

Über Leukämie und hochfrequente elektromagnetische Felder des Mobilfunks

A. M. Sommer

School of Engineering and Science, International University Bremen, D-28759 Bremen

Einleitung

Die Frage nach einer eventuellen Gesundheitsgefährdung durch elektromagnetische Felder wird seit Einführung des privaten Mobilfunks vor ca. 10 Jahren weltweit verstärkt diskutiert. Im Vordergrund steht dabei die Sorge um eine mögliche krebserzeugende oder zumindest -fördernde Wirkung der Mobiltelefone und Basisstationen.

Die vorliegende Literaturstudie soll einen Überblick über den jetzigen Stand der Wissenschaft und Forschung zum Einfluss hochfrequenter elektromagnetischer Felder auf Leukämieerkrankungen liefern. Dabei hat sie nicht den Anspruch der Vollständigkeit, d. h. nicht jede Studie zum Thema wird erläutert. Stattdessen wurde versucht, anhand von repräsentativen Arbeiten die Studienbreite darzustellen, unterschiedliche, positive wie negative Ergebnisse zu diskutieren und sie zusammenfassend zu bewerten.

Leukämie

Leukämie ist eine Erkrankung der weißen Blutzellen, der Leukozyten. Diese Zellen dienen im gesunden Zustand der Immunabwehr. Durch genetische Veränderung können sie sich jedoch wie andere Körperzellen auch über einen mehrstufigen Prozess zu Krebszellen entwickeln (Tillmann und Buschmann 2003). Diese dann meist funktionslosen Zellen können sich unkontrolliert im Blut und Blut bildenden Gewebe, v. a. im Knochenmark aber auch in der Milz und den Lymphknoten, vermehren und gesunde Zellen verdrängen. Die Krankheitssymptome resultieren u. a. aus der Verdrängung normaler Blutzellen. Die Folgen sind Anämie oder Blutungen infolge verminderter Anzahl der an der Blutgerinnung beteiligter Thrombozyten. Das

Immunsystem wird beeinträchtigt, und es kann zu Schwellungen betroffener Organe, wie der Milz und Lymphknoten, kommen. Je nach Krankheitsverlauf unterscheidet man zwischen akuten und chronischen Formen der Leukämie. Zudem unterscheidet man nach der Herkunft der fehlerhaften, vermehrten Blutzellen zwischen lymphatischer Leukämie (ausgehend von Vorstufen der Lymphozyten, die im lymphatischen Gewebe ausdifferenzieren) und myeloischer Leukämie (ausgehend von Vorstufen der im Knochenmark reifenden Granulozyten oder Monozyten).

Lymphknotenvergrößerungen, sogenannte Lymphome, können verschiedene Ursachen haben und gut- oder bösartig sein. Gutartige Lymphome entstehen durch Entzündungen der Lymphknoten. Bösartige Lymphome können durch geschwulstartiges Wachstum des Lymphknotengewebes entstehen (z. B. Hodgkin-Lymphom), durch lymphatische Leukämie oder durch Metastasenbildung von Krebsgeschwüren anderer Organe, was sich meist über die Lymphbahnen vollzieht.

Interaktion elektromagnetischer Felder mit biologischen Systemen

Zu den hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zählen unter anderem die bei Radio und Fernsehen verwendeten Felder sowie Felder des Mobilfunks. Die in Deutschland zur Zeit üblichen Mobilfunknetze arbeiten mit Mikrowellen der Frequenzbereiche 900 MHz (digitale D-Netze) und 1800 MHz (digitale E-Netze). Treffen Mikrowellen auf Wassermoleküle, können diese in Schwingungen geraten, wodurch Wärme erzeugt wird. Dieses Prinzip wird bei Mikrowellenöfen zum Erwärmen von Speisen genutzt. Beim Mobilfunk dagegen soll eine Erwärmung des Körpers vermieden werden. Dies ist bei der Festlegung der Grenzwerte berücksichtigt worden, die in Form der spezifische Absorptionsrate (SAR) angegeben werden. Die spezifische Absorptionsrate beschreibt die Energie, die im Hochfrequenzfeld pro kg Körpergewicht in einer bestimmten Zeit (gemittelt wird über 6 Minuten Einwirkungszeit) vom Körper aufgenommen wird. Unterschieden wird zwischen Einwirkung auf den ganzen Körper (Ganzkörper-SAR) und auf kleinere Gewebereiche (Teilkörper-SAR). Aus diesen Grenzwerten lassen sich die Begrenzungen derjenigen Feldparameter ableiten, die auf den Körper wirken, d. h. der elektrischen Feldstärke E in V/m, der magnetischen Feldstärke H in A/m oder der

Leistungsflussdichte S in W/m^2 (abgeleitete Grenzwerte). Die abgeleiteten Werte können im Gegensatz zur SAR, deren Ermittlung aufwändig ist, in der Umgebung des Menschen gemessen werden. Sie werden so abgeleitet, dass ihre Einhaltung auch die Einhaltung des entsprechenden Basisgrenzwertes (SAR) gewährleistet.

Wird eine Person einem elektromagnetischen Feld mit einem SAR-Wert von $4 \text{ W}/\text{Kg}$ eine halbe Stunde lang ausgesetzt, kann es zu einem Temperaturanstieg von 1°C kommen. Ein Ganzkörpergrenzwert von $0,4 \text{ W}/\text{Kg}$ wurde daher festgelegt, um ausreichenden Schutz bei beruflicher Exposition zu gewährleisten. Für die Allgemeinbevölkerung gilt der noch niedrigere Wert von $0,08 \text{ W}/\text{Kg}$ (Mittelwert für Ganzkörperbestrahlung, ICNIRP 1998). Der Teilkörpergrenzwert beträgt $2 \text{ W}/\text{kg}$, gemittelt über 10 g Körpergewebe. Wie viel Energie tatsächlich vom Menschen absorbiert wird, hängt u. a. von der Größe der Person und der Frequenz der Strahlung ab. Bei Kindern liegt das Maximum der Energieabsorption bei einem Frequenzbereich zwischen $100\text{-}400 \text{ MHz}$, bei Erwachsenen zwischen $30\text{-}100 \text{ MHz}$. Diese Werte liegen folglich außerhalb der Frequenzbereiche der durch Mobilfunk entstehenden Felder. Die Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung hängt auch vom Wassergehalt des Gewebes ab. Daher können in einzelnen Körperbereichen lokal erhöhte Absorptionswerte auftreten, die sogenannten „hot spots“ (Bernhardt 1999). So weist der Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik in seinem Positionspapier über Mobilfunk und Gesundheit (VDE Verband der Elektrotechnik 2002) auf eine schwache Erwärmung im Kopf von $0,1^\circ \text{C}$ durch Handygebrauch hin. (Andere Studien zeigen eine Erhöhung der Temperatur der Ohrhaut auf 41°C (analoge Telefone) bzw. 39°C (digitale Telefone, Forschungsgemeinschaft Funk e. V. 1998).) Offensichtlich sind die Hauptursachen für die lokale Erwärmung am Ohr jedoch Wärmeisolierung (es wird verhindert, dass Körperwärme über die Haut abgegeben wird, während man das Telefon ans Ohr hält) sowie die Eigenwärme des Telefons, während elektromagnetische Felder keinen bzw. nur einen geringen Beitrag zur Erwärmung leisten (Ofstedal et al. 2004).

Die Energie, die von Feldern des Mobilfunks ausgeht, ist zu klein, um chemische Bindungen innerhalb von biologischen Molekülen, beispielsweise der Erbsubstanz DNA, zu spalten. Es gilt daher als unwahrscheinlich, dass hochfrequente elektromagnetische Felder DNA direkt schädigen und so Krebsentstehung initiieren können (IEGMP 2000).

Es wird jedoch diskutiert, ob hochfrequente elektromagnetische Felder Tumorwachstum beschleunigen können, wenn sie schon nicht an der Initiation beteiligt sind (Hardell et al. 2003). Verschiedene Wechselwirkungen zwischen biologischen Systemen und elektromagnetischen Feldern sind bekannt, die nicht mit einer Temperaturerhöhung verbunden sind, auch wenn diese oft erst oberhalb der Schwelle für Temperatureffekte auftreten.

Als wohl wichtigste und weitestreichende Effekte von elektromagnetischen Feldern auf biologische Systeme, die den meisten komplexeren Prozessen zugrunde liegen, müssen hier Ladungsverschiebungen genannt werden. Dabei kann das elektrische Feld, als Bestandteil des elektromagnetischen Feldes, ganze Zellen polarisieren und die Interaktion zwischen Zellen beeinflussen (IEGMP 2000). Noch entscheidender können Ladungsverschiebungen an Membranen sein, da alle wichtigen zellulären Prozesse mit Membranen oder mit Konzentrations- und Potentialunterschieden über die Membranen verbunden sind (Hulbert und Else 1999, 2000). In verschiedenen Studien erzeugten elektromagnetische Felder eine Erhöhung der Kationenleitfähigkeit über die Zellmembran (UNEP/IRPA/WHO 1993). Liburdy und Vanek (1985) zeigten, dass bei roten Blutkörperchen der Feldeffekt vom physiologischen Zustand der Membran abhing. Cholesterin, welches die Permeabilität der Membran beeinflusst, aber auch die Sauerstoffkonzentration konnten die Wirkung des Feldes (2,45 GHz) auf die Natriumleitfähigkeit modulieren.

Die Regulation der intrazellulären Kalziumkonzentration ist für den Organismus besonders wichtig, da dieses Ion bei wichtigen Vorgänge wie Muskel- und Zellbewegung, Energiestoffwechsel, Hormonsekretion, Reizleitung, Zellteilung und Zelltod eine Rolle spielt. Störungen der Ionenregulation durch elektromagnetische Felder könnten daher Tumorentstehung und Metastasenbildung beeinflussen und hätten zusätzlich Einfluss auf die Regulation des onkostatischen (krebshemmenden) Hormons Melatonin (Stryer 1999, Blask et al. 2002). Verschiedene Studien deuteten darauf hin, dass die Kalziumkonzentration zumindest in Gehirnzellen von elektromagnetischen Feldern beeinflusst werden kann (IEGMP 2000), auch wenn neuere Studien keine generelle Veränderung vom Kalziumtransport im Gewebe belegen konnten (Cranfield et al. 2001; NRPB 2003).

Frech et al. (2001) entwickelten ein theoretisches Modell, in dem elektromagnetische Strahlung durch die Entstehung von chronischem zellulären Stress an der Krebsentwicklung beteiligt sein kann. Elektromagnetische Strahlung kann auch im nicht-thermischen Bereich zu einer erhöhten Expression von Stressproteinen führen (Leszczynski et al. 2002, Mashevich et al. 2003). Dies ist eine normale zelluläre Antwort auf Stress. Chronische Expression von Stressproteinen soll jedoch die Onkogenese, Metastasenbildung und/oder die Resistenz gegenüber Antikrebsmedikamenten initiieren oder fördern (French et al. 2001). Dieses Modell wurde von Leszczynski et al. (2002) erweitert und auf das Zentralnervensystem und die Blut-Hirn-Schranke angewendet. Dadurch entstand ein in sich logisches Modell, das einen Wirkmechanismus von elektromagnetischen Feldern auf die Entwicklung von zumindest Hirntumoren erklären könnte, jedoch bedarf es der wissenschaftlichen Überprüfung (Meyer 2003). Auch ist die Übertragbarkeit auf andere Gewebe, wie das blutbildende System, nicht unbedingt gegeben.

Studien zu elektromagnetischen Feldern und Erkrankungen des blutbildenden Systems

Die Häufung von Leukämiefällen in bestimmten Gebieten (Hocking et al. 1996, Dolk et al. 1997b) und bei einzelnen Bevölkerungs- bzw. Berufsgruppen (Szmigielski 1996, Cano und Pollan 2001) nährte die Vermutung, dass es einen kausalen Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und Erkrankungen der blutbildenden Organe geben könnte. So zeigten Studien aus Polen mit 128.000 Personen und den USA mit 20.000 Personen, dass Krebs des Blut- und Lymphsystems häufiger die Todesursache bei Personen war, die beim Militär starken elektromagnetischen Feldern ausgesetzt waren, als bei nicht- oder gering-exponierten Personen der gleichen Altersgruppe (Szmigielski 1996, Groves et al. 2002). Die polnische Studie gilt jedoch wegen methodischer Details als nicht besonders aussagekräftig (Moulder et al. 1999, IEGMP 2000), und die Autoren der US-amerikanischen Studie relativierten ihr Ergebnis selber, da ein erhöhtes Risiko, an nicht-lymphatischer Leukämie zu sterben, nur in einer von 2 Berufsgruppen mit starker Radarstrahlung (Techniker der Flugelektronik und des Waffenleitradars) auftrat und die

betroffenen Techniker der Flugelektronik von tödlichen Unfällen abgesehen insgesamt einem niedrigen Sterberisiko unterlagen. Laut einer schwedischen Studie korreliert ein erhöhtes Risiko, an non-Hodgkin Lymphomen zu erkranken, mit der Ausübung weniger Berufe (Cano und Pollan 2001). Unter anderem war dieses Risiko bei Männern der Telekommunikationsbranche erhöht, nicht jedoch bei Frauen. Dies könnte daran liegen, dass Frauen in Schweden eher in der Verwaltung arbeiten, während Männer häufiger in der Produktion und Technik tätig sind, wo sie mehr potentiell schädlichen Strahlen und Stoffen ausgesetzt sind. Eine Untersuchung an knapp 200.000 Beschäftigten von Motorola (unterschieden zwischen Arbeitsplätzen mit keiner, geringer, mittlerer und hoher Elektromagnetfeldexposition) konnte dagegen keine erhöhte Lymphom/Leukämierate bei hoher Bestrahlung aufzeigen (Morgan et al. 2000). Jedoch ist fraglich, ob der externe Vergleich (allgemeine Sterberate vierer US-amerikanischer Staaten, in denen sich die meisten Motorolawerke befanden) gut gewählt war, da dort die Sterberate insgesamt, auch bei nicht-krankheitsbedingten Todesursachen fast doppelt so hoch lag, was auf unterschiedliche sozioökonomische oder Altersstrukturen in den Gruppen hinweist. Es ist bekannt, dass nicht nur das Alter einen Einfluss auf das Sterberisiko besitzt, sondern auch sozioökonomische Faktoren, die u. a. über Eß-, Rauch- und Trinkgewohnheiten oder körperlicher und geistiger Ausgeglichenheit auf den Gesundheitszustand wirken. Nichtsdestotrotz, auch laut einer englischen Studie mit 84.000 Personen, ist das Risiko, an Leukämie zu sterben, unabhängig von beruflicher elektromagnetischer Exposition (Harrington et al. 2001).

Ob Blutkrebs häufiger bei Menschen auftritt, die in der Nähe von TV oder Radiosendeanlagen wohnen, wurde in verschiedenen Studien in den USA, Australien und England untersucht. Eine Fall-Kontroll-Studie in Hawaii deutete auf eine annähernde Verdopplung von Fällen von Leukämie bei Kindern innerhalb eines Umkreises von 4.2 Km um eine Gruppe von Radiosendemasten hin (Maskarinec et al. 1994). Die Anzahl von 12 erkrankten Kindern ist jedoch sehr klein und die Aussagekraft der Studie dadurch eingeschränkt, da sie gerade dort wegen der Häufung an Leukämiefällen durchgeführt wurde. Eine zufällige Häufung von Leukämiefällen ist daher nicht auszuschließen. In Sydney, Australien, verglichen Hocking et al. (1996) die Rate von Leukämie und Hirntumoren in Bezirken um 3 Fernsehtürme mit Bezirken in weiterer Entfernung zu den

selben Türmen. Sie fanden in der Nähe der Fernsehtürme eine Verdopplung der Gefahr, als Kind an Leukämie zu sterben, wogegen es keine Unterschiede in der Häufigkeit von Hirntumoren gab. Aufgrund der Bedeutung solcher Beobachtungen wurde diese Studie erweitert. Es konnte daraufhin keine Korrelation mehr zwischen akuter lymphoblastischer Leukämie bei Kindern und der Entfernung der Wohnung zu Fernsehtürmen gefunden werden (McKenzie et al. 1998). Daraus lässt sich schließen, dass die Häufung von Leukämiefällen in dem erstbeschriebenen Gebiet zufällig war oder auf anderen Faktoren als der Bestrahlung durch elektromagnetische Felder beruhte. Auch die Ergebnisse einer Studie von Dolk et al. (1997b) aus England, die ein erhöhtes Leukämierisiko in der Nähe der Sutton Coldfield TV- und Radiosendestation fanden, wurde bei Erweiterung um 20 Gebiete rund um andere Sendeanlagen nicht bestätigt (Dolk et al. 1997a). Eine Zusammenstellung weiterer Studien finden sich bei IEGMP (2000). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bisherige epidemiologische Studien zwar die Frage nach einem Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und einer erhöhten Leukämiegefahr aufwarfen, jedoch keinen überzeugenden Beweis für das Vorhandensein solch eines Zusammenhanges herstellen konnten.

Könnte gezeigt werden, dass in Tieren chronische oder lebenslange Bestrahlung mit elektromagnetischen Feldern zur Tumorentstehung führt oder Tumorentwicklung fördert, wäre dies ein direkter Hinweis für die Kanzerogenität solcher Strahlen. Die ersten Studien in dieser Richtung aus den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts litten jedoch an starken methodischen Mängeln, mit ungenauer Prüfung der Dosimetrie oder schlechten pathologischen Untersuchungen der Gewebe. Spätere Studien vermieden meist solche Fehler, jedoch sind insgesamt wenige Studien bekannt, die den Einfluss elektromagnetischer Felder auf Leukämie oder Lymphome untersuchten. Langzeitbestrahlung mit pulsmodulierten elektromagnetischen Feldern, wie sie im Mobilfunk genutzt werden (900 MHz, 2.6-13 W/m², SAR 0.008-4.2 W/kg, 30 min/Tag), führte zu einer signifikanten Erhöhung der Lymphomentwicklung in weiblichen, heterozygoten E μ -*Pim1* Mäusen (Repacholi et al. 1997). Diese transgenen Tiere besitzen eine genetische Anfälligkeit, spontan an Lymphomen zu erkranken. Wegen der Bedeutung dieser Studie wurde sie im Auftrag des National Health and Medical Research

Council of Australia in abgewandelter Form wiederholt (Utteridge et al. 2002). Dafür wurden ebenfalls heterozygote $E\mu$ -*Pim1* Mäuse des gleichen Tierzuchtlabors (Taconic Farms, New York) wie für die Studie von Repacholi und Mitarbeitern (1997) sowie Mäuse des Wildtyps verwendet. Um die Expositionsdaten (898,4 MHz, GSM-moduliert, SAR: 0.25-4 W/kg) genauer bestimmen zu können, wurden die Tiere in ihrer Bewegung eingeschränkt. Diese Studie konnte die Ergebnisse von Repacholi nicht bestätigen. Den Autoren unterliefen jedoch mehrere Fehler bei der Veröffentlichung der Daten, so dass deren Ergebnisse schwer zu beurteilen sind (siehe dazu Micro Wave News, Vol. XXII, No. 5 vom September/Oktober 2002 und Lerchl 2003). Im Rahmen des europäischen Studienprojektes PERFORM-A sollen diese beiden Studien daher nochmals in Italien überprüft werden (Tillmann und Buschmann 2003). Für Konstruktion, Aufbau und Betrieb der Expositionsanlage soll die Stiftung IT'IS in Zürich, Schweiz verantwortlich sein. Das Experiment wird als Blindstudie unter den Bedingungen der Guten Laborpraxis (GLP) durchgeführt und sollen den Prüfrichtlinien zur Kanzerogenität von EU, OECD und der amerikanischen Umweltbehörde EPA entsprechen. Die Ergebnisse werden für 2005 erwartet.

Die Auswirkung von elektromagnetischen Feldern auf chemisch induzierte Krebsentwicklung wurde in einer japanischen Studie untersucht (Imaida et al. 2001). Die Bestrahlung erfolgt mit dem gepulsten japanischen Standard-Mobilfunk Signal (1,5 GHz, 50 Hz gepulst, SAR: 84 mW/Kg). Es konnte in 4,2-16,7% der Tiere Lymphome gefunden werden. Die Anteile unterschieden sich jedoch nicht zwischen den Gruppen exponierter und nicht-exponierter Tiere. Zu einem vergleichbar negativem Ergebnis kamen Heikkinen et al. (2001) nach radioaktiver Bestrahlung von 150 Mäusen und anschließender Scheinexposition oder Exposition mit nicht-ionisierenden elektromagnetischen Feldern (kontinuierliche Strahlung entsprechend des nordischen Mobiltelefon-Typs (NMT-Typ) oder mit gepulsten Strahlen des GSM-Typs). Auch in dieser Studie hatten die Mobilfunkstrahlen keinen Einfluss auf die Entwicklung von Blutkrebs oder anderen Tumoren.

Insgesamt betrachtet bieten die vorliegenden Tierstudien keinen stichhaltigen Beweis, dass elektromagnetische Strahlung der Telekommunikation Leukämie oder Lymphome verursacht oder deren Entwicklung fördert. Jedoch sind die positiven

Ergebnisse der Studie von Repacholi et al. (1997) sehr ernst zu nehmen und daher weitere Untersuchungen notwendig.

Die Ergebnisse von Zellversuchen sind nur begrenzt auf den Menschen zu übertragen. Dennoch sind sie notwendig und hilfreich, um mögliche Wirkmechanismen elektromagnetischer Felder zu untersuchen. Dieses ist im Tier wegen der Vielzahl von überlappenden Einflüssen, sowie den Mechanismen zur Aufrechterhaltung bestimmter zellulärer Zustände und Reparaturmechanismen schwer möglich. In einer Studie aus dem Jahre 1992 konnte in menschlichen Blutproben eine gestörte Zellteilung nach 10-60-minütiger Bestrahlung (7,7 GHz, 0,5-30 mW/cm²) anhand von Mikrokernbildung und Chromosomenaberrationen beobachtet werden (Garaj-Vrhovac et al. 1992). Eine dosis- und zeitabhängige Zunahme von Mikrokernbildung bei menschlichen Lymphozyten konnte auch von einer anderen Arbeitsgruppe nach Bestrahlung mit 2,45 oder 7,7 GHz (unmoduliert, 10-30 mW/cm², 15-60 min) gefunden werden (Zotti-Martelli et al. 2000). Die Studie litt aber daran, dass die Blutproben von nur 2 Spendern kamen und ein Temperatureffekt nicht ausgeschlossen werden konnte. D'Ambrosio und Mitarbeiter (2002) verglichen die Wirkung von phasenmodulierten und unmodulierten elektromagnetischen Feldern (15 Minuten bei 1,748 GHz, SAR: 2,25 W/Kg, 35-35,7° C) auf Zellteilungskinetik und Mikrokernbildung. Es zeigte sich, dass die Zellteilungskinetik unbeeinflusst vom Feld war, die Mikrokernbildung bei modulierter Bestrahlung jedoch anstieg. Die Autoren schlossen daraus, dass die Phasenmodulierung an sich einen negativen Einfluss ausübe. Einen Anstieg der Mikrokernbildung in menschlichen Lymphozyten, nicht jedoch von Brüchen des DNA-Stranges in Leukozyten, konnte nach 24-stündiger Exposition bei 5 oder 10 W/Kg beobachtet werden, unabhängig davon, ob die Felder frequenz- oder pulsmoduliert waren (Tice et al. 2002). In einer oft zitierten Arbeit aus dem Jahre 1993 wurde ebenfalls eine gestörte Zellteilung menschlicher Lymphozyten nach 30-120-minütiger Bestrahlung bei einem sehr hohen SAR-Wert von 75 W/Kg (2,45 GHz, gepulst) anhand von Mikrokernbildung und Chromosomenaberrationen beobachtet, während es zu keinem vermehrten Austausch von Schwesterchromatiden kam (Maes et al. 1993). Die Temperaturmessung in den Proben wurde jedoch mit einem Metallfühler durchgeführt. Es ist daher nicht auszuschließen,

dass dieser als Antenne gewirkt und so benachbarte Zellen geschädigt haben könnte (Vijayalaxmi et al. 1997b). In einer weiteren Studie führte eine 72-stündige elektromagnetische Bestrahlung (830 MHz, SAR: 1,6-8,8 W/Kg) mit steigenden spezifischen Absorptionsraten zu einem linearen Anstieg an Aneuploidien (die Vervielfältigung oder Verlust) des Chromosoms 17 in menschlichen Lymphozyten (Mashevich et al. 2003).

Solchen Untersuchungen mit positiven Befunden steht eine Vielzahl an Studien gegenüber, die keinen Einfluss von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern auf Blutzellen finden konnten (Port et al. 2003, Meyer 2003). So war beispielsweise die Zellteilungsrate und der Schwesterchromatidaustausch menschlicher Lymphozyten unbeeinflusst von mehrtägiger Bestrahlung mit GSM-modulierten elektromagnetischen Feldern (900 MHz und 200 mW/Kg bzw. 1800 MHz und 1,7 W/Kg) (Antonopoulos et al. 1997). Auch eine Studie an menschlichen Leukozyten von McNamee et al. (2002) konnte keine vermehrte DNA Schädigung durch 2-stündige Exposition von modulierten 1900 MHz Feldern (SAR: 0-10 W/Kg) nachweisen. In anderen Studien kam es in menschlichen Lymphozyten trotz 24-stündiger Befeldung mit 840 MHz (CDMA- oder FDMA moduliert, SAR: 4,4-5,5 W/Kg, 37° C) oder 90-minütiger Befeldung mit 2,45 GHz (SAR: 12,5 W/Kg, 37,1° C) nicht häufiger zu Störungen der Zellteilung als unter Kontrollbedingungen (Vijayalaxmi et al. 1997b, 2001a, 2001b), noch führte die bis zu 3-tägige Exposition (900 MHz, kontinuierlich oder GSM-moduliert, 0,2-1,6 W/Kg) zu einem Anstieg der Mikrokernbildung (Zeni et al. 2003). Mikrokernbildung in polychromatischen Erythrozyten stieg weder nach 24-stündige Exposition von männlichen Ratten an (Vijayalaxmi et al. 2001c), noch nachdem Mäuse 18 Monate lang (20 Stunden/Tag, 2.45 GHz, zirkular polarisiert) elektromagnetischen Feldern ausgesetzt waren (Vijayalaxmi et al. 1997a, 1998). Es stellt sich jedoch die Frage, ob das Ergebnis der letzteren Studie dadurch beeinflusst wurde, dass Blut nur von denjenigen Mäusen genommen wurde, die nach 18 Monaten noch lebten. Weitere Studien beschäftigten sich mit der Lebensfähigkeit von Blutzellen, deren Anzahl im peripheren Blut oder mit der spontanen oder mitogen-stimulierten Transformation lymphoblastischer Zellen nach elektromagnetischer Feldexposition (2 GHz). In nur einer Arbeit aus dem Jahr 1973 wurde ein Anstieg der Zahl roter Blutkörperchen in Ratten gefunden, generell deuten die

Studien jedoch darauf hin, dass elektromagnetische Felder keinen Einfluss auf die Lebensfähigkeit oder Entwicklung von Lymphozyten haben (UNEP/IRPA/WHO 1993).

UMTS

In der heutigen Gesellschaft wächst der Bedarf nach grenzenloser Kommunikation und drahtlosem Informationsaustausch. Neben einer Vielzahl von landgestützten Funknetzen werden dazu auch Satellitentelefonssysteme (THURAYA, IRIDIUM, INMERSAT) verwendet. Um den Anspruch auf eine uneingeschränkte, flächendeckende und schnelle Datenübertragung in Zukunft besser verwirklichen zu können, wird zurzeit ein Netz leistungsfähigerer Technologien aufgebaut, z. B. des UMTS (Universal Mobile Telecommunication System).

Bremen als UMTS-Modellstadt (mit einer Verdichtung von gemeinsamen Antennenstandorten mehrerer Netzbetreiber) soll ein Zentrum des neuen Handy-Standards werden. Seit Ende 2002 wird dort das herkömmliche GSM-Netz zunehmend durch die neue Technologie ersetzt, die durch Errichtung zahlreicher neuer Sendeanlagen flächendeckend ausgebaut werden soll. Die Sendecharakteristik des UMTS unterscheidet sich deutlich vom bisherigen GSM-Standard, u. a. da es nicht gepulst mit höherer Frequenz (ca. 2 GHz) arbeitet.

Es gibt große Bedenken in der Öffentlichkeit, dass sich die große Leistungsfähigkeit dieses Systems auch durch einen großen Einfluss elektromagnetischer Felder auf die Gesundheit des Menschen auswirkt. Auf Grund der unterschiedlichen Sendecharakteristik können bisherige Studien über elektromagnetische Felder nur bedingt auf das UMTS übertragen werden. Dennoch werden mangels alternativer Daten bereits Warnungen bezüglich der Gefahr von Mobiltelefonen auf implantierten Körperhilfen von GSM-Studien auf UMTS-Studien extrapoliert (Kainz et al. 2003).

Verschiede Studien zum UMTS und Gesundheitsgefahren werden z. T. in Deutschland durchgeführt, beispielsweise ein auf der 25. Jahrestagung der Bioelectromagnetic Society (2003) vorgestelltes Projekt über den Einfluss von UMTS-Signalen auf die Blut-Hirn-Schranke bei Ratten. Diese Studie wird in Zusammenarbeit mit der Universität Wuppertal in Münster durchgeführt. In Bremen startete im April 2004

eine vom Bundesamt für Strahlenschutz geförderte Studie zum Einfluss von UMTS-Signalen auf die spontane Leukämieentwicklung bei Mäusen. Wissenschaftliche Veröffentlichungen darüber oder über andere relevante Gesundheitsaspekte liegen derzeit noch nicht vor. Dies liegt unter anderem an der Neuheit der Technik, aber auch an der räumlichen Beschränkung auf den europäischen Kontinent, wodurch in den USA keine Forschung über UMTS stattfindet.

Schlussfolgerung

Zurzeit liegen keine stichhaltigen Beweise vor, dass elektromagnetische Felder, wie sie durch das bisherige Mobilfunksystem hervorgerufen werden, einen negativen Effekt auf das blutbildende System haben. Die Datenlage ist jedoch nicht eindeutig, so dass noch weitere Studien besonders zum Wirkmechanismus eines möglichen Einflusses durchgeführt und die Ergebnisse verschiedenen Langzeitstudien noch abgewartet werden müssen, bevor eine abschließende Beurteilung erfolgen kann. Mit Ausnahme der Bremer Studie sind uns weitere Untersuchungen zum UMT-System und Leukämie-Erkrankungen oder Lymphom-Bildung nicht bekannt.

Literaturverzeichnis

- Antonopoulos A, Eisenbrandt H, Obe G (1997) Effects of high-frequency electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro. *Mutat Res* 395:209-214
- Bernhardt JH (1999) Gesundheitliche Aspekte des Mobilfunks. *Deutsches Ärzteblatt* 96:A845-A852
- Blask DE, Sauer LA, Dauchy RT (2002) Melatonin as a chronobiotic/anticancer agent: cellular, biochemical, and molecular mechanisms of action and their implications for circadian-based cancer therapy. *Curr Top Med Chem* 2:113-132
- Cano MI, Pollan M (2001) Non-Hodgkin's lymphomas and occupation in Sweden. *Int Arch Occup Environ Health* 74:773-779
- Cranfield CG, Wood AW, Anderson V, Menezes KG (2001) Effects of mobile phone type signals on calcium levels within human leukaemic T-cells (Jurkat cells). *Int J*

- Radiat Biol 77:1207-1217
- d'Ambrosio G, Massa R, Scarfi MR, Zeni O (2002) Cytogenetic damage in human lymphocytes following GSMK phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics* 23:7-13
- Dolk H, Elliott P, Shaddick G, Walls P, Thakrar B (1997a) Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. II. All high power transmitters. *Am J Epidemiol* 145:10-7
- Dolk H, Shaddick GWP, Grundy C, Thakrar B, Kleinschmidt I, Elliott P (1997b) Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain. I. Sutton Coldfield transmitter. *Am J Epidemiol* 145:1-9
- Forschungsgemeinschaft Funk e.V. (1998) Keine neuen spektakulären Befunde. *News letter* 2:1-3
- French PW, Penny R, Laurence JA, McKenzie DR (2001) Mobile phones, heat shock proteins and cancer. *Differentiation* 67:93-97
- Garaj-Vrhovac V, Fucic A, Horvat D (1992) The correlation between the frequency of micronuclei and specific chromosome aberrations in human lymphocytes exposed to microwave radiation in vitro. *Mutat Res* 281:181-186
- Groves FD, Page WF, Gridley G, Lisimaque L, Stewart PA, Tarone RE, Gail MH, Boice JD Jr, Beebe GW (2002) Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. *Am J Epidemiol* 155:910-918
- Hardell L, Mild KH, Carlberg M (2003) Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. *Int J Oncol* 22:339-407
- Harrington JM, Nichols L, Sorahan T, van Tongeren M (2001) Leukaemia mortality in relation to magnetic field exposure: findings from a study of United Kingdom electricity generation and transmission workers, 1973-97. *Occup Environ Med* 58:307-314
- Heikkinen P, Kosma VM, Hongisto T, Huuskonen H, Hyysalo P, Komulainen H, Kumlin T, Lahtinen T, Lang S, Puranen L, Juutilainen J (2001) Effects of mobile phone radiation on X-ray-induced tumorigenesis in mice. *Radiat Res* 156:775-785
- Hocking B, Gordon IR, Grain HL, Hatfield GE (1996) Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med J Aust* 165:601-605

- Hulbert AJ, Else PL (1999) Membranes as possible pacemakers of metabolism. *J theor Biol* 199:257-274
- Hulbert AJ, Else PL (2000) Mechanisms underlying the cost of living in animals. *Annu Rev Physiol* 62:207-235
- ICNIRP (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74:494-522
- IEGMP (2000) Mobil phones and health. Report of an independent expert group on mobile phones. UK Minister of Public Health. National Radio Protection Board, Chilton, Oxon: www.iegmp.org.uk
- Imaida K, Kuzutani K, Wang J, Fujiwara O, Ogiso T, Kato K, Shirai T (2001) Lack of promotion of 7,12-dimethylbenz[a]anthracene-initiated mouse skin carcinogenesis by 1.5 GHz electromagnetic near fields. *Carcinogenesis* 22:1837-1841
- Kainz W, Alesch F, Chan DD (2003) Electromagnetic interference of GSM mobile phones with the implantable deep brain stimulator, ITREL-III. *Biomed Eng Online* 2:11
- Lerchl A (2003) Comments on the recent publication on microwave effects on $E\mu$ -*Pim1* transgenic mice (Utteridge et al., *Radiat. Res.* 158, 357-364, 2002). *Radiat Res* 159:276
- Leszczynski D, Joenvaara S, Reivinen J, Kuokka R (2002) Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation* 70:120-129
- Liburdy RP, Vanek PF Jr (1985) Microwaves and the cell membrane. II. Temperature, plasma, and oxygen mediate microwave-induced membrane permeability in the erythrocyte. *Radiat Res* 102:190-205
- Maes A, Verschaeve L, Arroyo A, De Wagter C, Vercruyssen L (1993) In vitro cytogenetic effects of 2450 MHz waves on human peripheral blood lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 14:495-501
- Mashevich M, Folkman D, Kesar A, Barbul A, Korenstein R, Jerby E, Avivi L (2003) Exposure of human peripheral blood lymphocytes to electromagnetic fields associated with cellular phones leads to chromosomal instability.

- Bioelectromagnetics 24:82-90
- Maskarinec G, Cooper J, Swygert L (1994) Investigation of increased incidence in childhood leukemia near radio towers in Hawaii: preliminary observations. *J Environ Pathol Toxicol Oncol* 13:33-37
- McKenzie DR, Yin Y, Morrell S (1998) Childhood incidence of acute lymphoblastic leukaemia and exposure to broadcast radiation in Sydney--a second look. *Aust N Z J Public Health* 22:360-367
- McNamee JP, Bellier PV, Gajda GB, Lavallee BF, Lemay EP, Marro L, Thansandote A (2002) DNA damage in human leukocytes after acute in vitro exposure to a 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Radiat Res* 158:534-537
- Meyer R (2003) In vitro-Studien zu biologischen Wirkungen hochfrequenter Felder aus den Jahren 1997-2002. *Edition Wissenschaft* 20:3-25
- Morgan RW, Kelsh MA, Zhao K, Exuzides KA, Heringer S, Negrete W (2000) Radiofrequency exposure and mortality from cancer of the brain and lymphatic/hematopoietic systems. *Epidemiology* 11:118-127
- Moulder JE, Erdreich LS, Malyapa RS, Merritt J, Pickard WF, Vijayalaxmi (1999) Cell phones and cancer: what is the evidence for a connection? *Radiat Res* 151:513-531
- NRPB (2003) Health effects from radiofrequency electromagnetic fields. Report of an independent advisory group on non-ionising radiation. UK Minister of Public Health. National Radiological Protection Board, Chilton
- Oftedal G, Straume A, Johnsson A (2004) Wie kommt es zur Erwärmung der Haut durchs Handy? *News letter* 1:12-15
- Port M, Abend M, Römer B, Van Beuningen D (2003) Influence of high-frequency electromagnetic fields on different modes of cell death and gene expression. *Int J Radiat Biol* 79:701-708
- Repacholi MH, Basten A, Gebiski V, Noonan D, Finnie J, Harris AW (1997) Lymphomas in $E\mu$ -*Pim1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 147:631-40
- Stryer L (1999) *Biochemie*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
- Szmigielski S (1996) Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high

- frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci Total Environ* 180:9-17
- Tice RR, Hook GG, Donner M, McRee DI, Guy AW (2002) Genotoxicity of radiofrequency signals. I. Investigation of DNA damage and micronuclei induction in cultured human blood cells. *Bioelectromagnetics* 23:113-126
- Tillmann T, Buschmann J (2003) *In vivo*-Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF) insbesondere des Mobilfunks. *Edition Wissenschaft* 19:3-29
- UNEP/IRPA/WHO (1993) Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). World Health Organization, Geneva
- Utteridge TD, Gebiski V, Finnie JW, Vernon-Roberts B, Kuchel TR (2002) Long-term exposure of $E\mu$ -*Pim1* transgenic mice to 898.4 MHz microwaves does not increase lymphoma incidence. *Radiat Res* 158:357-364
- VDE Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (2002) Positionspapier Mobilfunk und Gesundheit. VDE - Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik, Frankfurt am Main
- Vijayalaxmi, Frei MR, Dusch SJ, Guel V, Meltz ML, Jauchem JR (1997a) Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Radiat Res* 147:495-500
- Vijayalaxmi, Mohan N, Meltz ML, Wittler MA (1997b) Proliferation and cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Int J Radiat Biol* 72:751-757
- Vijayalaxmi, Frei MR, Dusch SJ, Guel V, Meltz ML, Jauchem JR (1998) Correction of an error in calculation in the article "Frequency of micronuclei in the peripheral blood and bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation" (*Radiat. Res.* 147, 495-500, 1997). *Radiat Res* 149:308
- Vijayalaxmi, Bisht KS, Pickard WF, Meltz ML, Roti Roti JL, Moros EG (2001a) Chromosome damage and micronucleus formation in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (847.74 MHz, CDMA). *Radiat Res* 156:430-432

- Vijayalaxmi, Pickard WF, Bisht KS, Leal BZ, Meltz ML, Roti Roti JL, Straube WL, Moros EG (2001b) Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (835.62 MHz, FDMA). *Radiat Res* 155:113-121
- Vijayalaxmi, Pickard WF, Bisht KS, Prihoda TJ, Meltz ML, LaRegina MC, Roti Roti JL, Straube WL, Moros EG (2001c) Micronuclei in the peripheral blood and bone marrow cells of rats exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Int J Radiat Biol* 77:1109-1115
- Zeni O, Chiavoni AS, Sannino A, Antolini A, Forigo D, Bersani F, Scarfi MR (2003) Lack of genotoxic effects (micronucleus induction) in human lymphocytes exposed in vitro to 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat Res* 160:152-158
- Zotti-Martelli L, Peccatori M, Scarpato R, Migliore L (2000) Induction of micronuclei in human lymphocytes exposed in vitro to microwave radiation. *Mutat Res* 472:51-58