

»What We Thought Was Unseeable«: Die mediale Konstruktion der ersten authentischen empirischen Bilder eines Schwarzen Lochs

Paula Muhr

Einführung

Am 10. April 2019 wurde das erste empirische Bild eines Schwarzen Lochs auf sechs weltweit verteilten und zeitgleich laufenden Pressekonferenzen der Öffentlichkeit präsentiert (Goddi et al. 2019: 32). Dieses bahnbrechende Bild zeigt das supermassereiche rotierende Schwarze Loch M87*, das sich im Zentrum der Riesengalaxie Messier 87 befindet und 55 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt ist.¹ Schwarze Löcher sind mysteriöse kosmische Objekte, deren enorme Masse auf einen kleinen Raum konzentriert ist. Infolgedessen entsteht in ihrer unmittelbaren Umgebung ein extrem starkes Gravitationsfeld, dem sogar das Licht nicht entkommen kann. Die Grenze dieses Bereichs wird als Ereignishorizont (engl. event horizon) bezeichnet und gilt als das »definierende Merkmal« eines Schwarzen Lochs (EHTC 2019a: 1). Alles, was den Ereignishorizont nach innen überschreitet, verschwindet im Schwarzen Loch.

Die Existenz von Schwarzen Löchern wurde zuerst von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt. Seit den 1970ern gab es eine stetig wachsende Zahl astronomischer Messungen, die indirekte Beweise für die Existenz von Schwarzen Löchern lieferten. Dies geschah zunächst über die Messung ihrer Gravitationswirkungen auf benachbarte astronomische Objekte und im Jahr 2015 durch die Aufzeichnung von Gravitationswellen, Verzerrungen der

1 Die Masse des M87* ist geschätzt 6,5 Milliarden Mal größer als die der Sonne (EHTC 2019f: 1).

Raumzeit, die durch die Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern verursacht wurden (vgl. Goddi et al. 2019: 25f.). Diese Messungen ergaben jedoch keine Aufschlüsse über die Eigenschaften der unmittelbaren Umgebungen der Schwarzen Löcher, entsprechend dem von Einsteins Theorie vorhergesagten Ereignishorizont. Insofern waren die vor 2019 entstandenen wissenschaftlichen Bilder Schwarzer Löcher Ergebnisse von Computersimulationen, die die theoretischen Annahmen über diese rätselhaften Objekte visualisierten (vgl. etwa Mościbrodzka/Falcke/Shiokawa 2016).

Im Gegensatz dazu basierten die Bilder, die 2019 von der Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration, einem Team von mehr als 200 internationalen Wissenschaftler*innen, erzeugt wurden, das erste Mal auf den empirischen Datensätzen.² In diesem Sinne gelten die EHT-Bilder als die ersten empirischen Visualisierungen eines Schwarzen Lochs und dadurch auch als der erste »direkte visuelle Beweis« für die Existenz dieser mysteriösen astronomischen Objekte und ihrer Ereignishorizonte (EHTC 2019g).³ Dabei wurde mit diesen Bildern nicht nur ein grundsätzlich unsichtbares kosmisches Phänomen wissenschaftlich sichtbar gemacht. Vielmehr wurden Schwarze Löcher bzw. ihre unmittelbare Umgebung durch die Erstellung der EHT-Bilder empirisch erfassbar und erforschbar gemacht (vgl. dazu Muhr 2023). Wissenschaftler*innen nutzen also diese Bilder, um neue empirische Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften des M87* zu gewinnen und die bisher rein theoretischen Annahmen über den Ereignishorizont zu testen (EHTC 2019e, 2019f; Muhr 2023).⁴ Hinsichtlich dieser epistemischen Funktionen, die die EHT-Bilder im Kontext der physikalischen Grundlagenforschung erfüllen, ist ihre *empirische Authentizität* von höchster Priorität. Damit meine ich Folgendes:

-
- 2 Der Fokus der oben erwähnten Pressekonferenzen lag auf einem exemplarischen EHT-Bild. Jedoch hat das EHT-Team vier Bilder des M87* erzeugt – jeweils ein Bild für jeden von vier Messtagen (EHTC 2019a: 5, Fig. 3). Die EHT-Kollaboration wurde 2010 mit dem expliziten Ziel gegründet, »direkte« Bilder von Schwarzen Löchern, oder, genauer gesagt, von deren unmittelbarer Umgebung, zu erzeugen (ebd., 2).
 - 3 Meine Analyse wird aber zeigen, dass die empirische Natur dieser Bilder nicht bedeutet, dass ihre Erzeugung frei von theoretischen Annahmen war.
 - 4 Die hier analysierten Bilder sind nur der Anfang, da in der Zwischenzeit das EHT-Team weitere Bilder von M87* (EHTC 2021) wie auch die ersten empirischen Bilder von Sagittarius A*, dem Schwarzen Loch im Zentrum unserer Galaxie, veröffentlichte (EHTC 2022). Darüber hinaus arbeitet das Team gerade an der künftigen Erzeugung noch schärferer Bilder und Videos von M87* und Sagittarius A* (vgl. hierzu Bauman 2020: 29; Galison et al. 2023; wie auch <https://www.ngeht.org/about>).

Um valide und zuverlässige empirische Informationen über das visualisierte Schwarze Loch liefern zu können, muss nachweisbar sein, dass die EHT-Bilder weder Zufallsprodukte des aufwendigen und – wie wir sehen werden – oft sehr verwickelten bildgebenden Prozesses noch ein Ergebnis rein mathematischer Modellierung sind. Vielmehr muss nachweisbar sein, dass jedes EHT-Bild als Ergebnis seines komplexen Produktionsprozesses einen tragfähigen, in empirischer Messung begründeten *referentiellen* Bezug zu dem besagten kosmischen Objekt besitzt.⁵

Zur Betonung dieser empirischen Authentizität wurde das exemplarische EHT-Bild in den Ankündigungen an die breite Öffentlichkeit entweder implizit oder explizit mit einer fotografischen Aufnahme gleichgestellt. »We have taken the first picture of a black hole,« deklarierte Sheperd Doeleman, der Direktor der EHT, in der Pressemitteilung (EHTC 2019g). Andere Mitglieder des EHT-Teams (Wielgus 2020) sowie Autor*innen der zahlreichen Medienberichte haben das EHT-Bild danach explizit als »Fotografie« bezeichnet (Pimblet 2019; Seidler 2019). Diese diskursive Einbettung der neuartigen Bilder mag vorwiegend dadurch motiviert sein, dass Fotografie oft als das ultimative dokumentarische Medium rezipiert wird, das uns einen angeblich unvermittelten Blick auf »things as they are« ermöglicht (Walker 2020: 371). Zahlreiche medientheoretische Analysen haben jedoch überzeugend gezeigt, dass die vermeintliche mediale Transparenz und die damit verbundene »piktorale Selbstevidenz« der Fotografie nicht intrinsische Eigenschaften des Mediums sind, sondern kulturelle Artefakte, die durch bestimmte Gebrauchsweisen entstehen (Jäger 2006: 47; vgl. auch Walker 2020). Hinzu kommt, dass aus medientheoretischer Sicht die Gleichstellung zwischen den EHT-Bildern und der Fotografie eher irreführend als einleuchtend ist, weil dadurch die Medienspezifik der EHT-Bilder übersehen wird.

Wie in diesem Beitrag gezeigt wird, unterscheidet sich der Erstellungsprozess der EHT-Bilder grundsätzlich von der Erstellung fotografischer Aufnahmen und kann viel zutreffender als »making a picture« statt »taking a picture« bezeichnet werden. Ein Hinweis darauf ist allein die Tatsache, dass die algorithmenbasierte Erzeugung der EHT-Bilder aus nichtvisuellen Messdaten fast

5 Vgl. hierzu Jäger (2018: 308): »Auch wenn wir davon ausgehen, dass Prozesse der Generierung von Erkenntnisevidenz diskursiver, zeichenvermittelter Natur sind, heißt das nicht, dass das Wirkliche im erkenntniskonstitutiven Spiel der Zeichen keine bedeutende Rolle spielte.«

zwei Jahre in Anspruch genommen hat.⁶ Was zusätzlich gegen die pauschale Gleichstellung mit Fotografie spricht, ist, dass die EHT-Bilder des Schwarzen Lochs keineswegs mimetische Bilder sind, denn sie ähneln dem Schwarzen Loch visuell nicht.⁷

Was in jedem 2019 veröffentlichten EHT-Bild zu sehen ist, ist ein rot-orange leuchtender asymmetrischer Ring, dessen unterer Teil heller erscheint (vgl. EHTC 2019a: 5, Fig. 3). Wie das EHT-Team erklärte, visualisiert dieser Ring die innere Region der sogenannten Akkretionsscheibe (ebd.: 6). Diese besteht aus einfallendem glühendem Gas (d.h. Plasma), das sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit um das rotierende Schwarze Loch auf Spiralbahnen bewegt und dabei Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängen abgibt.⁸ In der Mitte befindet sich eine kreisförmige dunkle Region, die durch den innersten Photonenorbit begrenzt ist und als »Schatten« des Schwarzen Lochs bezeichnet wird (EHTC 2019a: 1f.; 2019e: 2; Falcke/Melia/Agol 2000). Es geht aus den Gleichungen der Relativitätstheorie hervor, dass der Photonenorbit eine instabile Kreisbahn in der unmittelbaren Nähe des Ereignishorizonts ist, auf der Lichtteilchen (d.h. Photonen) durch den Einfluss der Gravitationskraft des Schwarzen Lochs gebeugt werden und unendlich oft um das Schwarze Loch kreisen können. Die Photonen, die dieser Bahn entkommen oder sie von außen streifen, können einen entfernten Beobachter erreichen, während diejenigen, die sich innerhalb des Photonenorbits befinden, mit signifikant größerer Wahrscheinlichkeit den Ereignishorizont erreichen. Demnach ist der Schatten durch die Kombination der Lichtbeugung einerseits und des Einfangens von Licht andererseits durch den Ereignishorizont verursacht (Falcke/Melia/Agol 2000: L13f.). Laut den Annahmen der Relativitätstheorie ist daher für einen entfernten Beobachter der Schatten eines rotierenden Schwarzen Lochs mehrfach größer als der Ereignishorizont. Anders gesagt: Der Ereignishorizont selbst ist nicht in den EHT-Bildern sichtbar, da er sich innerhalb des Schattens befindet.⁹

6 Die Messdaten wurden im April 2017 erhoben (EHTC 2019a: 2).

7 Mir ist durchaus bewusst, dass nicht alle Fotografien zwingend mimetisch sind. Jedoch werden die vermeidliche mediale Transparenz und der »Anschein ursprünglicher Unvermitteltheit« vorwiegend mimetischen Fotografien zugeschrieben (Jäger 2006: 47).

8 Der untere Teil des Ringes wirkt in den Bildern dank des Doppler-Effekts heller: Das Gas im unteren Teil der Akkretionsscheibe bewegt sich auf den Beobachter zu, während im oberen Teil das Gegenteil geschieht (EHTC 2019d: 1).

9 Da Licht, das den Photonenorbit von außen überquert, schließlich im Ereignishorizont endet, werden der Photonenorbit und der Schatten, den er abgrenzt, als Strukturen

Im Grunde genommen macht die Messung der elektromagnetischen Strahlung, die die Akkretionsscheibe emittiert und in der Zwischenzeit die Erde erreicht hat, die Erzeugung der EHT-Bilder überhaupt möglich. Jedoch handelt es sich bei der vom EHT-Projekt aufgezeichneten elektromagnetischen Strahlung um Radiowellen, die sich außerhalb des Spektrums des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts befinden (EHTC 2019b: 3). Das bedeutet, dass nicht nur das Schwarze Loch und sein Ereignishorizont, sondern auch die umgebende Akkretionsscheibe grundsätzlich unsichtbar sind. Daher sind die EHT-Bilder farbcodierte Darstellungen in sogenannten »Falschfarben«. Diese Farben entsprechen nicht den intrinsischen Eigenschaften des visualisierten Objekts, sondern wurden vom EHT-Team arbiträr gewählt (Wielgus 2020).¹⁰ Zudem ist sogar der Helligkeitsverlauf der EHT-Bilder nichtmimetisch. Er ist in den Einheiten der sogenannten Helligkeitstemperatur dargestellt. Sie stimmen nicht mit den physikalischen Temperaturen des radioemittierenden Plasmas überein, aus dem die Akkretionsscheibe besteht (EHTC 2019d: 8f.).

Da sich aus epistemischer Sicht der Vergleich mit Fotografie als wenig produktiv erwiesen hat, drängt sich an dieser Stelle folgende Frage auf: Wie wurde die *Referentialität* der nichtmimetischen EHT-Bilder im Sinne ihrer

mit einer Größe auf der »Ereignishorizont-Skala« bezeichnet (EHTC 2019b: 2). Trotz seines Namens war es das Ziel des EHT-Projekts, den Schatten zu visualisieren, nicht den Ereignishorizont selbst.

- 10 Das Ergebnis der algorithmenbasierten Bildrekonstruktion aus den nichtvisuellen Daten sind zuerst Graustufenbilder, die im nächsten Schritt durch die Auswahl einer Farbskala in Farbbilder umgewandelt werden. Während die Verteilung der Helligkeitsunterschiede in den Bildern epistemische Bedeutung besitzt, gilt das für die einzelnen Farbtöne nicht. Dem EHT-Team war es also wichtig, eine einheitliche Farbskala zu entwickeln, bei der die Übergänge zwischen den einzelnen Farbtönen innerhalb dieser Farbskala gleichmäßig sind, um die Helligkeitsunterschiede der rekonstruierten Graustufenbilder nicht fälschlicherweise in Farbe zu übersetzen (vgl. <https://github.com/liamedeiros/ehplot/blob/docs/docs/COLORMAPS.ipynb>). Die Wahl einer bestimmten Farbskala, z.B. in verschiedenen Orange-Rot- oder alternativ in verschiedenen Blau- oder Rosatönen, war jedoch frei gestaltbar. Die orange-roten Farbtöne wurden gewählt, um die Bilder für die breite Öffentlichkeit zugänglicher zu machen, da diese Farben die Hitze der Akkretionsscheibe für Nicht-Expert*innen verdeutlichen sollten (vgl. dazu Galison et al. 2023: 6). Da die arbiträr gewählte Farbgebung der EHT-Bilder keine Konsequenz für ihre empirische Authentizität im wissenschaftlichen Kontext hat, wird sie hier nicht weiter diskutiert.

Fähigkeit, zuverlässige und authentische Informationen über das sonst unzugängliche Schwarze Loch zu liefern, hergestellt? Auf dem ersten Blick mag die Antwort trivial erscheinen. Man könnte behaupten, die Referentialität dieser Bilder verdanke sich jener komplexen Messung, die einen synchronisierten Einsatz mehrerer Teleskope auf der ganzen Welt beinhaltete, um ein virtuelles, erdumspannendes Teleskop zu bilden. Die so gewonnenen Messdaten – so wird es in Medienberichten meist erklärt – wurden dann dank neuartiger Algorithmen direkt in ein Bild umgewandelt. Diese Erklärung übersieht jedoch die bereits erwähnte Tatsache, dass die digitale Erstellung der EHT-Bilder aus den Messdaten fast zwei Jahre gedauert hat. Warum hat die Transformation der Messdaten in die endgültigen, als authentisch deklarierten Bilder so viel Zeit in Anspruch genommen? Und was genau geschah in diesem Transformationsprozess? Das EHT-Team hat diesen Prozess explizit als Bildrekonstruktion und nicht als Bildkonstruktion bezeichnet (EHTC 2019a: 4). Der Begriff der Bildrekonstruktion, den ich im Folgenden auch verwenden werde, impliziert, dass die EHT-Bilder nicht willkürlich erstellt, sondern aus den empirisch erhobenen Messsignalen zuverlässig zusammengebaut wurden. Mein Hauptargument in diesem Beitrag ist, dass wir gerade diesen aufwendigen Bildrekonstruktionsprozess verstehen müssen, um zu beurteilen, wie der Authentizitätsanspruch der entstandenen EHT-Bilder, im Sinne von ihrer Fähigkeit, »auf die ›wirkliche‹ Welt Bezug zu nehmen und diese von einer ›imaginären‹ Welt zu unterscheiden« (Jäger 2018: 316), erzeugt wurde. Meine Absicht ist dabei keineswegs zu behaupten, dass diese Bilder einen direkten, unmittelbaren Zugang zum dem visualisierten Schwarzen Loch bieten. Vielmehr möchte ich untersuchen, wie ihre Fähigkeit auf eine medientranszendente Realität zu verweisen medial konstruiert wurde. Um dies zu untersuchen, wird meine Analyse auf dem Begriff der *Referenzkette* des französischen Soziologen Bruno Latour und dem Begriff des *medialen Evidenzverfahrens* des deutschen Medienwissenschaftlers Ludwig Jäger basieren.

Der medientheoretische Hintergrund

Latour hat überzeugend argumentiert, dass wissenschaftliche Bilder nicht als mimetische Repräsentationen oder bloße visuelle Kopien der medientranszenten Realität zu verstehen sind. Der Grund dafür sei (Latour 1999: 69f.; 2014: 348), dass die Distanz zwischen einem Phänomen und seinem wissenschaftlichen Bild zu groß ist, um in einem einzigen Schritt überbrückt

werden zu können. Stattdessen sind Wissenschaftler*innen gezwungen, eine Reihe von Zwischenschritten einzubauen. Diese ermöglichen es ihnen, die Distanz zwischen dem Phänomen und seinem Bild in kleinere Abstände zu unterteilen, die sie dann durch eine Serie von aufeinanderfolgenden Inskriptionen überbrücken können.¹¹ So entsteht eine Kette von Transformationen, da die Wissenschaftler*innen in jedem Zwischenschritt die Inskriptionen, die aus dem vorhergehenden Schritt übertragen worden sind, überarbeiten und modifizieren, bevor sie sie zum nächsten Schritt transportieren (Latour 1999: 70; 2014: 347).

Wie eine solche Transformationskette in der wissenschaftlichen Praxis eingesetzt wird, zeigt Latour am Beispiel einer Expedition von Bodenwissenschaftler*innen, die er nach Amazonien begleitet. Sie gehen dabei der Frage nach, ob in einer bestimmten Region der Urwald in die Savanne vordringt oder der Urwald sich zurückzieht. Um die Antwort zu finden, entnehmen die Wissenschaftler*innen eine Reihe von Bodenproben, die sie dann durch eine von Latour genau beschriebene Kette von Transformationsschritten letztendlich in ein Diagramm des Bodenprofils umwandeln, das im Zentrum ihres Abschlussberichts steht. Latour (1999: 70–72) erklärt dazu, dass der Zweck der Transformationen bei jedem Information erzeugenden Schritt zweifach ist. Einerseits bewirken die Transformationen den Wirklichkeitsverlust durch Reduktion von Partikularität der vorangegangenen Inskription. Andererseits führen sie zu Wirklichkeitsgewinn durch Amplifikation der Vermittelbarkeit der nachfolgenden Inskription.

Dementsprechend entsteht das wissenschaftliche Bild als Ergebnis eines Prozesses, in dem eine kontinuierliche Kaskade von unterschiedlichen Aufzeichnungen und Zwischenbildern erzeugt wird. Laut Latour (ebd.: 71f.) ist eine reversible Bewegung entlang einer solchen ununterbrochenen und zurückverfolgbaren Kette der Transformationen das, was die Referenzialität und das wissensproduzierende Potential wissenschaftlicher Bilder garantiert. Anders gesagt: Nicht seine visuellen Eigenschaften, sondern die Details seines Erzeugungsprozesses bürgen für die potentielle empirische Authentizität und Wahrheitsevidenz eines wissenschaftlichen Bildes. Um die Authentizität im Sinne der nachweisbaren Referenzialität eines wissenschaftlichen Bildes über-

11 Latour (1999: 306f.) benutzt »Inskription« als allgemeinen Begriff für unterschiedliche grafische, textliche und bildliche Darstellungen und Aufzeichnungen, die im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung produziert werden.

haupt beurteilen zu können, müssen wir daher die zugrundeliegende Referenzkette analysieren.¹²

Tatsächlich lässt sich im Falle der EHT-Bilder eine zugrundeliegende Referenzkette erkennen. Sie besteht erstens aus der Erhebung der nichtvisuellen Messdaten (EHTC 2019b); zweitens aus der zweistufigen Datenvorbereitung (EHTC 2019c); und drittens aus der dreistufigen Bildrekonstruktion (EHTC 2019d). Bei näherer Betrachtung weicht jedoch ein wesentlicher Aspekt dieser Kette von Latours Beschreibung ab. In seiner Interpretation ist eine Transformationskette linear aufgebaut aus strikt aufeinanderfolgenden prozeduralen Schritten (Latour 1999: 69–79; vgl. besonders ebd.: 70, Fig. 2.21). Meine Analyse wird zeigen, dass im Gegensatz dazu einige Schritte der Transformationskette der EHT-Bilder – besonders in der Phase der Bilderrekonstruktion – *verzweigt* sind und aus mehreren, parallel laufenden und aufeinander verweisenden Operationen bestehen. Die Komplexität dieser verzweigten Kette mag auf den ersten Blick redundant erscheinen. Da aber die im April 2019 veröffentlichten EHT-Bilder die ersten ihrer Art waren, existierte zuvor kein etabliertes oder validiertes Verfahren für ihre Herstellung. Stattdessen musste die darunterliegende Referenzkette zuerst nicht nur herausgebildet, sondern auch durch ein entsprechendes *mediales Evidenzverfahren* – um den durch Jäger eingeführten Begriff zu benutzen – legitimiert werden.

Laut Jäger (2018: 319, Hervorh. im Orig.) muss in Situationen, in denen die Geltung des Wahrheitsgehalts eines Zeichens – im Sinne seiner Bezugnahme »auf die *Dadraußenheit* einer zeichentranszendente Welt« (d.h., empirische Authentizität) – aus irgendeinem Grund als problematisch erscheint oder noch nicht etabliert wurde, die Legitimität seiner Geltung durch mediale Prozeduren ausgehandelt und also diskursiv hervorgebracht werden. Diese Prozeduren, die in ihrer Gesamtheit von Jäger (2006: 41) als Evidenzverfahren bezeichnet werden, beinhalten die Herstellung eines komplexen Netzes »wechselseitiger Bezugnahmen differenter Medien aufeinander sowie die rekursive Rückwendung eines Mediums auf sich selbst«. Die Herstellung solcher inter- und intramedialen Bezugnahmen zwischen unterschiedlichen

12 Latour verwendet die Begriffe Transformationskette und Referenzkette austauschbar (vgl. Latour 1999: 70; 2014: 348) und ich folge hier diesem Vorgehen. Zudem ist der Umstand wichtig, dass im Unterschied zu Latour, der ein Team von Wissenschaftler*innen ethnographisch und in Echtzeit bei der Arbeit begleitet, meine Diskussion auf der Analyse der von EHT-Team publizierten wissenschaftlichen Aufsätzen beruht (EHTC 2019a; 2019b; 2019c; 2019d; 2019e; 2019f).

Zeichen ist rhetorisch organisiert und bedient sich »in der Regel in prozeduralen Grammatiken organisierter Mittel wie Beweis, Argumentation und Erklärung« (ebd.: 45). Das Resultat dieses Verfahrens der Verschaltung verschiedener Medien miteinander, bei dem »mediale Differenzen prozessiert werden«, nennt Jäger (ebd.: 41) *diskursive Evidenz*.¹³ Bei diesem Typus von Evidenz sind die Authentizitätsansprüche nur insoweit gewährleistet, als das darunterliegende Evidenzverfahren »hinsichtlich seiner prozeduralen Schritte nachvollzogen und hinsichtlich seiner Schlüssigkeit eingesehen werden kann« (ebd.: 46).¹⁴

Anders als bei Latour ist in Jägers Interpretation die Ununterbrochenheit der Kaskade der medialen Transformationen weder unerlässlich noch ausreichend, um einen zuverlässigen referentiellen Bezug zwischen dem Zeichen und dem medientranszendenten Phänomen herzustellen. Unerlässlich ist jedoch wie bei Latour die Zurückverfolgbarkeit der – hier aber nicht unbedingt linear ablaufenden – prozeduralen Schritte eines diskursiven Evidenzverfahrens. Zudem müssen die operative Notwendigkeit und die evidenzgenerierende Funktion jedes prozeduralen Schrittes dieses Verfahrens argumentativ durch *inferentielle* Bezüge von Zeichen auf Zeichen begründet werden.

Wie ich im Folgenden zeige, wurde die empirische Authentizität der ersten EHT-Bilder des Schwarzen Lochs durch ein speziell zugeschnittenes diskursives Evidenzverfahren konstruiert und beglaubigt, in dem verschiedene visuelle, mathematisch-algorithmische und rhetorische Operationen miteinander verschränkt wurden. Hier fokussiert sich meine Analyse vorwiegend auf die Phase des dreistufigen Bildrekonstruktionsprozesses, da die medialen Operationen dieser Phase die Transformation von nichtvisuellen Daten in ein Bild bewirken. Vor der Analyse dieser Phase müssen wir aber die vorhergehenden Schritte der Datenerhebung und -vorbereitung betrachten, da diese maßgeblich die Art der in der Bildrekonstruktionsphase vorgenommenen Operationen beeinflussen.

13 »Diskursiv« bedeutet hier: durch das Prozessieren von Zeichen verhandelt (vgl. Jäger 2018: 314f.).

14 Jäger unterscheidet dabei zwischen epistemischer und diskursiver Evidenz. Während der letztere Typ der Evidenz durch operative rhetorische Mittel herbeigeführt werden muss, beruht die epistemische Evidenz auf »den *subjektiven mentalen Zustand unmittelbarer Gewissheit*« (Jäger 2006: 45, Hervorh. im Orig.).

Die Erhebung und Vorbereitung der Messdaten

Das Messverfahren, durch das die Daten für die Rekonstruktion der EHT-Bilder erhoben wurden, heißt Langbasisinterferometrie (engl. very long baseline interferometry, VLBI). Sie beruht auf dem synchronisierten Einsatz von mehreren weltweit verteilten Radioteleskopen, die teilweise tausende Kilometer voneinander entfernt sind.¹⁵ Die GPS-basierte Synchronisation ermöglicht es, dass die zu einem virtuellen Netzwerk zusammengeschalteten Teleskope die Radiosignale im gleichen Frequenzband desselben Objekts am Himmel mit einer zeitlichen Übereinstimmung aufnehmen, die sich im Bereich von Nanosekunden befindet (EHTC 2019a: 3). Durch die spätere paarweise Überlagerung (Interferenz) der von einzelnen Teleskopen empfangenen Signale erhält man einen Datensatz, aus dem man die Position und/oder die räumlichen Eigenschaften des beobachteten astronomischen Objekts errechnen kann (vgl. dazu Bouman et al. 2016: 913–915). Die VLBI ist grundsätzlich nicht neu – sie wird seit den späten 1960ern benutzt (Thompson/Moran/Swenson 2017: 391). Aber erst durch die gezielte Arbeit des EHT-Teams konnte diese Methode konzeptionell und technologisch signifikant erweitert werden und jene hohe räumliche Auflösung erreichen, die für die Erzeugung der ersten Bilder eines Schwarzen Lochs notwendig war.¹⁶ Dabei wurde die notwendige Auflösung auf Basis jener theoretischen, auch als Grundlage für die aufwendigen Computersimulationen dienenden Annahmen über Schwarze Löcher und der bisherigen indirekten Messdaten definiert (EHTC 2019b: 5; Falcke/Melia/Agol 2000).

Generell ist die räumliche Auflösung der VLBI von zwei Faktoren abhängig: erstens dem maximalen Abstand zwischen den einzelnen Teleskopen; zweitens der Wellenlänge des gemessenen Radiosignals.¹⁷ Dementsprechend hat die instrumentelle Konstellation, die 2017 speziell für die EHT-Messung von M87* zusammengestellt wurde, den synchronen Einsatz von sieben Teleskopen an fünf geografischen Standorten benötigt, deren Basislängen

15 Die Entfernung zwischen je zwei Teleskopen wird als Basislänge bezeichnet (EHTC 2019a: 3).

16 Zusätzlich zur räumlichen Auflösung war es auch notwendig, die Messempfindlichkeit wesentlich zu erhöhen, um dadurch höhere Samplingraten und ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen. Die dafür notwendigen technischen Entwicklungen haben mehr als zehn Jahre gedauert (EHTC 2019b: 1–5).

17 Das Netzwerk hat eine nominale Auflösung von λ/L , wobei λ die Beobachtungswellenlänge und L die maximale projizierte Basislänge zwischen den Teleskopen ist (EHTC 2019a: 3).

zwischen 160 m und 10 700 km betrugen (EHTC 2019a: 3).¹⁸ Diese Anordnung erwies sich als notwendiges Minimum, um einen zwar extrem lückenhaften, aber für die rechnerische Rekonstruktion der ersten Bilder eines Schwarzen Lochs ausreichenden Datensatz zu liefern.¹⁹ Trotz relativ geringer Anzahl der Teleskope konnte das EHT-Team durch die Nutzung der sogenannten Aperturesynthese die notwendige Auflösung erreichen: »The rotation of Earth during the night causes the baselines connecting pairs of the telescopes to sweep through a range of angles and effective lengths, filling in the space of possible measurements« (Bouman 2020: 27).

Zudem waren bezüglich der Erhöhung der Auflösung weitere technische Weiterentwicklungen notwendig, um die Messung von Radiosignalen mit der Wellenlänge von 1,3 mm zu ermöglichen (EHTC 2019a: 3). Da die VLBI zuvor im Wellenlängenbereich von mehreren Millimetern bis mehreren Zentimetern erprobt wurde, war die Erweiterung auf die deutlich kürzere Wellenlänge mit neuen Herausforderung verbunden. So führte der Umstieg auf die kurze Wellenlänge zu einer Reihe neuartiger unvermeidbarer Messfehler, die die Bildrekonstruktion erschwerten.²⁰

Zwei Aspekte sind dabei von Interesse für unsere Diskussion: Erstens zeigt die bisherige Beschreibung, dass es sich bei der VLBI-Messung um keine passive Registrierung von Daten handelt, sondern um einen dynamischen Prozess. Denn bereits die Entscheidung darüber, welche Wellenlänge aufgenommen wird, hat direkte Auswirkungen auf die Qualität der erhobenen Daten und ihre anschließende Übersetzbarkeit in Bilder. Zweitens bedeutet das Auftreten

18 Das EHT-Interferometer bestand zu diesem Zeitpunkt aus acht Teleskopen, aber nur sieben von ihnen wurden für die Messung von M87* eingesetzt, da das achte Teleskop, aufgrund seines Standorts am Südpol, die von M87* emittierten Radiowellen nicht registrieren konnte. Stattdessen nahm das achte Teleskop an den VLBI-Messungen des Quasars 3C 279 und des Schwarzen Lochs Sagittarius A* teil, die ebenfalls an den gleichen vier Abenden im April 2017 stattfanden (EHTC 2019d: 5).

19 Die früheren EHT-Messungen wurden zunächst mit einer geringeren Anzahl von Teleskopen durchgeführt und mit Datensätzen erzeugt, aus denen keine eindeutige Bildrekonstruktion möglich war (Goddi et al. 2019: 28). Die Anordnung der Teleskope, die 2017 eingesetzt wurden, wurde auf Basis von Computersimulationen der synthetischen Datensätze entwickelt und getestet. Das Ergebnis war »an anticipated effective EHT angular resolution at 1.3 mm of 20 μ as [microarcseconds], yielding between about 36 resolution elements across a 120 $\times$ 120 μ as field of view« (EHTC 2019b: 5).

20 »Challenges at shorter wavelengths include increased noise in radio receiver electronics, higher atmospheric opacity, increased phase fluctuations caused by atmospheric turbulence, and decreased efficiency and size of radio telescopes« (EHTC 2019a: 3).

der spezifischen, durch die erhöhte räumliche Auflösung bedingten Messfehler, dass die traditionellen Methoden der Datenverarbeitung und Bildrekonstruktion in der VLBI nicht mehr ohne Weiteres für die vom EHT-Team erhobenen Daten geeignet waren. Es gab also kein standardisiertes Verfahren, das die Wissenschaftler*innen benutzen konnten, um die von den sieben Radioteleskopen aufgenommenen Signale in Bilder umzuwandeln. Aus diesem Grund musste das EHT-Team – um mit Latour zu sprechen – eine neue Transformationskette entwickeln und validieren, die auf die spezifischen Eigenschaften ihrer Daten zugeschnitten wurde.

Der erste Schritt in dieser Kette war der aufwendige Prozess der Datenerhebung durch das Interferometer (d.h. das Netzwerk von sieben Radioteleskopen). Diese Datenerhebung wurde am 5., 6., 10. und 11. April 2017 ausgeführt. An jedem dieser Tage fanden zwischen sieben und 25 einzelne Messungen statt, die jeweils zwischen drei und sieben Minuten dauerten (EHTC 2019a: 3). Daraus resultierten ca. 5 Petabyte Rohsignaldaten, die auf Hochleistungsfestplatten gespeichert wurden (Bouman 2020: 27).²¹ Im nächsten Abschnitt der Transformationskette wurden die Rohsignale der einzelnen Teleskope gemeinsam einer zweistufigen Datenverarbeitung unterzogen, die aus Korrelation und darauffolgender Kalibrierung bestand. Ziel der Datenverarbeitung war es, die Rohdaten in »science-ready data sets« umzuwandeln (EHTC 2019c: 2) und sie damit entsprechend für den nachfolgenden Schritt der Bildrekonstruktion aufzubereiten.

Während dieser Korrelation wurden zwei als Korrelatoren bezeichnete spezielle Supercomputer benutzt, um die paarweisen Rohsignale aller Teleskope zu korrelieren (d.h. zu kombinieren). Für diesen Transformationsschritt verwendeten die Korrelatoren das vorgegebene Modell der Erdgeometrie und die aufgezeichneten Zeitinformationen bei der Ankunft an jeder Station, um die Signale auf eine gemeinsame Zeitreferenz abzustimmen (EHTC 2019c: 3–5). Jeder Korrelator – einer im MIT Haystack Observatory und der andere im Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn – prozessierte jeweils die Hälfte des gesamten Datensatzes. Diese Aufteilung und die daraus resultierende Parallelisierung der Korrelation hatten zwei Gründe. Einerseits

21 Der Begriff »Rohdaten« wird hier als eine rein operative Beschreibung für die direkten Ausgaben der Messungen benutzt, die noch keiner gezielten Datenverarbeitung unterzogen wurden. Meine bisherige Analyse hat jedoch gezeigt, dass die Erzeugung der EHT-Rohdaten keineswegs frei von theoretischen Annahmen und mathematischer Modellierung war.

dienten sie der Beschleunigung des Prozesses. Andererseits ermöglichten sie die anschließende Validierung der von beiden verschiedenen Supercomputern erhaltenen Ergebnisse durch gegenseitigen Vergleich (EHTC 2019b: 14). Da dieser Vergleich wechselseitige Bezugnahmen zwischen den unabhängig prozessierten Datensätzen herstellte, um sie so zu beglaubigen, soll er hier als wichtige Instanz des EHT-spezifischen Evidenzverfahrens (Jäger 2006: 41) gedeutet werden.

Die parallelisierte Korrelation wurde für jeden Messtag gesondert durchgeführt und damit vier unabhängige Datensätze erzeugt. Diese enthielten aber einen hohen Anteil von durch unterschiedliche Messfehler entstandenem Rauschen, das zu einer verfälschten Bildrekonstruktion geführt hätte (EHTC 2019c: 3–5). Um dies zu vermeiden, musste anschließend ein Prozess der Kalibrierung durchgeführt werden. Dieser wurde speziell für die EHT-Daten entwickelt, um »bad data« – d.h. die messbedingten Inkohärenzen und Fehler (z.B. die Phasenverzerrungen, die durch unterschiedliche atmosphärische Bedingungen über den einzelnen Teleskopen entstehen) – zu beseitigen und dadurch einen ausreichend einheitlichen und zuverlässigen Datensatz für jeden Messtag zu erhalten (ebd.: 1 u. 5). In Anlehnung an Latour (1999: 70f.) kann man sagen, dass das EHT-Team bei diesem Transformationsschritt durch die Reduktion von Partikularität der vorangegangenen Datensätze die Amplifikation der Vermittelbarkeit der nachfolgenden Datensätze bewirkte. Dementsprechend fand in diesem Prozess eine enorme Datenkomprimierung statt – die resultierenden Datensätze wurden auf nur 250 Megabytes reduziert (Wielgus 2020).

Die technischen Details der Kalibrierung sind zu umfangreich, um hier genauer betrachtet zu werden. Für unsere Diskussion ist wesentlich, dass die Kalibrierung aus drei voneinander unabhängigen, parallel laufenden und speziell für diese Zwecke maßgeschneiderten automatisierten algorithmischen Pipelines bestand (EHTC 2019c: 4–14). Letztendlich wurde jedoch nur das Ergebnis einer dieser Pipelines als »the science-ready data set« deklariert und für die darauffolgende Bildrekonstruktion benutzt (ebd.: 2). Die Ergebnisse der anderen zwei Pipelines erfüllten dennoch eine entscheidende evidenzgenerierende Funktion. Der Vergleich der kalibrierten Datensätze der verschiedenen Pipelines hatte nämlich gezeigt, dass trotz der unterschiedlichen methodologischen Ansätze bei ihrer Erstellung die jeweiligen Ergebnisse ausreichend *konsistent* waren (ebd.: 14; 21–23). Diese durch intramediale Bezüge (Jäger 2006: 41) hergestellte Konsistenz diente zur Authentifizierung des Kalibrierungsprozesses, denn sie unterstrich, dass dessen Ergebnisse weder Zufalls-

produkte noch reine Artefakte eines bestimmten algorithmenbasierten methodologischen Zugangs waren. Im Folgenden werde ich zeigen, dass sich eine vergleichbare Multiplikation der einzelnen Transformationsschritte in parallel laufenden Operationen durch alle Phasen der Bildrekonstruktion als definierendes Merkmal des EHT-spezifischen Evidenzverfahrens fortsetzt.

Herausforderungen der Bildrekonstruktion

Die als Ergebnis der Datenverarbeitung entstandenen Datensätze bestanden aus einer Reihe von durch paarweise Korrelation von Signalen errechneten Interferenzmustern, die in der Fachsprache als »calibrated complex visibilities« (kalibrierte komplexe Sichtbarkeiten) bezeichnet werden (EHTC 2019d: 4). Diese komplexen Sichtbarkeiten entsprechen Raumfrequenzen – oder im Fachterminus – Fourier-Komponenten der Helligkeitsverteilung des Zielobjekts am Himmel.²² Das bedeutet, dass die mit einem idealen Interferometer gemessenen Sichtbarkeiten durch Anwendung einer erprobten mathematischen Methode, die als Fourier-Transformation bekannt ist, direkt in das Bild des Schwarzen Lochs umgewandelt werden können.

In der Praxis ist der Weg von den gemessenen Sichtbarkeiten bis zum Bild deutlich komplizierter. Erstens beinhalten die kalibrierten Sichtbarkeiten trotz der aufwendigen Datenvorbereitung weiterhin einen hohen Anteil an Rauschen. Das macht ihre direkte Umwandlung in ein empirisch authentisches Bild eines Schwarzen Lochs unmöglich.²³ Zweitens sind die EHT-

22 »An interferometer like the EHT samples the Fourier transform of the image on the sky. By correlating the data obtained from N stations, $N(N-1)/2$ spatial frequencies are measured. As the Earth rotates, those spatial frequencies form tracks in the Fourier plane to produce a sparsely sampled Fourier transform of the sky image.« (EHTC 2019d: 5f.) Es ist wichtig zu betonen, dass die Sichtbarkeiten (d.h. Ortsfrequenzen) nichtvisuelle Daten sind, die die Dimension $1/\text{Länge}$ haben. Anders gesagt ist Ortsfrequenz ein Maß dafür, wie oft sich sinusförmige Komponenten der Struktur pro Abstandseinheit wiederholen. Mathematisch betrachtet kann jedes Bild ohne Informationsverlust ins Ortsfrequenzspektrum (d.h. Fourierdomäne) zerlegt und dann durch die sogenannte Fourier-Transformation aus diesem Spektrum wiederhergestellt werden. In diesem Sinne ist die Fourierdomäne eine mathematisch veränderte, nichträumliche Darstellung des räumlich aufgelösten Bildes (vgl. Pedrotti et al. 2007: Kap. 25; Thompson/Moran/Swenson 2017: 76–108).

23 »In practice, each measured visibility is contaminated by thermal noise, station-dependent errors, and baseline-dependent errors [...] In addition to thermal noise, measured

Datensätze stark fragmentarisch und lückenhaft, da nur wenige Fourier-Komponenten des Bildes trotz der oben erwähnten Aperturesynthese gemessen werden können (ebd.). Auch wenn diese Einschränkung für die VLBI charakteristisch ist, war sie im Falle von EHT durch die geringe Anzahl der für die Messung geeigneten Teleskope besonders ausgeprägt (ebd.: 9). Infolgedessen gilt, dass »the inverse problem of determining an image from a measured set of visibilities is ill-posed. Consequently, reconstructed images are not unique – they always require information, assumptions, or constraints beyond the interferometer measurements« (ebd.: 4).

In anderen Worten: Aus dem gleichen kalibrierten EHT-Datensatz können mathematisch unendlich viele unterschiedliche Bilder rekonstruiert werden, deren visuelle Eigenschaften durch eine Reihe von interpretativen Entscheidungen bestimmt sind, die die Wissenschaftler*innen bei der Bildrekonstruktion treffen müssen. Wie konnte man dennoch aus den EHT-Daten empirisch authentische Bilder mit einem referentiellen Bezug zum Schwarzen Loch erzeugen? Und wie konnte die Referentialität der rekonstruierten Bilder beglaubigt werden, wenn es keine unabhängige Verifizierungsmöglichkeit gibt, d.h., »there are no previous VLBI images of any source at 1.3 mm wavelength, and there are no comparable black hole images on event-horizon scales at any wavelength« (EHTC 2019d: 9)? Wie wir im Folgenden sehen werden, lag die Lösung in der Entwicklung einer neuartigen mehrstufigen Bildrekonstruktionskette, in der sich unterschiedliche visuelle, algorithmische und diskursive Operationen im Sinne des Jägerschen *Evidenzverfahrens* gegenseitig beglaubigten.

»Blind imaging«

Bei der konventionellen VLBI, die Wellenlängen im cm-Bereich misst, ist der Prozess der Bildrekonstruktion gut etabliert. Er besteht typischerweise aus der Anwendung des CLEAN Algorithmus, der 1974 von Jan Högbom entwickelt wurde und auf dem statistischen Verfahren der inversen Modellierung basiert (Thompson/Moran/Swenson 2017: 551–557). Zuerst wird hier aus den kalibrierten Sichtbarkeiten durch inverse Fourier-Transformation ein sogenanntes »dirty image« errechnet, das wegen der lückenhaften veräuschten Messung viele Störungen enthält. Danach arbeitet der Algorithmus durch iterative Schritte daran, diese Störungen mathematisch approximativ

visibilities have systematic errors on both their amplitudes and phases.« (EHTC 2019d: 2f.)

zu erfassen und dann aus dem »schmutzigen Bild« zu dekonvolvieren (d.h. herauszurechnen) und so ein optimales »sauberes« Bild zu generieren. Dabei arbeitet der CLEAN-Algorithmus unter der Annahme, dass ein Bild eine Ansammlung von punktförmigen Quellen ist, und sucht dementsprechend nach den hellsten Punkten im Bild (Thompson/Moran/Swenson 2017: 552). Aus der Sicht der EHT ist diese Annahme aber problematisch, da die Akkretionsscheibe nicht eine punktförmige, sondern eine räumlich ausgedehnte Quelle ist, deren innere Struktur von Interesse ist. Zudem ist CLEAN in seiner Standardversion nicht in der Lage, mit jenen spezifischen Arten von Rauschen umzugehen, die in den EHT-Daten enthalten sind (EHTC 2019d: 4; Bouman et al. 2016: 915). Um diese Probleme zu umgehen, passte das EHT-Team im ersten Schritt den CLEAN-Algorithmus an den Bedarf ihrer Daten an. Diese Anpassung erforderte eine Reihe von Expertenentscheidungen und Benutzereingaben, deren potentieller Einfluss auf die Authentizität des endgültigen »sauberen« Bildes a priori nicht klar war.

Mit dem Ziel, optimale Rekonstruktionsergebnisse aus den Daten zu erzeugen, entschied sich das EHT-Team daher, zusätzlich zur Anpassung von CLEAN einen weiteren Bildrekonstruktionsansatz anzuwenden. Es handelt sich um den sogenannten Regularised-Maximum-Likelihood-Ansatz (RML), der zum statistischen Verfahren der Vorwärtsmodellierung gehört und in der optischen Interferometrie und Computer Vision verbreitet ist, jedoch seltener in der Radiointerferometrie verwendet wurde (EHTC 2019d: 4f.; Bouman et al. 2016: 915–917). Bei diesem Ansatz wird das finale Bild als Raster von Pixeln dargestellt. Die speziell dafür entwickelten Algorithmen werden verwendet, um die optimalen numerischen Werte für diese Pixel direkt aus dem EHT-Daten durch statistische Modellierung zu errechnen (EHTC 2019a: 5). Wie Bouman (2020: 29) es erklärt, der RML-Ansatz »starts with an image – say, a fuzzy blob – and uses the observational data to modify this starting guess until it finds an image that looks like an astronomical picture and has a high probability of producing the measurements we observed.« Um eine potentielle Überanpassung des Modells an die Daten und dadurch eine Verfälschung des rekonstruierten Bildes zu vermeiden, müssen bei RML gewisse Bildeigenschaften (z.B. Glattheit und Kompaktheit) von Benutzer*innen als bevorzugt vordefiniert werden.²⁴ Diese Eigenschaften, sogenannte Priors, werden auf Grundlage der vorherigen Annahmen darüber, wie die »physikalisch plausiblen« Bilder aussehen sollen, ausgewählt (EHTC 2019a: 4; vgl. auch Bouman

24 Diese Auswahl heißt Regularisierung – daher der Name des Ansatzes (EHTC 2019d: 4).

2017: 41; Bouman et al. 2016: 916). Insofern war auch dieser Ansatz, genauso wie CLEAN, mit einer Reihe von Expertenentscheidungen verbunden, die, falls falsch getroffen, zu unauthentischen Bildern führen können. Darüber hinaus musste die Angemessenheit des RML-Ansatzes, genauer gesagt, die neuen Algorithmen, die vom EHT-Team auf Basis dieses Ansatzes entwickelt wurden, für die Rekonstruktion der EHT-Daten zuerst bewiesen werden.

Um die Zuverlässigkeit sowohl des angepassten CLEAN- als auch des neueren RML-Ansatzes bei der Anwendung auf die EHT-Daten zu bewerten und deren Effekte miteinander zu vergleichen, führte das EHT-Team eine zusätzliche Stufe der Bildrekonstruktion namens ›blind imaging‹ ein, die bei der standardmäßigen VLBI nicht vorhanden ist. Das ›blind imaging‹ bestand daraus, dass mehrere Teams »were blind to each others' work«, während sie an demselben Datensatz arbeiteten (EHTC 2019d: 9).²⁵ Auf den ersten Blick mag diese zusätzliche Stufe der Bildrekonstruktion Nichtexpert*innen redundant erscheinen. Im Folgenden werde ich aber zeigen, dass ›blind imaging‹ mit einer Verschränkung von menschlichen Expertenurteilen und algorithmischen Prozeduren eine wichtige Rolle in der Erstellung der empirischen Authentizität der EHT-Bilder spielte.

Während der ›blind imaging‹-Stufe der Bildrekonstruktion erhielten vier unabhängig voneinander arbeitende Expertenteams die Aufgabe, aus dem EHT-Datensatz vom 11. April 2017 jeweils ein Bild des Schwarzen Lochs zu rekonstruieren (ebd.). Jeweils zwei Teams benutzen den CLEAN- oder den RML-Ansatz. Es gab dabei keine Beschränkungen, unter welchen mathematischen und theoretischen Annahmen diese Ansätze verwendet werden sollen: »Each team relied upon the judgment of its members to select strategies for data flagging, calibration, and imaging, using whatever software and techniques that they judged to be useful.« (ebd.: 30f.) Der entscheidende Punkt dabei war,

25 Vor der Anwendung auf die EHT-Daten, oder, genauer gesagt, bevor die EHT-Datenerhebung überhaupt stattgefunden hat, testete das Team die konventionellen wie auch die neu entwickelten Algorithmen ausführlich an großen synthetischen Testdatensätzen in einer Reihe von ›imaging challenges‹, die ebenfalls den ›blind imaging‹-Zugang verfolgten (Bouman 2017: 133–184). Diese ›imaging challenges‹ ermöglichten es dem EHT-Team, die Performanz der unterschiedlichen Algorithmen miteinander zu vergleichen und so »to better understand each of the algorithms' strength and weaknesses, and even develop stronger methods« (ebd.: 133). Die ›imaging challenges‹ lieferten jedoch keinen ausreichenden Beweis dafür, dass die Algorithmen bei der Anwendung auf die tatsächlichen EHT-Daten empirisch authentische Bildrekonstruktionen erzeugen würden (Muhr i.E.) und werden deswegen hier nicht diskutiert.

dass während der siebenwöchigen Arbeit mit den Daten jede Kommunikation zwischen den Teams untersagt war. So wurde die Arbeit jedes Teams nur durch das Expertenurteil seiner Mitglieder geprägt, ohne Einfluss durch die methodischen Entscheidungen der anderen Teams.

Anschließend reichte jedes Team anonym ein rekonstruiertes Bild ein. Die visuellen Eigenschaften dieser vier Bilder wurden dann mithilfe verschiedener quantitativer Bildmetriken miteinander verglichen, um entscheidende intramediale Bezugnahmen (Jäger 2006: 41) zwischen diesen Bildern herzustellen. Der Vergleich ergab, dass alle vier Bilder eine »ähnliche Morphologie« aufweisen, bestehend aus einer asymmetrischen Ringstruktur mit erhöhter Helligkeit im Süden und einem vergleichbaren Durchmesser (EHTC 2019d: 10, Fig. 4). Es stellte sich jedoch heraus, dass zahlreiche einzelne Details wie das Profil, die Dicke und die Helligkeit des Rings erheblich zwischen den Bildern variierten (ebd.: 9). Diese Variationen wurden den unterschiedlichen Expertenurteilen jedes Teams zugeschrieben und dementsprechend als Ergebnis von »human bias« deklariert (ebd.: 1). Die Schlussfolgerung war, dass, obwohl aufgrund der durch den »human bias« verursachten Detailunterschiede die empirische Authentizität der einzelnen Bilder unsicher war, alle vier Bilder die vergleichbare Ringstruktur als zentrales Bildmerkmal aufwiesen (ebd.: 9).

Folgende Aspekte von »blind imaging« sind von Interesse für unsere Diskussion: Erstens folgt aus meiner bisherigen Beschreibung, dass die Vervielfachung und die Parallelisierung der Bildrekonstruktion durch unabhängige Expertenteams gleichzeitig zwei unterschiedliche evidenzgenerierende Funktionen erfüllten. Einerseits haben die vergleichenden Ergebnisse der parallel arbeitenden Teams überzeugend gezeigt, dass die Ringstruktur von der jeweiligen Rekonstruktionsmethode unabhängig war, da sie in allen Bildern *konsistent* erkennbar war. Außerdem hat die zentrale Beteiligung der menschlichen Expertenurteile in dieser Phase erwiesen, dass die Ringstruktur kein Artefakt der algorithmischen Verarbeitung war. Somit hat »blind imaging« – und das ist der springende Punkt – die rekonstruierte Ringstruktur als ein intrinsisches Bildmerkmal, das durch die Messung in den Datensatz eingeschrieben wurde, authentifiziert.

Andererseits diente der parallele Einsatz der unabhängigen Teams ebenso der Plausibilisierung der auf dem RML-Ansatz basierten Algorithmen für die Bildrekonstruktion des EHT-Datensatzes durch den direkten Vergleich mit dem etablierten CLEAN-Algorithmus. Nachdem sich der neuere Ansatz im »blind imaging« bewiesen hatte, konnte er, wie sich gleich zeigen wird, in der darauffolgenden Stufe der Bildrekonstruktion als dominanter Ansatz einge-

setzt werden. »Blind imaging« diene also nicht nur der Authentifizierung der rekonstruierten Ringstruktur als Hauptbildmerkmal, sondern auch jener des RML-Ansatzes als zentrale Rekonstruktionsmethode. Diese doppelte Authentifizierung wurde sowohl durch die intramedialen Bezugnahmen zwischen den Eigenschaften der vier von »blind imaging«-Teams unabhängig rekonstruierten Bilder wie auch durch die intermedialen Bezugnahmen zwischen den dabei eingesetzten Operationen der Bildrekonstruktion gewährleistet. Dementsprechend behaupte ich, dass »blind imaging« eine wichtige Rolle in jenem operativen medienbasierten Evidenzverfahren einnahm, das zur Erstellung der empirischen Authentizität der EHT-Bilder, im Sinne ihrer »referentiellen Macht« auf die »Welt« da-draußen« (Jäger 2018: 316) Bezug zu nehmen, diene.

Zweitens ist »blind imaging« aus medientheoretischer Sicht interessant, weil die daraus resultierenden Bilder nicht in die nachfolgende Stufe der Bildrekonstruktion weitergegeben wurden. Stattdessen wurden sie abgelegt, da sie ihre doppelte Authentifizierungsfunktion erfüllt hatten und daher im weiteren Verlauf der Referenzkette nicht mehr zu gebrauchen waren. In der nächsten Stufe der Bildrekonstruktion kehrte das EHT-Team zu den ursprünglichen »science-ready« Datensätzen zurück, um aus ihnen die finalen Bilder von M87* zu erzeugen. Was mit Latour (1999: 76) als potentiell problematische Unterbrechung der Linearität der Referenzkette gedeutet werden könnte, ist hier jedoch ein Spezifikum des diskursiven Evidenzverfahrens (Jäger 2006: 41), das aufgrund der Neuartigkeit der EHT-Bilder für die Herstellung ihrer Referenzialität erforderlich war.

Die Imaging Pipelines, »ground truth images« und die quantitative Validierung der Ergebnisse

In der folgenden zweiten Stufe der Bildrekonstruktion wurden skriptgesteuerte Imaging Pipelines eingesetzt, mit der Zielsetzung, den Anteil der subjektiven Expertenurteile zu minimieren, weil diese als die Ursache für die unerwünschte Variabilität in den »blind« rekonstruierten Bildern angesehen wurden (EHTC 2019d: 9). Ähnlich wie die vorherige Stufe bestand auch diese Stufe aus parallelen Operationen. So wurden hier für die Bildrekonstruktion nicht eine, sondern drei voneinander unabhängige skriptgesteuerte Pipelines benutzt, die jeweils in einem anderen Softwarepaket erstellt wurden. Eine dieser Pipelines wurde in der DIFMAP-Software erstellt und nutzt den in der VLBI etablierten CLEAN-Algorithmus (ebd.: 12). Die anderen beiden Pipelines (eht-imaging und SMILI) implementierten Algorithmen, die, basierend auf dem

RML-Ansatz (ebd.: 12–14), speziell vom EHT-Team entwickelt wurden. Durch diese Zwei-zu-eins-Aufteilung wurde das Gewicht deutlich in Richtung des RML-Ansatzes verlagert. Jede Pipeline wurde so konzipiert, dass sie mehrere aufeinanderfolgende iterative Zyklen der Bilderzeugung durchführt, gefolgt von der so genannten Selbstkalibrierung, bei der die Zwischenbilder an die Daten angepasst werden, bevor die endgültige Bildrekonstruktion erstellt wird (ebd.: 12–14). Jedoch war, wie wir im Folgenden sehen werden, trotz des Einsatzes skriptgesteuerter Imaging Pipelines auch diese Stufe der Transformationskette nicht vollständig frei von menschlichen Expertenurteilen.

Während jede der drei Pipelines eine Anzahl festgelegter Einstellungen hatte, mussten einige freie Parameter eingestellt werden, was zahlreiche mögliche Parameterkombinationen pro Pipeline ergab. Es war dabei unklar, wie sich die Wahl verschiedener Parameter auf die empirische Authentizität der mit diesen Parametern rekonstruierten Bilder auswirken würde. Statt sich bei der Auswahl der freien Parameter einfach auf das menschliche Expertenurteil zu verlassen, entschied sich das Team daher, für alle drei Pipelines umfangreiche Untersuchungen möglicher Parameterkombinationen durchzuführen, einschließlich solcher, die nach Expertenurteil voraussichtlich schlechte Bildrekonstruktionen aus den EHT-Daten liefern würden (ebd.: 11). Ziel dieser Untersuchungen war es, die optimale Parameterkombination für jede Pipeline zu bestimmen, die die empirisch authentischen Bilder liefert. Wie das Team betonte, waren diese Untersuchungen »coarse-grained and do not completely explore the choices in the imaging process« (ebd.: 10). Dennoch war die Anzahl der für jede Pipeline in Betracht gezogenen Parameterkombinationen beträchtlich und lag zwischen 1008 für die DIFMAP-Pipeline und 37 500 für die eht-imaging-Pipeline (ebd.: 17).

Ein Außenstehender könnte jetzt annehmen, dass das EHT-Team die verschiedenen Parameterkombinationen testen konnte, indem es sie zur Rekonstruktion von Tausenden von Bildern aus dem EHT-Daten verwendete. Nach dieser Annahme könnte dann jedes dieser rekonstruierten Bilder mit dem zugrundeliegenden EHT-Datensatz verglichen werden, um die Konsistenz des Bildes mit den Daten zu überprüfen und so festzustellen, welche entstandene Bilder nicht nur Artefakte der algorithmischen Modellierung sind, sondern einen referentiellen Bezug zum Schwarzen Loch besitzen. Allerdings könnten sogar jene Bilder, die diesen Test bestehen würden, noch nicht als empirisch authentische Visualisierungen des Schwarzen Lochs definiert werden, da die EHT-Datensätze, wie bereits erwähnt, sehr lückenhaft waren; es könnten sich daher mehrere, sich voneinander unterscheidende Bildrekonstruktionen er-

geben, die dennoch alle ausreichend gut zu den Daten passen. Es wäre daher unmöglich gewesen, die empirische Authentizität der mit unterschiedlichen Parameterkombinationen algorithmisch rekonstruierten Bildvarianten im Sinne ihrer referentiellen Bezugnahme auf das Schwarze Loch allein auf Basis der EHT-Daten zu beurteilen.

Zur Lösung dieses Problems griff das Team auf speziell angefertigte synthetische Datensätze zurück, die es als Benchmarks für die Bewertung der Performance der Imaging Pipelines einsetzen konnte (ebd.: 10f.). Wie meine Analyse verdeutlichen wird, ermöglichten diese synthetischen Benchmark-Datensätze die Bestimmung der Parameterkombinationen, aufgrund deren die Imaging Pipelines optimale, vertrauenswürdige Bildrekonstruktionen aus den fragmentarischen EHT-Daten lieferten. Um diskutieren zu können, wie diese Bestimmung durchgeführt wurde, müssen wir uns zuerst ansehen, wie das Team die synthetischen Datensätze erzeugt hat.

Für die Erstellung der synthetischen Datensätze wählte das Team zunächst vier einfache geometrische Formen mit unterschiedlichen kompakten Strukturen aus: einen gleichmäßig hellen Ring, einen Ring mit einem deutlich helleren unteren Teil, eine gefüllte Scheibe und zwei asymmetrisch angeordnete runde Flecken (ebd.: 10). Wichtig dabei ist, dass nur die ersten zwei Formen mit der im »blind imaging« rekonstruierten Ringstruktur visuell vergleichbar waren, da sie in ihrem Zentrum einen kreisförmigen Schatten aufwiesen. Die anderen zwei Formen wurden gezielt so gewählt, dass sie davon abwichen, um den Algorithmen bei der Parameterauswahl nicht die erwartete Ringstruktur mit einem zentralen Schatten vorzuschreiben. Das heißt, dass die Auswahl der geometrischen Modelle durch das menschliche Expertenurteil bestimmt wurde.

Danach wurden vier Bilder synthetisiert, die diese geometrischen Modelle mit Eigenschaften, die den EHT-Daten ähnlich waren, visualisierten. Die Ähnlichkeit wurde in Form von physikalischen Größen wie Flussdichte und Sichtbarkeitsamplituden definiert (ebd.: 9f.). Die so erzeugten Bilder wurden als »Grundwahrheit« (engl. ground truth images) bezeichnet, da ihre visuellen Strukturen vordefiniert und daher bekannt waren, sodass sie aus diesem Grund verwendet werden konnten, um die Performance der Imaging Pipelines mit unterschiedlichen Parameterkombinationen zu vergleichen und zu bewerten.²⁶ Schließlich wurden entsprechende synthetische Daten (d.h. interfero-

26 Für eine ausführlichere medientheoretische Analyse dazu, wie die »ground truth images« in der EHT-Bildrekonstruktion ausgewählt, erzeugt und eingesetzt wurden,

metrische Sichtbarkeiten) aus jedem ›ground truth image‹ mit der Software eht-imaging generiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die simulierten Datensätze mit jenem Anteil an Rauschen und entsprechender Lückenhaftigkeit produziert wurden, die den originalen EHT-Daten entsprachen (ebd.: 10f.).

Die so synthetisierten Daten wurden dann für die Parameterbestimmung in jeder der oben genannten Pipelines verwendet. Im Laufe dieses Prozesses wurden aus diesen synthetischen Daten tausende bis zehntausende Bilder pro Pipeline mit unterschiedlichen Parametern rekonstruiert. Parallel wurden aus dem EHT-Datensatz von 11. April 2017 mit den gleichen Parameterkombinationen weitere tausende bis zehntausende Bilder pro Pipeline erzeugt. Die Entscheidung, wie viele Parameterkombinationen für jede Pipeline getestet werden sollten, basierte auf menschlichem Expertenurteil. Ziel dabei war, jene Parameterkombinationen für jede Pipeline zu bestimmen, »that consistently produce faithful image reconstructions on synthetic data« (ebd.: 10). In diesem Fall war die Genauigkeit (engl. image fidelity) der jeweiligen algorithmischen Bildrekonstruktion aus dem synthetische Datensatz quantifizierbar, da die Ergebnisse direkt mit dem entsprechenden ›ground truth image‹ vergleichbar waren.

Im nächsten Schritt wurden die sogenannten ›Top-Set‹-Parameterkombinationen für jede Pipeline bestimmt. Diese ergaben eine Reihe von »akzeptablen« Bildrekonstruktionen (ebd.: 14), indem sie die folgenden beiden Kriterien erfüllten: Erstens mussten aus den EHT-Daten mit diesen Parametern rekonstruierte Bilder mit den zugrundeliegenden Daten konsistent sein. Zweitens mussten mit den gleichen Parametern erzeugte Bildrekonstruktionen der synthetischen Daten den entsprechenden ›ground truth images‹ visuell ausreichend ähnlich sein.²⁷ In Anlehnung an Jäger (2006: 41) können wir argumentieren, dass die Identifizierung der ›Top-Set‹-Parameterkombinationen durch die parallele Herstellung intermedialer Bezüge zwischen den rekonstruierten Bildern und den EHT-Daten sowie intramedialer Bezüge zwischen den rekonstruierten Bildern und den ›ground truth images‹ erfolgt ist.

Letztendlich wurde aus dem so definierten ›Top Set‹ für jede Pipeline jeweils eine Parameterkombination identifiziert, die bei den simulierten

vgl. Muhr (i.E.). Für eine allgemeinere Diskussion über den Einsatz von ›ground truth images‹ bei der Entwicklung und Evaluierung von neuen Algorithmen vgl. Jatón (2021).

27 Die ›ausreichende‹ Ähnlichkeit wurde nach quantitativen Kriterien bestimmt (EHTC 2019d: 14–17).

Daten, die aus allen vier verschiedenen geometrischen Modellen abgeleitet wurden, die quantitativ besten Ergebnisse im Sinne von »image fidelity« zu den »ground truth images« liefert (EHTC 2019d: 15). Diese Prozedur, die weitere komplexe intermediale Bezüge zwischen den multiplen Bildern und Datensätzen erstellte, ergab die sogenannten »fiducial parameters« (d.h. vertrauenswürdige Parameter), mit denen die jeweilige algorithmische Pipeline nachweislich passgenaue zuverlässige Bildrekonstruktionen aus interferometrischen Daten mit dem vergleichbaren Rauschanteil und Lückenhaftigkeit wie bei den EHT-Daten erzeugte. Aufgrund dieser Parameter wurde dann mit jeder Pipeline jeweils ein »fiducial« (d.h. vertrauenswürdiges) Bild aus dem EHT-Datensatz vom 11. April rekonstruiert (ebd.: 9). Es wurden also die Vertrauenswürdigkeit und dadurch auch der Authentizitätsanspruch der mit »fiducial« Parametern rekonstruierten EHT-Bilder maßgeblich durch den Einsatz der »ground truth images« und daraus synthetisierter Datensätze hergestellt. Erst durch die Erstellung und Verwendung dieser externen Modellbilder und der entsprechenden synthetischen Datensätze war es möglich, die Differenz zwischen den schlechten, akzeptablen und optimalen (»fiducial«) Bildrekonstruktionen, die mit unterschiedlichen Parametern erzeugt wurden, medial zu prozessieren und also semantisch herzustellen. Die Zuverlässigkeit und empirische Authentizität der aus dem EHT-Datensatz algorithmisch rekonstruierten »fiducial« Bilder war daher, wie meine Analyse gezeigt hat, durch maßgeschneiderte mediale Prozeduren ausgehandelt und diskursiv hervorgebracht.

Damit war der Authentifizierungsprozess aber noch nicht abgeschlossen. Zunächst wurde im wechselseitigen visuellen und quantitativen Vergleich festgestellt, dass alle drei derart erstellten »fiducial« Bilder »weitgehend konsistent« waren, da in jedem ein Ring von etwa 40 Mikrobogensekunden Durchmesser mit einem dunklen Schatten in der Mitte dominierte (ebd.: 18). Das Entscheidende dabei war, dass diese durch intramediale Bezüge (Jäger 2006: 41) festgestellte visuelle Konsistenz trotz der unterschiedlichen Pipelines und »fiducial« Parameter, die für die Erstellung jedes Bildes benutzt wurden, bestand. Dies beglaubigte, dass der Ring ein intrinsisches – d.h. empirisch authentisches –, aus den Messdaten hervorgehendes EHT-Bildmerkmal war und also weder ein Artefakt der jeweiligen Pipeline noch eines aus einem der vier

synthetischen Datensätze, die auf vordefinierten geometrischen Formen basierten.²⁸

Aufgrund der unterschiedlichen Rekonstruktionsmethoden variierten jedoch einige Strukturdetails wie auch die Auflösungen der einzelnen ›fiducial‹ Bilder zwischen den Pipelines. Das bedeutet, dass die empirische Authentizität dieser unterschiedlichen Details weniger sicher war als jene der gesamten Ringstruktur. Um eine einheitliche Auflösung zu erreichen, wurden deshalb die drei ›fiducial‹ Bilder zuerst unscharf gemacht, um dadurch die Unsicherheiten in den Bildern zu minimieren (EHTC 2019d: 20). Danach wurde aus den unscharfen Bildern ein einfacher Mittelwert errechnet. Ziel war es, die einzelnen Unterschiede zwischen den ›fiducial‹ Bildern zu verringern und die gemeinsamen visuellen, statistisch zuverlässigeren Merkmale stärker hervorzuheben. Damit wurden zusätzliche wichtige Authentifizierungsfunktionen durch Unschärfmachung der einzelnen ›fiducial‹ Bilder wie auch deren Mittelwertbildung ausgeübt. Als Ergebnis dieses mathematischen und zugleich intramedialen Verfahrens entstand das gemittelte »konservative« EHT-Bild des Schwarzen Lochs M87* für die Messung von 11. April 2017 (ebd.).

Das gleiche Prozedere der Parametersuche, gefolgt von der Bestimmung eines ›Top Set‹, dann der ›fiducial‹ Parameter, der Berechnung der drei ›fiducial‹ Bilder, deren Unschärfmachung und letztlich ihrer Mittelwertbildung wurde für jene EHT-Datensätze durchgeführt, die an den restlichen drei

28 Um dies zusätzlich zu beglaubigen, führte das Team noch eine Kreuzvalidierung durch (EHTC 2019d: 17). Dazu wertete es aus, welche Parameterkombination für jede Pipeline bei drei der aus den vier verschiedenen geometrischen Modellen abgeleiteten simulierten Datensätzen am besten abschnitt. Anschließend verwendeten sie die so erhaltene Parameterkombination für jede Pipeline, um je ein Bild aus dem vierten simulierten Datensatz zu rekonstruieren, der in dieser Auswertung nicht verwendet wurde. So wurden z.B. für die Rekonstruktionen des Rings die Parameter ausgewählt, indem nur die Rekonstruktionen der anderen drei geometrischen Formen ausgewertet wurden. Das Team führte diesen Vorgang für jeden der vier simulierten Datensätze durch und erhielt in jedem Fall Bildrekonstruktionen, die den jeweiligen ›ground truth images‹ ausreichend ähnlich waren, ohne dabei den anderen drei zur Bestimmung der Parameter verwendeten geometrischen Modellen zu ähneln. Durch den Vorgang der Kreuzvalidierung, bei dem ein weiteres Netzwerk gezielter medialer Referenzen zwischen den simulierten Daten und den algorithmisch rekonstruierten Bildern aufgebaut wurde, konnte das Team die überzeugende diskursive Evidenz (Jäger 2006: 41) erbringen, dass die vordefinierten geometrischen Formen in ihren ›ground truth images‹ die Ergebnisse ihrer Algorithmen nicht verfälschten.

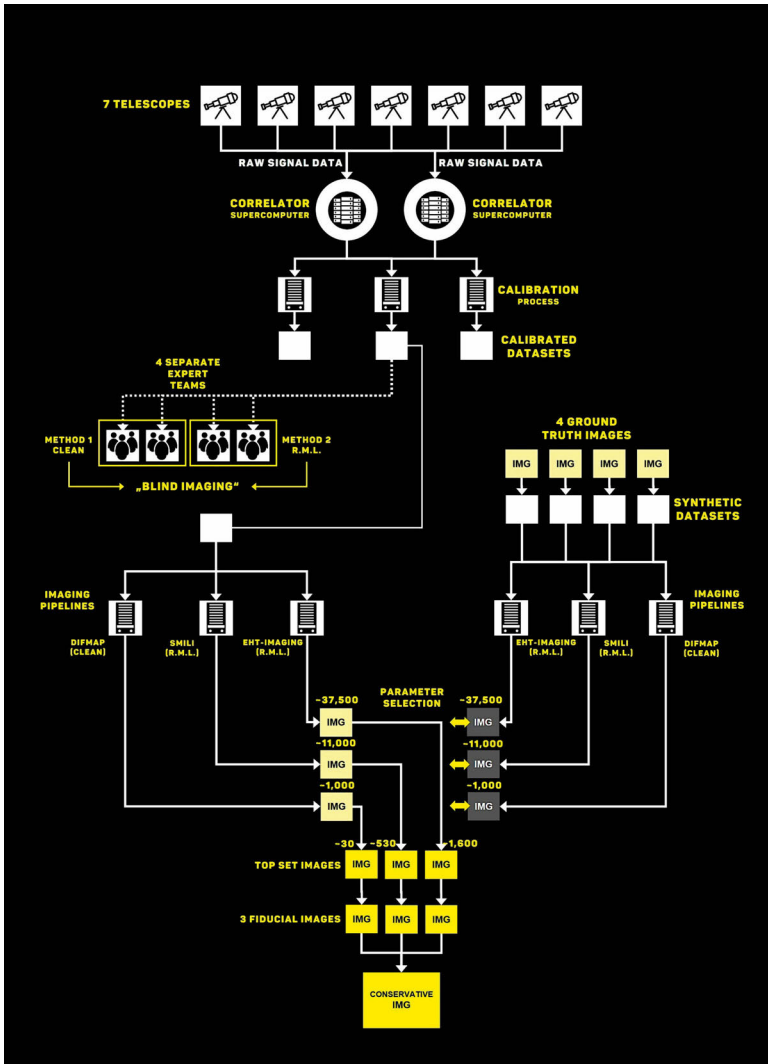
Messtagen erhoben wurden. So wurden vier gemittelte ›konservative‹ Bilder des M87* erstellt, je eines für jeden Messtag. Dass die rekonstruierten Bildmerkmale visuell weitgehend *konsistent* für alle vier Messtage waren, bekräftigte durch weitere intramediale Bezüge die wissenschaftliche Authentizität der resultierenden Bilder zusätzlich (ebd.: 31). Meine Analyse hat jedoch gezeigt, dass die entscheidende Authentifizierungsfunktion in der zweiten Bildrekonstruktionsphase vielmehr durch die parallele Benutzung von drei unterschiedlichen voneinander unabhängigen Pipelines wie auch durch den Einsatz von maßgeschneiderten synthetischen Datensätzen und den damit verbundenen ›ground truth images‹ ausgeübt wurde. Es verdankt sich besonders diesen zwei Aspekten des EHT-spezifischen Evidenzverfahrens mit ihrer erfolgreichen diskursiven Herstellung eines ganzen Netzwerks der »inferentiellen Bezugnahmen von Zeichen auf Zeichen« (Jäger 2018: 317), dass die Authentizitätsansprüche und die damit verbundene Referentialität der aus den entsprechend generierten und prozessierten empirischen Daten rekonstruierten Bilder von M87* gewährleistet wurden.

Es mag der Eindruck entstehen, dass die Bildrekonstruktion der EHT-Bilder zu diesem Zeitpunkt vollständig abgeschlossen war. Aber auch wenn keine weitere Veränderung an den zwölf ›fiducial‹ und an den vier gemittelten ›konservativen‹ EHT-Bildern vorgenommen wurde, führte das EHT-Team noch eine dritte Stufe der Bildrekonstruktion durch. Sie bestand aus einer Reihe quantitativer Validierungsprozeduren, deren technische Details hier für eine Diskussion zu komplex sind. Vereinfacht gesagt bestand das Ziel dieser Prozeduren darin, erstens zu identifizieren, welche rekonstruierten Bildmerkmale relational am zuverlässigsten sind; zweitens durch Validierungstests die Konsistenz zwischen den unterschiedlichen rekonstruierten Bildern und den darunterliegenden EHT-Daten zu evaluieren; drittens die Unsicherheiten in den Bildern zu quantifizieren, die als diejenigen Merkmale definiert wurden, die mit bestimmten Parameterwahlen variierten (EHTC 2019d: 18–29). Kumulativ dienten diese quantitativen Prozeduren dazu, die rekonstruierten EHT-Bilder durch Herstellung weiterer »medialrekursiver« (Jäger 2006: 41) wie auch intermedialer Bezugnahmen zwischen unterschiedlichen Zwischenbildern und Datensätzen zusätzlich zu authentifizieren.

Fazit

Meine Analyse hat gezeigt, dass die Authentizität der ersten empirischen Bilder eines Schwarzen Lochs keine unproblematisch vorhandene und in den visuellen Merkmalen dieser Bilder unmittelbar erkennbare Eigenschaft ist. Stattdessen musste die Authentizität dieser Bilder, die ein grundsätzlich unsichtbares Phänomen erstmalig empirisch visualisieren, durch ein elaboriertes medienspezifisches Evidenzverfahren (ebd.) konstruiert, ausgehandelt und beglaubigt werden. Dieses Verfahren wurde entlang einer mehrteiligen Transformationskette organisiert (Latour 1999: 69–73), die dazu diente, einen tragfähigen referentiellen Bezug zum visualisierten Schwarzen Loch zu erstellen (Abb. 1). Die besprochenen einzelnen Phasen dieser Transformationskette umfassten erstens die Datenerhebung, zweitens die zwei Stufen der Datenvorbereitung und drittens die drei Stufen der Bildrekonstruktion. Wir haben dabei gesehen, dass innerhalb jeder Phase sowie in den einzelnen Stufen dieser Phasen das Evidenzverfahren nicht linear verlief. Es bestand vielmehr aus einem komplexen, verzweigten Netzwerk von teils parallelen und iterativen, teils sukzessiv organisierten diskursiven wie auch algorithmischen Operationen, die visuelle, mathematische und rhetorische Mittel miteinander verknüpften. Einige dieser Operationen waren algorithmenbasiert und entweder teilweise oder vollständig automatisiert (z.B. Kalibrierung der Daten und die pipelinebasierte Bildrekonstruktion mit den ›fiducial‹ Parametern), während andere explizit auf menschliches Expertenurteil angewiesen waren (z.B. ›blind imaging‹ und die Auswahl von ›ground truth images‹). Mehrere Schritte in diesem Verfahren wurden vervielfacht, um eine vergleichende Nutzung verschiedener methodischer Ansätze zu ermöglichen, von denen einige bereits etabliert, andere jedoch neu und speziell für das EHT-Projekt entwickelt wurden. Darüber hinaus musste das EHT-Team neben der Arbeit mit den empirisch erzeugten Messdaten auch auf die vergleichende Verwendung der speziell gefertigten synthetischen Datensätze und der entsprechenden ›ground truth images‹ zurückgreifen.

Abb. 1: Visualisierung der mehrteiligen, verzweigten Transformationskette, die der Produktion der EHT-Bilder von M87* für jeden Messtag im April 2017 unterlag. Bildkonzept: Paula Muhr. Grafische Gestaltung: Gerold Muhr



Quelle: Muhr (2023)

Doch statt redundant zu sein, dienten diese netzwerkartigen Vervielfachungen bestimmter Transformationsschritte während des Produktionsprozesses und die Verwendung synthetischer Datensätze dazu, die empirische Authentizität der aus diesem Prozess resultierenden EHT-Bilder – d.h. ihren referentiellen Bezug auf ein zeichentranszendentes Phänomen – zu gewährleisten. Die so erzeugten EHT-Bilder eines Schwarzen Lochs sind authentisch, weil sie durch eine spezifisch zugeschnittene Kombination mehrerer methodischer Ansätze wie auch durch ein Zusammenspiel vom menschlichen Expertenurteil und Algorithmen als konsistent konstruiert wurden. Anders gesagt: Was die Authentizität dieser Bilder beglaubigt, ist, dass die verschiedenen menschlichen und nicht-menschlichen Akteure durch den Einsatz verschiedener statistischer Modellierungsmethoden ausreichend visuell konsistente Bildrekonstruktionen aus empirischen Messungen über eine nachvollziehbare Kaskade unterschiedlicher Aufzeichnungen und zahlreicher Zwischenbilder erstellen konnten. Diese semantisch entscheidende visuelle Konsistenz wurde dabei durch gezielte Herstellung inferentieller Bezüge zwischen diesen unterschiedlichen Aufzeichnungen, den algorithmisch rekonstruierten Zwischenbildern und den externen vordefinierten Modellbildern (»ground truth images«) sowie aus ihnen generierten synthetischen Datensätzen diskursiv hervorgebracht. Nur auf diese Weise konnte erreicht werden, dass die aus den verrauchten und fragmentarischen Messdaten rekonstruierten Bilder einen zuverlässigen referentiellen Bezug zu jenem Schwarzen Loch haben, dessen physikalische Eigenschaften sie visualisieren. Und nur so konnten Bilder erzeugt werden, die nicht nur dasjenige, »what we thought unseeable«, empirisch visualisierbar machen, sondern auch als neue epistemische Instrumente in der wissenschaftlichen Erforschung von Schwarzen Löchern einsetzbar sind (vgl. dazu Muhr 2023).

Literatur

- Bouman, Katherine L. (2017): *Extreme Imaging via Physical Model Inversion: Seeing Around Corners and Imaging Black Holes*. Unveröffentl. Diss., Cambridge, Mass.: Massachusetts Institute of Technology.
- (2020): »Portrait of a Black Hole. Here's How the Event Horizon Telescope Team Pieced Together a Now-Famous Image«, in: *IEEE Spectrum* 57.2, S. 22–29, DOI: 10.1109/MSPEC.2020.8976898.

- et al. (2016): »Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction«, in: 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 913–922, DOI:10.1109/cvpr.2016.105.
- Event Horizon Telescope Collaboration (EHTC) (2019a): »First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L1, S. 1–17, DOI: 10.3847/2041-8213/ab0ec7.
- (2019b): »First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L2, S. 1–28, DOI: 10.3847/2041-8213/ab0c96.
- (2019c): »First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L3, S. 1–32, DOI: 10.3847/2041-8213/ab0c57.
- (2019d): »First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L4, S. 1–52, DOI: 10.3847/2041-8213/ab0e85.
- (2019e): »First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L5, S. 1–31, DOI: 10.3847/2041-8213/ab0f43.
- (2019f): »First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 875.L6, S. 1–44, DOI: 10.3847/2041-8213/ab1141.
- (2019g): »Press Release (April 10, 2019): Astronomers Capture First Image of a Black Hole«, in: eventhorizontelescope.org vom 10.04.2019, online verfügbar unter <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole>, abgerufen am 02.01.2021.
- (2021): »First M87 Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 910.L12, S. 1–48. DOI: 10.3847/2041-8213/abe71d.
- (2022): »First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way«, in: *The Astrophysical Journal Letters* 930.L12, S. 1–21, DOI: 10.3847/2041-8213/ac6674.
- Falcke, Heino/Melia, Fulvio/Agol, Eric (2000): »Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center«, in: *The Astrophysical Journal* 528.L13–L16, DOI: 10.1086/312423.

- Galison, Peter et al. (2023): »The Next Generation Event Horizon Telescope Collaboration: History, Philosophy, and Culture«, in: *Galaxies* 11.32, S. 1–23, DOI: 10.3390/galaxies11010032.
- Goddi, Ciriaco et al. (2019): »First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA«, in: *The Messenger* 177, S. 25–35, DOI: 10.18727/0722-6691/5150.
- Jäger, Ludwig (2006): »Schauplätze der Evidenz. Evidenzverfahren und kulturelle Semantik. Eine Skizze«, in: Michael Cuntz et al. (Hg.), *Die Listen der Evidenz*, Köln: DuMont, S. 37–52.
- (2018): »»Outthereness«: Sprachtheoretische und interdisziplinäre Aspekte einer brisanten Alternative«, in: Ekkehard Felder/Andreas Gardt (Hg.), *Wirklichkeit oder Konstruktion?: Sprachtheoretische und interdisziplinäre Aspekte einer brisanten Alternative*, Berlin: de Gruyter, S. 301–323, DOI: 10.1515/9783110563436-014.
- Jaton, Florian (2021): »Assessing Biases, Relaxing Moralism: On Ground-Truthing Practices in Machine Learning Design and Application«, in: *Big Data & Society* 8.1, S. 1–15. DOI: 10.1177/20539517211013569.
- Latour, Bruno (1999): *Pandora's Hope: Essays on the Reality of Science Studies*, Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- (2014): »The More Manipulation, the Better«, in: Catelijne Coopmans et al. (Hg.), *Representation in Scientific Practice Revisited*, Cambridge, Mass.: MIT Press, S. 347–350.
- Mościbrodzka, Monika/Falcke, Heino/Shiokawa, Hotaka (2016): »General Relativistic Magnetohydrodynamical Simulations of the Jet in M87«, in: *Astronomy & Astrophysics* A38, DOI: 10.1051/0004-6361/201526630.
- Muhr, Paula (2023): »The »Cartographic Impulse« and its Epistemic Gains in the Process of Iteratively Mapping M87's Black Hole«, in: *Media+Environment* 5.1, Themenheft: Machinic Visions of the Planetary. DOI: 10.1525/001c.88163.
- (i.E.): »Establishing Trust in Algorithmic Results: Ground Truth Simulations and the First Empirical Images of a Black Hole«, in: Michael M. Resch et al. (Hg.), *The Science and Art of Simulation*, Cham ZG: Springer.
- Pedrotti, Frank L. et al. (2007): *Optik für Ingenieure: Grundlagen*, 3. Aufl., Berlin/Heidelberg: Springer.
- Pimblett, Kevin (2019): »First Black Hole Photo Confirms Einstein's Theory of Relativity«, in: *The Conversation* vom 10.04.2019, online verfügbar unter <https://theconversation.com/first-black-hole-photo-confirms-einsteins-theory-of-relativity-115167>, abgerufen am 17.01.2021.

- Seidler, Christoph (2019): »Forscher zeigen erstmals Foto von einem schwarzen Loch«, in: Spiegel Online vom 10.04.2019, online verfügbar unter <https://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/schwarzes-loch-fotografiert-forscher-zeigen-weltweit-erstes-bild-a-1260884.html>, abgerufen am 17.01.2021.
- Thompson, A. Richard/Moran, James M./Swenson, George W. (2017): *Interferometry and Synthesis in Radioastronomy*, 3. Aufl., Cham ZG: Springer.
- Walker, Ian (2020): »»Things As They Are«: The Problematic Possibilities of Documentary«, in: Stephen Bull (Hg.), *A Companion to Photography*, Hoboken, N.J.: Wiley-Blackwell, S. 371–391.
- Wielgus, Maciek (2020): »Event Horizon Telescope and Black Hole Images«, Vortrag im Rahmen der Konferenz »Photo: Science. Photography and Scientific Discourses« (30.11.2020), online verfügbar unter <https://www.facebook.com/cvf.udu.avcr/videos/439518287041023>, abgerufen am 02.02.2021.
- et al. (2020): »Monitoring the Morphology of M87 in 2009–2017 with the Event Horizon Telescope«, in: *The Astrophysical Journal* 901.67, S. 1–28, DOI: 10.3847/1538-4357/abacod.

