Spannungsgesteuerte Calciumkanäle (VGCC)

Wie schwache elektromagnetische Felder in die Zellphysiologie eingreifen

RAUM 1 — Bürger & Familien

Der Zell-Türsteher · Warum schwache Felder trotzdem wirken · Was Sie tun können

Wie kann ein schwaches Funksignal überhaupt etwas in meinem Körper auslösen?

Viele Menschen fragen sich zu Recht: Mein Handy erwärmt meine Hand kaum spürbar — wie soll ein so schwaches Signal dann etwas in meinen Zellen bewirken? Die Antwort führt zu einer der wichtigsten Entdeckungen der letzten Jahrzehnte in der Zellbiologie.

Stellen Sie sich die Hülle jeder Ihrer Zellen wie eine Hauswand mit unzähligen kleinen Türen vor. Eine besondere Art dieser Türen — die spannungsgesteuerten Calciumkanäle — öffnet sich nicht durch Wärme, sondern durch elektrische Kräfte. Ihr „Türsteher“ ist ein empfindlicher Sensor, der auf elektrische Spannungsänderungen reagiert. Elektromagnetische Felder üben genau solche elektrischen Kräfte aus — auch wenn sie viel zu schwach sind, um etwas zu erwärmen. Der Türsteher öffnet die Tür, Calcium strömt in die Zelle. Das ist an sich ein normaler Vorgang, der bei jedem Nervenreiz passiert. Zum Problem wird er, wenn äußere Felder ihn dauerhaft und ungewollt auslösen.

Was weiß die Forschung — und was nicht?

Der Biochemiker Martin Pall hat zusammengetragen, dass in über zwei Dutzend Laborstudien genau dieser Mechanismus nachweisbar war: Wurden die Calciumkanäle gezielt mit Medikamenten blockiert — wie sie auch gegen Bluthochdruck eingesetzt werden —, verschwanden die Zellreaktionen auf elektromagnetische Felder ganz oder größtenteils. Das ist ein starkes Indiz dafür, dass der Kanal der entscheidende Angriffspunkt ist.

Vorsorge im Alltag

- Direkten Körperkontakt mit sendenden Geräten reduzieren (Handy nicht dauerhaft in der Hosentasche)
- Den Schlafbereich von Dauersendern freihalten — hier ist die Belastungsdauer am längsten
- Dauernutzung von Funk konsequent vermeiden: Geräte nach Möglichkeit per Kabel betreiben (LAN statt WLAN), Funk nur bei Bedarf einschalten und sonst ausschalten
- Schnurgebundenes Telefon statt DECT; wo schnurlose Geräte bleiben, nachts ausschalten

- Beim Telefonieren Abstand schaffen: Lautsprecher (kostenlos) oder Luftschlauch-Headset (ab etwa 10 Euro, Stand Oktober 2026) nutzen, kein Kupferkabel am Ohr, und das Handy weit vom Körper entfernt halten.

Was verändert sich bei Ihnen?

Wenn Sie über ein paar Wochen beobachten, wie sich Schlaf, Konzentration oder Kopfschmerzen verhalten, während Sie Ihre Belastung zu Hause bewusst senken, gewinnen Sie eine persönliche Einschätzung. Ein Symptomtagebuch mit Datum, Schlafdauer, Befinden und genutzten Geräten reicht dafür aus.

→ Ärztinnen und Ärzte finden im nächsten Abschnitt die Kaskade im Einzelnen, die EHS-Biomarker und Formulierungen für das Patientengespräch.

RAUM 2 — Ärzte & Therapeuten

VGCC-Kaskade · Oxidativer Stress · Blut-Hirn-Schranke · EHS-Biomarker

Warum der VGCC-Mechanismus heute medizinisch nicht mehr ignoriert werden kann

Solange kein plausibler Wirkmechanismus für nicht-thermische Effekte vorlag, ließ sich die klinische Relevanz schwacher Felder leicht als spekulativ abtun. Mit der VGCC-Aktivierung liegt ein biophysikalisch begründeter, in über zwei Dutzend pharmakologischen Studien gezeigter Wirkpfad vor. Beschwerden bei „schwacher“ Exposition lassen sich damit nicht mehr allein mit dem Verweis auf fehlende Erwärmung entkräften.

Wie funktioniert die VGCC-Kaskade?

Mechanismen-Übersicht

Der spannungsgesteuerte Calciumkanal besitzt einen Spannungssensor aus vier geladenen Helix-Strukturen, der auf elektrische Feldkräfte reagiert, nicht auf Wärme. Öffnet ein äußeres Feld den Kanal unphysiologisch, strömt Calcium ein. Daraus verzweigen zwei Pfade: exzessive Calcium-Signalgebung und — über Stickstoffmonoxid und Peroxynitrit — oxidativer Stress mit Entzündungsreaktion. Zusammen erklären sie ein breites Spektrum beschriebener Effekte, von Genexpressionsänderungen bis zu Störungen der Blut-Hirn-Schranke (zum oxidativen Stress ausführlich Artikel 2).

Welche Evidenz stützt die VGCC-Aktivierung als ursächlichen Mechanismus?

Pall dokumentierte 2013 in einer Übersichtsarbeit 23 Studien, in denen Calciumkanalblocker die untersuchten EMF-induzierten Zellreaktionen vollständig oder weitgehend aufhoben [1]. 2015 erweiterte er die Analyse auf 26 Studien mit fünf verschiedenen Klassen von Calciumkanalblockern, die an unterschiedlichen Bindungsstellen wirken — jede hob die Effekte auf, was gegen eine unspezifische Nebenwirkung eines einzelnen Wirkstoffs spricht [2]. Die Reaktion erfolgt teils im Sekundenbereich, was auf eine direkte Einwirkung auf den Membransensor hindeutet [1].

Welche Folgekaskaden löst der Calciumeinstrom aus?

Der Calciumeinstrom aktiviert calciumabhängige Stickstoffmonoxid-Synthasen. Reagiert NO mit Superoxid, entsteht Peroxynitrit — ein hochreaktives Molekül, das Proteine, Lipide und DNA schädigen kann [3]. Parallel steigert oxidativer Stress die Ausschüttung entzündlicher Botenstoffe und kann die Mitochondrienfunktion beeinträchtigen [4]. Eine erhöhte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke mit Übertritt von Albumin ins Hirngewebe wurde bei Ratten nach Exposition gegenüber GSM-Handystrahlung beschrieben [5]; der Abbau von Tight-Junction-Proteinen über Matrix-Metalloproteinasen ist bei gepulsten niederfrequenten Feldern gezeigt [6] (zur Blut-Hirn-Schranke ausführlich Artikel 30).

Welche Patientengruppen sind besonders betroffen?

Bei rund 80 % von 32 prospektiv untersuchten Patientinnen und Patienten mit selbst berichteter Elektrohypersensibilität fanden Irigaray, Caccamo und Belpomme einen, zwei oder drei nachweisbare oxidative Stressmarker im Blut, darunter Nitrotyrosin als Marker der Peroxynitrit-Bildung [7]; eine größere Kohorte derselben Gruppe mit mehreren hundert Fällen hatte zuvor Entzündungs- und Stressmarker sowie ein verändertes Melatonin-Abbauprodukt im Urin beschrieben [8]. ⊙ Die Einstufung beruht auf wiederholter klinischer Beobachtung an großen Patientenkollektiven einer spezialisierten Forschungsgruppe; eine Replikation durch unabhängige Arbeitsgruppen mit vergleichbarer Methodik steht noch aus. Zu Kindern und Jugendlichen siehe Artikel 16.

Was folgt daraus für Diagnostik, Karenz und Beratung?

Die Kaskade erlaubt eine objektivierbare Zusatzdiagnostik: Nitrotyrosin, S100B-Protein, Hitzeschockproteine und Glutathion-Status können als orientierende Marker für oxidativen bzw. nitrosativen Stress erhoben werden [9]. Da sich Felder im Alltag nicht vollständig meiden lassen, tritt neben die Expositionskarenz das Prinzip der Abschirmung. Stahlbeton kann VLF-Sferics je nach Bauweise und Feldkomponente abschwächen [10]. Eine pauschale Abschirmung von etwa 90 % ist ohne passende Messung und genaue Angabe der Messgröße nicht nachgewiesen. Für den Schlafbereich lässt sich das Faraday-Prinzip gezielt nutzen — als ergänzende Maßnahme, Quellenreduktion hat Vorrang (ausführlich Artikel 22).

Wie lässt sich das im Patientengespräch vermitteln?

Formulierungsvorschläge für die Praxis

„Ihre Beschwerden sind ein wichtiges Signal Ihres Körpers. Wir schauen sie uns gemeinsam an.“

„Funkstrahlung kann kleine Kanäle in unseren Zellen öffnen — auch ohne Wärme. Das ist gut untersucht.“

„Wo sehen Sie selbst Möglichkeiten, Funk in Ihrem Alltag zu verringern?“

Vorsorgeempfehlungen für die Praxis

- Bei EHS-Verdacht orientierende Biomarker erheben (Nitrotyrosin, S100B, Hsp27/70, Glutathion-Status) — als Zusatzbaustein
- Die Anamnese um kumulative Nähe und Dauer der Exposition erweitern, nicht nur um den Gerätetyp
- Antioxidative Supplementierung individuell abwägen
- Den Schlafbereich als primären Interventionsort priorisieren
- Zur Dauernutzung raten: Geräte nach Möglichkeit per Kabel betreiben (LAN statt WLAN), Funk nur bei Bedarf einschalten — gemeint ist der Dauerbetrieb von Funk, nicht die Bildschirmzeit
- Das EUROPAEM-Diagnostikschema nutzen: Anamnese, Feldmessung, Karenzversuch, Verlaufsbeobachtung [11]

Ärztliches Fazit

Mit der VGCC-Aktivierung liegt ein biophysikalisch plausibler, in zahlreichen pharmakologischen Studien gezeigter Wirkpfad nicht-thermischer Effekte vor. Die Reduktion vermeidbarer Expositionsquellen — insbesondere im Schlafbereich — ist deshalb eine medizinisch begründete Vorsorgemaßnahme.

→ Die Kernevidenz, die biophysikalische Gegenposition und die methodischen Grenzen finden Sie im folgenden Abschnitt.

Wie solide ist die Kernevidenz für die VGCC-Aktivierung?

Pall (2013, 2015): In 23 bzw. 26 Studien unterschiedlicher Labore hoben Calciumkanalblocker — in der Erweiterung fünf strukturell verschiedene Wirkstoffklassen — die untersuchten EMF-Effekte vollständig oder weitgehend auf [1, 2]. ⊙ Die Blocker-Experimente selbst stammen aus zahlreichen voneinander unabhängigen Arbeitsgruppen; Pall hat sie zusammengeführt. Aus der Blockierbarkeit folgt, dass VGCC an den gemessenen Effekten ursächlich beteiligt sind — nicht zwingend, dass sie der einzige Angriffspunkt sind.

Was sagt die biophysikalische Gegenposition — und was antwortet die Forschung?

Der zentrale Einwand gegen nicht-thermische Effekte ist physikalisch: Die in Geweben induzierten Feldstärken seien bei Alltagsexposition so schwach, dass sie gegenüber dem thermischen Rauschen der Moleküle keine biologisch relevante Wirkung entfalten könnten. Robert Adair hat diese Argumentation für Hochfrequenz ausgearbeitet [12]. Sie beruht auf einer theoretischen Abschätzung, nicht auf experimentellen Gegenbefunden. Panagopoulos und Kollegen haben ein Modell vorgelegt, das erklärt, warum der Einwand für Ionenkanäle nicht greift: Oszillierende Felder versetzen die Ionen in und an den Kanälen in erzwungene Schwingungen, und schon kleine Verschiebungen dieser Ionen genügen, um den Spannungssensor eines Kanals auszulösen [13]. Gepulste und polarisierte technische Felder sind nach diesem Modell besonders wirksam [14]. Die Blocker-Experimente zeigen, dass die vorhergesagte Wirkung an den Kanälen tatsächlich eintritt.

Wie ist die nachgeschaltete Kaskade belegt?

NO-/Peroxynitrit-Signalweg: Die calciumabhängige Aktivierung der NO-Synthase und die daraus resultierende Peroxynitrit-Bildung sind als Folgeschritt beschrieben und mit oxidativem Zellstress verknüpft [3, 4]; die oxidative Stressreaktion selbst ist von zahlreichen unabhängigen Gruppen belegt (Artikel 2).

Blut-Hirn-Schranke: Die Lunder Gruppe um Salford fand bei Ratten nach zweistündiger GSM-Exposition Albumin-Übertritt ins Hirngewebe und geschädigte Nervenzellen [5]. Albumin-Übertritt im Tierversuch berichten mehrere Gruppen (ausführlich Artikel 30).

Wie belastbar sind die EHS-Biomarker-Befunde?

Irigaray, Caccamo & Belpomme (2018): Bei 32 prospektiv untersuchten EHS-Patientinnen und -Patienten zeigten rund 80 % einen, zwei oder drei erhöhte oxidative Stressmarker im peripheren Blut (u. a. TBARS/MDA, oxidiertes Glutathion, Nitrotyrosin) [7]. ⊙ Die Einstufung beruht auf wiederholter klinischer Beobachtung an großen Patientenkollektiven einer spezialisierten Forschungsgruppe [8, 9]; eine Replikation durch unabhängige Arbeitsgruppen mit vergleichbarer Methodik steht noch aus.

In Interviews mit 40 selbstdiagnostizierten EHS-Betroffenen traten die Symptome auf, bevor die Betroffenen begannen, elektromagnetische Felder als Ursache in Betracht zu ziehen; Erwartungseffekte könnten spätere Phasen verstärken [15]. Die Arbeit ist qualitativ und beruht auf nachträglichen Schilderungen.

Spielen Erwartungseffekte eine Rolle?

Der Einwand, Erwartungseffekte erklärten die Beschwerden, betrifft die subjektive Symptomzuordnung in Provokationsstudien, nicht die objektiv gemessenen Stressmarker im Blut, die weniger von der Selbsteinschätzung abhängen [7]. Ein negatives Provokationsergebnis widerlegt deshalb keinen objektivierbaren Biomarker-Befund. Zur Methodik der Provokationsstudien und zur fehlenden Stabilisierungsphase siehe Artikel 29.

Wo liegen die methodischen Grenzen?

Der Großteil der Blocker-Evidenz beruht auf Zell- und Tierstudien; die Übertragung auf den Menschen im Alltag ist nicht im gleichen Umfang untersucht. Die EHS-Biomarker-Forschung stammt überwiegend aus einer Arbeitsgruppe. Die Frage, ob eine Unterbrechung der Kaskade — etwa durch antioxidative Therapie — die Symptome bessert, ist noch nicht systematisch beantwortet.

Wie gehen ICNIRP und EUROPAEM mit dem Mechanismus um?

Die ICNIRP-Grenzwerte beruhen auf akut-thermischen und elektrostimulatorischen Effekten; die VGCC-Aktivierung wird nicht als Bemessungsgrundlage herangezogen (Artikel 3). Die EUROPAEM-Leitlinie verweist dagegen ausdrücklich auf oxidativen Stress und calciumkanalvermittelte Mechanismen als Grundlage für einen vorsorgeorientierten klinischen Umgang [11].

Kein Schadensnachweis ≠ Sicherheitsnachweis. Ein biophysikalisch plausibler, in zahlreichen Laboren pharmakologisch gezeigter Wirkpfad unterhalb jeder Erwärmung ist Grund genug für Vorsorge.

Wissensstandsmarker

- ○ **Hinweise vorhanden** — Erste Beobachtungen liegen vor. Noch keine unabhängige Bestätigung.
- ◉ **Unabhängig bestätigt** — Mehrere Forschungsgruppen kommen zu vergleichbaren Ergebnissen.
- ● **Biophysikalisch belegt** — Wirkmechanismus reproduzierbar nachgewiesen und beschrieben.

#	Quelle
1	Pall ML: Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects. J Cell Mol Med. 2013;17(8):958–965. DOI: 10.1111/jcmm.12088.
2	Pall ML: Scientific evidence contradicts findings and assumptions of Canadian Safety Panel 6: microwaves act through voltage-gated calcium channel activation to induce biological impacts at non-thermal levels, supporting a paradigm shift for microwave/lower frequency electromagnetic field action. Rev Environ Health. 2015;30(2):99–116. DOI: 10.1515/reveh-2015-0001.
3	Pall ML: Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. J Chem Neuroanat. 2016;75(Pt B):43–51. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001.

#	Quelle
4	Pall ML: Low Intensity Electromagnetic Fields Act via Voltage-Gated Calcium Channel (VGCC) Activation to Cause Very Early Onset Alzheimer's Disease: 18 Distinct Types of Evidence. Curr Alzheimer Res. 2022;19(2):119–132. DOI: 10.2174/1567205019666220202114103.
5	Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L, Persson BRR: Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. Environ Health Perspect. 2003;111(7):881–883. DOI: 10.1289/ehp.6039.
6	Zhang YM et al.: Altered expression of matrix metalloproteinases and tight junction proteins in rats following PEMF-induced blood-brain barrier permeability change. Biomed Environ Sci. 2012;25(2):197–202. — Gepulste niederfrequente Felder (PEMF).
7	Irigaray P, Caccamo D, Belpomme D: Oxidative stress in electrohypersensitivity self-reporting patients: Results of a prospective in vivo investigation with comprehensive molecular analysis. Int J Mol Med. 2018;42(4):1885–1898. DOI: 10.3892/ijmm.2018.3774. PMID 30015864.
8	Belpomme D, Campagnac C, Irigaray P: Reliable disease biomarkers characterizing and identifying electrohypersensitivity and multiple chemical sensitivity as two etiopathogenic aspects of a unique pathological disorder. Rev Environ Health. 2015;30(4):251–271.
9	Belpomme D, Irigaray P: Electrohypersensitivity as a Newly Identified and Characterized Neurologic Pathological Disorder: How to Diagnose, Treat, and Prevent It. Int J Mol Sci. 2020;21(6):1915. DOI: 10.3390/ijms21061915.
10	Faust V: Die atmosphärische Impulsstrahlung (Sferics). In: Faust V: Biometeorologie. Der Einfluß von Wetter und Klima auf Gesunde und Kranke. 2. Aufl. Stuttgart: Hippokrates-Verlag; 1978. S. 181–185. ISBN 3-7773-0394-1.
11	Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshammer H, Lercher P, Müller K, Oberfeld G, Ohnsorge P, Pelzmann P, Scheingraber C, Thill R: EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. Rev Environ Health. 2016;31(3):363–397. DOI: 10.1515/reveh-2016-0011.
12	Adair RK: Biophysical limits on athermal effects of RF and microwave radiation. Bioelectromagnetics. 2003;24(1):39–48. PMID 12483664.
13	Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Margaritis LH: Mechanism for action of electromagnetic fields on cells. Biochem Biophys Res Commun. 2002;298(1):95–102.
14	Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos GP: Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review). Int J Oncol. 2021;59(5):92. DOI: 10.3892/ijo.2021.5272.
15	Dieudonné M: Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study. Bioelectromagnetics. 2016;37(1):14–24. DOI: 10.1002/bem.21937. PMID 26369906.