

Warum ein kosmologisches Weltmodell nicht ausreicht

Zur Überdehnung des Einheitsanspruchs in der modernen Kosmologie

Abstract

Die moderne Kosmologie ist durch anhaltende Spannungen zwischen unterschiedlichen Messmethoden, Skalenbereichen und kosmologischen Epochen geprägt. Diese Spannungen werden häufig als lokale Inkonsistenzen innerhalb eines grundsätzlich einheitlichen theoretischen Rahmens behandelt. Dieses Paper schlägt eine andere methodologische Lesart vor: Persistente Spannungen können, sofern sie stabil reproduzierbar sind und an Übergängen zwischen Modellierungsregimen auftreten, auf eine Überdehnung des kosmologischen Einheitsanspruchs hinweisen.

Das Paper versteht sich nicht als physikalischer Alternativentwurf zur modernen Kosmologie, sondern als wissenschaftsphilosophische Fallanalyse domänengebundener Modellgeltung. Es argumentiert, dass die kosmologische Praxis bereits operativ mit unterschiedlichen Modellierungsregimen arbeitet, diese Domänenabhängigkeit jedoch nicht immer konsequent in eine explizite Theorie von Geltung, Domänengrenzen, Übergangsregeln und Falsifikationsebene übersetzt. Kosmologische Spannungen werden dadurch nicht relativiert, sondern auf einer anderen Ebene lesbar: als mögliche Hinweise darauf, dass nicht nur Parameter oder Zusatzannahmen, sondern auch Modell-Domänen-Zuordnungen selbst prüfungsbedürftig werden.

Vorgeschlagen wird daher keine Aufgabe wissenschaftlicher Einheit, sondern ihre Reorganisation als Einheit zweiter Ordnung. Einheit liegt dann nicht mehr ausschließlich in einem einzigen Modell, das alle kosmologischen Domänen unmittelbar tragen soll, sondern in expliziten Regeln der Domänenzuordnung, kontrollierten Übergängen, überlappenden Prüfzonen und gemeinsamen Konsistenzbedingungen. Damit verschiebt sich die Falsifikationsebene: Nicht nur einzelne Parameter stehen zur Disposition, sondern auch die Frage, ob ein Modell einer bestimmten Domäne noch angemessen zugeordnet ist. Das Paper entscheidet damit keine physikalische Hypothese, sondern entwickelt eine methodologische Architektur, in der Modellpluralität und wissenschaftliche Einheit kontrolliert aufeinander bezogen werden.

Keywords

Philosophie der Kosmologie, kosmologisches Standardmodell, Einheitsanspruch, kosmologische Spannungen, domänenspezifische Modelle, Modellarchitektur, Falsifikation, methodologischer Pluralismus, effektive Theorien

Stefan Rapp

Independent Researcher

Last revised: 28 April 2026

<https://orcid.org/0009-0004-0847-9164>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18265832>

Epistemics Project: <https://www.epistemics.de>

© 2026 Stefan Rapp — Licensed under CC BY-NC-ND 4.0

Inhaltsverzeichnis

1. Das Problem ist kein weiteres Spannungsphänomen.....	3
2. Das Einheitsideal in der modernen Kosmologie.....	6
3. Faktische Domänenabhängigkeit in der kosmologischen Praxis.....	8
4. Warum kosmologische Spannungen persistieren.....	11
5. Partielle Erfolge alternativer Ansätze.....	14
6. Modell-Sets und die Verschiebung der Falsifikationsebene.....	16
7. Kosten, Nutzen und epistemische Ehrlichkeit.....	19
8. Vom kosmologischen Weltmodell zur domänenverantwortlichen Modellierung.....	21
Literatur.....	23
Appendix A – Exemplarische Modell-Set-Lesart der Hubble-Spannung.....	25
Appendix B – Epistemische Lesart für Epistemik-Leser.....	30

1. Das Problem ist kein weiteres Spannungsphänomen

Die moderne Kosmologie befindet sich in einer eigentümlichen Situation. Einerseits verfügt sie mit dem kosmologischen Standardmodell über einen theoretischen Rahmen, der eine beeindruckende Vielzahl empirischer Befunde konsistent beschreibt. Andererseits mehren sich seit Jahren systematische Abweichungen zwischen unterschiedlichen Messmethoden und kosmischen Epochen, die sich nicht ohne Weiteres in dieses Modell integrieren lassen. Diese sogenannten „Spannungen“ werden in der Regel als lokale Probleme interpretiert: als Hinweise auf unterschätzte systematische Fehler, unzureichende Parametrisierungen oder als Motivation für begrenzte Erweiterungen des bestehenden Rahmens.

Dieses Paper setzt an einer anderen Stelle an. Es vertritt die These, dass die Persistenz dieser Spannungen weniger auf isolierte empirische oder theoretische Defizite zurückzuführen ist als auf eine methodologische Überdehnung. Gemeint ist der implizite Anspruch, ein einziges kosmologisches Modell müsse alle relevanten physikalischen Domänen des Universums zugleich tragen. Die zentrale These lautet daher nicht, dass die Kosmologie über falsche Gleichungen verfügt, sondern dass sie an einer problematischen Vorstellung von Modellgeltung festhält.

Die gängige Diskussion behandelt Spannungen typischerweise als temporäre Inkonsistenzen innerhalb eines grundsätzlich einheitlichen Weltmodells. Damit wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die zugrunde liegende Modellarchitektur selbst nicht zur Disposition steht. Genau diese Voraussetzung wird hier infrage gestellt. Die leitende Frage dieses Papers lautet, ob der fortgesetzte Versuch, empirische Inkonsistenzen innerhalb eines globalen Einheitsmodells aufzulösen, nicht selbst zu einem epistemischen Hindernis geworden ist.

Dabei ist zu betonen, was dieses Paper nicht leistet. Es präsentiert kein alternatives kosmologisches Modell, greift keine spezifischen Messprogramme an und erhebt keinen Anspruch auf physikalische Korrekturen bestehender Gleichungen. Es handelt sich vielmehr um eine methodologische Analyse der Modellpraxis in der Kosmologie. Gerade die Kosmologie ist für eine solche Analyse besonders geeignet, weil sie mit indirekten Inferenzketten, großskaligen Modellannahmen und begrenzten Möglichkeiten direkter experimenteller Intervention arbeitet (Ellis 2011). Ziel ist es, den impliziten Anspruch auf Einheitlichkeit explizit zu machen, seine epistemische Rolle zu rekonstruieren und zu zeigen, warum dieser Anspruch unter den heutigen empirischen Bedingungen problematisch geworden ist.

Der Status des Papers ist damit ausdrücklich exemplarisch. Die Kosmologie dient hier nicht als Anlass zur Entwicklung einer neuen Grundlagentheorie, sondern als besonders aufschlussreicher Fall, an dem sich ein allgemeines Problem moderner Modellpraxis zeigen lässt: der Übergang von erfolgreicher Stabilisierung zu möglicher Überdehnung. Die Analyse fragt daher nicht, welches konkrete kosmologische Modell physikalisch vorzuziehen ist, sondern auf welcher Ebene Modellgeltung, Domänengrenzen und Falsifikation methodologisch verhandelt werden sollten.

Der Ausgangspunkt ist eine einfache Beobachtung: Die kosmologische Praxis erkennt unterschiedliche Modellierungsregime operativ längst an. Frühes Universum, späte Expansion, lineare Störungstheorie, nichtlineare Strukturbildung, Galaxienphysik und numerische Simulationen folgen nicht einfach derselben Modellierungslogik. Problematisch ist daher nicht, dass die Kosmologie solche Unterschiede ignorierte. Problematisch ist vielmehr, dass diese operative Domänenabhängigkeit nicht immer mit gleicher Konsequenz in eine explizite Theorie von Modellgeltung, Domänengrenzen und Falsifikationsebene übersetzt wird. Daraus ergibt sich eine Spannung zwischen praktischer Pluralität und theoretischer Selbstbeschreibung als einheitliches Weltmodell.

Dieses Paper argumentiert, dass viele der aktuellen kosmologischen Spannungen sinnvoller als Signale einer falsch gewählten Falsifikationsebene interpretiert werden sollten. Nicht einzelne Parameter oder Gleichungen stehen zur Disposition, sondern der Anspruch, dass ein einziges Modell alle kosmologischen Domänen zugleich abdecken müsse. Eine solche Reinterpretation verschiebt den Fokus von ad hoc-Reparaturen hin zu einer reflektierten Modellarchitektur, in der unterschiedliche Domänen unterschiedliche effektive Beschreibungen erfordern können.

Dieser Einwand ist nicht nur methodologisch relevant, sondern berührt den Zweck kosmologischer Grundlagenforschung selbst. Kosmologische Forschung erhebt traditionell den Anspruch, aus der Untersuchung ferner Regime Rückschlüsse auf die physikalische Domäne zu erlauben, in der wir selbst leben. Diese Rückschlussfähigkeit bildet einen zentralen Sinn von Grundlagenforschung und bedarf daher einer expliziten methodologischen Absicherung. Ein globales Weltmodell, das solche Übertragungen implizit voraussetzt, ohne ihre Bedingungen auszuweisen, droht diesen Anspruch eher zu verdecken als zu erfüllen.

Auch die hier vorgeschlagene Lesart besitzt selbst einen begrenzten Geltungsanspruch. Sie entscheidet keine physikalische Hypothese, ersetzt keine Datenanalyse und liefert kein alternatives kosmologisches Modell. Ihre Funktion liegt darin, sichtbar zu machen, unter welchen Bedingungen empirische Spannungen nicht nur als lokale Abweichungen, sondern als Hinweise auf Modellarchitektur, Domänenzuordnung und Falsifikationsebene gelesen werden können. Damit unterliegt auch diese Analyse dem Prinzip, das sie selbst fordert: Ihre Geltung ist methodologisch, nicht physikalisch.

Die hier vorgeschlagene Perspektive beruht dabei nicht auf einem bloß pragmatischen Pluralismus. Sie folgt aus der Einsicht, dass kosmologische Erkenntnis wesentlich über unterschiedliche Mess-, Inferenz- und Modellierungsregime gewonnen wird, die jeweils eigene epistemische Bedingungen mit sich bringen. Wo diese Bedingungen systematisch variieren, kann Modellgeltung nicht voraussetzungslos vereinheitlicht werden, ohne an epistemischer Transparenz zu verlieren.

Die Struktur des Papers folgt dieser Argumentationslinie. Zunächst wird der Einheitsanspruch der modernen Kosmologie rekonstruiert und in seinem historischen und methodologischen Kontext verortet. Anschließend wird gezeigt, dass die tatsächliche Modellpraxis bereits domänenabhängig operiert, ohne dass daraus immer eine explizite Theorie der Domänenzuordnung folgt. Darauf aufbauend werden kosmologische Spannungen als mögliche, aber nicht automatische Hinweise auf falsch gesetzte Geltungsansprüche interpretiert. Alternative Ansätze werden anschließend nicht als vollständige Ersatzmodelle, sondern als mögliche Hinweise auf domänenspezifische Erklärungskraft gelesen. Abschließend wird ein methodologischer Rahmen vorgeschlagen, der Modell-Sets, Übergangsregeln und Einheit zweiter Ordnung anstelle eines unreflektierten globalen Einheitsanspruchs in den Mittelpunkt stellt.

2. Das Einheitsideal in der modernen Kosmologie

Der Anspruch auf ein einheitliches kosmologisches Modell ist kein Zufallsprodukt, sondern das Ergebnis einer langen und erfolgreichen Entwicklung. Mit der Etablierung des Λ CDM-Modells entstand ein theoretischer Rahmen, der Expansion, Hintergrundstrahlung, großräumige Strukturbildung und Materieverteilung in bemerkenswerter Weise zusammenführte und insbesondere durch präzise Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung empirisch stark gestützt wurde (Aghanim et al. 2020). Sein Erfolg liegt nicht nur in der empirischen Passung, sondern auch in der konzeptionellen Geschlossenheit. Ein vergleichsweise kleiner Satz von Annahmen erlaubt es, Phänomene über kosmische Zeitskalen hinweg kohärent zu beschreiben.

Diese Vereinheitlichung besaß und besitzt erhebliche epistemische Anziehungskraft. Einheitlichkeit gilt als wissenschaftliche Tugend, weil sie disparate Beobachtungen unter einem gemeinsamen formalen Rahmen integriert und dadurch erklärungsstärker erscheint als eine Sammlung isolierter Modelle. In der Kosmologie verstärkte sich dieser Effekt dadurch, dass alternative Ansätze entweder auf begrenzte Phänomenbereiche beschränkt blieben oder an zentralen empirischen Tests scheiterten. Das Einheitsmodell wurde so nicht nur zum besten verfügbaren Modell, sondern zum normativen Referenzpunkt, an dem sich alle Alternativen messen lassen mussten.

Mit diesem normativen Status ging jedoch ein impliziter Anspruch einher. Abweichungen zwischen Daten und Modell wurden primär als Defizite in der Ausarbeitung des Modells interpretiert, nicht als Hinweise auf mögliche Grenzen seiner Geltung. Die Frage, ob unterschiedliche kosmologische Domänen möglicherweise unterschiedliche theoretische Beschreibungen erfordern könnten, trat damit methodologisch in den Hintergrund. Einheitlichkeit wurde nicht länger nur als heuristisches Ziel verstanden, sondern zunehmend als Voraussetzung guter Theorie.

Dieser Anspruch war unter den damaligen Bedingungen plausibel. Die verfügbaren Daten ließen sich mit bemerkenswerter Präzision innerhalb eines einheitlichen Rahmens erklären, und die großen kosmologischen Erfolge des späten 20. und frühen 21. Jahrhunderts beruhen wesentlich auf dieser Vereinheitlichung (Peebles 2020). Gerade deshalb ist es wichtig, den historischen Kontext des Einheitsideals zu würdigen, bevor man seine heutige Angemessenheit infrage stellt.

Problematisch wird der Einheitsanspruch dort, wo er nicht mehr als regulatives Ideal, sondern als methodologische Verpflichtung fungiert. Gerade der Erfolg eines Modells kann in dieser Hinsicht blind machen. Wenn ein Modell über längere Zeit sehr unterschiedliche Beobachtungen integriert, wächst die Neigung, seine Architektur nicht mehr selbst zum Gegenstand methodologischer Prüfung zu machen. Abweichungen werden dann fast automatisch als lokale Störungen innerhalb des bestehenden Rahmens behandelt, nicht als mögliche Hinweise auf Grenzen seiner Geltung. Die epistemische Gefahr entsteht daher nicht trotz, sondern teilweise wegen des Erfolgs des Einheitsmodells.

Diese Verengung wird heute zunehmend sichtbar. Die empirische Präzision der Kosmologie ist so weit fortgeschritten, dass Unterschiede zwischen verschiedenen Messdomänen nicht mehr ohne Weiteres durch statistische Unsicherheiten überdeckt werden. Einige der prominent diskutierten Abweichungen treten inzwischen in mehreren unabhängigen Analysekontexten stabil genug auf, um nicht mehr bloß als zufällige Randerscheinungen behandelt werden zu können. Unter diesen Bedingungen kann der Einheitsanspruch, der lange Zeit ein Motor des Fortschritts war, selbst zu einem limitierenden Faktor werden.

Dabei darf die Stärke des kosmologischen Standardmodells nicht unterschätzt werden. Seine epistemische Kraft liegt nicht nur darin, dass es eine elegante Gesamtbeschreibung anbietet, sondern darin, dass unterschiedliche Beobachtungsklassen, unabhängige Datenquellen und verschiedene Inferenzwege in einem gemeinsamen Parameterraum aufeinander bezogen werden können. Hintergrundstrahlung, großräumige Struktur, Supernovae, baryonische akustische Oszillationen und Gravitationslinseneffekte wirken in diesem Rahmen als wechselseitige Kontrollinstanzen. Diese wechselseitigen Kontrollbindungen unterschiedlicher Datenklassen sind kein bloßer Ausdruck eines Einheitsideals, sondern ein reales methodisches Kontrollinstrument. Eine domänenverantwortliche Modellierung darf diese Kontrollfunktion daher nicht auflösen, sondern muss sie auf einer expliziteren architektonischen Ebene reorganisieren.

Die entscheidende Frage lautet daher nicht, ob das kosmologische Standardmodell falsch ist, sondern ob der Anspruch, es als globales Weltmodell zu behandeln, noch gerechtfertigt ist. Diese Unterscheidung ist zentral für die weitere Argumentation. Sie erlaubt es, empirische Spannungen nicht vorschnell als lokale Defekte zu interpretieren, sondern als mögliche Hinweise auf eine Überdehnung des Einheitsideals. Auf dieser Grundlage lässt sich die tatsächliche Modellpraxis der Kosmologie neu in den Blick nehmen.

3. Faktische Domänenabhängigkeit in der kosmologischen Praxis

Unabhängig von ihrer theoretischen Selbstbeschreibung operiert die moderne Kosmologie bereits heute in klar unterscheidbaren Modellierungsdomänen. Diese Domänen ergeben sich nicht aus willkürlicher Aufteilung, sondern aus unterschiedlichen physikalischen Regimen, Skalenordnungen und methodischen Zugängen. Entscheidend ist, dass zwischen diesen Bereichen keine durchgehend einheitliche Modellanwendung stattfindet, selbst wenn dies rhetorisch häufig nahegelegt wird. Die Praxis ist plural, auch dort, wo die Theorie Einheit behauptet.

Unter einer kosmologischen Domäne wird hier kein beliebig abgegrenzter Gegenstandsbereich verstanden. Eine Domäne ist vielmehr ein stabiler Zusammenhang aus Skalenbereich, physikalischem Regime, Messzugang, Inferenzkette und Modellannahmen, innerhalb dessen ein Modell empirisch prüfbar Geltung beanspruchen kann. Entscheidend ist, dass nicht jedes einzelne dieser Merkmale für sich genommen bereits eine eigene Domäne begründet. Methodologisch relevant wird eine Domänengrenze erst dort, wo mehrere dieser Faktoren zusammenwirken und bei ihrer Kopplung wiederholt Spannungen auftreten, die nicht allein durch lokale Fehlerkorrekturen, bessere Kalibrationen oder statistische Verfeinerung erklärbar sind.

Eine zentrale Domäne betrifft das frühe Universum. In diesem Bereich werden lineare Perturbationstheorien eingesetzt, die auf homogenen und isotropen Anfangsbedingungen beruhen. Diese Modelle sind mathematisch hoch formalisiert und außerordentlich erfolgreich, solange sie innerhalb ihres vorgesehenen Gültigkeitsbereichs angewandt werden. Ihre Leistungsfähigkeit beruht jedoch auf starken Idealisierungen, insbesondere der Vernachlässigung lokaler Strukturen und nichtlinearer Effekte, die in späteren kosmischen Epochen dominant werden.

Demgegenüber steht die Domäne der großräumigen, aber bereits nichtlinearen Strukturbildung. Hier verlieren lineare Näherungen zunehmend ihre Gültigkeit, und numerische Simulationen sowie effektive Beschreibungen treten stärker in den Vordergrund. Die Übergänge zwischen linearer Theorie und nichtlinearer Dynamik sind zwar theoretisch und numerisch kontrolliert, lassen sich aber nicht durch einen einzigen einfachen analytischen Formalismus vollständig erfassen. In der Praxis spielen daher neben theoretischen Prinzipien auch Näherungsverfahren, numerische Stabilität, Rechenaufwand und empirische Kalibration eine zentrale Rolle.

Eine weitere Domäne betrifft die Skala einzelner Galaxien und galaktischer Substrukturen. In diesem Bereich zeigen sich seit langem Phänomene, deren Ableitung aus großräumigen kosmologischen Anfangsbedingungen zusätzliche Annahmen über baryonische Physik, Rückkopplung, nichtlineare Dynamik und Subgrid-Modellierung erfordert. Praktisch geschieht dies etwa durch komplexe baryonische Rückkopplungsmechanismen, Subgrid-Modelle oder empirisch motivierte Korrekturterme. Diese Elemente sind funktional notwendig, besitzen jedoch keinen einheitlichen theoretischen Status. Sie werden ausdrücklich als effektive Beschreibungen behandelt, nicht als fundamentale Dynamiken.

Besonders deutlich tritt diese implizite Pluralität in numerischen Simulationen zutage. Solche Simulationen kombinieren großräumige Anfangsbedingungen mit lokal definierten Rezepten für Prozesse unterhalb der numerischen Auflösung. Diese Subgrid-Modelle sind nicht aus den grundlegenden Gleichungen abgeleitet, sondern werden empirisch kalibriert. Ihre Parameter werden so gewählt, dass sie beobachtete Strukturen reproduzieren, nicht, weil sie aus einem einheitlichen theoretischen Rahmen zwingend folgen würden.

Damit entsteht eine Modellpraxis, in der unterschiedliche Komponenten unterschiedlichen epistemischen Status besitzen. Einige Teile werden als fundamental behandelt, andere als effektive Näherungen, wieder andere als empirische Korrekturen. Diese Differenzen sind in der praktischen Arbeit klar präsent, werden jedoch selten systematisch reflektiert. Stattdessen wird die Gesamtkonstruktion weiterhin als Ausdruck eines einheitlichen Weltmodells dargestellt. Die Spannung zwischen faktischer Arbeitsweise und theoretischer Selbstbeschreibung bleibt dadurch verdeckt.

Diese Spannung wirkt sich auch auf die Interpretation kosmologischer Abweichungen aus. Wenn unterschiedliche Messungen systematisch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen, werden diese zunächst als Hinweise auf verborgene systematische Fehler oder unzureichende Parametrisierungen gelesen. Die Möglichkeit, dass solche Abweichungen auf Grenzen der Modellanwendung hindeuten könnten, bleibt meist sekundär. Der Einheitsanspruch fungiert hier als interpretativer Filter, der alternative Deutungen von vornherein begrenzt.

Dabei ist Domänenabhängigkeit an sich keineswegs problematisch. In vielen anderen Wissenschaftsbereichen ist sie längst anerkannt. In der Festkörperphysik, der Strömungsmechanik oder der Klimamodellierung gilt es als selbstverständlich, dass unterschiedliche Skalen unterschiedliche effektive Theorien erfordern. Wissenschaftliche Modelle und Gesetze werden dabei häufig nicht als einfache universelle Abbilder einer einheitlichen Weltstruktur verstanden, sondern als lokal und kontextabhängig wirksame Ordnungsformen (Cartwright 1983, 1999). Die Herausforderung besteht nicht darin, diese Pluralität zu vermeiden, sondern sie konsistent zu organisieren und ihre Übergänge explizit zu machen.

Ein wichtiger Anschluss liegt in der Methodologie effektiver Theorien. Die Physik kennt mit Effective Field Theory bereits einen etablierten Umgang mit skalenabhängigen Geltungsbereichen, kontrollierten Näherungen und nicht-fundamentalen Beschreibungen, auch in der kosmologischen Strukturbildung (Baumann et al. 2012; Carrasco, Hertzberg, and Senatore 2012). Der hier vorgeschlagene Ansatz beansprucht daher nicht, Domänenabhängigkeit als physikalische Praxis neu einzuführen. Er verschiebt die Frage vielmehr auf die Ebene der kosmologischen Modellarchitektur: Wenn skalenabhängige Geltung in einzelnen physikalischen Beschreibungen methodisch anerkannt ist, stellt sich die zusätzliche Frage, ob auch die Zuordnung kosmologischer Modelle zu Epochen, Skalen, Messregimen und Inferenzketten expliziter organisiert werden muss.

Die hier vorgeschlagene Modell-Set-Architektur ist dabei nicht mit Effective Field Theory gleichzusetzen. Effective Field Theory regelt skalenabhängige Geltung innerhalb formal kontrollierter theoretischer Rahmen. Die hier verhandelte Frage setzt eine Ebene höher an: Sie betrifft Übergänge zwischen Modellierungsregimen, deren Zusammenhang nicht notwendig durch eine gemeinsame Reduktions- oder Renormierungsstruktur gesichert ist. Der EFT-Anschluss zeigt daher nicht, dass der hier vorgeschlagene Ansatz überflüssig wäre, sondern dass skalenabhängige Geltung physikalisch bereits etabliert ist und nun methodologisch auf die Architektur kosmologischer Modellgeltung bezogen werden kann.

In der Kosmologie hingegen wird diese Pluralität häufig als provisorischer Zustand behandelt, der langfristig in einer vollständig vereinheitlichten Beschreibung aufgehen soll. Diese Erwartung prägt die methodologische Haltung der Disziplin, auch dort, wo sie empirisch kaum noch einlösbar ist. Das Ergebnis ist eine fortgesetzte Spannung zwischen dem Anspruch auf Einheit und der Notwendigkeit domänenspezifischer Modellierung.

Das zentrale Argument dieses Kapitels lautet daher nicht, dass die Kosmologie inkonsistent arbeitet. Im Gegenteil: Ihre Praxis ist funktional äußerst erfolgreich. Das Problem besteht darin, dass diese funktionale Pluralität nicht immer konsequent als methodologische Frage von Modellgeltung, Domänenzuordnung und Übergangsregeln reflektiert wird. Statt als stabile Struktur moderner Modellpraxis erscheint sie häufig als provisorischer Zustand, der innerhalb eines einheitlichen Weltmodells langfristig überwunden werden müsse. Dadurch können Spannungen in den Daten vorschnell als Defekte erscheinen, die zu reparieren sind, statt als mögliche Hinweise auf die Grenzen eines bestimmten Modellanspruchs.

Eine explizite Anerkennung der Domänenabhängigkeit würde diese Situation grundlegend verändern. Sie würde erlauben, Spannungen nicht mehr ausschließlich als Anomalien zu behandeln, sondern als Marker für Übergänge zwischen Modellregimen. Der Fokus verschöbe sich von der permanenten Optimierung eines globalen Modells hin zur reflektierten Organisation unterschiedlicher, aber miteinander kompatibler Beschreibungen. Auf dieser Grundlage lässt sich im nächsten Schritt erklären, warum viele kosmologische Spannungen nicht verschwinden, sondern stabil bleiben.

4. Warum kosmologische Spannungen persistieren

Die anhaltenden Spannungen der modernen Kosmologie werden üblicherweise als vorübergehende Inkonsistenzen verstanden, die sich mit verbesserten Daten, verfeinerten Analyseverfahren oder moderaten Modellerweiterungen auflösen lassen. Diese Erwartung ist tief im Selbstverständnis der Disziplin verankert. Sie setzt voraus, dass die beobachteten Abweichungen letztlich innerhalb eines einheitlichen theoretischen Rahmens erklärbar sein müssen. Genau diese Voraussetzung wird in diesem Kapitel infrage gestellt.

Auffällig ist zunächst, dass mehrere zentrale Spannungen bevorzugt dort auftreten, wo unterschiedliche kosmologische Domänen miteinander gekoppelt werden: zwischen frühem und spätem Universum, zwischen linearer Theorie und nichtlinearer Dynamik, zwischen globalen Parametern und lokalen Strukturen. Ihre Persistenz ist daher weniger überraschend, als sie oft erscheint. Sie ist ein erwartbares Resultat einer Modellarchitektur, die Übergänge zwischen Regimen nur unzureichend explizit macht.

Exemplarisch lässt sich dies an mehreren Spannungslinien verdeutlichen. Die Hubble-Spannung betrifft die Differenz zwischen frühen, modellabhängig aus der Hintergrundstrahlung erschlossenen Werten und späten, lokal über Distanzleitern bestimmten Werten der Expansionsrate. Die S_8 - beziehungsweise σ_8 -Spannung betrifft das Verhältnis zwischen aus dem frühen Universum abgeleiteten Parametern, Strukturwachstum und schwachen Gravitationslinsenmessungen (Heymans et al. 2021). Neuere Diskussionen um baryonische akustische Oszillationen, insbesondere DESI-Daten, und datenabhängige Hinweise auf mögliche Abweichungen vom einfachsten Λ -Modell zeigen zudem, dass auch späte Expansionsdaten unter bestimmten Kombinationen neue Fragen an die Standardarchitektur richten können (Adame et al. 2025; Abdulkarim et al. 2025). Diese Fälle beweisen keine Domänengrenzen. Sie bilden jedoch geeignete Prüffelder für die Frage, ob persistente Spannungen entlang unterschiedlicher Mess-, Skalen- und Inferenzregime methodologisch anders gelesen werden müssen.

Typischerweise werden Spannungen als Differenzen zwischen Messwerten interpretiert, die nominal dieselbe physikalische Größe betreffen. Diese Lesart legt nahe, dass mindestens eine der Messungen fehlerhaft oder unvollständig sein müsse. Entsprechend konzentriert sich die Analyse auf mögliche systematische Effekte, Kalibrationsprobleme oder statistische Verzerrungen. Diese Vorgehensweise ist in vielen Fällen berechtigt, greift jedoch dort zu kurz, wo die beteiligten Messungen auf unterschiedlichen Modellannahmen und Inferenzketten beruhen.

In solchen Fällen wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die zugrunde liegenden theoretischen Rahmen vollständig kompatibel sind. Die Möglichkeit, dass unterschiedliche Messdomänen unterschiedliche effektive Beschreibungen erfordern, wird kaum in Betracht gezogen. Spannungen erscheinen dann als Störungen eines an sich kohärenten Modells, nicht als Hinweise auf begrenzte Geltungsbereiche. Der interpretative Fokus verschiebt sich weg von der Modellarchitektur hin zu immer feineren Reparaturversuchen auf Parameter- und Datenebene.

Ein weiterer Grund für die Persistenz kosmologischer Spannungen liegt in der asymmetrischen Behandlung von Übereinstimmungen und Abweichungen. Passungen zwischen Modell und Daten werden als Bestätigung der globalen Gültigkeit interpretiert, während Abweichungen als lokale Probleme klassifiziert werden. Diese Asymmetrie stabilisiert den Einheitsanspruch auch dann, wenn die Zahl und Präzision der Abweichungen zunimmt. Das Modell wird dadurch epistemisch abgeschirmt, ohne explizit immunisiert zu werden.

Hinzu kommt, dass viele Spannungen in komplexe Parameterabhängigkeiten eingebettet sind. Modifikationen, die eine bestimmte Abweichung reduzieren, verschärfen häufig andere. Diese Wechselwirkungen werden meist als Ausdruck der Komplexität des Modells gelesen, nicht als Hinweis auf eine Überdehnung seines Geltungsanspruchs. Der fortgesetzte Versuch, alle Spannungen gleichzeitig innerhalb eines einzigen Rahmens zu adressieren, führt so zu einer zunehmenden Überfrachtung, ohne die grundlegende Modellarchitektur infrage zu stellen.

Aus methodologischer Perspektive deutet dieses Muster auf eine Verschiebung der Falsifikationsebene hin. Anstatt zu prüfen, ob der Anspruch auf ein globales Weltmodell selbst noch gerechtfertigt ist, wird Falsifikation auf immer kleinere Strukturelemente verlagert. Parameter, Untermodelle und Korrekturterme werden zur primären Zielscheibe der Kritik, während der übergeordnete Geltungsanspruch unangetastet bleibt. Spannungen verlieren dadurch einen Teil ihres heuristischen Potenzials.

Wird diese Situation aus einer domänenabhängigen Perspektive betrachtet, erscheint die Persistenz der Spannungen in einem anderen Licht. Wenn unterschiedliche Messungen effektiv unterschiedliche physikalische Regime adressieren, ist nicht zu erwarten, dass sie sich nahtlos in einem einzigen Parametersatz integrieren lassen. Spannungen sind dann keine Anomalien im engeren Sinn, sondern Ausdruck unzureichend verstandener Übergänge zwischen Modellregimen. Ihre Stabilität ist kein Zeichen methodischen Versagens, sondern ein Hinweis auf eine falsch gesetzte Erwartung.

Diese Reinterpretation relativiert nicht die empirischen Befunde. Die Daten behalten ihre volle Bedeutung. Was sich ändert, ist die Art, wie sie gelesen werden. Spannungen werden nicht länger primär als Defekte verstanden, die beseitigt werden müssen, sondern als Marker für Gültigkeitsgrenzen einzelner Modellkomponenten. Die Frage verschiebt sich von der Suche nach der einen korrekten Anpassung hin zur Klärung der Bedingungen, unter denen unterschiedliche Beschreibungen jeweils angemessen sind.

Nicht jede Spannung ist deshalb bereits ein Hinweis auf eine Domänengrenze. Eine Abweichung kann weiterhin auf systematische Fehler, Kalibrationsprobleme, Auswahlverzerrungen, unzureichende Statistik oder noch nicht ausgeschöpfte Modellverfeinerung zurückgehen. Methodologisch relevant als mögliches Domänensignal wird sie erst dann, wenn sie stabil reproduzierbar ist, an die Kopplung unterschiedlicher Regime, Skalen oder Inferenzketten gebunden bleibt und durch lokale Korrekturen nicht ohne neue Zusatzannahmen oder steigende Reparaturkosten aufgelöst werden kann. Die domänenbezogene Lesart ersetzt daher nicht die fachliche Suche nach Fehlerquellen, sondern beginnt dort, wo diese Suche selbst auf eine wiederkehrende strukturelle Grenze verweist.

Strukturell betrachtet entspricht dieses Muster einer Effizienzgrenze im Sinne endlicher Suchbedingungen. Solange Spannungen als lokale Defekte gerahmt werden, bleibt das System im Modus fortgesetzter Verdichtung eines globalen Rahmens, also in weiterer Optimierung innerhalb derselben Architektur. Wenn Abweichungen jedoch stabil entlang von Regimegrenzen auftreten, verschiebt sich ihr epistemischer Status: Sie werden zu Markern verdichteter Prozessspannung, die anzeigen, dass zusätzliche Verdichtung nur noch mit disproportionalen Kosten möglich ist. In dieser Situation wird eine kontrollierte Öffnung des Modellraums methodologisch plausibel.

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass anhaltende kosmologische Spannungen methodologisch als Hinweise auf eine mögliche Überdehnung des globalen Einheitsanspruchs gelesen werden können. Solange dieser Anspruch nicht selbst zur Disposition gestellt wird, besteht die Gefahr, dass Spannungen vor allem lokal repariert werden, obwohl sie auch architektonische Fragen der Modellgeltung anzeigen könnten. Im nächsten Kapitel wird gezeigt, dass auch alternative Ansätze an diesem Punkt missverstanden werden können: Ihr Scheitern muss nicht immer fehlende Erklärungskraft bedeuten, sondern kann auch daraus folgen, dass sie weiterhin am Erwartungshorizont eines globalen Ersatzmodells gemessen werden.

5. Partielle Erfolge alternativer Ansätze

Die moderne Kosmologie ist seit langem von alternativen Ansätzen begleitet, die jeweils spezifische Schwächen des etablierten Modells adressieren. In der fachlichen Debatte werden diese Ansätze häufig unter dem gemeinsamen Etikett des Scheiterns zusammengefasst, weil sie sich nicht als vollständiger Ersatz eines globalen Weltmodells durchsetzen konnten. Eine solche Bewertung greift jedoch zu kurz. Sie übersieht, dass manche dieser Ansätze in klar begrenzten Domänen erklärende oder heuristische Stärke besitzen, während ihr vermeintliches Scheitern vor allem dort auftritt, wo ihnen ein globaler Geltungsanspruch abverlangt wird.

Charakteristisch für diese Ansätze ist ihre domänenspezifische Ausrichtung. Sie sind auf bestimmte Phänomenbereiche zugeschnitten, etwa auf Abweichungen auf galaktischen Skalen, auf Probleme der Strukturbildung oder auf Anomalien im frühen Universum. In diesen Kontexten können sie teilweise präzisere, heuristisch fruchtbare oder konzeptionell alternative Beschreibungen anbieten. Ihre Erklärungskraft resultiert dann nicht aus universeller Reichweite, sondern aus der Fokussierung auf klar definierte Regime mit spezifisch relevanten Freiheitsgraden.

Dies zeigt sich an unterschiedlichen Typen alternativer Ansätze. Modifizierte Dynamiken oder Gravitationstheorien gewinnen ihre Plausibilität häufig dort, wo galaktische Rotations- und Beschleunigungsphänomene besonders prägnant beschrieben werden sollen, geraten aber unter deutlich stärkeren Anschlussdruck, wenn zugleich Hintergrundstrahlung, großräumige Strukturbildung und kosmologische Evolution erklärt werden müssen. Early-Dark-Energy-Modelle adressieren gezielt die Hubble-Spannung, können jedoch neue Spannungen in anderen Parameterbeziehungen oder im Strukturwachstum erzeugen. Modelle dynamischer Dunkler Energie gewinnen dort an Relevanz, wo späte Expansionsdaten vom einfachsten Λ -Modell abzuweichen scheinen, bleiben aber stark von Datenkombinationen, Parametrisierungen und statistischer Bewertung abhängig. Solche Beispiele zeigen nicht, dass Alternativen global überlegen wären. Sie zeigen vielmehr, dass ihr Erkenntniswert häufig zunächst in klar begrenzten Problem- und Geltungsbereichen liegt.

Problematisch wird ihre Rezeption dort, wo sie ausschließlich als konkurrierende Weltmodelle interpretiert werden. In diesem Rahmen müssen sie denselben Anspruch erfüllen wie das etablierte Modell: die konsistente Beschreibung aller kosmologischen Skalen und Epochen. Dieser Anspruch ist jedoch nicht immer aus der internen Logik der Ansätze motiviert, sondern teilweise aus dem dominanten Einheitsideal der Disziplin. Das Scheitern vieler Alternativen ist daher nicht ausschließlich als empirisches Scheitern zu verstehen. Es ist teilweise auch durch einen methodologischen Erwartungshorizont mitbestimmt, der lokale oder domänenspezifische Erklärungskraft nur dann voll anerkennt, wenn sie sich zu einem vollständigen globalen Ersatzmodell ausweiten lässt.

Diese Dynamik zeigt sich besonders deutlich in der wiederkehrenden Forderung nach globaler Konsistenz. Ansätze, die lokale Phänomene erfolgreich erklären, geraten unter Rechtfertigungsdruck, sobald sie keine vollständige kosmologische Evolution liefern oder Schwierigkeiten bei der Einbindung in großräumige Strukturbildung zeigen. Ihre partiellen Erfolge werden dadurch entwertet, statt als Hinweise auf domänenspezifische Erklärungskraft ernst genommen zu werden. Der Diskurs verengt sich auf eine binäre Logik aus Akzeptanz oder Verwerfung.

Eine alternative Lesart ist jedoch möglich und epistemisch fruchtbarer. Wird der globale Einheitsanspruch nicht mehr als alleiniger Bewertungsmaßstab behandelt, lassen sich die Erfolge alternativer Ansätze als Hinweise auf mögliche lokale Validierungen interpretieren. Sie zeigen dann nicht zwingend, dass ein alternatives Weltmodell global überlegen wäre, sondern dass bestimmte Phänomenbereiche unter passenden Modellbedingungen anders, teilweise präziser oder heuristisch fruchtbarer beschrieben werden können. Das Fehlen universeller Anschlussfähigkeit ist in diesem Licht nicht automatisch ein Defizit, sondern kann eine erwartbare Konsequenz begrenzter Geltungsbereiche sein.

Diese Reinterpretation verändert auch den Status der Alternativen selbst. Sie erscheinen nicht länger nur als unvollständige oder fehlerhafte Weltmodelle, sondern als mögliche effektive Modelle mit klar umrissenen Anwendungsdomänen. Das legitimiert sie jedoch nicht automatisch. Lokale Erklärungskraft ist lediglich ein erster Hinweis auf mögliche domänenspezifische Geltung. Voraussetzung bleibt, dass ihre Geltungsbereiche explizit benannt, ihre empirischen Erfolge unabhängig überprüfbar und ihre Übergangsbedingungen zu benachbarten Domänen offengelegt werden. Eine Alternative gewinnt daher nicht schon dadurch epistemisches Gewicht, dass sie ein lokales Problem besser beschreibt, sondern erst dadurch, dass sie ihre Reichweite, ihre Kosten und ihre Anschlussbedingungen transparent macht.

Aus dieser Perspektive werden alternative Ansätze zu wichtigen epistemischen Instrumenten. Sie helfen, die Struktur kosmologischer Probleme zu kartieren, indem sie sichtbar machen, wo bestimmte Annahmen funktionieren und wo sie an ihre Grenzen stoßen. Gerade dort, wo sie mit dem Standardmodell in Spannung geraten, markieren sie potenzielle Übergangsbereiche zwischen unterschiedlichen Modellregimen.

Das zentrale Argument dieses Kapitels lautet daher, dass das vermeintliche Scheitern alternativer Ansätze weniger über deren Qualität aussagt als über den Erwartungshorizont, in dem sie bewertet werden. Solange der Maßstab ein globales Weltmodell bleibt, erscheinen domänenspezifische Theorien zwangsläufig als unzureichend. Wird dieser Maßstab jedoch selbst hinterfragt, gewinnen ihre partiellen Erfolge eine neue epistemische Bedeutung. Sie werden zu Bausteinen einer differenzierten Modelllandschaft, in der Erklärungskraft an angemessene Domänenzuordnung gebunden ist.

Dieses Ergebnis bereitet den methodologischen Vorschlag des folgenden Kapitels vor. Dort wird gezeigt, dass ein Übergang von der Suche nach einem einheitlichen Weltmodell zu einer systematisch organisierten Menge domänenspezifischer Modelle nicht nur möglich, sondern unter bestimmten Bedingungen methodologisch naheliegt.

6. Modell-Sets und die Verschiebung der Falsifikationsebene

Wenn die bisherigen Kapitel zutreffen, dann folgt daraus eine methodologische Konsequenz, die über einzelne Modellanpassungen hinausgeht. Das Problem liegt dann nicht nur in unzureichenden Parametrisierungen oder fehlenden Zusatztermen, sondern auch in der Ebene, auf der Falsifikation ansetzt. Solange der Anspruch besteht, ein einziges kosmologisches Modell müsse alle Domänen zugleich erklären, können empirische Abweichungen vorschnell als lokale Defekte interpretiert werden, obwohl sie in manchen Fällen auf eine Überdehnung des Modellanspruchs hinweisen könnten.

Der hier vorgeschlagene Perspektivwechsel besteht nicht in der Aufgabe von Falsifikation, sondern in ihrer Verschiebung. Statt primär einzelne Parameter, Untermodelle oder Korrekturmechanismen zu falsifizieren, wird der Fokus auf die Modellarchitektur selbst gelenkt. Die zentrale Frage lautet dann nicht mehr, welches Modell „das richtige“ ist, sondern für welche Domäne welches Modell gilt und unter welchen Bedingungen Übergänge zwischen Domänen gerechtfertigt sind.

Dieser Ansatz lässt sich als Arbeit mit Modell-Sets beschreiben. Er knüpft an modelltheoretische Ansätze an, in denen Modelle nicht bloß als direkte Abbilder von Theorie oder Welt, sondern als eigenständige epistemische Vermittlungsinstanzen verstanden werden (Morgan and Morrison 1999; Hartmann 1999). Ein Modell-Set ist eine geordnete Architektur mehrerer domänenspezifischer Modelle, deren Geltungsbereiche explizit bestimmt, deren Übergänge methodisch kontrolliert und deren Überlappungen durch gemeinsame Konsistenzbedingungen diszipliniert werden. Die Modelle eines solchen Sets stehen nicht notwendig in Konkurrenz zueinander im Sinne exklusiver Gesamtdeutungen, sondern können sich funktional ergänzen, sofern ihre jeweiligen Domänen, Anschlussstellen und Grenzen offen ausgewiesen werden. Ihre Koexistenz ist dann kein Zeichen theoretischer Beliebigkeit, sondern Ausdruck einer expliziten Organisation unterschiedlicher Beschreibungsregime unter gemeinsamen Prüfbedingungen.

Ein Modell-Set unterliegt dabei strengen methodologischen Bedingungen. Erstens müssen die Domänen eindeutig spezifiziert sein, etwa durch Skalenordnungen, physikalische Regime oder charakteristische Inferenzketten. Zweitens müssen die einzelnen Modelle innerhalb ihrer jeweiligen Domänen empirisch überprüfbar bleiben. Drittens bedarf es eines gemeinsamen Konsistenzkerns, der grundlegende Anforderungen wie kausale Anschlussfähigkeit, statistische Kohärenz, lokale Erhaltungs-, Symmetrie- und Kovarianzbedingungen wahrt. Modell-Sets ersetzen damit nicht den Wahrheitsanspruch wissenschaftlicher Modelle, sondern präzisieren die Bedingungen seiner Anwendung.

Übergangsregeln bezeichnen dabei keine zusätzlichen Naturgesetze, sondern methodologische Bedingungen, unter denen Ergebnisse, Parameter oder Inferenzketten aus einer Domäne in eine andere übertragen werden dürfen. Sie betreffen etwa die Kompatibilität von Skalenannahmen, die Stabilität gemeinsamer Parameter, die Kontrolle von Näherungen und die empirische Belastbarkeit von Überlappungszonen. Problematisch wird eine Übergangsregel, wenn die Kopplung zweier Domänen nur noch durch fortlaufende Sonderannahmen, Kalibrationen oder lokale Reparaturen aufrechterhalten werden kann, ohne entsprechenden Gewinn an Robustheit zu erzeugen. Der Konsistenzkern eines Modell-Sets bezeichnet demgegenüber jene Minimalbedingungen, die auch bei domänenspezifischer Modellierung nicht aufgegeben werden dürfen, etwa kausale Anschlussfähigkeit, statistische Kohärenz und grundlegende Erhaltungs- oder Symmetrieanahmen.

Die entscheidende Veränderung betrifft die Falsifikationsebene. In einem Einheitsmodell wird Falsifikation primär lokal verstanden: Ein Messwert widerspricht einer Vorhersage, also muss das Modell angepasst oder erweitert werden. In einem Modell-Set kann Falsifikation auch architektonisch ansetzen. Wenn ein Modell in einer bestimmten Domäne nur noch durch fortlaufende Hilfskonstruktionen, Kalibrationen oder Sonderannahmen aufrechterhalten werden kann, ist nicht zwingend das Modell als solches falsch, sondern möglicherweise seine Zuordnung zu dieser Domäne. Falsifiziert wird dann der Anspruch, dass dieses Modell dort noch gelten sollte.

Diese Verschiebung ergänzt die Unterscheidung zwischen kontextueller und globaler Falsifikation wissenschaftlicher Modelle. Während kontextuelle Falsifikation die Geltung eines Modells innerhalb eines bestimmten Anwendungsbereichs betrifft und globale Falsifikation seinen übergreifenden Geltungsanspruch infrage stellt, setzt architektonische Falsifikation an der Modell-Domänen-Zuordnung selbst an. Zur Disposition steht dann nicht nur ein Modellinhalt, sondern die Frage, ob ein Modell einer bestimmten Domäne noch angemessen zugeordnet ist.

Diese Form der Falsifikation ist weniger spektakulär, aber epistemisch präziser. Sie führt nicht zu abrupten Theorieabbrüchen, sondern zu einer schrittweisen Reorganisation des Modellraums. Spannungen erhalten in diesem Rahmen eine neue Funktion. Sie markieren Stellen, an denen Übergänge zwischen Modellen unzureichend verstanden sind oder an denen Domänengrenzen falsch gezogen wurden.

In diesem Sinne können persistente kosmologische Spannungen unter bestimmten Bedingungen als Meta-Signale interpretiert werden. Sie verweisen dann nicht unmittelbar auf fehlerhafte Daten oder falsche Gleichungen, sondern auf eine möglicherweise inkonsistente Modellarchitektur oder eine problematische Zuordnung von Modell und Domäne. Ihre Persistenz ist in dieser Lesart kein methodisches Versagen, sondern ein Hinweis darauf, dass sie auf der falschen Ebene adressiert werden könnten. Erst wenn der Einheitsanspruch selbst methodologisch prüfbar wird, kann ihr heuristisches Potenzial vollständig sichtbar werden.

Ein Modell-Set verlangt daher eine andere Form wissenschaftlicher Disziplin. Es erfordert die Bereitschaft, Geltungsgrenzen explizit zu benennen und Übergangsprobleme offen zu thematisieren, statt sie durch ad hoc-Erweiterungen zu verdecken. Zugleich schützt dieser Ansatz vor einer inflationären Ausweitung einzelner Modelle, indem er den strukturellen Druck mindert, jedes neue empirische Detail in einen globalen Rahmen integrieren zu müssen. Komplexität wird nicht eliminiert, sondern methodisch organisiert.

Damit wird Einheit nicht aufgegeben, sondern auf eine zweite Ordnung verschoben. Einheit erster Ordnung bestünde darin, alle relevanten kosmologischen Phänomene unmittelbar unter ein einziges Modell und einen gemeinsamen Parameterraum zu bringen. Einheit zweiter Ordnung besteht dagegen darin, mehrere domänenspezifische Modelle durch explizite Übergangsregeln, überlappende Prüfzonen und gemeinsame Konsistenzbedingungen miteinander zu verbinden. Der Anspruch auf Kohärenz bleibt erhalten, wird aber nicht mehr stillschweigend an die universelle Reichweite eines einzelnen Modells gebunden. Entscheidend ist daher nicht weniger Einheit, sondern eine andere Form von Einheit: architektonisch, kontrolliert und domänenbewusst.

Einheit zweiter Ordnung ist daher nur dann mehr als bloßer Pluralismus, wenn mindestens drei Bedingungen erfüllt sind. Erstens müssen die Geltungsbereiche der beteiligten Modelle explizit bestimmt sein. Zweitens müssen ihre Übergänge und Überlappungen empirisch prüfbar bleiben. Drittens muss ein gemeinsamer Konsistenzkern erhalten bleiben, der verhindert, dass jede Spannung durch beliebige Domänenentrennung neutralisiert wird. Einheit zweiter Ordnung besteht somit nicht in der bloßen Addition mehrerer Modelle, sondern in ihrer kontrollierten, prüfbaren und begrenzten Kopplung.

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass der Übergang von einem kosmologischen Weltmodell zu einer domänenverantwortlichen Organisation von Modellen keine Kapitulation vor der Komplexität darstellt. Vielmehr handelt es sich um eine Präzisierung der Falsifikationspraxis, die es erlaubt, empirische Spannungen dort ernst zu nehmen, wo sie erkenntnisfördernd sind. Im folgenden Kapitel werden die mit diesem Ansatz verbundenen Kosten und Gewinne explizit gegeneinander abgewogen.

Vom kosmologischen Weltmodell zur Einheit zweiter Ordnung

Verschiebung der Modellarchitektur und der Falsifikationsebene

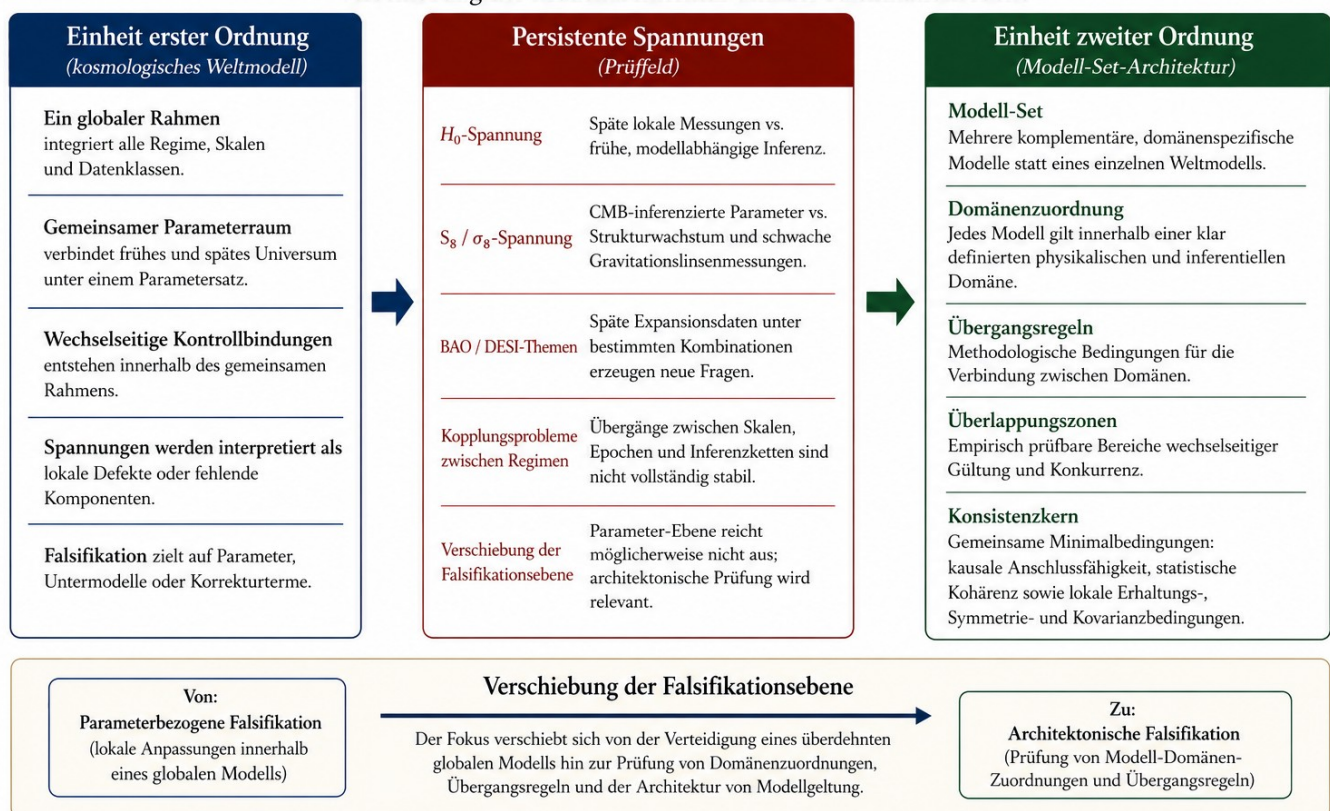


Abbildung 1: Vom kosmologischen Weltmodell zur Einheit zweiter Ordnung.

Die Abbildung zeigt die methodologische Verschiebung von parameterbezogener Falsifikation innerhalb eines globalen Modellrahmens hin zu architektonischer Falsifikation, bei der Modell-Domänen-Zuordnungen, Übergangsregeln und Konsistenzbedingungen selbst prüfbar werden.

7. Kosten, Nutzen und epistemische Ehrlichkeit

Der Übergang von einem globalen kosmologischen Weltmodell zu einer Architektur domänenspezifischer Modell-Sets ist nicht kostenneutral. Er verlangt einen bewussten Verzicht auf theoretische Ideale, die lange Zeit als selbstverständliche wissenschaftliche Tugenden galten. Gerade deshalb ist es notwendig, die mit diesem Schritt verbundenen Kosten offen zu benennen und ihnen die epistemischen Gewinne gegenüberzustellen. Nur so lässt sich vermeiden, dass der vorgeschlagene Ansatz als bloßer Rückzug vor ungelösten Problemen missverstanden wird.

Ein offensichtlicher Preis ist der Verlust formaler Eleganz. Ein einheitliches Weltmodell besitzt eine klare ästhetische und kommunikative Qualität. Es verspricht Übersichtlichkeit, mathematische Geschlossenheit und eine einfache narrative Struktur. Modell-Sets wirken demgegenüber fragmentierter. Sie ersetzen eine singuläre Erklärung durch eine geordnete Vielfalt von Beschreibungen, deren Zusammenspiel selbst erklärungsbedürftig ist. Diese zusätzliche Meta-Ebene erhöht die strukturelle Komplexität der Theorie.

Ein weiterer, gewichtigerer Kostenpunkt betrifft den möglichen Verlust globaler wechselseitiger Kontrollbindungen. Ein Einheitsmodell zwingt unterschiedliche Datenarten und Messdomänen in einen gemeinsamen Parameterraum und verhindert so lokale Überanpassung. Wird dieser Rahmen aufgegeben, besteht die Gefahr, dass Spannungen durch Domänensegmentierung neutralisiert werden, statt epistemisch wirksam zu bleiben. Modell-Sets laufen damit grundsätzlich Gefahr, Fragmentierung zu begünstigen, wenn keine zusätzlichen Disziplinierungsmechanismen etabliert werden.

Dieser Einwand ist ernst zu nehmen. Er verfehlt jedoch den hier vorgeschlagenen Ansatz, sofern Modell-Sets nicht als bloßer Pluralismus verstanden werden. Eine domänenverantwortliche Modellarchitektur ist nur dann epistemisch legitim, wenn sie Fragmentierung ausdrücklich begrenzt. Dazu gehören überlappende Geltungsbereiche, in denen unterschiedliche Modelle konkurrierenden Erklärungsdruck erfahren, klar definierte Übergangsregime, gemeinsame Konsistenzbedingungen und methodische Kriterien, die eine unbegrenzte Aufspaltung von Domänen verhindern. Modell-Sets ersetzen Cross-Constraints daher nicht, sondern verlagern sie von einem impliziten globalen Parameterraum auf eine ausdrücklich kontrollierte architektonische Ebene. Ihr Anspruch ist nicht geringere Strenge, sondern eine explizitere Form von Strenge.

Die hier vorgeschlagene domänenverantwortliche Modellierung ersetzt etablierte Verfahren statistischer Modellbewertung nicht. Bayesian Model Selection, Information Criteria oder posterior-predictive Prüfungen bleiben zentrale Instrumente, um konkurrierende Modelle innerhalb gegebener Vergleichsräume zu bewerten. Die hier verhandelte Frage liegt jedoch auf einer anderen Ebene: Wie werden die Domänen, Übergänge und Vergleichsräume bestimmt, innerhalb derer solche formalen Bewertungen überhaupt sinnvoll greifen? Modell-Sets verstehen sich daher nicht als Alternative zu statistischer Modellselektion, sondern als methodologische Architektur, in der deren Anwendungsbedingungen expliziter gemacht werden.

Dem stehen erhebliche epistemische Gewinne gegenüber. Der wichtigste besteht in einem ehrlicheren Umgang mit Inkonsistenzen. Anstatt Spannungen zu glätten oder zu marginalisieren, können sie als systematische Hinweise auf Geltungsgrenzen gelesen werden. Die Theorie verliert dadurch an scheinbarer Geschlossenheit, gewinnt aber an interpretativer Transparenz. Sichtbare Übergangsprobleme ersetzen verdeckte Inkonsistenzen.

Ein weiterer Gewinn liegt in der Reduktion ad hoc-Erweiterungen. Der Druck, jedes neue empirische Detail innerhalb eines globalen Modells erklären zu müssen, führt häufig zur Anhäufung zusätzlicher Parameter und Hilfskonstruktionen mit unklarem theoretischem Status. Modell-Sets entschärfen diesen Druck, indem sie neue Phänomene zunächst als Hinweise auf domänenspezifische Effekte behandeln. Dadurch wird theoretische Inflation begrenzt, ohne empirische Strenge aufzugeben.

In Begriffen struktureller Suche effizienz entspricht dies einem Übergang von fortgesetzter Stabilitätsverdichtung zu einer partiellen Explorationsöffnung: Nicht weil Neuheit an sich angestrebt würde, sondern weil die Kosten der weiteren Verdichtung im globalen Rahmen schneller wachsen als der Robustheitsgewinn. Der Wechsel betrifft damit nicht primär einzelne Parameter, sondern die Steuerlogik des Modellraums.

Besonders bedeutsam ist der Gewinn an heuristischer Offenheit. In einem Einheitsmodell erscheinen Abweichungen primär als Defekte, die zu beseitigen sind. In einem Modell-Set werden sie zu Ausgangspunkten neuer Fragestellungen. Der Fokus verschiebt sich von der Verteidigung eines überlasteten Rahmens hin zur Untersuchung von Übergängen, Grenzregimen und Skaleneffekten. Diese Verschiebung erweitert den Raum sinnvoller Forschung, statt ihn einzuengen.

Ein häufig erhobener Einwand lautet, dass Modell-Sets zu epistemischer Beliebigkeit führen könnten. Ohne ein übergeordnetes Weltmodell drohe der Verlust objektiver Maßstäbe. Dieser Einwand übersieht jedoch, dass Modell-Sets explizite Kriterien für Domänenzuordnung, empirische Bewährung und Konsistenz verlangen. Gerade weil diese Kriterien offen benannt werden, ist der Ansatz methodologisch strenger als ein impliziter Einheitsanspruch, der seine eigenen Grenzen verdeckt.

Epistemische Ehrlichkeit bedeutet in diesem Kontext nicht, auf Erklärung zu verzichten, sondern den Anspruch der Erklärung präzise zu begrenzen. Wahrheit wird nicht relativiert, sondern an klar definierte Geltungsbereiche gebunden. Diese Bindung erhöht die Überprüfbarkeit theoretischer Aussagen, statt sie zu schwächen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der vorgeschlagene Ansatz einen bewussten Tausch vollzieht. Er gibt formale Eleganz und narrative Einfachheit teilweise auf, um empirische Robustheit und methodologische Transparenz zu gewinnen. Angesichts der zunehmenden Präzision kosmologischer Daten erscheint dieser Tausch nicht nur vertretbar, sondern unter bestimmten Bedingungen methodologisch geboten. Ein Modell, das seine eigenen Grenzen kennt, ist epistemisch stärker als ein Modell, das sie systematisch verdeckt.

8. Vom kosmologischen Weltmodell zur domänenverantwortlichen Modellierung

Dieses Paper hat argumentiert, dass einige der gegenwärtig diskutierten Probleme der Kosmologie nicht ausschließlich als fehlerhafte Daten, unzureichende Gleichungen oder lokale Parameterprobleme verstanden werden sollten. Sie können auch auf einen überdehnten Anspruch an Einheitlichkeit hinweisen. Die Persistenz kosmologischer Spannungen erscheint vor diesem Hintergrund nicht notwendig als bloße Anomalie, sondern als möglicher Hinweis auf eine Modellarchitektur, deren Geltungsgrenzen nicht hinreichend explizit reflektiert werden.

Zentral für diese Diagnose war die Unterscheidung zwischen theoretischer Selbstbeschreibung und tatsächlicher Praxis. Während sich die Kosmologie weiterhin überwiegend als Disziplin eines einheitlichen Weltmodells versteht, zeigt die Analyse, dass sie faktisch längst domänenabhängig arbeitet. Unterschiedliche Skalen, physikalische Regime und methodische Zugänge werden mit unterschiedlichen Modellierungsstrategien adressiert. Diese Pluralität ist funktional erfolgreich, bleibt jedoch methodologisch unterbestimmt, solange sie nicht ausdrücklich als Frage von Domänenzuordnung, Übergangsregeln und Modellgeltung reflektiert wird.

Vor diesem Hintergrund wurde vorgeschlagen, kosmologische Spannungen epistemisch neu zu lesen. Sie erscheinen dann nicht mehr primär als Störungen eines ansonsten kohärenten Modells, sondern als Marker für Übergangsprobleme zwischen Modellregimen. Ihre Stabilität verweist weniger auf hartnäckige Detailfehler als auf eine falsche Wahl der Falsifikationsebene. Nicht einzelne Parameter oder Zusatzannahmen stehen zur Disposition, sondern der Anspruch, ein einziges Modell könne alle kosmologischen Domänen zugleich tragen.

Der Übergang von einem Einheitsmodell zu einer domänenverantwortlichen Organisation von Modell-Sets bedeutet dabei keine Abkehr von wissenschaftlicher Strenge. Im Gegenteil: Er verschiebt den Fokus von der Verteidigung eines überlasteten globalen Rahmens hin zur präzisen Bestimmung von Geltungsbereichen, Übergängen und Konsistenzbedingungen. Modelle werden dadurch nicht relativiert, sondern kontextualisiert. Ihre Erklärungskraft bemisst sich nicht an universeller Reichweite, sondern an ihrer Angemessenheit für klar definierte Domänen.

Diese Perspektive erlaubt zugleich eine Neubewertung alternativer Ansätze. Deren partielle Erfolge erscheinen nicht länger nur als unzureichende Annäherungen an ein globales Ideal, sondern als mögliche domänenspezifische Beschreibungen, deren epistemische Berechtigung an explizite Geltungsbereiche, Anschlussbedingungen und empirische Prüfungen gebunden bleibt. Das vermeintliche Scheitern vieler Alternativen erweist sich damit nicht automatisch als Ausdruck mangelnder theoretischer Qualität, sondern kann auch ein Symptom eines falsch gesetzten Erwartungshorizonts sein.

Methodologisch fordert dieser Ansatz eine erhöhte Form epistemischer Ehrlichkeit. Er verlangt, Geltungsgrenzen offen zu benennen, Übergänge explizit zu thematisieren und Spannungen nicht vorschnell zu glätten. Der Preis ist ein teilweiser Verlust an formaler Eleganz und narrativer Einfachheit. Der Gewinn besteht in einer Theoriearchitektur, die mit wachsender empirischer Präzision nicht fragiler, sondern belastbarer wird.

Auch der hier entwickelte Vorschlag bleibt selbst domänengebunden. Er beansprucht Geltung als wissenschaftsphilosophische Methodologie der Kosmologie, nicht als physikalische Theorie und nicht als Ersatz fachlicher Modellprüfung. Damit unterliegt er selbst dem Prinzip, das er beschreibt: Seine Tragfähigkeit hängt von der Angemessenheit seiner Domäne, seiner Übergangsbegriffe und seiner Anschlussfähigkeit an fachliche Prüfung ab.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Festhalten an einem kosmologischen Weltmodell nicht deshalb problematisch ist, weil Einheit als wissenschaftliches Ziel falsch wäre. Problematisch wird es dort, wo ein einzelnes Modell mehr leisten soll, als seine Domänen, Übergänge und Inferenzbedingungen tragen können. Eine domänenverantwortliche Modellierung ersetzt den Anspruch auf Einheit daher nicht durch Beliebigkeit, sondern durch Einheit zweiter Ordnung: durch eine explizite Architektur von Geltungsbereichen, Übergangsregeln, überlappenden Prüfzonen und gemeinsamen Konsistenzanforderungen. In einer Kosmologie, deren Daten immer präziser und vielfältiger werden, wäre dies kein Rückschritt, sondern eine reifere Form theoretischer Selbstverständigung.

Literatur

Adame, A. G., J. Aguilar, S. Ahlen, S. Alam, D. M. Alexander, M. Alvarez, O. Alves, et al. 2025. “DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations.” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2025 (02): 021. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021>.

Abdul Karim, M., et al. 2025. “DESI DR2 Results II: Measurements of Baryon Acoustic Oscillations and Cosmological Constraints.” arXiv:2503.14738.

Aghamousa, Amir, Jessica Aguilar, Steve Ahlen, Shadab Alam, Lori E. Allen, Carlos Allende Prieto, James Annis, et al. 2016. “The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design.” *arXiv preprint* arXiv:1611.00036.

Aghanim, N., Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A. J. Banday, et al. 2020. “Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters.” *Astronomy & Astrophysics* 641: A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.

Baumann, Daniel, Alberto Nicolis, Leonardo Senatore, and Matias Zaldarriaga. 2012. “Cosmological Non-Linearities as an Effective Fluid.” *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012 (07): 051.

Butterfield, Jeremy, and Christopher Isham. 1999. “On the Emergence of Time in Quantum Gravity.” In *The Arguments of Time*, edited by Jeremy Butterfield, 111–168. Oxford: Oxford University Press.

Carrasco, John Joseph M., Mark P. Hertzberg, and Leonardo Senatore. 2012. “The Effective Field Theory of Cosmological Large Scale Structures.” *Journal of High Energy Physics* 2012 (09): 082.

Cartwright, Nancy. 1983. *How the Laws of Physics Lie*. Oxford: Oxford University Press.

Cartwright, Nancy. 1999. *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Di Valentino, Eleonora, Olga Mena, Sunny Vagnozzi, Luis Visinelli, Weiqiang Yang, Alessandro Melchiorri, David F. Mota, Adam G. Riess, and Joseph Silk. 2021. “In the Realm of the Hubble Tension: A Review of Solutions.” *Classical and Quantum Gravity* 38 (15): 153001. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/ac086d>.

Ellis, George F. R. 2011. “The Epistemology of Cosmology.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 42 (3): 176–189.

Ellis, George F. R., and Joseph Silk. 2014. “Scientific Method: Defend the Integrity of Physics.” *Nature* 516 (7531): 321–323.

Hacking, Ian. 1983. *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hartmann, Stephan. 1999. “Models and Stories in Hadron Physics.” In *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*, edited by Mary S. Morgan and Margaret Morrison, 326–346. Cambridge: Cambridge University Press.

- Heymans, Catherine, Tilman Tröster, Marika Asgari, Chris Blake, Hendrik Hildebrandt, Benjamin Joachimi, Konrad Kuijken, et al. 2021. "KiDS-1000 Cosmology: Multi-Probe Weak Gravitational Lensing and Spectroscopic Galaxy Clustering Constraints." *Astronomy & Astrophysics* 646: A140. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202039063>.
- Kuhn, Thomas S. 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, Imre. 1978. *The Methodology of Scientific Research Programmes*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Morgan, Mary S., and Margaret Morrison, eds. 1999. *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peebles, P. J. E. 2020. *Cosmology's Century: An Inside History of Our Modern Understanding of the Universe*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Rapp, Stefan. 2026a. *Domänen, Grenzen und Übergangsfunktionen: Zur domänenrelativen Geltung, Migration und Kopplung von Modellen unter endlichen Bedingungen*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19542403>.
- Rapp, Stefan. 2026b. *Effiziente Suche unter endlichen Bedingungen: Eine Dual-Mode-Architektur des Modellmanagements*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18799355>.
- Rapp, Stefan. 2026c. *Epistemik: Modellmanagement unter endlichen Bedingungen*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18441301>.
- Rapp, Stefan. 2026d. *Friktion: Grenzsinal endlicher Tragfähigkeit in subjektiven, intersubjektiven und funktional-empirischen Stabilitätsräumen*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18434648>.
- Rapp, Stefan. 2026e. *Kontextuelle und globale Falsifikation wissenschaftlicher Modelle: Eine integrierte Theorie epistemischer Geltung*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17692470>.
- Rapp, Stefan. 2026f. *Revision unter endlichen Bedingungen: Eine Theorie der Modelltransformation in der Epistemik*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18935785>.
- Riess, Adam G., Wenlong Yuan, Lucas M. Macri, Dan Scolnic, Dillon Brout, Stefano Casertano, David O. Jones, et al. 2022. "A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with $1 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team." *The Astrophysical Journal Letters* 934 (1): L7.
- Smolin, Lee. 2006. *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next*. Boston: Houghton Mifflin.
- Smolin, Lee. 2013. *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt.
- Verde, Licia, Tommaso Treu, and Adam G. Riess. 2019. "Tensions between the Early and Late Universe." *Nature Astronomy* 3: 891–895. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0902-0>.
- Weinberg, Steven. 1993. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon Books.

Appendix A – Exemplarische Modell-Set-Lesart der Hubble-Spannung

A1. Status der Fallskizze

Dieser Appendix skizziert exemplarisch, wie die im Haupttext entwickelte Perspektive auf eine konkrete kosmologische Spannung angewandt werden kann. Die Hubble-Spannung dient dabei nicht als Beweis für eine Domänengrenze und auch nicht als Ausgangspunkt eines alternativen kosmologischen Modells. Sie wird vielmehr als methodologischer Prüffall behandelt: An ihr lässt sich zeigen, wie eine Spannung nicht nur als Differenz zweier Messwerte, sondern als Problem der Kopplung unterschiedlicher Modellierungs- und Inferenzregime gelesen werden kann.

Die Fallskizze ersetzt keine fachkosmologische Analyse. Sie entscheidet nicht zwischen Planck, SH0ES, Early-Dark-Energy-Modellen, modifizierter später Expansion oder systematischen Fehlerhypothesen. Ihr Ziel ist begrenzter: Sie zeigt, wie eine domänenverantwortliche Modell-Set-Analyse fragen würde, welche Annahmen notwendig sind, um Ergebnisse aus unterschiedlichen kosmologischen Domänen in einen gemeinsamen Parameteranspruch zu überführen.

Damit bleibt der Status der Analyse methodologisch. Die Hubble-Spannung wird nicht als Nachweis behandelt, dass das kosmologische Standardmodell falsch sei. Sie dient als Beispiel dafür, wie eine persistente Spannung unter bestimmten Bedingungen zur Prüfung der Modell-Domänen-Zuordnung und der Falsifikationsebene werden kann.

A2. Die Hubble-Spannung als Kopplungsproblem

Die Hubble-Spannung betrifft die Differenz zwischen modellabhängig aus frühen kosmologischen Daten rekonstruierten und lokal kalibrierten späten Bestimmungen der heutigen Expansionsrate des Universums. Unter Annahme des Λ CDM-Modells ergibt sich aus der kosmischen Hintergrundstrahlung ein niedrigerer Wert für H_0 , während lokale Distanzletermessungen, insbesondere über Cepheiden und Supernovae Ia, höhere Werte nahelegen. In der Literatur wird diese Spannung seit Jahren als eine der deutlichsten Herausforderungen für die Standardarchitektur der Kosmologie diskutiert (Verde, Treu, and Riess 2019; Di Valentino et al. 2021; Riess et al. 2022).

Methodologisch ist daran entscheidend, dass hier nicht einfach zwei direkte Messungen derselben Größe gegenüberstehen. Die frühe Bestimmung aus der Hintergrundstrahlung ist modellabhängig: Sie rekonstruiert den heutigen Wert von H_0 aus frühen kosmologischen Bedingungen, Parametern und Entwicklungsgleichungen innerhalb eines globalen Modells. Die lokale Bestimmung arbeitet dagegen über eine späte, astrophysikalisch verankerte Distanzleiter. Beide Verfahren zielen nominal auf dieselbe Größe, aber sie tun dies über unterschiedliche Messwege, Inferenzketten und Modellannahmen.

Eine rein lokale Lesart behandelt diese Differenz als Problem einzelner Messungen, Kalibrationen oder Zusatzparameter. Eine domänenverantwortliche Lesart setzt früher an. Sie fragt, welche Übergangsannahmen erforderlich sind, damit eine frühe kosmologische Inferenz und eine späte lokale Messkette denselben Parameteranspruch tragen können. Die Spannung wird dadurch nicht relativiert, sondern strukturell präzisiert: Sie betrifft nicht nur den Wert von H_0 , sondern auch die Stabilität der Verbindung zwischen früher und später kosmologischer Domäne.

A3. Standardlesarten als lokale Reparaturstrategien

Die etablierte fachliche Diskussion behandelt die Hubble-Spannung zu Recht zunächst als Problem möglicher Fehlerquellen und Modellanpassungen. Auf der Beobachtungsseite werden Kalibrationen, Cepheidenmessungen, Supernova-Stichproben, Staubkorrekturen, Metallizitätseffekte oder alternative Distanzindikatoren geprüft. Auf der theoretischen Seite werden Erweiterungen diskutiert, etwa zusätzliche frühe Energiekomponenten, modifizierte Rekombinationsgeschichten, veränderte Eigenschaften dunkler Energie, zusätzliche relativistische Freiheitsgrade oder Modifikationen der späten Expansion.

Diese Strategien sind fachlich notwendig. Eine domänenverantwortliche Lesart ersetzt sie nicht. Ebenso ersetzt sie keine statistische Modellbewertung; Bayes-Faktoren, Information Criteria oder posterior-predictive Prüfungen bleiben notwendig, bewerten jedoch Modelle innerhalb zuvor bestimmter Vergleichsräume. Sie stellt jedoch eine zusätzliche Frage: Bleibt die Spannung trotz wiederholter lokaler Prüfungen und Reparaturversuche stabil, dann könnte sie anzeigen, dass das Problem nicht nur auf der Ebene einzelner Messdetails oder Parameter liegt. Sie könnte dann auf eine problematische Kopplung zwischen Domänen verweisen, genauer zwischen einer frühen, modellrekonstruierten kosmologischen Domäne und einer späten, lokal-astrophysikalischen Messdomäne.

Entscheidend ist dabei nicht, dass lokale Reparaturen falsch wären. Entscheidend ist, ob sie Robustheit erzeugen oder lediglich Spannungen verschieben. Wenn eine Anpassung den H_0 -Konflikt reduziert, zugleich aber neue Probleme bei Baryon Acoustic Oscillations, Supernova-Daten, Strukturwachstum, Lensing oder anderen Parametern erzeugt, wird die Spannung architektonisch relevant. Dann steht nicht nur ein einzelner Wert zur Disposition, sondern die Frage, ob der gemeinsame Parameterraum die beteiligten Domänen noch angemessen koppelt.

A4. Modell-Set-Lesart der Hubble-Spannung

Eine Modell-Set-Lesart beginnt daher nicht mit der Frage, welcher H_0 -Wert isoliert „richtig“ ist. Sie fragt zuerst, welche Domänen, Inferenzketten und Übergangsregeln im Spiel sind. Mindestens zwei Domänen lassen sich unterscheiden: eine frühe kosmologische Domäne, in der H_0 aus der Hintergrundstrahlung im Rahmen eines globalen Entwicklungsmodells erschlossen wird, und eine späte lokale Domäne, in der H_0 über kalibrierte astrophysikalische Distanzmessungen bestimmt wird.

In einem klassischen Einheitsmodell werden beide Domänen durch einen gemeinsamen Parametersatz verbunden. Genau darin liegt die Stärke von Λ CDM: Es erlaubt, frühe und späte Daten in einen gemeinsamen kosmologischen Rahmen zu integrieren. Die Hubble-Spannung wird methodologisch interessant, wenn diese Verbindung nur noch durch zunehmende Zusatzannahmen stabilisiert werden kann. Dann wird die Frage relevant, ob die Kopplung selbst geprüft werden muss.

Ein Modell-Set würde die beiden Domänen nicht einfach trennen. Es würde vielmehr verlangen, ihre jeweilige Geltung, ihre Überlappungszonen und ihre Übergangsbedingungen ausdrücklich auszuweisen. Die frühe Domäne dürfte nicht beliebig von späten Daten entkoppelt werden; die späte Domäne dürfte nicht beliebig gegen CMB-, BAO- oder Strukturwachstumsdaten abgeschirmt werden. Der methodologische Gewinn liegt gerade darin, dass der Konflikt nicht verdeckt, sondern präziser lokalisiert wird: Wo genau bricht die Übertragung zwischen den Domänen unter Belastung ein?

A5. Übergangsregeln und Konsistenzkern

Für die Hubble-Spannung wären Übergangsregeln diejenigen Bedingungen, unter denen frühe und späte Bestimmungen von H_0 sinnvoll aufeinander bezogen werden dürfen. Dazu gehört erstens die Stabilität gemeinsamer Parameterannahmen: Der aus frühen Daten rekonstruierte Parameter darf nicht ohne explizite Zusatzbedingungen mit einem lokal gemessenen Wert identifiziert werden, wenn die beteiligten Inferenzketten unterschiedliche Modelllasten tragen.

Eine minimale Übergangsregel ließe sich exemplarisch so formulieren: Eine frühe, CMB-basierte Rekonstruktion von H_0 und eine späte, lokal kalibrierte Bestimmung von H_0 dürfen nur dann als stabil gekoppelte Bestimmungen derselben kosmologischen Größe gelten, wenn nicht nur die nominelle Identität des Parameters, sondern auch die Modell- und Inferenzbedingungen seiner Bestimmung stabil verbunden sind. Diese Verbindung muss relevante Kontrollinstanzen wie BAO, Supernovae, Lensing und Strukturwachstum ohne systematische Verschlechterung tragen. Wird die Übereinstimmung nur durch Zusatzannahmen erreicht, die andere Kontrollbereiche belasten, ist nicht allein der Parameterwert problematisch, sondern auch die Übergangsregel zwischen früher und später Domäne.

Zweitens müssen Überlappungszonen belastbar bleiben. Baryon Acoustic Oscillations, Supernova-Daten, Lensing, Strukturwachstum und andere kosmologische Proben fungieren hier nicht bloß als zusätzliche Daten, sondern als Kontrollinstanzen für die Kopplung zwischen früher und später Domäne. Ein Modell, das die Hubble-Spannung reduziert, aber diese Kontrollinstanzen systematisch verschlechtert, löst das Problem nicht architektonisch, sondern verschiebt es.

Drittens braucht ein Modell-Set einen Konsistenzkern. Dieser umfasst keine vollständige Einheitsdynamik, wohl aber minimale Bedingungen, die nicht beliebig aufgegeben werden dürfen: statistische Kohärenz, kausale Anschlussfähigkeit, kontrollierte Näherungen, empirische Prüfbarkeit und Kompatibilität mit robust etablierten Beobachtungsbereichen. Ein domänenspezifisches Modell darf daher nicht einfach dadurch legitimiert werden, dass es einen lokalen Wert besser trifft. Es muss zeigen, wie seine lokale Erklärungskraft mit den übrigen stabilen Bereichen der kosmologischen Praxis verbunden bleibt.

A6. Architektonische Falsifikation als zusätzliche Prüfebene

Die Hubble-Spannung kann in dieser Perspektive als Beispiel dafür dienen, wie architektonische Falsifikation als zusätzliche Prüfebene relevant werden kann. Falsifiziert wäre dann nicht unmittelbar Λ CDM als Ganzes und auch nicht automatisch eine bestimmte Messmethode. Zur Disposition stünde vielmehr der Anspruch, dass derselbe globale Modellrahmen die frühe und die späte Domäne ohne zusätzliche Übergangsprobleme in einem stabilen Parametersatz verbinden kann.

Diese Verschiebung ist methodologisch wichtig. Ein Parameterkonflikt fragt: Welcher Wert von H_0 stimmt? Eine architektonische Frage lautet: Unter welchen Bedingungen dürfen unterschiedliche Verfahren überhaupt denselben Parameteranspruch erheben? Die erste Frage bleibt notwendig, aber sie ist möglicherweise nicht vollständig. Die zweite Frage macht sichtbar, dass Falsifikation auch an der Zuordnung von Modellen zu Domänen ansetzen kann.

Die Hubble-Spannung wäre in diesem Sinne kein bloßer Defekt, der möglichst schnell geglättet werden muss. Sie wäre ein diagnostischer Belastungstest für die Modellarchitektur. Ihr Erkenntniswert läge nicht nur darin, ob sie eines Tages durch bessere Daten, bessere Kalibration oder neue Physik verschwindet. Er läge auch darin, dass sie zeigt, welche Kopplungsannahmen zwischen frühen und späten kosmologischen Regimen stillschweigend vorausgesetzt werden.

A7. Ergebnis der Fallskizze

Die Modell-Set-Lesart löst die Hubble-Spannung nicht. Sie verschiebt auch nicht die fachliche Entscheidung über Messgenauigkeit, systematische Fehler oder physikalische Erweiterungen. Ihr Beitrag liegt darin, die Spannung auf einer anderen Ebene lesbar zu machen. Sie zeigt, dass die Hubble-Spannung nicht nur als Konkurrenz zweier Zahlenwerte verstanden werden muss, sondern als Testfall für die Bedingungen, unter denen unterschiedliche Domänen in einem gemeinsamen kosmologischen Modellraum gekoppelt werden.

Damit erfüllt die Hubble-Spannung exemplarisch die Funktion, die der Haupttext kosmologischen Spannungen allgemein zuschreibt. Sie kann, sofern ihre Persistenz und Regimegebundenheit fachlich bestätigt bleiben, als Hinweis auf eine mögliche Überdehnung des Einheitsanspruchs gelesen werden. Diese Lesart bleibt konditional. Sie beansprucht keine physikalische Entscheidung. Sie macht jedoch sichtbar, wie aus einer lokalen Spannung eine architektonische Frage der Modellgeltung werden kann.

Der methodologische Ertrag besteht daher in einer Präzisierung der Fragestellung. Nicht nur: Welcher H_0 -Wert ist korrekt? Nicht nur: Welche Erweiterung löst die Spannung am elegantesten? Sondern zusätzlich: Welche Domänen, Übergangsregeln und Konsistenzbedingungen müssen erfüllt sein, damit ein gemeinsamer H_0 -Anspruch epistemisch gerechtfertigt bleibt? Genau an dieser Stelle zeigt sich der Nutzen einer domänenverantwortlichen Modellierung als Einheit zweiter Ordnung.

Appendix B – Epistemische Lesart für Epistemik-Leser

Dieser Appendix richtet sich an Leserinnen und Leser, die mit dem begrifflichen Rahmen der Epistemik arbeiten. Er ist nicht erforderlich, um die kosmologische Methodologie des Haupttexts zu verstehen, und führt keine zusätzliche physikalische Behauptung ein. Seine Funktion besteht ausschließlich darin, die im Haupttext entwickelte Argumentation in das Vokabular von Geltung, Stabilisierung, Friktion, Überdehnung und Modellarchitektur zu übersetzen, wie es im Rahmen der Epistemik als Theorie des Modellmanagements unter endlichen Bedingungen entwickelt wurde (Rapp 2026c; Rapp 2026d; Rapp 2026e).

B1. Überdehnung als Stabilitätsverdichtung

Der im Haupttext kritisierte Einheitsanspruch lässt sich epistemisch als Phase fortgesetzter Stabilitätsverdichtung beschreiben. Ein globales Weltmodell fungiert dabei als hochverdichteter Stabilitätsraum: Unterschiedliche Datenarten, Skalen und Inferenzketten werden in einen gemeinsamen Parameterraum integriert.

Solange diese Integration mit proportionalem Robustheitsgewinn einhergeht, ist sie epistemisch sinnvoll. Problematisch wird sie dort, wo zusätzliche Integration nur noch unter steigenden strukturellen Kosten möglich ist. Persistente Spannungen markieren in dieser Lesart nicht primär lokale Inkonsistenzen, sondern eine Verdichtung, die an ihre Effizienzgrenze gelangt.

Kosmologische Spannungen erscheinen damit als Friktionsverdichtungen: als Signale dafür, dass weitere Modellanpassungen zunehmend überproportionalen Aufwand erfordern, ohne entsprechenden Robustheitsgewinn zu erzeugen.

B2. Persistente Spannungen als Reallokationsindikatoren

Im Haupttext wurde gezeigt, dass viele Spannungen bevorzugt entlang von Übergängen zwischen physikalischen Regimen auftreten. Epistemisch gelesen markieren solche Übergänge strukturelle Schwellen im Modellraum.

Solange Abweichungen als bloße Parameterprobleme behandelt werden, verbleibt das System im Modus fortgesetzter Verdichtung. Erst wenn Spannungen stabil entlang von Regimegrenzen auftreten, verändert sich ihr Status: Sie werden zu Indikatoren einer möglichen Fehlzuordnung von Geltungsbereichen.

Der vorgeschlagene Übergang zu Modell-Sets entspricht in dieser Perspektive keinem Rückzug vor Komplexität, sondern einer kontrollierten Öffnung des Modellraums. Der Modus verschiebt sich von reiner Optimierung innerhalb eines globalen Rahmens zu einer partiellen Exploration strukturierter Alternativen.

B3. Verschiebung der Falsifikationsebene

Im Einheitsmodell setzt Falsifikation primär lokal an: Parameter, Untermodelle oder Zusatzannahmen stehen zur Disposition. In der hier entwickelten Architektur verschiebt sich die Falsifikationsebene auf die Zuordnung von Modellen zu Domänen.

Falsifiziert wird nicht zwingend ein Modell als solches, sondern sein Anspruch, in einer bestimmten Domäne zu gelten. Diese architektonische Falsifikation betrifft die Organisation des Modellraums, nicht lediglich dessen interne Feinjustierung.

Spannungen gewinnen dadurch eine neue epistemische Funktion. Sie werden nicht als Defekte verstanden, die zu glätten sind, sondern als Marker für Übergangsprobleme zwischen Regimen.

B4. Modell-Sets als strukturierte Exploration

Modell-Sets realisieren eine organisierte Form von Exploration unter Erhalt eines gemeinsamen Konsistenzkerns. Exploration bedeutet hier nicht theoretische Beliebigkeit, sondern explizite Domänenzuordnung, überlappende Geltungsbereiche und methodisch definierte Übergänge.

In einfacherer Form bedeutet dies: Wenn die weitere Reparatur eines globalen Modells zunehmend mehr Aufwand erzeugt, ohne einen entsprechenden Gewinn an Robustheit zu bringen, wird es rational, einen Teil der theoretischen Aufmerksamkeit auf alternative Domänenzuordnungen zu verschieben. Die Stabilisierungskraft wird dabei nicht aufgegeben, sondern anders verteilt. Ein Teil bleibt auf die Erhaltung gemeinsamer Konsistenzbedingungen gerichtet, ein anderer Teil öffnet den Modellraum für strukturierte Alternativen. Die domänenverantwortliche Modellierung ist damit keine Abkehr von Einheit, sondern eine Reorganisation von Einheit auf architektonischer Ebene.

B5. Grenzen der metatheoretischen Lesart

Diese epistemische Rekonstruktion ersetzt keine physikalische Analyse und liefert keine Entscheidung über konkrete kosmologische Hypothesen. Sie übersetzt die im Haupttext beschriebene Dynamik lediglich in ein allgemeineres Modell endlicher Such- und Stabilisierungsbedingungen. Ihre eigene Geltung bleibt daher auf die methodologische Ebene begrenzt. Ob einzelne kosmologische Modelle empirisch tragfähig sind, kann nur innerhalb der jeweiligen fachlichen Prüfverfahren entschieden werden. Der Appendix versteht sich entsprechend als Schnittstelle zwischen kosmologischer Methodologie und allgemeiner Modellarchitektur, nicht als Ersatz fachlicher Argumentation.