

VDE-POSITIONSPAPIER



TAKTILES INTERNET

Das IT-Netz der Zukunft

ITG

VDE

Autoren

Prof. Gerhard Fettweis, Technische Universität Dresden
Prof. Holger Boche, Technische Universität München
Prof. Thomas Wiegand, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut
Dr. Erich Zielinski, Alcatel-Lucent Stiftung für Kommunikationsforschung
Prof. Hans Schotten, DFKI und Technische Universität Kaiserslautern
Peter Merz, Nokia Solutions and Networks Management International GmbH
Prof. Sandra Hirche, Technische Universität München
Dr. Andreas Festag, Technische Universität Dresden
Dr. Walter Häffner, Vodafone GmbH
Dr. Michael Meyer, Ericsson GmbH
Prof. Ekehard Steinbach, Technische Universität München
Prof. Rolf Kraemer, IHP, Leibniz Institut für innovative Mikroelektronik
Prof. Ralf Steinmetz, Technische Universität Darmstadt
Dr. Frank Hofmann, Robert Bosch GmbH
Prof. Peter Eisert, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut
Dr. Reinhard Scholl, International Telecommunication Union
Prof. Frank Ellinger, Technische Universität Dresden
Dr. Erik Weiß, Telekom Deutschland GmbH
Ines Riedel, Technische Universität Dresden

Impressum

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG)

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main
Telefon 069 6308-362 · E-Mail itg@vde.com · <https://www.vde.com/itg>

Bildnachweise Titel ©: iStock

Design: www.schaper-kommunikation.de

Taktiler Internet

Ein Positionspapier der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG)

Die ITG engagiert sich mit 12.000 Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik für die Förderung der Informationstechnik, ihrer Anwendungen und für den technisch-wissenschaftlichen Nachwuchs. Der VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik ist mit 36.000 Mitgliedern, davon 1.300 Unternehmen, einer der großen technisch-wissenschaftlichen Verbände Europas.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Motivation | 6 |
| 1. Vision Taktiler Internet – ein wichtiges zukünftiges Innovationsfeld | 7 |
| 2. Anwendungsfelder | 9 |
| 2.1. Industrie | 9 |
| 2.2. Montagerobotik und Fernsteuerung | 9 |
| 2.3. Virtuelle Realität | 10 |
| 2.4. Erweiterte Realität | 11 |
| 2.5. Gesundheit | 13 |
| 2.6. Verkehr | 13 |
| 2.7. Serious Gaming | 14 |
| 2.8. Bildung und Kultur | 16 |
| 2.9. Intelligentes Stromnetz | 16 |
| 2.10. Weitere Anwendungsfelder | 17 |
| 3. Anforderungen an die Infrastruktur | 19 |
| 3.1. Latenz und Zuverlässigkeit | 19 |
| 3.2. Sicherheit | 20 |
| 3.3. Systemarchitektur | 21 |
| 3.4. Sensorik und Aktorik | 22 |
| 3.5. Zugangsnetz | 23 |
| 3.6. Mobile Edge Cloud | 24 |
| 4. Einfluss auf die Gesellschaft | 25 |
| 5. Handlungsempfehlungen | 27 |
| Danksagung | 29 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|--------------|---|----|
| Abbildung 1: | Reaktionszeiten des Menschen | 7 |
| Abbildung 2: | Innovationssprung des Taktilen Internets | 8 |
| Abbildung 3: | Physikalische Kopplung mehrerer Nutzer über eine Simulation der Virtuellen Realität mit haptischer Rückkopplung | 10 |
| Abbildung 4: | Fahrerassistenz durch Einblenden möglicher Gefahrensituationen | 11 |
| Abbildung 5: | Kollaborative Erfassung eines Livekonzerts für die virtuelle Teilnahme externer Nutzer | 12 |
| Abbildung 6: | Vernetzung des Verkehrs | 13 |
| Abbildung 7: | Bewegungsspiel ErgoActive für personalisiertes Herz-Kreislauf-Training | 15 |
| Abbildung 8: | Exemplarisches Latenz-Budget für ein System des Taktilen Internets | 19 |
| Abbildung 9: | Systemarchitektur | 21 |

Motivation

Mobile Datenkommunikation ist allgegenwärtig. Heute verbindet das Mobile Internet Menschen überall miteinander und ermöglicht uns jederzeit den Austausch von Sprache, Daten und multimedialen Inhalten. Bisherige Innovationen ermöglichten durch ständig steigende Datenraten den PC in der Hand, das Smartphone. Zurzeit erleben wir, wie das Internet der Dinge alle Geräte vernetzt und uns dadurch den Alltag erleichtert. Als nächsten Innovationssprung sehen wir das Taktile Internet kommen.

Durch minimale Reaktionszeiten, höchste Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit wird das Taktile Internet die gesamte Wirtschaft und die Gesellschaft mit einem Innovationsschub beeinflussen. Es bietet viele neue Möglichkeiten für Technologieanbieter, Diensteanbieter und den Menschen.

Dieses Positionspapier zeigt das Zukunftspotenzial des Taktilen Internets anhand vielversprechender Anwendungsfelder in Industrie und Gesellschaft, beispielsweise in der Industrieautomatisierung, der Gesundheit und der Bildung. Darüber hinaus beschreibt es die Anforderungen an die zukünftige, digitale Infrastruktur, diskutiert den zu erwartenden Einfluss auf die Gesellschaft und leitet Handlungsempfehlungen ab.

1. Vision Taktiler Internet – ein wichtiges zukünftiges Innovationsfeld

Unser tägliches Leben ist durch die Interaktion mit der Umwelt bestimmt. Mit unseren Sinnen können wir die Umgebung erfassen, uns orientieren und Entscheidungen treffen. Über die Wahrnehmung passen wir unser Verhalten an die Umwelt an oder beschließen, sie zu verändern. Die Geschwindigkeit unserer Interaktion mit der Umwelt ist dabei durch physiologische Wahrnehmungsprozesse beschränkt.

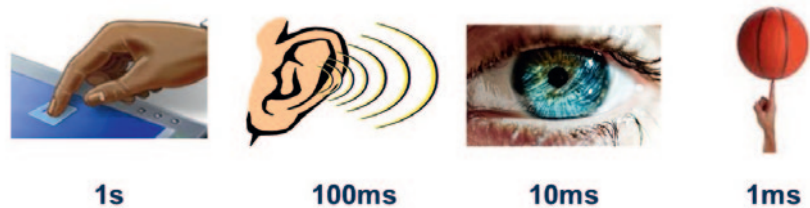


Abbildung 1: Reaktionszeiten des Menschen

(Quelle: Fettweis, G.; Alamouti, S., „5G: Personal Mobile Internet beyond What Cellular Did to Telephony,“ Communications Magazine, IEEE, vol.52, no.2, pp.140-145, February 2014)

Unterschiedliche Sinnesreize führen beim Menschen zu unterschiedlichen Reaktionszeiten (siehe Abbildung 1). Auf unerwartete Reize kann ein Mensch innerhalb einer Sekunde, der sogenannten Schrecksekunde, mit Muskelbewegungen reagieren. Ist ein Mensch jedoch darauf vorbereitet, kann er Reize deutlich schneller verarbeiten. Auf erwartete akustische Reize kann ein Mensch innerhalb von 100 Millisekunden reagieren. Erwartete visuelle Reize werden sogar innerhalb von 10 Millisekunden verarbeitet. Die menschliche taktile und haptische Wahrnehmung und Steuerung mit auditiv-visueller Rückkopplung ist besonders reaktionsschnell, hier wird eine Reaktionszeit von einer Millisekunde erreicht.

Ein technisches System, mit dem wir interagieren, ist genau dann in seiner Reaktionszeit auf uns Menschen angepasst, wenn uns die Rückkopplung des Systems intuitiv und natürlich erscheint. Ein Beispiel hierfür ist die Telefonie. Um natürlich zu wirken, muss die Sprache innerhalb von 100 Millisekunden übertragen werden. Größere Verzögerungen würden wir bemerken und uns in der Interaktion gestört fühlen. Moderne Telefonie ist darauf hin ausgelegt.

Prinzipiell können alle Sinne zur Interaktion von Menschen mit Maschinen genutzt werden. Die visuell-taktile Interaktion zwischen Menschen und technischen Systemen hat jedoch eine zunehmende Bedeutung. Beispielsweise Smartphones eröffnen viele neue technische Möglichkeiten und Anwendungsfelder. Neben der schnellen Informationsübertragung sind zwei Aspekte der Interaktion wichtig. Zum einen erfolgt in vielen Systemen nach einer Aktion des Menschen eine Rückkopplung vom technischen System zum Menschen. Um intuitiv und natürlich zu sein, muss diese Rückkopplung innerhalb der Reaktionszeiten des

jeweiligen menschlichen Sinnes verfügbar sein. Eine zu große Verzögerung zwischen Aktion und Rückkopplung wird als störend empfunden und kann sogar zu sogenannter Cybersickness führen. Zum anderen findet die Interaktion häufig über mehrere Sinne gleichzeitig statt, zum Beispiel akustisch und visuell. Die Rückkopplung für verschiedene Sinne muss ohne störende Zeitverschiebungen untereinander erfolgen. Eine solche zeitliche Verschiebung zwischen verschiedenen Sinneseindrücken, beispielsweise die unterschiedliche Verzögerung zwischen visuellen und akustischen Reizen bei sogenannter Lippen-Asynchronität, wird ebenso als störend empfunden.

Das technische System selbst hat eine sogenannte Ende-zu-Ende-Latenz, die sämtliche Verzögerungen umfasst, die durch die Übertragung der Information vom Menschen über eine Kommunikationsinfrastruktur zu einem Steuerrechner, durch die Verarbeitung und das Generieren der Reaktion und durch die Rückübertragung über die Kommunikationsinfrastruktur zum Menschen entstehen. Überschreitet die Ende-zu-Ende-Latenz die menschliche Reaktionszeit, reduziert dies die Wirklichkeitsnähe. Eine zunehmende Verbreitung findet auch die Interaktion von Maschinen mit der Umgebung. Die hohen Anforderungen an die Ende-zu-Ende-Latenz aus der Mensch-Maschine-Interaktion gelten auch hier, als sogenannte Systemantwortzeit, zum Beispiel für Roboter in der Produktionstechnik oder das ESP zur Stabilisierung des Autos. Auch in diesem Zusammenhang sprechen wir vom Taktilen Internet.

Das heutige Internet und auch das Mobile Internet sind auf den Transfer von Daten (Sprache, E-Mails, Bilder, Video) optimiert und haben eine Ende-zu-Ende-Latenz, die für Telefonie, das Browsen und das Übertragen von Videos mit eingeschränkter Auflösung ausreicht. Zurzeit erleben wir, wie das Internet der Dinge intelligente Geräte vernetzt. Typischerweise sind dies Sensoren mit sehr geringem Energieverbrauch und eingeschränkter Funktionalität, die Daten mit sehr geringer Rate und hoher Verzögerung austauschen.

Der nächste Innovationssprung ist das sogenannte Taktiler Internet (siehe Abbildung 2). Durch minimale Reaktionszeiten, höchste Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit ermöglicht es eine neue Dimension in der Mensch-Maschine-Kommunikation durch taktile und haptische Sinnes-

eindrücke. Auch die Interaktion von Maschinen wird durch diese professionelle Infrastruktur revolutioniert.

Das Taktiler Internet ermöglicht es Menschen und Maschinen in einem begrenzten räumlichen Radius mobil mit taktilem Echtzeit steuernd in die Umgebung eingreifen zu können. Es stellt eine neue technische Entwicklungsstufe für die Gesellschaft, Wirtschaft und Kultur dar.

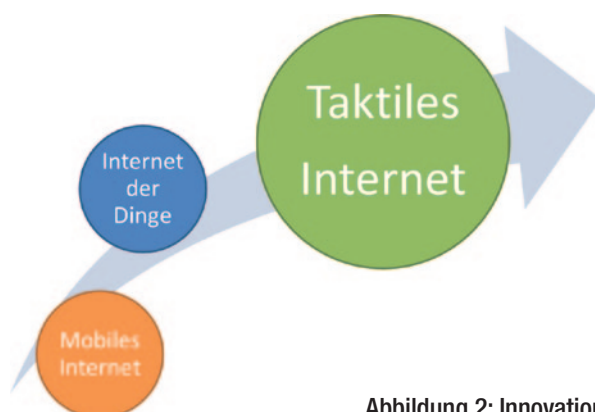


Abbildung 2: Innovationssprung des Taktilen Internets

2. Anwendungsfelder

Im Folgenden wird das Zukunftspotenzial des Taktilen Internets anhand vielversprechender Anwendungsfelder vorgestellt.

2.1. Industrie

Die Industrieautomatisierung ist ein wichtiges und schnell wachsendes Anwendungsfeld des Taktilen Internets. Die Steuerung schnell beweglicher Teile, zum Beispiel schneller Montageroboter mit taktiler Rückkopplung, erfordert aufgrund der Sensitivität der Regelkreise eine Ende-zu-Ende-Latenz deutlich unter einer Millisekunde pro Einzelsensor. Bei dem heute typischen Aufbau von Industriesteuerungen als geschlossene Regelkreise kontaktiert eine Masterstation im Millisekundentakt alle Sensoren und Aktoren und stellt die so gewonnenen Informationen in einem Prozessabbild dar. Aufgrund der Vielzahl an Sensoren, bei einer Druckmaschine beispielsweise bis zu 100, muss auch hier jeder Einzelsensor mit einer Ende-zu-Ende-Latenz erheblich unter einer Millisekunde bedient werden. Andere Anwendungen erfordern zusätzlich eine hohe Datenrate, beispielsweise optische Sensoren mit hochauflösenden Kameras und sehr hoher Bildfrequenz zur Beurteilung einer Oberflächengüte. Im Fall von drahtlosen Steuereinrichtungen ist darüber hinaus die Sicherheit besonders relevant, da hier potenzielle Angreifer keinen direkten physischen Zugang zu Steuereinrichtungen benötigen.

Die Vielfalt an Steuerungs- und Regelprozessen mit ihren jeweiligen deterministischen Realzeitbedingungen stellt somit unterschiedlich hohe Anforderungen an die Ende-zu-Ende-Latenz, die Datenrate, die Zuverlässigkeit und die Sicherheit. Um von Einzellösungen für Spezialfälle zu flexibel konfigurierbaren Standardlösungen zu kommen, müssen sowohl drahtgebundene als auch drahtlose Industrienetze über einen großen Parameterbereich skalierbar sein. In Einzelfällen werden heute schon Steuerungen über schnelle drahtgebundene Netze, beispielsweise industrielles Ethernet durchgeführt. In Zukunft sollen diese drahtgebundenen Steuerungen aber durch drahtlose Steuerungen ergänzt beziehungsweise ersetzt werden. Die dazu erforderlichen großen Verbesserungen sowohl hinsichtlich der Zuverlässigkeit als auch hinsichtlich der erreichbaren Ende-zu-Ende-Latenz erfordern noch einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand.

2.2. Montagerobotik und Fernsteuerung

In den letzten Jahren haben immer neue Beispiele des erfolgreichen Einsatzes von Robotern in Haushalt, Pflege, Fahrzeugführung und Produktion das Potenzial dieser Technologie deutlich gemacht. Googles Akquisition von gleich acht Start-ups für Robotik hat das öffentliche Interesse auch auf die wirtschaftlichen Vorteile des Einsatzes der Robotik gelenkt. Zahlreiche Tests und Wettbewerbe zeigen jedoch, dass

autonome Roboter – trotz einiger Erfolge, zum Beispiel beim autonomen Fahren – in vielen Bereichen erst mittel- oder langfristig einsetzbar sein werden.

In Bereichen, in denen autonome Roboter absehbar nicht zur Verfügung stehen werden, können ferngesteuerte Roboter eingesetzt werden. Ein hochaktuelles Szenario für ihren Einsatz sind Montage- und Reparaturarbeiten in gefährlichen Umgebungen. Die in Deutschland anstehende Demontage von Atomkraftwerken, Reparaturarbeiten in havarierten Atomkraftwerken oder Chemiefabriken, Montagearbeiten im Offshore-Bereich, Außenarbeiten an Raumstationen und die Beseitigung von Weltraumschrott in erdnahen Umlaufbahnen sind Anwendungsbereiche, die neben der wirtschaftlichen Dimension auch die gesellschaftliche und politische Bedeutung dieser Technologie verdeutlichen.

Allerdings setzen diese Beispiele fernsteuerbare mobile Roboter mit einer visuellen und haptischen Rückkopplung voraus. Für eine präzise Fernsteuerung müssen Systemantwortzeiten von einigen wenigen Millisekunden auch über Distanzen von mehreren 10 Kilometern erreicht werden. Eine Kommunikationsinfrastruktur, die derart kurze Systemantwortzeiten ermöglicht und die notwendige hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit aufweist, ist heute technisch noch nicht umsetzbar. Eine qualitativ neue mobile Kommunikationsinfrastruktur ist erforderlich.

2.3. Virtuelle Realität

Anwendungen im Bereich der Virtuellen Realität (VR) können in besonderem Maße vom Taktilen Internet profitieren. Die geringen Verzögerungen ermöglichen sogenannte Shared Haptic Virtual Environments, in denen mehrere Nutzer über eine VR-Simulation physikalisch miteinander gekoppelt werden, um gemeinsam feinmotorisch anspruchsvolle Tätigkeiten auszuführen (siehe Abbildung 3).

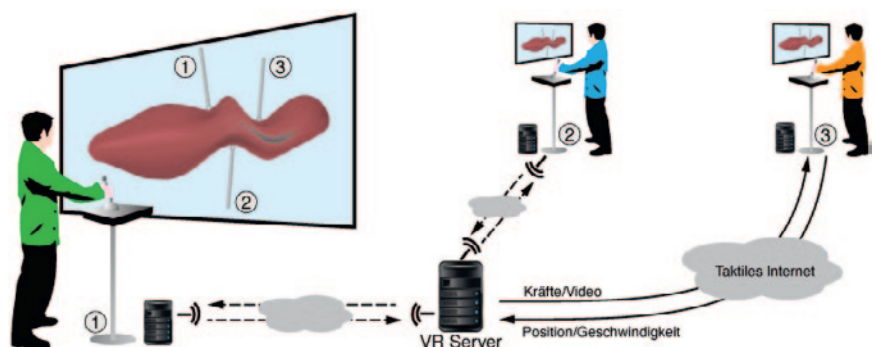


Abbildung 3: Physikalische Kopplung mehrerer Nutzer über eine Simulation der Virtuellen Realität mit haptischer Rückkopplung

(Quelle: C. Schuwerk, E. Steinbach)

Voraussetzung für eine hohe Wirklichkeitsnähe ist eine haptische Rückkopplung, die den Nutzern ermöglicht, die Objekte in der VR nicht nur visuell und akustisch wahrzunehmen, sondern zusätzlich auch zu erfühlen.

Dadurch werden feinmotorische Handlungen möglich, wie beispielsweise in der Telechirurgie, Mikromontage oder anderen Anwendungsszenarien mit großem „Fingerspitzengefühl“. Wirken zwei oder mehr Nutzer auf das gleiche Objekt ein, so findet eine unmittelbare Kraftkopplung über die VR-Simulation statt und die Nutzer spüren sich und ihre Aktionen gegenseitig. In heutigen vernetzten VR-Systemen führen zu große Verzögerungen noch zu Instabilitäten und Koordinationsschwierigkeiten. Eine hohe Wirklichkeitsnähe lässt sich nur erreichen, wenn die Reaktionszeit bei der Kommunikation zwischen den Nutzern und der VR im Bereich weniger Millisekunden liegt. In dieser Zeit müssen Positionsänderungen vom Nutzer in die VR übertragen werden, die physikalische Simulation ausgeführt werden und das Ergebnis in Form von Statusinformation beziehungsweise haptischer Rückkopplung an alle Nutzer zurückübertragen werden. Aus diesem Blickwinkel ist selbst die drahtgebundene Anbindung von Nutzern aus der Distanz noch eine große Herausforderung. Typische Aktualisierungsraten für die fortschreitende Berechnung der physikalischen Simulation und die Darstellung haptischer Informationen liegen im Bereich von 1.000 Hertz, was idealerweise einer Kommunikation der Ergebnisse im Millisekundentakt entspricht. Insbesondere die sogenannte Simulationskonsistenz aus Sicht aller Nutzer, das heißt die gewünschte identische lokale Sicht aller Nutzer auf die Gesamtsimulation zu jedem Zeitpunkt, lässt sich nur bei sehr kurzen Reaktionszeiten erreichen.

2.4. Erweiterte Realität



Abbildung 4: Fahrerassistenz durch Einblenden möglicher Gefahrensituationen

(Quelle: Eine Bearbeitung von dangerous driving in the rain - tips von woodleywonderworks/flickr.com, verwendet unter CC BY 2.0.)

In den letzten Jahren hat die Entwicklung neuer Anwendungen der Erweiterten Realität, der auch sogenannten Augmented Reality, ein enormes Wachstum gezeigt, nicht zuletzt durch die Einführung kleiner und leichter Brillensysteme sowie durch die Leistungssteigerung der mit Kameras ausgestatteten Smartphones oder Tablets. Durch das Einblenden von Zusatzinformationen in das Sichtfeld eines Nutzers wird eine Vielzahl neuer Assistenzsysteme für interaktive Städteführer, Wartungs-

aufgaben, Fahrerassistenz, Medizin, Ausbildung oder Lageunterstützung von Polizei und Feuerwehreinsätzen ermöglicht. Zurzeit sind solche Systeme aufgrund der begrenzten Rechenkapazität der kleinen Mobilgeräte und der übertragungsbedingten Verzögerungen oft auf das Einblenden weniger und meist statischer Information beschränkt und für einen praktischen Einsatz nur begrenzt geeignet.

Das Taktile Internet ermöglicht eine völlig neue Dimension von Assistenzsystemen. Anstatt auf begrenzte, vorab bekannte Information beschränkt zu sein, wird das Einblenden dynamischer Inhalte oder aktueller Information aus der Umgebung anderer Nutzer möglich. Dies erlaubt beispielsweise eine virtuelle Blickfelderweiterung für Fahrzeugführer (siehe Abbildung 4). Mögliche Gefahrensituationen durch Personen und Objekte, die der Fahrer durch Nebel, Kurven oder blockierte Sicht selbst nicht sehen kann, können durch vorausfahrende Fahrzeuge erfasst und lagerichtig in die Scheibe projiziert werden. Das Konzept des „Sehens, was andere sehen“ lässt sich auch in der Medizin, bei Feuerwehreinsätzen oder bei der virtuellen, gemeinsamen Teilnahme an Livekonzerten (siehe Abbildung 5) einsetzen. All diese Anwendungen, die auf der visuellen Kombination realer und bearbeiteter Inhalte beruhen, erfordern allerdings eine Reaktionszeit von wenigen Millisekunden, um den Anwender nicht zu irritieren. Dies betrifft nicht nur den Datenaustausch über schnelle Netze, sondern erfordert auch eine verzögerungsfreie Sensorik und Visualisierung, genauso wie neue Algorithmen, die rechenintensive Prozesse wie die 3D-Bilderfassung und Lagekorrektur auf verteilte Umgebungen mit niedriger Latenz ermöglichen.



Abbildung 5: Kollaborative Erfassung eines Livekonzerts für die virtuelle Teilnahme externer Nutzer

(Quelle: Eine Bearbeitung von Garbage live@ KB Hallen #1 von Stig Nygaard/flickr.com, verwendet unter CC BY 2.0.)

2.5. Gesundheit

Das Taktile Internet eröffnet revolutionäre neue Behandlungsmöglichkeiten in der medizinischen Versorgung und Pflege. Beispiele sind die Tele-Diagnose, Tele-Chirurgie und Tele-Rehabilitation. War bisher medizinische Expertise meist an den Standort des Arztes gebunden, kann diese nunmehr unabhängig vom Standort des Arztes flächendeckend, sofort und rund um die Uhr verfügbar sein. In der Tele-Diagnose von morgen ist der Arzt in der Lage, seinen Patienten aus der Ferne auch körperlich, also durch Abtasten, zu untersuchen. Dabei steuert der Arzt den entfernten Roboter und erhält über die Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht nur Video- und Audioinformation dargestellt, sondern bekommt auch den so wichtigen Tasteindruck vermittelt. Analog ermöglichen tele-chirurgische Operationstechniken den Eingriff aus der Ferne, so dass sich die Reise zum chirurgischen Spezialisten erübrigt.

Bei der zukünftigen Tele-Rehabilitation trägt der Patient ein Exoskelett, einen tragbaren Roboter, den der Physiotherapeut von einer Bedienstation aus der Ferne steuert, um die Bewegung des Patienten zu lenken und zu korrigieren. Durch die Einbettung in den gewohnten Alltag und die Umgebung des Patienten verspricht die Behandlung im häuslichen Umfeld bessere Therapieerfolge und damit auch eine höhere Kosteneffizienz.

Wirklichkeitsnähe ist eine Grundvoraussetzung für den sicheren Einsatz der neuen Tele-Technologien in der Medizin: Der Arzt, Chirurg oder Physiotherapeut benötigt einen realitätsnahen Eindruck des Patientenzustandes. Wirklichkeitsnähe erfordert von der Kommunikation deterministisches Echtzeitverhalten und ist mit derzeitigen Kommunikationssystemen nicht erreichbar. Eine Ende-zu-Ende-Latenz von 1 bis maximal 10 Millisekunden bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit in der Datenübertragung ist erforderlich. Mit geeigneten Regelungsverfahren lässt sich auch eine Ende-zu-Ende-Latenz von 10 Millisekunden und mehr kompensieren, allerdings reduziert sich die Wirklichkeitsnähe bei steigenden Verzögerungen.

2.6. Verkehr

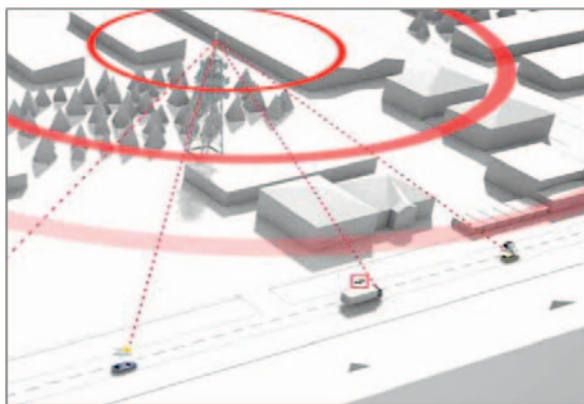


Abbildung 6: Vernetzung des Verkehrs

(Quelle: Bosch GmbH)

Mobilität hat eine elementare Bedeutung für unsere Gesellschaft. Verkehrssicherheit und -effizienz sind dabei die bedeutenden Faktoren. Verkehrsstaus verursachen in Deutschland jährlich einen volkswirtschaftlichen Schaden von rund 17 Milliarden Euro, wobei das Verkehrsaufkommen weiterhin kontinuierlich steigt. Die Zahl der bei Verkehrsunfällen verletzten beziehungsweise getöteten Personen lag 2012 bei jährlich 380 Tausend beziehungsweise 3.600.¹ Verkehrsunfälle und Verunglückte gehen zwar seit einigen Jahren zurück, eine deutliche und nachhaltige Reduktion kann jedoch nur durch Fahrzeugkommunikation und -koordination erreicht werden.

Leistungsfähige Fahrzeugsensorik und Assistenzsysteme helfen dem Fahrer schon heute, sicherer und entspannter ans Ziel zu kommen. Durch Kommunikation – dem Datenaustausch zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und der Straßen-Infrastruktur – wird das Fahrzeug vom autonomen zum kooperativen System. Der Datenaustausch liefert dem Fahrzeug Information aus der Umgebung und deckt dabei auch das nicht einsehbare Fahrzeugumfeld ab. Existierende Kommunikationssysteme, zum Beispiel Verkehrsinformationen über UKW-Radio, haben eine hohe Verzögerung bei geringer Positionsgenauigkeit und sind für Sicherheitsanwendungen ungeeignet. Kooperative Systeme – beispielsweise das vor der Markteinführung stehende WLAN-basierte Car-2-X-System – erlauben einen direkten Datenaustausch zwischen Fahrzeugen, unterstützen jedoch nicht alle kritischen Sicherheitsanwendungen.

Anwendungen der Fahrzeugsicherheit erfordern eine sehr geringe Ende-zu-Ende-Latenz von unter 10 Millisekunden zur Kollisionsvermeidung durch eingreifende Systeme und sogar von einer Millisekunde bei mehrfacher Hin- und Rückkommunikation zwischen Fahrzeugen zum Abstimmen von automatischen kooperativen Fahrmanövern. Zukünftig ist es vorstellbar, dass auch hochdynamische Objekte wie Fußgänger von einem Fahrzeug mit Radar oder Video detektiert werden und diese Information an umliegende Fahrzeuge verteilt wird. Langfristig wird erwartet, dass vollautomatisiertes Fahren die Mobilität der Zukunft verändern wird. Wegen der geringen Distanz zwischen automatisierten Fahrzeugen müssen potenziell kritische Situationen viel früher erkannt werden als bei einem menschlichen Fahrer.

2.7. Serious Gaming

Sogenannte Serious Games verbinden durch Spiele erzeugte positive Emotionen mit zielgerichteten Tätigkeiten in den gesellschaftlich relevanten Gebieten Bildung, Training, Simulation und Gesundheit. Über den Erfolg von Serious Games und die Nutzerakzeptanz entscheiden Faktoren wie die Benutzerfreundlichkeit und das Nutzererlebnis. Die Voraussetzung hierfür liegt in der Auswahl geeigneter Technologien – vor

¹ Quelle: Statistisches Bundesamt <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/Verkehrsunfaelle.html>

allem kommen hierbei Multimedia- und Kommunikationstechnologien zur Präsentation der Spielinhalte als auch der Interaktion der Spieler mit dem Spiel und der Kommunikation zwischen den Spielern untereinander zum Tragen. Dabei spielt insbesondere die Ende-zu-Ende-Latenz als ein limitierender Faktor für die Entwicklung von Spielmechanismen eine entscheidende Rolle, da wahrnehmbare Verzögerungen der Interaktion die Wirklichkeitsnähe der Anwendung unmittelbar beeinflussen.



Abbildung 7: Bewegungsspiel ErgoActive für personalisiertes Herz-Kreislauf-Training
(Quelle: TU Darmstadt)

Am Beispiel von Bewegungsspielen wie ErgoActive wird dies besonders deutlich: Für eine gute Spielqualität wird eine Bildwiederholrate von mindestens 50, eher 100 Hertz benötigt. Eine Einwirkung durch die Aktorik, beispielsweise durch Lenken, Bremsen oder Beschleunigen, soll für den Spieler unmittelbar sichtbar werden. In erster Näherung muss somit die Verarbeitung der Spiellogik inklusive der Umschaltzeiten für den Monitor und die übertragungsbedingten Verzögerungen bei einer Bildwiederholrate von 50 Hertz weniger als 20 Millisekunden und bei 100 Hertz weniger als 10 Millisekunden betragen. Erstrebenswert ist eine Ende-zu-Ende-Latenz von bis zu einer Millisekunde, damit möglichst viel Rechenzeit für die Berechnung der Interaktion und einer qualitativ hochwertigen Visualisierung zur Verfügung steht. Dies ist keine harte Grenze; auch ein gewisses Schwanken der Verzögerung ist akzeptabel. Aktuell ist die Entwicklung von interaktiven Anwendungen durch die hohen Übertragungsverzögerungen eingeschränkt, denn diese Verzögerungen können im Spielablauf als sogenannte Lags wahrgenommen werden. Aus diesem Grund gibt es in aktuellen Spielen Beschränkungen in der Anzahl der Mitspieler und der Distanzen zwischen Mitspielern. Es ist bekannt, dass Verzögerungen von 30 bis 50 Millisekunden oder mehr messbare Verschlechterungen der Spielewahr-

nehmung und -bewertung hervorrufen. Eine Verringerung der Ende-zu-Ende-Latenz und eine Zusicherung von Obergrenzen für die Ende-zu-Ende-Latenz auf nationalen und internationalen Verbindungen ist die Basis für bisher nicht realisierbare neue Interaktionsmöglichkeiten, die beispielsweise auch reale Bewegungen des gesamten Körpers oder taktile Interaktionen in Spiele mit mehreren Nutzern integrieren.

2.8. Bildung und Kultur

Anspruchsvolle handwerkliche Tätigkeiten erfordern feinmotorische Fähigkeiten, die sich nur schwer in Worte fassen und in der Regel nur mühsam durch beständiges Wiederholen und fortlaufende Korrektur durch einen Experten wie den Trainer oder Ausbilder erlernen lassen. Hier verspricht das Taktile Internet grundlegend neue Ausbildungsmöglichkeiten, die auf dem Prinzip der haptischen Überlagerung des Lehrenden und Lernenden beruhen. Führt der Lernende eine Tätigkeit aus, so kann der Lehrende diese direkt haptisch verfolgen, also die Bewegungsrichtung und Kräfte spüren und gegebenenfalls korrigieren. Voraussetzung dafür sind möglichst identische multimodale, also visuelle, auditorische und haptische Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie eine extrem geringe Ende-zu-Ende-Latenz, da der Lehrende schon bei geringen Verzögerungen nicht mehr in der Lage ist, zeitlich synchron und unmittelbar korrigierend auf den Bearbeitungsvorgang einzuwirken. Umgekehrt können ein oder mehrere Lernende auch dem Ausführen einer Tätigkeit durch den Lehrenden haptisch folgen und somit einen wesentlich besseren Eindruck von den feinmotorischen Herausforderungen der Tätigkeit erwerben, als dies mit einer visuellen oder auditorischen Erklärung beispielsweise per Lernvideo möglich wäre. So können angehende Mediziner zum Beispiel eine Operation haptisch mitverfolgen und dadurch wichtige Fähigkeiten für die eigene Ausbildung erwerben. Mit ähnlichen Ansätzen kann auch das Erlernen von Musikinstrumenten auf höchstem Niveau unterstützt werden. Hier wird es durch das Taktile Internet möglich, dass sich ein Experte aus der Entfernung haptisch mit dem Übenden überlagert und ihn direkt korrigiert.

Darüber hinaus ermöglicht das Taktile Internet auch verteiltes interaktives Musizieren, zum Beispiel das gemeinsame Proben räumlich entfernter Orchestermitglieder. Heute ist dies aufgrund der zu großen Ende-zu-Ende-Latenz nicht zufriedenstellend möglich. Um die notwendige Qualität für solche Anwendungen zu erreichen, ist eine Ende-zu-Ende-Latenz von wenigen Millisekunden erforderlich.

2.9. Intelligentes Stromnetz

Die effiziente und zuverlässige Energieübertragung und -verteilung in Stromnetzen ist die Grundlage einer sicheren Energieversorgung. Die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien führt zu verteilten Energieerzeugern, die un stetig Energie erzeugen und in alle Netzebenen des Stromnetzes einspeisen können. Eine phasenungeheure Einspeisung führt jedoch zu praktisch nicht nutzbarer Leistung, sogenannter Blindleistung.

Um Spannungsschwankungen zu vermeiden und das Stromnetz zu stabilisieren, ist ein Ausbalancieren des Energieverbrauchs und der Energieerzeugung erforderlich. Das bisherige Stromnetz kann die Stabilität, und damit eine sichere Energieversorgung, bei einer Einspeisung durch viele dezentrale Energieerzeuger nicht gewährleisten.

Um die vorhandene Energie sinnvoll zu verteilen und zu nutzen, nicht benötigte Überkapazitäten zu vermeiden und die Stabilität des Netzes zu gewährleisten, werden „Intelligente Stromnetze“, sogenannte Smart Grids, entwickelt. Diese bestehen im Wesentlichen aus zwei Komponenten: dem eigentlichen Stromnetz inklusive aller Erzeuger und Abnehmer sowie einem Kontroll- und Steuernetz. Dieses intelligente Stromnetz kennt den Status von Stromerzeugern, Übertragungsleitungen und Zwischenstationen, den aktuellen Verbrauch und Stromtarife. Intelligente Monitore auf Abnehmerseite können dann auf Basis von Netzstatusinformationen Verbraucher, zum Beispiel Waschmaschinen oder Autoladegeräte, genau dann einschalten, wenn Strom zu günstigen Preisen verfügbar ist. Die dezentralen Energieerzeuger können zur Stabilisierung des Stromnetzes dynamisch ab- oder zugeschaltet werden. In der Zukunft ist es auch vorstellbar, dass dezentrale Energieerzeuger phasengenau in das Stromnetz einspeisen und somit zur Stabilität durch Blindleistungskompensation beitragen.

Aus den technischen Randbedingungen ergeben sich harte Anforderungen an das intelligente Stromnetz. Eine dynamische Steuerung durch ein An- und Abschalten von Energieerzeugern verträgt eine Ende-zu-Ende-Latenz von mehreren 100 Millisekunden. Ein phasengenaues Einspeisen zur Blindleistungskompensation erfordert dagegen eine sehr geringe Ende-zu-Ende-Latenz von nur einer Millisekunde. Durch die Netzfrequenz von 50 Hertz führt eine Verzögerung von einer Millisekunde bereits zu einer Phasenverschiebung von 18° . Über die ohnehin hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit stellen intelligente Stromnetze damit auch hohe Anforderungen an die Latenz.

2.10. Weitere Anwendungsfelder

Die Fertigung des letzten Jahrhunderts war durch die Einführung des Fließbands geprägt. Dies ermöglichte es, an einer Montagelinie entlang des Fließbands, identische bzw. ähnliche Objekte zu Produkten zusammenzufügen und somit ehemalige Luxusgüter für die breite Masse verfügbar zu machen. Die neue Herausforderung ist es, stark individualisierte Produkte herzustellen. Dies wird entlang eines Fließbands immer ineffizienter, da die Fertigungsstraße dadurch zu lang wird und Roboter zu häufig stillstehen, wenn sie bei dem aktuell vorbeilaufenden Produkt nicht benötigt werden. Daher besteht der Bedarf „zurück zur Manufaktur“. An Fertigungsinseln werden die Produkte zusammengebaut.

Mobile Roboter bewegen sich zwischen diesen Inseln und treffen bei Bedarf mit dem Bauteil ein. Hierzu bedarf es des Taktilen Internets: einer funkbasierten Kommunikation zwischen Robotern, in taktilem Echtzeit, d.h. im Bereich einer Millisekunde.

Ein weiteres interessantes Anwendungsfeld des Taktilen Internets ist der Einsatz von kleinen unbemannten Fluggeräten, beispielsweise im Logistikbereich. Weitere mögliche Anwendungsszenarien solcher Flugkörper sind Bestandsüberprüfungen in der Forst- und Landwirtschaft, die Beobachtung und Überwachung von unübersichtlichen Brandherden, die Übertragung von Sportereignissen und auch die polizeiliche Aufklärung. Zur Sichtsteuerung von kleinen Fluggeräten wie Quad- oder Hexacoptern wird heute das 2,4 Gigahertz Frequenzband verwendet. Dadurch wird sowohl die Reichweite auf wenige hundert Meter beschränkt, als auch die Qualität der übertragbaren Video- und Audioströme begrenzt. Größere Reichweiten im Kilometerbereich und qualitativ hochwertige HD-Videoübertragungen sind bereits heute über sogenannte lokale Ad-Hoc LTE-Netze im 800 bis 900 Megahertz Frequenzband erreichbar. Die Ende-zu-Ende-Latenz von LTE ist hinreichend klein, um auf Sicht oder sogar basierend auf einem vom Fluggerät übermittelten Videosignal ein Fluggerät steuern zu können. Wie bei anderen taktilen Anwendungen ist bei einer Ende-zu-Ende-Latenz im Bereich bis zu 10 Millisekunden eine praktisch verzögerungsfreie und damit hochpräzise Fernsteuerung möglich. Eine deutlich geringere Ende-zu-Ende-Latenz wird zukünftig die sichere Fernsteuerung von Fluggeräten über Entfernungen bis zu einem Kilometer ermöglichen.

Die geringen Verzögerungen des Taktilen Internets ermöglichen zukünftig auch die mobile Anbindung an im Umfeld befindliche, existierende Infrastrukturen, beispielsweise an Rechenzentren, die mit einer Ende-zu-Ende-Latenz im Sub-Millisekunden-Bereich untereinander verknüpft sind. Darüber hinaus wird die professionelle Infrastruktur des Taktilen Internets noch weitere, bisher nicht absehbare, Anwendungsfelder ermöglichen.

3. Anforderungen an die Infrastruktur

3.1. Latenz und Zuverlässigkeit

Um eine Ende-zu-Ende-Latenz von Systemen und damit eine Systemantwortzeit von nur einer Millisekunde zu erreichen, muss verstanden sein, wie die Kette zwischen Sensoren und Aktoren in einem verteilten System des Taktilen Internets aufgebaut ist. Abbildung 8 veranschaulicht ein exemplarisches Latenz-Budget einer mobilen Funkkommunikation für das Taktiler Internet:

Der Sensor nimmt einen Messwert wahr. Diese Daten werden aufbereitet und einem eingebetteten System zur Verfügung gestellt, das die Funkschnittstelle ansteuert. Anschließend leitet die Funkschnittstelle die Daten über alle Protokollebenen hinweg auf die physikalische Ebene der Datenübertragung. An der Empfangsstelle, beispielsweise einer Basisstation mit angeschlossener Mobile Edge Cloud, geschieht dasselbe in umgekehrter Reihenfolge und wird einem Steuerrechner zur Verfügung gestellt. In diesem läuft die Systemregelung ab und Entscheidungen über Reaktionen werden gefällt. Um die gewünschte Systemreaktion zu erzielen, werden diese Entscheidungen schließlich über eine umgekehrt ablaufende Strecke dem Aktor zur Verfügung gestellt.

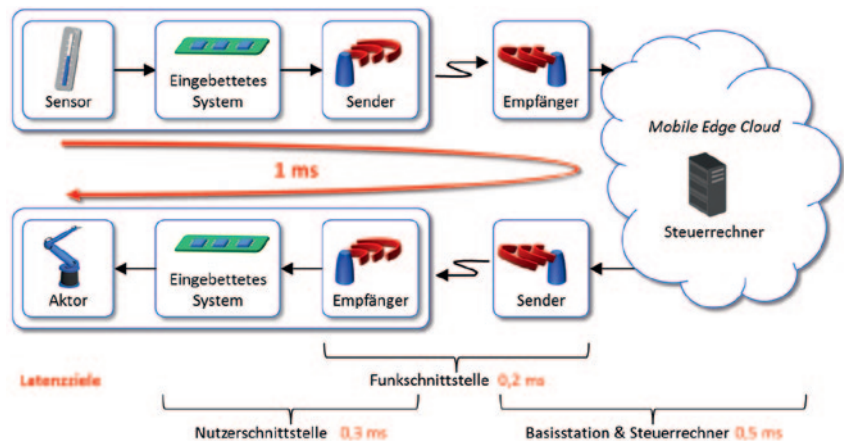


Abbildung 8: Exemplarisches Latenz-Budget für ein System des Taktilen Internets

(Quelle: I. Riedel, G. Fettweis)

Neben der geringen Ende-zu-Ende-Latenz ist eine hohe Zuverlässigkeit des Gesamtsystems ein weiteres wichtiges Qualitätsmerkmal des Taktilen Internets. Der Anspruch an höchste Zuverlässigkeit geht mit den Echtzeitanforderungen einher. Das wird unmittelbar klar, wenn man sich veranschaulicht, dass es für alle in Kapitel 2 dargestellten Anwendungen zwingend notwendig ist, dass die schnell übertragenen Daten auch zuverlässig ankommen.

Im Folgenden werden die Herausforderungen und einzelnen Systemkomponenten genauer beschrieben.

3.2. Sicherheit

Schon heute sind Kommunikationssysteme Teil der sogenannten Kritischen Infrastruktur. Die Gesellschaft hat höchste Erwartungen an ihre Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit und sie sind gegen Angriffe von außen und Fehlverhalten zu schützen. Die neuen technischen Anforderungen an das Taktile Internet, insbesondere die sehr kurze Ende-zu-Ende-Latenz, stellen enorme Herausforderungen an Kommunikationssysteme. Sowohl für die Sicherheit als auch für die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit sind Paradigmenwechsel beim Systemdesign der Kommunikationssysteme erforderlich. In existierenden Kommunikationssystemen beruht die Sicherheit der Kommunikation auf einer Trennung der Verschlüsselungs- von der Übertragungstechnik. Klassische Verschlüsselungsverfahren unterstützen die Sicherheit gegen Abhören dabei nur, wenn die Verschlüsselungsalgorithmen hinreichend komplex sind und die Abhörer nur über begrenzte Rechenleistung verfügen. Da diese Sicherheitsmechanismen in höheren Protokollschichten umgesetzt werden, ergeben sich dadurch nicht zu vernachlässigende Verzögerungen. Die Aufgabe der Übertragungstechnik besteht dabei lediglich darin, hohe Übertragungsraten bereitzustellen. Um die sichere Datenübertragung bei sehr kurzer Ende-zu-Ende-Latenz für das Taktile Internet zu erreichen, muss die Sicherheit der Kommunikation gegen Abhören und gegenüber Attacken direkt in die physikalische Übertragung eingebettet werden. Durch den Einsatz geeigneter Kodierungsverfahren sind dann nur die legitimierte Empfänger in der Lage, die sicheren Nachrichten zu empfangen. Die Abhörer hingegen werden als nicht legitimierte Empfänger über die Natur der sicheren Nachrichten vollständig im Unklaren gelassen. Selbst bei unendlicher Rechenleistung sind die Abhörer damit nicht in der Lage, die sicheren Nachrichten zu dekodieren. Dieser Ansatz liefert damit absolute Sicherheit im mathematischen Sinn. Neue wichtige Bewertungskriterien von Kommunikationssystemen sind unter anderem die maximalen Raten für die Übertragung von absolut sicheren Nachrichten, die maximalen Raten zur Übertragung absolut sicherer Schlüssel und die Erzeugungsraten von absolut sicheren Schlüsseln. Der Ansatz der übertragungstechnischen Sicherheit besitzt im Unterschied zu den klassischen Verschlüsselungsverfahren den weiteren Vorteil, dass diese Performancegrößen der Kommunikationssysteme direkt durch die physikalischen Ausbreitungsbedingungen bestimmt sind und damit bei der Systemdimensionierung und -optimierung berücksichtigt werden können. Eine weitere zentrale Herausforderung für das Taktile Internet ist die Authentifizierung von Nutzern beziehungsweise Endgeräten. Der existierende Ansatz der Trennung von Authentifizierung und physikalischer Übertragung erlaubt keine kurze Ende-zu-Ende-Latenz. Das Taktile Internet erfordert daher auch die Einbettung der Authentifizierung in die physikalische Übertragung. Hierzu können Hardware-spezifische Eigenschaften von Sendern, sogenannte Physical Unclonable Functions, als eine Art biometrischer Fingerabdruck verwendet werden.

3.3. Systemarchitektur

Das Taktile Internet erfordert minimale Reaktionszeiten, höchste Verfügbarkeit, höchste Zuverlässigkeit und höchste Sicherheit. Um das zu erreichen, ist eine Systemarchitektur mit verteilten Serviceplattformen erforderlich. Taktile Anwendungen müssen aufgrund der benötigten ultrakurzen Ende-zu-Ende-Latenz zukünftig nahe an den Nutzer herangeführt und lokal gehalten werden.

In einer ersten Stufe kann einem lokalen Cluster von Mobilfunkstationen zukünftig ein lokales kleines Rechenzentrum, eine sogenannte Mini Cloud, zugeordnet werden. Diese Mini Cloud bietet damit die gesamte im Cluster benötigte Funktionalität des Mobilfunknetzes sowie die in diesem Cluster angebotenen, zukünftig auch taktilen, Services. Ein solches lokales Cluster kann zukünftig die Robotik eines Industriekomplexes steuern.

In einer weiteren Stufe kann zukünftig eine sogenannte Mobile Edge Cloud mit Services und Netzfunktionen zum Rand der Infrastruktur des Mobilfunksystems, also direkt zu den einzelnen Mobilfunkstationen gebracht werden.

Mini Clouds oder Mobile Edge Clouds beinhalten im Wesentlichen drei Funktionsblöcke: (1) eine cloudbasierte Serviceplattform für taktile Applikationen, Online-Spiele, Web-Caches und andere laufzeitsensitive Applikationen, (2) virtualisierte Netzkontrollfunktionen, Optimierer zur Performanceverbesserung und Sicherheitsfunktionen, (3) alle notwendigen Schnittstellen zum Funknetz.

Mit der Zeit wird sich somit eine mehrstufige Hierarchie von Cloud-Plattformen entwickeln: zahlreiche Mobile Edge Clouds auf Ebene der Mobilfunkstationen, Mini Clouds auf lokaler Ebene und wenige zentrale Clouds.

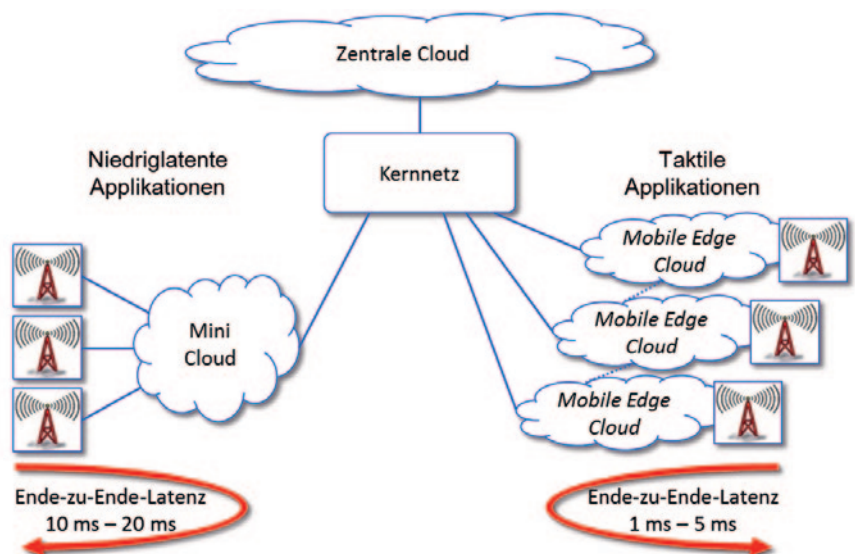


Abbildung 9: Systemarchitektur

(Quelle: I. Riedel, W. Häffner)

3.4. Sensorik und Aktorik

Die Sensor-Aktor-Kommunikation ist mit extrem hohen Anforderungen an Hardware und Software versehen. Hier müssen deterministische Systemantwortzeiten garantiert werden, damit zuverlässige Steuerungen realisiert werden können. Je nach Anwendung ist eine Ende-zu-Ende-Latenz von nur wenigen Mikrosekunden zulässig. Entsprechend dürfen die einzelnen Verarbeitungsschritte von der Sensordatenverarbeitung über die Weiterleitung zum Steuerrechner, die Berechnung der Steuer-signale und deren Übertragung zum Aktor Antwortzeiten im Bereich von Mikrosekunden nicht überschreiten. In einem ersten Verarbeitungsschritt erfolgen die Signalkonditionierung und die Datenkompression. Intelligente Datenkompressionsverfahren, die die Datenmenge so weit als möglich reduzieren, spielen bei der Systemoptimierung eine entscheidende Rolle. Die Kompression selbst muss mit möglichst geringer algorithmischer Verzögerung erfolgen und weitestgehend ohne Puffer-vorgänge auskommen. Bisher in regelmäßigen Zeitabständen übertragene Sensordaten werden deshalb in kürzlich entwickelten ereignisbasierten Regelungsverfahren nur dann übertragen, wenn neue, für die Regelung notwendige Informationen vorliegen. Des Weiteren werden Plausibilitätsverfahren eingesetzt, um „Ausreißer“ zu verwerfen. Mittels fortschrittlicher Filterverfahren können auch auf der Basis von einigen real gemessenen Werten und einem vorhandenen physikalischen Modell sehr gute Vorhersagen gemacht werden.

Vielversprechend sind auch sogenannte In-Network Processing-Verfahren, bei denen die von den Sensoren gelieferten Rohdaten in jedem Knoten von der Quelle bis zur Senke durch zusätzliche Informationen verfeinert werden. Ein Wert, der dann die Steuerung erreicht, hat eine viel höhere Aussagekraft als die Einzelwerte und die notwendige Steuerungsentscheidung kann so schneller und mit höherer Qualität erfolgen. Hohes Verbesserungspotenzial gibt es hinsichtlich der Kommunikation, da das Warten auf den Medienzugriff oft einige Millisekunden dauern kann und deshalb Sensordaten schon vor ihrem Absenden veraltet sein können. Um die Verzögerungen in allen Protokollschichten möglichst gering zu halten, sind völlig neuartige und skalierbare Verfahren des Protokollentwurfes notwendig. Die Ende-zu-Ende-Latenz von Sensor zu Aktor über alle Komponenten hinweg spielt die entscheidende Rolle und muss durch eine intelligente Koordination der Komponenten untereinander erreicht werden. Dabei ist zu beachten, dass die Prozesse in den Komponenten stark aneinander gekoppelt sind. Eine prozessübergreifende Betrachtung des Gesamtsystems sowie entsprechende Entwurfs-konzepte sind unerlässlich.

Die Minimierung der Ende-zu-Ende-Latenz erfordert neben schneller Datenkompression und extrem geringen Übertragungszeiten auch eine hocheffiziente Signalverarbeitung an der Nutzerschnittstelle. Bei der visuellen Kommunikation sind insbesondere das unmittelbare Auslesen der Bilder aus der Kamera, eine Steigerung der Bildwiederholrate sowie

die hochratige Übertragung relevant. Das Ziel muss sein, die Verzögerung digitaler Videosysteme in den Bereich analoger Lösungen zu bringen, bei denen die Bildwiederholrate der limitierende Faktor ist. Dies ist insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen, zum Beispiel bei Fahrerassistenzsystemen, von großer Bedeutung.

Für die haptische Kommunikation sind die Verzögerungsanforderungen noch strikter. Sobald Sensorwerte vorliegen, müssen diese übertragen werden. Nur so lassen sich harte Oberflächen haptisch als solche wahrnehmen. Das erfordert völlig neue Ansätze bei der Verarbeitung und Kompression haptischer Datenströme. Eine Systemantwortzeit von mehr als 10 Millisekunden würde zu Instabilitäten in der haptischen Interaktion führen.

3.5. Zugangsnetz

Die Anforderungen des Taktilen Internets haben weitreichende Konsequenzen für zukünftige Zugangsnetze. Die zu realisierende Ende-zu-Ende-Latenz von einer Millisekunde und die vom jeweiligen Anwendungsfeld abhängigen Zuverlässigkeits- und Kapazitätsanforderungen stellen sehr hohe Anforderungen. Während diese Anforderungen teilweise durch verfügbare drahtgebundene Zugangsnetze erfüllt werden können, sind drahtlose Zugangssysteme, die diese Anforderungen bedienen können, bisher nicht verfügbar.² Diese Lücke zu schließen, erfordert einen signifikanten Forschungsaufwand.

Es müssen Funkzugangssysteme entwickelt werden, die Verzögerungen in der Größenordnung von weniger als 0,2 Millisekunden ermöglichen (siehe Abbildung 8). Die Zeitdauer für die Allokation von Nutzerdaten muss damit beispielsweise um den Faktor 10 geringer sein als bei heutigen Funkstandards wie zum Beispiel LTE. Um überhaupt umsetzbar zu sein, müssen die beispielsweise für Anwendungen der Virtuellen Realität mit haptischer Rückkopplung erforderlichen großen Datenmengen mit geringster Verzögerung zuverlässig übertragen werden. Aufgrund der statistischen Eigenschaften des Übertragungsmediums können bei Funkübertragungen jedoch grundsätzlich Übertragungsfehler auftreten. Die zum Beispiel bei Industrieanwendungen auftretenden hohen Zahlen von Endgeräten auf engem Raum führen jedoch zu Interferenzen und können sich dadurch zusätzlich nachteilig auf die Zuverlässigkeit auswirken. Aufgrund der notwendigen geringen Verzögerung kann dem jedoch nicht, wie bisher üblich, durch wiederholte Übertragungen begegnet werden. Ansatzpunkte für neue Konzepte, um diese hohen Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen, sind Verfahren, die für Redundanz und Diversität sorgen. Ein weiterer wichtiger Aspekt für schnelle Funkzugangssysteme besteht darin, einen schnellen Zugang zu den Funkressourcen zu bekommen. Dazu sind geeignete vereinfachte Zugangsprotokolle und

² Die typische Ende-zu-Ende-Latenz im Festnetz beträgt derzeit 10 – 60 Millisekunden. Die Mobilfunknetze UMTS und HSDPA liegen mit 150 – 200 Millisekunden deutlich darüber. LTE Mobilfunknetze können heute 25 – 40 Millisekunden erreichen.

Signalisierungskonzepte zu erarbeiten, die den Zugriff auf das Übertragungsmedium in kurzer Zeit ermöglichen. Jede einzelne Protokollschicht darf nur extrem kurze Verzögerungen verursachen.

3.6. Mobile Edge Cloud

Die Lichtgeschwindigkeit erlaubt das Übertragen von Signalen über 300 Kilometer innerhalb einer Millisekunde. Selbst ohne die Berücksichtigung der Dauer der Signalverarbeitung kann somit ein Steuerrechner des Taktilen Internets nur Systeme im maximalen Umkreis von 150 Kilometern steuern. Unter Berücksichtigung einer realistischen Dauer der Signalverarbeitung muss der Steuerrechner daher in direkter Nähe der Basisstation oder des Zugangspunktes positioniert werden. Während besonders latenzkritische Steueranfragen in der Mobile Edge Cloud laufen, können weniger latenzkritische Informationsabfragen in einem weiter entfernten Steuerrechner der Cloud bearbeitet werden (siehe Abbildung 9).

Ein System des Taktilen Internets umfasst mehrere Komponenten: Zusätzlich zu dem Steuerrechner der Mobile Edge Cloud müssen die eingebetteten Systeme der mobilen Sensoren und Aktoren in den Regelungsablauf eingebunden werden. Ein verteiltes Regelungssystem entsteht. Nicht nur die auf den Rechnern laufende Software muss daher extremen Latenzanforderungen genügen. Auch die Echtzeitbetriebssysteme der Rechner müssen ankommende Steuerinformationen schnellstens zur Regelungssoftware leiten und Garantien für die Latenz einhalten.

Um die Ausfallsicherheit eines Systems des Taktilen Internets ohne Latenzerhöhungen zu garantieren, ist eine Mehrfachübertragung über parallele Kommunikationskanäle erforderlich. Die Betriebssysteme der eingebundenen Rechner müssen daher zukünftig auch die Garantiesteuerung der Kommunikation mit überwachen und steuern.

Um in heutigen Mobilfunksystemen eine unterbrechungsfreie Kommunikation zu garantieren, übergibt eine Basisstation den Kommunikationskanal eines mobilen Teilnehmers im Rahmen eines sogenannten Handoffs der nächsten Basisstation. In verteilten Systemen des Taktilen Internets müssen nicht nur die vielfältigen parallelen Kommunikationskanäle aufrechterhalten werden, d.h. auch in einzelnen Fällen ein Handoff durchgeführt werden. Dieselbe Anforderung an eine Übergabe gilt nun auch für die Übergabe eines Steuerprogramms von einem Rechner der Mobile Edge Cloud auf den nächsten. Dies – sowie die robuste parallele Kommunikation und die Echtzeitbetriebssysteme – sind völlig neue Herausforderungen, für die bisher keine technischen Lösungen existieren.

4. Einfluss auf die Gesellschaft

Es ist abzusehen, dass die Verbreitung des Taktilen Internets die Gesellschaft in vielen Bereichen beeinflussen wird. Durch unmittelbare Reaktionen ergeben sich einerseits massive Verbesserungen der Kommunikationsmöglichkeiten und der wirklichkeitsnahen Interaktion im privaten und geschäftlichen Umfeld. Andererseits werden vollkommen neue Anwendungsfelder erschlossen, die zur Lösung großer gesellschaftlicher Herausforderungen wie der alternden Gesellschaft, der Energiewende und der Verkehrsentwicklung beitragen können. Besonders hervorzuheben sind:

- Bildung, Weiterbildung, lebenslanges Lernen: Moderne Lernmethoden wie E-Learning, Blended-Learning und Massive Open Online Courses, aber auch Bewegungssimulatoren wie z.B. Flugsimulatoren können um interaktive Elemente erweitert werden, die weit über heutige einfache eingebettete Tests oder spielerische didaktische Elemente hinausgehen. Durch die extrem geringen Verzögerungen des Taktilen Internets wird es zukünftig sogar möglich sein, Lehrende und Lernende haptisch zu überlagern, was zu völlig neuen Lernerfahrungen, insbesondere beim Einüben feinmotorischer Fähigkeiten führen wird.
- Medizin: Die vernetzte Expertise von Ärzten bei Tele-Diagnose und Behandlung sowie die Kombination des Tastsinns erfahrener Operateure in Verbindung mit höchster räumlicher Präzision bei robotergestützten Tele-Operationen, auch über Distanzen hinweg, resultieren in qualitativen Verbesserungen bei einer Vielzahl von Eingriffen. Darüber hinaus führt die Unterstützung behinderter oder älterer Menschen durch Prothesen und Kraftverstärker auf der Basis von Exoskeletten zu einer erhöhten Mobilität und Beweglichkeit und ermöglicht dadurch über einen längeren Zeitraum hinweg ein selbstbestimmtes Leben.
- Persönliche Sicherheitsumgebung: Das Taktile Internet ermöglicht die Einrichtung einer persönlichen räumlichen Sicherheitszone, die mit anderen Objekten in der Umgebung in Wechselwirkung steht. Im öffentlichen Verkehr beispielsweise kann langfristig eine erhöhte Sicherheit für Kinder oder ältere Menschen erreicht werden, indem Fahrzeuge sehr schnell kritische Situationen erkennen, darauf situationsgerecht reagieren und andere Verkehrsteilnehmer in ihrer Umgebung warnen. Auch in Produktionsumgebungen kann eine erhöhte Arbeitssicherheit erreicht werden, indem vernetzte Produktionseinrichtungen dem Menschen ausweichen und somit Unfälle verhindert werden.

- Verkehrssteuerung: Die Vernetzung von Fahrzeugen ermöglicht kooperative Verkehrssysteme, die den einsehbaren Fahrerhorizont erweitern und die Steuerung des Individualverkehrs unter Berücksichtigung von lokalen Gefährdungspotenzialen und makroskopischen Verkehrsparametern wie beispielsweise der Verkehrsdichte in Stadtzentren erlauben. So können die Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz nachhaltig verbessert sowie die Unfallzahlen und vor allem die Anzahl der Unfallopfer reduziert werden. Mit dem Taktilen Internet kommunizieren Fahrzeuge wesentlich schneller als mit existierenden Systemen zur lokalen Gefahrenwarnung. Dadurch werden beispielsweise kooperative Sicherheitsanwendungen zur automatischen Kollisionsvermeidung unterstützt. Neue Verkehrsmodi wie automatisiertes Fahren und Kolonnenfahren ermöglichen einen kontinuierlichen und energieeffizienten Verkehrsfluss.
- Energiewende, Elektrizitätsversorgung: Das Taktiler Internet ermöglicht in dezentralen Stromnetzen, Verbraucher und Lasten phasengenau zu schalten und Blindleistung zu minimieren. Es stellt eine funktionale Erweiterung des Smart Grids dar und leistet damit einen Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz und zur Versorgungssicherheit.

5. Handlungsempfehlungen

In allen Regionen der Welt wird eine leistungsstarke mobile Kommunikationsinfrastruktur inzwischen als Grundlage für Innovationen in vielen wirtschaftlich wie gesellschaftlich relevanten Schlüsselbranchen erkannt. Einige Anwendungsfelder wie Gesundheit, Bildung und Energieversorgung sind in diesem Positionspapier beschrieben.

Global werden – zum Beispiel unter dem Begriff fünfte Mobilfunkgeneration (5G) – Milliardenbeträge in die Forschung zu diesen Systemen investiert.

Hierbei ist offensichtlich, dass die Querschnittsbedeutung dieser zukünftigen, digitalen Infrastruktur weit über den Mobilfunk hinaus erkannt wurde und der Wettbewerb um die Technologieführerschaft international große Priorität genießt. Innovationen in Branchen wie dem Maschinen- und Anlagenbau, der Automobilindustrie, Transport und Logistik, dem Gesundheitswesen und der öffentlichen Verwaltung werden langfristig nur dann in Deutschland und Europa entstehen, wenn sie vor Ort entwickelt, getestet und genutzt werden können.

Die Weiterentwicklung der europäischen Technologieführerschaft im Bereich der Netzwerktechnologien ist – wie die NSA-Aktivitäten deutlich demonstrieren – nicht nur eine wirtschaftliche Notwendigkeit. Der Querschnittscharakter der zukünftigen Kommunikationsinfrastruktur macht eine prägende und führende Rolle der deutschen und europäischen Forschung und Entwicklung in diesem Bereich, basierend auf internationalen Standards, zu einer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Notwendigkeit.

Deutschland hat aufgrund der ausgezeichneten Forschungslandschaft gute Voraussetzungen, bei der Erforschung und Einführung von Schlüsseltechnologien für das Taktile Internet eine führende Rolle zu spielen. Die starke Position Deutschlands sowohl bei den Entwicklern grundlegender Technologien als auch bei den beschriebenen Nutzergruppen erlaubt es Synergien zu nutzen, die beiden Gruppen einen Vorsprung im internationalen Wettbewerb verschaffen werden. Dies garantiert der deutschen Gesellschaft und Wirtschaft die Verfügbarkeit der weltweit fortschrittlichsten Kommunikationsinfrastruktur.

Aus dieser Situation ergeben sich folgende dringende Handlungsempfehlungen:

Die deutsche Forschung muss in enger Kooperation der beschriebenen Anwendergruppen, Hersteller, Netzbetreiber und Forschung eine führende Rolle in der Entwicklung zukünftiger Kommunikationsinfrastrukturen spielen. Hierbei sollten ergänzend zu europäischen Engagements zu 5G insbesondere Themen getrieben werden, die für zukünftige Innovationen wichtiger deutscher Branchen von großer Bedeutung sind. Die entsprechenden technischen Schwerpunkte sind in diesem Positionspapier beschrieben.

Koordinierte Forschungsförderung ist insbesondere in den folgenden Bereichen erforderlich:

- Neuartige Funkzugangsnetze, die ressourceneffizient höchste Anforderungen an die Ende-zu-Ende-Latenz, die Zuverlässigkeit und die Robustheit erfüllen
- Netzwerkbezogene Sicherheitskonzepte, die auch an die Nutzerbedürfnisse angepasste Konzepte zum Schutz der Privatsphäre beinhalten
- Innovative und adaptive Netzwerkarchitekturen auf der Basis von Mobile Edge Clouds sowie
- Sensorik und Aktorik für die beschriebenen taktilen Anwendungen der nächsten Generation

Diese technologiegetriebenen Forschungsaktivitäten sollten durch interdisziplinäre Programme ergänzt werden, die Anwender mit höchsten Anforderungen an die Vernetzung mit den entsprechenden Technologieentwicklern zusammenbringen.

Die Weiterentwicklung der deutschen und europäischen Technologieführerschaft in allen Aspekten der Netzwerktechnologien muss als Grundlage für die selbstbestimmte Weiterentwicklung unserer Wirtschaftsstrukturen aber auch unserer Gesellschaft erkannt werden. Öffentliche Verwaltung, Bildung und Gesundheit sind drei gesellschaftlich prägende Bereiche, die in Zukunft zunehmend durch eine professionellen Anforderungen genügende digitale Infrastruktur geprägt werden.

Nur die Technologieführerschaft im Bereich der Kommunikationstechnologie garantiert auch zukünftig, dass Deutschland und Europa immer über die leistungsfähigste Kommunikationsinfrastruktur verfügen werden.

Die Forschung und Entwicklung vieler wichtiger Branchen wird ohne die professionelle Infrastruktur des Taktilen Internets Deutschland verlassen müssen. Investitionen in Forschung und Bildung, Regulierung und öffentliche Investitionen müssen dem Rechnung tragen.

Danksagung

Für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Positionspapiers gilt unser besonderer Dank der Alcatel-Lucent Stiftung für Kommunikationsforschung und dem Projekt fast strategy, das Teil des Clusters fast – Fast Actuators Sensors and Transceivers im Rahmen der Initiative Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist.





VDE

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15
60596 Frankfurt am Main
Telefon: 069 6308-0
E-Mail: service@vde.com
Internet: <http://www.vde.com>