

Eine Bestandsaufnahme teratologischer Studien  
von Peter Thalau

# Embryonalentwicklung unter dem Einfluss hoch- und niederfr

## Einleitung

Elektromagnetische Felder (EMF) gehören seit jeher zu unserer natürlichen Umwelt und werden von verschiedenen Tieren (z.B. Fische und Vögel) zur Orientierung genutzt. Durch die seit Beginn dieses Jahrhunderts fortschreitende Technisierung kommt es jedoch zu einer stetigen Zunahme von EMF. Es stellt sich nun die Frage, ob oder inwieweit EMF in der Lage sind, biologische Systeme und insbesondere den menschlichen Organismus zu beeinflussen. Seit den achtziger Jahren wird eine mögliche Beeinflussung der Embryonalentwicklung durch EMF diskutiert und in den vergangenen zehn Jahren wurden eine Vielzahl von Studien zu diesem Thema veröffentlicht. Viele dieser Arbeiten sind in vergleichsweise unbekanntem oder schwer zugänglichen Zeitschriften erschienen. Deshalb soll mit dieser Übersichtsstudie eine Bestandsaufnahme der bisherigen Studien zu diesem Themenkomplex versucht werden. Wegen der Vielzahl der vorliegenden Arbeiten war es nicht möglich, alle zu berücksichtigen, so wurden z.B. ausschließlich Studien in englischer oder deutscher Sprache miteinbezogen.

## Teratologie

Die Teratologie (griech. Teratos = Monstrum) ist das Teilgebiet der Embryologie, das sich mit angeborenen Missbildungen beschäftigt. Als Ursachen dieser Missbildungen gelten zum einen genetische Faktoren und zum anderen Umweltfaktoren,

wobei die Ursache für die meisten Missbildungen nicht bekannt ist. Schätzungen schreiben 7 % - 10 % der Missbildungen bekannter Ursache alleine Umweltfaktoren zu, für weitere 10 % werden ausschließlich genetische Faktoren verantwortlich gemacht und bei der weitaus größten Anzahl (ca. 80 %) geht man von einer Kombination genetischer und äußerer Einflüsse aus. Die Tatsache, dass manche Organismen genetisch vorbelastet sind und auf Teratogene empfindlicher reagieren als andere wird mit dem Fachbegriff „genetische Disposition“ bezeichnet.

Unter dem Begriff Teratogene werden äußere Einflüsse zusammengefasst, die angeborene Missbildungen verursachen. Bekannte Teratogene für den Menschen sind Viren wie z.B. das Röteln- und das Herpes-simplex-Virus oder chemische Stoffe wie Arzneimittel (z.B. Contergan), künstliche Hormone (z.B. Cortison) und Chemikalien in der Umwelt (z.B. Herbizide).

Da die Embryonalentwicklung eine Phase starker Zellvermehrung ist, ist sie durch teratogene Einflüsse besonders gefährdet. Je nach Entwicklungsstadium sind unterschiedliche Organe bzw. Gewebe betroffen.

Die Embryonalentwicklung wird in drei Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt (Blastogenese) reicht von der Befruchtung der Eizelle bis zur Bildung der drei Keimblätter, aus denen sich später alle Gewebearten ableiten. In dieser Phase können Teratogene entweder so viele Zellen schädigen, dass der Embryo abstirbt, oder es

# equenter elektromagnetischer Felder

sind so wenige Zellen betroffen, dass Regulationsmechanismen den Schaden kompensieren können und es zu keinerlei Missbildungen kommt. Im zweiten Abschnitt, der Embryonalphase, werden alle Organe angelegt. Deshalb ist diese Phase, die beim Menschen von der 4. bis zur 8. Schwangerschafts-Woche reicht, teratogenen Einflüssen gegenüber sehr empfindlich. Die Fetalperiode, der dritte Abschnitt, ist im Wesentlichen dem Wachstum des Fötus gewidmet. Nur noch in einigen Organsystemen wie dem Gehirn spezialisieren sich noch Zellen auf ihre späteren Aufgaben und folglich nimmt die Empfindlichkeit gegenüber Teratogenen ab.

## Der Hühnerembryo als Versuchsmodell

Da *in vivo* Untersuchungen an menschlichen Embryonen aus ethischen Gründen nicht möglich sind, werden teratologische Laboruntersuchungen an Tieren durchgeführt. Aufgrund ihrer Gemeinsamkeiten in der Embryonalentwicklung kommen dafür Reptilien, Vögel und Säugetiere in Frage. Die meisten Teratogene gelangen über den Stoffwechsel und Blutkreislauf der Mutter zum Embryo. Daher werden oft Säugetiere als Modell verwendet. Bei EMF kann man aber wegen ihrer physikalischen Eigenschaften davon ausgehen, dass sie den Embryo auch direkt beeinflussen könnten. Deshalb bieten sich hier Vogelembryonen als Forschungsobjekte an. In der Tat werden viele Untersuchungen über mögliche

teratogene Effekte von EMF an Hühnerembryonen vorgenommen. Die Verwendung von Hühnerembryonen hat mehrere Vorteile. Die Embryonen sind, nur geschützt durch die Eihülle, direkt den EMF ausgesetzt. Bei Säugetieren sind die Embryonen durch die Mutter teilweise abgeschirmt. Dieser Abschirmungseffekt variiert von Versuchstier zu Versuchstier, da z. B. Unterschiede in der Körpergröße und verschieden große Fettdepots eine Rolle spielen. Es ist also nicht möglich genau zu definieren, welchen Feldbedingungen die einzelnen Embryonen ausgesetzt sind. Hier wird auch eine Übertragung der Ergebnisse auf den Menschen fragwürdig. Als Säugetiermodelle werden in der Regel Ratten und Mäuse eingesetzt, und bei beiden ist der Abschirmungseffekt durch die Mutter wesentlich geringer als beim sehr viel größeren Menschen. Darüber hinaus ist es bei Säugetierembryonen schwer, die Feldbedingungen während des Versuches konstant zu halten, da sich die Versuchstiere unkontrolliert in den Käfigen bewegen. Dadurch wird es schwierig die Ergebnisse einzelner Versuchstiere miteinander zu vergleichen, und es besteht die Möglichkeit, dass die Embryonen auf die ständige Änderung der Feldbedingungen reagieren. Ein letzter Vorteil ist, dass bei Hühnerembryonen die Ergebnisse nicht durch eventuell auftretende Sekundäreffekte, die über das Muttertier auf den Embryo einwirken, verfälscht werden. Solche vielleicht auftretenden Sekundäreffekte könnten zum

einen durch die EMF hervorgerufen werden. Zum anderen aber auf einer nicht erkannten Erkrankung der Mutter oder falscher Haltung beruhen.

Allerdings muss bei der Übertragung der Ergebnisse auf den Menschen berücksichtigt werden, dass Hühnereier im Vergleich zum Menschen eine deutlich höhere Absorptionsfähigkeit im Resonanzbereich haben.

## Gliederung

In der Gliederung wird zunächst zwischen Laborarbeiten und epidemiologischen Studien unterschieden. Eine weitere Unterteilung erfolgt nach hoch- bzw. niederfrequenten EMF und nach den untersuchten Versuchstieren (Hühner und Säugetiere) bzw. -Modellen (Zell- und Gewebekulturen). Die Darstellung sollte möglichst wertfrei erfolgen. Kritische Anmerkungen waren jedoch vonnöten, wenn die veröffentlichten Ergebnisse in auffälliger Weise vom bisherigen Kenntnisstand oder zu erwartenden Effekten abweichen, oder wenn der Verdacht nahe liegt, dass die Ergebnisse durch Fehler in Versuchsdesign und -durchführung verfälscht wurden.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der, in dieser Studie erfassten Arbeiten, sind zum Teil widersprüchlich. Das hat mehrere Gründe. So wurden meist unterschiedliche Frequenzen untersucht und es gab in der Regel erhebliche Unterschiede im Versuchs-

design, wie z.B. Dauer und Zeitpunkt der EMF-Exposition. Hinzu kommt, dass in den einzelnen Arbeiten oft jeweils andere biologische Parameter, wie z.B. Missbildungsrate oder Embryonalsterblichkeit untersucht wurden. In diesem Zusammenhang muss zwischen den Begriffen Embryonalsterblichkeit und teratogener Effekt unterschieden werden, da nicht nur angeborene Missbildungen zu einem Absterben des Embryos führen können.

Um diesen Problemen zu begegnen, haben sich sechs Arbeitsgruppen aus vier verschiedenen Ländern zum „Henhouse Project“ zusammengeschlossen. Im Rahmen dieses Projektes führten die einzelnen Arbeitsgruppen in ihren jeweiligen Heimatländern identische Versuche zur Exposition von Hühnerembryonen mit niederfrequenten EMF durch. Trotzdem konnten keine einheitlichen Ergebnisse erzielt werden. Vier Gruppen konnten keine statistisch signifikanten Effekte nachweisen, die zwei anderen Gruppen hingegen schon. Eine mögliche Erklärung ist die unterschiedliche genetische Disposition der verwendeten Embryonen. Die untersuchten Eier stammten zwar alle von Hühnern einer Rasse ab, aber es wurden Eier verschiedener Hühner und Hähne verwendet. Die Unterschiede in der genetischen Ausstattung der Eier könnten zu den abweichenden Ergebnissen geführt haben.

Insgesamt weisen die bisher durchgeführten Arbeiten beim Menschen keinen Zusammenhang zwischen einer Exposition mit niederfrequenten EMF und einer teratogenen Schädigung nach. Bei den Versuchen mit Hühnerembryonen konnten zwar in einigen Fällen signifikante Effekte beobachtet werden. Allerdings wurden nur frühe Stadien der Embryonalentwicklung untersucht und nicht die weitere Entwicklung bis zum Schlüpfen dokumentiert. Schäden in diesen frühen Phasen füh-

ren aber entweder zum Absterben des Embryos oder haben dank spezieller Reparaturmechanismen überhaupt keine Auswirkung. Bei den Untersuchungen an Säugtierembryonen wurden bei 56 % der Untersuchungen statistisch bedeutsame Auswirkungen festgestellt. Die betreffen aber jeweils unterschiedliche Parameter, so dass sich für die einzelnen Parameter sehr viel niedrigere Prozentwerte ergeben, z. B. ist die Embryonalsterblichkeit nur in 12 % der Fälle erhöht. Zusammenfassend kann man sagen, dass die, bei Säugetierembryonen beobachteten, Effekte entweder nicht reproduzierbar waren oder sich auf bestimmte Zuchtformen beschränkten.

Einige Untersuchungen mit hochfrequenten EMF, weisen statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen Versuchs- und Kontrollgruppen nach. Allerdings lassen sich diese Effekte wahrscheinlich größtenteils auf die thermische Wirkung einer Exposition mit hochfrequenten EMF zurückführen. Einige mit Hühnerembryonen durchgeführte Studien fallen negativ durch ihre fehlerhafte Versuchsdurchführung auf. Zu niedrige oder zu hohe Bebrütungstemperaturen sind bei diesen Arbeiten vermutlich für die erhöhte Embryonalsterblichkeit verantwortlich. Besonders erwähnt werden soll noch eine Studie, die bei Exposition mit hochfrequenten EMF, eine Embryonalsterblichkeit von bis zu 100 % feststellt. Die Embryonen sind alle in der dritten Brutwoche, kurz vor dem Ausschlüpfen, abgestorben und weisen anscheinend keine Missbildungen auf. Beides deutet darauf hin, dass nicht die von den Autoren angenommene teratogene Wirkung des EMF, sondern eine falsche Bruttemperatur die erhöhte Sterblichkeit verschuldet hat. Bei dieser Studie muss auch an der Objektivität der Autoren gezweifelt werden, da sie ganz offensichtlich kommerzielle Ziele verfolgen und eine

Abschirmungsantenne auf den Markt bringen wollen. Die Frage nach möglichen Risiken von mobilen Telefonen und Mobilfunknetz kann zur Zeit nur verneint werden, weil die wenigen in dem relevanten Frequenzbereich durchgeführten Studien keine oder nur geringe Effekte zeigen.

Die bisher vorliegenden Daten aus einer Reihe von zellbiologischen Untersuchungen konnten keinen Nachweis für eine Wirkung der untersuchten EMF auf das Genmaterial oder die ganze Zelle erbringen. Untersuchungen im 1,8 GHz-Bereich fehlen allerdings gänzlich.

Von großem Interesse sind Studien bei denen die Frage gestellt wird, ob eine Exposition mit EMF die Wirkung teratogener Stoffe möglicherweise abschwächen oder verstärken kann. In diesem Bereich liegen zwar einige *in vitro* Untersuchungen aber nur wenige *in vivo* Studien vor. Besonders wichtig wären Arbeiten, die eine gemeinsame oder gegensätzliche Wirkung von EMF mit solchen Faktoren wie Stress, Krankheiten oder Genussmitteln untersuchen.

Die Ergebnisse der bisher durchgeführten epidemiologischen Studien liefern keine Hinweise, dass von niederfrequenten EMF ein erhöhtes Risiko für Schwangere ausgeht. Für mögliche Wirkungen von Mobilfunkanlagen und Mobiltelefone können noch keine Aussagen getroffen werden, da kein ausreichendes Datenmaterial vorliegt.

## Fazit

Trotz der großen Anzahl veröffentlichter Studien können noch nicht alle Fragen zu diesem Themenkomplex befriedigend beantwortet werden. Daher besteht nach Meinung des Autors auch weiterhin ein erheblicher Forschungsbedarf.

Dr. Peter Thalau, Johann-Wolfgang-von-Goethe-Universität, Frankfurt/M., Zoologisches Institut