

38 Schriften aus der Fakultät Humanwissenschaften
der Otto Friedrich-Universität Bamberg

Schriften aus der Fakultät Humanwissenschaften
der Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Band 38



University
of Bamberg
Press

2022

Theorie und Messung in der Psychologie

Eine evolutionäre Perspektive

Matthias Borgstede



Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist als freie Onlineversion über das Forschungsinformationssystem (FIS; fis.uni-bamberg.de) der Universität Bamberg erreichbar. Das Werk – ausgenommen Cover, Zitate und Abbildungen – steht unter der CC-Lizenz CC-BY.



Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Herstellung und Druck: docupoint Magdeburg
Umschlaggestaltung: University of Bamberg Press
Umschlaggrafik: Charles Darwins erste Skizze eines evolutionären Stammbaums, aus Darwins „First Notebook on Transmutation of Species“ (1837),
Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darwin_Tree_1837.png
(nachbearbeitet durch M. Borgstede)

© University of Bamberg Press, Bamberg 2022
<https://www.uni-bamberg.de/ubp>

ISSN: 1866-8674 (Print) eISSN: 2750-8498 (Online)
ISBN: 978-3-86309-892-6 (Print) eISBN: 978-3-86309-893-3 (Online)

URN: [urn:nbn:de:bvb:473-irb-56781](http://nbn:de:bvb:473-irb-56781)
DOI: <https://doi.org/10.20378/irb-56781>

Danksagung

Diese Habilitationsschrift wäre ohne die von verschiedenen Seiten erfahrene Unterstützung nicht möglich gewesen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die direkt oder indirekt zum Gelingen meines Habilitationsvorhabens beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt den Mitgliedern meines Fachmentorats, welche mich in den letzten Jahren durch inhaltliche, formale, strategische und persönliche Beratung hilfreich und freundlich unterstützt haben. Ich danke dem Vorsitzenden des Fachmentorats, Prof. Dr. Claus Carstensen, für die Organisation und Koordination des Mentorats sowie für die hilfreichen Anregungen und kritischen Kommentare zu früheren Versionen der Habilitationsschrift.

Prof. Dr. Annette Scheunpflug danke ich vor allem für ihren strategischen Blick und die durch sie angeregten Perspektivwechsel in Hinblick auf die inhaltliche Ausgestaltung der Habilitation sowie für die Bereitstellung von zeitlichen, fachlichen und personellen Ressourcen für die Anfertigung dieser Habilitationsschrift und der zugehörigen Fachartikel. Ohne diese Unterstützung wäre es deutlich schwerer gewesen, meine Forschungsideen umzusetzen. Ebenso bedanke ich mich für die vielen ermutigenden Gespräche und die dadurch vermittelte emotionale Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Frank Eggert, der meinen wissenschaftlichen Werdegang von Anfang an stark geprägt hat. Viele der in dieser Habilitation verarbeiteten Ideen und Gedanken wurden durch ihn angestoßen oder haben sich im wechselseitigen Gespräch entwickelt. Darüber hinaus bedanke ich mich für die kontinuierlichen inhaltlichen Anregungen im Rahmen der Planung und Anfertigung der Originalarbeiten, die produktive Zusammenarbeit im Rahmen der gemeinsamen

Publikationstätigkeiten sowie die erfahrene persönliche Unterstützung bei der Realisierung meiner Forschungsvorhaben.

Darüber hinaus danke ich dem Institut für Pädagogik, dem Institut für Psychologie und der Fakultät für Humanwissenschaften der Otto-Friedrich-Universität Bamberg für die guten strukturellen Bedingungen, welche die Anfertigung meiner Habilitation ermöglicht haben.

Ferner danke ich dem Lehrstuhl für Allgemeine Pädagogik der Otto-Friedrich-Universität Bamberg für die angenehme Arbeitsatmosphäre sowie den persönlichen und fachlichen Austausch. Im Besonderen danke ich Dr. Marcel Scholz für die produktive und angenehme Zusammenarbeit in Forschung und Lehre. Mein Dank gilt auch den vielen am Lehrstuhl beschäftigten Hilfskräften für die kompetente Unterstützung, sowie Anja Klein für die angenehme Zusammenarbeit.

Auch möchte ich mich für die vielen anregenden Gespräche mit Kolleg*innen anderer Lehrstühle und Fachrichtungen bedanken, insbesondere bei Prof. Dr. Claus-Christian Carbon, Prof. Dr. Maximilian Pfost, Prof. Dr. Jorge Groß, Prof. Dr. Jürgen Paul, Dr. Yelva Larsen, Dr. Johannes Leder, Dr. Lukas Röseler, Dr. Leonie Kaczmarek, sowie den Teilnehmenden des Philosophy of Behavior Analysis Journal Club.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Kindern bedanken, die mich durch ihre ungebremste Neugier und Begeisterungsfähigkeit immer wieder motiviert haben, weiter zu machen, und durch ihre vielen Fragen dabei geholfen haben, meine Ideen verständlich auszudrücken.

Bamberg, im Juli 2022,

Matthias Borgstede

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	9
2	Grundlagen.....	13
2.1	Wissenschaftliche Theorien als semantische Strukturen	13
2.2	Formale Modellierung als Methode der Theoriebildung	24
2.3	Selektion als allgemeines Prinzip des Verhaltens	30
3	Darstellung des Habilitationskorpus.....	37
3.1	Systematik des Korpus	37
3.2	Grundlagen psychologischer Messung	39
3.2.1	Konzeptuelle Probleme der Psychometrie	42
3.2.2	Alternative Modelle psychologischer Messung	48
3.3	Evolutionäre Modelle adaptiven Verhaltens.....	55
3.3.1	Natürliche Selektion	58
3.3.2	Verhaltensselektion	66
4	Schlussfolgerungen.....	81
5	Literaturverzeichnis.....	85
6	Anhang: Liste der Originalarbeiten.....	101

1 Einleitung

Diese Habilitationsschrift soll einen Beitrag zu einer allgemeinen Theorie des Verhaltens aus evolutionärer Perspektive und den damit verbundenen Anforderungen an die Formalisierung von Theorien und die Begründung von Messprozeduren leisten. Dies beinhaltet eine Klärung der zu verwendenden theoretischen Begriffe und deren Relationen zueinander. Der in dieser Habilitationsschrift vorgestellte evolutionstheoretische Ansatz soll die notwendigen Bedingungen für eine derartige formale Begriffsbildung schaffen.

Im Zentrum der vorgestellten Arbeiten steht die Formalisierung allgemeiner theoretischer Verhaltensprinzipien im Rahmen eines evolutionären Selektionsmodells, welches als konzeptueller Rahmen für eine allgemeine Verhaltenstheorie und darauf aufbauende Messprozeduren dienen soll. Die Arbeiten nähern sich dieser Thematik auf drei verschiedenen Ebenen. Auf wissenschaftstheoretischer Ebene geht es um die epistemologischen und ontologischen Grundlagen psychologischer Theoriebildung, welche im Rahmen des metatheoretischen Strukturalismus reflektiert werden (Abschnitt 2.1). Auf methodischer Ebene interessieren konkrete, forschungspraktische Implikationen einer derart fundierten Theoriebildung, etwa in Hinblick auf die Konzeption psychologischer Messinstrumente oder die Interpretation von Fragebogenergebnissen (Abschnitt 2.2). Auf inhaltlicher Ebene geht es schließlich um die Entwicklung einer substantiellen formalen Verhaltenstheorie, die auf dem Prinzip der Selektion von Verhalten durch Konsequenzen beruht (Abschnitt 2.3). Aufbauend auf dieser metatheoretischen Rahmung werden die insgesamt elf Originalarbeiten zusammenfassend vorgestellt und hinsichtlich ihrer jeweiligen Schwerpunktsetzung eingeordnet (Kapitel 3). Im Anschluss werden die Arbeiten im Detail beschrieben und diskutiert.

Dabei werden zwei Forschungsstränge unterschieden, welche in den darauffolgenden Abschnitten vorgestellt werden. Einer befasst sich mit der Formalisierung evolutionstheoretischer Prinzipien im Rahmen einer allgemeinen Verhaltenstheorie, der andere mit den im Rahmen der formalen Theoriebildung zu lösenden methodologischen Problemen der psychologischen Diagnostik. Obwohl der evolutionstheoretische Ansatz letzten Endes als inhaltliche Grundlage für theoretisch bedeutsame Messungen zu verstehen ist, soll zunächst auf die methodologische Problematik eingegangen werden. Dieses Vorgehen erleichtert die Einordnung der einzelnen Arbeiten in den in Kapitel 2 zu entwickelnden metatheoretischen Rahmen.

Der methodologische Strang dieser Habilitationsschrift befasst sich mit der Rolle substantieller formaler Theorie im Rahmen psychologischer Messung (Abschnitt 3.2). Dabei wird sowohl auf grundlegende konzeptuelle Probleme im Kontext der Psychometrie, als auch auf mögliche alternative Herangehensweisen an die Umsetzung psychologischer Messung eingegangen. Auf konzeptueller Ebene wird die Frage nach der Semantik psychologischer Konstrukte gestellt und in Hinblick auf gängige psychometrische Praktiken untersucht. Ein Kernthema ist hierbei die Unterscheidung zwischen dem empirischen und dem analytischen Gehalt psychologischer Konstrukte, welche weitreichende Implikationen für die Konstruktion und Interpretation psychologischer Tests nach sich zieht (Abschnitt 3.2.1). Ausgehend von den identifizierten Problemen im Kontext der Psychometrie werden schließlich alternative Herangehensweisen an das Thema der Messung in der Psychologie entwickelt (Abschnitt 3.2.2). Diese bauen auf einer semantischen Konzeption psychologischer Konstrukte auf, die im Lichte der zu Grunde gelegten strukturalistischen Theoriekonzeption formal expliziert wird.

Der inhaltliche Strang widmet sich der Frage nach allgemeinen Gesetzmäßigkeiten adaptiven Verhaltens (Abschnitt 3.3). Dabei werden sowohl Verhaltensanpassungen auf Populationsebene, als auch Verhaltensanpassungen auf Individuenebene betrachtet. Auf Populationsebene zeigt sich adaptives Verhalten in Form evolutionärer Anpassungen an sich ändernde Umweltbedingungen (Abschnitt 3.3.1). Die verwendeten Methoden zur Modellierung evolutionärer Veränderungen stammen aus dem Bereich der adaptiven Dynamik und der Verhaltensökologie. Eine zentrale Rolle spielen hierbei Differentialgleichungssysteme, sowie Matrix- und Integralrechnung. Auf Individuenebene werden diese evolutionären Prozesse durch adaptive Mechanismen ergänzt, die kurzfristige Verhaltensanpassungen innerhalb der Lebensspanne eines Individuums ermöglichen. Derartige Mechanismen werden gemeinhin als „Lernen“ bezeichnet. Die hier vorgestellten Arbeiten widmen sich der Thematik des individuellen Lernens im Rahmen eines Integrierten Selektionsmodells für Verhalten (Abschnitt 3.3.2). Verhaltensanpassungen werden demnach als das Resultat paralleler Selektionsprozesse auf verschiedenen Ebenen und Zeitskalen verstanden. Zu diesem Zweck sollen allgemeine Gesetzmäßigkeiten adaptiven Verhaltens im Rahmen eines evolutionären Modells formal erfasst werden. Den formalen Überbau für die Modellierung individuellen Lernens als Selektionsprozess stellt die so genannte Price-Gleichung dar (Price, 1970), eine abstrakte mathematische Beschreibung von Selektionsprozessen, die auf dem Prinzip der Kovarianzzerlegung basiert. Die Arbeit endet mit einem abschließenden Resümee (Kapitel 4).

2 Grundlagen

2.1 Wissenschaftliche Theorien als semantische Strukturen

Die im Rahmen dieser Habilitationsschrift vorgestellten Arbeiten bauen auf einem Theorieverständnis auf, welches sich sowohl in den etablierten Naturwissenschaften, als auch in den Sozialwissenschaften, insbesondere der Psychologie, bewährt hat – der semantischen Theoriekonzeption.

Die semantische Theoriekonzeption wurde in den 1970ern und 1980ern als Gegenentwurf zum damals vorherrschenden logischen Positivismus entwickelt (Giere, 1988; Suppe, 1989; Suppes, 1970). Im logischen Positivismus wurden Theorien als Aussagensysteme verstanden, welche idealerweise in einer formalen Sprache (vorzugsweise unter Verwendung formaler Logik und mathematischer Systeme) formuliert werden. Diese „Theoriesprache“ sollte verwendet werden, um eigens konstruierte theoretische Begriffe in Form eines Aussagensystems (den so genannten Axiomen) miteinander zu relationieren. Zusätzlich zu diesen Axiomen wurden so genannte Korrespondenzregeln gefordert, welche die theoretischen Begriffe mittels analytischer Sätze in Beobachtungsbegriffe (welche direkt erfahrbare Tatsachen bezeichnen) übersetzen. Die Korrespondenzregeln sollten sicherstellen, dass Theorien empirisch angebunden und dadurch prüfbar werden. Es handelt sich um operationale Definitionen der theoretischen Begriffe, also um Handlungsanweisungen, wie die theoretischen Konzepte mit Inhalt gefüllt werden. Nach positivistischer Auffassung ist die Aufgabe der Wissenschaft, Beobachtungen in Theoriesprache zu übersetzen, um dann den Wahrheitswert der theoretischen

Sätze (der Axiome) festzustellen (Carnap, 1974). In diesem Sinne war die postulierte Erkenntnisstrategie die Verifikation theoretischer Sätze.

Der logische Positivismus bringt zahlreiche theoretische Probleme mit sich. Das erste Problem betrifft die Rolle analytischer und synthetischer Sätze im Rahmen empirischer Theorien. Dem logischen Positivismus folgend sind die Korrespondenzregeln analytische Sätze, also Definitionen, und als solche weder wahr noch falsch, sondern reine Konventionen (Bridgman, 1927). Dies wirft die Frage nach der Bedeutung theoretischer Begriffe auf. Wenn theoretische Begriffe vollständig durch Korrespondenzregeln definiert werden, liefert die Operationalisierung eines theoretischen Begriffs seine eigentliche Bedeutung. Begriffe werden demnach ausschließlich operational definiert und haben keinerlei Bedeutung, die über die konkrete Operationalisierung hinausgeht. Ein theoretischer Begriff wie „Masse“ wäre somit nichts weiter als das Ergebnis einer entsprechenden Messoperation zur Feststellung der Masse eines Objekts, etwa durch eine Balkenwaage. Jede darüber hinaus gehende Bedeutung, die man mit dem Begriff „Masse“ assoziiert, wäre demnach nicht Teil der Theorie und streng genommen eine unwissenschaftliche Überdehnung des Begriffs. Ebenso würde es wenig Sinn ergeben, sich „Masse“ als eine tatsächliche Eigenschaft von Objekten vorzustellen, denn ohne die durch die Korrespondenzregel festgelegte Operation hätte kein Objekt eine Masse. Darüber hinaus würden verschiedene Operationalisierungen eines theoretischen Begriffs unterschiedliche Bedeutungen generieren. Die „Masse“, die mittels einer Balkenwaage festgestellt wird, wäre somit nicht dasselbe wie die „Masse“, die mittels einer Federwaage festgestellt wird. Da es ferner kein theoretisches Kriterium für die Angemessenheit einer Operationalisierung gibt (es handelt sich ja um bloße Konventionen), ist

es unmöglich festzustellen, welche der vielen möglichen Bedeutungen eines theoretischen Begriffs „die Richtige“ ist.

Das zweite zu erwähnende Problem betrifft den Anspruch, wissenschaftliche Theorien in einer formalen Sprache zu axiomatisieren. Es hat sich herausgestellt, dass die axiomatische Methode sogar für die meistentwickelten Theorien extrem schwer umzusetzen ist. Die Übertragung in formale Logik ist nicht nur mühsam, sie erschwert auch das Verständnis der theoretischen Sätze. Darüber hinaus gibt es nicht selten mehrere, logisch äquivalente Formulierungen derselben Theorie. Im Bereich der klassischen Mechanik zum Beispiel kommen die formalen Systeme von Newton, Hamilton und Lagrange stets zu exakt denselben Vorhersagen. Der syntaktischen Theoriekonzeption folgend, müsste man streng genommen von verschiedenen Theorien sprechen. Tatsächlich herrscht aber Konsens darüber, dass es sich bei allen drei genannten Formalismen um dieselbe Theorie handelt. Die unterschiedlichen Formalisierungen werden hingegen als austauschbar und nicht essentiell betrachtet (Balzer et al., 1987). Schließlich widerspricht die axiomatische Methode in vielen Fällen dem tatsächlichen Vorgehen in den Naturwissenschaften. Wissenschaftliche Theorien werden in den seltensten Fällen in Form von Axiomsystemen vorgestellt, sondern als mehr oder weniger systematische Sammlung mathematischer Prinzipien und Techniken. Die meisten Axiomatisierungen naturwissenschaftlicher Theorien sind tatsächlich wissenschaftstheoretische Rekonstruktionen im Nachhinein (z.B. H. A. Simon, 1947).

Ein weiteres Problem des logischen Positivismus beruht auf der Idee, dass wissenschaftliche Theorien durch empirische Untersuchungen verifiziert werden sollen. Tatsächlich ist eine wirkliche Verifikation in den

meisten Fällen nicht nur praktisch schwer umzusetzen (aufgrund fehlerhafter Messungen und verrauschter Ergebnisse), sondern häufig auch logisch unmöglich. Dieses Problem ergibt sich, sobald eine Theorie All-Sätze enthält, die universelle Gültigkeit beanspruchen. Ein Beispiel für einen universellen All-Satz ist Newtons Gravitationsgesetz: „Für alle physikalischen Objekte gilt: Die Gravitationskraft, die zwischen zwei Objekten wirkt, ist proportional zum Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat der Distanz zwischen den Objekten“. Da sich der Satz auf alle physikalischen Objekte bezieht, die je existiert haben und existieren werden, ist es unmöglich, durch empirische Untersuchungen die Gültigkeit des Satzes zu verifizieren. Man kann durch wiederholte Demonstration des beschriebenen Phänomens die Gültigkeit eines derartigen Satzes plausibel machen, nicht aber beweisen.

Diese als Induktionsproblem bekannte Schwierigkeit veranlasste Popper dazu, das Verifikationskriterium durch das Prinzip der Falsifikation zu ersetzen. Statt zu fordern, dass wissenschaftliche Theorien verifiziert werden, schlug Popper vor, sie systematischen Falsifikationsversuchen zu unterziehen, in der Hoffnung, dadurch die Menge der möglichen Theorien sukzessive einzugrenzen (Popper, 1935). Das darauf aufbauende wissenschaftstheoretische Programm, der kritische Rationalismus, stieß auf breite Akzeptanz. Poppers Position wird auch in der Psychologie gerne herangezogen, wenn es um die mustergültige Vorgehensweise der empirischen Wissenschaft geht (z.B. Döring & Bortz, 2016). Betrachtet man allerdings die tatsächlichen Forschungspraktiken, zeigt sich ein ganz anderes Bild. In kaum einer Studie wird die Falsifikation einer Theorie als Ziel verfolgt. Im Gegenteil, empirische Untersuchungen, deren Resultate im Widerspruch zu einer Theorie stehen, werden oft eher als Misserfolg denn als Erfolg betrachtet und entsprechend eingeordnet. Ein extremer Fall dieses Vorgehens ist das Zurückhalten von Negativbefunden durch

Forschende selbst oder die entsprechenden Publikationsorgane, das zum so genannten Publication Bias führen kann. Publication Bias äußert sich darin, dass positive Befunde mit größerer Wahrscheinlichkeit veröffentlicht werden als negative Befunde, was langfristig dazu führt, dass Effektstärken überschätzt werden und zahlreiche psychologische Befunde nicht replizierbar sind (Open Science Collaboration, 2015). Somit lässt sich festhalten, dass das Prinzip der Falsifikation zumindest, was die tatsächlichen Forschungspraktiken angeht, eine untergeordnete Rolle spielen dürfte. Es bleibt also die Frage, wie nach syntaktischer Auffassung mit misslungenen Verifikationsversuchen umgegangen werden soll. Der logische Positivismus bietet hierauf keine befriedigende Antwort, da er ein idealisiertes Bild von Wissenschaft zeichnet, welches in der Realität so nicht vorkommt.

Das letzte zu erwähnende Problem schließlich besteht darin, dass der Theoriebegriff im logischen Positivismus statisch ist. Eine Theorie, verstanden als Aussagensystem, ist als solches unveränderlich. Ändert man die Axiome, ändert sich die Theorie als Ganzes. Auch diese Auffassung entspricht nicht dem tatsächlichen Umgang mit Theorien, der sich in der Geschichte der Wissenschaft beobachten lässt. Theorien sind keine statischen Gebilde, die – einmal in Stein gemeißelt – unveränderlich bestehen bleiben, oder eben als Ganzes ersetzt werden. Vielmehr handelt es sich um dynamische Strukturen, die durch den Abgleich mit der Wirklichkeit fortlaufend verändert werden. Einzelne Aspekte einer Theorie können verändert oder ergänzt werden, ohne dass der Kern der Theorie angetastet wird. Ebenso kann der Geltungsbereich einer Theorie erweitert oder eingeschränkt werden. Die Gesetze der Thermodynamik zum Beispiel haben sich im Laufe der Geschichte von einzelnen, empirisch gewonnenen, funktionalen Zusammenhängen zu allgemeinen Prinzipien entwickelt, welche auf einer statistischen Formulierung der klassischen Mechanik

beruhen (vgl. Nolting, 2004). Weder die klassische Mechanik, noch die Thermodynamik wurden hierdurch grundlegend verändert. Stattdessen wurden die neuen Entdeckungen sukzessive in die bestehenden Theorien eingebaut. Vor diesem Hintergrund wird klar, dass der logische Positivismus der Historizität wissenschaftlicher Theorien nur schwer gerecht werden kann.

Diese Probleme sind der Grund, dass der logische Positivismus als theoretisches Fundament empirischer Wissenschaft vielfach als überholt bezeichnet wurde (Creath, 2021). Nichtsdestotrotz findet man einzelne Aspekte positivistischen Denkens immer wieder in der Art und Weise, wie empirische Wissenschaft betrieben wird. Vor allem in den Sozialwissenschaften scheint sich positivistisches Gedankengut bis heute gehalten zu haben. Zum Teil mag das daran liegen, dass nicht alle wissenschaftlichen Untersuchungen auf einer elaborierten wissenschaftstheoretischen Gesamtstrategie aufbauen. Zum anderen könnte dies aber auch daran liegen, dass zumindest außerhalb des wissenschaftsphilosophischen Diskurses wenig über alternative Herangehensweisen gesprochen wird. Die semantische Theoriekonzeption ist als eben eine solche Alternative zu verstehen. Sie lässt sich am besten in Abgrenzung zur syntaktischen Konzeption, und insbesondere zum logischen Positivismus, verstehen.

Aus logischer Sicht rückt die positivistische Theoriekonzeption die syntaktischen Aspekte von Theorien in den Vordergrund. Eine Theorie wird als Aussagensystem verstanden, idealerweise in Form prädikatenlogischer Sätze (also formalisierte All-Sätze und Existenzsätze). Formal logisch wird die Semantik prädikatenlogischer Sätze durch mengentheoretische Strukturen (also Mengen und Relationen) spezifiziert: ein All-Satz ist genau dann wahr, wenn er auf alle Elemente einer bestimmten Menge zutrifft; ein Existenz-Satz ist genau dann wahr, wenn er auf

mindestens ein Element einer bestimmten Menge zutrifft. Im Positivismus werden diese mengentheoretischen Strukturen identifiziert, indem die Theorie mittels Korrespondenzregeln auf empirische relationale Strukturen angewandt wird. Die Semantik ergibt sich somit aus der Kombination von Axiomen und Korrespondenzregeln.

In der semantischen Theoriekonzeption hingegen werden die syntaktischen Aspekte einer Theorie (also die sprachliche Ausformulierung) als beliebig betrachtet. Die Wahl des Axiomensystems und der Sprache ändern nach dieser Auffassung nichts am Inhalt der Theorie, solange sie dieselben relationalen Strukturen repräsentieren. Es spielt demnach zum Beispiel keine Rolle, ob man den Lagrange-Formalismus oder den Hamilton'schen Formalismus der klassischen Mechanik verwendet – es bleibt dieselbe Theorie. Entscheidend ist im Strukturalismus hingegen die Semantik, also die mengentheoretischen Strukturen, die durch die Theorie beschrieben werden.

Tatsächlich ist die Klasse der beschriebenen Strukturen nach semantischer Auffassung die eigentliche Theorie (Balzer et al., 1987). Aus diesem Grund wird die semantische Theoriekonzeption auch oft als „strukturalistisch“ bezeichnet. Theorien in diesem Sinne sind in aller Regel keine einheitlichen Gebilde, sondern bestehen aus zahlreichen Theorieelementen, welche jeweils einen Aspekt der zu charakterisierenden Struktur beschreiben. Diese Theorieelemente lassen sich oft in einer Teilhierarchie zueinander relationieren, so dass spezifische Gesetzmäßigkeiten als Spezialisierung allgemeinerer Prinzipien verstanden werden können. An der Spitze dieser Hierarchie steht das Kernelement der Theorie, das fundamentale Prinzip, auf dem die gesamte Theorie aufbaut. Im Falle der klassischen Mechanik wäre ein solches fundamentales Prinzip zum Beispiel durch Newtons zweites Bewegungsgesetz gegeben, welches die auf einen

Körper wirkende Kraft als Produkt aus Masse und Beschleunigung beschreibt (Newton, 1687). Spezifische Gesetze wären beispielsweise das Gravitationsgesetz, das Hooke'sche Gesetz oder das Hebelgesetz (vgl. Nolting, 2004). Im Gegensatz zu den Axiomen im logischen Positivismus ist das fundamentale Prinzip nicht als logische Basis für deduktiv gewonnene Gesetzmäßigkeiten zu verstehen. Es stellt vielmehr das konzeptuelle Fundament der Theorie dar. Die theoretischen Konzepte und ihre Relationen zueinander, wie sie im fundamentalen Prinzip spezifiziert werden, setzen den analytischen Rahmen für die Theorie fest. Sie besagen, worum es in der Theorie geht. Im Fall der klassischen Mechanik geht es um Kräfte und die Bewegung von Körpern im Raum. Newtons zweites Gesetz spezifiziert den grundlegenden Zusammenhang zwischen den theoretischen Größen „Masse“, „Beschleunigung“ und „Kraft“. Dadurch legt es die Art und Weise fest, wie diese Begriffe korrekt zu verwenden sind. Insofern es die kontextabhängige Verwendung der theoretischen Begriffe festlegt, determiniert das fundamentale Prinzip deren Bedeutung im Wittgenstein'schen Sinne (Wittgenstein, 2013/1953). Die Theorie stellt demnach ein Sprachspiel dar, dessen Regeln durch das fundamentale Prinzip gegeben sind. Die Bedeutung theoretischer Begriffe ist daher nicht unabhängig von den theoretischen Prinzipien. Sie wird nicht erst durch Korrespondenzregeln in Form von Operationalisierungen generiert, sondern ist durch die Theorie selbst gegeben. Ebenso bezeichnen die fundamentalen Prinzipien keine empirischen Zusammenhänge, sondern sind die eigentlichen Definitionen (Díez & Lorenzano, 2013).

Die übrigen Theorieelemente stellen Spezialisierungen des fundamentalen Prinzips dar. Sie folgen nicht logisch aus den übergeordneten Prinzipien, sondern postulieren ergänzende Gesetzmäßigkeiten, mit deren Hilfe die fundamentalen Prinzipien auf konkrete empirische Szenarien

angewandt werden können. Das Gravitationsgesetz zum Beispiel verknüpft die Konzepte der Kraft und der Masse mit der Distanz zweier Körper. Das Hooke'sche Gesetz verknüpft dasselbe abstrakte Prinzip mit der Ausdehnung von Sprungfedern, und das Hebelgesetz wiederum ergänzt den Zusammenhang zwischen Kraft und Hebellänge. Durch die spezifischen Gesetze wird die Theorie auf verschiedene Szenarien anwendbar. Ohne entsprechende Spezialisierungen wäre das fundamentale Prinzip empirisch leer. In Kombination aber ergeben fundamentale Prinzipien und deren Spezialisierungen ein Theorienetz, welches durch fortlaufenden Abgleich mit der empirischen Wirklichkeit aktualisiert und korrigiert werden kann. Dabei werden fundamentale Prinzipien in der Regel unverändert gelassen. Spezifische Gesetzmäßigkeiten gehören jedoch nicht zum Kern der Theorie. Sie können verändert, weggelassen oder ersetzt werden, ohne dass das grundlegende Vokabular und der analytische Rahmen der Theorie verändert werden müsste. Wenn sich zum Beispiel ein Material nicht proportional zur Krafteinwirkung verformen, wird man durch Anwendung des Hooke'schen Gesetzes zu falschen Ergebnissen hinsichtlich der Kräfte und gegebenenfalls resultierender Beschleunigung kommen. Aber man würde dadurch nicht Newtons zweites Bewegungsgesetz als widerlegt betrachten, sondern den Geltungsbereich des Hooke'schen Gesetzes entsprechend eingrenzen und für die neu entdeckte Materialeigenschaft ein entsprechend verändertes Theorieelement formulieren.

Spezialisierungen eines fundamentalen Prinzips können auch verwendet werden, um empirische Prozeduren zur Messung theoretischer Größen zu konzipieren. Anders als im logischen Positivismus handelt es sich bei der Operationalisierung nicht um die Anwendung analytischer Sätze (operationaler Definitionen), denn die Bedeutung erhalten theoretische Begriffe durch ihre Relationen zu den übrigen theoretischen Begriffen

(Suppe, 1972). Operationalisierungen sind nach dieser Auffassung nur sinnvoll möglich, wenn man eine elaborierte Theorie hat, d.h. wenn die Bedeutung der Begriffe bereits klar ist. Ansonsten wären Operationalisierungen beliebige Setzungen (vgl. Bridgman, 1927).

Wenn man zum Beispiel die Masse eines Objekts bestimmen will, braucht man zunächst eine theoretische Definition des Begriffs, d.h. seine Relationen zu anderen theoretischen Begriffen. In der klassischen Mechanik ist dies gegeben durch Newtons zweites Gesetz: $F = ma$. Um die Masse (m) in diesem Sinne zu operationalisieren, muss man das physikalische System betrachten, in welchem das Objekt eingebunden ist und dann seine Masse berechnen, indem man die Theorie anwendet. Ist das betrachtete System beispielsweise eine Balkenwaage, kann man das Hebelgesetz benutzen, um zu zeigen, dass Newtons zweites Gesetz genau dann ein Kräftegleichgewicht vorhersagt, wenn die Objekte auf beiden Seiten der Waage dieselbe Masse haben. Das Austarieren einer Balkenwaage ist somit eine valide Operationalisierung für die Masse eines Objekts.

Physikalische Systeme können aber auch ganz anders beschaffen sein, zum Beispiel, wenn es um die Masse von Planeten geht. Nichtsdestotrotz gibt es zahlreiche Belege, dass die klassische Mechanik auch auf die Bewegung von Planeten anwendbar ist. Folglich kann man dasselbe Gesetz, also $F = ma$, verwenden, um mittels entsprechender Spezialisierungen (in diesem Fall das Gravitationsgesetzes) die Masse eines Planeten aus seiner Bewegung relativ zu anderen Planeten zu berechnen. Es handelt sich hierbei um eine völlig andere Operation, aber da dieselbe Theorie zur Bestimmung der Masse zu Grunde gelegt wird, handelt es sich auch um

dieselbe theoretische Größe. Damit ist das Problem der Bedeutung theoretischer Begriffe und das daraus resultierende Problem der Identifikation adäquater Operationalisierungen gelöst.

Die hierarchische Strukturierung von Theorien als Netze aus einzelnen Theorieelementen ermöglicht ferner eine dynamische Konzeptualisierung von Theorien und von Theoriebildung. Statt eine Theorie als statisches Gebilde aus Axiomen zu betrachten, wird ein flexibles Baukastensystem vorgeschlagen, bei welchem einzelne Elemente verändert und angepasst werden können. Darüber hinaus eröffnet die semantische Perspektive auch die sukzessive Anpassung des Geltungsbereichs einer Theorie. Statt auf universelle All-Sätze zu bauen (deren Verifikation ohnehin unmöglich ist), beschreiben Theorieelemente bestimmte mengentheoretische Strukturen. Das fundamentale Prinzip beschreibt die allgemeinste Klasse von Strukturen, die durch die Theorie erfasst wird. Jede Spezialisierung durch zusätzliche Theorieelemente grenzt diese Klasse von Strukturen weiter ein. Dadurch steigt der empirische Gehalt der Theorie. Gleichzeitig kann es passieren, dass bestimmte ursprünglich intendierte Anwendungen durch derartige Spezialisierungen aus dem Geltungsbereich der Theorie herausfallen. Zum Beispiel hat sich herausgestellt, dass physikalische Systeme mit sehr starken Gravitationsfeldern sich nicht adäquat durch die klassische Mechanik beschreiben lassen. Ebenso wenig lässt sich die klassische Mechanik auf subatomarer Ebene anwenden. Derartige Einschränkungen des Geltungsbereichs gehören nach semantischer Auffassung ebenso zum Prozess der Theoriebildung wie die Anpassungen spezialisierter Theorieelemente. Theorien sind somit historische Gebilde, welche sich im Laufe der Zeit verändern und

durch die wechselseitige Koordination von empirischen Beobachtungen und Theorieelementen geprägt sind (Balzer et al., 1987).

Versteht man wissenschaftliche Theorien und Theoriebildung in diesem Sinne, ergeben sich weitreichende Konsequenzen für die Psychologie. Die erste betrifft die Problematik psychologischer Operationalisierungen und Messungen. Die zweite betrifft die Konzeption eines Theorienetzes, das als analytischer Rahmen für die Psychologie dienen kann. Beide Probleme sind eng miteinander verwoben, da die Operationalisierung theoretischer Begriffe nach semantischer Auffassung nicht unabhängig von einer zu Grunde gelegten Theorie erfolgen kann. Zugleich ist die Koordination zwischen Theorie und Empirie auf konkrete Prozeduren zur Prüfung bestimmter Theorieelemente angewiesen. Beide Ebenen hängen wiederum mit einem weiteren, bisher nur implizit behandelten Punkt zusammen – der Rolle formaler Modellierung in der Theoriebildung.

2.2 Formale Modellierung als Methode der Theoriebildung

Im vorangehenden Abschnitt wurde dargelegt, warum die axiomatische Methode im Sinne des logischen Positivismus als wenig hilfreich für die Theoriebildung zu beurteilen ist. Es wäre jedoch falsch zu glauben, Formalisierung spiele keine oder eine untergeordnete Rolle in der semantischen Theoriekonzeption. Tatsächlich ist für die exakte Beschreibung semantischer Strukturen eine formale und mitunter mathematische Sprache unerlässlich. Der einzige Unterschied zur syntaktischen Herangehensweise ist, dass die Art der Formulierung nebensächlich ist, solange die zu erfassende Struktur korrekt und präzise erfasst wird. Beide Ansätze stimmen somit darin überein, dass die Formalisierung wissenschaftlicher Theorien erstrebenswert und mitunter notwendig ist, denn nur, was

klar und eindeutig beschrieben ist, lässt sich hinsichtlich seines Wahrheitsgehalts beurteilen. Oder, etwas vereinfacht gesagt, nur klar gestellte Fragen lassen sich auch klar beantworten. In diesem Sinne ist die Formalisierung wissenschaftlicher Theorien eine Stärke, da sie eine ansonsten schwer zu erreichende Präzision in der Beschreibung komplexer Strukturen ermöglicht. Nichtsdestotrotz ist nicht jede Art der Formalisierung hilfreich. Manche formale Ansätze können in die Irre führen, zum Beispiel, indem sie vorgeben, Probleme zu lösen, die sie nicht lösen können, oder indem implizite oder als selbstverständlich angesehene Annahmen im Rahmen eines formalen Modells fixiert und schließlich durch soziale Praktiken institutionalisiert werden. Im Folgenden sollen diese Fallstricke der Formalisierung vor dem Hintergrund einer wissenschaftshistorischen Perspektive analysiert und in Hinblick auf ihre Bedeutsamkeit für die psychologische Theoriebildung untersucht werden.

Formale Ansätze haben eine lange Tradition in der empirischen Wissenschaft. Die Idee, dass sich die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Welt funktioniert in einer mathematischen Sprache erfassen lassen, findet sich bereits bei den Pythagoreern (van der Waerden, 1974). In den Augen der Pythagoreer lag die Mathematik allem Sein zu Grunde. Diese fast schon mystische Vorstellung von einer mathematisch geordneten Welt prägte die Entwicklung der Wissenschaft nachhaltig. So gelang es Ptolemäus, die Bewegung der damals bekannten Himmelskörper (bestehend aus der Sonne, dem Mond und den fünf Planeten, die mit bloßem Auge erkennbar sind) mit einer erstaunlichen Präzision vorherzusagen, indem er ein mathematisches Modell der Planetenbewegungen konstruierte (Toomer, 1998). Ptolemäus' Modell beschrieb die Bewegung der Himmelskörper durch Kreisbahnen (da der Kreis als „vollkommene“ Form angesehen wurde). Alle beobachteten Abweichungen von den postulierten Kreisbahnen wurden wiederum durch Kreisbahnen erklärt, deren Mittelpunkte

sich auf der größeren Kreisbahn bewegen – so genannte Epizykel. Das Epizykelmodell spiegelt nicht nur die Bedeutung formaler Modelle für die empirische Wissenschaft wider, sondern illustriert auch, wie bestimmte metaphysische Vorannahmen (z.B. „alle Himmelskörper bewegen sich auf Kreisbahnen“ und „die Erde ist der Mittelpunkt des Universums“) sich in formalen Modellen der Wirklichkeit niederschlagen und über lange Zeiträume erhalten können.

Heute wissen wir, dass das Epizykelmodell falsch ist – die Bewegungsbahnen der Planeten sind Ellipsen, nicht Kreise, und sie bewegen sich nicht um die Erde, sondern um die Sonne. Die Einsicht, dass die Erde nicht der Mittelpunkt des Universums und die Bewegungen der Himmelskörper nicht der „vollkommenen“ Kreisbahn folgten, verbreitete sich erst Jahrhunderte nachdem Ptolemäus sein Modell der Himmelskörper konzipiert hatte. Die Gründe hierfür sind vielfältig (vgl. Kuhn, 1971 für eine ausführliche historische Rekonstruktion der „Kopernikanischen Revolution“). Zum einen konkurrierten neue Ideen mit althergebrachten Überzeugungen über das Wesen der Welt, welche überaus schwer zu überwinden waren. Zum anderen erfüllte das Epizykelmodell seinen Zweck sehr gut – die exakte Vorhersage zukünftiger Planetenbewegungen. Diese wurden benötigt, um astrologische Analysen wie Horoskope oder die Vorhersage wichtiger Ereignisse „wissenschaftlich“ zu untermauern. Die soziale Praktik der Astrologie war nicht nur eine wesentliche Motivation für die mathematische Beschreibung der Bewegung der Himmelskörper, sie wurde langfristig auch zur praktischen Rechtfertigung für das Festhalten am Epizykelmodell. Wie hartnäckig das Festhalten an althergebrachten Überzeugungen im Kontext der Theoriebildung sein kann, illustriert das Beispiel des Tychonischen Planetenmodells, welches von Tycho Brahe vorgeschlagen wurde (Kuhn, 1971). Mit der Erfindung des Spiegelteleskops häuften sich im 17. Jahrhundert die Belege, dass das

Ptolemäische Weltbild nicht stimmen kann (zum Beispiel sind die Phasen der Venus, die durch ihre relative Position zu Sonne und Erde entstehen, nicht mit dem Ptolemäischen Weltbild vereinbar). Brahe löste diese Probleme, indem er postulierte, die Sonne drehe sich um die Erde, und alle anderen Planeten drehten sich um die Sonne. Mathematisch ist dieses Modell identisch mit dem Kopernikanischen System – allerdings rettete Brahe das Postulat, die Erde sei der Mittelpunkt des Universums. Ein weiteres Beispiel für das Festhalten an formalisierten Vorannahmen findet sich auch in der biologischen Taxonomie, in Form des „natürlichen Systems der Arten“. Bis heute wird die Spezies Mensch unter einem eigenständigen Gattungsnamen „Homo“ geführt, obwohl die biologische Begründung eines eigenen Gattungsbegriffs seit Beginn der biologischen Taxonomie von Anfang an umstritten war. Tatsächlich bestätigen genetische Analysen, dass eine eigene Gattung für den modernen Menschen biologisch kaum zu begründen ist (Wildman et al., 2003).

Dieser kurze Blick in die Geschichte der Wissenschaft illustriert, wie die Formalisierung theoretischer Vorstellungen zugleich Segen und Fluch sein kann. Auf der einen Seite liefert eine mathematische Beschreibung einen ansonsten unmöglichen Grad an Präzision und Eindeutigkeit. Auf der anderen Seite schlagen sich immer gewisse Vorannahmen in mathematischen Modellen nieder, die nur noch schwer korrigierbar sind, sobald sich bestimmte sozial legitimierte Anwendungen der entsprechenden Modelle etabliert haben.

Auch die Psychologie blickt auf eine lange Tradition mathematischer Modellierung zurück. Allerdings verlief die Mathematisierung in der Psychologie anders als in den klassischen Naturwissenschaften. Statt formaler Theorien und deren Anwendung auf empirische Szenarien, beruht die Mathematisierung der Psychologie in erster Linie auf der Entwicklung

und Anwendung statistischer Methoden (Eronen & Romeijn, 2020). Tatsächlich wurden etliche statistische Konzepte sogar in der Psychologie entwickelt, wie zum Beispiel der Korrelationskoeffizient durch Francis Galton (Galton, 1889), oder die Faktorenanalyse durch Charles Spearman (Spearman, 1904). Die Einführung statistischer Methoden ermöglichte die quantitativ exakte Beschreibung von Verhalten, indem von einzelnen Individuen abstrahiert, und stattdessen Zusammenhänge auf Gruppenebene in den Fokus genommen wurden. Auch wenn das Verhalten einzelner Individuen in konkreten Situationen nach wie vor weitgehend unvorhersagbar blieb, ermöglichte die Betrachtung psychologischer Phänomene auf Gruppenebene die mathematische Beschreibung gewisser Regelmäßigkeiten. Die Anwendung quantitativer, mathematischer Methoden wurde und wird oftmals als Beleg für die Verwissenschaftlichung der Psychologie herangezogen (Danziger, 2009). Die Entwicklung statistischer Methoden hat zweifelsohne zur Anerkennung der Psychologie als empirische Wissenschaft beigetragen. Nichtsdestotrotz bringt die routinemäßige Anwendung statistischer Methoden einige gravierende forschungspraktische Probleme mit sich. Allzu leicht wird im Rahmen einzelner Untersuchungen statistische Signifikanz zum einzigen Kriterium wissenschaftlichen Erfolgs. Diese kochbuchartige Anwendung statistischer Hypothesentests wurde vielfach kritisiert, da sie zu Fehlinterpretationen verleitet und die Veröffentlichung von Falsch-Positiv-Befunden begünstigt (Gigerenzer, 2004).

Viel gravierender aber als die genannten Probleme ist jedoch, dass statistische Modelle keine substanziellen formalen Theorien sind, sondern Datenmodelle. Datenmodelle beschreiben einen Datensatz, indem sie die beobachteten Variablen transformieren und zum Teil idealisieren. Sie

können zwar zur empirischen Prüfung bestehender Hypothesen verwendet werden,¹ liefern jedoch keine Hypothesen über die die Datenstruktur produzierenden Mechanismen (Eronen & Bringmann, 2021). Ein Regressionsmodell etwa mag einen Teil der Varianz einer Variablen statistisch auf die Varianz in einer anderen Variablen zurückführen. Das kann zu näherungsweise richtigen und unter Umständen nützlichen Vorhersagen führen. Aber die Zerlegung von Varianzanteilen sagt nichts über die generativen Prozesse aus, welche die Daten hervorgebracht haben. Ebenso kann ein Rasch-skaliertes Test dazu verwendet werden, um die Lösungswahrscheinlichkeit einer Person in einem bestimmten Testitem vorherzusagen. Aber selbst, wenn diese Vorhersage korrekt ist, sagt sie nichts über die Prozesse aus, welche die Itemantworten generieren.

In dieser Hinsicht ist die Art der Mathematisierung in der Psychologie fundamental verschieden von der Weise, wie formale und mathematische Methoden in den Naturwissenschaften angewandt werden. Mathematische Modellierung in den Naturwissenschaften stellt in der Regel den Versuch dar, die generativen Prozesse hinter den Beobachtungen abzubilden. Statistische Modellierung in der Psychologie hingegen befasst sich mit der Beschreibung von Zusammenhängen in den beobachteten Daten. Auf den ersten Blick erinnert die Mathematisierung der Psychologie durch die zunehmende Verbreitung statistischer Methoden zwar an die historische Entwicklung der Naturwissenschaft. Tatsächlich handelt es sich jedoch um etwas völlig anderes.

Das Festhalten an statistischer Modellierung als Ausgangspunkt für die Mathematisierung der Psychologie kann sogar hinderlich für substantielle formale Theoriebildung sein, da man den Eindruck gewinnen

¹ Insofern ist der Begriff „Datenmodell“ nicht gleichbedeutend mit „datengetriebener Analyse“.

könnte, man hätte bereits formale Theorien, die tatsächlich aber Datenmodelle zur Überprüfung informeller Theorien sind. Eine substantielle formale Theoriebildung muss daher unabhängig von gängigen statistischen Modellierungsansätzen formuliert werden. Nicht die Form der statistischen Modelle sollte die Formalisierung vorgeben, sondern informierte Hypothesen über die den Beobachtungen zu Grunde liegenden Prozesse. Der folgende Abschnitt widmet sich daher der Frage, wie ein allgemeines Prinzip zur Beschreibung von Verhaltensdynamiken aussehen kann, und wie die formale Basis eines entsprechenden grundlegenden Theorieelements beschaffen sein kann.

2.3 Selektion als allgemeines Prinzip des Verhaltens

In den vorangehenden Abschnitten wurden die wissenschaftstheoretischen und methodologischen Grundlagen einer substanziellen Theoriebildung beschrieben. Wie aber lassen sich diese Prinzipien in der Psychologie umsetzen? Oder anders gefragt, wie lässt sich der Gegenstandsbereich der Psychologie beschreiben und zu einem grundlegenden Prinzip verdichten?

Die in dieser Habilitationsschrift verfolgte Strategie baut auf einem biologischen Verständnis von psychologischen Prozessen auf. Dabei liegt der Fokus nicht auf der Physiologie, die psychologische Prozesse umsetzt, sondern auf der Interaktion zwischen Organismus und Umwelt. Organismen (inklusive des Menschen) werden als dynamische Systeme verstanden, die an die Dynamik ihrer Umwelt gekoppelt sind. Diese Kopplung zwischen Organismus und Umwelt erfolgt grundsätzlich auf Verhaltens-ebene. Daher ist es für die Betrachtung dieser Interaktion sinnvoll, die Dynamik von Verhalten in den Fokus der Theoriebildung zu nehmen.

Die Ebene des Erlebens, welche üblicherweise auch zum Gegenstandsbe-
reich der Psychologie gezählt wird, gehört somit ebenso wenig zum Kern
des zu entwickelnden Theorienetzes wie die physiologische Ebene.² Der
Kern der zu entwickelnden Theorie bezieht sich demnach auf die Inter-
aktion zwischen Verhalten und dessen Auswirkungen in verschiedenen
Umgebungen. Die entscheidende Frage ist daher in diesem Kontext: Gibt
es ein allgemeines Prinzip, welches der Interaktion zwischen Organis-
mus und Umwelt zu Grunde liegt; und wenn ja, wie lässt sich dieses Prin-
zip mathematisch exakt beschreiben? Ein derartiges allgemeines Prinzip
lässt sich nicht empirisch ermitteln. Als grundlegendes Theorieelement
stellt es für sich genommen keinen empirischen Zusammenhang dar,
sondern es legt fest, worum es in der Theorie gehen soll. Es liefert das
grundlegende Vokabular und damit den analytischen Rahmen für eine
allgemeine Verhaltenstheorie.

Im Rahmen dieser Habilitationsschrift wird das Prinzip der Selektion als
grundlegendes Prinzip des Verhaltens vorgeschlagen. Das Prinzip der Se-
lektion wurde erstmals auf der Ebene evolutionärer Anpassungen von Or-
ganismen an ihre Umwelt beschrieben (Darwin, 1859). Es basiert auf dem
Zusammenspiel von Variation, Transmission und differentieller Repro-
duktion. Evolutionäre Modelle können zum einen zur Beschreibung der
Veränderung physiologischer Merkmale wie Körpergröße oder Gewicht
verwendet werden. Ebenso gut lassen sie sich jedoch auch zur Beschrei-
bung der Veränderung von Verhaltensmerkmalen, wie zum Beispiel
Brutpflege oder Partnerwerbverhalten verwenden. Die Evolution derar-
tiger Verhaltensmerkmale (oder Verhaltenstendenzen) wurde in den letz-
ten Jahren zunehmend in der Psychologie aufgegriffen und im Rahmen

² Dies schließt jedoch nicht aus, dass das Theorienetz mit der Zeit um spezialisierende The-
orieelemente ergänzt wird, welche das Erleben in Abhängigkeit bestimmter Umgebungs-
faktoren beschreiben, wie beispielsweise das psychophysische Gesetz von Stevens (1957).

der evolutionären Psychologie umgesetzt. Die biologische Selektion psychologischer Mechanismen soll jedoch nicht Fokus dieser Arbeit sein. Stattdessen wird postuliert, dass psychologische Mechanismen selbst Realisierungen eines allgemeinen Selektionsprinzips sind. Nach dieser Auffassung ist die natürliche Selektion, inklusive der sie realisierenden genetischen Prozesse, nur eine mögliche Realisierung des Selektionsprinzips, welches den dahinterliegenden Mechanismus auf abstrakter Ebene beschreibt.

Eine abstrakte Analyse des Selektionsprinzips erfordert einen eindeutigen konzeptuellen Rahmen. Dieser ist durch die so genannte Price-Gleichung gegeben (Price, 1970, 1972). Price erkannte, dass Mittelwertsunterschiede sich unter bestimmten Voraussetzungen in einen Kovarianzterm und einen Erwartungswertterm zerlegen lassen. Diese mathematische Einsicht erscheint auf den ersten Blick trivial (der Beweis umfasst nur wenige Zeilen), ist jedoch von enormer Reichweite. Die Bedeutung der Price-Gleichung erschließt sich aus den zu Grunde gelegten Definitionen und deren mengentheoretischer Einbettung. Grundlage der Price-Gleichung ist eine bestimmte mengentheoretische Struktur, bestehend aus zwei Mengen und einer Relation. Die Mengen können beliebige Elemente enthalten, etwa Individuen oder Gruppen, aber auch unbelebte Materie wie Steine, oder gar Planeten. Entscheidend ist, dass die Objekte sich hinsichtlich mindestens einer Eigenschaft vergleichen lassen und dass zwischen den beiden betrachteten Mengen eine Relation besteht, die jedem Objekt aus Menge 2 mindestens ein Objekt aus Menge 1 zuordnet. In Anlehnung an biologische Selektionsprozesse wird Menge 1 häufig als Elterngeneration bezeichnet, Menge 2 als Nachkommengeneration und die zwischen ihnen bestehende Relation im Sinne biologischer Elternschaft interpretiert. Abbildung 1 illustriert die beschriebene Struktur auf

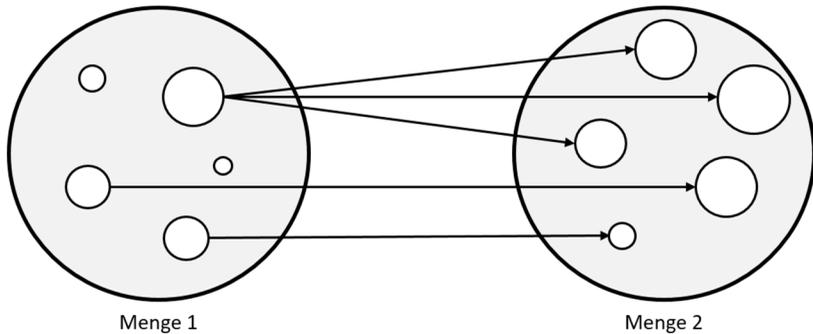


Abbildung 1: Mengentheoretische Veranschaulichung der Price-Gleichung

abstrakter Ebene. In der Abbildung sind die Objekte Kreise und die betrachtete Eigenschaft ist der Durchmesser der Kreise. Um die Darstellung verständlich zu halten, ist jedem Kreis aus Menge 2 genau ein Kreis aus Menge 1 zugeordnet (symbolisiert durch die Pfeile). Darüber hinaus haben die mit den Pfeilen verbundenen Kreise eine ähnliche Größe (d.h. es gibt eine Korrelation zwischen dem Durchmesser der Kreise in Menge 2 und den Kreisen aus Menge 1, denen sie zugeordnet sind).

In der Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Kreise in Menge 2 im Mittel einen größeren Durchmesser haben als jene in Menge 1. Der biologischen Interpretation folgend, vererben Eltern ihre Größe demnach tendenziell an ihre Nachkommen. Ebenfalls erkennbar ist, dass die Kreise aus Menge 1, die einen größeren Durchmesser haben, tendenziell mit mehr Kreisen aus Menge 2 verbunden sind als jene mit geringerem Durchmesser. Im Fall biologischer Selektion würde dies bedeuten, dass größere Eltern tendenziell mehr Nachkommen haben, also mehr zur Nachkommengeneration beitragen als kleinere Eltern. Dieser Beitrag der

Eltern verschiedener Größe zur Nachkommengeneration wird im Kontext der Price-Gleichung „Fitness“ genannt. Der Unterschied im mittleren Durchmesser zwischen den beiden Mengen lässt sich demnach dadurch erklären, dass die betreffende Eigenschaft (in diesem Fall der Kreisdurchmesser in Menge 1) positiv mit der Fitness (also dem Beitrag zu Menge 2) kovariiert. Price erkannte, dass diese Kovarianz die Essenz des Selektionsprinzips ausmacht.

In seiner ursprünglichen Veröffentlichung beschrieb Price das Selektionsprinzip im Kontext der Populationsgenetik. Price zeigte in diesem Artikel, dass die Veränderung einer beliebigen Genfrequenz von Eltern- zu Nachkommengeneration bei perfekter Vererbung des Gens stets der Kovarianz zwischen dem elterlichen Genotyp und der elterlichen Fitness entspricht. Ist die Vererbung des Gens nicht perfekt (z.B. aufgrund von Mutationen), lässt sich die Abweichung zwischen der Veränderung der Genfrequenz und der Kovarianz zwischen Genotyp und Fitness als Erwartungswert der Veränderung des Genotyps von Eltern zu Nachkommen erfassen. Formal entspricht dies einer Zerlegung des Genfrequenzunterschiedes $\Delta\bar{z}$ in einen Kovarianzterm $\text{Cov}(z, w)$ und einen Erwartungswertterm $E(w\Delta z)$:

$$\bar{w}\Delta\bar{z} = \text{Cov}(z, w) + E(w\Delta z) \quad (1)$$

Dabei ist w die individuelle Fitness und z der individuelle Genotyp. \bar{w} steht für die durchschnittliche Fitness der Elternpopulation und \bar{z} für die durchschnittliche Ausprägung des Genotyps z , welcher im Falle eines einzelnen Gens mit zwei Loci mit der Populations-Genfrequenz übereinstimmt. $\Delta\bar{z}$ bezeichnet entsprechend die Veränderung der Genfrequenz von der Eltern- zur Nachkommengeneration und Δz die Veränderung des Genotyps bei der Transmission von Eltern zu Nachkommen.

Die Price-Gleichung zählt heute zu den Grundfesten der modernen Populationsbiologie (Luque, 2017; Luque & Baravalle, 2021). Als mathematische Identität liefert sie den analytischen Rahmen für eine formale Definition von Selektion, die sich auf beliebige Systeme anwenden lässt, solange sie dieselbe grundlegende Struktur aufweisen wie eine Eltern- und Nachkommengeneration, bei der eine Elterneigenschaft an die Nachkommen weitergegeben wird. Im Kontext der Populationsgenetik beschreibt der Kovarianzterm der Price-Gleichung die Effekte natürlicher Selektion.

Der Geltungsbereich der Price-Gleichung beschränkt sich allerdings aufgrund des hohen Abstraktionsgrades der Definitionen nicht auf die Biologie. Alle mengentheoretischen Strukturen, die den oben genannten Bedingungen genügen, ermöglichen eine entsprechende Zerlegung von Mittelwertsunterschieden in einen Kovarianzterm und einen Erwartungswertterm. Somit lässt sich die Price-Gleichung in vielfältigen Kontexten verwenden, um die Effekte von Selektionsprozessen zu identifizieren und formal zu beschreiben (Price, 1995, geschrieben ca. 1971). So wurde die Price-Gleichung zum Beispiel verwendet, um die Ausbreitung und Entwicklung kultureller Praktiken zu beschreiben (El Mouden et al., 2014; Nettle, 2020). Steven S. Frank argumentiert sogar, dass die Price-Gleichung sich ebenso in physikalischen und informationstheoretischen Prinzipien wiederfindet (Frank, 2018, 2020).

Die Price-Gleichung wurde jedoch auch dahingehend kritisiert, dass die Beschreibung von Selektion durch eine mathematische Tautologie wie die Price-Gleichung nahezu inhaltsleer sei (van Veelen, 2020). Vor dem Hintergrund der semantischen Theoriekonzeption ist die tautologische Natur der Price-Gleichung jedoch kein Problem. Als allgemeines Prinzip stellt die Gleichung einen gemeinsamen konzeptuellen Rahmen für die

Analyse von Selektionsprozessen bereit. Somit ist die Price-Gleichung am ehesten als eine formale Definition des Selektionsprinzips zu verstehen.

Wie bereits Price (1970) bemerkte, liefert die Berücksichtigung von Kovarianzstrukturen für die Analyse von Selektionsprozessen zwar keine rechnerischen Vorteile, ist jedoch von unschätzbarem Wert für die Theorieentwicklung. In diesem Sinne soll im Rahmen dieser Habilitationsschrift der Grundstein zu einer allgemeinen Theorie des Verhaltens gelegt werden, die biologische und psychologische Aspekte der Verhaltensanpassung unter einem gemeinsamen Prinzip der Verhaltensselektion vereint. Die Arbeiten lassen sich entsprechend ihrer inhaltlichen Ausrichtung auf verschiedenen Ebenen an dieses übergeordnete Ziel anknüpfen. Auf der einen Seite stehen eine Reihe Veröffentlichungen zu den wissenschaftstheoretischen Grundlagen der Messung und Modellierung. Auf der anderen Seite stehen Veröffentlichungen zu konkreten Selektionsmodellen auf evolutionärer Ebene, sowie eine Reihe grundlegender theoretischer Arbeiten zur Etablierung eines allgemeinen Selektionsprinzips in der verhaltensorientierten Psychologie. Das folgende Kapitel soll zunächst einen Überblick über die einzelnen Beiträge und die zwischen ihnen bestehenden Querverbindungen schaffen. Im Anschluss werden die Arbeiten zusammenfassend dargestellt.

3 Darstellung des Habilitationskorpus

3.1 Systematik des Korpus

Der Korpus dieser Habilitation besteht aus insgesamt elf Originalarbeiten. Thematisch lassen sie sich in zwei große Blöcke unterteilen. Der erste befasst sich mit den wissenschaftstheoretischen und formalen Grundlagen psychologischer Messung. Der zweite Block bezieht sich auf die formale Modellierung adaptiven Verhaltens als Selektionsprozess. Die Arbeiten lassen sich ferner den drei im Grundlagenteil aufgespannten Analyseebenen zuordnen. Die erste Ebene stellt die wissenschaftstheoretische Grundlegung dar, die in Abschnitt 2.1 vorgestellt wurde. Die zweite Ebene besteht in der methodologischen Herangehensweise der formalen Modellierung (vgl. Abschnitt 2.2). Und die dritte Ebene umfasst die inhaltliche Komponente der Theoriebildung im Sinne eines allgemeinen Selektionsprinzips (vgl. Abschnitt 2.3). Nicht alle Arbeiten beinhalten alle drei Ebenen, jedoch decken sie gemeinsam jeweils das gesamte Spektrum in Bezug auf die beiden Themenblöcke ab.

Abbildung 2 zeigt einen Überblick über die Veröffentlichungen, inklusive einer systematischen Einordnung in Hinblick auf die drei genannten Analyseebenen und die beiden thematischen Blöcke. Die ersten fünf Arbeiten (gelb schattiert) befassen sich mit den Grundlagen psychologischer Messung. Sie bestehen aus zwei theoretischen Arbeiten (Buntins et al., 2017; Leising & Borgstede, 2019), sowie drei weiteren Arbeiten, die zusätzlich zur wissenschaftstheoretischen Ebene auch eine formale Komponente beinhalten (Borgstede, 2019b; Borgstede & Eggert, 2022; Borgstede & Scholz, 2021). Die übrigen sechs Arbeiten (grün schattiert) befassen sich mit der Beschreibung adaptiver Verhaltensprozesse im Rahmen eines allgemeinen Selektionsprinzips. Sie bestehen aus zwei Arbeiten zur

Darstellung des Habilitationskorpus

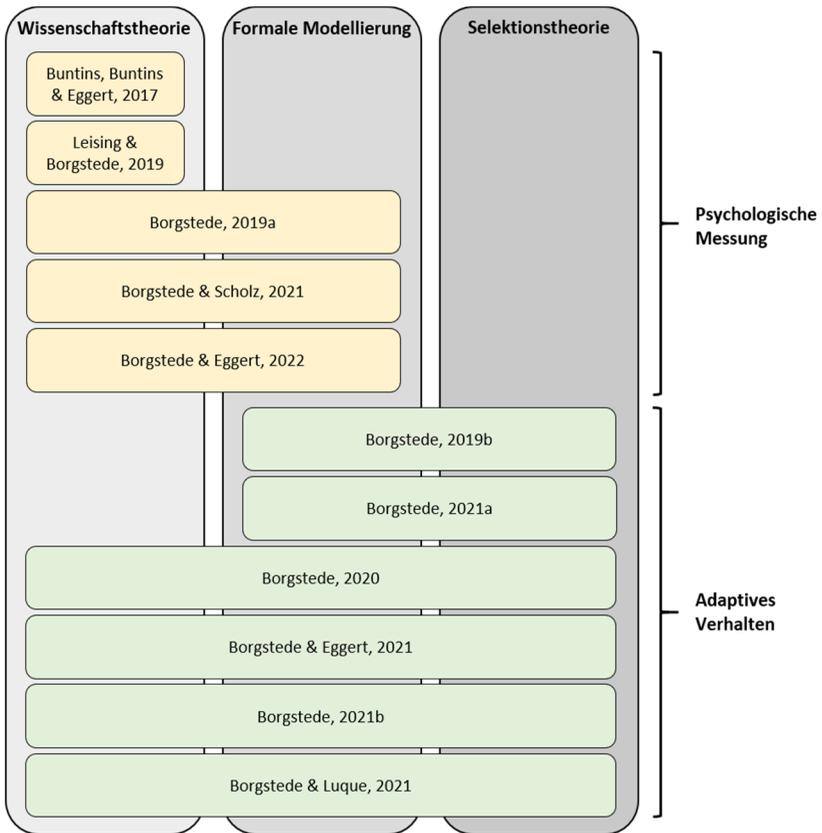


Abbildung 2: Systematik des Habilitationskorpus

evolutionären Dynamik von geschlechtsabhängigen elterlichen Investitionen (Borgstede, 2019a, 2021a), sowie vier Arbeiten, die sich mit der Entwicklung eines integrierten Selektionsmodells für individuelles Lernen und evolutionäre Anpassungen beschäftigen (Borgstede, 2020, 2021b; Borgstede & Eggert, 2021; Borgstede & Luque, 2021). Während die ersten

beiden dieser Veröffentlichungen den Fokus auf formale Modelle für evolutionäre Verhaltensanpassungen legen, umfassen die übrigen vier Veröffentlichungen alle drei Analyseebenen.

In den folgenden Abschnitten sollen die einzelnen Arbeiten thematisch sortiert vorgestellt und jeweils vor dem Hintergrund der drei Analyseebenen theoretisch verortet werden. Die Darstellung der einzelnen Veröffentlichungen zielt dabei nicht darauf ab, deren Inhalte vollständig abzubilden, sondern einen Überblick über deren Systematik und bestehende Querbezüge zu vermitteln.

3.2 Grundlagen psychologischer Messung

Die Mathematisierung der Psychologie war von Anfang an stark von dem Bestreben geprägt, psychologische Größen zu quantifizieren und zu messen. Frühe Versuche der Quantifizierung kognitiver Fähigkeiten finden sich zum Beispiel bei Francis Galton. Ausgehend von der Vorstellung, dass Intelligenzunterschiede sich in unterschiedlichem Hirnvolumen abbilden, erhob Galton beispielsweise standardmäßig die Hutgröße von Probanden (Fachner, 2005)³. McKeen-Cattell, ein Schüler Galtons, entwickelte dessen Ideen weiter und entwickelte darauf aufbauend so genannte „Mental Tests“, die im Wesentlichen auf Reaktionszeiten in standardisierten Aufgaben zu basalen Wahrnehmungsprozessen fußten (McKeen Cattell & Galton, 1890). Die Idee hinter dieser Art Testung war, dass sich Unterschiede in kognitiven Fähigkeiten bereits in unterschiedlich guter

³ Ironischerweise hatte Galton selbst eine vergleichsweise geringe Hutgröße (Fachner, 2005).

Verarbeitung einfacher Reize zeigen sollten – eine Annahme, die sich später als falsch herausstellte.

Obwohl diese frühen Versuche der Quantifizierung psychologischer Konzepte wenig erfolgreich waren, erscheint das grundsätzliche Bestreben nach Quantifizierung (als einem vermeintlichen Kriterium der Naturwissenschaften) heute genau so aktuell wie damals. Dieser so genannte „quantitative Imperativ“ bestimmt nach wie vor das Denken und Handeln in weiten Teilen der Psychologie (Michell, 1999). Historisch sind dabei verschiedene Strömungen zu unterscheiden, die in weiten Teilen unabhängig voneinander ihre eigenen Standards und Methoden entwickelt haben.

Zum einen wäre da die Tradition der Psychophysik, welche das Ziel verfolgt, physikalische Größen (wie beispielsweise die Masse kleiner Objekte) mittels einer psychophysischen Funktion in psychologische Größen zu überführen (Gescheider, 2016). In diesem Kontext haben sich standardisierte Vergleichsoperationen zwischen Objekten („Welches Objekt ist schwerer?“), sowie Einschätzungen der subjektiven Empfindungen auf numerischen Skalen („Wie schwer ist dieses Objekt?“) etabliert.

Einen weiteren Strang stellt die so genannte Klassische Testtheorie dar, welche ursprünglich dem Zweck diente, vermeintliche Messfehler bei psychologischer Leistungsbeurteilungen abzuschätzen (Lord & Novick, 1968). Heutzutage wird die Klassische Testtheorie routinemäßig auch außerhalb der Leistungsbeurteilung angewandt, zum Beispiel im Kontext der Persönlichkeitsdiagnostik. In der Klassischen Testtheorie haben sich

vor allem korrelationsbasierte Methoden zur Qualitätsbeurteilung standardisierter Diagnoseverfahren (so genannte „Gütekriterien“) durchgesetzt.

Ein formal zwar ähnlicher, aber historisch zunächst unabhängiger Ansatz zur Quantifizierung psychologischer Konzepte stellt die faktoranalytische Tradition dar. Die Faktoranalyse wurde von Charles Spearman entwickelt, um spezifische kognitive Fähigkeiten von einem von ihm hypothetisierten Generalfaktor (dem g-Faktor) zu separieren (Spearman, 1904). Die Faktoranalyse basiert auf der Beschreibung von Kovarianzstrukturen durch Linearkombinationen unbeobachteter Faktoren. Sie wird bis heute verwendet, um psychologische Tests in homogene Untertests zu unterteilen, und bildet die formale Basis moderner Strukturgleichungsmodelle (Hoyle, 2012).

Ausgehend von der Idee, die Antworten auf psychologische Testaufgaben auf objektiv vergleichbare Fähigkeitswerte zurückzuführen, entwickelte Georg Rasch die Grundlagen der modernen Item-Response-Theorie (Rasch, 1960). Die Item-Response-Theorie basiert auf der Idee, dass sich die Antwortwahrscheinlichkeiten in einem Test als Funktion unbeobachteter psychologischer Größen beschreiben lassen. Die Item-Response-Theorie bildet heute die Grundlage zahlreicher Kompetenztests, hat sich jedoch darüber hinaus im Bereich der Testdiagnostik bisher nicht gegen die klassische Testtheorie durchsetzen können.

Weitgehend unbeachtet von diesen an praktischen Problemen orientierten Strömungen entwickelte sich die repräsentationale Messtheorie (Krantz et al., 1971; Luce et al., 1990; Suppes et al., 1971). Die repräsentationale Messtheorie basiert auf einer rationalen Rekonstruktion des Messprozesses als Abbildung empirischer relationaler Systeme (wie z.B. die Ergebnisse einer Vergleichsoperation zwischen verschiedenen Objekten)

in numerische relationale Systeme (i.d.R. die reellen Zahlen). Zu diesem Zweck werden die numerisch zu repräsentierenden Systeme mittels abstrakter Mengentheorie charakterisiert, um dann notwendige und hinreichende Bedingungen für die gewünschte Abbildung herzuleiten. Obwohl die repräsentationale Messtheorie seit ihrer Einführung fortlaufend weiterentwickelt wurde, finden sich heute kaum Anwendungen im Bereich der psychologischen Messung.

So unterschiedlich die beschriebenen Herangehensweisen an das Problem der psychologischen Messung auch sein mögen, basieren Sie doch alle auf einer Reihe impliziter Annahmen über psychologische Konzepte und die damit bezeichneten Eigenschaften. Damit einher gehen einige fundamentale Probleme im Kontext psychologischer Messung, welche die Aussagekraft der gängigen Praktiken (im Folgenden unter dem Oberbegriff „Psychometrie“ zusammengefasst) grundlegend in Frage stellen. Diese impliziten Annahmen und übergreifenden Probleme der Psychometrie, sowie mögliche Lösungsperspektiven, sind Inhalt der im folgenden Abschnitt vorgestellten Veröffentlichungen.

3.2.1 Konzeptuelle Probleme der Psychometrie

Die Entwicklung der Psychometrie wirkt auf den ersten Blick wie eine Erfolgsgeschichte. Während Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts noch weitgehend Uneinigkeit darüber bestand, ob psychologische Messungen überhaupt möglich wären, würden die meisten in der Psychologie Forschenden diese Frage heute mit einem klaren Ja beantworten. Die statistischen Methoden, die im Rahmen psychometrischer Modellbildung entwickelt wurden scheinen über jeden Zweifel erhaben, erweisen sie sich doch sowohl in der Forschung als auch in der angewandten Diagnostik als überaus praktikabel.

Trotz des mittlerweile wohletablierten Modus Operandi wurde die Frage nach der Messbarkeit psychologischer Eigenschaften nie abschließend beantwortet. Michell (1999) argumentiert, dass die voranschreitende quantitative Psychologie nie wirklich auf die substanziellen Zweifel von Seiten der Naturwissenschaften und Wissenschaftsphilosophie eingegangen ist (vgl. Ferguson et al., 1940). Statt eine theoretische Rechtfertigung der vorgeschlagenen Messprozeduren vorzulegen habe die Psychologie schlicht ihre eigene Definition für „Messung“ erfunden, und so das eigentliche Problem umgangen (Michell, 2000). Demnach wird in der Psychologie jedwede regelhafte Zahlenzuordnung zu Objekten als Messung bezeichnet – unabhängig davon, ob diese Zahlenzuordnung auf tatsächlichen Eigenschaftsausprägungen basiert oder nicht (Stevens, 1946). Dieses verkürzte Verständnis von Messung geht mit einem naiven Operationalismus einher, welcher die empirisch festgelegten Messprozeduren als eigentliche Definition der zu erfassenden theoretischen Begriffe versteht (Borsboom, 2005). Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt wurde, führt eine derartige Auffassung zu zahlreichen theoretischen Problemen in Hinblick auf die theoretische Bedeutsamkeit der empirisch gewonnenen Werte. Statt psychologische Konzepte im Rahmen einer substanziellen Theorie formal zu definieren, erhalten sie ihre Bedeutung somit allein durch die etablierten Prozeduren. Im Kontext der Psychologie bestehen diese Praktiken primär in der Durchführung standardisierter Tests und Fragebögen. Somit reduziert sich die Bedeutung theoretischer Begriffe in weiten Teilen der Psychologie auf die Ergebnisse in standardisierten Tests. „Intelligenz“ ist daher streng genommen nichts weiter als „das was der Intelligenztest misst“ (Boring, 1923). Ebenso wird durch die Anwendung psychometrischer Methoden zur Quantifizierung von Kompetenzen in der empirischen Bildungsforschung der Kompetenzbegriff einiger wesentlicher theoretischer Komponenten beraubt, so dass am Ende nur

noch die „Fähigkeit, Aufgaben des Typs XY zu lösen“ bleibt. Die auf diese Weise (operational) definierten Begriffe werden in der Psychologie häufig als „Hypothetische Konstrukte“ bezeichnet, obwohl sie – der Logik der operationalen Definition folgend – eigentlich keinen hypothetischen, sondern definitorischen Charakter haben. Zugleich gibt es innerhalb der Psychologie aber kaum Einigkeit darüber, welche spezifischen Verfahren geeignete operationale Definitionen darstellen. Damit ist die Bedeutung psychologischer Konzepte im Rahmen der quantitativen Psychologie häufig unklar (Uher, 2018).

Der Überblicksartikel von Leising und Borgstede (2019) widmet sich der Frage, was hypothetische Konstrukte in der Psychologie sind, was sie vorgeben zu sein und was sie sein könnten. Der Grundtenor dieser Veröffentlichung ist, dass die quantitative Psychologie trotz der enormen Fortschritte im Bereich psychometrischer Methoden nach wie vor nicht zu Messungen führt, die mit denen aus den Naturwissenschaften vergleichbar wären. Statt theoriebasierter Operationalisierungen, wie sie in den Naturwissenschaften mittlerweile Standard sind, bezeichnen psychologische Konstrukte häufig einfach das gemeinsame Auftreten einer als homogen wahrgenommenen Menge unterschiedlicher Phänomene. Zum Beispiel werden in der klinischen Diagnostik bis heute rein deskriptive Klassifikationssysteme wie das DSM verwendet (Falkai & Wittchen, 2015), die dann wiederum als Ausgangspunkt für die Zusammenstellung von Fragen in einem psychologischen Test darstellen. So besteht die Quantifizierung von Depressivität durch einen standardisierten Test wie das Beck-Depressions-Inventar (Hautzinger et al., 2009) im Wesentlichen darin, dass typische Diagnosekriterien abgefragt werden, um dann die Anzahl (und ggf. die Intensität) der auf eine Person zutreffenden Kriterien zu bestimmen. „Depressivität“ ist hier lediglich ein anderer Begriff

für „Anzahl der Depressionssymptome“, und als solche theorielos. Neuere psychometrische Entwicklungen berücksichtigen zusätzlich die wechselseitige Beeinflussung unterschiedlicher Symptome, bleiben jedoch darüber hinaus ohne theoretischen Bezug (vgl. Borsboom, 2017). Zum Beispiel sind Schlafstörungen und Müdigkeit häufige Symptome von Depressionen, stehen jedoch nicht unabhängig nebeneinander, sondern ersteres ist offenkundig eine Teilursache für letzteres. Von dieser einfachen Gruppierung einzelner Beobachtungen zu Oberbegriffen zu unterscheiden sind Ansätze, die psychologische Konstrukte mit latenten Variablen identifizieren, wie die Faktorenanalyse, Strukturgleichungsmodelle oder Item-Response-Modelle. Die Gleichsetzung von Konstrukten mit latenten Variablen macht diese statistisch zugänglich. Wie in Abschnitt 2.2 argumentiert impliziert statistische Modellierung jedoch keine substantielle Theorie. Daher bleibt die theoretische Reichweite latenter Variablen weiterhin offen. In Leising und Borgstede (2019) wird dafür plädiert, diese theoretische Underdeterminiertheit anzuerkennen und im Rahmen konsensueller Konstruktdefinitionen langfristig einzudämmen.

Die Begriffliche Vagheit psychologischer Konstrukte ist ebenfalls Ausgangspunkt für den Artikel von Buntins et al. (2017). In dieser Arbeit wird argumentiert, dass begriffliche Unschärfe und theoretische Underdeterminiertheit gemeinsam dazu führen, dass psychometrische Verfahren – im Gegensatz zu naturwissenschaftlichen Messprozeduren – grundsätzlich hinsichtlich ihrer *Validität* hinterfragt werden. Mit Validität ist in der psychologischen Diagnostik gemeint, inwieweit eine Messprozedur tatsächlich die zu messende Eigenschaft widerspiegelt. Der Artikel fokussiert zwei grundlegend verschiedene Herangehensweisen an das Problem der Messung in der Psychologie. Zum einen wird die Position des Operationalismus betrachtet, nach welcher die Operationalisierung die eigentliche Definition des interessierenden theoretischen Begriffs ist. Zum

anderen wird aus repräsentationaler Perspektive argumentiert, nach welcher Messung in der Abbildung empirischer in numerische Relationen besteht (vgl. Abschnitt 2.2). Anhand einer streng logischen Beweisführung wird in der Arbeit gezeigt, dass eine operationalistische Auffassung der Messung die Frage nach der Validität ad absurdum führt, da eine operationale Definition eben eine Definition (also ein analytischer Satz) und somit unabhängig von jeder Empirie logisch gesehen wahr ist. Ebenso wird gezeigt, dass die Validitätsfrage nach repräsentationaler Auffassung gleichermaßen inhaltsleer ist, da es unmöglich ist, eine empirische Struktur methodisch korrekt in Zahlen abzubilden, ohne zu wissen, was man abbildet. Daher wird in Buntins et al. (2017) geschlossen, dass es sich bei der Frage nach der Validität gar nicht um ein messtheoretisches Problem handelt, sondern stattdessen um den Abgleich einer sich entwickelnden Wissenschaftssprache mit bereits bestehenden Alltagskonzepten. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll zu fragen, ob etwa ein Intelligenztest wirklich Intelligenz misst – denn der Begriff „Intelligenz“ hat bereits eine Semantik in der Alltagssprache. In Ermangelung substanzieller formaler Theorien gibt es jedoch oft keine entsprechende formale Semantik im Rahmen der psychologischen Fachsprache. Eine solche formale Semantik kann den Ausführungen aus Abschnitt 2.1 folgend jedoch nicht aufgrund von alltagssprachlichen (oder gar alltagspsychologischen) Konzepten formuliert werden, sondern erfordert substanzielle Theoriebildung. Aus wissenschaftstheoretischer Perspektive ist die Frage nach der Validität daher eher hinderlich, wenn es um die theoretische Weiterentwicklung der Psychologie geht.

Die Problematik der operationalen Definition psychologischer Konstrukte wird in Borgstede (2019b) zusätzlich aus einer praxisorientierten Perspektive betrachtet. Ausgehend von der weiten Verbreitung psycho-

metrischer „Gütekriterien“ zur Beurteilung und Optimierung von Fragebogen wird argumentiert, dass der formale Rahmen der Klassischen Testtheorie und die daraus abgeleiteten statistischen Kennwerte zur Abschätzung von Reliabilität und Validität nicht geeignet ist, um theoretisch bedeutsame Definitionen zu begründen. Der Artikel orientiert sich dabei nicht an den formalen Grundlagen der Klassischen Testtheorie, sondern an der gängigen Anwendung der Theorie im Rahmen der Test- und Fragebogenkonstruktion. Den Ausgangspunkt für die Argumentationsführung stellt die Beobachtung dar, dass sämtliche statistischen Kennwerte, die aus der Klassischen Testtheorie konstruierbar sind, auf empirischen Korrelationen zwischen Itemantworten in einem Test basieren. Das Gütekriterium der Validität etwa erhält im Rahmen der Klassischen Testtheorie eine völlig andere Bedeutung als im übergeordneten psychometrischen Diskurs. Während der Validitätsbegriff eigentlich untrennbar mit der Semantik psychologischer Konstrukte verwoben ist, definiert ihn die Klassische Testtheorie schlicht als Korrelation eines Testergebnisses mit einem Außenkriterium. Ein derartiger Kennwert lässt sich zwar statistisch leicht berechnen – seine inhaltliche Interpretation ist aber fragwürdig. Ebenso basieren sämtliche statistische Reliabilitätsschätzer auf empirischen Korrelationen zwischen den Antworten der Probanden auf Testitems. Die Interpretation derartiger Korrelationen als Testgütekriterium (etwa im Sinne von Messgenauigkeit) ist nur unter sehr restriktiven – und, wie im Artikel argumentiert wird, oft unplausiblen – Annahmen zulässig. Schließlich wird in Borgstede (2019b) auf fundamentaler Ebene hinterfragt, ob empirische Korrelationen überhaupt eine sinnvolle Grundlage für die Konstruktion theoretisch bedeutsamer Operationalisierungen darstellen können. Anhand von Beispielen wird gezeigt, dass hohe empirische Korrelationen weder notwendig noch hinreichend für bedeutsame Operationalisierungen sind. Entsprechend

schließt die Arbeit mit einem Plädoyer für ein reflektierteres und theoretisch besser verankertes Vorgehen in der Test- und Fragebogenkonstruktion.

3.2.2 Alternative Modelle psychologischer Messung

Die bisher genannten Arbeiten befassen sich in erster Linie mit der Identifikation theoretischer und metatheoretischer Probleme im Rahmen bestehender psychometrischer Praktiken. Im Folgenden werden zwei weitere Arbeiten vorgestellt, die sich inhaltlich und methodisch von den etablierten Ansätzen entfernen, um eine stärkere Verwurzelung psychologischer Messung im Rahmen substanzieller formaler Theoriebildung ermöglichen.

Dass die bestehenden Versuche zur Quantifizierung psychologischer Konzepte keine Methoden zur formalen Theoriebildung sind, lässt sich in manchen Fällen leicht erkennen. Zum Beispiel erhebt die Klassische Testtheorie überhaupt nicht den Anspruch, in irgendeiner Weise Theorien zu formalisieren (vgl. Lord & Novick, 1968). In anderen Fällen ist die Lage weniger eindeutig. So könnte man zum Beispiel argumentieren, dass die Transformation physikalischer in psychologische Variablen im Rahmen der Psychophysik im Grunde eine formalisierte Wahrnehmungstheorie ist. Wie von Michell (1999) ausführlich dargelegt, ist die grundlegende theoretische Vorstellung hinter dieser Interpretation – dass physikalische, quantitative, Variablen vom Organismus in Form psychologischer, ebenfalls quantitativer, Variablen repräsentiert werden – nicht Gegenstand psychophysischer Skalierungsverfahren. Stattdessen wird die quantitative Natur psychologischer Perzepte als Basis für die Konstruktion psychophysischer Funktionen ungeprüft vorausgesetzt (Michell, 1999).

Es bleibt die Frage, inwieweit die repräsentationale Messtheorie ein Fundament psychologischer Messung im Sinne substanzieller Theoriebildung darstellen kann. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren handelt es sich bei der repräsentationalen Messtheorie nicht um ein Skalierungsverfahren, das die quantitative Natur der zu erfassenden Eigenschaften ungeprüft voraussetzt. Im Gegenteil, die repräsentationale Messtheorie versteht sich als Verfahren, um eben diese quantitative Natur empirisch prüfbar zu machen (Krantz et al., 1971). So lässt sich beispielsweise zeigen, dass das Konzept der „Einstellung“ (als wertende Position gegenüber einem Objekt) zwar in sich konsistent als quantitative Größe formalisierbar ist, die abzubildende empirische relationale Struktur jedoch nicht den notwendigen Bedingungen für eine entsprechende numerische Repräsentation genügen (Westermann, 1984). Darüber hinaus ist die methodische Herangehensweise der repräsentationalen Messtheorie uneingeschränkt mit der semantischen Theoriekonzeption kompatibel. Wie diese basiert sie auf mengentheoretischen Charakterisierungen empirischer Strukturen und deren formaler Beschreibung durch abstrakte mathematische Strukturen. Insofern könnte man ein repräsentationales Messmodell im Sinne einer formalisierten Theorie interpretieren. Nichtsdestotrotz würde eine derartige Theorie ausschließlich die quantitative Natur der interessierenden theoretischen Begriffe beinhalten, ohne jedoch deren Relationen zu anderen theoretischen Begriffen zu spezifizieren. Betrachten wir das Beispiel einer Balkenwaage. Nach repräsentationaler Messtheorie würde man das System als mengentheoretische Struktur beschreiben – der Ausschlag der Balkenwaage würde als empirische Relation („schwerer als“) betrachtet werden, und die Objekte, die man in die Waagschalen legen kann, wären die Grundmenge, auf welcher die entsprechende Relation definiert wäre. Ein Messmodell würde nun bestimmte Eigenschaften dieser empirischen relationalen Struktur

spezifizieren, die gegeben sein müssen, damit eine numerische Repräsentation (eine Messung) möglich ist. Eine dieser Eigenschaften wäre z.B., dass der Ausschlag der Waage gleichbleibt, wenn man auf beiden Seiten je ein identisches Objekt hinzufügt⁴. Durch wiederholte empirische Vergleiche verschiedener Objekte (und deren Kombinationen) mit Hilfe der Balkenwaage ließe sich ein entsprechendes Messmodell experimentell prüfen. Das Resultat wäre eine numerische Abbildung der empirisch vorgefundenen Struktur. Auf diese Weise kann die quantitative Natur der Balkenwaagen-Struktur belegt werden (Krantz et al., 1971).

Aber handelt es sich bei dieser numerischen Konstruktion um die *Masse* der verglichenen Objekte? Ausgehend von der Konstruktion der Vergleichsoperation (legen von Objekten in die Schalen einer Balkenwaage) liegt diese Schlussfolgerung nahe. Aber können wir sicher sein, ob eine Balkenwaage die Masse von Objekten vergleicht? Hierfür müssen wir zunächst den Begriff der Masse *definieren*. Entweder wir definieren ihn operational – dann ist die Frage trivialerweise zu bejahen (diese Antwort hat aber keinen theoretischen Gehalt). Oder wir definieren „Masse“ im Rahmen einer formalen Theorie, etwa der klassischen Mechanik – dann ist diese Frage nur zu bejahen, wenn wir das Verhalten einer Balkenwaage im Rahmen der klassischen Mechanik adäquat beschreiben können und die numerische Repräsentation durch das Messmodell mit der theoretisch definierten Eigenschaft der Masse zusammenfällt. Tatsächlich gibt es im Falle der Masse eine derartige Korrespondenz zwischen dem repräsentationalen Messmodell und der Anwendung der übergeordneten Theorie. Aber die für die Semantik des theoretischen Begriffs relevante Struktur war eben nicht die empirische relationale Struktur, die mit Hilfe der repräsentationalen Messtheorie abgebildet werden kann, sondern es

⁴ Zusammen mit einigen weiteren Eigenschaften (u.a. Symmetrie, Transitivität, Additivität) ergibt sich eine so genannte „extensive Messstruktur“.

war eine darüber hinaus gehende formale Theorie. Daher lässt sich festhalten, dass die repräsentationale Messtheorie zwar kompatibel ist mit der semantischen Theoriekonzeption, jedoch für sich allein nicht hinreichend für die Formulierung substantieller Theorien ist.

Die Arbeit von Borgstede und Scholz (2021) knüpft genau an dieser Stelle an. Ausgehend von einem repräsentationalen Verständnis der Messung wird analysiert, wie quantitative und qualitative Begriffsbildung in der Psychologie idealisierter Weise vonstattengehen sollte, und welche Implikationen sich daraus für die Rolle systematischer Replikationsversuche ergeben. Während quantitative Begriffe durch die Abbildung empirischer relationaler Strukturen in Zahlen charakterisiert werden, werden qualitative Begriffe durch die Abbildung empirischer relationaler Strukturen in logische Prädikate charakterisiert. Formale Modelle, die auf quantitativ konstruierten abstrakten Begriffen aufbauen (variablenbasierte Modelle) werden Modellen, die auf qualitativ konstruierten abstrakten Begriffen basieren (fallbasierte Modelle) gegenübergestellt. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der logischen Struktur quantitativer und qualitativer Konstruktionen. Während variablenbasierte Modelle in der Regel in Form logischer All-Sätze („Für alle...“) auftreten, basieren fallbasierte Modelle meistens auf logischen Existenzsätzen („Es gibt...“). In Borgstede und Scholz (2021) wird argumentiert, dass diese logischen Satzformen häufig nicht nur innerhalb der untersuchten Forschungskontexte (d.h., in Bezug auf die tatsächlich beobachteten empirischen relationalen Strukturen), sondern auch darüber hinaus verwendet werden. Aus einem kontextabhängigen „Für alle beobachteten Fälle gilt...“ wird somit ein universeller All-Satz der Form „Für alle potenziell beobachtbaren Fälle in allen möglichen Kontexten gilt...“. Wie in Abschnitt 2.1 dargelegt sind derartige universelle All-Sätze prinzipiell nicht verifizierbar. Dem Prinzip der Falsifikation folgend lassen sie sich jedoch widerlegen – und zwar bereits

durch ein einziges Gegenbeispiel. Diese Ausweitung des intendierten Geltungsbereichs eines Satzes über die beobachteten Kontexte hinaus impliziert eine Top-Down Generalisierungsstrategie, bei der die universelle Gültigkeit eines Modells als Prämisse genommen und dann anhand spezifischer, kontextabhängiger Anwendungen geprüft wird. Entweder der universelle Geltungsanspruch hält der kritischen Prüfung durch Replikationsversuche stand, oder das Modell als ganzes gilt als widerlegt (vgl. Popper, 1935). Vor diesem Hintergrund haben gescheiterte Replikationsversuche (wie sie in der Psychologie mittlerweile vielfach belegt sind) verheerende Folgen für die Beurteilung der Geltung eines Modells. In Borgstede und Scholz (2021) wird vorgeschlagen, das Problem der Geltung quantitativer Konstruktionen zu lösen, indem statt universeller All-Sätze *kontextabhängige* All-Sätze formuliert werden. Konkret bedeutet dies, dass zwar innerhalb eines Kontexts der Anspruch erhoben werden kann, dass eine Gesetzmäßigkeit allgemein gültig sei, nicht aber über verschiedene Kontexte hinweg. Dieses Vorgehen entspricht einer Bottom-Up Generalisierungsstrategie, wie sie standardmäßig in vielen qualitativen Studien verfolgt wird. Statt von universeller Gültigkeit eines Modells auszugehen, wird die Geltung eines Modells grundsätzlich kontextabhängig konzeptualisiert. Konkret bedeutet dies, dass quantitative Konstruktionen ebenso wie qualitative Konstruktionen im Sinne eines Kontextübergreifenden Existenzsatzes formuliert werden können. Statt eines universellen All-Satzes der Form „Für alle potenziell beobachtbaren Fälle in allen möglichen Kontexten gilt...“ ergibt sich so ein kontextabhängiger All-Satz der Form „Für alle Fälle in mindestens einem möglichen Kontext gilt...“. In Borgstede und Scholz (2021) wird diese Unterscheidung durch die Konzepte der Notwendigkeit und Möglichkeit, sowie deren modal-logische Entsprechungen formalisiert. Das Resultat ist ein Entwurf für eine alter-

native Interpretation von Replikationsversuchen. Statt Sätze mit universellem Geltungsanspruch zu prüfen wird vorgeschlagen, den Geltungsbereich kontextabhängiger Sätze sukzessive durch das Heranziehen ähnlicher und kontrastierender empirischer Strukturen zu erweitern, und auf diese Weise die Randbedingungen eines Modells zu explorieren. Vor dem Hintergrund der semantischen Theoriekonzeption ist ein solches Vorgehen vor allem dann sinnvoll, wenn die theoretischen Konstruktionen, d.h. die theoretischen Begriffe und postulierten Zusammenhänge, sich noch im Anfangsstadium befinden. Die Interpretation quantitativer und qualitativer Begriffe als Repräsentationen empirischer relationaler Strukturen geht dabei Hand in Hand mit dem semantischen Theoriebegriff, der Theorien als Klasse abstrakter Strukturen versteht. Die vorgeschlagene Bottom-Up Strategie ermöglicht eine fortlaufende Koordination zwischen theoretischen Begriffen und den Ergebnissen empirischer Untersuchungen. Auf diese Weise können auch theoretisch unterdeterminierte Begriffe durch die zunehmende Schärfung der zu Grunde gelegten Theorie allmählich expliziert werden.

In Borgstede und Eggert (2022) wird der Fokus der Analyse von der formalen Begriffsbildung auf die Möglichkeit theoretisch bedeutsamer Operationalisierungen im Rahmen der strukturalistischen Theoriekonzeption verlagert. Ebenso wie in Borgstede und Scholz (2021) werden Theorien als Klassen von abstrakten Strukturen verstanden, die durch die wechselseitige Beeinflussung theoretischer Weiterentwicklungen und empirischer Befunde mit tatsächlich vorfindbaren Strukturen koordiniert werden. Allerdings geht es in Borgstede und Eggert (2022) nicht um die Problematik der Generalisierung, sondern um die Frage, was Messung in der Psychologie vor dem Hintergrund der semantischen Theoriekonzeption überhaupt bedeuten kann und welche Implikationen sich daraus im Hinblick auf die Messbarkeit latenter Variablen ergeben. Der Artikel setzt

bei einer grundlegenden Annahme etablierter psychometrischer Verfahren an, welche als die „fundamentale Prämisse der Psychometrie“ bezeichnet wird – dass psychologische Eigenschaften schwer zu messen seien, weil sie unbeobachtbar seien. Diese Annahme wird standardmäßig als Begründung für die Verwendung von Latente-Variablen-Modellen wie der Faktoranalyse, Strukturgleichungsmodellen oder Item-Response-Modellen herangezogen. In Borgstede und Eggert (2022) wird argumentiert, dass diese Annahme irreführend ist, und dass ihre „Lösung“ durch die Entwicklung und Anwendung statistischer Modelle von den viel grundlegenden Problemen im Bereich psychologischer Theoriebildung ablenkt. Anhand von Beispielen aus der Wissenschaftsgeschichte wird gezeigt, dass Latente-Variablen-Modelle zwar einen gewissen praktischen Wert als Datenmodelle haben können, jedoch ungeeignet sind um substantielle Theoriebildung zu betreiben. Als alternative Herangehensweise wird das Konzept der *theoriebasierten Messung* eingeführt. Theoriebasierte Messung wird definiert als die Anwendung einer empirisch hinreichend belegten Theorie auf einen standardisierten empirischen Kontext. Vorausgesetzt die Theorie liefert eine adäquate Beschreibung des entsprechenden Kontexts (so wie z.B. die klassische Mechanik eine adäquate Beschreibung einer Balkenwaage liefert), kann eine derartige Anwendung verwendet werden, um auf Grundlage der Theorie die konkreten Ausprägungen der durch theoretische Begriffe bezeichneten Größen zu bestimmen. Der Artikel beschreibt, wie theoretisch bedeutsame Operationalisierungen in der Psychologie möglich wären, wenn es entsprechend weit entwickelte Theorien gäbe. Statt statistisch motivierter Datenmodelle werden hierfür substantielle formale Theorien benötigt. Insofern stellt die Arbeit von Borgstede und Eggert (2022) eine direkte Verbindung zwischen den wissenschaftstheoretischen Grundlagen aus Abschnitt 2.1 und der psychologischen Diagnostik her.

3.3 Evolutionäre Modelle adaptiven Verhaltens

In den bisher vorgestellten Arbeiten wurden die Grundlagen psychologischer Diagnostik aus wissenschaftstheoretischer und methodologischer Perspektive analysiert. Dabei stellte sich heraus, dass bedeutungsvolle psychologische Messungen und darauf aufbauende diagnostische Verfahren auf eine empirisch fundierte, substanzielle, formale Theorie angewiesen sind. Ohne eine derartige Theorie sind auch die vorgeschlagenen methodischen Strategien nicht konkret umsetzbar.

In den folgenden Abschnitten soll es um die Grundlegung einer solchen substanziellen formalen Theorie gehen. Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, bauen die vorgestellten Arbeiten inhaltlich auf der Idee auf, dass psychologische Prozesse im Wesentlichen Prozesse der adaptiven Verhaltenssteuerung sind, und dass adaptives Verhalten sich durch das allgemeine Prinzip der Selektion adäquat beschreiben lässt. Für die Umsetzung dieser theoretischen Grundannahme im Rahmen der Theoriebildung spielen sowohl die Ebene der formalen Modellierung (Abschnitt 2.2), als auch die Ebene der wissenschaftstheoretischen Grundlegung (Abschnitt 2.1) eine zentrale Rolle.

Formale Selektionsmodelle haben in der theoretischen Biologie eine lange Tradition. Die verschiedenen Modellierungsansätze lassen sich dabei sehr grob in zwei grundlegende Richtungen unterteilen. Zum einen gibt es einen umfangreichen Diskurs zu formalen Modellen natürlicher Selektion auf genetischer Ebene. Dieser Forschungsstrang fokussiert die physiologischen Mechanismen, welche die Prinzipien der Variation, Transmission und Selektion im Falle der biologischen Evolution realisieren (Fisher, 1930). Genetische Modelle der Selektion haben den Vorteil, dass sie sich auf unmittelbar beobachtbare Untersuchungseinheiten (Gene) beziehen, deren physiologische und biochemische Eigenschaften

sich im Labor kleinschrittig und kontrolliert untersuchen lassen. Auf der anderen Seite sehen sich genetische Selektionsmodelle mit der Schwierigkeit konfrontiert, dass bereits die Genotypen sehr einfacher Organismen extrem komplex organisiert sind. Obwohl man heutzutage mit Hilfe moderner Sequenziermethoden Genome vollständig entschlüsseln kann, ist in den meisten Fällen nicht bekannt, welche genetischen Faktoren für die Entwicklung welcher Eigenschaften verantwortlich sind. Die Identifikation eindeutiger genetischer Ursachen für phänotypische Variation ist unter anderem deshalb extrem schwer, weil einzelne Gene oft weder hinreichend noch notwendig für bestimmte Phänotypen sind. Darüber hinaus kann es zahlreiche Interaktionen zwischen verschiedenen genetischen Faktoren, sowie korrelierte Genotypen, geben (Maynard Smith, 1998). Ergebnisse aus der epigenetischen Forschung zeigen ferner, dass einzelne genetische Faktoren aktiviert oder deaktiviert werden können (Moore, 2015). Insgesamt lässt sich festhalten, dass genetische Selektionsmodelle zwar gut geeignet sind, um grundlegende Mechanismen der Evolution durch natürliche Selektion zu analysieren, jedoch kaum zur Modellierung konkreter phänotypischer Anpassungen (vor allem in Hinblick auf Mechanismen der Verhaltensregulation), deren genetische Ursachen in der Regel viel zu komplex sind, um ein adäquates Modell zu spezifizieren.

Ein alternativer Modellierungsansatz betrachtet biologische Selektionsprozesse auf phänotypischer Ebene. Anstelle der Gene werden hier Eigenschaften von Individuen (wie z.B. die Körpergröße) als Analyseeinheit betrachtet. Obwohl natürliche Selektion zweifelsohne durch genetische Mechanismen vermittelt wird, kann eine phänotypische Betrachtung als vereinfachender Modellierungsrahmen ebenso konsistent sein (Grafen, 2008). Die Begründung hierfür ist, dass Gene niemals direkt, sondern stets vermittelt über phänotypische Eigenschaften von Individuen (oder

unter Umständen Gruppen) selektiert werden. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, dass Selektionsprozesse auf phänotypischer Ebene weitgehend unabhängig von der genetischen Architektur betrachtet werden können (Davies et al., 2012). Rückschlüsse auf genetische Prozesse sind hingegen nicht ohne weiteres möglich.

Die Vorstellung der Selektion von Eigenschaften (statt Genen) entspricht darüber hinaus Darwins ursprünglicher Theorie der Evolution durch natürliche Selektion (Darwin, 1859). Tatsächlich sind aus selektionstheoretischer Perspektive die genauen Mechanismen der Variation und Transmission sekundär. So ist es zum Beispiel durchaus möglich, dass bestimmte Eigenschaften auf nichtgenetischem Wege von der Elterngeneration zur Nachkommengeneration weitergegeben werden. Ein realweltliches Beispiel für derartige nichtgenetische Transmission von Mutter zu Kind stellt die Weitergabe von Nahrungspräferenzen durch die chemische Zusammensetzung der Muttermilch bei Säugetieren dar (Jablonka & Lamb, 2005). Ein genetisches Modell würde derartige Mechanismen ausklammern. Ein phänotypisches Modell hingegen kann genetische wie nichtgenetische Transmissionsfaktoren gleichermaßen beinhalten. Aus diesem Grund werden phänotypische Modelle zum Teil auch zur Modellierung nichtbiologischer Selektionsprozesse verwendet, zum Beispiel im Bereich der so genannten „kulturellen Evolution“ (Baravalle & Luque, 2021; El Mouden et al., 2014).

Im Rahmen dieser Habilitationsschrift geht es um die Anwendung des Selektionsprinzips zur Modellierung adaptiven Verhaltens. Dabei geht es nicht um die Rückführung von Verhalten auf genetische Faktoren, sondern um die Dynamik des Verhaltens selbst. Ob und inwieweit genetische oder nichtgenetische Transmissionsmechanismen dabei eine Rolle spie-

len, kann im Einzelnen sehr unterschiedlich ausfallen. Daher wird Selektion in allen im folgenden vorgestellten Arbeiten auf Ebene des *Verhaltens* beschrieben, ohne auf explizite genetische Mechanismen einzugehen. Dabei wird sowohl die natürliche Selektion allgemeiner Verhaltenstendenzen, als auch die (nichtbiologische) Selektion durch Konsequenzen innerhalb der Lebensspanne einzelner Individuen betrachtet.

3.3.1 Natürliche Selektion

Den ersten Teil der in dieser Habilitationsschrift vorgestellten Arbeiten zum Thema Selektion bilden zwei Veröffentlichungen aus dem Bereich der Verhaltensökologie. Die verhaltensökologische Perspektive betrachtet Verhalten als das Resultat evolutionärer Selektionsprozesse (Davies et al., 2012). Anders als die meisten physiologischen Eigenschaften (beispielsweise Körpergröße) wird Verhalten kontextabhängig konzeptualisiert. Ein Verhalten ist dadurch immer an bestimmte Umgebungsfaktoren gekoppelt und wird entsprechend als Resultat der Interaktion zwischen Umwelt und Individuum verstanden. Eine verhaltensökologische Analyse von aggressivem Verhalten würde zum Beispiel die Tendenz zu aggressiven Akten nicht als Individueneigenschaft betrachten (im Sinne einer Persönlichkeitseigenschaft bzw. Traits „Aggressivität“), sondern die Häufigkeit und Intensität aggressiver Verhaltensweisen auf die Interaktion des Individuums mit seiner Umgebung zurückführen, indem die situationsabhängigen (evolutionären) Kosten und Nutzen aggressiver Verhaltensweisen modelliert und verglichen werden. Verhalten wird entsprechend im Sinne bedingter Regeln (so genannter „Strategien“) konzeptualisiert. Mögliche Strategien im Kontext von aggressivem Verhalten könnten zum Beispiel sein „Wenn ein Konkurrent kleiner ist als du, greife an!“ oder „Wenn du dich außerhalb deines Reviers befindest, zieh

dich zurück!“. Derartige Verhaltensstrategien werden jedoch nicht als bewusst reflektierte Handlungen verstanden, sondern als das Resultat natürlicher Selektion. Die Verhaltensökologie beruht im Wesentlichen auf formalen Modellen bzw. formalisierten Theorien über die Interaktion zwischen Individuum und Umwelt. Zum Methodenrepertoire zählen beispielsweise spieltheoretische Modelle (Maynard Smith, 1982), Optimierungsmodelle (Stephens & Krebs, 1986), sowie dynamische Modelle evolutionärer Anpassungen (Metz et al., 1995).

Die im Folgenden zu besprechenden Arbeiten befassen sich inhaltlich mit der Frage der Ressourcenaufteilung zwischen männlichen und weiblichen Nachkommen und sind somit in den größeren Rahmen der Sex-Ratio Theory einzuordnen (Charnov, 1982). Beide Arbeiten fokussieren den Zusammenhang zwischen elterlicher Kondition (Gesundheit, Größe, Gewicht...) und ungleichen Investitionen in männliche oder weibliche Nachkommen. Investitionen sind hierbei sehr allgemein gefasst und beinhalten sowohl die Zeit, Energie und gesundheitlichen Risiken, die Eltern im Rahmen einer Schwangerschaft zugunsten ungeborener Nachkommen aufbringen, als auch alles, was nach der Geburt zum Wohle der Nachkommen investiert wird (z.B. Betreuungszeit oder Futteraufteilung). Elterliche Investitionen werden dabei stets in Hinblick auf die in Kauf genommenen evolutionären Kosten verstanden (Trivers, 1972). Seine Nachkommen gegen einen Fressfeind zu verteidigen, mag zum Beispiel nur wenig Zeit und Energie kosten im Vergleich zur Brutpflege, ist aber mit dem Risiko des Todes – und damit potentiell weniger zukünftigen Nachkommen – verbunden, und stellt somit ein hohes Investment dar. Ebenso ist der Begriff der Kondition (oder „quality“) sehr weit gefasst und beinhaltet alle Eigenschaften, die sich positiv oder negativ auf den erwarteten evolutionären Erfolg eines Individuums auswirken. Dieser wird formal als reproduktiver Wert repräsentiert, ein Maß für den erwarteten

genetischen Beitrag eines Individuums zur zukünftigen Zusammensetzung der Population.

Die Analyse des Elterninvestments in Abhängigkeit der elterlichen Kondition ist mit einigen spezifischen theoretischen Herausforderungen verbunden. Die meisten theoretischen Analysen (z.B. Trivers & Willard, 1973) legen statische Optimierungsmodelle zu Grunde, bei denen die reproduktiven Werte männlicher und weiblicher Nachkommen als konstant angenommen werden. Eine solche Annahme ist jedoch für sich geschlechtlich reproduzierende Organismen nicht haltbar, da ein Überschuss des einen Geschlechts zwangsweise den reproduktiven Wert von Vertretern des anderen Geschlechts erhöht. In einer Population aus 100 weiblichen und einem männlichen Individuum wäre zum Beispiel das männliche Individuum zwangsweise der Vater aller Individuen der Nachkommengeneration, sein Beitrag wäre also 100%. Gegeben, dass das männliche Individuum im Laufe seines Lebens mehr als eine Fortpflanzungspartnerin hat, wäre der durchschnittliche Beitrag eines weiblichen Individuums zur Nachkommengeneration entsprechend geringer (Fisher, 1930). Aus diesem Grund sind verhaltensökologische Modelle, die sich auf das Verhältnis von männlichen zu weiblichen Individuen in der Population beziehen, besonders anfällig für fehlerhafte Vorhersagen, wenn reproduktive Werte als konstant angenommen werden. Darüber hinaus kann eine ungleiche geschlechtliche Zusammensetzung der zur Fortpflanzung verfügbaren Individuen zu Konkurrenz um Reproduktionsgelegenheiten führen, was wiederum Einfluss auf die geschlechtsabhängigen reproduktiven Werte und die damit assoziierten Eigenschaften nehmen kann.

In den in dieser Habilitationsschrift vorgestellten Arbeiten werden daher keine statischen Modelle verwendet, sondern Modelle für die evolutionäre

Dynamik, also den langfristigen Verlauf der natürlichen Selektion. Den Ausgangspunkt für die verwendeten Methoden bilden demografische Populationsmodelle, welche die Anzahl männlicher und weiblicher Individuen unterschiedlicher Kondition als Resultat einer bestimmten Verhaltensstrategie (z.B. „Wenn du in guter Kondition bist, produziere nur männliche Nachkommen!“) über den zeitlichen Verlauf betrachten. Derartige Populationsmodelle konvergieren in der Regel schnell (d.h. im Verlauf von einigen Dutzend Generationen) zu einem demografischen Gleichgewicht, in welchem die relative Verteilung der Geschlechter und der Kondition über die Zeit stabil bleibt. Diese stabile Populationszusammensetzung kann dann genutzt werden um zu bestimmen, ob sich minimale Abweichungen von der betrachteten Verhaltensstrategie in der etablierten Population durchsetzen können. Dies ist bei seltenen, kleinen Abweichungen immer dann der Fall, wenn die abweichende Variante eine höhere Wachstumsrate aufweist als die etablierte Variante (Doebeli, 2011). Wenn sich eine neue Variante durchsetzt, wird diese als neue etablierte Strategie behandelt und das Modell erneut iteriert. Auf diese Weise lässt sich die Dynamik der natürlichen Selektion über viele Generationen vereinfacht als Aufeinanderfolge so genannter „Invasionen“ modellieren. Diese evolutionäre Invasionsanalyse in Kombination mit nichtlinearen Populationsmodellen, welche die dynamische Anpassung der reproduktiven Werte berücksichtigen, ist der gemeinsame methodische Überbau der beiden Arbeiten.

In Borgstede (2019a) geht es um die Frage, inwieweit sich im Rahmen einer evolutionären Invasionsanalyse evolutionär stabile Strategien für die Aufteilung elterlichen Investments nach der Geburt der Nachkommen ergeben. Evolutionär stabile Strategien sind Strategien, die – wenn sie sich einmal in einer Population etabliert haben – von keiner anderen Strategie verdrängt werden können. Den theoretischen Hintergrund der

Arbeit bildet die so genannte Trivers-Willard Hypothese (Trivers & Willard, 1973). Die Trivers-Willard Hypothese besagt, dass Eltern in guter Kondition mehr in das Geschlecht investieren, das eine höhere Variabilität im reproduktiven Wert aufweist. Bei vielen Huftieren kovariiert zum Beispiel die Körpergröße recht stark mit dem reproduktiven Erfolg männlicher Individuen, nicht jedoch mit dem reproduktiven Erfolg weiblicher Individuen. Gegeben, die Körpergröße wird von Eltern zu Nachkommen vererbt, müsste es in diesem Fall für große Eltern vorteilhafter sein, männliche Nachkommen zu produzieren als weibliche. Die Trivers-Willard Hypothese wurde in zahlreichen Spezies empirisch bestätigt (z.B. Cameron & Dalerum, 2009; Charnov et al., 1981; Clutton-Brock et al., 1984, 1986), konnte aber vor allem in Hinblick auf nachgeburtliche Investitionen bisher weder eindeutig belegt noch widerlegt werden (z.B. Byers & Moodie, 1990; Cameron & Linklater, 2000; Cronk, 2007; Hinde, 2009). Ein Grund hierfür könnte nach neuesten theoretischen Analysen darin bestehen, dass die Aufteilung nachgeburtlicher Investitionen vom *Zuwachs* im reproduktiven Wert der Nachkommen (also dem marginalen Nutzen auf evolutionärer Ebene) abhängt und nicht vom absoluten reproduktiven Wert der Nachkommen (Lazarus, 2002; Veller et al., 2016). Wenngleich die Faktoren, von denen die Aufteilung nachgeburtlicher Investitionen abhängen, hinreichend bekannt sind, gibt es bisher keine theoretischen Untersuchungen zu den zu erwartenden evolutionär stabilen Strategien. Daher widmet sich die Arbeit von Borgstede (2019a) der Frage, welche Aufteilung des elterlichen Investments zwischen männlichen und weiblichen Nachkommen sich langfristig evolutionär entwickeln müsste, wenn ein Geschlecht eine höhere Variabilität im reproduktiven Wert hat als das andere. Das verwendete Modell beschreibt die demografische Entwicklung der Population als dynamisches System in Form eines Matrix-Populations-Modells (Caswell, 2001). Das Besondere am verwendeten

Modell ist, dass es neben der Unterteilung der Population in gute und schlechte Kondition („high quality“ und „low quality“) auch die verschiedenen Geschlechter in verschiedenen Lebensstadien („juvenile“ und „adult“) berücksichtigt, sowie paarungsfähige Individuen zumindest zeitweise zu stabilen Partnerschaften („reproductive units“) zusammenfasst. Durch diese Populationsstruktur ist es möglich, die Effekte unterschiedlich hohen Elterninvestments auf das Heranwachsen der Nachkommen zu modellieren, sowie die sich daraus ergebende Zusammensetzung der fortpflanzungsfähigen und zur Paarbildung zur Verfügung stehenden Individuen dynamisch abzubilden. Durch systematische Variation einzelner demografischer Parameter (z.B. der Wahrscheinlichkeit, dass ein männliches Individuum guter Kondition von weiblichen Individuen guter Kondition als Partner in Betracht gezogen wird) wird darüber hinaus die Variabilität im reproduktiven Wert männlicher und weiblicher Individuen verändert. Die Auswirkungen dieser Parameterveränderungen auf die sich langfristig entwickelnden evolutionär stabilen Strategien ergeben sich aus der Anwendung der evolutionären Invasionsanalyse. Auf diese Weise entstehen je nach spezifischer Demografie unterschiedliche evolutionäre Dynamiken. Das Hauptergebnis der Analyse in Borgstede (2019a) ist, dass Eltern dahingehend selektiert werden mehr in das Geschlecht zu investieren, das eine höhere Variabilität im reproduktiven Wert hat – und zwar unabhängig von ihrer Kondition. Diese Vorhersage unterscheidet sich substantiell von der ursprünglichen Trivers-Willard Hypothese für Geburtenverhältnisse.

Der zweite Artikel zum Thema elterliches Investment (Borgstede, 2021a) handelt von der evolutionären Dynamik konditionsabhängiger Geburtenverhältnisse. Anders als in Borgstede (2019a) geht es demnach nicht um Investitionen in bereits geborene Nachkommen, sondern um vorgeburt-

liche Investitionen, welche sich im relativen Anteil männlicher bzw. weiblicher Individuen in der Nachkommenschaft niederschlagen. Frühere Analysen haben gezeigt, dass die Vorhersagen von Trivers und Willard nur unter sehr spezifischen Bedingungen gelten und sich je nach demografischer Zusammensetzung der Population stark verändern und sogar umkehren können (Schindler et al., 2015). Der Grund hierfür ist wiederum die Veränderung der reproduktiven Werte männlicher und weiblicher Nachkommen durch ungleiche Geburtenverhältnisse. In bisherigen Studien wurde jedoch wenig auf die Auswirkungen dieser Populationsrückkopplung auf die langfristige evolutionäre Dynamik geachtet. Je nachdem, wie stark die Effekte der konditionsabhängigen Geburtenverhältnisse auf die demografische Zusammensetzung der Population sind, könnten sich mitunter abweichende Vorhersagen ergeben. Daher wird in Borgstede (2021a) die langfristige evolutionäre Dynamik sich verändernder Geburtenverhältnisse untersucht. Den Ausgangspunkt bildet wieder ein demografisches Populationsmodell mit einer expliziten Unterteilung nach Geschlecht. Allerdings wird die Kondition der Individuen nicht in Form zweier qualitativ zu unterscheidenden Kategorien (hoch vs. niedrig) beschrieben, sondern als kontinuierliche Individuenvariable. Entsprechend wird für die Beschreibung der Differentialgleichungen keine Matrix verwendet, sondern ein so genanntes Integral-Projektions-Modell (Ellner & Rees, 2006), bei dem die Dynamik der Dichteverteilung einer kontinuierlichen Variablen beschrieben wird. Die Parameter des Modells stammen aus einem veröffentlichten Modell zur Demografie einer Population von Columbia-Zieseln (*Urocitellus columbianus*), welches anhand von über mehrere Jahre gesammelten Daten im Sheep River Provincial Park in Alberta (Kanada) konstruiert wurde (Schindler et al., 2013). Als Konditionsvariable diente im Fall der Columbia-Ziesel das Körpergewicht. Die Repräsentation der Konditionierungsvariable als Kontinuum

ermöglicht eine realitätsnähere Modellierung, erschwert allerdings die Formulierung der Verhaltensstrategie als bedingte Regel. Während es im Falle zweier qualitativ unterschiedlicher Konditionen ohne weiteres möglich ist, für jede der beiden Ausprägungen eine Verhaltensregel anzugeben, bräuchte man im Falle einer kontinuierlichen Variable potenziell unendlich viele derartige Regeln – für jede mögliche Ausprägung eine. Um dieses Problem zu lösen, wurde eine neue Methode entwickelt, bei welcher die Verhaltensstrategie durch eine nichtparametrische Funktion beschrieben wird. Statt also für jede mögliche Gewichtsausprägung eine eigene Regel zu formulieren, wird die relative Geburtenrate männlicher bzw. weiblicher Nachkommen als kontinuierliche Funktion des Elterngewichts beschrieben. Um möglichst wenige Einschränkungen in Hinblick auf die Form dieser Funktion einzuführen, wurde diese Funktion statistisch durch eine nichtparametrische Spline-Funktion approximiert. Im Rahmen der evolutionären Invasionsanalyse wurden nun in jedem Schritt minimale zufällige Abweichungen von der etablierten Funktion (d.h. der etablierten Verhaltensstrategie) eingeführt, die dann mittels einer neuen Spline-Funktion statistisch approximiert wurden (vgl. Green & Silverman, 2000). Auf diese Weise lassen sich nahezu beliebige Veränderungen der Funktionsform erzielen, die dann jeweils hinsichtlich ihrer evolutionären Überlegenheit evaluiert werden können. Die resultierende evolutionäre Dynamik der bedingten Geburtenverhältnisse weist, wie erwartet, starke nichtlineare Effekte auf, die je nach initialer Strategie unterschiedlich ausgeprägt sind. Trotz dieser Nichtlinearität konvergieren alle Simulationen zu ein und derselben evolutionär stabilen Strategie. Im Fall der untersuchten Columbia-Ziesel-Population handelt es sich hierbei um eine monoton fallende Funktion (d.h. Eltern mit geringem Gewicht produzieren mehr männliche, Eltern mit hohem Gewicht mehr weibliche

Nachkommen). Diese Vorhersage für die langfristige Dynamik der evolvierenden Verhaltensstrategie stimmt in ihrer Richtung mit früheren (statischen) Analysen überein, jedoch ist der vorhergesagte Effekt deutlich stärker ausgeprägt als bisher vermutet.

Zusammengenommen leisten die beiden genannten Veröffentlichungen einen wichtigen Beitrag zur Theoriebildung im Bereich der geschlechtersensiblen elterlichen Investitionen und der Etablierung dynamischer Modellierungstechniken in der Verhaltensökologie im Allgemeinen. Die Arbeiten zeigen darüber hinaus, dass nichtlineare Effekte aufgrund sich ändernder demografischer Populationszusammensetzungen entscheidend für die spezifischen Vorhersagen sind, die aus einer Theorie abgeleitet werden.

3.3.2 Verhaltensselektion

Die bisher vorgestellten Arbeiten handelten von populationsbasierten Selektionsmodellen für adaptives Verhalten. Aufbauend auf der Idee, dass sich die Interaktion zwischen Individuen und ihrer Umgebung grundsätzlich durch die Analyse von Selektionsprozessen verstehen lässt, werden im Folgenden eine Reihe von Arbeiten beschrieben, in denen das abstrakte Prinzip der Selektion auf Ebene individueller Verhaltensanpassungen angewandt wird.

Die Idee, dass individuelle Verhaltensänderungen analog zu einem evolutionären Prozess ablaufen könnten, kursiert bereits seit über einem Jahrhundert (Thorndike, 1900). Die Analogie zwischen Lernen und Evolution wurde seither immer wieder aufgegriffen und zur Erklärung individueller Verhaltensanpassungen genutzt (Broadbent, 1961; D. T. Campbell, 1956; Gilbert, 1970; Pringle, 1951; C. Simon & Hesses, 2019; Skinner, 1981; Staddon & Simmelhag, 1971). Es wurden verschiedene

Versuche unternommen, Lernen durch Verstärkung im Sinne evolutionärer oder quasi-evolutionärer Selektionsprozesse zu beschreiben, um die Integration von Lernen und Evolution in einem gemeinsamen konzeptuellen Rahmen zu ermöglichen.

Skinner (1981) beschreibt mit „Selection by Consequences“ einen kausalen Erklärungsmodus, der sich auf unterschiedlichen Ebenen des Verhaltens manifestiert. Verstärkung ist demnach nicht nur ähnlich zu Evolution, sondern Lernen und Evolution sind gleichwertige Instanzen eines übergeordneten Prinzips. Skinners Auffassung von Selektion als allgemeines Erklärungsprinzip für adaptives Verhalten wurde sehr unterschiedlich aufgenommen und zum Teil heftig kritisiert (vgl. die Open Peer Commentaries zum reprint des Artikels in Behavioral and Brain Sciences im Jahr 1984).

Die Idee, Selection by Consequences sei ein kausal wirkendes Prinzip, welches individuelle Verhaltensanpassungen ebenso hervorbringt wie evolutionäre Anpassungen ganzer Spezies, wurde unter anderem von Donahoe et al. (1993) aufgegriffen, um die der Verhaltensselektion zu Grunde liegenden neuronalen Mechanismen in einem formalen Modell zu beschreiben. Das erklärte Ziel bei diesem Ansatz war, analog zur genetischen Grundlage der biologischen Evolution, eine neuronale Grundlage für Transmission und Selektion im Rahmen individuellen Lernens zu schaffen. Mit Hilfe des vorgeschlagenen „Unified Reinforcement Principle“ gelingt es der Arbeitsgruppe, verschiedene empirische Phänomene im Kontext der operanten und klassischen Konditionierung zu erklären. Allerdings bleibt offen, ob und, wenn ja, in welcher Weise das Unified Reinforcement Principle tatsächlich einen Selektionsprozess beschreibt.

Ein paralleler Diskurs wurde im Bereich der Neurowissenschaften geführt. Ausgehend von mathematischen Modellen grundlegender synaptischer Plastizität (wie beispielsweise der Hebb'schen Lernregel) wurde wiederholt ein „Neural Darwinism“ vorgeschlagen, um die grundlegenden Prinzipien neuronaler Prozesse zu beschreiben (Changeux et al., 1984; Edelman, 1987). Jedoch kommen Fernando et al. (2012) in einem Überblicksartikel zu dem Ergebnis, dass kaum ein Ansatz überzeugende Argumente dafür liefert, dass neuronale Vorgänge sich als Selektionsprozess beschreiben lassen. Die Gründe hierfür sind dieselben wie im verhaltensanalytischen Diskurs: Selten wird überhaupt der Versuch unternommen, explizit zu klären, worin genau die neuronalen Entsprechungen für die konstituierenden Faktoren eines Selektionsprozesses – Variation, Transmission und Selektion – bestehen. Eine Ausnahme findet sich in den Arbeiten von Loewenstein, der explizite populationsbiologische Modelle auf Ensembles von Neuronen anwendet und unter anderem empirische Phänomene wie operantes Matching (Herrnstein, 1961) oder spezifische Lernalgorithmen herleitet (Loewenstein, 2008, 2010; Loewenstein & Seung, 2006).

In der Verhaltensanalyse gibt es bisher nur wenige Versuche, das Prinzip der Selektion im Rahmen der formalen Theoriebildung nutzbar zu machen. Eine notwendige Voraussetzung hierfür war der Wechsel der Analyseebene von der „molekularen“ zur „molaren“ Perspektive (Rachlin, 1978). Statt den Fokus auf einzelne Verhaltensinstanzen (wie z.B. das Drücken eines Hebels) zu richten, betrachtet der molare Ansatz Verhalten auf einem höheren Abstraktionslevel und befasst sich entsprechend weniger mit den Relationen einzelner Stimuli und Responses, sondern mit durchschnittlichen Verhaltensraten, die über einen längeren Zeitraum aggregiert werden. Lernen besteht demnach nicht in der Ausbildung von Assoziationen oder situativen Entscheidungen, sondern in der

gradueller Veränderung kontextabhängiger Verhaltensraten (Baum, 2002). Theoretische Entwicklungen wie das Correlation Based Law of Effect (Baum, 1973) schufen das notwendige Vokabular, um Verhaltensweisen sinnvoll als „Populationen“ (im Sinne der Verhaltensweisen, die in einer bestimmten Zeitspanne innerhalb eines Kontextes beobachtet werden) konzeptualisieren zu können.

Einer der ambitioniertesten Versuche, das Prinzip der Selektion im Rahmen eines molaren Modells der Verhaltensanpassung umzusetzen, stammt von McDowell (2004). McDowells „Computational Model of Behavioral Selection“ erhebt nicht den Anspruch, neuronale Mechanismen abzubilden, sondern stellt den Versuch dar, ein evolutionär inspiriertes, formales Modell zu konstruieren, das „computationally equivalent“ zu den tatsächlich ablaufenden Prozessen ist. Konkret stellt McDowell eine Reihe evolutionärer Algorithmen vor, die in der Lage sind, verschiedene empirisch gefundene Verhaltensdynamiken zu simulieren. Die elementaren Analyseeinheiten sind hierbei nicht die beobachteten Verhaltensweisen selbst, sondern „potentielle“ Verhaltensweisen, die zu jedem Zeitpunkt in Form einer abstrakten Population konzeptualisiert werden. Diese potenziellen Verhaltensweisen variieren in verschiedenen Dimensionen und werden in dem Maße selektiert, wie sie tatsächlich an den Tag gelegten und verstärkten Verhaltensweisen ähneln. Entsprechend eines evolutionären Algorithmus, werden die „überlebenden“ potenziellen Verhaltensweisen miteinander gekreuzt, so dass deren „Nachkommen“ (ebenfalls potenzielle Verhaltensweisen) hinsichtlich der variierenden Dimensionen ihren „Eltern“ im Schnitt ähneln. Das Computational Model of Behavioral Selection liefert empirisch adäquate Vorhersagen für zahlreiche Experimentalparadigmen (McDowell, 2013). Darüber hinaus ist es das erste verhaltensbasierte Modell, in dem Lernen nicht nur analog zu natürlicher Selektion betrachtet wird, sondern tatsächlich in Form eines

Selektionsprozesses formalisiert wird. Nichtsdestotrotz ist die Vorstellung einer abstrakten Population potenzieller Verhaltensweisen, die sich fortpflanzen und Eigenschaften vererben, weder aus verhaltensanalytischer noch aus neuropsychologischer Sicht überzeugend. McDowells Arbeiten zeigen, dass es möglich ist, bestimmte Lernprozesse mittels evolutionärer Algorithmen zu imitieren, nicht aber, dass es sich tatsächlich um Selektionsprozesse handelt.

Ein anderer Ansatz, Lernen formal als Selektionsprozess zu beschreiben, stammt von Baum (2017). Baum liefert eine auf der Price-Gleichung basierende Interpretation von operanter Konditionierung, bei der die einzelnen Verhaltensweisen in einem Experimentaltrial mit den Individuen einer Elterngeneration identifiziert werden, und die Verhaltensweisen in einem späteren Trial als Individuen einer Nachkommengeneration. Im Gegensatz zu McDowells Ansatz handelt es sich hierbei um tatsächlich beobachtete Verhaltensweisen und nicht um theoretische Abstraktionen. Baum interpretiert die Veränderung von einem Trial zum nächsten als Resultat von „behavioral selection“ im Sinne der Kovarianz zwischen dem Auftreten einer Verhaltensweise im ersten Trial und der Verstärkerrate im ersten Trial. Baum liefert somit erstmals ein formales Modell, das Lernen selbst (nicht neuronale Plastizität oder fiktionale potenzielle Verhaltensweisen) als Selektionsprozess beschreibt. Allerdings funktioniert Baums Modell nur unter der Annahme, dass es keine weiteren Einflüsse auf die Verhaltensänderung zwischen den Trials außer der Verstärkung gibt.

Die bisherige Forschung hat das Thema „Lernen als Selektionsprozess“ aus verschiedenen Perspektiven betrachtet, von der verbalen Analogie über die Modellierung neuronaler Mechanismen zu molaren Ansätzen der Verhaltensselektion. So unterschiedlich die Herangehensweisen auch

sein mögen, haben sie doch eine Gemeinsamkeit: Lernen und Evolution werden als ähnliche (oder analoge), aber *separate* Prozesse konzeptualisiert. Zwar existieren Bemühungen zu einer funktionalen Integration beider Selektionsebenen in verschiedenen Disziplinen, allerdings gibt es bisher keine Integration von Lernen und Evolution im Rahmen eines gemeinsamen Modells, welches adaptives Verhalten auf beiden Ebenen als Selektionsprozess beschreibt.

Ein verhaltensanalytischer Versuch in Richtung der theoretischen Integration beider Prozesse findet sich bei Baum (2012), der Verstärker mit so genannten „Phylogenetically Important Events (PIEs)“ gleichsetzt. PIEs sind Ereignisse, die für das Überleben und die Fortpflanzung einer Spezies unmittelbar relevant sind (etwa die Verfügbarkeit von Futter oder die An- bzw. Abwesenheit physischer Bedrohung). Baum zufolge sind Verstärker deshalb verstärkend, weil sie die erwartete evolutionäre Fitness von Individuen erhöhen. Ein ähnliches Konzept verfolgen auch Singh et al. (2010), welche die Fitnesskonsequenzen von Verstärkern in numerischen Simulationen explizit modellieren und auf diese Weise zum Beispiel die verstärkende Wirkung von Explorationsverhalten erklären. Allerdings verknüpfen weder Baum (2012) noch Singh et al. (2010) ihr evolutionäres Konzept der Verstärkung mit einem expliziten Selektionsmodell für individuelles Verhalten.

Schließlich gibt es einen umfangreichen biologischen Diskurs über die Evolution des Lernens (siehe Aoki & Feldman, 2014 für einen Überblick). Hier werden entweder ganze Lernalgorithmen oder einzelne Parameter von Lernalgorithmen als individuelle Phänotypen betrachtet, die ihrerseits durch natürliche Selektion geformt werden (McNamara & Houston, 2009). Modelle zur Evolution spezifischer Lernalgorithmen nehmen aller-

dings lediglich in Hinblick auf evolutionäre Anpassungen eine Selektionsperspektive ein, nicht aber in Hinblick auf das Lernen selbst. Somit liefern auch sie keine Integration von Lernen und Evolution im Rahmen eines gemeinsamen Selektionsmodells. Ohne eine solche Integration bleibt die Verwendung eines evolutionären Vokabulars für die Analyse individueller adaptiver Verhaltensprozesse eine rhetorische Metapher. Benötigt wird ein formales Selektionsmodell, das die Ebene der natürlichen Selektion mit der Ebene der individuellen Verhaltensselektion vereint. Das gemeinsame Thema der im Folgenden vorgestellten Arbeiten ist die Entwicklung eines derartigen formalen Modells.

Eine erste formale Verknüpfung zwischen Lernen und Evolution wird in Borgstede (2020) vorgenommen. Den Ausgangspunkt dieses Artikels stellt die Betrachtung von Selektion als Optimierungsalgorithmus dar. Im evolutionären Kontext bedeutet dies, dass natürliche Selektion als Mechanismus der Fitnessmaximierung betrachtet wird (Caswell, 1982). Diese Betrachtungsweise ermöglicht im Kontext der Evolutionsbiologie, Vorhersagen für evolutionäre Endpunkte aus formalen Optimierungsmodellen abzuleiten. Im Rahmen der Verhaltensökologie werden derartige Optimierungsmodelle, die eigentlich auf Populationsebene ansetzen, oft auch zur Vorhersage individueller Verhaltensanpassungen verwendet. Eine analoge Herangehensweise hat sich auch im Bereich der Verhaltensökonomik etabliert. Hier werden formale Modelle der Nutzenoptimierung verwendet, um Gleichgewichtspunkte für individuelle Verhaltensweisen vorherzusagen. Optimierungsmodelle auf Individuenebene werden jedoch in der Regel unabhängig von entsprechenden Optimierungsmodellen auf Populationsebene betrachtet. Daraus ergeben sich eine Reihe von Problemen. Zum einen lässt die isolierte Betrachtung individueller Nutzenoptimierung im Prinzip beliebige Nutzenfunktionen zu, so dass kaum empirisch entschieden werden kann, ob zum Beispiel

im Einzelfall nicht optimiert wird, oder ob lediglich das Optimalitätskriterium nicht richtig erkannt wurde. Zum anderen ist das Resultat individueller Optimierungsprozesse in der Regel Verhalten, welches sich wiederum auf die individuell verfügbaren Ressourcen, und dadurch auf die zu erwartenden Überlebens- und Reproduktionschancen auswirkt. Weil das Ergebnis der individuellen Optimierungsprozesse Einfluss auf das Optimalitätskriterium auf Populationsebene (Fitness) nimmt, hängen beide Prozesse unweigerlich miteinander zusammen. In Borgstede (2020) wird dieser Zusammenhang in den Fokus genommen. Die theoretische Analyse baut auf formalen Modellen der Evolutionsbiologie auf, welche individuelle Fitness in Abhängigkeit zur Demografie einer Population definieren. Die demografischen Modelle sind eng verwandt mit denen aus Borgstede (2019a) und Borgstede (2021a), werden hier jedoch nicht für die Herleitung spezifischer Hypothesen verwendet, sondern in Hinblick auf generelle mathematische Modelleigenschaften untersucht. Insbesondere wird die Frage beantwortet, wie der mathematische Zusammenhang zwischen der evolutionären Fitness und einem individuellen Optimierungskriterium aussehen kann, wenn Individuen beides simultan optimieren. Das Ergebnis der Analyse lautet, dass ein individuelles Optimierungskriterium, dessen Optimierung sich auf evolutionär relevante Verhaltensweisen auswirkt, proportional zum erwarteten Zuwachs im reproduktiven Wert sein muss. Dieser so genannte „Verstärkerwert“ schlägt eine erste formale Brücke zwischen natürlicher Selektion und individuellen Verhaltensanpassungen.

Im Artikel von Borgstede und Eggert (2021) werden auf diesem ersten Ergebnis aufbauend Verhaltensanpassungen auf Populationsebene und Verhaltensanpassungen auf Individuenebene im Rahmen eines integrativen Selektionsmodells zusammengeführt. Das so genannte „Multilevel Model of Behavioral Selection (MLBS)“ beruht, ähnlich wie der Ansatz

von Baum (2017), auf der abstrakten Beschreibung von Selektionsprozessen durch die Price-Gleichung. Im Gegensatz zu Baum wird individuelles Verhalten jedoch nicht isoliert von natürlicher Selektion betrachtet, sondern auf beiden Ebenen zugleich. Dadurch gelingt eine funktionale Integration von Lernen und Evolution im Rahmen eines gemeinsamen Selektionsmodells. Kernannahme des MLBS ist, dass individuelle Lernprozesse nur in dem Maße adaptiv sein können, wie sie Zuwachs in evolutionärer Fitness begünstigen. Daher bildet den gemeinsamen Ausgangspunkt natürlicher Selektion und individueller Verhaltensselektion das Konzept der evolutionären Fitness. Selektion auf Individuenebene (im Sinne operanter Verstärkung) kann demnach nur stattfinden, sofern das selektierte Verhalten die erwartete individuelle Fitness erhöht. Dementsprechend werden Verstärker als so genannte Fitnessprädiktoren (oder Fitness-Proxies) definiert, die (ähnlich wie Baums PIEs) die Vorhersage einer erwarteten Fitnesserhöhung ermöglichen. Wenn ein Fitnessprädiktor innerhalb eines bestimmten Kontextes (beispielsweise im Rahmen eines Experiments zur operanten Verstärkung) mit der Ausprägung einer bestimmten Verhaltensweise (beispielsweise der Hebeldruckrate während verschiedener Trials) kovariiert, erhöht sich die durchschnittliche Verhaltensausprägung in dem Maße, wie sie Zuwachs in evolutionärer Fitness vorhersagt. Dieser grundlegende Zusammenhang zwischen Verstärkung und evolutionärer Fitness wird als das „Covariance Based Law of Effect (CLOE)“ bezeichnet.

Formal besteht das MLBS in einer Erweiterung der Price-Gleichung. Der entscheidende Punkt ist, dass der Erwartungswertterm in Gleichung 1 im Sinne individueller Verhaltensänderungen interpretiert werden kann, sofern man die Betrachtung auf die Überlebenskomponente der evolutionären Fitness beschränkt (dann ist jedes überlebende Individuum aus der Elterngeneration ein „Nachkomme“ seiner selbst). Betrachtet man diese

intraindividuellen Veränderungen wiederum als Ergebnis eines Selektionsprozesses, kann man die Price-Gleichung entsprechend erweitern:

$$\bar{w}\Delta\bar{z} = \text{Cov}_i(z, w) + E_i \left(\text{Cov}_j(z, w) + E_j(w\Delta z) \right) \quad (2)$$

w und \bar{w} sind definiert wie gehabt, z bezeichnet die Verhaltensausrprägung (z.B. die Hebeldruckrate in einem Experimentaltrial) und \bar{z} die durchschnittliche Verhaltensausrprägung über mehrere Experimentaltrials. Die Veränderung des durchschnittlichen Verhaltens $\Delta\bar{z}$ lässt sich nun in einen Kovarianzterm auf Populationsebene ($\text{Cov}_i(z, w)$, entspricht natürlicher Selektion) und den Populationserwartungswert E_i über die individuellen Verhaltensänderungen zerlegen. Die individuellen Verhaltensänderungen werden wiederum entsprechend der Price-Gleichung in einen intraindividuellen Kovarianzterm ($\text{Cov}_j(z, w)$, entspricht Verstärkung) und einen intraindividuellen Erwartungswert ($E_j(w\Delta z)$, entspricht Verhaltensänderungen, die nicht durch Verstärkung verursacht werden) zerlegt. Schließlich wird eine funktionale Verknüpfung beider Ebenen über das Konzept der Fitnessprädiktoren (beispielsweise die erwartete Futtermenge) vorgenommen, indem die Fitnessschwankungen auf intraindividuelle Ebene durch vorhergesagte Fitnesswerte ersetzt werden. Approximiert man diese Vorhersage mittels einer linearen Regression der Form $w = \beta_0 + \beta_{wp}p + \varepsilon$, ergibt sich der individuelle Selektionsteil als:

$$w\Delta z = \beta_{wp}\text{Cov}_j(z, p) + \delta \quad (3)$$

Die Arbeit von Borgstede und Eggert (2021) demonstriert ferner, wie mit Hilfe des Covariance Based Law of Effect vielfältige empirische Effekte erklärt werden können, beispielsweise die Herausbildung konditionierter Verstärker, die Abhängigkeit der Effektivität von Verstärkern von ihrer Vorhersagekraft (Kamin, 1969), die verstärkende Wirkung selten ausge-

führter Verhaltensweisen (Premack & Premack, 1963) oder die Veränderung der verstärkenden Wirkung verschiedener Verhaltensweisen durch äußere Restriktionen (Timberlake & Allison, 1974).

Das Covariance Based Law of Effect wird in einer weiteren Veröffentlichung (Borgstede & Luque, 2021) in seiner Rolle als fundamentales Verhaltensprinzip in den Kontext der semantischen Theoriekonzeption eingeordnet. Vor dem Hintergrund einer wissenschaftshistorischen Perspektive wird zunächst dargelegt, welche Rolle die Suche nach fundamentalen Prinzipien im Rahmen der verhaltensanalytischen Theoriebildung im Laufe der Geschichte eingenommen hat. Während der frühe Behaviorismus von einer Reihe großer theoretischer Entwürfe geprägt war (z.B. Hull et al., 1940; Tolman, 1938), scheint substanzielle Theoriebildung in der modernen Verhaltensanalyse kaum eine Rolle zu spielen. Es wird argumentiert, dass diese Entwicklung wesentlich auf den starken Einfluss B.F. Skinners auf die inhaltliche, methodische und wissenschaftstheoretische Ausrichtung der Verhaltensanalyse zurückgeht. Skinner (1950) sprach sich dezidiert gegen abstrakte Theoriebildung aus und schlug stattdessen vor, eine datengetriebene Verhaltenspsychologie zu etablieren. Statt nach allgemeinen, abstrakten Erklärungsprinzipien zu suchen, bestand die Aufgabe der Psychologie nach Skinner primär darin, beobachtbare Verhaltensweisen zu quantifizieren und mittels mathematischer Funktionen zu relationieren. Ein solches Vorgehen legt den Schwerpunkt auf Exploration und auf die Generierung reproduzierbarer Phänomene. Übergeordnete Prinzipien, so Skinner, seien nicht notwendig, um funktionale Relationen zwischen beobachtbaren Größen zu entdecken (Skinner, 1950). Zwar räumt Skinner ein, dass das letztendliche Ziel der Wissenschaft die Formulierung ebensolcher allgemeiner Prinzipien sei, verweist aber gleichzeitig darauf, dass die zu seiner Zeit vorliegenden theoretischen Entwürfe zu wenig empirisch verankert und

dadurch spekulativ und letztlich unbrauchbar seien. Vor diesem Hintergrund erstaunt es nicht, dass Skinner in seinen späteren Arbeiten vorschlug, adaptives Verhalten in einem selektionstheoretischen Kontext zu analysieren. Das vorgeschlagene fundamentale Prinzip nannte er „Selection by Consequences“ (vgl. Abschnitt 2.3), ohne es jedoch in den Kontext der durch Price angestoßenen formalen Selektionstheorie einzubinden. Die Arbeit von Borgstede und Luque (2021) knüpft genau an dieser Stelle an. Vor dem Hintergrund des MLBS wird das Prinzip der Selektion durch Konsequenzen im Rahmen einer allgemeinen Selektionstheorie formal expliziert. In diesem Kontext wird das Covariance Based Law of Effect als grundlegendes Theorieelement beschrieben und in seiner Rolle als fundamentales Prinzip im Sinne der semantischen Theoriekonzeption diskutiert. Ausgehend von diesem fundamentalen Prinzip wird darüber hinaus ein Theorienetz aus weiteren verhaltensanalytischen Prinzipien konstruiert. In diesem Rahmen wird dargelegt, dass das Matching Law (Herrnstein, 1961), welches vielfach als fundamentales Prinzip vorgeschlagen wurde (vgl. Davison & McCarthy, 2016) sich aus selektionstheoretischer Perspektive eher als Spezialfall einer allgemeineren Gleichgewichtsbedingung verstehen lässt. Der Artikel schließt mit einer detaillierten Analyse empirischer Abweichungen vom Matching Law im Kontext verschiedener Zeitverzögerungen im Verstärkerplan, die sich unter Verwendung des Covariance Based Law of Effect vollständig erklären lassen. In Borgstede (2021b) schließlich dient das MLBS als theoretischer Erklärungsrahmen für den Zusammenhang zwischen Lernen und Informationszuwachs. Lernen scheint untrennbar mit der Suche nach Information verbunden zu sein. Eine gängige Erklärung für diesen Zusammenhang ist, dass Individuen aktiv entscheidende und handelnde Subjekte seien, die eine intrinsische Tendenz zur Informationssuche haben. Das Streben

nach Information wäre demnach die Triebfeder des Lernens oder mit anderen Worten – Individuen lernen, weil sie nach Information suchen. Diese Auffassung des intrinsischen Antriebs liegt zahlreichen informationstheoretischen Ansätzen in der Kognitionspsychologie zu Grunde, zum Beispiel der Theorie der aktiven Inferenz (Friston et al., 2006), oder der prädiktiven Kodierung (Clark, 2013). In Borgstede (2021b) wird argumentiert, dass der Rückgriff auf intrinsische Motive zur Erklärung eines so grundlegenden Phänomens einem essentialistischen Erklärungsmodus entspricht. Dies bedeutet, dass Erklärungen nicht auf Gesetzmäßigkeiten oder Prinzipien (welche Relationen zwischen Objekten beschreiben), sondern auf inhärente Kräfte (welche aus den Objekten selbst stammen) verweisen (Palmer & Donahoe, 1992). Während essentialistische Erklärungen in den Naturwissenschaften längst als überholt gelten, haben sie immer noch einen festen Platz in der Psychologie. In Borgstede (2021b) wird vorgeschlagen, den essentialistischen Erklärungsmodus zugunsten eines selektionistischen Erklärungsmodus fallen zu lassen. Mit dem Prinzip der Selektion, und insbesondere dessen Formalisierung im Rahmen des MLBS, ist die Möglichkeit gegeben, die Relationen zwischen den Objekten (in Form von Gesetzmäßigkeiten) in den Fokus zu nehmen. Eine Rückführung von Verhalten auf inhärente psychologische Kräfte (wie z.B. Absichten, Ziele oder Wille) ist daher nicht mehr notwendig und sollte, wie in der Naturwissenschaft, als inakzeptabler Erklärungsmodus beurteilt werden. Der Artikel zeigt ferner anhand eines Beispiels, wie der im Rahmen von Lernprozessen beobachtbare Informationszuwachs sich als Resultat von Selektionsprozessen erklären lässt. Das Kernargument ist, dass es in der Natur der Selektion liegt, Ordnung aus dem Chaos zu erschaffen. Wenn Lernen sich als Selektionsprozess verstehen lässt, ist folglich davon auszugehen, dass sich im Laufe des Lernens (im Rahmen des betrachteten Systems) zunehmend mehr Ordnung

ergibt. Das System wird regelhafter in dem Sinne, dass sowohl das Verhalten als auch dessen Konsequenzen mit fortschreitendem Lernen immer vorhersagbarer werden. Vorhersagbarkeit aber ist, formal gesehen, nichts Anderes als Information (Shannon, 1948). Daher lässt sich der Zuwachs in Information mathematisch in Form lokal abnehmender Entropie beschreiben. Das MLBS ermöglicht somit eine formale Verknüpfung zwischen dem Prinzip der Verhaltensselektion und informationstheoretischen Ansätzen der Psychologie. Diese Verknüpfung ist so eng, dass sich für das im Artikel betrachtete Beispiel sogar zeigen lässt, dass der graduelle Informationszuwachs, den das MLBS vorhersagt, mathematisch äquivalent zur Vorhersage aus einem entsprechenden essentialistischen Modell (dem Free Energy Principle, Friston, 2010) ist. Der Artikel endet mit einem Plädoyer für die Etablierung selektionistischer Erklärungsmodi in der Psychologie, um dem selbstgestellten Anspruch der (Natur-)Wissenschaftlichkeit gerecht zu werden.

4 Schlussfolgerungen

In dieser Habilitationsschrift ging es um die wissenschaftstheoretische, methodische und inhaltliche Bedeutung formaler Modellierung in der Psychologie. Vor dem Hintergrund einer semantischen Theoriekonzeption wurde argumentiert, dass formale Modelle ein notwendiger und oft vernachlässigter Bestandteil substanzieller Theoriebildung in der Psychologie sind. Auf methodischer Ebene ergab sich darüber hinaus, dass die fortschreitende Mathematisierung der Psychologie in erster Linie auf der Einführung und Weiterentwicklung statistischer Modelle zur Beschreibung empirischer Verhaltensdaten beruht. Es wurde herausgearbeitet, dass – im Gegensatz zu den etablierten Naturwissenschaften – wenig substanzielle Theoriebildung mittels formaler Modellierung praktiziert wird. Als möglicher Ausgangspunkt für eine derartige formale Theoriebildung wurde ein selektionstheoretischer Rahmen vorgeschlagen, welcher auf der abstrakten Beschreibung von Selektionsprinzipien durch mathematische Kovarianzstrukturen basiert.

Vor diesem metatheoretischen Hintergrund wurden insgesamt elf Publikationen vorgestellt und entsprechend ihrer jeweiligen Schwerpunktsetzung wissenschaftstheoretisch, methodisch und inhaltlich eingeordnet. Es wurde gezeigt, dass die formale Methode sowohl im Bereich der wissenschaftstheoretischen Grundlegung psychologischer Diagnostik als auch in Hinblick auf die Etablierung selektionstheoretischer Prinzipien in der Psychologie zu neuen und zum Teil unerwarteten Ergebnissen führen kann. Auf diagnostischer Ebene eröffnet die repräsentationale Verankerung wissenschaftlicher Konstruktionen einen Brückenschlag zwischen quantitativen und qualitativen Forschungsprogrammen, von dem beide Paradigmen potenziell profitieren können. Auf der einen Seite kann die systematische Formalisierung qualitativer Begriffsbildung dazu

beitragen, bestehende Interpretationspraktiken aus der qualitativen Forschungsmethodik besser zu verstehen, transparenter zu machen und leichter quantitativ überprüfbar zu machen. Auf der anderen Seite ermöglicht die Dekonstruktion quantitativer Begriffe im Sinne empirischer relationaler Strukturen, quantitative Modellbildung im Sinne substanzieller Theoriekonstruktion zu betrachten. Auf inhaltlicher Ebene ermöglicht das Prinzip der Selektion einen ähnlichen Brückenschlag zwischen verhaltensorientierter und kognitiver Psychologie. Indem das Selektionsprinzip beide Paradigmen transzendiert, schafft es gleichermaßen einen Raum für theoretische Neukonstruktionen, sowie für die Integration bestehender Analyseschemata.

Die Arbeiten zeigen darüber hinaus, wie fruchtbar eine inhaltlich motivierte, formale Theoriebildung in Hinblick auf die Erklärung und Integration scheinbar sehr unterschiedlicher Phänomene sein kann. Die gemeinsame Betrachtung biologischer Selektion auf Populationsebene und verhaltensbasierter Selektion auf Individuenebene ermöglicht eine formale Integration der Evolutionsbiologie mit der Verhaltenspsychologie. Die semantische Analyse verschiedener Theorieelemente in Form theoretischer Netzwerke ist ferner offen für Erweiterungen und Modifikationen und im Prinzip beliebig skalierbar. So können beispielsweise bereits jetzt Prinzipien aus der Psychophysik (z.B. Stevens' Potenzgesetz) mit Phänomenen aus der Verhaltensanalyse (z.B. operantes Matching) verknüpft werden, um bisher rätselhafte empirische Effekte zu erklären. Darüber hinaus eröffnet die formale und theoretische Integration des Selektionsprinzips mit informationstheoretischen Ansätzen eine mögliche Grundlage für ein tiefgreifendes Verständnis adaptiver Verhaltensprozesse jenseits der bestehenden Forschungstraditionen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Methode der formalen Modellierung mehr sein kann als statistische Datenanalyse. Inhaltlich motivierte formale Modelle wie das MLBS können dabei helfen, theoretische Ideen und Konzepte zu präzisieren, Ungenauigkeiten in theoretischen Argumenten aufzudecken, Inkonsistenzen zu beheben, sowie bestehende empirische Befunde zu erklären und neue Hypothesen herzuleiten. Die fortlaufende Koordination zwischen empirischen Beobachtungen und den verschiedenen Elementen eines Theorienetzes verleiht Messprozeduren eine inhaltliche Ebene (ihre „Bedeutung“) und ermöglicht gleichsam, allgemeine Prinzipien hinter ansonsten unverständlichen Phänomenen sichtbar zu machen. Eine solche Verknüpfung zwischen Theorie und Empirie ist nur möglich, wenn man die Datenanalyse formal mit den zu koordinierenden theoretischen Prinzipien verknüpft. Aus diesem Grund ist substanzielle formale Theoriebildung ebenso wichtig wie Experimentalmethodik und statistische Modellierung. Erst im Zusammenspiel dieser drei Aspekte entfaltet sich das volle Potenzial der wissenschaftlichen Methode

5 Literaturverzeichnis

- Aoki, K. & Feldman, M. W. (2014). Evolution of learning strategies in temporally and spatially variable environments: A review of theory. *Theoretical population biology*, 91, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2013.10.004>
- Balzer, W., Moulines, C. U. & Sneed, J. D. (1987). *An architectonic for science. The structuralist program*. Reidel.
- Baravalle, L. & Luque, V. J. (2021). Towards a Pricean foundation for cultural evolutionary theory. *THEORIA. An international journal for theory, history and foundations of science*, 37(2). <https://doi.org/10.1387/theoria.21940>
- Baum, W. M. (1973). The correlation-based law of effect. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 20, 137–153.
- Baum, W. M. (2002). From molecular to molar: a paradigm shift in behavior analysis. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 78(1), 95–116. <https://doi.org/10.1901/jeab.2002.78-95>
- Baum, W. M. (2012). Rethinking reinforcement: allocation, induction, and contingency. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 97(1), 101–124. <https://doi.org/10.1901/jeab.2012.97-101>
- Baum, W. M. (2017). Selection by consequences, behavioral evolution, and the price equation. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 107(3), 321–342. <https://doi.org/10.1002/jeab.256>
- Borgstede, M. (2019a). Is there a Trivers-Willard effect for parental investment? Modelling evolutionarily stable strategies using a matrix population model with nonlinear mating. *Theoretical population biology*, 130, 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2019.10.001>
- Borgstede, M. (2019b). Zwischen Definition und Empirie. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Pädagogik*, 95(2), 199–217. <https://doi.org/10.30965/25890581-09501018>

- Borgstede, M. (2020). An evolutionary model of reinforcer value. *Behavioural processes*, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2020.104109>
- Borgstede, M. (2021a). Evolutionary dynamics of the Trivers–Willard effect: A nonparametric approach. *Ecology and evolution*, 11(18), 12676–12685. <https://doi.org/10.1002/ece3.8012>
- Borgstede, M. (2021b). Why do individuals seek information? A selectionist perspective. *Frontiers in psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.684544>
- Borgstede, M. & Eggert, F. (2021). The formal foundation of an evolutionary theory of reinforcement. *Behavioural processes*, 186, 104370. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2021.104370>
- Borgstede, M. & Eggert, F. (2022). Squaring the circle: From latent variables to theory-based measurement. *Theory and psychology*. <https://doi.org/10.1177/09593543221127985>
- Borgstede, M. & Luque, V. J. (2021). The covariance based law of effect: A fundamental principle of behavior. *Behavior and philosophy*, 49, 63–81. https://behavior.org/wp-content/uploads/2022/01/BP-v49-Borgstede2_corrected.pdf
- Borgstede, M. & Scholz, M. (2021). Quantitative and qualitative approaches to generalization and replication – A representationalist view. *Frontiers in psychology*, 12, 605191. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.605191>
- Boring, E. G. (1923). Intelligence as the tests test it. *New republic*, 36, 35–37.
- Borsboom, D. (2005). *Measuring the mind: Conceptual issues in contemporary psychometrics*. Cambridge University Press.

- Borsboom, D. (2017). A network theory of mental disorders. *World psychiatry: Official journal of the World Psychiatric Association (WPA)*, 16(1), 5–13. <https://doi.org/10.1002/wps.20375>
- Bridgman, P. W. (1927). *The logic of modern physics*. Macmillan.
- Broadbent, D. E. (1961). *Behaviour*. Methuen.
- Buntins, M., Buntins, K. & Eggert, F. (2017). Clarifying the concept of validity: From measurement to everyday language. *Theory and psychology*, 27(5), 703–710. <https://doi.org/10.1177/0959354317702256>
- Byers, J. A. & Moodie, J. D. (1990). Sex-specific maternal investment in pronghorn, and the question of a limit on differential provisioning in ungulates. *Behavioral ecology and sociobiology*, 26, 157–165.
- Cameron, E. Z. & Dalerum, F. (2009). A Trivers-Willard effect in contemporary humans: Male-biased sex ratios among billionaires. *PLOS one*, 4(1), e4195. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004195>
- Cameron, E. Z. & Linklater, W. L. (2000). Individual mares bias investment in sons and daughters in relation to their condition. *Animal behaviour*, 60(3), 359–367. <https://doi.org/10.1006/anbe.2000.1480>
- Campbell, D. T. (1956). Adaptive behavior from random response. *Behavioral science*, 1(2), 105–110. <https://doi.org/10.1002/bs.3830010204>
- Carnap, R. (1974). *An introduction to the philosophy of science*. Dover Publications Inc.
- Caswell, H. (1982). Optimal life histories and the maximization of reproductive value: A general theorem for complex life cycles. *Ecology*, 63(5), 1218–1222. <https://doi.org/10.2307/1938846>
- Caswell, H. (2001). *Matrix Population Models. Construction, analysis, and interpretation. 2nd ed.* Sinauer Associates.

- Changeux, J.-P., Heidmann, T. & Patte, P. (1984). Learning by selection. In P. Marler & H. S. Terrace (Hrsg.), *The biology of learning. Report of the Dahlem workshop on the biology of learning Berlin, 1983, October 23–28* (S. 115–133). Springer.
- Charnov, E. L. (1982). *The theory of sex allocation. Monographs in population biology: Bd. 18*. Princeton University Press.
- Charnov, E. L., Hartogh, R. L. L., Jones, W. T. & van den Assem, J. (1981). Sex ratio evolution in a variable environment. *Nature*, 289(5793), 27. <https://doi.org/10.1038/289027a0>
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *The Behavioral and brain sciences*, 36(3), 181–204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477>
- Clutton-Brock, T. H., Albon, S. D. & Guinness, F. E. (1984). Maternal dominance, breeding success and birth sex ratios in red deer. *Nature*, 308(5957), 358. <https://doi.org/10.1038/308358a0>
- Clutton-Brock, T. H., Albon, S. D. & Guinness, F. E. (1986). Great expectations: dominance, breeding success and offspring sex ratios in red deer. *Animal Behaviour*, 34(2), 460–471. [https://doi.org/10.1016/S0003-3472\(86\)80115-4](https://doi.org/10.1016/S0003-3472(86)80115-4)
- Creath, R. (2021). Logical Empiricism. In E. N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford encyclopedia of philosophy* (2021. Aufl.). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Cronk, L. (2007). Boy or girl: gender preferences from a Darwinian point of view. *Reproductive biomedicine online*, 15(2), 23–32.
- Danziger, K. (2009). *Constructing the subject*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511524059>
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*. John Murray.

- Davies, N. B., Krebs, J. R. & West, S. A. (2012). *An introduction to behavioural ecology* (4. ed.). Wiley-Blackwell.
- Davison, M. & McCarthy, D. (2016). *The Matching Law*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315638911>
- Díez, J. & Lorenzano, P. (2013). Who got what wrong? Fodor and Piattelli on Darwin: Guiding principles and explanatory models in natural selection. *Erkenntnis*, 78(5), 1143–1175. <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9414-3>
- Doebeli, M. (2011). *Adaptive diversification. Monographs in population biology: Bd. 48*. Princeton University Press.
- Donahoe, J. W., Burgos, J. E. & Palmer, D. C. (1993). A selectionist approach to reinforcement. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 60(1), 17–40. <https://doi.org/10.1901/jeab.1993.60-17>
- Döring, N. & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- Edelman, G. M. (1987). *Neural darwinism: The theory of neuronal group selection*. Basic Books.
- El Mouden, C., André, J.-B., Morin, O. & Nettle, D. (2014). Cultural transmission and the evolution of human behaviour: A general approach based on the Price equation. *Journal of evolutionary biology*, 27(2), 231–241. <https://doi.org/10.1111/jeb.12296>
- Ellner, S. P. & Rees, M. (2006). Integral projection models for species with complex demography. *The American naturalist*, 167(3), 410–428. <https://doi.org/10.1086/499438>
- Eronen, M. I. & Bringmann, L. F. (2021). The theory crisis in psychology: How to move forward. *Perspectives on psychological science*, 16(4), 779–788. <https://doi.org/10.1177/1745691620970586>

- Eronen, M. I. & Romeijn, J.-W. (2020). Philosophy of science and the formalization of psychological theory. *Theory and psychology*, 30(6), 786–799. <https://doi.org/10.1177/0959354320969876>
- Fachner, R. E. (2005). Galtons Hut. In H. E. Lück (Hrsg.), *Illustrierte Geschichte der Psychologie*. Beltz.
- Falkai, P. & Wittchen, H.-U. (Hrsg.). (2015). *Diagnostisches und statistisches Manual Psychischer Störungen DSM-5®* (Fünfte Fassung, deutsche Ausgabe). Hogrefe.
- Ferguson, A., Myers, C. S., Bartlett, R. J., Banister, H., Bartlett, F. C., Brown, W. & Campbell, N. R. (1940). Final report of the committee appointed to consider and report upon the possibility of quantitative estimates of sensory events. *Report of the British Association for the Advancement of S*, 2, 331–349.
- Fernando, C., Szathmáry, E. & Husbands, P. (2012). Selectionist and evolutionary approaches to brain function: A critical appraisal. *Frontiers in computational neuroscience*, 6, 24. <https://doi.org/10.3389/fncom.2012.00024>
- Fisher, R. A. (1930). *The genetical theory of natural selection*. Clarendon Press.
- Frank, S. A. (2018). The Price Equation Program: Simple invariances unify population dynamics, thermodynamics, probability, information and inference. *Entropy*, 20(12), 978. <https://doi.org/10.3390/e20120978>
- Frank, S. A. (2020). Simple unity among the fundamental equations of science. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 375(1797), 20190351. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0351>

- Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature reviews. Neuroscience*, 11(2), 127–138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Friston, K., Kilner, J. & Harrison, L. (2006). A free energy principle for the brain. *Journal of physiology (Paris)*, 100(1-3), 70–87. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2006.10.001>
- Galton, F. (1889). I. Co-relations and their measurement, chiefly from anthropometric data. *Proceedings of the Royal Society of London*, 45(273-279), 135–145. <https://doi.org/10.1098/rspl.1888.0082>
- Gescheider, G. A. (2016). *Psychophysics: The fundamentals* (3rd edition). Routledge.
- Giere, R. (1988). *Explaining science*. University of Chicago Press.
- Gigerenzer, G. (2004). Mindless statistics. *The journal of socio-economics*, 33(5), 587–606. <https://doi.org/10.1016/j.socrec.2004.09.033>
- Gilbert, R. M. (1970). Psychology and biology. *Canadian psychologist/Psychologie canadienne*, 11(3), 221–238. <https://doi.org/10.1037/h0082574>
- Grafen, A. (2008). The simplest formal argument for fitness optimization. *Journal of genetics*, 87(4), 421–433. <https://doi.org/10.1007/s12041-008-0064-9>
- Green, P. J. & Silverman, B. W. (Hrsg.). (2000). *Monographs on statistics and applied probability: Bd. 58. Nonparametric regression and generalized linear models: A roughness penalty approach* (1. Aufl.). Chapman & Hall.
- Hautzinger, M., Keller, F. & Kühner, C. (2009). *BDI-II. Beck-Depressions-Inventar. Revision*. (2. Aufl.). Pearson Assessment.

- Herrnstein, R. J. (1961). Relative and absolute strength of response as a function of frequency of reinforcement. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 4, 267–272. <https://doi.org/10.1901/jeab.1961.4-267>
- Hinde, K. (2009). Richer milk for sons but more milk for daughters: Sex-biased investment during lactation varies with maternal life history in rhesus macaques. *American journal of human biology: the official journal of the Human Biology Council*, 21(4), 512–519. <https://doi.org/10.1002/ajhb.20917>
- Hoyle, R. H. (Hrsg.). (2012). *Handbook of structural equation modeling*. The Guilford Press.
- Hull, C. L., Hovland, C. I., Ross, R. T., Hall, M., Perkins, D. T. & Fitch, F. B. (1940). *Mathematico-deductive theory of rote learning: a study in scientific methodology*. Yale University Press.
- Jablonka, E. & Lamb, M. J. (2005). *Evolution in four dimensions: Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life. Life and mind*. MIT Press.
- Kamin, L. J. (1969). Predictability, surprise, attention and conditioning. In B. A. Campbell & R. M. Church (Hrsg.), *Punishment and aversive behavior* (S. 279–296).
- Krantz, D. H., Luce, D., Suppes, P. & Tversky, A. (1971). *Foundations of measurement volume I: Additive and polynomial representations*. Academic Press.
- Kuhn, T. S. (1971). *The Copernican revolution: Planetary astronomy in the development of western thought* (4. Aufl.). Harvard University Press.
- Lazarus, J. (2002). Human sex ratios: adaptations and mechanisms, problems and prospects. In I. C. W. Hardy (Hrsg.), *Sex ratios: concepts and research methods 1* (S. 287–311). Cambridge University Press.

- Leising, D. & Borgstede, M. (2019). Hypothetical constructs. In V. Zeigler-Hill & T. K. Shackelford (Hrsg.), *Encyclopedia of personality and individual differences* (S. 1–6). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28099-8_679-1
- Loewenstein, Y. (2008). Robustness of learning that is based on covariance-driven synaptic plasticity. *PLOS Computational biology*, 4(3), e1000007. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000007>
- Loewenstein, Y. (2010). Synaptic theory of replicator-like melioration. *Frontiers in computational neuroscience*, 4, 17. <https://doi.org/10.3389/fncom.2010.00017>
- Loewenstein, Y. & Seung, H. S. (2006). Operant matching is a generic outcome of synaptic plasticity based on the covariance between reward and neural activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(41), 15224–15229. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505220103>
- Lord, F. M. & Novick, M. R. (1968). *Statistical theories of mental test scores*. Addison-Wesley.
- Luce, D., Krantz, D. H., Suppes, P. & Tversky, A. (1990). *Foundations of measurement volume III: Representation, axiomatization, and invariance*. Academic Press.
- Luque, V. J. (2017). One equation to rule them all: a philosophical analysis of the Price equation. *Biology and philosophy*, 32(1), 97–125. <https://doi.org/10.1007/s10539-016-9538-y>
- Luque, V. J. & Baravalle, L. (2021). The mirror of physics: on how the Price equation can unify evolutionary biology. *Synthese*, 199, 12439–12462. <https://doi.org/10.1007/s11229-021-03339-6>
- Maynard Smith, J. (1982). *Evolution and the theory of games*. Cambridge University Press.

- Maynard Smith, J. (1998). *Evolutionary genetics* (2. ed.). Oxford Univ. Press.
- McDowell, J. J. (2004). A computational model of selection by consequences. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 81(3), 297–317. <https://doi.org/10.1901/jeab.2004.81-297>
- McDowell, J. J. (2013). A quantitative evolutionary theory of adaptive behavior dynamics. *Psychological review*, 120(4), 731–750. <https://doi.org/10.1037/a0034244>
- McKeen Cattell, J. & Galton, F. (1890). Mental tests and measurements. *Mind*, 15(59), 373–381.
- McNamara, J. M. & Houston, A. I. (2009). Integrating function and mechanism. *Trends in ecology and evolution*, 24(12), 670–675. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.05.011>
- Metz, J., Geritz, S. A., Meszner, G., Jacobs, F. J. & van Heerwaarden, J. S. (1995). *Adaptive dynamics: a geometrical study of the consequences of nearly faithful reproduction*. Laxenburg, Austria. International Institute for Applied Systems Analysis.
- Michell, J. (1999). *Measurement in psychology: Critical history of a methodological concept* (1. Aufl.). *Ideas in context*. Cambridge University Press.
- Michell, J. (2000). Normal Science, Pathological Science and Psychometrics. *Theory & Psychology*, 10(5), 639–667. <https://doi.org/10.1177/0959354300105004>
- Moore, D. S. (2015). *The developing genome: An introduction to behavioral epigenetics*. Oxford University Press.
- Nettle, D. (2020). Selection, adaptation, inheritance and design in human culture: the view from the Price equation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, biological sciences*, 375(1797), 20190358. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0358>

- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Jussu Societatis Regiae ac typis Josephi Streater. <http://cudl.lib.cam.ac.uk/view/PR-ADV-B-00039-00001/9>
- Nolting, W. (2004). *Grundkurs theoretische Physik* (5. Aufl.). Springer.
- Open Science Collaboration (2015). Estimating the reproducibility of psychological science. *Science*, 349(6251), aac4716-aac4716. <https://doi.org/10.1126/science.aac4716>
- Palmer, D. C. & Donahoe, J. W. (1992). Essentialism and selectionism in cognitive science and behavior analysis. *The American psychologist*, 47(11), 1344–1358. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.47.11.1344>
- Popper, K. (1935). *Logik der Forschung*. Springer.
- Premack, D. & Premack, A. J. (1963). Increased eating in rats deprived of running. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 6, 209–212. <https://doi.org/10.1901/jeab.1963.6-209>
- Price, G. R. (1970). Selection and covariance. *Nature*, 227(5257), 520–521. <https://doi.org/10.1038/227520a0>
- Price, G. R. (1972). Extension of covariance selection mathematics. *Annals of human genetics*, 35(4), 485–490. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1809.1957.tb01874.x>
- Price, G. R. (1995, geschrieben ca. 1971). The nature of selection. (Written circa 1971, published posthumously). *Journal of theoretical biology*, 175(3), 389–396. <https://doi.org/10.1006/jtbi.1995.0149>
- Pringle, J. (1951). On the parallel between learning and evolution. *Behaviour*, 3(1), 174–214. <https://doi.org/10.1163/156853951X00269>
- Rachlin, H. (1978). A molar theory of reinforcement schedules. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 30(3), 345–360. <https://doi.org/10.1901/jeab.1978.30-345>

- Rasch, G. (1960). *Studies in mathematical psychology: I. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. Danmarks Paedagogiske Institut.
- Schindler, S., Gaillard, J.-M., Grüning, A., Neuhaus, P., Traill, L. W., Tuljapurkar, S. & Coulson, T. (2015). Sex-specific demography and generalization of the Trivers-Willard theory. *Nature*, 526(7572), 249–252. <https://doi.org/10.1038/nature14968>
- Schindler, S., Neuhaus, P., Gaillard, J.-M. & Coulson, T. (2013). The influence of nonrandom mating on population growth. *The American naturalist*, 182(1), 28–41. <https://doi.org/10.1086/670753>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27(3), 379–423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Simon, C. & Hesse, D. O. (2019). Selection as a domain-general evolutionary process. *Behavioural processes*, 161, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2017.12.020>
- Simon, H. A. (1947). The axioms of Newtonian mechanics. *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, 38(287), 888–905. <https://doi.org/10.1080/14786444708561148>
- Singh, S., Lewis, L. & Barto, A. G. (2010). Intrinsically motivated reinforcement learning: An evolutionary perspective. *IEEE Transactions on autonomous mental development*, 2(2), 70–82.
- Skinner, B. F. (1950). Are theories of learning necessary? *Psychological review*, 57(4), 193–216.
- Skinner, B. F. (1981). Selection by consequences. *Science*, 213(4507), 501–504.

- Skinner, B. F. (1984). Selection by consequences. *The Behavioral and brain sciences*, 7(04), 477. <https://doi.org/10.1017/S0140525X0002673X>
- Spearman, C. (1904). General intelligence, objectively determined and measured. *American journal of psychology*, 15, 201–293.
- Staddon, J. E. R. & Simmelhag, V. L. (1971). The „superstition“ experiment: A reexamination of its implications for the principles of adaptive behavior. *Psychological review*, 78(1), 3–43. <https://doi.org/10.1037/h0030305>
- Stephens, D. W. & Krebs, J. R. (1986). *Foraging theory. Monographs in behavior and ecology*. Princeton University Press
- Stevens, S. S. (1946). On the theory of scales of measurement. *Science*, 103, 667–680.
- Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological review*, 64(3), 153–181. <https://doi.org/10.1037/h0046162>
- Suppe, F. (1972). Theories, their formulations, and the operational imperative. *Synthese*, 25(1-2), 129–164. <https://doi.org/10.1007/BF00485000>
- Suppe, F. (1989). *The semantic conception of theories and scientific realism*. University of Illinois Press
- Suppes, P. (1970). *Set-theoretical structures in science*. Stanford University Press.
- Suppes, P., Krantz, D. H., Luce, D. & Tversky, A. (1971). *Foundations of measurement volume II: Geometrical, threshold, and probabilistic representations*. Academic Press.
- Thorndike, E. L. (1900). The associative processes in animals. *Biological lectures from the Marine Biological Laboratory of Woods Holl, 1899*, 69–91.

- Timberlake, W. & Allison, J. (1974). Response deprivation: An empirical approach to instrumental performance. *Psychological review*, 81(2), 146–164. <https://doi.org/10.1037/h0036101>
- Tolman, E. C. (1938). The determiners of behavior at a choice point. *Psychological review*, 45(1), 1–41. <https://doi.org/10.1037/h0062733>
- Toomer, G. J. (1998). *Ptolemy's Almagest* (G. J. Toomer, Übers.). Princeton University Press.
- Trivers, R. L. (1972). Parental investment and sexual selection. In B. G. Campbell (Hrsg.), *Sexual selection and the descent of man: The Darwinian pivot*. Aldine Transaction.
- Trivers, R. L. & Willard, D. E. (1973). Natural selection of parental ability to vary the sex ratio of offspring. *Science*, 179, 90–92.
- Uher, J. (2018). Quantitative data from rating scales: An epistemological and methodological enquiry. *Frontiers in psychology*, 9, 2599. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02599>
- van der Waerden, B. L. (1974). The earliest form of the epicycle theory. *Journal for the history of astronomy*, 5, 175–185.
- van Veelen, M. (2020). The problem with the Price equation. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 375(1797), 20190355. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0355>
- Veller, C., Haig, D. & Nowak, M. A. (2016). The Trivers-Willard hypothesis: Sex ratio or investment? *Proceedings of the Royal Society B: Biological sciences*, 283(1830). <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.0126>
- Westermann, R. (1984). Zur empirischen Überprüfung des Skalenniveaus von individuellen Einschätzungen und Ratings. *Zeitschrift für Psychologie*, 192(2), 122–133. <https://doi.org/10.1515/9783112470381-004>

- Wildman, D. E., Uddin, M., Liu, G., Grossman, L. I. & Goodman, M. (2003). Implications of natural selection in shaping 99.4% non-synonymous DNA identity between humans and chimpanzees: enlarging genus Homo. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(12), 7181–7188. <https://doi.org/10.1073/pnas.1232172100>
- Wittgenstein, L. (2013/1953). *Philosophische Untersuchungen* (6. Aufl.). *Bibliothek Suhrkamp*. Suhrkamp.

6 Anhang: Liste der Originalarbeiten⁵

A1: Konzeptuelle Probleme der Psychometrie

Leising, D., Borgstede, M. (2019). Hypothetical constructs. In: Zeigler-Hill V., Shackelford T. (Hrsg.) *Encyclopedia of personality and individual differences*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28099-8_679-1

Buntins, M., Buntins, K., Eggert, F. (2017). Clarifying the concept of validity – from measurement to everyday language. *Theory and psychology*, 27(5). 703-710. <https://doi.org/10.1177/0959354317702256>

Borgstede, M. (2019a). Zwischen Definition und Empirie. Theoretische Probleme der Fragebogenkonstruktion. *Vierteljahrsschrift für wissenschaftliche Pädagogik*, 95. 199-217. <https://doi.org/10.30965/25890581-09501018>

A2: Alternative Modelle psychologischer Messung

Borgstede, M., Scholz, M. (2021). Qualitative and quantitative approaches to generalization and replication – A representationalist view. *Frontiers in psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.605191>

Borgstede, M., Eggert, F. (2022). Squaring the circle: From latent variables to theory-based measurement. *Theory and psychology*. <https://doi.org/10.1177/09593543221127985>

⁵ Alle Originalarbeiten sind frei zugänglich über das Forschungsinformationssystem (FIS) der Universität Bamberg: <https://fis.uni-bamberg.de/cris/rp/rp01735/publications.html>

A3: Natürliche Selektion

Borgstede, M. (2019b). Is there a Trivers-Willard effect for parental investment? Modelling evolutionarily stable strategies using a matrix population model with nonlinear mating. *Theoretical population biology*, 130, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2019.10.001>

Borgstede, M. (2021a). Evolutionary dynamics of the Trivers-Willard effect: A nonparametric approach. *Ecology and evolution*, 11(18), 12676-12685. <https://doi.org/10.1002/ece3.8012>

A4: Verhaltensselektion

Borgstede, M. (2020). An evolutionary model of reinforcer value. *Behavioural processes*, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2020.104109>

Borgstede, M., Eggert, F. (2021). The formal foundation of an evolutionary theory of reinforcement. *Behavioural processes*, 186, 104370. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2021.104370>

Borgstede, M., Luque, V. (2021). The covariance based law of effect: A fundamental principle of behavior. *Behavior and philosophy*, 49, 63-81. https://behavior.org/wp-content/uploads/2022/01/BP-v49-Borgstede2_corrected.pdf

Borgstede, M. (2021b). Why do individuals seek information? A selectionist perspective. *Frontiers in psychology*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.684544>



University
of Bamberg
Press

In dieser Habilitationsschrift geht es um die wissenschaftstheoretische, methodische und inhaltliche Bedeutung formaler Modellierung in der Psychologie. Vor dem Hintergrund einer semantischen Theoriekonzeption wird argumentiert, dass valide psychologische Messoperationen nicht unabhängig von substantieller formaler Theorie definiert werden können. Theoriebildung wird dabei nicht als statistische Modellierung, sondern als Formalisierung allgemeiner theoretischer Prinzipien verstanden. Als möglicher Ausgangspunkt für eine derartige formale Theoriebildung in der Psychologie wird ein evolutionstheoretischer Rahmen für die Erklärung individueller Verhaltensanpassungen an wechselnde Umweltbedingungen vorgeschlagen. Lernen und Evolution sind nach dieser Auffassung keine Gegensätze, sondern integrale Bestandteile eines allgemeinen Selektionsprozesses.



ISBN 978-3-86309-893-3



9 783863 098933

www.uni-bamberg.de/ubp/