

Bluetooth-Artefakte zur Interaktion mit intelligenten Umgebungen

Markus Klein, Till Harbaum und Thomas Fuhrmann
Institut für Telematik, Universität Karlsruhe (TH)

Zusammenfassung

Von Menschen gefertigte Alltagsgegenstände, Artefakte, können dazu dienen, in die aus einer Vielzahl kleiner, eingebetteter Systeme geschaffene so genannte intelligente Umgebung einzugreifen. Sie müssen dazu sowohl mit entsprechenden Sensoren als auch einer geeigneten drahtlosen Kommunikationstechnik ausgerüstet werden. Dieser Beitrag beschreibt den BlueWand, ein stiftähnliches Eingabegerät, das seine Lage und Bewegung im Raum erkennt und diese Daten mittels Bluetooth an andere Bluetooth-Geräte in seiner Umgebung übermittelt. So können verschiedene Geräte in einer intelligenter Umgebung durch einfaches Zeigen oder durch Gesten gesteuert werden. Dieser Beitrag beschreibt auch, wie die Technik des BlueWand, bei verschiedenen anderen Artefakten angewandt werden kann.

1 Einleitung

Der technische Fortschritt in der Halbleitertechnik führte in den letzten Jahren zu einer fortwährenden Miniaturisierung vieler elektronischer Geräte wie z.B. Handys und PDAs (Personal Digital Assistant). Dieser Miniaturisierung sind jedoch ergonomische Grenzen gesetzt. Schon jetzt sind die Tasten aktueller Mobiltelefone so klein, dass manche Menschen diese nicht mehr sicher bedienen können. Aus diesem Grund ist abzusehen, dass für weitere Miniaturisierungen *eine neue Art von Mensch-Maschine-Schnittstelle* benötigt wird.

Ein anderer Trend ist die zunehmende drahtlose Vernetzung elektronischer Geräte. Egal ob Handy, PDA, MP3-Player oder drahtlose Kopfhörer, sie alle kommunizieren drahtlos miteinander und bilden so ein persönliches Nahbereichsnetz. Um die einzelnen Komponenten dieses Nahbereichsnetzes zu kontrollieren, ist man bislang auf die Bedienelemente der jeweiligen Geräte angewiesen: Für einen Anruf muss man das Handy aus der Tasche holen und die Nummer wählen. Zuvor hat man vielleicht schon den MP3-Player anhalten müssen. Für eine Notiz während des Gesprächs muss man dann auch noch den PDA mitsamt dazu passendem Stift herauskramen. In einem solchen Szenario wäre es also wünschenswert, *alle Geräte auf die gleiche Art einfach bedienen* zu können, und nicht jedes Gerät einzeln.



Abbildung 1: Originalversion des BlueWand mit aufgesetztem Bluetooth-Modul und orthogonalen Sensoren (links). Entwurf der miniaturisierten Variante, die ab Ende Februar einsatzbereit sein wird (rechts)

Anstatt nun die Rolle dieser vereinheitlichten Mensch-Maschine-Schnittstelle beispielsweise vollständig dem PDA zu übertragen, so dass dieser dann die Kontrolle über alle Komponenten des persönlichen Nahbereichsnetzes hat, geht der hier beschriebene Ansatz einen anderen Weg. Bei ihm wird die Mensch-Maschine-Schnittstelle in modal unterschiedliche Aspekte unterteilt, die dann verschiedenen Geräten aus dem persönlichen Nahbereichsnetz übertragen werden. Die Kommunikation von der Maschine zum Menschen übernimmt beispielsweise der drahtlose Kopfhörer oder optional ein in die Brille integriertes Display. Zur Kommunikation vom Menschen zur Maschine könnte eine Tastatur, eine Spracheingabeeinheit oder ein Datenhandschuh dienen. In der Praxis sind solche Eingabemedien aber oft ungeeignet: Bequem zu bedienende Tastaturen sind zu groß und zu schwer, kleine Tastaturen aber zu unbequem. Spracheingabesysteme sind in Alltagsumgebungen häufig (noch) zu fehlerträchtig und Datenhandschuhe zu hinderlich im Dauergebrauch. In den meisten Alltagssituationen ist ein kleines, leichtes und einfach zu benutzendes Gerät wünschenswert. Ein Gerät das man schnell zur Hand nehmen und schnell wieder ablegen kann.

Diese Anforderungen erfüllt das von uns entwickelte Eingabegerät, der BlueWand, dessen Stiftform gerade den typischen Interaktionsparadigmen des Menschen besonders entgegenkommt: Mit einem Stift auf etwas zu zeigen oder eine geschwungene Geste zu machen ist sehr natürlich für den Menschen. Diese neue Art der Mensch-Maschine-Interaktion ist also schnell und besonders einfach zu erlernen. Darüber hinaus ist der BlueWand so klein und fast so leicht wie ein handelsüblicher Textmarker (siehe Abb. 1). Dieser Beitrag beschreibt den BlueWand, seine möglichen Einsatzbereiche und die ihm zugrunde liegende Sensor- und Kommunikationstechnik, sowie weitere Artefakte, in die diese Technik eingebracht wurde. Er zeigt außerdem Szenarien auf, in denen diese Artefakte zu einer intelligenten Umgebung kombiniert werden können und berichtet über erste Erfahrungen mit diesen Szenarien.

2 Stand der Forschung

Die hier beschriebenen Arbeiten verbinden zwei Forschungsgebiete, nämlich die Telematik, insbesondere den Bereich des ubiquitären Rechnens einerseits, mit der Forschung zu Mensch-Maschine-Schnittstellen andererseits. Trotz der erforderlichen Kürze soll hier ein Einblick in beide Gebiete gegeben werden.

Die Nutzung des dreidimensionalen Raums für Eingaben an ein Computersystem zählen mit zu den natürlichsten Möglichkeiten einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (Ishii and Ullmer 1997; Jacob 2002). Hier sind insbesondere virtuelle Welten (Bowman et al. 2001) und der Bereich der

so genannten *Augmented Reality* (Starner et al. 1997) zu nennen. Viele solcher Techniken zum Erfassen von Position und Bewegung im Raum basieren auf Methoden des Computersehens, d.h. sie werten ein Kamerabild der Umgebung aus (Starner et al. 1998). Ein anderer typischer Fall ist die Verwendung von Datenhandschuhen, die mit Hilfe aktiver Sensoren die Bewegung der Hände oder gar einzelner Finger erfassen (Moeslund 2000). Im Gegensatz zu dem hier vorgestellten Ansatz, insbesondere dem BlueWand, der sich auf einfaches Zeigen und Deuten und elementare Gesten beschränkt, können solche Techniken viel mehr Details erfassen. Sie benötigen aber entweder eine Außensicht auf die jeweilige Person oder benötigen diese, für alle Eingabeoperationen einen Datenhandschuh zu tragen. Wir glauben, dass diese Eingabetechniken daher für den Bereich intelligenter Umgebungen unangemessen sind.

Greifbare Benutzerschnittstellen (*Tangible User Interfaces*) (Ullmer and Ishii 2001; Ishii and Ullmer 1997) verbinden eine physische Datenrepräsentation mit einer, meist intuitiven, physischen Schnittstelle, die es erlaubt, scheinbar unmittelbar mit der Datenrepräsentation zu arbeiten bzw. sie direkt zu verändern. (Benbasat and Paradiso 2001) beschreibt eine Messkomponente, die wie der BlueWand Trägheitsmessungen verwendet, um die Lage und Bewegung von Artefakten zu erfassen. Diese Artefakte steuern dann, in einer eins-zu-eins Abbildung beispielsweise einen Avatar in einer virtuellen Umgebung. In (Sawada and Hashimoto 1997; Paradiso 1999) wird vorgeschlagen, diese Technik zum Dirigieren eines virtuellen Orchesters zu verwenden und (Small and Ishii 1997; Fitzmaurice and Buxton 1997; Hinckley et al. 2000) nutzen ähnliche Methoden, um die räumliche Lage eines PDAs zur Dateneingabe zu nutzen. Andere Ansätze wie der von (LaViola 1999) untersuchen multimodale Eingaben, beispielsweise die Kombination von Sprache und Gestik.

Auch die Verbindung von Sensoren mit den verschiedenen Gegenständen in einem intelligenten Raum wurde bereits untersucht (Beigl et al. 2001; Beigl 2000; Schmidt and Laerhoven 2001). Wir glauben, dass die in diesem Beitrag vorgestellte Technik diese Ansätze aufgreift, sie aber durch die Verwendung der Bluetooth-Funktechnik vielfältiger nutzbar machen. Gerade die Trennung von Ein- und Ausgabe und die Zusammenfassung vieler typischer Interaktionen im BlueWand führt unserer Meinung nach zu einer Vereinfachung Mensch-Maschine-Interaktion in intelligenten Umgebungen, insbesondere im mobilen Bereich. Hier glauben wir, dass der BlueWand auch vielen aktuellen Vorschlägen, die noch vom Tastaturparadigma ausgehen, überlegen ist (Levy 2002; Ferscha and Vogl 2002).

3 BlueWand

Mit dem BlueWand ist die volle Kontrolle über das persönliche Nahbereichsnetz möglich, seien es Geräte, die am Körper oder in der Tasche getragen werden oder sonstige Geräte in der jeweiligen Umgebung (Abb. 2). So kann man beispielsweise mit einer Handbewegung dem Discman oder MP3-Player veranlassen, zum nächsten Lied vorzuspringen. Ebenso leicht und intuitiv kann man die Lautstärke einstellen oder durch verschiedene Menüs navigieren, wobei der aktuelle Menüpunkt jeweils über den ebenfalls per Bluetooth angebotenen Kopfhörer vorgelesen wird. Man kann eine Telefonnummer wählen und ein Gespräch führen, ohne das Handy aus der Tasche holen zu müssen.

Mit einer integrierten Schrifterkennung könnte man sogar Notizen oder Termine für den PDA einfach in die Luft schreiben, und bei Computerspielen dient der BlueWand als

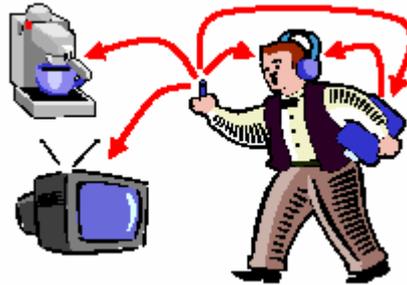


Abbildung 2: Typisches Anwendungsszenario für den BlueWand

Joystick. Sobald preisgünstige HMDs (Head Mounted Displays) verfügbar sein werden, könnte gerade bei mobilen Spielen eine bedeutende Anwendung des BlueWand liegen.

Aber auch festinstallierte Geräte lassen sich mit dem BlueWand steuern, z.B. der DVD-Player oder Fernseher im heimischen Wohnzimmer, durch deren immer komplizierter werdende On-Screen-Displays man so sehr leicht navigieren kann: einfach und intuitiv durch direktes Deuten bzw. Zeigen. Andere Geräte wie z.B. die Heizung oder Klimaanlage können bedient werden, ohne dass man nach einem Bedienelement suchen muss.

Der BlueWand dient aber nicht nur zu Steuerung. Man kann auf dem BlueWand auch persönliche Daten speichern z.B. kryptografische Schlüssel oder eine elektronische Geldbörse. Eine bestimmte Handbewegung, vergleichbar mit einer Unterschrift, dient dabei als biometrisches Authentifizierungsmerkmal und ersetzt die bisher übliche PIN-Nummer. Mit einem kryptografischen Schlüssel in Verbindung mit der Authentifizierung kann man so z.B. Türen öffnen, die elektronische Geldbörse verwenden oder ein Dokument signieren.

3.1 Sensorsystem

Der BlueWand basiert auf mehreren mikromechanischen Sensoren, die alle sechs Bewegungsfreiheitsgrade erfassen. Diese Sensoren (drei Gyroskope und zwei je zweiachsige Beschleunigungssensoren) werden ca. 180mal pro Sekunde ausgelesen. Die dabei gewonnenen Messdaten können entweder direkt verwendet werden, um eine relative Bewegung, z.B. eine Drehung, Kippung oder einen Stoss zu erkennen. Sie können aber auch in ein kombiniertes Rechenmodell eingebracht werden, das die vollständige Lage- und Bewegungsinformation über den BlueWand liefert. Hier ist insbesondere die Unterscheidung zwischen einer Neigung im Schwerfeld der Erde und einer von einer Bewegung hervorgerufenen Beschleunigung von großer Wichtigkeit. Werden diese beiden Effekte nicht sehr genau getrennt, treten große Abweichungen zwischen der berechneten und der realen Position auf¹. Der BlueWand verhindert diese Verfälschung durch die Kombination des 6-Achsen Bewegungsmodells mit einem heuristischen Ansatz, der diese Unterscheidung auf Grund der unterschiedlichen Dauer einer gemessenen Beschleunigung ermöglicht.

¹ Diese Problematik beschränkt den Einsatz auf die Erkennung von Gesten. Eine Verwendung zur (Trägheits-) Navigation, z.B. in Gebäuden, ist nicht möglich. Hier muss, zumindest ergänzend, auf andere Techniken zurückgegriffen werden.

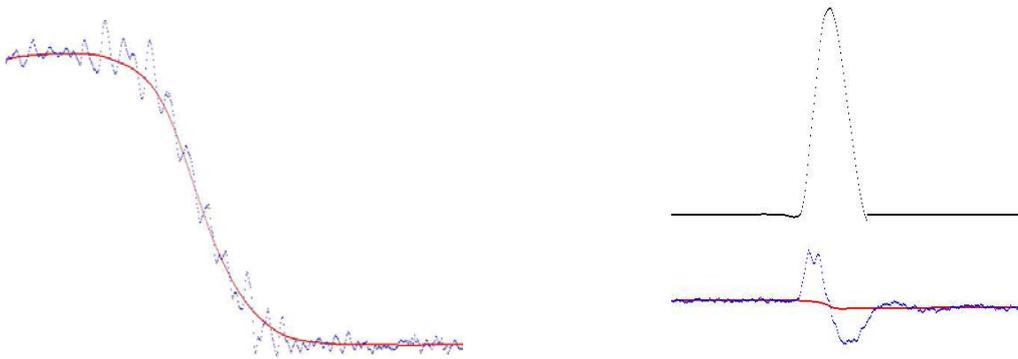


Abbildung 3: Beschleunigungswerte einer isolierten Messachse: links eine nur scheinbare Bewegung durch Kippung im Schwerfeld der Erde, rechts eine reale Bewegung mit Darstellung der berechneten Geschwindigkeitswerte (obere Kurve).

Neigungen verändern diesen Wert eher moderat und über einen längeren Zeitraum, während Bewegungen eher starke Ausschläge der Werte hervorrufen. Die Unterscheidung wird durch das Anpassen („Fitten“) an eine geglättete Kurve erreicht (siehe Abbildung 3). Ändert sich die Beschleunigung innerhalb des Fit-Fensters hinreichend wenig, wird eine konstante Geschwindigkeit angenommen. Ist die Geschwindigkeit nahe Null, wird angenommen, dass der BlueWand vollständig ruht. (In der Abbildung erkennbar am geringen Versatz am rechten Fuß der Geschwindigkeitsspitze.) Der angenommene Übergang in die Ruhestellung wird dabei innerhalb der Latenz des Fit-Fensters ggf. auch zeitlich rückwirkend gesetzt.²

Durch dieses Anpassungsverfahren werden außerdem die leichten Zitterbewegungen der menschlichen Hand eliminiert, die in der Abbildung gut zu sehen sind. Dieses Zittern ist im Übrigen ein leicht erkennbares Zeichen dafür, dass der BlueWand tatsächlich in der Hand gehalten wird und nicht etwa unbenutzt auf dem Tisch liegt.

3.2 Bluetooth Protokollstapel

Die Bluetooth-Technologie hat sich im Laufe der letzten Monate immer mehr verbreitet. Entsprechend wird Bluetooth auch auf vielen wichtigen Betriebssystemplattformen (z.B. Windows, Linux, MacOS und PalmOS) unterstützt. Allerdings benötigen die dort eingesetzten Implementierungen des Bluetooth Protokollstapels vergleichsweise viele Ressourcen, insbesondere Speicher und Rechenleistung. Sie sind daher nicht geeignet, um auf einem Microcontroller eingesetzt zu werden.

Aus diesem Grund haben wir uns entschieden, eine unabhängige, speziell für 8 Bit Microcontroller optimierte Variante des Bluetooth-Protokollstapels zu implementieren. Durch die Verwendung von C als Programmiersprache ist die Implementierung überdies plattformunabhängig.³

² In unseren Versuchen wird eine Latenz von bis zu 300ms bei der Gestenerkennung nicht als störend empfunden. Dieser Wert ist größer als die tolerable Latenz in z.B. Sprachübertragungssystemen.

³ Die Implementierung wurde bislang auf einem AVR ATmega128 von Atmel und auf Linux (Intel-Pentium-Architektur) eingesetzt. Letztere ermöglicht uns eine einfachere und schnellere Entwicklung zeigt aber auch die Portabilität unserer Implementierung.

Die Grundidee dieser Implementierung ist, die Pufferung von Daten innerhalb des Protokollstapels vollständig zu vermeiden. Bluetooth-Kommandos (sowohl auf HCI, ACL und L2CAP-Ebene) werden direkt aus dem Datenstrom des Bluetooth-Moduls heraus verarbeitet. Umgekehrt werden zu sendende Daten erst während der Übertragung zu Bluetooth-Kommandos umgeformt. So können die meisten Kommandos und Ereignisse innerhalb nur weniger Maschinenzyklen verarbeitet werden. Der gesamte Protokollstapel (bis einschließlich L2CAP) benötigt nur wenige Dutzend Byte RAM. Diese Eigenschaft macht diese Implementierung besonders geeignet für niedrig getaktete Microcontroller mit Harvard-Architektur, die häufig nur wenige Hundert Byte RAM bieten. Lässt der Microcontroller die flexible Anpassung der Taktrate zu, kann der Takt und damit der Stromverbrauch an die jeweils aktuell erforderliche Datenrate angepasst werden.

Für Anwendungen die eine höhere Datenrate benötigen, beispielsweise den im nächsten Abschnitt beschriebenen MP3-Player, stehen ausreichend Leistungsreserven zur Verfügung. Mit unserem 8 Bit Microcontroller erzielt die Implementierung bei 7MHz Takt einen Durchsatz von ca. 280 kBit/s. Dieser Durchsatz übersteigt damit bereits die Leistungsfähigkeit eines PDA von Palm um das zweifache. Weitere Steigerungen der Datenrate durch den Einsatz leistungsfähigerer Bluetooth-Module und die nachträgliche Optimierung des vom C-Compiler erzeugten Programmcodes sind wahrscheinlich.

4 BlueMP3

Der BlueMP3 erfüllt zwei Aufgaben, die aus pragmatischen Gründen in ein Gerät vereinigt wurden: Erstens speichert er große Datenmengen in einem kleinen Gerät, das leicht in der Kleidung oder einer Handtasche getragen werden kann. Zweitens gibt er Audiodaten in deutlich höherer Qualität wieder als dies übliche Bluetooth-Headsets könnten. Durch den Einsatz des MP3-Kompressionsverfahrens wird im High-End Audiobereich auch signifikant Bandbreite eingespart.

Neben diesen hauptsächlichen Anwendungen erfüllt der BlueMP3 (siehe Abb. 4) außerdem zwei pragmatischen Anforderungen: Er demonstriert die Tauglichkeit unserer Bluetooth Implementierung bei hohen Datenraten und stellt ein attraktives Gerät dar, mit dem sich Studierende für die Mitarbeit in unserem Forschungsprojekt begeistern lassen.

Im Szenario der Interaktion mit intelligenten Umgebungen müssen die die beiden Funktionen des BlueMP3 getrennt betrachtet werden: Die Audiowiedergabe bindet die jeweilige Trägerin über den Hörsinn in ihre Umgebung ein. So können Informationen vorgelesen werden oder akustische Signale an die jeweils betroffene Person übermittelt werden. Der mobile Datenspeicher kann Daten an Orten bereit halten, an denen keine ausreichend performante Weitverkehrsnetzanbindung zur Verfügung steht, beispielsweise in Fahrzeugen, beim Joggen oder in fremden, nicht hinreichend erschlossenen Gebieten. Gerade während der Einführung der ubiquitären Technologien ist ein solcher mobiler Datenspeicher wichtig.

5 BlueCup und BlueChair

Die bislang beschriebenen Artefakte ermöglichen die bewusste Interaktion mit einer intelligenten Umgebung durch Zeigen und Hören. Besonderen Reiz bekommen solche Umgebungen aber durch die Möglichkeit, beliebige andere Artefakte zu integrieren, um der gemeinsamen Umgebung Informationen über die in ihr agierenden Menschen zugänglich zu machen.

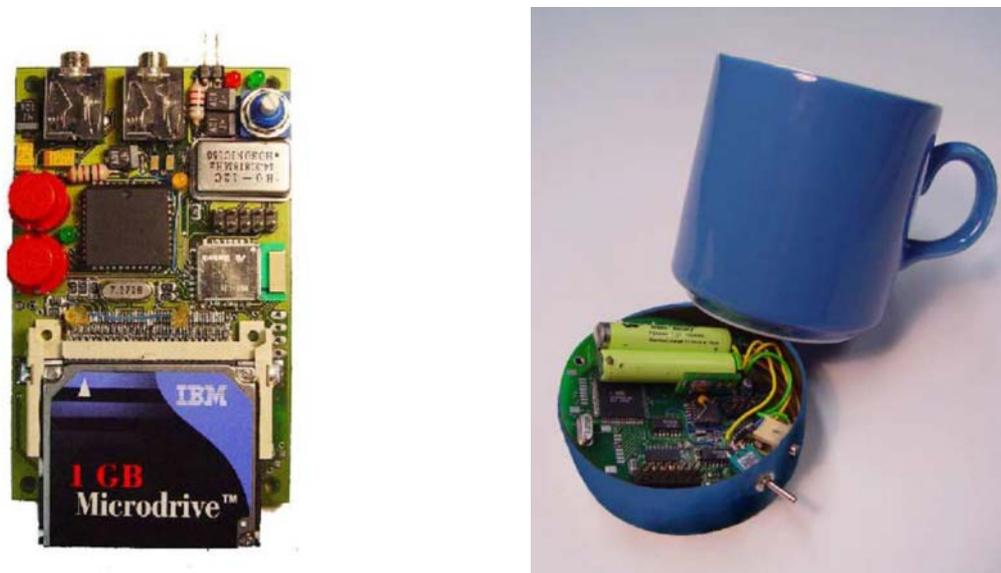


Abbildung 4: Bluetooth-MP3-Player mit Microdrive-Karte (links). Bluetooth-Adapter für Kaffeetasse (rechts)

Die praktische Durchführbarkeit dieses Gedankens haben wir durch die Ausstattung von zwei verschiedenen Alltagsgegenständen mit Bluetooth demonstriert, einer Kaffeetasse (siehe Abb. 4) und einem Stuhl. Die Idee derartige Artefakte per Funk in eine intelligente Umgebung zu integrieren, ist nicht neu (Beigl et al. 2001; Gellersen et al. 1999). Wir greifen diese Ansätze aber auf, um zu zeigen, dass sich unsere Bluetooth-Implementierung leicht für solche Szenarien anwenden lässt. Die verwendeten mikromechanischen Sensoren liefern überdies auch sehr feingranulare Messwerte über die Umgebung eines solches Artefakts.

In diesen beiden Artefakten kommt jeweils der Kern des BlueWand zum Einsatz. Je nach konkreter Anwendung werden aber einige der Sensoren durch andere Sensoren ersetzt. So enthält die BlueCup einen Beschleunigungssensor, ergänzt um einen Temperaturfühler und einen kapazitiven Füllstandssensor.

Durch die in Abschnitt 3.1 beschriebene Detektion der menschlichen Zitterbewegungen kann jederzeit erkannt werden, ob die Tasse auf dem Tisch steht, oder in der Hand gehalten wird. Trinkbewegungen sind leicht zu erfassen. Über die Füllstandsmessung kann auch die Menge der pro Schluck aufgenommenen Flüssigkeit bis auf wenige Milliliter genau erfasst werden.

Der BlueChair wurde hingegen mit Drucksensoren im Sitzkissen ausgestattet, die erfassen ob und wie eine Person auf einem Stuhl sitzt. In den aktuellen Arbeiten werden auch die Rollen eines Bürostuhls mit Sensoren ausgestattet. Zusammen mit den ursprünglichen Bewegungssensoren des BlueWand kann so ein umfassendes Bewegungsprofil der jeweiligen Person auf dem Stuhl erfasst werden, aus dem man auf ihre Aufmerksamkeit etc. zurückschließen kann.

Alle diese Daten können, abgestuft nach Zugriffsrechten, der jeweiligen intelligenten Umgebung übermittelt werden. Die Verwendung von Bluetooth ermöglicht überdies die einfache und kostengünstige Verwendung von Standardkomponenten. Durch den Einsatz des beim BlueWand erprob-

ten Basismoduls können derartige Artefakte in kürzester Zeit für die Verwendung in der intelligenten Umgebung ausgestattet werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag beschreibt den BlueWand als handliches Eingabegerät, das seine Lage und Bewegung an eine intelligente Umgebung übermitteln kann. Durch die Verwendung von Bluetooth kann so leicht eine Vielzahl von Geräten in diese Umgebung mit einbezogen werden. Typische Anwendungen sind einerseits die Kontrolle des persönlichen Nahbereichsnetzes, das aus den von einer Person mitgeführten Bluetooth-Geräten (Handy, PDA, MP3-Player, etc.) besteht, und andererseits die Steuerung von Geräten in z.B. einem intelligenten Raum (Fernseher, Videorekorder, Heizung, Klimaanlage, Licht, Jalousien, etc.).

Die für den BlueWand entwickelte Sensorik und die besonders ressourcensparende Implementierung des Bluetooth Protokollstapels wurden inzwischen in eine Reihe weiterer Gegenstände angewandt. Diese können wie die BlueCup oder der BlueChair vielfältige Daten über die jeweilige Umgebung sammeln und sie dieser mittels Bluetooth zur Verfügung stellen. Dies ermöglicht die gute Abstimmung der eingebetteten Systeme, die diese intelligente Umgebung bilden. Diese Technik birgt aber auch die Gefahr der Kontrolle der in einer solchen Umgebung lebenden und arbeitenden Menschen. Diese Gefahr gegen den Nutzen abzuwägen, den die in diesem Beitrag vorgestellte Technologie bringt, wird Aufgabe zukünftiger Forschungsprojekte sein müssen.

Literatur

- Beigl, M. (2000). *Kommunikation in interaktiven Räumen*. PhD thesis, Universität Karlsruhe (TH). Beigl, M., Gellersen, H.-W., and Schmidt, A. (2001). Mediacups: experience with design and use of computer-augmented everyday artifacts. *Computer Networks, Special Issue on Pervasive Computing*, 35(4):401-409.
- Benbasat, A. Y. and Paradiso, J. A. (2001). An inertial measurement framework for gesture recognition and applications. In *Proceedings of the International Gesture Workshop*, pages 9-20, London, UK.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., and Poupyrev, I. (2001). An introduction to 3d user interface design. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(1):96-108.
- Ferscha, A. and Vogl, S. (2002). Pervasive web access via public communication walls. In *Proceedings of the First International Conference, Pervasive 2002*, pages 84-97, Zurich, Switzerland.
- Fitzmaurice, G.W. and Buxton, W. (1997). An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 43-50, Atlanta, Georgia, USA.
- Gellersen, H.-W., Beigl, M., and Krull, H. (1999). The MediaCup: Awareness technology embedded in an everyday object. In *Proceedings of First International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, Karlsruhe, Germany.

- Hinckley, K., Pierce, J. S., Sinclair, M., and Horvitz, E. (2000). Sensing techniques for mobile interaction. In *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pages 91-100, New York, NY.
- Ishii, H. and Ullmer, B. (1997). Tangible bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)*, pages 234-241, Atlanta, USA. ACM Press.
- Jacob, R. J. K. (2002). Computers in human-computer interaction. In Jacko, J. A. and Sears, A., editors, *Handbook for Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- LaViola, J. J. (1999). Whole-hand and speech input in virtual environments. Master's thesis, Department of Computer Science, Brown University. CS-99-15.
- Levy, D. (2002). The fastap keypad and pervasive computing. In *Proceedings of the First International Conference, Pervasive 2002*, pages 58-68, Zurich, Switzerland.
- Moeslund, T. B. (2000). Interacting with a virtual world through motion capture. In Qvortrup, L., editor, *Interaction in Virtual Inhabited 3D Worlds*, chapter 11. Springer-Verlag.
- Paradiso, J. A. (1999). The brain opera technology: New instruments and gestural sensors for musical interaction and performance. *Journal of New Music Research*, 28(2):130-149.
- Sawada, H. and Hashimoto, S. (1997). Gesture recognition using an accelerometer sensor and its application to musical performance control. *Electronics and Communications in Japan, Part 3*, 80(5):9-17.
- Schmidt, A. and Laerhoven, K. V. (2001). How to build smart appliances. *IEEE Personal Communications*.
- Small, D. and Ishii, H. (1997). Design of spatially aware graspable displays. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 367-368, Atlanta, Georgia, USA.
- Starner, T., Mann, S., Rhodes, B., Levine, J., Healey, J., Picard, D. K. R. W., and Pentland, A. (1997). Augmented reality through wearable computing. *Presence, Special Issue on Augmented Reality*, 6(4):386-398.
- Starner, T., Schiele, B., and Pentland, A. (1998). Visual context awareness in wearable computing. In *Second IEEE International Conference on Wearable Computing (ISWC)*.
- Ullmer, B. and Ishii, H. (2001). Emerging frameworks for tangible user interfaces. In Carroll, J. M., editor, *Human-Computer Interaction in the New Millennium*, pages 579-601. Addison-Wesley.