

Aus dem Institut für
Physiologie, Physiologische Chemie und Tierernährung
der Tierärztlichen Fakultät München
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Vorstand: Univ.-Prof. Dr. M. Stangassinger

Arbeit angefertigt unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. med. vet. M. Stangassinger

**Zum Einfluss chronischer Exposition in hochfrequenten
elektromagnetischen Feldern von zwei Mobilfunkstandards
(GSM und UMTS) auf Lern- und Gedächtnisleistungen bei
Ratten (*Rattus norvegicus*)**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der veterinärbiologischen Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

von
Janine Schneider
aus Halle (Saale)

München 2008

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität München.

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Braun

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Stangassinger

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Erhard

Tag der Promotion: 8. Februar 2008

Abkürzungsverzeichnis

B	Anzahl der erzielten Belohnungen bzw. belohnte Hebeldrücke
B-an-Phase	Anzahl Belohnungen in einer 30minütigen an-Phase
B-ges	Anzahl aller Belohnungen einer Untersuchungsnacht
B-max	maximal mögliche erreichbare Futterkugelmenge
DRH	<i>differential reinforcement of high rates</i> , Verstärkungsplan
DRL	<i>differential reinforcement of low rates</i> , Verstärkungsplan
F	Filialgeneration, Nachkommen
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Mobilfunkstandard der zweiten Generation
Hd-an	Gesamtzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen
Hd-aus	Gesamtzahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen
Hd-an-Phase	Hebeldruckzahl in einer 30minütigen an-Phase
Hd-aus-Phase	Hebeldruckzahl in einer 60minütigen aus-Phase
Hd-ges	Anzahl aller Hebeldrücke einer Untersuchungsnacht
Hz	Hertz, Maßeinheit für Anzahl von Schwingungen pro Sekunde
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
N	Anzahl nötiger Hebeldrücke für eine Futterbelohnung
n	Versuchstieranzahl bzw. Stichprobenumfang
OBC-GUI	<i>operant behavior control-graphic user interface</i> , PC-Programm
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
r_s	Spearman Rangkorrelationskoeffizient
SAR	spezifische Absorptionsrate bzw. <i>specific absorption rate</i>
T	Tesla, Maßeinheit für magnetische Flussdichte bzw. Induktion
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , Mobilfunkstandard der dritten Generation

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
2	SCHRIFTTUM	3
2.1	Elektromagnetische Felder	3
2.2	Mobilfunkkommunikation und Grenzwerte	5
2.3	Lernen und Gedächtnis.....	8
2.4	Operante Konditionierung	11
2.5	<i>Social discrimination</i> -Test.....	15
2.6	Fragestellung	18
3	MATERIAL UND METHODEN.....	19
3.1	Tiere.....	19
3.2	Befeldung.....	19
3.3	Haltungsbedingungen	20
3.4	Zucht.....	22
3.5	Versuchsbedingungen im Untersuchungsraum	23
3.6	Operante Konditionierung in Skinnerboxen zur Erfassung der Lernleistung..	23
3.6.1	Versuchstiere	23
3.6.2	Skinnerboxen	24
3.6.3	Versuche	25
3.6.4	Verstärkungsprogramme und Datenerfassung.....	26
3.6.5	Durchführung	28
3.6.6	Untersuchung zum Einfluss des grünen LED-Signallichts bei DRL 16.....	28
3.7	<i>Social discrimination</i> -Tests zur Erfassung der Gedächtnisleistung.....	30
3.7.1	Versuchszeit und Tiere	30
3.7.2	Durchführung	30
3.8	Auswertung	31
3.8.1	Auswertung der operanten Konditionierungsversuche.....	31
3.8.2	Auswertung der <i>social discrimination</i> -Tests	33

4	ERGEBNISSE	34
4.1	Ergebnisse der operanten Konditionierungsversuche.....	34
4.1.1	Einfluss auf die Körpergewichtsentwicklung.....	34
4.1.2	Gleichwertigkeit der beiden Hebel einer Skinnerbox	35
4.1.3	Latenzzeit.....	36
4.1.4	Gesamtzahl der Hebeldrücke.....	37
4.1.5	Anzahl der Hebeldrücke in den an- und aus-Phasen	39
4.1.6	Verhältnis der Hebeldruckzahl von aus- zu an-Phasen.....	44
4.1.7	Aktivitätsmuster.....	47
4.1.8	Leistung und Effizienz	49
4.1.9	Erzielte Futterbelohnungsmengen	56
4.1.10	Wechsel zwischen den beiden Hebeln einer Skinner-Box	62
4.1.11	Ergebnisse zum Einfluss des Signallichts bei DRL 16	67
4.2	Ergebnisse der <i>social discrimination</i> -Tests.....	68
5	DISKUSSION	74
5.1	Operante Konditionierung	74
5.1.1	Diskussion der Ergebnisse.....	74
5.1.2	Diskussion des Versuchsdesigns.....	78
5.2	<i>Social discrimination</i> -Test.....	82
5.3	Vergleich zu anderen Studien.....	84
5.4	Schlussbetrachtung	88
6	ZUSAMMENFASSUNG	90
7	SUMMARY	92
8	LITERATURVERZEICHNIS	94
9	DANKSAGUNG	101
10	ANHANG	102
10.1	Zusätzliche Abbildungen.....	102
10.2	Datentabellen der operanten Konditionierungsversuche	103
10.3	Rohdaten der <i>social discrimination</i> -Tests	111

1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen des vom Bundesamt für Strahlenschutz in Auftrag gegebenen Forschungsvorhabens „*In vivo*-Experimente unter Exposition mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern der Mobilfunkkommunikation“ angefertigt. Es handelte sich dabei um ein Gemeinschaftsprojekt des Forschungsverbundes Elektromagnetische Verträglichkeit, Mensch und Umwelt (EMVU) der Technischen Universität München und der Ludwig-Maximilians-Universität München. Es wurde unter dem Aktenzeichen 55.2-1-54-2531-91-04 durch die Regierung von Oberbayern genehmigt. Der Lernversuch zur operanten Konditionierung war innerhalb des Projekts vorgegeben. Weiterhin wurden durch andere Arbeitsgruppen Immun- und Stressreaktionen, Permeabilität der Blut-Hirn-Schranke, Anzahl und Dichte von CA1-Neuronen im Hippokampus sowie Reproduktions- und Entwicklungsparameter untersucht.

Derzeit werden zwei technische Standards für die auf hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung basierende Mobilfunkkommunikation parallel eingesetzt. Das *Global System for Mobile Communications* (GSM) und das *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) arbeiten in jeweils verschiedenen Frequenzbereichen und mit unterschiedlichen technischen Verfahren. (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003a und 2003b). Für die Abstrahlungen der genutzten elektromagnetischen Felder der Basisstationen gelten gesetzlich festgelegte Grenzwerte, einerseits für die allgemeine Bevölkerung und andererseits etwas höhere für beruflich exponierte Personen (26. BImSchV). Für elektromagnetische Felder sind thermische Wirkungen aufgrund der Erwärmung von Geweben im Organismus belegt (ICNIRP 1998, D'Andrea 1999, D'Andrea 2003a). Diese treten bei hohen Feldstärken auf und werden bei Einhaltung der Grenzwerte vermieden. Athermische Wirkungen sind teilweise gezeigt worden (Hermann & Hossmann 1997, ICNIRP 1998, D'Andrea 2003b). Sie werden aber auch im Bereich der kognitiven Leistungen kontrovers diskutiert (Sienkiewicz et al. 2005).

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss langfristiger Befeldung auf Lern- und Gedächtnisleistungen zu untersuchen. Als Tiermodell diente die albinotische

Laborratte vom Wistar Hannover Stamm, welche hierfür über drei Generationen hinweg von ihrer Zeugung bis zum Abschluss der Experimente chronisch exponiert wurde. Nachgebildet wurde eine ungepulste Bestrahlung durch eine Basisstation unter Fernfeldbedingungen, einerseits für den GSM- Mobilfunkstandard und andererseits für den UMTS-Mobilfunkstandard. Eine dritte Versuchstiergruppe blieb unbefeldet und diente als Kontrolle. Die verwendete Feldstärke orientierte sich am in Deutschland derzeit höchstmöglich erlaubten und als sicher eingeschätzten Ganzkörpergrenzwert. Dabei sind thermische Wirkungen ausgeschlossen, so dass eventuelle Einflüsse auf athermische Wirkungen zurückzuführen sind. Die Experimente selbst fanden außerhalb der Hochfrequenzfelder statt. Die Lernleistung wurde mit Hilfe einer operanten Konditionierung in Skinnerboxen erfasst. An die Versuchstiere wurden in mehreren Testsitzungen zunehmend schwierigere Lernanforderungen für den Erhalt von Futterbelohnungen gestellt. Die Gedächtnisleistung für sozial relevante Informationen, nämlich die Identität kurz zuvor getroffener Artgenossen, wurde mit dem *social discrimination* Testverfahren untersucht. Änderungen in der Leistungsfähigkeit verglichen zur Kontrollgruppe würden auf einen Einfluss chronischer Befeldung hinweisen.

2 Schrifttum

2.1 Elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder bestehen sowohl aus einer elektrischen als auch magnetischen Feldkomponente. Bewegte elektrische Ladungen erzeugen Magnetfelder und zeitlich veränderliche Magnetfelder wiederum induzieren zeitlich veränderliche elektrische Felder. Die Stärke eines elektrischen Feldes E wird in Volt pro Meter [V/m] angegeben. Die Stärke eines Magnetfeldes H wird in Ampere pro Meter [A/m] angegeben. Häufig wird stattdessen die magnetische Flussdichte bzw. Induktion in Tesla [T] angegeben. Ebenfalls kann die Stärke eines elektromagnetischen Feldes als Leistungsflussdichte S ($= E \times H$) in Watt pro Quadratmeter [W/m^2] angegeben werden (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2002). Natürliche Quellen elektromagnetischer Wellen sind beispielsweise die Sonneneinstrahlung, Gewitter und Bewegung innerhalb des Erdmagnetfeldes.

Das elektromagnetische Spektrum wird grob in ionisierende (Gamma- und Röntgenstrahlen) und nichtionisierende Strahlung eingeteilt. Die nichtionisierende Strahlung kann auch bei hoher Intensität keine atomaren oder molekularen Bindungen zerstören. Sie umfasst die optische Strahlung (ultraviolette Strahlung, für den Menschen sichtbares Licht, infrarote Strahlung), hochfrequente und niederfrequente Felder (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2002 und 2003a).

Elektromagnetische Felder werden durch Wellenlänge, Frequenz und Energie charakterisiert. Die Frequenz (Anzahl von Schwingungen pro Sekunde) wird in Hertz [Hz] angegeben. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto höher ist die Frequenz. Je höher die Frequenz ist, desto energiereicher ist die elektromagnetische Welle. Die Eindringtiefe in organisches Gewebe ist frequenzabhängig. Je niedriger die Frequenz ist, desto höher ist die Eindringtiefe. Im exponierten organischen Gewebe können eventuell Effekte auftreten. Bei Einflüssen aufgrund von Erwärmung spricht man von thermischen Effekten. Veränderungen, die ohne messbare Temperaturänderungen im Gewebe auftreten, bezeichnet man als athermische Effekte.

Felder im Niederfrequenzbereich (<30 kHz) sind an die erzeugende Quelle gebunden und nehmen mit der Entfernung schnell ab. Sie treten zum Beispiel an

Hochspannungsleitungen, Umschaltstationen und elektrischen Haushaltsgeräten auf. Sie können Atome in Schwingungen versetzen, Ladungen verschieben und schwache elektrische Ströme im Körper induzieren (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2002).

Bei höheren Frequenzen lösen sich elektrisches und magnetisches Feld von der Quelle und breiten sich in Lichtgeschwindigkeit ohne an ein Trägermedium gebunden zu sein, aus. Die Energie, welche pro Kilogramm Körpergewicht in einer bestimmten Zeiteinheit aufgenommen wird, wird als spezifische Absorptionsrate oder *specific absorption rate* (SAR) in Watt pro Kilogramm [W/kg] angegeben. Die Energie hochfrequenter elektromagnetischer Wellen wird im Körper hauptsächlich in Wärme umgewandelt (ICNIRP 1998, D'Andrea 2003a). Verhaltensänderungen aufgrund von Hitzestress sind bekannt (Hermann & Hossmann 1997, ICNIRP 1998, D'Andrea 1999, D'Andrea 2003a). Wird die Kapazität der Thermoregulation überfordert, kann dies unter anderem zu Gewebsschäden führen (ICNIRP 1998, D'Andrea 2003a). Die Beeinflussung kognitiver Leistungen durch Hitzestress aufgrund von Erwärmung ist von zahlreichen verschiedenen Variablen wie zum Beispiel Aufgabenanforderung, Übung, Motivation, Expositionsbedingungen usw. abhängig (D'Andrea 1999, D'Andrea 2003a, Hancock & Vasmatazidis 2003).

Die hochfrequenten elektromagnetischen Felder liegen definitionsgemäß im Frequenzbereich von 30 kHz-300 GHz und haben also Wellenlängen von 10 km bis 1 mm. Hochfrequenzfelder unter 1 MHz erzeugen vor allem elektrische Ladungen und Ströme. Bei über 1 MHz wird im Gewebe vor allem Wärme erzeugt (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2002). Es gibt zahlreiche Anwendungsgebiete für hochfrequente elektromagnetische Wellen. Sie werden beispielsweise für Radar, Mikrowellenherde, (Richt)Funk, WLAN (*wireless local area network*), Bluetooth, Mobilfunk, Schnurlostelefone, Fernseh- und Radiosender, Warensicherung sowie in Industrie (Induktionsöfen, Schweißgeräte) und Medizin verwendet (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2002 und 2003a). Der Nachweis athermischer Effekte wird häufig angezweifelt (Hermann & Hossmann 1997, ICNIRP 1998, D'Andrea 2003b, Sienkiewicz et al. 2005). Sie wurden vor allem im Zusammenhang von niederfrequenten Feldern und gepulsten elektromagnetischen Wellen nachgewiesen (Hermann & Hossmann 1997, ICNIRP 1998, Sienkiewicz et al. 2005).

Die Beeinflussung biochemischer und elektrochemischer Prozesse sowie Reizauslösung an Zellen wurde vor allem *in-vitro* an Gewebs- und Zellkulturen gezeigt. Die Ergebnisse von Tierversuchen konnten oftmals nicht repliziert werden. Epidemiologische Studien werden bisher als nicht schlüssig angesehen (Hermann & Hossmann 1997, ICNIRP 1998, D'Andrea 2003b, Sienkiewicz et al. 2005).

2.2 Mobilfunkkommunikation und Grenzwerte

Um Informationen von und zu einem mobilen Endgerät mittels hochfrequenter elektromagnetischer Wellen zu übertragen, werden die Informationen digitalisiert und auf eine Trägerwelle aufmoduliert. Dabei ist eine Modulation von Amplitude (Signalstärke), Frequenz und Phase möglich. Die Informationen werden über eine ortsfeste Funksendeanlage (Basisstation) innerhalb einer bestimmten Reichweite (Funkzelle) weitergeleitet. Die so genannten Funkzellen enthalten eine Basisstation, welche über Kabel, Richtfunk oder Glasfaser mit einem zentralen Vermittlungsrechner verbunden ist (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003a).

Jedes Mobilfunknetz ist mehr oder weniger flächendeckend in zahlreiche Funkzellen aufgeteilt. Angestrebt wird eine Verbindung zwischen mobilem Endgerät (Handy) und Basisstation bei möglichst geringer Leistung. Mit zunehmender Dichte des Netzes sinkt die nötige Leistung für die Verbindung. Eine Exposition durch eine Basisstation ist zwar permanent, aber gering verglichen zur kurzfristigen aber höheren Exposition durch ein Mobilfunkendgerät (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003b). Im Nahfeld einer Sendeanlage sind elektrisches und magnetisches Feld entkoppelt. Dies erschwert eine Berechnung der lokalen Strahlenbelastung (ICNIRP 1998). Im Fernfeld sind elektrische und magnetische Anteile senkrecht zueinander und zur Ausbreitungsrichtung angeordnet. Die Feldstärke nimmt proportional mit der Entfernung ab. E und H nehmen mit dem Abstand r zur Antenne $1/r$ ab. Die Leistungsflussdichte S nimmt mit zunehmendem Abstand r von der Antenne $1/r^2$ ab (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003a). Die Eindringtiefe der elektromagnetischen Felder der Mobilfunkstrahlung in Gewebe beträgt wenige Zentimeter.

Die ersten analogen Mobilfunknetze Deutschlands (A-Netz 1958-1977, B-Netz 1972-1994, C-Netz 1984-2000) sind mittlerweile eingestellt und werden als Mobilfunkstandard der ersten Generation bezeichnet. Die seit 1992 (D-Netze) und 1994 (E-Netze) in Betrieb befindlichen Netze basieren auf dem Mobilfunkstandard der zweiten Generation, welche auch *Global System for Mobile Communications* oder kurz GSM genannt wird. Seit 2003 ist der Mobilfunkstandard der dritten Generation, *Universal Mobile Telecommunications System* oder kurz UMTS bezeichnet, in Betrieb und wird kontinuierlich ausgebaut. Die Verfahren von GSM und UMTS unterscheiden sich in vielfacher Weise (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003a).

Bei GSM-900 (D-Netze) werden Frequenzbereiche von 880-915 MHz und 925-960 MHz und bei GSM-1800 (E-Netze) werden Frequenzen von 1710-1785 MHz und 1805-1880 MHz verwendet. GSM-1900 wird in den USA genutzt. Bei GSM wird zur Informationsübertragung die Frequenz moduliert und eine vergleichsweise schmale Kanalbandbreite von 200 kHz genutzt. Pro Frequenz wird innerhalb eines von insgesamt acht Zeitschlitzten (Dauer je 0,557 ms) gesendet. Bei einer Auslastung der Basisstation, also bei Nutzung aller Zeitschlitzte, ist das elektromagnetische Feld nicht mehr gepulst. Am Handy selbst ergibt sich jedoch stets ein gepulstes Signal von 217 Hz. Durch die Nutzung von unterschiedlichen Trägerfrequenzen (Frequenzmultiplex-System) und zeitversetztem Senden auf einer Frequenz (Zeitmultiplexverfahren) können bis zu 100 Mobilfunkteilnehmer gleichzeitig innerhalb einer Funkzelle telefonieren bzw. Daten versenden oder empfangen (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003a). Die wabenartig angeordneten Funkzellen können im Durchmesser bei GSM-900 maximal ca. 35 km und bei GSM-1800 maximal ca. 10 km groß sein. Die typische Sendeleistung einer Basisstation liegt bei circa 20-50 Watt (GSM-900) bzw. 10 Watt (GSM-1800).

Bei UMTS werden die Frequenzbereiche von 1920-1980 MHz und 2110-2170 MHz, und phasenmoduliert eine relativ große Kanalbandbreite von 5 MHz ausgenutzt. Dies ermöglicht gegenüber GSM eine deutlich schnellere Datenübertragung. Die Basisstationen senden zeitgleich auf derselben Frequenz und verschlüsseln jede Verbindung mit einem Markierungscode. Dies wird als CDMA-Verfahren (*Code Division Multiple Access*) bezeichnet. Dies ermöglicht einen Vielfachzugriff mehrerer

Handynutzer auf eine Basisstation. Eine Pulsung des Signals erfolgt nicht. Um eine wechselseitige Kommunikation zwischen Handy und Basisstation zu ermöglichen, wird bei UMTS das so genannte Frequenzduplex-Verfahren eingesetzt. Dabei wird der Verbindung Handy-Basisstation eine andere Frequenz als der Verbindung Basisstation-Handy zugeteilt. Das Zeitduplex-Verfahren, also die abwechselnde Kommunikation zwischen Endgerät und Basisstation auf einer Frequenz, wird bisher nur im geringen Maße genutzt. Die Funkzellenstruktur des UMTS-Standards ist dynamisch und flexibel. Die unterschiedlichen Zellen vergrößern bzw. verkleinern sich nach Bedarf und können sich überlappen (Fachinformation des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen 2003b). Die typische Sendeleistung einer Basisstation liegt zwischen 10 bis 30 Watt.

Zum Schutz der Bevölkerung vor einer eventuell schädlichen Strahlenbelastung durch elektromagnetische Felder der Mobilfunkkommunikation wurden 1998 von der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) Grenzwerte empfohlen. Diese bildeten die Grundlage für die in Deutschland gültigen Grenzwerte für ortsfeste Sendeanlagen in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) von 1996. Grundlage der Grenzwerte sind Forschungsergebnisse die zeigen, dass thermische Effekte nach Befeldung mit einem SAR-Wert von 4 W/kg über 30 Minuten, aufgrund einer induzierten Gewebserwärmung von über 1°C, auftreten (ICNIRP 1998). Aufgrund der geringen Durchblutung und damit einhergehender niedrigeren Thermoregulationskapazität von beispielsweise Auge und Hoden muss man hier eine stärkere Anfälligkeit gegenüber thermischen Effekten annehmen (ICNIRP 1998). Durch die Einführung des Sicherheitsfaktors von 10 für beruflich Exponierte und 50 für die allgemeine Bevölkerung liegen die gültigen Grenzwerte gemittelt über den gesamten Körper damit bei beruflicher Exposition bei 0,4 W/kg und sonst bei 0,08 W/kg. Dadurch sollen thermische Effekte im Körper ausgeschlossen werden. Die über 10 g Gewebe gemittelten Teilkörpergrenzwerte liegen mit 10 (Kopf) und 20 W/kg (Gliedermaßen) für beruflich Exponierte und 2 (Kopf) und 4 (Gliedermaßen) W/kg für die Allgemeinbevölkerung höher (ICNIRP 1998, 26. BImSchV). Die Beeinflussung kognitiver Prozesse durch die Einwirkung hochfrequenter Felder wird, wie bereits erwähnt, kontrovers diskutiert.

2.3 Lernen und Gedächtnis

Kognitive Leistungen wie Lernen und Gedächtnis werden durch die Plastizität synaptischer Verschaltungen und struktureller Anpassungen im Gehirn ermöglicht (Heldmaier & Neuweiler 2003). Wichtige beteiligte Hirnareale sind im Allgemeinen zum Beispiel der Hippokampus, der präfrontaler Kortex und das Striatum sowie die Amygdala (Bannermann et al. 2001, Kelley 2004).

Lernen ist ein Prozess, der auf Erfahrungen bzw. im Gedächtnis abgelegten Informationen beruht. Durch die Informationsverarbeitung erfolgt durch eine relativ stabile Verhaltensänderung eine verbesserte Anpassung des Individuums. Lernen hat stattgefunden, wenn sich ein Tier in einer bestimmten Situation angepasster als früher verhält. Es gibt nicht-assoziative und assoziative Lernarten. Nicht-assoziative Lernformen sind Habituation (Gewöhnung) und *arousal* (Sensitivierung bzw. Empfindlichkeitssteigerung). Die nachfolgenden Lernformen werden den assoziativen Lernarten zugeordnet. Hierbei werden nacheinander oder gleichzeitig auftretende Ereignisse miteinander verknüpft. Bei der klassischen Konditionierung werden zwei Stimuli oder auch Stimulus (Reiz) und Reaktion miteinander verknüpft. Ein neutraler Reiz wird nach dem Lernvorgang zu einem reaktionsauslösenden Reiz (konditionierter Stimulus): Der neutrale Reiz wird wiederholt mit einem Reflexauslösenden Reiz (unkonditionierter Stimulus) dargeboten. Schließlich löst der vormals neutrale Reiz den Reflex bzw. die Reaktion auch ohne Vorhandensein des unkonditionierten Stimulus aus. Diese, durch den konditionierten Stimulus ausgelöste, Reaktion wird als konditionierte Reaktion bezeichnet. Die durch einen unkonditionierten Stimulus ausgelöste Reaktion wird als unkonditionierte Reaktion bezeichnet (Zimbardo & Gerrig 1999). Die operante Konditionierung wird im folgenden Kapitel (2.4) näher erläutert. Latentes Lernen ist das beiläufige Einspeichern bedeutungsneutraler Eindrücke, die im Bedarfsfall eine verhaltensändernde Wirkung ermöglichen. Des Weiteren wird Beobachtungs- bzw. Nachahmungslernen sowie Lernen durch Einsicht (z.B. Werkzeuggebrauch) unterschieden. Ein Spezialfall des assoziativen Lernens ist die Prägung. Sie ist eine, auf eine sensible Periode begrenzte, obligatorische Lernform, die zumeist ein irreversibles und stabiles Ergebnis zur Folge hat. Explorationsverhalten, also Neugier- und Erkundungsverhalten ist endogen motiviert und führt zur Ansammlung von Erfahrungen und Informationen über beispielsweise die Umgebung, Objekte,

Situationen, Artgenossen etc. Das Spielverhalten dient ebenfalls dem Erfahrungsgewinn (Objektspiele, Sozialspiele) sowie der motorischen Vervollkommnung (Bewegungsspiele).

Das Gedächtnis ist die Fähigkeit Informationen aufzunehmen (enkodieren), zu speichern und bei Bedarf abzurufen (Zimbardo & Gerrig 1999). Es gibt mehrere Gedächtnissysteme an denen verschiedenen Areale im Gehirn beteiligt sind. Das nicht-deklarative bzw. implizite Gedächtnis umfasst unbewusste Lern- und Gedächtnisleistungen. Diese Prozesse sind unabhängig vom Hippokampus. Nicht-assoziative Lernleistungen, Konditionierung sowie das prozedurale Gedächtnis werden hier eingeordnet. Im prozeduralen Gedächtnis werden eingeübte bzw. wiederholte Handlungsabläufe sowie motorische Fähigkeiten gespeichert. Dafür sind die Basalganglien, das Kleinhirn (Cerebellum) und der motorische Kortex von Bedeutung (Heldmaier & Neuweiler 2003). Das deklarative bzw. explizite Gedächtnis bezieht sich auf bewusst zugänglich gespeicherte Informationen. Es ist hippokampusabhängig und wird nach Heldmaier & Neuweiler 2003 in episodisches Gedächtnis (persönliche Erfahrungen), semantisches Gedächtnis (allgemeines Wissen) und Wahrnehmungsrepräsentationen (Objektidentifikation u.ä.) unterteilt. Eine Darstellung des anatomischen Aufbaus des Hippokampus befindet sich in Abbildung 20 im Anhang. Der Hippokampus spielt zum Beispiel bei der räumlichen Orientierung und dem Ortsgedächtnis (*spatial memory*) eine bedeutende Rolle sowie bei der Bildung von Langzeitgedächtnisinhalten. Bei der Gedächtnisbildung vermittelt die parahippokampale Region (parahippokampaler Gyrus bzw. bei Ratten postrhinaler Kortex, perirhinaler Kortex und entorhinaler Kortex) zwischen dem Hippokampus und den assoziativen Neokortizes (Heldmaier & Neuweiler 2003). Eine Unterscheidung zwischen bekannten und neuen sensorischen Reizen ist in der parahippokampalen Region auch ohne Hippokampusbeteiligung möglich, wenn kein räumlicher Bezug dazu nötig ist (Heldmaier & Neuweiler 2003).

Das emotionale Gedächtnis stattet Gedächtnisinhalte mit assoziierten Empfindungen aus. Dafür wirken Kerne der Amygdala (vor allem lateraler Kern und vorderer Teil des basolateralen Kerns) und der präfrontale Kortex zusammen (Heldmaier & Neuweiler 2003). Emotional belegte Erinnerungen werden - im Vergleich zu neutralen Inhalten - besonders gut behalten.

Man teilt das Gedächtnis auch nach folgenden Arten ein: sensorisches Gedächtnis, Kurzzeitgedächtnis (Arbeitsgedächtnis) und Langzeitgedächtnis (Zimbardo & Gerrig 1999). Das sensorische Gedächtnis besitzt eine große Aufnahmefähigkeit für Sinneswahrnehmungen. Es speichert sie jedoch nur für kurze Dauer (wenige Sekunden). Über Aufmerksamkeits- und Mustererkennungsprozesse werden sensorische Informationen ins Kurzzeitgedächtnis übermittelt (Zimbardo & Gerrig 1999). Das Kurzzeitgedächtnis hat eine begrenzte Aufnahmefähigkeitkapazität. Es speichert Informationen, wenn sie nicht wiederholt werden, nur für kurze Dauer. Das Kurzzeitgedächtnis bereitet Gedächtnisinhalte für die Speicherung im Langzeitgedächtnis vor. Das Arbeitsgedächtnis wird oft dem Kurzzeitgedächtnis zugeordnet und dient der bewussten Informationsverarbeitung unter Abrufen von Gedächtnisinhalten, zum Beispiel aus dem Langzeitgedächtnis. Der präfrontale Kortex spielt dabei für das Ausführen von Handlungen eine wichtige Rolle (Heldmaier & Neuweiler 2003). Das Langzeitgedächtnis hat eine sehr große Kapazität zum Speichern von Gedächtnisinhalten in Form von Engrammen. Die Speicherdauer kann sehr lang (möglicherweise lebenslang) sein und es gilt als sehr störungsresistent.

Auswahl von Testmöglichkeiten

Um kognitive Leistungen, also Lernen und Gedächtnis zu untersuchen, wurden zahlreiche Tests entwickelt (Sousa et al. 2006): Bei einer Variante des *passive avoidance*-Test lernen Tiere zum Beispiel eine erhöhte Plattform nicht zu verlassen (*step-down-avoidance*). Im *active avoidance*-Test müssen Versuchstiere lernen zum Beispiel in einer *shuttle*-Box auf einen bestimmten Reiz hin, von einem Abschnitt in den anderen Abschnitt der Box zu wechseln, um einen leichten elektrischen Schlag zu vermeiden.

Unterschiedliche Labyrinthversuche werden ebenfalls oft eingesetzt, um das räumliche Gedächtnis (*spatial memory*) zu prüfen. Im *radial arm maze* soll das Versuchstier, ausgehend von einer zentralen Arena, die Futterbelohnungen am Ende der Arme aufsuchen. Im beliebten Morris *water maze*-Test wird das Aufsuchen einer unter der Wasseroberfläche versteckten Plattform gefordert. Einfachere Labyrinth stellen zum Beispiel das *T-maze* und das *Y-maze* dar. Den Laufgang-Test (*runway*) gib es ebenfalls in verschiedenen Variationen.

Recognition-Tests, also das Erinnern von Objekten, Düften, sozialen Stimuli etc. bieten sich aufgrund der einfachen Durchführung an. Dabei wird die Dauer und/oder Häufigkeit des Erkundens von bekannten und unbekanntem Stimuli gemessen und verglichen. Eine Variante dieses Versuchsdesigns ist zum Beispiel der *novel object discrimination*-Test. Eine Darstellung von zwei Versuchsdesigns zur Untersuchung von Erinnerungsvermögen an Artgenossen erfolgt im übernächsten Kapitel (2.5).

Eine typische Testvariante des klassischen Konditionierens ist *fear conditioning*. Dabei wird ein bestimmter Reiz (Licht, Ton etc.) mit einem leichten elektrischen Schlag assoziiert. Gemessen wird dabei das Erstarren (*freezing*) oder Erschrecken (*startle response*) des Versuchstieres. Andere Varianten sind beispielsweise Lid-schlussreflex und Geschmacksaversion.

Zu den operanten Testmethoden gehört zum Beispiel - neben den nach Verstärkungsplänen konditionierenden Versuchen (siehe Kapitel 2.4) - *reversal learning*, *repeated acquisition*, *autoshaping*- und *delay*-Versuche. Im *delayed match to sample*-Versuch beispielsweise entscheidet das Versuchstier ob ein, vor einer Pause präsentierter, Stimulus dem jetzigen gleicht und führt eine entsprechende Reaktion (z.B. Hebeldruck) aus.

2.4 Operante Konditionierung

Die operante bzw. instrumentelle Konditionierung wird auch als Lernen am Erfolg oder Versuch-und-Irrtums-Lernen bezeichnet. Sie gehört zu den assoziativen Lernformen. Beim operanten Konditionieren wird eine Verhaltensweise (Reaktion oder *response* genannt) mit einer Konsequenz (*outcome*) in einem Ursache-Wirkungs-Zusammenhang verknüpft. Nach Thorndikes *Law of Effect* (Angermeier 1976) verstärken Belohnungen die Reaktions-Stimulus-Assoziation und damit auch die Auftretenswahrscheinlichkeit der Reaktion.

Die Konsequenzen können positiv oder negativ sein. Eine Belohnung wird als positive Verstärkung und der Wegfall bzw. die Vermeidung eines negativen Reizes wird als negative Verstärkung bezeichnet. Beides erhöht die Auftretenswahrscheinlichkeit der Reaktion. Eine negative also unangenehme Konsequenz wie zum Beispiel ein aversiver Reiz (Bestrafung Typ I oder positive Bestrafung) oder die Entfernung einer positiven Konsequenz (Bestrafung Typ II oder negative Bestrafung) erniedrigen die Auftretenswahrscheinlichkeit der Verhaltensreaktion (Angermeier

1976). Konsequenzen wie zum Beispiel Belohnungen, welche die Auftretenswahrscheinlichkeit für belohntes Verhalten erhöhen, werden *reinforcer* bzw. Verstärker genannt. Es gibt primäre und sekundäre Verstärker (Angermeier 1976). Primäre Verstärker befriedigen physiologische Bedürfnisse (Hunger, Durst, Sex, sensorische Reize) und sind ohne weitere Lernvorgänge wirksam. Die Wertigkeit („Attraktivität“) eines primären Verstärkers wird im assoziativen orbitofrontalen Kortex erstellt und nimmt mit der Sättigung an dem spezifischen Reiz ab (Heldmaier & Neuweiler 2003). Sekundäre Verstärker müssen erst durch Kopplung an primäre Verstärker gelernt werden, um wirksam zu werden. Die Bildung dieser Assoziation findet in der Amygdala statt (Heldmaier & Neuweiler 2003). Typisches Beispiel für sekundäre Verstärker sind Tauschobjekte wie zum Beispiel Geld oder *token*.

B. F. Skinner entwickelte in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts einen Versuchskäfig, der dem Versuchstier eine reizarme Umgebung darbietet und die automatisierte Erfassung von Wirkreaktionen ermöglicht (Angermeier 1976, Pritchett & Mulder 2004). Typischerweise müssen Tauben auf eine Scheibe picken und Ratten einen Hebel drücken, um eine Verstärkung (*reinforcement*) zu erzielen. Als Bezeichnung für diese Art von Testapparaturen hat sich der Begriff Skinnerbox eingebürgert. Wichtige Voraussetzungen für erfolgreiches Lernen in einer Skinnerbox sind Motivation (beispielsweise Hunger oder Durst) und Appetenzverhalten (Suchverhalten). Die Motivation wird häufig über einen Entzug (Deprivation) von zum Beispiel Futter oder Wasser kontrolliert (Pritchett & Mulder 2004).

Die zu erlernende Assoziation ist von verschiedenen Eigenschaften der Ursache-Wirkungs-Beziehung abhängig. Für die Ausbildung der zu erlernenden Assoziation ist eine zeitliche und räumliche Nähe zwischen Verhalten und Konsequenz, also Kontiguität nötig. Ebenso ist die Kontingenz, also die Vorhersagbarkeit von Ereignissen aufgrund ihres gemeinsamen Auftretens bedeutend. Hinweisreize - auch diskriminative Stimuli genannt - können das gewünschte Verhalten unterstützen (Ferster & Skinner 1957). Außerdem darf die biologische Disposition nicht außer Acht gelassen werden. Es können nicht immer beliebige Verhaltensreaktionen oder Reize mit einer entsprechenden Konsequenz verknüpft werden. Nur die für das Tier in diesem Zusammenhang bedeutsamen Ereignisse bzw. Reize oder Handlungen werden miteinander in Verbindung gebracht. Dies ist zumeist artspezifisch. Die Häufigkeit der Verstärkung hat Einfluss auf die Stärke bzw. Festigung der

Assoziation. Die Belohnungsmenge und/oder -qualität hat ebenfalls Einfluss auf die vom Tier gezeigten Verhaltensreaktionen. Eine Assoziation kann als gelernt angesehen werden, wenn das Versuchstier angepassteres Verhalten zeigt. Es erzielt beispielsweise mit deutlich weniger Fehlern in kürzerer Zeit die erstrebten Belohnungen oder vermeidet durch die korrekte Wirkreaktion erfolgreich aversive Reize. Bei Ausbleiben der erwarteten Verstärkung kommt es nach einer kurzfristigen Intensivierung der Wirkreaktionen zur Abnahme der Auftretenswahrscheinlichkeit des Verhaltens. Dieses Phänomen wird als Abschwächung oder Löschung bezeichnet.

Für die operante Konditionierung sind zahlreiche Verstärkungspläne (*schedules of reinforcement*) entwickelt worden. Aufgrund der vielen Variationsmöglichkeiten soll hier nur eine kurze Übersicht geboten werden. Grob unterscheidet man zwischen nicht-intermittierenden und intermittierenden Verstärkungsplänen. Bei nicht-intermittierenden Verstärkungsplänen handelt es sich um eine kontinuierliche Verstärkung (*continuous reinforcement* - CRF) und wird auch Immerverstärkung genannt. Jede gewünschte Wirkreaktion wird verstärkt. Dies führt zu schnellen Lernergebnissen, aber auch zu schneller Löschung bei Ausbleiben der Verstärkung. Bei intermittierenden (partiellen) Verstärkungsplänen wird nicht jede Wirkreaktion verstärkt. Dies führt zu einem lösungsresistenteren Verhalten (Angermeier 1976). Hier kann man zwischen Intervallplänen (*interval schedule*), bei denen die Verstärkung einer Wirkreaktion nach einem bestimmten Zeitintervall erfolgt, und Raten- bzw. Quotenplänen (*ratio schedule*), bei denen die Verstärkung nach einer bestimmten Anzahl Wirkreaktionen erfolgt, unterscheiden. Die Reaktionshäufigkeit ist bei Quoten- bzw. Ratenplänen höher als bei Intervallplänen. Die beiden Formen können fixiert oder variabel sein. Variable Verstärkungspläne haben im Allgemeinen gleichmäßigere Verhaltenshäufigkeiten zur Folge als fixierte Pläne. Bei einem fixierten Intervallplan (*fixed interval* - FI) wird nach gleich langen Zeitabständen und bei einem variablen Intervallplan (*variable interval* - VI) bei zufällig um einen Mittelwert variierenden Zeitabständen verstärkt. Beim fixierten Ratenplan (*fixed ratio* - FR) wird nach einer festgelegten Anzahl von Wirkreaktionen und beim variablen Ratenplan (*variable ratio* - VR) nach einer zufällig um einen Mittelwert variierenden Anzahl von Wirkreaktionen verstärkt. Durch spezielle Kombinationen entstehen zahlreiche weitere Verstärkungspläne wie zum Beispiel alternative Verstärkung, gemischte Verstärkung, Ketten-Verstärkung, multiple Verstärkung, Parallel-

Verstärkung, Tandem-Verstärkung oder zusammenhängende Verstärkung usw. (Ferster & Skinner 1957, Angermeier 1976).

In der vorliegenden Studie kommen zwei Formen von Verstärkungsplänen zum Einsatz: Einmal die Verstärkung hoher Verhaltenshäufigkeit (*differential reinforcement of high rates* - DRH) bei der eine hohe Rate von Wirkreaktionen konditioniert werden soll, indem für eine Belohnung eine vorgegebene Anzahl Wirkreaktionen innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls absolviert werden müssen. Als zweites wird die Verstärkung einer geringen Verhaltenshäufigkeit (*differential reinforcement of low rates* - DRL) genutzt. Dabei wird die Wirkreaktion nach einem bestimmten Zeitintervall verstärkt. In diesem Zeitintervall darf das Versuchstier keine Wirkreaktion zeigen, sonst beginnt das Zeitintervall von vorn. Dies unterscheidet den DRL-Verstärkungsplan vom fixierten Intervallplan.

Die Erkenntnisse der operanten Konditionierung werden unter anderem erfolgreich in den Bereichen der Erziehung und Pädagogik, Verhaltenstherapie, Tierhaltung und Tierdressur umgesetzt. Wissenschaftliche Anwendung findet der Einsatz von Skinnerboxen auch heute noch in verschiedenen Bereichen der Psychologie (beispielsweise Lernpsychologie, klinische Psychologie, Wahrnehmungs- und Gestaltpsychologie etc.), der Neurowissenschaften, der medizinischen Forschung (Toxikologie, Pharmakologie usw.) und der Zoologie (u.a. Verhaltensbiologie, Physiologie). Zahlreiche Studien aus unterschiedlichen Fachgebieten, die sich operanter Konditionierung bedienen, lassen sich in der aktuellen Literatur finden. Getestet werden zum Beispiel Sinnesleistungen, Lernvermögen, Wahlverhalten, Krankheitszustände und/oder Einflüsse von chemischen Substanzen wie Hormonen, Neurotransmittern, Medikamenten, Drogen sowie toxischen Stoffen und so weiter. Ein weiteres Forschungsgebiet, welches auch mit operanten Techniken in Skinnerboxen untersucht wird, ist die Zeitwahrnehmung und zeitliche Kontrolle. Eine Übersicht zum Einfluss von Skinner auf die Erforschung von *animal timing* gibt unter anderem Lejeune (2006). Neben den klassischen Versuchstieren wie Ratte und Taube werden zahlreiche weitere unterschiedliche Spezies als Versuchstiere für operante Verhaltensversuche eingesetzt. Eine ausführliche Übersicht zu sensorischen Kapazitäten von Nutztieren, die mittels operanter Konditionierungstechniken gemessen wurden, gibt zum Beispiel Arave (1996). Aktuelle Untersuchungen von Tinnitus-Phänomenen bei Ratten erfolgen ebenfalls mittels

operanter Konditionierungstechniken in Skinnerboxen (Rüttiger et al. 2003). Reviews zum Einsatz der operanten Konditionierung im Bereich der Toxikologie geben zum Beispiel Laties (1978) und Wenger (1990). Zur Untersuchung von Effekten elektromagnetischer Befeldung wurde die operante Konditionierung bisher vor allem im Bereich der Mikrowellen (oftmals bei 2,45 GHz), statischen elektrischen oder magnetischen Feldern, *elf*(*extremely low-frequency*)-*fields* und gepulsten Feldern genutzt.

2.5 Social discrimination-Test

Die nachtaktive, ursprünglich in Erdbauten lebende Wanderratte (*Rattus norvegicus*) stammt aus Asien (Nordchina, Mongolei). Sie ist mittlerweile als Kulturfolger des Menschen nahezu weltweit verbreitet. Anfang des 19. Jahrhunderts wurden vor allem Albinoratten in wissenschaftlichen Laboren zu beliebten Versuchstieren und seit Mitte des 19. Jahrhunderts weitergezüchtet (Krinke 2000). Ratten haben einen ausgeprägten Geruchssinn und leben üblicherweise sozial in Gruppen zusammen. Beide Eigenschaften werden im *social discrimination*-Test ausgenutzt. Die Exploration von Artgenossen ist eine spontane und häufige Verhaltensweise, welche relevante Bedeutung im Zusammenhang mit sozialem Verhalten hat. Somit stellt die Untersuchung des Erkennens und Unterscheidens von Individuen eine sinnvolle Methode dar.

Der *social discrimination*-Test wurde Mitte der 90er Jahre von Engelmann et al. (1995) vorgeschlagen und ist eine Weiterentwicklung des *social recognition*-Tests, welcher Anfang der 80er Jahre von Thor & Holloway (1982) eingeführt wurde. Bei beiden empfindlichen Testvarianten wird die Gedächtnisleistung des *social memory* geprüft. Hierbei sollen adulte Ratten die Identität einer juvenilen Ratte in einem kurzen, meist vier bis fünf Minuten langen Zusammentreffen erlernen. Eine vorübergehende Kurzzeiterinnerung wird auf Basis von vor allem olfaktorischer Informationen (*cues*) gebildet (Carr et al. 1976, Sawyer et al. 1984, Dantzer et al. 1987, Popik et al. 1991, Bielsky & Young 2004). Diese werden durch Beschnüffeln und Anogenitalkontrolle aufgenommen. Sie sind als komplexe Duftmischungen sowohl im Urin als auch in anderen Körpersekreten enthalten (Bielsky & Young 2004, Lin et al. 2005). Mit dem Hauptriechsinne werden vor allem die flüchtigen chemische Substanzen und mit dem Vomeronasalorgan hauptsächlich die nicht-flüchtigen

chemischen Stoffe (Pheromone) wahrgenommen (Dulac & Torello 2003, Lin et al. 2005). Der Hauptriechsinnsinn besteht aus einem paarigen Riechsinnesepithel in der Nasenhöhle und sendet Axone in den *Bulbus olfactorius*. Von da aus wird der primäre olfaktorische Kortex innerviert, der sich aus mehreren Kernen zusammensetzt (*Nucleus olfactorius anterior*, posteriorer piriforme Kortex, entorhinaler Kortex, *Tuberculum olfactorium*, basomedialer Kern und posteriore Teile des basolateralen Kerns der Amygdala). Von der Amygdala aus gehen Verbindungen zum Hypothalamus, und von da weiter in verschiedene Felder der assoziativen Kortizes. Der entorhinale Kortex projiziert zum Hippokampus und das *Tuberculum olfactorium* gehört zum limbischen System (Heldmaier & Neuweiler 2003, Dulac & Torello 2003, Bielsky & Young 2004). Das Vomeronasalorgan ist ein annähernd zylinderförmiges paariges Organ im vorderen Abschnitt der Nasenscheidewand mit einem Sinneszellepithel mit - vom Hauptriechsinnsinn verschiedenen - Rezeptoren. Die Axone ziehen in den akzessorischen olfaktorischen Bulbus. Von diesem aus ziehen Mitralzellen in den medialen Teil der Amygdala. Von da aus führen Verbindungen ins limbische System und bestimmte Kerne des Hypothalamus (Heldmaier & Neuweiler 2003, Dulac & Torello 2003, Bielsky & Young 2004). Das Vomeronasalorgan der Männchen ist voluminöser und enthält mehr Neuronen als das der Weibchen (Heldmaier & Neuweiler 2003). Eine Skizze der anatomischen Verknüpfungen beider Riechsinnessysteme mit Gehirnarealen stellt Abbildung 19 im Anhang dar.

Das Einsetzen von Juvenilen reduziert agonistisches Verhalten der adulten Ratten, da Jungtiere nur selten attackiert werden (Carr et al. 1976). Statt eines Individuums kann bei Ratten dafür auch deren Urin oder benutzte Streu verwendet werden (Carr et al. 1976, Sawyer et al. 1984, van den Bos et al. 2002). Nach einem festgelegten Zeitintervall erfolgt die Überprüfung des Erinnerungsvermögens. Als Kriterium für Erinnerungsvermögen wird die Schnüffeldauer an den Jungtieren gemessen. Im *social recognition*-Test wird basierend auf dem Habituation/Dishabituation-Paradigma in einem zweiten vier- bis fünfminütigen Zusammensetzen dasselbe oder ein neues Jungtier angeboten. Wird dasselbe Jungtier wieder erkannt, tritt eine Reduzierung der Schnüffeldauer (Habituation) verglichen zum ersten Zusammensetzen ein. Eine ähnliche Schnüffeldauer deutet auf Dishabituation und damit Vergessen des Individuums hin. Beim Anbieten eines neuen Jungtieres tritt eine

ähnliche Schnüffeldauer wie im ersten Zusammensetzen auf. Dies zeigt, dass eine abnehmende Schnüffeldauer nicht auf Ermüdung oder Sättigung an sozialen Reizen zurückzuführen ist. Im *social discrimination*-Test werden dasselbe Jungtier und ein weiteres bis dato unbekanntes Jungtier dem adulten Tier gleichzeitig angeboten und die Schnüffeldauern an beiden Juvenilen miteinander verglichen. Wird das wiederholt angebotene Jungtier wieder erkannt, so ruft es deutlich weniger Interesse beim Versuchstier hervor als das unbekannte neue Juvenile. Bei ähnlichen Schnüffeldauern hingegen muss von einem Vergessen des wiederholt angebotenen Jungtiers ausgegangen werden. Beide Juvenile rufen ein ähnlich großes Interesse beim Versuchstier hervor. Trotz der Hauptaktivitätszeit der Ratten in der Dunkelphase lässt sich der *social discrimination*-Test mit gleichen Resultaten ebenfalls in der Ruhephase der Ratten durchführen (Reijmers et al. 2001).

Das Erinnerungsvermögen wird vor allem durch neurohypophysäre Hormone, also Vasopressin und Oxytocin, positiv beeinflusst (Dantzer et al. 1987, Bluthé & Dantzer 1990, Popik et al. 1992, Bielsky & Young 2004) und zeigt Geschlechtsdimorphismus (Bluthé & Dantzer 1990, Engelmann et al. 1998, Markham & Juraska 2007). Männliche Ratten erinnern sich nach 30 Minuten, nicht jedoch nach 120 Minuten an ein Jungtier (Dantzer et al. 1987, Bluthé & Dantzer 1990, Popik et al. 1992, Engelmann et al. 1995). Außerdem zeigen Rattenmännchen längeres Schnüffeln an den Jungtieren als kastrierte Männchen oder Weibchen (Thor & Holloway 1982, Bluthé & Dantzer 1990, Markham & Juraska 2007). Weibliche Ratten zeigen zwar niedrigere Schnüffeldauern an den Jungtieren als intakte Männchen, aber erinnern sich bis zu 120 Minuten, jedoch nicht 180 Minuten an ein Juveniles (Bluthé & Dantzer 1990, Engelmann et al. 1998). Juvenile Ratten im Alter von 38-40 Tagen scheinen ein deutlich kürzeres Erinnerungsvermögen (unter zehn Minuten) als adulte Ratten zu besitzen (Thor & Holloway 1982). Im *social discrimination*-Test zeigen sowohl sexuell naive als auch sexuell erfahrene Rattenmännchen ein Unterscheidungs- und damit Erinnerungsvermögen an ein wiederholt dargebotenes Jungtier bei einem Zeitintervall von 30 Minuten zwischen den beiden Einzeltests (Engelmann et al. 1995). Ein Zykluseinfluss bezüglich *social memory* ist bei der weiblichen Ratte nicht nachgewiesen. Zwar zeigen östrische Weibchen niedrigere Schnüffelzeiten als nicht-östrische, aber ihr Diskriminationsvermögen ist ähnlich dem von nicht-östrischen Rattenweibchen (Engelmann et al. 1998, Markham & Juraska 2007).

Im Zusammenhang mit elektromagnetischer Strahlung fand der *social discrimination*-Test noch keine Anwendung. Der *social recognition*-Test wurde bisher zur Untersuchung von Wirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder eingesetzt. Nach neuntägiger jeweils zweistündiger täglicher Exposition durch ein 60 Hz Feld mit einer magnetischen Flussdichte von 1 mT wurde eine Verbesserung des Erinnerungsvermögens an ein Jungtier auf eine Dauer von 300 Minuten bei männlichen (Vázquez-García et al. 2004) und weiblichen Ratten (Reyes-Guerrero et al. 2006) nachgewiesen.

2.6 Fragestellung

Ziel der vorliegenden Studie war es anhand des Tiermodells der Ratte zu prüfen, ob athermische Effekte auf Lern- und Gedächtnisleistung, die aus einer chronischen Exposition hochfrequenter elektromagnetischer Felder der Mobilfunkkommunikation resultieren könnten, auftreten. Neben einer unbefeldeten Kontrollgruppe wurden zwei Versuchstiergruppen mit den derzeit gängigen GSM- bzw. UMTS-Standards von Mobilfunkbasisstationen bestrahlt. Es wurden drei aufeinander folgende Rattengenerationen exponiert. Da neben der Haltung auch die Nachzucht in den Expositionskammern statt fand, wurden die Versuchstiere also von ihrer Zeugung bis zum Abschluss der Experimente chronisch bestrahlt. Sie wurden mittels operanter Konditionierung in Skinnerboxen und dem *social discrimination*-Test untersucht.

3 Material und Methoden

3.1 Tiere

Als Versuchstiere dienten albinotische Ratten (*Rattus norvegicus*) des Auszuchtstammes WISTAR, Rj:HAN. Diese wurden im Institut über drei Generationen hinweg nachgezüchtet. Die Parentalgeneration wurde im Alter von neun Wochen im Mai 2005 vom Züchter (Robert Janvier, Le Genest-St-Isle) angeliefert. Von Mitte Juli bis Anfang September 2005 fanden Selektionstests mittels operanter Konditionierung statt. Dabei wurden nach einer Sequenz von vier nächtlichen operanten Konditionierungsexperimenten in Skinnerboxen, Tiere mit mittlerer Lernleistung ausgewählt. Die Ratten, die in der letzten Testnacht am besten bzw. am schlechtesten abschnitten, wurden aus dem Versuch entfernt. Von 120 Tieren (60 Männchen, 60 Weibchen) wurden 26 Tiere von der Verpaarung ausgeschlossen. Somit standen 94 Zuchttiere (47 Männchen, 47 Weibchen) zur Verfügung. Aus diesen wurden zufällige Zuchtpaare gebildet und möglichst gleichmäßig auf drei Expositionskammern verteilt. Aus Gründen des Platzbedarfs und der Logistik der Versuchsdurchführung wurde die Parentalgeneration und jede Filialgeneration (F_1 , F_2 und F_3) in zwei Gruppen unterteilt, welche in einem zeitlichen Abstand von circa einem Monat vermehrt wurden. Die Nachzucht fand innerhalb der entsprechenden Expositionskammer statt.

3.2 Befeldung

Die elektromagnetisch abgeschirmten Expositionskammern (3,7x3,7x3,7 m) aus verzinktem Stahlblech mit Pressspankern der Firma Emc-Technik & Consulting GmbH, Stuttgart waren mit Hochfrequenzabsorbermaterial ausgekleidet. In zwei der drei Kammern fand eine chronische Befeldung statt. Die durchschnittliche Tagesbefeldung betrug jeweils circa 95%. Die Befeldungen waren während der Durchführung von Tierpflege, Entnahme der Tiere für Versuche und Ausfälle der Anlage kurzfristig ausgeschaltet. In einer Kammer erfolgte die Befeldung entsprechend dem Frequenzbereich für Mobilfunk nach dem GSM-Standard bei einer Frequenz von 900 MHz und in der zweiten Kammer entsprechend dem Frequenzbereich für UMTS bei 1,966 GHz. Die dritte Kammer ohne jegliche Bestrahlung diente als Kontrolle. Angestrebt wurde jeweils ein SAR-Wert von 0,4

W/kg, welcher dem Basisgrenzwert für Ganzkörperbelastung durch vom Körper absorbierte Energie bei beruflicher Exposition (im Frequenzbereich 100 kHz-10 GHz) entsprach. In jeder Kammer befand sich ein Parabolspiegel aus angestrichenem Stahlblech (Durchmesser 320 cm, Brennweite 112 cm) mit entsprechendem Primärstrahler zur Erzeugung des elektromagnetischen Feldes. Im Bereich der Tierhaltung wurde damit ein linear polarisiertes, homogenes Feld (ebene Welle, Fernfeldbedingungen) erreicht. Zur Signalerzeugung dienten außerhalb der Kammer ein Messsender mit entsprechender GSM-Modulation der Firma Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, München bzw. ein generischer UMTS-Generator von GMT – Gesellschaft für Medizin und Technik, Wuppertal sowie Leistungsverstärker der Firma BONN Elektronik GmbH, Ottobrunn. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Befeldungsanlage im Inneren einer Expositionskammer mit welcher die abgegebene Mobilfunkstrahlung der Antenne einer Basisstation nachgebildet wurde.

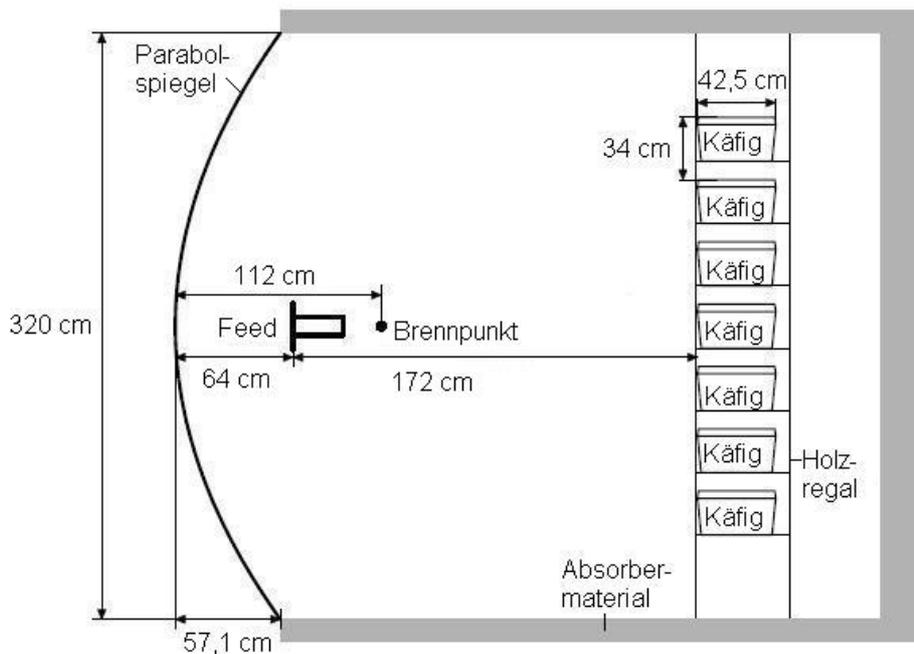


Abb. 1: Schematische Seitenansicht der Befeldungsanlage im Inneren einer Expositionskammer (Feed = Primärstrahler). (Nach Schelkshorn et al., 2007.)

3.3 Haltungsbedingungen

In jeder Expositionskammer wurden die Tiere in einem ungefähr drei Meter hohen Regal aus Holz gehalten. Die Holzregale hatten je sieben Regalböden mit einer Länge von 240 cm. Dies bot jeweils acht nebeneinander stehenden Käfigen Platz. Es

waren also maximal 56 Stellplätze pro Kammer vorhanden. Die verwendeten Käfige aus Makrolon (Polycarbonat) Eurostandard Typ III H der Firma Tecniplast Deutschland GmbH, Hohenpeißenberg waren 425x266x185 mm groß. Die modifizierten Käfigdeckel bestanden ebenfalls vollständig aus Kunststoff und ergaben eine Gesamthöhe von 225 mm. Um das Käfiginnenklima zu verbessern, wurden mehrere circa 1 cm große Belüftungslöcher in die Käfigunterschalen gebohrt. Abbildung 2 zeigt ein Foto der verwendeten Käfige inklusive Kunststoffdeckel und Wasserflasche. Pro Käfig wurden entweder zwei Männchen oder drei Weibchen zusammengehalten, welche keine Geschwistergruppen bildeten. In den klimatisierten Kammern herrschten Temperaturen von 20 ± 3 °C und eine relative Luftfeuchte von 60 ± 15 %. Das Lichtregime hatte einen Hell-Dunkel-Rhythmus von 12:12 Stunden wobei das Licht um 07:00 Uhr MEZ an- und um 19:00 Uhr MEZ ausgeschaltet wurde. Tagsüber betrug die durchschnittliche Beleuchtungsstärke 65 ± 15 Lux und nachts null Lux. Die Käfige wurden viermal in der Woche vormittags gewechselt. Als Einstreu diente Weichholzgranulat der Firma Altromin® (Gesellschaft für Tierernährung mbH, Lage). Trinkwasser und Futter in Pellet-Form wurde *ad libitum* gereicht. Das Wasser wurde in Kunststoffflaschen (Fassungsvermögen: 400 ml) der Firma Tecniplast Deutschland GmbH, Hohenpeißenberg mit Gummistopfen und Tränkenippeln aus Glas (Kunz & Müller GmbH, Berlin) angeboten. Das Wasser wurde dreimal wöchentlich gewechselt. Das Haltungsfutter Standard 1324 Ratte/Maus Haltdiät der Firma Altromin® (Gesellschaft für Tierernährung mbH, Lage) diente als Alleinfuttermittel. Als Beschäftigungsmöglichkeiten (*Enrichment*) erhielten die Ratten pro Käfig einige Streifen von ungebleichtem Zellstoff (WDT, Garbsen) und eine autoklavierte Papprolle. Pro Tier gab es zusätzlich ein Nagehölzchen (4x1,6x1 cm) aus Espenholz der Firma ABEDD® LAB & VET Service GmbH, Wien. Einmal wöchentlich erfolgte eine Rotation der Käfige auf den nächsten Stellplatz um Befeldungs- und Beleuchtungsunterschiede auszugleichen. Ebenfalls einmal wöchentlich wurden alle Ratten gewogen und dabei ihr Gesundheitszustand kontrolliert. Beim Umgang mit den Tieren wurden hygienische Schutzmaßnahmen wie das Tragen von Kittel, Mundschutz, Haube, Gummihandschuhen, Schuhwechsel und Desinfektion eingehalten.

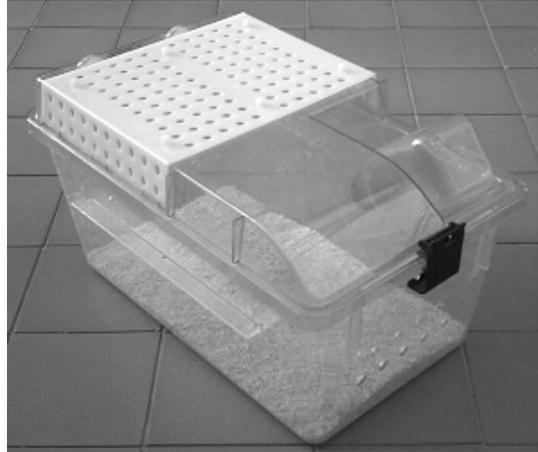


Abb. 2: Foto eines modifizierten Makrolon Käfigs (Typ III H) mit Kunststoffdeckel, Einstreu und Wasserflasche. Um die Befeldung nicht zu beeinflussen, konnten im Tierhaltungsbereich keine metallischen Gegenstände genutzt werden.

3.4 Zucht

Jede Filialgeneration (F_1 , F_2 und F_3) wurde in zwei Gruppen, in einem zeitlichen Abstand von circa einem Monat, vermehrt. Aus der Parentalgeneration wurden Mitte August und Mitte September 2005 zufällige Zuchtpaare gebildet und diese möglichst gleichmäßig auf drei Expositionskammern verteilt. Die Parentalgeneration wurde also im Alter von 22 Wochen für die Gruppe 1 bzw. im Alter von 26 Wochen für die Gruppe 2 der ersten Filialgeneration verpaart. Die Ratten der ersten Filialgeneration wurden im Alter von 18 Wochen und die Tiere der zweiten Filialgeneration im Alter von 19 Wochen verpaart. Für die Nachzucht wurden die Ratten aus dem operanten Konditionierungsversuch und nach Bedarf Reservetiere ausgewählt. Die Verpaarungen erfolgten innerhalb der Expositionskammern, wobei je ein Männchen und ein Weibchen in einen Käfig (425x266x155 mm) mit Gittereinsatz zusammengesetzt wurden. Der Käfig wurde täglich früh gewechselt. Dabei wurde das Vorhandensein von herausgefallenen Vaginalplaques, welche eine erfolgreiche Verpaarung anzeigen, überprüft. Nach sieben Tagen wurden die Männchen in ihre Heimatkäfige zurückgesetzt. Die Weibchen wurden einzeln gesetzt und die Gewichtszunahme als zusätzliche Trächtigkeitskontrolle genutzt. Zur Aufzucht der zweiten und dritten Rattengeneration wurde bis zum Absetztag statt des Haltungsfutters das rohfaserreiche Zuchtfutter Standard 1314 Ratte/Maus Zuchtdiät der Firma Altromin[®] (Gesellschaft für Tierernährung mbH, Lage) verwendet. Die Jungtiere wurden in der ersten Lebenswoche am Fußrücken tätowiert. Sie erhielten vor dem Absetzen vom

Muttertier am 21. Lebenstag zur individuellen Markierung subkutan im Nackenbereich einen ALVIC[®]-Transponder (Alvetra GmbH, Neumünster). Bei den ersten zwei Generationen wurden die Jungtiere bis zum Absetzen täglich für die Untersuchung von Entwicklungsparametern eingesetzt. Für die Verhaltensversuche wurden pro Kammer aus fünf Würfen je ein Männchen und ein Weibchen zufällig ausgewählt. In vier Fällen konnten kein männliches und weibliches Geschwister entnommen werden, so dass auf einen sechsten Wurf zurückgegriffen werden musste. Weitere Jungtiere wurden sowohl für die Versuche der anderen Projektarbeitsgruppen als auch als Reservetiere in den Expositions-kammern behalten. Überzählige Juvenile wurden nach dem Absetzen aus den Kammern entfernt.

3.5 Versuchsbedingungen im Untersuchungsraum

Der klimatisierte, nicht befeldete fensterlose Untersuchungsraum war 4x2,5x2,5 m groß und enthielt zehn nebeneinander aufgebaute Skinnerboxen und einen Untersuchungstisch. Während der Experimente herrschten im Raum Temperaturen von $18,5 \pm 2,5$ °C. Das Oberlicht wurde von einer Zeitschaltuhr kontrolliert und war während der Versuche ausgeschaltet. Sämtliche Versuche wurden verblindet durchgeführt. Ein Helfer stellte die benötigten Versuchstiere aus den Expositions-kammern zur Verfügung. Die Entblindung erfolgte nach Abschluss der jeweiligen Experimente. Während der Zeit der *social discrimination*-Tests wurden die dafür benötigten männlichen Jungtiere vorübergehend im Untersuchungsraum untergebracht. Sie wurden gruppenweise zu durchschnittlich fünf Jungtieren in Käfigen (425x266x155 mm) mit Gitterdeckeln gehalten. Die Versorgung erfolgte mit Pelletfutter von Altromin[®] (Gesellschaft für Tierernährung mbH, Lage) und Leitungswasser *ad libitum*.

3.6 Operante Konditionierung in Skinnerboxen zur Erfassung der Lernleistung

3.6.1 Versuchstiere

Für die Lernversuche wurden aus allen drei Filialgenerationen insgesamt 180 sexuell naive Tiere ausgewählt. Pro Filialgeneration waren je zehn Männchen und zehn

Weibchen aus einer Kammer. Aus Gruppe 1 bzw. 2 waren das demnach in einer Generation jeweils fünf Männchen und fünf Weibchen pro Expositionskammer. Jeweils ein Männchen und ein Weibchen entstammten zumeist demselben Wurf und waren folglich Geschwister. Die Ratten der ersten und dritten Filialgeneration waren zu Versuchsbeginn durchschnittlich 10 Wochen alt und die Tiere der zweiten Filialgeneration durchschnittlich 11 Wochen alt.

3.6.2 Skinnerboxen

Die oben offenen und mit Gitterdeckeln verschließbaren Skinnerboxen waren durch aufklappbare Überboxen aus Holzspanplatten voneinander isoliert. Die einzelnen, aus Plexiglas bestehenden, Skinnerboxen waren 250x290x490 mm groß. Sie enthielten einen herausnehmbaren Gittereinsatz in Höhe von 2 cm über dem Skinnerboxenboden. An der äußeren Vorderseite befanden sich der Futterautomat und die Wasserflasche sowie die Verkabelung. Auf der Innenseite befanden sich 5 cm über dem Gitterboden zwei metallische Hebel (3x2 cm²). Diese mussten mit einem Kraftaufwand von 0,4 N gedrückt werden, um die Futterbelohnung in Form eines runden Pellets von 45 mg (Bio-Serv[®] Dustless Precision Rodent Pellets, Bilaney Consultants GmbH, Düsseldorf) in einem halbrunden Kunststoffschälchen zwischen den beiden Hebeln zu erhalten. 4 cm über jedem Hebel befanden sich drei Signallämpchen mit Leuchtdioden (weiß: 3 Lux, grün: 2 Lux, rot: wurde nicht verwendet). Bei ausreichendem Druck auf einen Hebel leuchtete das darüber befindliche weiße Lämpchen 10 ms lang auf. Ein so genanntes Hauslicht sowie ein Rotlicht waren an der Vorderseite in Höhe von 44 bzw. 40 cm über dem Boxenboden angebracht. Sie ergaben eine Helligkeit von 1 Lux in Höhe des Gittereinsatzes. Die Tränkenippel befanden sich an der vorderen Innenseite nahe dem linken Rand in Höhe der Signallämpchen. Das Wasser wurde *ad libitum* angeboten und einmal wöchentlich gewechselt. Die Einstreu aus Weichholzgranulat der Firma Altromin[®] (Gesellschaft für Tierernährung mbH, Lage) reichte bis an den Gittereinsatz hoch und wurde vor jeder Testnacht gewechselt. Innerhalb der Skinnerboxen erwärmte sich die Luft über Nacht aufgrund des Tierbesatzes um circa 2-3 Grad. Je ein Ventilator pro Skinnerbox, welche im Deckel der Überbox installiert waren, sorgte für die Lüftung in den voneinander isolierten Skinnerboxabteilen und erzeugte ein maskierendes

Geräusch (circa 55 dB). In den ersten fünf Boxen wurden ausschließlich männliche Ratten und in den letzten fünf Boxen ausschließlich weibliche Ratten getestet.

3.6.3 Versuche

Ein Versuch bestand aus fünf Untersuchungs Nächten: einer Trainingsnacht und vier Testnächten. Die Untersuchungs Nächte dauerten 15 Stunden. Untersuchungsbeginn war 16:00 Uhr MEZ. Folglich war das Testende gegen 07:00 Uhr MEZ am nächsten Morgen. Die 15 Stunden bestanden aus sich abwechselnden zehn 30minütigen an-Phasen und zehn 60minütigen aus-Phasen, beginnend mit einer an-Phase. Während der an-Phasen waren das Hauslicht und das Rotlicht angeschaltet. Durch entsprechende Hebelrücke konnten Futterbelohnungen erarbeitet werden. In den aus-Phasen waren Hauslicht und Rotlicht sowie die Signallämpchen abgeschaltet. Futterbelohnungen waren nicht verfügbar. Dadurch sollte die Motivation während der Dauer der Untersuchungsnacht aufrechterhalten werden. Die Ratten aus den drei Expositions-kammern wurden an aufeinander folgenden Nächten abwechselnd getestet. Für jedes Tier ergab sich damit ein zeitlicher Abstand von zwei Tagen zwischen den einzelnen Untersuchungs Nächten, an welchen Tiere der anderen Expositions-kammern getestet wurden. Die dem Training nachfolgenden drei Testnächte begannen stets am dritten darauf folgenden Nachmittag. Die letzte Testnacht der Tiere erfolgte im Abstand von sechs Tagen. Die Untersuchungs-reihenfolge der Kammern wurde vor Beginn der Experimente durch einen Helfer zufällig ausgewählt und konnte zwischen den verschiedenen Versuchen variieren. Innerhalb eines Versuchsdurchganges blieb die Reihenfolge der getesteten Kammern gleich. Insgesamt dauerte ein Versuchsdurchlauf einer Tiergruppe aller drei Kammern 18 Tage. Dabei wurde an 15 Tagen getestet. Abbildung 3 stellt den Versuchsablauf schematisch dar. Die Chronologie der Versuche für die, in Gruppen aufgeteilten, Filialgenerationen zeigt Tabelle 1.

Versuch:	Training			Test 1			Test 2			Test 3			Test 4					
Kammer:	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3				1	2	3
Nacht:	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.	17.	18.

Abb. 3: Schema des Versuchsablaufs der operanten Konditionierung einer Rattengruppe für die drei Expositionskammern. Die Reihenfolge der Kammern ist beispielhaft gewählt und war dem Untersucher während des Versuchsdurchganges aufgrund der Verblindung nicht bekannt.

Tab. 1: Zeiträume der operanten Konditionierungsversuche.

Generation	Versuchsdurchlauf	Generation	Versuchsdurchlauf
F ₁ Gruppe 1	15.11.-02.12.2005	F ₁ Gruppe 2	19.12.-05.01.2006
F ₂ Gruppe 1	24.04.-11.05.2006	F ₂ Gruppe 2	29.05.-15.06.2006
F ₃ Gruppe 1	25.09.-12.10.2006	F ₃ Gruppe 2	29.10.-15.11.2006

3.6.4 Verstärkungsprogramme und Datenerfassung

Insgesamt kamen an den fünf Untersuchungs Nächten drei verschiedene Verstärkungspläne zum Einsatz. In der Trainingsnacht wurde ein nicht-intermittierender Verstärkungsplan der Immerverstärkung, auch kontinuierliche Verstärkung (*continuous reinforcement*) genannt, mit automatischer Belohnungsgabe alle fünf Minuten bei Nichtaktivität des Tieres vorgegeben. Jeder Hebeldruck wurde mit einer Futterkugel belohnt. Zu Beginn jeder an-Phase erfolgte eine automatische Futterkugelgabe. Alle fünf Minuten folgte eine weitere bis entweder ein Hebeldruck erfolgte oder die an-Phase zu Ende war. Fünf Minuten nach dem zuletzt getätigten Hebeldruck wurde wieder automatisch wie beschrieben alle fünf Minuten eine Futterkugel gegeben. Die Trainingsnacht diente der Gewöhnung der Ratte an die Testumgebung (Skinnerbox) und den Testablauf (Unterteilung in abwechselnde an- und aus-Phasen). Die automatischen Futterkugelgaben sollten das Interesse des Tieres auf die möglichen Belohnungen und auf die unmittelbare Umgebung des Futterschälchens lenken. Damit erhöhte sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Ratte zufällig einen der beiden Hebel berührte und sich die Assoziation zwischen Hebeldruck, weißen Signallämpchen und Futtergabe ausbildete. Durch weiteres Hebeldrücken des Versuchstieres wurde diese Assoziation verstärkt und konnte als gelernt angesehen werden. Als abgekürzte Bezeichnung für den Verstärkungsplan der ersten Untersuchungsnacht wurde der Begriff Training gewählt. In den beiden darauf folgenden Testnächten wurde ein intermittierender Verstärkungsplan mit einer

Verstärkung großer Verhaltenshäufigkeit vorgegeben, abgekürzt mit „DRH“ nach der englischen Bezeichnung *differential reinforcement of high rates*. In der ersten Testnacht musste die Ratte in einem Zeitraum von maximal einer Sekunde mindestens zwei Hebeldrücke ausführen um eine Futterbelohnung zu erhalten. Dieser Verstärkungsplan wurde abgekürzt DRH 2:1 bezeichnet. In der zweiten Testnacht mussten mindestens vier Hebeldrücke innerhalb von maximal zwei Sekunden erfolgen, um eine Futterbelohnung zu erzielen. Dieser Verstärkungsplan wurde abgekürzt DRH 4:2 genannt. Dabei wurden die Hebeldrücke beider Hebel zusammen berücksichtigt. Häufigere Hebeldrücke, die innerhalb des geforderten Intervalls lagen, wurden in beiden Testnächten ebenfalls belohnt, wenn die geforderte Mindestzahl erreicht wurde. Somit konnten unter Umständen mehr als nur eine Belohnung in einer bzw. zwei Sekunden erzielt werden. In diesen beiden Verstärkungsprogrammen wurde die Ratte also trainiert mehrere Hebeldrücke schnell hintereinander (mindestens ein Hebeldruck alle 0,5 Sekunden) auszuführen. Für die letzten beiden Testnächte wurde die Verstärkung geringer Verhaltenshäufigkeit vorgegeben, abgekürzt mit „DRL“ nach der englischsprachigen Bezeichnung *differential reinforcement of low rates*. Erst nach Ablauf eines 16sekündigen Sperrintervalls, welches für beide Hebel immer gleichzeitig galt, durfte ein beliebiger Hebel gedrückt werden, damit eine Futterbelohnung erfolgte. Die Kurzschreibweise hierfür lautete DRL 16. Das Sperrintervall startete zu Beginn jeder an-Phase. Es begann nach jedem Hebeldruck von vorn und wurde durch ein grünes Licht über dem zuletzt gedrückten Hebel signalisiert. Dieses Verstärkungsprogramm wurde den Versuchstieren nach sechstägiger Pause in der vierten Testnacht erneut angeboten. In den letzten beiden Testnächten ist somit eine hohe Hebeldruckfrequenz nicht mehr gefragt. Ein einzelner Hebeldruck nach Ablauf des Sperrintervalls genügte, um eine Futterbelohnung zu erarbeiten. Dabei durften innerhalb des vorgegebenen Sperrzeitraumes keine Hebeldrücke erfolgen. Das von einem Projektmitarbeiter für dieses Experiment erstellte PC-Programm OBC-GUI Version 2.1.2 steuerte die automatische Erfassung der Daten. Neben allgemeinen Informationen wie zum Beispiel Datum, Skinnerboxnummer und Konfiguration des Verstärkungsprogramms wurden pro Skinnerbox die Hebeldrücke ab Beginn des Testprogramms chronologisch mit einer Auflösung von 1 ms erfasst. Dabei wurde aufgezeichnet in welcher Phase der einzelne Hebeldruck getätigt wurde, ob er

belohnt oder unbelohnt war, ob er mit dem rechten oder linken Hebel ausgeführt wurde und wann nach Testbeginn in Millisekunden er erfolgt war.

3.6.5 Durchführung

Vor Testbeginn wurde die Funktionsfähigkeit der technischen Anlage durch einen kurzen Vortest überprüft. Daher befanden sich zu Testbeginn immer zwei bis drei Futterkugeln im Kunststoffschälchen. Danach wurden die Versuchstiere, welche von einem Helfer einzeln in durchnummerierten Käfigen (425x266x155 mm) mit Gitterdeckel und ungebleichtem Zellstoff (WDT, Garbsen) bereitgestellt wurden, in die Skinnerboxen eingesetzt. Jede Skinnerbox wurde mit dem Gitterdeckel geschlossen. Schließlich wurde die Überbox geschlossen und die Ventilatoren manuell eingeschaltet. Das Raumlicht schaltete sich automatisch einige Minuten vor Versuchsbeginn aus und vor Versuchsende an. Das PC-Programm OBC-GUI Version 2.1.2 steuerte ohne Anwesenheit einer Aufsichtsperson automatisch den Ablauf des Verstärkungsprogramms und der Phasen der Testnacht sowie die Datenerfassung. Nach Versuchsende wurden die Ventilatoren manuell abgeschaltet, die Überbox geöffnet und die Ratten aus den Skinnerboxen entnommen und in die entsprechend nummerierten Käfige zurückgesetzt. Diese wurden dann von einem Helfer in die entsprechenden Expositionskammern zurückgebracht und die Ratten in ihre Heimatkäfige zurückgesetzt. Bei einem kurzen Nachttest wurde die Funktionsfähigkeit der technischen Anlage erneut überprüft. Die erfassten Daten wurden auf Vollständigkeit geprüft und gesichert. Nach jeder Testnacht wurde die Einstreu gewechselt und die Skinnerboxen sowie deren Gittereinsätze mit Bacillo[®] AF (WDT, Garbsen), einem Propanol-Ethanol-Gemisch, gründlich aus- und abgewischt, um Gerüche und Verschmutzungen zu entfernen. Auch die nummerierten Käfige wurden vor der Wiederbenutzung mit Bacillo[®] AF desinfiziert und der Zellstoff erneuert.

3.6.6 Untersuchung zum Einfluss des grünen LED-Signallichts bei DRL 16

30 sexuell naive Rattenweibchen des Auszuchtstammes WISTAR, Rj:HAN aus der dritten Filialgeneration im Alter von 27 ± 1 Wochen wurden für die Untersuchung zum Einfluss des grünen Signallichtes auf die Lernleistung bei DRL 16 ausgewertet. Diese Tiere hatten nicht an den ursprünglichen Verhaltensversuchen teilgenommen, sondern stammten von einer anderen Projektarbeitsgruppe. Deren Experimente waren 1-2 Monate vor den Zusatzuntersuchungen abgeschlossen worden. Die Tiere

wurden unabhängig von ihrer ursprünglichen Kammerherkunft in der expositionsfreien Kontrollkammer untergebracht (Tabelle 2). Die operanten Konditionierungsversuche gliederten sich pro Tier in zwei aufeinander folgende Untersuchungsächte auf. Die Testdauer von 15 Stunden und die Abfolge und Zeitdauer der jeweils zehn alternierenden an- und aus-Phasen entsprachen dem Hauptversuch. Jedoch wurden die Tests von 17:50 Uhr MEZ bis 08:50 Uhr MEZ durchgeführt. Das Lichtregime im Untersuchungsraum hatte im Zeitraum der Zusatzuntersuchungen einen Hell-Dunkel-Rhythmus von 12:12 Stunden. Das Raumlicht wurde um 17:50 Uhr MEZ aus- und gegen 5:50 Uhr MEZ angeschaltet. Die Versuchstiere wurden direkt vom Heimatkäfig in die Skinnerboxen gesetzt und nach Testende in ihren Heimatkäfig zurückgesetzt. Die erste Untersuchungsnacht war eine Trainingsnacht, in welcher die Immerverstärkung (*continuous reinforcement*) mit automatischer Belohnungsgabe alle fünf Minuten bei Nichtaktivität des Tieres eingesetzt wurde. Sie diente wie auch im Hauptversuch der Gewöhnung an die Testumgebung, dem Testablauf und der Knüpfung der Assoziation Hebeldruck-Futterbelohnung. In der darauf folgenden Testnacht erfolgte die Verstärkung für geringe Verhaltenshäufigkeit (*differential reinforcement of low rates*). Die Ratten mussten die Einhaltung eines 16sekündigen Sperrintervalls erlernen. Eine Gruppe von 17 Ratten erhielt kein Signallicht zur Anzeige des Sperrintervalls über dem zuletzt gedrückten Hebel. Den übrigen 13 Weibchen stand das grüne Signallicht in den an-Phasen wie im Hauptversuch zur Verfügung. Die Einteilung der Weibchen pro Käfig in eine der beiden Gruppen erfolgte aufgrund der Verblindung zufällig.

Tab. 2: Übersicht über die ehemaligen Kammern aus der sexuell naiven Rattenweibchen der F₃-Generation im Alter von 27 ± 1 Wochen für die Gruppen ohne und mit grünem LED-Signallicht zur Anzeige des Sperrintervalls in der DRL 16 Testnacht stammten.

ehemalige Kammern	Kontrollkammer		GSM-Kammer		UMTS-Kammer		Anzahl n Gesamt
	Anzahl n	Anteil (%)	Anzahl n	Anteil (%)	Anzahl n	Anteil (%)	
Gruppe ohne LED	3	17,6	6	35,3	8	47,1	17
Gruppe mit LED	7	53,8	2	15,4	4	30,8	13

3.7 Social discrimination-Tests zur Erfassung der Gedächtnisleistung

3.7.1 Versuchszeit und Tiere

Die Experimente fanden zu Beginn der zweiten Hälfte der Ruhezeit im Untersuchungsraum statt. Sie dauerten circa zwei Stunden pro Versuchstag. In dieser Zeit wurden durchschnittlich fünf Versuchstiere gleichen Geschlechts getestet. Insgesamt wurden die Daten von 95 männlichen und 54 weiblichen Versuchstieren berücksichtigt. Davon waren 111 Ratten im Alter von $26 \pm 1,5$ Wochen sexuell erfahren (eine erfolgreiche Verpaarung bzw. erfolgreiche Jungtieraufzucht) und hatten $12,6 \pm 0,5$ Wochen zuvor den operanten Verhaltenstest absolviert. 29 Männchen und 28 Weibchen stammten aus der ersten Filialgeneration und die anderen 28 Männchen und 26 Weibchen aus der zweiten Filialgeneration. Bei allen Müttern war der Wurf $7,5 \pm 4,5$ Tage vor dem *social discrimination*-Test abgesetzt worden. Die übrigen 38 Männchen stammten aus der dritten Filialgeneration und waren sexuell naiv. Sie wurden im Alter von 14 ± 1 Wochen getestet. 29 dieser Versuchstiere hatten $1 \pm 0,5$ Wochen zuvor den operanten Verhaltenstest abgeschlossen.

Die verwendeten männlichen Jungtiere gehörten ebenfalls zum Auszuchtstamm WISTAR, Rj:HAN und waren entweder überzählige Jungtiere aus der Kontrollkammer oder direkt vom Züchter (Robert Janvier, Le Genest-St-Isle) im Absetzalter angeliefert. Sie waren zu Versuchsbeginn 25 ± 3 Tage alt und wurden für mehrere *social discrimination*-Tests eingesetzt. Die verwendeten Jungtiere hätten vom Alter her zwar potentiell eigene Nachkommen der Versuchstiere sein können, jedoch wurde darauf geachtet sie nicht mit eigenen männlichen Nachkommen zu testen. Pro Versuchstier wurden keine Geschwister verwendet.

3.7.2 Durchführung

Während der Versuchsdurchführung war das Oberlicht ausgeschaltet. Da eine Zusatzlampe angeschaltet war, herrschten auf dem Untersuchungstisch Lichtverhältnisse von 60 Lux. Der Versuch pro Versuchstier bestand aus zwei vierminütigen Tests, die im Abstand von 30 Minuten durchgeführt wurden. Um ein Männchen in seinem Heimatkäfig testen zu können, wurde der Käfigpartner vorübergehend in einen Extrakäfig (425x266x155 mm) mit Gitterdeckel gesetzt und die Pappöhre für den Versuch entfernt. Die Untersuchungen wurden mit

Einweggummihandschuhen durchgeführt, um eine Übertragung menschlicher Gerüche zu vermeiden. Nach der Entfernung des Partnertieres wurde ein männliches Jungtier eines Wurfes mit wasserfestem *permanent marker* Edding 300 mit einem farbigen Strich am Kopf markiert und zum Versuchstier in den Heimatkäfig gesetzt. Nach vier Minuten wurde das Jungtier wieder entfernt und das Partnertier zurückgesetzt. Während der vierminütigen Expositionszeit wurde die Schnüffeldauer des Versuchstieres am Jungtier mit dem PC-Programm EVENTLOG Event Recorder Version 1.0 (Robert Henderson 1986) mittels Laptop erfasst. Als Schnüffeln wurde der Abstand der Nase des Versuchstieres unter einem Zentimeter vom Jungtier entfernt definiert. Dieses war zumeist von deutlichen Nasenflügelbewegungen und typischen Schnüffelgeräuschen begleitet. Neben der Anogenitalkontrolle wurde das Beschnüffeln des Fells, der Mundregion und des Schwanzes beobachtet. Nach einer Wartezeit von 30 Minuten wurde für den zweiten Test erneut das erste Jungtier und dazu ein zweites Jungtier eines anderen Wurfes, diesmal mit einem entsprechenden farbigen Strich am Rücken markiert, für vier Minuten in den Heimatkäfig des Versuchstieres gesetzt. Die Schnüffelzeiten des Versuchstieres wurden auf dem Computer erfasst. Kurz zuvor waren wiederum Partnertier und Pappröhre für den Versuch entfernt worden. Nach Ablauf der vierminütigen Versuchszeit wurden die Ratten zurückgesetzt. Das Partnertier stand später selbst zum Testen zur Verfügung. Die Versuchsdurchführung für die Weibchen verlief analog, nur dass hier zwei Partnertiere vorhanden waren und diese dann entsprechend beide zusammen vorübergehend in einen Extrakäfig gesetzt wurden.

3.8 Auswertung

3.8.1 Auswertung der operanten Konditionierungsversuche

Konnten eine Tiergruppe oder Einzeltiere aufgrund technischen Versagens oder wegen Bedienungsfehler das geplante Verstärkungsprogramm nicht ordnungsgemäß erleben, so wurden die Daten dieser und der nachfolgenden Testnächte aussortiert. Somit entstanden unvollständige Datensätze. Von den 180 Versuchstieren wurden 154 Ratten vollständig ausgewertet. 14 Versuchstiere entfielen aus der Auswertung und von 22 Tieren lagen unvollständige Datensätze vor. Nach Konvertierung und entsprechender Aufbereitung der erfassten Rohdaten mittels kleiner modifizierbarer

PC-Programme (Skripts) erfolgte die Übertragung und Auswertung der Daten in Microsoft® Office Excel 2003. Die Daten der drei Filialgenerationen wurden pro Kammer zusammengefasst ausgewertet, da die Ratten unter denselben Bedingungen aufgewachsen und gehalten worden waren sowie im gleichen Alter den Konditionierungsversuch durchlaufen haben. Da jedoch zumeist ein Männchen und ein Weibchen der Versuchstiere pro Gruppe Geschwister waren, wurden die Geschlechter getrennt ausgewertet. Die statistische Analyse der Daten erfolgte im PC-Programm SigmaStat® for Windows Version 3.10 Systat Software, Inc. Das Signifikanzniveau wurde bei allen statistischen Tests auf $\alpha=0,05$ festgelegt. Die Normalverteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov Anpassungstest geprüft. Da die erfassten Daten nicht normalverteilt waren, wurden nicht-parametrische Testverfahren genutzt. Mehrere unabhängige Stichproben wurden mit der Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse geprüft und eventuelle post hoc Einzelvergleiche mit dem Dunn's Test durchgeführt. Bei der grafischen Darstellung in Box-Diagrammen wird eine Box unten durch das 25%-Quantil (1. Quartil) und oben durch das 75%-Quantil (3. Quartil) begrenzt und der Median (2. Quartil) durch eine waagerechte Linie gekennzeichnet. Die vertikalen Linien (*whiskers*) reichen zum 90%- bzw. 10%-Quantil. Die Punkte stellen Extremwerte dar. Bei zwei abhängigen Stichproben wie zum Beispiel beim Vergleich zweier aufeinander folgender Untersuchungs Nächte wurde auf den Wilcoxon Rangsummentest zurückgegriffen. Es konnten nur diejenigen Ratten verglichen werden von denen in beiden zu vergleichenden Untersuchungs Nächten Daten vorlagen. Bei zwei unabhängigen Stichproben wurde der Mann-Whitney U-Test angewendet. Für die Prüfung auf Zusammenhänge zwischen zwei Merkmalen wurde der Spearman Rang-Korrelationskoeffizient r_s ermittelt und auf Signifikanz überprüft. Die r_s -Werte können zwischen -1 und +1 liegen. Der Wert 0 bedeutet, dass keine Korrelation vorliegt. Der Wert +/-1 würde eine perfekte Korrelation darstellen. Bei einer negativen Korrelation wird das eine Merkmal kleiner je größer das andere Merkmal wird. Bei positiven Werten, also einer positiven Korrelation, wird ein Merkmal umso größer je größer das andere Merkmal wird. Die normalverteilten Körpergewichtszunahmen, im Zeitraum in der Woche vor bis nach dem Versuch, zwischen Ratten mit und ohne Versuchsteilnahme wurden mit dem Student's t-Test untersucht. Bei mehreren unabhängigen Stichproben wurde

eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) verwendet um die normalverteilten Körpergewichte bzw. Zunahmen zu vergleichen.

Die Auswertungen der einzelnen an- bzw. aus-Phasen und der statistische Vergleich zwischen den Ratten der drei Expositionskammern ergaben keine homogenen Ergebnisse. Dies ermöglichte keine schlüssigen zusätzlichen Erkenntnisse. Daher wurde weitestgehend auf eine detaillierte Darstellung der Auswertung einzelner Phasen verzichtet.

3.8.2 Auswertung der *social discrimination*-Tests

Die Daten der ersten beiden Filialgenerationen mit sexuell erfahrenen adulten Ratten wurden pro Kammer zusammengefasst. Die Geschlechter wurden jedoch getrennt ausgewertet. Die Daten der sexuell naiven jungen männlichen Versuchsratten der dritten Filialgeneration wurden von den anderen beiden Generationen getrennt ausgewertet. Die Summen der Schnüffelzeiten an den einzelnen Juvenilen pro vierminütigem Test wurden mit dem PC-Programm WinRat Evaluation of Action Data Version 2.30 (Heinz Barthelmes, Max-Planck Institut für Psychiatrie München) angezeigt und diese Daten in Microsoft® Office Excel 2003 übertragen und ausgewertet. Die statistische Analyse der Schnüffeldauern an den Jungtieren erfolgte mit dem PC-Programm SigmaStat® for Windows Version 3.10 Systat Software, Inc. Das Signifikanzniveau wurde bei allen statistischen Tests auf $\alpha=0,05$ festgelegt. Die Normalverteilung der Daten wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov Anpassungstest bestätigt und somit parametrische Testverfahren angewendet. Der Vergleich zwischen der Schnüffeldauer am wiederholt angebotenen und dem neuen Jungtier auf signifikante Unterschiede wurde mit dem t-Test für gepaarte Daten durchgeführt. Zur Prüfung auf Unterschiede zwischen den drei Kammern, also mehreren unabhängigen Stichproben, wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) eingesetzt und für post hoc Einzelvergleiche der Holm-Sidak Test verwendet. Bei zwei unabhängigen Stichproben wurde der Student's t-Test gewählt. Um eine eventuell vorhandene Abhängigkeit zwischen der Zeitdauer vom Absetzen der Nachkommen bis zum *social discrimination*-Test der Mütter und ihrem Verhalten im Versuch zu untersuchen, wurde der Spearman Rang-Korrelationskoeffizient r_s ermittelt und auf Signifikanz geprüft.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der operanten Konditionierungsversuche

4.1.1 Einfluss auf die Körpergewichtsentwicklung

In den Expositionskammern wurden auch Ratten für die späteren Untersuchungen der anderen Projektteilnehmer unter denselben Bedingungen wie die Ratten für die Verhaltensversuche gehalten. Die Gewichtsdaten dieser Tiere konnten daher herangezogen werden. In der Woche vor Beginn der operanten Konditionierungsversuche ergab der Vergleich der Gewichte zwischen den Kammern keine signifikanten Unterschiede sowohl bei den Männchen ($P=0,925$) als auch bei den Weibchen ($P=0,168$). Die Anzahl der dafür gewogenen Ratten pro Kammer und Geschlecht können Abbildung 4 entnommen werden.

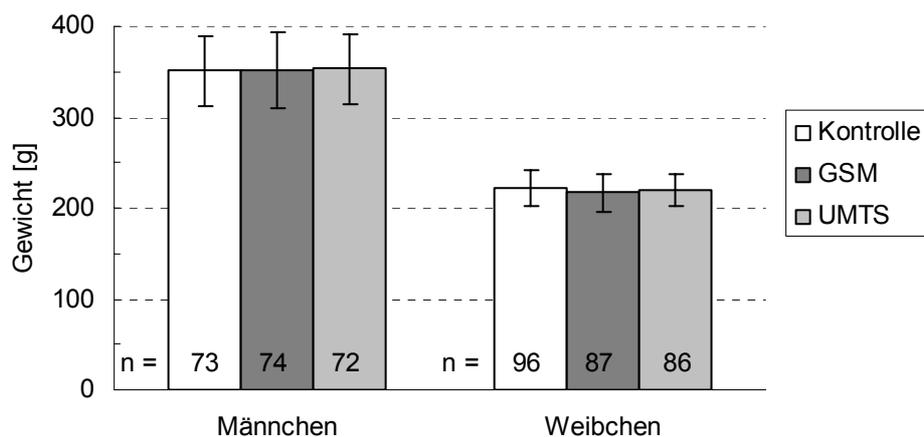


Abb. 4: Die Mittelwerte und Standardabweichung der Körpergewichte in Gramm von der Woche vor Beginn des operanten Konditionierungsversuches sind für männliche und weibliche Ratten, nach Kammern getrennt, dargestellt. Bei der Tierzahl (n) ist zu beachten, dass davon je 30 Ratten pro Kammer und Geschlecht für den Verhaltensversuch eingesetzt wurden.

Im Verlauf des Experiments nahmen die Tiere an Körpermasse zu. Möglicherweise beeinflussten die Futterbelohnungen der operanten Konditionierungsversuche die Gewichtsentwicklung. Die Zunahmen wurden zwischen Ratten mit und ohne Versuchsteilnahme innerhalb einer jeden Kammer verglichen. Die Untersuchung der Gewichtszunahmen ergab entweder keinen signifikanten Unterschied oder wie bei den befeldeten Weibchen eine signifikant höhere Gewichtszunahme bei den

Versuchsratten gegenüber den anderen Tieren. Die Gewichtsentwicklung wurde durch den Skinnerboxversuch nicht negativ beeinträchtigt. Die Angaben zur jeweilig verwendeten Tierzahl n, Mittelwerten (\pm Standardabweichung) und den p-Werten des Student's t-Tests enthält Tabelle 3.

Der Vergleich der Gewichtszunahmen zwischen den Tieren der drei Expositionskammern ergab sowohl bei den Ratten ohne Versuchsteilnahme (♂ $P=0,957$, ♀ $P=0,947$) als auch bei den Ratten aus dem Skinnerboxversuch (♂ $P=0,671$, ♀ $P=0,078$) keine signifikanten Unterschiede.

Tab. 3: Mittlere Körpergewichtszunahmen (\pm Standardabweichung) in Gramm in der Woche vor bis zur Woche nach dem Konditionierungsversuch. n=Tierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Gewichtszunahme [g]	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle	GSM	UMTS	Kontrolle	GSM	UMTS
Gruppe mit Versuch	84 \pm 22 n=29	79 \pm 19 n=29	82 \pm 17 n=25	30 \pm 16 n=29	37 \pm 10 n=29	36 \pm 10 n=25
Gruppe ohne Versuch	79 \pm 24 n=43	79 \pm 24 n=44	77 \pm 24 n=42	28 \pm 11 n=66	29 \pm 10 n=57	29 \pm 9 n=56
P=	0,375	0,904	0,427	0,165	<0,001	0,004

4.1.2 Gleichwertigkeit der beiden Hebel einer Skinnerbox

In jeder Skinnerbox befanden sich zwei funktionstüchtige Hebel. Diese waren zu beiden Seiten des mittig angebrachten Futterschälchens angeordnet. Es stellte sich die Frage, ob die Versuchstiere derselben Skinnerbox einen der beiden Hebel spontan bevorzugten bzw. mieden. Dies würde darauf hindeuten, dass zu Beginn des Versuchs nicht beide Hebel für die Versuchstiere gleichwertig waren. Um diese Fragestellung zu beantworten, wurde jeweils der zuerst getätigte Hebeldruck in der Trainingstestnacht betrachtet und die prozentuale Verteilung für die Betätigung des linken bzw. rechten Hebels innerhalb einer Skinnerbox errechnet. Sollten beide Hebel einer Box anfangs gleich attraktiv bzw. interessant sein, so würde man eine annähernde Zufallsverteilung der links- bzw. rechtsseitigen Ersthebeldrücke erwarten. Es zeigte sich, dass in keiner Skinnerbox ein Hebel spontan von allen Versuchstieren derselben Box bevorzugt oder gemieden wurde. Somit konnte eine Gleichwertigkeit der beiden Hebel in den Skinnerboxen angenommen werden. In Abbildung 5 ist die in den Trainingstestnächten ermittelte prozentuale Verteilung des zuerst gedrückten Hebels, auf die einzelne Box bezogen, dargestellt.

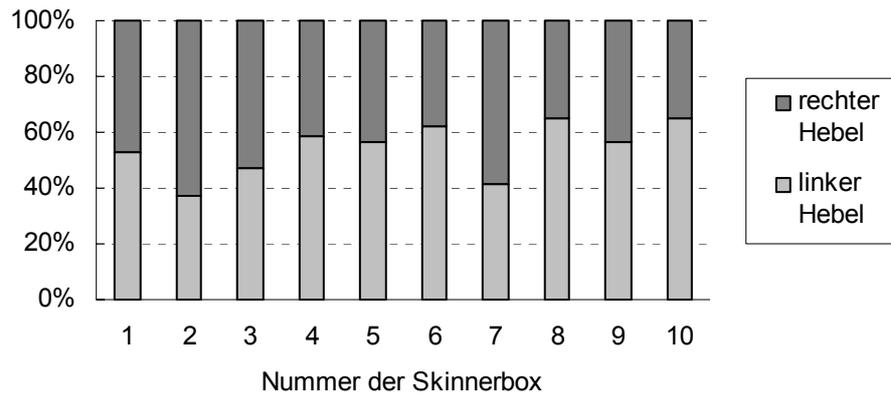


Abb. 5: Die prozentuale Verteilung des ersten Hebeldrucks (linker oder rechter Hebel der Skinnerbox) in der Trainingsnacht ist für die Kammern zusammengefasst dargestellt. In den Skinnerboxen 1 bis 5 wurden männliche und in den Boxen 6 bis 10 weibliche Ratten getestet. Für die Boxen 1, 3, 4, 7, 8 und 10 wurden 17 Tiere bzw. Ersthebeldrücke und für die Boxen 2, 5, 6 und 9 wurden 16 Ratten bzw. Ersthebeldrücke ausgewertet.

4.1.3 Latenzzeit

Die Latenzzeit ist die Zeitspanne von Testbeginn bis zum ersten Hebeldruck des Versuchstieres. Die Versuchstiere begannen im Allgemeinen mit dem Drücken der Hebel selten unmittelbar nach Versuchsbeginn. In der Trainingsnacht begannen $71 \pm 12\%$ der Versuchstiere mit dem Drücken der Hebel innerhalb der ersten an-Phase. In den darauf folgenden Testnächten waren es $88 \pm 12\%$. Die Mittelwerte (\pm Standardabweichung) der Latenzzeit in Minuten sind für jede Untersuchungsnacht, nach Geschlechtern und Kammern getrennt, in Tabelle 10 im Anhang aufgelistet. Der Vergleich der Tiere der drei Kammern untereinander ergab in der vorletzten Testnacht einen signifikanten Unterschied ($P=0,014$). Laut post hoc Dunn's Test fingen die Weibchen aus der UMTS-Kammer signifikant früher an die Hebel zu betätigen als die Weibchen aus der Kontrollkammer. In den restlichen Untersuchungs Nächten zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls in Tabelle 10 im Anhang aufgeführt.

Vergleiche der Latenzzeiten zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben vereinzelt signifikante Unterschiede. In der ersten Testnacht war die Latenzzeit der Ratten bis auf die der Tiere der UMTS-Kammer signifikant kürzer als in der Trainingsnacht (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P=0,001$; GSM 24 ♂ $P=0,017$ und 24 ♀ $P<0,001$; UMTS 20 ♂ $P=0,123$ und 20 ♀

P=0,245). In der zweiten Testnacht gab es verglichen zur ersten Testnacht keine signifikanten Unterschiede in der Latenzzeitlänge (Kontrolle 29 ♂ P=0,795 und 29 ♀ P=0,411; GSM 23 ♂ P=0,323 und 24 ♀ P=0,149; UMTS 20 ♂ P=0,596 und 19 ♀ P=0,225). In der dritten Testnacht war die Latenzzeit der Kontrollweibchen signifikant länger und die der UMTS-befeldeten Weibchen signifikant kürzer als in der vorangegangenen Testnacht. Die Latenzzeiten der restlichen Tiere waren in beiden Testnächten ähnlich lang (Kontrolle 29 ♂ P=0,147 und 29 ♀ P=0,038; GSM 28 ♂ P=0,516 und 29 ♀ P=0,914; UMTS 25 ♂ P=0,518 und 24 ♀ P=0,020). In der letzten Testnacht, verglichen zur vorletzten, war die Latenzzeit der GSM-bestrahlten Männchen und der Kontrollweibchen signifikant kürzer. Die Latenzzeiten der übrigen Ratten waren in beiden Testnächten ähnlich lang (Kontrolle 29 ♂ P=0,309 und 29 ♀ P=0,020; GSM 28 ♂ P=0,011 und 29 ♀ P=0,331; UMTS 25 ♂ P=0,053 und 24 ♀ P=0,989).

4.1.4 Gesamtzahl der Hebeldrücke

Um zu prüfen ob die Kontrolltiere und die in den Kammern befeldeten Ratten eine ähnliche Anzahl von Hebeldrücken während der Untersuchungs Nächte erbracht hatten, wurden die Gesamthebeldruckzahlen der Tiere der drei Kammern untereinander getestet. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ratten der drei Kammern außer in der letzten Testnacht (Wiederholung des DRL 16 Verstärkungsplans) bei den weiblichen Versuchstieren (P=0,005). Der daraufhin durchgeführte post hoc Dunn's Test ergab, dass die Weibchen der GSM-Kammer signifikant mehr Hebeldrücke in dieser Testnacht ausgeführt hatten als die Rattenweibchen der Kontroll- sowie der UMTS-Kammer. Zwischen den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer fand sich kein signifikanter Unterschied. In Tabelle 11 im Anhang sind die Mittelwerte (\pm Standardabweichung) für die Männchen und Weibchen nach Kammern und Untersuchungs Nächten getrennt aufgelistet. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls verzeichnet. In Abbildung 6 sind die Gesamthebeldruckzahlen pro Untersuchungs nacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

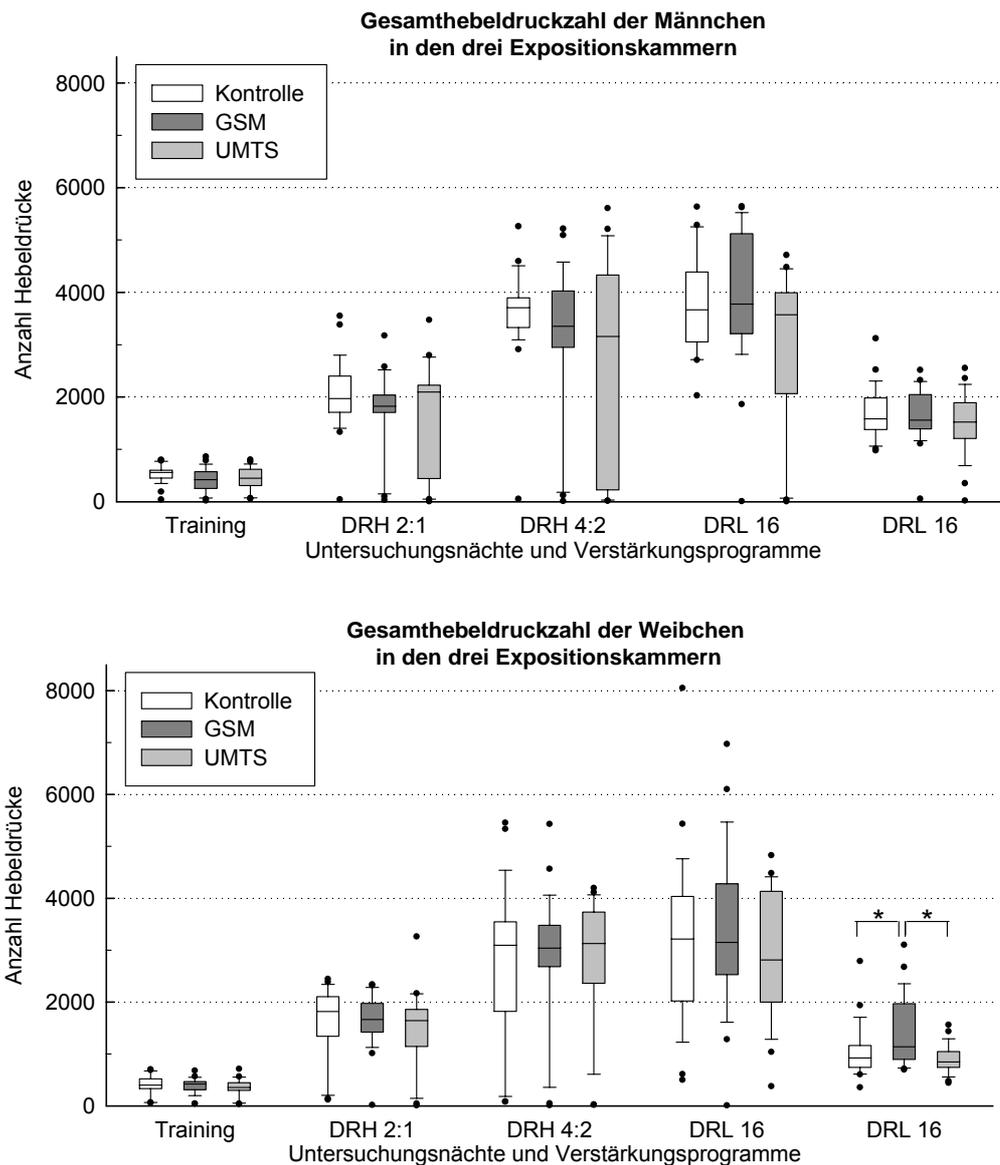


Abb. 6: Gesamthebeldruckzahlen der Männchen (oberes Diagramm) und der Weibchen (unteres Diagramm) pro Untersuchungsnacht. Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit einem * gekennzeichnet. Die Tierzahl n ist Tabelle 11 im Anhang zu entnehmen.

Betrachtete man die Gesamthebeldrücke der Trainingsnacht und der ersten Testnacht mit dem DRH 2:1 Verstärkungsplan, so zeigte sich bei den Versuchstieren eine signifikant höhere Hebeldruckgesamtzahl in der Testnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 24 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$; UMTS 20 ♂ $P < 0,001$; 20 ♀ $P < 0,001$). Im Mittel fand sich eine Steigerung der Hebeldruckgesamtzahl um das Vierfache. Im Vergleich zwischen erster und zweiter Testnacht, in der die Testanforderung von zwei Hebeldrücken pro Sekunde auf vier Hebeldrücke

innerhalb von zwei Sekunden erhöht worden war, wurde eine signifikante Erhöhung der Gesamthebeldrücke in der zweiten Testnacht, im Durchschnitt fast eine Verdopplung, beobachtet (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 23 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$; UMTS 20 ♂ $P < 0,001$ und 19 ♀ $P < 0,001$). Der Vergleich zwischen dritter und zweiter Testnacht, also dem erstmaligen Verwenden des DRL 16 Verstärkungsplans, ergab keinen einheitlichen Trend der Veränderung der Gesamthebeldruckzahl. Die Männchen der GSM-Kammer erhöhten die Zahl ihrer Hebeldrücke in der ersten DRL 16 Testnacht. Bei den restlichen Versuchstieren zeigten sich in beiden Testnächten ähnliche Werte (Kontrolle 29 ♂ $P = 0,754$ und 29 ♀ $P = 0,105$; GSM 28 ♂ $P = 0,006$ und 29 ♀ $P = 0,063$; UMTS 25 ♂ $P = 0,154$ und 24 ♀ $P < 0,830$). Verglich man die Werte der dritten und vierten Testnacht miteinander, so zeigte sich, dass die Ratten den Hebel in der letzten Testnacht signifikant weniger oft betätigten (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Im Mittel drückten die Versuchstiere in der letzten Testnacht circa halb so oft wie in der sechs Tage zurückliegenden Testnacht.

Einzelne Individuen beider Geschlechter fielen durch eine vergleichsweise sehr niedrige Hebeldruckgesamtzahl auf. Es waren zum Beispiel unter 100 oder unter 10 Hebeldrücke in einer Untersuchungsnacht. Insgesamt 28 Ratten, also 17% der 166 ausgewerteten Versuchstiere, zeigten in einigen Untersuchungs Nächten auffallend wenige Hebeldrücke. 29% (8 Tiere) dieser Versuchstiere waren aus der Kontrollkammer, 32% (9 Tiere) stammten aus der GSM-Kammer und 39% (11 Tiere) aus der UMTS-Kammer. In den Testnächten mit den DRH-Verstärkungsplänen fielen einzelne Ratten deutlich öfter auf als in den letzten beiden Testnächten mit dem DRL 16 Verstärkungsplan. Bei drei Ratten war ausschließlich in der Trainingsnacht die Hebeldruckgesamtzahl auffallend gering. Vier Ratten erbrachten in allen fünf Untersuchungs Nächten vergleichsweise deutlich wenige Hebeldrücke.

4.1.5 Anzahl der Hebeldrücke in den an- und aus-Phasen

Verglich man die Zahl der Hebeldrücke in den zehn an-Phasen einer Untersuchungsnacht zwischen den Tieren der drei Expositionskammern, so erhielt man in der letzten Testnacht einen signifikanten Unterschied ($P = 0,004$). Der daraufhin durchgeführte post hoc Dunn's Test ergab, dass die Weibchen der GSM-Kammer

signifikant mehr Hebeldrücke in dieser Testnacht in den an-Phasen ausgeführt hatten als die Weibchen der Kontroll- sowie der UMTS-Kammer. Zwischen den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer fand sich kein signifikanter Unterschied. Tabelle 12 im Anhang enthält die Mittelwerte (\pm Standardabweichung) der Hebeldruckanzahlen der an-Phasen, für die Untersuchungs Nächte und Geschlechter getrennt aufgeführt. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls verzeichnet. In Abbildung 7 sind die Hebeldruckzahlen der an-Phasen pro Untersuchungs nacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt jeweils die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

Vergleiche der Hebeldruckzahlen der an-Phasen zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben ähnliche Ergebnisse wie bei den Gesamthebeldruckzahlen. In der ersten Testnacht erbrachten die Versuchstiere eine signifikant höhere Hebeldruckzahl in den an-Phasen verglichen zur Trainingsnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 24 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$; UMTS 20 ♂ $P < 0,001$ und 20 ♀ $P < 0,001$). Es handelte sich dabei im Mittel um eine Steigerung der Hebeldruckzahl um das Vier- bis Fünffache. Auch zwischen der DRH 2:1 und der DRH 4:2 Testnacht wurde eine signifikante Erhöhung, durchschnittlich fast eine Verdopplung der Hebeldrücke in den an-Phasen in der zweiten Testnacht beobachtet (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 23 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$; UMTS 20 ♂ $P < 0,001$ und 19 ♀ $P < 0,001$). Der Vergleich zwischen dritter und zweiter Testnacht ergab keine signifikanten Unterschiede der Hebeldruckzahlen (Kontrolle 29 ♂ $P = 0,154$ und 29 ♀ $P = 0,180$; GSM 28 ♂ $P = 0,198$ und 29 ♀ $P = 0,210$; UMTS 25 ♂ $P = 0,628$ und 24 ♀ $P < 0,786$). Verglich man die Werte der beiden DRL 16 Testnächte miteinander, so zeigte sich, dass die Ratten den Hebel in der letzten Testnacht signifikant weniger oft betätigten (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Im Mittel drückten die Versuchstiere in der letzten Testnacht in den an-Phasen circa halb so oft oder noch seltener als in der vorletzten Testnacht.

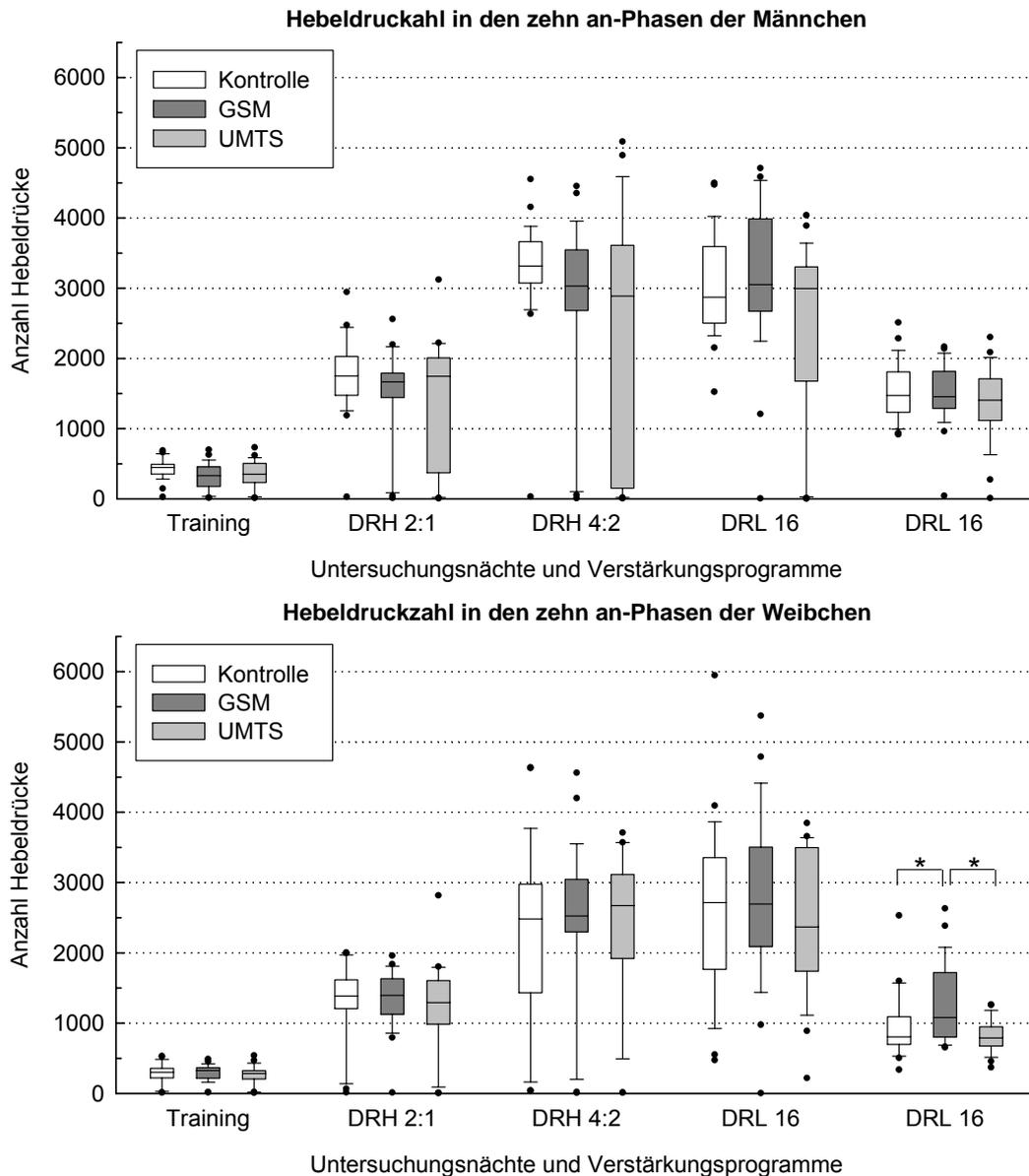


Abb. 7: Hebeldruckzahlen der zehn an-Phasen der Männchen (oberes Diagramm) und Weibchen (unteres Diagramm) pro Untersuchungsnacht. Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit einem * gekennzeichnet. Die Tierzahl n ist Tabelle 12 im Anhang zu entnehmen.

Hebeldrücke in den aus-Phasen blieben unbelohnt. Die ausbleibende Verstärkung sollte in den aus-Phasen zu einer deutlich geringeren Hebeldruckanzahl als in den an-Phasen führen. Der Vergleich zwischen der Hebeldruckzahl der an- und der aus-Phasen ergab für die Versuchstiere aller Kammern in allen Untersuchungs Nächten bei beiden Geschlechtern signifikante Unterschiede ($P < 0,001$). Das heißt, dass die

Ratten im Durchschnitt in den an-Phasen signifikant mehr Hebeldrücke als während der aus-Phasen erbrachten.

Untersuchte man die Zahl der in den zehn aus-Phasen geleisteten Hebeldrücke hinsichtlich auf Unterschiede zwischen den Tieren der Expositionskammern, so erhielt man in der dritten Testnacht einen signifikanten Unterschied ($P=0,002$). Der daraufhin durchgeführte post hoc Dunn's Test zeigte auf, dass die Männchen der UMTS-Kammer signifikant weniger Hebeldrücke in den aus-Phasen dieser Testnacht erbrachten als die Männchen der Kontroll- sowie der GSM-Kammer. Zwischen den Männchen der Kontroll- und GSM-Kammer ergab sich kein signifikanter Unterschied. Tabelle 13 im Anhang enthält die Mittelwerte (\pm Standardabweichung) der Hebeldruckzahlen der aus-Phasen, für die Untersuchungs Nächte und Geschlechter getrennt aufgeführt. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls verzeichnet. In Abbildung 8 sind die Hebeldruckzahlen der aus-Phasen pro Untersuchungs nacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt jeweils die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

Vergleiche der Hebeldruckzahlen der aus-Phasen zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben ähnliche Ergebnisse wie bei den Gesamthebeldruckzahlen. In der ersten Testnacht zeigten die Ratten eine signifikant höhere Hebeldruckzahl in den aus-Phasen, circa dreimal so viel, verglichen zur Trainingsnacht (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; GSM 24 ♂ $P<0,001$ und 24 ♀ $P<0,001$; UMTS 20 ♂ $P=0,004$ und 20 ♀ $P<0,001$). In der zweiten DRH-Testnacht wurde verglichen zu ersten DRH-Testnacht eine signifikante Erhöhung der Hebeldruckzahl in den aus-Phasen bei den Männchen der GSM-Kammer, den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer sowie tendenziell bei den Weibchen der GSM-Kammer festgestellt. Die Männchen der Kontroll- und UMTS-Kammer zeigten in beiden Testnächten vergleichsweise ähnliche Werte (Kontrolle 29 ♂ $P=0,370$ und 29 ♀ $P=0,031$; GSM 23 ♂ $P=0,001$ und 24 ♀ $P=0,052$; UMTS 20 ♂ $P=0,475$ und 19 ♀ $P=0,018$). In der ersten DRL 16 Testnacht betätigten die Männchen und die GSM-befeldeten Weibchen den Hebel signifikant häufiger als in der DRH 4:2-Testnacht. Die Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer erbrachten ähnliche Hebeldruckzahlen in beiden Testnächten (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P=0,103$; GSM 28 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P=0,003$; UMTS 25 ♂ $P=0,002$ und 24 ♀

$P < 0,920$). Vergleich man die Werte der dritten und vierten Testnacht miteinander, so betätigten die Ratten den Hebel in der letzten Testnacht signifikant seltener (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Im Mittel drückten die Ratten in der letzten Testnacht in den aus-Phasen circa einviertel bis einfüntel mal so oft wie in den aus-Phasen der vorletzten Testnacht.

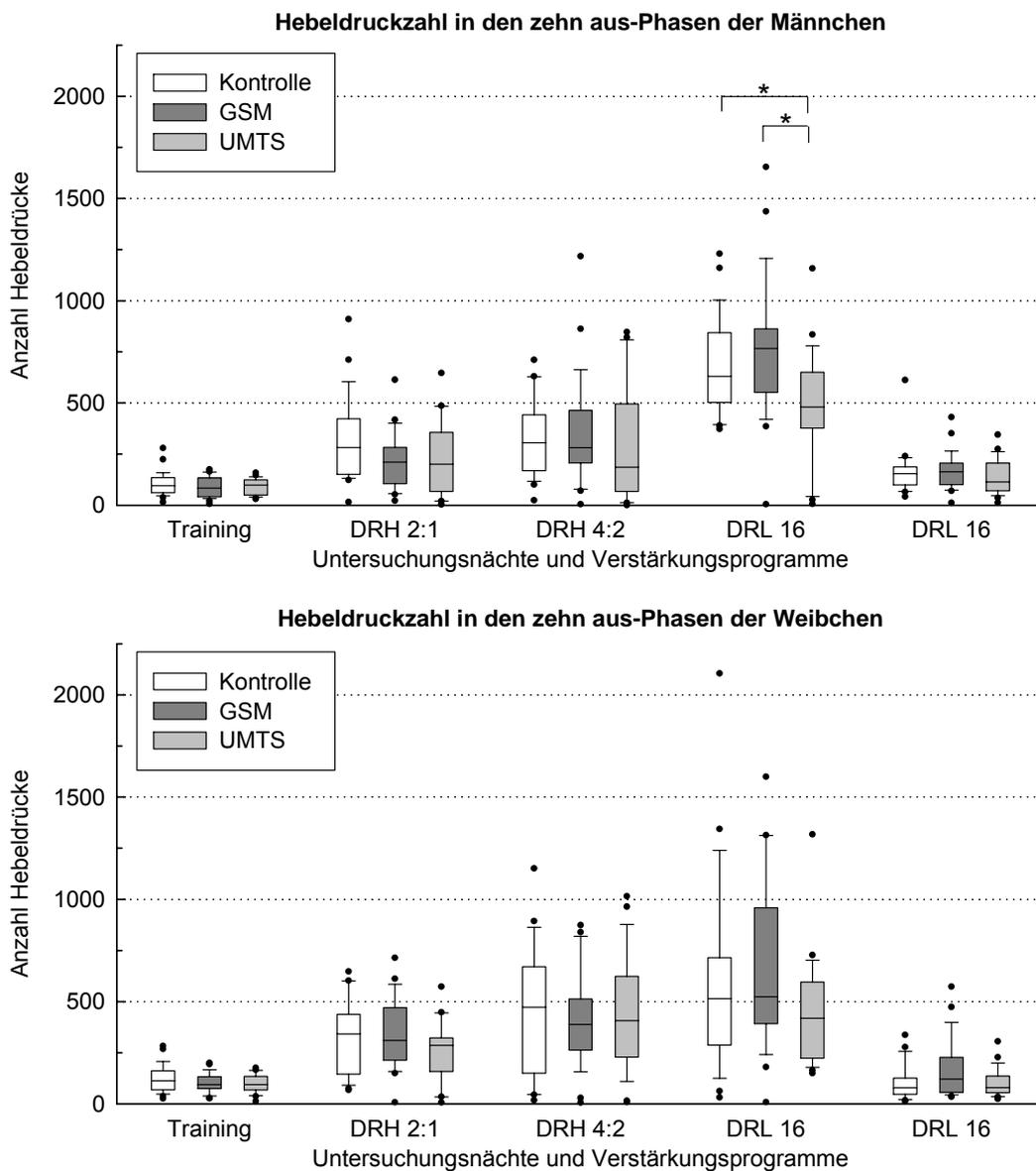


Abb. 8: Hebeldruckzahlen der zehn aus-Phasen der Männchen (oberes Diagramm) und Weibchen (unteres Diagramm) pro Untersuchungsnacht. Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit einem * gekennzeichnet. Die Versuchstierzahl n ist Tabelle 13 im Anhang zu entnehmen.

4.1.6 Verhältnis der Hebeldruckzahl von aus- zu an-Phasen

Bildete man das Verhältnis:

Hebeldruckzahl der aus-Phasen / Hebeldruckzahl der an-Phasen

ließen sich die Tiere der Expositionsammern unabhängig von der absoluten Hebeldruckzahl vergleichen. Der Wert 0 bedeutet, dass die Hebel ausschließlich in den an-Phasen und nicht in den aus-Phasen betätigt worden sind. Bei 0,5 hätten die Ratten in den zehn an-Phasen doppelt so oft gedrückt wie in den zehn aus-Phasen. Der Wert 1 bedeutet, dass in den einstündigen aus-Phasen ebenso viele Hebeldrücke wie in den halbstündigen an-Phasen getätigt wurden. Hätten die Ratten unabhängig von den Phasen gleichmäßig oft gedrückt, so würde sich ein Wert von 2 ergeben, da die aus-Phasen doppelt so lang wie die an-Phasen waren. Ein höherer Wert würde entsprechend anzeigen, dass häufigeres Hebeldrücken in den aus-Phasen als in den an-Phasen erfolgte. In Tabelle 4 ist das gemittelte Verhältnis der Hebeldruckzahl der aus-Phasen zur Anzahl der Hebeldrücke der an-Phasen dargestellt. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls aufgelistet. Bei den Weibchen in der dritten Testnacht mit dem Verstärkungsplan DRL 16 gab es einen signifikanten Unterschied ($P=0,013$). Der post hoc Dunn's Test ergab, dass sich das Hebeldruckverhältnis zwischen den Weibchen der GSM- und UMTS-Kammer signifikant unterschied. Die Beachtung der an- bzw. aus-Phasen der Weibchen aus der GSM-Kammer war signifikant schlechter als die der Weibchen der UMTS-Kammer. Gegenüber den Kontrollweibchen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. In den restlichen Untersuchungs Nächten zeigten sich bei beiden Geschlechtern keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tieren der drei Kammern.

Tab. 4: Mittleres Verhältnis der Hebeldrücke von aus- zu an-Phasen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Je geringer der Wert, desto besser die Phasenbeachtung. Der statistische Vergleich zwischen den Kammern wurde mittels Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse vorgenommen. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der vorletzten Testnacht zwischen den Weibchen der GSM- und UMTS-Kammer. n=Versuchstierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	0,27 \pm 0,18 n=29	0,19 \pm 0,12 n=29	0,13 \pm 0,14 n=29	0,23 \pm 0,07 n=29	0,10 \pm 0,04 n=29
GSM	0,42 \pm 0,39 n=29	0,32 \pm 0,49 n=24	0,21 \pm 0,28 n=28	0,29 \pm 0,22 n=28	0,11 \pm 0,05 n=28
UMTS	0,58 \pm 0,98 n=25	0,32 \pm 0,47 n=20	0,33 \pm 0,68 n=25	0,35 \pm 0,54 n=25	0,16 \pm 0,29 n=25
P=	0,120	0,755	0,259	0,310	0,397
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	0,76 \pm 1,12 n=29	0,56 \pm 1,36 n=29	0,28 \pm 0,27 n=29	0,21 \pm 0,09 n=29	0,11 \pm 0,08 n=29
GSM	0,46 \pm 0,44 n=29	0,27 \pm 0,17 n=24	0,26 \pm 0,28 n=29	0,50 \pm 1,44 n=29	0,12 \pm 0,06 n=29
UMTS	0,74 \pm 1,40 n=25	0,54 \pm 1,03 n=20	0,26 \pm 0,26 n=24	0,19 \pm 0,13 n=24	0,12 \pm 0,06 n=24
P=	0,281	0,434	0,630	0,013	0,522

Vergleiche der Phasenbeachtung über das Hebeldruckverhältnis von aus- zu an-Phasen zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben einige signifikante Unterschiede. In der ersten Testnacht war die Beachtung der unterschiedlichen Phasen außer bei den UMTS-befeldeten Männchen signifikant besser als in der Trainingsnacht (Kontrolle 29 ♂ P=0,013 und 29 ♀ P<0,001; GSM 24 ♂ P=0,008 und 24 ♀ P=0,009; UMTS 20 ♂ P=0,123 und 20 ♀ P=0,008). In der zweiten DRH-Testnacht zeigten die Kontrollmännchen eine bessere Phasenbeachtung verglichen zur vorangegangenen DRH 2:1 Testnacht. Bei den Kontrollweibchen ließ sich eine Tendenz zur besseren Phasenbeachtung finden. Die übrigen Versuchstiere zeigten in beiden DRH-Testnächten ähnliche Werte (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P=0,054; GSM 23 ♂ P=0,140 und 24 ♀ P=0,113; UMTS 20 ♂ P=0,701 und 19 ♀ P=0,395). In der ersten DRL 16 Testnacht war die Phasenbeachtung der Männchen der Kontroll- und GSM-Kammer signifikant schlechter als in der vorangegangenen DRH 4:2 Testnacht. Bei den GSM-befeldeten Weibchen ließ sich eine Tendenz zu einer schlechteren Phasenbeachtung finden. Die übrigen Versuchstiere zeigten in beiden Testnächten ähnliche Werte (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P=0,436; GSM 28 ♂ P=0,001 und 29 ♀ P=0,054; UMTS 25

♂ P=0,502 und 24 ♀ P=0,119). In der Testnacht mit dem wiederholt angebotenen DRL 16 Verstärkungsplan war die Beachtung der an- und aus-Phasen stets signifikant besser verglichen zur sechs Tage zuvor vorangegangenen DRL 16 Testnacht (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; GSM 28 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; UMTS 25 ♂ P<0,001 und 24 ♀ P<0,001).

Allgemein ließ sich also oftmals über die Untersuchungs Nächte hinweg eine im Mittel zunehmende Konzentration der Hebeldruckzahl auf die an-Phasen erkennen. Die aus-Phasen wurden zunehmend von den Ratten berücksichtigt. Die höchste Hebeldruckaktivität fand sich vor allem in den an-Phasen. In der dritten Testnacht zeigte sich zum Teil eine Verschlechterung des Hebeldruckverhältnisses, welches sich dann in der letzten Testnacht wieder sprunghaft besserte. Eine exakte Beachtung der Phasen durch die Ratten und damit vollständige Unterdrückung der Hebeldruckaktivität in den aus-Phasen wurde nicht erzielt. Dies verdeutlicht auch Abbildung 9 in welcher die durchschnittliche prozentuale Verteilung der Hebeldrücke auf die an- und aus-Phasen für die einzelnen Expositionskammern dargestellt ist. Hierfür wurde der prozentuale Anteil der Hebeldrücke in den an-Phasen bzw. in den aus-Phasen an allen Hebeldrücken der gesamten Untersuchungs nacht errechnet:

$$\text{Anteil Hebeldrücke in den an-Phasen in \%} = \text{Hd-an} \times 100 / \text{Hd-ges}$$
$$\text{Anteil Hebeldrücke in den aus-Phasen in \%} = \text{Hd-aus} \times 100 / \text{Hd-ges.}$$

Hd-an = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen

Hd-aus = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen

Hd-ges = Anzahl aller Hebeldrücke einer Untersuchungs nacht

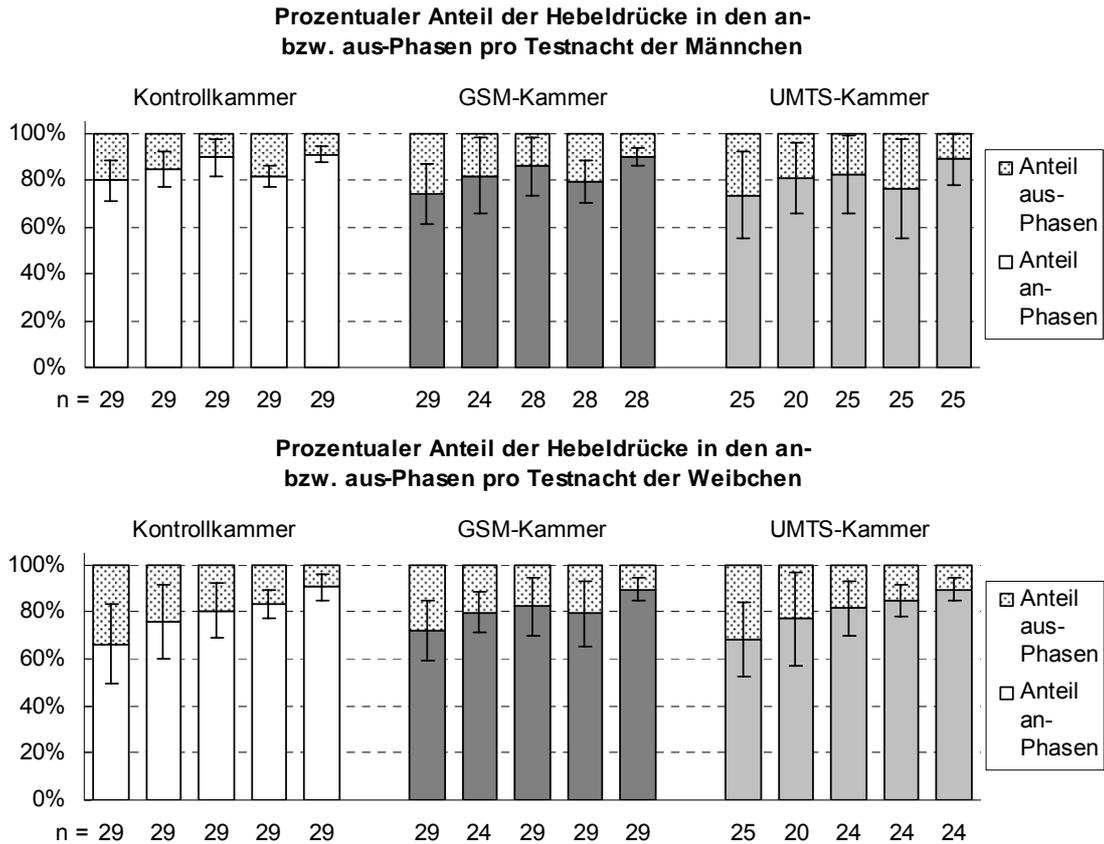


Abb. 9: Mittlere prozentuale Verteilung (\pm Standardabweichung) der Hebeldrücke auf die an- und aus-Phasen der männlichen (oberes Diagramm) und weiblichen (unteres Diagramm) Ratten aus den drei Expositionskammern an den fünf Untersuchungs Nächten. n=Tierzahl.

4.1.7 Aktivitätsmuster

Um den Aktivitätsrhythmus der Versuchstiere einzuschätzen, stand die Hebeldruckaktivität zur Verfügung. Dafür wurde die prozentuale Verteilung der Zahl der Hebeldrücke in den an- bzw. aus-Phasen auf die jeweils zehn Phasen berechnet:

$$\text{Aktivität in Prozent in den an-Phasen} = \text{Hd-an-Phase} \times 100 / \text{Hd-an}$$

$$\text{Aktivität in Prozent in den aus-Phasen} = \text{Hd-aus-Phase} \times 100 / \text{Hd-aus.}$$

Hd-an-Phase = Hebeldruckzahl in einer 30minütigen an-Phase

Hd-aus-Phase = Hebeldruckzahl in einer 60minütigen aus-Phase

Hd-an = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen

Hd-aus = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen

Die Werte wurden für alle Untersuchungs Nächte für beide Geschlechter ermittelt und über die Untersuchungs Nächte hinweg gemittelt. Die Kammern wurden hierbei zusammengefasst. Bei einer über die Untersuchungs nacht gleichmäßig verteilten Aktivität sollten die Werte in jeder Phase bei circa zehn Prozent liegen. Wie man auf Abbildung 10 für die Männchen und Abbildung 11 für die Weibchen ersehen kann, war die Aktivität nicht gleichmäßig auf die an- bzw. aus-Phasen verteilt. Man konnte bei den Ratten ein Maximum an Hebeldruckaktivität vor allem in an-Phase 4 und aus-Phase 3 erkennen. Ein Minimum ließ sich in an-Phase 9 und zwei Hebeldruckaktivitätsminima in aus-Phase 8 und 10 erkennen. Die Ratten waren also zwischen 19:30 Uhr und 21:00 Uhr MEZ, wobei die an-Phase von 20:30 Uhr bis 21:00 Uhr MEZ andauerte, im Versuch am aktivsten. Ein Aktivitätsanstieg war bei den Männchen in der 3. an-Phase, also von 19:00 bis 19:30 Uhr erkennbar. Dies entsprach dem zeitlichen Beginn der Dunkelphase in den Expositions kammern und damit dem üblichen Aktivitätsbeginn der nachtaktiven Tiere. Die Weibchen zeigten schon früher, nämlich in an-Phase 2 (17:30 Uhr bis 18:00 Uhr MEZ) einen Anstieg der Hebeldruckaktivität. Die geringste Aktivität zeigten die Tiere von 03:00 Uhr bis 04:30 Uhr MEZ (aus-Phase von 03:00 Uhr bis 04:00 Uhr MEZ) sowie von 06:00 bis 07:00 Uhr MEZ (aus-Phase 10). In der letzten an-Phase (05:30 Uhr bis 06:00 Uhr MEZ) war ein leichter Anstieg der Aktivität zu erkennen. Eine Stunde vor Anschalten des Lichts lag die letzte aus-Phase, in welcher die Ratten keine Futterbelohnungen erarbeiten konnten. Ein zweites Maximum an Futteraufnahme gegen Ende der Aktivitätszeit, wie es typisch für nachtaktive Tiere ist (Strubbe & Woods 2004), war nicht möglich. Allgemein zeigte sich eine stärkere Aktivität der Versuchstiere in den ersten sechs Stunden des Versuches. Diese ließ ab circa 22:00 Uhr MEZ für die folgenden neun Stunden nach.

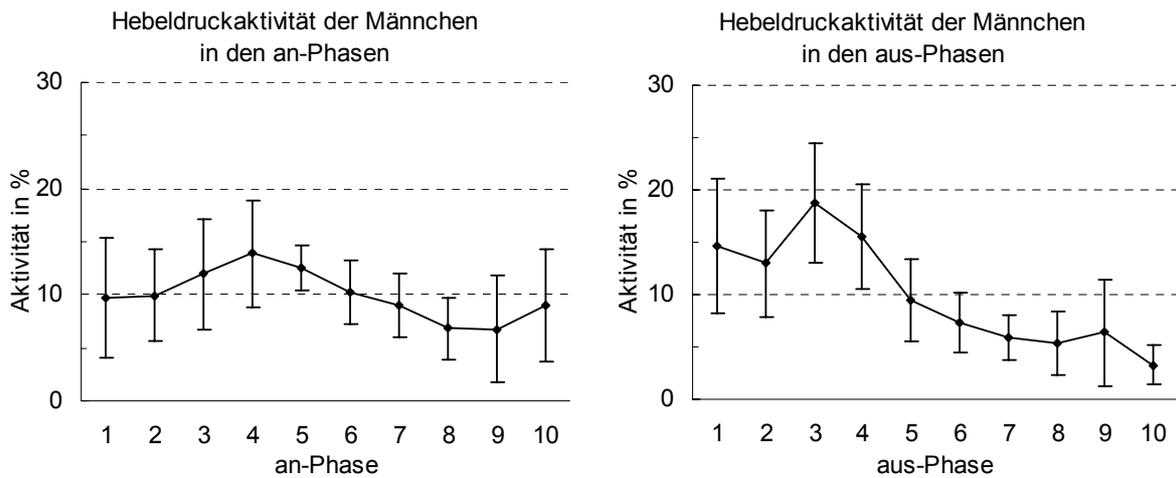


Abb. 10: Die über alle Untersuchungsächte gemittelte prozentuale Verteilung der Hebeldruckaktivität (\pm Standardabweichung) der Männchen in den zehn an-Phasen (linkes Diagramm) und aus-Phasen (rechtes Diagramm) ist für die drei Expositionskammern zusammengefasst dargestellt.

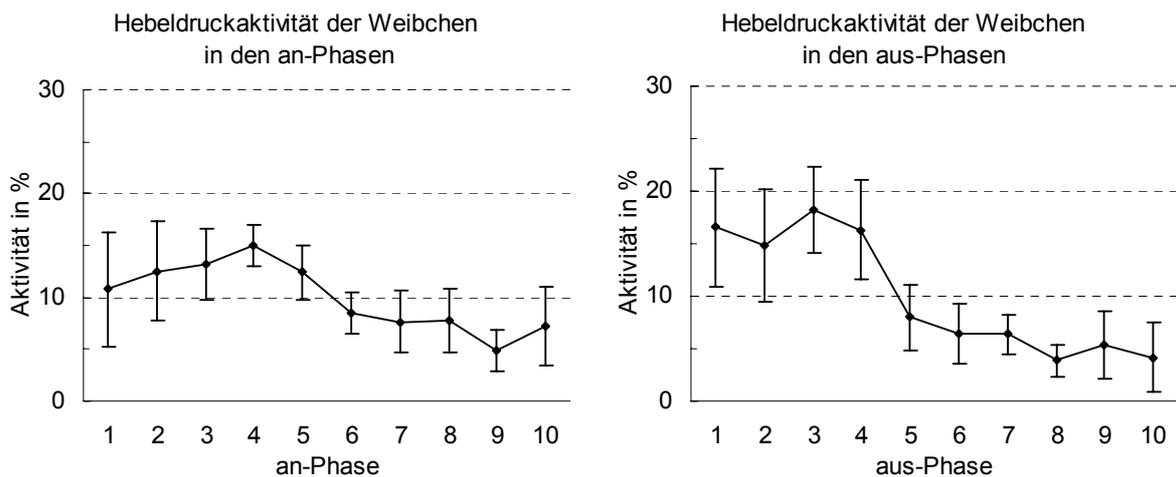


Abb. 11: Die über alle Untersuchungsächte gemittelte prozentuale Verteilung der Hebeldruckaktivität (\pm Standardabweichung) der Weibchen in den zehn an-Phasen (linkes Diagramm) und aus-Phasen (rechtes Diagramm) ist für die drei Expositionskammern zusammengefasst dargestellt.

4.1.8 Leistung und Effizienz

Die Hebeldrücke, auf die eine Belohnung in Form eines Futterkügelchens erfolgte, wurden als belohnte Hebeldrücke bezeichnet. Unbelohnte Hebeldrücke (zum Beispiel die ersten drei von insgesamt vier erwarteten Hebeldrücken), die für das Erzielen eines belohnten Hebeldrucks nötig waren, waren keine falschen Hebeldrücke an sich. Die Anzahl „falscher“ bzw. unbelohnter Hebeldrücke wurde

daher je nach Verstärkungsplan korrigiert. Betrachtet wurden ausschließlich die an-Phasen, weil nur in diesen auch tatsächlich Belohnungen erarbeitet werden konnten. Drückte ein Versuchstier in den an-Phasen nicht, so konnte keine Leistung ermittelt werden. Allgemein berechnete sich die Leistung in Prozent nach folgender Formel:

$$\text{Leistung (\%)} = B \times N \times 100 / \text{Hd-an.}$$

B = Anzahl der erzielten Belohnungen bzw. belohnte Hebeldrücke

N = Anzahl nötiger Hebeldrücke für eine Futterbelohnung

Hd-an = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen

Für eine Belohnung beim Verstärkungsplan DRH 2:1 waren zwei Hebeldrücke und bei DRH 4:2 waren vier Hebeldrücke nötig. Beim Verstärkungsplan DRL 16 war ein Hebeldruck außerhalb des 16sekündigen Sperrintervalls für den Erhalt einer Belohnung ausreichend. In der Trainingsnacht konnten die Versuchstiere in den an-Phasen keine falschen Hebeldrücke produzieren, weil jeder Hebeldruck belohnt wurde. Damit lag die Leistung stets bei 100%. Deshalb wurden hier nur die nachfolgenden vier Testnächte betrachtet.

Der Vergleich der prozentualen Leistungen pro Testnacht zwischen den Tieren der drei Expositionskammern ergab in zwei Fällen signifikante Unterschiede: in der dritten Testnacht bei den Männchen beim Verstärkungsplan DRL 16 ($P=0,024$) und in der vierten Testnacht beim wiederholt angebotenen Verstärkungsplan DRL 16 bei den Weibchen ($P=0,009$). Der daraufhin ausgeführte post hoc Dunn's Test ergab, dass die Männchen der GSM-Kammer in der dritten Testnacht eine signifikant niedrigere Leistung erzielten als die Männchen der UMTS-Kammer, welche eine signifikant höhere Leistung vorwiesen. Ein signifikanter Unterschied zur Kontrollkammer ergab sich jeweils nicht. In der vierten Testnacht ergab der post hoc Dunn's Test, dass die Weibchen der GSM-Kammer eine signifikant niedrigere Leistung als die Weibchen der UMTS- und der Kontrollkammer aufwiesen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Weibchen der UMTS- und Kontrollkammer zeigte sich nicht. Die Werte der mittleren Leistungen in Prozent (\pm Standardabweichung) pro Testnacht sind in Tabelle 14 im Anhang aufgeführt. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls eingetragen. In Abbildung 12 sind die prozentualen Leistungen pro

Testnacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt jeweils die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

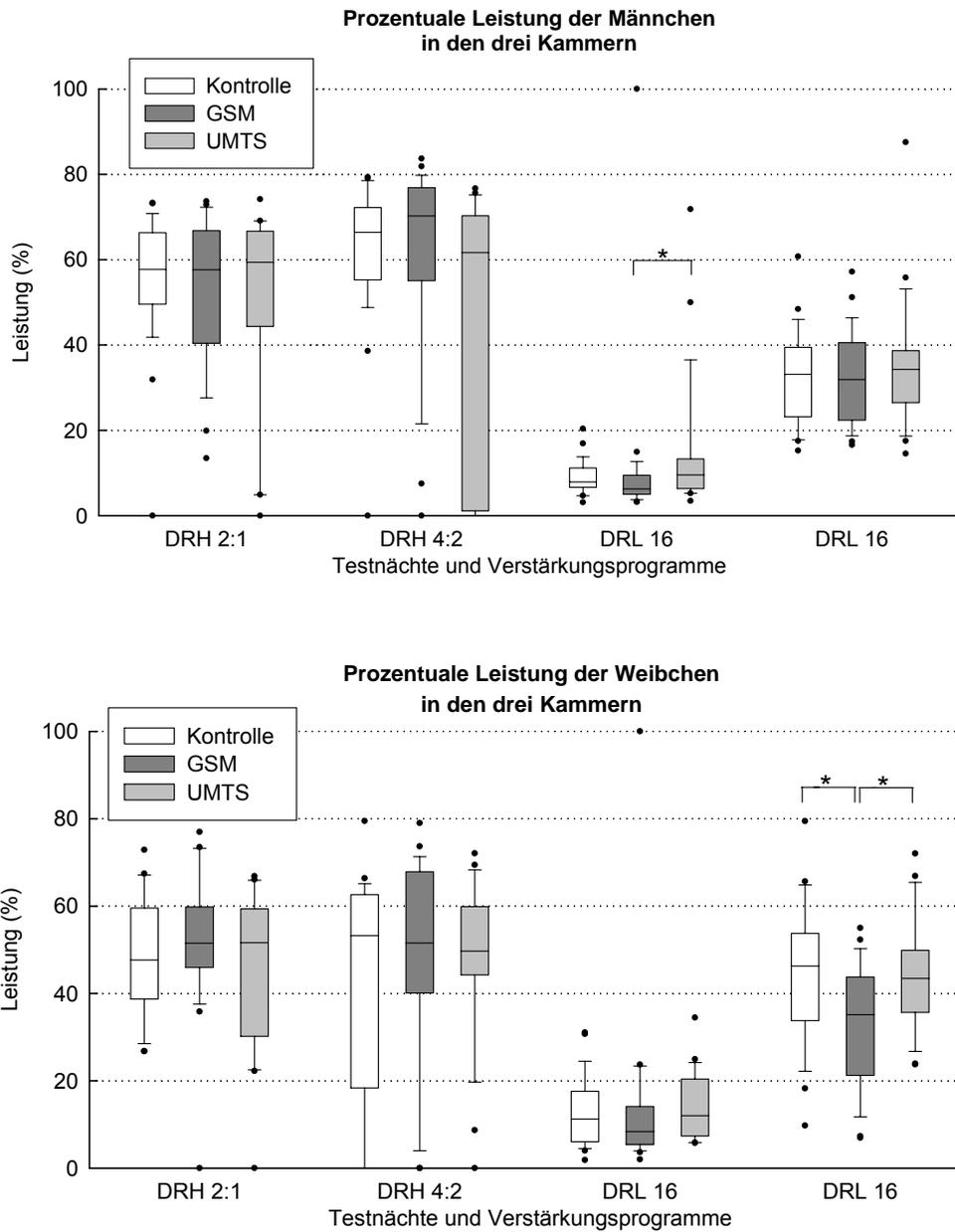


Abb. 12: Prozentuale Leistung in den vier Testnächten der Männchen (oberes Diagramm) und der Weibchen (unteres Diagramm). Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit einem * gekennzeichnet. Die Tierzahl n ist Tabelle 14 im Anhang zu entnehmen.

Um die Frage zu beantworten, ob die prozentuale Leistung im Testnachtverlauf stetig anstieg, wurde der Spearman Rangkorrelationskoeffizient r_s ermittelt und auf Signifikanz geprüft. Dafür wurde die Leistung in Prozent für jede an-Phase errechnet:

$$\text{Leistung (\%)} = \text{B-an-Phase} \times N \times 100 / \text{Hd-an-Phase}.$$

B-an-Phase = Anzahl Belohnungen in einer 30minütigen an-Phase

N = Anzahl nötiger Hebeldrücke für eine Futterbelohnung

Hd-an-Phase = Hebeldruckzahl in einer 30minütigen an-Phase

Die Werte wurden gemittelt und dann auf einen Zusammenhang zur ansteigenden an-Phasenzahl hin untersucht. Die Rangkorrelation für die Mittelwerte der prozentualen Leistung pro an-Phase und der Zahl der an-Phasen ergab in der ersten Testnacht (DRH 2:1) signifikante positive Korrelationen bei den Kontrolltieren und Weibchen der UMTS-Kammer. Bei den UMTS-befeldeten Männchen ließ sich eine Tendenz feststellen. Hier wurde die Leistung also im Laufe der Testnacht immer besser. Bei den GSM-bestrahlten Tieren ließ sich kein Zusammenhang nachweisen. In der DRH 4:2 Testnacht war die Höhe der Leistung nicht mit der zunehmenden Testnachtlänge korreliert. Bei den beiden DRL 16-Testnächte war stets ein signifikanter positiver Zusammenhang vorhanden. Hier wurde die prozentuale Leistung der Versuchstiere im Verlauf der Testnacht immer besser. Die r_s - und p-Werte befinden sich in Tabelle 15 im Anhang.

Korrelierte man die prozentuale Leistung mit der Zahl der Hebeldrücke in den an-Phasen, so zeigte sich in der DRH 2:1 Testnacht bei den Männchen der UMTS-Kammer ein positiver Zusammenhang. Bei den übrigen Versuchstieren konnte kein Zusammenhang nachgewiesen werden. In der DRH 4:2 Testnacht konnte für die Kontrollweibchen und die UMTS-befeldeten Männchen eine positive Korrelation nachgewiesen werden. Bei den anderen Ratten lag kein Zusammenhang zwischen Hebeldruckzahl und Leistung vor. In den beiden Testnächten mit der Verstärkung geringer Hebeldruckraten war in allen Fällen eine signifikante negative Korrelation zu finden. Eine geringere Hebeldruckzahl ging mit einer höheren Leistung einher bzw. eine geringere Leistung ging mit einer höheren Hebeldruckzahl einher. Die r_s - und p-Werte befinden sich in Tabelle 16 im Anhang.

Vergleiche der prozentualen Leistung zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Testnächten ergaben häufig signifikante Unterschiede. In der DRH 4:2 Testnacht zeigten die Männchen der Kontroll- und GSM-Kammer eine höhere Leistung verglichen zur DRH 2:1 Testnacht. Die Leistung der übrigen Versuchstiere war in beiden Testnächten ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P = 0,092$; GSM 23 ♂ $P = 0,009$ und 24 ♀ $P = 0,820$; UMTS 20 ♂ $P = 0,418$ und 19 ♀ $P = 0,225$). In der dritten und vierten Testnacht wurde den Versuchstieren derselbe Verstärkungsplan vorgegeben. In beiden Testnächten mussten die Ratten ein Zeitintervall von 16 Sekunden Länge abwarten bevor ein Hebeldruck eine Futterkugel erbrachte. Anders als in den beiden vorhergehenden Testnächten waren mehrere schnell aufeinander folgende Hebeldrücke nicht mehr angebracht. In der ersten DRL 16 Testnacht war die prozentuale Leistung stets signifikant geringer als in der vorangegangenen DRH 4:2 Testnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 24 ♂ $P = 0,004$ und 24 ♀ $P < 0,001$). In der Testnacht mit dem wiederholt angebotenen DRL 16 Verstärkungsplan war die Leistung der Tiere stets signifikant höher verglichen zur vorangegangenen Testnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Die Anzahl der Hebeldrücke innerhalb des Sperrintervalls nahm in der letzten Testnacht signifikant ab (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Bei den weiblichen Versuchstieren war dies im etwas stärkeren Maße als bei den Männchen der Fall. Der Vergleich zwischen den Tieren der drei Expositionskammern zeigte auf, dass die Weibchen der GSM-Kammer in der letzten Testnacht signifikant mehr Fehler machten als die Weibchen der Kontroll- oder UMTS-Kammer. Zwischen den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer gab es keinen signifikanten Unterschied. Bei den Männchen ergab sich kein signifikanter Unterschied in der Zahl falscher Hebeldrücke. Die mittlere Fehlerzahl \pm Standardabweichung sowie die p-Werte sind in Tabelle 5 enthalten.

Tab. 5: Mittlere Zahl von Hebeldrücken (\pm Standardabweichung) während des Sperrintervalls in Testnacht 3 und 4. Der statistische Vergleich zwischen den Kammern wurde mittels Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse vorgenommen. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied der Weibchen der GSM- zur UMTS- sowie Kontrollkammer in der vierten Testnacht. n=Versuchstierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Anzahl Fehler	Männchen		Weibchen	
	Testnacht 3	Testnacht 4	Testnacht 3	Testnacht 4
Kontrolle	2798 \pm 728 n=29	1066 \pm 428 n=29	2338 \pm 1219 n=29	567 \pm 439 n=29
GSM	2969 \pm 1027 n=28	1059 \pm 425 n=28	2554 \pm 1171 n=29	920 \pm 598 n=29
UMTS	2270 \pm 1121 n=25	938 \pm 457 n=25	2201 \pm 1000 n=24	474 \pm 216 n=24
P=	0,122	0,560	0,569	0,003

Bezog man die Anzahl der Hebeldrücke der aus-Phase mit in die Formel zur Leistungsberechnung mit ein, ließ sich die Effizienz nach folgender Formel berechnen:

$$\text{Effizienz (\%)} = B \times N \times 100 / \text{Hd-ges.}$$

B = Anzahl der erzielten Belohnungen bzw. belohnte Hebeldrücke

N = Anzahl nötiger Hebeldrücke für eine Futterbelohnung

Hd-ges = Anzahl aller Hebeldrücke einer Untersuchungsnacht

In der Trainingsnacht wurde bei der Berechnung nur die Anzahl der erarbeiteten Belohnungen berücksichtigt und nicht die Zahl der automatisch abgegebenen Futterkugeln hinzuaddiert.

Der Vergleich der Effizienzen pro Untersuchungsnacht zwischen den Ratten der drei Expositionskammern ergab mittels der Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse in zwei Fällen signifikante Unterschiede: in der dritten Testnacht der Männchen (P=0,035) und in der vierten Testnacht der Weibchen (P=0,013). Der daraufhin ausgeführte post hoc Dunn's Test ergab, dass die Männchen der GSM-Kammer eine signifikant niedrigere Effizienz erzielten als die Männchen der UMTS-Kammer, welche eine signifikant höhere Effizienz vorwiesen. Ein signifikanter Unterschied zur Kontrollkammer ergab sich jeweils nicht. Bei den weiblichen Versuchsratten ergab der post hoc Dunn's Test, dass die Weibchen der GSM-Kammer eine signifikant niedrigere Effizienz als die Weibchen der Kontrollkammer aufwiesen. Ein signifikanter

Unterschied zwischen den Weibchen der UMTS- und Kontrollkammer sowie zwischen den Weibchen der GSM- und UMTS-Kammer zeigte sich nicht. Die Werte der mittleren Effizienzen in Prozent (\pm Standardabweichung) sind in Tabelle 17 im Anhang aufgeführt. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls eingetragen. In Abbildung 13 sind die prozentualen Effizienzen pro Untersuchungsnacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt jeweils die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

Vergleiche der prozentualen Effizienz zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben Ergebnisse wie bei der prozentualen Leistung. In der ersten Testnacht war die Effizienz stets signifikant geringer als in der Trainingsnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 24 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$; UMTS 20 ♂ $P < 0,001$; 20 ♀ $P < 0,001$). In der DRH 4:2 Testnacht zeigten die Männchen der Kontroll- und GSM-Kammer eine höhere Effizienz verglichen zur DRH 2:1 Testnacht. Die Effizienz der übrigen Versuchstiere war in beiden DRH-Testnächten ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P = 0,368$; GSM 23 ♂ $P = 0,009$ und 24 ♀ $P = 0,403$; UMTS 20 ♂ $P = 0,169$ und 19 ♀ $P = 0,087$). In der ersten DRL 16 Testnacht war die Effizienz stets signifikant geringer als in der vorangegangenen DRH-Testnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P = 0,004$ und 24 ♀ $P < 0,001$). In der Testnacht mit dem wiederholt angebotenen DRL 16 Verstärkungsplan war die Effizienz der Tiere stets signifikant höher verglichen zur vorangegangenen Testnacht (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$).

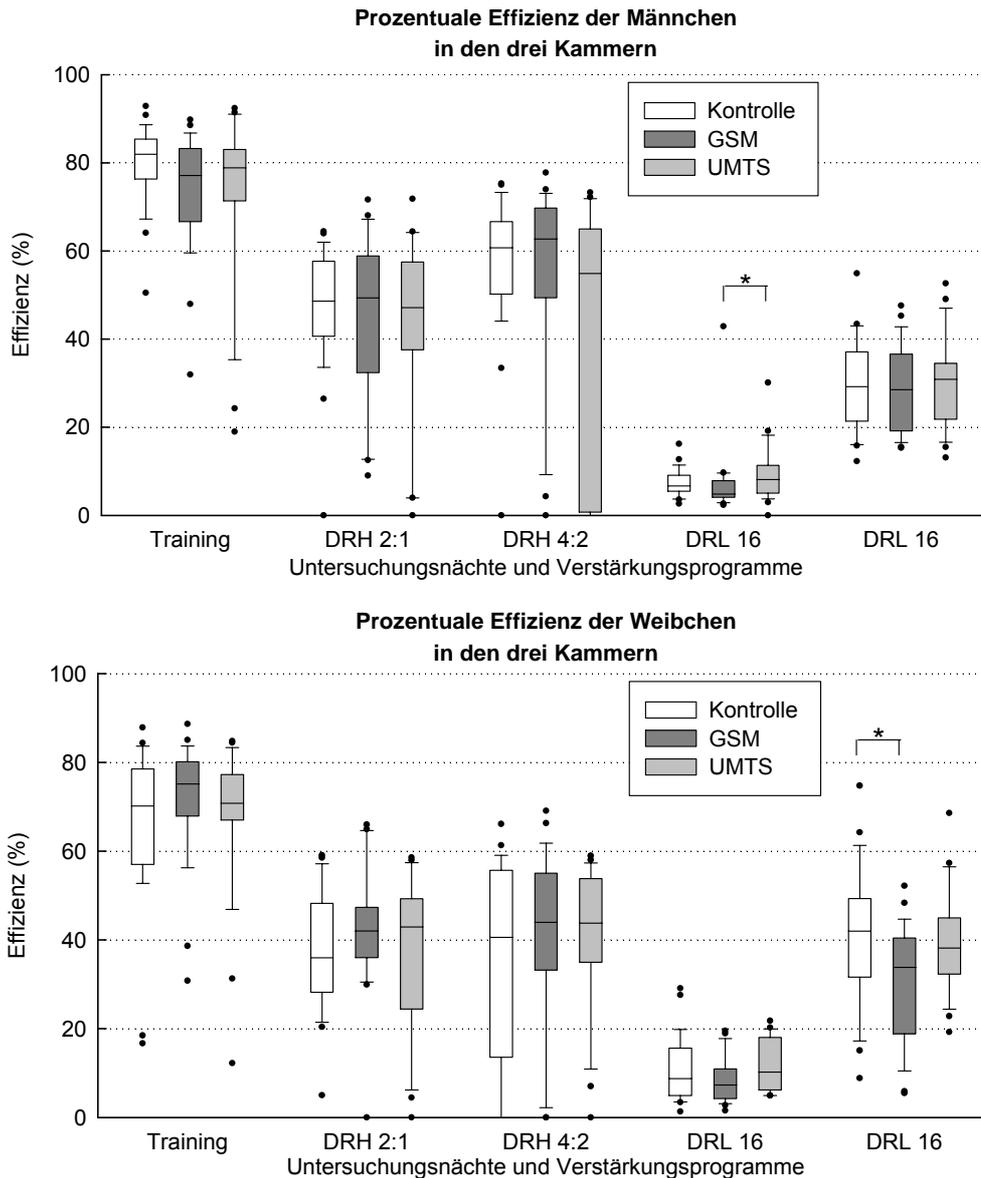


Abb. 13: Prozentuale Effizienz der Männchen (oberes Diagramm) und der Weibchen (unteres Diagramm) für jede Untersuchungsnacht. Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit * gekennzeichnet. Die Tierzahl n ist Tabelle 17 im Anhang zu entnehmen.

4.1.9 Erzielte Futterbelohnungsmengen

In der Trainingsnacht erhielt jedes Versuchstier auch ohne eigenes Zutun Futterbelohnungen. In den darauf folgenden Testnächten war der Erhalt von Futterkugeln vollständig vom eigenen Hebeldruckverhalten abhängig. Da in der Trainingsnacht bei Inaktivität der Ratte alle fünf Minuten in den an-Phasen automatisch eine Futterkugel gegeben wurde, entspricht die angegebene Menge nicht der Anzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen. Bei völliger Hebeldruckinaktivität des Versuchstieres in den an-

Phasen hätte dieses sechs Futterkugeln pro an-Phase und damit insgesamt 60 Futterkugeln in der Trainingsnacht erhalten.

Nach der Trainingsnacht wurden in einigen Skinnerboxen verstopfte Futterabgabehöhrchen der Futterautomaten oder nicht verzehrte Belohnungen in den Futtergeschälchen verzeichnet. In wenigen Fällen trat dies in den Testnächten auf. Die Zahl der vom Futterautomat abgegebenen Futterkugeln entspricht also in seltenen Fällen nicht der tatsächlich verzehrten Menge an Belohnungen.

Vergleich man die Gesamtmengen der erhaltenen Futterkugeln zwischen den Ratten der drei Kammern (Kontrolle und befeldete Kammern) für jede Untersuchungsnacht, so zeigten sich keine signifikanten Unterschiede. In Tabelle 18 im Anhang sind die erhaltenen Futterkugelgesamtmengen pro Untersuchungsnacht mit Mittelwert und Standardabweichung angegeben. Die entsprechenden p-Werte sind ebenfalls eingetragen. In Abbildung 14 sind die erhaltenen Futterkugelmengen pro Untersuchungsnacht für die drei Expositionskammern nebeneinander dargestellt. Das obere Box-Diagramm zeigt jeweils die Werte der Männchen und das untere Box-Diagramm die Daten der Weibchen.

In der DRH 2:1 Testnacht erzielte ein Männchen aus der Kontrollkammer, ein Weibchen aus der GSM-Kammer sowie ein Männchen und ein Weibchen der UMTS-Kammer keine Futterbelohnungen. In der zweiten Testnacht mit dem Verstärkungsplan DRH 4:2 erarbeiteten vier Ratten der Kontrollkammer, drei Ratten der GSM-Kammer und sieben Ratten der UMTS-Kammer keine Futterkugeln. Dies machte 4%, 7% und 14% der ausgewerteten Versuchstiere der jeweiligen Kammern aus. In der dritten Testnacht mit dem Verstärkungsplan DRL 16 erzielte ein Männchen der UMTS-Kammer keine Futterbelohnungen, weil es in den an-Phasen keinen Hebel betätigte. In der darauf folgenden Testnacht erarbeiteten sich alle Versuchsratten Futterbelohnungen.

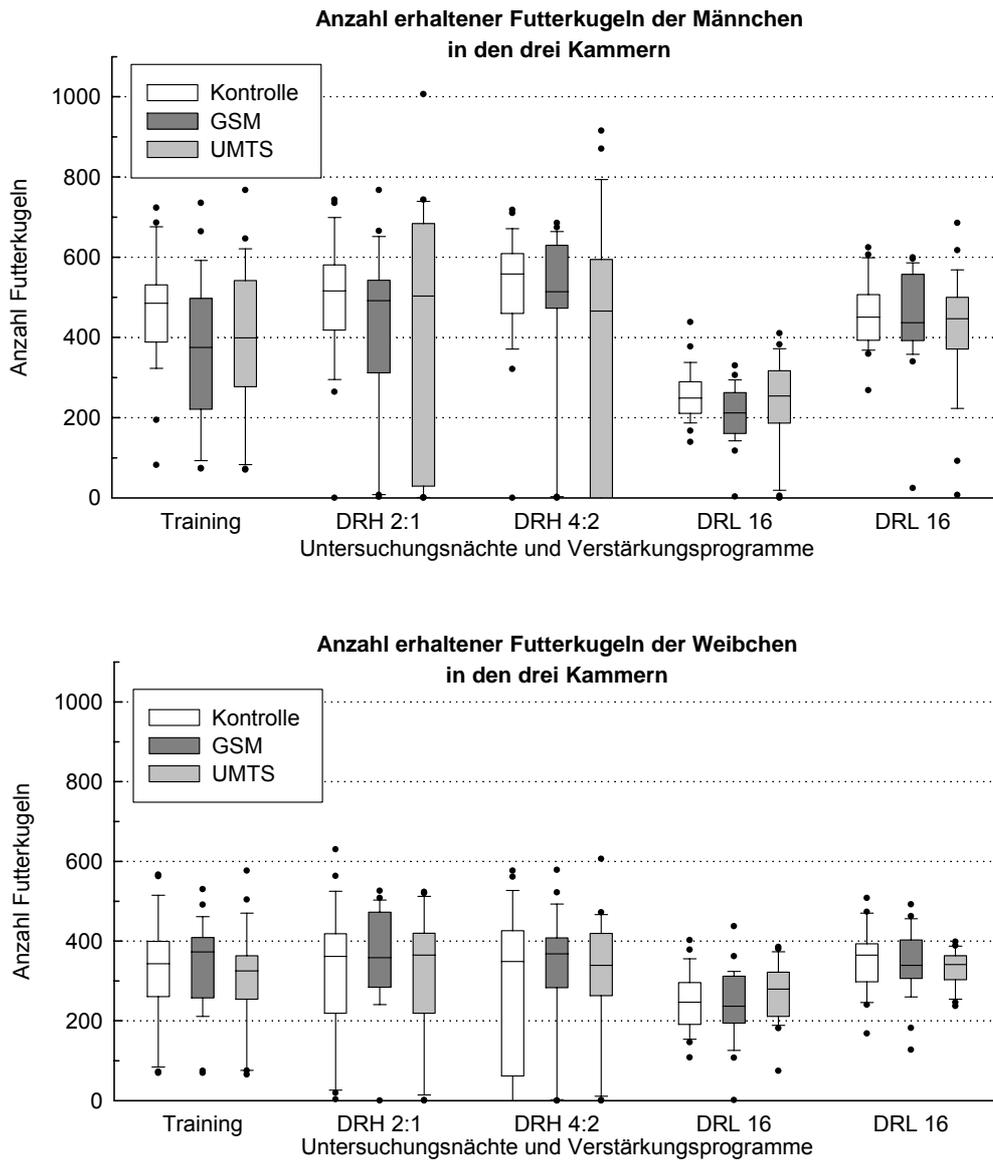


Abb. 14: Anzahl erhaltener Futterkugeln der Männchen (oberes Diagramm) und der Weibchen (unteres Diagramm) für jede Untersuchungsnacht. Signifikante Unterschiede zwischen den Kammern sind mit * gekennzeichnet. Die Tierzahl n ist Tabelle 18 im Anhang zu entnehmen.

Vergleiche der erhaltenen Futterkugelmengen zwischen jeweils zwei aufeinander folgenden Untersuchungs Nächten ergaben vereinzelt signifikante Unterschiede. In der ersten Testnacht erhielten die GSM-befeldeten Männchen signifikant mehr Futterkugeln als in der Trainingsnacht. Die restlichen Ratten erhielten in beiden Untersuchungs Nächten ähnliche Mengen an Futterkugeln (Kontrolle 29 ♂ $P=0,056$ und 29 ♀ $P=0,202$; GSM 24 ♂ $P=0,008$ und 24 ♀ $P=0,235$; UMTS 20 ♂ $P=0,231$; 20 ♀ $P=0,648$). In der zweiten Testnacht mit der Anforderung von vier Hebeldrücken in zwei Sekunden gab es verglichen zur ersten Testnacht mit der Anforderung von zwei

Hebelldrücken pro Sekunde keine signifikanten Unterschiede in der erzielten Futterbelohnungsmenge (Kontrolle 29 ♂ P=0,136 und 29 ♀ P=0,154; GSM 23 ♂ P=0,196 und 24 ♀ P=0,681; UMTS 20 ♂ P=0,393 und 19 ♀ P=0,332). In der dritten Testnacht war die Futterkugelzahl außer bei den Kontrollweibchen signifikant geringer als in der vorangegangenen Testnacht (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P=0,229; GSM 28 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P=0,001; UMTS 25 ♂ P=0,013 und 24 ♀ P=0,037). In der letzten Testnacht, verglichen zur vorletzten, war die Zahl der erarbeiteten Belohnungen signifikant höher (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; GSM 28 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; UMTS 25 ♂ P<0,001 und 24 ♀ P<0,001).

In den DRL-Testnächten ließ sich aufgrund des Sperrintervalls die maximal ausschöpfbare Belohnungsmenge errechnen. Pro halbstündige an-Phase, welche immer mit dem Sperrintervall von 16 Sekunden begann, waren das 112,5, also 112 Belohnungen, wenn das Versuchstier stets sofort nach Ende des Sperrintervalls reagierte. In einer DRL 16 Testnacht (zehn an-Phasen) konnten also maximal 1120 Belohnung erarbeitet werden. Der prozentuale Anteil der erzielten Futterbelohnungen an der maximal möglichen Belohnungsmenge bei optimaler Leistung ließ sich nach folgender Formel berechnen:

$$\text{ausgeschöpfter Anteil an B-max (\%)} = B \times 100 / B\text{-max}$$

B = Anzahl der erzielten Futterbelohnungen bzw. belohnte Hebelldrücke

B-max = maximal mögliche erreichbare Futterkugelmenge, hier: 1120 Belohnungen

Verglich man die prozentualen Anteile der erzielten Belohnungsmengen an den 1120 Futterkugeln, so ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tieren der Kammern wie in Tabelle 6 ersichtlich ist. Der Vergleich zwischen beiden Testnächten ergab, dass der prozentuale Anteil an der maximal möglichen Belohnungsmenge in der letzten Testnacht stets signifikant höher war als in der vorletzten Testnacht (Kontrolle 29 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; GSM 28 ♂ P<0,001 und 29 ♀ P<0,001; UMTS 25 ♂ P<0,001 und 24 ♀ P<0,001).

Tab. 6: Mittlerer prozentualer Anteil an der maximal möglichen Futterbelohnungsmenge in Testnacht 3 und 4. Der statistische Vergleich zwischen den Kammern wurde mittels Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse vorgenommen. n=Tierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Anteil B-max (%)	Männchen		Weibchen	
	Testnacht 3	Testnacht 4	Testnacht 3	Testnacht 4
Kontrolle	22,8 ± 5,6 n=29	40,9 ± 7,4 n=29	22,0 ± 6,3 n=29	31,7 ± 6,9 n=29
GSM	18,5 ± 6,2 n=28	40,4 ± 10,6 n=28	21,4 ± 7,9 n=29	30,8 ± 7,3 n=29
UMTS	20,8 ± 9,9 n=25	37,8 ± 12,6 n=25	24,3 ± 6,5 n=24	29,7 ± 3,8 n=24
P=	0,077	0,728	0,219	0,501

Korrelierte man die Anzahl erhaltener Belohnungen mit der prozentuale Leistung, so zeigte sich in allen Testnächten - bis auf die Kontrollweibchen und UMTS-befeldeten Weibchen in der letzten Testnacht - ein signifikant positiver Zusammenhang. Je höher die prozentuale Leistung des Tieres in der Testnacht war, desto mehr Futterkugeln erzielte es. Die r_s - und p-Werte sind in der Tabelle 19 im Anhang enthalten. Für die Betrachtung des Zusammenhanges von Futterkugelzahl und Testnachtverlauf, wurde die prozentuale anteilige Verteilung der Belohnungen auf jede der zehn an-Phasen folgendermaßen berechnet:

$$\text{Belohnung in einer an-Phase (\%)} = \text{B-an-Phase} \times 100 / \text{B-ges.}$$

B-an-Phase = Anzahl Belohnungen in einer 30minütigen an-Phase

B-ges = Anzahl aller Belohnungen einer Untersuchungsnacht

Diese Werte wurden gemittelt und mit der zunehmenden Zahl von an-Phasen korreliert. In der Trainingsnacht zeigte sich bei den Männchen, nicht jedoch bei den Weibchen eine positive Korrelation. Die Männchen aller Kammern erhielten also im Verlauf der Testnacht immer mehr Futterkugeln. Bei den Weibchen gab es keinen Zusammenhang. In der DRH 2:1 Testnacht ergab sich bei den Versuchstieren keine Korrelation. Ein Fortschreiten der Testnacht bedeute also keinen zunehmend höheren Anteil an Futterkugeln. In der darauf folgenden Testnacht mit der Erhöhung der Anforderung auf vier Hebeldrücke in zwei Sekunden zeigte sich bei den Versuchstieren, bis auf die Kontrollweibchen, eine signifikante negative Korrelation. Die Ratten erarbeiteten sich im anfänglichen Testzeitraum mehr Futterkugeln als im

späteren. Dies könnte auf eine allmähliche Sättigung der Tiere hinweisen. In der Testnacht mit dem erstmaligen Verwenden des DRL 16 Verstärkungsplans gab es eine signifikante positive Korrelation. Mit zunehmendem Testnachtverlauf erzielten die Versuchstiere zunehmend mehr Futterbelohnungen. In der darauf folgenden DRL 16 Testnacht gab es bei den GSM-befeldeten Männchen und den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer einen positiven Zusammenhang zwischen steigendem Futterkugelanteil und zunehmender Testnachtlänge. Bei den Männchen der Kontroll- und UMTS-Kammer und den Weibchen der GSM-Kammer zeigte sich keine signifikante Korrelation. Die r_s - und p -Werte sind in der Tabelle 20 im Anhang enthalten.

Die Korrelation der anteiligen prozentualen Belohnungsmenge pro an-Phase und der Mittelwerte der Hebeldruckaktivität in den an-Phasen ergab für die ersten drei Untersuchungs Nächte stets einen signifikant positiven Zusammenhang. Je größer die Aktivität in einer an-Phase war, desto mehr Belohnungen erhielten die Tiere. In der ersten DRL-Testnacht zeigte sich bei den Tieren bis auf die Ratten der GSM-Kammer eine signifikante negative Korrelation. Dies bedeutet, dass die Versuchsratten bei niedrigerer Hebeldruckaktivität mehr Belohnungen bekamen. In der zweiten DRL 16 Testnacht zeigte sich bei den Männchen kein Zusammenhang. Bei den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer hingegen gab es einen positiven Zusammenhang. Bei höherer Hebeldruckaktivität in der an-Phase gab es auch mehr Futterbelohnungen in dieser Phase. Bei den GSM-Weibchen war dieser Zusammenhang als Trend erkennbar. Die r_s - und p -Werte sind in der Tabelle 21 im Anhang enthalten.

Um die Frage zu beantworten, ob die Versuchstiere im Durchschnitt genügend Belohnungen zur Deckung ihres Futterbedarfes erzielen konnten, wurde der Energiewert der Futterkugeln und der durchschnittliche tägliche Energiebedarf der Ratten berechnet. Das durchschnittliche Gewicht während des Versuchszeitraumes betrug für die Männchen 395 g und für die Weibchen 239 g. Bei Annahme eines Futterverbrauchs des Alleinfuttermittels (umsetzbare Energie: 8,58 kJ/g) von 10 g pro 100 g Körpergewicht am Tag (Gesellschaft für Versuchstierkunde, 1998) hatten die Männchen einen Haltungsfutterbedarf von durchschnittlich 39,5 g und die Weibchen durchschnittlich 23,9 g pro Tag. Dies entsprach der Energiemenge von 339,04 kJ für die Männchen und 205,14 kJ für die Weibchen. Die Futterkugeln hatten

einen höheren Energiewert (15,16 kJ/g) als das Haltungsfutter. 10 g Haltungsfutter entsprach 5,66 g Futterbelohnungen, also 126 Belohnungskugeln. Eine Futterbelohnung von 45 mg, also 0,045 g hatte einen Brennwert von 0,68 kJ. Eine männliche Ratte hätte zur Deckung des mittleren Futterbedarfs also durchschnittlich 497 Futterkugeln und die weiblichen Ratten durchschnittlich 301 Futterkugeln zu sich nehmen müssen. Vor Versuchsbeginn wogen die männlichen Ratten durchschnittlich 355 g und hatten demnach einen mittleren Bedarf von 447 Futterkugeln. Die Weibchen wogen vor Versuchsbeginn durchschnittlich 222 g und brauchten also durchschnittlich 279 Futterbelohnungen. Nach Versuchsende wogen die Männchen nunmehr durchschnittlich 436 g. Das ergab einen mittleren täglichen Bedarf von 549 Belohnungskugeln am Tag. Die weiblichen Versuchsratten wogen nach Versuchsende durchschnittlich 256 g. Das entsprach einem mittleren Bedarf von 322 Futterkugeln am Tag. Innerhalb des Versuchszeitraumes stieg der durchschnittliche Bedarf der Männchen um 102 Futterkugeln von 447 auf 549 Futterbelohnungen und der durchschnittliche Bedarf der Weibchen stieg um 43 Futterkugeln von 279 auf 322 Futterbelohnungen. Aufgrund der durchschnittlich erzielten Futterkugelmengen kann man annehmen, dass die Versuchstiere in der Regel ihren Futterbedarf in der Trainingsnacht und den beiden DRH-Testnächten sowie in der letzten Testnacht, in welcher erneut der DRL 16 Verstärkungsplan vorgegeben war, vermutlich decken konnten. Bei genauer Beachtung des 16sekündigen Sperrintervalls in den zehn halbstündigen an-Phasen könnten sich die Tiere maximal 1120 Futterkugeln erarbeiten und damit theoretisch problemlos ihren Futterbedarf decken. In der vorletzten Testnacht mit der erstmaligen Vorgabe der Verstärkung geringer Hebeldruckraten lagen die erzielten Futterkugelmengen erkennbar unter dem errechenbaren theoretischen Wert. In der dritten Testnacht kam es wahrscheinlich zu keiner (eventuell vorzeitigen) Sättigung der Versuchstiere, wie es in den anderen Untersuchungs Nächten möglicherweise der Fall war.

4.1.10 Wechsel zwischen den beiden Hebeln einer Skinner-Box

Den Versuchstieren standen in jeder Skinner-Box zwei gleichwertige Hebel zur Erarbeitung von Futterbelohnungen zur Verfügung. Eine Präferenz für einen bestimmten Hebel könnte sich herausbilden, wenn an einem Hebel erfolgreich Futterkugeln erzielt worden sind. Hat das Versuchstier die Anforderung noch nicht

erlernt, könnte es häufiger zwischen dem linken und rechten Hebeln hin- und hergewechselt haben bis sich ein Erfolg einstellte. Im Allgemeinen war es für eine effiziente Erarbeitung von Futterbelohnungen förderlich nicht zuviel zwischen den Hebeln hin- und herzuwechseln. Beim DRH-Verstärkungsplan sollte ohne längere Pause mehrfach hintereinander gedrückt werden bzw. beim DRL 16 Verstärkungsplan das Erlöschen des grünen Signallichts, welches das Sperrintervall nur über dem zuletzt betätigten Hebel anzeigte, abgewartet werden.

Für eine bestimmte Anzahl von Hebeldrücken war eine bestimmte Anzahl (Hebeldruckzahl – 1) von Hebelwechseln maximal möglich. Um die Zahl der Hebelwechsel relativ zur Hebeldruckzahl vergleichen zu können, wurde der prozentuale Anteil der Hebelwechsel an diesem Maximalwert wie folgt errechnet:

$$\text{Hebelwechsel (\%)} = \text{Anzahl Hebelwechsel} \times 100 / (\text{Hebeldruckzahl} - 1)$$

Bezog man diese Formel auf die Gesamthebeldruckzahl einer Untersuchungsnacht und verglich die prozentualen Anteile an Hebelwechseln zwischen den Tieren der drei Kammern, so zeigte sich in der letzten Testnacht ein signifikanter Unterschied ($P=0,037$). Der daraufhin durchgeführte post hoc Dunn's Test zeigte auf, dass die Weibchen aus der UMTS-Kammer signifikant weniger zwischen den beiden verfügbaren Hebeln wechselten als die Weibchen der GSM-Kammer. Ein signifikanter Unterschied zu den Kontrollweibchen ergab sich jeweils nicht. In den restlichen Untersuchungs Nächten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tieren der Expositionskammern. In Tabelle 7 sind die mittleren Hebelwechselanteile an der maximal möglichen Hebelwechselanzahl in Prozent (\pm Standardabweichung) und die entsprechenden p-Werte zu finden.

Tab. 7: Mittlere prozentuale Hebelwechsel (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der statistische Vergleich zwischen den Tieren der Expositionskammern wurde mittels Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse vorgenommen. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Weibchen der GSM- und UMTS-Kammer in der vierten Testnacht. n=Tierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	11,0 \pm 8,0 n = 29	9,1 \pm 9,5 n = 29	2,8 \pm 3,2 n = 29	24,2 \pm 13,7 n = 29	20,8 \pm 14,7 n = 29
GSM	12,7 \pm 10,9 n = 29	9,6 \pm 7,8 n = 24	4,4 \pm 5,9 n = 28	19,8 \pm 12,2 n = 28	16,0 \pm 11,1 n = 28
UMTS	8,8 \pm 5,6 n = 25	6,9 \pm 5,6 n = 20	7,4 \pm 9,9 n = 25	22,3 \pm 11,8 n = 25	22,6 \pm 16,3 n = 25
P=	0,523	0,630	0,235	0,409	0,266
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	12,2 \pm 5,8 n = 29	11,3 \pm 9,0 n = 29	6,9 \pm 6,9 n = 29	23,2 \pm 13,6 n = 29	20,3 \pm 14,6 n = 29
GSM	14,9 \pm 8,4 n = 29	12,0 \pm 8,5 n = 24	5,9 \pm 4,6 n = 29	23,2 \pm 7,7 n = 29	27,9 \pm 13,3 n = 29
UMTS	12,4 \pm 4,7 n = 25	8,5 \pm 6,6 n = 20	4,7 \pm 5,0 n = 24	18,1 \pm 9,9 n = 24	18,8 \pm 12,3 n = 24
P=	0,442	0,287	0,507	0,202	0,037

Oben genannte Formel ließ sich ebenfalls auf die an- bzw. aus-Phasen beziehen. Die relative Hebelwechselzahl in Prozent für die an- bzw. aus-Phasen errechnete sich also folgendermaßen:

$$\text{Hebelwechsel an-Phasen (\%)} = \text{Anzahl Hebelwechsel} \times 100 / (\text{Hd-an} - 1)$$

$$\text{Hebelwechsel aus-Phasen (\%)} = \text{Anzahl Hebelwechsel} \times 100 / (\text{Hd-aus} - 1)$$

Hd-an = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen

Hd-aus = Gesamtzahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen

Der Vergleich zwischen den Ratten der drei Kammern ergab in den an-Phasen in der letzten Testnacht einen signifikanten Unterschied (P=0,036). Der daraufhin durchgeführte post hoc Dunn's Test zeigte auf, dass die Weibchen aus der UMTS-Kammer in den an-Phasen signifikant weniger zwischen den beiden verfügbaren Hebeln wechselten als die Weibchen der GSM-Kammer, und diese dementsprechend signifikant häufiger. Ein signifikanter Unterschied zu den Kontrollweibchen ergab sich jeweils nicht. In den restlichen Testnächten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Verglich man die Tiere der drei Kammern bezüglich der relativen Hebelwechselzahl in den aus-Phasen untereinander, so

ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. In Tabelle 22 im Anhang sind die mittleren Hebelwechselanteile in Prozent (\pm Standardabweichung) für die an-Phasen und in Tabelle 23 im Anhang für die aus-Phasen sowie die entsprechenden p-Werte angegeben.

Korrelierte man die relative Menge an Wechseln zwischen den beiden verfügbaren Hebeln in den an-Phasen und der prozentualen Leistung, ergab sich in der DRH 2:1 Testnacht, bis auf die UMTS-bestrahlten Weibchen, ein signifikanter negativer Zusammenhang. Je geringer die relative prozentuale Hebelwechselrate war, desto höher war auch die Leistung. In der DRH 4:2-Testnacht war dieser Zusammenhang außer bei den Kontrollmännchen und den UMTS-bestrahlten Weibchen für die Versuchstiere signifikant nachweisbar. In der ersten DRL 16 Testnacht gab es keine Korrelation zwischen der prozentualen Leistung und relativen Hebelwechseln. In der letzten Testnacht war, bis auf die Männchen der UMTS-Kammer, ein signifikanter negativer Zusammenhang zu finden. Eine höhere prozentuale Leistung ging mit niedrigerer relativer Hebelwechselzahl in den an-Phasen einher. In der Regel bestätigte sich also die Annahme, dass weniger Wechsel zwischen den verfügbaren Hebeln für die effiziente Erzielung von Futterbelohnungen förderlich war. Die r_S - und p-Werte befinden sich in Tabelle 24 im Anhang.

Verglich man je zwei aufeinander folgende Untersuchungsächte hinsichtlich der gesamten relativen Hebelwechsel in Prozent, so zeigten sich signifikante Unterschiede. In der DRH 2:1 Testnacht wechselten die GSM-bestrahlten Ratten signifikant relativ weniger oft zwischen den beiden Hebeln einer Skinnerbox als in der Trainingsnacht. Die restlichen Versuchstiere hatten vergleichsweise ähnliche Werte in beiden Untersuchungsächten (Kontrolle 29 ♂ $P=0,110$ und 29 ♀ $P=0,280$; GSM 24 ♂ $P=0,013$ und 24 ♀ $P=0,011$; UMTS 20 ♂ $P=0,177$; 20 ♀ $P=0,123$). In der zweiten Testnacht mit der Anforderung DRH 4:2 gab es verglichen zur ersten Testnacht mit der Anforderung DRH 2:1 außer bei den UMTS-befeldeten Männchen signifikant weniger Hebelwechsel (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; GSM 23 ♂ $P<0,001$ und 24 ♀ $P<0,001$; UMTS 20 ♂ $P=0,441$ und 19 ♀ $P=0,005$). In der dritten Testnacht in welcher erstmalig der DRL 16 Verstärkungsplan vorgegeben war, traten bei den Versuchstieren verglichen zur vorangegangenen Testnacht signifikant mehr relative Hebelwechsel auf (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; GSM 28 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; UMTS 25 ♂ $P<0,001$ und 24 ♀ $P<0,001$). In der

letzten Testnacht, verglichen zur vorletzten, war die Zahl der relativen Hebelwechsel bei den Weibchen der GSM-Kammer signifikant höher und bei den übrigen Versuchsratten dagegen zur vorangegangenen Testnacht ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P=0,180$ und 29 ♀ $P=0,147$; GSM 28 ♂ $P=0,086$ und 29 ♀ $P=0,022$; UMTS 25 ♂ $P=0,979$ und 24 ♀ $P=0,679$).

Führte man diese Vergleiche hinsichtlich der relativen Hebelwechsel in den an-Phasen durch, so zeigten sich ähnliche Ergebnisse. In der ersten Testnacht wechselten die GSM-bestrahlten Weibchen in den an-Phasen signifikant relativ weniger oft als in der Trainingsnacht. Die restlichen Versuchstiere zeigten ähnliche Werte in beiden Untersuchungs Nächten (Kontrolle 29 ♂ $P=0,166$ und 29 ♀ $P=0,173$; GSM 24 ♂ $P=0,141$ und 24 ♀ $P=0,013$; UMTS 20 ♂ $P=0,017$; 20 ♀ $P=0,216$). In der zweiten Testnacht gab es verglichen zur ersten Testnacht außer bei den UMTS-befeldeten Männchen in den an-Phasen signifikant seltener Hebelwechsel (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P=0,007$; GSM 23 ♂ $P<0,001$ und 24 ♀ $P=0,001$; UMTS 20 ♂ $P=0,568$ und 19 ♀ $P=0,040$). In der dritten Testnacht traten bei den Versuchstieren verglichen zur vorangegangenen Testnacht in den an-Phasen signifikant relativ mehr Hebelwechsel auf (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; GSM 28 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; UMTS 25 ♂ $P<0,001$ und 24 ♀ $P<0,001$). In der letzten Testnacht, verglichen zur vorletzten, war die Zahl der relativen Hebelwechsel in den an-Phasen bei den Weibchen der GSM-Kammer signifikant höher und bei den übrigen Versuchsratten dagegen zur vorangegangenen Testnacht ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P=0,180$ und 29 ♀ $P=0,147$; GSM 28 ♂ $P=0,086$ und 29 ♀ $P=0,022$; UMTS 25 ♂ $P=0,979$ und 24 ♀ $P=0,679$).

Vergleiche hinsichtlich der relativen Hebelwechsel in den aus-Phasen erbrachten einige unterschiedliche Ergebnisse. In der ersten Testnacht verglichen zur Trainingsnacht wechselten die Männchen der Kontroll- und UMTS-Kammer signifikant seltener zwischen dem linken und rechten Hebel hin- und her. Die Werte der übrigen Versuchstiere waren in beiden Untersuchungs Nächten ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P=0,470$ und 29 ♀ $P=0,309$; GSM 24 ♂ $P=0,207$ und 24 ♀ $P=0,271$; UMTS 20 ♂ $P=0,048$; 20 ♀ $P=0,165$). Außer bei den UMTS-befeldeten Männchen wurden signifikant weniger Hebelwechsel in der DRH 4:2 Testnacht, verglichen zur DRH 2:1 Testnacht, verzeichnet (Kontrolle 29 ♂ $P<0,001$ und 29 ♀ $P<0,001$; GSM 23 ♂ $P=0,025$ und 24 ♀ $P<0,001$; UMTS 20 ♂ $P=0,066$ und 19 ♀ $P=0,016$). In der dritten

Testnacht traten verglichen zur vorangegangenen Testnacht in den aus-Phasen signifikant mehr Hebelwechsel auf (Kontrolle 29 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; GSM 28 ♂ $P < 0,001$ und 29 ♀ $P < 0,001$; UMTS 25 ♂ $P < 0,001$ und 24 ♀ $P < 0,001$). Der Vergleich der beiden DRL 16 Testnächte zeigte auf, dass die GSM-bestrahlten Männchen in der letzten Testnacht signifikant weniger Hebelwechsel vollzogen. Die Werte der übrigen Ratten waren in beiden Testnächten ähnlich (Kontrolle 29 ♂ $P = 0,080$ und 29 ♀ $P = 0,270$; GSM 28 ♂ $P = 0,039$ und 29 ♀ $P = 0,746$; UMTS 25 ♂ $P = 0,214$ und 24 ♀ $P = 0,214$).

4.1.11 Ergebnisse zum Einfluss des Signallichts bei DRL 16

Zwischen der erzielten Leistung in der DRL 16 Testnacht und den Expositionskammern aus denen die Versuchstiere vor Beginn der Zusatzuntersuchungen ursprünglich stammten, gab es keinen signifikanten

Zusammenhang: Gruppe ohne LED (n=17): $r_S = -0,044$; $P = 0,861$

Gruppe mit LED (n=13): $r_S = -0,051$; $P = 0,863$.

Die Daten der zwei Versuchstiergruppen (Ratten ohne und mit grünem LED-Signallicht in der DRL 16 Testnacht) wurden mittels Mann-Whitney U-Test auf signifikante Unterschiede getestet. Für die Trainingsnacht ergaben sich zwischen den beiden Versuchstiergruppen, wie aus Tabelle 8 ersichtlich ist, keine signifikanten Unterschiede. Getestet wurden die Gesamtzahl der Hebeldrücke, die Anzahl der erarbeiteten Belohnungen (welche in diesem Fall der Anzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen entsprach, da jeder Hebeldruck belohnt wurde) und die Zahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen.

In der Testnacht mit dem Verstärkungsplan DRL 16 unterschieden sich die Anzahl erarbeiteter Belohnungen und die Anzahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen zwischen beiden Versuchstiergruppen nicht signifikant. Die Hebeldruckgesamtzahl zwischen den beiden Versuchstiergruppen unterschied sich signifikant. Die Rattengruppe, die ein grünes LED-Signallicht zur Anzeige des Sperrintervalls zur Verfügung hatte, erzielte eine signifikant höhere Leistung. Die Ratten dieser Gruppe wiesen signifikant weniger unbelohnte in den an-Phasen auf. Sie drückten also seltener während des Sperrintervalls. Die Leistung in Prozent errechnete sich aus der Anzahl belohnter Hebeldrücke $\times 100 /$ Anzahl belohnter + unbelohnter Hebeldrücke der an-Phasen. Die Werte der Testnacht sind in Tabelle 9 aufgelistet.

Die Weibchen, welchen das 16sekündige Sperrintervall durch ein grünes Licht über den zuletzt betätigten Hebel signalisiert wurde, erzielten mit deutlich weniger Fehlern eine ähnliche Menge an Futterkugeln wie die Tiere, welche keine Anzeige des Sperrintervalls zur Verfügung hatten. Die Verfügbarkeit eines Hinweisreizes in Form eines grünen Signallichtes erhöhte die Leistung signifikant.

Tab. 8: Mittlere Hebeldruckanzahlen in der Trainingsnacht (\pm Standardabweichung) von sexuell naiven Rattenweibchen. Für die statistische Analyse der Gruppe ohne und mit grünem LED-Signallicht zur Anzeige des Sperrintervalls in der darauf folgenden DRL 16 Testnacht wurde der Mann-Whitney U-Test verwendet. n=Tierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Anzahl der Hebeldrücke:	Trainingsnacht		
	gesamt	an-Phasen	aus-Phasen
Gruppe ohne LED, n=16	293 \pm 155	214 \pm 123	79 \pm 46
Gruppe mit LED, n=13	305 \pm 129	224 \pm 114	81 \pm 39
P=	0,776	0,792	0,878

Tab. 9: Mittlere Hebeldruckanzahlen in der Testnacht (\pm Standardabweichung) von sexuell naiven Rattenweibchen. Für die statistische Analyse der Gruppe ohne und mit Signallicht wurde der Mann-Whitney U-Test verwendet. n=Tierzahl. P=Irrtumswahrscheinlichkeit.

Anzahl der Hebeldrücke:	DRL 16 Testnacht				
	gesamte Testnacht	belohnte, an-Phasen	unbelohnte, an-Phasen	aus-Phasen	Leistung (%)
Gruppe ohne LED, n=17	1404 \pm 595	173 \pm 61	945 \pm 432	287 \pm 156	16,9 \pm 5,5
Gruppe mit LED, n=13	1001 \pm 433	176 \pm 81	601 \pm 286	223 \pm 105	27,0 \pm 16,7
P=	0,030	0,818	0,014	0,315	0,009

4.2 Ergebnisse der *social discrimination*-Tests

Ein signifikanter Unterschied zwischen der Schnüffeldauer am wiederholt angebotenen und neuen Jungtier im zweiten Test ließ auf höheres Interesse am neuen und bis dato unbekanntem Jungtier schließen. Das wiederholt dargebotene Jungtier wurde als bekannt wieder erkannt und rief ein geringeres Interesse hervor. In diesem Falle wäre ein Erinnerungsvermögen an das erste Jungtier nachgewiesen. Unterschieden sich die Schnüffeldauern nicht signifikant, so wurden beide Jungtiere als unbekannt wahrgenommen und riefen ein gleich hohes Interesse beim Versuchstier hervor. Das erneut dargebotene Jungtier wurde demzufolge nach der 30minütigen Pause nicht wieder erkannt.

Die unmittelbare Reaktion der adulten Versuchstiere nach dem Einsetzen eines Jungtieres bestand darin, sich ihm zuzuwenden und eventuell zu folgen. Dabei

wurde neben der Anogenitalkontrolle auch das Schnüffeln an Fell, Mundregion und Schwanz des Jungtieres beobachtet. Bei zwei Jungtieren wurden die Juvenilen vom Versuchstier mehrfach abwechselnd untersucht. Neben diesem typischen Explorationsverhalten zeigten einige der Versuchstiere nach einiger Zeit ein Abwenden vom Juvenilen und Vermeiden. In seltenen Fällen kam es zum Wegstoßen der Jungtiere mit den Hinterfüßen. Die Jungtiere zeigten im Heimatkäfig des Versuchstieres neben intensivem Explorationsverhalten zur Erkundung von Versuchstier und Umgebung auch Spielverhalten. Fressen und Graben in der Einstreu trat seltener auf. Aggressivität bzw. Dominanzverhalten der Adulten wurde in Form von Aufspringen auf das Jungtier, um es mit den Vorderpfoten eine zeitlang zu Boden zu drücken, beobachtet. In einigen Fällen wurde die zeitweise Immobilität des Jungtieres für Anogenitalkontrolle und Beschnüffeln genutzt. In seltenen Fällen schnappten einige Weibchen nach den Juvenilen. Es kam jedoch in keinem Fall zu Verletzungen. Die Jungtiere reagierten auf aggressives Verhalten mit deutlich verlangsamten Bewegungen und versuchten oftmals beim Versuchstier unterzukriechen. Gemieden wurde die adulte Ratte nicht.

Die Männchen waren deutlich seltener aggressiv als die Weibchen, welche häufiger Dominanzverhalten zeigten. Von den Weibchen zeigten 30% (16 von 54) wenig und 33% (18 von 54) deutlich aggressives Verhalten gegenüber den männlichen Jungtieren. Während also 63% der Weibchen agonistische Verhaltensweisen zeigten, waren es bei den Männchen der ersten beiden Filialgenerationen 9% (5 von 57) und der dritten Filialgeneration 3% (1 von 38). Es gab keine Häufung aggressiver Tiere aus einer bestimmten Expositions-kammer, sondern die Zahl aggressiver und nicht aggressiver Ratten verteilte sich relativ gleichmäßig.

Zwischen der Zeitspanne vom Absetzen des Wurfes bis zum Versuch und eventuellem agonistischem Verhalten der Weibchen war kein Zusammenhang zu finden (Kontrolle $r_s=0,140$, $P=0,551$, $n=20$; GSM $r_s=0,295$, $P=0,275$, $n=15$; UMTS $r_s=0,444$, $P=0,056$, $n=19$). Aggressivität und Schnüffeldauerdifferenz an beiden Juvenilen im zweiten Test war ebenfalls in keiner Kammer korreliert (Kontrolle $r_s=0,400$, $P=0,079$, $n=20$; GSM $r_s=0,491$, $P=0,060$, $n=15$; UMTS $r_s=0,433$, $P=0,063$, $n=19$). In Abbildung 15 wird deutlich, dass zwischen dem zeitlichen Abstand zwischen Versuch und Absetzen des Wurfes und der Erinnerungsleistung des Weibchens im *social discrimination*-Test kein Zusammenhang bestand. Auch der

Spearman Rang-Korrelationskoeffizient r_s ergab in keiner der drei Kammern einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Zeitdauer vom Absetzen der eigenen Nachkommen bis zum *social discrimination*-Test der Weibchen und der Differenz in Sekunden zwischen der Schnüffeldauer am neuen und wiederholt dargebotenen Jungtier im zweiten vierminütigen Test (Kontrolle $r_s = -0,134$, $P = 0,575$, $n = 20$; GSM $r_s = 0,450$, $P = 0,089$, $n = 15$; UMTS $r_s = -0,141$, $P = 0,560$, $n = 19$). Das Verhalten der Weibchen wurde also nicht durch die Tatsache beeinflusst, dass einige Tage vor dem Versuch die eigenen Jungtiere abgesetzt wurden.

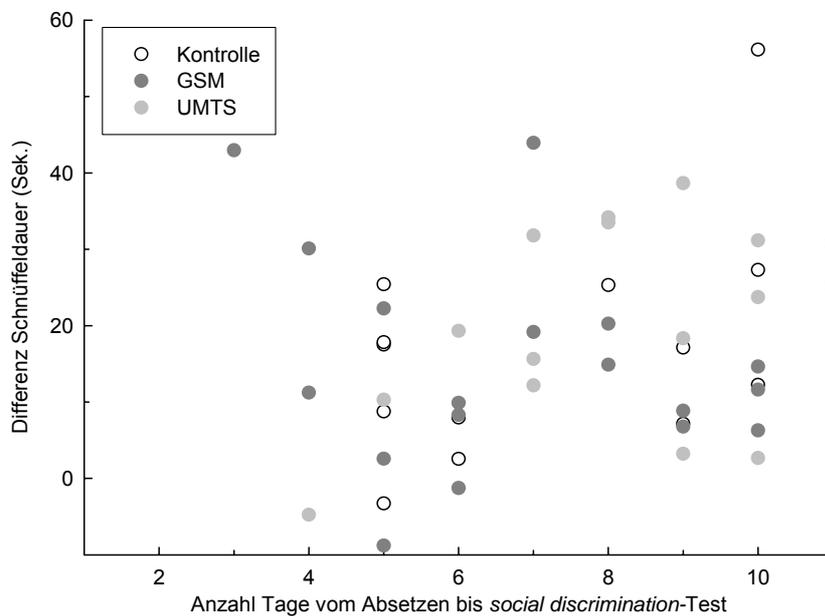


Abb. 15: Zahl der Tage vom Absetzen der eigenen Nachkommen bis zum *social discrimination*-Test der Weibchen der drei Expositionskammern und deren Differenz der Schnüffeldauern am neuen und am wiederholt angebotenen Jungtier im zweiten Test nach 30 Minuten.

Wie in Abbildung 16 zu sehen, zeigten die Weibchen im Alter von $26 \pm 1,5$ Wochen aus allen drei Kammern im zweiten Test ein Erinnerungsvermögen an das Juvenile aus dem ersten Test. Dies ließ sich aus den signifikanten Unterschieden der Schnüffeldauern an dem neuen und dem wiederholt dargebotenen Jungtier ableiten (Kontrolle $P < 0,001$; GSM $P < 0,001$; UMTS $P < 0,001$). Die Schnüffeldauern beim ersten vierminütigen Test unterschieden sich zwischen den Weibchen der drei Expositionskammern nicht signifikant ($P = 0,144$).

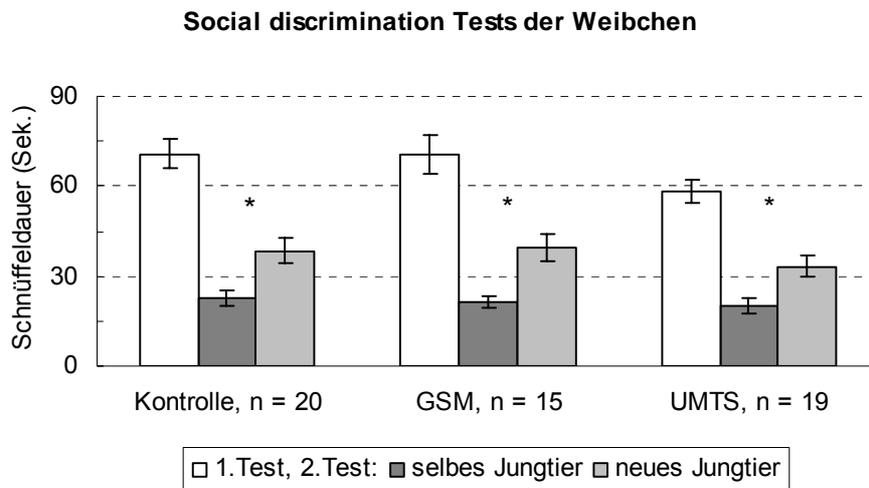


Abb. 16: Mittlere Schnüffeldauern (\pm Standardfehler) in Sekunden sexuell erfahrener weiblicher Ratten im Alter von $26 \pm 1,5$ Wochen. Im ersten vierminütigen Test wurde dem Weibchen in seinem Heimatkäfig ein unbekanntes Jungtier dargeboten. Nach 30 Minuten wurden dem Versuchstier wieder dasselbe Jungtier und gleichzeitig ein neues unbekanntes Jungtier eines anderen Wurfes angeboten. Signifikante Unterschiede zwischen der Schnüffeldauer am wiederholt dargebotenen und am neuen Jungtier sind mit * gekennzeichnet. n=Tierzahl.

Die männlichen Versuchstiere waren ebenfalls $26 \pm 1,5$ Wochen alt und sexuell erfahren. Die GSM-befeldeten Männchen der ersten beiden Filialgenerationen schnüffelten nicht signifikant länger ($P=0,721$) am neuen Jungtier im zweiten Test und zeigten damit kein Erinnerungsvermögen an das Juvenile aus dem ersten Test 30 Minuten zuvor. Signifikante Schnüffeldauerunterschiede waren hingegen bei den Kontrollmännchen ($P=0,049$) und den UMTS-bestrahlten Männchen ($P=0,009$) der ersten beiden Filialgenerationen zu finden. Dies ist in Abbildung 17 ersichtlich. Die Schnüffeldauern im ersten vierminütigen Test unterschieden sich zwischen den Männchen der drei Expositionskammern nicht signifikant ($P=0,063$). Auch die Schnüffeldauern der gleichaltrigen Männchen und Weibchen am Juvenilen im ersten vierminütigen Test unterschieden sich laut Student's t-Test in den Kammern nicht untereinander (Kontrolle $P=0,372$; GSM $P=0,204$; UMTS $P=0,263$).

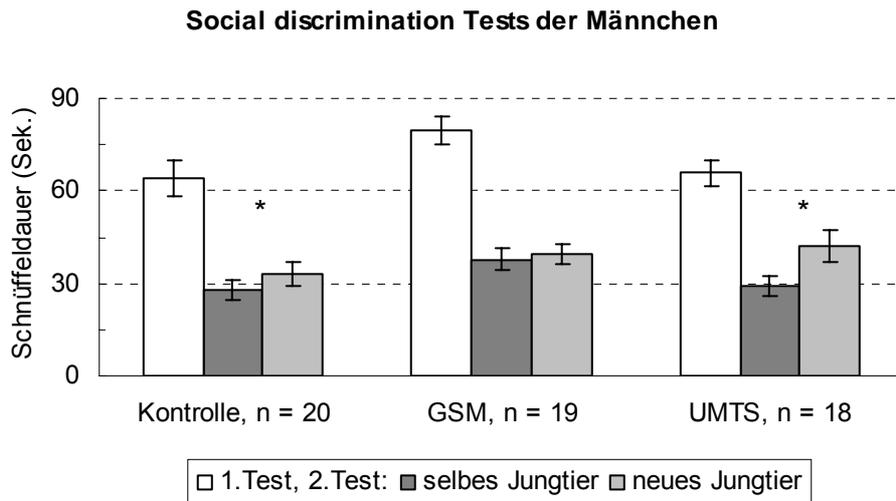


Abb. 17: Mittlere Schnüffeldauern (\pm Standardfehler) in Sekunden sexuell erfahrener männlicher Ratten im Alter von $26 \pm 1,5$ Wochen. Im ersten vierminütigen Test wurde dem Männchen in seinem Heimatkäfig ein Jungtier dargeboten. Nach 30 Minuten wurden dem Versuchstier wieder dasselbe Jungtier und gleichzeitig ein neues unbekanntes Jungtier eines anderen Wurfes angeboten. Signifikante Unterschiede zwischen der Schnüffeldauer am wiederholt dargebotenen und am neuen Jungtier sind mit * gekennzeichnet. n=Tierzahl.

Die Ergebnisse der sexuell naiven 14 ± 1 Wochen alten Männchen der dritten Filialgeneration zeigten bei den Kontrollmännchen ein Erinnern an das erneut angebotene Jungtier, aufgrund des signifikant längeren Schnüffeln am neuen und daher unbekanntem Juvenilen ($P=0,010$). Bei den befeldeten F_3 -Männchen gab es keine signifikanten Unterschiede der Schnüffeldauern im zweiten Test (GSM $P=0,076$; UMTS $P=0,531$). Dies zeigt Abbildung 18. Die Schnüffeldauern beim ersten vierminütigen Test unterschieden sich zwischen den Männchen der drei Expositionskammern signifikant ($P=0,009$). Deshalb wurde ein post hoc Holm-Sidak Test durchgeführt. Dieser ergab, dass die Kontrollmännchen signifikant kürzer an den Juvenilen schnüffelten als die Männchen sowohl der GSM- als auch der UMTS-Kammer. Die Schnüffeldauern der GSM- und UMTS-befeldeten Männchen waren hingegen ähnlich lang.

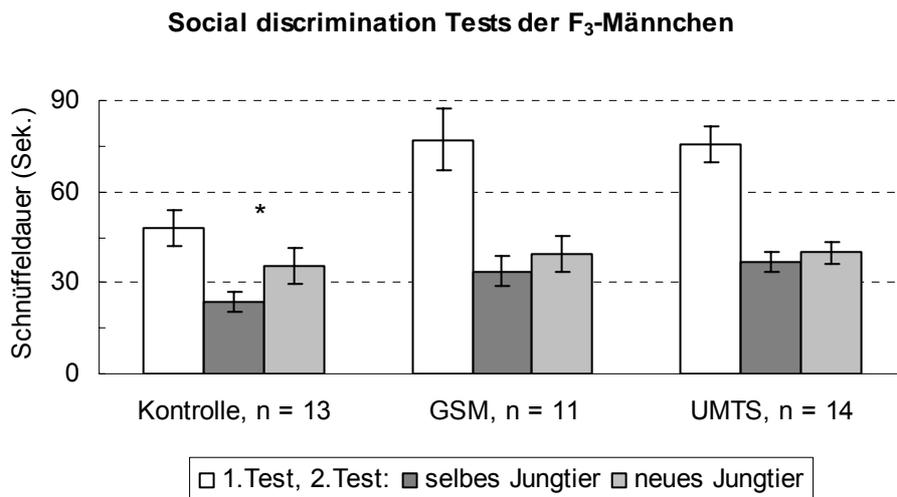


Abb. 18: Mittlere Schnüffeldauern (\pm Standardfehler) in Sekunden sexuell naiver männlicher Ratten der dritten Filialgeneration im Alter von 14 ± 1 Wochen. Im ersten vierminütigen Test wurde dem Männchen in seinem Heimatkäfig ein Jungtier dargeboten. Nach 30 Minuten wurden dem Versuchstier wieder dasselbe Jungtier und gleichzeitig ein neues unbekanntes Jungtier eines anderen Wurfes angeboten. Signifikante Unterschiede zwischen der Schnüffeldauer am wiederholt dargebotenen und am neuen Jungtier sind mit * gekennzeichnet. n=Tierzahl.

5 Diskussion

Zunächst werden die Konditionierungsversuche und die *social discrimination*-Tests getrennt betrachtet. Die Ergebnisse werden jeweils zusammengefasst, erläutert und interpretiert. Außerdem wird das Versuchsdesign diskutiert. Anschließend wird ein Vergleich mit der aktuellen Literatur vorgenommen. Eine zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse erfolgt abschließend.

5.1 Operante Konditionierung

5.1.1 Diskussion der Ergebnisse

In der Trainingsnacht und den zwei nachfolgenden Testnächten mit den Programmen zur Verstärkung hoher Hebeldruckraten zeigten die Ratten der drei Expositions-kammern keine signifikanten Unterschiede. Betrachtet wurde hierfür die Menge geleisteter Hebeldrücke, der Beachtung der an- und aus-Phasen, Leistung, Effizienz, Latenzzeiten und die relative Hebelwechselzahl. Für die genannten Untersuchungs-nächte zeigte die Korrelationsanalyse auf, dass zum Beispiel bei einem DRH-Verstärkungsplan erwartungsgemäß mit höherer Hebeldruckaktivität auch die Zahl der erhaltenen Belohnungen anstieg.

Im Trainingsnachtverlauf erzielten die Männchen in den an-Phasen anteilig immer mehr Belohnungen während bei den Weibchen dieser Zusammenhang nicht zu finden war. Es ist davon auszugehen, dass die Weibchen schneller gesättigt waren, da sie einen niedrigeren Futterbedarf als die Männchen haben. In der ersten Testnacht (DRH 2:1) erarbeitete sich keine Versuchstiergruppe im zunehmenden Verlauf mehr Belohnungen. Möglicherweise ist eine vorzeitige Sättigung die Ursache hierfür. In der zweiten Testnacht holten sich die Versuchstiere bis auf die Kontrollweibchen im Verlaufe des DRH 4:2 Tests zunehmend weniger Belohnungen. Eine vorzeitige Sättigung ist als ursächlich anzunehmen.

Die prozentuale Leistung stieg bei den Ratten der Kontroll- und UMTS-Kammer im Verlauf der ersten Testnacht (DRH 2:1) an. Die Tiere der GSM-Kammer zeigten diesen Zusammenhang nicht. In der zweiten Testnacht, in der mindestens vier Hebeldrücke im Abstand von maximal einer halben Sekunde gefordert waren, zeigte sich kein Zusammenhang zwischen Leistungsverbesserung und Testnachtverlauf.

Auch konnte in den DRH-Testnächten fast nie bei großen Mengen an Hebelldrücken auf eine ebenfalls hohe Leistung geschlussfolgert werden. Offenbar waren die Tiere vorzeitig nicht mehr ausreichend motiviert, der Lernanforderung exakt zu entsprechen. Trotz Fehler (unnötig vielen und/oder nicht schnell genug hintereinander platzierten Hebelldrücken), reichte die Zahl der erhaltenen Futterbelohnungen für eine Sättigung aus.

Bei den männlichen Versuchstieren konnten in der dritten Testnacht, in welcher erstmalig der Verstärkungsplan DRL 16 vorgegeben worden war, signifikante Unterschiede nachgewiesen werden. In den aus-Phasen drückten die UMTS-befeldeten Rattenmännchen signifikant weniger oft als die Männchen der Kontroll- und GSM-Kammer. Jedoch war die Zahl der gesamten Hebelldrücke und die Zahl der Hebelldrücke in den an-Phasen sowie die Beachtung der an- und aus-Phasen wiederum ähnlich. Die Leistung und Effizienz der Männchen aus der UMTS-Kammer war signifikant höher als bei den Männchen der GSM-Kammer, deren Leistung signifikant niedriger ausfiel. Zur Kontrollkammer wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt, so dass hier nicht von einem signifikanten Einfluss der chronischen Befeldung gesprochen werden kann. Der gefundene Leistungsunterschied zwischen den Männchen aus den Kammern mit Befeldung weist auf geringfügige Einflüsse einmal in Richtung Lernverbesserung nach chronischer UMTS-Bestrahlung und in Richtung Lernleistungsverschlechterung nach chronischer GSM-Bestrahlung hin. Diese Effekte auf die Leistung sind jedoch unter der DRL 16 Verstärkung zu klein um auffallend von der Leistung der Kontrollmännchen abzuweichen. Hinsichtlich der Latenzzeiten oder relativer Hebelwechselzahl wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede gefunden.

In der dritten Testnacht zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den weiblichen Versuchstieren der drei Expositionskammern hinsichtlich Hebeldruckzahlen, Leistung, Effizienz oder Hebelwechseln. Die Beachtung der an- und aus-Phasen gelang den UMTS-befeldeten Weibchen signifikant besser als den GSM-befeldeten Weibchen. Zu den Kontrollweibchen bestand jedoch jeweils kein signifikanter Unterschied. Die Latenzzeit der Rattenweibchen der UMTS-Kammer war signifikant kürzer als die der Kontrollweibchen. Zu den Ratten der GSM-Kammer bestand aber jeweils kein signifikanter Unterschied.

Im Testnachtverlauf erzielten die Versuchstiere zunehmend mehr Belohnungen was wie zu erwarten mit der ebenfalls zunehmend höheren Leistung einherging. In dieser Testnacht waren die Versuchstiere durchgehend motiviert Futterbelohnungen zu erzielen und somit nicht vorzeitig gesättigt. Der Druck die Anforderung für eine Futterbelohnung genau zu erfüllen, war höher als in den vorangegangenen beiden Testnächten. Jeder falsche Hebeldruck bedeutete aufgrund des erneuten Startens des Sperrintervalls, dass sich die Möglichkeit eine Futterbelohnung zu erhalten weiter verzögerte.

In der fünften Untersuchungsnacht wurde den Ratten derselbe Verstärkungsplan (DRL 16) wie in der vorigen Testnacht angeboten, so dass eine deutliche Leistungsverbesserung auch für eine Gedächtnisleistung sprechen würde.

Zwischen den männlichen Versuchstieren der drei Expositionskammern ließen sich keine signifikanten Unterschiede finden, so dass hier kein Effekt einer chronischen Befeldung nachzuweisen war.

In der zweiten DRL-Testnacht ließen sich Verhaltenseffekte bei den GSM-befeldeten Weibchen verglichen zur Kontrollgruppe finden. Die GSM-bestrahlten Weibchen drückten signifikant häufiger als die Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer. Dies gilt sowohl bezüglich der gesamten Testnacht als auch bezüglich der Anzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen. Die Zahl der Hebeldrücke in den aus-Phasen und die Beachtung der an- und aus-Phasen war hingegen ähnlich. Die Leistung der Weibchen der GSM-Kammer war signifikant niedriger als die der Weibchen aus der Kontroll- und UMTS-Kammer. Die Effizienz der GSM-befeldeten Rattenweibchen war ebenfalls signifikant geringer als die der Kontrollweibchen. Zu den Rattenweibchen der UMTS-Kammer bestand dagegen kein signifikanter Unterschied. Der relative Anteil an Wechseln zwischen dem linken und rechten Hebel war in den aus-Phasen ähnlich. Aber bezüglich der Gesamtzahl an Hebeldrücken und Anzahl der Hebeldrücke in den an-Phasen wechselten die Rattenweibchen aus der GSM-Kammer signifikant häufiger zwischen den Hebeln als die Versuchsweibchen der UMTS-Kammer. Zu den Kontrollweibchen ergab sich jedoch jeweils kein Unterschied. Die Latenzzeiten waren in dieser Testnacht untereinander ähnlich.

Bei beiden Geschlechtern ergaben Vergleiche der Daten der ersten mit denen der zweiten DRL 16 Testnacht zumeist übereinstimmende Ergebnisse. So war die Hebeldruckzahl, die in der gesamten Testnacht erbracht wurde, in der zweiten DRL-Testnacht verglichen zur ersten signifikant niedriger. Ebenso verhielt es sich mit den Hebeldruckzahlen der an- und aus-Phasen. Die Hebeldruckaktivität konzentrierte sich in der fünften Testnacht verglichen zur vierten Testnacht signifikant mehr auf die an-Phasen. Die Anzahl vorzeitiger Hebeldrücke innerhalb des Sperrintervalls war in der letzten Testnacht signifikant geringer als in der vorletzten Testnacht. Somit waren Effizienz und Leistung in der Testnacht mit dem wiederholt angebotenen DRL 16 Verstärkungsplan signifikant höher. Dementsprechend erarbeiteten sich die Tiere in der fünften Testnacht signifikant mehr Futterbelohnungen als in der vorigen Testnacht. Einige Unterschiede wurden bei der Latenzzeit und der relativen Zahl der Hebelwechsel festgestellt. In der letzten Testnacht, verglichen zur vorletzten, war die Latenzzeit der GSM-bestrahlten Männchen und der Kontrollweibchen signifikant kürzer. Die Latenzzeiten der übrigen Ratten waren dagegen in beiden Testnächten ähnlich lang. Der Vergleich der beiden DRL 16 Testnächte zeigte auf, dass die GSM-bestrahlten Männchen in der letzten Testnacht signifikant weniger Hebelwechsel in den aus-Phasen vollzogen als in der vorletzten Testnacht. Die Werte der übrigen Ratten in den aus-Phasen waren in beiden Testnächten ähnlich. Die Zahl der relativen Hebelwechsel in den an-Phasen war verglichen zur vorletzten Testnacht bei den Weibchen der GSM-Kammer signifikant höher und bei den übrigen Versuchsratten dagegen zur vorangegangenen Testnacht ähnlich.

Übereinstimmend für beide Testnächte konnte man feststellen, dass die prozentuale Leistung im Testnachtverlauf zunahm, wobei bei der DRL-Verstärkung erwartungsgemäß ein Zusammenhang zwischen höherer Leistung bei weniger Hebeldrücken gefunden wurde. In den DRL 16 Testnächten bedeutete also eine niedrigere Hebeldruckanzahl auch eine höhere Leistung. Die GSM-Weibchen erreichten keine so hohe Leistung in der letzten Testnacht wie die Kontrollweibchen und die Weibchen aus der UMTS-Kammer. Offensichtlich konnten sich die GSM-befeldeten Weibchen weniger gut an die Lernanforderung der vorigen Testnacht erinnern als die Kontroll- und UMTS-bestrahlten Weibchen.

Trotz vereinzelter Leistungs- und Effizienzunterschiede war die Menge an erhaltenen Futterkugeln in allen Untersuchungs Nächten bei beiden Geschlechtern ähnlich. Die niedrigere Leistung der GSM-befeldeten Männchen in der vorletzten und der GSM-bestrahlten Weibchen in der letzten Testnacht führten nicht zu einer signifikant niedrigeren Zahl erzielter Belohnungen im Vergleich zu den Tieren der anderen beiden Kammern. Auch die Gewichtszunahmen während der Dauer der Versuchszeit unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Tieren der drei Kammern.

Das Erlernen der Aufgabe mehrere Hebeldrücke im Abstand von maximal einer halben Sekunde zu leisten, stellte für die Versuchstiere keine allzu große Herausforderung dar, obwohl die Motivation die genaue geforderte Anzahl an Hebeldrücken zu erlernen durch die vorschnelle Sättigung im Versuchsverlauf eventuell ungenügend war. Beim Umlernen von der Verstärkung hoher Verhaltenshäufigkeit zu niedriger Verhaltenshäufigkeit in der ersten DRL 16 Testnacht zeigten sich keine relevanten Lernleistungsunterschiede verglichen zur Kontrollgruppe. Die Fähigkeit das Erlöschen des Signallichts und/oder den Zeitraum von mehreren Sekunden abzuwarten war nicht durch die Befeldung beeinträchtigt. Eine eventuell schlechtere Gedächtnisleistung zeigten weibliche Ratten nach chronischer Befeldung mit dem GSM-Standard in der letzten Testnacht beim wiederholt angebotenen DRL 16 Verstärkungsplan. In der vorletzten Testnacht beim erstmaligen Verwenden dieses Konditionierungsplanes ließen sich nämlich noch keine Leistungsunterschiede zwischen den Weibchen der Expositionskammern nachweisen.

Eine Erklärung für die Ratten, die in einigen oder einzelnen Untersuchungs Nächten vergleichsweise auffällig wenig Hebeldruckaktivität gezeigt haben, wäre mangelnde Motivation und/oder das Nichterlernen der Versuchsanforderung.

5.1.2 Diskussion des Versuchsdesigns

In der vorliegenden Studie sollten die Versuchsratten in einer Skinnerbox den Zusammenhang zwischen Hebeldruck und Futtergabe erlernen. Sie wurden also auf das Drücken eines Hebels konditioniert. Zusätzliche Hinweisreize sollten das gewünschte Verhalten unterstützen. So gab es neben dem kurzen Aufleuchten eines weißen Signallichts, auch ein typisches Klicken, wenn der Hebel ausreichend niedergedrückt wurde. Ein anderer akustischer Hinweisreiz auf die bevorstehende

Futterbelohnung war das Geräusch des Futterautomaten. Eine Trainingsnacht erwies sich als ausreichend, um die zu konditionierende Wirkreaktion zu erlernen.

Optische Signale (Hauslicht oder Dunkelheit) sollten dem Tier anzeigen, wann Wirkreaktionen belohnt werden. Die Dunkelheit (aus-Phase) zeigte die Unterbrechung des Verstärkungsplanes an. Die Menge der Hebeldrücke in den aus-Phasen war aufgrund der ausbleibenden Verstärkung stets niedriger als in den an-Phasen. Im Verlaufe der Versuche wurden die aus-Phasen von den Ratten zunehmend berücksichtigt. Dies führte allerdings nicht zu einer vollständigen Unterdrückung der konditionierten Reaktion. Der optische Hinweisreiz wurde vermutlich dafür nicht ausreichend stark von den Tieren beachtet. Dafür spricht auch die teilweise Verschlechterung der Phasenbeachtung in der dritten Testnacht. Hier war die Lernanforderung nach Verstärkung hoher Verhaltenshäufigkeit in den vorangegangenen Testnächten plötzlich grundsätzlich verschieden, da nun im Gegenteil niedrige Verhaltenshäufigkeiten gefordert waren. Die Stimuluskontrolle über optische Signale ist bei Ratten also nicht ausreichend, um Hebeldrücke in aus-Phasen vollständig zu unterdrücken. Da Ratten auch im Dunkeln weiterhin Wirkreaktionen erbringen, könnten alternativ oder ergänzend akustische Signale wie zum Beispiel ein *buzzer* oder das Entfernen der Hebel als Möglichkeit zur Anzeige einer Unterbrechung verwendet werden (Ferster & Skinner 1957).

Licht kann ab bestimmten Intensitäten als aversiver Reiz wirken (Keller 1941). Es ist daher eventuell zweckmäßiger Dunkelheit als salienten Reiz für an-Phasen zu nutzen. In der vorliegenden Studie ist jedoch aufgrund der geringen Helligkeit der verwendeten Lichter (siehe Kapitel 3.6.2) davon auszugehen, dass sie selbst bei den lichtempfindlichen albinotischen Versuchstieren keinen aversiven Reiz darstellten.

Auffällig ist die große interindividuelle Varianz zwischen den Ratten im Experiment. Die durchgeführte Art der Selektion (siehe Kapitel 3.1) zur Beschränkung der Weiterzucht auf Ratten mit mittleren Lernleistungen im operanten Konditionierungsversuch, um die Varianz zu verringern, erreichte nicht die gewünschte Wirkung. Um die genetische Disposition besser zu kontrollieren, wäre zum Beispiel das Verwenden eines Inzucht- statt eines Auszuchtstammes denkbar. Ein weiterer Grund für die hohe Variabilität der Lernleistung könnte eine unterschiedlich starke Motivation (Hunger) der Tiere während der Untersuchungsnacht sein. Bei der nachtaktiven Wanderratte unter einem 12:12 Licht-Dunkel-Regime bei *ad libitum*

Fütterung wird der Hauptanteil der täglichen Nahrungsmenge vorwiegend in der Dunkelphase mit Maxima zu Beginn und Ende der Aktivitätsphase aufgenommen (Strubbe & Woods 2004). Da der Testbeginn einige Stunden vor dem üblichen Einsetzen der Dunkelphase lag, konnte also auf eine Futterdeprivation zur Kontrolle der Motivation verzichtet werden. Eventuell sollte man dennoch die Futterpellets in der Ruhezeit vor Testbeginn vollständig aus dem Heimatkäfig entfernen und den Tieren erst nach Testabschluss wieder Zugang zum Haltungsfutter gewähren. Eine vorzeitige Sättigung im Versuchsverlauf sollte vermieden werden, um eine anhaltende Motivation in den an-Phasen zu gewährleisten. In den Testnächten mit der Verwendung des Verstärkungsplans DRL 16 ist dies gelungen. Bei den vorangegangenen Untersuchungsnächten gab es Hinweise, dass möglicherweise eine vorzeitige Sättigung erfolgte. Neben dem Überprüfen des Futterschälchens in der Skinnerbox auf übrig gebliebene Futterbelohnungen, wäre durch eine Kontrolle des Haltungsfutterverbrauchs eine noch bessere Einschätzung der Sättigung der Versuchstiere möglich. Eine bessere Kontrolle der Motivation könnte zum Beispiel auch durch eine Verkleinerung der verwendeten Futterkugeln und/oder eine Beschränkung der maximal möglichen Belohnungsmenge pro an-Phase über den Verstärkungsplan geschehen. Eine Verkürzung der Versuchszeit wäre ebenfalls eine Möglichkeit. Noch höhere Lernanforderungen könnten eine überschnelle Sättigung vermeiden, indem die Ratten zum Beispiel die Anzahl der nötigen Hebeldrücke genauer beachten und unnötige Wirkreaktionen vermeiden würden. Die Zeitabschnitte der höchsten Motivation könnte man ausnutzen, wenn man die an-Phasen zu Beginn und Ende der üblichen Aktivitätszeit legen würde. Im vorliegenden Versuchsdesign fiel eine an-Phase auf die Zeit der maximalen Futteraufnahme zu Aktivitätsbeginn. In der Zeit der maximalen Futteraufnahme zum Ende der Aktivitätszeit hin, lag jedoch eine aus-Phase, in welcher kein Futter erarbeitet werden konnte. Die Ausnutzung der im circadianen Rhythmus begründeten Motivationsmaxima gelang also nur zum Teil. Um eine bessere Vereinheitlichung der Latenzzeiten zu erreichen, sollte der Testnachtbeginn auf den Aktivitätszeitbeginn (Beginn der Dunkelzeit) gelegt werden. Dies könnte sicherstellen, dass alle Versuchstiere innerhalb der ersten an-Phase mit dem Lernprozess beginnen, so würden sich die interindividuellen Varianzen vermutlich weiter einschränken lassen.

Anhand der Hebeldruckaktivität wurde ein Aktivitätsrhythmus der Versuchstiere erstellt. Da im Experiment der Dunkelphasenbeginn drei Stunden vorverlegt und die Testnacht in an- und aus-Phasen unterteilt war, wurde der natürliche Aktivitätsrhythmus der nachtaktiven Ratten verändert. Eine über die Untersuchungs- nacht hinweg gleichmäßige Verteilung der Hebeldruckaktivität auf die einzelnen Phasen zeigte sich aber nicht. Gründe dafür könnten neben dem natürlichen Aktivitätsrhythmus zum Beispiel variierende Motivation, vorzeitige Sättigung, die Anforderung des Verstärkungsplanes oder die zum Teil unterschiedlichen Latenzzeiten sein.

Aufgrund der Verwendung eines grünen LED-Signallichts als Hinweisreiz über dem zuletzt betätigten Hebel zur Anzeige des Sperrintervalls in den DRL 16 Testnächten war die Leistung der Ratten erhöht. Der Hinweisreiz wird von den Tieren also beachtet. Es ist jedoch nicht möglich zu differenzieren, ob ein einzelnes Versuchstier sich auf sein Zeiteinschätzungsvermögen, das Signallicht oder eine Kombination von beidem stützte. Als Erklärung für eine suboptimale Leistung in DRL-Verstärkungsplänen aufgrund vorzeitiger Hebeldrücke wird nicht ein schlechtes Zeiteinschätzungsvermögen angenommen. In Betracht gezogen wird eher eine Sensitivierung (*arousal*), also die Zunahme der Aktivitätsbereitschaft, welche durch die Futterbelohnungspräsentation und das Vergehen von Zeit induziert wird (Doughty & Richards 2002). Das Signallicht ermöglicht eventuell ein schnelleres Erlernen der Sperrintervalldauer und/oder hilft vorzeitiges Hebeldruckverhalten, welches sich aufgrund der Erwartung einer baldigen Futterbelohnung einstellt, zu unterdrücken. Der Einsatz von zusätzlichen Hinweisreizen kann die Lernleistung also beeinflussen und bietet einen weiteren Ansatz um das Versuchsdesign zu variieren.

Sable et al. (2006) untersuchten bei der Ratte mit einer ähnlichen Abfolge von DRH- und DRL-Verstärkungsplänen die Wirkung einer Mischung polychlorierter Biphenyle (PCB) auf die Nachkommen exponierter Mütter. Anschließend wurde zusätzlich der Verstärkungsplan der Löschung, also keine Futterbelohnungsgaben, eingesetzt. Dadurch konnten weitere Effekte der PCB-Belastung während der Entwicklungszeit bei den Nachkommen im Alter von circa acht bis neun Monaten gefunden werden. Der nicht-intermittierende Verstärkungsplan zur Abschwächung bzw. Löschung (*extinction* – EXT) könnte auch in dem in der vorliegenden Studie untersuchten Zusammenhang eine sinnvolle Ergänzung zur Abfolge der Verstärkungspläne

aufeinander folgender Testnächte darstellen. So könnte der Einfluss des Ausbleibens der erwarteten Futterbelohnungen auf die Wirkreaktionen untersucht werden und eventuell zusätzliche Verhaltensunterschiede aufgezeigt werden.

5.2 *Social discrimination-Test*

Wie erwartet wurden die männlichen Jungtiere im Test nicht von den adulten Käfigbewohnern ernsthaft attackiert oder verletzt. Besonders die Männchen waren deutlich seltener aggressiv als die Weibchen. Die Weibchen dagegen wehrten die Jungen oft nach kurzer Zeit ab und zeigten häufig Dominanzverhalten. Das agonistische Verhalten ist hauptsächlich zyklusabhängig. Östrische Weibchen sind weniger aggressiv als nicht-östrische Weibchen. Die Gedächtnisleistung wird dadurch jedoch nicht beeinträchtigt. Da davon auszugehen ist, dass der Zyklus das Erinnerungsvermögen nicht beeinflusst (Engelmann et al. 1998, Markham & Juraska 2007), wurde dieser nicht kontrolliert.

Laut Literaturangaben gibt es Geschlechtsunterschiede in der Schnüffeldauer am Jungtier beim ersten kurzen Zusammensetzen der adulten Ratte und eines Jungtieres. Dabei verbringen Männchen signifikant längere Zeit mit Schnüffeln an den Stimulustieren als Weibchen (Thor & Holloway 1982, Bluthé & Dantzer 1990, Kelly & Tran 1997, Burman & Mendl 2003, Peña et al. 2006, Markham & Juraska 2007). Dies kann im Rahmen dieser Studie nicht bestätigt werden. Männchen und Weibchen im Alter von circa einem halben Jahr aus allen drei Expositionskammern zeigten keine signifikanten Schnüffeldauerunterschiede im ersten kurzzeitigen Zusammensetzen mit einem Jungtier. Das Interesse an sozialen Stimuli, hier in Form eines Jungtieres, schien bei beiden Geschlechtern gleich groß zu sein. Diese Abweichung von in der Literatur beschriebenen Ergebnissen ist möglicherweise auf die hier eingehaltene Gruppenhaltung zurückzuführen. Die Ratten der oben genannten Studien wurden vor der Testdurchführung einige Zeit einzeln gehalten. Dieses Vorgehen wurde für die vorliegende Arbeit als unnötiger Eingriff in die Haltungsbedingungen erachtet.

Die Versuchstiere wurden nach dem Absetzen am 21. Lebenstag in gleichgeschlechtlichen Gruppen zu zwei Männchen bzw. drei Weibchen gehalten. Die Weibchen hatten also die Möglichkeit mit zwei anderen Ratten zu interagieren während den männlichen Ratten nur ein Partnertier zur Verfügung stand.

Möglicherweise resultierte dies in einem unterschiedlich großen „Übungseffekt“ beim Kontakt mit Artgenossen. Dies könnte eventuell einen zusätzlichen Einfluss auf das Sozialverhalten der beiden Geschlechter der Versuchstiere ausgeübt haben.

Die Kontrollratten beider Geschlechter zeigten nach 30 Minuten ein Erinnerungsvermögen an die vorher präsentierten juvenilen Männchen. Dieses Ergebnis stimmt mit bereits publizierten Daten überein (Dantzer et al. 1987, Bluthé & Dantzer 1990, Popik et al. 1992, Engelmann et al. 1995). Die Erwartung einer unbeeinträchtigten Gedächtnisleistung unter üblichen Haltungsbedingungen und ohne weitere Behandlung wurde erfüllt. Die Kontrolldaten boten also eine sichere Basis für den Vergleich mit den Ergebnissen der befeldeten Ratten.

Die Weibchen aus allen drei Expositionskammern erinnerten sich nach 30 Minuten an das männliche Jungtier. Da weibliche Ratten ein deutlich besseres Erinnerungsvermögen an Juvenile als Männchen besitzen (Bluthé & Dantzer 1990, Engelmann et al. 1998), hätte ein längeres Zeitintervall von beispielsweise zwei Stunden vermutlich eher behandlungsinduzierte Unterschiede der Gedächtnisleistung aufzeigen können. Eine halbe Stunde ist für weibliche Ratten eine eher unterfordernde Testsituation. Weitere Untersuchungen, mit unterschiedlich langen Zeitintervallen (>30 Minuten) zwischen den beiden Jungtierpräsentationen, wären hilfreich gewesen.

Bei den männlichen Ratten gab es Unterschiede bezüglich der Gedächtnisleistung. Von den sexuell erfahrenen circa ein halbes Jahr alten Rattenmännchen erinnerten sich die GSM-befeldeten Männchen im Gegensatz zu den Tieren aus der Kontroll- und UMTS-Kammer nach einer halben Stunde nicht mehr an das wiederholt angebotene Juvenile. Die jüngeren sexuell naiven drei bis vier Monate alten Männchen aus der GSM- und UMTS-Kammer erinnerten sich ebenfalls nach 30 Minuten nicht mehr an ein wiederholt angebotenes Juvenile. Sie verbrachten dabei im ersten vierminütigen Test signifikant mehr Zeit mit dem Beschnüffeln der Juvenile als die sexuell naiven gleichaltrigen Kontrollmännchen. Die Kontrollmännchen erinnerten sich jedoch an das Jungtier. Dies bestätigt die Ergebnisse von Engelmann et al. (1995), dass sexuelle Erfahrung der Versuchstiere im *social discrimination*-Test keine Rolle spielt. Die chronische Befeldung mit einem hochfrequenten elektromagnetischen Feld bei einer Frequenz von 900 MHz und einer SAR von 0,4 W/kg scheint die Gedächtnisleistung für sozial relevante Informationen zu beeinträchtigen. Die chronische Befeldung bei einer Frequenz von 1,966 GHz und

einer SAR von 0,4 W/kg scheint die Gedächtnisleistung für sozial relevante Informationen altersabhängig zu beeinträchtigen. Ursächlich hierfür ist möglicherweise eine Entwicklungsverzögerung der Gedächtnisleistung. Die circa drei Monate älteren UMTS-befeldete Männchen erkennen ein Jungtier nach einer halben Stunde und erreichen somit ein Leistungsniveau wie die Kontrolltiere. Wahrscheinlich würden die GSM-befeldeten Ratten einige Wochen später ebenfalls eine bessere Gedächtnisleistung zeigen. Sicher ist dies aber nicht. Es wäre deshalb interessant die altersabhängige Entwicklung der Gedächtnisleistung hinsichtlich *social memory* unter den beiden Mobilfunkstandards zu verfolgen. Dabei könnten auch unterschiedlich lange Zeitintervalle (30-120 Minuten) zwischen den beiden Jungtierpräsentationen helfen das Ausmaß der möglichen Verschlechterung der Gedächtnisleistung genauer zu quantifizieren.

Die vorliegende Studie verwendete erstmalig den *social discrimination*-Test zur Einschätzung von *social memory* bei Ratten nach Belastung mit elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern. Es gibt derzeit zwei Arbeiten (Vázquez-García et al. 2004, Reyes-Guerrero et al. 2006), die mittels *social recognition*-Tests (siehe Kapitel 2.5) den Bestrahlungseinfluss eines extrem niederfrequenten Feldes (*elf-field*) nachgewiesen haben. In diesem Fall handelte es sich um eine Verlängerung des Erinnerungsvermögens von adulten Ratten an Juvenile nach einem vierminütigen Zusammensetzen auf mindestens fünf Stunden.

5.3 Vergleich zu anderen Studien

Tests zu Gedächtnis- und Lernleistungen von Ratten sind bei Befeldungen mit 900 MHz, aber noch nicht bei vom UMTS-Mobilfunkstandard genutzten Frequenzen in der Literatur beschrieben.

Bornhausen & Scheingraber (2000) befeldeten drei Monate alte weibliche Ratten von Tag 1-20 ihrer Trächtigkeit unter Fernfeldbedingungen. Sie verwendeten dafür ein 900 MHz, 217 Hz gepulstes elektromagnetisches Feld nach GSM-Standard bei einer spezifischen Absorptionsrate von circa 0,02-0,08 W/kg. Die Nachkommen wurden analog zur vorliegenden Studie in Skinnerboxen pro Testnacht 15 Stunden mit alternierenden an- und aus-Phasen getestet. Dabei wurde an die Tiere eine zunehmend höhere Lernanforderung gestellt. Nach drei Testnächten mit einer Verstärkung in Richtung hoher Hebeldruckzahl (DRH 2:1, DRH 4:2, DRH 8:4) und

drei Testnächten mit Verstärkung in Richtung geringer Hebeldruckhäufigkeit (DRL 8, DRL 16, DRL 32) folgten drei Testnächte mit einer kombinierten DRH- und DRL-Verstärkung. Dabei fand alle 45 Minuten ein Wechsel von DRH- und DRL-Verstärkung ohne aus-Phase statt. Die ausschließlich pränatal erfolgte Befeldung ergab im Alter von 11-12 Wochen in allen Testnächten keine Lernleistungsunterschiede zu nicht befeldeten Kontrollratten.

Sienkiewicz et al. (2000) exponierten männliche Mäuse (*Mus musculus*) eines Inzuchtstammes zehn Tage lang je 45 Minuten einem 900 MHz und 217 Hz gepulsten elektromagnetischen Feld unter Fernfeldbedingungen bei einer Ganzkörper-SAR von circa 0,05 W/kg. Diese Bedingungen sollten ein Telefonat mit einem Mobiltelefon unter GSM-Standard nachbilden. Die Exposition der Tiere begann im Alter von 12 Wochen. Im Anschluss an die tägliche Befeldung sollten die futterdeprivierten Mäuse lernen in einem achtarmigen *radial arm maze* Futter am Ende jedes Armes zu finden und innerhalb von 15 Minuten alle Arme unter zu Hilfenahme von visuellen Hinweisreizen zu besuchen. Der Test des räumlichen Lernens über die zehn Tage hinweg ergab keine unterschiedlichen Leistungen zwischen befeldeten Mäusen und scheinexponierten Kontrollmäusen.

Dubreuil et al. (2002) exponierten 45 Minuten täglich ausschließlich die Köpfe männlicher Ratten mit einem 217 Hz gepulsten 900 MHz elektromagnetischen Feld bei einer SAR von entweder 1 oder 3,5 W/kg. Den futterdeprivierten Tieren wurde im Anschluss an die tägliche Befeldung eine Aufgabe zum räumlichen Lernen mittels visuellen geometrischen Hinweisreizen gestellt. In einem achtarmigen *radial arm maze* enthielten die Enden der acht Arme Futter. Die Ratten sollten über zehn Tage hinweg lernen jeden Arm nur einmal zu besuchen. Weiterhin konnten die Ratten bei der „Trockenversion“ des Morris *water maze* auf einer runden Plattform (*open-field* Arena) mit dreizehn befestigten kleinen Boxen diejenige Box, welche eine Futterbelohnung enthielt, finden. Die belohnte Box befand sich stets am selben Platz. Diese Lernaufgabe erhielten die Tiere viermal täglich über 14 Tage hinweg. Beide Versuchsdesigns zeigten keine Lernleistungsunterschiede zwischen befeldeten, scheinexponierten und völlig unbehandelten Rattenmännchen auf.

Dubreuil et al. (2003) exponierten wiederum 45 Minuten täglich ausschließlich die Köpfe männlicher Ratten mit einem 217 Hz gepulsten 900 MHz elektromagnetischen Feld bei einer SAR von entweder 1 oder 3,5 W/kg. Sie führten Versuche zum

räumlichen Lernen und zur Objekterkennung durch. Die futterdeprivierten Tiere wurden im Anschluss an die tägliche Befeldung in ein achtarmiges *radial arm maze*, dessen Enden Futter enthielten, gesetzt. Die Ratten sollten über zwölf Tage hinweg mittels visueller geometrischer Hinweisreize lernen, jeden Arm nur einmal zu besuchen. Zur Erhöhung des Schwierigkeitsgrades wurde in einem weiteren Experiment nach acht Tagen die übliche Testprozedur abgeändert. Die Ratten wurden von da an sieben Tage lang nach dem Besuch von vier Armen kurzzeitig aus dem *radial arm maze* entfernt. Nach 15 Minuten wurden sie wieder eingesetzt wobei die Tiere die vorher nicht besuchten vier Arme aufsuchen sollten. Beide Tests zeigten keine eindeutigen Lernleistungsunterschiede zwischen befeldeten, scheinexponierten und völlig unbehandelten Rattenmännchen. Die Objekterkennungsaufgabe wurde in einem quadratischen *open-field* mit 15 oder 60 Minuten Zeitintervall zwischen zwei Tests durchgeführt. Die Befeldung fand entweder vor der Aufgabe (beim 15 Minuten Zeitintervall) oder zwischen den beiden Tests (im 60 Minuten Zwischenzeitintervall) statt. Im ersten dreiminütigen Test durfte das Versuchstier zwei identische Plastikobjekte erkunden und wurde danach für 15 bzw. 60 Minuten aus dem *open-field* entfernt. Nach dem entsprechenden Zeitintervall wurde die Ratte ins *open-field* zurückgesetzt und konnte nun wieder drei Minuten lang zwei andere Objekte erkunden. Eines war identisch zu denen aus dem ersten Test und das andere war ein bisher unbekanntes Plastikobjekt. In beiden Fällen erkundeten befeldete, scheinexponierte und völlig unbehandelte adulte Rattenmännchen das neue Objekt signifikant länger als das bekannte. Sie zeigten damit ein unbeeinflusstes Erinnerungsvermögen an das wiederholt angebotene Objekt, sowohl nach einer Viertel- als auch nach einer ganzen Stunde.

Das jeweils verwendete elektromagnetische Feld in den genannten Arbeiten entsprach mit 900 MHz dem GSM-Standard und simulierte durch die 217 Hz Pulsung ein Telefonat mit einem Mobiltelefon. Anders als in den vorgestellten Studien war das 900 MHz Feld in der vorliegenden Studie nicht gepulst. Die beschriebenen Experimente fanden jedoch ebenfalls nicht während unmittelbarer Befeldung statt. Die Verhaltenstests zum räumlichen Gedächtnis (*spatial memory*) und dem Objekterkennungstest (*object recognition*) wurden nach 45minütiger Bestrahlung durchgeführt, so dass hier nicht von einer chronischen Exposition gesprochen werden kann. Während der kurzzeitigen Befeldung waren die Tiere außerdem in ihrer

Bewegungsfreiheit stark eingeschränkt. Eine langfristige Bestrahlung von Nagern durch hochfrequente elektromagnetische Felder, ähnlich einer Basisstation, mit anschließendem Test von kognitiven Leistungen wurde bisher nicht durchgeführt. Die verwendeten spezifischen Absorptionsraten in den oben genannten Studien waren entweder deutlich niedriger (0,05 W/kg bei Mäusen) oder deutlich höher (1 oder 3,5 W/kg bei Ratten) als die hier angewendete SAR von 0,4 W/kg. Die chronische 20tägige pränatale Befeldung von Ratten erfolgte mit deutlich niedrigerer SAR (0,02-0,08 W/kg). Im Bereich der Befeldung unter UMTS-Mobilfunkstandard mangelt es an vergleichbaren Studien.

In allen zitierten Untersuchungen konnte keine Beeinträchtigung der Lern- oder Gedächtnisleistung verglichen zu unbefeldeten Kontrolltieren nachgewiesen werden. Auch in der vorliegenden Studie wurde keine Beeinflussung der Lernleistung durch chronische prä- und postnatale Exposition nach GSM- oder UMTS-Mobilfunkstandard bei 0,4 W/kg im operanten Konditionierungsversuch im Vergleich zu einer scheinexponierten Kontrollgruppe gefunden. Die Untersuchung zu *social memory* zeigte Effekte einer chronischen Befeldung im Sinne einer Gedächtnisleistungsverschlechterung auf. Dies steht im Gegensatz zu den Befunden zum räumlichen Gedächtnis und Objekterinnerungsvermögen. Diese erwiesen sich nach GSM-Befeldung als unbeeinflusst. Eine unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeit der komplex verschalteten beteiligten zentralnervösen Areale und Sinneswahrnehmungsstrukturen sollte daher in Betracht gezogen werden. Auch kann aufgrund der unterschiedlichen beteiligten Hirnareale, Gedächtnistypen, Lernformen etc. der Einfluss auf kognitive Leistungen nicht problemlos verallgemeinert werden. Zum Beispiel war *social memory* (*social recognition*-Test) nach einer zytotoxischen Hippokampusläsion nicht in Mitleidenschaft gezogen, während das räumliche Gedächtnis (*elevated T-maze*) erwartungsgemäß beeinträchtigt war (Bannermann et al. 2001). Die Autoren schlagen daher die parahippokampale Region als essentiell für *social memory* vor, weil es sich beim *social recognition*-Test um einen einfachen olfaktorischen Erkennungstest handelt. Für eine komplexere Aufgabe (Einbezug mehrerer Sinnesmodalitäten und/oder räumliche Bezüge) würde der Hippokampus wiederum eine wichtige Rolle spielen. Für das Erlernen von futterbelohntem Hebel-drücken sind dagegen Teile des Striatums, der präfrontale Kortex und basolaterale Teile der Amygdala unverzichtbar. Vor allem der *Nucleus acumbens* (im ventralen

Striatum) scheint eine Schlüsselrolle zu spielen (Kelley 2004). Dieser kontrolliert beispielsweise auch motiviertes Verhalten und Futteraufnahme. Tests zur Prüfung verschiedener kognitiven Leistungen sind also notwendig. Dabei ist ein eventueller Geschlechtsdimorphismus, der bei vielen Tierarten auftritt zu beachten. Fähigkeiten für bestimmte kognitive Leistungen könnten zwischen den Geschlechtern differieren. Ein Beispiel dafür ist *social memory* adulter Ratten für juvenile Ratten, wobei Weibchen ein längeres Erinnerungsvermögen als Männchen besitzen (siehe Kapitel 2.5). Auch könnte ein Geschlecht aufgrund von leichten Unterschieden in zentralnervösen Arealen und/oder damit verschalteten Strukturen empfindlicher oder unempfindlicher auf Strahlungseinflüsse reagieren.

Die Expositionsdauer könnte ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor sein. In der vorliegenden Studie wurden die Versuchstiere von ihrer Zeugung bis zum Abschluss der Experimente befeldet. In den oben zitierten Arbeiten wurde über deutlich kürzere Zeiträume hinweg bestrahlt. Eine akute Befeldung während der Versuchsdurchführung könnte eventuell bestimmte Effekten aufzeigen, die trotz vorheriger chronischer Befeldung in einem unbefeldeten Versuchsaufbau nicht zu finden sind.

5.4 Schlussbetrachtung

Die in vielen Bereichen bewährte operante Konditionierung zeigte bei den hier verwendeten Verstärkungsplänen keine überzeugenden Hinweise auf Einflüsse einer chronischen Befeldung mit 900 MHz bzw. 1,966 GHz auf die Lernleistung auf. Der Leistungsunterschied zwischen den weiblichen Versuchsratten aus der GSM-Kammer und den Kontrollweibchen in der letzten Testnacht (wiederholte DRL 16 Verstärkung) ist vermutlich eher auf eine schlechtere Gedächtnisleistung nach chronischer GSM-Befeldung zurückzuführen. Das Erlernen und Ausführen einfacher Aufgaben scheint durch eine chronische Befeldung nach GSM- oder UMTS-Mobilfunkstandard nicht beeinträchtigt zu sein. Die verwendeten Lernaufgaben der operanten Konditionierung sind möglicherweise nicht fordernd und/oder komplex genug gewesen, um eventuelle Effekte auf die Tiere überzeugend aufzuzeigen. Es bietet sich die Verwendung von Verstärkungsplänen mit höherem Schwierigkeitsgrad oder auch eine Kombination verschiedener Verstärkungspläne innerhalb einer Testnacht an. Das Versuchsdesign müsste dafür weiter optimiert werden.

Der *social discrimination*-Test wurde in der vorliegenden Studie erstmalig für die Untersuchung von Einflüssen elektromagnetischer Befeldung eingesetzt. Der Einsatz eines 30minütigen Zeitintervalls zwischen den zwei Jungtierpräsentationen hat sich bei männlichen Ratten als geeignet erwiesen um Effekte aufzuzeigen. Weibliche Ratten besitzen ein längeres Erinnerungsvermögen für kurzzeitig getroffene Jungtiere (Bluthé & Dantzer 1990, Engelmann et al. 1998). Daher ist ein Intervall von 30 Minuten vermutlich nicht ausreichend gewesen um einen Schwierigkeitsgrad darzustellen, bei dem sich Einflüsse einer chronischen Befeldung nachweisen lassen. Hier sind weitere Untersuchungen sinnvoll. Weiterhin wäre die Untersuchung von Alterseffekten im Zusammenhang mit der chronischen Exposition interessant.

Das Testen anderer kognitiver Leistungen bzw. der Einsatz weiterer verschiedener Versuchsdesigns würde einen umfassenderen Einblick und auch einen eindeutigeren Nachweis auf Einflüsse durch hochfrequente elektromagnetische Felder der Mobilfunkkommunikation ermöglichen.

6 Zusammenfassung

Zum Einfluss chronischer Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern von zwei Mobilfunkstandards (GSM und UMTS) auf Lern- und Gedächtnisleistungen bei Ratten (*Rattus norvegicus*)

Zurzeit werden zwei technische Standards für Mobilfunkkommunikation, GSM und UMTS eingesetzt. Athermische Wirkungen, durch die dabei verwendeten hochfrequenten elektromagnetischen Felder auf kognitive Leistungen sind umstritten.

In der vorliegenden Studie wurden Einflüsse auf Lern- und Gedächtnisleistung durch chronische Exposition durch linear polarisierte ebene ungepulste elektromagnetische Felder unter Fernfeldbedingungen bei 900 MHz (GSM-Mobilfunkstandard) bzw. 1,966 GHz (UMTS-Mobilfunkstandard) untersucht.

Drei aufeinander folgende Generationen albinotischer Wistar Hannover Ratten wurden unter Laborbedingungen in Käfigen mit zwei Männchen oder drei Weibchen in identischen Expositionskammern gehalten. Die verwendete spezifische Absorptionsrate von 0,4 W/kg entspricht dem Grenzwert für berufliche Ganzkörperexposition. Eine scheinbefeldete Gruppe diente als Kontrolle. Die Ergebnisse der Filialgenerationen wurden zusammengefasst und nach Geschlechtern getrennt ausgewertet.

Die Lernleistung sexuell naiver Versuchstiere wurde im Alter von zehn bis elf Wochen mittels operanter Konditionierung in automatisierten Skinnerboxen erfasst. Fünf nacheinander folgende 15stündigen Untersuchungsächte waren in je zehn alternierende 30minütige an- und 60minütige aus-Phasen unterteilt. Nur in den an-Phasen konnten durch Hebeldrücke Belohnungen (45 mg Futterpellets) erzielt werden. Nach der Trainingsnacht folgte die Verstärkung hoher Verhaltenshäufigkeit (*differential reinforcement of high rates*). In der ersten Testnacht wurden zwei Hebeldrücke innerhalb von einer Sekunde (DRH 2:1) und in der zweiten Testnacht vier Hebeldrücke in zwei Sekunden (DRH 4:2) für eine Futterbelohnung gefordert. In den darauf folgenden zwei Testnächten erfolgte die Verstärkung einer geringen Verhaltenshäufigkeit (*differential reinforcement of low rates*). Nach einem 16sekündigen Zeitintervall wurde ein Hebeldruck belohnt (DRL 16). Vorzeitige Hebeldrücke starteten das Sperrintervall erneut. Mittels Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse wurde ein relevanter signifikanter Unterschied der Leistung

zwischen den Weibchen der Expositionskammern gefunden ($P=0,009$). In der letzten Testnacht mit dem wiederholt vorgegebenen DRL 16 Verstärkungsplan zeigten die GSM-befeldeten Weibchen eine signifikant niedrigere Leistung als die Kontroll- und UMTS-befeldeten Weibchen. Dies deutet jedoch eher auf eine Beeinträchtigung der Gedächtnisleistung hin. Die Lernleistung war in beiden Geschlechtern nicht auffällig durch eine chronische Befeldung beeinflusst.

Die Gedächtnisleistung von sexuell erfahrenen Ratten im Alter von $26 \pm 1,5$ Wochen und sexuell naiven Männchen im Alter von 14 ± 1 Wochen wurden mit männlichen Jungtieren mittels *social discrimination*-Tests untersucht. In den Heimatkäfig des Versuchstieres wurde ein Jungtier für vier Minuten hinzugesetzt. Nach 30 Minuten wurden vier Minuten lang dasselbe und ein neues Jungtier gleichzeitig dargeboten. Die Schnüffeldauer der adulten Ratte an den Jungtieren wurde erfasst. Die Schnüffeldauer am wiederholt angebotenen Jungtier und am neuen Jungtier wurde miteinander mittels t-Test für gepaarte Daten verglichen. Sind beide ähnlich lang, zeigt das Versuchstier ein gleich hohes Interesse an beiden Individuen. Das Adulte erinnert sich nicht an das wiederholt angebotene Jungtier. Man geht von einer Erinnerungsleistung aus, wenn das Versuchstier das neue Jungtier signifikant länger inspiziert. Es zeigt für das bislang unbekannte junge Männchen mehr Interesse. Die Weibchen erinnerten sich nach 30 Minuten an das wiederholt dazugesetzte Juvenile (Kontrolle $P<0,001$, GSM $P<0,001$, UMTS $P<0,001$). Rattenweibchen verfügen jedoch über ein generell längeres Erinnerungsvermögen als 30 Minuten für kurzzeitig angetroffene Jungtiere. Bei den jüngeren Männchen erinnerten sich die Kontrolltiere ($P=0,010$), nicht aber die befeldeten Tiere (GSM $P=0,076$, UMTS $P=0,531$). Bei den älteren Männchen erinnerten sich die Kontroll- ($P=0,049$) und UMTS-befeldeten ($P=0,009$) Versuchstiere, nicht aber die GSM-befeldeten ($P=0,063$) Männchen. Die chronische Befeldung bei 900 MHz (GSM) scheint die Gedächtnisleistung für sozial relevante Informationen zu vermindern. Die chronische Befeldung bei 1,966 GHz (UMTS) scheint altersabhängige beeinträchtigende Effekte auf die Gedächtnisleistung zur Folge zu haben.

7 Summary

Influence of chronic exposure to high frequency electromagnetic fields of two technical standards of mobile communications (GSM and UMTS) on learning and memory in rats (*Rattus norvegicus*)

Two technical standards for mobile communications, i.e. GSM and UMTS are being used at the present time. Athermal effects of the therefore used high-frequency electromagnetic fields on cognition are disputed.

In the present study, influences of chronic exposure to linear polarized plane continuous-wave electromagnetic fields under far field conditions at 900 MHz (GSM) or 1,966 GHz (UMTS) on learning and memory were examined. Three consecutive generations of albinotic Wistar Hanover rats were housed in cages with two males or three females under standard laboratory conditions in identical exposure chambers. The applied specific absorption rate of 0.4 W/kg corresponds to the permissible level of whole-body average exposure for occupational exposed humans. Control animals were sham exposed. The results of the generations were pooled and analysed for sexes separately.

Learning performance of 10-11 weeks old sexual naïve subjects was assessed with operant conditioning techniques in computer-controlled Skinner boxes. The five consecutive nocturnal 15 hours lasting trials consisted of alternating ten 30 minutes long on-phases and ten 60 minutes long off-phases. Reward (45 mg food pellet) for lever presses were obtainable in on-phases only. Training was followed by the schedule of differential reinforcement of high rates. On the first testing-night two lever presses in one second (DRH 2:1) and on the second testing-night four lever presses in two seconds (DRH 4:2) were required. The following two testing-nights employed the schedule of differential reinforcement of low rates. A lever press was rewarded after a time interval of 16 seconds had elapsed (DRL 16). Lever presses too early, restarted the blocking interval. Kruskal-Wallis analysis of variances revealed a relevant significant difference in performance between female rats of the three exposure chambers ($P=0,009$). On the last testing-night with repeated DRL 16 schedule presentation, GSM-radiated female subjects showed a significant lower performance than did the control and UMTS-radiated female rats. However, this suggests rather an adverse effect on memory performance. The learning

performance in both sexes was not influenced conspicuously by chronic field exposure.

Memory performance of sexually experienced rats at the age of $26 \pm 1,5$ weeks and sexual naïve males at the age of 14 ± 1 weeks were tested with the social discrimination procedure using male juveniles. A juvenile was added for four minutes into the subject's home cage. After 30 minutes the same and a novel juvenile were presented four minutes long to the resident rat, simultaneously. The subject's sniffing time duration at the juveniles was recorded. Sniffing time duration at the repeatedly presented and at the novel juvenile was compared with paired t-Test. Comparable amounts of sniffing time mean that the subject shows an equal interest in both young individuals. The adult does not remember the repeatedly presented juvenile. A memory performance is assumed, if the subject inspects the novel juvenile longer. It shows more interest in the so far unknown young male. Female subjects remembered the repeatedly added juvenile after an interval of 30 minutes (control $P < 0,001$, GSM $P < 0,001$, UMTS $P < 0,001$). Female rats generally exhibit longer retention ability than 30 minutes for shortly met juveniles. Of the younger male subjects, control males ($P = 0,010$) but not the radiated males (GSM $P = 0,076$, UMTS $P = 0,531$) showed social memory. Of the older male subjects, control ($P = 0,049$) and UMTS-radiated ($P = 0,009$) subjects but not GSM-radiated ($P = 0,063$) male rats showed social memory. Chronic exposure to 900 MHz electromagnetic fields seems to impair social memory performance. Chronic exposure to 1,966 GHz electromagnetic fields seems to display age-related adverse effects on social memory.

8 Literaturverzeichnis

Angermeier, W. F.: Kontrolle des Verhaltens - Das Lernen am Erfolg. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1976)

Arave, C. W.: Assessing sensory capacity of animals using operant technology. Journal of Animal Science 74(8): 1996-2009, 1996

Bannermann, D. M.; Lemaire, M.; Beggs; S. ; Rawlins, J. N. P. ; Iversen, S. D. : Cytotoxic lesions of the hippocampus increase social investigation but do not impair social-recognition memory. Experimental Brain Research 138: 100-109, 2001

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Elektromagnetische Felder – Einwirkungen auf den Menschen. StMLU, 2002

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Stichwort Mobilfunk. StMLU, 2003a

Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU): Grundinformation zur neuen Mobilfunkgeneration UMTS. StMLU, 2003b

Bielsky, I. F.; Young, L. J.: Oxytocin, vasopressin and social recognition in mammals. Peptides 25: 1556-1574, 2004

Bluthé, R. M.; Dantzer, R.: Social recognition does not involve vasopressinergic neurotransmission in female rats. Brain Research 535(2): 301-304, 1990

Bornhausen, M.; Scheingraber, H.: Prenatal exposure to 900 MHz, cell-phone electromagnetic fields had no effect on operant-behavior performances of adult rats. Bioelectromagnetics 21: 566-574, 2000

Burman, O. H. P.; Mendl, M.: The influence of preexperimental experience on social discrimination in rats (*Rattus norvegicus*). *Journal of Comparative Psychology* 117(3): 344-349, 2003

Carr, W. J.; Yee, L.; Gable, D.; Marasco, E.: Olfactory recognition of conspecifics by domestic Norway rats. *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 90(9): 821-828, 1976

D'Andrea, J. A.: Behavioral evaluation of microwave irradiation. *Bioelectromagnetics Supplement* 4: 64-74, 1999

D'Andrea, J. A.; Adair, E. R.; de Lorge, J. O.: Behavioral and cognitive effects of microwave exposure. *Bioelectromagnetics Supplement* 6: 39-62, 2003a

D'Andrea, J. A.; Chou, C. K.; Johnston, S. A.; Adair, E. R.: Microwave effects on the nervous system. *Bioelectromagnetics Supplement* 6: 107-147, 2003b

Dantzer, R.; Bluthé, R.-M.; Koob, G. F.; Le Moal, M.: Modulation of social memory in male rats by neurophyseal peptides. *Psychopharmacology* 91(3): 363-368, 1987

Doughty, A. H.; Richards, J. B.: Effects of reinforcer magnitude on responding under differential-reinforcement-of-low-rate schedules of rats and pigeons. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 78(1): 17-30, 2002

Dubreuil, D.; Jay, T.; Edeline J.-M.: Does head-only exposure to GSM-900 electromagnetic fields affect the performance of rats in spatial learning tasks? *Behavioural Brain Research* 129(1-2): 203-210, 2002

Dubreuil, D.; Jay, T.; Edeline J.-M.: Head-only exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields does not alter rat's memory in spatial and non-spatial tasks. *Behavioural Brain Research* 145(1-2): 51-61, 2003

Dulac C.; Torello, A. T.: Molecular detection of pheromone signals in mammals: from genes to behaviour. *Nature Reviews Neuroscience* 4: 551-562, 2003

Engelmann, M.; Wotjak, C. T.; Landgraf, R.: Social discrimination procedure: an alternative method to investigate juvenile recognition abilities in rats. *Physiology & Behavior* 58(2): 315-321, 1995

Engelmann, M.; Ebner, K.; Wotjak, C. T.; Landgraf, R.: Endogenous oxytocin is involved in short-term olfactory memory in female rats. *Behavioural Brain Research* 90(1): 89-94, 1998

Ferster, C. B.; Skinner, B. F.: Schedules of reinforcement. *Appleton-Century-Crofts, Inc., New York* (1957)

Gesellschaft für Versuchstierkunde - Society of Laboratory Animal Science (GV-SOLAS), Ausschuß für Ernährung der Versuchstiere: Fütterungskonzepte und – methoden in der Versuchstierhaltung und im Tierversuch - Ratte. *GV-SOLAS*, 1998

Hancock, P. A.; Vasmatazidis, I.: Effects of heat stress on cognitive performance: the current state of knowledge. *International Journal of Hyperthermia* 19(3): 355-372, 2003

Heldmaier, G.; Neuweiler, G.: Vergleichende Tierphysiologie – Band 1 Neuro- und Sinnesphysiologie. *Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York* (2003)

Herrmann, D. H.; Hossmann, K.-A.: Neurological effects of microwave exposure related to mobile communication. *Journal of Neurological Sciences* 152(1): 1-14, 1997

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 70(4): 494-522, 1998

Keller, F. S.: Light-aversion in the white rat. *The Psychological Record* 4: 235-250, 1941

Kelley, A. E.: Ventral striatal control of appetitive motivation: role in ingestive behaviour and reward-related learning. *Neuroscience and Behavioral Reviews* 27: 765-776, 2004

Kelly, S. J.; Tran, T. D.: Alcohol exposure during development alters social recognition and social communication in rats. *Neurotoxicology and Teratology* 19(5): 383-389, 1997

Krinke, G. J. (ed.): *The laboratory rat.* Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo (2000)

Laties, V. G.: How operant conditioning can contribute to behavioral toxicology. *Environmental Health Perspectives* 26: 29-35, 1978

Lejeune, H.; Richelle, M.; Wearden, J. H.: About Skinner and time: behavior-analytic contributions to research on animal timing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 85(1): 125-142, 2006

Lin, D. Y.; Zhang, S.-Z.; Block, E.; Katz, L. C.: Encoding social signals in the mouse main olfactory bulb. *Nature* 434: 470-477, 2005

Markham, J. A.; Juraska, J. M.: Social recognition memory: Influence of age, sex, and ovarian hormonal status. *Physiology & Behavior*: 1-8, published online on July 3, 2007

Peña, Y.; Prunell, M.; Dimitsantos, V.; Nadal, R.; Escorihuela, R. M.: Environmental enrichment effects in social investigation in rats are gender dependent. *Behavioural Brain Research* 174(1): 181-187, 2006

Popik, P.; Vetulani, J.; Bisaga, A.; van Ree, J. M.: Recognition cue in the rat's social memory paradigm. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology* 2(4): 315-327, 1991

Popik, P.; Vetulani, J.; van Ree, J. M.: Low doses of oxytocin facilitate social recognition in rats. *Psychopharmacology* 106(1): 71-71, 1992

Pritchett, K.; Mulder, G. B.: Operant conditioning. *Contemporary Topics in Laboratory Animal Science* 43(4): 35-36, 2004

Reijmers, L. G. J. E.; Leus, I. E.; Burbach, P. H.; Spruijt, B. M.; van Ree, J. M.: Social memory in the rat: circadian variation and effect of circadian rhythm disruption. *Physiology & Behavior* 72(3): 305-309, 2001

Reyes-Guerrero, G.; Vázquez-García, M.; Elías-Viñas, D.; Donatti-Albarrán, O. A.; Guevara-Guzmán, R.: Effects of 17 b-estradiol and extremely low-frequency electromagnetic fields on social recognition memory in female rats: a possible interaction? *Brain Research* 1095(1): 131-138, 2006

Rüttiger, R.; Ciuffani, J.; Zenner, H.-P.; Knipper, M.: A behavioral paradigm to judge acute sodium salicylate-induced sound experience in rats: a new approach for an animal model on tinnitus. *Hearing Research* 180(1-2): 39-50, 2003

Sable, H. J. K.; Powers, B. E.; Wang, V. C.; Widholm, J. J.; Schantz, S. L.: Alterations in DRH and DRL performance in rats developmentally exposed to an environmental PCB mixture. *Neurotoxicology and Teratology* 28(5): 548-556, 2006

Sawyer, T. F.; Hengehold, A. K.; Perez, W. A.: Chemosensory and hormonal mediation of social memory in male rats. *Behavioral Neuroscience* 98(5): 908-913, 1984

Schelkshorn, S.; Tejero, S.; Detlefsen, J.: Exposure setup for animal experiments using a parabolic reflector. *Radiation Protection Dosimetry*: 1-4, published online on June 22, 2007

Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV) vom 16. Dezember 1996 (BGBl. I S. 1966)

Sienkiewicz, Z. J.; Blackwell, R. P.; Haylock, R. G. E.; Saunders, R. D.; Cobb, B. L.: Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. *Bioelectromagnetics* 21(3): 151-158, 2000

Sienkiewicz, Z.; Jones, N.; Bottomley, A.: Neurobehavioural effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics Supplement* 7: 116-126, 2005

Song, C.; Leonard B. E.: The olfactory bulbectomised rat as a model of depression. *Neuroscience and Behavioral Reviews* 29: 627-647, 2005

Sousa, N.; Almeida, O. F. X.; Wotjak, C. T.: A hitchhiker's guide to behavioral analysis in laboratory rodents. *Genes, Brain and Behavior* 5 Supplement 2: 5-24, 2006

Strubbe, J. H.; Woods, C. W.: The timing of meals. *Psychological Review* 111(1): 128-141, 2004

Thor, D. H.; Holloway, W. R.: Social memory of the male laboratory rat. *Journal of Comparative and Physiological Psychology* 96(6): 1000-1006, 1982

van den Bos, R.; van der Horst, K. J.; Baars, A. M.; Spruijt, B. M.: Is it possible to replace stimulus animals by scent-filled cups in the social discrimination test? *Alternatives to Laboratory Animals* 30(3): 299-304, 2002

Vázquez-García, M.; Elías-Viñas, D.; Reyes-Guerrero, G.; Domínguez-González, A.; Verdugo-Díaz, L.; Guevara-Guzmán, R.: Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields improves social recognition in male rats. *Physiology & Behavior* 82(4): 685–690, 2004

Wenger, G. R.: Operant behavior as a technique for toxicity testing. *Neurotoxicology and Teratology* 12(5): 515-521, 1990

Zimbardo, P. G.; Gerrig, R. J.: *Psychologie*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1999)

9 Danksagung

Ich danke Prof. Dr. M. Stangassinger für das Thema und die Möglichkeit der Durchführung dieser Dissertation sowie für die zahlreichen konstruktiven Anmerkungen.

Weiterhin danke ich Dr. M. Bornhausen für die Bereitstellung von Arbeitsmaterialien und für seine sowie Markus Kowalewskis technische Betreuung der Lernversuche. Außerdem danke ich Dipl.-Ing. (FH) Christian Kögler für die Bereitstellung des PC-Programms und der Skripte für den Versuchsteil der operanten Konditionierung.

Nicht unerwähnt bleiben, sollen die vielen Helfer, welche die Verblindung der Versuche ermöglichten: Andreas Schöffmann, Catrin Kahlfeld, Christine Engmann, Judith Schreiner, Nina Hettenbach, Sabine Okorn und Stefan Lochbrunner.

Mein großer Dank gilt ebenfalls meinen Freunden, die mich stets emotional unterstützt haben, geduldig zuhörten und gute Ratschläge parat hielten.

10 Anhang

10.1 Zusätzliche Abbildungen

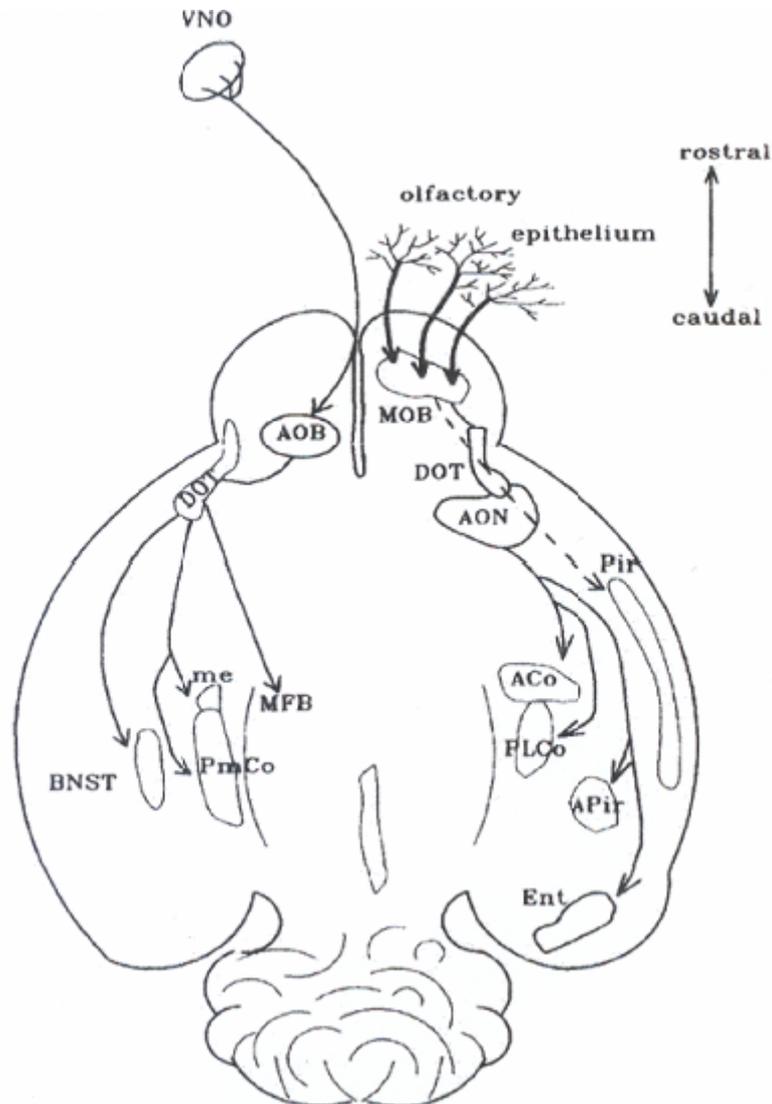


Fig. 1. Diagram of the anatomical connections between the olfactory bulbs and other regions of the rat brain. AON, anterior olfactory nucleus; APir, anterior piriform cortex; DOT, dorsal olfactory tract; Ent, entorhinal cortex; me, medial nucleus of amygdaloid nucleus; Pir, piriform cortex, PLCo, posterolateral cortical amygdaloid nucleus, Pmco, periamygdaloid cortex; VNO, vomeronasal organ. - - -, tufted cell projections;—mitral cell projections. Adapted from Jancsar (1981).

Abb. 19: Skizze der anatomischen Verknüpfungen des Hauptriechsinnes und des Vomeronasalorgans im Gehirn der Ratte. AOB, accessory olfactory bulb; BNST, bed nucleus of the stria terminalis; MOB, main olfactory bulb. Die restlichen Abkürzungen sind der Legende in der Abbildung entnehmbar (aus Song & Leonard 2005).

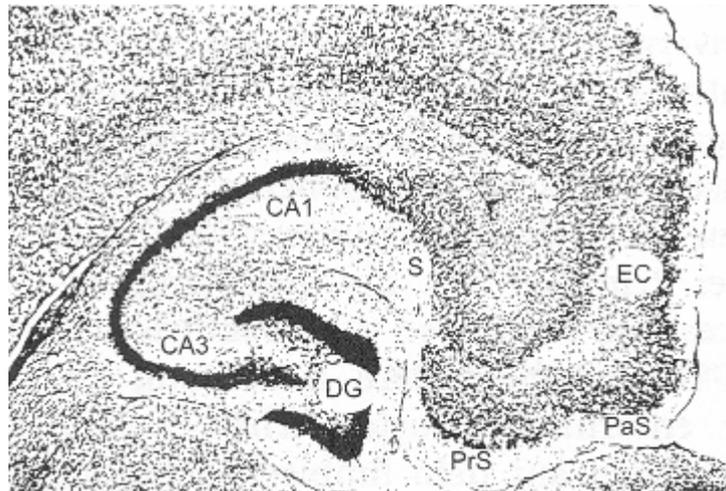


Abb. 20: Foto eines angefärbten Horizontalschnitts durch die Hippokampusregion einer Ratte. CA, Cornu Ammonis mit Pyramidenzellen; DG, Gyrus dentatus; EC, entorhinaler Kortex; PaS, Parasubiculum; PrS, Präsubiculum; S, Subiculum (aus Heldmaier & Neuweiler 2003).

10.2 Datentabellen der operanten Konditionierungsversuche

Der statistische Vergleich zwischen den Ratten der drei Expositionskammern wurde mit Kruskal-Wallis Rangvarianzanalyse vorgenommen. n=Stichprobenumfang. P=Irrtumswahrscheinlichkeit. r_s = Spearman Korrelationskoeffizient.

Tab. 10: Mittlere Latenzzeit von Versuchsbeginn bis zum ersten Hebeldruck in Minuten (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der vorletzten Testnacht zwischen den Weibchen der Kontroll- und UMTS-Kammer.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	31 \pm 53 n=29	6 \pm 13 n=29	8 \pm 19 n=29	4 \pm 9 n=29	2 \pm 5 n=29
GSM	41 \pm 50 n=29	18 \pm 35 n=24	7 \pm 157 n=28	28 \pm 59 n=28	11 \pm 55 n=28
UMTS	28 \pm 43 n=25	12 \pm 25 n=20	21 \pm 45 n=25	36 \pm 87 n=25	24 \pm 67 n=25
P=	0,664	0,553	0,958	0,304	0,827
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	19 \pm 27 n=29	7 \pm 19 n=29	11 \pm 23 n=29	25 \pm 33 n=29	9 \pm 23 n=29
GSM	29 \pm 45 n=29	7 \pm 8 n=24	17 \pm 36 n=29	17 \pm 30 n=29	14 \pm 38 n=29
UMTS	17 \pm 20 n=25	21 \pm 47 n=20	11 \pm 24 n=24	3 \pm 80 n=24	8 \pm 20 n=24
P=	0,315	0,277	0,322	0,014	0,440

Tab. 11: Mittlere Gesamtanzahl der Hebeldrücke (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der letzten Testnacht zwischen den Weibchen der GSM- und sowohl zur Kontroll- als auch zur UMTS-Kammer.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	524 \pm 162 n=29	2047 \pm 660 n=29	3594 \pm 839 n=29	3745 \pm 851 n=29	1684 \pm 477 n=29
GSM	406 \pm 229 n=29	1672 \pm 797 n=24	3233 \pm 1273 n=28	3936 \pm 1266 n=28	1680 \pm 503 n=28
UMTS	442 \pm 215 n=25	1650 \pm 1030 n=20	2678 \pm 1937 n=25	2999 \pm 1390 n=25	1498 \pm 561 n=25
P=	0,085	0,334	0,154	0,084	0,484
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	408 \pm 184 n=29	1585 \pm 715 n=29	2703 \pm 1527 n=29	3162 \pm 1565 n=29	1026 \pm 483 n=29
GSM	397 \pm 142 n=29	1673 \pm 497 n=24	2932 \pm 1156 n=29	3452 \pm 1505 n=29	1432 \pm 676 n=29
UMTS	358 \pm 157 n=25	1535 \pm 709 n=20	2895 \pm 1157 n=24	2913 \pm 1211 n=24	904 \pm 262 n=24
P=	0,339	0,525	0,870	0,510	0,005

Tab. 12: Mittlere Hebeldruckanzahl in den zehn an-Phasen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der letzten Testnacht zwischen den Weibchen der GSM- und sowohl zur Kontroll- als auch zur UMTS-Kammer.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	422 \pm 139 n=29	2047 \pm 660 n=29	1731 \pm 530 n=29	3053 \pm 704 n=29	1524 \pm 400 n=29
GSM	316 \pm 192 n=29	1672 \pm 797 n=24	1458 \pm 697 n=28	3177 \pm 1042 n=28	1512 \pm 444 n=28
UMTS	352 \pm 192 n=25	1650 \pm 1030 n=20	1419 \pm 904 n=25	2502 \pm 1173 n=25	1361 \pm 504 n=25
P=	0,083	0,600	0,096	0,179	0,476
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	287 \pm 141 n=29	1267 \pm 605 n=29	2260 \pm 1311 n=29	2585 \pm 1194 n=29	922 \pm 426 n=29
GSM	296 \pm 114 n=29	1344 \pm 407 n=24	2514 \pm 1025 n=29	2794 \pm 1152 n=29	1265 \pm 566 n=29
UMTS	259 \pm 127 n=25	1274 \pm 611 n=20	2450 \pm 1010 n=24	2473 \pm 1000 n=24	806 \pm 221 n=24
P=	0,335	0,778	0,755	0,609	0,004

Tab. 13: Mittlere Hebeldruckanzahl in den zehn aus-Phasen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der letzten Testnacht zwischen den Männchen der UMTS- und sowohl zur Kontroll- als auch zur GSM-Kammer.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	103 \pm 56 n=29	316 \pm 202 n=29	332 \pm 183 n=29	692 \pm 235 n=29	161 \pm 101 n=29
GSM	90 \pm 51 n=29	214 \pm 139 n=24	354 \pm 261 n=28	760 \pm 323 n=28	168 \pm 86 n=28
UMTS	90 \pm 39 n=25	231 \pm 185 n=20	290 \pm 278 n=25	497 \pm 256 n=25	137 \pm 83 n=25
P=	0,708	0,080	0,302	0,002	0,321
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	121 \pm 65 n=29	318 \pm 168 n=29	442 \pm 310 n=29	577 \pm 429 n=29	104 \pm 85 n=29
GSM	101 \pm 44 n=29	329 \pm 168 n=24	418 \pm 218 n=29	659 \pm 393 n=29	167 \pm 137 n=29
UMTS	98 \pm 42 n=25	261 \pm 146 n=20	445 \pm 273 n=24	440 \pm 258 n=24	98 \pm 65 n=24
P=	0,440	0,439	0,983	0,108	0,060

Tab. 14: Mittlere Leistung in Prozent (\pm Standardabweichung) pro Testnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der vorletzten Testnacht zwischen den Männchen der GSM- und UMTS-Kammer und einen signifikanten Unterschied in der letzten Testnacht zwischen den Weibchen der GSM- und sowohl zur Kontroll- als auch zur UMTS-Kammer.

Männchen	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	55,7 \pm 14,6 n=29	62,8 \pm 15,6 n=29	9,0 \pm 3,7 n=29	32,3 \pm 10,7 n=29
GSM	53,7 \pm 16,7 n=24	62,3 \pm 21,3 n=28	10,4 \pm 17,8 n=28	32,6 \pm 10,7 n=28
UMTS	50,0 \pm 24,4 n=20	45,1 \pm 31,8 n=25	14,5 \pm 15,5 n=24	35,3 \pm 14,9 n=25
P=	0,976	0,064	0,024	0,869
Weibchen	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	49,0 \pm 12,8 n=29	41,1 \pm 25,0 n=29	12,8 \pm 8,0 n=29	44,1 \pm 15,8 n=29
GSM	51,9 \pm 15,6 n=24	49,3 \pm 21,1 n=29	13,4 \pm 17,7 n=29	32,8 \pm 14,1 n=29
UMTS	45,6 \pm 18,0 n=20	48,8 \pm 17,4 n=24	13,8 \pm 7,6 n=24	44,1 \pm 12,3 n=24
P=	0,542	0,536	0,356	0,009

Tab. 15: Korrelation zwischen Leistung und Phasenzahl, also der mittleren prozentualen Leistung in den zehn an-Phasen und der zunehmenden Testnachtlänge.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10
DRH 2:1	0,624 P=0,048	0,515 P=0,116	0,612 P=0,054	0,745 P=0,011	0,479 P=0,148	0,758 P=0,009
DRH 4:2	-0,406 P=0,227	0,139 P=0,681	-0,539 P=0,098	0,248 P=0,468	0,588 P=0,067	0,212 P=0,535
1. DRL 16	0,927 P<0,001	0,964 P<0,001	0,867 P<0,001	0,842 P<0,001	0,952 P<0,001	0,915 P<0,001
2. DRL 16	0,891 P<0,001	0,879 P=0,060	0,988 P=0,004	0,721 P=0,016	0,927 P<0,001	0,806 P=0,003

Tab. 16: Korrelation zwischen Leistung und Hebeldruckzahl, also der mittleren prozentualen Leistung und der Anzahl an Hebelldrücken in den an-Phasen.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle	GSM	UMTS	Kontrolle	GSM	UMTS
DRH 2:1	0,037 P=0,847 n=29	0,244 P=0,246 n=24	0,566 P=0,009 n=20	-0,082 P=0,670 n=29	-0,093 P=0,661 n=24	0,149 P=0,525 n=20
DRH 4:2	0,021 P=0,914 n=29	-0,018 P=0,928 n=28	0,654 P<0,001 n=25	0,571 P=0,001 n=29	-0,057 P=0,764 n=29	0,103 P=0,626 n=24
1. DRL 16	-0,747 P<0,001 n=29	-0,770 P<0,001 n=28	-0,610 P=0,001 n=25	-0,947 P<0,001 n=29	-0,925 P<0,001 n=29	-0,891 P<0,001 n=24
2. DRL 16	-0,830 P<0,001 n=29	-0,818 P<0,001 n=28	-0,804 P<0,001 n=25	-0,774 P<0,001 n=29	-0,895 P<0,001 n=29	-0,873 P<0,001 n=24

Tab. 17: Mittlere Effizienz in Prozent (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied in der vorletzten Testnacht zwischen den Männchen der GSM- und UMTS-Kammer und einen signifikanten Unterschied in der letzten Testnacht zwischen den Weibchen der GSM- und Kontrollkammer.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	79,9 \pm 8,7 n=29	47,6 \pm 13,5 n=29	57,2 \pm 15,0 n=29	7,3 \pm 2,9 n=29	29,4 \pm 10,0 n=29
GSM	73,8 \pm 12,9 n=29	45,4 \pm 18,7 n=24	55,5 \pm 20,7 n=28	7,0 \pm 7,4 n=28	29,2 \pm 9,5 n=28
UMTS	73,4 \pm 18,5 n=25	42,3 \pm 21,8 n=20	40,7 \pm 29,3 n=25	9,3 \pm 6,2 n=25	30,5 \pm 10,1 n=25
P=	0,120	0,880	0,111	0,035	0,929
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	66,3 \pm 16,9 n=29	37,2 \pm 13,3 n=29	34,7 \pm 22,2 n=29	10,8 \pm 7,1 n=29	40,2 \pm 15,3 n=29
GSM	71,9 \pm 12,8 n=29	41,8 \pm 13,3 n=24	42,3 \pm 18,4 n=29	8,6 \pm 4,9 n=29	29,6 \pm 13,1 n=29
UMTS	68,2 \pm 15,9 n=25	37,2 \pm 16,6 n=20	40,8 \pm 15,7 n=24	11,4 \pm 5,8 n=24	39,5 \pm 11,4 n=24
P=	0,281	0,452	0,548	0,188	0,013

Tab. 18: Mittlere Anzahl erhaltener Futterbelohnungen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	462 \pm 135 n=29	494 \pm 156 n=29	528 \pm 139 n=29	256 \pm 63 n=29	458 \pm 83 n=29
GSM	360 \pm 186 n=29	421 \pm 216 n=24	486 \pm 189 n=28	208 \pm 69 n=28	453 \pm 119 n=28
UMTS	396 \pm 186 n=25	433 \pm 309 n=20	388 \pm 299 n=25	232 \pm 110 n=25	423 \pm 141 n=25
P=	0,086	0,648	0,134	0,077	0,728
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	330 \pm 136 n=29	311 \pm 168 n=29	284 \pm 196 n=29	247 \pm 70 n=29	355 \pm 77 n=29
GSM	339 \pm 110 n=29	360 \pm 121 n=24	336 \pm 146 n=29	240 \pm 88 n=29	345 \pm 82 n=29
UMTS	304 \pm 121 n=25	308 \pm 151 n=20	320 \pm 147 n=24	272 \pm 73 n=24	333 \pm 43 n=24
P=	0,351	0,508	0,752	0,219	0,501

Tab. 19: Korrelation zwischen Futterbelohnung und Leistung, also der mittleren Anzahl Futterbelohnungen und der mittleren prozentualen Leistung.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle	GSM	UMTS	Kontrolle	GSM	UMTS
DRH 2:1	0,666 P<0,001 n=29	0,735 P<0,001 n=24	0,754 P<0,001 n=20	0,545 P=0,003 n=29	0,616 P=0,001 n=24	0,665 P=0,001 n=20
DRH 4:2	0,781 P<0,001 n=29	0,650 P<0,001 n=28	0,860 P<0,001 n=25	0,915 P<0,001 n=29	0,749 P<0,001 n=29	0,473 P=0,020 n=24
1. DRL 16	0,799 P<0,001 n=29	0,554 P=0,002 n=28	0,457 P=0,022 n=25	0,477 P=0,009 n=29	0,626 P<0,001 n=29	0,453 P=0,026 n=24
2. DRL 16	0,667 P<0,001 n=29	0,585 P=0,001 n=28	0,424 P=0,035 n=25	0,345 P=0,066 n=29	0,471 P=0,010 n=29	0,190 P=0,368 n=24

Tab. 20: Korrelation zwischen prozentualer Belohnungsmenge und Phasenzahl, also dem mittleren prozentualen Anteil an Belohnungen in den zehn an-Phasen und der zunehmenden Untersuchungsnachtlänge.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10
Training	0,685 P=0,025	0,976 P<0,001	0,842 P<0,001	0,382 P=0,258	0,564 P=0,081	0,370 P=0,275
DRH 2:1	-0,091 P=0,785	-0,067 P=0,838	-0,115 P=0,733	-0,370 P=0,275	-0,394 P=0,243	-0,176 P=0,126
DRH 4:2	-0,721 P=0,016	-0,879 P<0,001	-0,624 P=0,048	-0,503 P=0,126	-0,661 P=0,033	-0,624 P=0,048
1. DRL 16	0,867 P<0,001	0,976 P<0,001	0,879 P<0,001	0,988 P<0,001	0,673 P<0,001	0,697 P=0,022
2. DRL 16	-0,103 P=0,759	0,697 P=0,022	0,200 P=0,559	-0,806 P=0,003	-0,600 P=0,060	-0,745 P=0,011

Tab. 21: Korrelation zwischen prozentualer Belohnungsmenge und Hebeldruckaktivität, also dem mittleren prozentalem Anteil an Belohnungen in den zehn an-Phasen und der prozentualen Hebeldruckaktivität in den an-Phasen.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10	Kontrolle n=10	GSM n=10	UMTS n=10
Training	1,000 P<0,001	0,988 P<0,001	0,988 P<0,001	0,964 P<0,001	0,830 P<0,001	0,952 P<0,001
DRH 2:1	0,903 P<0,001	0,891 P<0,001	0,915 P<0,001	0,939 P<0,002	0,879 P<0,003	0,988 P<0,004
DRH 4:2	0,988 P<0,001	0,988 P<0,001	0,915 P<0,001	0,915 P<0,001	0,842 P<0,001	0,903 P<0,001
1. DRL 16	-0,830 P<0,001	-0,600 P=0,060	-0,794 P=0,004	-0,758 P=0,009	-0,527 P=0,107	-0,648 P=0,038
2. DRL 16	0,370 P=0,275	-0,055 P=0,865	0,321 P=0,346	0,842 P<0,001	0,612 P=0,054	0,794 P=0,004

Tab. 22: Mittlere prozentuale Hebelwechsel in den an-Phasen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht. Der post hoc Dunn's Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Weibchen der GSM- und UMTS-Kammer in der letzten Testnacht.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	9,9 \pm 8,6 n=29	8,9 \pm 11,7 n=29	2,4 \pm 3,3 n=29	25,2 \pm 14,6 n=29	21,1 \pm 15,4 n=29
GSM	12,7 \pm 13,9 n=29	10,4 \pm 9,8 n=24	3,4 \pm 5,3 n=28	20,6 \pm 13,0 n=28	16,2 \pm 11,6 n=28
UMTS	7,0 \pm 5,5 n=25	6,5 \pm 6,5 n=20	8,1 \pm 14,6 n=25	22,8 \pm 12,6 n=25	24,0 \pm 17,0 n=25
P=	0,566	0,484	0,244	0,455	0,201
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	11,9 \pm 8,4 n=29	10,2 \pm 9,6 n=29	6,7 \pm 7,6 n=29	23,7 \pm 14,1 n=29	20,6 \pm 15,6 n=29
GSM	14,4 \pm 9,9 n=29	11,1 \pm 9,6 n=24	5,4 \pm 5,1 n=29	22,8 \pm 8,9 n=29	28,6 \pm 14,2 n=29
UMTS	11,8 \pm 6,2 n=25	7,7 \pm 7,1 n=20	4,8 \pm 6,7 n=24	17,9 \pm 10,2 n=24	18,8 \pm 13,0 n=24
P=	0,618	0,476	0,541	0,156	0,036

Tab. 23: Mittlere prozentuale Hebelwechsel in den aus-Phasen (\pm Standardabweichung) pro Untersuchungsnacht.

Männchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	15,9 \pm 6,9 n=29	12,5 \pm 7,1 n=29	7,4 \pm 4,3 n=29	20,0 \pm 10,6 n=29	17,4 \pm 9,0 n=29
GSM	13,5 \pm 6,5 n=29	11,1 \pm 6,52 n=24	9,5 \pm 11,9 n=28	16,9 \pm 10,6 n=28	13,7 \pm 8,4 n=28
UMTS	14,8 \pm 6,4 n=25	11,6 \pm 6,0 n=20	10,1 \pm 9,2 n=25	19,6 \pm 10,6 n=25	16,7 \pm 9,9 n=25
P=	0,386	0,894	0,732	0,488	0,235
Weibchen	Training	DRH 2:1	DRH 4:2	DRL 16	DRL 16
Kontrolle	15,5 \pm 4,2 n=29	14,2 \pm 7,1 n=29	8,9 \pm 6,4 n=29	21,1 \pm 11,6 n=29	18,3 \pm 7,9 n=29
GSM	16,8 \pm 6,0 n=29	15,1 \pm 6,2 n=24	9,2 \pm 5,6 n=29	23,2 \pm 8,2 n=29	21,6 \pm 10,9 n=29
UMTS	15,8 \pm 5,4 n=25	12,4 \pm 6,0 n=20	7,6 \pm 4,3 n=24	20,0 \pm 9,3 n=24	18,7 \pm 8,7 n=24
P=	0,651	0,470	0,747	0,468	0,451

Tab. 24: Korrelation zwischen Hebelwechselzahl und Leistung, also dem mittleren anteiligen prozentualen Hebelwechsel an der maximal möglichen Hebelwechselanzahl in den an-Phasen und der mittleren prozentualen Leistung.

r_s	Männchen			Weibchen		
	Kontrolle	GSM	UMTS	Kontrolle	GSM	UMTS
DRH 2:1	-0,480 P=0,009 n=29	-0,696 P<0,001 n=24	-0,562 P=0,010 n=20	-0,543 P=0,002 n=29	-0,490 P=0,015 n=24	-0,159 P=0,496 n=20
DRH 4:2	-0,306 P=0,106 n=29	-0,448 P=0,017 n=28	-0,520 P=0,008 n=25	-0,718 P<0,001 n=29	-0,586 P<0,001 n=29	-0,397 P=0,055 n=24
1. DRL 16	-0,167 P=0,385 n=29	0,114 P=0,561 n=28	-0,073 P=0,725 n=25	-0,274 P=0,149 n=29	-0,333 P=0,077 n=29	-0,289 P=0,169 n=24
2. DRL 16	-0,423 P=0,022 n=29	-0,518 P=0,005 n=28	-0,250 P=0,225 n=25	-0,473 P=0,010 n=29	-0,462 P=0,012 n=29	-0,520 P=0,009 n=24

10.3 Rohdaten der *social discrimination*-Tests

Juv.=Juveniles, MW=Mittelwert, SA=Standardabweichung, SF=Standardfehler

Tab. 25: Schnüffeldauer der Rattenweibchen an den Jungtieren in Sekunden.

Weibchen F ₁ und F ₂	Kontrolle			GSM			UMTS		
	1.Test	2. Test		1.Test	2. Test		1.Test	2. Test	
	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.
1	52,30	9,19	11,87	67,26	33,01	58,26	48,72	16,90	23,18
2	67,07	14,45	45,62	50,35	22,90	35,15	49,93	7,88	16,73
3	41,37	12,16	14,31	107,46	23,39	30,56	27,65	8,29	15,07
4	47,89	40,06	38,16	30,50	12,92	15,48	62,26	6,73	21,38
5	57,78	23,48	42,45	71,37	18,13	43,55	49,05	14,56	26,18
6	76,75	22,89	20,57	108,29	19,34	28,10	45,97	5,32	15,21
7	68,51	25,82	36,35	44,92	33,85	51,67	69,54	19,22	41,46
8	88,32	13,79	52,45	59,26	25,42	22,15	66,65	12,75	27,64
9	62,50	24,57	48,32	59,82	13,27	30,78	39,67	17,28	36,46
10	98,76	17,62	30,96	57,73	24,32	49,63	62,44	20,79	29,08
11	72,50	16,85	27,14	41,05	5,81	13,78	63,92	24,63	54,74
12	54,54	14,39	26,57	85,87	28,92	59,67	62,47	17,69	28,91
13	88,65	19,99	54,17	117,02	18,32	74,45	92,80	29,34	20,55
14	80,00	16,28	19,51	68,80	17,32	44,61	93,97	16,74	59,70
15	49,69	11,16	29,50	89,09	19,44	36,55	43,54	50,42	40,21
16	46,72	15,96	31,60				67,39	26,60	70,53
17	74,03	45,65	77,45				37,93	19,21	39,46
18	130,40	54,77	74,08				72,60	40,25	42,83
19	81,73	25,50	20,75				54,73	20,90	19,64
20	77,11	31,18	64,66						
MW	70,83	22,79	38,32	70,59	21,09	39,63	58,48	19,76	33,10
SA	21,19	12,03	18,95	26,03	7,57	17,17	17,25	11,26	15,71
SF	4,74	2,69	4,24	6,72	1,95	4,43	3,96	2,58	3,60

Tab. 26: Schnüffeldauer der Rattenmännchen an den Jungtieren in Sekunden.

Männchen F ₁ und F ₂	Kontrolle			GSM			UMTS		
	1.Test	2. Test		1.Test	2. Test		1.Test	2. Test	
	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.
1	77,80	61,01	71,34	89,29	32,27	14,21	88,32	43,59	88,64
2	108,23	31,72	45,73	93,93	62,29	28,26	59,72	16,80	52,89
3	102,42	36,15	40,15	77,81	37,34	39,18	56,83	18,05	24,21
4	45,75	16,15	18,38	127,51	47,33	37,54	37,95	11,19	60,94
5	92,52	51,46	54,38	57,84	29,78	31,06	82,05	46,19	45,94
6	49,96	32,26	44,41	61,79	30,05	42,23	91,65	37,38	52,69
7	47,86	35,29	23,90	81,05	72,85	46,97	93,57	32,23	35,43
8	97,39	26,96	23,33	54,81	33,15	64,84	77,41	48,26	65,81
9	80,39	35,30	55,71	63,50	13,09	52,28	64,91	37,32	24,44
10	68,44	7,27	12,47	41,51	19,61	21,93	76,02	28,85	28,98
11	18,13	18,17	18,77	95,72	24,26	44,99	66,85	22,57	52,98
12	43,96	33,06	20,32	101,02	45,64	25,72	58,48	19,26	18,47
13	80,34	17,21	34,88	95,02	41,68	64,00	57,64	36,67	32,61
14	62,73	22,99	24,80	80,32	27,38	44,05	77,96	43,16	73,44
15	79,96	16,05	37,58	93,45	38,46	29,70	53,39	33,40	54,57
16	39,22	45,05	44,67	66,57	28,57	28,83	36,30	26,40	18,09
17	41,62	14,34	47,72	74,17	59,80	42,09	69,36	9,84	18,02
18	19,86	18,46	9,39	91,42	43,81	30,96	38,60	12,98	9,34
19	53,44	4,82	10,65	66,18	30,62	62,61			
20	71,00	29,10	25,26						
MW	64,05	27,64	33,19	79,63	37,79	39,55	65,95	29,12	42,08
SA	26,04	14,38	17,05	20,25	15,02	14,31	17,80	12,51	22,11
SF	5,82	3,21	3,81	4,65	3,45	3,28	4,20	2,95	5,21

Tab. 27: Schnüffeldauer der sexuell naiven Rattenmännchen an den Jungtieren in Sekunden.

Männchen F ₃	Kontrolle			GSM			UMTS		
	1.Test	2. Test		1.Test	2. Test		1.Test	2. Test	
	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.	ein Juv.	selbes Juv.	neues Juv.
1	87,44	32,36	41,14	40,81	14,91	23,16	79,97	28,37	30,93
2	77,26	17,87	39,90	128,74	39,28	52,24	84,11	38,27	43,03
3	39,89	32,05	57,50	115,94	57,78	72,24	115,94	34,47	50,31
4	41,90	56,12	81,73	127,73	43,65	48,19	94,11	31,90	45,20
5	75,18	20,29	56,09	66,96	46,44	53,55	114,44	44,83	52,78
6	55,24	21,28	24,70	57,27	45,38	39,77	63,50	32,79	41,47
7	36,13	19,95	28,48	52,15	6,14	13,35	67,31	50,95	60,99
8	29,75	26,12	8,60	53,52	27,44	10,62	56,78	54,15	39,14
9	22,63	18,24	12,39	91,49	25,66	28,24	60,58	42,10	29,66
10	38,10	8,18	15,52	48,13	19,85	36,45	81,11	37,74	40,91
11	41,70	16,59	28,60	65,60	43,71	56,67	42,96	13,11	12,25
12	28,69	27,62	39,47				48,15	54,30	11,66
13	49,60	11,32	27,78				78,71	24,94	51,75
14							69,18	27,02	46,43
MW	47,96	23,69	35,53	77,12	33,66	39,50	75,49	36,78	39,75
SA	20,28	12,10	20,50	33,03	15,87	19,30	21,95	11,82	14,39
SF	5,62	3,36	5,69	9,96	4,78	5,82	5,87	3,16	3,85

