

# Wissenschaftsrecht

Zeitschrift für deutsches und europäisches Wissenschaftsrecht

Herausgegeben von Christian von Coelln · Volker Epping  
Klaus Ferdinand Gärditz · Bernhard Kempen  
Ute Mager · Andreas Schlüter

Beiheft 26

Klaus Ferdinand Gärditz

Cephalopoden im Tierversuchsrecht

Eine Fallstudie zu biowissenschaftlicher Grundlagen-  
forschung, Modellorganismen und epistemischer  
Lastenverteilung im Verwaltungsrecht



Mohr Siebeck

# Wissenschaftsrecht

Zeitschrift für deutsches und europäisches Wissenschaftsrecht

Herausgegeben von Christian von Coelln · Volker Epping  
Klaus Ferdinand Gärditz · Bernhard Kempen  
Ute Mager · Andreas Schlüter

Beiheft 26

Klaus Ferdinand Gärditz

Cephalopoden im Tierversuchsrecht

Eine Fallstudie zu biowissenschaftlicher Grundlagen-  
forschung, Modellorganismen und epistemischer  
Lastenverteilung im Verwaltungsrecht



Mohr Siebeck

*Klaus Ferdinand Gärditz*, geboren 1975; Studium der Rechtswissenschaften in Bonn 1995–1998; Referendardienst in Rheinland-Pfalz 1999–2001; Promotion 2001 in Bonn; 2002–2004 Verwaltungsrichter in Rheinland-Pfalz und Rechtsanwalt in Bonn; 2004–2009 Wiss. Assistent an der Universität Bayreuth; Habilitation 2009; seit Sommersemester 2009 Professor für Öffentliches Recht an der Universität Bonn; 2014–2021 stellv. Richter am VerfGH NW; 2015–2021 Richter im Nebenamt am OVG NW. Seit 2020 Mitglied der Nordrhein-Westfälischen Akademie der Wissenschaften und der Künste.

ISBN 978-3-16-162600-5 / eISBN 978-3-16-162720-0  
DOI 10.1628/978-3-16-162720-0

ISSN 0948-1478 (Wissenschaftsrecht: Beiheft)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

© 2023 Mohr Siebeck Tübingen. [www.mohrsiebeck.com](http://www.mohrsiebeck.com)

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für die Verbreitung, Vervielfältigung, Übersetzung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Das Heft wurde von Laupp & Göbel in Gomaringen gesetzt, auf alterungsbeständiges Werkdruckpapier gedruckt und von der Buchbinderei Nädele in Nehren gebunden.

Printed in Germany.

## Vorwort

Die vorliegende Untersuchung behandelt ein sehr spezielles Thema, das freilich nur auf den ersten Blick peripher wirkt, aber schnell in zentrale Fragen des Wissenschaftsrechts (einschließlich einer eigentümlich forschungsnahen epistemischen Dimension) führt. Der Text ist aus einer schlichten Laune heraus entstanden. Ich beschäftige mich wissenschaftlich in unterschiedlichen Bereichen mit dem Tierversuchsrecht, nicht zuletzt über einen lebendigen und lehrreichen Austausch mit meinen Kolleginnen und Kollegen am Universitätsklinikum Bonn, die mit Tierversuchen arbeiten, sowie als Mitglied in der „Ständigen Senatskommission für tierexperimentelle Forschung“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Normalerweise wird man dort ausschließlich mit heute hochstandardisierten und überwiegend gentechnisch veränderten Labortieren konfrontiert. Gearbeitet wird mit Mäusen und Ratten, selten einmal mit Schweinen. Bei dieser Arbeit war mir aufgefallen, dass die EU-Tierversuchsrichtlinie im Jahr 2010 zwar den Schutzzumfang um Cephalopoden ergänzt hat, es aber keine deutschsprachige Literatur zu den Hintergründen und auch keine deutschen Debatten hierzu gibt. Geweckter Neugierde folgte – wie üblich – Recherche, die dann im Ergebnis mehr Fragen aufwarf als beantwortete. Auch als dringend nötiger Ausgleich für Belastungen mit verschiedensten Aufgaben ist dann sukzessive dieser Text entstanden. Ich verbinde trotz des anekdotischen Anlasses der Entstehung damit die Hoffnung, zur Aufhellung beizutragen, wie unser Tierversuchsrecht strukturiert und warum am Ende alles viel komplizierter ist, als es auf den ersten Blick erscheint. Es ist zugleich ein Appell an die Rechtswissenschaften, mehr interdisziplinäre Sensibilität zu zeigen und sich gerade im Wissenschaftsrecht auf die Eigenesetzlichkeiten der Fächer einzulassen, die rechtlich reguliert werden.

Ich habe am 28. März 2023 ein strukturiertes Gespräch mit Professor Dr. *Gilles Laurent*, Dr. *Antje Berken* und Dr. *Emily Northrup* vom Max-Planck-Institut für Gehirnforschung in Frankfurt am Main über die Forschungsansätze, Herausforderungen und Erfahrungen mit Cephalopoden im Tierversuch geführt. Ich danke sehr herzlich für das aufschlussreiche Gespräch, das wesentlich dazu beigetragen hat, diese Untersuchung abzuschließen. Die hieraus gewonnenen qualitativen Erkenntnisse sind in die vorliegende Untersuchung eingegangen und an entsprechenden Stellen zitiert.

Ferner möchte ich zwei Personen danken, die sich um diese kleine Untersuchung sehr verdient gemacht haben: Meine Mitarbeiterin Frau *Karoline Linzbach* hat mich in das bezeichnete Gespräch mit dem MPI begleitet und mit mir meine hieraus gezogenen Schlussfolgerungen engagiert diskutiert. Sie hat zudem die Mühe auf sich genommen, das Manuskript auf Schreibfehler und Unklarheiten gegenzulesen. Danken möchte ich ferner Dr. *Hjördis Czesnick*, die liebenswürdigerweise aus eigener Neugierde meine Manuskriptfassung angesehen und als Biologin sehr wichtige Rückfragen zu den rechtswissenschaftlichen Folgerungen gestellt hat, die mir nicht zuletzt Anlass für die eine oder andere notwendige Präzisierung gaben. Ganz herzlichen Dank!

Bonn, Mai 2023

Klaus Ferdinand Gärditz

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort . . . . .	III
I. Hintergrund . . . . .	1
II. Tiermodelle in den Life Sciences . . . . .	4
1. Modellorganismen . . . . .	5
a) Konservierung von Strukturen als Erkenntnischance . . . . .	6
b) Geeignete Modellorganismen . . . . .	8
c) Invertebraten als Modelle . . . . .	11
d) Holistische Perspektive . . . . .	13
2. Evolutionäre Entwicklungsbiologie . . . . .	14
III. Cephalopoden und tierexperimentelles Interesse . . . . .	18
1. Hochkomplexes Nervensystem als Proprium . . . . .	21
2. Cephalopoden als Modell in der Wissenschaftsgeschichte . . . . .	27
a) Die Riesenaxone und der Anfang der modernen Neurophysiologie . . . . .	27
b) Der kybernetische Oktopus . . . . .	28
3. Forschungsinteressen . . . . .	29
a) Neurowissenschaften . . . . .	30
b) Weitere Forschungsfelder . . . . .	33
c) Zwischenbilanz . . . . .	36
IV. Einbeziehung in das Tierschutzrecht . . . . .	39
1. Richtlinienerlass und Motiv der Schutzerweiterung . . . . .	40
2. Epistemische Unsicherheit, Nozizeption, Vorsorge und Fiktion . . . . .	43
3. Deutsches Recht . . . . .	47

V.	Epistemische Folgelasten . . . . .	49
	1. <i>Empfindungsfähigkeit als Definitions- und Erkenntnisproblem</i> . . . . .	49
	2. <i>Cephalopoden als Grenzfall</i> . . . . .	54
	3. <i>Die Fallstricke einer Vergeisteswissenschaftlichung</i> . . . . .	58
VI.	Konfliktverlagerung ins Tierversuchsrecht . . . . .	62
	1. <i>Genehmigungsrecht</i> . . . . .	63
	2. <i>Ethische Rechtfertigung</i> . . . . .	65
	a) <i>Ermittlung der Belastung</i> . . . . .	66
	b) <i>Ermittlung der wissenschaftlichen Bedeutung</i> . . . . .	70
	aa) <i>Wissenschaftsfreiheit als Grenze            der Kognitionstiefe</i> . . . . .	71
	bb) <i>Epistemische Verfahrensrationalität als Grenze            der Kognitionstiefe</i> . . . . .	73
	cc) <i>Neurowissenschaftliche Grundlagenforschung            und funktionale Selbstreferenz des Tierwohls</i> . . . . .	75
	c) <i>Prozedurale, iterative und kooperative        Wissensgenerierung</i> . . . . .	76
	d) <i>Relationierende Abwägung</i> . . . . .	80
	3. <i>Replace, Reduce, Refine</i> . . . . .	86
	a) <i>Studiendesign und Reduktion        durch Nutzungsoptimierung</i> . . . . .	89
	b) <i>Replacement</i> . . . . .	91
	c) <i>Refinement und Haltungsbedingungen</i> . . . . .	92
	4. <i>Tötung von Tieren</i> . . . . .	95
VII.	Resümee . . . . .	99
	Schlagworte . . . . .	106

## I. Hintergrund

Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen (§ 1 Satz 2 TierSchG<sup>1</sup>). Diese tierethisch begründete Basisregel des geltenden Tierschutzrechts ist epistemisch voraussetzungsvoll, weil sie implizit Kenntnisse über Empfindungsvermögen einer Tierart voraussetzt, die nicht zwingend gesichert sind. Wie schwierig die Erfüllung des tierschutzrechtlichen Auftrags unter den besonderen Bedingungen tierexperimenteller Forschung sein kann, aber auch wie wenig reflektiert bisweilen Rechtsetzung erfolgt, die sich mehr von öffentlicher Intuition als von wissenschaftlichem Sachverstand leiten lässt, zeigt der normative Grenzfall der Tierversuche mit Cephalopoden<sup>2</sup>.

Tierversuche mit Cephalopoden spielen heute eine praktisch eher randständige Rolle,<sup>3</sup> sie haben Bedeutung vor allem für Bereiche neurowissenschaftlicher Grundlagenforschung. Für eine rechtswissenschaftliche Modellbildung, die die Verarbeitung von Konflikten in rechtlichen Verfah-

---

<sup>1</sup> Tierschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung v. 18.5.2006 (BGBl. I S. 1206, 1313), das zuletzt durch Art. 2 Abs. 20 des Gesetzes v. 20.12.2022 (BGBl. I S. 2752) geändert worden ist.

<sup>2</sup> Zu Phylogenese, Taxonomie und Physiologie *P. Boyle/P. Rodhouse*, Cephalopods: Ecology and Fisheries, 2005, S. 7 ff., 36 ff.; *M. K. Nisbiguchi/R. H. Mapes*, Cephalopoda, in: W. Ponder (Hrsg.), Phylogeny and Evolution of the Mollusca, 2008, S. 163 ff.; *W. F. Ponder/D. R. Lindberg/J. M. Ponder*, Biology and Evolution of the Mollusca, Vol. 2, 2020, S. 195 ff.; *L. von Salvini-Plawen*, Mollusca, in: W. Westheide/G. Rieger (Hrsg.), Spezielle Zoologie, Teil 1: Einzeller und Wirbellose Tiere, 3. Aufl. (2013), S. 293 (345 ff.). Zur vergleichenden Verhaltensforschung der verschiedenen Cephalopoden-Arten *J. A. Mather/J. S. Alupay*, An Ethogram for Benthic Octopods (Cephalopoda: Octopodidae), Journal of Comparative Psychology 130 (2016), S. 109 ff. Vgl. für eine Bestandaufnahme der Cephalopoden der Adria *E. Ciavaglia/C. Manfredi*, Distribution and some biological aspects of cephalopods in the North and Central Adriatic, Bollettino malacologico 45 (2009), Supplement, S. 61 ff.

<sup>3</sup> In der – ohnehin spärlichen – Rechtsprechung zum Tierschutzrecht findet sich kein einziger Fall. Die einzige Erwähnung findet sich eher entlegen in einer steuerrechtlichen Privilegierung von versteinerten Cephalopoden als paläontologische Sammlerstücke: *BFHE* 151, 266 ff. Im ansonsten dominanten (europäischen) Naturschutzrecht gibt es keine Cephalopoden, die unter Artenschutz fallen. Die einzigen Mollusca, die unter Artenschutz zu stellen sind, sind einige Gastropoda (Schnecken), Bivalvia (Muscheln) sowie der Seeigel *Centrostephanus longispinus*. Siehe Anhang IV zur Richtlinie 92/43/EWG des Rates v. 21.5.1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen (ABl. L 206, S. 7).

ren abbilden möchte, eignen sich jedoch oftmals Grenzphänomene besonders gut, weil sie Konflikte ausschärfen und dazu zwingen, Probleme aus Perspektiven zu betrachten, die vom routinierten Standard abweichen. Für ein stark bewegliches System wie die Wissenschaft sind Normalitätsannahmen besonders riskant, weil das normalisierte Wissen rasch überholt sein kann. So hat auch die Forschung mit Invertebraten (Wirbellosen) in den letzten Dekaden mit neuem Wissen immer weiter eingeschlossene Prämissen in Frage gestellt und insbesondere zuvor unbekannte neuronale Komplexität zu Tage befördert.<sup>4</sup> Gleichwohl sind Nervensysteme der Invertebraten nicht annähernd so gut erforscht wie die der Vertebraten (Wirbeltiere).<sup>5</sup>

Der Grenzfall ist daher auch für die rechtswissenschaftliche Forschung oftmals der bessere Referenzfall. Cephalopoden sind für das Tierschutzrecht besonders interessant, weil sie einerseits ein hochkomplexes Verhalten zeigen und über ein leistungsfähiges Nervensystem verfügen, andererseits aber in ihrer Neurophysiologie sehr fremd und nur in Ansätzen erforscht sind. Vieles bleibt auf den ersten Blick überraschend, auf den zweiten Blick immer noch rätselhaft.<sup>6</sup> Das hat auch Folgen für die rechtliche Regulierung der Forschung. Die tierschutzrechtlichen Abwägungen sehen sich mit ganz anderen Herausforderungen konfrontiert als Standardmodelle mit traditionellen Vertebraten-Modellorganismen wie Mäusen, Ratten oder Zebrafischen, die millionenfach erprobt sind und auf breite Erfahrung in der Versuchstierkunde verwiesen können.<sup>7</sup> Den normativen Wert von tierexperimenteller Grundlagenforschung, den das Tierschutzrecht abwägend verarbeiten muss, kann man wiederum nur beurteilen, wenn man die Funktion von Modellen und den spezifischen Wert einer Spezies betrachtet, die zur Modellierung herangezogen wird. Das recht-

---

<sup>4</sup> C. Carere/J. Mather, Why Invertebrate Welfare?, in: C. Carere/J. Mather (Hrsg.), *The Welfare of Invertebrate Animals*, 2019, S. 1 (4).

<sup>5</sup> T. E. Feinberg/J. M. Mallatt, *The Ancient Origins of Consciousness*, 2017, S. 173.

<sup>6</sup> G. Ponte/C. Chiangetti/G. Fiorito et al., Cephalopod Behavior: From Neural Plasticity to Consciousness, *Frontiers in Systems Neuroscience* 15 (2022), Article 787139, S. 1 (2).

<sup>7</sup> Vgl. nur die standardisierten Referenzwerke zu Mäusen R. Bebringer/M. Gertsenstein/K. Vinterstein Nagy/A. Nagy, *Manipulating the Mouse Embryo: A Laboratory Manual*, 4. Aufl. (2013); H. Hedrich (Hrsg.), *The Laboratory Mouse Gebundene*, 2012; G. Proetzl/M. V. Wiles (Hrsg.), *Mouse Models for Drug Discovery: Methods and Protocols*, 2. Aufl. (2018); zu Ratten R. L. Maynard/N. Downe, *Anatomy and Histology of the Laboratory Rat in Toxicology and Biomedical Research*, 2019; M. A. Suckow/F. C. Hankenson/R. P. Wilson/P. L. Foley (Hrsg.), *The Laboratory Rat*, 3. Aufl. (2019); zu Zebrafischen S. Cartner/J. S. Eisen/S. F. Farmer/K. J. Guillemain/M. L. Kent/G. E. Sanders (Hrsg.), *The Zebrafish in Biomedical Research: Biology, Husbandry, Diseases, and Research Applications*, 2019; K. Kawakami/E. E. Patton/M. Orger (Hrsg.), *Zebrafish: Methods and Protocols*, 2018.

liche Setting und seine Binnenrationalität macht Forschung hier zu einer rechtsepiistemischen Herausforderung, ein zureichendes interdisziplinäres Grundverständnis aufzubauen. Traditionellerweise orientiert sich die Auswahl von Referenzgebieten im Recht an der rechtsnormativen Strukturierung im besonderen Verwaltungsrecht.<sup>8</sup> Eine kognitiv offene Wissenschaft, die auch die Rechtsanwenderperspektive einbezieht, wie Entscheidungen entstehen und wirken,<sup>9</sup> und sich daher mit den Kontexten von Recht befassen muss, kommt nicht umhin, auch geeignete Referenzgebiete auf der Tatsachenseite auszuwählen („Realbereichsanalyse“<sup>10</sup>), um Sachprobleme zu veranschaulichen, die rechtliche Strukturen zu bewältigen haben. Im Wissenschaftsrecht bedeutet das vor allem, sich auf die epistemischen Strukturen anderer Fächer einzulassen.

Ich habe am 28. März 2023 ein Gespräch mit Professor Dr. *Gilles Laurent*, Dr. *Antje Berken* und Dr. *Emily Northrup* vom Max-Planck-Institut für Gehirnforschung in Frankfurt am Main über die Forschungsansätze, Herausforderungen und Erfahrungen mit Cephalopoden im Tierversuch geführt. An dieser Einrichtung findet zahlenmäßig die größte Forschung mit Cephalopoden in Deutschland statt. Die hieraus gewonnenen qualitativen Erkenntnisse (im Sinne einer vertikal integrierten Fallstudie) sind in die vorliegende Untersuchung eingegangen und an entsprechenden Stellen zitiert.

---

<sup>8</sup> *E. Schmidt-Aßmann*, Das allgemeine Verwaltungsrecht als Ordnungs idee, 2. Aufl. (2004), S. 8, 112 ff.; *A. Voßkuhle*, Neue Verwaltungsrechtswissenschaft, in: ders./M. Eifert/C. Möllers (Hrsg.), Grundlagen des Verwaltungsrechts, Bd. I, 3. Aufl. (2022), § 1 Rn. 43 ff.

<sup>9</sup> *C. Bickenbach*, Die Einschätzungsprerogative des Gesetzgebers, 2014, S. 163 f.; *C. Bumke*, Rechtsdogmatik, 2017, S. 103 f.; *M. Eifert*, Das Verwaltungsrecht zwischen klassischem dogmatischen Verständnis und steuerungswissenschaftlichem Anspruch, VVDStRL 67 (2008), S. 286 (292, 295 ff.); *W. Hoffmann-Riem*, Methoden einer anwendungsorientierten Verwaltungsrechtswissenschaft, in: *E. Schmidt-Aßmann/W. Hoffmann-Riem* (Hrsg.), Methoden der Verwaltungsrechtswissenschaft, 2004, S. 9 (20 ff.); *E. Schmidt-Aßmann*, Verwaltungsrechtliche Dogmatik, 2013, S. 14 ff.; *T. Siegel*, Entscheidungsfindung im Verwaltungsverbund, 2009, S. 25; *Voßkuhle* (Fn. 8), § 1 Rn. 15. Ideengeschichte nachgezeichnet bei *J. F. Schaefer*, Die Umgestaltung des Verwaltungsrechts, 2016, S. 133 ff.

<sup>10</sup> *Voßkuhle* (Fn. 8), § 1 Rn. 29 f.

## II. Tiermodelle in den Life Sciences

Modellierungen sind ein unverzichtbares epistemisches Vorgehen in den Life Sciences, weil sie Abstraktionen ermöglichen, die wiederum Voraussetzung einer allgemeineren Theoriebildung sind.<sup>11</sup> Das Modell ist daher vor allem eine funktional aufgefächerte Denkkategorie der Grundlagenforschung.<sup>12</sup> Gerade Tiermodelle sind aus den – angewandten wie grundlagenorientierten – Lebenswissenschaften kaum wegzudenken. Eine jüngere Bestandaufnahme schätzte, dass 70 Prozent der geförderten biomedizinischen Forschung Tierversuche verwende,<sup>13</sup> und stellte fest, dass 95 Prozent aller für Physiologie/Medizin vergebenen Nobelpreise auf Forschungsergebnissen beruhten, die auch tierexperimentelle Methoden eingesetzt hatten.<sup>14</sup>

Anwendungsbezogene Forschung steht stets auf den Schultern von Riesen, nämlich einer beharrlichen, intrinsisch motivierten, filigranen und oftmals langwierigen Grundlagenforschung, die erst nach und nach ein solides Fundament schafft, auf dem dann die Leuchttürmchen populärer Anwendungen gebaut werden können.<sup>15</sup> Geht es nicht um originär zoologische Erkenntnisinteressen an einer spezifischen Art, sondern um die Gewinnung biowissenschaftlichen Grundlagenverständnisses – etwa evolutionsbiologischer, pathologischer, entwicklungsbiologischer, biochemischer, molekularbiologischer oder neurowissenschaftlicher Provenienz –, wird mit einer Tierart letztlich als repräsentatives Modell experimentell

---

<sup>11</sup> M. D. Laubichler/G. B. Müller, Models in Theoretical Biology, in: dies. (Hrsg.), Modeling Biology, 2007, S. 3 (9).

<sup>12</sup> Vgl. S. Leonelli, What is in a Model?, Combining Theoretical and Material Models to Develop Intelligible Theories, in: M. D. Laubichler/G. B. Müller (Hrsg.), Modeling Biology, 2007, S. 15 (28 ff.).

<sup>13</sup> Zu den Zahlen und Themenfeldern eingehend B. Bert/A. Dörendahl/G. Schönfelder et al., Rethinking 3R strategies: Digging deeper into AnimalTestInfo promotes transparency in vivo biomedical research, PLoS Biology 15 (2017), Nr. 12, Article e2003217, S. 1 ff.

<sup>14</sup> Enqi Liu/Jianglin Fan, Laboratory Animals and Biomedical Research, in: Enqi Liu/Jianglin Fan (Hrsg.), Fundamentals of Laboratory Animal Sciences, 2020, S. 1 (7).

<sup>15</sup> K. F. Gärditz, Hoflieferanten, 2023, S. 17. Das krude Klischee, Grundlagenforschung mit Tierversuchen sei letztlich gesellschaftlich nutzlos, ist bereits alt. Vgl. aus der Defensive hiergegen bereits W. Kobinger, Von der Maus zum Menschen, in: F. Lembeck (Hrsg.), Alternativen zum Tierversuch, 1988, S. 35 (38).

geforscht. Für das Tierversuchsrecht sind Modelle auch deshalb besonders herausfordernd, weil sie – wie zu zeigen sein wird<sup>16</sup> – hohen Begründungsaufwand verursachen, der wiederum rechtsnormativ-bürokratisch radiziert ist. Auch deshalb lohnt es sich aus rechtswissenschaftlicher Sicht, zunächst einmal die Kategorie des Modellorganismus etwas näher zu betrachten.

### 1. Modellorganismen

Modellorganismen kommt in den Lebenswissenschaften eine kaum zu überschätzende Bedeutung zu.<sup>17</sup> Modellorganismen sind – ungeachtet begrifflicher Unschärfen<sup>18</sup> – nichtmenschliche Arten, die stellvertretend umfassend untersucht werden, um biologische Zusammenhänge in der Erwartung zu verstehen, dass sich Erkenntnisse abstrahiert auch auf andere Spezies übertragen lassen oder jedenfalls Rückschlüsse auf deren Biologie ermöglichen.<sup>19</sup> An die Stelle der Punktperspektive des einzelnen Experiments tritt eine holistische Perspektive auf eine Spezies, die Verständnis für Zusammenhänge vermittelt, die dann übergreifend nutzbar zu machen sind. Ein erheblicher Teil des heutigen biologischen Wissens beruht auf dieser Untersuchungstiefe einer vergleichsweise kleinen Zahl an Modellorganismen. Es geht also um eine Form, epistemische Repräsentationsbreite zu schaffen,<sup>20</sup> mithin um indirekte Erkenntnis<sup>21</sup>.

Hinzu treten zunehmend auch komparatistische Ansätze, die Modellorganismen nutzen, um Vergleiche zwischen Spezies zu ziehen, die taxonomisch sehr weit voneinander entfernt sind.<sup>22</sup> Modellierung erfolgt hier ggf.

<sup>16</sup> Unten VI. 2.

<sup>17</sup> W. Arthur, *Understanding Evo-Devo*, 2021, S. 50.

<sup>18</sup> S. A. C. Love/Y. Yoshida, *Reflections on Model Organisms in Evolutionary Developmental Biology*, in: W. Tworzydło/S. M. Bilinski (Hrsg.), *Evo-Devo: Non-model Species in Cell and Developmental Biology*, 2019, S. 3 (11 ff.).

<sup>19</sup> R. A. Ankerly/S. Leonelli, *Model Organisms*, 2020, S. 2. Gerade hinsichtlich der Übertragbarkeit wurde mit Recht darauf hingewiesen, dass jeder Organismus einzigartig ist und daher die von „exakten“ Naturwissenschaften gewohnten Schritte der Universalisierbarkeit nicht tragen, aber wissenschaftshistorisch immer wieder – durch voreilige Verallgemeinerungen – gezogen worden sind. So E. Mayr, *Die Entwicklungen der biologischen Gedankenwelt*, 1984, S. 682 f. Bewusstsein für die Grenzen von Modellen und für den Eigenwert des Speziellen entsteht hier erst in jüngerer Zeit.

<sup>20</sup> Ankerly/Leonelli (Fn. 19), S. 6 f.

<sup>21</sup> M. Weisberg, *Who Is a Modeler?*, *The British Journal for the Philosophy of Science* 58 (2007), S. 207 (209 f.).

<sup>22</sup> Ankerly/Leonelli (Fn. 19), S. 64 ff. Zur Ergiebigkeit gerade einer Einbeziehung von Cephalopoden in vergleichende Studien siehe J. Basil/R. Crook, *Evolution of behavioral and neural complexity: learning and memory in Chambered Nautilus*, in: A.-S. Darmaillacq/L. Dickel/J. Mather (Hrsg.), *Cephalopod Cognition*, 2014, S. 31 (31 f.).

durch Kontrastierung,<sup>23</sup> also durch die (ggf. evolutionsbiologisch aufzuhellende) Aussagekraft konkreter Unterschiede. Das Verständnis, warum etwas bei einer anderen Art *anders* ist, lässt sich mitunter zurückspiegeln und kann so dazu beitragen, besser zu begreifen, warum etwas z. B. beim Menschen so ist, wie es ist.

Modellorganismen können natürlich auch Pflanzen, Pilze oder Bacteria sein.<sup>24</sup> Zur Klärung komplexerer Wirkungszusammenhänge, zumal im Kontext systemischer Beobachtungen oder gar solcher mit translationalem Potential für die Medizin, benötigt man aber in der Regel mehrzellige Tiere (Metazoen). Damit rückt der Tierversuch in das Zentrum der Modellierung, die hierdurch Komplexität von Leben mit einer Feinauflösung darstellen kann, die in der anwendungsorientierten Forschung – erst recht am Menschen mit Blick auf die engen medizinethischen Grenzen – nie erreichbar wäre. Modellorganismen sind zugleich ein Gerüst, standardisierte Methoden der Intervention in biologische Prozesse zu entwickeln,<sup>25</sup> haben also eine spezifische epistemische Funktion. Sie sind die Methodensandkästen, auf denen Instrumente erprobt und verfeinert werden, mit denen jede Forschung (die anwendungsbezogene eingeschlossen) arbeitet.

#### a) Konservierung von Strukturen als Erkenntnischance

Anders als bei konkreten Modellen für Krankheiten in der Biomedizin<sup>26</sup> ist der Einbezug von Modellorganismen in den Biowissenschaften flexibel

<sup>23</sup> Vgl. auch *I. Ruiz-Trillo*, What are Genomes of Premetazoan Lineages Telling Us About the Origins of Metazoa?, in: *K. J. Niklas/S. A. Newman (Hrsg.), Multicellularity: Origins and Evolution*, 2016, S. 171 (172).

<sup>24</sup> Vgl. *P. A. Adamczyk/J. L. Reed*, Escherichia coli as a model organism for systems metabolic engineering, *Current Opinion in Systems Biology* 6 (2017), S. 80ff.; *Z. D. Blount*, The Natural History of Model Organisms: The unexhausted potential of E. coli, *eLife* 4 (2015), Article e05826, S. 1ff.; *D. Botstein/S. A. Chervitz/J. M. Cherry*, Yeast as a Model Organism, Published in final edited form as, *Science* 277 (1997), S. 1259f.; *U. Krämer*, The Natural History of Model Organisms: Planting molecular functions in an ecological context with Arabidopsis thaliana, *eLife* 4 (2015), Article e06100, S. 1ff.; *S. Mohammadi/B. Saberidokhti/S. Subramaniam/A. Grama*, Scope and limitations of yeast as a model organism for studying human tissue-specific pathways, *BMC Systems Biology* 9 (2015), Article 96, S. 1ff.; *J. Nielsen*, Yeast Systems Biology: Model Organism and Cell Factory, *Biotechnology Journal* 14 (2019), Article 1800421, S. 1ff.; *J. J. Russell/J. A. Theriot/A. Brunet et al.*, Non-model model organisms, *BMC Biology* 15:55 (2017), S. 1 (2ff.); *D. R. Zeigler*, The Bacillus Genetic Stock Centra/Bacillus subtilis, in: *R. L. Jarret/K. McCluskey (Hrsg.)*, *The Biological Resources of Model Organisms*, 2020, S. 35 ff.

<sup>25</sup> *Ankery/Leonelli (Fn. 19)*, S. 9.

<sup>26</sup> Vgl. für den dortigen Standardisierungsbedarf nur *J. Hau*, Animal models for human diseases: An overview, in: *P. M. Conn (Hrsg.)*, *Source book of models for biomedical research*, 2008, S. 3 ff.; *K. Fitzgerald/P. M. Carroll*, *Introduction to Model Systems in*

und breit möglich, aber auch unberechenbarer. Modellorganismen exemplifizieren und bleiben in ihrem Deutungsanspruch daher graduell reduziert, weil Abstraktion von Spezifischem natürlich immer epistemischen Grenzen unterliegt; sie sind letztlich aber gerade deshalb von großer Bedeutung, wissenschaftliche Erklärungen dort zu bieten, wo Komplexität den Rückgriff auf einfache Gesetzmäßigkeiten verhindert.<sup>27</sup> Grundannahme ist, dass bestimmte biologische Prozesse allgemein in allen oder jedenfalls den meisten Organismen einer (beim Design der Modellierung adäquat definierten) Gruppe sehr ähnlich sind.<sup>28</sup> Nicht zuletzt die Verfeinerung der Einblicke durch die Methoden der Molekularbiologie hat den Fundus der (teils seit der Kambrischen Explosion) konservierten Gemeinsamkeiten deutlich anwachsen lassen.<sup>29</sup> Man hofft also auf einen hinreichenden

---

Drug Discovery, in: P. M. Caroll/K. Fitzgerald (Hrsg.), *Model Organisms in Drug Discovery 2003*, S. 1 (4f.); *F. Nainu/J. Baptista/A. Faustino-Rocha/P. A. Oliveira*, Editorial: Model organisms in experimental pharmacology and drug discovery 2022, *Frontiers in Pharmacology* 14 (2023), Nr. 1143934; *E. E. Patton/L. I. Zon/D. M. Langenau*, Zebrafish disease models in drug discovery: from preclinical modelling to clinical trials, *Nature Reviews Drug Discovery* 20 (2021), S. 611 (611f.).

<sup>27</sup> *M. S. Morgan*, Afterword: Reflexions on Exemplary Narratives, Cases, and Model Organisms, in: A. N. H. Creager/E. Lunbeck/M. N. Wise (Hrsg.), *Science without Laws*, 2007, S. 264 (273). Zur Inadäquanz von Modellen, die auf Linearität und Homogenität der Komponenten gründen, extrem heterogen strukturierte biologische Systeme zu erklären, nur *H. Sayama*, Complexity, Development, and Evolution in Morphogenetic Collective Systems, in: G. Y. Georgiev/J. M. Smart/C. L. Flores Martinez/M. E. Pric (Hrsg.), *Evolution, Development and Complexity*, 2019, S. 293 ff.

<sup>28</sup> *Ankery/Leonelli* (Fn. 19), S. 7.

<sup>29</sup> Auch hier sind in der Regel nur indirekte Beobachtungen möglich, die rezente Taxa vergleichen und Entwicklungen rekonstruieren. Direkter Zugriff auf fossile Bestände von Coleoidea (also Cephalopoden ohne Kalkgehäuse) ist aufgrund der schlechten Fossilisation nur begrenzt möglich und methodisch herausfordernd. Vgl. *B. Ziegler*, Spezielle Paläobiologie: Protisten, Spongien, Coelenterata, Mollusken, 2. Aufl. (1991), S. 307ff. Aus diesem Grund sind paläobiologische Informationen über die Evolution (anders als bei den Nautiloideen) in deutlich geringerem Umfang vorhanden, namentlich fragmentierter und mit Blick auf die Feinstrukturen der Weichteile selten. Zu den aber immerhin bestehenden (teilweise auch Feinstrukturen erfassenden) positiven Befunden z. B. *A. J. Kear/D. E. G. Briggs/D. T. Donovan*, Decay and fossilization of non-mineralized tissue in coleoid cephalopods, *Palaeontology* 38 (1995), S. 105 ff.; *M. Harzhauser*, Filling a Gap – Beaks and Hooks of Cenozoic Coleoids (Cephalopoda), *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien. Serie A für Mineralogie und Petrographie, Geologie und Paläontologie, Anthropologie und Prähistorie* 101 (1999), S. 123 ff.; *C. Klug/N. H. Landman/R. Hoffmann et al.*, Anatomy and evolution of the first Coleoidea in the Carboniferous, *Communications Biology* 2 (2019), Article 280, S. 1 ff.; *C. Klug/G. Schweigert/D. Fuchs/K. De Baets*, Distraction sinking and fossilized coleoid predatory behaviour from the German Early Jurassic, *Swiss Journal of Palaeontology* 140 (2021), Article 7, S. 1 ff.; *A. C. Riccardi*, Callovian and Oxfordian (Jurassic) teuthids (Coleoidea, Cephalopoda) from Chile, *Journal of Paleontology* 90 (2016), S. 910ff.; *R. E. Young/M. Vecchione/D. T. Donovan*, The evolution of coleoid cepha-

Grad der Generalisierbarkeit von Erkenntnissen aufgrund der relativen Art-Unspezifität von vielen Genen.<sup>30</sup> Arbeiten mit Modellorganismen machen sich die mitunter stabile Konservierung von bestimmten Proteinen zunutze, die in taxonomisch sehr unterschiedlichen Organismen in einem kleinen und sehr konkreten Funktionskontext auf einer biochemischen Ebene sehr ähnlich operieren.<sup>31</sup> Umso genauer der Fokus eines Versuchs auf die Mechanismen auf molekularer Ebene gerichtet ist – namentlich Genexpression und ihre Steuerung, Proteinfunktionen, Rezeptoren, Signaltransduktion, Biomembranen oder Transporter –, umso eher kann auch Modellorganismen ein abstrakter Erklärungswert über das (zoologische) Interesse an der jeweiligen Art hinaus zugeschrieben werden.

### b) Geeignete Modellorganismen

Um ein Modell zu bilden, das möglichst umfassend – und das heißt unter heutigen Forschungsbedingungen: von zahlreichen Forschungsteams mit jeweils anderem Fokus – untersucht werden soll, benötigt man idealerweise möglichst standardisierte Organismen, die einfach und in hinreichender Zahl zur Verfügung stehen. Praktische Voraussetzung, ob eine Art als Modellorganismus taugt, ist nicht nur die funktionale Konservierung eines Gens. Erforderlich ist auch die leichte Haltung unter Laborbedingungen und eine hinreichend rasche Generationenfolge bzw. schnelle Reproduktion.<sup>32</sup>

Hier beginnen die Schwierigkeiten, derentwegen auch die Modellfindung immer ein wertungsabhängiger Kompromiss ist, in dessen Rahmen man dann epistemische Prioritäten setzen und ggf. Abstriche bei Präzision und/oder Generalisierbarkeit hinnehmen muss. Manche Organismen

---

lopods and their present biodiversity and ecology, *South African Journal of Marine Science* 20 (1998), S. 393 ff. Vgl. zu den Anfängen molekularbiologischer Instrumente *G. A. Wray/J. S. Levinton/L. H. Shapiro*, *Molecular Evidence for Deep Precambrian Divergences Among Metazoan Phyla*, *Science* 274 (1996), S. 568 ff. Siehe allgemein zum Stand der Paläobiologie der Cephalopoden *C. Klug/L. Bonnaud-Ponticelli/R. Hoffmann et al.*, *Cephalopod palaeobiology: evolution and life history of the most intelligent invertebrates*, *Swiss Journal of Palaeontology* 141 (2022), Article 7, S. 1 ff.

<sup>30</sup> *Arthur* (Fn. 17), S. 51.

<sup>31</sup> *E. J. A. Hubbard*, *Model Organisms as Powerful Tools*, in: *A. N. H. Creager/E. Lunbeck/M. N. Wise* (Hrsg.), *Science without Laws*, 2007, S. 59 (60 f.). Beispielsweise die Biosynthese der Proteine, die die Homöostase über die Lipidschichten von Biomembranen regulieren, ist evolutionsbiologisch bei allen Eukaryoten stark konserviert. *S. R. Bauer/A. Voelzmann/M. Hoch et al.*, *Schlank, a member of the ceramide synthase family controls growth and body fat in Drosophila*, *The EMBO Journal* 28 (2009), S. 3706 ff.

<sup>32</sup> *Russell/Theriot/Brunet et al.* (Fn. 24), S. 1.

sind zwar funktional interessant für Modelle, lassen sich aber nicht mit hinreichender Geschwindigkeit nachzüchten, um standardisierte Generationenfolgen zu erhalten.<sup>33</sup> Die genetische Variabilität bleibt hoch und reduziert die statistische Aussagekraft von Versuchen. Will man umgekehrt die Entwicklungsperspektive der Evolutionsbiologie nutzbar machen, um bestimmte biologische Phänomene besser zu verstehen, liegt es nahe – so wurde jüngst aus der Perspektive der Neurowissenschaften dargelegt – bei den Modellorganismen stärker zu diversifizieren und auch Arten jenseits der etablierten Labortiere in Versuchen einzusetzen.<sup>34</sup> Die gezielte Erstreckung auf neue und ungewöhnliche Organismen kann Erkenntnisgewinne versprechen, weil diese besonders gut geeignet sein können, grundsätzliche Fragen der Biowissenschaften von allgemeinem Interesse zu klären, wozu sich eine Spezies mitunter gerade aufgrund ihrer Besonderheiten anbieten kann.<sup>35</sup>

Um qualitativ hochwertige Forschungsdaten zu generieren, muss man standardisieren, was es aber wiederum erfordert, das Rauschen durch die genetische Variabilität einer Population gering zu halten.<sup>36</sup> Leichte und schnelle Züchtung unter kontrollierten Bedingungen unterstützt dies. Bisweilen sind es aber auch ganz pragmatische Erwägungen, die einen Modellorganismus machen, etwa in der frühen Entwicklungsbiologie *Galus gallus*, weil man in ein Hühnerei ein Fenster schneiden kann, um Hühnerembryonen zu beobachten.<sup>37</sup> Nicht immer sind die aus pragmatischen Gründen der Verfügbarkeit gewählten Organismen auch diejenigen, die sich am besten eignen, eine bestimmte biowissenschaftliche Frage zu untersuchen.<sup>38</sup> Das Exemplarische kann die Artpezifität nicht abstreifen und bedingt es, dass es nicht einen Organismus gibt, an dem sich gleichzeitig alle Fragen der Entwicklung, Physiologie oder Biochemie des Lebens veranschaulichen lassen.<sup>39</sup> Idealerweise hat man also ein Setting komplementärer Modellorganismen, die zu einem epistemischen Gesamtbild beitragen.

---

<sup>33</sup> Vgl. für Korallen *E. E. Ball/D. C. Hayward/T. C. L. Bridge/D. J. Miller*, *Acropora – The Most-Studied Coral Genus*, in: A. Boutet/B. Schierwater (Hrsg.), *Handbook of Marine Model Organisms in Experimental Biology: Established and Emerging*, 2021, S. 173 (185).

<sup>34</sup> *G. Laurent*, *On the value of model diversity in neuroscience*, *Nature Reviews* 21 (2020), S. 395 f.

<sup>35</sup> *Russell/Theriot/Brunet et al.* (Fn. 24), S. 6, 11, 22, 24.

<sup>36</sup> Vgl. *G. D. Ruxton/N. Colegrave*, *Experimental Design for the Life Sciences*, 4. Aufl. (2016), S. 5 f.; allgemein *S. T. Bate/R. A. Clark*, *The Design and Statistical Analysis of Animal Experiments*, 2014, S. 18.

<sup>37</sup> *Arthur* (Fn. 17), S. 49.

<sup>38</sup> *Russell/Theriot/Brunet et al.* (Fn. 24), S. 2.

<sup>39</sup> *W. Müller/M. Hassel*, *Entwicklungs- und Reproduktionsbiologie*, 6. Aufl. (2018), S. 55.

Die Auswahl geeigneter Modellorganismen hängt zunächst davon ab, was erforscht werden soll und welche Anforderungen an eine Art sich hieraus ergeben.<sup>40</sup> Geht es um spezifische zellbiologische Vorgänge auf molekularer Ebene, sind möglichst einfache Organismen geeignet, auch um Komplexität zu reduzieren; mitunter genügen Einzeller. Für komplexere Beobachtungen braucht man höher ausdifferenzierte mehrzellige Organismen. Wenn man es wiederum mit ohnehin schon höchst komplexen Systemen (wie dem Zentralen Nervensysteme [ZNS] oder dem Immunsystem) zu tun hat, mag der Rekurs auf einfacher strukturierte Modellorganismen dazu dienen, bestimmte Fragen überhaupt noch pragmatisch adressieren zu können, ohne sogleich im Rauschen der Überkomplexität unterzugehen. Aus Forschungsfeldern wie den Neurowissenschaften oder der Pharmakologie ist bekannt, dass einerseits die Kenntnis der biochemischen Mikrovorgänge an einzelnen Membranproteinen natürlich nicht die Makroperspektive der Vernetzung eines Nervensystems ersetzen kann,<sup>41</sup> andererseits aber Nervensysteme auch nicht ohne Neurochemie und interzelluläre Prozesse (wie die Genregulation) verstanden werden können.<sup>42</sup> Zahlreiche Prozesse greifen komplex ineinander<sup>43</sup> und ein Systemverständnis wird ohne ein Verständnis der Mechanismen auf molekularer Mikroebene hinter dem System unvollkommen bleiben. Gerade die molekulare Mikroebene ist aber oft evolutionsbiologisch überraschend stark konserviert,<sup>44</sup> auch weil sich die bis heute erhaltenen biochemischen Prozesse und basalen Bausteine der Biomoleküle sehr früh in der Evolutionsgeschichte ausgeformt haben<sup>45</sup>.

---

<sup>40</sup> Exemplarisch für Neurowissenschaften *J. Morgensen*, Animal Models in Neuroscience, in: J. Hau/S. J. Schapiro (Hrsg.), Handbook of Laboratory Animal Science, 4. Aufl. (2021), S. 591 (599).

<sup>41</sup> Vgl. *F. Hucho*, Einführung in die Neurochemie, 1982, S. 1 f.

<sup>42</sup> Vgl. exemplarisch aus seiner neuropathologischen Sicht *B. D. Turner/D. T. Kashima/B. A. Grueter et al.*, Synaptic Plasticity in the Nucleus Accumbens: Lessons Learned from Experience, ACS Chemical Neuroscience 9 (2018), S. 2114 (2114).

<sup>43</sup> Vgl. *B. D. Turner/D. T. Kashima/B. A. Grueter et al.*, Synaptic Plasticity in the Nucleus Accumbens: Lessons Learned from Experience, ACS Chemical Neuroscience 9 (2018), S. 2114 (2114).

<sup>44</sup> *P. A. Arguello/J. A. Gogos*, Modeling Madness in Mice: One Piece at a Time, Neuron 52 (2006), S. 179 (185); *T. W. Robbins*, Homology in behavioural pharmacology: an approach to animal models of human cognition, Behavioural Pharmacology 9 (1998), S. 509 (510). So wurde beispielsweise ermittelt, dass von 414 Genen der Hefe, die für enzymatische Kernfunktionen kodieren, 47 Prozent eine vollständige Sequenzhomologie zum Menschen aufweisen. *S. J. Nielsen*, Yeast Systems Biology: Model Organism and Cell Factory, Biotechnology Journal 14 (2019), Nr. 1800421, S. 1 (2).

<sup>45</sup> *M. W. Kirschner/J. C. Gerhart*, The Plausibility of Life, 2005, S. 47.

## Schlagworte

3R 64, 86 ff.

Abdopus aculeatus 43  
Abwägung 8, 46, 50, 62, 65–66, 70, 76,  
80 ff., 87, 90, 97–98, 99, 102, 103  
Aktionspotential 28, 51 (Fn. 298)  
Alterungsprozess 34  
Amtsermittlung 74  
Analgesie 56 (Fn. 327), 57  
Analogie 15–16, 25, 26, 34, 53, 60, 65,  
67, 73  
Anästhesie 33 (Fn. 193), 56–57, 97, 98  
anekdotische Evidenz 45, 101 (Fn. 546)  
Anthropomorphismus 32, 55, 59  
Anthropozentrismus 50  
anwendungsbezogene Forschung 4, 6,  
76, 82, 83, 84  
Aplysia californica 12, 44, 85  
Aquarien 20, 21, 111  
Architheutis dux 16 (Fn. 80)  
Artenschutz 1 (Fn. 3)  
Artspezifität 9  
Artvergleich 33  
Arzneimittelprüfung 19  
Arzneistoffe *siehe* Pharmaka  
Aufzucht 20, 36  
Augen 16, 16 (Fn. 80)  
Aussagekraft von Forschungsergebnis-  
sen 9, 32, 89–90, 92, 94  
Axon 27–28, 31–32, 84, 85  
  
Bacteria 6, 35  
Bakterien *siehe* Bacteria  
Belastung 19–20, 55, 58, 66–68, 75, 91,  
93, 94  
Beobachterperspektive 51, 99  
Berken, Antje III, 3  
Best practice 77, 80, 87  
Betäubung 46, 47, 97, 98  
Beurteilungsspielraum 65, 71 (Fn. 392),  
72 (Fn. 398)

Beweis 45, 53, 57 (Fn. 334), 71  
Beweismittelrecht 71  
Bewusstlosigkeit 57  
Bilateria 37  
Biochemie 4, 8, 9, 10, 16, 42 (Fn. 247),  
58  
Biomedizin 4, 6, 11, 19 (Fn. 90), 36  
Biomembranen 8  
Blutegel 44  
  
Caenorhabditis elegans 11–12  
Cannabinoid-Rezeptoren 67  
Centrostephanus longispinus 1 (Fn. 3)  
Cephalopod Research (CephRes) 19  
Chinin 25  
Cholera 35  
Chromatophoren 26, 34  
Cnidaria 22  
Coleoidea 7 (Fn. 29)  
  
Darwin 26 (Fn. 148), 60 (Fn. 343)  
Delikatesse 48  
Deutsche Forschungsgemeinschaft  
(DFG) III  
Dialogpartner 77  
Diskursfähigkeit 100  
Distanz, taxonomische 19, 22, 32, 53,  
59, 67, 82, 91, 103  
DNA 18 (Fn. 85), 22 (Fn. 116), 35  
Doryteuthis pealeii 22, 27, 43, 85  
Drosophila melanogaster 11 (Fn. 48), 12  
  
Eier 36, 93  
Eingriffsrechtfertigung 69  
Einzeller 10  
Eledone cirrhosa 21  
Eledone moschata 21  
Elektroschock 55  
Emergenz 52  
Empfindungsvermögen 1, 41, 45, 79  
Empirie 49, 50, 67

- Enterocytus dofleini 29  
 Entwicklungsbiologie 4, 9, 14–17,  
   23 (Fn. 124), 32 (Fn. 192),  
   35 (Fn. 212), 37, 84  
 Entwicklungsperspektive 9  
 episodisches Gedächtnis 24  
 Erkenntnisdefizit 74  
 Erkenntnisgewinn 9, 14, 64, 70, 80,  
   82 (Fn. 450), 89, 91  
 Erlaubnispflicht (Zucht/Haltung) 48  
 ethische Rechtfertigung 65–86, 104  
 ethische Vertretbarkeit 19, 50, 65, 76,  
   80, 87, 90, 97, 103  
 Euprymna scolopes 21, 22, 29,  
   33, 34–35, 37, 42 (Fn. 251), 59,  
   67 (Fn. 367), 94  
 EU-Tierversuchsrichtlinie *siehe*  
   RL 2010/63/EU  
 Epidenz 39 (Fn. 224), 45, 56, 76, 77, 88,  
   101 (Fn. 546)  
 Evo-Devo *siehe* Evolutionären Ent-  
   wicklungsbiologie  
 Evolutionären Entwicklungsbiologie  
   14–17, 37, 84  
 Evolutionsbiologie 9, 14, 16,  
   31 (Fn. 180), 36–37, 44, 54, 59, 82,  
   83, 91  
 Evolutionsgeschichte 10, 22f.  
 Experiment 13, 28, 29, 37, 67, 104  
 experimentelle Gesetzgebung 79  
 experimentelle Verwaltung 79  
 Expertifizierung 74  
 Expertise 73, 77, 88  
  
 Fachgesellschaften 78  
 Fachwissenschaften 66, 74, 78, 80, 99,  
   101 (Fn. 547)  
 Fallstudie 3, 100  
 Federation of European Laboratory  
   Animal Science Associations  
   (FELASA) 63 (Fn. 352), 78  
 Fische 2, 24  
 Folgenabwägung 62  
 Forschungseinrichtung 79  
 Forschungsfreiheit *siehe* Wissenschafts-  
   freiheit  
 Forschungsgemeinschaft 91  
 Forschungsrecht 99–100  
 Freiheitsvertrauen 73  
 Fruchtfliege *siehe* Drosophila  
  
 Gallus gallus 15  
 Gedächtnis 12, 24, 31 (Fn. 183), 41, 44,  
   49, 52 (Fn. 300), 85, 101  
 Gehirn 23, 29, 30, 31, 37, 41,  
   43 (Fn. 251), 50, 52, 53, 54, 84  
 Gehirnnareale 32, 43 (Fn. 255)  
 Gehirnforschung III, 3, 79  
 Geisteswissenschaften 58–61  
 Gemeiner Kalmar *siehe* Loligo vulgaris  
 Gemeiner Krake *siehe* Octopus  
   vulgaris  
 Gemeiner Tintenfisch *siehe* Sepia  
   offinialis  
 Genehmigungsbehörde 65, 70, 71, 72,  
   73, 74, 79, 82  
 Genehmigungsrecht 63–65  
 Genehmigungsvoraussetzung 63, 71  
 Generationenfolge 8–9  
 genetische Variabilität 9, 89  
 Genexpression 8, 12, 14, 30,  
   32 (Fn. 192)  
 Genotyp 15  
 Genregulation 10, 22  
 Gesellschaft 70, 76, 78, 86, 90,  
   101 (Fn. 547), 102 (Fn. 554)  
 Gesetzgebung 43, 46, 58, 60–61, 79  
 Grundlagenforschung 1, 2, 4, 28, 30,  
   32, 33, 34, 36, 37, 38, 64, 70, 75, 82,  
   83, 84, 85, 101, 102, 104  
 Grundrechte-Charta 50, 61, 69, 71, 72,  
   76, 80, 81  
  
 Habitat 18 (Fn. 85), 92  
 Haltungsbedingungen 46, 64, 92–94  
 Hawaiian bobtail squid *siehe*  
   Euprymna scolopes  
 Hodgkin, Alan 27–28  
 Homologie 15–16, 31, 54, 83  
 Hormon 42  
 Hühnererei 9  
 Huxley, Andrew 27–28  
 Hydrostatik 34  
  
 Immunsystem 10, 30  
 Intelligenz 24, 30, 32, 49, 54  
 Intuition 1  
 Invertebraten 2, 11–12, 23,  
   39 (Fn. 226), 45, 54, 56 (Fn. 322)  
 Ionenfluss 28  
 Ionenkanäle 12, 31–32, 84

- Kalifornischer Seehase *siehe* *Aplysia californica*  
 Kalifornischer Zweifleck-Oktopus *siehe* *Octopus bimaculoides*  
 Kalium 31  
 Kalkgehäuse 7 (Fn. 29)  
 Kalmar 16 (Fn. 80), 20, 21, 22, 43, 105  
 Kambrische Explosion 13  
 Kandel, Eric 12  
 Klimawandel 30, 34  
 Klinische Chemie 56  
 Knock-Out-Tiere 36  
 Kognitionspflicht 74  
 Kohärenz 88  
 Kommunikation 34, 41, 56 76  
 Kommunitarismus 90  
 komplexes Nervensystem 10, 21 ff., 41, 91  
 komplexes Verhalten 2, 24, 42, 50  
 Komplexität 2, 6, 7, 10, 16, 26, 27, 30, 31, 31 (Fn. 183), 33, 37, 39, 43–45, 49, 51, 54, 57, 60, 67, 69, 71, 77, 95, 103  
 Komplexitätsreduktion 13, 74  
 Konservierung 6–8, 22, 23, 25, 31  
 Konsistenz 47 (Fn. 282), 88  
 Kontrolle 24, 65, 68  
 Kontrollerlaubnis 63  
 Körper-Geist-Problem 50  
 Kosten-Nutzen-Abwägung 83  
 Krabbe 25, 55  
 Krake 21, 23, 29, 49, 105  
 Krankheit 6, 12, 56 (Fn. 323), 64, 82, 94  
 Kybernetik 28–29  
  
 Laborbedingung 8, 13, 37, 56, 95 (Fn. 518)  
 Laborhaltung 20, 35, 91, 93, 94  
 Labortierkunde 56  
 Langeweile 95  
 Laurent, Gilles III, 3, 24 (Fn. 133), 33 (Fn. 197), 35 (Fn. 212), 37 (Fn. 221), 80 (Fn. 111)  
 Lebendexemplare 36, 46  
 Lebenswissenschaft *siehe* Life Science  
 Leiden 1, 41, 46, 49, 62, 64, 65, 67, 69, 75, 76, 86, 95, 96, 97, 104  
 Leidenschaftlichkeit 42, 44, 47, 58, 62, 65, 66, 67, 70, 76, 91  
 Life Science 4, 5, 27, 33, 60, 74, 83, 86  
  
*Loligo forbesi* 21  
*Loligo pealeii* *siehe* *Doryteuthis pealeii*  
*Loligo vulgaris* 21  
  
 Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) 56, 57 (Fn. 330), 58 (Fn. 335), 97  
 Mantel 21, 35, 44  
 Mather, Jennifer 39 (Fn. 226)  
 Mäuse III, 2, 19, 20, 36, 84 (Fn. 485), 87, 95 (Fn. 518)  
 Max-Planck-Institut für Hirnforschung III, 3, 33, 79  
 Medizin 16, 28, 34, 63, 82, 83, 84 *siehe* Biomedizin  
 Medizinethik 6  
 medizinische Versorgung von Versuchstieren 63  
 Meeresschwämme 11  
 Membranpotential 28  
 Metazoen 6, 14 (Fn. 67), 22, 34 (Fn. 202)  
 Mikro-CT 93  
 Modellierung 2, 4–7, 100  
 Modellorganismus 5–17, 29, 30, 35, 83, 91, 102, 103  
 molecular toolkit 14  
 Molekularbiologie 4, 7, 8 (Fn. 29), 15, 16, 18 (Fn. 85), 32 (Fn. 192), 33, 84  
 Mollusca 1 (Fn. 3), 23, 32, 42 (Fn. 248), 42 (Fn. 251), 58, 91  
 Morphologie 23 (Fn. 119), 25, 55  
 Moschuskrake *siehe* *Eldone moschata*  
 muddling through 88  
 Myelinisierung 28  
 Myelinscheide 28  
  
 Nagellack 25  
 Nagetiere 67  
 Nahrungsmittel 33, 47  
 Natrium 31  
 Naturschutzrecht 1 (Fn. 3), 74  
 Nautiloideen 7 (Fn. 29), 42, 43 (Fn. 251)  
 Nautilus 32 (Fn. 192), 43 (Fn. 251), 94  
 Nematoden 11  
 Nervenendigung 44  
 Nervenfasern 28  
 Nervensystem 2, 10, 21–26, 27, 29, 30, 32, 37, 41, 43, 44, 54, 55, 57 (Fn. 333), 67, 85, 91, 95, 102

- Neurologie 12, 34  
 Neurophysiologie 2, 27–28  
 Neurotransmitter 42  
 Neurowissenschaften 9, 10, 30–33, 50, 84, 92  
 Nobelpreis 4, 12, 28  
 Nordamerikanischer Kalmar *siehe* Doryteuthis pealeii  
 Nordischer Kalmar *siehe* Loligo forbesi  
 Northrup, Emily III, 3, 80 (Fn. 434)  
 Nozizeption 43–46, 55 (Fn. 318), 57, 67  
  
 Octopus bimaculoides 22, 29  
 Octopus vulgaris 23, 29, 33, 73 (Fn. 367)  
 Öffentlichkeit 85, 86 (Fn. 465), 90 (Fn. 491)  
 Ökologie 13, 14, 28 (Fn. 85), 20, 34, 45, 74, 83, 95 (Fn. 518)  
 Ökotoxikologie 34  
 Ommastrephidae 20  
 Ontogenie 15  
 Opioid-Rezeptoren 67  
 Orchideenfach 73, 104  
 Ordnungsrecht 95  
  
 Paläobiologie 7, 59  
 Pathologie 4, 10 (Fn. 42), 37  
 Pazifischer Riesenkrake *siehe* Enteroctopus dofleini  
 Perlboote 105  
 Pflanzen 6  
 phänomenales Bewusstsein *siehe* Qualia  
 Phänotyp 15  
 Pharmaka 12, 57, 58, 64 (Fn. 353), 82  
 Pharmakologie 10, 19, 57, 58, 64, 102 (Fn. 550)  
 Philosophie 50, 54 (Fn. 315)  
 Photorezeptoren 55  
 Phylogenie 1 (Fn. 2), 15, 30, 32, 37, 54, 67  
 Physiologie 9, 18 (Fn. 85), 20, 27–28, 32, 40, 43, 102  
 Pilze 6  
 Plausibilitätskontrolle 68  
 Popularisierung 59  
 Population 9, 26, 89, 90  
 Proteinfunktion 8  
 Psychologie 26  
 Punktperspektive 5, 13, 36  
  
 Qualia 51  
 Qualifikation (Personal) 46  
 Quallen 11  
 Querschnittsklausel Tierschutz 45, 61, 81  
  
 Ratten III, 2, 87  
 räumliches Gedächtnis 24  
 Realbereich 3, 72 (Fn. 298), 99, 100, 102, 105  
 Realbereichsanalyse 3  
 Realbereichs-Referenzgebiet 100  
 Rechtfertigungslast 81–82  
 Rechtsanwender 3  
 Rechtsdogmatik 102  
 Rechtsverstöße 95  
 Reduction 64, 86 ff., 94  
 Referenzfälle 101  
 Referenzgebiet 3, 100  
 Refinement 75, 86 ff., 92 ff., 97, 104  
 Regelungszweck 50  
 Reizverarbeitung 44, 55, 69  
 REM-Schlaf 26  
 Replacement 64, 91–92  
 Repräsentationsbreite 5  
 Reproduktion 8  
 Reproduzierbarkeit 89  
 Reptilien 33, 56 (Fn. 327)  
 Rezeptionsbarrieren 100  
 Rezeptoren 8, 41, 55, 67  
 Rezeptorendichte 41  
 Richtlinie 2010/63/EU 40, 47, 62, 66, 68, 69, 72 (Fn. 398), 77, 80, 82, 86 (Fn. 465), 87, 93  
 Richtlinie 86/609/EWG 40  
 Riesenkalmar *siehe* Architheutis dux  
 Risiko 26, 50, 62  
 Risikobewertung 19, 50  
 Risikowissen 69  
 RNA-Editing 30  
  
 Säugetiere 42 (Fn. 247), 43, 44, 52, 54  
 Saugnäpfe 23  
 Schaltkreise 32, 33, 51  
 Schlafphasen 26  
 Schmerzblockade 67  
 Schmerzempfinden 43, 44, 45, 46, 52, 55, 57 (Fn. 334), 67  
 Schmerzen 1, 41, 47, 49, 56, 62, 65, 66, 69, 75, 86, 95, 96, 97

- Schmerzfähigkeit 47  
 Schutzverantwortung 103  
 Schwann'sche Zelle 28  
 Seeigel 1 (Fn. 3), 11, 14 (Fn. 67)  
 Selektionsdruck 24, 30  
*Sepia officinalis* 21, 25, 29, 33,  
 67 (Fn. 367)  
 Sepien 105  
 Sepiolidae 21  
 Signaltransduktion 8  
 Solidargemeinschaft 90  
 Spekulation 26, 53, 56, 57, 60, 69, 73,  
 104  
 Spekulationsverbot 73, 104  
 Spiegelbild 25  
 Sporozoen 33  
 Staatsziel Tierschutz 61, 63, 69, 81–82,  
 87  
 Standardversuchstechnik 74  
 Ständigen Senatskommission für tier-  
 experimentelle Forschung III  
 Sterberate 91  
 Stress 41, 42, 55, 56, 93, 94  
 Studiendesign 89–91
- taxonomische Distanz 19, 22, 32, 53,  
 59, 67, 82, 91, 103  
 Tetrodotoxin 32  
 Theoriebildung 4, 29, 61  
 Tierärztin/Tierarzt 56 (Fn. 322), 96  
*siehe* Veterinärmedizin  
 Tierethik 26, 60  
 Tierkrankheit 94  
 Tierschutzwissen 78, 87  
 Tierwohl 20, 30, 49, 53, 67, 69–70, 75–76,  
 79, 80, 81, 82, 85, 87, 91, 96, 98, 104  
 Tierwohlausschuss 41  
 Tötung 47, 95–97  
 Tötungsmethode 46, 97  
 Toxikologie 19, 34  
 translationale Erkenntnisse 6, 34, 36, 37  
 Transmittersystem 32  
 Transporter 8
- Überwachungsbehörde 88  
 Umwelt- und Technikrecht 45  
 Umweltschäden 93  
 Unsicherheit 26, 43 ff., 50, 53 (Fn. 310),  
 58, 60, 62, 65, 69–70, 79, 80, 82, 91,  
 97, 98
- Variabilität, genetische 9, 89  
 Verfahrensrationalität 73–75  
 Verfassungsrechtsprechung  
 101 (Fn. 547)  
 Verfeinern *siehe* Refine  
 Verhältnismäßigkeitsprüfung 86–87,  
 96  
 Vermeiden *siehe* Replace  
 vernünftiger Grund 1, 95–96  
 Verringern *siehe* Reduce  
 Versagungsermessens 63  
 Versuchsantrag 72  
 Vertebraten 2, 16, 20, 23, 24, 25, 31,  
 34 (Fn. 202), 40, 48, 52 (Fn. 303), 54,  
 55, 58, 59, 83, 84, 86 (Fn. 466)  
 Verwaltungsbürokratie 74  
 Verwaltungsrecht 3, 99  
 Verwaltungsverfahren 49, 61, 73, 74,  
 76, 77, 78, 85  
 Veterinärmedizin 47, 48, 55, 66, 82, 92,  
 94, 97  
*Vibrio cholerae* 35  
*Vibrio fischeri* 35  
 Vögel 32, 56 (Fn. 327)
- Wahrscheinlichkeit 45, 62  
 Weichkörperrobotik 34  
 Wildfang 18 (Fn. 85), 93  
 Willkür 47 (Fn. 328), 50  
 Wirbellose *siehe* Invertebraten  
 Wirbeltiere *siehe* Vertebraten  
 Wissenschaftsadäquanz 71  
 Wissenschaftsethik 67, 104  
 Wissenschaftsfreiheit 53, 61,  
 65 (Fn. 361), 68–69, 71–73, 80–82,  
 97  
 Wissenschaftsgeschichte 16, 27–29,  
 101, 102 (Fn. 550), 103  
 Wissenschaftssoziologie 74,  
 102 (Fn. 554)  
 Wissensdefizit 45, 65  
 Wissensgenerierung 75, 76 ff., 87  
 Wissensunsicherheit 53 (Fn. 310), 70,  
 80  
 Wohlergehen 45, 64
- Young, John Zachary 28–29
- Zebrafische 2  
 Zehnfußkrebse 47

- Zeitgeschichte 101 (Fn. 547)  
Zelltypen 32  
Zentrales Nervensystem 10, 23, 24, 25,  
26, 30, 32, 54, 55, 57, 67, 75  
Zirrenkrake *siehe* Eledone cirrhosa  
ZNS *siehe* Zentrales Nervensystem  
Zoologie 4, 8, 18, 20, 27, 33, 94  
Zurechnung 53, 60, 62  
Zuständigkeit 71 (Fn. 391), 76f.  
Zwertintenfische 21