

# Das Vorhaben miniW

Michael Baldauf,  
Werner Sörgel und  
Werner Wiesbeck

**Die individuelle mobile Kommunikation bestimmt seit den 90er Jahren in starkem Maße unser Kommunikationsverhalten. Neben Quellen, denen die Kollektivbevölkerung aufgrund von regionalen und überregionalen Netzen ausgesetzt ist, nehmen die Immissionen im Privatbereich durch Produkte der persönlichen Kommunikation wie DECT, WLAN, Bluetooth usw. stetig zu. Während ein Großteil der Bevölkerung die neuen Kommunikationstechniken intensiv nutzt, besteht aber auch eine gewisse Verunsicherung bezüglich der gesundheitlichen Auswirkungen von Hochfrequenzanwendungen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert nicht nur die Entwicklung von neuen Technologien, sondern leistet ebenfalls einen Beitrag zur Technikfolgenabschätzung, indem gezielt Projekte aus dem Bereich EMVU gefördert werden. Der nachfolgende Beitrag gibt einen Einblick in das Vorhaben miniWatt.**

## Überblick

Das BMBF hat von Januar 2002 bis März 2003 das Vorhaben „Alternative Funksysteme mit minimaler Strahlungsleistungsdichte im digitalen Rundfunk, Mobilfunk und drahtlosen LANs“ (kurz: miniWatt) finanziert. Das mit ca. 1,1 Mio Euro geförderte Projekt war in sieben Arbeitsbereiche mit insgesamt 38 Teilprojekten untergliedert. An dem Forschungsvorhaben waren elf Universitätsinstitute, drei Industrieunternehmen, vier mittelständische Unternehmen sowie ein unabhängiges Forschungsinstitut beteiligt. Ziel des Vorhabens war eine umfassende Untersuchung des Potenzials zur Senkung der Exposition durch technische, strukturelle und organisatorische Maßnahmen beim digitalen Rundfunk, Mobilfunk und bei WLANs.

## Stand der Technik

Die heutigen Mobilfunksysteme, die der breiten Bevölkerung zur Verfügung stehen, nutzen digitale Modulationsarten. Analoge Systeme werden momentan noch für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) genutzt. Beim terrestrischen Rundfunk existieren derzeit analoge und digitale Verteilungsstrategien. Digitale Techniken erlauben aufgrund der besseren Datensicherungsmaßnahmen den Einsatz niedrigerer Sendeleistungen. Dadurch wird prinzipiell eine Senkung der Exposition im Vergleich zu analogen Übertragungstechniken möglich. Andererseits nimmt die Nutzung des elektromagnetischen Spektrums gerade in den Bereichen des Mobilfunks und der Heimvernetzung zu, so dass hierdurch die Zahl der Feldquellen ansteigt.

Die heute zur Verfügung stehenden Techniken sind so konzipiert, dass eine Dekodierung der Signale möglich ist, solange die erforderlichen Qualitätskriterien des Signals im Vergleich zu Störeinflüssen (SINR) erfüllt sind. Um Interferenzen zu minimieren werden zudem keine unnötig hohen Sendeleistungen verwendet, d.h. die Empfindlichkeiten der Geräte werden voll ausgeschöpft. Rückkanalfähige Systeme (wie z.B. Mobilfunk) besitzen des Weiteren Mechanismen zur Sendeleistungsregelung, die Emissionen auf das Maß reduzieren, das für eine sichere Verbindung erforderlich, bzw. im Rahmen der Spezifikationen möglich ist.

## Effizienzsteigerung

Der zentrale Ansatzpunkt für eine umfassende Senkung der Emission ist eine Steigerung der Effizienz durch Nutzung nicht erschlossener Ressourcen (z. B. Raumdiversität). Das heißt ein ideales System ist so zu entwerfen, dass die Energie, welche erforderlich ist um ein Nutzbit in einer geforderten Zeit (Datenra-

te) sicher zu übertragen, minimiert wird. Das Minimum muss unter Berücksichtigung von bestimmten Randbedingungen (erlaubter Spektralbereich, Kosten...) gefunden werden. So kann es beispielsweise sein, dass durchaus höhere Effizienzen, und damit geringere Emissionen, möglich wären bei Verwendung einer anderen Arbeitsfrequenz, die aber nicht für die Nutzung freigegeben ist. Aufwändigere Techniken sind in der Regel mit höheren Kosten verbunden, welche eine wirtschaftliche Einführung neuer Technologien verhindern können.

Um die Effizienz eines Funksystems zu steigern, können verschiedene einzelne Parameter des Systems oder das ganze System verändert werden. Daher wurden, im Rahmen des Vorhabens miniWatt, zusammengehörige Techniken entsprechend zusammengefasst (siehe Tabelle 1).

## Referenzmodelle

Um die verschiedenen Maßnahmen hinsichtlich ihres Einsparpotenzials an Sendeleistung bewerten zu können, wurde jedem Teilprojekt ein geeignetes Referenzmodell zugrunde gelegt. Für die Systeme WLAN, PAN, Mobilfunk (GSM und UMTS) sowie digitales Fernsehen wurden Parametersätze definiert, im Hinblick derer die untersuchten Techniken zu vergleichen sind.

## Ergebnisse

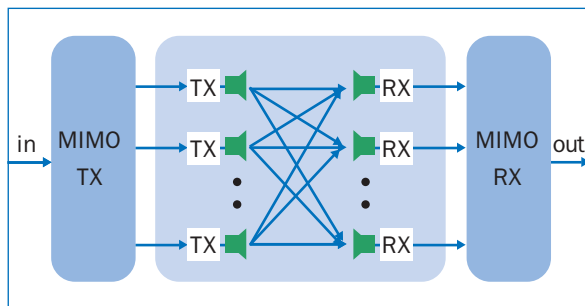
Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse des Vorhabens dargestellt. Der vollständige Abschlussbericht ist unter [1] zu finden.

## Intelligente Antennensysteme

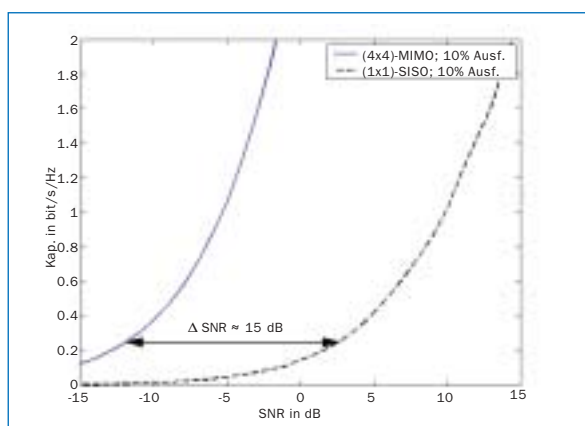
Aus mehreren Antennen bestehende Systeme können durch eine Überlagerung der von den verschiedenen Einzelantennen abgestrahlten Signalanteile zur

AP 1	Bandspreizverfahren
AP 2	Raum-Zeit-Signalverarbeitung
AP 3	Alternative Frequenzbereiche
AP 4	Selbstorganisierende Netze, Algorithmen und Protokolle
AP 5	Alternative Netze
AP 6	Standardkonforme Entwicklungen beim Mobilfunk
AP 7	Standardkonforme Entwicklungen beim Digitalen Rundfunk

**Tabelle 1: Arbeitspakete im Vorhaben miniWatt.**



**Bild 1: Schematische Darstellung eines MIMO-Mehrantennensystems.**



**Bild 2: 10% Ausfall-Kapazitäten für eine klassische Antennenkonfiguration von einer Sende- und einer Empfangsantenne (SISO-System) und einem MIMO-System bestehend aus vier Sende- und Empfangsantennen in einem Rayleigh Kanal [2]. Im dargestellten Fall ergibt sich eine mögliche Sendeleistungsreduktion von ca. 15 dB (Faktor 32).**

Ausbildung einer Gesamtrichtcharakteristik führen, die von der eines Einzelelementes abweicht. Hierdurch kann die elektromagnetische Energie an dem gewünschten Raumbereich des Empfängers konzentriert werden, während sie gleichzeitig an anderen Orten reduziert wird. Da dies adaptiv geschehen kann, ist eine Ausrichtung auf verschiedene Teilnehmerstandorte leicht möglich. Man spricht hierbei von (ggf. adaptivem) Beamforming. Die Strahlformung kann ausgenutzt werden um die Sendeleistung abzusenken. MIMO-Systeme (Multiple Input – Multiple Output), die über mehrere Antennen auf der Sende- und Empfangsseite verfügen, gehen einen Schritt weiter. Unter Ausnutzung der Diversität, beispielsweise des Raumes, sind die Signale an den einzelnen Empfangsantennen unkorreliert. Die in der Empfängerumgebung verfügbare Leistung wird besser genutzt, insbesondere können kurzzeitige Signaleinbrüche stark vermindert werden. Des Weiteren ist es möglich über verschiedene Antennen unterschiedliche Informationen parallel zu übertragen, die am Empfänger geeignet kombiniert werden. Ein derartiges MIMO-System ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Die Kapazität eines MIMO-Systems ist eine Zufallsvariable und hängt von der Realisierung des Funkkanals ab. Daher wird bei der Angabe von Kapazitäten die Übertragungskapazität angegeben, die in einem bestimmten Prozentsatz der Fälle nicht erreicht wird. Diese Kapazität wird üblicherweise als Ausfall-Kapazität (engl. outage capacity) bezeichnet. Bild 2 zeigt, dass bei einem Mehrantennensystem (durchgezogene, blaue Linie) eine bestimmte Ausfall-Kapazität bei einem deutlich geringeren Signal-zu-Rauschverhältnis erreicht werden kann als bei der üblichen Konfiguration mit einer Empfangsantenne (gestrichelte, schwarze Linie). Die Einsparungen der Sendeleistungen sind im Wesentlichen abhängig von der erforderlichen Übertragungskapazität (in bit/s/Hz), der Antennenanzahl auf Sende- bzw. Empfangsseite sowie dem vorliegenden Funkkanal. Einsparungen um etwa eine Größenordnung sind aber durchaus realistisch. Allerdings sind geeignete Signalverarbeitungsmechanismen zumindest auf der Empfangsseite, bei bestimmten MIMO-Übertragungsverfahren auch auf der Sendeseite, er-

forderlich um einen entsprechenden Kapazitätsgewinn bzw. eine Sendeleistungsreduktion zu erhalten. Diese Technik steht mittlerweile vor der Einführung beim Mobilfunk. Sie ist jedoch auch für andere Übertragungen, z. B. Rundfunk, nutzbar.

### Neuartige Netzstrukturen

Eine Veränderung der Netzstruktur der Sendeeinrichtungen hat, aufgrund der notwendigen Parameteranpassungen für die Sendeanlagen, einen unmittelbaren Einfluss auf die Emission. Im Rahmen des Vorhabens miniWatt wurden u. a. Multi-hop-Systeme betrachtet, bei denen das Funksignal von einem Endgerät über mehrere verschiedene andere Endgeräte (ggf. inaktiver) Teilnehmer zu einer Basisstation gelangt (Bild 3). Wegen der kurzen Distanz zum nächsten Endgerät wird für den Nutzer mit dem Verbindungswunsch die Verwendung einer erheblich kleineren Sendeleistung möglich. Nähere Untersuchungen haben aller-

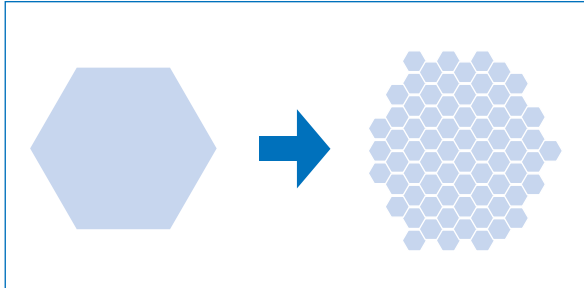
dings gezeigt, dass bei vielen Hops der Verwaltungsaufwand sehr stark zunimmt, wodurch gleichzeitig die Effizienz sinkt. Es kann daher unter Umständen keine zuverlässige Verbindung gewährleistet werden. Zudem ist das Vorhandensein anderer verfügbarer Endgeräte in der Umgebung erforderlich, die ihrerseits wieder zu Quellen werden.

Durch die Verkleinerung des Versorgungsgebietes kann die Emission deutlich gesenkt werden. Im Falle von zellularen Netzen (Mobilfunk) spricht man dann von Zellteilung (Bild 4). Die Beschränkung der Versorgung auf jeweils kleinere Gebiete erlaubt bei Rundfunknetzen ebenfalls eine Senkung der Sendeleistung. Da bei Mobilfunkzellen die maximale Nutzeranzahl pro Basisstation beschränkt ist, sind die Vorteile beim Mobilfunk wegen der gleichzeitigen Kapazitätserhöhung durch die Zellteilung größer als beim Rundfunk.

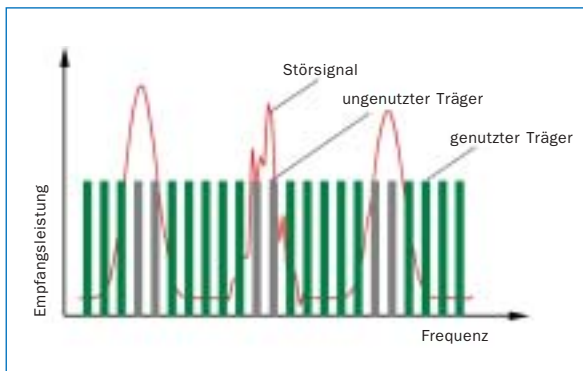
Beim digitalen terrestrischen Fernsehen (DVB-T) könnte durch den Ersatz des Versorgungsziels „portable



**Bild 3: Reduktion der Sendeleistung durch Verwendung multi-hop-fähiger Endgeräte. Aufgrund geringer Distanzen zu einem benachbarten Endgerät wird nur eine kleine Sendeleistung benötigt.**



**Bild 4: Eine Zellteilung verkleinert das zu versorgende Gebiet. Dadurch kann die Sendeleistung reduziert und die Kapazität gesteigert werden.**



**Bild 5: Durch Verzicht auf die Übertragung von Trägern, welche am Empfänger nicht korrekt decodiert werden können, kann Sendeleistung eingespart werden.**


indoor“, das eine Versorgung mit Rundfunkdiensten im Kerngebiet innerhalb des Hauses im Erdgeschoss vorsieht, durch die Forderung, dass die erforderliche Feldstärke nur außerhalb des Hauses in Dachhöhe erreicht wird, die Emission deutlich reduziert werden. Unter Verwendung einer Dachantenne, die einen Gewinn von etwa 10 dB aufweist, ließe sich so die erforderliche Sendeleistung insgesamt um den Faktor 1000 (30 dB) bis 10000 (40 dB) absenken. Eine dichtere Netzstruktur würde darüber hinaus zu einer weitergehenden Emissionsreduktion führen.

Hochfliegende Plattformen bzw. Satelliten zeichnen sich durch eine sehr homogene Leistungsdichteverteilung am Boden aus. Insbesondere für Rundfunksysteme ohne Rückkanal, bei denen zudem große Flächen mit einer endlichen Anzahl von Programmen versorgt werden sollen, bietet sich diese Art der Versorgung auch in Anbetracht der Kosten an. Die Exposition aufgrund von Satelliten zur Rundfunkübertragung ist im Vergleich zum terrestrischen Fernsehen, trotz der um Größenordnungen höheren Programmvielfalt, deutlich kleiner.

### Innovative Signalverarbeitungstechniken

Mehrträgerverfahren verwenden zur Übertragung von Informationen verschiedene Trägerfrequenzen aus einem vorgegebenen Frequenzbereich. Derartige Techniken besitzen den Vorteil, dass die Möglichkeit besteht, zur Übertragung von Signalen nur diejenigen Trägerfrequenzen zu nutzen, bei denen eine geringe Übertragungsdämpfung auftritt bzw. die am Empfänger in ausreichend hoher Qualität empfangen werden können. Ein hierfür geeignetes Verfahren ist beispielsweise OFDM (orthogonal frequency division multiplex). Durch adaptives „Bit-loading“ werden hierbei Informationen nur auf den Frequenzen übertragen, die auch am Empfänger wieder decodiert werden können (Bild 5). Simulationen im Rahmen des Vorhabens miniWatt haben gezeigt, dass durch den Einsatz eines adaptiven Bit-loadings die erforderliche Sendeleistung typischerweise um ca. 1,5 dB (Faktor 1,4) gesenkt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Emissionsreduzierung ist eine geeignete Störunterdrückung (Interference



Cancellation). Hierbei können am Empfänger vorhandene Informationen über die störenden Signale genutzt werden, um die Störeinflüsse zu reduzieren. Auf diese Weise kann die erforderliche Sendeleistung verkleinert werden.

Darüber hinaus kann durch die Verwendung höherer Datenkompressionen die Emission ebenfalls abgesenkt werden. Da für die Übertragung eine kleinere Übertragungsrate (in bit/s), und damit eine kleinere Übertragungskapazität, erforderlich ist, kann die Sendeleistung reduziert werden.

### Alternative Frequenzbereiche

Im Rahmen des Vorhabens miniWatt wurde das Potenzial einer Sendeleistungsreduktion durch die Verwendung von alternativen Frequenzbereichen analysiert.

Die bei niedrigeren Übertragungsfrequenzen vorhandene kleinere Ausbreitungsdämpfung erlaubt eine Reduktion der Sendeleistung. Würden beispielsweise für UMTS-Dienste anstatt der üblichen Frequenzen um 2 GHz Frequenzen im Bereich um 450 MHz (früheres C-Band) verwendet, so ließe sich die Sendeleistung um ca. 14 dB (Faktor 25) senken.

Als Alternative zur Verwendung von Frequenzen im GHz-Bereich für einige Anwendungen innerhalb des Hauses (z. B. WLAN, Bluetooth, Funkkopfhörer) könnten teilweise Infrarotsender eingesetzt werden. Die biologischen Auswirkungen von Infrarotstrahlung sind geklärt und sind durch den üblichen Einsatz von IR-Fernbedienungen bzw. IrDA-Schnittstellen in der Bevölkerung akzeptiert. Zudem sind die Komponenten äußerst preiswert verfügbar. Da die Übertragung praktisch Sichtverbindung voraussetzt sind die Anwendungsmöglichkeiten entsprechend begrenzt.

Sowohl die Übertragung per Schallwellen als auch die Möglichkeit der induktiven Übertragung erwies sich als nicht effizient.

### Weitere Informationen

Zum Vorhaben miniWatt hat der Projektträger des Vorhabens, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), eine Broschüre erstellt, diese kann unter [3] herunter geladen werden. Der Gesamtbe-

richt ist über den Katalog (OPAC) der TIB/UB Hannover [1] verfügbar.

### Aktuelles Forschungsvorhaben miniWatt II

Anknüpfend an die Ergebnisse des Vorhabens miniWatt werden seit April dieses Jahres systematisch Leistungsdichten, spezifische Absorptionsraten und die Pulshaltigkeiten der verschiedensten Dienste analysiert und verglichen. Das laufende Vorhaben trägt den Titel „Minimierung der Immission zukünftiger Funkdienste“ (kurz: miniWatt II) und wird gemeinsam vom BMBF und BMU gefördert.

Im Gegensatz zum abgeschlossenen Vorhaben miniWatt, bei dem die Emission im Vordergrund stand, soll das Hauptaugenmerk nun auf die Immission gerichtet sein. Mit Wissenschaftlern, welche über ein breites Fachwissen auf dem Gebiet der Biomedizin verfügen, sollen darüber hinaus Immissionen umfassend bewertet werden.

Die Ergebnisse können u. a. einen wichtigen Beitrag zur immissionsoptimierten Funknetzplanung liefern. Des Weiteren soll die Geräteindustrie in die Lage versetzt werden, ganzheitlich optimierte Lösungen zur Senkung der Exposition umzusetzen.

### Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (Zuwendungsgeber), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (Projektträger), sowie bei allen beteiligten Kollegen für die gute Zusammenarbeit.

*Michael Baldauf und Werner Sörgel sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE) der Universität Karlsruhe (TH).*

*Prof. Dr. Werner Wiesbeck ist Institutsleiter des Instituts für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE) der Universität Karlsruhe (TH) und Projektleiter der Vorhaben miniWatt und miniWatt II.*

### Literatur

- [1] <http://www.tib-hannover.de>, Katalog OPAC, Suchbegriffe: Alternative Funksysteme, miniWatt (ca. 27 MB)
- [2] M.A. Baldauf, Th. Fügen, C. Kuhnert, Th. Schäfer, C. Waldschmidt, W. Wiesbeck, „Expositionsreduzierung in zellularen Mobilfunknetzen unter Verwendung intelligenter Antennensysteme“, Elektromagnetische Verträglichkeit, EMV 2004, pp. 523-530, Düsseldorf, 2004
- [3] [http://www.dlr.de/pt\\_it/kt/miniwatt\\_broschuere.pdf](http://www.dlr.de/pt_it/kt/miniwatt_broschuere.pdf) (ca. 3,6 MB)