digitale Inhalte wie private Fotos und Videos oder öffentlich über den Web-Browser zugängliche Inhalte können in den vermeintlich physischen Raum projiziert und mithilfe von Augenbewegungen (Eye-Tracking), Handgesten oder Sprache gesteuert sowie bearbeitet werden. Vermarktet wird das Headset vom Unternehmen Apple als sogenannter **„Spatial Computer“**, womit die Ära des „Raum-

computings“ eingeläutet werden soll: Das Sitzen an einem Computer vor dem Schreibtisch sei Vergangenheit und das Arbeiten im freien physischen Raum die Zukunft.

Die **Erweiterung visuell-auditiver Wahrnehmung** von AR und VR um weitere Sinnesempfindungen und die multimodale Interaktion mit der virtuellen Welt **verstärken die Immersion**. Durch Hinzufügen des **haptischen Sinnes** zur visuellen Reizverarbeitung entsteht das Gefühl einer realistischeren Telepräsenz. Entwicklungen wie der **VR-Handschuhe (VR-Glove)** ermöglichen es beispielsweise, virtuelle Gegenstände über eine sensorische Rückmeldung mithilfe der Force-Feedback-Technologie zu berühren und zu spüren (HaptX Inc., 2024). Für dieses Verfahren kommen mit Sensoren ausgestattete Textilien zum Einsatz, die Druck- und Temperaturunterschiede auf die Haut übertragen.

Auch wird an Systemen geforscht, die ein **Riechen und Schmecken in der virtuellen Realität** ermöglichen. Für die Beanspruchung des olfaktorischen Sinns werden beispielsweise **Duft-Dispenser in das VR-Headset integriert** (Cakebread, 2017). Passend zum Geschehen in der virtuellen Welt wird dabei ein entsprechender Duftstoff freigesetzt. Eine neuere Entwicklung der City University in Hongkong nutzt parfümiertes Paraffinwachs, das ferngesteuert in anderthalb Sekunden aufgeheizt werden kann, sodass Duftstoffe schneller und flexibler freigesetzt werden können (Liu et al., 2023). Etwas schwieriger gestaltet sich die Suche nach Lösungen, um ein **Schmecken in der virtuellen Welt** zu ermöglichen. Erste Ansätze nutzen Elektroden, mit deren Hilfe die menschliche Zunge über elektrische Signale stimuliert wird (Ranasinghe & Do, 2016). So können die Geschmacksrichtungen süß, sauer, salzig und bitter künstlich erzeugt werden. Bis hier der große Durchbruch gelingt, bedarf es jedoch weiterer Forschung und Entwicklung.

Neben der Stimulation klassischer Sinnesmodalitäten werden weitere Empfindungen in die Virtualität einbezogen. **Bewegung im virtuellen Raum** wird beispielsweise durch bewegliche Sitze, Laufbänder und Gurte ermöglicht. Dabei kann auch die Propriozeption, die Wahrnehmung und Empfindung des eigenen Körpers und seiner

Bewegung im Raum, genutzt werden. Um diesen Aspekt aufzugreifen, kann die virtuelle Welt so simuliert werden, dass sie Körperbewegungen und -stellungen übernimmt, wodurch ein noch stärkeres Gefühl der Immersion entsteht. Die Propriozeption spielt im Übrigen neben anderen Faktoren auch bei der Entstehung von **Motion Sickness** eine Rolle. Es handelt sich dabei um ein Unwohlbefinden, oft in Form von Übelkeit, Kopfschmerzen oder Müdigkeit, das eintritt, wenn visuelle und propriozeptive Reizverarbeitung mit der vestibulären Wahrnehmung – dem Gleichgewichtssinn – konfliktieren (Chang et al., 2020). Zur Vermeidung von Motion Sickness kann die galvanische vestibuläre Stimulation (GVS) genutzt werden, eine Methode zur Auslösung vestibulärer Reflexe am Gleichgewichtsorgan über eine hinter dem Ohr angebrachte Elektrode, um dort fehlende Informationen zu simulieren (Sra et al., 2019).

Einige der beschriebenen VR-Technologien gehören zur Kategorie der **Wearables**. Wie bei der VR-Brille oder dem VR-Handschuh, handelt es sich dabei um Computertechnologien, die am Körper getragen werden und zur Messung körperlicher Aktivitäten sowie zur Erweiterung oder Assistenz menschlicher Funktionen dienen. Die **Smartwatch** ist womöglich aktuell der bisher prominenteste Vertreter dieser Technologie. Die an der elektronischen Armbanduhr integrierten Sensoren erfassen, analysieren sowie visualisieren motorische und physiologische Parameter des Körpers. Etwas weniger bekannt ist das **Exoskelett**. Das tragbare Gerüst erfasst Körperbewegungen über Sensoren und unterstützt mechanisch die Bewegungsführung. Einsatz findet es beispielweise in der industriellen Produktion beim Heben schwerer Lasten. Es ermöglicht neben einer Kraftverstärkung eine größere Bewegungssicherheit unter hohen Lasten und eine **ergonomische Verbesserung der Arbeitsbedingungen** sowie ein verringertes Verletzungsrisiko.

Neben den virtuellen Welten, die über die Augen und andere Sinnesorgane zugänglich sind, entwickelt sich seit den 1990er Jahren ein völlig neues Konzept der MMS: das **Brain-Computer-Interface (BCI)**. Es gehört zu den neuroadaptiven Systemen und ermöglicht eine Schnittstelle zwischen Gehirn und technischem

System. BCIs können zur **direkten Steuerung technischer Prozesse oder auch virtueller Welten über neuronale Aktivität** genutzt werden. Damit rückt das Steuerungssystem noch weiter in den Hintergrund, denn es erfolgt keine physische Eingabe zur Lenkung der Maschine, sondern sie wird direkt über neuronale Impulse vollzogen.

Abhängig von der Messmethode können diese Systeme in **invasive, semi-invasive und nicht-invasive BCIs** differenziert werden. Bei nicht-invasiven BCIs werden in der Regel mithilfe der Elektroenzephalografie (EEG) Elektroden auf der Kopfhaut platziert, die elektrische Spannungsschwankungen zwischen den Elektroden erfassen und verarbeiten. Über die räumliche und zeitliche Veränderung der Spannungsschwankungen können Rückschlüsse auf die neuronale Aktivität in den unterschiedlichen Hirnregionen gezogen werden. Insbesondere im medizinischen Kontext sind ihre Einsatzoptionen vielversprechend. Sie ermöglichen die Behandlung von Krankheiten wie Epilepsie, Parkinson oder Querschnittslähmungen. **Neuroprothesen** beispielsweise können gelähmten Menschen helfen, ihre motorischen Einschränkungen zu überwinden. Dabei **übersetzt das BCI neuronale Signale in technische Steuerbefehle**, sodass Kontrolle und Steuerung prothetischer Gliedmaße über Hirnsignale möglich werden.

In den letzten Jahren rücken zunehmend auch nichtmedizinische Anwendungsmöglichkeiten in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Neben der **Fernsteuerung von Robotern (Tele-Robotik)** oder der Lenkung von Fahrzeugen wird versucht, BCIs zum Zwecke der **Überwachung von Bewusstseinszuständen** einzusetzen. Als Beispiel ist hier eine Machbarkeitsstudie des Fraunhofer IAO zu nennen, in der ein BCI für die Qualitätskontrolle in der industriellen Produktion zum Einsatz kam (Fraunhofer IAO, 2024): Das physiologische Monitoringsystem detektiert mithilfe eines EEG das reiz-spezifische Aufmerksamkeitsniveau der Nutzenden, wenn diese in der visuellen Sichtprüfung einen Fehler erkennen. Das System unterstützt so das Aussortieren fehlerhafter Produkte. Gleichzeitig identifiziert das System niedrigere Aufmerksamkeit oder Ermüdung, um Nutzenden eine Pause vorzuschlagen. Die prüfende Person wird so durch

ein technisches Hilfsmittel bei ihrer monotonen Tätigkeit der visuellen Qualitätsprüfung kognitiv entlastet.

Nichtinvasive Methoden weisen eine niedrige Übertragungsrate und Messpräzision in Bezug auf das elektrische Signal auf, da sie die neuronale Aktivität lediglich an der Schädeldecke erfassen. Bei invasiven und semi-invasiven Verfahren hingegen werden **kleine Elektroden oder Implantate direkt an der Hirnrinde oder auch im Gehirn selbst angebracht**. Sie können aufgrund der höheren Signalstärke deutlich bessere Mess- und Auswertungsergebnisse liefern und ermöglichen aufgrund ihrer größeren Nähe zu den jeweiligen neuronalen Arealen oder gar einzelnen Neuronen selektivere und spezifischere Messungen.

Prominentester Vertreter ist vermutlich das US-amerikanische Unternehmen Neuralink. Bereits 2021 zeigte das Unternehmen das Video eines Affen, der mithilfe zweier implantierter Neuroprothesen lediglich über **Gedankenkraft einen Cursor steuert, um das Videospiel Pong zu spielen** (Neuralink, 2021). Dieses BCI ist dabei vollständig invasiv. Die gemessenen neuronalen Signale werden drahtlos außerhalb des Körpers an eine entsprechende Applikation gesendet, in welcher die Daten dekodiert und in entsprechende Aktionen umgesetzt werden. Neuralink machte Mitte 2023 Schlagzeilen mit der Ankündigung, diese **Implantate an Menschen testen** zu wollen, und wurde dabei für die unsicheren Rahmenbedingungen bei Testung der Technologie am Menschen massiv kritisiert (Capoot, 2023). Doch nur ein halbes Jahr später verkündete das Unternehmen, dass das BCI erstmals bei einem paralysierten Patienten implantiert worden sei. Es konnte in der Folge erfolgreich demonstriert werden, dass die gelähmte Person imstande ist, eine **Computermaus mithilfe ihrer neuronalen Aktivität zu bedienen** (Duffy, 2024) **und Online-Schach zu spielen**. Kurz darauf wurde berichtet, dass sich einige Drähte des Chips aus ihrer Position gelöst hatten, welche jedoch nach kurzer Zeit wieder stabilisiert werden konnten. Neuralink gab bekannt, den Gehirnchip inzwischen bei einem zweiten Patienten implantiert zu haben und plant, das Implantat im Rahmen der klinischen Studie bei weiteren acht Personen einzusetzen.

Invasive und semi-invasive Neuroprothesen werden auch in anderen Projekten bereits am Menschen getestet und erforscht. Ein aktuelles Forschungsprojekt der Universität Berkeley zeigt dabei auch große Potenziale für **Künstliche Intelligenz in Verbindung mit Brain-Computer-Interfaces**. In einer Studie wurde das semi-invasive BCI bei einer infolge eines Unfalls gelähmten und nicht sprachfähigen Person eingesetzt (Metzger et al., 2023). Die neuronale Aktivität über dem Sprachkortex wurde mithilfe von Methoden der Künstlichen Intelligenz in Echtzeit dekodiert und in eine synthetische Sprachausgabe transferiert. Auf einem Bildschirm ist dabei ein Gesichtsavatar der Probandin zu sehen, der auf Basis ihrer Gedankenkraft eine Audio-Sprache in ihrem eigenen Sprachton, welcher aus vor ihrer Verletzung aufgezeichnetem Tonmaterial extrahiert wurde, wiedergibt. An dieser Stelle wird die enorme Wirkkraft der Künstlichen Intelligenz bei der Gestaltung von MMS nur beispielhaft verdeutlicht. Weil dieser Thematik unabhängig von ihrem Einsatz bei den MMS insbesondere wegen der Durchbrüche in der Entwicklung der Sprachmodelle in den vergangenen Jahren eine besondere Bedeutung zukommt, wird sie künftig in einem separaten VDI Research-Paper umfänglicher behandelt.

Neben dem Einsatz Künstlicher Intelligenz zeichnet sich eine weitere zukunftsrelevante Entwicklung ab: die **Fähigkeit zur drahtlosen Kommunikation von BCIs**. Beispielsweise kann die elektrische Aktivität des Gehirns in Echtzeit in einen Datenstrom umgewandelt werden, der über das Internet übertragen und in einem externen Drittsystem weiterverarbeitet wird. Hierauf basierend sind Systeme wie das **Brain-to-Cloud-Interface** möglich, eine Schnittstelle zwischen Gehirn und Cloud. Es dient dazu, aus der neuronalen Aktivität extrahierte Daten in einer Cloud abzulegen oder Nutzenden einen direkten Zugang zu digitalen Wissensbeständen zu ermöglichen. Darüber hinaus könnten Menschen über die Cloud miteinander verbunden werden, wodurch der Austausch von Gefühlen oder Gedanken über das Interface ermöglicht werden könnte. Dieses System würde neue Optionen schaffen, die bereits Motiv zahlreicher Science-Fiction-Romane und Filme (Gibson, 1987; Stephenson, 1994) sind.

Was in Zukunft auch möglich sein wird, zeigen aktuell noch unausgereifte Verfahren, bei denen BCIs ohne jegliche chirurgischen Eingriffe im Gehirn platziert werden. Mithilfe der Nanotechnologie können **neural-nanorobotische BCI** entwickelt werden, die aufgrund ihrer geringen Größe in menschliche Blutgefäße injiziert werden und nach Überquerung der Blut-Hirn-Schranke bis auf die synaptische Ebene vordringen können (Martins et al., 2019). Dies würde eine **Übertragung spezifischer Informationen von der Neuronenebene** ermöglichen und damit eine neue Genauigkeit der selektiven Messpräzision erreichen.

Fortschreitend und zukunftsweisend erscheinen auch die Erforschung und Entwicklung einer **Kombination von BCI-Technologien mit AR- und VR-Anwendungen**. Hierdurch wird eine vollständig immersive Sinneserfahrung denkbar. Das immersive Eintauchen in die virtuelle Welt erfolgt nicht mehr nur anhand von XR-Technologien, die virtuelle Welt kann auch über den kognitiven Zustand beeinflusst oder über Gedanken gesteuert werden. Dies ermöglicht beispielsweise ein proaktives Anpassen eines in der virtuellen Realität abgebildeten Szenarios an den Aufmerksamkeitszustand der Nutzenden. So könnte die Ablaufgeschwindigkeit eines Szenarios beispielsweise verlangsamt dargestellt werden. Darüber hinaus könnten die Bewegungen des eigenen Avatars direkt durch Gedanken gesteuert werden. Diese Technologieansätze eröffnen nicht nur für medizinische Therapieformen neue Optionen. Die zunehmende Verschränkung der verschiedenartigen MMS und die Ansprache sämtlicher Sinne ermöglichen eine multimodale Interaktion mit der virtuellen Welt. **Das Gefühl der Immersion und der Eindruck der (virtuellen) Telepräsenz erreichen so eine neue Dimension.**

Neben diesen Chancen, die eine alle Sinne einbeziehende virtualisierte Welt bietet, birgt sie aber auch erhebliche, nicht zu unterschätzende **Herausforderungen und Risiken**. Zu benennen

sind dabei Bedenken über potenzielle Risiken bezüglich **Verletzungen am Gehirn** und an sonstigem Zellgewebe durch implantierte BCIs und die Gefahren für die gesundheitliche Unversehrtheit des Menschen, während gleichzeitig die technische Entwicklung mit einer großen Geschwindigkeit voranschreitet. Auch Herausforderungen wie **Datenschutz- und Datensicherheitsfragen, die Überwachung und Kontrolle biologischer Daten**, eine **direkte externe Einflussnahme auf das menschliche Gehirn** oder neue Möglichkeiten von **Cyber-Kriminalität** zählen dazu. In erster Linie stellt sich die Frage, wie hochsensible Biodaten gespeichert und verarbeitet werden, und vor allem, wer Zugriff auf diese Daten haben darf. Die **Privatheit von Daten**, die Aufschluss über die physische Gesundheit und Leistungsfähigkeit, aber auch den mentalen Zustand und die geistigen Fähigkeiten der Nutzenden geben, sind besonders schützenswert (Zweck & Schwarz, 2021). Sie ermöglichen einen bisher nicht dagewesenen Einblick in Psyche und Charakter des Nutzenden. Hier zeigt sich die immense Bedeutung von Mensch-Maschine-Schnittstellen, die als Bindeglied zur Virtualität die technische Hoheit über die Art und Weise der Sammlung und Verarbeitung von Daten haben. Bereits latente Formen des „Gatekeepings“ werfen ethische Bedenken im Umgang mit MMS auf: Das sogenannte **Nudging**, welches in seiner ursprünglichen Konzeption als subtile und unbemerkte Beeinflussung des Menschen in eine „positive Richtung“ verstanden wurde, kann in Abhängigkeit von der intendierten Einwirkung im Rahmen des direkten Zugangs auf biologische Daten bisher nicht erkannte Formen von Bevormundung annehmen und die vorherrschenden Grenzen der Manipulation oft erst allmählich und dann langfristig unterlaufen. Nicht zuletzt würde die umfassende Sammlung personenspezifischer Biodaten eine digitale **panoptische Dauerüberwachung¹** ermöglichen, womit neuartige **Mechanismen zur Kontrolle**

¹ Das Panopticon ist ein architektonisches Konzept von Jeremy Bentham zum Bau moderner Gefängnisse oder ähnlicher Einrichtungen, bei denen ein*e einzelne*r Wächter*in von einem zentralen Wachturm ausgehend alle Insass*innen überwachen kann, diese*r jedoch selbst für die Insass*innen nicht sichtbar ist. Diese Konstruktionsweise sollte bewirken, dass sich die Insass*innen aufgrund der ständigen Möglichkeit der Überwachung regelkonform verhalten, um Strafen zu vermeiden. In Anlehnung an dieses Konzept beschreibt der Philosoph Michel Foucault mit dem Begriff des Panoptismus eine Form von Überwachungs- und Kontrollmechanismen moderner Gesellschaften, bei der die potenzielle Dauerüberwachung eine Selbstregulierung und -disziplinierung der Menschen entsprechend den sozial konformen Verhaltensweisen zur Folge hat, um negative soziale Sanktionen zu vermeiden.

und Disziplinierung der Menschen einhergehen. Weitreichendere Folgen ergeben sich im Falle eines gewollten Angriffes auf die MMS. In einem Szenario, in dem Nutzende mit einem implantierten Gehirnchip in einer VR-Umgebung und somit über alle Sinne in die Virtualität involviert sind, könnte ein „Hacken des Gehirns“ weitreichende **Manipulationsmöglichkeiten** eröffnen und/oder bleibende psychische oder physische Schäden für Gehirn oder Körper nach sich ziehen.

Neben diesen Risiken haben MMS das **Potenzial, tiefgreifende soziale Veränderungen in der Gesellschaft hervorzurufen.** Was zunächst als Ansatz zur Hilfeleistung und Unterstützung für körperlich beeinträchtigte Menschen gerechtfertigt wird, kann nach Erreichen einer entsprechenden gesellschaftlichen Akzeptanz schnell in Bestrebungen zur Selbstoptimierung münden. Das sogenannte **Biohacking**, eine Methode zur Verbesserung der physischen und psychischen Gesundheit und Leistungsfähigkeit gesunder Menschen durch das Monitoring biologischer Prozesse u. a. auf Basis von Wearables, ist bereits in der Mitte der Gesellschaft angekommen. Der nächste Schritt ist das **Brainhacking**, die Optimierung geistiger Fähigkeiten mithilfe von Technik – im kritischsten Fall verwirklicht im Rahmen eines Konzepts des „Joy of Use“, um nicht nur vermeintlich sinnvoll zu sein, sondern zugleich auch Spaß zu bereiten. Auf diese Weise stellen sich nicht nur philosophische Fragen nach dem Wesen der neuen Wirklichkeit und der Rolle des Menschen darin. Unter dem Begriff des **Transhumanismus** werden unterschiedliche Möglichkeiten diskutiert, um den Menschen u. a. mithilfe von Technik über seine natürlichen Grenzen hinaus zu erweitern. Zu klären wäre in diesem Zusammenhang, wer in solchen soziotechnischen Konstrukten die Verantwortung für die Handlung übernimmt. Wer ist beispielsweise im Falle der Fehlsteuerung einer Neuroprothese verantwortlich: Mensch oder Maschine bzw. Maschinenhersteller*in/-inverkehrbringer*in? In einer Welt, in der menschliche Sinne über eine MMS überbrückt werden können, weil die Interaktion mit Technik direkt über die neuronale Aktivität erfolgt, verschwimmt die Grenze zwischen selbst- und fremdbestimmten Handlungen: Die resultierende **Cyborgisierung des**

Menschen wird Realität. Nicht zuletzt sollten die möglichen Auswirkungen der (algorithmischen) **Personalisierung einer derartigen immersiven virtuellen Welt** nicht unterschätzt werden. Die umfanglichere persönliche Informationsgrundlage einschließlich biologischer Daten und die erhöhte Immersion könnten die Effekte der sogenannten Filterblase verstärken, da Nutzende noch tiefer in eine personalisierte, auf ihre Interessen und Bedürfnissen zugeschnittene virtuelle Welt eintauchen können. Dies kann zu einer stärkeren Abschottung von alternativen Perspektiven führen und die Wahrnehmung der realen Welt stark verzerren.

Die bisherigen Ausführungen zeigen, welche häufig unterschätzte Bedeutung der **MMS als Zugang zur virtuellen Welt** zukommt, die weit über die Nutzung von VR-Brillen hinausgeht, **denn sie leistet die Übersetzungsarbeit zwischen physischer Wirklichkeit und virtueller Welt (Dickel, 2023) als Tor zum künftigen Metaversum.** Sie ist derart konzipiert, dass die Bedienung stets intuitiv gestaltet ist und so das Bewusstsein der aktiven Steuerung von Technik zunehmend in den Hintergrund gerät. Zugleich versteckt sie die Komplexität der zugrundeliegenden Technologie (Dickel, 2023), welche als Artefakt im Hintergrund agiert und für Nutzende unsichtbar bleibt. Mit diesen Eigenschaften bewirkt sie, dass die Grenzen zwischen Analogem und Digitalem verblassen und ethische Bedenken schrittweise und schleichend drohen, unterlaufen zu werden. Um die Auswirkungen umfassend und nachhaltig, vor allem aber frühzeitig zu erfassen, ist eine intensivere gesellschaftliche Diskussion erforderlich. Diese als Ausgangspunkt erfordert dann eine vertiefte wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Formulierung und Beantwortung offener Fragen als Grundlage für erforderliche Korrekturen und Regulierungen durch politische Entscheidungsträger. Die im vorliegenden VDI Research-Paper aufgezeigten Möglichkeiten und Herausforderungen machen die Notwendigkeit einer weiteren und tiefgreifenden Betrachtung und Analyse der Mensch-Maschine-Schnittstellen deutlich. Die Dringlichkeit wird durch den dargestellten Reifegrad und die Vielfalt der schon jetzt vertieft zu reflektierenden technischen Perspektiven der MMS deutlich.

Quellenverzeichnis:

- Apple Inc. (o. J.). „Apple Vision Pro“. <https://www.apple.com/apple-vision-pro/>
- Cakebread, C. (2017, 27. Juni). „Virtual reality gets smelly thanks to this Japanese startup“. BUSINESS INSIDER. <https://www.businessinsider.com/japanese-startup-vaqso-adding-smells-virtual-reality-2017-6>
- Capoot, A. (2023, 25. Mai). „Elon Musk's brain implant company Neuralink announces FDA approval of in-human clinical study“. CNBC. <https://www.cnbc.com/2023/05/25/elon-musks-neuralink-gets-fda-approval-for-in-human-study.html>
- Chang, E., Kim, H. T., & Yoo, B. (2020). „Virtual Reality Sickness: A review of Causes and Measurements“. *International Journal of Human-computer Interaction*, 36(17), 1658–1682. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>
- Dickel, S. (2023). „Der kybernetische Blick und seine Grenzen. Zur systemtheoretischen Selbstbeschreibung der digitalen Gesellschaft“. *Berliner Journal für Soziologie*, 33(3), 197–226. <https://doi.org/10.1007/s11609-022-00475-9>
- Duffy, C. (2024, 20. Februar). „First Neuralink human trial subject can control a computer mouse with brain implant, Elon Musk says“. CNN Business. <https://edition.cnn.com/2024/02/20/tech/first-neuralink-human-subject-computer-mouse-elon-musk/index.html>
- Fraunhofer IAO (o. J.). „Brain-Computer-Interface in der Produktion“. <https://www.hci.iao.fraunhofer.de/de/Human-Centered-AI/feinfuehlig-technik/brain-computer-interface-in-der-produktion-.html>
- Gibson, W. (1987). „Neuromancer“ (1. Aufl.). Heyne.
- HaptX Inc. (o. J.). „HaptX Gloves G1“. <https://haptx.com/virtual-reality/>
- Liu, Y., Yiu, C. K., Zhao, Z., Park, W., Shi, R., Huang, X., Zeng, Y., Wang, K., Wong, T. H., Jia, S., Zhou, J., Gao, Z., Zhao, L., Yao, K., Li, J., Sha, C., Gao, Y., Zhao, G., Huang, Y., ... Yu, X. (2023). „Soft, miniaturized, wireless olfactory interface for virtual reality“. *Nature Communications*, 14(1), Artikel 2297. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37678-4>
- Martins, N. R. B., Angelica, A., Chakravarthy, K., Svidinenko, Y., Boehm, F., Opiş, I., Lebedev, M. A., Swan, M., Garan, S. A., Rosenfeld, J. V., Hogg, T. & Freitas, R. A. (2019). „Human Brain/Cloud Interface“. *Frontiers in Neuroscience*, 13, Artikel 112. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00112>
- Metzger, S. L., Littlejohn, K. T., Silva, A. B., Moses, D. A., Seaton, M. P., Wang, R., Dougherty, M. E., Liu, J. R., Wu, P., Berger, M. A., Zhuravleva, I., Tu-Chan, A., Ganguly, K., Anumanchipalli, G. K., & Chang, E. F. (2023). „A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control“. *Nature*, 620, 1037–1046. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06443-4>
- Miller, C. C. (2013, 20. Februar). „Google Searches for Style“. *The New York Times*. <https://web.archive.org/web/20171106113834/http://www.nytimes.com/2013/02/21/technology/google-looks-to-make-its-computer-glasses-stylish.html>
- Myers, B. A. (1998). „A brief history of human-computer interaction technology“. *Interactions*, 5(2), 44–54. <https://doi.org/10.1145/274430.274436>
- Neuralink (2021, 8. April). „Monkey MindPong“ [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=rsCul1sp4hQ>
- Ranasinghe, N., & Do, E. Y.-L. (2016). „Digital Lollipop: Studying Electrical Stimulation on the Human Tongue to Simulate Taste Sensations“. *ACM Trans. Multimedia Computing Communications, and Applications*, 13(1), 1–22. <https://doi.org/10.1145/2996462>
- Sra, M., Jain, A., & Maes, P. (2019). „Adding Proprioceptive Feedback to Virtual Reality Experiences Using Galvanic Vestibular Stimulation“. *CHI 2019*, 675, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300905>

Stephenson, N. (1994). „Snow Crash“ (1. Aufl.). Goldmann Verlag.

Timpe, K.-P., & Kolrep, H. (2002). „Das Mensch-Maschine-System als interdisziplinärer Gegenstand“. In Timpe, K.-P., Juergensohn, T., & Kolrep, H. (Hrsg.), Mensch-Maschine Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation (S. 9–40). Symposion Publishing.

Wölfel, M. (2023). „Immersive virtuelle Realität: Grundlagen, Technologien, Anwendungen“ (1. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66908-2>

Zweck, A., Braun, M., Cebulla, E. (2023) „Metaversum: Überblick und Perspektiven“. VDI Research-Paper 13, VDI Technologiezentrum GmbH Düsseldorf. <https://www.vditz.de/service/metaverse>

Zweck, A., Schwarz, D. (2021) „Prinzipien und Potentiale digitaler Selbstvermessung“. VDI Research-Paper 6, VDI Technologiezentrum GmbH Düsseldorf. <https://www.vditz.de/service/publikationen/details/prinzipien-und-potentiale-digitaler-selbstvermessung>

Bildquellen Grafik Seite 3:

Maschinenschalter:
Getty Images/Volkan Gokhan Turan
Monitor und Maus:
Getty Images/audioundwerbung
2D-Display:
Getty Images/miniseries
Head-Mounted-Display:
Getty Images/freemixer
VR-System:
Getty Images/NoSystem images
Exoskelett/Wearable:
Getty Images/gorodenkoff

Brain-Computer-Interface:
Getty Images/oonal
Neuroprothese:
Getty Images/NiseriN
„Brain Chip“:
Getty Images/peterschreiber.media
BCI und KI:
Getty Images/gorodenkoff
Vollständige Immersion:
Framestock – stock.adobe.com

Empfohlene Zitierweise:

Zweck, A., Cengiz, R., Braun, M. (2024) „Mensch-Maschine-Schnittstellen, Tor zur virtuellen Welt der Zukunft“. VDI Research-Paper 18, VDI Technologiezentrum GmbH Düsseldorf. <https://www.vditz.de/service/publikationen/details/mensch-maschine-schnittstellen>

VDI Research

VDI Research versteht sich als Informationsdienstleister, Impulsgeber und Vernetzer zu neuen Themen, Methoden und längerfristiger Vorausschau.

Weitere Publikationen von VDI Research und des VDI TZ unter: [vditz.de/service/publikationen](https://www.vditz.de/service/publikationen)

Ihre Ansprechpersonen

VDI Research
Prof. Dr. Dr. Axel Zweck
Rojin Cengiz
Dr. Matthias Braun
E-Mail: cengiz@vdi.de

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf

www.vditz.de
[X](#) @technikzukunft · [in](#)