

ATHEM-3 (2020-2024)

**Athermische biologische Wirkungen bei
Langzeit-Exposition mit hochfrequenten
elektromagnetischen Feldern niedriger
Intensität**

Untertitel:

**Indikatoren für Gesundheitsrisiken
nach Langzeit-Exposition durch
stationäre Mobilfunk-Sender**

**Ein Forschungsprojekt der Kompetenzinitiative e.V.
in Zusammenarbeit mit Forscherteams
aus Deutschland, Österreich, und der Slowakei**

Wissenschaftliche Projektleitung:

A.o. Univ.Prof. Dr. Wilhelm Mosgöller
an der Med. Universität Wien
wilhelm.mosgoeller@meduniwien.ac.at

Projekt-Koordination:

SClgenia Forschungssupport GmbH
A-1090 Wien
Telefon: +43 664 28 48 324
office@scigenia.com

**Initiator &
Projektauftraggeber**

Kompetenzinitiative zum Schutz von
Mensch, Umwelt und Demokratie e.V.
Geschäftsstelle,

Auf der Ochsenweide 10
D-66133 Saarbrücken-Scheidt

Tel. +49 / (0)681-84121874

sekretariat@kompetenzinitiative.com
<https://kompetenzinitiative.com/>

Verfasser, Redaktion und Ansprechpartner

Wissenschaftliche Projekt-Leitung und Korrespondenz

A.o. Prof. Dr. Wilhelm MOSGÖLLER

Medizinische Universität Wien, Inst. für Krebsforschung, 1090 Wien Österreich

Tel.: +43 664/28 48 324

wilhelm.mosgoeller@meduniwien.ac.at

Leitung und Verantwortung in Bezug auf die Teil-Projekte

Teilbericht A, Konzentrationstests bei Kurzzeitexposition

Dr.-Ing. Dietrich MOLDAN

Dr. Moldan Umweltanalytik, Am Henkelsee 13, 97346 Iphofen, Deutschland

Tel +49 / 93 23 / 87 08-10

info@drmoldan.de, www.drmoldan.de

Teilbericht B, Konzentrationstests bei Kurzzeitexposition

Roman SCHILLING (mit Dr.-Ing. Dietrich MOLDAN, A.o. Prof. Dr. Wilhelm MOSGÖLLER)

Burker Straße 41, 91599 Dentlein am Forst

info@schilling-therapie.de

Teilbericht C, Autonome Körperfunktionen (Herzratenvariabilität)

Prof. Dr. Maximilian MOSER, Sachbearbeitung: DI Matthias FRÜHWIRTH

Human Research Institut für Gesundheitstechnologie und Präventionsforschung GmbH

Franz-Pichler-Straße 30, 8160 Weiz, Österreich

Tel. +43 (31726) 44111 – 0, Fax +43 (3172) 44111 – 11

Email: office@humanresearch.at web: www.humanresearch.at

Teilbericht D, Blutuntersuchungen, Einfluss auf die Genom-Instabilität

Ass. Prof. Dr. Igor BELYAEV Department für Radiobiologie am Biomedizinischen Forschungszentrum der Slowakischen Akademie der Wissenschaften,

Dubravska cesta 9, 845 05 Bratislava, Slowakei

Tel.: +421 2 32295119

Email: igor.believa@savba.sk

Der besseren Lesbarkeit wegen, wird darauf verzichtet männlich und weibliche Formen nebeneinander anzuführen, bzw. durch Kunstwörter zu kennzeichnen. Jede personenbezogene Bezeichnung meint immer beide Geschlechter, wenn es nicht ausdrücklich anders angeführt wird.

In Kürze

ATHEM-3 ist ein internationales und interdisziplinäres Forschungs-Projekt zu gesundheitlich relevanten Risiken durch Mobilfunk-Sender. Die zentrale Fragestellung war, ob kontrovers diskutierte Hinweise auf gesundheitsrelevante Effekte aus Labor-, Tier- und Humanstudien sich bestätigen oder alternativ als im Alltag nicht relevant herausstellen. Dabei galt die Blickrichtung und der Fokus der ATHEM-3 Studien zwei zentralen biologischen Konstituenten des Menschen: zum einen den autonomen Körperfunktionen und zum anderen dem Erbgut.

Um mögliche Langzeitfolgen der Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern am Menschen zu untersuchen, wurden 24 Freiwillige aus benachbarten Siedlungen, nach jahrelanger Exposition zu Mobilfunkfeldern - die entweder relativ hoch oder niedrig waren - untersucht. Die Freiwilligen waren in Bezug auf Alter, Ernährung, Lebensstil, berufliche Situation, Umweltbelastungen etc. gut vergleichbar. Die Gruppe der „relativ hoch exponierten Personen“ und „vergleichsweise niedrig Exponierten“ unterschieden sich klar und statistisch signifikant durch die Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) im eigenen Wohnumfeld.

So wie bei den Vorgängerprojekten ATHEM-1 und ATHEM-2 zeigten die Ergebnisse von ATHEM-3 beides, negative Befunde und solche, die auf gesundheitlich relevante Einflüsse der Exposition hinweisen. Aus der zusammenschauenden Analyse früherer und aktueller, sowie internationaler Befunde, die positiv und/oder negativ ausgefallen sind, ergibt sich ein Bild zu Auswirkungen und deren Mechanismen der chronischen Exposition bei niedrigen, aber überdurchschnittlichen Intensitäten hochfrequenter EMF.

Zustimmung der zuständigen Ethikkommission

Der Untersuchungsplan wurde der Ethikkommission der Ärztekammer NRW (Deutschland) vorgelegt. Der Untersuchungsplan wurde befürwortet. Es gab keine Änderungen zum ursprünglich geplanten und festgelegten Untersuchungsablauf.

Zentrale Merkmale und Ergebnisse von ATHEM-3

Die doppelt verblindeten Untersuchungen (autonomes Nervensystem, Chromosomenanalysen) wurden von ausgewiesenen Experten ihres Faches und international anerkannten Wissenschaftlern durchgeführt. Beide Untersuchungsarten zeigten einen signifikanten Unterschied zwischen Anrainern, die mit HF-EMF überdurchschnittlich hoch oder niedrig exponiert wohnen.

Bei der HRV-Analyse waren tagsüber die Unterschiede zwischen hoch und niedrig exponierten Personen individuell verschieden. Während der Nachtruhe war die Erholungsfunktion des Schlafes (Vagus-Aktivität) bei der Personen-Gruppe mit höherer Exposition signifikant herabgesetzt.

Die Chromosomen-Analyse in den Blutproben erbrachte Hinweise dahingehend, dass die HF-EMF Exposition DNA-Schäden verursacht, welche über Jahre hinweg zu einer Akkumulation von Chromosomenschäden führen. Die Beobachtung von Schäden bei Langzeit-Exponierten, steht nicht in Widerspruch zu Ergebnissen früherer Untersuchungen, sie ergänzt und erweitert die Ergebnisse gleichartiger Kurzzeit-Untersuchungen (Stundenbereich), bei denen keine Einflüsse festgestellt wurden.

Eine Frage zu Projektbeginn, nämlich ob die HF-EMF Exposition über Jahre zur Gewöhnung („adaptive response“), kann angesichts des beobachteten Schlafverhaltens und der Chromosomenveränderungen in der Gruppe mit überdurchschnittlich hoher HF-EMF Exposition verneint werden.

Befund-Bewertung

Die beobachteten Signifikanzen zeigen keine akute Gesundheitsbeeinträchtigung, aber liefern die Evidenz dafür, dass Langzeitexposition ein Gesundheits-Risiko mit sich bringt. Diese Studie ist auch aufgrund der geringen Patientenzahlen aussagekräftig genug, da die Gruppen hinsichtlich demographischer Daten, Lebensstilfaktoren und alternativen Risikofaktoren wie Exposition zu (medizinisch indizierten) ionisierender Strahlung vergleichbar waren.

Die Effekte auf das autonome Nervensystem bei relativ hoher Exposition, sind – bei Ausschluss unbekannter Einflussfaktoren - ein direkter Hinweis auf eine expositionsbedingte Herabsetzung der Erholungsfunktion der Tiefschlafphasen und eine expositionsbedingte Beeinträchtigung bei der Bewältigung entzündlicher Vorgänge im Körper.

Der Befund nach Jahren der Exposition in diesem Projekt erklärt sich, weil geringe und darum unbemerkte Chromosomenschäden durch Exposition sich über Jahre ansammeln können, um nach Jahren der Exposition in messbaren Mengen vorzuliegen.

Chromosomenschäden sind Grundlage der biologischen Dosimetrie im Kontext mit ionisierenden Strahlen. Aus der Schadwirkung heraus bestimmt man die so genannte Äquivalenzdosis; deren Höhe ist durch Expositions-Richtlinien der Internationalen Atom Energie Behörde (IAEA) begrenzt. Die in diesem Projekt gefundenen Chromosomenschäden sind äquivalent zu einer Exposition mit ionisierender Strahlung, die die Grenzwerte der IAEO um ein Vielfaches übersteigen.

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort des Projektträgers	10
2	Zur Forschungsfrage	12
2.1	<i>Stand der Wissenschaft zu Projektbeginn</i>	12
2.2	<i>Studiendesign - Überblick.....</i>	12
3	Projektteam A, Physikalische Messungen	14
3.1	<i>Einleitung / Hintergrund</i>	19
3.2	<i>Fragestellungen und Projekt-Ziele.....</i>	20
3.3	<i>Methodik.....</i>	21
3.3.1	Studien-Probanden.....	21
3.3.2	Studien-Equipment.....	23
3.3.3	Pavillon für experimentelle Hochfrequenz-Abschirmung	24
3.3.4	Kurzzeit-Abschirm-Tests im Pavillon.....	30
3.3.5	Gruppenbildung auf Basis physikalischer Messungen.....	31
3.3.6	Statistische Auswertung	34
3.4	<i>Ergebnisse</i>	35
3.4.1	Probanden	35
3.4.2	Exposition an den Schlafplätzen	35
3.4.3	Exposition im Pavillon während experimenteller Abschirmung.....	49
3.5	<i>Diskussion.....</i>	54
3.5.1	Wahl der Projektstandorte	54
3.5.2	Elektrische und magnetische Wechselfelder, Niederfrequenz	54
3.5.3	Hochfrequente EMF-Immissionen.....	54
3.6	<i>Projekt-Errungenschaft</i>	55
4	Projektteam B, Konzentrationstests	56
4.1	<i>Einleitung / Hintergrund</i>	58
4.2	<i>Methodik.....</i>	58
4.2.1	Studienteilnehmer	58
4.2.2	Erfassung der EMF Umwelt-Immissionen	59
4.2.3	Pavillon zur HF-EMF Abschirmung.....	59
4.2.4	Konzentrationstest (d2-R)	59
4.2.5	Test im Pavillon.....	60
4.2.6	Statistik	61
4.3	<i>Ergebnisse</i>	61
4.3.1	EMF - Messungen	61
4.3.2	Probanden	61
4.3.3	Konzentrationstest-Ergebnisse.....	61
4.3.4	Auswertbare Datenmenge	62
4.3.5	Statistische Bewertung.....	71
4.4	<i>Diskussion.....</i>	72
5	Projektteam C, autonome Körper-Funktionen	74
5.1	<i>Einleitung und Problemstellung</i>	78
5.1.1	Das vegetative Nervensystem und die Herzratenvariabilität (HRV)	78
5.1.2	Bedeutung der HRV für Leistungsfähigkeit und Gesundheit	78

5.1.3	Fragestellungen	79
5.2	Methodik.....	79
5.2.1	Versuchsteilnehmer	79
5.2.2	Kurzzeit-Abschirmversuche	80
5.2.3	Messungen	81
5.2.4	EKG und HRV-Messmethode	81
5.2.5	Berechnete HRV-Parameter	82
5.2.6	Fragebögen.....	83
5.2.7	Statistische Methoden.....	83
5.3	Ergebnisse	84
5.3.1	Versuchsteilnehmer	84
5.3.2	Fragebogendaten	86
5.3.3	Kurzzeit-Abschirmversuche	89
5.3.4	Langzeit- und Nachtauswertung.....	94
5.3.5	Vorverarbeitung und betrachtete Zeitabschnitte	94
5.3.6	Korrelationen von EMF- und HRV-Parametern	104
5.3.7	Abschirmversuch "revisited": Korrelation mit der Exposition am Schlafplatz.....	106
5.4	Diskussion.....	107
5.4.1	Kurzzeit-Abschirmversuche	108
5.4.2	Langzeit- und Nachtmessungen	108
5.4.3	Limitationen und mögliche Confounder.....	109
5.4.4	Bedeutung der Vagus-Aktivität für Leistungsfähigkeit und Gesundheit	109
5.4.5	Schlussfolgerung.....	112
5.5	Annex, Teilbericht C.....	113
5.5.1	Auswertung der Kurzzeit-Abschirmtests gemäß Studienplan	113
5.5.2	Geschlechtsspezifischer Vergleich der HRV in der Gesamtschlafphase	115
6	Projektteam D, Genom-Stabilität, zelluläre Effekte	117
6.1	Einführung.....	119
6.2	Materialien und Methoden	121
6.2.1	Verwendete Chemikalien	121
6.2.2	Studienteilnehmende	121
6.2.3	Umwelt-elektromagnetische Felder	122
6.2.4	Analysen der Blutproben	125
6.2.5	Statistische Auswertung	129
6.3	Ergebnisse	129
6.3.1	Teilnehmende.....	129
6.3.2	Messungen der EMF-Expositionen	129
6.3.3	Explorative Korrelation von EMF-Exposition und biologischen Endpunkten	130
6.3.4	Biologische Endpunkte, Gruppenvergleich (Kontrollgruppe C, exponierte Gruppe E)	130
6.3.5	Analysen von Störfaktoren	134
6.4	Diskussion.....	137
6.5	Schlussfolgerung	141
6.6	Zitierte Referenzen in Teilbericht "D"	142
7	Zusammenschau.....	145
7.1	Studienmerkmale	146
7.1.1	Probanden	146
7.1.2	Verblindete Analysen	147
7.1.3	Peer Review der Teilreports	147
7.2	Keine kognitiven Effekte bei kurzem Exposition-Wechsel	147

7.3	<i>Physiologische Effekte, autonome Nachtruhe-Erholung</i>	147
7.4	<i>Genom – Instabilität, zelluläre Effekte</i>	148
7.4.1	<i>Oxidativer Mechanismus</i>	148
7.4.2	<i>Unterschiedliche Zell-Typen sind unterschiedlich robust</i>	149
7.5	<i>Was bedeuten die Befunde?</i>	149
8	Was meint "Dosis"? Intensität, Zeit oder beides zusammen	150
9	Befunde in Bezug auf Schutz-Grenzwerte	150
10	Präventiver Strahlenschutz	152
10.1	<i>Technische Prävention</i>	152
10.2	<i>Vorsorgeprinzipien: ALARA und ALATA</i>	153
11	Ausblick	154
11.1	<i>Beispiel für sozial- und umweltverträglichen Netzausbau</i>	154
11.2	<i>Kooperation der Mobilfunkanbieter senkt die Exposition</i>	154
11.3	<i>Datenübertragung mit Lichtfrequenzen</i>	156
12	Verzeichnisse	157
12.1	<i>Im Allgemeinteil zitierte Literatur</i>	157
12.2	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	167
12.3	<i>Tabellenverzeichnis</i>	169

1 Vorwort des Projektträgers

ATHEM-3 ist ein internationales und interdisziplinäres Forschungs-Projekt. Es war ein überraschender Todesfall eines Arztes, der zu Diskussionen führte, ob und wie eine Sendeanlage in der unmittelbaren Nachbarschaft daran beteiligt sein könnte. Ist das nur ein Hirngespinnst oder sind mit seriösen wissenschaftlichen Methoden gesundheitliche Belastungen durch Sendeanlagen nachweisbar?

Diese Frage stellte man unter anderem während einer öffentlichen internationalen Tagung „Biologische Wirkungen des Mobilfunks“, zu der die Kompetenzinitiative e.V. ins Kurfürstliche Schloss zu Mainz, 4. – 6. Oktober 2019, eingeladen hatte.¹ In Mainz selbst wurden nicht nur aktuelle Erkenntnisse der Forschung vorgestellt, sondern auch die Möglichkeiten diskutiert, auf wissenschaftlicher Grundlage einen Beitrag zum zeitgemäßen Strahlenschutz zu leisten.

In der Initialphase des Projekts waren die Sichtung der aktuellen Wissenschaft und Such-Bewegungen auch in anderen Kontexten bedeutsam. Mit der Trägerschaft der Kompetenzinitiative e.V. gelang es im Laufe des Jahres 2020, international und national renommierte Experten für das Vorhaben zu gewinnen, die in ihren jeweiligen Arbeitsgebieten über langjährige Erfahrung und Expertise verfügen: Prof. Dr. med. Wilhelm Mosgöller übernahm die wissenschaftliche Projekt-Leitung. Dr.-Ing. Dietrich Moldan ist ein versierter und zertifizierter Messtechniker. Prof. Dr. Maximilian Moser gilt als Experte für Kreislaufregulation und vegetatives Nervensystem. Prof. Dr. Igor Belyaev ist ein international agierender Strahlenbiologie-Experte. Sie waren die Leiter der jeweiligen Untersuchungen in ihrem Fachbereich.

Mit der Projektbezeichnung ATHEM-3 setzte man, mit Blick auf Anspruch und Profil, das gemeinsame Projekt in eine naheliegende Beziehung zu ATHEM-1 (2002-2008) und ATHEM-2 (2012-2016), beides internationale Referenz-Studien der unabhängigen Forschung über biologische Wirkungen des Mobilfunks.

Unter welchen Rahmenbedingungen entstand ATHEM-3?

Es war allen Beteiligten von vornherein klar, dass die Kompetenzinitiative e.V. nicht über die nötigen Ressourcen verfügt, ein internationales Forschungsprojekt solcher Größenordnung und Dimension zu finanzieren. Es ist bemerkenswert, dass das Vorhaben durch großzügige bürgerliche Spendenpraxis gelang, ATHEM-3 ist gänzlich spendenfinanziert, wofür wir dankbar sind.

Das genuin akademische Interesse der Akteure mag nicht unerheblich dazu beigetragen haben, dass die Untersuchungen - von Industrie und Politik unabhängig - realisiert wurden. Der Projektablauf wurde durch Krankheitsgeschehen von Projekt-Akteuren beeinträchtigt (Frühjahr und Sommer 2022, Winter und Frühjahr 2023) und kommt daher später als geplant am Jahresbeginn 2024 zum Abschluss.

Ein Meilenstein der gemeinsamen Arbeit war ein Team-Meeting in Bratislava im Spätsommer 2022 ein. Wir waren Gast beim Biomedizinischen Forschungszentrum der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, Department für Radiobiologie. Die bis dahin vorliegenden Ergebnisse wurden beraten, eine erste Vorstellung der Projektergebnisse

¹ <https://kompetenzinitiative.com/mainz-2019/> - <https://kompetenzinitiative.com/en/mainz-2019/>

erfolgte auf der internationalen öffentlichen Tagung „Zur aktuellen 5G / Mobilfunk-Diskussion – Risiken und Perspektiven“ im Goethe-Museum Düsseldorf im Oktober 2022.² Überblickt man die gesamte, rund dreijährige, Entstehungs- und Arbeitszeit, so gehört es zu den wesentlichen Merkmalen des Projekts, dass ATHEM-3 durchgängig von bürgerlichem Engagement mit gemeinnützigen Interessen getragen war. Dieser Konstellation verdankt das Projekt letztlich ein hohes Maß an wissenschaftlicher Unabhängigkeit. ATHEM-3 ist ein Beispiel für bürgerlich erlebte bzw. gelebte Wissenschaft.

Was macht ATHEM-3 so besonders?

Die gestellten wissenschaftlichen Fragen berühren unterschiedliche wissenschaftliche Disziplinen. Die außergewöhnliche Komplexität, die von Anfang an unterschiedliche Kompetenzen der Projekt-Partner erforderte, bedingte im weiteren Fortgang des Projekts ebenso vielfältige wie enge wechselseitige Verständigungsprozesse zwischen den Teams. Zu Beginn stand ATHEM-3 vor der Herausforderung, ein wissenschaftliches Forschungsdesign zu entwickeln, das hohen Standards der Grundlagenforschung im Bereich „Biologische Wirkung der chronischen Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern“ gerecht wird. Kein einziger Mensch auf dieser Welt kann alle dazu erforderlichen Expertisen einbringen. Es war zu Beginn angesichts der Vielfalt und Dichte von HF-EMF Emittenten keine einfache Aufgabe, einen Ort zu finden, in dem man hoch und niedrig Langzeit-HF-EMF exponierte Anrainer fair vergleichen kann.

Die Messung der Exposition durch die physikalischen Umgebungsfelder erfolgte gemäß anerkannter technischer Normen. Die Erfassung autonomer Körperfunktionen geschah durch Experten in der Analyse der Herzratenvariabilität. Allein die Blut-Untersuchung erfordert mehr Koordination und Kompetenz, als es ein Einzelner einbringen könnte.

Die beste Wissenschaft wäre aber wertlos, hätten nicht 24 Freiwillige den Zutritt zu ihrer Wohnumgebung möglich gemacht, und hätten sie nicht ihre Zeit sowie zwölf Milliliter ihres Blutes beigesteuert. Besonders die Rolle und der Beitrag der Freiwilligen verleiht den Ergebnissen des ATHEM-3 Projektes Alltagsnähe und begründet deren Relevanz für die Reflexion nachbarschaftlicher Beziehungen der unmittelbaren Umgebung einer Sendeanlage. Die langfristige Exposition mit F-EMF ist mit relevanten Risikoindikatoren assoziiert. In einer Welt, die zunehmend von verschiedensten technisch bedingten elektromagnetischen Feldern durchflutet wird, hat ein Standort mit jahrelang unterschiedlicher HF-EMF Exposition und mit klar trennbaren Vergleichsgruppen gewissermaßen Modellcharakter.

Saarbrücken, im Herbst 2023;

für das Vorstandsteam der Kompetenzinitiative e.V.

Prof. Dr. Klaus Buchner, Prof. Dr.-Ing. Wilfried Kühling,
Dr. phil. Peter Ludwig, Klaus Scheidsteger

² <https://kompetenzinitiative.com/duesseldorf-2022/> - <https://kompetenzinitiative.com/en/duesseldorf-2022/>

2 Zur Forschungsfrage

2.1 Stand der Wissenschaft zu Projektbeginn

Ein Ergebnis von *ATHEM-1* (2002-2008) (Molla-Djafari et al., 2010) war, dass stundenlange Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) in bestimmten Zellen zu DNA-Brüchen führt (Diem et al., 2005; Schwarz et al., 2008), oder zu Veränderungen des Proteinhaushalts (Gerner et al., 2010). Es gibt sensible (reaktive) Zell-Typen und andere, die bei gleichen Expositionsbedingungen ohne merklichen Schaden geblieben sind.

Das Nachfolgeprojekt *ATHEM-2* (2012-2016) (Molla-Djafari et al., 2016) hat zur Frage „Wie denn das möglich sei, dass HF-EMF zu DNA-Brüchen führt“ internationale Forschungsbericht bestätigt. Unter HF-EMF Exposition entsteht oxidativer Stress, der DNA oxidativ schädigen kann (Yakymenko et al., 2016; Al-Serori et al., 2018). Bei der Reparatur dieser Schäden durch die Zelle treten selten, aber doch Fehler auf. DNA-Schäden stören (oder zerstören) die genetische Information in der DNA (Gregus, 2013). Geringe DNA-Störungen können sich der Beobachtung entziehen. Es ist denkbar, dass sie sich im Laufe der Zeit entweder zurückbilden oder anhäufen.

Eine zentrale Fragstellung von *ATHEM-3* war es, ob bei den exponierten Menschen funktionelle Veränderungen auftreten, ob Gewöhnungseffekte eine Rolle spielen, oder alternativ nach Jahren der Exposition zelluläre DNA-assoziierte Pathologien akkumulieren und zu Tage treten.

2.2 Studiendesign - Überblick

In der Vergangenheit lieferten Laboruntersuchungen oft positive und dann wieder gegensätzliche Befunde. Aber gibt es gesundheitsrelevante Effekte unter Alltagsbedingungen?

Dazu wurden gesunde freiwillige Studien-Teilnehmer aus einer Wohnumgebung rekrutiert. Die HF-EMF Immissionen von Mobilfunksendern waren in den Wohnräumen entweder relativ hoch oder - zum Vergleich – sehr niedrig. Lebensstil-Faktoren wie Ernährung, Umwelteinflüsse, berufsbedingte Expositionen, hausgemachte RF-EMF Expositionen, etc. wurden dokumentiert.

Die Studienteilnehmer öffneten dem Projektteam ihre Häuser, um die vorhandenen elektromagnetischen Felder (hausgemacht und von extern kommend) zu erfassen. Auf Basis der in den Häusern vorhandenen Immissionen ließen sich die Studienteilnehmer zwanglos zwei direkt miteinander vergleichbaren Gruppen zuteilen:

Überdurchschnittlich hoch mit HF-EMF exponiert

Kaum oder niedrig exponiert.

Es wurden hochauflösende 24-Stunden EKG-Aufzeichnungen erstellt. Die Freiwilligen stellten Blutproben zur Verfügung. Die Untersuchungen wurden unter mehrfach verblindeten Bedingungen durchgeführt.

Der Untersuchungsplan wurde von einer Ethikkommission begutachtet und befürwortet.

Während des gesamten Projektes wurden keine zusätzlichen EMF-Immissionen erzeugt.

Wien, im Herbst 2023, Prof. Dr. Wilhelm Mosgöller

Die folgenden Abschnitte enthalten die Berichte der einzelnen Projektteams:

- A. Physikalische Messungen, EMF-Messung
Dietrich Moldan
- B. Konzentrationstest unter Kurzzeit-Abschirmung und -Exposition,
Roman Schilling, Dietrich Moldan, Wilhelm Mosgöller
- C. Autonomes Nervensystem – Analysen der Herzratenvariabilität,
Maximilian Moser, Matthias Frühwirth
- D. Blutuntersuchungen, Genom-Stabilität, zelluläre Effekte
Igor Belyaev

3 Projektteam A, Physikalische Messungen

ATHEM-3

Endbericht des Teilprojektes A

EMF-Messungen

In Kürze

Was wurde gemacht?

Nach einer Erstinformation an knapp 70 Personen wurden 25 Personen als Studienprobanden ausgewählt. Die freiwilligen Probanden wohnten seit mindestens 5 Jahren in zwei benachbarten mittelfränkischen Gemeinden in Deutschland. Sie wurden auf Basis der gemessenen Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zwei Vergleichsgruppen zugeteilt, eine Versuchsgruppe (Gruppe V) und eine Kontroll-Gruppe (Gruppe C).

Die Wohnumgebung der Probanden wurde hinsichtlich EMF-Immissionen (niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder sowie hochfrequente Wellen) ausführlich vermessen. Es wurden die Schlafplätze der Probanden als Ort mit der längsten Aufenthaltsdauer im Haus und somit „repräsentativsten“ Expositionssituation ausführlich dokumentiert und zwischen den Orten (Personengruppen) verglichen.

Um nicht nur die chronische Exposition zwischen den Gruppen V und C, sondern auch akute Einflüsse der EMF-Exposition bei einzelnen Personen zu untersuchen, wurden die Probanden beider Gruppen in einem doppelt verblindeten Versuchsdesign mit EKG-Recordern für die Bestimmung der HRV (Herzratenvariabilität) ausgestattet. Zusätzlich wurden sie ebenfalls doppelt verblindet während 30 oder 60 Minuten dauernder Abschirmungen einem Konzentrationstest unterzogen. Für diese Abschirmexperimente wurde in einem Garten ein Pavillon mit mobiler Abschirm-Vorrichtung aufgebaut.

Studienprotokoll - Änderungen

Das Projekt wurde realisiert, so wie geplant und von der Ethikkommission bewilligt.

Eine Person schied aufgrund von während des Projektes bekannt gewordenen Herzrhythmus-Störungen vorzeitig aus. Je nach Fragestellung wurden die Daten aller 25 Personen oder abzüglich der Ausfälle ausgewertet.

Ergebnisse

Es wurden keinerlei Überschreitungen der Grenzwerte gemäß der deutschen 26. BImSchV festgestellt.

Die ausgewählten Orte und Personengruppen sind ähnlich strukturiert und darum gut vergleichbar bezüglich Lebensstil und Vorbelastungen. Alle Probanden lebten seit mehreren Jahren am jeweiligen Standort.

Die EMF im nieder- und hochfrequenten Bereich (16,7 Hz bis 6 GHz), von Bahnenergie-Versorgung, öffentlicher Energieversorgung und üblichen hochfrequenten Funkdiensten wurden gemessen, dokumentiert und statistisch zwischen den beiden Gruppen V und C verglichen. Ein signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen V und C war die Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Wellen, die bei der Gruppe V zum überwiegenden Teil von nur einer Basisstation ausging, während bei der Gruppe C zwar drei Senderstandorte, jedoch mit größerem Abstand zu den Wohnungen bestanden.

Im Bereich der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Wechselfelder, verursacht durch Stromleitungen und elektrische Geräte, bestanden keine signifikanten Unterschiede.

Die Kurzzeit-Abschirm-Tests zur Erfassung akuter Veränderungen wurden an Wochenenden (jeweils am Samstag und Sonntag) in einem Pavillon durchgeführt. Die während der Abschirmexperimente gemessenen Immissionen unterschieden sich unwesentlich von den in der Projektvorbereitungsphase gemessenen. Die Abschirmung wurde doppelt verblindet durchgeführt, weder die Probanden und deren Betreuer vor Ort, noch die Forscherteams, welche später die biologischen Fragestellungen untersuchten, hatten während der Datenanalyse Informationen darüber, ob die Abschirmung „an“ oder „aus“ war.

Die während der Kurzzeit-Abschirmexperimente erhobenen Daten und deren Auswertung sind in den Abschnitten 4 (Konzentrationstests) und 5 (HRV) beschrieben. Die der Langzeitexposition zurechenbaren Ergebnisse sind in den Abschnitten 5 und 6 (Zell-Genom) referiert.

Schlussfolgerung

Die Messungen der EMF (elektromagnetischen Felder) im häuslichen Umfeld belegen, dass die beiden Gruppen sich hinsichtlich der hochfrequenten EMF-Immissionen am Wohnort signifikant unterschieden. Die Gruppe V war vergleichsweise hoch exponiert, die Gruppe C niedrig. Weil die Gruppen in anderen Aspekten gut vergleichbar waren, sind die wissenschaftlichen Voraussetzungen erfüllt, mögliche Langzeitwirkungen langjähriger HF-EMF Exposition mit untersuchen.

Im Bereich der niederfrequenten Felder (NF-EMF-Exposition) gab es keine signifikanten Gruppenunterschiede. Die Gruppen waren gut vergleichbar und hinsichtlich der HF-EMF Exposition klar getrennt, es gab es keine Überschneidungen.

Der Vergleich der Ergebnisse biologischer Tests zwischen den Gruppen zeigt daher in der Gruppe V mögliche Langzeitwirkungen der HF-EMF-Exposition an.

Liste der verwendeten Fachausdrücke und Abkürzungen

$\mu\text{W}/\text{m}^2$	Mikrowatt pro Quadratmeter, Maßeinheit der hochfrequenten Leistungsflussdichte S , Maß für die Höhe der Immissionen in einem festen Verhältnis zur elektrischen Feldstärke E über die Beziehung $E = \sqrt{S} \sqrt{Z_0}$ mit $Z_0 = 377 \Omega$, Wellenwiderstand des Vakuums.
5G	5. Generation (dzt. letzter) Mobilfunkstandard, auch 5G-Standard
5G wide	im Frequenzbereich unter 3 GHz, mit konventionellen Sektorantennen, kein aktives Beamforming, Bandbreiten 10 - 20 MHz; Datenraten nur mäßig höher als bei LTE; in verschiedenen Frequenzbereichen zwischen 700 bis 2.170 MHz.
5G fast	im Frequenzbereich über 3 GHz, mit mMIMO-Antennen (massive MIMO), aktives Beamforming, Bandbreiten bis 100 MHz; sehr hohe Datenraten möglich, aktuell im Frequenzbereich 3.400 bis 3.700 MHz.
Abtastrate	Die Abtastrate, auch bekannt als Sampling-Rate, ist die Anzahl der Einzel-Messungen eines Signals pro Zeiteinheit.
Bikonische Antenne	Eine Halterung mit zwei konischen Antennen von gleicher Form und Größe, allerdings in entgegengesetzter Richtung angebracht. Während der Messungen wird die Antenne in verschiedenen Höhen und mit unterschiedlichen Polarisierungen geschwenkt. Damit sind die Messwerte vergleichbar jenen mit einer 3-dimensionalen Messantenne gewonnen.
DAB+	<i>Digital Audio Broadcasting</i> , digitaler Tonrundfunk (Radio) im Frequenzbereich von 174 bis 230 MHz.
Datenlogger	Datenerfassungsgerät oder Datenerfassungssystem.
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i> , Funkstandard für Schurlos-Festnetz-Telefone im Frequenzbereich von 1.880 bis 1.900 MHz.
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</i> digitaler Fernseh Rundfunk, im Frequenzbereich von 470 bis 690 MHz.
Emission	Im Kontext dieses Reports: das Aussenden von hochfrequenten EMF-Signalen.
Grundlast	Bei Mobilsendern wird zwischen immer mindestens vorhandener Emission/Immission (Grundlast), aktueller Emission/Immission (mit unterschiedlichen Auslastungsgraden zwischen Grundlast und Vollast) und maximaler Emission/Immission (Vollast) unterschieden.
GSM	Engl. " <i>Global System for Mobile Communication</i> ": Der 2. Mobilfunkstandard, auch 2G-Standard, eingeführt 1990 als „ <i>Groupe Spécial Mobile</i> “ mit Mobilfunksendern im Frequenzbereich von 935 bis 960 und 1.805 bis 1.880 MHz.
HF-EMF	Hochfrequente Felder des elektromagnetischen Spektrums, hier der Funktechnologien.

HRV	Herz-Raten-Variabilität. Eine Messmethode in der physiologischen Medizin zur Erfassung autonomer Körperfunktionen und der kardiovegetativen Regulation
Immission	Im Kontext dieses Reports: das Einwirken von hochfrequenten Signalen mit bestimmten Leistungsflussdichten an einem Ort.
MHz	Megahertz, Maßeinheit für die Frequenz, beschreibt die Anzahl der Schwingungen einer Welle pro Sekunde. 1 MHz = 1 Million Schwingungen pro Sekunde, 1 Gigahertz GHz = 1 Milliarde Schwingungen pro Sekunde.
LTE	engl.: <i>Long Term Evolution</i> , der 4. Mobilfunkstandard, auch 4G-Standard mit Mobilfunksendern in verschiedenen Frequenzbereichen um 700, 800, 900, 1.800, 2.100 und 2.600 MHz.
NF-EMF	Niederfrequente Felder des elektromagnetischen Spektrums, hier der 16,7 Hz Bahnenergieversorgung und der 50 Hz öffentlichen Energieversorgung.
RMS	<i>Root Mean Square</i> (Effektivwert). Der Effektivwert ist der quadratische Mittelwert einer zeitlich veränderlichen Größe, hier Spannungs- oder Stromgröße.
TETRA	engl. „Terrestrial Trunked Radio“ früher „Trans European Trunked Radio“ Standard für digitalen BOS-Funk (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben) mit Frequenzen um 400 MHz.
UKW	Tonrundfunk (FM-Radio) im Ultrakurzwellen-Bereich zwischen 87 und 108 MHz.
UMTS	engl. <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> , ein Mobilfunkstandard, auch 3G-Standard, in Deutschland seit 2003 mit Mobilfunksendern im Frequenzbereich von 2.110 bis 2.170 MHz. In Deutschland wurde der UMTS-Betrieb zum Ende 2021 eingestellt.
V/m	Volt pro Meter, Maß für die Stärke eines elektrischen Feldes.
Volllast	Höchste Sendeleistung bei Mobilfunksendern; (siehe auch „Grundlast“).
WLAN	engl.: <i>Wireless Local Area Network</i> , drahtloses lokales Netzwerk (z.B. in einer Wohnung oder einem Büro) zur Kommunikation digitaler Geräte per Funkverbindung, in der Regel mit sogenannten WLAN-Routern oder Access Points und ggf. Repeatern mit Frequenzen zwischen 2,4 und 2,5 GHz, und/oder 5,1-5,6 GHz Emissionen gemessen in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ oder V/m.

3.1 Einleitung / Hintergrund

In den letzten zwei Jahrzehnten wurden mobile Funkdienste und auf Funktechnologie basierte Kommunikationsdienste zügig ausgebaut. Damit die neue Technologie landesweit funktioniert, wurden flächendeckend Funksendeanlagen (Basisstationen) errichtet. Diese werden mit Frequenzen betrieben, die entweder dem öffentlichen Ton- und Fernseh Rundfunk vorbehalten sind, oder von staatlichen Einrichtungen (BOS = Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben wie Polizei, Rettungsdienste), oder von Firmen der Rundfunk- und Mobilfunkbranche betrieben werden. Der landesweite Ausbau der Mobilfunksysteme erfolgte ohne Untersuchung möglicher Langzeitfolgen der spezifischen Expositionssituation (Mobilfunksignale).

In der Geschichte der Menschheit kam es immer wieder zu Veränderungen der Umweltbedingungen und Anpassungen in der Regel über viele Jahre. Hingegen, der flächendeckende Ausbau der Mobiltelefonie erfolgte in vergleichsweise sehr kurzer Zeit. Nie zuvor wurde ein biologisch relevanter Umweltfaktor wie die Exposition zu hochfrequenten Feldern in weniger als einem Jahrzehnt flächendeckend installiert. Noch nie zuvor haben breite Menschenmassen sich freiwillig eine Quelle für hochfrequente elektromagnetische Felder – wie es Mobiltelefone sind – an den Kopf gehalten, am Körper getragen, oder wurden unfrei dem Umwelteinfluss im derzeit gegebenen Ausmaß ausgesetzt.

Es ist allgemein bekannt, dass hochfrequente elektromagnetische Felder durch Wasser absorbiert werden. Auf diesem physikalischen Prinzip basiert der Mikrowellenherd. Damit beim Einsatz der Funktechnologie oder bei Radaranwendungen die emittierten Mikrowellen keinen Hitzeschaden bei Menschen anrichten, wurden einschlägige Normen und Grenzwerte eingeführt, die bei Exposition zu hohen Intensitäten Wärme-Schäden verhindern.

Die Grenzwerte zur Unterbindung von Wärmeschäden basieren auf dem so genannten „thermischen Prinzip“. Allerdings, gibt es auch so genannte athermische Effekte. Im Jahr 2011 kam die IARC (International Association for Research on Cancer) zur Erkenntnis, dass die Langzeit-Exposition mit Grenzwert-gerechten hochfrequenten Wellen ein „mögliches Krebsrisiko“ in sich birgt (Baan et al., 2011). Nach dieser Einschätzung der IARC im Jahr untermauern später publizierte Tierstudien (Wyde et al., 2016; Falcioni et al., 2018; Melnick, 2019; Vornoli et al., 2019) die Forderung nach genauerer Untersuchung der Wirkzusammenhänge.

Um biologische Wirkungen zu untersuchen, sind mehrere Aspekte der Exposition von Interesse:

- Intensität im Sinne von Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte, die Begrenzung der Expositions-Feldstärke (und somit Gewebeerwärmung) erfolgt gemäß der Grenzwerte.
- Dosis als Leistungsflussdichte, oder besser: Dosis als Leistungsflussdichte x Zeitdauer (Stunden, Tage bis Jahre). Allerdings, für den Parameter „Zeit“ (protrahierte Exposition) existieren im Zusammenhang mit HF-EMF keine offiziellen Grenzwerte.
- Im Falle festgestellter Wirkungen: Wirkdosis, bzw. Wirkschwelle (engl. NOEL, No Observed Effect Level).

Einflussfaktoren wie Modulation, kontinuierliche oder gepulste Exposition, und insbesondere die Zeitdauer mit der Möglichkeit der Akkumulation (Anhäufung) kleinerer Effekte sind hinsichtlich der möglichen biologischen Folgen der Exposition mit elektromagnetischen Feldern bisher kaum systematisch untersucht. Beispielsweise kann eine Exposition mit Tabakrauch für Minuten oder Tage keinen Lungenkrebs auslösen, das kann nur die chronische Exposition über Jahre hinweg. Beispielsweise sind viele Inhaltsstoffe von Nahrungsmitteln in kleinen Mengen genossen harmlos, aber der regelmäßig überdurchschnittliche Konsum ist mit dem Auftreten von Krankheiten wie Diabetes bis hin zu Krebserkrankungen assoziiert.

Bei der landesweiten Errichtung von Mobilfunk-Infrastruktur werden typischerweise die auf die Feldstärke ausgerichteten Grenzwerte zur Risiko-Kontrolle herangezogen, die Zeitkomponente der Exposition wird nicht berücksichtigt.

Nachdem das ATHEM-2 Projekt Hinweise lieferte, dass bei der Exposition zu HF-EMF die Anreicherung kleiner biologischer Veränderungen über die Zeit eine Rolle spielt (Molla-Djafari et al., 2016), fokussiert dieser Teilbericht von ATHEM-3 darauf, die Grundlagen für die fundierte Untersuchung möglicher biologischer Folgen der langjährigen Exposition zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern zu schaffen.

3.2 Fragestellungen und Projekt-Ziele

Die Ziele des Teilprojektes sind:

- Zuordnung der Personen, je nach Höhe der Exposition im häuslichen Umfeld in Vergleichsgruppen, für doppelt verblindete physiologische und zellgenetische Tests.
- Objektive Bestimmung der Immissionen von EMF im Schlafbereich (Langzeitexposition), und während der Abschirmtests (Kurzzeitexposition).
- Durchführung von Abschirmexperimenten für Konzentrationstests unter aktueller oder geschirmter Hochfrequenz-Immission.
- Dokumentation der EMF Expositionen zur Korrelation mit den parallel erhobenen biologischen Parametern. Siehe dazu die Teilprojekte:
 - B. Konzentrationstests (Abschnitt 4)
Bestimmung der Konzentrationsfähigkeit unter relativ hoher (ungeschirmter) und relativ niedriger (geschirmter) HF-EMF Exposition
 - C. HRV-Analyse (Abschnitt 5)
- Bestimmung der Herz-Raten-Variabilität (HRV), als physiologischer Parameter zum Stresserleben und der Erholungsqualität, besonders während des Schlafes.
 - D. Zell-Genom (Abschnitt 6)
Bestimmung spezifischer Laborparameter zur Dokumentation von oxidativem Zellstress und Veränderungen an der DNA (Erbsubstanz).

3.3 Methodik

Ein geeignetes Gebiet für die wissenschaftliche Untersuchung der Fragestellung über „mögliche Langzeitwirkungen chronischer Exposition“ fand sich in zwei benachbarten Gemeinden in Unterfranken (Deutschland). Beide Gemeinden weisen einen ähnlich ländlichen Charakter auf, charakterisiert durch freistehende Einfamilienhäuser.

In einem Wohngebiet befand sich eine Mobilfunksendeanlage, die strahlungstechnisch dominant war. Die Abstände zu den untersuchten Wohnungen lagen zwischen 75 und 160 m. Die Probanden aus diesem Ort wurden der Gruppe V (Versuchsgruppe) zugeteilt.

Das zweite Wohngebiet wurde von drei Mobilfunksendeanlagen versorgt. Deren Abstände zu den Wohnungen der Probanden lagen zwischen 490 und 1.020 m. Die Probanden aus diesem Ort wurden der Gruppe C (Control) zugeteilt.

3.3.1 Studien-Probanden

Es wurden knapp 70 Personen hinsichtlich einer möglichen Teilnahme an der Studie angesprochen. Die Interessenten wurden im Juni und Juli 2021 zu zwei Informations-Veranstaltungen eingeladen. In den Tagen nach den Informationsveranstaltungen wurden in einem persönlichen Gespräch mit dem Teil-Projektleiter alle offenen Fragen erörtert und die Rekrutierung abgeschlossen. Anschließend erfolgten Messungen der physikalischen Felder in den Häusern der Probanden.

Gemäß den Einschlusskriterien wurden 25 Probanden für die Teilnahme ausgewählt. Ein Proband beendete die Teilnahme vorzeitig aufgrund der entdeckten kardialen Situation. Die verbleibenden 24 Probanden verteilten sich auf zwei Expositionsbereiche bzw. Personengruppen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Probanden und deren Gruppenzuteilung.

Legende: AVG – Mittelwert WM in allen Tabellen; Std. – Standardabweichung; Mit Ausnahme des hoch signifikanten unterschiedlichen Abstands zur nächstgelegenen Mobilfunkbasisstation bestand kein besonderer Unterschied zwischen den Gruppen V und C.

	Gruppe V relativ hohe Immission		Gruppe C relativ niedrige Immission		Gesamt
Anzahl der Probanden	12		12		24
Geschlecht (M/W)	5 / 7		6 / 6		11 + 13
	Bereich von - bis	AVG ± Std.	Bereich von bis	AVG ± Std.	Signifikanz (t-Test)
Alter (Jahre)	39 – 62	52,8 ±7,3	24 – 63	47,8 ±13,6	P=0,266
Wohndauer (Jahre)	12 – 34	23±9	5 – 54	26±14	P=0,476
Abstand zur nächstgelegenen Mobilfunk- Basisstation (Meter)	75 - 160	125 ±35	490 – 1 020	767 ±241	P<0,001

Teilnahme-Kriterien

Die Auswahlkriterien für die Probanden waren:

- Aufenthaltsdauer am aktuellen Wohnort länger als 5 Jahre,
- Alter zwischen 18 und 70 Jahren,
- Schriftliche Zustimmung zu
 - EMF-Dokumentation im Wohnhaus und Umfeld,
 - biologisch- medizinischen Tests,
 - Verwertung der erhobenen personenbezogenen Daten,
 - EMF-Untersuchungen am Schlafplatz, durch Kurzzeitmessungen der elektrischen Wechselfelder, sowie Langzeitmessungen von magnetischen Wechselfeldern, und Hochfrequenz mit HF-Breitbandmessgeräten und Datenloggern,
 - Teilnahme an zwei Abschirmexperimenten,
 - Tragen eines 24-Stunden EKGs mit Datenaufzeichnung für Analysen der Herz-Raten-Variabilität,
 - Einmalige Blutabnahme für DNA-(Erbgut)-Untersuchungen.

Um Zustände auszuschließen, die biologische Messparameter beeinflussen können und um vergleichbare Personen-Gruppen zu erhalten, wurden folgende Ausschlusskriterien angewandt:

- Krebsbehandlung in den letzten 12 Monaten,
- Tragen eines Herzschrittmachers oder Defibrillators,
- Herzrhythmusstörung, medikamentös behandelt,
- Bluthochdruck-Therapie mit Beta-Blockern,
- medikamentös behandelte Depression in den letzten 12 Wochen,
- Drogenabusus durch Alkohol, Zigaretten oder andere Substanzen,
- eine akute oder chronische psychiatrische Erkrankung,
- eine akute fieberhafte Erkrankung, erhöhte Temperatur,
- die gleichzeitige Teilnahme an einer weiteren medizinischen Studie.

3.3.2 Studien-Equipment

Messgeräte

Die Messungen der EMF-Immissionen erfolgten mit folgenden Geräten:

Elektrische Wechselfelder EWF

Die Messungen der elektrischen Wechselfelder im Frequenzbereich zwischen 30 und 2.000 Hz wurden mit einer dreidimensionalen, potentialfreien E-Feldsonde und dem zugehörigen Basisgerät EFA 3 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Deutschland) mit RMS-Bewertung durchgeführt (Seriennummer SN D 0117).

Magnetische Wechselfelder MWF

Es erfolgten dreidimensionale Messungen der magnetischen Wechselfelder mit Datenloggern MLog3D (Merkel Messtechnik) im Frequenzbereich von 16 Hz und 50 - 2.000 Hz und EMLog2 (ESTEC) im Frequenzbereich von 5 - 30 Hz und 37 - 2.000 Hz. Die Seriennummern sind in der Messdokumentation hinterlegt.

Hochfrequente elektromagnetische Felder HF-EMF

Es erfolgten frequenzselektive Messungen der einzelnen Funkdienste mit einem HF-Spektrumanalysator und bikonischen Antennen.

- Spektrumanalysator von Rohde & Schwarz, FSL 6, 9 kHz - 6 GHz
Seriennummer 10 04 23
- Messantennen Schwarzbeck
 - EFS 9218 9 kHz - 300 MHz, Seriennummer 102
 - SBA 9113-B 80 MHz - 3 GHz, Seriennummer 362
 - USLP 9143 250 MHz - 6 GHz, Seriennummer 198.
- Antennenkabel Schwarzbeck AK 9513 mit 3 m Länge, Seriennummer 161030

Während der Tests im Pavillon wurde mit Hilfe von Remote Control der Spektrumanalysator von einem Notebook aus gesteuert. Die Software Active Presenter von Atomi Systems ermöglichte das Aufzeichnen der Messwerte der hochfrequenten Immissionen vom Display des Notebooks.

HF-Breitbandmessgeräte mit Datenloggern wurden eingesetzt:

- An den Schlafplätzen für die Langzeitmessungen.
- Im Pavillon während der jeweils zweistündigen Testphasen.

Hierbei handelte es sich um das HF59B mit UBB-Antenne von Gigahertz-Solutions und den Anschluss via ASB3-Adapter an die Datenlogger EMLog2s von ESTEC für den Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz.

Frequenzbereiche der Geräte:

- HF59B 27 MHz - 2,5 GHz
- UBB-Antenne 27 MHz - 3,3 GHz

Qualitätsmanagement

Die Messgeräte – mit Ausnahme der HF-Breitbandmessgeräte – unterliegen regelmäßigen Maßnahmen der Qualitätssicherung wie Funktionstests, Gerätevergleiche und

Kalibrierungen. Zusätzlich beteiligt sich der Autor einmal jährlich an Ringmessungen. Die Seriennummern sind beim Autor hinterlegt.

3.3.3 Pavillon für experimentelle Hochfrequenz-Abschirmung

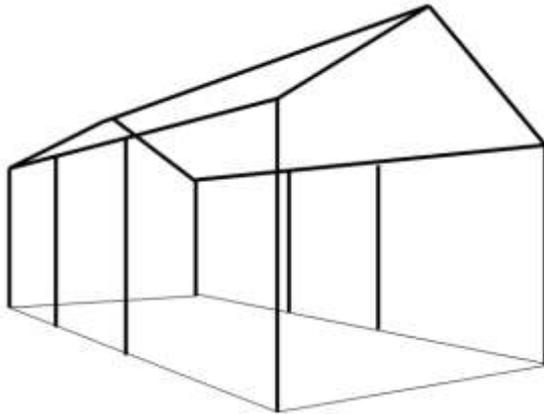
Für experimentelle Kurzzeit-Abschirmungen wurde in einem Garten in ca. 115 m Abstand zur Mobilfunkbasisstation und zwischen zwei Hauptstrahlrichtungen der Sektorantennen der naheliegenden Mobilfunkstation ein Pavillon errichtet.

Konstruktion und Aufbau

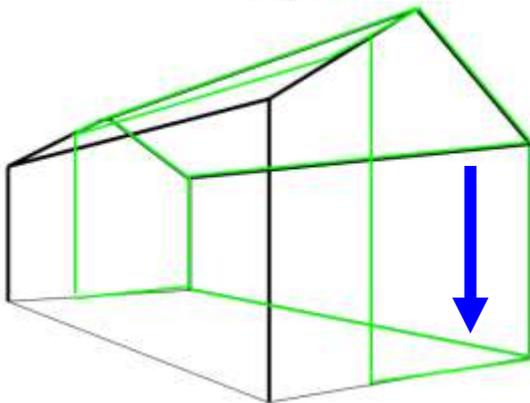
Die Abmessungen des Pavillons betragen 3 m Breite und 6 m Länge bei einer seitlichen Höhe von 2 m und einer Firsthöhe von 2,9 m. Das Grundgerüst des Pavillons war vom Typ eines Partyzeltes mit einer Kunststoffbedachung (Abbildung 3-1).

Im Pavillon wurden über die gesamte Länge 6 Sitzplätze in gleichmäßigem Abstand verteilt. Da der Pavillon im rechten Winkel zur Einstrahlrichtung positioniert wurde, waren die Abstände der 6 Sitzplätze zur Mobilfunksendeanlage gleich (Abbildung 3-2).

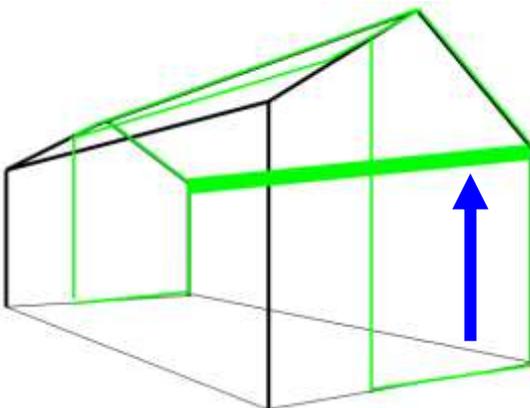
Die der nächsten Mobilfunkantenne zugewandte Längsseite des Pavillons wurde mit einem die Hochfrequenz dämpfenden beweglichen Abschirmstoff versehen. Fest abgeschirmt wurden die beiden Giebelseiten zu je ca. 70 %, eine komplette Dachseite sowie 30 % der angrenzenden anderen Dachfläche. Die andere Längsseite des Pavillons diente als Zugang zu den Sitzplätzen und zur Frischluftzufuhr bzw. Zirkulation bei hohen Umgebungstemperaturen.



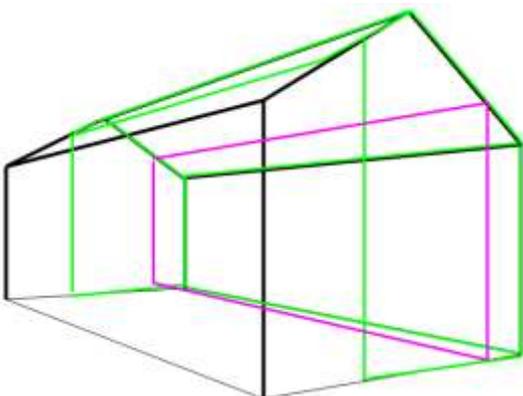
Grundgestell des 3x6 m Pavillon



Grundgestell des 3x6 m Pavillon mit **Abschirmtextil** (mit grünen Linien umrandet) an rechter Seitenwand + rechte Dachfläche + 30 % der linken Dachfläche + 70 % der beiden Stirnseiten, Abb. tlw. ohne seitliche Stützen rechts und links
Abschirmvorhang auf der Längsseite „**UNTEN**“



Wie zuvor, jedoch Abschirmvorhang auf der Längsseite „**OBEN**“



Wie zuvor, jedoch zusätzlich mit **schwarzem Sichtschutz** (blickdichter Vorhangstoff, mit magenta Linien umrandet)

Abbildung 3-1: Konstruktions-Skizze Pavillon.
Mit abschirmenden festen Flächen und einer beweglichen Fläche (Abschirm-Textil).

Die Probanden saßen mit dem Rücken zu einem schwarzen Sichtschutz (blickdichter Vorhangstoff). Hinter dem Sichtschutz war der mobile Hochfrequenz-dämpfender Abschirmstoff angebracht, der – wenn gesenkt – die Exposition der Probanden reduzierte. Der Abschirmvorhang war an der oberen Kante (Traufhöhe) einer Längsseite des Pavillons innen so befestigt, dass er leicht hochgehoben und bis auf den Boden abgesenkt werden konnte (Abbildung 3-2).



Abbildung 3-2: Realisierter Pavillon mit Stühlen für die Probanden.
Links: Stuhldreie vor schwarzem Sichtschutz;
Rechts: Raum zwischen dem Sichtschutz und dem schirmenden Vorhang, Der Pfeil bezeichnet dessen Position „unten“.

Zwischen dem Abschirmstoff an der äußeren Längsseite und dem parallel dazu aufgehängten schwarzen blickdichten Sichtschutz bestand ein Abstand von ca. 60 cm. In diesem Bereich war eine bikonische Antenne für den Frequenzbereich von 80 MHz bis 3 GHz auf einem Stativ positioniert (Abbildung 3-3).

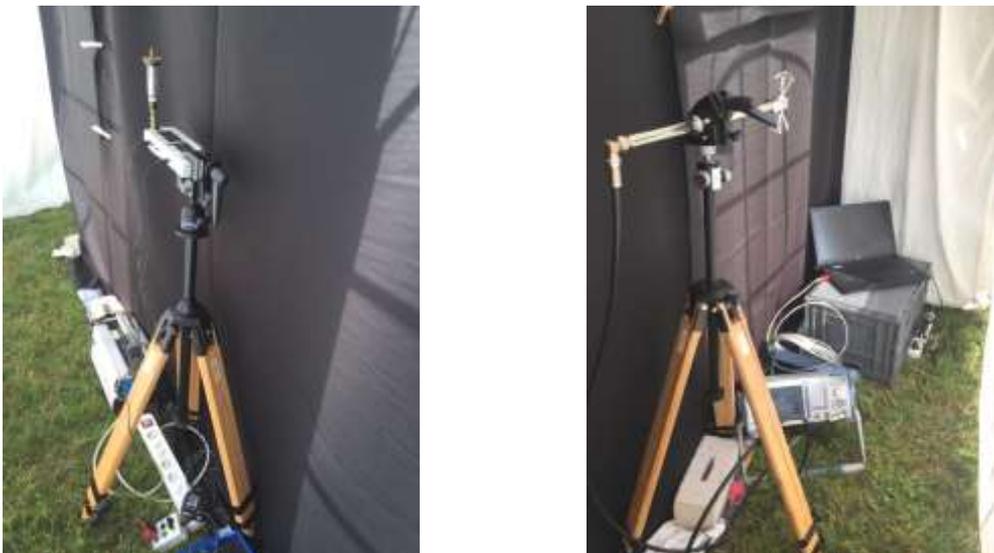


Abbildung 3-3: Messvorrichtungen zwischen Sichtschutz und Abschirmvorhang.
Links: HF- Breitbandmessung mit Datenlogger;
Rechts: HF-Spektrumanalyse mit Fernsteuerung und Videoaufzeichnung über Notebook.

Die Antenne war an einem HF-Spektrumanalysator angeschlossen. Über ein LAN-Kabel erfolgte eine Verbindung zu einem Notebook und Remote Control Steuerung. Der angezeigte Frequenzbereich betrug 790 bis 965 MHz. Er umfasste somit die beiden dominanten Frequenzbereiche von LTE 800 und GSM/LTE 900.

Zusätzlich wurde ein HF-Breitbandmessgerät HF59B mit horizontal isotroper UBB-Antenne mit einem Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz auf einem weiteren Stativ befestigt. Die der Leistungsflussdichte proportionale Antennenspannung wurde als Summenwert über einen separaten Datenlogger aufgezeichnet.

An den Sitzplätzen der Probanden waren unter 1 V/m elektrische Wechselfelder vorhanden. Die magnetischen Wechselfelder lagen in der Spitze unter 10 nT bei 16,7 Hz und unter 50 nT bei 50 Hz.

Eine Überprüfung der Sitzplätze in Bezug auf Hochfrequenzimmissionen der Mobilfunk-sendeanlage ergab mittels Hochfrequenz-Spektrumanalyse nahezu identische Immissionswerte an allen Plätzen (Abbildung 3-4).

Kontrolle der Vorhang-Abschirmwirkung

Das Absenken des (die Hochfrequenz dämpfenden) textilen Abschirmvorhangs (Swiss Shield Naturell, Firma YSHIELD) reduzierte die Strahlungsdichte bei LTE 800 ca. um 10 dB (das entspricht ca. 90 % Schirmwirkung) und bei GSM 900 um 4 dB (das entspricht ca. 75% Schirmwirkung). Der Abschirmvorhang selbst hat unter Laborbedingungen eine Dämpfung von 40 dB, entsprechend einer Reduzierung um den Faktor 10. Allerdings war der Pavillon auf einer Seite offen, um bei sommerlichen Temperaturen einen gewissen Luftzug zu ermöglichen. Die Abschirmung war nur zu etwa 70 % ausgeführt, das erlaubt Reflexionen durch Bauwerke in der Umgebung in den Pavillon hinein.

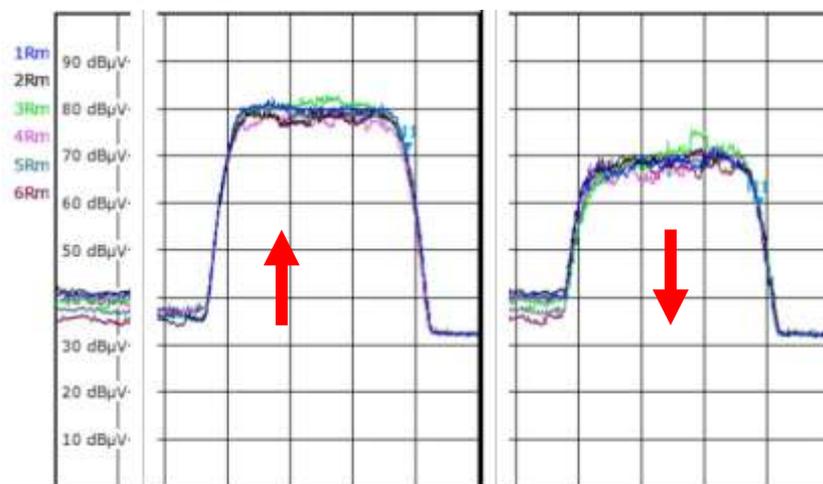


Abbildung 3-4: Abschirmwirkung im Frequenzbereich Telekom LTE 816 MHz. Elektrische Spannung an der Messantenne an den 6 Sitzplätzen (farbige Linien); die Pfeile weisen auf die Vorhangposition während der Messung Links: Vorhang „oben“ (hohe Immission); Rechts: Vorhang „unten“ (niedrige Immission). Die dB Skala (Ordinate) ist logarithmisch. Die jeweilige Bildbreite (Abszisse) entspricht 17,5 MHz.

EMF-Messungen im Pavillon

Elektrische Wechselfelder EWF

Alle sechs Sitzplätze der Probanden im Pavillon wurden bezüglich elektrischer Wechselfelder untersucht.

Magnetische Wechselfelder MWF

Im Bereich der sechs Sitzplätze der Probanden im Pavillon wurden Kurzzeitmessungen der magnetischen Wechselfelder durchgeführt.

Hochfrequente Felder (HF-EMF)

Mit dem HF-Spektrumanalysator wurden die Immissionen der Funkdienste analog zu Kapitel 3.4.3 im Pavillon vor der Durchführung der Tests überprüft. Dominant war eine LTE 800 Frequenz und deutlich schwächer eine GSM-Frequenz.

EMF-Messungen am Standort des Pavillons

Eine detaillierte Voruntersuchung hatte gezeigt, dass die dominanten Hochfrequenz-Immissionen Messungen (LTE 800) von der nächstgelegenen Mobilfunksendeanlage (Telekom) stammten. Weitere messbare Immissionen kamen von Telefónica, allerdings in der Leistungsflussdichte um 99% geringer. Vodafone war nicht vertreten. Zusätzlich waren vergleichsweise geringere Leistungsflussdichten von GSM 900 von dieser Basisstation vorhanden (etwa 5 % der LTE 800 Leistungsflussdichten). Aus diesem Grunde wurden die Hochfrequenzimmissionen der Frequenzen von 800 und 900 MHz mit einem HF-Spektrumanalysator während der jeweils 2-stündigen experimentellen Abschirm-Tests erfasst und aufgezeichnet.

Tabelle 3-2: Leistungsflussdichten und elektrische Feldstärken im Pavillon.

Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$								
GSM		GSM		UMTS	LTE		LTE	
Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast	aktuell	Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast
RMS		Peak		Peak	RMS		Peak	
637	2.550	803	3.210	2.263	2.659	10.638	26.595	106.379

elektrische Feldstärke in mV/m								
GSM		GSM		UMTS	LTE		LTE	
Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast	aktuell	Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast
RMS		Peak		Peak	RMS		Peak	
490	980	550	1.100	924	1.001	2.003	3.166	6.333

Zusätzlich wurde der Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz mit einem HF-Breitbandmessgerät erfasst und mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Für diese Messungen wurde ein nicht kalibriertes Messgerät eingesetzt, die Messungen während der Intervention dienten ausschließlich der Kontrolle, ob das „Abschirmtextil - oben“ oder „unten“ war. Die Werte in den relevanten Grafiken sind als Spannung des Summensignals der HF-Immissionen dargestellt (Abbildung 3-5).

Abschirmkontrolle

Mit dem HF-Spektrumanalysator wurden die LTE 800 und GSM/LTE 900 Signale gemessen und mit fortlaufender Aufzeichnung erfasst. Parallel dazu erfolgte eine Breitband-Messung der hochfrequenten Signale ohne Filter im Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz (Abbildung 3-5).

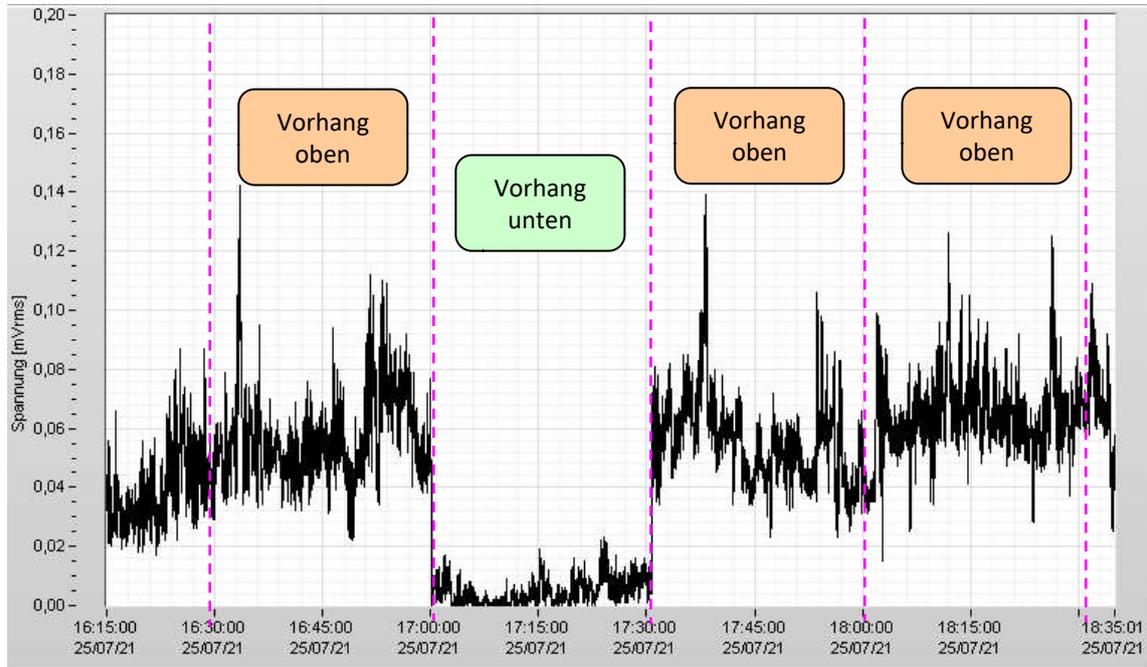


Abbildung 3-5: HF Breitband-Messung während der Abschirm-Experimente. Je nach Position des Abschirmvorhangs ist die Exposition der Probanden im Pavillon relativ hoch oder niedrig. Ausgangsspannung bei HF-Breitbandmessgerät mit Abschirmvorhang „unten“ (relativ niedrige Mobilfunkexposition) bzw. „oben“ (relativ hohe Mobilfunkexposition) während der 4 x 30 min Testzeiten am 25.07.21 von 16:15-18:35 Uhr

3.3.4 Kurzzeit-Abschirm-Tests im Pavillon

Zeitlicher Ablauf

Die jeweils 6 Probanden wurden pro Testdurchlauf von einem Teammitglied betreut, sie bekamen vorab das jeweilige Prozedere erläutert. Die Abfolge war:

- HRV-Gerät am ersten Testtag anlegen.
- Ca. 30 min Zeit für Akklimatisation, Gespräche mit anderen Probanden.
- Platz nehmen auf den Stühlen mit dem Rücken zum schwarzen Vorhangstoff und mit Rücken zur Mobilfunkantenne.
- Beginn der 4 Testphasen zu je 30 Minuten.
- In den letzten 5 Minuten jeder 30 Minutenphase wurde ein d2-R-Konzentrationstest durchgeführt.
- Nach jeder 30-Minuten-Phase wurde das Abschirm-Textil umgebaut, oder "Schein-umgebaut" (= belassen, Abbildung 3-6).

	Position des Abschirmvorhangs und Expositionsdauer			
Abfolge 1	oben	unten	oben	oben
Abfolge 2	unten	oben	unten	unten
Dauer	30 Minuten	30 Minuten	2 x 30 = 60 Minuten	

Abbildung 3-6: Abfolge der Exposition im Pavillon unter experimenteller Abschirmung.

Es wurden an jedem Experimenttag jeweils 4 Testphasen zu je 30 min – insgesamt also 2 Stunden – durchgeführt. Die Probanden blieben während der gesamten Zeit auf ihren Plätzen.

Weder der Betreuer noch die Probanden konnten in den Umbauphasen erkennen, ob das Abschirmtextil nach „oben“ gehoben und fixiert oder nach „unten“ abgelassen wurde. Um das doppelblinde Versuchs-Design zu wahren, wurde der Vorhang nach jeweils 30 Minuten manipuliert, unabhängig davon, ob die Manipulation eine Änderung der Abschirmung bewirkte oder nicht. Um die Voraussetzungen für eine Doppelblindstudie zu gewährleisten, war die Kommunikation zwischen Probanden, Betreuer und Versuchsleiter auf ein Minimum beschränkt.

Um denkbare Gewöhnungseffekte und Tageszeiten zu berücksichtigen, wechselte die Abfolge an zwei aufeinander folgenden Tagen (Abbildung 3-6).

- Probanden der Gruppe 1 und 3: Samstagvormittag und Sonntagnachmittag
- Probanden der Gruppe 2 und 4. Samstagnachmittag und Sonntagvormittag

Die Abfolgen 1 und 2 (Abbildung 3-6) wurden abwechselnd angewandt, um denkbare Ergebnisverzerrungen durch Gewöhnungs- und Lerneffekte zu minimieren. Die Aufeinanderfolge von zwei gleichartigen Bedingungen erzeugte eine Phase von 60 Minuten Dauer, mit entweder relativ hoher oder niedriger (abgeschirmter) HF-Exposition.

Anlegen des HRV Datenloggers

Für eine Fragestellung des Teilprojektes C, betreffend die autonome Regulationsfähigkeit zwischen relativ hoch bzw. niedrig exponierten Personen, erfolgte das Anlegen eines HRV-Recorders am Morgen des ersten Experimenttages.

Mit den gleichen HRV-Recordern wurden akute Veränderungen der Aktivität autonomer Funktionen unter experimenteller Abschirmung für 30 oder 60 Minuten untersucht.

Die HRV-Auswertungen sind im Report des Teilprojektes ATHEM-3 C (HRV) beschrieben.

Konzentrations-Test während der Sitzung im Pavillon

Zur Beschäftigung und um die Aufmerksamkeit der Probanden zu fokussieren, wurde im Halb-Stunden-Takt der d2-R-Konzentrationstest durchgeführt. Ob der d2-R Test nach einer kurzfristigen Abschirmung eine veränderte Konzentrationsfähigkeit feststellen kann, ist Fragestellung des Teilreports "Konzentrationstests" (Abschnitt 4).

3.3.5 Gruppenbildung auf Basis physikalischer Messungen

Die Dokumentation der EWF - elektrische Wechselfelder, MWF - magnetische Wechselfelder, HF- Hochfrequente Wellen für den Schlafbereich wurde herangezogen um die Vergleichsgruppen zu charakterisieren:

- Gruppe C – Kontroll-Gruppe, niedrig exponiert
- Gruppe V – Versuchsgruppe, überdurchschnittlich hoch exponiert

Die Messwerte für den Schlafbereich wurden mit den biologischen Endpunkten zum autonomen Nervensystem (Abschnitt 5.3) und den zellgenetischen Blutuntersuchungen (Abschnitt 6) korreliert.

EMF-Messungen an Schlafplätzen

Elektrische Wechselfelder EWF

Für die Messung am Schlafplatz wurden im Sinne einer standardisierten Vorgangsweise in einem vorgegebenen Raster 9 Messpunkte gemäß den einschlägigen VDB- Richtlinien³ festgelegt (Abbildung 3-7).

Der untersuchte Frequenzbereich betrug 30 Hz bis 2 kHz, erfasst mit einem RMS-Detektor.

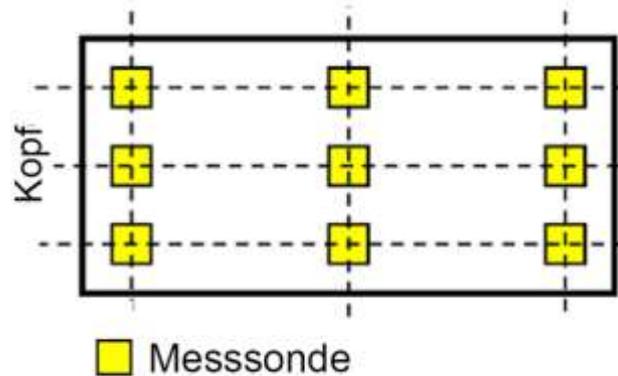


Abbildung 3-7: Prinzip einer 9-Punkt Messung am Schlafplatz.

Lage der 9 Messpunkte am Beispiel eines Einzelschlafplatzes, die äußeren Messpunkte waren jeweils ca. 10 cm von der Matratzenkante entfernt. Auf dem Bett waren weder eine Bettdecke noch ein Kopfkissen, damit für die Messungen eine gerade Fläche zur Verfügung stand. Doppelbetten wurden wie ein großes Bett und nicht wie 2 Einzelbetten gemessen.

Magnetische Wechselfelder MWF

Wie bei den elektrischen Feldern wurde auch hier als Messort der Schlafplatz herangezogen und im vorgegebenen Raster (Abbildung 3-7) neun Messpunkte gemäß VDB Richtlinien festgelegt.

Vor einer Langzeitmessung wurde durch eine 9-Punkt-Kurzzeitmessung analog der Messung der elektrischen Wechselfelder geprüft, ob es Feldquellen mit zeitlich konstanter Emission im oder rund um den Bettbereich gibt. Dazu gehören Geräte mit Trafo wie elektrische Wecker oder Uhren, Beatmungsgeräte, Geräte der Unterhaltungsbranche (Radio, TV, SAT, WLAN), Ladegeräte für Mobiltelefone usw. Ergebnis: Es ergaben sich keine dauerhaften Magnetfeldverursacher.

Im Anschluss an diese Überprüfungen wurden Langzeitaufzeichnungen von bis zu 7 Tagen mit Magnetfelddatenloggern durchgeführt. Es wurde je ein Logger – wenn möglich – unter dem Kopfbereich des Bettes des Probanden, ansonsten am Nachttisch positioniert. Sie erfassten getrennt die beiden Hauptfrequenzen von 16,7 Hz Bahnenergieversorgung und 50 Hz öffentliche Energieversorgung.

Logger vom Typ MLog3D: Die Abtastrate betrug zwei Sekunden. Es werden die magnetischen Flussdichten in den Frequenzbereichen 16,7 Hz und 50-2000 Hz erfasst (Auflösung: 10 nT).

³ VDB-Richtlinien zur Vorgehensweise bei baubiologischen Untersuchungen in Gebäuden, Band 1, 3. Auflage Oktober 2018, Kapitel A13

Logger vom Typ EMlog2: Die Abtastrate betrug eine Sekunde. Es werden die magnetischen Flussdichten in den Frequenzbereichen 5-30 Hz und 37-2000 Hz erfasst (Auflösung: 1 nT). Bei den Auswertungen der Langzeitmessung von maximal 7 Tagen wurde die gesamte Aufzeichnung auf Auffälligkeiten überprüft. Zur Detailauswertung kamen die Nachtphasen von 22:00 bis 6:00 Uhr der ersten 5 Tage.

Hochfrequente Felder (HF-EMF)

Mit dem HF-Spektrumanalysator wurden die Immissionen folgender Funkdienste überprüft:

- Tonrundfunk UKW
- DAB+
- TETRA
- DVB-T
- LTE 800
- 900 MHz: GSM und LTE
- 1800 MHz: GSM und LTE
- DECT
- 2100 MHz: UMTS⁴ und LTE
- WLAN 2,4 GHz
- 2600 MHz: LTE
- WLAN 5,3-5,6 GHz
- 5G 3,4-3,7 GHz

Die Messungen erfolgten gemäß VDB-Richtlinien⁵.

Die Hochfrequenz-Messwerte werden angegeben als:

- Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ z. B. zur Bewertung gemäß der EMF-Leitlinie der Europäischen Akademie für Umweltmedizin (Belyaev et al., 2016).
- Elektrische Feldstärken in mV/m z. B. zur Bewertung gemäß den ICNIRP-Guidelines (ICNIRP, 2020) bzw. der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutz-Gesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV) in Deutschland.⁶

Während der HF-Langzeitmessungen mit Datenloggern in den Schlafzimmern wurden allfällige Schwankungen der Hochfrequenzimmissionen während der Nachtphase erfasst.

⁴ Zum Zeitpunkt der Langzeit-Messungen an den Schlafplätzen und Abschirmexperimenten im Pavillon waren Anfang Juli die Sendeanlagen für UMTS von Telekom und Vodafone nicht mehr in Betrieb, sie waren am 30.06.2021 deutschlandweit abgeschaltet worden. Die Signale von Telefónica waren nur an den Messpunkten der Gruppe C mit relativ sehr geringen Feldstärken vorhanden. Die UMTS-Sendeanlagen von Telefónica wurden zum 31.12.2021 deutschlandweit abgeschaltet.

⁵ VDB Richtlinie, Zur Vorgehensweise bei baubiologischen Untersuchungen in Gebäuden, Band 1, 3. Auflage Oktober 2018, Kapitel A15

⁶ https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/

Parallele Erfassung der HRV

In allen Schlafbereichen der Probanden erfolgten die Messungen der elektrischen und magnetischen Wechselfelder sowie der Hochfrequenz wie zuvor beschrieben. Zusätzlich erfolgte im Anschluss an den Messtermin eine Erfassung der magnetischen Wechselfelder an je einem Punkt pro Schlafplatz für die Dauer von bis zu 7 Tagen.

Für die HRV-Messungen (Ergebnisse in Teilbericht C) wurde der HRV-Datenlogger von den Probanden für die Aufzeichnung der Herzaktivität mindestens 24 Stunden am Körper getragen. Parallel dazu erfolgte eine Langzeitaufzeichnung der HF-Immissionen:

- an repräsentativen Messpunkten, wodurch die Schwankungen von Mobilfunkimmissionen für mehrere Probanden in einem engeren räumlichen Bereich gleichzeitig kontrolliert werden konnten,
- mit einem HF-Breitbandmessgerät mit Datenlogger im Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz,
- zur Auswertung kam die Nachtphase von 22-6 Uhr (Teilbericht C).

3.3.6 Statistische Auswertung

Für die Gruppenvergleiche und Analysen wurde das Softwarepaket SPSS (V.27, IBM) und das Statistikprogramm BIAS (Version 11.12, epsilon Verlag, Frankfurt, Deutschland) verwendet. Zusätzlich zu den deskriptiven Analysen wurden bei normalverteilten Daten t-Tests für unabhängige oder gepaarte Stichproben, Varianzanalyse ANOVA, oder das Allgemeine Lineare Modell (GLM) für wiederholte Messungen angewendet. Bei nicht normal verteilten Datensätzen kamen der nicht parametrische Mann Whitney-Test (MWU) zur Anwendung. Im Falle von Mehrfachtests wurde eine Bonferroni-Korrektur für den Alpha-Fehler durchgeführt, wie in den entsprechenden Tabellen angegeben.

3.4 Ergebnisse

Die folgenden Auswertungen und Tabellen beziehen sich auf 24 Probanden.

Die Probanden mit der relativ höheren Mobilfunkimmission werden kollektiv als Gruppe V (Versuchsgruppe), die mit der relativ niedrigeren Mobilfunkimmission als Gruppe C (Control) bezeichnet.

3.4.1 Probanden

Tabelle 3-1 fasst die Merkmale der 24 Probanden, getrennt nach Gruppenzugehörigkeit (Gruppe V, Gruppe C) zusammen.

Die Probanden beider Gruppen zeigen eine ähnliche Verteilung von Geschlecht, Alter und Wohndauer. Der Abstand zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation erwies sich als signifikant unterschiedlich. Weil die räumlichen Abstände aber nicht zwingend mit der physikalischen Immission korrelieren, wurden an den jeweiligen Wohnorten die tatsächlich vorhandenen hochfrequenten und zusätzlich die niederfrequenten EMF-Immissionen gemessen.

3.4.2 Exposition an den Schlafplätzen

Elektrische Wechselfelder (EWF)

Die rund um den Schlafplatz unter Spannung stehenden elektrischen Leitungen weisen in der Regel eine relativ konstante Wechselspannung von ca. 230 Volt auf. Insofern sind die gemessenen elektrischen Feldstärken rund um die Uhr in nahezu unveränderter Intensität (Feldstärke) vorhanden. Die folgenden Tabellen zeigen die in den Schlafbereichen der Probanden erhobenen elektrischen Wechselfelder.

Tabelle 3-3: Elektrische Wechselfelder (V/m) im Schlafbereich.

Gelb: Gruppe V, grün: Gruppe C.

Die Intensitäten der elektrischen Wechselfelder sind in beiden Gruppen ähnlich verteilt.

Im rechten Tabellenblock erfolgt die Sortierung nach den maximalen Werten.

Legende: min – niedrigster Wert; max – höchster Wert; AVG – arithmetischer Mittelwert

Tln. ID	V/m		V/m		V/m		V/m	
	min	max	min	max	min	max	min	max
			V		C			
6	2	35			2	35	0	0
7	1	3	1	3			1	2
8	1	3	1	3			1	3
9	2	7			2	7	1	3
10	2	6			2	6	2	4
11	2	7			2	7	2	4
13	2	8			2	8	2	6
14	5	25	5	25			1	6
15	4	34			4	34	2	7
16	4	44			4	44	2	7
17	1	12	1	12			2	8
18	1	6	1	6			0	10
20	2	4			2	4	1	12
22	5	108	5	108			2	12
23	5	70	5	70			2	16
24	2	4	2	4			5	25
25	2	12			2	12	4	34
26	0	10	0	10			2	35
27	4	43	4	43			4	43
28	2	16			2	16	4	44
30	8	73			8	73	7	47
33	1	2	1	2			5	70
34	0	0			0	0	8	73
35	7	47	7	47			5	108
min	0	0	0	2	0	0	min	0
max	8	108	7	108	8	73	max	8
AVG	2,7	24,1	2,7	27,8	2,6	20,4	AVG	2,7

Tabelle 3-4: E-Wechselfelder (V/m) im Schlafbereich, statistischer Gruppenvergleich. Die elektrischen Wechselfelder unterschieden sich zwischen den Gruppen nicht signifikant.

Elektrische Felder	Gruppe V			Gruppe C			Signifikanz (t-Test)
	V/m	Bereich	MW	N	Bereich	MW± Std.	N
min (niedrigster Wert)	0,1 - 7,0	2,7 ±2,3	12	0,0 – 8,0	2,6 ±2,0	12	0,926
max. (höchster Wert)	2,2 - 108,0	27,8 ± 33,4	12	0,0 – 73,0	20,4 ±21,8	12	0,530

Magnetische Wechselfelder MWF

Weil magnetische Wechselfelder i. d. R. tageszeitlichen Schwankungen unterliegen, wurden sie in den Wohnbereichen der Probanden über einen Zeitraum von mindestens 5 (bis zu 7) Tagen aufgezeichnet. Der Focus lag auf den Frequenzbereichen 16,7 Hz (Bahnenergieversorgung) und 50 Hz (öffentliche Energieversorgung).

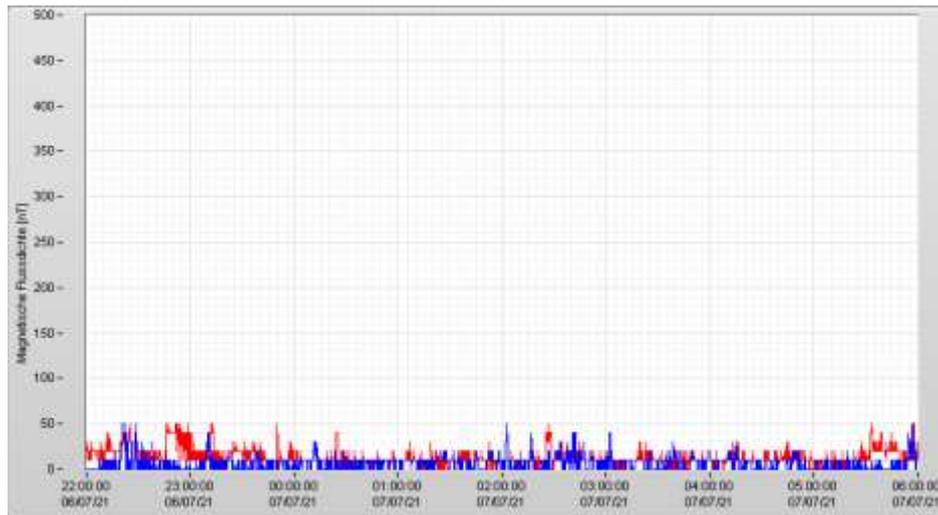
Die Probanden befanden sich typischerweise tagsüber außer Haus, deshalb lag der Schwerpunkt der Auswertungen auf den Nachtphasen. Es wurden in den Schlafräumen jeweils für den Zeitraum von 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr das Minimum, Maximum und der Mittelwert der magnetischen Wechselfelder dokumentiert.

Im Rahmen der Auswertung der Messungen zeigte sich, dass:

- der Wochentag keinen erkennbaren Einfluss auf das Messergebnis hatte,
- zwischen den einzelnen Nächten bei den jeweiligen Probanden keine oder nur minimalen Unterschiede auftraten.

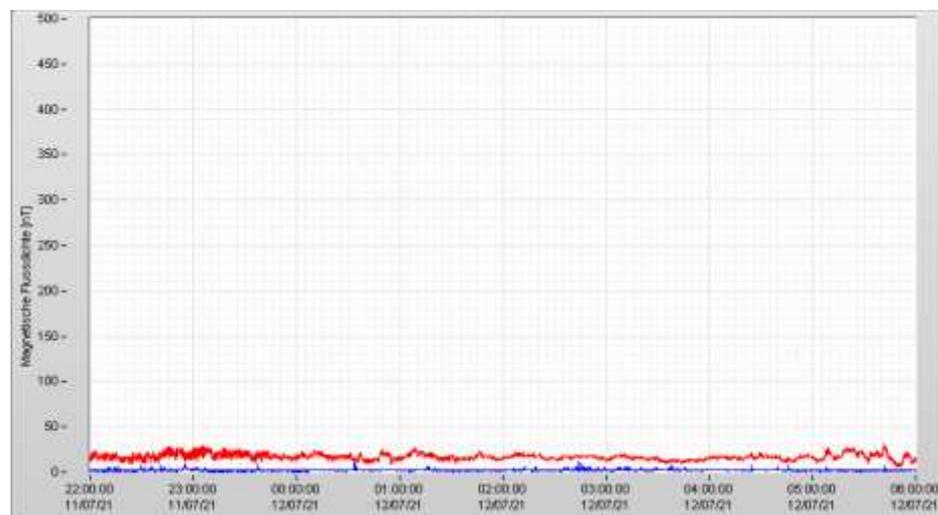
Um die Auswertung bei allen Probanden gleich zu halten, wurden jeweils die ersten fünf Nächte in die Analyse einbezogen und für die ersten fünf Nächte die Parameter Minimum, Maximum und Mittelwert ermittelt. Die Abbildung 3-8 zeigt drei typische Beispiele, die das Spektrum während der Nachtmessungen repräsentieren.

A



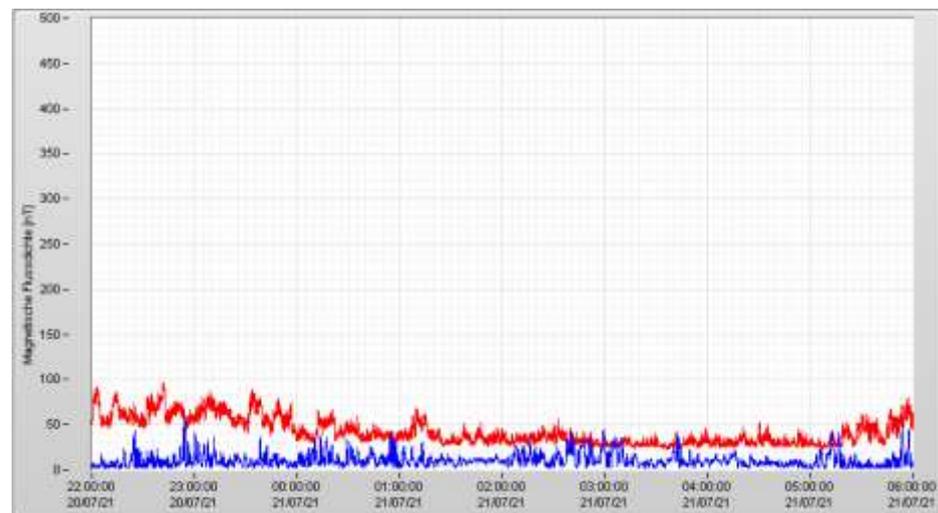
22 bis 6 Uhr
vom
06.-07.07.2021
Proband 9

B



22 bis 6 Uhr
vom
11.-12.7.2021
Proband 17

C



22 bis 6 Uhr
vom
20.-21.07.2021
Proband 27

Abbildung 3-8, Magnetische Wechselfelder während der Nachtphase von 22 bis 6 Uhr.

Magnetischen Flussdichten von Bahnenergieversorgung (16,7 Hz, blau); öffentliche Energieversorgung (50 Hz, rot).

Drei Beispiele A, B und C von 3 unterschiedlichen Schlafplätzen und Messtagen. Die Unterschiede der Wechselfeld-Immissionen waren durchwegs sehr gering.

Tabelle 3-5: Magnetische Wechselfelder der öffentlichen Energieversorgung. (50 Hz) Bahnenergieversorgung (16,7 Hz); Einzelwerte in nT.

Tln. ID	50 Hz			16,7 Hz		
	min	max	AVG	min	max	AVG
6	12	30	17,0	0	2	0,0
7	0	50	10,6	0	10	0,0
8	0	50	10,6	0	10	0,0
9	0	54	12,8	0	70	6,6
10	0	38	11,8	0	10	0,0
11	0	38	11,8	0	10	0,0
13	2	56	18,4	0	16	0,6
14	0	34	10,6	0	30	1,4
15	10	154	41,6	0	16	0,0
16	10	154	41,6	0	16	0,0
17	7	33	17,8	0	13	2,2
18	7	33	17,8	0	13	2,2
20	2	58	16,2	0	20	0,0
22	0	56	8,6	0	20	1,4
23	0	56	8,6	0	20	1,4
24	0	34	12,8	0	60	7,6
25	2	56	18,4	0	16	0,6
26	1	42	10,2	1	26	4,8
27	25	111	42,2	1	66	9,8
28	0	22	7,0	0	18	0,6
30	0	22	7,0	0	18	0,6
33	0	34	12,8	0	60	7,6
34	0	56	17,6	0	14	0,4
35	0	28	4,8	0	24	3,2
min	0	22	4,8	0	2	0,0
max	25	154	42,2	1	70	9,8
AVG	3	54	16,2	0	24	2,1

Die 50 Hz Felder der öffentlichen Energieversorgung und der 16,7 Hz Bahnenergieversorgung sind insgesamt sehr niedrig, sie weisen in beiden Probandengruppen ähnliche Werte auf (Tabelle 3-6, Tabelle 3-7).

Tabelle 3-6: Magnetische Wechselfelder, 50 Hz, öffentliche Energieversorgung, Werte in nT.
 Gemessen wurde an den Schlafplätzen während 5 Nächten von jeweils 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr. Die Gruppen V und C sind ähnlich, es besteht kein signifikanter Unterschied (MWU - Mann-Whitney U-Test).

Magnetische Felder (nT)	Gruppe V (N=12)		Gruppe C (N=12)		Unterschied (MWU)
	Bereich von - bis	Mittelwert	Bereich von - bis	Mittelwert	
50 Hz					P
Niedrigste Werte	0,0 – 24,8	3,3	0,0 – 12,0	3,2	0,438
Spitzen werte	27,8 – 111,4	46,9	22,0 - 154,0	61,5	0,383
Durchschnitt Mittelwerte	4,8 – 42,2	14,0	7,0 – 41,6	18,4	0,183

Tabelle 3-7: Magnetische Wechsel-Felder, 16,7 Hz, Bahnenergieversorgung, Werte in nT. Gemessen wurde an den Schlafplätzen während 5 Nächten von jeweils 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr. Die 16,7 Hz magnetischen Wechselfelder, verursacht durch die an beiden Orten vorbeiführende Eisenbahn, führt in beiden Gruppen zu keinen nennenswerten Hintergrundbelastungen.

Magnetische Felder (nT)	Gruppe V (N=12)		Gruppe C (N=12)		Unterschied (MWU)
	Bereich von - bis	Mittelwert	Bereich von - bis	Mittelwert	
16,7 Hz					P
Niedrigste Werte	0,0 – 1,0	0,1	0,0 – 0,0	0,0	0,149
Spitzen werte	10,0 – 65,6	29,2	2,0 – 70,0	18,8	0,147
Durchschnitt Mittelwerte	0,0 – 9,8	3,5	0,0 – 6,6	0,8	0,006

Hochfrequente EMF, HF-EMF

Die frequenzselektive Erfassung der Immissionen von Mobilfunksendeanlagen sowie schnurlosen Telefonen und WLAN erfolgte mit einem HF-Spektrumanalysator am 4., 9., und 10. Juli 2021. Dabei wurden 16 Frequenzbereiche bzw. Funkdienste gemessen. In einigen Frequenzbereichen waren keine Funksignale detektierbar. Von den 16 gemessenen Bereichen kamen 9 Frequenzbereiche bzw. deren 11 Funkdienste zur Auswertung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-8, Tabelle 3-9, und Tabelle 3-10 dargestellt. Es wurden keine Immissionen bei den folgenden 5 Funkdiensten bzw.-Frequenz-Bereichen ermittelt: UKW, DAB+, LTE 2600 MHz, WLAN 5,3-5,6 GHz und 5G bei 3,4-3,7 GHz. Die

Signale von TETRA-Behördenfunk bzw. DVB-T waren sehr niedrig (mit Peak Detektor unter $10 \mu\text{W}/\text{m}^2$, bzw. $30 \text{ mV}/\text{m}$).

Bei GSM wurde die Grundlast durch Ermittlung der dauersendenden Organisationskanäle BCCH ermittelt. Für die Volllast wurden zusätzliche 3 Verkehrskanäle TCH angenommen, was für die Grundlast 25 % der Volllast ergibt.

Bei LTE wurde der höchste Pegel des Signals als Volllastpegel angenommen und dann die Grundlast als 25 % der Volllast angenommen (berechnet).

Signale von schnurlosen Telefonen nach DECT-Standard und WLAN wurden mit dem höchsten Wert und Peak Detektor erfasst.

Tabelle 3-8: HF-Immissionen in den Schlafräumen, Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$.
Einzelmesswerte

TIn ID	Gruppe group	Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$ // RF density in $\mu\text{W}/\text{m}^2$												
		TETRA	DVB-T	GSM		GSM		UMTS	LTE		LTE		DECT	WLAN
				Grundlast	Voillast	Grundlast	Voillast	aktuell	Grundlast	Voillast	Grundlast	Voillast		
				Peak	Peak	RMS	Peak	Peak	RMS	Peak	Peak			
6	C	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	6	3	10
7	V	0	1	11	44	14	55	0	67	266	666	2.664	0	0
8	V	0	1	11	44	14	55	0	67	266	666	2.664	0	0
9	C	0	0	5	18	6	23	2	8	31	77	308	0	34
10	C	0	8	1	2	1	3	0	2	8	19	77	0	0
11	C	0	0	5	18	6	23	2	8	31	77	308	0	34
13	C	1	2	1	4	1	5	3	3	11	27	110	0	0
14	V	0	0	10	42	13	52	0	65	260	649	2.598	0	180
15	C	0	1	0	1	0	1	0	0	2	4	16	0	0
16	C	0	1	0	1	0	1	0	0	2	4	16	0	0
17	V	0	1	296	1.183	372	1.490	0	719	2.874	7.186	28.745	5	13
18	V	0	1	296	1.183	372	1.490	0	719	2.874	7.186	28.745	5	13
20	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	389	137
22	V	0	0	16	65	20	81	0	182	727	1.818	7.273	15	93
23	V	0	0	16	65	20	81	0	182	727	1.818	7.273	15	93
24	V	0	8	7	28	9	36	0	54	216	540	2.162	0	0
25	C	1	2	1	4	1	5	3	3	11	27	110	0	0
26	V	0	0	25	101	32	128	0	804	3.216	8.040	32.158	5	855
27	V	0	0	44	175	55	220	0	132	529	1.322	5.287	26	165
28	C	0	7	0	2	1	2	2	4	15	37	148	339	557
30	C	0	7	0	2	1	2	2	4	15	37	148	8	414
33	V	0	8	7	28	9	36	0	54	216	540	2.162	0	0
34	C	2	4	1	6	2	7	7	2	6	15	60	0	0
35	V	0	0	95	379	119	477	0	637	2.549	6.372	25.488	97	154
Min		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0
Max		2	8	296	1.183	372	1.490	7	804	3.216	8.040	32.158	389	855
Avg		0	2	35	141	45	178	1	155	619	1.547	6.189	38	115
50.-Perzentil		0	1	6	23	7	29	0	31	123	309	1.235	0	13
80.-Perzentil		0,2	5	20	79	25	100	2	182	727	1.818	7.273	15	158
95.-Perzentil		0,8	8	266	1.063	334	1.338	3	719	2.874	7.186	28.745	303	536

Tabelle 3-9: HF-Immissionen in den Schlafräumen, Elektrische Feldstärken in mV/m.
Einzelmesswerte

TIn ID	Gruppe group	elektrische Feldstärke in mV/m // electrical field strength in mV/m												
		TETRA	DVB-T	GSM		GSM		UMTS	LTE		LTE		DECT	WLAN 2,4 GHz
		Peak	Peak	Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast	Peak	Grundlast	Volllast	Grundlast	Volllast	Peak	Peak
				RMS		Peak			RMS		Peak			
6	C	2	0	4	7	4	8	1	8	15	24	48	34	61
7	V	3	19	64	129	72	144	1	158	317	501	1.002	0	0
8	V	3	19	64	129	72	144	1	158	317	501	1.002	0	0
9	C	7	0	41	82	46	92	29	54	108	170	341	0	113
10	C	4	56	14	28	16	32	1	27	54	85	170	0	0
11	C	7	0	41	82	46	92	29	54	108	170	341	0	113
13	C	17	29	20	39	22	44	32	32	64	102	204	0	0
14	V	2	8	63	125	70	141	1	156	313	495	990	0	260
15	C	2	22	8	15	9	17	1	12	24	39	77	0	0
16	C	2	22	8	15	9	17	1	12	24	39	77	0	0
17	V	1	21	334	668	375	749	1	521	1.041	1.646	3.292	42	70
18	V	1	21	334	668	375	749	1	521	1.041	1.646	3.292	42	70
20	C	7	0	2	5	3	5	1	7	13	21	42	383	227
22	V	4	9	78	156	88	175	1	262	524	828	1.656	76	187
23	V	4	9	78	156	88	175	1	262	524	828	1.656	76	187
24	V	4	54	52	103	58	116	1	143	285	451	903	0	0
25	C	17	29	20	39	22	44	32	32	64	102	204	0	0
26	V	1	10	98	195	110	219	1	551	1.101	1.741	3.482	44	568
27	V	2	9	128	257	144	288	1	223	446	706	1.412	99	249
28	C	11	53	13	26	15	29	26	37	75	118	236	358	458
30	C	11	53	13	26	15	29	26	37	75	118	236	54	395
33	V	4	54	52	103	58	116	1	143	285	451	903	0	0
34	C	26	39	23	46	26	52	50	24	48	75	150	0	0
35	V	2	10	189	378	212	424	1	490	980	1.550	3.100	191	241
Min		1	0	2	5	3	5	1	7	13	21	42	0	0
Max		26	56	334	668	375	749	50	551	1.101	1.741	3.482	383	568
Avg		9	29	115	231	130	259	18	242	483	764	1.527	119	208
50.-Perzentil		4	20	46	93	52	104	1	98	197	311	622	0	70
80.-Perzentil		8,6	44	86	172	96	193	27	262	524	828	1.656	76	244
95.-Perzentil		17,1	54	312	624	350	701	32	521	1.041	1.646	3.292	333	449

Tabelle 3-10: HF-Immissionen in den Schlafräumen; statistischer Gruppenvergleich.

Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$, es wurden Immissionen von vier externen Funkdiensten (TETRA, DVB-T, GSM, und LTE) und von zwei *Indoor* Quellen (DECT, WLAN) dokumentiert. Von den externen Funkdiensten sind Tetra und DVB-T zwar messbar, aber sehr gering. Die Immissionsquellen der Mobilfunk-spezifischen Signale (GSM, LTE) überlagern alle anderen um ein Vielfaches. Der Unterschied bei diesen Immissionen ist zwischen den beiden Gruppen V und C bei GSM signifikant und bei LTE hochsignifikant. Die statistische Effektgröße (Eta^2) ist bei den Mobilfunk-Immissionen (GSM und LTE) am größten.

Leistungsflussdichten ($\mu\text{W}/\text{m}^2$)	Gruppe V			Gruppe C			Statistischer Unterschied			Statistische Effektgröße	
	Bereich von - bis	Mittelwert	N	Bereich von - bis	Mittelwert	N	P (MWU)	P nach Bonferoni (N=8)	Bewertung	Eta ²	Bewertung
Tetra Peak	0,0 – 0,1	0,0	12	0,0 – 1,8	0,4	12	0,008	0,062	n.s.	0,189	Groß
DVB-T	0,2 – 7,7	1,7	12	0,0 – 8,2	2,8	12	0,562	1,000	n.s.	0,034	Mittel
GSM-Grundlast-RMS	7,1- 295,8	69,5	12	0,0 – 4,5	1,2	12	<0,001	<0,0001	Hoch Signifikant	0,178	Groß
GSM-Grundlast Peak	8,9 – 372,4	87,5	12	0,0 – 5,7	1,5	12	<0,001	<0,001	Hoch Signifikant	0,178	Groß
LTE Grundlast RMS	54,0 – 804,0	306,7	12	0,1 – 7,7	2,7	12	<0,001	<0,001	Hoch Signifikant	0,344	Groß
LTE Grundlast Peak	540,5 – 8039,6	3.067,1	12	1,1 – 77,0	27,3	12	<0,001	<0,001	Hoch Signifikant	0,344	Groß
DECT Peak	0,0 – 97,2	14,1	12	0,0 – 388,7	61,6	12	0,345	1,00	n.s.	0,056	Mittel
WLAN Peak	0,0 – 855,4	130,4	12	0,0 - 557	98,8	12	0,401	1,00	n.s.	0,006	Klein

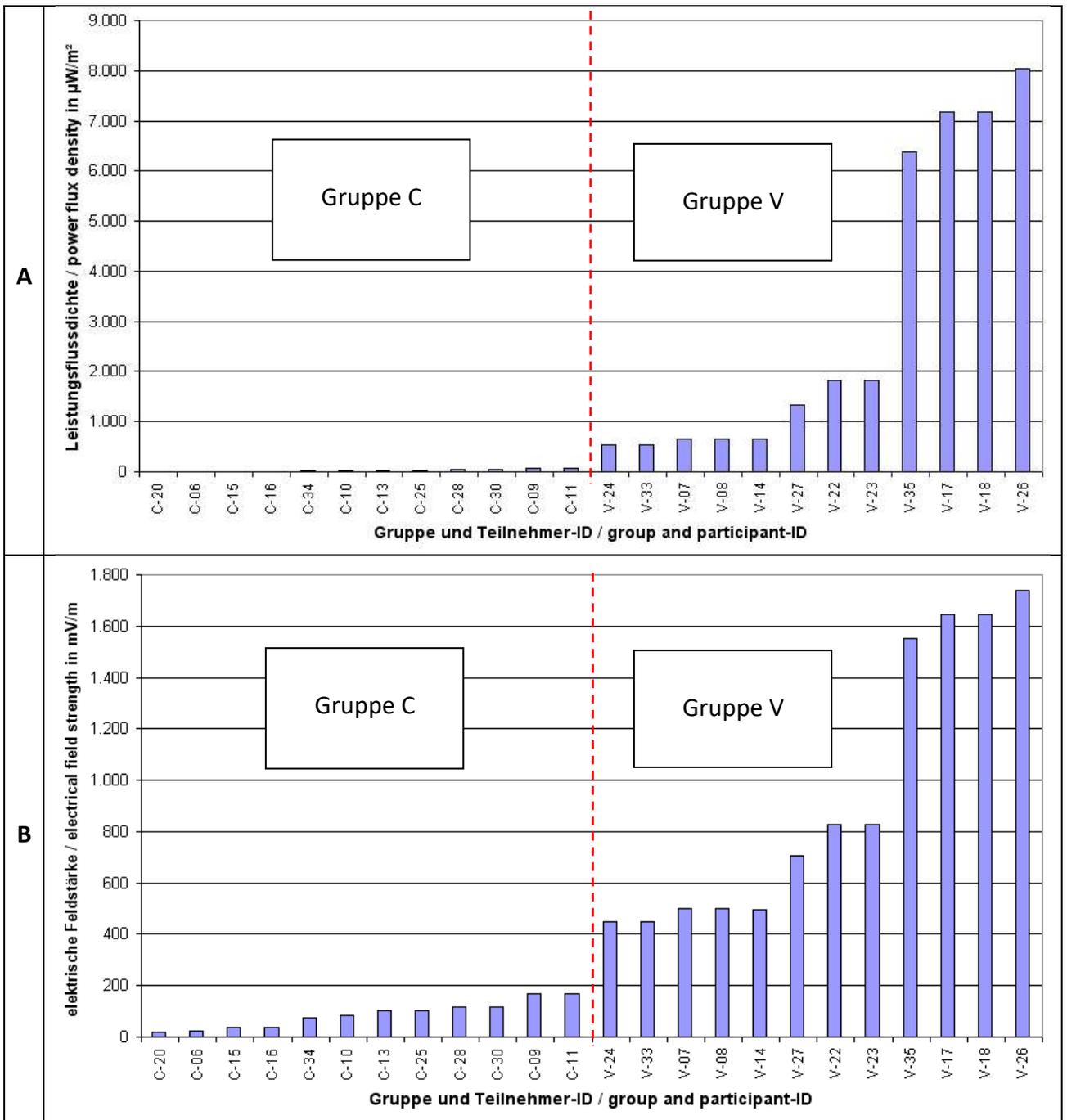


Abbildung 3-9: LTE-800 Grundlast in den Schlafräumen der Probanden (Gruppen C und V).

A: Leistungsfussdichte ($\mu\text{W}/\text{m}^2$), B: elektrische Feldstärke (mV/m)

In der Gruppe C liegen alle Werte unter $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ($200 \text{mV}/\text{m}$), während in der Gruppe V die Werte ohne Ausnahme um ein Vielfaches höher liegen; sie betragen zwischen 500 und $8.000 \mu\text{W}/\text{m}^2$ (400 und $1.750 \text{mV}/\text{m}$). Die Probanden 35, 17, 18, und 26 liegen im Quartil mit den höchsten Messwerten.

Die Immissionen von Schnurlos-Telefonen (DECT-Signale) sowie WLAN waren während der Messungen relativ konstant. Bei DECT lagen die PEAK-Werte zwischen 0 und 389 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [0 und 383 mV/m], im Mittel bei 38 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [119 mV/m]. 80 Prozent aller Werte lagen unter 15 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [76 mV/m]. Bei 13 Probanden gab es keine DECT-Signale.

Bei WLAN lagen die PEAK-Werte zwischen 0 und 855 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [0 und 569 mV/m], im Mittel bei 115 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [208 mV/m]. 80 Prozent aller Werte lagen unter 158 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [244 mV/m]. Bei 10 Probanden gab es keine WLAN-Signale.

Signale von UMTS wurden nur noch an 9 von 12 Schlafplätzen in der Gruppe mit relativ niedrigerer Mobilfunkimmission mit Leistungsflussdichten unter 10 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ [50 mV/m] (PEAK) ermittelt. Die Betreiber Telekom bzw. Vodafone hatten zum 30. Juni 2021 den Betrieb eingestellt, Telefónica stellte den Sendebetrieb zum 31.12.2021 ein.

Es wurden keine Immissionen bei den folgenden 5 Funkdiensten bzw. Frequenzen ermittelt: UKW (FM-Tonrundfunk), DAB+, LTE 2600 MHz, WLAN 5,3-5,6 GHz und 5G bei 3,4-3,7 GHz.

Weil die Immissionen von Mobilfunksendeanlagen aufgrund der Auslastung Schwankungen unterliegen, wurde zur Überprüfung der nächtlichen Situation in jener Nacht, in der die Probanden das HRV Gerät angelegt hatten, mit einem HF Breitbandmessgerät mit Datenlogger der Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz kontinuierlich erfasst.

Abbildung 3-10 zeigt eine 24 Stunden Kontrolle der Intensitätsschwankungen in der Umgebung eines Probanden mit relativ niedriger Mobilfunkimmission (Gruppe C) und dann den Detailzeitraum der Nachtphase von 22 bis 6 Uhr. In der Zeit von 23:06 bis 23:15 Uhr waren bei dieser Messung kurzzeitig Impulse vorhanden, deren Ursache nicht ermittelt werden konnte.

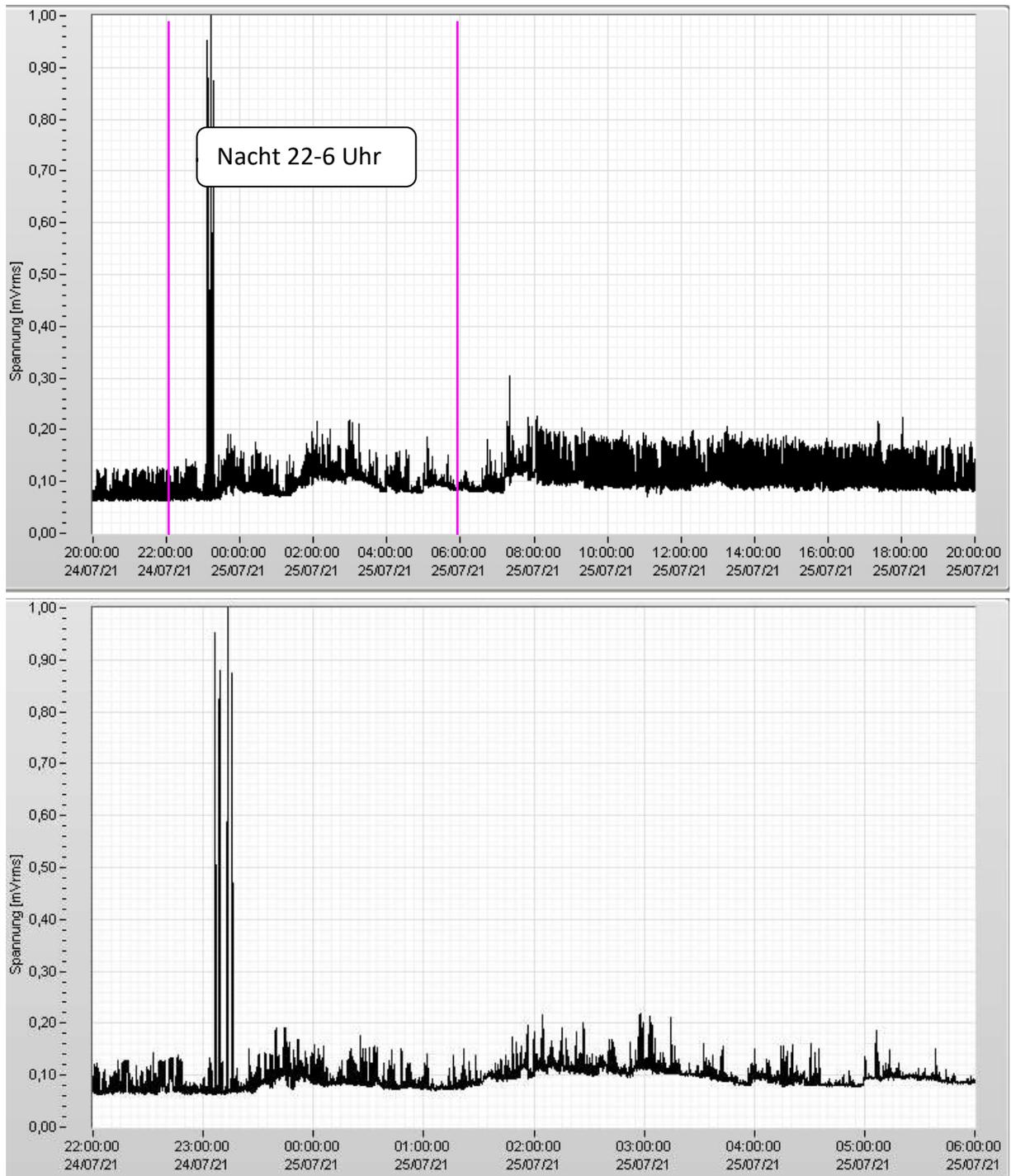


Abbildung 3-10: Beispiel einer HF Breitband-Messung, Gruppe C.
 Oben: Übersicht über 24 Stunden, Unten: 8 Stunden Ausschnitt der Schlafphase
 Ausgangsspannung am HF-Breitbandmessgerät. Mit Ausnahme der wenigen Peaks
 nach 23 Uhr ist der Pegel relativ gleichmäßig.

Abbildung 3-11 zeigt eine 24 Stunden Kontrolle der Intensitätsschwankungen in der Umgebung eines Probanden mit relativ höherer Mobilfunkimmission (Gruppe V)

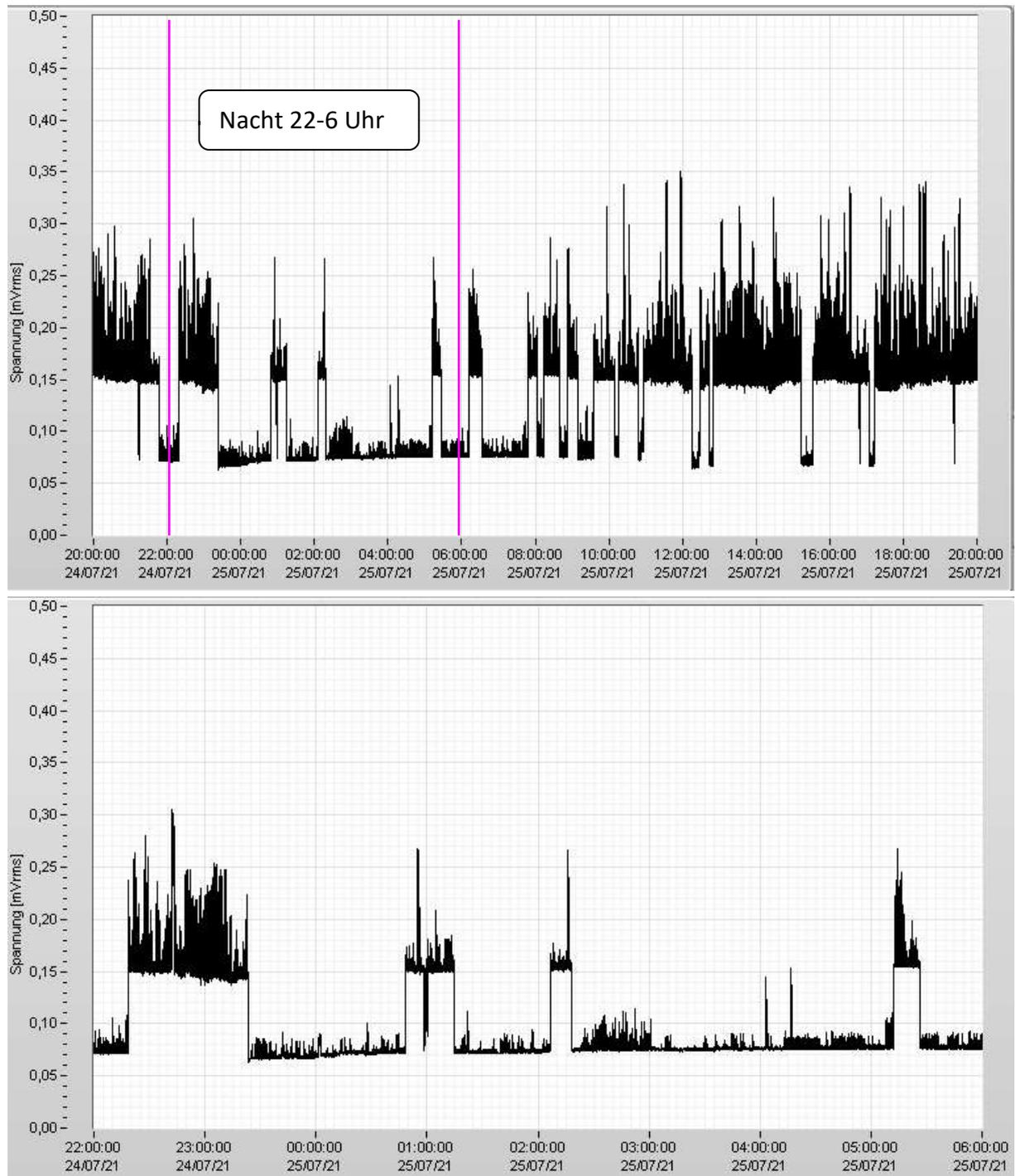


Abbildung 3-11: Beispiel einer HF Breitband-Messung, Gruppe V.
 Oben: Übersicht über 24 Stunden, Unten: 8 Stunden Ausschnitt der Schlafphase.
 Ausgangsspannung am HF-Breitbandmessgerät. Sowohl bei Tag als auch während der Nachtphase sind starke Schwankungen der Pegel erkennbar.

3.4.3 Exposition im Pavillon während experimenteller Abschirmung

Zur Ermittlung der Exposition während der Tests im Pavillon wurde eine kontinuierliche Erfassung der Mobilfunkmissionen im Frequenzbereich der dominanten Mobilfunksender von 790 bis 965 MHz mit einem HF-Spektrumanalysator mit Remote Steuerung via Notebook und Aufzeichnung des Bildschirms durchgeführt. In diesem Frequenzbereich waren die dominanten Signale von LTE 800 und GSM 900 der Telekom.

Parallel dazu wurden mit einem HF-Breitbandmessgerät alle Signale im Frequenzbereich von 27 MHz bis 2,5 GHz ermittelt und mit einem Datenlogger gespeichert.

Die Erfassung der Signale erfolgte im schmalen Gang zwischen dem Abschirmtextil an der Längsseite des Pavillons und dem schwarzen Vorhang (Abbildung 3-3).

Die Leistungsflussdichten (bei Grundlast = 25 % der Volllast) der nächstgelegenen Mobilfunksendeanlage betragen im Bereich der 6 Sitzplätze bei:

- GSM 900 gerundet 250 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ohne Abschirmvorhang und ca. 60 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ mit Abschirmvorhang,
- LTE 800 gerundet 7.420 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ ohne Abschirmvorhang und ca. 870 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ mit Abschirmvorhang.

Die 24 Probanden nahmen in Gruppen zu je 6 Personen an den Abschirmexperimenten im Pavillon teil. Jeder Proband wurde zweimal, jeweils an einem Vormittag und Nachmittag, einer Testserie im Pavillon unterzogen (Tabelle 3-11).

Tabelle 3-11: Testgruppen bei den experimentellen Abschirmungen im Pavillon. Um mögliche Gewöhnungseffekte und Außen-Einflüsse zu berücksichtigen, wurde zwischen den Gruppen die Abfolge der Tageszeiten systematisch gewechselt.

Testgruppe Tag	Datum	Tageszeit	Uhrzeit
1.1	24.07.2021	Vormittag	09:15 bis 11:45
1.2	25.07.2021	Nachmittag	16:15 bis 18:35
2.1	24.07.2021	Nachmittag	16:15 bis 18:45
2.2	25.07.2021	Vormittag	09:15 bis 11:45
3.1	31.07.2021	Vormittag	09:15 bis 11:45
3.2	01.08.2021	Nachmittag	14:15 bis 16:40
4.1	31.07.2021	Nachmittag	16:15 bis 18:45
4.2	01.08.2021	Vormittag	09:20 bis 11:50

Die folgenden Abbildungen zeigen die Expositionskontrolle (HF-Breitbandmessungen, Antennenspannung) während der experimentellen Abschirmungen für jeden Durchlauf.

1. Gruppe: 1. Testtag

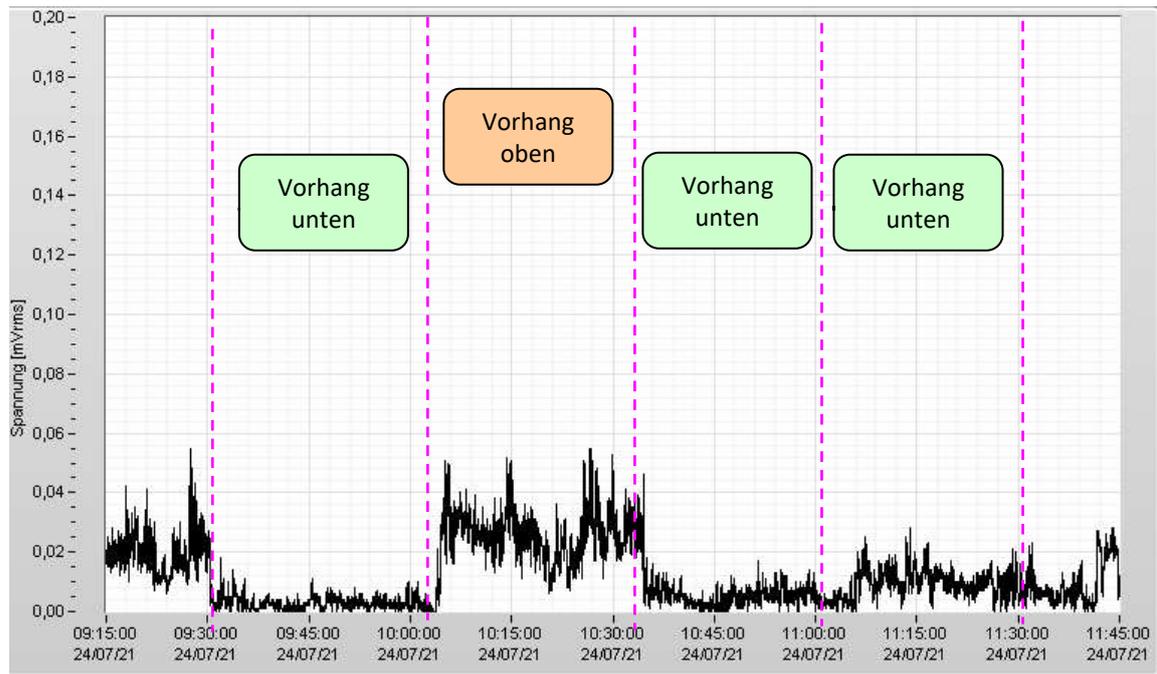


Abbildung 3-12: Kontrollmessung am 24.07.21 von 09:15-11:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der Abschirmung, wenn der Vorhang gesenkt (unten) ist.

1. Gruppe: 2. Testtag

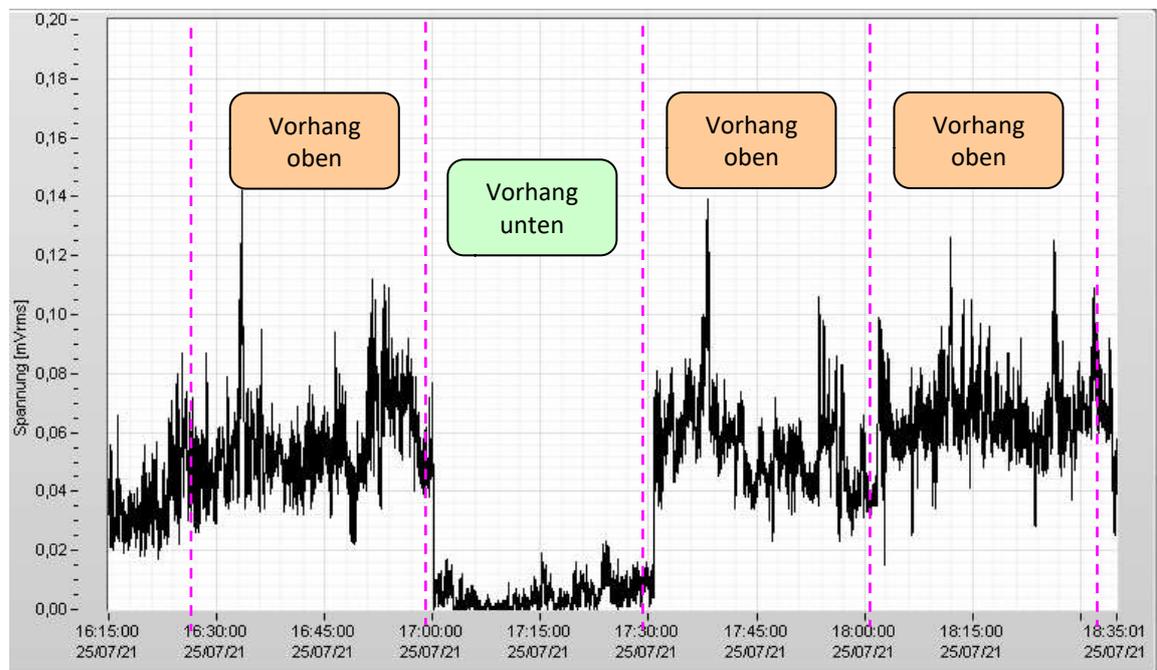


Abbildung 3-13: Kontrollmessung am 25.07.21 von 16:15-18:35 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der 30-minütigen Abschirmung (Vorhang unten).

2. Gruppe: 1. Testtag

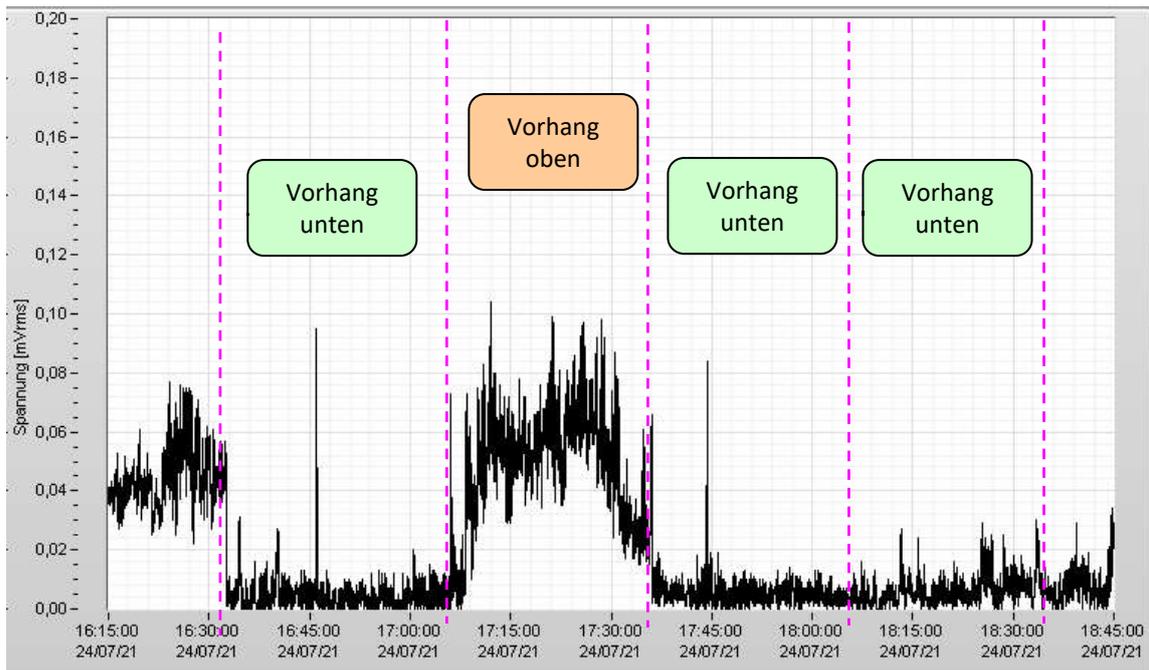


Abbildung 3-14: Kontrollmessung am 24.07.2021 von 16:15-18:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der Abschirmung, wenn der Vorhang gesenkt (Vorhang unten) ist.

2. Gruppe: 2. Testtag

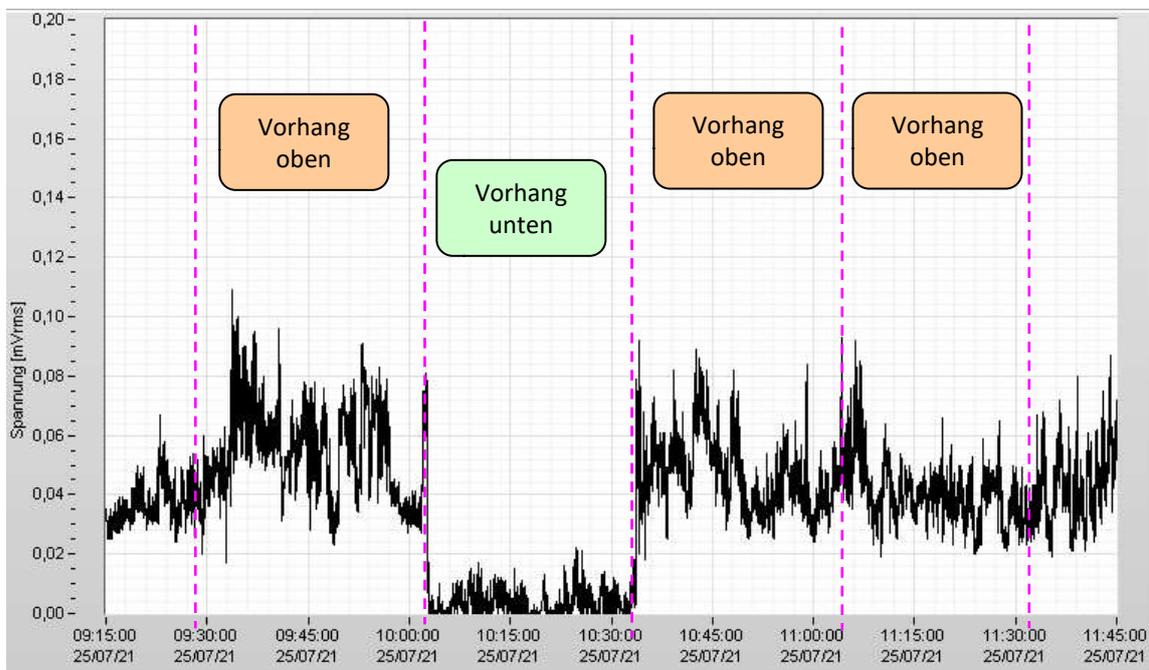


Abbildung 3-15: Kontrollmessung am 25.07.2021 von 09:15-11:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der 30-minütigen Abschirmung (Vorhang unten).

3. Gruppe: 1. Testtag

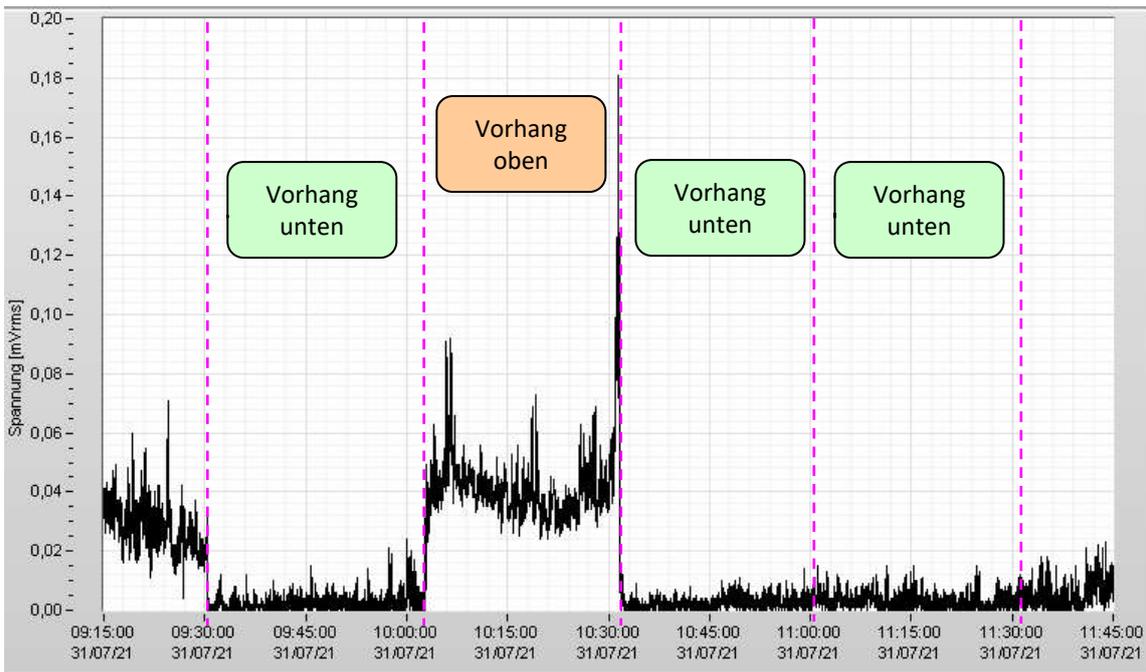


Abbildung 3-16: Kontrollmessung am 31.07.2021 von 09:15-11:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der Abschirmung, wenn der Vorhang gesenkt (Vorhang unten) ist.

3. Gruppe: 2. Testtag

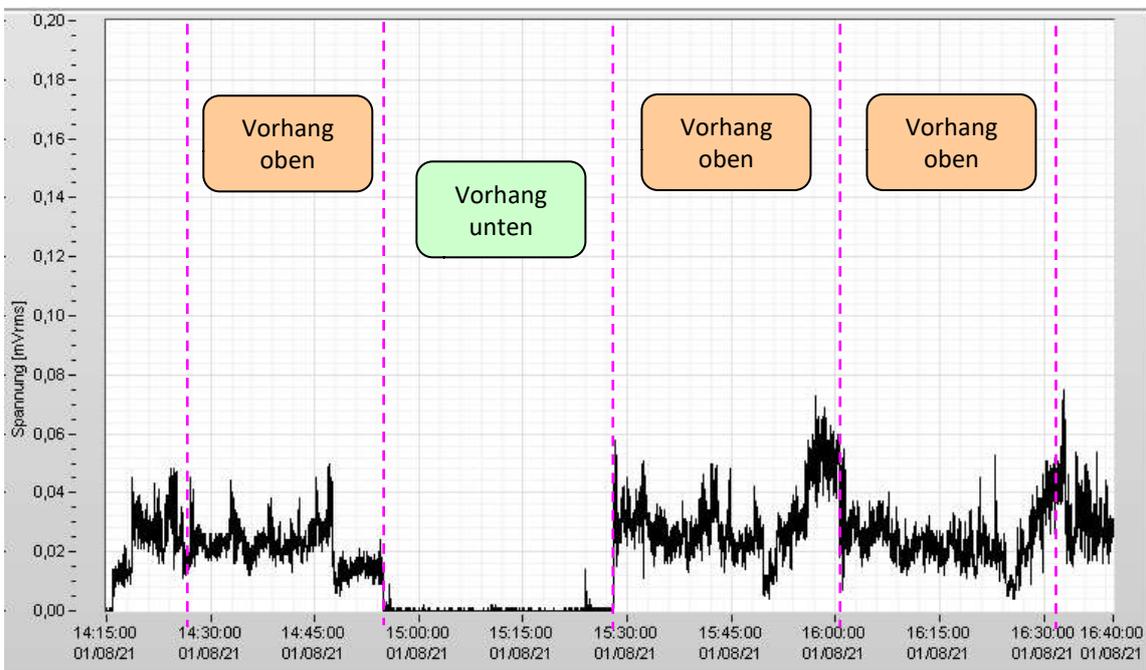


Abbildung 3-17: Kontrollmessung am 01.08.2021 von 14:15-16:40 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der 30-minütigen Abschirmung (Vorhang unten).

4. Gruppe: 1. Testtag

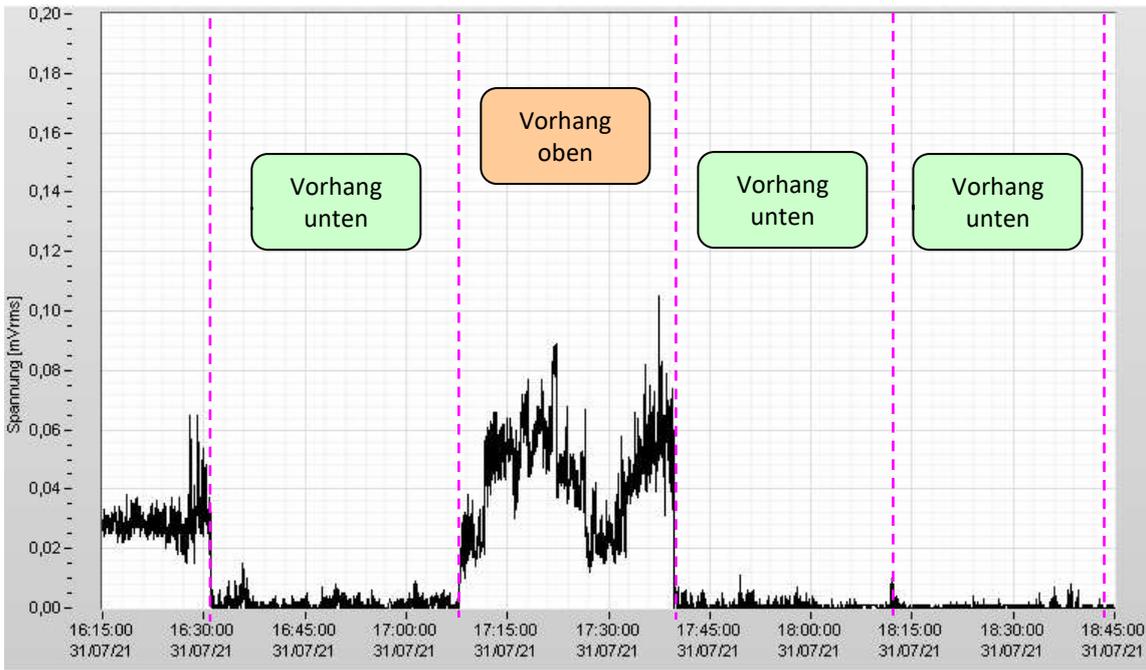


Abbildung 3-18: Kontrollmessung am 31.07.2021 von 16:15-18:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der Abschirmung, wenn der Vorhang gesenkt (Vorhang unten) ist.

4. Gruppe: 2. Testtag

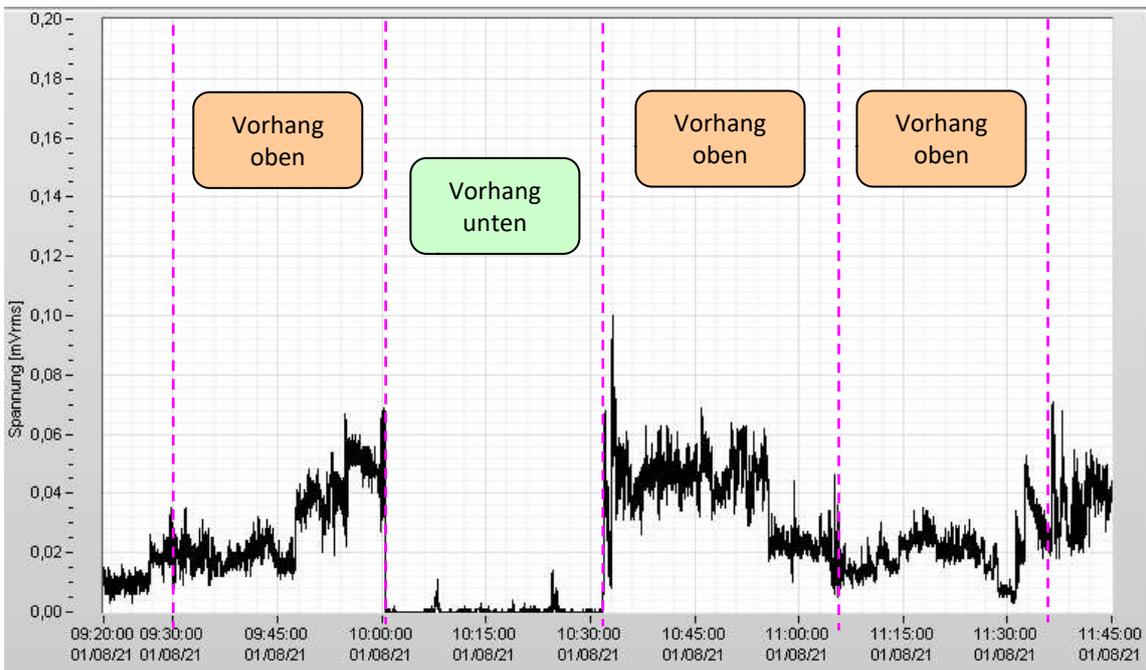


Abbildung 3-19: Kontrollmessung am 01.08.21 von 09:20-11:45 Uhr.
Die Kurve zeigt die Ausgangsspannung des HF-Breitbandmessgerätes und belegt die Wirksamkeit der 30-minütigen Abschirmung (Vorhang unten).

3.5 Diskussion

Die Ortswahl, die rekrutierten Probanden, die Studienbedingungen und die Messungen ermöglichten es, zwei vergleichbare Personengruppen zu definieren, um die Personen bezüglich möglicher Folgen der unterschiedlichen chronischen Exposition mit HF-EMF zu untersuchen. Beide Orte weisen eine ländliche Struktur auf, die Probanden in beiden Gruppen sind soziographisch und unter Berücksichtigung von Lebensstilfaktoren und Umweltrisikofaktoren gut vergleichbar.

3.5.1 Wahl der Projektstandorte

Interessiert man sich für biologische Parameter, die mit der chronischen Exposition mit elektromagnetischen Feldern sowohl in niederfrequenten als auch im hochfrequenten Spektrum korrelieren, so ist es nach dem flächendeckenden Ausbau der Mobilfunk-Infrastruktur in den Gemeinden eine Herausforderung, einen geeigneten Standort für den wissenschaftlichen Vergleich einer relativ hoch exponierten Menschengruppe mit einer vergleichbaren aber relativ niedrig exponierten Gruppe zu finden.

Ein wesentliches Projekt-Merkmal ist es, dass die Probanden unterschiedlich zu Mobilfunk-Immissionen exponiert, aber in Hinblick auf Lebensführung und Lebensstil, Alter und Geschlecht gut vergleichbar sind. Unsere Probanden und Versuchsgruppen stammten aus benachbarten Siedlungen mit ähnlichem dörflichen Charakter. Die Verteilung von Alter und Geschlecht zwischen den Gruppen war ausgewogen, Ernährung und Lebensstil, sowie gesundheitsrelevante Faktoren sind annäherungsweise gleich.

3.5.2 Elektrische und magnetische Wechselfelder, Niederfrequenz

Die in den Schlafbereichen der Probanden festgestellten elektrischen Felder sind in beiden Gruppen ähnlich gering (Tabelle 3-3, Tabelle 3-4). Die elektrischen Felder der Stromversorgung tragen daher zu den gefundenen Gruppen-Unterschieden bei den parallel durchgeführten biologischen Tests (Teilberichte B, C, D) kaum bei.

Bei den magnetischen Wechselfeldern traten zwischen den Wochentagen bei den jeweiligen Probanden keine oder nur minimale Unterschiede auf (Tabelle 3-6, Tabelle 3-7). Weil die gemessenen magnetischen Feld-Intensitäten durchwegs niedrig waren, ist es sehr unwahrscheinlich, dass bei den Probanden die niederfrequenten Wechselfelder zu den signifikanten Korrelationen zwischen EMF-Immission und biologischen Befunden beitragen (siehe Teilberichte, Abschnitt 4 - Konzentrationstests, Abschnitt 5 - HRV, und Abschnitt 6 - zelluläre Genom Veränderungen).

3.5.3 Hochfrequente EMF-Immissionen

Indoor-Immission

Die Immissionen von indoor-Quellen wie Schnurlos-Telefone (DECT) oder so genannte WLAN Router (kabellose Computeranbindung ans Internet) wurden berücksichtigt. Es fand sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Vergleichs-Gruppen. Die gemessenen Feldstärken der Indoor -Quellen summieren sich in der Gruppe V nur zu einem kleinen Bruchteil der vorliegenden Gesamtmission von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (Tabelle 3-10).

Aus der Umgebung

Tabelle 3-10 fasst die gemessenen hochfrequenten Immissionen in der Gruppe V und der Gruppe C zusammen. Die Immissionen von Behördenfunk TETRA und von DVB-T (digitales Fernsehen) waren zwar messbar, aber sehr gering.

Die Exposition der Probanden mit Mobilfunk-spezifischen Feldern (GSM, LTE) übertrifft in der Gruppe V jene der Gruppe C, und übertrifft die anderen Felder um ein Vielfaches, selbst jene von privaten *Indoor* Funk-Emittenten (DECT, WLAN).

Der Gruppen-Unterschied ist sowohl bei GSM, wie auch bei LTE hoch signifikant. Die statistische Effektgröße (η^2) des Gruppenunterschiedes ist bei den Mobilfunk-Immissionen stärker als bei den anderen Umgebungs-Feldern.

3.6 Projekt-Errungenschaft

Die Immissionen aus der öffentlichen Energieversorgung (niederfrequente elektrische und magnetische Wechselfelder) waren gering. Es zeigten sich keine besonderen Unterschiede zwischen den Gruppen V und C.

Hingegen waren im Hochfrequenzbereich bei den Mobilfunkimmissionen die Immissionen in der Gruppe V überdurchschnittlich hoch und zwischen den Gruppen V & C statistisch signifikant unterschiedlich.

Es wurde an den benachbarten Orten ein „Freiland-Versuchslabor“ etabliert, um mögliche biologische Folgen einer jahrelangen Hochfrequenz-Exposition zu untersuchen, wie in den Abschnitten 5 - HRV und 6 - Zell-Genom referiert.

4 Projektteam B, Konzentrationstests

ATHEM-3

Endbericht des Teilprojektes B

Konzentrations-Tests unter Kurzzeitabschirmung

In Kürze

Hintergrund

Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen dienten primär dazu, die Studienteilnehmer während einer zweistündigen Ruhepause und EKG-Aufzeichnung zur Untersuchung der autonomen Körperfunktionen wach, abgelenkt und konzentriert zu halten. Der Vollständigkeit halber werden auch Untersuchungen zur Konzentrationsfähigkeit im nahen Umfeld einer Mobilfunkanlage - mit und ohne kurzzeitiger HF-EMF Abschirmung (30 – 60 min.) berichtet.

Die eigentliche Absicht war:

- Die Studienteilnehmer sollten durch gezielte Beschäftigung über zwei Stunden gleichförmig in ruhiger Spannung gehalten werden, mit dem Ziel, "mitgebrachte mentale" und äußere Störfaktoren und Einflüsse zu minimieren.

Sekundäre Fragestellungen waren:

- Gibt es Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung **chronisch** exponierter Personen?
Besteht ein Unterschied zwischen den Gruppen (Gruppe V und C)?
- Hat die **kurzfristige** Exposition (30 - 60 Minuten) mit niedrig-Dosis-EM-Feldern messbare Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung von Personen?

Um die Aufmerksamkeit der Teilnehmer zu binden, sowie externe wie auch innere Ablenkungen zu minimieren, wurde gegen Ende jeder 30 Minutenphase der validierte d2-R-Konzentrationstest⁷ durchgeführt. Die Experiment-Zeit an jedem der beiden Testtage war zwei Stunden, geteilt in 4 x 30 Minuten.

Alle Immissionsbedingungen entsprachen den gesetzlichen Grenzwerten nach der 26. Bundes-Immissionsschutzverordnung (26. BImSchV), Während der gesamten Projektdauer wurden keinerlei Grenzwertüberschreitungen erzeugt bzw. festgestellt.

Ergebnisse

Alle Teilnehmer - ohne Ausnahme - waren die gesamte Versuchszeit „bei der Sache“. Die Untersuchungen am Wochenende, in einer ruhigen Wohnsiedlung, verliefen ohne Störung.

Konzentrationstest-Auswertung

Die erhobenen Konzentrationsleistungen sind in beiden Gruppen ähnlich heterogen. Die inner-individuellen Vergleiche zwischen 1) „abgeschirmt“ und 2) „nicht abgeschirmt“ lieferten keine signifikanten Hinweise auf einen möglichen Einfluss von HF-EMF auf die Konzentrationsleistung.

⁷ <https://www.testzentrale.de/shop/test-d2-aufmerksamkeits-belastungs-test.html>

Diskussion – Interpretation

Nachdem alle Probanden die Testbögen während der Abschirmtests gleichmäßig komplett ausfüllten und vollständig beisteuerten, schlussfolgern wir, dass die Ergebnisse der Konzentrationstests weitgehend frei von Ergebnis-verzerrenden externen und/oder internen Störfaktoren sind. 30 und 60 Minuten Intervalle sind unter Feldbedingungen möglicherweise zu kurz, um akute Effekte der Exposition mit geringen HF-EMF Intensitäten und deren Wechsel festzustellen.

4.1 Einleitung / Hintergrund

Es gibt kaum systematische Untersuchungen, um mögliche kognitive Auswirkungen von HF-EMF-Immissionen in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen abzuschätzen.

Der folgende Bericht beschreibt die Ergebnisse einer doppelt verblindeten Kohorten-Studie zu mehreren Fragestellungen.

- Haben Immissionen hochfrequenter elektro-magnetischer Felder (HF-EMF) in der Umgebung von aktiven Mobilfunk-Basisstationen Auswirkungen auf die Konzentrations-Fähigkeit von Personen?

Insbesondere bei:

- Chronischer Exposition im Wohnbereich.
Dazu untersuchten wir Personen, die seit Jahren vergleichsweise hohen Immissionen einer Mobilfunk-Basisstation ausgesetzt sind.
- Akute Expositionsänderungen.
Wir untersuchten Freiwillige bezüglich der Konzentrationsleistung unter halbstundenweise wechselnder (experimenteller) Abschirmung zur Reduktion der HF-EMF-Exposition.

4.2 Methodik

4.2.1 Studienteilnehmer

Wie in Teilreport "Messungen" (Abschnitt 3) detailliert beschrieben wurden Bewohner die seit Jahren vergleichsweise geringe bzw. hohe Immissionen mit hochfrequenten Elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) exponiert sind in zwei Vergleichsgruppen mit insgesamt 25 Personen rekrutiert. In einer späteren Projektphase wurde ein Teilnehmer wegen einer in der HRV-Analyse entdeckten Irregularität ausgeschlossen, was aber für diesen Teilbericht keine Auswirkungen hat. Die Gruppen waren:

- Gruppe C (N=13) relativ niedrige HF-EMF (Mobilfunk) Immission.
- Gruppe V (N=12) relativ hohe HF-EMF (Mobilfunk) Immission.

Die Teilnahme Kriterien sind in Teilbericht A detailliert angeführt, die wichtigsten waren:

- Aufenthaltsdauer am aktuellen Wohnort mehr als 5 Jahre,
- Physische und psychische Gesundheit,
- Alter zwischen 18 und 70 Jahren.,

4.2.2 Erfassung der EMF Umwelt-Immissionen

Die nachfolgenden Messungen der EMF-Immissionen wurden vor, während und nach den Abschirmexperimenten durchgeführt (detailliert ausgeführt im Teilreport A "Messungen", Abschnitt 3):

- Elektrische Wechselfelder EWF,
- magnetische Wechselfelder MWF (16,7 Hz, 50 Hz),
- hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF).

Während der Konzentrationstests wurde mit Hilfe von Remote Control der Spektrumanalysator von einem Notebook aus gesteuert. Die Messwerte der hochfrequenten Immissionen vom Display des Notebooks wurden aufgezeichnet.

Vor, während, und nach den jeweils zweistündigen Konzentrationsmessungen wurden HF-Breitbandmessgeräte mit Datenloggern eingesetzt (HF59B mit UBB-Antenne von Gigahertz-Solutions und den Anschluss via ASB3-Adapter an die Datenlogger EMLog2 von ESTEC).

Frequenzbereiche der Geräte:

- HF59B 27 MHz – 2,5 GHz
- UBB-Antenne 27 MHz – 3,3 GHz

Außerhalb dieser Bereiche wurde keine nennenswerte Funkstrahlung festgestellt und war auch nicht zu erwarten.

4.2.3 Pavillon zur HF-EMF Abschirmung

Aufbau und Funktion der Vorrichtung zur akuten Abschirmung der hoch frequenten Umgebungsfelder sind im Abschnitt 3.3.3 beschrieben.

4.2.4 Konzentrationstest (d2-R)

Der so genannte d2-R Test wurde 1962 von R. Brickenkamp entwickelt.⁸ Es handelt sich um einen wissenschaftlichen validierten Test zur Beurteilung der menschlichen Konzentration. Der Test wird in Deutschland häufig eingesetzt, er gilt als effizientes Messverfahren für die konzentrierte Aufmerksamkeit von Jugendlichen und Erwachsenen.

Das Testprinzip ist einfach. Er besteht aus Reihen der Buchstaben „d“ und „p“, welche oben und/oder unten mit 1 - 4 kurzen Strichen versehen sind. Die Aufgabe der Testpersonen besteht darin, in jeder Buchstaben-Reihe möglichst viele der mit 2 Strichen markierten „d“ durchzustreichen und dabei weder Auslassungsfehler (AF) oder Verwechslungsfehler (VF) zu produzieren. Beispielsweise darf ein „d“ mit mehr oder weniger als zwei Strichen nicht markiert werden. Ein „p“ darf niemals durchgestrichen werden, egal mit wie vielen Strichen es markiert ist.

Der Test wurde in Kleingruppen zu jeweils 6 Testpersonen durchgeführt. Aufgabe für die Teilnehmer war es, so schnell wie möglich, aber fehlerfrei zu arbeiten. Nach einem Probedurchgang wurde nach jeweils 20 Sekunden die Zeile gewechselt. Ein d2-R Test dauerte knapp 5 Minuten und wurde jeweils am Ende einer 30 min. Expositionsphase durchgeführt. Die auswertbaren Testvariablen sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

⁸ <https://www.testzentrale.de/shop/test-d2-aufmerksamkeits-belastungs-test.html>

Tabelle 4-1: d2-R Konzentrationstest, Test-Variablen

Variable	Parameter	Bedeutung
BZO	Bearbeitete Ziel-Objekte	Maß für die Geschwindigkeit der Testpersonen bei der Testbearbeitung
AF	Auslassungsfehler	Anzahl der übersehenen Zielobjekte (d=, mit zwei Strichen)
VF	Verwechslungsfehler	Anzahl der falsch angestrichenen Zielobjekte (z.B. p= mit zwei Strichen, -d=, mit drei Strichen, etc.)
AFVF	Fehlerhäufigkeit	beide Fehlertypen (AF, VF) zusammengezählt
KL	Konzentrationsleistung	BZO minus AFVF,
Frel%	Fehlerrate	% Fehler gemessen an den BZO

4.2.5 Test im Pavillon

Der Testablauf und die verblindete Abschirmung (bzw. Exposition) ist in Teilreport A beschrieben (3.3.4). Die Ergebnisse der Kontrollmessungen sind in Abschnitt (3.4.3) dargestellt.

Die Teilnehmer verblieben während der gesamten Zeit auf ihren Plätzen.

Zur Auswertung kamen:

- Expositionsphase 1, Minute 1 bis 24;
d2-R Test von Minute 25 bis 30,
Gefolgt von: Manipulation (Umbau) des schirmenden Vorhanges.
- Expositionsphase 2, Minute 31 bis 54;
d2-R Test von Minute 55 bis 60,
Gefolgt von: Manipulation (Umbau) des schirmenden Vorhanges.
- Expositionsphase 3, Minute 61 bis 84;
d2-R Test von Minute 85 bis 90,
Gefolgt von:
Manipulation oder Schein-Manipulation (Umbau) des schirmenden Vorhanges.
- Expositionsphase 4, Minute 91 bis 114;
d2-R Test von Minute 115 bis 120.
- Ende nach 2 Stunden (4 Expositions-Intervalle zu 30 Minuten).

4.2.6 Statistik

Die Daten wurden mit Hilfe der Statistiksoftware B.I.A.S (Version 11.12, epsilon Verlag, Deutschland) und IBM SPSS V.28 ausgewertet, sowohl deskriptiv wie analytisch.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 EMF - Messungen

Die detaillierte Vorgangsweise ist in Teilreport "Messungen" (Abschnitt 3) beschrieben.
In Kürze:

Hintergrundfelder

Die 16,7 Hz magnetischen Wechselfelder, verursacht durch die an beiden Orten vorbeiführende Eisenbahn, führte zu keinen nennenswerten Hintergrundbelastungen (für Details siehe Report „A“).

Die 50 Hz Felder der Elektrizitäts-Versorgung wiesen bei beiden Teilnehmergruppen ähnliche – sehr niedrige - Werte auf (für Details siehe Abschnitt 3).

4.3.2 Probanden

Die Tabelle 4-2 fasst die Merkmale der insgesamt 25 Studienteilnehmer der beiden Gruppen (mit relativ höherer bzw. niedriger Immission) zusammen.

Tabelle 4-2: Charakterisierung der Teilnehmer beim Konzentrationstest.
Gruppe C mit relativ **niedriger** Mobilfunkimmission,
Avg - Mittelwert; Std. – Standardabweichung.

Teilnehmer	Versuchsgruppe V				Kontrollgruppe C			
	M		F		M		F	
Geschlecht (N)	5		7		7		6	
Statistik	Min	Max	Avg	Std.	Min	Max	Avg	Std.
Alter (Jahre)	39	62	52,83	7,31	24	63	48,46	13,25
Abstand zur Mobilfunkantenne (m)	75	160	125,42	34,54	490	1020	781,54	236,29
Wohnt am Ort seit (Jahre)	12	34	22,92	8,69	5	54	26,15	13,25

4.3.3 Konzentrationstest-Ergebnisse

Die folgenden Ergebnis-Beschreibungen und Abbildungen basieren auf den Ergebnissen des d2-R Konzentrations-Tests:

- Unterschiede zwischen Vor- und Nachmittag
- Gibt es einen Unterschied zwischen Vor- und Nachmittag?

- Gruppen-Unterschied (V und C) mit und ohne Abschirmung.
- Wenn man seit Jahren im Bereich relativ hoher HF-EMF Immissionen lebt, gibt es dann einen Gewöhnungseffekt oder sind die akuten Wirkungen bei chronisch exponierten und bei „Naiven“ eher gleich?
- Schirmwirkung im Zeitverlauf.
- Wenn es expositionsbedingte Effekte gibt, sind diese eher nach 30 oder eher nach 60 Minuten messbar?
- Relative Fehlerrate (Verhältnis von Bearbeitungsgeschwindigkeit zu gemachten Fehlern).

4.3.4 Auswertbare Datenmenge

Jeder der 25 Teilnehmer nahm an allen Tests teil. Nach jeder 30 min. Testphase entstand je ein Testergebnis. Nach 2 x 30 min. mit unveränderter Abschirmung entstand jeden Testtag ein 60 min pro Proband. Tabelle 4-3 fasst die Zahl der auswertbaren Tests zusammen.

Tabelle 4-3: Anzahl der durchgeführten und auswertbaren d2-R Tests.
Die Rücklaufquote für ausgefüllte Tests war 100%.

Anzahl der d2-R – Tests ...	Ohne Abschirmung Immission „hoch“	Mit Abschirmung Immission „niedrig“
30 min Intervalle: 25 Teilnehmer, 2 Tage, 4 Tests/Tag	100	100
60 min Intervalle: 25 Teilnehmer, 2 Tage, 1 Intervall pro Testtag	25	25

Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO) und Konzentrationsleistung (KL)

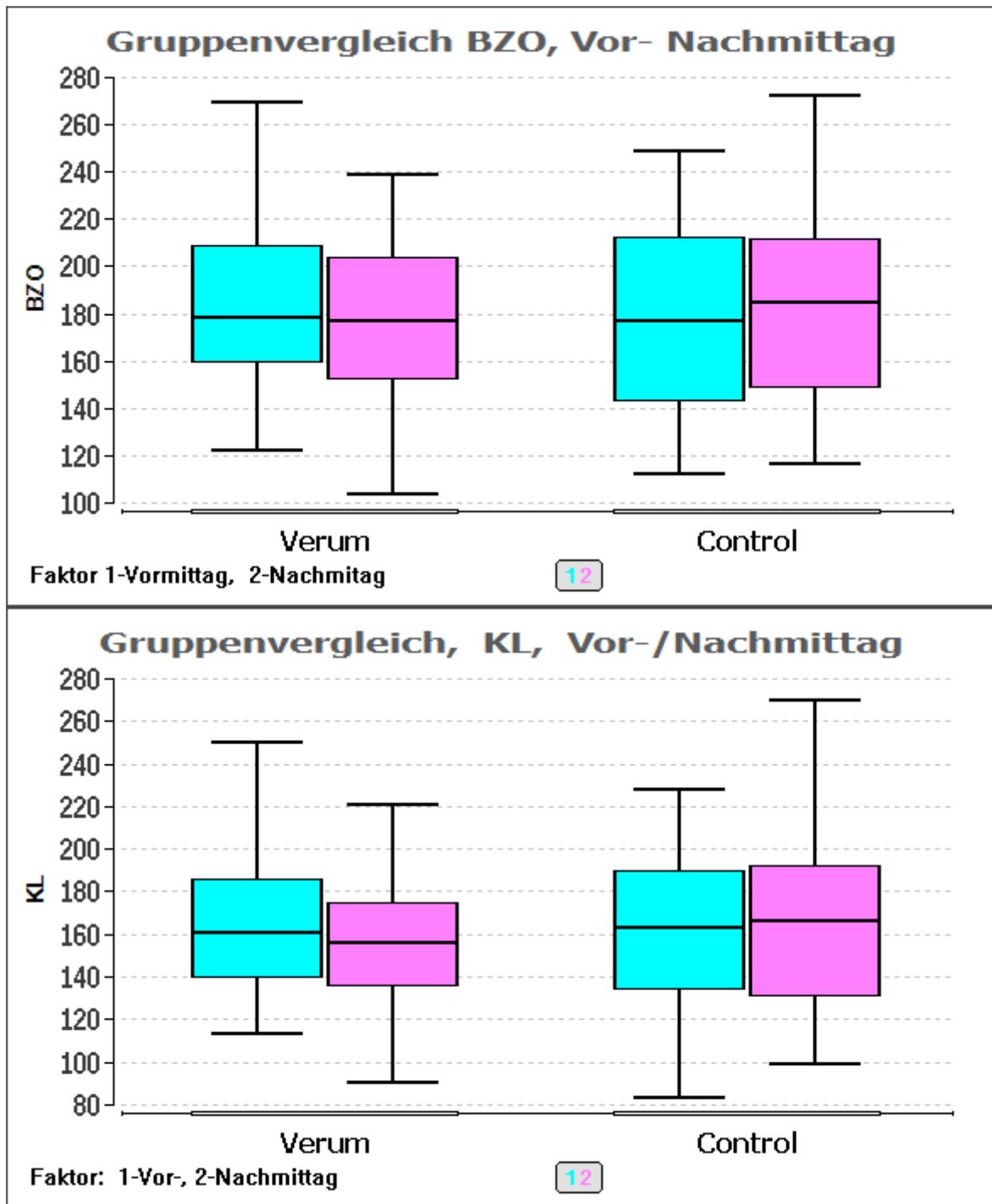


Abbildung 4-1: Tageszeit-Abhängigkeit, Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Der Gruppenvergleich zeigt keine besonderen Unterschiede. Weder Median noch die Verteilung innerhalb der Gruppe weisen auf einen besonderen Unterschied zwischen Vor- und Nachmittag. Legende: Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO), Konzentrationsleistung (KL).

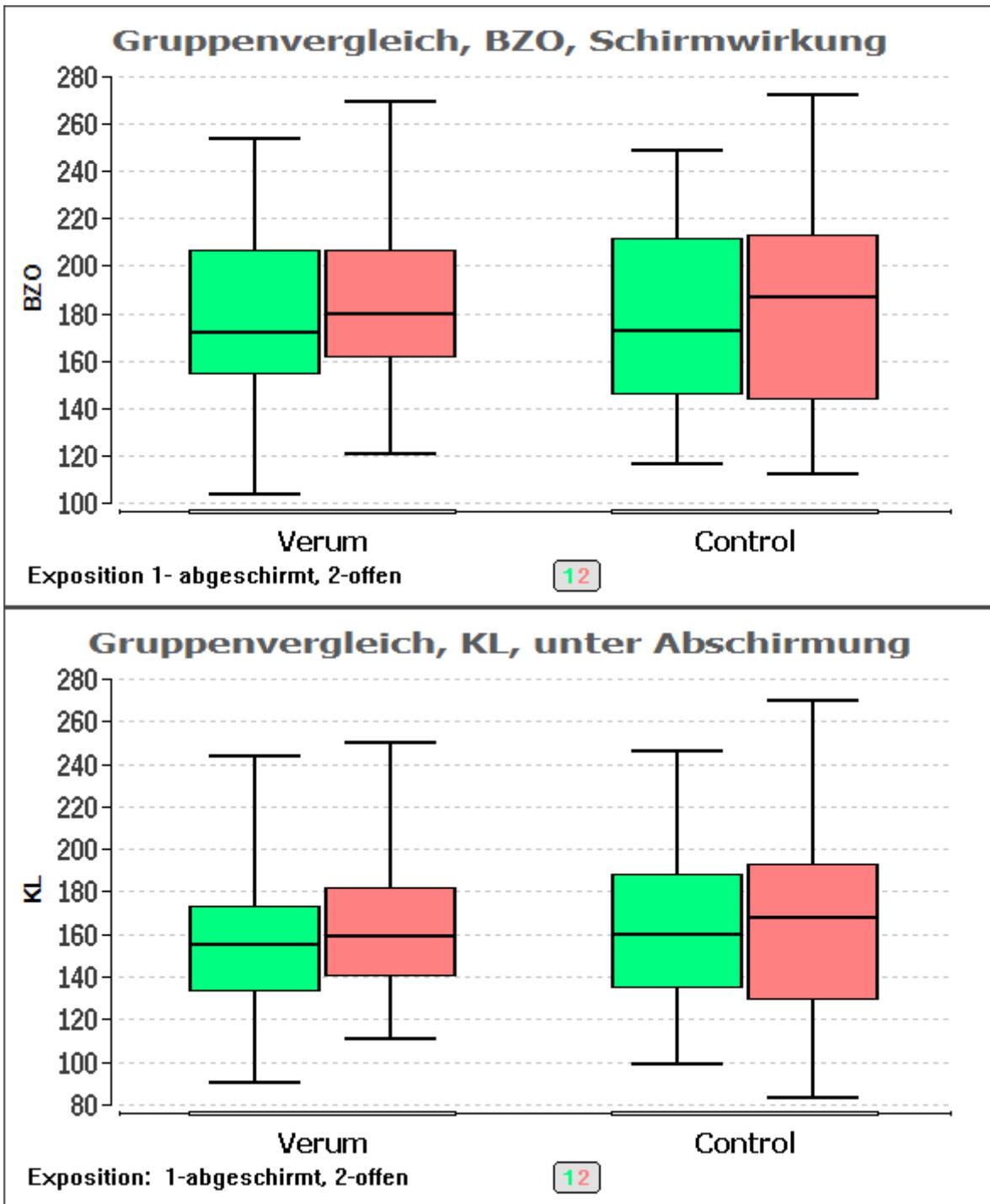


Abbildung 4-2: Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung, mit und ohne Abschirmung. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO) & Konzentrationsleistung (KL) sind in beiden Gruppen (V u. C) in etwa gleich gelagert. In beiden Gruppen bewirkt die offene (ungeschirmte) Situation eine leichte Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO) und Konzentrationsleistung (KL).

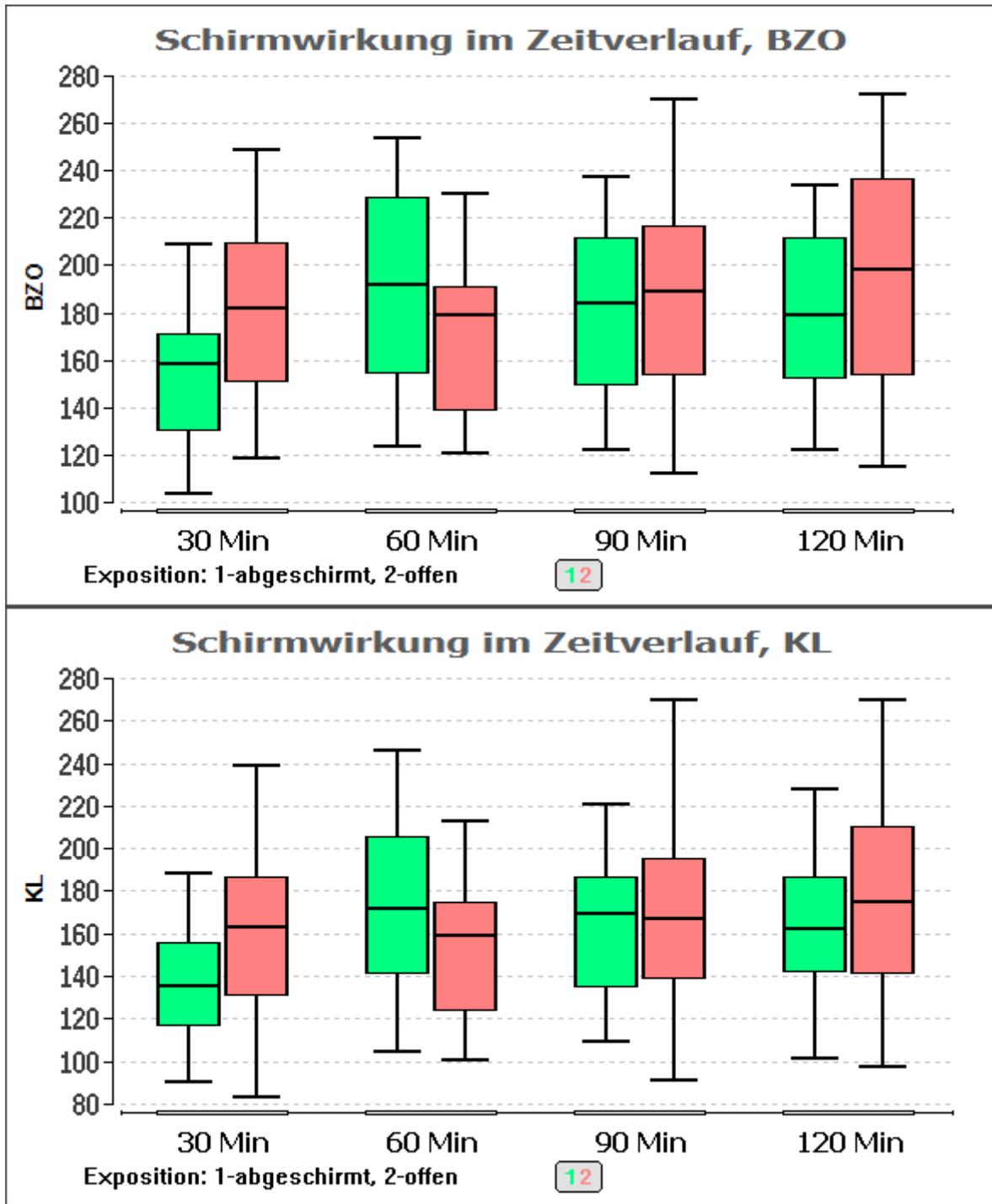


Abbildung 4-3: Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung in zwei Stunden, mit und ohne Abschirmung.

Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Die Messergebnisse zu den vier Zeitpunkten liegen im etwa gleichen Niveau. Es ist keine Drift der Testergebnisse zu erkennen, die auf Lern- oder Gewöhnungseffekte hinweisen.

Auslassungsfehler & Verwechslungsfehler

Tageszeit-Abhängigkeit

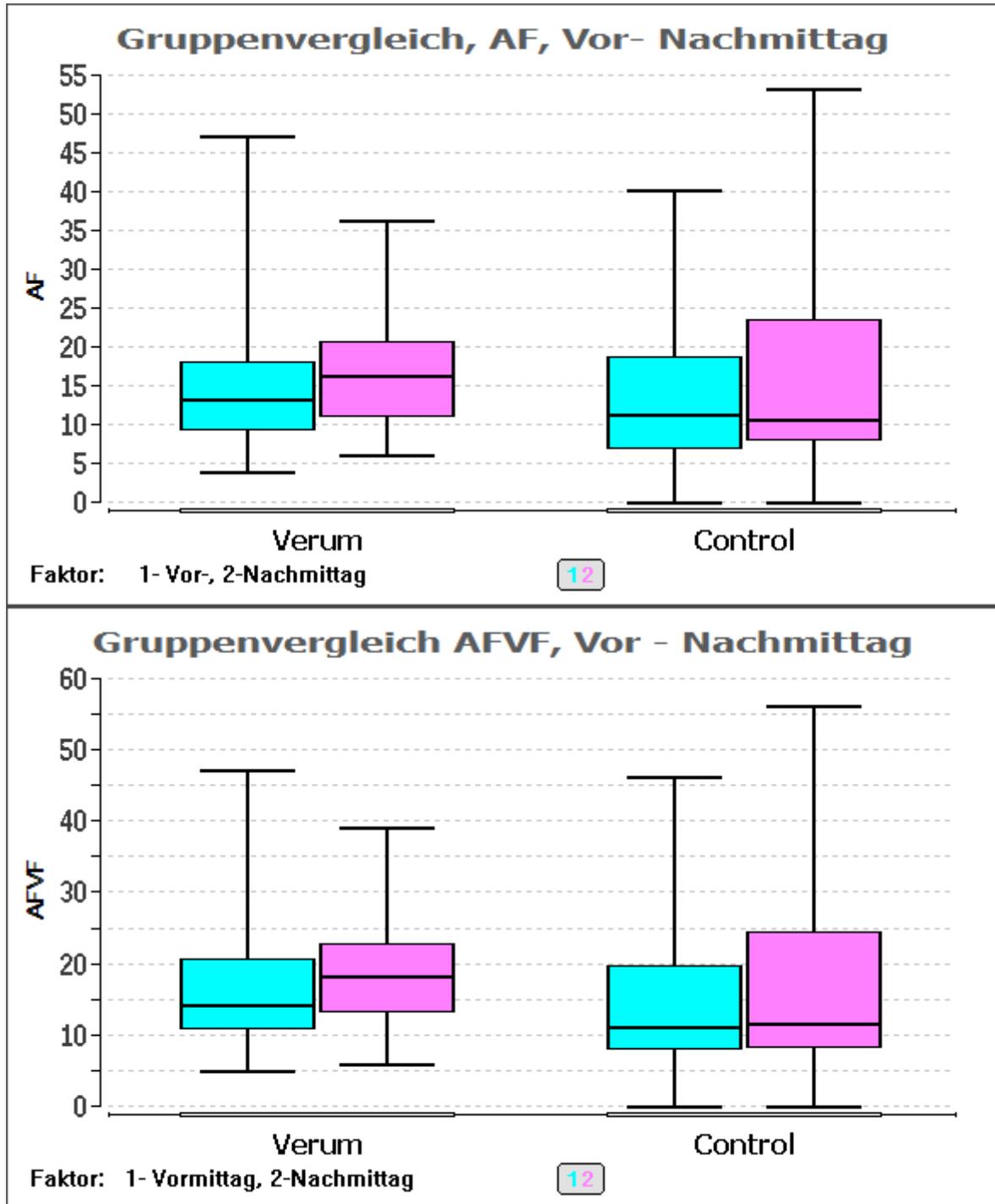


Abbildung 4-4: Tageszeit-Abhängigkeit, Fehlerrate, Gruppenvergleich. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. In der Gruppe C liegt der Median der Fehlerrate bei den Vor- und Nachmittags-Messungen in etwa gleich. In der Gruppe V steigt der Median am Nachmittag etwas an. AF-Auslassungsfehler, VF-Verwechslungsfehler, AFVF – beide Fehlertypen zusammen.

Wirkung der experimentellen Abschirmung

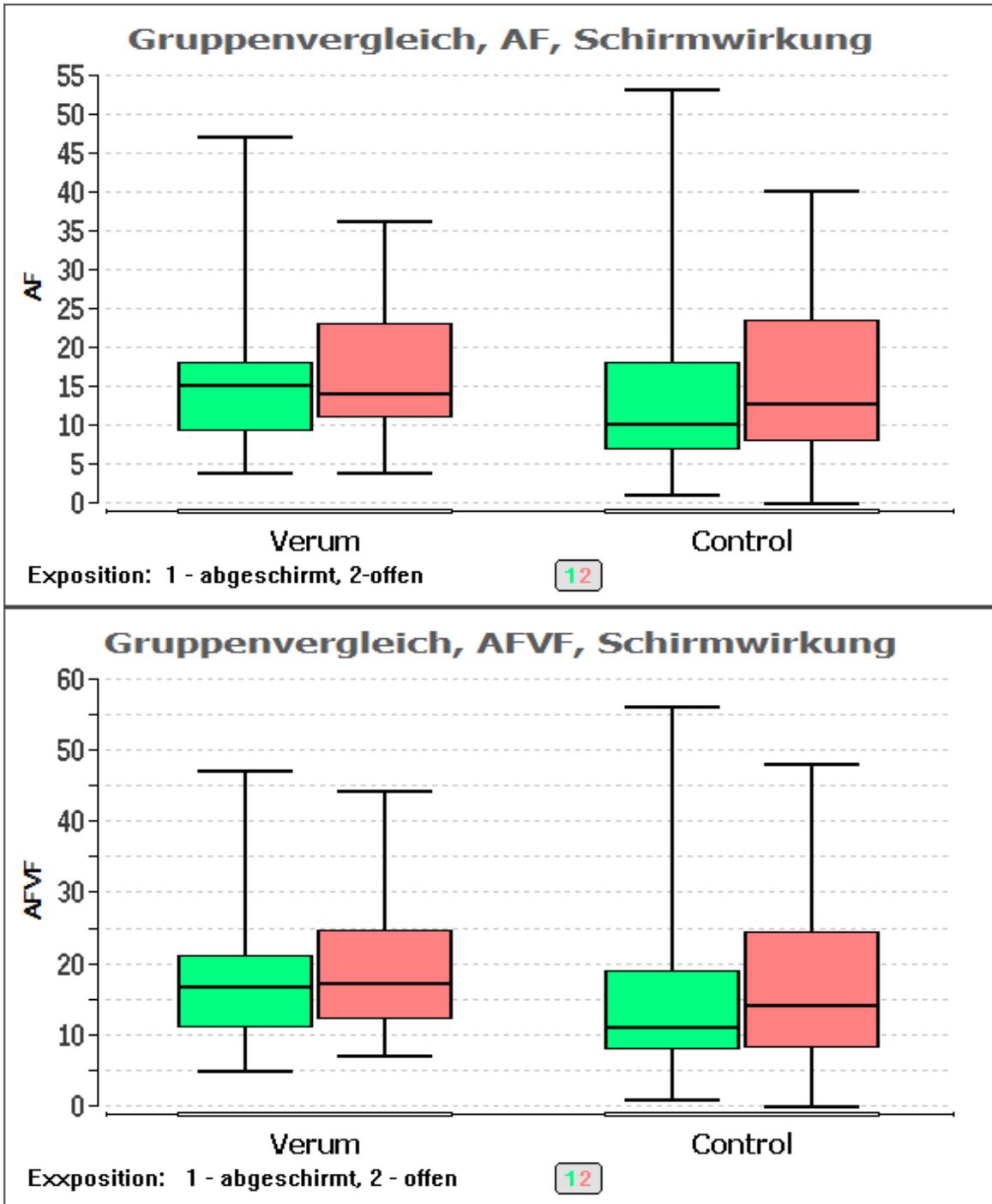


Abbildung 4-5: Fehlerrate, mit u. ohne Abschirmung, Gruppenvergleich. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. In beiden Gruppen ändert sich die Fehlerrate kaum oder gering. In der Control Gruppe steigt der Median der Fehlerrate unter Exposition (offen, nicht abgeschirmt).
 Legende: AF-Auslassungsfehler, VF-Verwechslungsfehler, AFVF beide Fehlertypen zusammen.

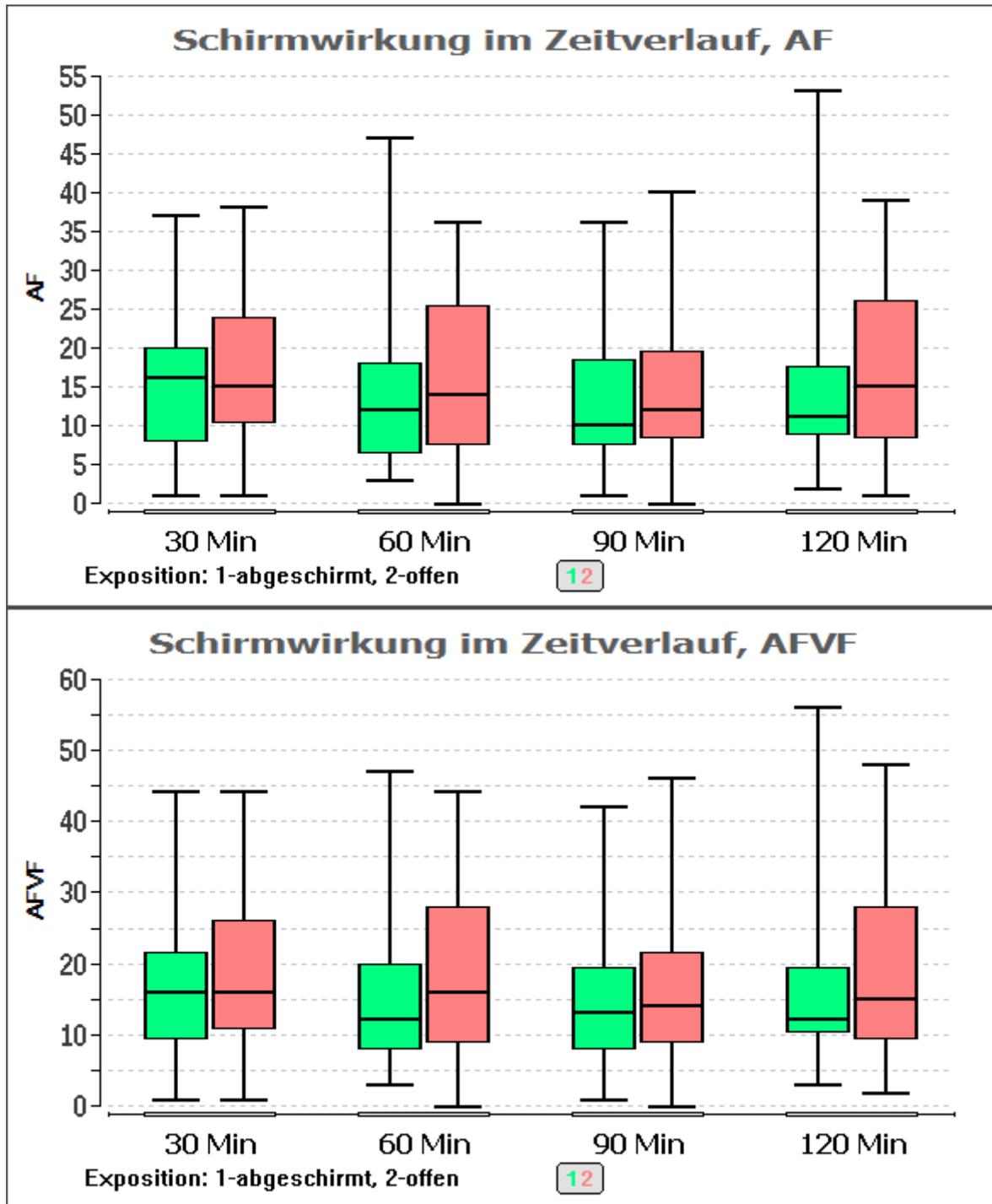


Abbildung 4-6: Zeitverlauf, Konzentrationsfehler mit und ohne Abschirmung. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Nach 30 Minuten (am Ende des ersten Intervalls) besteht kein Unterschied zwischen „abgeschirmt“ oder „offen“ (= nicht abgeschirmt). Zu späteren Zeitpunkten (60 bis 120 Minuten) liegt die Fehlerrate nach Exposition (offen) stets höher als unter geschirmten Bedingungen. Der Median-Unterschied zwischen abgeschirmt und offen ist am größten bei Minute 120. Bei 30 Minuten sind die Mediane bei beiden Fehler-Variablen nahezu ident. Die Messergebnisse bei 60 min, 90 min und 120 min könnten ein Hinweis darauf sein, dass es längere Zeit benötigt als 30 Minuten, um eine Wirkung der HF-EMF Exposition auf die Fehlerrate sichtbar zu machen.

Relative Fehlerrate (Frel%)

Die relative Fehlerrate (Frel%) setzt die Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO) und die gemachten Fehler (AFVF) in Beziehung. Es ist somit kein eigenständiger Parameter, sondern wird aus den bereits oben berichteten Daten berechnet.

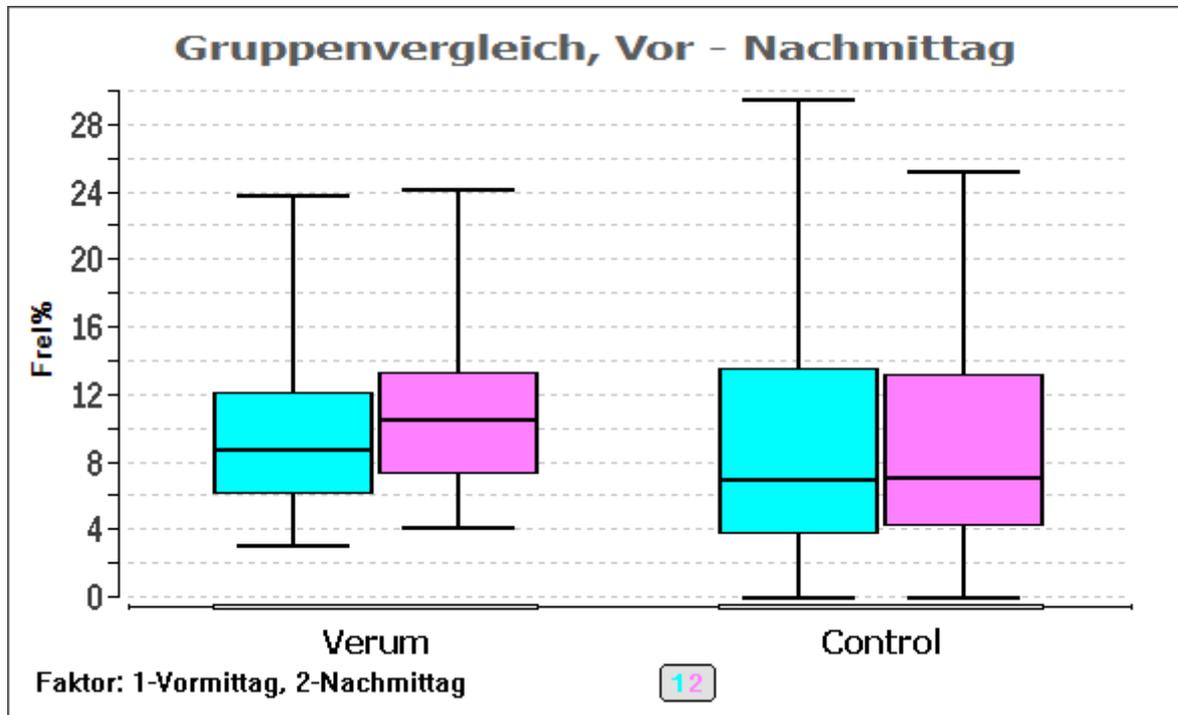


Abbildung 4-7: Tageszeit-Abhängigkeit, Rel. Fehler-Rate (Frel%), Gruppenvergleich. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Mit geringen Schwankungen liegen die Ergebnisse in jeder Gruppe gleichauf. In der Gruppe V ist der Median der relativen Fehlerrate am Nachmittag gering aber nicht signifikant erhöht.

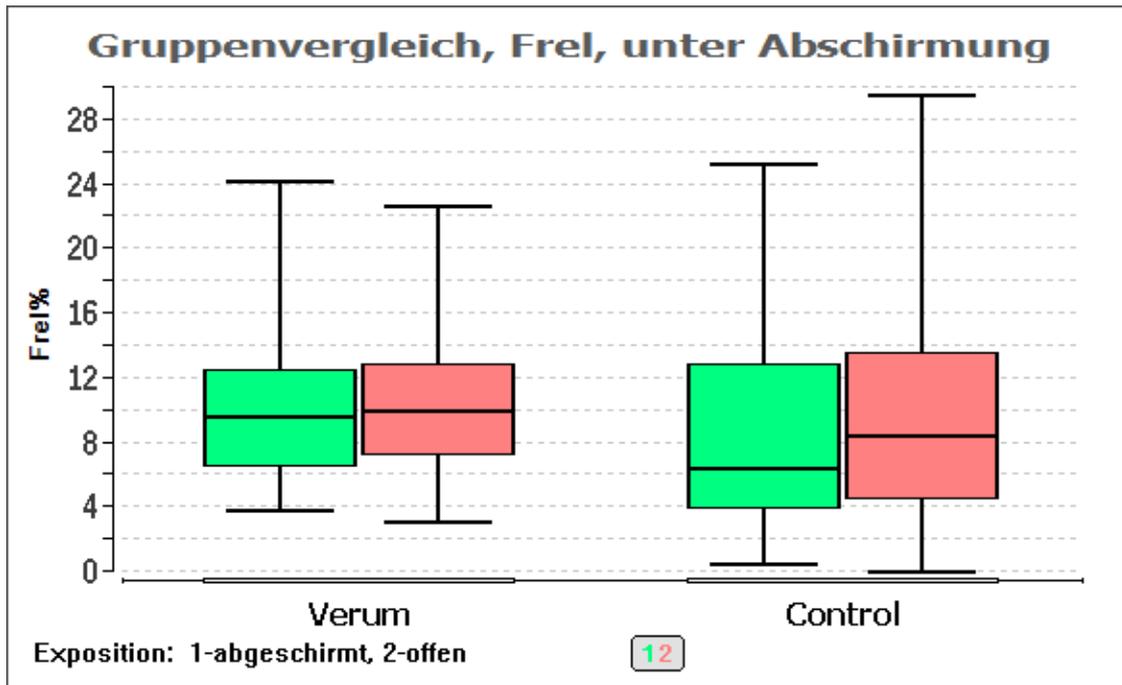


Abbildung 4-8: Rel. Fehler (Frel%) mit und ohne Abschirmung, Gruppenvergleich. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Mit geringen Schwankungen liegen die Ergebnisse in jeder Gruppe gleichauf. In der Gruppe C ist bei offener – nicht abgeschirmter – Exposition die relative Fehlerrate minimal erhöht.

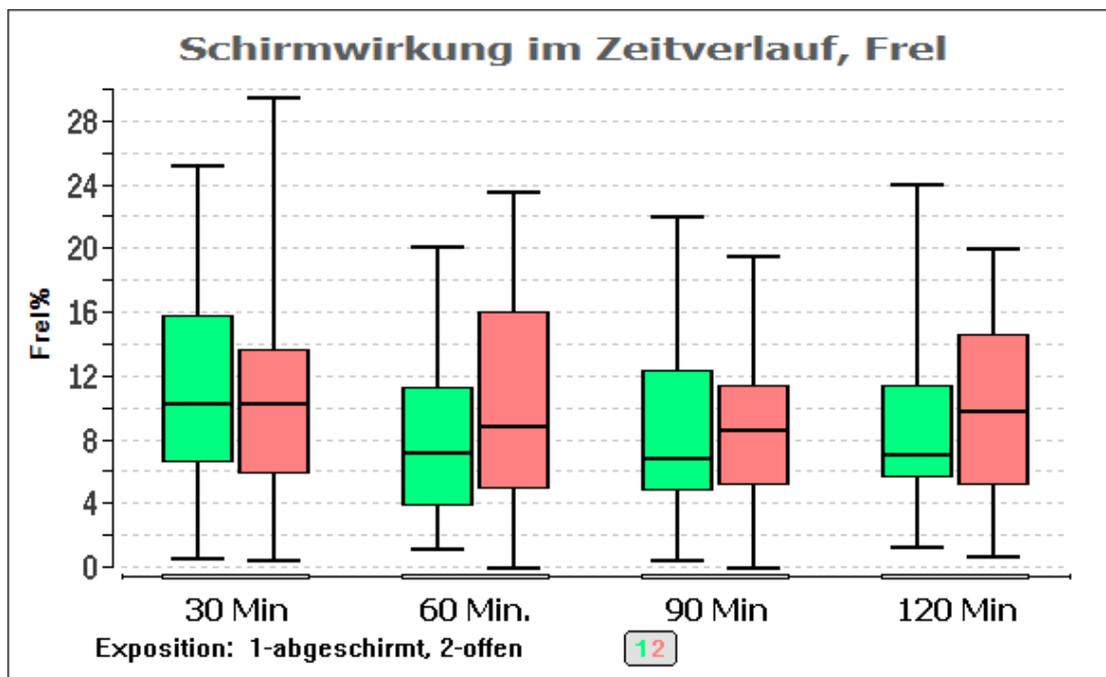


Abbildung 4-9: Zeitverlauf der Relativen Fehler-Rate (Frel%) mit und ohne Abschirmung. Boxplot, mit Median und vier Quartilen. Nach 30 Minuten ist der Median zwischen den Bedingungen (abgeschirmt - offen) nahezu ident. Ab 60 Minuten wird der Unterschied zwischen „abgeschirmt“ und „offen“ (nicht abgeschirmt) größer, ein Indiz dafür, dass eine 30 Minuten Phase zu kurz ist, um wirksam zu sein. Obwohl statistisch nicht signifikant, der Abschirmeffekt ist am größten nach 120 Minuten.

4.3.5 Statistische Bewertung

Die Hinweise auf einen Einfluss der Exposition im Sinne einer erhöhten Bearbeitungsgeschwindigkeit bei erhöhter Fehlerrate (Abbildung 4-1, Abbildung 4-2, Abbildung 4-5) sind überraschend konsistent. Darum prüften wir die Annahme, dass niedrig dosierte HF-EMF einen Einfluss auf die Konzentration haben könnten, mittels Mann-Whitney-U Statistik Test (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: d2-R Konzentrationstest, abgeschirmt oder offen (nicht abgeschirmt). Gruppenvergleich, bei 30 Minuten Intervallen, die Unterschiede waren weder in der Kontroll-Gruppe C noch in der Gruppe V signifikant. Nimmt man beide Gruppen zusammen sind auch nach 60 Minuten-Intervallen die Änderungen, die eine erhöhte Bearbeitungsgeschwindigkeit und eine erhöhte Fehlerrate anzeigen, nicht signifikant.

Gruppe	30 Minutenintervalle	Exposition	Mittelwert	Std.	Tests N	MWU - p
Gruppe C	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	geschirmt	177,3	36,9	52	0,409
	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	offen	184,8	41,6	52	
	Fehlerrate (AF+VF)	geschirmt	15,0	12,4	52	0,324
	Fehlerrate (AF+VF)	offen	16,8	12,2	52	
Gruppe V	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	geschirmt	175,1	34,5	48	0,303
	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	offen	183,3	35,7	48	
	Fehlerrate (AF+VF)	geschirmt	18,2	9,5	48	0,615
	Fehlerrate (AF+VF)	offen	18,9	9,1	48	
Gesamt	60 Minutenintervalle	Schirmung	Mittelwert	Std.	Test-Anzahl N	MWU - p
Beide Gruppen V + C	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	geschirmt	181,0	33,9	25	0,295
	Bearbeitungsgeschwindigkeit (BZO)	offen	194,1	45,3	25	
	Fehlerrate (AF+VF)	geschirmt	16,4	11,2	25	0,478
	Fehlerrate (AF+VF)	offen	18,8	11,8	25	

Wenn man die beobachteten Unterschiede im Sinne einer Fallzahlermittlung hochrechnet, sind es schätzungsweise ca. 1000 Teilnehmer, die man untersuchen müsste, um signifikante Effekte zu erhalten.

4.4 Diskussion

Die Untersuchungen zu Auswirkungen der Exposition zu niedrig dosierten HF-EMF unter Alltagsbedingungen bedürfen besonderer Vorkehrungen. Bei experimentellen Untersuchungen während des Alltags ist es erforderlich, Ablenkungen und Ergebnis verzerrende externe und interne Einflüsse zu beachten.

Merkmale der Teilnehmer können bei ungleicher Verteilung zwischen den Untersuchungsgruppen ergebnisverzerrend wirken, allerdings war beispielsweise die Geschlechtszugehörigkeit unter den Teilnehmern ausgewogen (Tabelle 4-2). Die Gruppenbildung erfolgte auf Basis der vorhandenen – durch Messung festgestellten – EMF im Schlafbereich der Teilnehmer. Der Abstand zwischen Wohnhaus und Sendeantenne wurde erhoben (Tabelle 4-2), war aber letztlich für die Zuordnung zur Gruppe C oder Gruppe V nicht entscheidend.

Der eigens für dieses Projekt errichtete Pavillon ermöglichte es, unter Feldbedingungen mit zwei Mitarbeitern ein doppelt verblindetes Versuchsdesign zu gewährleisten. Um die Exposition oder den Erfolg der Abschirmung zu gewährleisten, wurde die Abschirmwirkung durch Messung kontrolliert (Abbildungen 3-12 bis 3-19). Um mögliche Gewöhnungseffekte oder Zeitfolgeneffekte zu unterbinden, wurden die Abschirmbedingungen in gemischter Reihenfolge angeboten (Abbildung 3-6).

Um beruflich bedingte Einflüsse hintanzuhalten, wurden die Abschirmtests am Wochenende durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse des Konzentrationstests beim Testen am Vormittag oder Nachmittag gleichbleibend waren (Abbildung 4-4, Abbildung 4-7).

Bei Untersuchungen an Freiwilligen unter Alltagsbedingungen sind externe und innere Ablenkungen Störfaktoren, die man berücksichtigen sollte. Alle Teilnehmer haben alle d2-R-Tests vollständig und über zwei Stunden hinweg mit einheitlicher Konzentration durchgeführt (Abbildung 4-6, Abbildung 4-9). Der d2-R Test ist geeignet, die Teilnehmer für zwei Stunden zu fokussieren, um innere und externe Störfaktoren, welche die Konzentration stören könnten, zu minimieren.

Bei der Detailauswertung der d2-R-Testergebnisse fanden sich bei großer Überlappung der Daten-Streubreite Hinweise dahingehend, dass sich nach Expositionsphasen, die länger als 30 Minuten dauern, sich die Bearbeitungsgeschwindigkeit - aber auch die Fehlerrate - erhöht.

Die Analyse der Konzentrationstests erbrachte unserer Kohorte keine statistisch signifikanten Ergebnisse (Tabelle 4-4), hat aber Hinweise auf mögliche Einflüsse der HF-EMF Exposition auf die Konzentration geliefert, deren Untersuchung längere Betrachtungszeiträume als 30 oder 60 Minuten benötigen würden.

Unsere Ergebnisse sind stimmig mit international publizierten Befunden. Regel et al. (2006) untersuchten den Einfluss eines UMTS-Basisstationssignals (Universal Mobile Telecommunications System) auf das Wohlbefinden und untersuchten die kognitive Leistung bei 117 Probanden. In einem kontrollierten Expositionsexperiment über 45 Minuten bei einer elektrischen Feldstärke von 0, 1 oder 10 V/m (27 oder 265.00 $\mu\text{W}/\text{m}^2$), wurden an insgesamt 117 gesunden Probanden das Wohlbefinden, die wahrgenommene Feldstärke und die kognitive Leistung bewertet. Die Autoren diskutieren ihre Ergebnisse im Widerspruch zu der – mittlerweile nicht mehr abrufbaren – Niederländischen TNO

Studie von Zwamborn et al. 2003, *“Effects of Global Communication System Radio-Frequency Fields on Well being and Cognitive Functions of Human Subjects with and without Subjective Complaints”*. Die Autoren beschreiben, lediglich zwei „marginale Effekte“ gefunden zu haben.

In einem weiteren Projekt, wurde bei Abschirmexperimenten im Zuge der Expositionsänderung von „niedriger“ zu „hoher“ Exposition ein Anstieg des Speichelhormons Cortisol festgestellt. Die Autoren schlussfolgern, dass die Exposition zu HF-EMF bei geringen Feldstärken „psychobiologische Stressmarker“ beeinflussen kann (Augner et al., 2010).

In einer indischen Studie (Singh et al., 2016) zeigte sich, dass die Mehrheit der Probanden, die sich in der Nähe der Mobilfunkbasisstation aufhielten, über Schlafstörungen, Kopfschmerzen, Schwindel, Reizbarkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und Bluthochdruck, also unspezifische Stress-Symptome klagten. Zusätzlich zeigte sich, dass ein Großteil der Probanden unter HF-EMF Exposition im Vergleich zu den Kontrollpersonen eine statistisch signifikant geringere stimulierte Speichelsekretion ($p < 0,01$) aufwies, also eine körperliche Reaktion zeigte, die durch das autonome Nervensystem vermittelt wird.

Guxens et al. (2016) untersuchten die Auswirkungen von HF-EMF in Wohnräumen. Die Autoren beschreiben unter Exposition mit HF-EMF eine erhöhte Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung. Der Befund ist stimmig zu unserer Beobachtung, dass die Bearbeitungsgeschwindigkeit unter HF-EMF Exposition in beiden Gruppen (V u. C) gering aber nicht signifikant erhöht ist (Abbildung 4-3).

Malek et al. (2015) untersuchten 200 Probanden. Es wurde neben anderen Parametern die Reaktionszeit unter HF-EMF Exposition getestet. Die Ergebnisse sind vergleichbar zu unseren (Tabelle 4-4). Es waren auch bei 200 Probanden die Unterschiede zwischen der Exposition und der Schein-Exposition rechnerisch nicht signifikant (Malek et al., 2015).

Aus der Zusammenschau der eigenen und international publizierten Befunde ergibt sich, dass für den statistischen Nachweis von Kurzeffekten (Minuten – Stunden) der Exposition mit HF-EMF etwas über 1.000 Studienteilnehmer untersucht werden müssten, was auf einen geringen erwartbaren Effekt bei Kurzzeit Exposition (30 Minuten oder 60 Minuten) hinweist. Bei einer allfälligen Folge-Untersuchung sollte der Betrachtungszeitraum vergrößert werden.

5 Projektteam C, autonome Körper-Funktionen

HRI-Projektnummer 32102

Version 2.5+

ATHEM-3

Endbericht des Teilprojektes C

HRV — Herzratenvariabilität

In Kürze

Das Teilprojekt "HRV" befasst sich mit Wirkungen auf das autonome Nervensystem von im Vergleich zu den offiziellen Grenzwerten geringen Expositionen zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) des Mobilfunks, wie sie typischerweise im Umkreis von Mobilfunksendern unter Alltagsbedingungen auftreten. Untersucht wurden gesunde Personen, die seit mehreren Jahren durchgehend im Versorgungsgebiet eines Mobilfunkmastes wohnhaft sind. Um mögliche Einflüsse auf das autonome Nervensystem — welches zahlreiche wichtige Organfunktionen im Körper steuert — zu untersuchen, wurden Messungen der Herzratenvariabilität (HRV) durchgeführt. Parallel zur HRV-Messung wurden die gleichen Personen von weiteren Projektteams bezüglich möglicher Auswirkungen auf die Konzentrationsleistung (Abschnitt 4) und Auswirkungen auf das zelluläre Genom (DNA-Stabilität) untersucht (Abschnitt 6).

Methodik

Eingeschlossen wurden 25 Freiwillige, je zur Hälfte aus benachbarten Wohnorten. Diese Wohnorte waren entweder durch eine vergleichsweise hohe oder niedrige Exposition zu hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, gemessen jeweils am Schlafplatz der Teilnehmer, charakterisiert. Um mögliche Auswirkungen der chronischen (Langzeit-) Exposition zu erfassen, wurden nur Teilnehmer eingeschlossen, die zumindest 5 Jahre am aktuellen Wohnort wohnten.

Kurzzeit-Abschirmversuche: Die Teilnehmer (freiwillige Männer und Frauen) wurden an zwei Tagen mit je vier 30-minütigen Phasen (25 Minuten Ruhe und 5 Minuten Konzentrationsleistungstest) wechselnd entweder bei Exposition zu hochfrequenten Feldern eines Mobilfunk-Sendemasts oder alternativ unter abgeschirmten Bedingungen beobachtet. Die Abschirmung erfolgte mit HF-EMF abschirmenden Vorhängen und war für die Teilnehmer verblindet. Die Reduktion der Exposition aufgrund der Schirmwirkung wurde von einem Sachverständigen durch Messung durchgehend kontrolliert (Teilreport "Messungen" Abschnitt 3).

Langzeitmessung über 24 Stunden mit Nachtauswertung: Je nach der HF-EMF-Exposition am Schlafplatz wurden die Testpersonen zwei ca. gleich großen Gruppen zugeteilt. Der Verlauf spezifischer HRV-Parameter und die Korrelation zur dauerhaften Exposition zu elektromagnetischen Feldern (EMF) wurde analysiert.

Ergebnisse

Kurzzeit-Abschirmversuche:

Bei den Abschirmversuchen mit 30 bis 60 Minuten Expositionsdauer konnte weder in Ruhe noch während des Konzentrationsleistungstests eine systematische Beeinflussung der HRV durch die höhere oder alternativ abgeschirmt niedrigere HF-EMF-Exposition festgestellt werden.

Langzeit- und Nachtmessungen:

Tagsüber wurden keine Unterschiede zwischen den Gruppen beobachtet. Während der Nachtruhe zeigten mehrere HRV-Parameter — insbesondere solche, die die Vagus-Aktivität (high frequency variability) und die Blutdruckrhythmik (low frequency variability) reflektieren — Unterschiede zwischen den hoch und niedrig exponierten Personen. Jene

Teilnehmer, die am Wohnort sowohl in der Messnacht als auch jahrelang einer relativ höheren Mobilfunk-EMF Immission ausgesetzt waren, zeigten während der Nachtruhe vergleichsweise geringere Werte für die Vagus-Aktivität. Eine Korrelationsanalyse untersuchte den Zusammenhang zwischen spezifischen HRV-Parametern mit unterschiedlichen EMF-Immissionsarten. Die Korrelation war am ausgeprägtesten bei den hochfrequenten Immissionen des LTE-Mobilfunks.

Schlussfolgerung

Die Untersuchungsergebnisse weisen darauf hin, dass HF-EMF-Immissionen, wie sie unter Alltagsbedingungen vorkommen, die vegetative Regulation beeinflussen kann.

Aufgrund der flächendeckenden Versorgung und der komplex ausgebauten Funknetze sind geeignete Standorte für vergleichende Langzeitstudien rar. Diese Untersuchung ist Teil eines umfassenden Forschungsprogrammes, welches unter Alltagsbedingungen zwei Bereiche, die für Gesundheit und Wohlbefinden von Bedeutung sind, parallel untersucht, nämlich mögliche Einflüsse auf das autonome Nervensystem und Einflüsse auf das Genom. Am untersuchten Standort war es möglich, zwei fair vergleichbare, aber hinsichtlich der HF-EMF Immission klar trennbare Untersuchungsgruppen zu untersuchen und Unterschiede zu finden, die der HF-EMF Exposition zugeschrieben werden können.

Übersicht über die analysierten HRV-Parameter.

Tabelle 5-1: Liste der analysierten HRV-Parameter

Abkürzung	Parameter	Einheit
HR	Median der Momentanherzfrequenz	bpm
RR	Median der Momentanherzperiodendauer	ms
SDNN	Standardabweichung der normalen RR-Intervalle	ms
logRSA _{hr} , logRSA _{rr}	Respiratorische Sinus-Arrhythmie aus der Momentanherzfrequenz bzw. RR-Intervallserie	1/min, ms
pp8	Pattern predominance	1
pNN50	Anteil sukzessiver Herzperiodendauerdifferenzen >50 ms	%
SD1, SD2	Standardabweichungen entlang den Achsen der in den phase-lag-plot der RR-Intervalle eingebetteten Ellipse	ms
HVQmean	mittlerer Herz-Vagusquotient, Maß für die Stressbelastung	
ATMFr _{sa}	Atemfrequenz aus der RSA berechnet	1/min
RSA	Respiratorische Sinus-Arrhythmie, atembedingte sinusförmige Schwankung der Herzfrequenz;	
QPA	Puls-Atem-Quotient	1
rMSSD	root mean square successive differences, quadratisches Mittel der sukzessiven Herzperiodendauerdifferenzen	ms
lnHF _{hr} , lnHF _{rr}	High Frequency variability, HF (0.15 - 0.4 Hz)	ln (bpm ²), ln (ms ²)
lnLF _{hr} , lnLF _{rr}	Low Frequency variability, LF (0.04 - 0.15 Hz)	ln (bpm ²), ln (ms ²)
lnVLF _{hr} , lnVLF _{rr}	Very Low Frequency variability, VLF (0.033 - 0.04 Hz)	ln (bpm ²), ln (ms ²)
lnTOT _{hr} , lnTOT _{rr}	Spektrale Gesamtleistung von 0.033 – 0.4 Hz	ln (bpm ²), ln (ms ²)
VQ _{hr} , VQ _{rr}	Vegetativer Quotient (LF/HF)	1

5.1 Einleitung und Problemstellung

5.1.1 Das vegetative Nervensystem und die Herzratenvariabilität (HRV)

Das vegetative Nervensystem (synonym: autonome Nervensystem) des Menschen gehört zu den wichtigsten Steuerorganen für verschiedene Körperfunktionen. Es koordiniert lebenswichtige Körperorgane, -systeme und -funktionen. Es steuert beispielsweise den Tag/Nachtrhythmus. Besonders dem so genannten Vagusnerv (Hauptnerv des parasympathischen Nervensystems) kommt dabei die Koordination der Erholung im Schlaf zu.

Das sympathische Nervensystem wird bei Stress aktiviert und bewirkt die Freisetzung der Hormone Adrenalin, Noradrenalin, Cortisol, etc. Der Vagus hingegen ist in Ruhe bzw. in Erholungszuständen besonders aktiv und hat eine Reihe von Aufgaben für Wohlbefinden und Gesundheitserhaltung. Der Haupt-Neurotransmitter hier ist Acetylcholin.

Die Messung der Vagus-Aktivität und die Messung der Balance zwischen Sympathikus und Parasympathikus ist eine Domäne der HRV-Analyse. Sie macht die Vagus-Aktivität nichtinvasiv und objektiv über die Variabilität der Herzfrequenz messbar.

Die **Herzfrequenz** (Herzrate, Pulsfrequenz) ist eine der wichtigsten Stellgrößen eines komplexen Regelnetzwerkes, an dem Herz, Kreislauf, Atmung, Temperatur, Stoffwechsel und psychomentele Einflüsse beteiligt sind. Sie wird kurz- und mittelfristig durch das vegetative Nervensystem gesteuert. Vagus-Aktivität senkt die Herzfrequenz, Sympathikus-Aktivität steigert sie. Die Interaktion mit verschiedenen Organfunktionen verleiht der Herzrate ihre typische komplexe zeitliche Struktur, die als Herzratenvariabilität (HRV) bekannt ist. Die HRV-Analyse gibt Auskunft über die Aktivität der einzelnen Komponenten des autonomen Nervensystems, deren Zusammenwirken und Regulationsreserven.

Die schnellen, meist atemsynchronen Änderungen der Herzfrequenz um ca. 0,25 Hz (4 Sekunden Periodendauer) werden ausschließlich dem Vagus (dem Hauptnerv des parasympathischen Teils des autonomen Nervensystems) zugeordnet. Vagale Synapsen reagieren rascher als sympathische, wodurch sich in der HRV-Analyse vagale Aktivität in Modulationen mit hohen Frequenzen und sympathische Aktivität in niedrigeren Frequenzen abbildet.

Der Sympathikus ist jener Teil des autonomen Nervensystems, der beim Gesunden Leistungsbereitschaft vermittelt. Sympathische Aktivität lässt sich in der HRV-Analyse eher in den Bereichen, der so genannten low frequency (LF, um 0,1 Hz oder 10 Sekunden Periodendauer) und very low frequency variability (VLF, um 0,017 Hz oder 60 Sekunden Periodendauer) beobachten.

5.1.2 Bedeutung der HRV für Leistungsfähigkeit und Gesundheit

Durch die HRV messbare und gesundheitsrelevante vagusgesteuerte Körperfunktionen sind die so genannte kardiorespiratorische Koordination, also die Abstimmung zwischen Herzschlag und Atmung (Kralemann et al., 2013). Beim gesunden Menschen wird einerseits der Herzschlag durch jeden Atemzug beschleunigt und verlangsamt (respiratorische Sinusarrhythmie, vermittelt durch den Vagus), andererseits findet der Beginn der Einatmung bevorzugt zu gewissen Phasen der Herzaktivität statt — es handelt sich also um einen wechselseitigen Einfluss von Herzschlag und Atmung. Diese und weitere Komponenten können mit HRV-Analysen erfasst werden.

Studien haben beschrieben, dass technisch erzeugte elektromagnetische Felder, im speziellen Mobilfunksignale, unter anderem auch das autonome Nervensystem beeinflussen (beispielsweise Abdel-Rassoul et al., 2007; Andrzejak et al., 2008; Ekici et al., 2016; Misek et al., 2020), doch gibt es keinen gesicherten Wissensstand über dauerhafte Auswirkungen langfristiger Exposition.

5.1.3 Fragestellungen

Primäre Fragestellung:

Lassen sich nach jahrelanger Exposition im Vergleich zur Exposition mit vergleichsweise niedrigen HF-EMF Feldern des Mobilfunks mögliche Folgen im Bereich des autonomen Nervensystems dokumentieren?

Sekundäre (studienmethodische) Fragestellung

Unter der Annahme, dass es sich bei gegebenen Immissionen im Alltag um Effekte mit geringer Effektgröße der Zielparameter handelt, ist es ein Ziel der vorliegenden Studie zu prüfen, ob bzw. wie eine Feldstudie zur primären Fragestellung unter Alltagsbedingungen machbar ist. Das vorliegende Projekt sollte die Grundlagen für die Planung einer prospektiven analytischen Feld-Studie schaffen.

5.2 Methodik

5.2.1 Versuchsteilnehmer

Teilnahmekriterien

Die Teilnehmer waren gesunde Freiwillige (Alter zwischen 18 und 70 Jahren), die den aktuellen Wohnsitz im Versorgungsgebiet von Mobilfunkbasisstationen seit mindestens 5 Jahren innehaben.

Um Zustände auszuschließen, die die Messparameter beeinflussen können und vergleichbare Gruppen zu erhalten, gab es eine Liste von Ausschlusskriterien (siehe dazu Abschnitt 3.3.1). Davon sind für diesen Projektteil die relevantesten:

- Tragen eines Herzschrittmachers oder Defibrillators,
- Herzrhythmusstörung, medikamentös behandelt,
- Bluthochdruck-Therapie mit Beta-Blockern.

Gruppenbildung

Die Teilnehmer kamen aus benachbarten Wohngebieten und wurden zwei Vergleichsgruppen zugeordnet (siehe dazu Abschnitt 3.4.2).

Die beiden Gruppen waren:

- Gruppe V: Personen, die in der nahen Umgebung einer Mobilfunk-Basisstation wohnen und man daher erwarten darf, dass sie einer überdurchschnittlichen Immission ausgesetzt sind.
- Gruppe C: Personen die entfernt von der nächsten Mobilfunkbasisstation wohnen und daher am Wohnort einer vergleichsweise nur geringen Immission von der Mobilfunkbasisstation ausgesetzt sind.

Das endgültige Zuordnungskriterium war die Höhe der HF-EMF Exposition am Wohnort, die durch EMF-Immissionsmessungen am Schlafplatz bestimmt wurde (Abschnitt 3.4.2).

5.2.2 Kurzzeit-Abschirmversuche

An zwei Wochenenden (24./25.7. und 31.7./1.8.2021) fanden interventionelle Abschirmversuche statt. Jedes Wochenende durchliefen zwei Gruppen von ca.6 Personen den gleichen Versuchsablauf: Jede Person wurde einmal am Samstag und das zweite Mal am darauffolgenden Sonntag getestet.

Die Versuche fanden in einem Garten in einem Pavillon-Zelt statt. Die Abschirmung erfolgte in Richtung des nächstgelegenen Mobilfunkmastes (Entfernung ca. 115 m).

Der Versuchsablauf bestand aus 4 Zeitabschnitten mit alternierender Exposition. Die Zeitabschnitte dauerten je 30 Minuten, davon waren 25 Minuten Ruhezeit (im Sitzen), und während der letzten 5 Minuten wurde ein d2-R Konzentrationsleistungstest ebenfalls im Sitzen durchgeführt.

Zwischen den Zeitabschnitten wurde die Exposition der Teilnehmer gegenüber der Mobilfunkstrahlung durch Absenken oder Hochziehen eines HF-EMF-abschirmenden Vorhanges verändert. Das Absenken des Vorhangs bewirkte das Absenken der HF-EMF-Exposition. Die Versuchspersonen konnten den Vorhang nicht sehen, aber Geräusche wahrnehmen, die durch Positionsveränderung hervorgerufen wurden. Darum wurde, wenn in zwei aufeinander folgenden Zeitabschnitten die Position des Abschirmvorhangs gleich blieb, der Vorhang "zum Schein" verändert, mit derselben Geräusch-Kulisse, die aber keinen Rückschluss auf die aktuelle Exposition erlaubt. Weder der Versuchsleiter, der die d2-Tests vorgab, noch die Versuchspersonen hatten Informationen zur aktuellen Position des Abschirmvorhangs und somit keine Information über die aktuelle Höhe der Exposition am Sitzplatz.

Bei gesenktem Vorhang war die HF-EMF-Exposition niedrig, bei hochgezogenem Vorhang hoch (Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Experimentelle Kurzzeitexposition / Abschirmung, Abfolgen.

Die Messungen der Gruppen 1 und 2 fanden am 24. und 25.7.2021 statt, die der Gruppen 3 und 4 am 31.7. und 1.8.2021.

N = niedrige Vorhang Position = niedrige HF-EMF-Exposition (Abschirmung).

H = hohe Vorhang Position = hohe HF-EMF-Exposition (keine Abschirmung).

Gruppe	Versuch 1	Expositionsabfolge	Versuch 2	Expositionsabfolge
1	Vormittag	N-H-N-N	Nachmittag	H-N-H-H
2	Nachmittag	N-H-N-N	Vormittag	H-N-H-H
3	Vormittag	N-H-N-N	Nachmittag	H-N-H-H
4	Nachmittag	N-H-N-N	Vormittag	H-N-H-H

5.2.3 Messungen

Die EKG-Messgeräte wurden allen Teilnehmern am Vormittag des ersten Versuchstages angelegt und nach den Tests am zweiten Tag abgenommen. Jede Testperson lieferte somit Aufzeichnungen über die Abschirmtests, die übrige Tagesaktivität und die Nachtruhe. Die Messdauer pro Person war zwischen 24 und 33 Stunden. Jede Testperson füllte am Abend des ersten Versuchstages einen Fragebogen zur Momentanbefindlichkeit (Basler Befindlichkeits-Skala, BBS) aus, und nach der Nachtruhe einen Fragebogen zur nächtlichen Erholungsqualität (HRI-Schlaf), siehe Abschnitt 5.2.6.

5.2.4 EKG und HRV-Messmethode

Eine genaue Erfassung der Herzaktion setzt eine hochpräzise Abtastung des EKGs zur exakten Feststellung der R-Zacken des EKGs voraus. Aus diesem Grund wurden hochauflösende Messgeräte (ChronoCord®, Human Research Institut, Weiz, Österreich) mit einer Abtastrate von 8000 Werten pro Sekunde und 16 Bit Auflösung des EKGs verwendet.

Die Echtzeituhren der EKG-Messgeräte wurden vor dem ersten Messwochenende eingestellt, die Synchronisationsgenauigkeit war genauer als 5 Sekunden.

Vor und nach den einzelnen Versuchsphasen der Abschirmversuche wurde von den Testpersonen auf Anweisung des Versuchsleiters eine Markierungstaste am Gerät gedrückt. Diese Zeitmarkierungen sind in den Daten ersichtlich und wurden für die exakte Bestimmung der Testphasen in den Abschirmversuchen benutzt.

Die Herzschlagzeitpunkte wurden durch Detektion der R-Zacken von der geräteinternen Software bestimmt. Artefakte und Extrasystolen wurden durch einen Erkennungsalgorithmus markiert (modifiziert nach Berger et al., 1986), alle Herzraten-Aufzeichnungen - und im Zweifelsfall das EKG - -visuell geprüft und bei Bedarf korrigiert.

Um belastbare Aussagen treffen zu können wurde berücksichtigt, dass es für verschiedene HRV-Parameter Untergrenzen für die Länge der betrachteten Zeitspannen gibt. Es hebt die Validität der Parameter, wenn in den betrachteten Zeitspannen keine besonderen Tätigkeitswechsel oder Körperlage-Veränderungen (Stehen, Liegen) vorgenommen werden. Darum wurden bei den Kurzzeitmessungen die HRV-Parameter für die einzelnen Tätigkeitsphasen (ruhiges Sitzen, aktive Teilnahme beim Konzentrationstest) getrennt bestimmt.

Bei den Abschirmversuchen richtete sich die Länge der Segmente, über die jeweils die HRV-Parameter berechnet wurden, nach der Dauer der Versuchsphasen (d2-Test: 4 Minuten 40 Sekunden), bei den circadianen Messungen wurden jeweils 5-Minuten-Segmente nach der Empfehlung aus (Task Force of the ESC and NASPE, 1996) verwendet. Die Auswertung der Nachtmessungen erfolgte „per Protokoll“, unter Ausschluss unvollständig vorliegender bzw. Artefakt behafteter Daten. Einzelne markierte Artefakte bzw. Extrasystolen wurden aus der Zeitserie gelöscht. Wenn mehr als 5% der Zeitdauer des jeweiligen Segments als fehlerhaft markiert wurde, wurde das Segment zur Gänze aus der Berechnung ausgeschlossen.

5.2.5 Berechnete HRV-Parameter

Für die HRV-Analyse wurden Parameter ausgewählt, die insbesondere Vagus- und Sympathikus-Aktivität sowie koordinative Aspekte von Herzschlag und Atmung reflektieren:

1. Der Median der **Herzfrequenz** (HR, heart rate) ist ein Basisparameter.
2. Analog wird häufig die zur HR inverse Herzperiodendauer angegeben (RR, für RR-Intervalle, was sich auf die R-Zacken des EKGs bezieht).
3. Die **Atemfrequenz** wurde indirekt aus der Respiratorischen Sinus-Arrhythmie berechnet (Bettermann et al., 1996).
4. Die **Respiratorische Sinus-Arrhythmie (RSA)** bezeichnet die Modulation der Herzfrequenz aufgrund der Atmung. Sie kann durch den Median sukzessiver absoluter Momentanherzfrequenzwerten bzw. RR-Intervallen quantifiziert werden und wird zur Annäherung der Verteilung an eine Normalverteilung logarithmiert (logRSA, Moser et al., 1994). Dieser Parameter ist vornehmlich vagal beeinflusst, ebenso wie **rMSSD**, **pNN50** und die folgend beschriebene **HF** (Task Force of the ESC and NASPE, 1996).
5. Spektralanalyse ist die verbreitetste Methode der Parameterberechnung im Frequenzbereich (Task Force of the ESC and NASPE, 1996). Dafür wurden die RR- bzw. Momentanherzfrequenzfolge nach Interpolation mit Splines mit 4 Hz gleichabständig abgetastet und das mittels FFT (Fast Fourier Transformation) berechnete Spektrum über verschiedene Frequenzbereiche integriert (HF, LF, VLF, TOT). Diese Parameter werden zur Darstellung und statistischen Analyse ebenfalls logarithmiert. Der Quotient LF/HF, auch bekannt als vegetativer Quotient (VQ), wird als Indikator der autonomen Balance genutzt.
6. **SDNN** ist die Standardabweichung der Herzschlagintervalle im jeweiligen Analysesegment. Für deren Berechnung werden nur Intervalle zwischen Normalschlägen benutzt, die vom Sinusknoten ausgehen. SDNN ist ebenso wie VLF und TOT ein Maß für die Gesamtvariabilität.
SD1 und **SD2** sind Standardabweichungen entlang den Achsen der in den phase-lag-plot der RR-Intervalle eingebetteten Ellipse (Shaffer and Ginsberg, 2017). SD2 ist faktisch ident mit SDNN.
7. Die **pattern predominance** (pp8, Bettermann et al., 1999) quantifiziert hauptsächlich ateminduzierte Fluktuationen, im Gegensatz zur RSA wird sie aber nicht von der Amplitude beeinflusst und gibt daher koordinative Aspekte von Puls und Atmung wieder (Bettermann et al., 1999).

8. Der Quotient von Herz- und Atemfrequenz (QPA), nimmt bei Menschen in Ruhe vorzugsweise ganzzahlige Werte mit dem Funktionsoptimum 4:1 an (Hildebrandt et al., 1998) und ist ein Parameter, der die Nachterholung reflektiert.

5.2.6 Fragebögen

Basler Befindlichkeits-Skala (BBS)

Der BBS erfasst die momentane subjektive Befindlichkeit in vier Subskalen (Hobi, 1985):

- Vitalität (VT),
- Intrapsychischer Gleichgewichtszustand (IG),
- Soziale Extravertiertheit (SE),
- Vigilanz, kognitive Steuerungs- und Leistungsfähigkeit (VG),
- ein Summenscore bewertet das „Momentanbefinden“.

Das aktuelle Befinden wurde am Abend des ersten Versuchstages erhoben.

Schlaferholung (HRI-Schlaf)

Der Fragebogen zur aktuellen Schlaferholung (Grote, 2010) beinhaltet elf Einzelfragen zu folgenden Komponenten: Schlaffeffizienz, Einschlaf latenz, Schlafkontinuität, Aufwachqualität, subjektive Schlafqualität, Schlafdauer und Schlafbedürfnis. Bei der Interpretation der Komponenten kann zwischen drei Dimensionen (Subskalen) unterschieden werden:

- F1, Schlafmerkmale: aktuelle Merkmale des Schlafverhaltens (Schlaffeffizienz, Einschlaf latenz, Schlafkontinuität),
- F2, Schlafbewertung: subjektive Bewertung von Aufwachqualität und subjektiver Schlafqualität,
- F3, Schlafdauer: quantitative Aspekte Schlafdauer und Schlafbedürfnis.

Der Summenscore aller drei Dimensionen ergibt ein Maß für die aktuelle subjektive Schlaferholung. Der Fragebogen wurde z.B. in Studien mit Messung des Rehabilitationserfolges (Grote et al., 2019) oder Schlafumgebung (Grote et al., 2021) angewandt.

5.2.7 Statistische Methoden

Je nach Fragestellung bzw. Datensatz kamen deskriptive oder analytische Verfahren zur Anwendung. Die spezifischen Methoden und Tests sind bei den jeweiligen Tabellen und Graphiken angegeben.

Die Exploration von Zusammenhängen zwischen biologischen Parametern und der Exposition zu EMF wurde deskriptiv mit t-Tests (Mittelwertvergleichen) und Korrelationstests vorgenommen. Für die Analyse der Abschirmversuche (Abschnitt 5.3.3) kamen lineare gemischte Modelle zum Einsatz.

Das Signifikanzniveau wurde mit der Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,05$ angenommen. Ein Testergebnis von $p < 0,05$ wird im Folgenden als „signifikant“ und von $p < 0,01$ als „hoch signifikant“ bezeichnet.

5.3 Ergebnisse

5.3.1 Versuchsteilnehmer

In die Untersuchung wurden 25 Personen eingeschlossen. Die endgültige Zuteilung zu den beiden Vergleichsgruppen findet sich in Tabelle 5-3. Sie erfolgte aufgrund der gemessenen HF-EMF-Immissionen am Schlafplatz. Es ergaben sich durch die Messungen keinerlei Veränderungen zur vorläufigen Zuteilung auf Basis der Entfernung zur nächsten Mobilfunk-Basisstation.

Tabelle 5-3: HRV, Geschlecht und Gruppenzuordnung der Teilnehmer.

Gruppe	Männlich N =	Weiblich N =	Gesamt
C	7	6	13
V	5	7	12
Gesamt	12	13	25

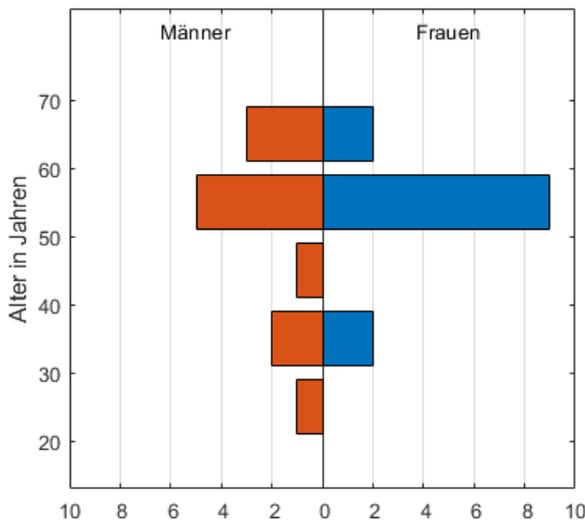


Abbildung 5-1:
Altersverteilung pro
Geschlecht
der 25 Teilnehmer.

Alle Versuchspersonen beendeten die Messungen wie vorgesehen. Ein Mann zeigte im gesamten EKG eine hohe Anzahl von Rhythmusstörungen (Extrasystolen) die eine sachgemäße Auswertung der HRV unmöglich machten. Ein weiterer männlicher Teilnehmer zeigte intermittierende bis langdauernde bradykarde Phasen nur während der Abschirmversuche. Beide Messungen wurden von den HRV-Auswertungen ausgeschlossen (*per protocol* Analyse).

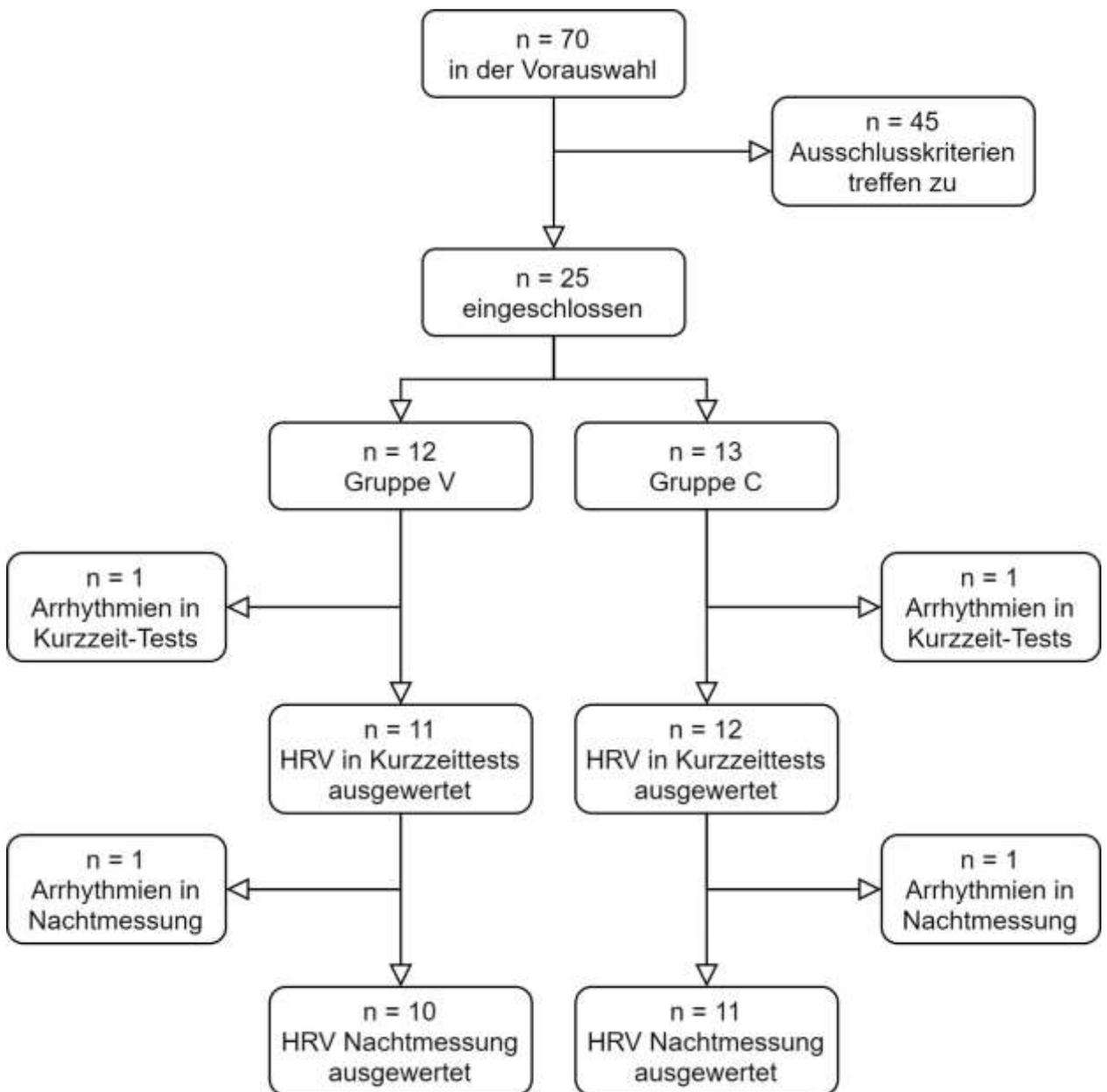


Abbildung 5-2: Teilnehmer, Untersuchungsablauf, Flussdiagramm.

Von den Personen, deren Messungen für die Abschirmversuche ausgewertet wurden, zeigten zwei weitere Personen (ein Mann, eine Frau) nachts arrhythmische und ausgeprägt bradykarde Herzschlag-Sequenzen in hoher Zahl, wie sie während der Abschirmversuche tagsüber nicht aufgetreten waren. Die Daten dieser zwei Personen wurden von der circadianen Analyse nebst Nachtruhe ausgeschlossen.

Gruppenbildung, HF-EMF Exposition am Wohnort

Die Teilnehmer wurden vorläufig auf Basis der Entfernung ihres Wohnortes zur nächsten Mobilfunk-Basisstation zwei Vergleichs-Gruppen zugeordnet. Die Zuordnung wurde durch Messungen der HF-EMF Exposition bestätigt (Abschnitt 3.4.2).

- Kontrollgruppe C, niedrig exponiert
- Versuchsgruppe V, relativ hoch exponiert

5.3.2 Fragebogendaten

Die Daten von allen 25 Personen (12 Männer, 13 Frauen) bildeten das Auswerteset für die Fragebogendaten.

Basler Befindlichkeitsskala BBS

Der Befindlichkeitsfragebogen BBS wurde von den 25 Personen nahezu vollständig ausgefüllt. Es fehlte nur ein einziges Item (TN24, Item 4). Dieses wurde auf den gerundeten Mittelwert der übrigen Items der zugehörigen Subskala Vigilant (Items 4, 8, 12 und 16) gesetzt.

Die Momentanbefindlichkeit wurde am Abend des ersten Versuchstages erhoben. Die Ergebnisse zwischen den Gruppen V und C waren ähnlich. Es gab es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen V und C, weder in der Gesamtwertung noch bei einer der vier Subskalen (Tabelle 5-4). Auch war kein Unterschied zwischen Männern und Frauen zu beobachten (Daten nicht gezeigt).

Tabelle 5-4: Abendliche Momentanbefindlichkeit in den Gruppen V und C, in den vier Subskalen (0 – maximal positiv, 48 – maximal negativ).

BBS-Subskala		Gruppe	N	Mittelwert	Standard-abweichung	t-Test p =
1	Intrapsychischer Gleichgewichtszustand	V	12	21,500	4,1231	0,981
		C	13	21,538	4,0746	
2	Vitalität	V	12	15,333	3,7254	0,847
		C	13	15,615	3,5009	
3	Soziale Extravertiertheit	V	12	15,417	5,4181	0,630
		C	13	14,615	2,2927	
4	Vigilant	V	12	16,167	5,1669	0,857
		C	13	15,846	3,5082	
Gesamt	Summe Befindlichkeit	V	12	68,417	15,2522	0,879
		C	13	67,615	10,6108	

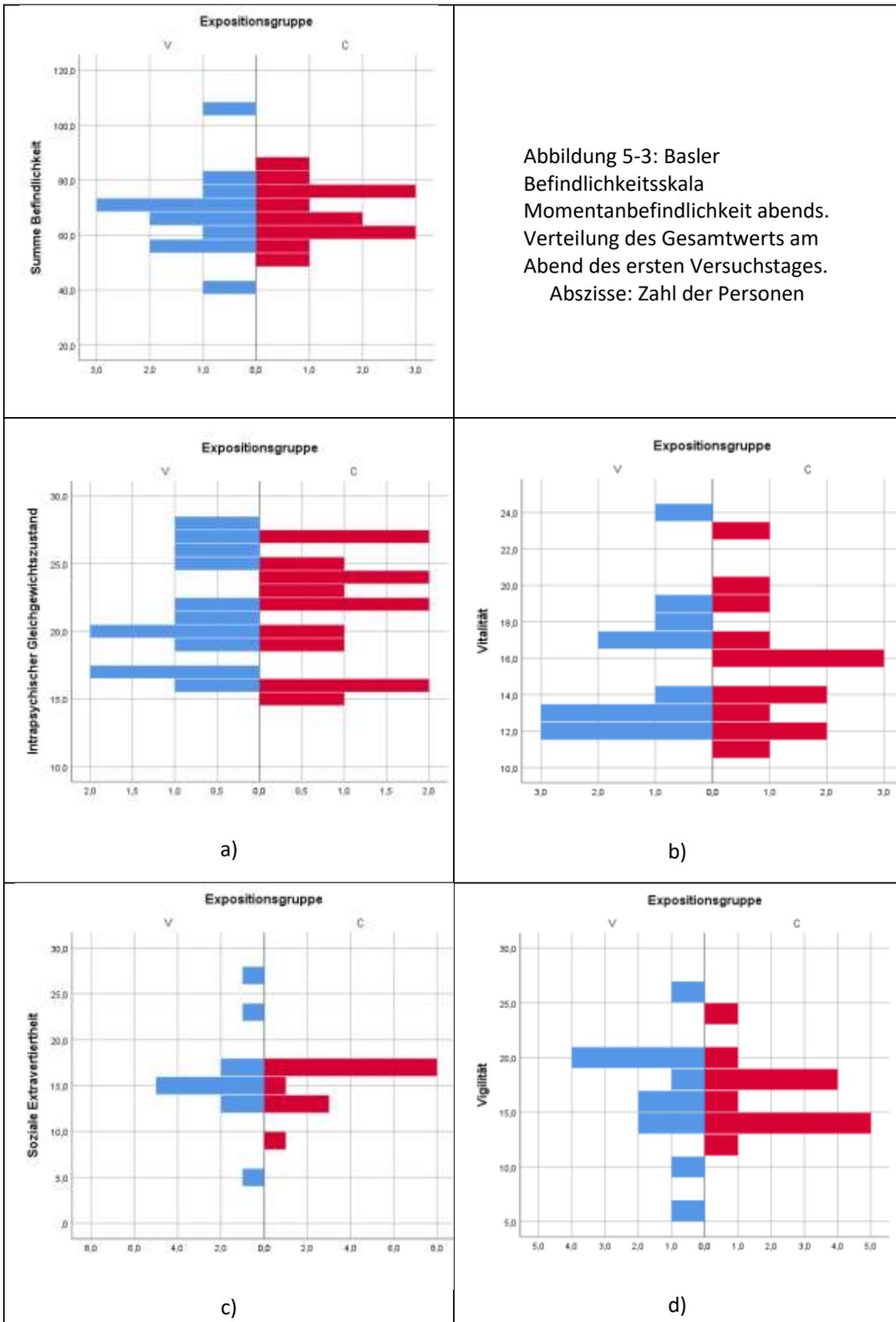


Abbildung 5-4: Verteilung der Subskalen der Basler Befindlichkeitsskala. a) Intrapyschischer Gleichgewichtszustand, b) Vitalität, c) Soziale Extravertiertheit, d) Vigilanz, abgefragt am Abend des ersten Versuchstages.

HRI-Schlaf — Erholungsqualität

Die Erhebung der Qualität der Schlaferholung zeigten keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen V und C, weder in der Gesamtwertung noch bei den einzelnen Sub-Skalen (Tabelle 5-5).

Bei 7 Teilnehmern fehlten ein oder mehrere Items, darum schwankt in Tabelle 5-5 die Zahl „N“ der Teilnehmer zwischen den Subskalen. Eine Anmerkung von TN17, *„nach 1,5 h wieder aufgestanden und nach 3 h wieder ins Bett gegangen“*, wurde als Einschlaflatenz von 180 min erfasst (Item 7), andere fehlende Items wurden nicht ersetzt.

Tabelle 5-5: HRI-Erholungsqualität des Schlafes in den Gruppen V und C.
Die Ergebnisse beider Gruppen waren ähnlich, in keiner der Subskalen wurde ein statistischer Unterschied festgestellt.

Sub-Skala	Gruppe	N	Mittelwert	Std.-Abweichung	Sig. t-Test
F1. Schlafmerkmale	V	8	2,375	0,9161	0,552
	C	12	2,167	0,6276	
F2. Schlafbewertung	V	9	1,556	0,6346	0,570
	C	12	1,417	0,4687	
F3. Schlaflänge	V	10	2,500	0,6667	0,176
	C	12	2,833	0,4438	
aktueller Schlaferholungswert	V	6	16,833	2,9439	0,149
	C	11	14,818	2,4215	

5.3.3 Kurzzeit-Abschirmversuche

Im Folgenden werden exemplarisch jene HRV-Parameter grafisch dargestellt, die auch bei (Misek et al., 2018) besprochen werden. Abbildung 5-5 zeigt die Verlaufs-Muster, wie sie grundsätzlich bei allen evaluierten HRV-Parametern feststellbar waren, als Hinweis auf die interne Validität und Reproduzierbarkeit der erhobenen Messparameter.

Sequenzeffekte

Typischerweise waren innerhalb der Versuchsabläufe (bestehend aus vier 30 Minuten-Abschnitten) konsistente Trends über die Abschnitte hinweg erkennbar.

- Es war in jedem 30 min-Abschnitt ein Median-Unterschied zwischen der Ruhe- und d2-R Test-Phase erkennbar, und
- die Verlaufsmuster (fallender oder steigender Trend) waren dieselben am Testtag 1 und Testtag 2.

Bei der Auswertung der Kurzzeit-Abschirmversuche fanden sich demgemäß statistisch hochsignifikante Sequenz-Effekte innerhalb eines Versuchsdurchlaufes, jedoch keine Unterschiede, die der Exposition zurechenbar sind. Für Details siehe Annex 5.5.1.

Herzfrequenz

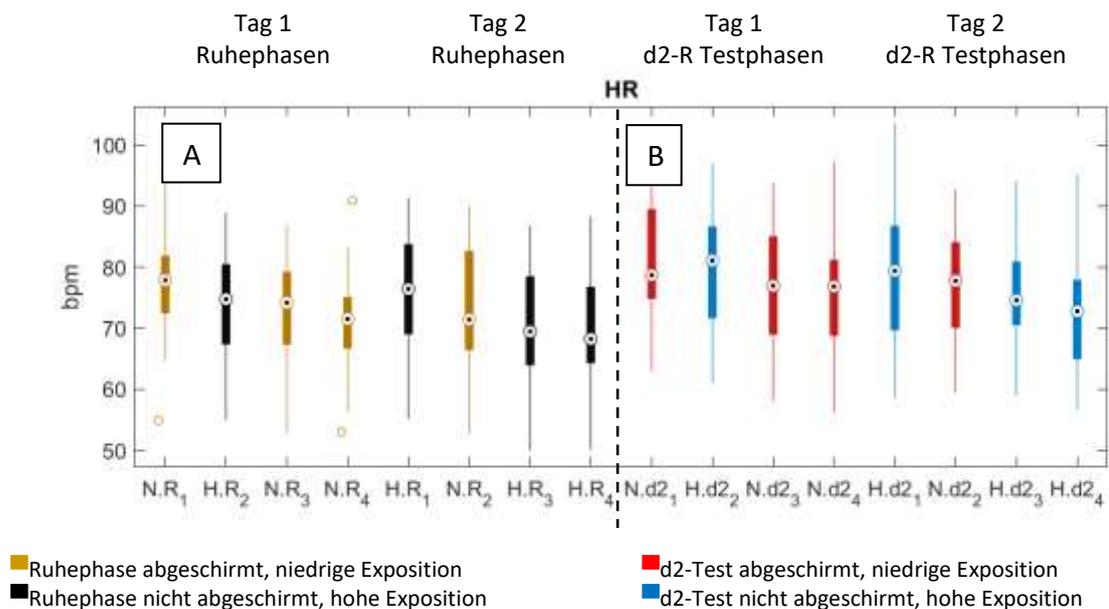


Abbildung 5-5: Abschirmtest, Sequenz-Effekt in der Herzfrequenz (HR).

Boxplot mit Median, Quartilen und einzelne Ausreißer.

A, links: Abfolge der 25 min Ruhephasen; B, rechts: Abfolge der 5 min. d2-R Tests;

Legende auf der x-Achse:

N - niedrige Exposition, H - hohe Exposition,

R₁ bis R₄ Chronologische Abfolge der Ruhephasen;

d₂₁ bis d₂₄ Chronologische Abfolge der d2-R Test-Phasen.

Sowohl bei den 25-minütigen Ruhephasen, wie auch bei den 5-minütigen d2-R Test-Phasen zeigt sich ein Abfolge-Effekt von Abschnitt 1 bis Abschnitt 4, aber kein Effekt, der der Abschirmung zuzuordnen ist.

Weitere Parameter

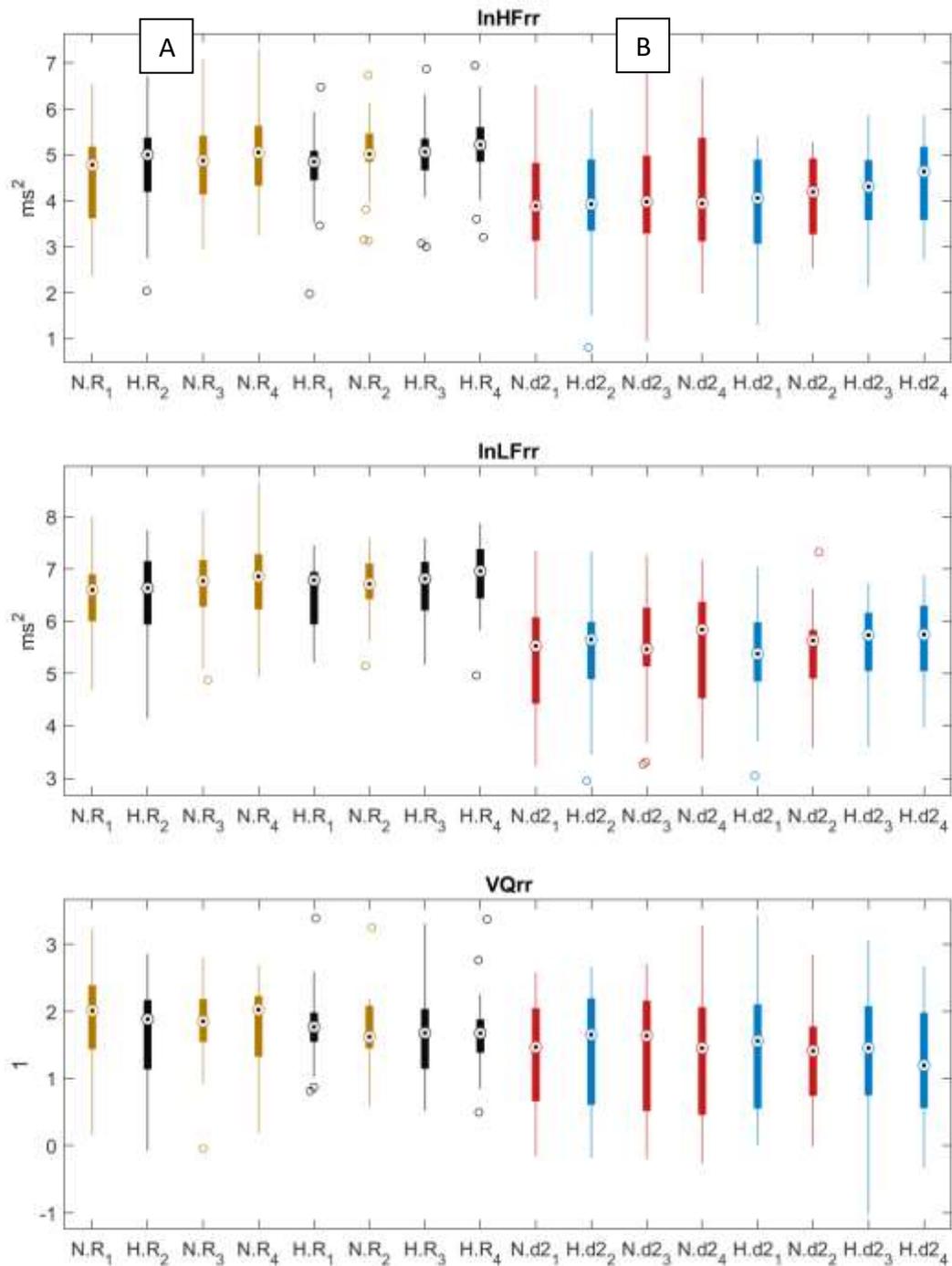


Abbildung 5-6: Abschirmtest, Sequenz-Effekt bei HF, LF und vegetativem Quotienten (VQ).

A, links: Abfolge der 25 min Ruhephasen; B, rechts: Abfolge der 5 min. d2-R Tests; N = niedrige Exposition (abgeschirmt), H = hohe Exposition (nicht abgeschirmt), R₁ bis R₄ = Ruhephasen, d2₁ bis d2₄ = d2-R Test-Phasen.

Sowohl bei den 25-minütigen Ruhephasen, wie auch bei den 5-minütigen d2 –R Test-Phasen zeigt sich ein Abfolge-Effekt von Abschnitt 1 bis Abschnitt 4, aber kein Effekt, welcher der Abschirmung zuzuordnen ist.

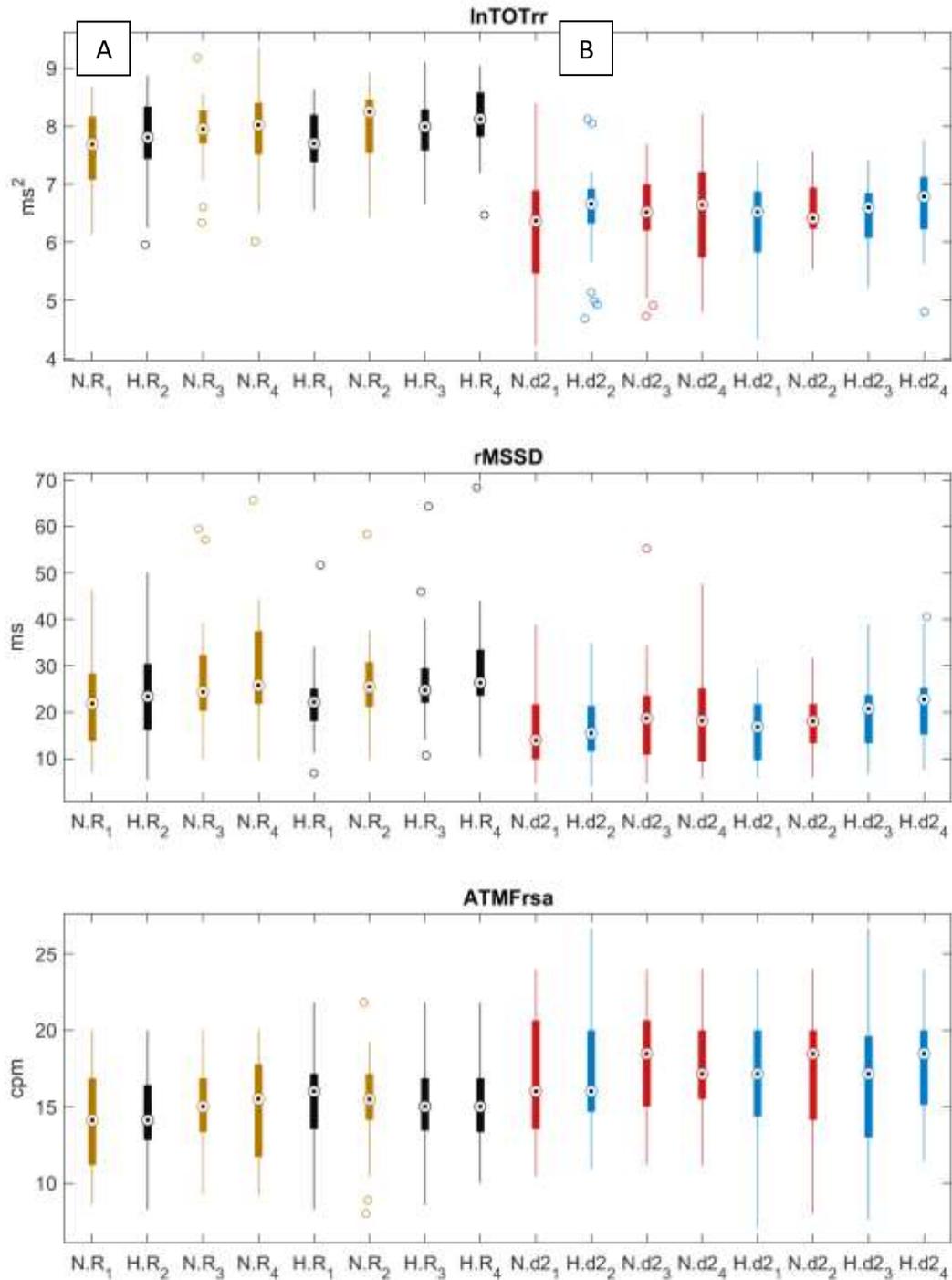


Abbildung 5-7: Abschirmtest, Sequenz-Effekt in der Gesamtvariabilität (InTOT), schnellen vagusassoziierten Rhythmik (rMSSD) und Atemfrequenz (ATMFrSa), A, links: Abfolge der 25 min Ruhephasen; B, rechts: Abfolge der 5 min. d2-R Tests, N = niedrige Exposition (abgeschirmt), H = hohe Exposition (nicht abgeschirmt), R₁ bis R₄ = Ruhephasen, d₂₁ bis d₂₄ = d2-R Testphasen. Sowohl bei den 25-minütigen Ruhephasen, wie auch bei den 5-minütigen d2-R Testphasen zeigt sich ein Abfolge-Effekt von Abschnitt 1 bis Abschnitt 4, aber kein Effekt welcher der Abschirmung zuzuordnen ist.

Personenbezogene Einflussgrößen

Gibt es einen Zusammenhang von Probandenalter und/oder individuellen Basiswerten der Vagus-Aktivität und/oder Herzfrequenz auf die Sensibilität auf Exposition mit HF-EMF? Für diese Fragestellung wurden ausgewählte HRV-Parameter-Differenzen zwischen vergleichsweise hoher Exposition (ohne Abschirmung) und niedriger Exposition (mit Abschirmung) bestimmt und zusammen mit HRV-Ruhewerten und Probanden-Alter betrachtet. Das Ergebnis dieser Regressionsanalysen liefert Hinweise für einen möglichen Zusammenhang zwischen 1) Auswirkungen der HF-EMF-Abschirmung mit 2) Alter oder 3) vegetativer Ausgangslage. Abbildung 5-8 zeigt die Ergebnisse der Regressionsanalyse für die Herzrate (ΔHR) und die Vagus-Aktivität ($\Delta \ln HFhr$).

Die Herzfrequenz (Herzrate – HR, Puls) ...

- Senkt sich bei kurzfristiger HF-EMF-Abschirmung bei jüngeren Proband (< 45 Jahre), aber nicht bei älteren Personen. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse gegen Alter sind an der statistischen Signifikanzgrenze ($p=0,052$ Ruhephase; $p=0,043$ d2-Testphase). Bei der Fülle von Tests sind so genannte statistische Typ-1 Fehler (zufällig falsch positive Ergebnisse) zu erwarten. Eine Wiederholung mit mehr Teilnehmern und mit weiterer Altersstreuung kann eine bessere Einschätzung zu dieser Fragestellung liefern.
- Zeigt keinen Zusammenhang der Veränderung bei Exposition mit der Ruhe-Vagus-Aktivität ($p=0,167$ bzw. $p=0,267$).
- Zeigt sich zwischen „exponiert“ und „nicht exponiert“ unabhängig von der Höhe der individuellen Ruhe-Herzrate der Teilnehmer ($p=0,885$ bzw. $p=0,269$).

Die Vagus-Aktivität (gemessen am Parameter $\ln HRhr$)

- Zeigt sich unter Kurzeitexposition zu HF-EMF bei den jungen Teilnehmer (< 45 Jahre) erniedrigt; bei Teilnehmer von > 45 Jahren, ist dieser Befund nicht erkennbar. Die Regressionsanalyse zur Altersabhängigkeit ist in Ruhe signifikant, beim d2-R Test nicht ($p=0,031$ bzw. $p=0,162$).
- Liegt die Vagus-Aktivität im oberen Bereich ($\log RSAhr > 0,15$ bpm), so wird sie bei HF-EMF-Exposition gesenkt. Anders ausgedrückt: bei Abschirmung der HF-EMF zeigt sich eine verbesserte Erholung der Vagus-Aktivität. Bei Teilnehmern mit niedrigerer Vagus-Aktivität kann keine einheitliche Reaktionsrichtung festgestellt werden. Die Regressionsanalyse weist den Effekt in Ruhe als statistisch signifikant aus ($p=0,008$), in der d2-R Konzentrationsphase nicht ($p=0,117$).
- Zeigt sich zwischen „exponiert“ und „nicht exponiert“ unabhängig von der Höhe der individuellen Ruhe-Herzrate der Teilnehmer.

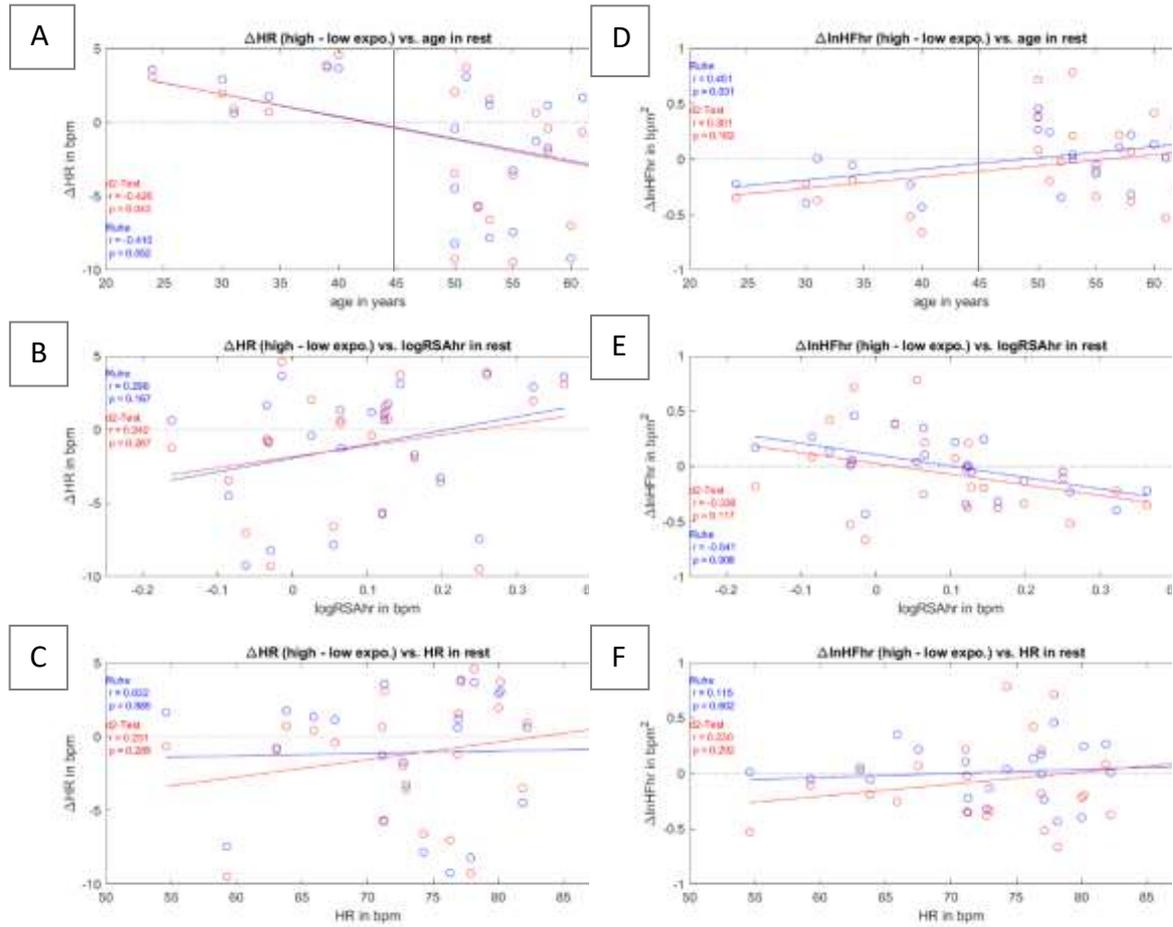


Abbildung 5-8: Expositionsbedingte HRV-Differenz, je nach Alter und Ruhewerten. Die Differenzen von HR (Herzfrequenz, A, B, C) und lnHFhr (Vagus-Aktivität, D, E, F) zwischen exponierter und abgeschirmter Versuchsbedingung werden über Alter (A, D), Ruhe-Vagus-Aktivität (logRSA, B, E) und Ruhe-Herzfrequenz (HR in rest, C, F) aufgetragen. Jeder Punkt repräsentiert pro Proband die mittleren Messdifferenzen zwischen HF-EMF-Exposition und Abschirmung, und zwar repräsentiert blau die 25 Minuten Ruhephasen, rot die 5 Minuten d2-Test-Phasen. Der jeweilige Korrelationskoeffizient (r) wurde mittels F-Test auf statistische Signifikanz (p) geprüft.

Bei der Herzfrequenz (HR) zeigt sich eine Beziehung zum Alter (A), aber nicht zur Vagus-Aktivität (B) und nicht zur Basis-Herzrate (C). Bei der Vagus-Aktivität ($\Delta \ln HFhr$, D, E, F) während der 25 Minuten Ruhephasen findet sich eine signifikante Korrelation mit dem Alter (D) und der $\log RSA_{hr}$ (E).

Die in den Diagrammen ersichtlichen Abhängigkeiten zeigen, dass Alter und die Vagus-Aktivität (vor der Exposition) einen entscheidenden Einfluss auf die Wirkung der Exposition haben, im Sinne einer Wirk-Umkehr. Dieses Ergebnis sollte in zukünftigen Versuchsanordnungen berücksichtigt werden, da sonst vorhandene Wirkungen (z.B. je nach Altersverteilung bei den Testpersonen) übersehen werden können, bzw. unterschiedliche Studien scheinbar widersprüchliche Ergebnisse liefern.

5.3.4 Langzeit- und Nachtauswertung

Testpersonencharakteristik

Tabelle 5-6 zeigt die Geschlechts- und Altersverteilung der Teilnehmer, deren Langzeitmessungen über zumindest 24h in die Auswertung aufgenommen wurden.

Tabelle 5-6: HRV-Nachtstundenauswertung, Testpersonen Gruppenvergleich.

	Gruppe V			Gruppe C		
	Männer	Frauen	Gemeinsam	Männer	Frauen	Gemeinsam
N	3	7	10	6	5	11
Alter in Jahren						
Mittelwert	54,3	51,7	52,5	42,7	56,4	48,9
Median	61	52	53,5	42,5	57	53
SD	12,4	6,6	8,0	15,2	4,9	13,3
Minimum	40	39	39	24	50	24
Maximum	62	58	62	63	62	63

5.3.5 Vorverarbeitung und betrachtete Zeitabschnitte

Die Abschnitte zur Tageszeit und die der Nachtruhe wurden getrennt betrachtet. Während der Nachtruhe entfallen tätigkeitsbedingte HRV-Schwankungen und die Analyse der Nachtruhedaten erlaubt Aussagen zur Erholungs- und Regenerationsqualität (Moser et al., 2006; Moser et al., 2008).

Die Probanden markierten den Beginn der Nachtruhe per Tastendruck am Recorder. Im Tätigkeitsprotokoll vermerkte Aufwachphasen wurden von der Analyse ausgenommen, wenn sie eine Länge von 15 min. überschritten. Kürzere Schlafunterbrechungen wurden für den Wert der gesamten Nachtruhe einberechnet. Ruhiges Liegen mit Einschlafbereitschaft ist in der Analyse der Nachtruhe mit enthalten, da sich der tatsächliche Einschlafzeitpunkt der Selbstprotokollierung entzieht und nicht exakt bestimmt werden kann.

Als Basalwerte wurden die Werte einer halben Stunde aus dem Tiefschlaf visuell detektiert und zur Analyse herangezogen. Typischerweise ist die erste Tiefschlafphase die ruhigste und längste aller Tiefschlafphasen, jedoch zeigte sich in diesem Probandenkollektiv, dass fast alle Teilnehmer die niedrigste Herzfrequenz mit der gleichmäßigsten RSA erst in einer späteren Tiefschlafphase erreichten. Daher wurde zusätzlich zur ersten Tiefschlafphase („First deep“) noch jene Tiefschlafphase mit der niedrigsten Herzfrequenz analysiert („Lowest deep“).

Ein Teilnehmer (TN10) hat mittags und abends Kinder schlafen gelegt und ist dabei offensichtlich selbst eingeschlafen. Die tiefsten Herzfrequenzwerte wurden beim Schlaf zu Mittag erreicht. Dass die erste auch die tiefste Tiefschlafphase war, wurde nur bei zwei Personen festgestellt (TN16, TN25).

Tabelle 5-7: HRV-Parameter in den Wach- und Schlafphasen, Gruppenvergleich. Gruppe V - Versuchsgruppe, C - Kontrollgruppe), p-Werte eines t-Tests zwischen den Gruppen (ohne Korrektur für mehrfachen Vergleich) und Effektstärke (Hedges' g). p-Werte < 0,05 sind gelb, < 0,01 rot hervorgehoben, Tendenzen (p<0.1) grün hinterlegt. Bewertung der Effektgröße: kleiner Effekt g>0.1, mittlerer Effekt g>0.3, großer Effekt (fett gedruckt) g>0.5.

MW – Mittelwerte, Std. – Standardabweichung.

Parameter	Wachphase Tag						Nachtruhe					
	Gruppe V		Gruppe C		Signifi- kanz	Effekt- stärke	Gruppe V		Gruppe C		Signifi- kanz	Effekt- stärke
	MW	Std.	MW	Std.	p	g	MW	Std.	MW	Std.	p	g
HR	79,97	9,16	81,17	6,759	0,733	-0,15	62,93	6,55	64,41	6,211	0,602	-0,23
RR	777,5	107,6	755,4	60,51	0,565	0,26	967,9	107,2	946,0	93,84	0,623	0,22
SDNN	54,35	13,86	55,72	12,97	0,817	-0,10	48,65	14,3	62,91	23,9	0,118	-0,72
rMSSD	20,54	9,08	23,48	7,506	0,427	-0,35	24,08	9,047	38,55	20,76	0,056	-0,89
logRSAhr	0,030	0,143	0,075	0,118	0,442	-0,34	-0,018	0,120	0,104	0,164	0,068	-0,85
logRSArr	1,011	0,198	1,038	0,134	0,721	-0,16	1,163	0,140	1,265	0,222	0,228	-0,54
PP8	2,289	0,302	2,337	0,362	0,747	-0,14	3,808	1,565	3,799	1,865	0,990	0,01
pNN50	4,506	5,79	5,131	3,51	0,766	-0,13	5,689	7,94	15,02	11,98	0,051	-0,91
SD1	14,54	6,43	16,62	5,315	0,427	-0,35	17,05	6,409	27,30	14,71	0,056	-0,89
SD2	75,06	18,52	76,51	17,79	0,857	-0,08	65,98	19,4	83,70	30,69	0,135	-0,68
HVQmean	65,52	22,41	57,19	18,64	0,364	0,41	59,30	11,95	47,39	23,94	0,172	0,62
ATMFrSa	14,81	1,80	15,09	2,632	0,777	-0,13	15,18	1,453	15,30	1,118	0,823	-0,10
QPArsa	5,807	1,10	5,864	1,408	0,918	-0,05	4,205	0,480	4,263	0,440	0,776	-0,13
lnHFrr	4,409	0,943	4,741	0,752	0,382	-0,39	4,770	0,698	5,532	1,107	0,078	-0,81
lnLFrr	6,151	0,573	6,413	0,798	0,403	-0,37	5,834	0,636	6,506	0,877	0,061	-0,87
lnVLFrr	7,046	0,484	7,026	0,489	0,928	0,04	6,526	0,649	6,956	0,721	0,170	-0,62
lnTOTrr	7,540	0,506	7,621	0,575	0,734	-0,15	7,199	0,639	7,722	0,801	0,116	-0,72
VQrr	1,743	0,591	1,672	0,261	0,724	0,16	1,064	0,570	0,973	0,462	0,691	0,18
lnHFhr	-0,164	0,813	0,208	0,703	0,274	-0,49	-0,691	0,711	0,130	0,822	0,025	-1,06
lnLFhr	1,604	0,588	1,915	0,748	0,307	-0,46	0,440	0,519	1,168	0,585	0,007	-1,31
lnVLFhr	2,524	0,335	2,562	0,414	0,823	-0,10	1,152	0,400	1,652	0,421	0,012	-1,22
lnTOThr	3,010	0,412	3,143	0,518	0,527	-0,62	1,817	0,450	2,402	0,495	0,011	-1,23
VQhr	1,769	0,569	1,706	0,258	0,747	0,19	1,131	0,556	1,038	0,450	0,678	0,18

Tabelle 5-8: HRV-Parameter in Tiefschlafphasen, Gruppenvergleich.
 Gruppe V - Versuchsgruppe, C - Kontrollgruppe, p-Werte eines t-Tests zwischen den Gruppen (ohne Korrektur für mehrfachen Vergleich) und Effektstärke (Hedges' g).
 Bewertung der Effektgröße: kleiner Effekt $g > 0.1$, mittlerer Effekt $g > 0.3$, großer Effekt (fett gedruckt) $g > 0.5$.

MW – Mittelwerte, Std. – Standardabweichung. Eine hohe Effektstärke ohne Signifikanz ist ein Hinweis, dass in der Gruppe die Streuung der Einzelwerte groß war. Es bräuchte eine größere Versuchsgruppe eine vorhandene Wirkung signifikant nachzuweisen, oder zu sehen, ob beispielsweise in der Gruppe unterschiedliche Reaktionen auftreten (z.B. Reaktion je nach Alter, siehe dazu Abbildung 5-8).

Parameter	<i>Erste Tiefschlafphase</i>						<i>Tiefste Tiefschlafphase</i>					
	Gruppe V		Gruppe C		Signifi- kanz	Effekt- stärke	Gruppe V		Gruppe C		Signifi- kanz	Effekt- stärke
	MW	Std	MW	Std	<i>p</i>	<i>g</i>	MW	Std.	MW	Std.	<i>p</i>	<i>g</i>
HR	65,61	7,63	66,15	8,405	<i>0,879</i>	-0,07	58,40	5,559	58,13	6,046	<i>0,917</i>	0,05
RR	927,3	118,0	921,2	119,7	<i>0,907</i>	0,05	1036,0	102,8	1042,0	103,2	<i>0,902</i>	-0,05
SDNN	28,98	10,81	35,14	18,52	<i>0,370</i>	-0,40	39,71	13,23	48,38	18,51	<i>0,236</i>	-0,53
rMSSD	22,30	13,35	27,65	17,44	<i>0,443</i>	-0,34	29,51	12,13	41,29	21,4	<i>0,143</i>	-0,67
logRSAhr	0,007	0,214	0,056	0,172	<i>0,572</i>	-0,25	0,045	0,139	0,132	0,214	<i>0,286</i>	-0,48
logRSArr	1,157	0,229	1,198	0,240	<i>0,690</i>	-0,18	1,292	0,164	1,382	0,278	<i>0,384</i>	-0,39
PP8	5,057	2,559	4,203	1,528	<i>0,360</i>	0,41	5,278	2,90	4,695	2,146	<i>0,604</i>	0,23
pNN50	5,857	14,13	8,924	13,68	<i>0,619</i>	-0,22	9,082	13,46	21,51	19,56	<i>0,110</i>	-0,73
SD1	15,79	9,454	19,58	12,35	<i>0,443</i>	-0,34	20,91	8,596	29,24	15,16	<i>0,143</i>	-0,67
SD2	37,49	12,79	45,34	23,52	<i>0,361</i>	-0,41	51,50	17,19	61,09	22,05	<i>0,284</i>	-0,48
HVQmean	62,01	20,99	55,15	24,1	<i>0,497</i>	0,30	47,95	12,31	43,12	28,3	<i>0,624</i>	0,22
ATMFrSa	15,80	1,673	15,83	1,36	<i>0,960</i>	-0,02	14,69	1,517	15,08	1,361	<i>0,548</i>	-0,27
QPArsa	4,182	0,509	4,208	0,558	<i>0,913</i>	-0,05	4,013	0,520	3,890	0,580	<i>0,616</i>	0,22
InHFrr	4,793	1,104	5,037	1,17	<i>0,630</i>	-0,21	5,340	0,678	5,766	1,142	<i>0,318</i>	-0,45
InLFrr	5,116	0,701	5,676	1,114	<i>0,190</i>	-0,59	5,875	0,688	6,279	0,959	<i>0,285</i>	-0,48
InVLFrr	5,314	0,636	5,610	0,976	<i>0,425</i>	-0,36	6,204	0,610	6,387	0,870	<i>0,588</i>	-0,24
InTOTrr	6,352	0,760	6,660	1,034	<i>0,450</i>	-0,34	7,069	0,586	7,378	0,887	<i>0,363</i>	-0,41
VQrr	0,323	0,849	0,639	0,570	<i>0,326</i>	-0,44	0,535	0,549	0,513	0,565	<i>0,930</i>	0,04
InHFhr	-0,512	1,129	-0,257	0,887	<i>0,570</i>	-0,25	-0,416	0,687	0,014	0,871	<i>0,226</i>	-0,55
InLFhr	-0,175	0,501	0,396	0,941	<i>0,104</i>	-0,75	0,155	0,587	0,543	0,675	<i>0,177</i>	-0,61
InVLFhr	0,023	0,390	0,334	0,825	<i>0,291</i>	-0,47	0,478	0,516	0,644	0,576	<i>0,497</i>	-0,30
InTOThr	1,063	0,621	1,381	0,833	<i>0,338</i>	-0,43	1,346	0,499	1,639	0,575	<i>0,228</i>	-0,54

VQhr	0,338	0,868	0,653	0,584	0,337	-0,43	0,571	0,545	0,529	0,572	0,864	0,08
------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------

24 Stunden-Profile der cardiovegetativen Aktivität

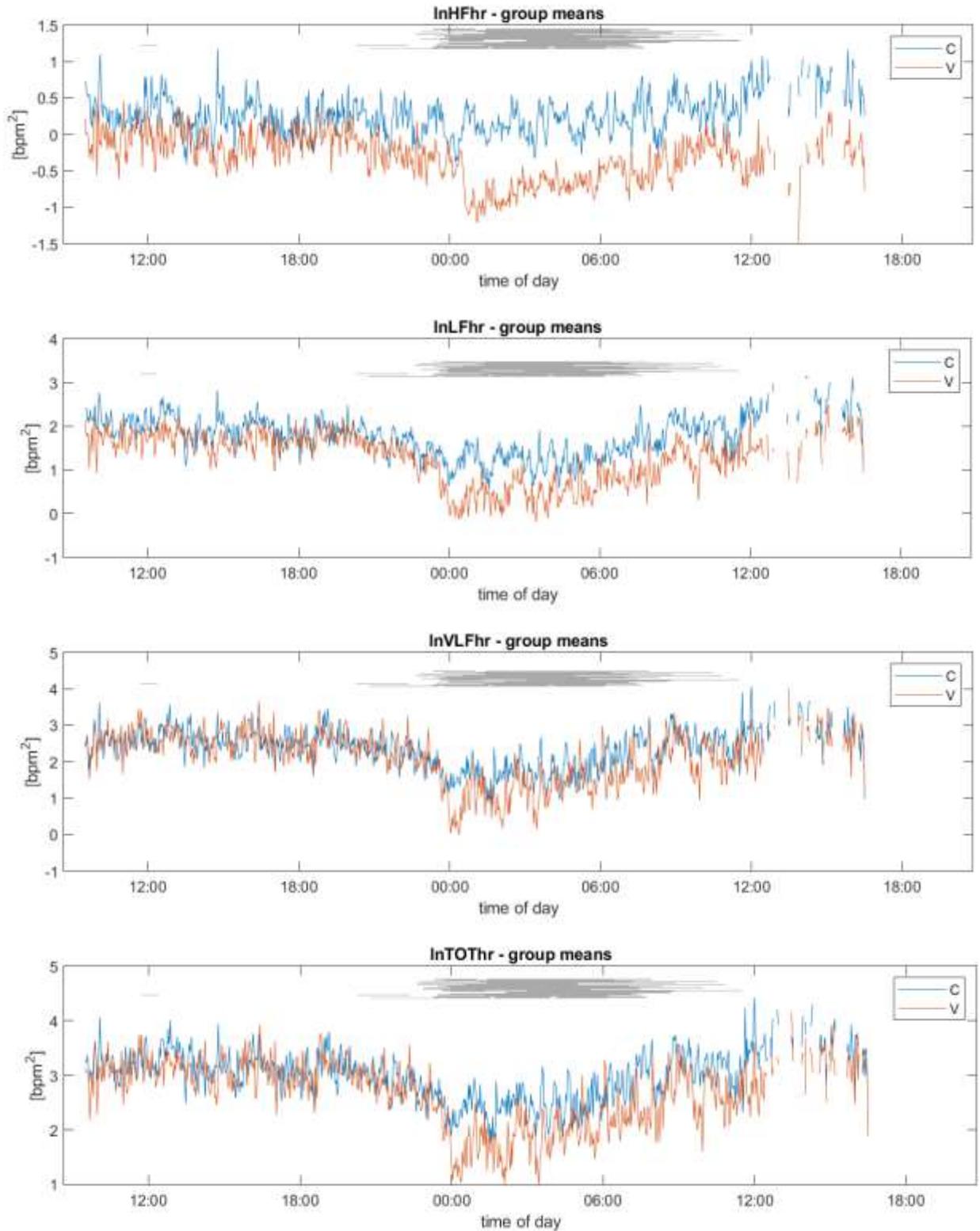


Abbildung 5-9: Tagesverlauf der Spektralparameter nach tatsächlicher Uhrzeit. Die in 5-Minuten-Intervallen berechneten HRV-Parameter wurden pro Vergleichsgruppe gemittelt. Die grauen Balken am oberen Rand repräsentieren die

Schlafzeiten, Schlafunterbrechungen sind als Lücken erkennbar. Bei Tag decken sich die Verläufe meist, in den Nachstunden (00:00 bis ca. 06:00 Uhr) liegen die Werte der Gruppe V eher unter jenen der Kontroll-Gruppe C.

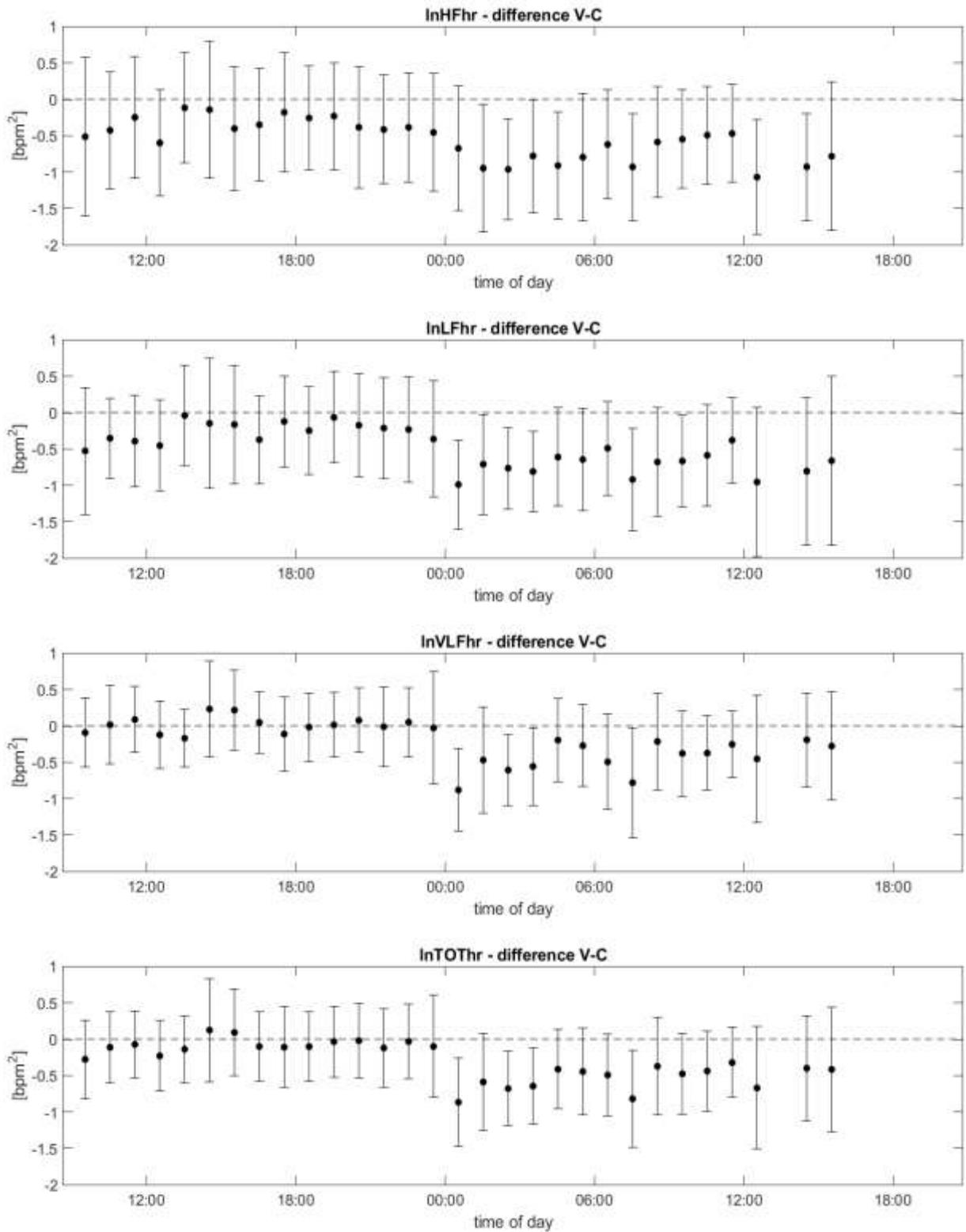


Abbildung 5-10: Differenzen und 95%-Konfidenzintervalle, Stundenmittel der HRV. Während der Wachzeiten (z.B. von 12:00 Uhr bis 18:00 Uhr) ist kein besonderer Gruppen-Unterschied erkennbar (alle Konfidenzintervalle schließen den Wert 0 ein), nach Mitternacht (00:00 Uhr) finden sich vereinzelt oder gruppiert größere

Differenzen zwischen der Gruppe V und Gruppe C, die Konfidenzintervalle ohne Einschluss der 0-Linie zeigen einen statistisch signifikanten Gruppenunterschied.

Nachtruhe

Um zu prüfen, ob die beobachteten Gruppenunterschiede der Tageszeit oder alternativ der individuellen Ruhezeit zuordenbar sind, wurden die 24 Stunden Aufzeichnungen synchronisiert.

Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 zeigen die 24-Stunden Verläufe ausgewählter Parameter, nachdem die Kurven der individuellen Teilnehmer auf den Zeitpunkt des Zubettgehens (Licht aus, Schlafbereitschaft) synchronisiert (Zeitpunkt 0) sind. Im Zeitraum -10 h bis +12 h sind die Messungen aller 21 Probanden enthalten, zu den Rändern hin sind es aufgrund unterschiedlicher Schlaf- und Messzeiten zwischen den Teilnehmern sukzessive weniger Daten.

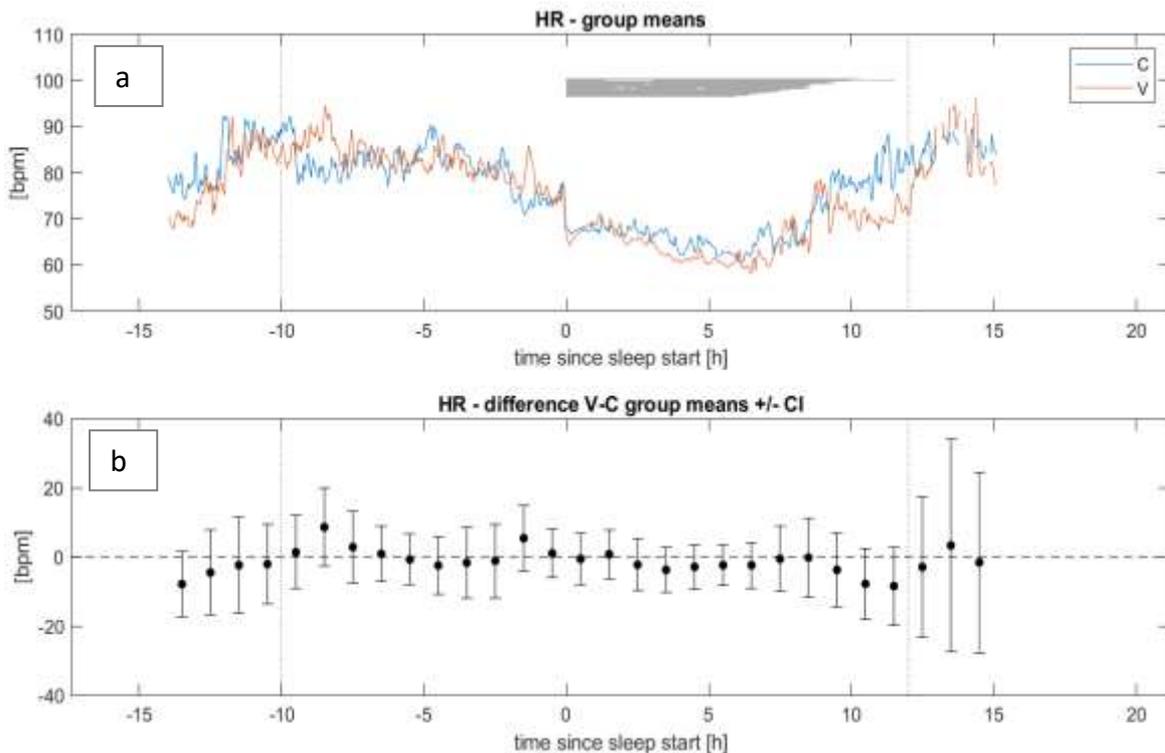


Abbildung 5-11: Tagesverlauf und Gruppendifferenz der Herzfrequenz, schlafsynchronisiert.

a: Die Herzfrequenz wurde in 5-Minuten-Intervallen berechnet und pro Vergleichsgruppe gemittelt. Der Zeitpunkt „0“ markiert den Beginn der Nachtruhe. Die grauen Linien am oberen Rand repräsentieren die individuellen Schlafzeiten, Schlafunterbrechungen sind als Lücken erkennbar.

Zu Beginn der Nachtruhe (Zeitpunkt „0“) ist eine markante Absenkung der Herzrate zu beobachten. Die unterschiedliche Schlafdauer der Probanden bedingt, dass beim Aufwachen der Anstieg zum Tagesniveau nicht markant sondern allmählich erfolgt. Die Verläufe in den Gruppen V und C liegen durchgehend eng beieinander. Die Herzfrequenz in den Gruppen V und C ist über die gesamte Beobachtungszeit nicht unterschiedlich, sondern ähnlich.

b: Gruppendifferenzen der Gruppen V und C der stundenweise gemittelten Herzfrequenz, Mittelwert mit 95%-Konfidenzintervall des Differenzwerts. Zu keinem Zeitpunkt gibt es auffällige Gruppenunterschiede.

Die Abbildung 5-12 zeigt vier weitere 24-Stundenprofile, und Abbildung 5-13 zeigt die jeweils zugehörige Gruppendifferenz pro Stunde. Tagsüber findet sich kein besonderer Unterschied, während der Nachtruhe zeichnet sich ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Gruppen ab. Die Vagus-Aktivität ist tagsüber in der Gruppe C wenig, aber konsistent höher als in Gruppe V. Bereits zwei bis drei Stunden vor der Nachtruhe gehen die Verläufe beim Parameter HF auseinander (Abbildung 5-12.a). Ab Beginn der Nachtruhe (Zeitpunkt „0“) wird dieser Unterschied deutlich größer und ist statistisch signifikant.

Geringere, aber ebenso signifikante Unterschiede sind während der Nachtruhe in den langsameren Rhythmen wie der LF (Sympathikus-Aktivität bzw. Blutdruckrhythmik, Abbildung 5-12.b - $\ln LF_{hr}$) zu beobachten. Ähnliches gilt für die Durchblutungsrythmik (Abbildung 5-12.c - VLF). Die Verläufe der Parameter $\ln VLF_{hr}$ und $\ln TOT_{hr}$ (Abbildung 5-12.c und d) zeigten beim Gruppenvergleich tagsüber eine nahezu perfekte Überlagerung, während der Nachtruhe war ein geringer Gruppenunterschied beobachtbar.

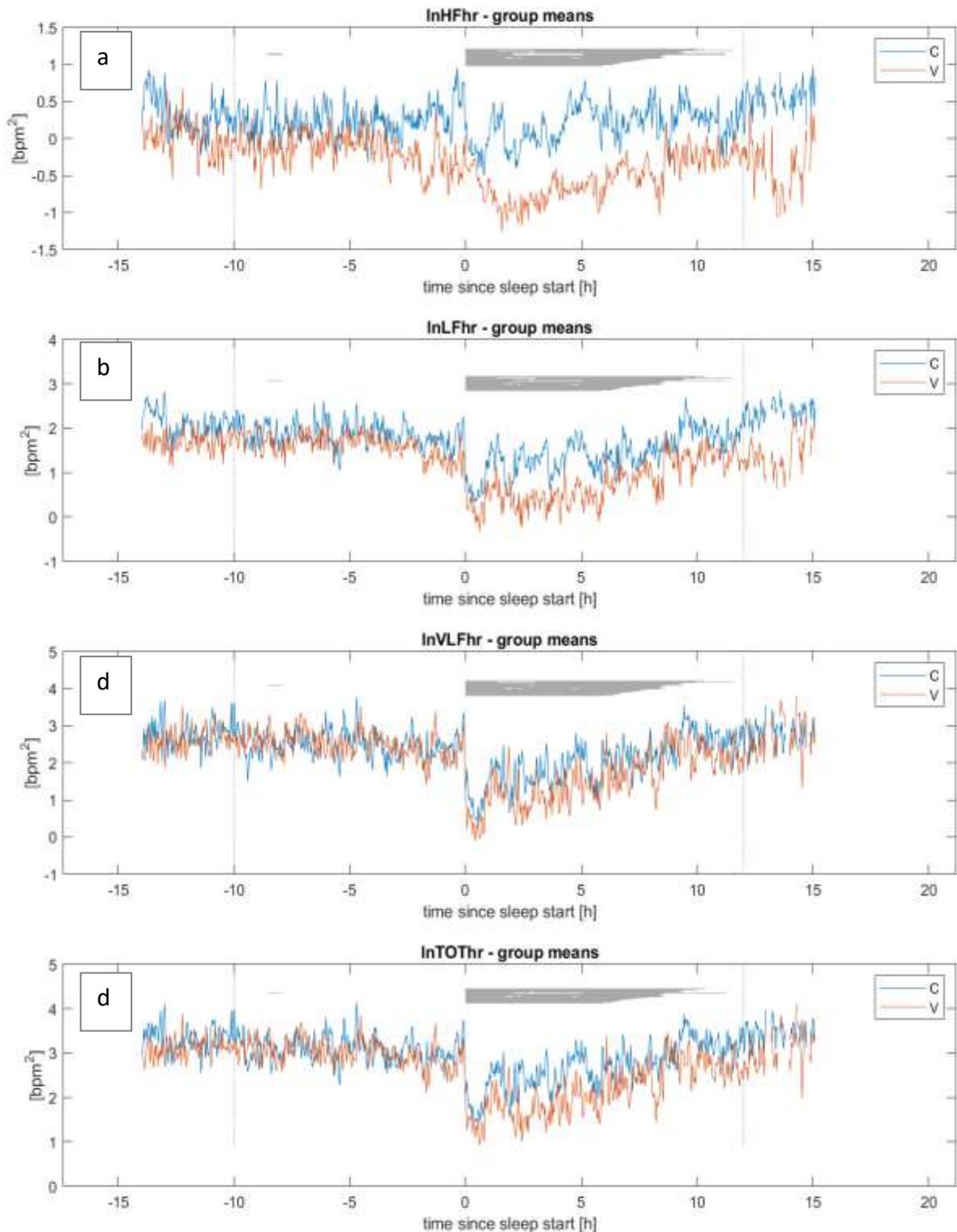


Abbildung 5-12: Tagesverläufe, synchronisiert auf den Beginn der Nachtruhe. V – Versuchsgruppe, C – Kontrollgruppe. Diagramm a): HF, Vagus-Aktivität; b): LF, Sympathikus-Aktivität; c) VLF, Durchblutungsrhythmik; d) TOT, Gesamtvariabilität. Während des Tages überlagern sich die Verläufe der C- und der Gruppe V. Während der Nachtruhe - Stunde 0 bis Stunde 5 - sind in der Gruppe V alle Parameter erniedrigt, insbesondere jene, die Vagus-Aktivität anzeigen.

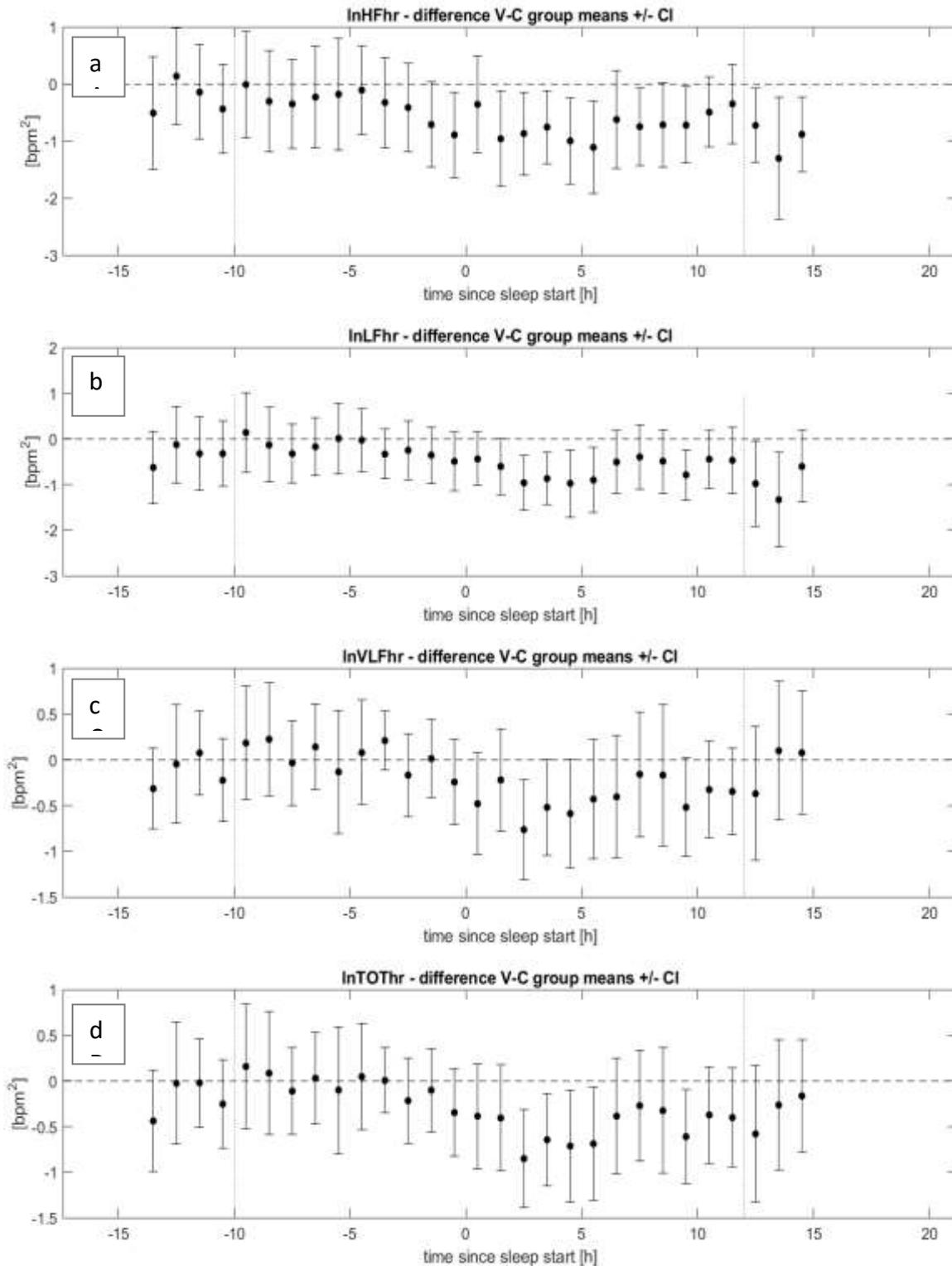


Abbildung 5-13: Gruppendifferenzen, Tagesverläufe, synchronisiert. Stundenmittel mit 95%-Konfidenzintervall.

Wenn das Konfidenzintervall zur Gänze über oder unter der Nulllinie liegt, zeigt das einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen V und C an (z.B. während der Nachtruhezeiten, Stunden +2 bis +5).

V – Versuchsgruppe, C – Kontrollgruppe. Diagramm a): HF, Vagus-Aktivität; b): LF, Sympathikus-Aktivität; c) VLF, Durchblutungsrhythmik; d) TOT, Gesamtvariabilität.

5.3.6 Korrelationen von EMF- und HRV-Parametern

Vom Projektpartner Dr. Moldan Umweltanalytik wurde am Schlafplatz die Exposition mit nieder- und hochfrequenter EMF dokumentiert. Die Messmethoden und detaillierten Ergebnisse sind im Abschnitt 3 beschrieben. Tabelle 5-9 listet die EMF-Expositionsparameter, die für Korrelationsanalysen herangezogen wurden.

Tabelle 5-9: Elektromagnetische Feld-Arten für die Korrelation mit HRV.

Kurzbezeichnung	Einheit	Bedeutung
EWF	V/m	Niederfrequente elektrische Wechselfelder, 30-2.000 Hz
HF_DECT_peak	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	Hochfrequente Leistungsflussdichte im DECT-Band
HF_GSM900_peak	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	Hochfrequente Leistungsflussdichte im GSM900-Band
HF_LTE_peak	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	Hochfrequente Leistungsflussdichte im LTE-Band
HF_WLAN_peak	$\mu\text{W}/\text{m}^2$	Hochfrequente Leistungsflussdichte in WLAN-Bändern, 2,4 bzw. 5 GHz
MWF_17_avg	nT	Mittlere Magnetische Flussdichte im Bereich 16,7 Hz
MWF_17_max	nT	Maximale Magnetische Flussdichte im Bereich 16,7 Hz
MWF_50_avg	nT	Mittlere Magnetische Flussdichte im Bereich 50 Hz
MWF_50_max	nT	Maximale Magnetische Flussdichte im Bereich 50 Hz

Nachdem die Expositionshöhe der Freiwilligen bei den verschiedenen EMF-Parameter meist eine nicht-normale, linkssteile, rechtsschiefe Verteilung aufwies wurde daher die Korrelation mit HRV-Parametern mit dem verteilungsunabhängigen Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman geprüft. Die Korrelationen zwischen EMF- und HRV-Parametern (Abbildung 5-14) sollen mögliche Zusammenhänge von spezifischen EMF-Bereichen und Parametern der ANS-Aktivität bei Tag bzw. Nacht aufzeigen. Bei dieser Analyse zeigen sich biologisch relevante Ergebnisse aufgrund der großen Anzahl nicht in Einzelvergleichen, erst Cluster von signifikanten Korrelationen liefern einen Hinweis auf einen Einfluss der EMF-Exposition auf das autonome Nervensystem.

Während der Wachphase war keine auffällige Häufung von Korrelationen zu beobachten. Hingegen zeigten sich in der Schlafphase niedrigere HRV-Werte vor allem bei der Vagus-Aktivität als auch bei der Gesamtvariabilität, wenn die Immission von GSM- und LTE-Exposition höher lag (Abbildung 5-14 C).

Niederfrequente elektrische Wechselfelder im 50 Hz-Bereich haben möglicherweise einen positiven Zusammenhang mit den langsameren Bereichen der HRV (Blutdruck- und Durchblutungsrythmik) zu Schlafbeginn (erste Tiefschlafphase, Abbildung 5-14 D).

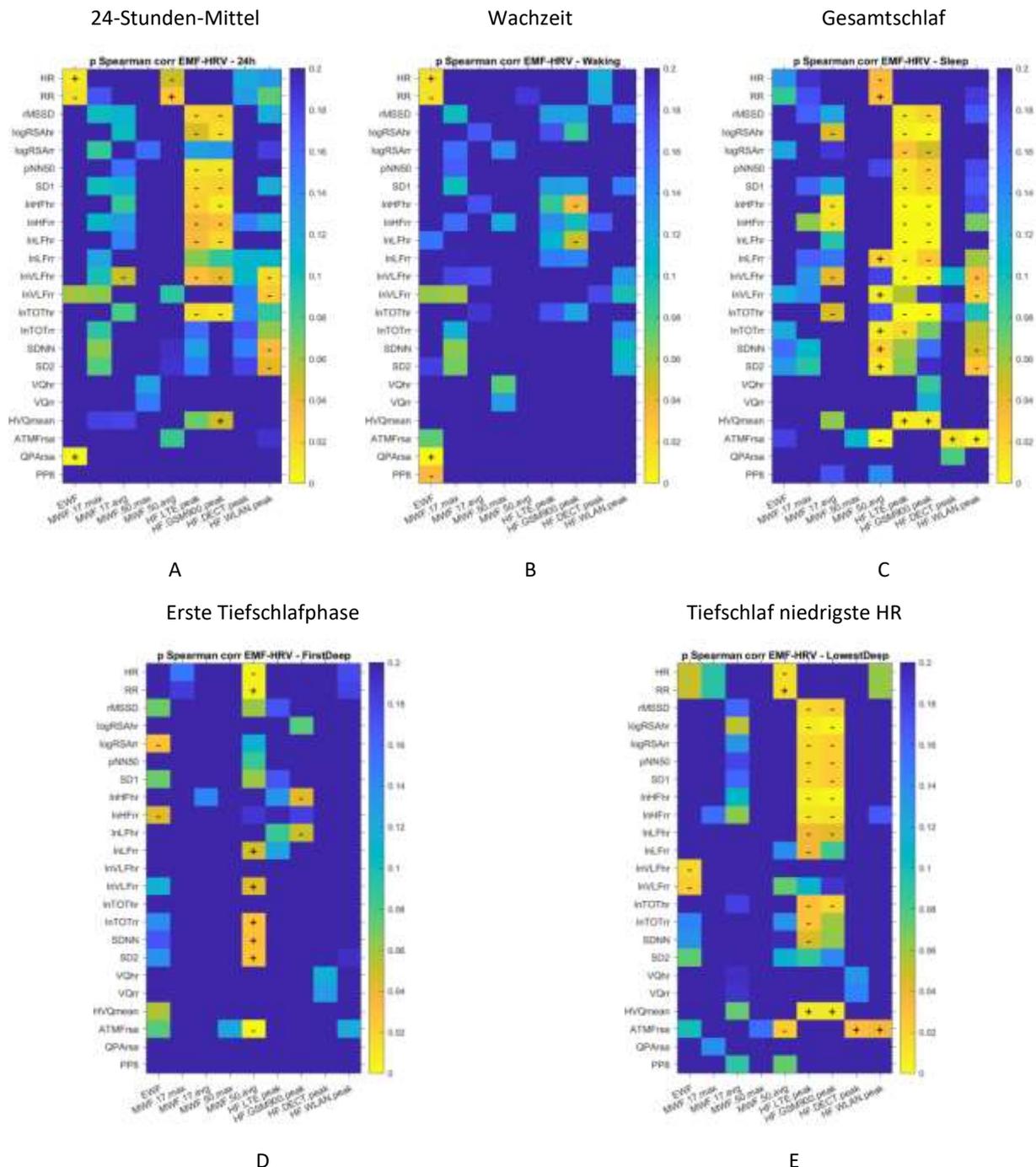


Abbildung 5-14: Korrelationen zwischen EMF-Exposition und HRV-Parametern. Spearman Rang-Korrelations-Test, helle Felder mit + oder – Zeichen repräsentieren signifikante Korrelationen, das Vorzeichen + bzw. – gibt die Richtung des Zusammenhangs an; die Werte sind nicht für mehrfache Vergleiche korrigiert. Im 24-Stunden-Mittel (A) findet sich ein Cluster signifikanter Beziehungen zwischen verschiedenen HRV-Parametern und zwei HF-EMF-Subtypen, nämlich LTE und GSM. Die ebenfalls signifikanten Beziehungen zwischen ATMFrse und den DECT Signalen, sowie WLAN Signalen, könnten ein Hinweis auf die Wirkung der Exposition mit HF-EMF sein, wie sie von DECT Schnurlos-Telefonen und WLAN Routern in den Wohnungen ausgehen. Diese Beziehung ist während der Wachzeit (B) nicht zu beobachten, allerdings deutlich während der Gesamtschlafzeit (C). Die erste Tiefschlafphase (D) zeigt die

Beziehung kaum, deutlich wird es bei der Betrachtung der tiefsten Tiefschlafphase (E).

5.3.7 Abschirmversuch "revisited": Korrelation mit der Exposition am Schlafplatz

Es wurde untersucht, ob die HF-EMF-Exposition am Wohnort eine Rolle für die Reaktion auf einen HF-EMF-Expositionswechsel (Abschirm-Vorhang hochgezogen bzw. heruntergelassen) und damit der Kurzzeit-HF-EMF-Exposition haben könnte.

In anderen Worten: kann die langjährige Exposition entweder zur Gewöhnung oder alternativ zur Überempfindlichkeit gegenüber der HF-EMF-Exposition führen? Bewirkt die langjährige Exposition eine Art von Training für den Körper? Reagieren die Personen in der Gruppe V anders als jene in der Gruppe C?

Hierzu wurden die Differenzen der HRV-Werte beim Expositionswechsel erstellt (Abbildung 5-15). N->H bezeichnet dabei den Wechsel vom abgeschirmten (vergleichsweise niedrige HF-EMF-Exposition) zum nicht abgeschirmten Zustand (vergleichsweise hohe HF-EMF-Exposition), H->N die umgekehrte Abfolge, also von vergleichsweise hoher zu niedriger Exposition.

Personen mit geringer HF-EMF-Exposition am Schlafplatz (Gruppe C) zeigen unter Belastung im Konzentrationsleistungstest nach dem Öffnen des Vorhangs eher eine Absenkung der Vagus-Aktivität als vergleichsweise hoch exponierte Personen der Gruppe V ($p=0,018$, Abbildung 5-15 b). Andere signifikante Korrelationen wurden nicht beobachtet.

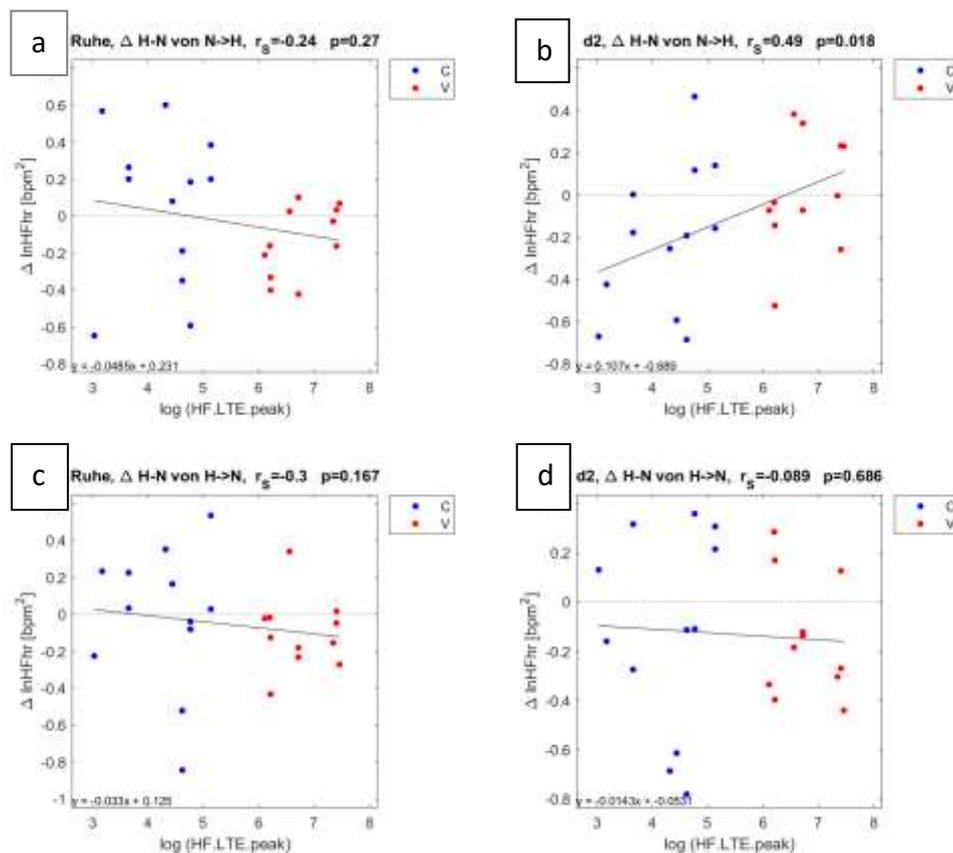


Abbildung 5-15: Langzeit HF-EMF-Exposition und Reaktion auf Abschirm-Wechsel. Auf der Ordinate(Y-Achse) ist jeweils die Differenz beim Wechsel zwischen hoher und niedriger HF-EMF-Exposition aufgetragen. Positive Werte bedeuten, dass der HRV-Parameter bei hoher Exposition höher liegt.

Legende: links: 25 Minuten - Ruhephasen, rechts 5 Minuten d2-Testphasen.

Oben: N->H: Wechsel von niedriger zu hoher Exposition (Vorhang öffnen).

Unten: H->N: Wechsel von hoher zu niedriger Exposition (Vorhang senken).

Die beiden Gruppen V und C sind zur Übersichtlichkeit farblich getrennt, die Korrelationskoeffizienten bzw. die Regressionsgerade wurden jedoch gemeinsam berechnet.

5.4 Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse weisen darauf hin, dass HF-EMF-Immissionen, wie sie unter Alltagsbedingungen vorkommen, zu messbaren Effekten in der kardiovegetativen Regulation führen können. Eine kurze Expositionsdauer (30 Minuten) führte zu keinen messbaren Einflüssen. Bei längerer Exposition (Jahre) besteht eine Verminderung der Vagus-Aktivität (parasymphatisches Nervensystem). Die Verminderung war tagsüber kaum feststellbar, sie war deutlich während der Nachtruhe. Die Erfassung allfälliger Gewöhnungseffekte oder Sensibilisierungen, die mit jahrelanger HF-Exposition einhergehen könnten, war in dieser Studie nicht möglich, dafür bräuchte es eine Feldstudie mit mehr Teilnehmern.

5.4.1 Kurzzeit-Abschirmversuche

Bei den Kurzzeit-Abschirmversuchen zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zwischen HRV-Parametern und systematisch wechselnder Intensität von HF-EMF-Exposition. Weder in der Auswertung der 25-minütigen Ruhephasen noch während der Testphasen (5-minütige Konzentrationsleistung) konnten systematische Veränderungen der HRV aufgrund der höheren oder niedrigeren Mobilfunkexposition festgestellt werden. Misek et al. (2018) konnten bei HF-EMF-Exposition höhere Werte bei mit der Vagus-Aktivität assoziierten Parametern und eine niedrigere Herzrate messen. Allerdings war die Strahlendosis (Feldstärke), der die Testpersonen ausgesetzt waren, deutlich höher als in diesem Projekt. Während Misek et al. (2018) die HF-EMF-Exposition durch das eigene Mobiltelefon bei Verwendung nahe am Kopf simulierten, befanden sich unsere Studienteilnehmer im Fernfeld einer stationären Mobilfunk-Basisstationen.

Methodische Limitationen: Das gewählte Studiendesign erlaubt zwar den direkten Vergleich der Versuchsgruppen, aber mögliche Gewöhnungseffekte bzw. Erstversuchseffekte (die z. B. für den d2-R Test bekannt sind (Amirian, 2014; Steinborn et al., 2018)) über die Gruppen hinweg lassen sich nicht stringent untersuchen. Eine vollständige Randomisierung der Expositionsbedingungen oder Balancierung der Abfolge von Abschirmung/Nichtabschirmung, insbesondere auch zwischen den Versuchstagen, ist eine Möglichkeit zur Verbesserung des Versuchsdesigns.

5.4.2 Langzeit- und Nachtmessungen

Die Abschnitte zur Tageszeit und die der Nachtruhe wurden getrennt betrachtet. Während der Nachtruhe entfallen tätigkeitsbedingte HRV-Schwankungen und die Analyse der Nachtruhedaten erlaubt Aussagen zur Erholungs- und Regenerationsqualität (Moser et al., 2006; Moser et al., 2008).

Tagsüber fand sich unter den vielen betrachteten HRV-Parametern kein Hinweis auf einen Gruppenunterschied (Tabelle 5-7). In den **Nachtphasen**, welche die Teilnehmer am jeweiligen Wohnort verbrachten, zeigten sich Unterschiede zwischen den Gruppen. Bei mehreren HRV-Parametern, insbesondere jenen, die die Vagus-Aktivität reflektieren, waren diese statistisch signifikant.

In der Gruppe mit höherer HF-EMF-Exposition fiel während der Nachtruhe die Vagus-Aktivität stärker ab, was ein Hinweis auf geringeren Erholungswert des Schlafes ist (Stein and Pu, 2012; Fatt et al., 2020; Schiltz et al., 2022). Es war dieser Effekt während der gesamten Schlafphase bemerkbar (Abbildung 5-12, Abbildung 5-14, C), insbesondere während der tiefsten Schlafphase (Abbildung 5-14, E)

Typisch wäre, dass die erste Tiefschlafphase auch die tiefste von allen ist. Dass insbesondere in der Tiefschlafphase die niedrigste Herzfrequenz auftritt, nicht jedoch in der ersten Tiefschlafphase nach dem Einschlafen, ist möglicherweise dem Messtermin an einem Wochenende geschuldet. Nächte am Wochenende durchbrechen bei vielen Menschen den gewohnten Tages- bzw. Schlafrhythmus, sie gehen früher oder später zu Bett oder setzen abends besondere Aktivitäten, wodurch es zu Änderungen des sonst normaltypischen Schlafbildes kommt.

Vergleicht man die synchronisierten Verläufe (Abbildung 5-12) mit jenen, die der Uhrzeit folgen (Abbildung 5-9), so ist erkennbar, dass der markante Abfall der HRV-Parameter

primär ein Schlaf-assoziiertes Phänomen ist und nur sekundär der absoluten Tages- bzw. Nachtzeit zuordenbar ist.

Objektive HRV-Messungen während der Nachtruhe sind möglicherweise sensibler als Erhebungen der Schlafqualität durch subjektive Fragebogen. Bei den Studienteilnehmern waren während der Nachtruhe statistisch signifikante Gruppenunterschiede bei HRV-Parametern erkennbar (Abbildung 5-13), aber nicht bei der durch Fragebögen erhobenen Schlaferholung (Tabelle 5-5).

5.4.3 Limitationen und mögliche Confounder

Die Teilnehmer in den beiden Vergleichsgruppen waren bezüglich Alter, Geschlecht, abendlicher Befindlichkeit und subjektiver Erholungsqualität des Schlafes fair vergleichbar (nicht signifikant unterschiedlich). Allerdings handelt es sich um ein so genanntes *Convenience-Sample*, das bedeutet, dass die Testpersonen nicht zufällig (randomisiert) aus einer definierten Population gelost wurden. Es wäre denkbar, dass die Vergleichsgruppen Unterschiede in anderen als den dokumentierten Merkmalen aufweisen. Dokumentierte Merkmale sind Momentanbefindlichkeit (Tabelle 5-4), subjektive Qualität der Schlaferholung (Tabelle 5-5), Alter und Geschlecht (Tabelle 5-6), Ernährungs-Stil, Gesundheitsstatus und Medikamentengebrauch, Exposition zu medizinischen Strahlenanwendungen (Röntgen, Isotopenuntersuchungen), berufliche Exposition zu Umwelt-Risiken, wie Pestizide, Chemikalien, etc., siehe Teilbericht D, Genom-Stabilität (Abschnitt 6).

Bezüglich der (groben) Mobilfunkexposition ihres Schlafplatzes waren die Teilnehmer nicht verblindet, weil sie natürlich die Standorte der Mobilfunkbasisstationen in ihrer langjährigen Wohnumgebung kennen. Zudem kann aufgrund des Querschnittsdesigns mit nur einmaliger Messung der HRV-Werte im Verlauf der Nacht nicht zwischen einem akuten oder einem chronischen Effekt unterschieden werden, dafür sind weitere Versuche mit Wiederholungen notwendig.

Eine — allerdings bei Feldstudien kaum zu realisierende — Studienvariante wäre es, nicht nur die messdurchführenden und die HRV-auswertenden Wissenschaftler zu verblinden, sondern auch die Teilnehmer, um beispielsweise einen so genannten Nocebo-Effekt auszuschließen. Ein Nocebo-Effekt im Kontext dieser Studie würde bedeuten, dass das bloße Wissen um eine vermutete Exposition — und nicht die Exposition selbst — die beobachtete Absenkung der HRV Parameter bewirkt.

Die Tagesaktivitäten und der Aufenthaltsort tagsüber wurden — mit Ausnahme der in den Messungen enthaltenen Kurzzeit-Abschirmtests — nicht kontrolliert. Der nahezu deckungsgleiche Verlauf der der HRV-Werte beider Versuchsgruppen tagsüber legt allerdings nahe, dass die Tagesbeschäftigung der Versuchsteilnehmer den in den Nachstunden beobachteten Unterschied nicht erklären kann.

5.4.4 Bedeutung der Vagus-Aktivität für Leistungsfähigkeit und Gesundheit

Höhere vagale Aktivität ist verbunden mit höherer Lebenserwartung und mit guter Lebensqualität (Zulfiqar et al., 2010). Hohe vagale Aktivität wurde auch korreliert mit besserer Resilienz (psychischer Widerstandskraft) bei Erkrankungen (Tsuji et al., 1994). Vagus-Aktivität und Wohlbefinden werden durch Aufenthalt in der Natur (Park et al., 2014) wie auch durch zahlreiche andere als gesund angesehene Aktivitäten wie moderates

Gehen, Zufuhr von Omega-3-Fettsäuren, (La Rovere and Christensen, 2015; Macartney et al., 2021) und Atemübungen (Sevoz-Couche and Laborde, 2022) stimuliert, auch werden sie durch Hören von Musik (Mojtabavi et al., 2020; Kulinski et al., 2022) und aktives Singen (Somayaji et al., 2022) verbessert. Die Gedächtniskonsolidierung während der Nachtruhe läuft besser bei hoher Vagus-Aktivität (Whitehurst et al., 2016). Andererseits verschlechtert sich die Vagus-Aktivität durch als ungesund bekannte Aktivitäten wie Rauchen (Guo et al., 2022) und übermäßigen Alkoholkonsum (Pop et al., 2021), Methylquecksilber (Karita et al., 2018) sowie Feinstaubexposition (Gold et al., 2000; Suh and Zanobetti, 2010; Cowell et al., 2019).

Weitere gesundheitsrelevante vagusgesteuerte Körperfunktionen sind die so genannte kardiorespiratorische Koordination, also die Abstimmung zwischen Herzschlag und Atmung (Kralemann et al., 2013). Beim gesunden Menschen wird einerseits der Herzschlag durch jeden Atemzug beschleunigt und verlangsamt (respiratorische Sinusarrhythmie, vermittelt durch den Vagus), andererseits findet der Beginn der Einatmung bevorzugt zu gewissen Phasen der Herzaktivität statt — es handelt sich also um einen wechselseitigen Einfluss von Herzschlag und Atmung.

Bedeutsam ist die Vagus-Aktivität auch im Zusammenhang mit Entzündungen. Eine höhere Vagus-Aktivität ist besser geeignet, chronische Entzündungen im Organismus zu kontrollieren (Tracey, 2002; Rosas-Ballina and Tracey, 2009; Olofsson et al., 2012) und wirkt dem Auftreten von Autoimmunreaktionen entgegen (siehe Abbildung 5-16).

Vaguskontrolle der stillen Entzündung

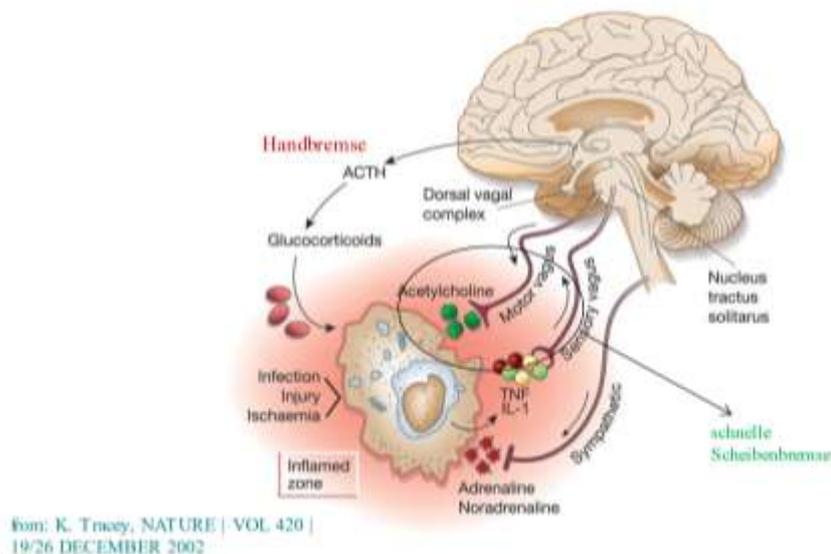


Abbildung 5-16: Schema der Vagus-Wirkung bei Entzündungen.

Die Kontrolle der stillen Entzündung beim gesunden Organismus erfolgt zwischen dem Entzündungsherd in der Körperperipherie (rot schattierter Bereich) und dem Gehirn. Es besteht eine Verbindung durch sensorische und motorische Vagusnerv-Fasern. Während der sensorische Vagusnerv (80% der Fasern) die Entzündung an Stammhirnbereiche meldet, wird über den motorischen Vagus (20% der Fasern) die Entzündung gehemmt (basierend auf einer Grafik aus Tracey, 2002).

Eine Liste von Pathologien mit Beteiligung (chronisch) entzündlicher Prozesse ist in Abbildung 5-17 dargestellt.

Table 1 Examples of inflammatory disorders	
Disorders in which an important pathogenetic role is assigned to inflammation	
Alzheimer's disease	Osteoarthritis
Anaphylaxis	Pemphigus
Ankylosing spondylitis	Periodic fever syndromes
Asthma	Psoriasis
Atherosclerosis	Rheumatoid arthritis
Atopic dermatitis	Sarcoidosis
Chronic obstructive pulmonary disease	Systemic lupus erythematosus
Crohn's disease (regional enteritis)	Type I diabetes mellitus
Gout	Ulcerative colitis
Hashimoto's thyroiditis	Vasculitides (Wegener's syndrome, Goodpasture's syndrome, giant cell arteritis, polyarteritis nodosa)
Ischaemia-reperfusion injury (occlusive and embolic stroke and myocardial infarction)	Xenograft rejection
Multiple sclerosis	
Diseases of infectious origin in which inflammation may contribute as much to pathology as does microbial toxicity	
Bacterial dysentery	Influenza virus pneumonia
Chagas disease (<i>Trypanosoma cruzi</i>)	Leprosy (tuberculoid form)
Cystic fibrosis pneumonitis	Neisserial or pneumococcal meningitis
Filariasis	Post-streptococcal glomerulonephritis
<i>Helicobacter pylori</i> gastritis	Sepsis syndrome
Hepatitis C	Tuberculosis
Diseases of diverse origin in which post-inflammatory fibrosis is a principal cause of pathology	
Bleomycin-induced pulmonary fibrosis	Hepatic cirrhosis (post-viral or alcoholic)
Chronic allograft rejection	Radiation-induced pulmonary fibrosis
Idiopathic pulmonary fibrosis	Schistosomiasis

Abbildung 5-17: Diagnosen mit Beteiligung von Entzündungsprozessen (aus Nathan, 2002). Bei diesen Pathologien wäre eine hohe Vagus-Aktivität günstig für den Krankheitsverlauf.

5.4.5 Schlussfolgerung

Das gewählte Studienprotokoll hat sich in der Praxis als gut umsetzbar erwiesen. Die Auswertung der HRV liefert Hinweise dahingehend, dass eine kurzfristige Exposition zu schwachen Feldern des Mobilfunks eher uneinheitliche Auswirkungen hat, während eine langfristige Exposition physiologisch wirksame Beeinflussungen durch Mobilfunkstrahlung nach sich zieht. Diese waren tagsüber kaum oder gar nicht beobachtbar, hingegen wurde während der nächtlichen Erholungsphase in der Gruppe mit chronisch hoher Exposition am Schlafplatz zu Mobilfunkbasisstations-Signalen eine verminderte Vagus-Aktivität festgestellt.

Andere EMF-Immissionen (Bahnstrom 16,7 Hz, Netzstrom 50 Hz, DECT, WLAN etc.) als die erwähnten LTE- und GSM-Mobilfunksignale waren sehr schwach oder gar nicht vertreten. Je kleiner die Immission ist und je kleiner der Unterschied zwischen den Immissionen in den Vergleichsgruppen ist, umso kleiner ist auch die Wahrscheinlichkeit, biologische Unterschiede festzustellen.

Darum sind ein Hauptergebnis dieses Projektes die gefundenen höchsten Korrelationen zwischen hochfrequenten EMF (LTE und GSM) und Vagus-Aktivität anzeigenden HRV-Parametern während der Nachtruhe.

Dass eine Gruppe von Personen, welche höher exponiert ist, als eine entfernt wohnende minimal exponierte Vergleichsgruppe, eine Absenkung der Vagus-Aktivität erfährt, scheint erstmalig untersucht und beobachtet zu sein.

5.5 Annex, Teilbericht C

5.5.1 Auswertung der Kurzzeit-Abschirmtests gemäß Studienplan

Weder in der Auswertung der Ruhephasen (20 Minuten), noch während der d2-Testphasen (5 Min, Konzentrationsleistung) konnten über das gesamte Kollektiv gemittelt signifikante Veränderungen der HRV festgestellt werden, die der höheren oder niedrigeren HF-EMF zurechenbar sind.

Die statistische Bewertung (Linear Mixed Model) der Ruhephasen, welche die Exposition (H - hoch, N - niedrig), die Versuchsphase (Ruhe, d2-R) und die Wiederholung der Tests an jedem Tag (R1-R4) als fixe Effekte sowie Tag und Person berücksichtigte, ergab durchwegs hochsignifikante Effekte der Versuchsphase und der Wiederholung, jedoch keine der Exposition.

Tabelle 5-10: Abschirmversuch, Statistik (univariates gemischtes Modell).

Feste Effekte: WH .. Wiederholung der Experimentabschnitte; Phase .. Ruhe im Sitzen oder d2-RTest; Exposition .. hoch (ohne Abschirmung) oder niedrig (mit Abschirmung). Zufällige Effekte: Tag, Person. CI . 95%-Konfidenzintervall für den jeweiligen Koeffizienten.

Bei den Abschnitt-Wiederholungen (WH) zeigte sich ein signifikanter Sequenzeffekt. Die HRV-Parameter waren außerdem signifikant unterschiedlich zwischen Ruhephase und d2-R Konzentrationstestphase. Ob die Exposition niedrig oder hoch war, machte während der 30 Minuten-Abschnitte keinen Unterschied.

Parameter Einheit	Koeffizient	Wert	CI	p
HR, min ⁻¹	(Intercept)	78,3	(75; 81,5)	0,000
	WH (1 .. 4)	-2,02	(-2,27; -1,77)	0,000
	Phase (Ruhe, d2)	3,87	(2,51; 5,24)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,0432	(-0,677; 0,591)	0,894
RR, ms	(Intercept)	779	(741; 817)	0,000
	WH (1 .. 4)	22,1	(19,4; 24,8)	0,000
	Phase (Ruhe, d2)	-43,9	(-60,5; -27,3)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	0,561	(-6,35; 7,47)	0,873
SDNN, ms	(Intercept)	54,3	(49; 59,5)	0,000
	WH (1 .. 4)	1,99	(1,26; 2,72)	0,000
	Phase (Ruhe, d2)	-25,9	(-29,5; -22,3)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-1,35	(-3,19; 0,49)	0,150
rMSSD ms	(Intercept)	21,6	(18; 25,2)	0,000
	WH (1 .. 4)	1,73	(1,4; 2,05)	0,000
	Phase (Ruhe, d2)	-7,33	(-9,38; -5,28)	0,000
	Exposition (nein, ja)	-0,381	(-1,21; 0,45)	0,368
logRSArr log ms	(Intercept)	1,05	(0,977; 1,13)	0,000
	WH (1 .. 4)	0,0359	(0,029; 0,0428)	0,000
	Phase (Ruhe, d2)	-0,126	(-0,162; -0,0901)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,00676	(-0,0244; 0,0109)	0,452

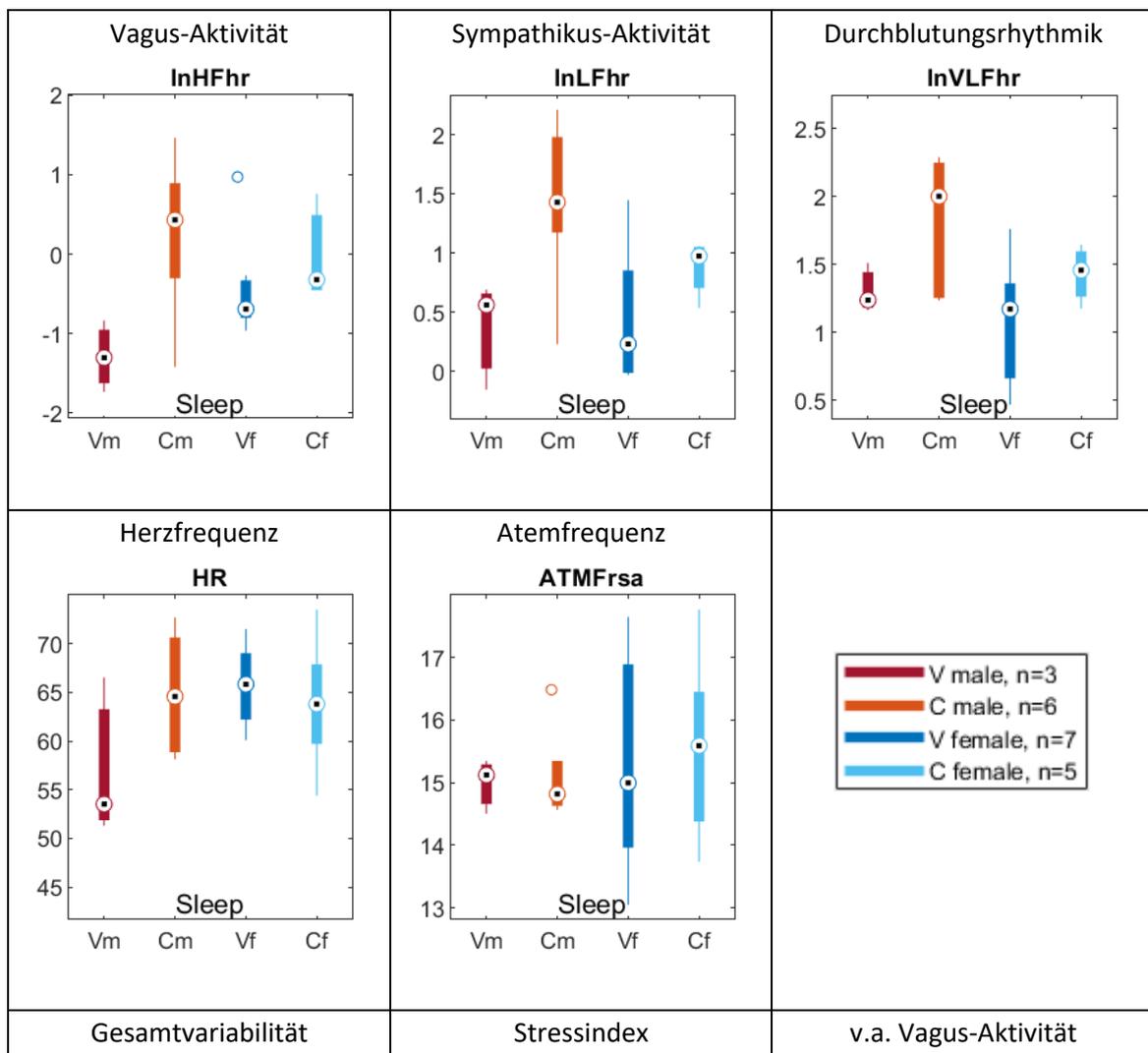
Tabelle 5-11: Fortsetzung: Abschirmversuch, Statistik (univariat. gemischt. Modell).
 Feste Effekte: WH . Wiederholung der Experimentphasen, Phase .. Ruhe im Sitzen
 oder d2-Test, Exposition .. ohne (hoch) oder mit (niedrig) Abschirmung. CI .. 95%-
 Konfidenzintervall für den jeweiligen Koeffizienten. Interpretation wie in Tabelle
 5-10.

Parameter Einheit	Koeffizient	Wert	CI	p
	(Intercept)	4,59	(4,2; 4,98)	0,000
InHFrr	WH (1 .. 4)	0,129	(0,0946; 0,163)	0,000
log ms ²	Phase (Ruhe, d2)	-0,792	(-1,05; -0,533)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,0415	(-0,129; 0,0456)	0,349
	(Intercept)	6,43	(6,1; 6,75)	0,000
InLFrr	WH (1 .. 4)	0,0977	(0,063; 0,132)	0,000
log ms ²	Phase (Ruhe, d2)	-1,16	(-1,35; -0,956)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,0525	(-0,14; 0,0348)	0,238
	(Intercept)	7,14	(6,89; 7,39)	0,000
InVLFrr	WH (1 .. 4)	0,0843	(0,0415; 0,127)	0,000
log ms ²	Phase (Ruhe, d2)	-1,71	(-1,86; -1,56)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	0,024	(-0,0835; 0,131)	0,661
	(Intercept)	7,64	(7,38; 7,9)	0,000
InTOTrr	WH (1 .. 4)	0,0923	(0,0594; 0,125)	0,000
og ms ²	Phase (Ruhe, d2)	-1,39	(-1,54; -1,24)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,0217	(-0,105; 0,0615)	0,609
	(Intercept)	1,84	(1,56; 2,12)	0,000
VQrr	WH (1 .. 4)	-0,031	(-0,0643; 0,0023)	0,068
1	Phase (Ruhe, d2)	-0,363	(-0,57; -0,157)	0,001
	Exposition (niedrig, hoch)	-0,0197	(-0,103; 0,0639)	0,643
	(Intercept)	14,5	(13,2; 15,8)	0,000
ATMFr _{sa}	WH (1 .. 4)	0,152	(-0,038; 0,342)	0,117
min ⁻¹	Phase (Ruhe, d2)	2,46	(1,24; 3,67)	0,000
	Exposition (niedrig, hoch)	0,035	(-0,433; 0,503)	0,883

Die Verteilung der Residuen wurde jeweils grafisch geprüft. Modelle, die als zusätzlichen Faktor die langjährige Präexposition einschlossen, ergaben keinen Einfluss der Präexposition und keine Erhöhung der R²-Statistik.

5.5.2 Geschlechtsspezifischer Vergleich der HRV in der Gesamtschlafphase

Es ist bekannt, dass Frauen zu einer höheren Herzfrequenz, aber auch zu niedrigerem vegetativem Quotienten, also zu einer stärkeren Vagusdominanz tendieren (Nunan et al., 2010). Um abzuwägen, ob in vorliegender Studie die Geschlechterverteilung Unterschiede zwischen den Gruppen C und V bedingen könnte, wurde geprüft, ob etwaige Gruppenunterschiede auch bezüglich des Geschlechts konsistent sind. Es zeigte sich, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den Gruppen in beiden Geschlechtern gleichsinnig erfolgen (Abbildung 5-18), insbesondere bei jenen Parametern, die in der Schlafphase Gruppenunterschiede zeigten (vgl. Tabelle 5-7, Seite 95).



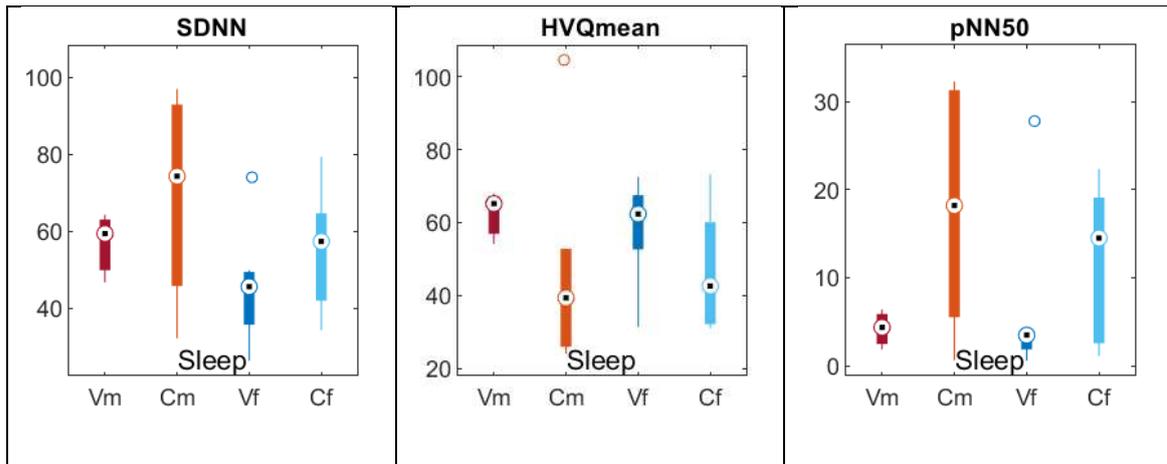


Abbildung 5-18: HRV-Werte des Gesamtschlafs nach Geschlecht und Expositionsgruppe

Vm = Männer der Versuchsgruppe, Cm = Männer der Kontrollgruppe, Vf = Frauen der Versuchsgruppe, Cf = Frauen der Kontrollgruppe.

6 Projektteam D, Genom-Stabilität, zelluläre Effekte

ATHEM03-Teilprojekt "D" Forschungsbericht

Die wissenschaftliche Arbeit für dieses Teilprojekt wurde im Frühjahr 2024 in einer internationalen *peer reviewed* Fachzeitschrift veröffentlicht.

Der umseitige Report "D" ist eine Übersetzung der Veröffentlichung aus dem Fachjournal

ATHEM03-Teilprojekt: Genomintegrität Akronym: GenTox

Lang-Titel:

Genominstabilität bei Langzeitexposition gegenüber niedrigen hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

Kontakt

Teilprojektleiter:
Ass. Prof. Dr. Igor BELYAEV
Department of Radiobiology,
Cancer Research Institute, BMC SAS

Dubravská cesta 9,
84505 Bratislava
Slowakische Republik

Tel.: +42 12 32295119
E-Mail: igor.beljaev@savba.sk
<http://www.biomedcentrum.sav.sk/research-departments/department-of-radiobiology>

Projektkoordinator:
Prof. Dr. Wilhelm MOSGÖLLER
Medizinische Universität Wien MUW

Borschkegasse 8a,
1090 Wien
Österreich

Tel.: +43 664 / 28 48 324
E-Mail: wilhelm.mosgoeller@meduniwien.ac.at



Ecotoxicology and Environmental Safety 279 (2024) 116486



Deutscher Titel:

Bewertung von oxidativem Stress und genetischer Instabilität bei Anwohnern von Mobilfunk-Basisstationen in Deutschland

Autoren

Sachin Gulati^a, Wilhelm Mosgoeller^b, Dietrich Moldan^c, Pavol Kosik^a, Matus Durdik^a, Lukas Jakl^a, Milan Skorvaga^a, Eva Markova^a, Dominika Kochanova^a, Katarina Vigasova^a, Igor Belyaev^{a,*}

^a Department für Radiobiologie, Institut für Krebsforschung, Biomedizinisches Forschungszentrum der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, 84505 Bratislava, Slowakische Republik

^b Zentrum für Krebsforschung, Medizinische Universität Wien, 1090 Wien, Österreich

^c Dr. Moldan Umweltanalytik, 97346 Iphofen, Deutschland

Schlagwörter:

Hochfrequenz, hochfrequente elektromagnetische Felder, HF, HF-EMF,
Langzeitexposition bei niedriger Dosis
genetische Instabilität
oxidativer Stress
DNA-Schäden
Chromosomenaberrationen

* Korrespondenz an igor.beliaev@savba.sk (I. Belyaev).

DOI und Link Zur Original-Publikation: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116486>

Online veröffentlicht am 30. Mai 2024

Abstrakt, ZUSAMMENFASSUNG

Die Exposition des Menschen gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) wird begrenzt, um thermisch bedingte Schad-Wirkungen im Gewebe zu vermeiden. Bei sehr niedrigen Expositionen können jedoch nach wenigen Stunden „nicht thermische“ biologische Wirkungen auftreten. Dazu zählen oxidativer Stress, DNA- oder Chromosomenaberrationen und andere Schäden, die zusammenfassend als Genominstabilität bezeichnet werden. Es ist nur wenig über chronische (jahrelange) HF-Expositionen im nicht thermischen Bereich bekannt.

Wir untersuchten zwei benachbarte Wohnsiedlungen in einer ländlichen Region, deren Anwohner entweder relativ niedriger (Kontrollgruppe) oder relativ hoher (exponierte Gruppe) HF-Strahlung von nahe gelegenen Mobilfunk-Basisstationen (MFBS) ausgesetzt waren. Vierundzwanzig gesunde Erwachsene, die mindestens 5 Jahre in ihren Wohnungen gelebt haben, meldeten sich freiwillig zur Teilnahme an der Studie. Die Wohnungen wurden auf ihre Exposition gegenüber gängigen Arten elektromagnetischer Felder untersucht, und die Blutproben auf folgende Parameter: oxidativer Status, reparierbare DNA-Veränderungen, bleibende Chromosomenschäden und krebsspezifische genetische Marker wie MLL-Genumlagerungen. Wir dokumentierten mögliche Störfaktoren wie Alter, Geschlecht, Ernährungsweise, lebenslange Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (Röntgenstrahlung), berufliche Expositionen, etc.

Die Gruppen waren gut vergleichbar: Alter, Geschlecht, Lebensweise und berufliche Expositionen waren sehr ähnlich verteilt. Die jahrelange HF-Exposition hatte keine messbare Auswirkung auf MLL-Genumlagerungen und Veränderungen bei der Transkription des c-Abl-Gens. In Verbindung mit erhöhten HF-Expositionen beobachteten wir erhöhte Werte für Lipidperoxidation und oxidative DNA-Läsionen, auch wenn diese nicht statistisch signifikant waren. Bei der Häufigkeit der DNA-Doppelstrangbrüche, Mikronuklei, Ringchromosomen und azentrischen Chromosomen war der Unterschied zwischen den Gruppen nicht signifikant. Chromosomenaberrationen wie dizentrische Chromosomen ($p = 0,007$), Chromatidlücken ($p = 0,019$), Chromosomenfragmente ($p < 0,001$) und die Anzahl der Chromosomenaberrationen ($p < 0,001$) waren in der exponierten Gruppe signifikant erhöht. Es gab keinen möglichen Störfaktor, der diese Ergebnisse beeinträchtigte.

Erhöhte Raten von Chromosomenaberrationen, die mit einer übermäßigen Exposition gegenüber ionisierender Strahlung verbunden sind, können auch bei der Exposition gegenüber nicht ionisierender Strahlung auftreten. Biologische Endpunkte können für die Festlegung von Expositionsbegrenzungen aufschlussreich sein. Weitere Forschung ist notwendig, um die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Expositionshöhe und Expositionsdauer zu untersuchen, damit die Anhäufung von Endpunkten nach jahrelanger Exposition berücksichtigt wird. Wie bereits für ionisierende Strahlung etabliert, könnten Chromosomenaberrationen auch zur Festlegung von Schutzmaßnahmen vor nicht ionisierender Strahlung herangezogen werden.

6.1 Einführung

Vom ersten Einsatz in den 1950er Jahren bis heute hat die Exposition des Menschen gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) mit der zunehmenden

Nutzung von funkbasierten Technologien drastisch zugenommen. Seit ungefähr 1996 hat die Einführung des Mobilfunks und die Errichtung von Mobilfunk-Basisstationen (MFBS) die Diskussion über mögliche biologische Wirkungen durch HF-Expositionen angeheizt. Im Jahr 2011 stuft die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hochfrequente elektromagnetische Felder als „möglicherweise karzinogen, Gruppe 2B“ ein (Baan et al., 2011). Während eine Reihe von Forschern keine Wirkungen beobachteten, könnten neuere Studien sogar eine höhere Klassifizierung rechtfertigen, d. h. „wahrscheinlich kanzerogen, Gruppe 2A“ (ICBE-EMF, 2022). Wirkungen von HF-Expositionen auf genetische Strukturen könnten eine krebserregende Wirkung erklären, so wie sie in Tierstudien beobachtet wurden (Falcioni et al., 2018; Wyde et al., 2018). HF-Expositionen unterhalb der derzeit gültigen Grenzwerte und Kurzzeitexpositionen (in einem Zeitraum von Stunden) können DNA-Schäden hervorrufen (Garaj-Vrhovac et al., 2011) und die Blut-Hirn-Schranke beeinträchtigen (Nittby et al., 2009). DNA-Schäden, die durch HF-Strahlung hervorgerufen werden, wurden sowohl in Tiermodellen als auch Humanstudien beobachtet (Akdag et al., 2016; Bektas et al., 2020).

Die durch HF-Strahlung hervorgerufenen genotoxischen Wirkungen können durch Antioxidantien gemildert werden (Liu et al., 2013). Es gibt nur wenige Autoren, die keine expositionsbedingten oxidativen Veränderungen beobachteten. Die Mehrheit der Studien dokumentiert jedoch oxidativen Stress, der von HF-Expositionen hervorgerufen wurde (Yakymenko et al., 2016). Oxidativer Stress kann Makromoleküle schädigen, Entzündungen anfachen und zur Anhäufung von Mutationen führen (Zhang et al., 2022). Nach ungefähr 16 Stunden können transiente (reparierbare) DNA-Schäden entstehen. Veränderungen, die im Comet Assay dargestellt werden können, ermöglichen die Unterscheidung zwischen Einzelstrang- oder Doppelstrangbrüchen der DNA (Schwarz et al., 2008) oder oxidativen DNA-Läsionen (Al-Serori et al., 2018). Eine empfindliche Methode zur Untersuchung von DNA-Doppelstrangbrüchen ist die Visualisierung mittels Färbung der DNA-Reparatur-Foci γ H2AX/53BP1 (Rothkamm et al., 2015).

Mikronuklei, die mittels Zytokinese-Block-Mikronukleus-Test (CBMN) untersucht werden können, sind ein Biomarker der Genotoxikologie und des Krebsrisikos. Ob HF-Strahlung Mikronuklei erzeugen kann oder nicht, wird noch kontrovers diskutiert (Jagetia, 2022). Für die Bewertung der durch radioaktive Strahlung hervorgerufenen Genotoxizität ist die biologische Dosimetrie (z. B. Bestimmung der Chromosomenaberrationen; CA) eine allgemein anerkannte Praxis.

Durch HF-Strahlung hervorgerufene Chromosomenaberrationen wie azentrische Fragmente und dizentrische Chromosomen wurden bei akuten In-vitro-Expositionen beschrieben, aber nicht von anderen Studien bestätigt (Armstrong et al., 2013). Die Wirkungen nicht thermischer HF-Strahlung scheinen jedoch von verschiedenen – nicht immer erfassten – physikalischen und biologischen Parametern abhängig zu sein (Armstrong et al., 2013; Belyaev, 2010), die das Vergleichen von Studien und das Bestimmen von Schwellwerten erschweren.

Um die expositionsbedingte Gewebs-Erwärmung zu vermeiden, begrenzen aktuelle Richtlinien die Höhe der HF-Strahlung (ICNIRP, 2020), nicht aber die so genannten nicht-thermischen Wirkungen und nicht die Expositionsdauer. Die Expositionszeit - ein wichtiger Faktor der „Dosis“, bleiben unberücksichtigt. Leitlinien für Langzeitexpositionen bei nicht thermischer Exposition gegenüber HF-Strahlung wurden von der Europäischen Akademie

für Umweltmedizin (EUROPAEM) vorgeschlagen (Belyaev et al., 2016), sind aber nicht international anerkannt. Eine große Sorge der Öffentlichkeit gilt den schädlichen Auswirkungen der HF-Strahlung, die von Mobilfunk-Basisstationen ausgeht. Während Rundfunkantennen typischerweise außerhalb von Gemeinden errichtet werden, stehen Mobilfunk-Basisstationen in der Nähe der Handy-Kunden, also in Wohngebieten.

Mögliche Auswirkungen der kontinuierlichen Exposition gegenüber HF-Strahlung sind weitgehend unerforscht. Ein aktueller Fallbericht beschreibt, dass Mobilfunk-Basisstationen Kurzzeitwirkungen haben können (Nilsson und Hardell, 2023). Ein früher Hinweis auf das karzinogene Potenzial bei Langzeitexpositionen in einer deutschen ökologischen Studie (Eger et al., 2004) wurde in einer anderen Region nicht reproduziert (Meyer et al., 2006). In einer brasilianischen Studie war das Krebsrisiko jedoch in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen erhöht (Dode et al., 2011). Wolf und Wolf (Wolf und Wolf, 2004) fanden einen Zusammenhang, der von einer anderen Studie in Israel nicht bestätigt wurde (Atzmon et al., 2012).

Um zu untersuchen ob eine Langzeitexposition gegenüber umgebungsbedingter HF-Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen ein Krebsrisiko darstellt oder nicht, untersuchten wir menschliche Blutzellen auf oxidativen Stress, reparierbare und irreparable (permanente) DNA-Schäden, zytogenetische Endpunkte und leukämiespezifische MLL-Genveränderungen, wie KMT2A oder Histon-Lysin-N-Methyltransferase 2A (Harper und Aplan, 2008).

6.2 Materialien und Methoden

6.2.1 Verwendete Chemikalien

Alle Chemikalien von Sigma (St. Louis, MO, USA), New England Biolabs (NEB, UK), Thermo Fischer Scientific (Waltham, MA, USA) und Merck (Darmstadt, Germany).

6.2.2 Studienteilnehmende

Wir rekrutierten 24 Personen. Alle Teilnehmenden wohnten seit über fünf Jahren entweder in der Nähe oder weit entfernt von Mobilfunk-Basisstationen. Die Teilnehmenden erteilten ihre schriftliche Einwilligung zum Studienprotokoll. Die Ethik-Kommission der Ärztekammer Nordrhein (Düsseldorf, Deutschland) befürwortete das Studienprotokoll (Az-2021403). Wir dokumentierten demografische Daten (Alter, Geschlecht, etc., Tabelle 1), Ernährungsweise, Lebensweise, Einnahme von Medikamenten (Suppl. 1), medizinische Untersuchungen, die auf ionisierender Strahlung beruhen (Supplement 2), berufliche Expositionen und Umweltbelastungen sowie die Selbsteinschätzung der Teilnehmenden zu ihrer subjektiv empfundenen elektromagnetischen Hypersensitivität (Supplement 3). Zu den Ausschlusskriterien zählten akute und chronische Erkrankungen (z. B. Fieber, Autoimmunkrankheiten, Krebs, Demenz, etc.) und alle Erkrankungen, die innerhalb der drei Monate vor der Blutentnahme eine medizinische Behandlung erforderten.

Tabelle 6-1: Basis-Merkmale der Studienteilnehmenden.

Die Teilnehmenden, die in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen leben (Gruppe E), und diejenigen, die in einem größeren Abstand zu Mobilfunk-Basisstationen leben (Kontrollgruppe C), zeigten bei Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Körpergröße und Wohndauer eine ähnliche Verteilung. Die Informationen zu bevorzugten Ernährungsweisen, Lebensstilfaktoren, Gesundheitszustand und Medikamenteneinnahme, bisherigen radiologischen Untersuchungen, spezifischen Umweltbelastungen, einschließlich Selbsteinschätzung zu elektromagnetischer Hypersensitivität, sind in den Tabellen der [Supplemente](#) (Suppl. 1 bis Suppl. 3) zusammengefasst.

	Gruppe C (Kontrolle) Relativ niedrige Exposition		Group E (Exponiert) Relativ hohe Exposition		Gesamt
Anzahl der Teilnehmenden N	12		12		24
Sex (M/F)	6 / 6		5 / 7		11 / 13
	Bereich von – bis	Mittelwert ±SD	Bereich von – bis	Mittelwert ±SD	Signifikanz P (ANOVA)
Abstand zur nächstgelegenen MFBS (Meter)	490 – 1 020	767 ±241	75 – 160	125 ±35	< 0.001
Alter (Jahre)	24 – 63	47.8 ±13.6	39 – 62	52.8 ±7.3	0.266
Körpergewicht (kg)	56 – 96	80.3 ±14.3	56 – 113	82.2 ±16.4	0.775
Körpergröße (cm)	158 – 187	173.8 ±7.6	152 – 185	169.8 ± 8.5	0.238
Wohndauer (Jahre)	5 – 54	26 14	12 – 34	23 ±9	0.476

Legende: SD – Standardabweichung; ANOVA – Varianzanalyse.

6.2.3 Umwelt-elektromagnetische Felder

Messgeräte

Die Messungen niederfrequenter elektrischer Wechselfelder (NFWF) wurden mit einer 3D-E-Feldsonde und dem Basisgerät EFA*3 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, Deutschland; SN D 0117) potenzialfrei durchgeführt. Die dreidimensionalen Messungen niederfrequenter magnetischer Wechselfelder wurden mit den Datenloggern MLog3D (Merkel Messtechnik, Maintal, Deutschland) und EMLog2 (ESTEC, Schwäbisch Hall, Deutschland) durchgeführt. Für die Expositionsbewertung der elektromagnetischen Felder im Hochfrequenzbereich haben wir die vorherrschenden Funkdienste mit einem

Spektrumanalysator gemessen. Es kam der Spektrumanalysator FSL6, 9 kHz – 6 GHz zum Einsatz (Rohde & Schwarz Messgerätebau GmbH, Memmingen, Deutschland; SN 10 04 23). Als Messantennen wurden die bikonischen Antennen EFS 9218 9 kHz – 300 MHz (SN 102) und SBA 9113-B 80 MHz – 3 GHz (SN 362) sowie die LogPer-Antenne USLP 9143 250 MHz – 6 GHz (SN 198) von Schwarzbeck Mess-Elektronik OHG (Schönau, Deutschland) verwendet. Das Antennenkabel war ebenfalls von Schwarzbeck, Typ AK 9513 mit 3 m Länge (SN 161030). Für die HF-Breitbandmessungen über 24 Stunden am Schlafplatz der Teilnehmenden wurde das Messgerät HF59B (27 MHz – 2,5 GHz) mit einer UBB-Antenne (27 MHz – 3,3 GHz) (Gigahertz-Solutions, Langenzenn, Deutschland) mit einem ASB3-Adapter für den Datenlogger (EMLog2 von ESTEC, Schwäbisch Hall, Deutschland) verwendet.

Dokumentation der Exposition

Um zwischen den Teilnehmenden mit „niedriger“ und „hoher“ Exposition unterscheiden zu können, führten wir im Freien EMF-Messungen zur Hintergrundbelastung und in Innenräumen detaillierte EMF-Messungen am Schlafplatz durch. In einem ersten Schritt suchten wir ortsfeste Feldquellen, um Geräte mit Transformatoren zu lokalisieren (elektrische Wecker, Uhren, Ventilatoren, Radios, Fernseher, WLAN, etc.) und fanden keine derartigen Feldquellen. Am nächsten Tag wurden Messungen über 7 Tage mit Datenloggern vorgenommen. Die beiden Hauptfrequenzen wurden separat erfasst: 16,7 Hz für Bahnstromanlagen und 50 Hz für die öffentliche Stromversorgung. Die Sampling-Rate betrug 2 Sekunden. Die magnetische Flussdichte wurde in den Frequenzbereichen von 16,7 Hz und 50 – 2000 Hz erfasst, die Auflösung betrug 10 nT. Alternativ verwendeten wir auch EMlog2-Geräte mit einer Sampling-Rate von 1 Sekunde. Mit diesen Geräten wurde die magnetische Flussdichte in den Frequenzbereichen 5 – 30 Hz und 37 – 2000 Hz erfasst, die Auflösung betrug 1 nT. Alle Daten der Langzeitmessungen, die von 5 bis 7 Tagen reichten, wurden daraufhin auf mögliche Anomalien untersucht. Die Mess-Daten der ersten 5 Tage von 22 Uhr bis 6 Uhr wurden statistisch ausgewertet. Aufgrund ihrer EMF-Exposition wurden die Teilnehmenden der Gruppe mit niedriger Exposition (Kontrollgruppe) oder mit hoher Exposition (exponierte Gruppe, [Tabelle 2](#)) zugeordnet.

Tabelle 6-2: Physikalische Messungen im Wohnumfeld der Teilnehmer
EMF-bedingte physikalische Parameter am Schlafplatz der Teilnehmenden, die in der Nähe oder weit entfernt von der nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation leben. Niederfrequente Felder (ELF: 16,7 Hz, 50 Hz) waren im Allgemeinen niedrig. In Bezug auf die HF-Exposition (GSM, LTE) durch Mobilfunk-Basisstationen war der Unterschied zwischen den Gruppen signifikant, während das Gleiche nicht für die HF-Exposition (DECT, WLAN) im Innenraum zutraf.

Physikalische Parameter	Kontroll-gruppe N = 12 (Mittel ±SD)	Exponierte Gruppe N = 12 (Mittel ±SD)	ANOVA Gruppenunterschied	
			P	Signifikanz
NF-EWF; V/m; Max	20.4±21.8	27.8±33.4	0.530	n.s.
NF-MWF 22-6; 16,7 Hz; nT; Max	18.8±16.8	29.2±20.7	0.190	n.s.
NF-MWF 22-6; 16,7 Hz; nT; AVG	0.8±1.9	3.5±3.2	0.021	*
NF-MWF 22-6; 50 Hz; nT; Max	61.5±45.2	46.9±22.6	0.326	n.s.
NF-MWF 22-6; 50 Hz; nT; AVG	18.4±11.5	13.9±9.6	0.312	n.s.
GSM Grundlast RMS, μW/m ²	1.2±1.6	69.5±108.5	0.040	*
GSM Volllast RMS, μW/m ²	4.7±6.4	278.1±434.0	0.040	*
GSM Grundlast PEAK, μW/m ²	1.5±2.0	87.5±136.6	0.040	*
GSM Volllast PEAK, μW/m ²	6.0±8.1	350.1±546.4	0.040	*
LTE Grundlast RMS, μW/m ²	2.7±2.7	306.7±310.3	0.003	**
LTE Volllast RMS, μW/m ²	10.9±10.6	1226.8±1241.1	0.003	**
LTE Grundlast PEAK, μW/m ²	27.3±26.6	3067.1±3102.7	0.003	**
LTE Volllast PEAK, μW/m ²	109.2±106.4	12268.2±12410.7	0.003	**
DECT; PEAK, μW/m ²	61.6±141.7	14.1±27.5	0.266	n.s.
WLAN; PEAK μW/m ²	98.8±187.4	130.4±239.0	0.722	n.s.

Legende: NF-EWF – Niederfrequente Elektrische Wechsel-Felder; NF-MWF – Niederfrequente Magnetische Wechsel-Felder; GSM, LTE – MFBS-Signale (Immissionen von Mobilfunk-Basisstationen); DECT – Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Schnurlostelefon Hochfrequenz-Felder); WLAN – Wireless Local Area Network (WLAN-Router-Hochfrequenz-Felder), 22-6: 22 Uhr bis 6 Uhr Nachtzeit, PEAK und RMS – Detektor-Modus für die HF-Spektrumanalyse; n. s. – nicht signifikant; * signifikant, p < 0,05; ** signifikant, p < 0.01;

6.2.4 Analysen der Blutproben

Alle Teilnehmenden stellten je 12 ml Blut für die biologischen Untersuchungen zur Verfügung. Das Blut wurde in einer örtlichen Hausarztpraxis in den Morgenstunden durch Venenpunktion entnommen. Die Röhrchen (sterile Einweg-Vakuumröhrchen mit EDTA/Heparin zur Antikoagulation) wurden durch Nummerierung verschlüsselt und dann in Thermobehältern bei 20 °C (± 2 °C) innerhalb von 6–7 Stunden zum Labor nach Bratislava (Slowakei) gebracht. Um Doppelblind-Bedingungen gewährleisten zu können, erhielten der Kurier und die Mitglieder des Laborteams keine Informationen über die Spendenden, außer die Identifikationsnummer (ID) der verschlüsselten Blutproben. Der Schlüssel für die Zuordnung der Proben zu den Spendenden wurde vom deutschen Partner aufbewahrt, von dem die Blutentnahme in einer örtlichen Hausarztpraxis organisiert wurde. Beim Eintreffen der Blutproben im Partner-Labor betrug die Lebensfähigkeit der Lymphozyten stets über 95 %.

Oxidativer Stress

Um eine Kennzahl für den oxidativen Stress-Status der freiwillig gespendeten Blutproben zu erhalten, wurde unmittelbar nach dem Eintreffen der Blutproben ein TBARS Assay durchgeführt, wie beschrieben ([Buege und Aust, 1978](#)).

DNA-Analysen

Alkalischer Comet Assay.

DNA-Schäden wie Einzelstrangbrüche (SSB) und alkalisch empfindliche Stellen wurden mit Hilfe des alkalischen Comet Assay nach [Singh et al., \(1988\)](#) mit geringfügigen Modifikationen durchgeführt. Nach der Färbung der Objektträger mit Ethidiumbromid (5 µg/ml) wurden je 100 Zellen von beiden Objektträgern einer Blutprobe beliebig ausgewählt und mit dem Epi-Fluoreszenzmikroskop Zeiss Axioscope 2 (Carl Zeiss Microscopy, Jena, Deutschland) untersucht. Mit Hilfe der computergestützten Bildanalyse-Software Metafer (MetaSystems, Altlußheim, Deutschland) wurden die Kometen (Tail Moment) analysiert.

FPG Comet Assay (modifiziert).

Durch Oxidation hervorgerufene DNA-Schäden wurden mit Hilfe des Enzyms Formamidopyrimidin-DNA-Glykosylase (FPG) bestimmt nach der Methode von [Collins et al., \(1993\)](#). Das Vorgehen war wie beim alkalischen Comet Assay, außer dass alle Objektträger nach der Lyse mit der FPG-Pufferlösung behandelt wurden (0,1 M KCl, 0,5 mM Na₂-EDTA, 40 mM HEPES-KOH, 0,2 mg/ml bovines Serumalbumin, pH-Wert 8). Anschließend wurden die Objektträger mit FPG-Enzym (New England Biolabs Ltd., Massachusetts, USA), und zwar 1 mg/ml FPG-Pufferlösung, für 30 Minuten bei 37 °C inkubiert. Von jeder Probe wurden zwei Objektträger gewonnen. Die Kometen wurden als Tail Moment (TM) mit Hilfe der Software Metafer (MetaSystems, Altlußheim, Deutschland) analysiert.

Mikronuklei (MN) und Chromosomenaberrationen (CA).

Der Mikronukleus-Test ([Abb. 1](#)) wurde gemäß den IAEA-Richtlinien ([IAEA, 2011](#)) durchgeführt. Wir analysierten 1000 binukleäre Zellen von jeder Blutprobe der

Teilnehmenden. Die binukleären Zellen wurden mit Hilfe des Mikronukleus-Tests unter Verwendung der Software Metafer (MetaSystems, Altlussheim, Deutschland) analysiert.

Zur Untersuchung der Chromosomenaberrationen wurden Lymphozyten des peripheren Blutes (PBL) gemäß den Methoden von Moorhead et al. (Moorhead et al., 1960) kurzzeitig kultiviert. Von jeder Probe wurden Vollblut-Kulturen im Duplikat angefertigt. Für die Untersuchung wurden mit Hilfe der Software Metafer (MetaSystems, Altlussheim, Deutschland) 1000 gut gespreizte Metaphasen analysiert. Auf der Grundlage allgemein anerkannter Kriterien bestimmten wir Chromosomenaberrationen wie Chromatidlücken, Fragmente, azentrische und dizentrische Chromosomen und Ringchromosomen (Abb. 1).

DNA-Doppelstrangbrüche (DSB) per Immunfärbung mit 53BP1/γH2AX.

Zur Visualisierung der DNA-Reparatur-Foci (53BP1/γH2AX) wurden die Zellen auf mikroskopische Objektträgern zentrifugiert, mit einer 3%igen Paraformaldehyd-Lösung fixiert und wie hier (Durdik et al., 2019) beschrieben immungefärbt. Von jeder Probe wurden zwei Objektträger gefärbt. Das Scanning wurde mit Hilfe des Metafer Slide Scanning System (Version 3.6; MetaSystems, Altlussheim, Deutschland) durchgeführt. Die Daten von mindestens 400 Zellen (200 von jedem Objektträger) wurden einer statistischen Analyse unterzogen.

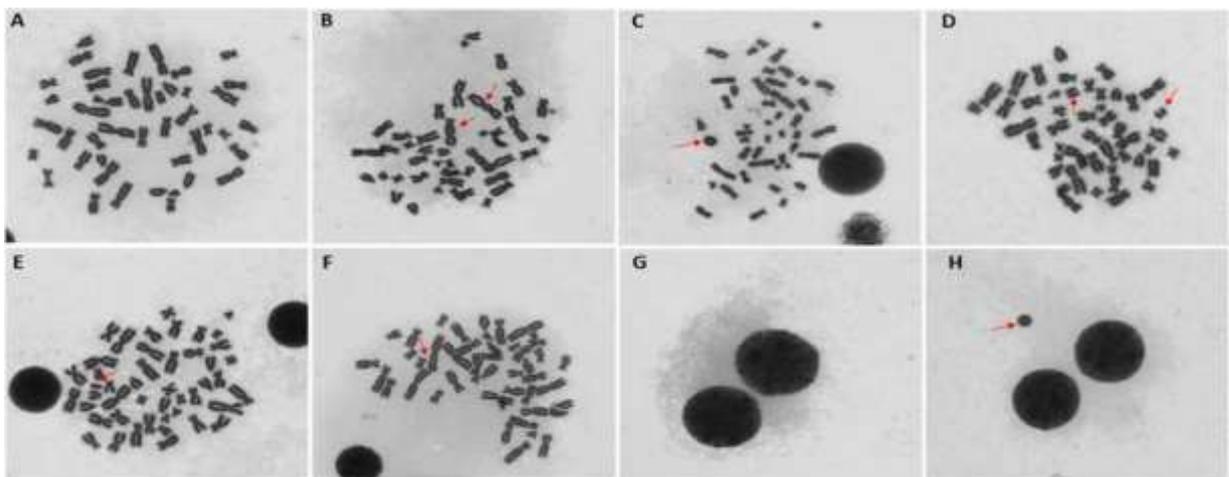


Abbildung 6-1: Permanente (nicht reparierfähige) DNA-Schäden, Chromosomen- und Mikrokernanalyse.

Normale Metaphase ohne Anzeichen von Schädigungen (A); Beispiele für verschiedene Chromosomenaberrationen wie dizentrische Chromosomen (B), Ringchromosomen (C), azentrische Chromosomen (D), Fragmente (E) und Chromatidlücke (F). Mikronukleus-Test zur Visualisierung bleibender DNA-Schäden: Der Zytokinese-Block-Mikronukleus-Test produziert binukleäre Zellen (G), vorherrschende Chromosomenfragmente erscheinen als Mikronukleus (H).

Spezifische Genanalysen

Präleukämische Genumlagerungen, FISH.

Um die leukämiespezifischen MLL-Genumlagerungen (KMT2A) (Harper und Aplan, 2008) zu analysieren, verwendeten wir das DNA-FISH-Verfahren mit Break-apart-Sonden zum Nachweis von Bruchpunkten (HPL013) (HPL013, Cytocell, Cambridge, UK). Abb. 2 zeigt das Prinzip, was dem Verfahren zu Grunde liegt. Die Ausstriche von 200 µl frischem Blut auf den mattierten Objektträgern (Menzel-Gläser, Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)

wurden getrocknet und wie hier (Jakl et al., 2020) beschrieben verarbeitet. In Kürze: Die gefärbten Objektträger wurden mittels Fluoreszenzmikroskopie (Olympus BX51, Shinjuku, Japan) mit 100facher Vergrößerung untersucht, und zwar im entsprechenden Spektrum, d. h. blau (Nukleus), grün und rot (FISH-Sonde). Innerhalb des Zellkerns entspricht das rote Signal dem MLL-Genabschnitt zwischen Bruchpunkt und PHLDB1-Gen (Pleckstrin homology-like domain family B member 1), was sich näher am Telomer befindet. Das grüne Signal entspricht dem MLL-Genabschnitt zwischen UBE4A-Gen (ubiquitination factor E4A) und Bruchpunkt, der sich näher am Zentromer befindet. Je nach Ausbeute der gefärbten Zellkerne wurden 740 – 1340 Zellen analysiert.

Normale Zellen enthalten zwei MLL-Gene, wobei rote und grüne Signale kolokalisiert werden (A). Eine Translokation wird dargestellt durch ein intaktes kolokalisiertes grünes, ein rotes und ein grünes Signal, die voneinander getrennt sind (B). Eine vollständige Gendeletion wird durch nur ein kolokalisiertes grünes und rotes Signal dargestellt (C). Eine vollständige Genduplikation wird durch eine zusätzliche Stelle mit kolokalisierten Signalen dargestellt (D). Der Verlust entweder des roten (E) oder des grünen (F) Signals weist auf eine partielle Deletion hin. Ein Verlust beider Signale kann eine vollständige Gendeletion auf einem Chromosom anzeigen. Jedes zusätzliche Signal (entweder rot (G) oder grün (H)) wird als partielle Duplikation betrachtet.

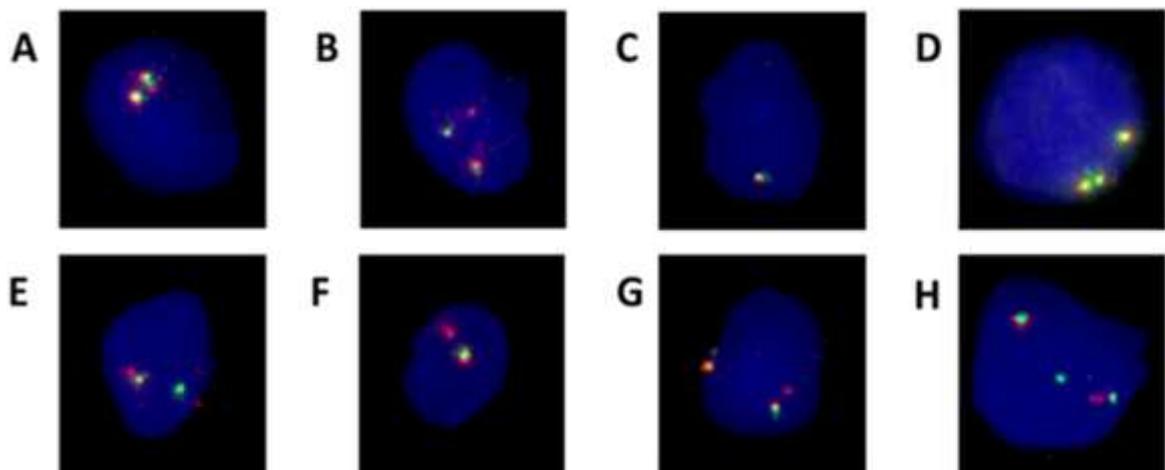


Abbildung 6-2: MLL-Gen Umlagerungen (Translokationen)

Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH) verwendet MLL-*Break-apart*-Sonden.

Zellkerne sind blau (DAPI-Färbung). Das rote Signal steht für den Genabschnitt, der sich näher am Telomer befindet, das grüne Signal färbt die gegenüberliegende Stelle jenseits des Bruchpunktes (also jene näher am Zentromer).

PFG-Analyse

RNA-Isolierung und cDNA-Synthese.

Die Gesamt-RNA wurde mit dem innuPREP DNA/RNA Mini Kit (Analytik Jena) aus $2,2 \times 10^6$ – 6×10^6 mononukleären Zellen nach den Anweisungen des Herstellers isoliert. Die Konzentration und Reinheit der isolierten RNA wurde mit dem NanoDrop 1000 Spektrophotometer (Thermo Fisher Scientific, Wilmington, NC, USA) bestimmt. Anschließend wurden die RNA-Ausbeute und pg/Zelle berechnet.

Die aus 2×10^6 Zellen extrahierte RNA wurde mittels reverse Transkriptase RevertAid™ H⁻ M-MuLV (Thermo Fisher Scientific) in cDNA umgeschrieben. Die Reaktionsmischung enthielt 5 µMol randomisierte Hexameren und Oligo (dT)18. Das Verfahren folgte dem Herstellerprotokoll. Einzelheiten sind in Suppl. 4 aufgeführt.

RT-qPCR und Sequenzierung.

Für jede quantitative Echtzeit-PCR wurden 2 µl cDNA (1/10 Vol. der RT-Reaktion) verwendet. Jede Probenanalyse wurde in dreifacher Ausführung durchgeführt, nach einem standardisierten Protokoll ([Gabert et al., 2003](#)), wobei folgende Änderungen vorgenommen wurden, um eine optimale Aktivität des Mastermixes zu erreichen: (i) Endvolumen: 20 µl, (ii) Matrize: 2 µl unverdünnte cDNA, (iii) PCR-Zyklusbedingungen: 1 Zyklus 95 °C 12 min, 45 Zyklen 95 °C 15 s, 60 °C 1 min.

Die RT-qPCR-Analysen für MLL-AF4 und MLL-AF9 R-T wurden in zwei separaten RT-qPCR-Verfahren durchgeführt:

MLL-AF4: (i) MLL-F1 + AF4-R + AF4-Pr, (ii) MLL-F2 + AF4-R + AF4-Pr

MLL-AF9: (i) MLL1-F + AF9-R1 + MLL-T1-Pr, (2) MLL1-F + AF9-R2/3 + MLL-T1-Pr.

Die Validierung der Positivität der Proben für das untersuchte PFG wurde mit Hilfe der Sequenzierung durchgeführt. Das RT-qPCR-Produkt wurde in den pUC18-Vektor eingefügt und die daraus resultierende rekombinante DNA in Form eines Plasmidrings, die durch Kolonie-PCR verifiziert wurde, diente als Matrize für die Sequenzierungsreaktion mit dem universellen M13/pUC Reverse-Primer, was die Sequenzierung des gesamten DNA-Inserts ermöglichte. Die Sequenzierung wurde nach einem Standardverfahren mit dem BigDye® Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, Thermo Scientific) durchgeführt.

Die Qualität der RNA wurde anhand des Expressionsniveaus des c-Abl-Kontrollgens (Haushaltsgen) bewertet. Die RNA gilt als für das RT-qPCR-Verfahren geeignet, wenn > 10.000 Kopien des Kontrollgens pro 10^5 Zellen vorhanden sind. Suppl. 5 zeigt, dass das Expressionsniveau von c-Abl zwischen 12.000 bis zu 48.000 Kopien liegt, was darauf hindeutet, dass die aus den peripheren Blutlymphozyten isolierte RNA der untersuchten Teilnehmenden nicht abgebaut wird, d. h. für weitere Analysen mittels RT-qPCR geeignet ist. Die Daten veranschaulichen, dass die Effizienz, der Korrelationskoeffizient und die Steigung aller fünf in dieser Studie verwendeten RT-qPCR-Untersuchungen innerhalb akzeptabler Werte liegen. Die Sequenzen der Primer und Sonden sowie die Analysen der Sequenzierungsdaten sind in Suppl. 6 aufgeführt.

6.2.5 Statistische Auswertung

Um mögliche Zusammenhänge zwischen physikalischen Messungen und biologischen Variablen zu ermitteln, führten wir eine Spearman-Korrelationsanalyse durch. Dann berechneten wir die Mittelwerte und Standardabweichungen (SD) und verglichen die Daten der beiden untersuchten Gruppen mittels univariater ANOVA-Analyse oder Students t-Test. Der Einfluss möglicher Störfaktoren wurde mittels einer zwei-faktoriellen ANOVA-Analyse (SPSS, V. 28.0) getestet. Um kumulierte Alpha-Fehler zu vermeiden, wurde die bekannernaßen sehr konservative Bonferroni-Korrektur angewandt. Für die Analyse der Häufigkeitsdaten kam der Exakte Fisher-Test zur Anwendung. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

6.3 Ergebnisse

6.3.1 Teilnehmende

Aufgrund des Abstands ihrer Wohnung zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation wurden die Teilnehmenden vorläufig in zwei Gruppen eingeteilt (Tabelle 1). Der Abstand zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation unterschied sich signifikant ($p < 0,001$) zwischen den Gruppen, während Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Körpergröße und Wohndauer ähnlich waren (Tabelle 1).

Die dokumentierten Ernährungsweisen und Lebensmittelpräferenzen, konkret der Verzehr von Fleisch, Gegrilltem und Käse, waren ähnlich. Lebensstilfaktoren wie Alkohol- und Nikotinkonsum waren ähnlich zwischen den Gruppen. Die meisten Teilnehmenden gaben an, „keine Medikamente“ einzunehmen. Keine der Teilnehmenden hatte jemals Therapien erhalten, die die DNA angreifen (z. B. Zytostatika). Teilnehmende, die innerhalb von drei Monaten vor der Teilnahme Antibiotika eingenommen hatten, und die Einnahme von Jod oder L-Thyroxin (zur Aufrechterhaltung der Schilddrüsenfunktion) waren gleichmäßig auf die Gruppen verteilt (Suppl. 1).

In Bezug auf die Exposition gegenüber ionisierender Strahlung über die gesamte Lebenszeit (Röntgenstrahlung, CT, etc., Suppl. 2) gab es zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede. Vier Teilnehmende gaben ein berufsbedingtes Risiko an, das mit Genominstabilität in Zusammenhang steht; ihre Zuordnung zu den Gruppen war gleichmäßig (Suppl. 3).

Die allgemeine Selbsteinschätzung der Teilnehmenden zu ihrer elektromagnetischen Hypersensitivität ergab einen höheren – wenn auch statistisch nicht signifikanten – Wert in der exponierten Gruppe, und die Symptome in Zusammenhang mit elektromagnetischer Hypersensitivität unterschieden sich nicht signifikant (Suppl. 3). Obwohl das Projekt während der COVID-Pandemie eingeleitet wurde, hatte keiner der Teilnehmenden vor oder während der Studie COVID. Zwölf der Teilnehmenden (50 %) wurden geimpft, die anderen wurden auf Corona getestet und waren negativ.

6.3.2 Messungen der EMF-Expositionen

Tabelle 2 vergleicht die verschiedenen EMF-Expositionen zwischen Gruppe E und Gruppe C. Während sich die Exposition gegenüber elektrischen Feldern des Stromnetzes und "hausgemachter" HF-Strahlung (DECT, WLAN) zwischen den Gruppen statistisch nicht unterschied, untermauerte die statistische Analyse der HF-Expositionen durch die

Mobilfunk-Basisstationen die Gruppenzuordnung der Teilnehmenden zur exponierten Gruppe (E) und Kontrollgruppe (C) auf der Grundlage des Abstands zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation ([Tabelle 1](#)). Es gab keine Überschneidungen zwischen den Gruppen, weder in Bezug auf den Abstand (Kontrollgruppe: 490 – 1020 m; exponierte Gruppe: 75 – 160 m) noch die GSM-Exposition (Kontrollgruppe: 0,0 – 4,5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$; exponierte Gruppe: 7,1 – 295,8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$) oder LTE-Exposition (Kontrollgruppe: 0,1 – 7,7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$; exponierte Gruppe: 54,0 – 804,0 $\mu\text{W}/\text{m}^2$). Die Exposition gegenüber GSM- und LTE-Signalen zeigte keine Überschneidungen, der Gruppenunterschied war hoch signifikant ([Tabelle 2](#)). Wir haben keine Signale über 2,5 GHz gefunden.

6.3.3 Explorative Korrelation von EMF-Exposition und biologischen Endpunkten

Wir untersuchten die Korrelationen zwischen spezifischen biologischen Variablen und der spezifischen Umweltexposition mittels Spearman-Rangkorrelation. [Tabelle 3](#) zeigt die Korrelationen zwischen dem Oxidationsstatus, reparierbaren und irreparablen DNA-Läsionen oder spezifischen Genveränderungen und den verschiedenen physikalischen Umweltmessungen. Die höchsten Korrelationskoeffizienten ergaben sich zwischen Chromosomenaberrationen und der Exposition gegenüber HF-Strahlung (GSM und LTE) von Mobilfunk-Basisstationen (MFBS), die sowohl durch den Abstand zur MFBS als auch durch HF-Messungen ermittelt wurden. Andere physikalische Parameter zeigten mit den biologischen Endpunkten sehr geringe oder unbedeutende Korrelationen. Bemerkenswert ist, dass die Expression des Haushaltsgens c-Abl positiv mit der Exposition gegenüber DECT, WLAN und NFEF auf hohem statistischem Niveau korrelierte. In Übereinstimmung mit diesen Daten korrelierte der RNA-Gehalt pro Zelle positiv mit der DECT-, WLAN- und NFEF-Exposition und auch mit der c-Abl-Genexpression, wenn auch nicht immer auf statistisch signifikante Weise. Diese Daten weisen möglicherweise darauf hin, dass diese Arten der HF-Exposition die Genexpression beeinflussen könnten, obwohl sie nicht genotoxisch sind.

6.3.4 Biologische Endpunkte, Gruppenvergleich (Kontrollgruppe C, exponierte Gruppe E)

[Tabelle 4](#) vergleicht die Ergebnisse der Laboruntersuchungen. Die Lipidperoxidation in den Blutproben war in der Gruppe E höher, wenn auch nicht statistisch signifikant. In der Gruppe E war die durchschnittliche Anzahl der oxidativen DNA-Läsionen (FPG Comet Assay) höher und die Einzelstrang-DNA-Läsionen (alkalischer Comet Assay) war signifikant höher. Die FISH-Analyse der Proben der Teilnehmenden zeigte keine Zunahme bei Deletionen, Duplikationen, Zuwachs, Brüchen oder allen Genumlagerungen im MLL-Gen in der Gruppe E ([Abb. 2](#), [Tabelle 3](#)). Suppl. 4 zeigt die Ergebnisse der RT-qPCR-Analyse der Teilnehmenden auf das Vorhandensein der präleukämischen Fusionsgene (PFG) MLL-AF4 und MLL-AF9, von denen bekannt ist, dass sie mit Leukämie in Zusammenhang stehen. Von den beiden untersuchten PFGs wurden nur MLL-AF4-Fusionstranskripte mit sehr verringerter Kopienanzahl in je zwei Personen der Kontrollgruppe sowie der exponierten

Gruppe identifiziert. Drei dieser positiven Proben wurden durch Sequenzierung verifiziert. Die Gruppenvergleichsanalyse zeigte keine statistisch signifikanten

Unterschiede zwischen der Kontrollgruppe und der exponierten Gruppe. Biomarker der DNA-Doppelstrangreparatur (γ H2AX, 53BP1) und der Mikronukleus-Test (Abb. 1) zeigten keine besonderen Unterschiede. Die Rate der Chromosomenaberrationen (Abb. 1) wie dizentrische Chromosomen, Chromatidlücken und Fragmente war in der Gruppe E signifikant höher. Auch die Gesamtzahl aller Chromosomenaberrationen war in der Gruppe E signifikant höher ($p = 0,001$, Tabelle 4).

Tabelle 6-3: umseitig. Explorative Spearman-Rangkorrelation

zwischen Biomarkern und spezifischen EMF-Expositionen. Signifikante Korrelationen sind hervorgehoben (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$). Die Signifikanzniveaus sind nicht für Mehrfachtests korrigiert. D.h. eine einzelne Signifikanz könnte möglicherweise ein zufälliges Ergebnis darstellen. Es gibt jedoch Cluster signifikanter Korrelationen, die weitere Analysen begründeten. Am

auffälligsten war die positiven Korrelation zwischen den verschiedenen Chromosomenaberrationen (Spalte: l, n), die mit den GSM- und LTE-Messungen korrelierten.

In Übereinstimmung mit diesem Fund korrelieren die Chromosomenaberrationen negativ mit dem Abstand zu den Mobilfunk-Basisstationen.

Alle Chromosomen Aberrationen korrelierten positiv, spezifische Chromosomenaberrationen waren statistisch signifikant (Spalte: i, m, n). Keines der Messergebnisse bei den niederfrequenten Magnetfelder (öffentliche Stromversorgung und Bahnstromanlagen, Zeile 26 – 29) zeigt signifikante Zusammenhänge mit irgendeinem biologischen Parameter.

Legende zu umseitigen Tabelle: Spearman-Korrelation, zweiseitige Signifikanz:

* $p < 0,05$;

** $p < 0,01$;

Biologischer Endpunkt		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	l	k	m	n	o	P
		age	Fpg Comet Assay	Alk Comet Assay	TBARS	Micro-Nuklei %	gH2AX	53BP1	gH2AX/53BP1	% Di-centric	% Ring	% Acentr.	% Gap	% Fragmente	total % Aberration	RNA (pg/cell)	C-ABL
1	Fpg Comet Assay	0,203															
2	Alk Comet Assay	0,248	0,383														
3	TBARS	0,141	-0,093	,648**													
4	Micro Nuclei %	-0,404	0,003	-0,316	-0,351												
5	gH2AX	,482*	-0,010	0,081	-0,014	0,062											
6	53BP1	0,247	-0,159	0,162	0,300	0,064	,769**										
7	yH2AX/53BP1	0,393	-0,055	0,100	0,045	-0,007	,924**	,768**									
8	% Di-centric	0,259	-0,086	0,101	,413*	0,087	-0,124	-0,118	-0,176								
9	% Ring	-0,007	-0,201	-0,144	0,013	-0,013	0,044	-0,066	0,049	0,040							
10	% Acentric	-0,197	-0,268	-0,177	0,029	,457*	-0,142	-0,092	-0,076	0,325	0,078						
11	% Gap	0,113	0,268	,585**	,633**	-0,122	-0,062	0,048	-0,118	,491*	0,067	0,224					
12	% Fragments	0,079	0,121	0,028	0,067	0,081	-0,273	-0,392	-0,237	,526**	0,053	0,250	0,083				
13	total % Aberration	0,151	0,106	0,200	0,327	0,080	-0,231	-0,259	-0,261	,786**	0,087	,546**	,642**	,708**			
14	RNA (pg/cell)	0,209	0,150	-0,361	-,452*	0,050	0,143	-0,105	-0,029	0,121	0,335	-0,158	0,015	0,048	0,092		
15	C-ABL	0,080	0,074	-0,321	-0,337	0,339	0,011	-0,130	-0,047	0,077	0,315	-0,044	-0,162	0,243	0,077	,406*	
16	GSM Grundlast RMS	0,207	0,172	0,191	0,261	-0,092	-0,300	-0,319	-0,337	,598**	0,227	0,205	0,372	,598**	,677**	0,051	0,131
17	GSM Volllast RMS	0,207	0,172	0,191	0,261	-0,092	-0,300	-0,319	-0,337	,598**	0,227	0,205	0,372	,598**	,677**	0,051	0,131
18	GSM Grundlast PEAK	0,207	0,172	0,191	0,261	-0,092	-0,300	-0,319	-0,337	,598**	0,227	0,205	0,372	,598**	,677**	0,051	0,131
19	GSM Volllast PEAK	0,207	0,172	0,191	0,261	-0,092	-0,300	-0,319	-0,337	,598**	0,227	0,205	0,372	,598**	,677**	0,051	0,131
20	LTE Grundlast RMS	0,084	0,257	0,130	0,192	0,017	-0,341	-0,323	-0,352	,529**	0,267	0,241	0,365	,639**	,668**	0,119	0,163
21	LTE Volllast RMS	0,084	0,257	0,130	0,192	0,017	-0,341	-0,323	-0,352	,529**	0,267	0,241	0,365	,639**	,668**	0,119	0,163
22	LTE Grundlast PEAK	0,084	0,257	0,130	0,192	0,017	-0,341	-0,323	-0,352	,529**	0,267	0,241	0,365	,639**	,668**	0,119	0,163
23	LTE Volllast PEAK	0,084	0,257	0,130	0,192	0,017	-0,341	-0,323	-0,352	,529**	0,267	0,241	0,365	,639**	,668**	0,119	0,163
24	DECT; PEAK	-0,027	0,192	-0,235	-0,108	,434*	-0,189	-0,066	-0,353	0,135	-0,043	0,062	-0,037	0,291	0,175	0,209	,554**
25	WLAN; PEAK	0,076	0,273	-0,278	-0,221	0,365	0,053	0,117	-0,061	0,110	0,238	-0,133	-0,070	0,240	0,061	,485*	,657**
26	LFMF 22-6; 16,7 Hz; Max	0,134	0,156	-0,151	-0,255	0,172	0,168	0,216	0,047	0,015	0,056	-0,007	-0,047	0,002	0,102	0,326	0,129
27	LFMF 22-6; 16,7 Hz; AVG	0,210	0,057	-0,200	-0,187	-0,036	-0,139	-0,188	-0,251	0,272	0,169	0,154	0,077	0,266	0,390	0,397	0,139
28	LFMF 22-6; 50 Hz; Max	0,012	0,079	0,095	-0,022	0,028	0,080	0,052	0,040	-0,179	-0,176	-0,245	-0,235	-0,193	-0,254	-0,307	-0,150
29	LFMF 22-6; 50 Hz; AVG	0,290	-0,114	0,004	-0,059	-0,398	-0,016	-0,207	-0,118	-0,177	-0,164	-0,284	-0,118	-0,283	-0,229	-0,080	-0,245
30	Abstand (Meter)	-0,142	-0,283	-0,312	-0,288	-0,064	0,044	-0,026	0,031	-,478*	-0,202	-0,302	-,496*	-,646**	-,758**	0,013	-0,087
31	LFEWF; V/m; max.	-,459*	0,169	-0,371	-,474*	0,278	-0,271	-0,248	-0,322	-0,315	0,113	-0,101	-0,256	0,080	-0,125	0,152	,544**

Tabelle 6-4: Blutproben, untersuchte Biomarker, Gruppenvergleich mittels univarianter ANOVA. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen gab es bei den Chromosomenaberrationen (CA), z.B. dizentrische Chromosomen, Chromatidlücken, Fragmente und gesamte Anzahl der Chromosomenaberrationen.

Biomarker	Parameter	Kontrollen N = 12 (Mittel ±SD)	Exponierte N = 12 (Mittel ±SD)	ANOVA P	Difference	Bonferoni P (N=19)
Oxidations-grad	Lipid Peroxidation Assay (nmol/mg Protein)	8.9±8.1	13.8±9.6	0.184	n.s.	> 0.999
Transiente, reparierbare DNA Schäden	FPG Comet Assay Tail moment (µM)	30.1±9.6	33.4±6.3	0.332	n.s.	> 0.999
	Alkaliner Comet Assay Tail moment (µM)	9.1±4.2	13.5±5.8	0.045	*	0,856
DNA-Reparatur-Foci bei Doppelstrangbrüchen	gH2AX	0.9±0.3	0.8±0.2	0.445	n.s.	> 0.999
	53BP1	1.4±0.3	1.2±0.3	0.247	n.s.	> 0.999
	gH2AX/53BP1	0.7±0.2	0.6±0.2	0.328	n.s.	> 0.999
Permanente Nicht reparierbare DNA-Schäden	Mikronukleus Assay	2.4±0.5	2.3±0.4	0.928	n.s.	> 0.999
	% Di-zentrische Chromosomen	0.4±0.2	0.7±0.2	0.007	*	0,142
	% Ring Chromosomen	0.1±0.1	0.1±0.2	0.375	n.s.	> 0.999
	% a-zentrische Chromosomen	0.9±0.5	1.3±0.7	0.100	n.s.	> 0.999
	% Chromatid Lücken	1.2±0.5	2.3±1.5	0.019	*	0,377
	% Fragmente	1.3±0.6	2.6±0.9	<0.001	**	0,009
	% gesamt chromosomale Aberrationen	3.9±1,1	7.1±1.3	<0.001	**	< 0,001
Spezifische Genaktivität	RNA Ausbeute in pg/cell	1.7±0.4	1.7±0.6	0.892	n.s.	> 0.999
	c-ABL Gen Kopienanzahl	28841.7 ±9000.1	31244.2 ±12504.9	0.594	n.s.	> 0.999
Spezifische genetische Schäden	MLL-Deletion, (FISH-Analysen)	1.09±0.90	1.96±1.58	0.174	n.s.	> 0.999
	MLL-Duplikation, (FISH-Analysen)	0.07±0.13	0.06±0.09	0.934	n.s.	> 0.999

	MLL-Break-apart, (FISH-Analysen)	0.18±0.29	0.02±0.04	0.069	n.s.	> 0.999
	Gesamtzahl der MLL- Genumlagerungen	1.57±0.86	2.26±1.77	0.3235	n.s.	> 0.999

Legende:

n. s. – nicht signifikant;

* p < 0,05, signifikant;

** p < 0,001, hoch signifikant;

6.3.5 Analysen von Störfaktoren

Neben unserer Beobachtung, dass sich Einzelstrang-DNA-Läsionen und verschiedene Chromosomenaberrationen zwischen den Gruppen unterscheiden (Tabelle 4), haben wir auch Störfaktoren beobachtet, die den beobachteten Unterschied zwischen den Gruppen verfälschen könnten. Um den möglichen Einfluss von Störfaktoren abzuschätzen, führten wir eine bi-faktorielle univariate ANOVA durch. Der erste Faktor war der Gruppenunterschied; der zweite Faktor waren die jeweiligen Biomarker, die einen Störfaktor darstellen könnten. Tabelle 5 fasst die Ergebnisse dieser Analysen zusammen.

Obwohl Mikronuklei bei Frauen häufiger auftraten (p = 0,035), kann in Anbetracht der fast gleichen Anzahl von Frauen in den Gruppen (C/E) und der bi-faktoriellen Analyseergebnisse das Geschlecht nicht als Störfaktor angesehen werden. Unter den Teilnehmenden gab es nur zwei Raucher. Daher können wir in dieser Studie eine Verzerrung durch das Rauchen ausschließen. Bei den fünf Personen, die regelmäßig Alkohol konsumieren – im Vergleich zu denjenigen, die selten oder nie Alkohol trinken (n = 19) – fanden wir eine erhöhte DNA-Schädigung, gemessen mittels Auszählung von γ H2AX (p = 0,011) und den kolokalisierten Foci γ H2AX/53BP1 (p = 0,002). Der statistische Vergleich ergab eine höhere Anzahl an DNA-Schädigungen (mittels alkalischen Comet Assay gemessen) in der exponierten Gruppe E mit grenzwertiger Signifikanz (Tabelle 4, p = 0,045).

Fünfzehn Teilnehmende, die sich mehr als 5 Röntgenuntersuchungen unterzogen hatten – im Vergleich zu denen mit ≤ 5 Röntgenuntersuchungen – wiesen eine höhere Anzahl von DNA-Reparatur-Foci 53BP1 (p = 0,006) und kolokalisierten DNA-Reparatur-Foci γ H2AX/53BP1 (p = 0,013) auf. Da die Teilnehmenden mit einer höheren Anzahl von Röntgenuntersuchungen gleichmäßig auf beide Gruppen verteilt waren und die bi-faktoriellen Analysen keine signifikanten Abhängigkeiten ergaben (Tabelle 5), verzerrt eine hohe Expositionsrate von Röntgenstrahlung das Ergebnis des Gruppenvergleichs in dieser Studie nicht. Das Gleiche gilt für die Computertomografie (CT). Während eine hohe Anzahl von CTs (≥ 3) mit einer erhöhten Rate von DNA-Reparatur-Foci zusammenhängt, lässt die Gleichverteilung dieser Teilnehmenden zwischen den Gruppen die bi-faktoriellen Störfaktoranalysen unbedeutend erscheinen (Tabelle 5). Keiner der möglichen Störfaktoren beeinflusste irgendeine Art von Chromosomenaberrationen (Tabelle 5). Der statistische Gruppenunterschied war für die beobachteten Chromosomenaberrationen hochsignifikant. Die Bonferroni-Korrektur des p-Werts bei Mehrfachtests (19 Parameter

aus jeder Blutprobe) änderte das Ergebnis nicht (Tabelle 4). Wir stellten fest, dass die Rate der Chromosomenaberrationen (nicht reparierbare, bleibende Aberrationen als Indikatoren für genotoxische Wirkungen) in den Blutzellen der exponierten Teilnehmenden (Gruppe E) signifikant höher war.

Tabelle 6-5: Potentielle Störfaktoren. Bi-faktorielle Varianzanalyse (ANOVA) zur Identifizierung möglicher Verzerrungen. Keiner der möglichen Störfaktoren war ungleichmäßig zwischen den Gruppen verteilt. Nur das Ergebnis des alkalischen Comet Assay wies ein signifikantes Verzerrungspotenzial auf (Alkoholkonsum). Doppelstrang-Reparatur-Foci (γ H2AX, 53BP1, γ H2AX/35BP1) zeigten einige Abhängigkeiten bei Alkoholkonsum und Röntgenuntersuchungen, jedoch identifizierten die Bi-faktoriellen Analysen keinen dieser Faktoren als möglichen Störfaktor, der den in Tabelle 4 dargestellten Gruppenvergleich (Kontrollen/Exponierte) verzerren könnte.

Potentieller Einflussfaktor	Endpunkte Parameter	Lipid peroxidation (nmol/mg Protein)	Alk, Comet Assay Schweif-Moment (μ M)	DNA Doppelstrangbruch Reparatur Foci			Micronuklei (per 1000 Zellen)	Chromosomale Aberrationen pro Zelle %
				γ H2AX	53BP1	γ H2AX/53BP1		
Geschlecht	männlich (n=11)	10.6 \pm 10.15	10.5 \pm 5.27	0.8 \pm 0.22	1.2 \pm 0.22	0.7 \pm 0.23	2.2 \pm 0.33	5.0 \pm 2.06
	weiblich (n=13)	12.0 \pm 8.37	11.9 \pm 5.67	0.8 \pm 0.28	1.3 \pm 0.30	0.70 \pm .22	2.5 \pm 0.42 *	5.9 \pm 1.96
1. TN-Gruppe / 2. Geschlecht	Bifaktoriell P =	0.757	0.744	0.757	0.644	0.991	0.249	0.706
Rauchverhalten	Nicht-Raucher (n=22)	10.9 \pm 8.79	11.5 \pm 5.59	0.8 \pm 0.25	1.3 \pm 0.26	0.7 \pm 0.22	2.3 \pm 0.43	5.4 \pm 1.92
	Raucher (n=2)	16.0 \pm 14.50	8.5 \pm 1.34	0.7 \pm 0.22	1.3 \pm 0.45	0.6 \pm 0.13	2.4 \pm 0.36	6.1 \pm 3.85
1. TN-Gruppe / 2. Rauchverhalten	Bifaktoriell P =	0.208	0.726	0.268	0.036	0.370	0.386	0.181
Alkoholkonsum	Rare (n=19)	12.8 \pm 9.53	11.2 \pm 4.91	0.8 \pm 0.18	1.3 \pm 0.27	0.6 \pm 0.16	2.4 \pm 0.43	5.8 \pm 2.06
	Regular (n=5)	5.8 \pm 3.57	11.3 \pm 7.78	1.1 \pm 0.33 *	1.4 \pm 0.25	0.9 \pm 0.26 *	2.2 \pm 0.32	4.5 \pm 1.62
1. TN-Gruppe / 2. Alkoholkonsum	Bifaktoriell P =	0.960	0.024*	0.019*	0.079	0.132	0.466	0.287

Tabelle 6-5, Fortsetzung

Potentieller Einflussfaktor	Endpunkte Parameter	Lipid peroxidation (nmol/mg Protein)	Alk, Comet Assay Schweif-Moment (µM)	DNA Doppelstrangbruch Reparatur Foci			Micronuklei (per 1000 Zellen)	Chromosomale Aberrationen pro Zelle %
				γH2AX	53BP1	γH2AX/53BP1		
Röntgen-Untersuchungen (im Leben bisher)	Bis zu 5 x (n=9)	8.3 ±4.78	10.3 ±4.13	0.9 ±0.25	1.2 ±0.24	0.8 ±0.21	2.3 ±0.38	5.6 ±2.28
	mehr als 5x (n=15)	13.16 ±10.59	11.9 ±6.13	0.9 ±0.26	1.1 ±0.21 *	0.6 ±0.16 *	2.4 ±0.43	5.4 ±1.92
1. TN-Gruppe / 2. Röntgen	Bifactoriell P =	0.916	0.956	0.374	0.747	0.310	0.049	0.584
Röntgen .- Durchleuchtung	Keine (n=8)	9.3 ±5.66	10.0 ±3.56	0.8 ±0.22	1.2 ±0.24	0.7 ±0.21	2.4 ±0.49	5.1 ±1.4
	Eine oder mehr (n=9)	16.5 ±11.87	11.8 ±5.61	0.7 ±0.07	1.3 ±0.20	0.6 ±0.08	2.3 ±0.38	6.8 ±2.23
1. TN-Gruppe / 2. Durchleuchtung	Bifactoriell P =	0.819	0.900	0.608	0.387	0.626	0.352	0.248
Computer-Tomographie CT (im Leben bisher)	Keine (7)	8.7 ±5.37	11.66 ±2.10	0.7 ±0.17	1.1 ±0.21	0.6 ±0.15	2.3 ±0.47	5.2 ±1.56
	1 x bis 2 x (n=10)	14.9 ±10.17	10.9 ±6.20	0.8 ±0.21	1.31 ±0.26	0.64 ±0.17	2.4 ±0.38	6.7 ±1.93 *
	3 x oder mehr (n=5)	9.7 ±11.30	11.8 ±7.82	1.1 ±0.32 *	1.5 ±0.19 *	0.95 ±0.25 *	2.3 ±0.55	4.0 ±1.38
1. TN-Gruppe / 2. Tomographie	Bifactoriell P =	0.616	0.114	0.092	0.407	0.400	0.316	0.839

Legende:

* signifikanter Unterschied zwischen den Einfluss-Faktor-Gruppen (ANOVA)

6.4 Diskussion

Die erste deutsche Studie, die das „Wohnen in der Nähe eines Mobilfunkmasts“ mit einem erhöhten Krebsrisiko in Verbindung brachte, erschien im Jahr 2004 (Eger et al., 2004). Unabhängig davon wurde in Israel ein erhöhtes Auftreten von Krebs und Wohnen in der Nähe eines Mobilfunksenders beschrieben (Wolf und Wolf, 2004). Unsere Beobachtung zu Chromosomenaberrationen liefert einen Mechanismus, der die Ergebnisse von Eger et al. (Eger et al., 2004) und Wolf und Wolf (Wolf und Wolf, 2004) erklären kann. Eine neuere Studie, die eine signifikante Genominstabilität nach der Exposition mit HF-Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen beschreibt, wurde an Mäusen durchgeführt (Zosangzuali et al., 2021). Bereits zuvor hatten Zothansiana et al. verschiedene mit genetischer Instabilität zusammenhängende Endpunkte in humanen peripheren Blutlymphozyten untersucht und biologische Effekte bei Anwohnern in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen festgestellt (Zothansiana et al., 2017). Die Ergebnisse zeigten eine signifikant höhere Häufigkeit von Mikronuklei und einen veränderten antioxidativen Status bei zunehmender Leistungsflussdichte der HF-Exposition. Das kann daher als ein weiterer Mechanismus angesehen werden, der ökologische und epidemiologische Studienergebnisse über ein erhöhtes Krebsrisiko bei Menschen, die in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen leben, erklären könnte. Rodrigues et al. untersuchten die Sterberate und die HF-Exposition durch Mobilfunk-Basisstationen und kamen zu dem Schluss, dass die Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von Mobilfunk-Basisstationen die Sterberate für alle Krebsarten erhöht (Rodrigues et al., 2021).

Unsere Analysen ergaben Chromosomenaberrationen (Abb. 1) bei Anwohnern als mögliche Folge der jahrelangen Exposition gegenüber HF-Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen. Die vorläufige Gruppenzuordnung aufgrund des Abstands (Tabelle 1) zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation wurde durch die Messungen der jeweiligen HF-Strahlung bestätigt. Die Anwohner der Kontrollgruppe C lebten mit einer geringen HF-Exposition bei großem Abstand, während diejenigen der Expositionsgruppe E bei geringem Abstand zu Mobilfunk-Basisstationen mit einer hohen HF-Exposition lebten (Tabelle 2).

Um jegliche Voreingenommenheit der Untersuchenden oder im Zusammenhang mit einer elektromagnetischen Hypersensitivität zu vermeiden, erfolgten die Blutentnahme und die Analysen unter strikten Doppelblindbedingungen. Der Verblindungscode wurde nach Abschluss der Laboranalysen und deren Vorlage beim Projektkoordinator entschlüsselt. Da HF-Emissionen sehr schwanken können und der Schlafplatz der Ort ist, an dem man sich im Haus am längsten aufhält, halten wir die Messungen während der Nachtstunden für besonders relevant und pragmatisch in dieser Studie. Die Felder, die von der Stromversorgung ausgehen, waren gering und unterschieden sich auch nicht signifikant zwischen den Gruppen der Studie (Tabelle 1), was ihren Einfluss auf das Studienergebnis vernachlässigbar macht. Auch die HF-Exposition im Innenraum (DECT, WLAN) lag unter der durchschnittlichen HF-Belastung in Wohnräumen und unterschied sich zwischen den Gruppen der Studie nicht (Tabelle 2).

Um die Vorgehensweise vor der Laboruntersuchung zwischen den Proben und Probenahmetagen zu standardisieren, wurden die Blutproben in einer isolierten Box bei gleichbleibenden Temperaturen transportiert. Um mögliche Auswirkungen

transportbedingter Ereignisse auszuschließen, wurde bei der Ankunft im Labor die Lebensfähigkeit der Zellen überprüft und für ausreichend befunden.

Neben der HF-Exposition können viele andere Faktoren die Genomintegrität beeinträchtigen oder Genominstabilität verursachen. Faktoren wie Alter, Geschlecht, Ernährungsweise, Lebensstil, etc. können die Häufigkeit von Mikronuklei in peripheren Blutlymphozyten erheblich beeinflussen (Fenech und Bonassi, 2011). In unserer Studie waren mögliche Ernährungsweisen und Lebensmittelpräferenzen zwischen den Gruppen gleichmäßig verteilt (Suppl. 1). Von der Liste der möglichen Störfaktoren konnten wir Lebensstilfaktoren wie Alkohol- und Nikotinkonsum ausschließen (Suppl. 1, Tabelle 5). Wir konnten mögliche Verzerrungen aufgrund des Gesundheitszustands der Teilnehmenden oder früherer Expositionen gegenüber ionisierender Strahlung ausschließen (Suppl. 1, Suppl. 2). Da berufsbedingte Risikofaktoren selten waren und sich gleichmäßig auf die Gruppen verteilten (Suppl. 3), stehen unsere Ergebnisse in keinem Zusammenhang mit diesen Faktoren. Auch die subjektive elektromagnetische Hypersensitivität (EHS), die zu Verzerrungen führen könnte, spielte in unserem Gruppenvergleich keine signifikante Rolle (Suppl. 3). Keiner dieser personenspezifischen Faktoren und keine EHS-bezogenen Informationen ergaben ein signifikantes Verzerrungspotenzial für die gefundenen Unterschiede zwischen den Gruppen der Studie. Keiner der möglichen Störfaktoren beeinflusste die Chromosomenaberrationen (Abb. 1), was bestätigt, dass eine langfristige (jahrelange) Exposition gegenüber GSM- und LTE-Signalen mit Intensitäten, die in den Wohnungen der Teilnehmenden der Gruppe E gemessen wurden, die Rate der Chromosomenaberrationen erhöht.

Reparierbare (transiente) DNA-Schäden (alkalischer Comet Assay) waren in der Gruppe E (Tabelle 4) höher, obwohl die Analyse der Störfaktoren eine signifikante Abhängigkeit dieser spezifischen Variable bei höherem Alkoholkonsum ergab (Tabelle 5). Dieses irgendwie isolierte Ergebnis kann ein "echtes Ergebnis" oder ein statistischer Alpha-Fehler sein. Wir haben die Parameter, die mit reparierbaren DNA-Schäden in Zusammenhang stehen, von unseren endgültigen Schlussfolgerungen jedoch ausgeschlossen.

Die Häufigkeit der Mikronuklei (MN) war bei den Frauen höher (Abb. 1, Tabelle 5). Beide Geschlechter waren jedoch in beiden Gruppen ähnlich vertreten (Tabelle 1). Daher ergab die bi-faktorielle Varianzanalyse (ANOVA) nicht die beobachtete höhere MN-Häufigkeit bei Frauen als Störfaktor. Die Exposition gegenüber einem physikalischen Faktor wie hochfrequente elektromagnetische Felder oder chemische Mutagene kann zu einer übermäßigen Produktion von ROS und somit zu oxidativem Stress führen, der das Risiko für chronische Krankheiten erhöht (Sies et al., 2022). Es wurde vermutet, dass oxidativer Stress und DNA-Schäden ein Schlüsselfaktor für das HF-bedingte Auftreten von Leukämien im Kindesalter und Hirntumoren sein könnten (De Iulii et al., 2009). Es gibt viele Studien, die nicht thermische Effekte wie oxidativen Stress infolge von HF-Expositionen beschreiben (Yakymenko et al., 2016). In unserer Studie fanden wir eine leicht erhöhte Lipidperoxidationsrate in der exponierten Gruppe, wenn auch nicht statistisch signifikant ($p > 0,05$). Auch die oxidierten DNA-Läsionen waren in der Gruppe E leicht erhöht, aber wiederum nicht in einem Ausmaß, das statistisch signifikant wäre (Tabelle 4). Zusammenfassend können wir sagen, dass unsere Beobachtungen zu oxidativen Veränderungen aufgrund von HF-Expositionen in das Gesamtbild passen, dass HF-Expositionen oxidativen Stress verursachen können (Yakymenko et al., 2016).

Der Comet Assay zur Bewertung von DNA-Strangbrüchen ist eine weitverbreitete empfindliche Untersuchungsmethode. Gandhi et al. verwendeten die Comet Assay-Methode und beschrieben eine signifikante Erhöhung von Einzelstrangbrüchen (SSB) bei Anwohnern, die im Umkreis von weniger als 300 m zu einer Mobilfunk-Basisstation lebten (Gandhi et al., 2014). In unserer Stichprobe zeigten die Comet Assay-Analysen eine höhere Menge an DNA-Schäden ($p = 0,045$) in der exponierten Gruppe (Tabelle 4). Unter Laborbedingungen wurde eine kurzzeitige HF-Exposition von wenigen Stunden wiederholt mit reparierbaren DNA-Schäden in Verbindung gebracht (Franzellitti et al., 2010; Lai and Singh, 1996; Schwarz et al., 2008). Im Vergleich zu den Laborbedingungen war die Exposition bei den Teilnehmenden in unserer Studie selbst in der exponierten Gruppe schwach. Die niedrige Dosis und die Expositionsdauer von vielen Jahren könnten in den Teilnehmenden unserer Studie einen adaptiven Reaktionsmechanismus aktiviert haben, eine Reaktion, die für Lymphozyten beschrieben wurde (Sannino et al., 2013).

DNA-Doppelstrangbrüche (DSB) können durch 53BP1- oder γ H2AX-Färbung sichtbar gemacht werden. Bei den Teilnehmenden unserer Studie wurde ein Anstieg der DNA-Reparatur-Foci bei Doppelstrangbrüchen im Zusammenhang mit wiederholter Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (z. B. mehrfache Röntgenuntersuchungen, Fluoroskopien, Computertomografien) festgestellt, nicht aber mit einer höheren Umweltbelastung durch HF-Strahlung. Auch hier könnte in der exponierten Gruppe die Höhe der Exposition zu gering gewesen sein, alternativ könnten adaptive Reaktionen zu diesem Ergebnis beitragen.

Wir fanden keine Studien, in denen untersucht wurde, ob bestimmte Mutationen im Zusammenhang mit Leukämien im Kindesalter und Hirntumoren durch die Exposition gegenüber HF-Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen verursacht werden. Anomalien der MLL-Fusionsgene MLL-AF4 und MLL-AF9 treten am häufigsten bei akuter myeloischer Leukämie im Kindesalter auf. Daher analysierten wir die Induktion der oben genannten PFG mittels RT-qPCR und FISH. Durch FISH konnten wir keine Deletionen, Duplikationen, Brüche oder komplette Genumlagerungen im MLL-Gen feststellen ($p > 0,05$) (Tabelle 2). PFG-Gene, und zwar MLLAF4 und MLL-AF9, die für die Leukämogenese aufgrund von Genumlagerungen verantwortlich sind, wurden mit der RT-qPCR-Methode identifiziert, und die Ergebnisse wurden durch Sequenzierung verifiziert. Ihr Vorkommen unterschied sich zwischen den Gruppen der Teilnehmenden jedoch nicht.

Mikronuklei (Abb. 1) entstehen aus verzögerten Chromosomen oder azentrischen Chromosomenfragmenten, die nicht in die Tochterkerne eingebaut werden. Während seit langem bekannt ist, dass Störungen vieler Aspekte des Spindelaufbaus zur Entstehung von Mikronuklei führen, wurden in jüngster Zeit weitere molekulare Akteure und Mechanismen in die Bildung von Mikronuklei einbezogen (Krupina et al., 2021). Zusammen mit Chromosomenaberrationen sind Mikronuklei Indikatoren für ein erhöhtes Risiko für die Krebsentstehung. In unserer Studie beobachteten wir keinen Zusammenhang zwischen chronischer HF-Exposition und der Häufigkeit von Mikronuklei ($p > 0,05$, Tabelle 4). Dieses Ergebnis könnte ein Hinweis auf die Existenz einer Expositionsschwelle für Mikronuklei sein. Die unterschiedlichen zellulären Mechanismen, die an der Entstehung von Mikronuklei oder Chromosomenaberrationen beteiligt sind, könnten deren unterschiedliche Prävalenz in den hier analysierten Proben erklären (Krupina et al., 2021). Chromosomenaberrationen (Abb. 1) sind wichtige Marker für

Genomschäden durch übermäßige Exposition gegenüber ionisierender Strahlung. Chromosomenaberrationen sind der Schlüssel für das Screening von Umweltbelastungen mit mutagenem Potenzial, sowohl in In-vitro-, In-vivo- oder auch Humanstudien.

Da die Dizentrik als Goldstandard in der biologischen Dosimetrie gilt, haben wir die zu den dizentrischen Chromosomen erhobenen Daten benutzt, um die effektive Dosis für die exponierten Personen gemäß der von der IAEA empfohlenen Gleichung für die längere Exposition gegenüber ionisierender Strahlung im Niedrigdosisbereich (IAEA, 2011) zu berechnen und zu bewerten. Während die Schätzungen von 0,0 – 194,9 mSv reichten, betrug der Mittelwert der effektiven Dosis für die Gruppe E $76,4 \pm 19,8$ mSv. Der Grenzwert für die Ganzkörperbelastung zum Schutz der Bevölkerung liegt bei 1 mSv pro Jahr (IAEA, 2018). Geht man von einer 10- oder 20-jährigen HF-Exposition der Bewohner aus, übersteigt das Äquivalent der effektiven Dosis den IAEA-Grenzwert deutlich. Die Feststellung, dass HF-Strahlung die Rate von dizentrischen Chromosomen so stark erhöht, dass Sicherheitsgrenzwerte für ionisierende Strahlung überschritten werden, sollte aufgrund der vorgeschlagenen Unterschiedlichkeit von ionisierender und nicht ionisierender Strahlung und Expositionsbedingungen mit Sorgfalt behandelt werden.

Da unsere Daten darauf hindeuten, dass die Häufigkeit von Chromosomenaberrationen nach jahrelanger HF-Exposition im Niedrigdosisbereich immer noch höher ist als bei niedrig exponierten Kontrollen (Tabelle 4, Gruppe C), deutet dies darauf hin, dass mögliche adaptive Reaktionen die Entstehung neuer Chromosomenaberrationen nicht wirksam verhindern, wenn die HF-Exposition im Niedrigdosisbereich über Jahre anhält. Negative Berichte zeigen, dass der Zusammenhang zwischen HF-Exposition und genetischer Instabilität noch nicht ausreichend verstanden wird. So fanden Yildirim et al. bei Personen, die in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen wohnten, keinen Anstieg von Chromosomenaberrationen oder Mikronuklei (Yildirim et al., 2010). Mehrere Faktoren wie die Dauer der Exposition und die Art des Signals (Frequenz, Modulation, nicht kontinuierliche Exposition, etc.) könnten für die möglichen Unstimmigkeiten verantwortlich sein (Armstrong et al., 2013; Belyaev, 2019).

Die Ergebnisse der Studie könnten durch die Variabilität der individuellen Exposition beeinflusst sein. Da unsere vorläufigen Messungen jedoch im Freien stattfanden und die Gruppenzuordnung auf der Exposition in Innenräumen während der Nachtstunden basiert, schlossen wir eine mögliche Verzerrung durch Faktoren wie die Abschirmung durch Innenräume aus. Übermäßige HF-Expositionen über die gesamte Lebenszeit oder Störfaktoren wie Expositionen gegenüber ionisierender Strahlung wurden in der Analyse dokumentiert (Suppl. 1 – 3) und berücksichtigt (Tabelle 5).

Die nicht signifikanten Ergebnisse, insbesondere in Bezug auf die MLL-Genumlagerungen und die Transkriptionsmodifikation des c-Abl-Gens, könnten ein zusätzlicher Beweis dafür sein, dass die beobachteten Anzeichen genetischer Instabilität die DNA und verschiedene Chromosomen eher stochastisch treffen, als dass sie spezifische Gene oder DNA-Sequenzen beeinflussen. Dieses Ergebnis bestätigt die Rolle von übermäßigem oxidativem Stress als grundlegenden pathogenen Mechanismus und es kann die kumulierten Chromosomenaberrationen nach jahrelanger Exposition erklären.

Zusammenfassend weisen die hochsignifikanten Unterschiede zwischen den Kontrollen und der exponierten Gruppe (Tabelle 4) zusammen mit der Korrelation zwischen spezifischen HF-Signalen (GSM, LTE) und den verschiedenen Chromosomenaberrationen

(Tabelle 3) nach chronischer (jahrelanger) Exposition auf die HF-Signale der Mobilfunk-Basisstationen (GSM, LTE) als Ursache der beobachteten genetischen Instabilität hin. Somit könnten unsere Ergebnisse zu Chromosomenaberrationen einen biologisch plausiblen Mechanismus für die Daten zu einem signifikant erhöhten Krebsrisiko bei Personen liefern, die HF-Strahlung von Mobilfunk-Basisstationen ausgesetzt sind (Li et al., 2012; Eger et al., 2004; Wolf und Wolf, 2004; Rodrigues et al., 2021).

6.5 Schlussfolgerung

In dieser Studie fanden wir keine statistisch signifikanten DNA-Schäden und/oder oxidativen Stress, die auf das Wohnen in der Nähe von Mobilfunk-Basisstationen (MFBS) zurückzuführen wären. Wir fanden auch keine statistisch signifikanten Wirkungen in Bezug auf spezifische Genparameter. Die zytogenetischen Schäden, d.h. die Chromosomenaberrationen, waren bei den Bewohnern mit höherer Exposition gegenüber HF-Strahlung signifikant erhöht. Sie korrelierten negativ mit dem Abstand zu Mobilfunk-Basisstationen und positiv mit der Exposition gegenüber LTE- und GSM-Signalen von Mobilfunk-Basisstationen.

Erklärung zur Urheberschaft

Eva Markova: Projektverwaltung. Lukas Jakl: Mikroskopische Untersuchung. Milan Skorvaga: Daten-Validierung, Untersuchung. Igor Belyaev: Konzeption, verfassen und editieren des Manuskripts. Supervision, Projektadministration, Methodik, Konzeptualisierung des Projektes. Sachin Gulati: Konzeption und Verfassen von Präsentationsmaterial, Investigation. Dominika Kochanova: Veranschaulichung, Untersuchung. Katarina Vigasova: Laborexperimente, Untersuchung. Pavol Kosik: Untersuchung. Matus Durdik: Untersuchung. Wilhelm Mosgoeller: Projektkoordination, Supervision, Manuscript-Konzeption Methodik, Akquise von Fördermitteln, Projekt-Konzeptualisierung. Dietrich Moldan: Physikalische Messungen.

Erklärung zu Interessenkonflikten

Die Autoren erklären, dass ihnen keine konkurrierenden finanziellen Interessen oder persönliche Beziehungen bekannt sind, die ihre Arbeit an dieser Studie hätten beeinflussen können.

Verfügbarkeit von Daten

Die Daten werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

Danksagung

Die Studie wurde durch die Kompetenzinitiative zum Schutz von Mensch, Umwelt und Demokratie e.V., 66133 Saarbrücken-Scheidt, Deutschland, gefördert. Der Sponsor hatte keinen Einfluss auf das Projektdesign und Projektpräsentation.

Anhang A. Zusätzliche Informationen

Ergänzende Daten zu diesem Artikel stehen online unter [doi:10.1016/j.ecoenv.2024.116486](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116486) zur Verfügung (Link: Supplementary material).

6.6 Zitierte Referenzen in Teilbericht "D"

- Akdag, M.Z., et al., 2016. Does prolonged radiofrequency radiation emitted from Wi-Fi devices induce DNA damage in various tissues of rats? *J. Chem. Neuroanat.* 75, 116-122.
- Al-Serori, H., et al., 2018. Mobile phone specific electromagnetic fields induce transient DNA damage and nucleotide excision repair in serum-deprived human glioblastoma cells. *PLoS One* 13, e0193677.
- Armstrong, B., et al., 2013. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer.
- Atzmon, I., et al., 2012. Cancer risks in the Druze Isifya village: reasons and RF/MW antennas. *Pathophysiology* 19, 21-28.
- Baan, R., et al., 2011. Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *Lancet Oncol.* 12, 624-626.
- Bektas, H., et al., 2020. Comparison of effects of 2.4 GHz Wi-Fi and mobile phone exposure on human placenta and cord blood. *Biotechnol. Equip.* 34, 154-162.

- Belyaev, I.Y., 2010. Dependence of non-thermal biological effects of microwaves on physical and biological variables: implications for reproducibility and safety standards. *Non-thermal effects and mechanisms of interaction between electromagnetic fields and living matter*. Mattioli 1885, 187-217.
- Belyaev, I., et al., 2016. EUROPAEM EMF guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev. Environ. Health* 31, 363-397.
- Belyaev, I., 2019. *Main Regularities and Health Risks from Exposure to Non-Thermal Microwaves of Mobile Communication*. IEEE, New York.
- Buege, J.A., Aust, S.D., [30] Microsomal lipid peroxidation. In: S. Fleischer, L. Packer, (Eds.), *Methods in Enzymology*. Academic Press, 1978, pp. 302-310.
- Collins, A.R., et al., 1993. Direct enzymic detection of endogenous oxidative base damage in human lymphocyte DNA. *Carcinogenesis* 14, 1733-1735.
- De Iuliis, G.N., et al., 2009. Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa in vitro. *PLoS One* 4, e6446.
- Dode, A., et al., 2011. Mortality by neoplasia and cellular telephone base stations in the Belo Horizonte municipality, Minas Gerais state, Brazil. *Sci. Total Environ.* 409, 3649-3665.
- Durdik, M., et al., 2019. Microwaves from mobile phone induce reactive oxygen species but not DNA damage, preleukemic fusion genes and apoptosis in hematopoietic stem/progenitor cells. *Sci. Rep.* 9, 16182.
- Eger, H., et al., 2004. The influence of being physically near to a cell phone transmission mast on the incidence of cancer. *Umw. Med. Ges.* 17, 326-332.
- Falcioni, L., et al., 2018. Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ. Res.* 165, 496-503.
- Fenech, M., Bonassi, S., 2011. The effect of age, gender, diet and lifestyle on DNA damage measured using micronucleus frequency in human peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis* 26, 43-49.
- Franzellitti, S., et al., 2010. Transient DNA damage induced by high-frequency electromagnetic fields (GSM 1.8 GHz) in the human trophoblast HTR-8/SVneo cell line evaluated with the alkaline comet assay. *Mutat. Res.* 683, 35-42.
- Gabert, J., et al., 2003. Standardization and quality control studies of 'real-time' quantitative reverse transcriptase polymerase chain reaction of fusion gene transcripts for residual disease detection in leukemia - a Europe against cancer program. *Leukemia* 17, 2318-2357.
- Gandhi, G., et al., 2014. DNA and chromosomal damage in residents near a mobile phone base station. *Int. J. Hum. Genet.* 14, 107-118.
- Garaj-Vrhovac, V., et al., 2011. Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 214, 59-65.
- Harper, D.P., Aplan, P.D., 2008. Chromosomal rearrangements leading to MLL gene fusions: clinical and biological aspects. *Cancer Res.* 68, 10024-10027.
- IAEA, 2011. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.
- IAEA, 2018. *Occupational Radiation Protection*. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna.
- ICBE-EMF, I.C. o t B.E. o E.F., 2022. Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. *Environ. Health* 21, 92.
- ICNIRP, 2020. *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*. *Health Phys.* 118, 483-524.
- Jagetia, G.C., 2022. Genotoxic effects of electromagnetic field radiations from mobile phones. *Environ. Res.* 212, 113321.
- Jakl, L., et al., 2020. BCR/ABL preleukemic fusion gene in subpopulations of hematopoietic stem and progenitor cells from human UCB. *Neoplasma* 67, 158-163.

- Krupina, K., et al., 2021. Causes and consequences of micronuclei. *Curr. Opin. Cell Biol.* 70, 91-99.
- Lai, H., Singh, N.P., 1996. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 69, 513-521.
- Li, C.Y., et al., 2012. A population-based case-control study of radiofrequency exposure in relation to childhood neoplasm. *Sci. Total Environ.* 435-436, 472-478.
- Liu, C., et al., 2013. Mobile phone radiation induces mode-dependent DNA damage in a mouse spermatocyte-derived cell line: a protective role of melatonin. *Int. J. Radiat. Biol.* 89, 993-1001.
- Meyer, M., et al., 2006. Mobilfunkbasisstationen und Krebshäufigkeit in Bayern. *Umw. Forsch. Prax.* 11, 89-97.
- Moorhead, P.S., et al., 1960. Chromosome preparations of leukocytes cultured from human peripheral blood. *Exp. Cell Res.* 20, 613-616.
- Nilsson, M., Hardell, L., 2023. A 49-year-old man developed severe microwave syndrome after activation of 5G base station 20 meters from his apartment. *J. Community Med. Public Health* 7, 382.
- Nittby, H., et al., 2009. Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone. *Pathophysiology* 16, 103-112.
- Rodrigues, N.C., et al., 2021. The effect of continuous low-intensity exposure to electromagnetic fields from radio base stations to cancer mortality in Brazil. *Int. J. Environ. Res. Public Health* Vol. 18.
- Rothkamm, K., et al., 2015. DNA damage foci: meaning and significance. *Environ. Mol. Mutagen.* 56, 491-504.
- Sannino, A., et al., 2013. Adaptive response in human blood lymphocytes exposed to non-ionizing radiofrequency fields: resistance to ionizing radiation-induced damage. *J. Radiat. Res.* 55, 210-217.
- Schwarz, C., et al., 2008. Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 81, 755-767.
- Sies, H., et al., 2022. Defining roles of specific reactive oxygen species (ROS) in cell biology and physiology. *Nat. Rev. Mol. Cell Biol.* 23, 499-515.
- Singh, N.P., et al., 1988. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells. *Exp. Cell Res.* 175, 184-191.
- Wolf, R., Wolf, D., 2004. Increased incidence of cancer near a cell-phone transmitter station. *Int. J. Canc Prev.* 1, 123-128.
- Wyde, M.E., et al., 2018. Effect of cell phone radiofrequency radiation on body temperature in rodents: Pilot studies of the National Toxicology Program's reverberation chamber exposure system. *Bioelectromagnetics* 39, 190-199.
- Yakymenko, I., et al., 2016. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn. Biol. Med.* 35, 186-202.
- Yildirim, M.S., et al., 2010. Effect of mobile phone station on micronucleus frequency and chromosomal aberrations in human blood cells. *Genet. Couns.* 21, 243-251.
- Zhang, Z.H., et al., 2022. Are reactive oxygen species (ROS) a suitable metric to predict toxicity of carbonaceous aerosol particles? *Atmos. Chem. Phys.* 22, 1793-1809.
- Zosangzuali, M., et al., 2021. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation emitted from a mobile phone base station on the redox homeostasis in different organs of Swiss albino mice. *Electro Biol. Med.* 40, 393-407.
- Zothansiam, et al., 2017. Impact of radiofrequency radiation on DNA damage and antioxidants in peripheral blood lymphocytes of humans residing in the vicinity of mobile phone base stations. *Electromagn. Biol. Med.* 36, 295-305.

7 Zusammenschau

Wilhelm Mosgöller

Eine frühe Untersuchung von so genannten a-thermischen Wirkungen war das ATHEM-1 Projekt. Die signifikanten Effekte auf die zelluläre DNA - nicht in allen, aber in einigen Zellen - sind publiziert (Schwarz et al., 2008; Gerner et al., 2010). Nach ATHEM-1 der Befund „expositionsbedingte DNA-Läsionen“ durch international mehrfach bestätigt (Belyaev, 2010; Chavdoula et al., 2010; Franzellitti et al., 2010; Kesari et al., 2010; Kumar et al., 2010; Tomruk et al., 2010; Xu et al., 2010).

Die Erkenntnis, dass es bei Exposition im Stundenbereich beides gibt, sensible Zellen und solche, die sich von einer stundenlangen Exposition „unbeeindruckt“ zeigten, beendete eine wissenschaftliche Kontroverse der Vergangenheit. Der Befund „sensible Zellen neben widerstandsfähigen Zellen“ ist kein Widerspruch. Berücksichtigt man zelluläre Mechanismen wie beispielsweise den Weg über oxidative DNA-Läsionen (Yakymenko et al., 2016), dann lassen sich die Vorgänge in den betroffenen Zellen biologisch nachvollziehbar erklären.

Eine weitere Erkenntnis aus ATHEM-1 betrifft die Rolle der Expositionsdauer. Bei HF-EMF-Exposition mit schwachen Feldern (etwa hundertfach unter dem Grenzwert) finden sich typischerweise nach kurzer Exposition keine Effekte. Wenn sich bei sensiblen (reaktiven) Zellen expositionsbedingte DNA-Schäden zeigten, erschienen diese nicht unmittelbar, sondern nach vier Stunden, oder nach 16 und 24 Stunden Exposition (Diem et al., 2005). Bei internationalen Forschungsbemühungen zeigten sich DNA-Läsionen je nach Zelltyp, Tierspezies, und Gewebematerial zwischen 15-30 Minuten (Cam and Seyhan, 2012) und mehreren Stunden (Schwarz et al., 2008; Al-Serori et al., 2018).

Menschliche Lymphocyten (weiße Blutzellen) sind ein beliebtes Zellmodell für die Erforschung von Wirkungen ionisierender Strahlung. Bei analogen Tests, aber mit HF-EMF Exposition, haben sie wiederholte Male keine HF-EMF expositionsbedingten DNA-Läsionen gezeigt (Vijayalaxmi et al., 1997; Vijayalaxmi, 2006; Waldmann et al., 2013).

Auf der Suche nach dem zellulären Mechanismus, der hinter der Beobachtung von expositionsbedingten DNA-Läsionen steht, wurden im ATHEM-2 Projekt keine Lymphocyten, sondern fünf alternative Zelltypen *in vitro* exponiert und untersucht. Arunter waren zwei Hirntumor-(Glioblastom)-Zelllinien - eine EMF reaktiv, die andere robust. Sie wurden für weiterführende Untersuchungen zum zellulären Mechanismus ausgewählt (Molla-Djafari et al., 2016). Es zeigte sich, dass die gefundenen HF-EMF expositionsbedingten DNA-Läsionen durch genetischen Hintergrund und mit oxidativen DNA-Schäden bzw. deren Reparatur erklärt werden können (Al-Serori et al., 2018). Die HF-EMF Exposition verursachte DNA-Läsionen besonders in jenen Zellen, die vor und während der Exposition experimentell gestresst und geschwächt wurden (Molla-Djafari et al., 2016).

Einer der biologischen Mechanismen ist der, dass im Zuge der Reparatur oxidativer DNA-Schäden die DNA von Reparaturenzymen enzymatisch geschnitten wird (Al-Serori et al., 2018). Diese Befunde bedeuten keinesfalls, dass HF-EMF Exposition ein zuverlässig wirkendes „DNA-brechendes-Zellgift“ ist. Aber die gefundene erhöhte Rate oxidativer Schäden und die mit dadurch aktivierten zellulären Reparaturmechanismen bewirken u.a. eine erhöhte Rate von Reparaturfehlern.

Solche Reparaturfehler passieren bei DNA-Einzelstrang-Läsionen dann und wann. Bei den selten gefundenen DNA-Doppelstrangbrüchen sind sie häufig. Insgesamt ist es nachvollziehbar, dass nach Kurzzeit-Exposition kleine Schädigungen unter der Wahrnehmungsschwelle eines Labortests bleiben. Gehäufte Chromosomen-Aberrationen, nach Jahren der erhöhten Exposition, erklären sich durch eine langsam anwachsende Rate permanent gewordener Schäden über die Jahre. Die der Zelle aufgezwungene erhöhte Reparaturaktivität erhöht die Rate von Reparaturfehlern und führt zu permanent schadhafter DNA, wie es einer DNA-toxischen Wirkung entspricht (Eaton and Gilbert, 2013; Gregus, 2013).

Der Mechanismus "zelluläre Oxidationsschäden" erklärt auch den synergistischen Effekt von HF-EMF mit toxischen Chemikalien, deren Wirkmechanismus ebenfalls Oxidationsvorgänge involviert, wie es wiederholt beobachtet wurde. Bei Tieren, die ein chemisches Karzinogen (Ethyl-Nitro-Harnstoff) verabreicht bekamen, verdoppelte die Exposition mit HF-EMF die Anzahl der erkrankten Individuen (Tillmann et al., 2010). Dieser damals aufsehenerregende Befund wurde unabhängig wiederholt und repliziert (Lerchl et al., 2015). Bereits 1997 war bekannt, dass die Kombination eines Chemotherapeutikums (MMC) mit der HF-EMF (900 MHz) Exposition von Sendeanlagen die DNA Schadensrate ansteigen lässt (Maes et al., 1997). Auch bei 2450 MHz wirkt HF-EMF synergistisch mit DNA-schädigenden Stoffen (Zhang et al., 2003). Ein 1800 MHz-HF-EMF Signal verstärkte die oxidativ-DNA-schädigende Wirkung des Karzinogens Nitroquinolin-Oxid (Baohong et al., 2005).

Ob eine Schädigung gering und für das normale Leben nicht relevant ist, oder alternativ: durchaus relevant ist, oder ob sie im normalen Leben kompensiert werden kann, zeigt sich nicht im Reagenzglas, sondern in systematischen Beobachtungen im normalen Leben. Folgerichtig untersuchte ATHEM-3, ob die Exposition mit HF-EMF für z.B. DNA-Schäden, Chromosomenschäden, Körperfunktionen, etc., im Alltag eine Rolle spielt. Ob nach chronischer Exposition unterschwellige Wirkungen abgebaut werden, oder alternativ sich anreichern (kumulieren), wurde bisher nicht systematisch untersucht.

7.1 Studienmerkmale

Dies Studie ist auch bei geringen Teilnehmerzahlen aussagekräftig. Die Gruppen waren hinsichtlich demographischer Daten, Lebensstilfaktoren und alternativen Risikofaktoren wie Exposition zu (medizinisch indizierten) ionisierender Strahlung gut vergleichbar und bezüglich der Exposition mit HF-EMF klar zuordenbar, entweder der Kontroll- oder Versuchsgruppe. Da bereits einige Studien zu diesem Thema vorliegen, bestätigen unsere Daten die bisher oft kontrovers wirkende Befundlage, dass die akute Exposition zu HF-EMF manchmal wirkt und manchmal keine signifikanten akut-Wirkungen bewirkt. Nun zeigen unsere Daten, dass bei niedriger akuter Wirkung, die damit assoziierten Langzeitfolgen akkumulieren können.

7.1.1 Probanden

Was waren die Voraussetzungen für eine systematische Untersuchung unter Alltagsbedingungen? Es nahm zu Projektbeginn einige Monate in Anspruch, bis ein Gebiet mit unterschiedlicher aber überschaubarer Expositionslage gefunden war. Die freiwilligen

Teilnehmer waren entweder überdurchschnittlich stark oder relativ niedrig mit HF-EMF exponiert, aber in beiden Fällen war die Mobilfunk-Netzversorgung gegeben. In Parametern wie Alter, Geschlechtsverteilung, Lebensstil, Ernährung, und Umwelt-Risikofaktoren waren die Vergleichs-Gruppen sich ähnlich und gut vergleichbar. Ein Unterschied lag in der Entfernung zur nächstgelegenen Mobilfunk-Basisstation. Dieser Unterschied wurde durch umfassende physikalische Messungen im Hoch-Frequenzbereich (790 Hz bis 2.200 MHz) belegt. Die Personen in den Vergleichsgruppen waren entweder „hoch exponiert“ oder „niedrig exponiert“.

7.1.2 Verblindete Analysen

Um einen möglichen Untersucherbias zu unterbinden, erfolgten die Analysen der zellulären Reaktionen, DNA-Reparatur, Chromosomen-Aberrationen, autonome physiologische Körperfunktionen, etc. jeweils unter doppelt verblindeten Bedingungen. Sowohl die Blutproben als auch die HRV wurde ohne Kenntnis der Gruppenzugehörigkeit analysiert. Die Entblindung (Decodierung und Gruppenzuteilung) erfolgte, nachdem die individuellen Ergebnisse vorlagen.

7.1.3 Peer Review der Teilreports

Als qualitätssichernde Maßnahme in einem interdisziplinären Projekt - um Validität und die die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten - wurden die von den Autoren eingereichten Teilberichte vor deren Integration in den Gesamtreport einem anonymen externen *peer review* Verfahren unterworfen.

7.2 Keine kognitiven Effekte bei kurzem Exposition-Wechsel

Das ATHEM-3 Projekt zielte eigentlich auf mögliche Wirkungen der Langzeit-Exposition. Um für HRV-Messungen unter Tags eine Phase mit vergleichbareren Aktivitäts-Level zu haben, wurde an zwei Wochenenden mit den freiwilligen Probanden beider Gruppen Konzentrationstests nach kurzer Abschirmung der Exposition durchgeführt. Die Testintervalle mit HF-EMF Exposition oder mit akuter Abschirmung dauerten jeweils 30 oder 60 Minuten.

Bei dieser Intervall-Länge fanden sich keine signifikanten Unterschiede zwischen abgeschirmt oder exponiert (siehe Teilbericht B).

Bei der parallelen HRV Analyse zeigte sich während der Ruhephasen und während der 5-minütigen Konzentrationstests ein Abfolge-Effekt von Intervall 1 bis 4 (4 x 30 Minuten-Intervalle = 2 Stunden Gesamtzeit).

Eine Betrachtung der Altersgruppen erbrachte Hinweise, dass unter HF-EMF Exposition die Vagus-Aktivität bei jüngeren Personen (< 45 Jahre) abnimmt. Diese Befunde waren aber nur grenzwertig statistisch signifikant, könnten also zufällig signifikant sein (statistischer Typ-1-Fehler). Es würde eine Studie mit mehr Teilnehmern brauchen, um bezüglich der beobachteten Alters-Abhängigkeit belastbare Angaben machen zu können.

7.3 Physiologische Effekte, autonome Nachtruhe-Erholung

Tagsüber waren die HRV-Parameter zwischen den Personen mit hoher oder niedriger Exposition (Gruppe V, Gruppe C) kaum unterschiedlich.

Wenn aber der menschliche Organismus sich auf „Nachtruhe“ einstellt, so zeigen die HRV-Parameter, die der Parasympathikus-Aktivität (Erholungsfunktion) zurechenbar sind, unerwünschte Effekte der Exposition mit HF-EMF. Bei den signifikanten Parametern, aber auch jenen, die einen statistischen Trend ergaben ($0,1 > P > 0,05$), liegt die Effektstärke im oberen Bereich (Teilbericht HRV, Abschnitt 5.3, Tabelle 5-7). Der Befund, dass während der Nachtruhe schon eine geringe, aber überdurchschnittliche Exposition die Erholungsfunktion des Schlafes beeinträchtigt, verdiente es, in einer größeren Studie abgeklärt zu werden. Auch bräuchte es eine größere Untersuchungsreihe, um die Hinweise auf die beeinträchtigte Schlaf-Erholung je nach Altersklasse systematisch zu untersuchen.

7.4 Genom – Instabilität, zelluläre Effekte

Die Freiwilligen spendeten 12 ml Blut für Labor-Analysen zur Bestimmung von 1.) oxidativem Stress, 2.) akuten DNA-Schäden bzw. deren Reparatur-Aktivität, und 3.) so genannten Kleinkerntests. Hierbei zeigten sich keine besonderen Gruppen-Unterschiede. Anders verhielt es sich bei den 4.) Chromosomenschäden, also DNA-Schäden, die von der Zelle nicht mehr repariert werden können. Chromosomenschäden sind ein typischer Biomarker im Zusammenhang mit der Schädigung von ionisierender Strahlung. Es gibt international nur wenig Befunde, die Chromosomenschäden im Zusammenhang mit HF-EMF-Exposition untersuchten.

Bei Kurzzeit-Expositionen mit HF-EMF und Verfahren, die sich an Untersuchungen von ionisierenden Strahlen orientieren, sind aufgrund des geringen Energieeintrags keine besonderen direkten Expositions-Schäden zu erwarten. Berücksichtigt man allerdings, dass Chromosomenschäden akkumulieren, um nach Jahren sichtbar zu werden, so ergibt sich der Befund in den Zelluntersuchungen (Abschnitt 6) als Folge der jahrelangen Akkumulation geringer Schadraten, die unter anderen bekannten Ursachen von der Exposition mit HF-EMF herrühren.

In anderen Worten: Die beobachteten Chromosomenschäden erklären sich, weil Schäden, die bei Kurzzeit-Betrachtung unter der Wahrnehmungsschwelle der wissenschaftlichen Tests bleiben, über die Jahre akkumulieren können, bis deren Anhäufung die Messschwelle eines Bluttests (Chromosomenanalyse) übersteigt, und eine Höhe jenseits biologisch begründeter Grenzwerte erreicht (siehe Abschnitt 9).

7.4.1 Oxidativer Mechanismus

So genannte Freie Radikale haben eine wichtige Rolle bei der Wirkung von 1) ionisierender Strahlung, 2) bei der Wirkung vieler Chemotherapeutika, aber auch 3) bei a-thermischen Wirkungen der HF-EMF Exposition (Yakymenko et al., 2016). Während ionisierende Strahlung oder Chemotherapeutika unmittelbar zytotoxisch sein können, ist der Mechanismus bei HF-EMF Exposition langsamer. Exposition mit HF-EMF kann zu oxidativem Zell-Stress und oxidativen DNA-Läsionen führen. Das aktiviert die zelluläre DNA-Reparatur, in deren Folge - selten aber doch - Mutationen und Chromosomenschäden entstehen, ein in den toxikologischen Wissenschaften lange bekannter Risikofaktor (Gregus, 2013).

7.4.2 Unterschiedliche Zell-Typen sind unterschiedlich robust

Der weitaus am häufigsten untersuchte Zelltyp im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung und auch mit nicht ionisierender Strahlung sind „Lymphozyten“ nach Kurzzeitexposition im Labor (Vijayalaxmi et al., 1997; Vijayalaxmi et al., 2001b; Vijayalaxmi et al., 2001c; McNamee et al., 2002a; McNamee et al., 2002b; Tice et al., 2002; Zeni et al., 2005; Stronati et al., 2006; Vijayalaxmi, 2006; Zeni et al., 2008). In Übereinstimmung mit international publizierten Befunden zeigten auch im EU-REFLEX Projekt und ATHEM-1 Projekt Lymphozyten bei Kurzzeitexposition (im Stundenbereich) konsistent keine HF-EMF Expositions-assoziierten DNA-Brüche. Lymphozyten verhalten sich gegenüber HF-EMF Exposition eher robust (Vijayalaxmi et al., 2001a; Vijayalaxmi, 2006; Schwarz et al., 2008). Im ATHEM-3 Projekt geschah die Exposition nicht im Labor, sondern unter Alltagsbedingungen. Die Expositions-Intensität war wesentlich niedriger, aber die Expositions-Zeit waren nicht Stunden oder Tage, sondern ging über Jahre.

Nach Ende einer kurzen aber wirksamen Exposition im Labor benötigt eine Zelle ca. 2 Stunden, um DNA Brüche oder Proteinveränderungen zurückzubauen (Franzellitti et al., 2010; Gerner et al., 2010; Al-Serori et al., 2018).

Die nun vorliegenden Daten aus den ATHEM-3-Teilprojekt „D“ (Abschnitt 6) weisen darauf hin, dass nach Langzeitexposition von Menschen selbst bei den sonst eher robusten menschlichen Lymphocyten DNA-Schäden auftreten. Dies erklärt sich, wenn Expositionsbedingte geringe Schäden sich über die Jahre ansammeln um dann sichtbar zu werden.

7.5 Was bedeuten die Befunde?

Bei den Kurzzeit-Interventionen (30 & 60 Minuten) waren keine Effekte der Exposition beobachtbar (Abschnitt 4 und 5). Allerdings, wenn die Exposition mit HF-EMF länger besteht, wurden bei den Anrainern in der Gruppe (V, mit überdurchschnittlich hoher Exposition) für Gesundheit und Wohlbefinden relevante Risiken festgestellt (Abschnitt 5 und 6).

Die Befunde bezüglich des autonomen Nervensystem unter HF-EMF-Exposition, weisen - vorbehaltlich der Rolle unbekannter Einflussfaktoren - direkt auf eine Herabsetzung der Erholungsfunktion der Tiefschlafphasen und auf eine verlangsamte Bewältigung entzündlicher Vorgänge im Körper (siehe Abschnitt 5.4.4).

Die geringere Vagus-Aktivität während der Nachtstunden (Abschnitt 5) wurde in der exponierten Gruppe beobachtet. Die relativ hohe Exposition bestand über Jahre und war auch in der Messnacht gegeben. Dies spricht dafür, dass sich bei exponierten Personen auch über die Jahre keine Gewöhnung einstellte.

Es ist bekannt, dass durch HF-EMF Exposition entstandene DNA-Läsionen von der Zelle repariert werden können (Gerner et al., 2010; Al-Serori et al., 2017), aber wenn sich irreparable Schäden ansammeln, häufen sich Risikoindikatoren (Marquardt, 1997; Younes, 1997; Efferth and Kaina, 2008) wie die im Teilprojekt "Genom" (Abschnitt 6) gefunden Chromosomenbefunde. Die nach Jahren vorliegenden Chromosomen-Aberrationen sind ein Hinweis dahingehend, dass Folgen kurzer Expositionen nicht wieder (völlig) abgebaut werden, sondern über die Zeit akkumulieren, um nach Jahren messbar zu werden. Auch stellen die Befunde zu den Chromosomenaberrationen unter HF-EMF Exposition eine

unabhängige Replikation von Untersuchungen dar, die Schäden am Genom menschlichen Genom beschrieben (Garaj-Vrhovac et al., 1992).

Die beobachteten Chromosomenveränderungen in der relativ hoch exponierten Freiwilligen Gruppe stehen nicht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Kurzzeitexpositionen bei denen nur geringe oder keine signifikanten Chromosomenschäden beobachtet wurden.

Bei chronischen Reizen (über Monate und Jahre hinweg) sind „Gewöhnungseffekte“ denkbar, wie beispielweise bei Neurotransmitter-Veränderungen beschrieben (Buchner and Eger, 2011). Auch ist bekannt, dass HF-EMF-Exposition in den Zellen einen "*adaptive response*" hervorrufen kann (Zeni et al., 2012; Vijayalaxmi et al., 2014). Allerdings, angesichts des beobachteten Schlafverhaltens (Teilprojekt C, Abschnitt 5) und der Chromosomenveränderungen in der Gruppe mit überdurchschnittlich hoher HF-EMF Exposition (Teilprojekt D, Abschnitt 6) muss bei unseren Probanden in der höher Exponierten Gruppe V die Frage nach einer Gewöhnung nach Jahren eher verneint werden.

8 Was meint "Dosis"? Intensität, Zeit oder beides zusammen

Besonders die gefundenen Chromosomenveränderungen (Teilprojekt "D", Abschnitt 6) sind ein stimmiger Hinweis, dass bei HF-EMF Exposition nicht allein die Intensität, sondern auch die Einwirkzeit eine wesentliche Rolle spielt. Die Gesamtdosis – also das Produkt aus der Intensität der eingestrahlten HF-EMF und der Zeit – und deren Zusammenhang mit der biologischen Wirkung ist jedoch nicht immer linear. Bei längerer Expositionsdauer kann die Exposition biologische Reaktionen bewirken, die nach kurzer Zeit nicht sichtbar sind. Unter Laborbedingungen ist gezeigt, diese können bei einer Steigerung der Intensität paradoxerweise abnehmen, um dann bei weiterer Steigerung wieder anzusteigen (Al-Serori et al., 2017). Manchmal wird ein Wirkplateau erreicht, d.h. die Wirkung bleibt trotz weiterer Dosissteigerung gleichbleibend, wie im Zusammenhang mit HF-EMF-expositionsbedingt permanenten DNA-Schäden gezeigt (Schwarz et al., 2008). Derartig - vordergründig - unlogisch wirkende Dosis- Wirkungsbeziehungen sind in den biologischen Wissenschaften bekannt. In solchen Fällen begegnet man Sicherheitsbedenken nicht mit Grenzwert-Anpassungen, sondern organisatorischen Präventionsmaßnahmen.

9 Befunde in Bezug auf Schutz-Grenzwerte

Oft werden HF-EMF Expositionen mit elektromagnetischen Feldern durch Richtlinien – herausgegeben von der International Commission for Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) – begrenzt. Die ICNIRP Richtlinie (ICNIRP, 2020) schützt vor HF-EMF im Bereich von 100 kHz bis 300 GHz, führt aber Einschränkungen an. Die Grenzwert-Empfehlungen der ICNIRP stützen sich wesentlich auf den expositionsbedingten Temperaturanstieg im exponierten Gewebe oder Körper, weil "eine Reihe von gesundheitlichen Auswirkungen auftreten können, wenn die Körperkerntemperatur um mehr als etwa 1°C ansteigt". Ein Temperaturanstieg um 1°C bedeutet per se keine gesundheitsschädliche Wirkung oder erwiesene Krankheit. Die Berücksichtigung ist aber eine bewährte Vorgangsweise zur Begrenzung von Wärmeschäden.

Das Prinzip "Schutz vor übermäßiger Erwärmung" durch physikalische Messungen, ist aber besonders im Zusammenhang mit Langzeitexposition umstritten (ICBE-EMF, 2022).

Redmayne and Maisch (2023) halten fest: "Viele wichtige Quellen kommen zum Schluss, dass die Forschung unzureichend ist, um die Sicherheit auch unter dem Gesichtspunkt der Wärme zu gewährleisten".

Den beobachteten Chromosomenschäden in der Gruppe mit hoher HF-EMF-Exposition liegen keine Wärmewirkungen zu Grunde. Spezifische Chromosomenschäden bilden die Basis für die Bestimmung der biologischen Äquivalenzdosen, wie sie z.B. von der Internationalen Atom Energie Behörde (IAEA) zur Expositionsbegrenzung herangezogen werden. Die IAEA Grenzwerte können damit - im Unterschied zu den ICNIRP Empfehlungen - beides konkret abdecken: 1.) nicht thermische Effekte und 2.) Langzeit Effekte.

Die Methode mit der athermische Effekte wie Chromosomenschäden nach Langzeitexposition in die entsprechenden Strahlenschutzrichtlinien einfließen, wird in einer Veröffentlichung aus dem Jahr 1986 erläutert (IAEA, 1986):

"Die Chromosomenaberrationsanalyse ist als wertvolle Methode zur Dosisermittlung anerkannt, sie schließt eine Lücke in der Dosimetrietechnik. Sie kommt zur Anwendung, insbesondere wenn es Schwierigkeiten bei der Interpretation der Daten gibt, wie in Fällen, in denen Grund zur Annahme besteht, dass Personen, die keine Dosimeter tragen, Strahlung ausgesetzt waren. In Fällen von Entschädigungsansprüchen für Strahlenschäden, die nicht durch eindeutige dosimetrische Nachweise gestützt werden, oder in Fällen von Exposition während des gesamten Arbeitslebens einer Person.

Das koordinierte Forschungsprogramm zur Anwendung der Chromosomenaberrationsanalyse im Strahlenschutz wurde 1982 von der IAEO mit dem Ziel initiiert, die Anwendung der Chromosomenaberrationsanalyse zur Dosisbewertung als Ergänzung zur routinemäßigen physikalischen Dosimetrie zu fördern und auszuweiten. Die Ziele des Programms bestanden darin, die zuverlässigsten der bisher getesteten Techniken zu ermitteln und die praktischste standardisierte Methodik festzulegen, "

Gemäß IAEA entsprechen die in ATHEM-3 beobachteten chromosomalen Aberrationen der Äquivalenzdosis von 76,4 mSv (Millisievert) Strahlenexposition (IAEA, 1986; 2011) und liegen damit im oberen Bereich der erlaubten beruflichen Exposition (IAEA, 2018a). Weil der IAEA Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung (IAEA, 2018b) und gemäß gem. [§ 80 Abs. 1 \(deutsches\) Strahlenschutzgesetz](#)⁹ bei unter 1 mSv pro Jahr liegt (Abbildung 9-1), bedeutete die gefundene Äquivalenzdosis – selbst unter der konservativen Annahme einer 10 Jährigen Exposition - eine über 7,64-fach erhöhte Grenzwertüberschreitung.

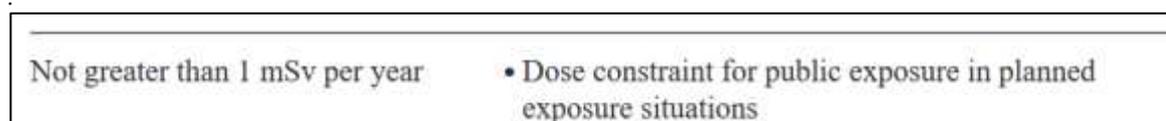


Abbildung 9-1: Faksimile-Auszug aus der IAEA Schutzrichtlinie für Allgemeinbevölkerung (IAEA, 2018b).

⁹ <https://www.gesetze-im-internet.de/strlsg/80.html>

10 Präventiver Strahlenschutz

Athermische Effekte sind biologische Reaktionen auf schwache HF-EMF Felder, deren Wärmewirkung keine besondere Rolle spielt. Beispiele dafür sind Veränderungen der Gehirnströme (Bise, 1978), Nervenfunktionen (Zuraulis et al., 2018; Meo et al., 2019), oder Zellstress, verursacht durch so genannte freie Radikale (Yakymenko et al., 2016).

Oxydativer Stress durch athermische HF-EMF Exposition führt zu Läsionen zellulärer Kernstrukturen (Franzellitti et al., 2010). DNA-Schäden in einer Zelle müssen nicht - können aber - genetisch determinierte Fehlsteuerungen nach sich ziehen. Beispiele für bleibende DNA-Schäden sind Mikronuklei (Tice et al., 2002) oder chromosomale Aberrationen (Singh et al., 1994).

Im Zusammenhang mit Mobilfunk Basisstationen wurden verschiedene gesundheitlich relevante Effekte beschrieben (Hutter et al., 2006; Oftedal et al., 2007; Buchner et al., 2014; Klaps et al., 2016). Allerdings, die wissenschaftliche Datenlage zu athermischen Wirkungen von HF-EMF erlaubt es nicht, einen Schwellenwert und/oder Grenzwert festzulegen. Weil aber niemand gerne auf den technologischen Fortschritt verzichtet, kann man in solchen Fällen Expositions-minimierende Strategien anwenden und bleibt trotz offener wissenschaftlicher Fragen handlungsfähig, ohne sich einem vermeidbaren Risiko auszusetzen. Im Falle von stationären Mobilfunk-Basisstationen kann man durch technische Maßnahmen im Sinne der Anwendung des Vorsorgeprinzips ein solches Gesundheits-Risiko reduzieren.

10.1 Technische Prävention

Im Hinblick auf mögliche Beeinträchtigungen durch HF-EMF kommt - wie bei jeder Form der Strahlung - die sogenannte „3A- Regel“ zur Anwendung. Die wichtigsten Schutz-Möglichkeiten sind: **Abstand, Aufenthalt, Abschirmung.**

Bei Mobiltelefon-Nutzern ist die Verwendung eines so genannten Headsets (Verbindungskabel zwischen Mobiltelefon und Ohrstecker samt Mikrophon) eine expositionsreduzierende Maßnahme.

Allerdings, bei fest installierten Expositions-Quellen in der Nachbarschaft ist es nicht möglich, den Abstand zu vergrößern, oder den Aufenthalt zu verkürzen. Es kann nur der Betreiber die Exposition der Umgebung verändern (reduzieren). Beispielsweise durch:

- Begrenzung der ausgestrahlten Leistung (EIRP), um gemäß dem ALARA/ALATA Prinzip, eine Begrenzung nicht auf das erlaubte, sondern auf das benötigte Maß vorzunehmen.
- Änderung/Optimierung der Hauptstrahlrichtung,
- Veränderung des Öffnungswinkels einer Antenne,
- Änderung des Antennengewinns,
- Änderung des Neigungswinkels und der Antennen Montagehöhe.

10.2 Vorsorgeprinzipien: ALARA und ALATA

Das in Europa bekannteste Vorsorgeprinzip ist das ALARA Prinzip (*As Low As Reasonable Achievable*). Das Europäische ALARA-Netzwerk ([EAN](#)¹⁰) zur Förderung der Umsetzung wurde 1996 gegründet. Das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz erklärt das ALARA Prinzip im Strahlenschutz wie folgt:

Das System des Strahlenschutzes beruht auf drei allgemeinen Grundsätzen.

1. Rechtfertigung
2. Dosisbegrenzung
3. Optimierung

Diese Grundsätze sind im **Strahlenschutzgesetz** rechtsverbindlich festgelegt:

Das Gebot der Optimierung bedeutet, dass die Strahlenexposition auch unterhalb der gesetzlich vorgegebenen Grenzwerte oder Richtwerte zu reduzieren ist. Gesellschaftliche und ökonomische Faktoren sind dabei zu berücksichtigen. Dieses Optimierungsgebot wird international als ALARA ("As Low As Reasonably Achievable") bezeichnet.

Abbildung 10-1: Information des deutschen Bundesamtes für Strahlenschutz. Auskunft zur Rechtsverbindlichkeit des Gebotes die Exposition auch unterhalb der Grenzwerte zu reduzieren.
<https://www.bfs.de/SharedDocs/FAQs/BfS/DE/ion/ion/alara.html>
(letzter Zugriff am 19.01.2024)

Dem ALARA Prinzip sehr ähnlich ist das so genannte ALATA Prinzip (*As Low As Technically Achievable*). Beide, ALARA und ALATA, zielen auf die Expositions-Minimierung, sei es durch organisatorische oder schwerpunktmäßig technische Maßnahmen.

Im Kontext mit Mobilfunk scheidet die Umsetzung solcher EU-Standard-Prinzipien manchmal daran, dass die Mobilfunk-Betreiber in der Anwendung oder Umsetzung keinen direkten Nutzen sehen.

Um bei Bauwerken und installierten Antennen die Sichtweisen beider, der Antennenbetreiber und jene der exponierten Anrainer, einfließen zu lassen, wurde in Österreich der LSB (Leitfaden Senderbau) entwickelt.¹¹ Der LSB ist eine Leitlinie, die ALARA und ALATA Prinzipien im Sinne eines sozial- und umweltverträglichen Baus und Betriebs von Antennenanlagen umsetzt (Abschnitt 11.1).

¹⁰ <https://www.eu-alara.net/>

¹¹ [Leitfaden Senderbau, 2. Auflage.](#)

[Herausgeber: Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt – PDF Wirtschaftskammer Österreich, PDF Download.](#)

11 Ausblick

Angesichts des internationalen Forschungsstandes und der aktuellen Befunde ergibt sich die Frage nach Alternativen zur bisher gängigen Praxis.

11.1 Beispiel für sozial- und umweltverträglichen Netzausbau

Für die Entwicklung des österreichischen Leitfaden Senderbau (LSB) arbeiteten Vertreter der österr. Arbeiterkammer, der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA), der Wirtschaftskammer-Bundesinnung der Elektro-, Gebäude-, Alarm- und Kommunikationstechniker sowie Vertretern der Wiener Umwelthanwaltschaft mit Wissenschaftlern der Medizinischen Universität Wien zusammen. Der LSB wird mitgetragen von der österreichischen Ärztekammer.

Der originale Leitfaden Senderbau und die zweite Auflage zielt im Falle der Errichtung oder des Umbaus einer Antennenanlage auf Konsens zwischen den typischerweise privatrechtlich organisierten Anlagen-Errichtern und den - das Risiko erduldenen - Anrainern. Jeder Errichtungsprozess ist standortspezifisch. Wenn eine Funkanlage im Wohngebiet errichtet oder umgebaut werden soll, kann der LSB den Prozess mittels strukturierten Dialog zwischen Behörden, Anrainern und Betreibern begleiten. Der LSB ist abrufbar unter folgender Web-Adressen:

- [Ärztinnen und Ärzte für eine gesunde Umwelt – PDF](#)
- [Wirtschaftskammer Österreich, PDF Download](#)

11.2 Kooperation der Mobilfunkanbieter senkt die Exposition

Typischerweise betreibt jeder Mobilfunkanbieter ein eigenes Netz mit eigener Infrastruktur (Basisstationen). Ein Kunde kommt nur über Basisstationen des eigenen Anbieters ins Netz. Steht die nächste geeignete Basisstation entfernt, steigt automatisch die Sendeleistung von Basisstation und Mobiltelefon. Lässt sich die Entfernung nicht überbrücken, reißt die Verbindung ab, man spricht von einem "Funkloch".

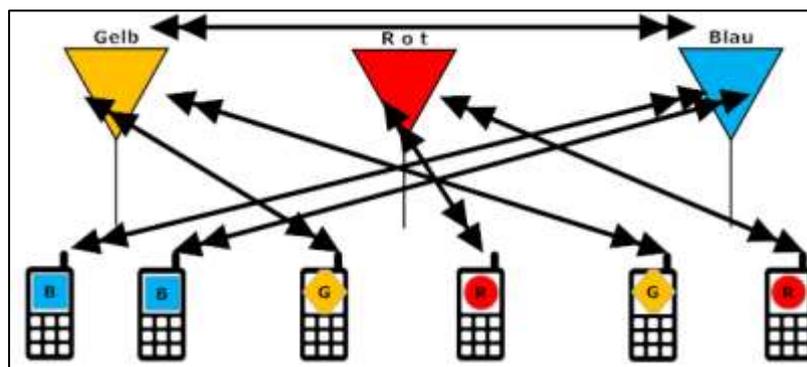


Abbildung 11-1: Mobilfunk OHNE Kooperation der Betreiber.

Drei Basisstationen der Mobilfunkanbieter Gelb, Rot und Blau mit je zwei Endgeräten (Mobiltelefone). Je nach Abstand des Nutzers zur nächsten „eigenen“ Basisstation wird die Funkleistung hoch reguliert um die Distanz zu überwinden. Der Batterieverbrauch steigt an, die Exposition der Anrainer und des Handynutzers ist erhöht.

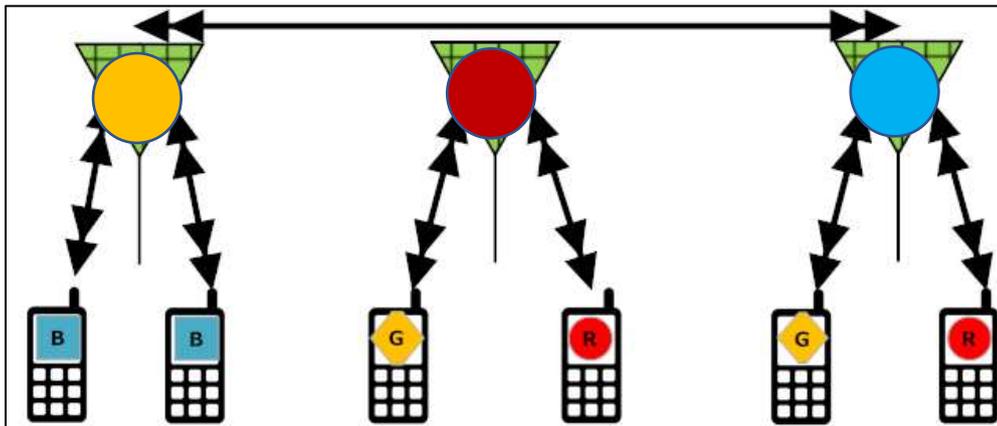


Abbildung 11-2: Mobilfunk MIT Kooperation der Betreiber.

Bei gemeinsamer Infrastruktur-Nutzung sucht sich jedes Mobiltelefon automatisch die nächstgelegene Basisstation. Das verkürzt Verbindungswege und reduziert die Strahlenbelastung von Anrainern und Telefon-Nutzern.

Dass jeder Anbieter eine eigene Infrastruktur betreibt, ist ein Merkmal der Mobilfunk-Anbieter. Kein Autohersteller baut ein Straßennetz nur für Autos der eigenen Marke, kein privater Stromerzeuger versorgt die Kunden über ein eigenes Stromnetz, kein Pharmakonzern betreibt Apotheken für nur eigene Produkte.

Innerhalb der Staatsgrenzen könnte ein gemeinsam genutztes Funknetz Funklöcher schließen, den Batterieverbrauch reduzieren, die Verbindungsqualität heben und gleichzeitig die Exposition der Bevölkerung mit HF-EMF reduzieren.

Eine weitere Präventionsempfehlung die sich auch aus dem vorliegenden Projekt ergibt, kann jeder bei sich zu Hause umsetzen, nämlich die IT-Infrastruktur als Kabel-gebunden und/oder LiFi basiert einzurichten, so wie es sich auch aus einer Feldstudie in St.Gallen (Schweiz) ergibt. Nach einer groß angelegten Untersuchung zur Mobilfunkversorgung der St.Galler Innenstadt mit Kleinzellen empfiehlt die Stadt für den Innenraum "den Datentransfer prioritär über die kabelgebundene Infrastruktur abzuwickeln"¹².

Angesichts der Entwicklung von Technologien die auf Lichtfrequenzen als leistungsstarken Informationsträger setzen, bietet sich an im Wohn- und Bürobereich (indoor) lichtbasierte Netzwerke zu schaffen. Dies erhöht die Leistung und senkt die Exposition mit HF-EMF. Man kann im Wohnbereich beispielsweise polymer optische Lichtleiter (POF-Kabel) entlang der vorhandenen Unterputz-Stromleitungen verlegen, besonders wenn ein geschirmtes Kupferkabel dort keinen Platz mehr hätte (mehr dazu im Abschnitt 11.3).

¹² https://www.stadt.sg.ch/news/stsg_medienmitteilungen/2020/07/kleinzellen.html,

11.3 Datenübertragung mit Lichtfrequenzen

Derzeit noch stammen HF-EMF Immissionen im Wohnbereich typischerweise von 1.) externen Funkdiensten (Mobilfunksignale) und 2.) hausgemachten HF-EMF (z.B. W-LAN). Expositionsminimierende Maßnahmen sollten immer beide Immissionsarten betrachten.

Der Einsatz von Licht-Wellen zur Übertragung digitaler Informationen kann im Haus externe Mobilfunksignale und funkbasierte W-LAN Router ablösen. Erste Li-Fi-Systeme (Light-Fidelity) sind am Markt und sind hinsichtlich Übertragungsleistung, Abhörsicherheit und Gesundheitsbedenken HF-EMF basierten Funkanwendungen überlegen. Licht-Frequenzen durchdringen nicht oder kaum die Haut, um im Körper biologische Reaktionen auszulösen. Anders als bei HF-EMF, hat sich der menschliche Organismus im Zuge der Evolution an Licht angepasst.

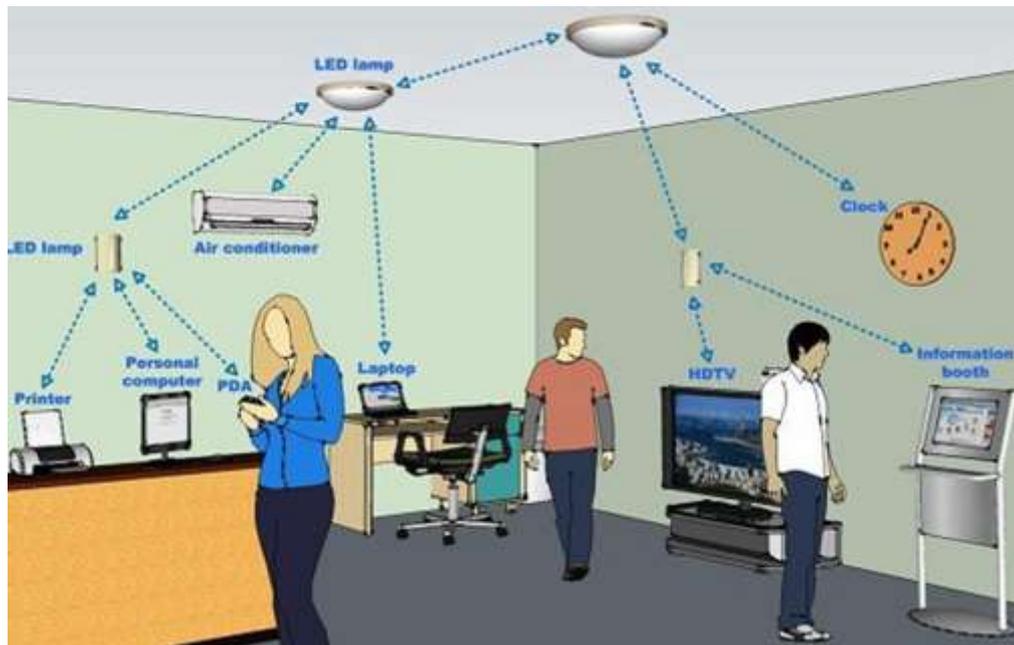


Abbildung 11-3, Schema einer indoor komplex vernetzten LiFi-Kommunikation; Accesspoints (Router) senden einen Lichtkegel, die End-Geräte am Schreibtisch sind beispielsweise über einen USB-Licht-Stick verbunden. Innerhalb des Lichtkegels ist die Datenübertragung wesentlich leistungsfähiger als mit HF-EMF. Es erfolgt keine Exposition mit HF-EMF.

Quelle: Kühling, W. (2023)¹³ -

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Li-Fi.jpg&oldid=677426717>.

Noch vor kurzem war die Verbindung von optischen Lichtleitern lediglich Spezialisten vorbehalten. Inzwischen verstehen versierte Hauselektriker, die Verlegung von Glasfaserleitungen oder POF-Kabeln (Polymer Optic Fiber). Man kann POF-Kabel entlang bestehender Stromleitungen einziehen. Lichtleiter sind "immun" gegen elektromagnetische Störfelder. Licht-Signale anstatt HF-EMF-Signale im Haus steigern die Netzqualität, die Exposition mit HF-EMF entfällt.

¹³ Kühling, W. (2023): Bewertungsdilemma Mobilfunk – Wie wir das Unvermögen staatlicher Risikobewertung endlich überwinden. Metropolis, Marburg. [ISBN 978-3-7316-1544-6]. S. 144

12 Verzeichnisse

12.1 Im Allgemeinteil zitierte Literatur

- Abdel-Rassoul, G., El-Fateh, O.A., Salem, M.A., et al. (2007). Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology* 28: pp. 434-440; Doi:10.1016/j.neuro.2006.07.012.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16962663>.
- Al-Serori, H., Ferk, F., Kundi, M., et al. (2018). Mobile phone specific electromagnetic fields induce transient DNA damage and nucleotide excision repair in serum-deprived human glioblastoma cells. *PLoS One* 13: pp. e0193677; Doi:10.1371/journal.pone.0193677.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29649215>.
- Al-Serori, H., Kundi, M., Ferk, F., et al. (2017). Evaluation of the potential of mobile phone specific electromagnetic fields (UMTS) to produce micronuclei in human glioblastoma cell lines. *Toxicol In Vitro* 40: pp. 264-271; Doi:10.1016/j.tiv.2017.01.012.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28126644>.
- Amirian, I. (2014). The impact of sleep deprivation on surgeons' performance during night shifts. *Danish medical journal* 61: pp. B4912-B4912; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25186549>.
- Andrzejak, R., Poreba, R., Poreba, M., et al. (2008). The Influence of the Call with a Mobile Phone on Heart Rate Variability Parameters in Healthy Volunteers. *Industrial Health* 46: pp. 409-417.
- Augner, C., Hacker, G.W., Oberfeld, G., et al. (2010). Effects of exposure to GSM mobile phone base station signals on salivary cortisol, alpha-amylase, and immunoglobulin A. *Biomed Environ Sci* 23: pp. 199-207; Doi:10.1016/s0895-3988(10)60053-0. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20708499>.
- Baan, R., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., et al. (2011). Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *Lancet Oncol* 12: pp. 624-626; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21845765>.
- Baohong, W., Jiliang, H., Lifan, J., et al. (2005). Studying the synergistic damage effects induced by 1.8 GHz radiofrequency field radiation (RFR) with four chemical mutagens on human lymphocyte DNA using comet assay in vitro. *Mutat.Res.* 578: pp. 149-157; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15935405>.
- Belyaev, I., Dean, A., Eger, H., et al. (2016). EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health* 31: pp. 363-397; Doi:10.1515/reveh-2016-0011. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27454111>.
- Belyaev, I.Y. (2010). Radiation-induced DNA repair foci: spatio-temporal aspects of formation, application for assessment of radiosensitivity and biological dosimetry. *Mutat Res* 704: pp. 132-141; Doi:10.1016/j.mrrev.2010.01.011. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20096808>.
- Berger, R.D., Akselrod, S., Gordon, D., and Cohen, R.J. (1986). An Efficient Algorithm for Spectral Analysis of Heart Rate Variability. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 33: pp. 900-904; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3759126>.

- Bettermann, H., Amponsah, H., Cysarz, D., and Van Leeuwen, P. (1999). Musical rhythms in heart period dynamics - A cross-cultural and interdisciplinary approach to cardiac rhythms. *Am J Physiol* 277: pp. H1762-H1770; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10564129>.
- Bettermann, H., Engelke, P., van Leeuwen, P., and Heckmann, C. (1996). Die Bestimmung der Atemfrequenz aus der respiratorischen Sinusarrhythmie (RSA). *Biomed Tech Berl* 41: pp. 319-323.
- Bise, W. (1978). Low power radio-frequency and microwave effects on human electroencephalogram and behavior. *Physiol.Chem.Physics* 10: pp. 387-398; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/751078>.
- Buchner, K., and Eger, H. (2011). Veränderung klinisch bedeutsamer Neurotransmitter unter dem Einfluss modulierter hochfrequenter Felder - Eine Langzeiterhebung unter lebensnahen Bedingungen. *Umwelt · Medizin · Gesellschaft* 24: pp. 44-57; <https://www.emf-portal.org/en/article/19075>.
- Buchner, K., Eger, H., and Hopper, J. (2014). Reduzierte Fruchtbarkeit und vermehrte Missbildungen unter Mobilfunkstrahlung - Dokumentation aus einem landwirtschaftlichen Nutzbetrieb. . *Umwelt Medizin Gesellschaft* 27: pp. 182-191; <https://www.mobilfunk-oberfranken.de/download/buchner-eger-hopper-2014-umg.pdf>.
- Cam, S.T., and Seyhan, N. (2012). Single-strand DNA breaks in human hair root cells exposed to mobile phone radiation. *Int J Radiat Biol* 88: pp. 420-424; Doi:10.3109/09553002.2012.666005 [doi]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22348707>.
- Chavdoula, E.D., Panagopoulos, D.J., and Margaritis, L.H. (2010). Comparison of biological effects between continuous and intermittent exposure to GSM-900-MHz mobile phone radiation: Detection of apoptotic cell-death features. *Mutat Res* 700: pp. 51-61; Doi:10.1016/j.mrgentox.2010.05.008. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20472095>.
- Cowell, W.J., Brunst, K.J., Malin, A.J., et al. (2019). Prenatal Exposure to PM2.5 and Cardiac Vagal Tone during Infancy: Findings from a Multiethnic Birth Cohort. *Environ Health Perspect* 127: pp. 107007; Doi:10.1289/ehp4434. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31663780>.
- Diem, E., Schwarz, C., Adlkofer, F., Jahn, O., and Rüdiger, H. (2005). Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800 MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat.Res.* 583: pp. 178-183; Doi:10.1016/j.mrgentox.2005.03.006. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15869902>.
- Eaton, D.L., and Gilbert, S.G. (2013). "Principles of Toxicology," in *Casarets and Doull's Toxicology, The Basic Science of Poisons* ed. C.D. Klaassen 8 ed (New York, Chicago, San Fransisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Dehli, San Juan, Singapore, Sydney, Toronto: Mc Graw-Hill Education), pp. 13-48.
- Efferth, T., and Kaina, B. (2008). "Cancer Development," in *Toxicology and Risk Assessment, A comprehensible introduction*, eds. H. Greim & R. Synder (Chichester, West Sussex, England: John wiley & Sons, Ltd), pp. 164.
- Ekici, B., Tanındı, A., Ekici, G., and Diker, E. (2016). The effects of the duration of mobile phone use on heart rate variability parameters in healthy subjects. *Anatol J Cardiol* 16: pp. 833-838; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27109242>.

- Falcioni, L., Bua, L., Tibaldi, E., et al. (2018). Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ Res* 165: pp. 496-503; Doi:10.1016/j.envres.2018.01.037.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29530389>.
- Fatt, S.J., Beilharz, J.E., Joubert, M., et al. (2020). Parasympathetic activity is reduced during slow-wave sleep, but not resting wakefulness, in patients with chronic fatigue syndrome. *J Clin Sleep Med* 16: pp. 19-28; Doi:10.5664/jcsm.8114.
- Franzellitti, S., Valbonesi, P., Ciancaglini, N., et al. (2010). Transient DNA damage induced by high-frequency electromagnetic fields (GSM 1.8GHz) in the human trophoblast HTR-8/SVneo cell line evaluated with the alkaline comet assay. *Mutat Res* 683: pp. 35-42; Doi:10.1016/j.mrfmmm.2009.10.004.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19822160/>.
- Garaj-Vrhovac, V., Fucic, A., and 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: pp. 181-186.
- Gerner, C., Haudek, V., Schandl, U., et al. (2010). Increased protein synthesis by cells exposed to a 1,800-MHz radio-frequency mobile phone electromagnetic field, detected by proteome profiling. *Int Arch Occup Environ Health* 83: pp. 691-702; Doi:10.1007/s00420-010-0513-7.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20145945>.
- Gold, D.R., Litonjua, A., Schwartz, J., et al. (2000). Ambient pollution and heart rate variability. *Circulation* 101: pp. 1267-1273; Doi:10.1161/01.cir.101.11.1267.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10725286>.
- Gregus, Z. (2013). "Mechanisms of Toxicology " in *Casarett and Doull's Toxicology - The basic science of poisons* ed. C.D. Klaassen 8 ed (New York ... Toronto: Mc Graw Hill Education), pp. 105-108.
- Grote, V. (2010). *Schlaferholung und Herzratenvariabilität als Indikatoren für Wohlbefinden und Gesundheit*. Dissertation, Universität Graz Graz.
- Grote, V., Frühwirth, M., Lackner, H.K., et al. (2021). Cardiorespiratory Interaction and Autonomic Sleep Quality Improve during Sleep in Beds Made from Pinus cembra (Stone Pine) Solid Wood. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18: pp. 9748; Doi:10.3390/ijerph18189749.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34574675>.
- Grote, V., Levnajic, Z., Puff, H., et al. (2019). Dynamics of Vagal Activity Due to Surgery and Subsequent Rehabilitation. *Front Neurosci* 13: pp. 1116; Doi:10.3389/fnins.2019.01116.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31827417>.
- Guo, Q.N., Wang, J., Liu, H.Y., Wu, D., and Liao, S.X. (2022). Nicotine Ingestion Reduces Heart Rate Variability in Young Healthy Adults. *Biomed Res Int* 2022: pp. 4286621; Doi:10.1155/2022/4286621.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35028314>.
- Guxens, M., Vermeulen, R., van Eijsden, M., et al. (2016). Outdoor and indoor sources of residential radiofrequency electromagnetic fields, personal cell phone and cordless phone use, and cognitive function in 5-6 years old children. *Environ Res*

- 150: pp. 364-374; Doi:10.1016/j.envres.2016.06.021.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27348251>.
- Hildebrandt, G., Moser, M., and Lehofer, M. (1998). *Chronobiologie und Chronomedizin. Hippokrates*: Stuttgart.
- Hobi, V. (1985). "Basler Befindlichkeits-Skala. Ein Self-Rating zur Verlaufsmessung der Befindlichkeit." (Weinheim: Beltz Test
- Hutter, H.P., Moshhammer, H., Wallner, P., and Kundi, M. (2006). Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occup Environ Med* 63: pp. 307-313; Doi:10.1136/oem.2005.020784.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2092490/>.
- IAEA (1986). "Biological Dosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose Assessment", *Technical Reports Series* Technical Reports Series No. 260 Vienna IAEA - International Atomic Energy Agency
<https://www.iaea.org/publications/1362/biological-dosimetry-chromosomal-aberration-analysis-for-dose-assessment>.
- IAEA (2011). "Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies", *IAEA Safety Standards and related Publications* IAEA Safety Standards and related Publications No. Vienna International Atomic Energy Agency https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR-Biodosimetry%202011_web.pdf.
- IAEA (2018a). *Occupational Radiation Protection. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY*: Vienna <https://www.iaea.org/publications/11113/occupational-radiation-protection>.
- IAEA (2018b). "Radiation protection of the public and the environment ", *IAEA safety standards series*; IAEA safety standards series No. SSG-8 Vienna IAEA - International Atomic Energy Agency https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1781_web.pdf.
- ICBE-EMF (2022). International Commission on the Biological Effects of Electromagnetic, Fields; Scientific evidence invalidates health assumptions underlying the FCC and ICNIRP exposure limit determinations for radiofrequency radiation: implications for 5G. *Environ Health* 21: pp. 92; Doi:10.1186/s12940-022-00900-9.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36253855>.
- ICNIRP (2020). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys* 118: pp. 483-524; Doi:10.1097/hp.0000000000001210.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32167495>.
- Karita, K., Iwata, T., Maeda, E., Sakamoto, M., and Murata, K. (2018). Assessment of Cardiac Autonomic Function in Relation to Methylmercury Neurotoxicity. *Toxics* 6: Doi:10.3390/toxics6030038.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30036985>.
- Kesari, K.K., Behari, J., and Kumar, S. (2010). Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain. *Int J Radiat Biol* 86: pp. 334-343; Doi:10.3109/09553000903564059.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20353343/>.
- Klaps, A., Ponocny, I., Winker, R., Kundi, M., Auersperg, F., and Barth, A. (2016). Mobile phone base stations and well-being--A meta-analysis. *Sci Total Environ* 544: pp.

- 24-30; Doi:10.1016/j.scitotenv.2015.11.009.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26657246>.
- Kralemann, B., Frühwirth, M., Pikovskiy, A., et al. (2013). In vivo cardiac phase response curve elucidates human respiratory heart rate variability. *Nat Commun* 4: pp. 2418; Doi:10.1038/ncomms3418.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23995013>.
- Kulinski, J., Ofori, E.K., Visotcky, A., Smith, A., Sparapani, R., and Fleg, J.L. (2022). Effects of music on the cardiovascular system. *Trends Cardiovasc Med* 32: pp. 390-398; Doi:10.1016/j.tcm.2021.06.004.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34237410>.
- Kumar, S., Kesari, K.K., and Behari, J. (2010). Evaluation of genotoxic effects in male Wistar rats following microwave exposure. *Indian J Exp Biol* 48: pp. 586-592; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20882761>.
- La Rovere, M.T., and Christensen, J.H. (2015). The autonomic nervous system and cardiovascular disease: role of n-3 PUFAs. *Vascul Pharmacol* 71: pp. 1-10; Doi:10.1016/j.vph.2015.02.005.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25869497>.
- Lerchl, A., Klose, M., Grote, K., et al. (2015). Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochem Biophys Res Commun* 459: pp. 585-590; Doi:10.1016/j.bbrc.2015.02.151.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25749340>.
- Macartney, M.J., Ghodsian, M.M., Noel-Gough, B., McLennan, P.L., and Peoples, G.E. (2021). DHA-Rich Fish Oil Increases the Omega-3 Index in Healthy Adults and Slows Resting Heart Rate without Altering Cardiac Autonomic Reflex Modulation. *J Am Coll Nutr* pp. 1-9; Doi:10.1080/07315724.2021.1953417.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34379997>.
- Maes, A., Collier, M., Van Gorp, U., Vandoninck, S., and Verschaeve, L. (1997). Cytogenetic effects of 935.2-MHz (GSM) microwaves alone and in combination with mitomycin C. *Mutat.Res.* 393: pp. 151-156; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9357572>.
- Malek, F., Rani, K.A., Rahim, H.A., and Omar, M.H. (2015). Effect of Short-Term Mobile Phone Base Station Exposure on Cognitive Performance, Body Temperature, Heart Rate and Blood Pressure of Malaysians. *Sci Rep* 5: pp. 13206; Doi:10.1038/srep13206. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26286015>.
- Marquardt, H. (1997). "Chemical Cancerogenesis," in *Lehrbuch der Toxikologie*, eds. H. Marquardt & S.G. Schäfer (Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag), pp. 124-147.
- McNamee, J.P., Bellier, P.V., Gajda, G.B., et al. (2002a). DNA damage in human leukocytes after acute in vitro exposure to a 1.9 GHz pulse-modulated radiofrequency field. *Radiation Research* 158: pp. 534-537; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12236821>.
- McNamee, J.P., Bellier, P.V., Gajda, G.B., et al. (2002b). DNA damage and micronucleus induction in human leukocytes after acute in vitro exposure to a 1.9 GHz continuous-wave radiofrequency field. *Radiation Research* 158: pp. 523-533; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12236820>.

- Melnick, R.L. (2019). Commentary on the utility of the National Toxicology Program study on cell phone radiofrequency radiation data for assessing human health risks despite unfounded criticisms aimed at minimizing the findings of adverse health effects. *Environ Res* 168: pp. 1-6; Doi:10.1016/j.envres.2018.09.010. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30243215>.
- Meo, S.A., Almahmoud, M., Alsultan, Q., Alotaibi, N., Alnajashi, I., and Hajjar, W.M. (2019). Mobile Phone Base Station Tower Settings Adjacent to School Buildings: Impact on Students' Cognitive Health. *Am J Mens Health* 13: pp. 1557988318816914; Doi:10.1177/1557988318816914. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30526242>.
- Misek, J., Belyaev, I., Jakusova, V., Tonhajzerova, I., Barabas, J., and Jakus, J. (2018). Heart Rate Variability Affected by Radiofrequency Electromagnetic Field in Adolescent Students. *Bioelectromagnetics* 39: pp. 277-288.
- Misek, J., Veterník, M., Tonhajzerova, I., Jakusova, V., Janousek, L., and Jakus, J. (2020). Radiofrequency electromagnetic field affects heart rate variability in rabbits. *Physiol Res* 69: pp. 633-643; Doi:10.33549/physiolres.934425. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32672045>.
- Mojtabavi, H., Saghadzadeh, A., Valenti, V.E., and Rezaei, N. (2020). Can music influence cardiac autonomic system? A systematic review and narrative synthesis to evaluate its impact on heart rate variability. *Complement Ther Clin Pract* 39: pp. 101162; Doi:10.1016/j.ctcp.2020.101162. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32379689>.
- Molla-Djafari, H., Mosgoeller, W., Kundi, M., Tuschl, H., Gerner, C., and Schmid, G. (2010). "Band 47 Untersuchung athermischer Wirkungen elektromagnetischer Felder im Mobilfunkbereich", *AUVA Forschungsreports*; AUVA Forschungsreports No. Wien Allgemeine Unfallversicherungsanstalt AUVA <https://www.auva.at/cdscontent/?contentid=10007.672634&portal=auvportal&viewmode=content> (Feb 2020).
- Molla-Djafari, H., Schiessl, K., Schmid, G., Kundi, M., Knasmueller, S., and Mosgoeller, W. (2016). "Report 70, Athermal effects of electromagnetic field exposure associated with mobile communications", *AUVA Research Reports*; AUVA Research Reports No. Vienna Austrian Workers Compensation Board - AUVA <https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.642538&version=1499168711> (Feb 2020).
- Moser, M., Frühwirth, M., and Kenner, T. (2008). The Symphony of Life - Importance, Interaction and Visualization of Biological Rhythms. *IEEE Eng Med Biol Mag* 27: pp. 29-37; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18270048>.
- Moser, M., Frühwirth, M., Penter, R., and Winker, R. (2006). Why life oscillates - from a topographical towards a functional chronobiology. *Cancer Causes and Control* 17: pp. 591-599; <http://www.springerlink.com/content/m4826jm5216101h6/fulltext.pdf>.
- Moser, M., Lehofer, M., Sedminek, A., et al. (1994). Heart Rate Variability as a Prognostic Tool in Cardiology. *Circulation* 90: pp. 1078-1082; <http://circ.ahajournals.org/content/90/2/1078.full.pdf>.
- Nathan, C. (2002). Points of control in inflammation. *Nature* 420: pp. 846-852; Doi:10.1038/nature01320. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12490957>.

- Nunan, D., Sandercock, G.R., and Brodie, D.A. (2010). A Quantitative Systematic Review of Normal Values for Short-Term Heart Rate Variability in Healthy Adults. *Pace* 33: pp. 1407-1417; Doi:10.1111/j.1540-8159.2010.02841.x.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20663071>.
- Oftedal, G., Straume, A., Johnsson, A., and Stovner, L.J. (2007). Mobile phone headache: a double blind, sham-controlled provocation study. *Cephalalgia* 27: pp. 447-455;
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17359515>.
- Olofsson, P.S., Rosas-Ballina, M., Levine, Y.A., and Tracey, K.J. (2012). Rethinking inflammation: neural circuits in the regulation of immunity. *Immunol Rev* 248: pp. 188-204; Doi:10.1111/j.1600-065X.2012.01138.x.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22725962>.
- Park, B.J., Tsunetsugu, Y., Morikawa, T., et al. (2014). [Physiological and psychological effects of walking in stay-in forest therapy]. *Nihon Eiseigaku Zasshi* 69: pp. 98-103; Doi:10.1265/jjh.69.98. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24858504>.
- Pop, G.N., Christodorescu, R., Velimirovici, D.E., et al. (2021). Assessment of the Impact of Alcohol Consumption Patterns on Heart Rate Variability by Machine Learning in Healthy Young Adults. *Medicina (Kaunas)* 57: Doi:10.3390/medicina57090956.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34577879>.
- Redmayne, M., and Maisch, D.R. (2023). ICNIRP Guidelines' Exposure Assessment Method for 5G Millimetre Wave Radiation May Trigger Adverse Effects. *Int J Environ Res Public Health* 20: Doi:10.3390/ijerph20075267.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/37047882>.
- Regel, S.J., Negovetic, S., Rössli, M., et al. (2006). UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance. *Environ Health Perspect* 114: pp. 1270-1275; Doi:10.1289/ehp.8934. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16882538>.
- Rosas-Ballina, M., and Tracey, K.J. (2009). The neurology of the immune system: neural reflexes regulate immunity. *Neuron* 64: pp. 28-32; Doi:10.1016/j.neuron.2009.09.039.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19840545>.
- Schiltz, H.K., Fenning, R.M., Erath, S.A., and Baker, J.K. (2022). Parasympathetic functioning and sleep problems in children with autism spectrum disorder. *Autism Res* 15: pp. 2138-2148; Doi:10.1002/aur.2816.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36114684>.
- Schwarz, C., Kratochvil, E., Pilger, A., Kuster, N., Adlkofer, F., and Rudiger, H.W. (2008). Radiofrequency electromagnetic fields (UMTS, 1,950 MHz) induce genotoxic effects in vitro in human fibroblasts but not in lymphocytes. *Int.Arch.Occup.Environ.Health* 81: pp. 755-767;
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18278508>.
- Sevoz-Couche, C., and Laborde, S. (2022). Heart rate variability and slow-paced breathing: when coherence meets resonance. *Neurosci Biobehav Rev* 135: pp. 104576; Doi:10.1016/j.neubiorev.2022.104576.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35167847>.
- Shaffer, F., and Ginsberg, J.P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front Public Health* 5: pp. 258; Doi:10.3389/fpubh.2017.00258.
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29034226>.
- Singh, K., Nagaraj, A., Yousuf, A., Ganta, S., Pareek, S., and Vishnani, P. (2016). Effect of electromagnetic radiations from mobile phone base stations on general health

- and salivary function. *J Int Soc Prev Community Dent* 6: pp. 54-59; Doi:10.4103/2231-0762.175413. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27011934>.
- Singh, N., Rudra, N., Bansal, P., Mathur, R., Behari, J., and Nayar, U. (1994). Poly ADP ribosylation as a possible mechanism of microwave--biointeraction. *Indian J Physiol Pharmacol.* 38: pp. 181-184; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7814078/>.
- Somayaji, K., Frenkel, M., Tabaza, L., et al. (2022). Acute effects of singing on cardiovascular biomarkers. *Front Cardiovasc Med* 9: pp. 869104; Doi:10.3389/fcvm.2022.869104. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/35924212>.
- Stein, P.K., and Pu, Y. (2012). Heart rate variability, sleep and sleep disorders. *Sleep Medicine Reviews* 16: pp. 47-66; Doi:10.1016/j.smr.2011.02.005. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21658979>.
- Steinborn, M.B., Langner, R., Flehmig, H.C., and Huestegge, L. (2018). Methodology of performance scoring in the d2 sustained-attention test: Cumulative-reliability functions and practical guidelines. *Psychological Assessment* 30: pp. 339-357; Doi:10.1037/pas0000482. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28406669>.
- Stronati, L., Testa, A., Moquet, J., et al. (2006). 935 MHz cellular phone radiation. An in vitro study of genotoxicity in human lymphocytes. *Int.J.Radiat.Biol* 82: pp. 339-346; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16782651>.
- Suh, H.H., and Zanobetti, A. (2010). Exposure error masks the relationship between traffic-related air pollution and heart rate variability. *J Occup Environ Med* 52: pp. 685-692; Doi:10.1097/JOM.0b013e3181e8071f. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20595912>.
- Task Force of the ESC and NASPE (1996). Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use (Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology). *Eur Heart J* 17: pp. 354-381; <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/htbin-post/Entrez/query?db=m&form=6&dopt=r&uid=8737210>.
- Tice, R.R., Hook, G.G., Donner, M., McRee, D.I., and Guy, A.W. (2002). Genotoxicity of radiofrequency signals. I. Investigation of DNA damage and micronuclei induction in cultured human blood cells. *Bioelectromagnetics* 23: pp. 113-126; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11835258>.
- Tillmann, T., Ernst, H., Streckert, J., et al. (2010). Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. *Int J Radiat Biol* 86: pp. 529-541; Doi:10.3109/09553001003734501. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20545575>.
- Tomruk, A., Guler, G., and Dincel, A.S. (2010). The influence of 1800 MHz GSM-like signals on hepatic oxidative DNA and lipid damage in nonpregnant, pregnant, and newly born rabbits. *Cell Biochem Biophys* 56: pp. 39-47; Doi:10.1007/s12013-009-9068-1. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19851891>.
- Tracey, K.J. (2002). The inflammatory reflex. *Nature* 420: pp. 853-859; Doi:10.1038/nature01321. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12490958>.
- Tsuji, H., Venditti Jr, F.J., Manders, E.S., et al. (1994). Reduced heart rate variability and mortality risk in an elderly cohort. The Framingham Heart Study. *Circulation* 90: pp. 878-883; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8044959>.

- Vijayalaxmi (2006). Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to 2.45 GHz or 8.2 GHz radiofrequency radiation. *Radiation Research* 166: pp. 532-538; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16972753/>.
- Vijayalaxmi, Bisht, K.S., Pickard, W.F., Meltz, M.L., Roti Roti, J.L., and Moros, E.G. (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) 18. *Radiation Research* 156: pp. 430-432; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11554855/>.
- Vijayalaxmi, Cao, Y., and Scarfi, M.R. (2014). Adaptive response in mammalian cells exposed to non-ionizing radiofrequency fields: A review and gaps in knowledge. *Mutat Res Rev*, Doi:10.1016/j.mrrev.2014.02.002.
- Vijayalaxmi, Mohan, N., Meltz, M.L., and Wittler, M.A. (1997). Proliferation and cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Int.J.Radiat.Biol* 72: pp. 751-757; <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9416798/>.
- Vijayalaxmi, Pickard, W.F., Bisht, K.S., et al. (2001b). Micronuclei in the peripheral blood and bone marrow cells of rats exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation 1. *Int J.Radiat.Biol.* 77: pp. 1109-1115; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11683981>.
- Vijayalaxmi, L.B.Z., Meltz, M.L., Pickard, W.F., et al. (2001c). Cytogenetic studies in human blood lymphocytes exposed in vitro to radiofrequency radiation at a cellular telephone frequency (835.62 MHz, FDMA). *Radiation Research* 155: pp. 113-121.
- Vornoli, A., Falcioni, L., Mandrioli, D., Bua, L., and Belpoggi, F. (2019). The Contribution of In Vivo Mammalian Studies to the Knowledge of Adverse Effects of Radiofrequency Radiation on Human Health. *Int J Environ Res Public Health* 16: Doi:10.3390/ijerph16183379. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31547363>.
- Waldmann, P., Bohnenberger, S., Greinert, R., et al. (2013). Influence of GSM Signals on Human Peripheral Lymphocytes: Study of Genotoxicity. *Radiat Res* 179: pp. 243-253; Doi:10.1667/RR2914.1 [doi]. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23316708>.
- Whitehurst, L.N., Cellini, N., McDevitt, E.A., Duggan, K.A., and Mednick, S.C. (2016). Autonomic activity during sleep predicts memory consolidation in humans. *Proc Natl Acad Sci U S A* 113: pp. 7272-7277; Doi:10.1073/pnas.1518202113. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27298366>.
- Wyde, M.E., Cesta, M.F., Blystone, C.R., et al. (2016). Report of Partial Findings from the National Toxicology Program - Carcinogenesis Studies of Cell Phone Radiofrequency Radiation in Hsd: Sprague Dawley® SD rats (Whole Body Exposures); Draft 5-19-2016; Available online: <http://biorxiv.org/content/biorxiv/early/2016/05/26/055699.full.pdf>. Accessed on July 29th, 2017 *US National Toxicology Program (NTP)*.
- Xu, S., Zhou, Z., Zhang, L., et al. (2010). Exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons. *Brain Res* 1311: pp. 189-196; Doi:10.1016/j.brainres.2009.10.062. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19879861/>.

- Yakymenko, I., Tsybulin, O., Sidorik, E., Henshel, D., Kyrylenko, O., and Kyrylenko, S. (2016). Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med* 35: pp. 186-202; Doi:10.3109/15368378.2015.1043557. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26151230>.
- Younes, M. (1997). "Free radicals and reactive oxygen species [Freie Radikale und reaktive Sauerstoffspezies]," in *Lehrbuch der Toxikologie*, eds. H. Marquardt & S.G. Schäfer (Heidelberg Berlin: Spektrum Akademischer Verlag), pp. 94-105.
- Zeni, O., Romano, M., Perrotta, A., et al. (2005). Evaluation of genotoxic effects in human peripheral blood leukocytes following an acute in vitro exposure to 900 MHz radiofrequency fields. *Bioelectromagnetics* 26: pp. 258-265; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15832336>.
- Zeni, O., Sannino, A., Romeo, S., et al. (2012). Induction of an adaptive response in human blood lymphocytes exposed to radiofrequency fields: influence of the universal mobile telecommunication system (UMTS) signal and the specific absorption rate. *Mutat Res* 747: pp. 29-35; Doi:10.1016/j.mrgentox.2012.03.013. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22525361>.
- Zeni, O., Schiavoni, A., Perrotta, A., Forigo, D., Deplano, M., and Scarfi, M.R. (2008). Evaluation of genotoxic effects in human leukocytes after in vitro exposure to 1950 MHz UMTS radiofrequency field. *Bioelectromagnetics* 29: pp. 177-184; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18027845>.
- Zhang, M.B., Jin, L.F., He, J.L., Hu, J., and Zheng, W. (2003). Effects of 2,450 MHz microwave on DNA damage induced by three chemical mutagens in vitro. *Zhonghua Lao.Dong.Wei Sheng Zhi.Ye.Bing.Za Zhi.* 21: pp. 266-269; <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14761437>.
- Zulfiqar, U., Jurivich, D.A., Gao, W., and Singer, D.H. (2010). Relation of high heart rate variability to healthy longevity. *Am J Cardiol* 105: pp. 1181-1185; Doi:10.1016/j.amjcard.2009.12.022. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20381674>.
- Zuraulis, V., Nagurnas, S., Peceliunas, R., Pumputis, V., and Skackauskas, P. (2018). The analysis of drivers' reaction time using cell phone in the case of vehicle stabilization task. *Int J Occup Med Environ Health* 31: pp. 633-648; Doi:10.13075/ijomeh.1896.01264. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29974890>.

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Konstruktions-Skizze Pavillon.	25
Abbildung 3-2: Realisierter Pavillon mit Stühlen für die Probanden.....	26
Abbildung 3-3: Messvorrichtungen zwischen Sichtschutz und Abschirmvorhang.....	26
Abbildung 3-4: Abschirmwirkung im Frequenzbereich Telekom LTE 816 MHz.....	27
Abbildung 3-5: HF Breitband-Messung während der Abschirm-Experimente.....	29
Abbildung 3-6: Abfolge der Exposition im Pavillon unter experimenteller Abschirmung.....	30
Abbildung 3-7: Prinzip einer 9-Punkt Messung am Schlafplatz.....	32
Abbildung 3-8, Magnetische Wechselfelder während der Nachtphase von 22 bis 6 Uhr.....	38
Abbildung 3-9: LTE-800 Grundlast in den Schlafräumen der Probanden.....	45
Abbildung 3-10: Beispiel einer HF Breitband-Messung, Gruppe C.....	47
Abbildung 3-11: Beispiel einer HF Breitband-Messung, Gruppe V.....	48
Abbildung 3-12: Kontrollmessung am 24.07.21 von 09:15-11:45 Uhr.....	50
Abbildung 3-13: Kontrollmessung am 25.07.21 von 16:15-18:35 Uhr.....	50
Abbildung 3-14: Kontrollmessung am 24.07.2021 von 16:15-18:45 Uhr.....	51
Abbildung 3-15: Kontrollmessung am 25.07.2021 von 09:15-11:45 Uhr.....	51
Abbildung 3-16: Kontrollmessung am 31.07.2021 von 09:15-11:45 Uhr.....	52
Abbildung 3-17: Kontrollmessung am 01.08.2021 von 14:15-16:40 Uhr.....	52
Abbildung 3-18: Kontrollmessung am 31.07.2021 von 16:15-18:45 Uhr.....	53
Abbildung 3-19: Kontrollmessung am 01.08.21 von 09:20-11:45 Uhr.....	53
Abbildung 4-1: Tageszeit-Abhängigkeit, Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung.....	63
Abbildung 4-2: Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung, mit und ohne Abschirmung.....	64
Abbildung 4-3: Geschwindigkeit & Konzentrationsleistung in zwei Stunden, mit und ohne Abschirmung...	65
Abbildung 4-4: Tageszeit-Abhängigkeit, Fehlerrate, Gruppenvergleich.....	66
Abbildung 4-5: Fehlerrate, mit u. ohne Abschirmung, Gruppenvergleich.....	67
Abbildung 4-6: Zeitverlauf, Konzentrationsfehler mit und ohne Abschirmung.....	68
Abbildung 4-7: Tageszeit-Abhängigkeit, Rel. Fehler-Rate (Frel%), Gruppenvergleich.....	69
Abbildung 4-8: Rel. Fehler (Frel%) mit und ohne Abschirmung, Gruppenvergleich.....	70
Abbildung 4-9: Zeitverlauf der Relativen Fehler-Rate (Frel%) mit und ohne Abschirmung.....	70
Abbildung 5-1: Altersverteilung pro Geschlecht.....	84
Abbildung 5-2: Teilnehmer, Untersuchungsablauf, Flussdiagramm.....	85
Abbildung 5-3: Basler Befindlichkeitsskala Momentanbefindlichkeit abends.....	87
Abbildung 5-4: Verteilung der Subskalen der Basler Befindlichkeitsskala.....	87
Abbildung 5-5: Abschirmtest, Sequenz-Effekt in der Herzfrequenz (HR).....	89
Abbildung 5-6: Abschirmtest, Sequenz-Effekt bei HF, LF und vegetativem Quotienten (VQ).....	90
Abbildung 5-7: Abschirmtest, Sequenz-Effekt in der Gesamtvariabilität (lnTOT),.....	91
Abbildung 5-8: Expositionsbedingte HRV-Differenz, je nach Alter und Ruhewerten.....	93

Abbildung 5-9: Tagesverlauf der Spektralparameter nach tatsächlicher Uhrzeit.	97
Abbildung 5-10: Differenzen und 95%-Konfidenzintervalle, Stundenmittel der HRV.	98
Abbildung 5-11: Tagesverlauf und Gruppendifferenz der Herzfrequenz, schlafsynchronisiert.	100
Abbildung 5-12: Tagesverläufe, synchronisiert auf den Beginn der Nachtruhe.	102
Abbildung 5-13: Gruppendifferenzen, Tagesverläufe, synchronisiert.	103
Abbildung 5-14: Korrelationen zwischen EMF-Exposition und HRV-Parametern.	105
Abbildung 5-15: Langzeit HF-EMF-Exposition und Reaktion auf Abschirm-Wechsel.	107
Abbildung 5-16: Schema der Vagus-Wirkung bei Entzündungen.	110
Abbildung 5-17: Diagnosen mit Beteiligung von Entzündungsprozessen	111
Abbildung 5-18: HRV-Werte des Gesamtschlafs nach Geschlecht und Expositionsgruppe	116
Abbildung 6-1: Permanente (nicht reparierfähige) DNA-Schäden,	126
Abbildung 6-2: MLL-Gen Umlagerungen (Translokationen).....	127
Abbildung 9-1: Faksimile-Auszug aus der IAEA Schutzrichtlinie für Allgemeinbevölkerung (IAEA, 2018b).	151
Abbildung 10-1: Information des deutschen Bundesamtes für Strahlenschutz.	153
Abbildung 11-1: Mobilfunk OHNE Kooperation der Betreiber.	154
Abbildung 11-2: Mobilfunk MIT Kooperation der Betreiber.	155
Abbildung 11-3, Schema einer indoor komplex vernetzten LiFi-Kommunikation;.....	156

12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Probanden und deren Gruppenzuteilung	21
Tabelle 3-2: Leistungsflussdichten und elektrische Feldstärken im Pavillon	28
Tabelle 3-3: Elektrische Wechselfelder (V/m) im Schlafbereich	36
Tabelle 3-4: E-Wechselfelder (V/m) im Schlafbereich, statistischer Gruppenvergleich	37
Tabelle 3-5: Magnetische Wechselfelder der öffentlichen Energieversorgung.	39
Tabelle 3-6: Magnetische Wechselfelder, 50 Hz, öffentliche Energieversorgung, Werte in nT.	40
Tabelle 3-7: Magnetische Wechsel-Felder, 16,7 Hz, Bahnenergieversorgung,	40
Tabelle 3-8: HF-Immissionen in den Schlafräumen, Leistungsflussdichten in $\mu\text{W}/\text{m}^2$	42
Tabelle 3-9: HF-Immissionen in den Schlafräumen, Elektrische Feldstärken in mV/m.	43
Tabelle 3-10: HF-Immissionen in den Schlafräumen; statistischer Gruppenvergleich	44
Tabelle 3-11: Testgruppen bei den experimentellen Abschirmungen im Pavillon	49
Tabelle 4-1: d2-R Konzentrationstest, Test-Variablen	60
Tabelle 4-2: Charakterisierung der Teilnehmer beim Konzentrationstest.	61
Tabelle 4-3: Anzahl der durchgeführten und auswertbaren d2-R Tests	62
Tabelle 4-4: d2-R Konzentrationstest, abgeschirmt oder offen (nicht abgeschirmt).	71
Tabelle 5-1: Liste der analysierten HRV-Parameter	77
Tabelle 5-2: Experimentelle Kurzzeitexposition / Abschirmung, Abfolgen	81
Tabelle 5-3: HRV, Geschlecht und Gruppenzuordnung der Teilnehmer.	84
Tabelle 5-4: Abendliche Momentanbefindlichkeit in den Gruppen V und C,	86
Tabelle 5-5: HRI-Erholungsqualität des Schlafes in den Gruppen V und C.	88
Tabelle 5-6: HRV-Nachtstundenauswertung, Testpersonen Gruppenvergleich	94
Tabelle 5-7: HRV-Parameter in den Wach- und Schlafphasen, Gruppenvergleich	95
Tabelle 5-8: HRV-Parameter in Tiefschlafphasen, Gruppenvergleich.	96
Tabelle 5-9: Elektromagnetische Feld-Arten für die Korrelation mit HRV	104
Tabelle 5-10: Abschirmversuch, Statistik (univariates gemischtes Modell).	113
Tabelle 5-11: Fortsetzung: Abschirmversuch, Statistik (univariat. gemischt. Modell).	114
Tabelle 6-1: Basis-Merkmale der Studienteilnehmenden.	122
Tabelle 6-2: Physikalische Messungen im Wohnumfeld der Teilnehmer	123
Tabelle 6-3: umseitig. Explorative Spearman-Rangkorrelation	131
Tabelle 6-4: Blutproben, untersuchte Biomarker, Gruppenvergleich	133
Tabelle 6-5: Potentielle Störfaktoren. Bi-faktorielle Varianzanalyse (ANOVA)	135
