

Wolfgang Reuter

## Original oder Schüler?

Einsatzmöglichkeiten Künstlicher Intelligenz bei Zuschreibungsfragen  
am Beispiel des Rembrandt Research Projects

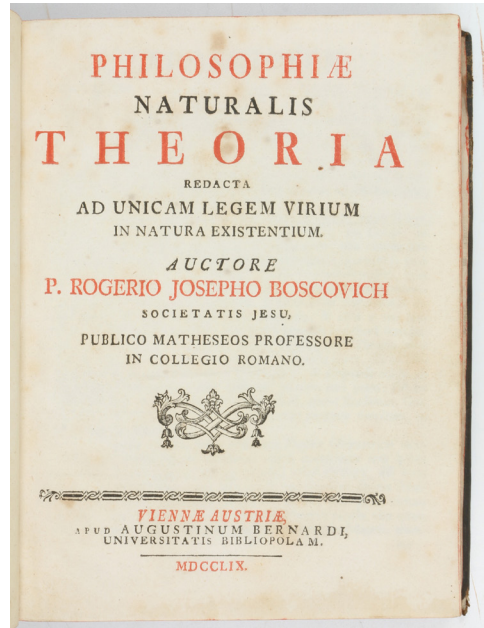
### Künstliche Intelligenz in der Kunst

Künstliche Intelligenz und Algorithmen des Maschinellen Lernens, einem Teilgebiet der sogenannten Künstlichen Intelligenz (KI) sind in vielen Branchen als Technologie längst akzeptiert und ein wichtiger Bestandteil in der Wertschöpfungskette. Den meisten Kunsthistorikern jedoch fällt es schwer, die Methoden und Verfahren zu akzeptieren, geschweige denn anzuwenden. Die Gründe dafür mögen vielfältig sein, zwei davon wollen wir jedoch an dieser Stelle zumindest erwähnen und näher beleuchten.

Es ist vor allem die Bezeichnung ‚Künstliche Intelligenz‘, die Kunsthistoriker wie auch Experten aus anderen Branchen und/oder Industrien als bedrohlich empfinden. ‚Werden wir bald alle überflüssig?‘ – mit solchen und ähnlichen Fragen sind KI-Experten und -Praktiker tagtäglich konfrontiert. Dabei ist das, was gemeinhin als Künstliche Intelligenz bezeichnet wird, keineswegs neu und mit tatsächlicher Intelligenz hat es rein gar nichts zu tun. Sämtliche Algorithmen des Maschinellen Lernens basieren auf der Minimierung einer sogenannten Kosten- oder Fehlerfunktion. Einem Verfahren also, dass um 1750 zum ersten Mal intuitiv von dem Universalgelehrten Rudjer Josip Bošković angewandt wurde, der zusammen mit dem englischen Jesuitenpater und Astronom Christopher Maire die Elliptizität der Erdkugel anhand der Abstände zwischen fünf unterschiedlichen Breitengraden bestimmte. Die Berechnung beruhte darauf, dass sich die ihm nicht bekannten Messfehler weitgehend gegenseitig aufhoben (Abb. 1a/b).<sup>1</sup> Gut 30 Jahre später wurde das Verfahren dann von Carl Friedrich Gauß und Adrien-Marie Legendre mathematisch exakt formalisiert und seit den 1940er Jahren noch einmal deutlich verbessert. An dem Grundprinzip aber hat sich bis heute nichts geändert: Algorithmen des Maschinellen Lernens beruhen auf der Minimierung der Abstände zwischen berechneten Vorhersagen und tatsächlichen Messwerten.<sup>2</sup>

Stellen wir uns einmal vor, die Technologie würde in ihrer Bezeichnung nicht das Wort ‚Intelligenz‘ führen, sondern beispielsweise ‚Optimierte Fehlerfunktionsminimierung‘ heißen und als Teilgebiet der angewandten Mathematik gelten, was ihren Kern viel eher und eigentlich ziemlich genau trifft. Dann gäbe es weder eine ethische Diskussion über die Technologie, noch wären Menschen ihretwegen besorgt. Wir, die am weitesten entwickelte und intelligenteste Spezies auf diesem Planeten (jedenfalls halten wir uns dafür), können problemlos akzeptieren, dass ein Taschenrechner zwei neunstellige Zahlen schneller multipliziert als unser Gehirn. Die vage Vorstellung aber, dass eine Maschine intelligent sein könnte und somit irgendwann vielleicht intelligenter als wir, ängstigt uns, weil sie unsere Stellung innerhalb des Ökosystems Erde in Frage stellt.

Allerdings sind die KI-Gemeinschaft sowie die Fakultäten und Organisationen, die sich mit dieser Technologie beschäftigen und daran forschen, nicht unschuldig an den Sorgen und Ängsten der Menschen vor Künstlicher Intelligenz. Der Grund dafür ist ein völlig sinnloser Wettbewerb, der KI-Modelle stets gegen die Genauigkeit der besten Experten misst. Letztere haben oft das Gefühl, gegen einen Gegner anzutreten, den sie weder fassen können, noch verstehen, was deren ablehnende Hal-



1a/b Rudjer Josip Bošković, gemalt von R. Edge Pine, 1760, sowie die Titelseite seiner 1758 in Wien erschienene Publication *Theoria philosophiæ naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium*, in der er ein erstes Verfahren zur Minimierung einer Fehlerfunktion vorstellte

tion noch verstärkt – vor allem wenn die Diskussion, etwa im medizinischen Bereich, zu Schlagzeilen wie „Künstliche Intelligenz schlägt Hautärzte bei Krebsdiagnose“ führt.<sup>3</sup>

Dabei ist die öffentliche Wahrnehmung von Künstlicher Intelligenz zumindest verzerrt und teilweise völlig falsch. Zum einen hat sich in zahlreichen dieser Fälle herausgestellt, dass diese Modelle nur mit bestimmten Daten gut funktionieren, mit anderen jedoch weit hinter der Expertise von Ärzten zurückfallen.<sup>4</sup> Vor allem aber haben mehrere Experimente gezeigt, dass die besten Ergebnisse dann auftreten, wenn die Fachexperten, seien es Ärzte, Physiker oder Chemiker, die Technologie anwenden, sich jedoch nicht sklavisch an die Ergebnisse halten, sondern diese in ihre Überlegungen und Erwägungen einfließen lassen. Folglich wenn Künstliche Intelligenz der menschlichen Intelligenz assistiert.<sup>5</sup>

Dennoch macht es Sinn, die Genauigkeit von menschlichen Experten bei bestimmten Aufgaben, wie hier bei der Erkennung von Malstilen, zu kennen. Denn Künstliche Intelligenz braucht vor allem eines: gelabelte Daten. Die Algorithmen lernen anhand von Beispielen, in dem vorliegenden Fall also von Gemälden *und* den zugehörigen Malern – und diese Zuordnungen zu bestimmten Künstlern stammen von Kunsthistorikern. Aus diesem Grund werden wir im Folgenden auch die Genauigkeit der Experten bei der Zuschreibung von Gemälden aus dem Umfeld Rembrandts evaluieren.

Wir werden uns jedoch nicht an dem unsinnigen Wettbewerb beteiligen, der menschliche Intelligenz mit künstlicher vergleicht. Stattdessen werden wir einerseits demonstrieren, dass die sogenannte Künstliche Intelligenz<sup>6</sup> tatsächlich sehr effektiv im Erkennen von Mustern ist, die in diesem Fall die Stile von bestimmten Künstlern ausmachen. Vor allem aber werden wir aufzeigen, wie diese Technologie Kunsthistorikern helfen kann, umstrittene Bilder bestimmten Malern zuzuschreiben. Darüber hinaus werden wir, wo immer nötig, auch auf die Sensitivitäten und Unzulänglichkeiten dieser Methode hinweisen.

## Die Schwierigkeit der Zuordnung bei Bildern von Werkstattmalern

Tote malen nicht, soviel steht fest. Und dennoch wachsen die Werkverzeichnisse von beliebten und hochpreisig gehandelten Malern über die Jahre und Jahrzehnte regelmäßig an. Heinrich Campendonks Œuvre zählte beispielsweise 1960 nur 115 Werke,<sup>7</sup> 1989 waren es 1215,<sup>8</sup> samt einiger inzwischen nachgewiesener Fälschungen. Von Alexej von Jawlensky wurden 1998 gut 600 Aquarelle abgeschrieben. Sie waren erst Anfang der 1990er Jahre aufgetaucht und vom Jawlensky Archiv in Locarno als echt anerkannt worden.<sup>9</sup> Seither läuft eine hitzige Debatte über die Fortschreibung des Werkeverzeichnisses, in dem auch zahlreiche gefälschte Gemälde vermutet werden. Die Frage ‚Original oder Fälschung?‘ stellt sich bei fast allen Malern, die am Kunstmarkt zumindest fünfstelligen Summen erzielen – und Kunsthistoriker sind sich oft uneins über die Authentizität bestimmter Werke.

Noch schwieriger ist die Zuordnung von Kunstwerken bei den Werkstattmalern des 16. und 17. Jahrhunderts. Die Studios von Leonardo da Vinci, Raphael, Rembrandt, Rubens und anderen waren im Grunde mittelständische Betriebe mit teilweisen Dutzenden von Mitarbeitern. Ihr einziges Ziel war es, Gemälde im Stil des Meisters zu produzieren. Überspitzt ausgedrückt könnte man von Kopier- und Fälschungsmanufakturen sprechen. Dazu kommt, dass der jeweilige Meister oft einzelne Partien des Bildes selbst gemalt, retuschiert oder vollendet hat. Folglich fällt die Zuordnung von Werken dieser Künstler besonders schwer. Einige der Bilder wurden über Jahrzehnte zwischen verschiedenen Schülern herumgereicht wie Wanderpokale. Das Gemälde *Old man contemplating in a study* (Abb. 2) gilt derzeit als Werk der Rembrandt-Schule, war in der Vergangenheit laut dem niederländischen Institut für Kunstgeschichte (RKD) aber auch schon Adriaen Verdoel, Abraham van den Hecken, Karel van der Pluym, Gerbrand van den Eeckhout, Willem Drost und natürlich dem Meister selbst, also Rembrandt, zugeschrieben.<sup>10</sup> Andere Bilder haben ähnliche Zu- und Abschreibungs-Odysseen hinter sich.

Insgesamt ist bei knapp drei Viertel der untersuchten Werke Rembrandts sowie dessen Schüler die Urheberschaft strittig. Soll heißen, für drei Viertel dieser Werke gibt es im Schnitt mindestens eine abgelehnte Zuschreibung. Wie sicher sind sich Kunsthistoriker also bei der Beurteilung von Kunstwerken Rembrandts oder aus dessen Umfeld? Oder wie unsicher? Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gemälde tatsächlich richtig zugeschrieben ist?

Unseres Wissens gibt es keine belastbaren Studien zu diesem Thema. Wir haben einen systematischen Ansatz verfolgt, um die Genauigkeit von Zuschreibungen zu Rembrandt und dessen Schülern zu messen, wobei uns völlig klar ist, dass eine exakte Beantwortung der oben gestellten Fragen nicht möglich ist. Allerdings lassen sich die Ober- und Untergrenzen exakt berechnen – und wir werden die Systematik im folgenden Kapitel transparent offenlegen.



2 School of Rembrandt, *Old man contemplating in a study*, Oslo, National Museum



3 Rembrandt-Gemälde *Bust of a youth*, ca. 1660. Das Werk galt von 1836 bis 1969 als Original des Meisters, von 1969 bis 1992 war es abgeschrieben, 1992 wurde es von Slatkes als teilweise von Rembrandt eingestuft – und 1997 von Blankert als in Gänze von Rembrandt. Seither gilt es (bis auf weiteres) erneut als Original von Rembrandt

## Human Level Performance bei der Zuschreibung von Kunstwerken aus dem Umfeld Rembrandts

Datenbasis für die Untersuchung sind die online verfügbaren Erkenntnisse des niederländischen Institutes für Kunstgeschichte (RKD). Das RKD verfügt ohne Zweifel über die weltweit größte Sammlung von Forschungen zu den Gemälden von Rembrandt und dessen Schülern sowie über die umfassendste, wenn auch nicht in allen Fällen vollständige Liste von Literaturquellen zu diesen Werken. Für jedes einzelne Werk sind alle wesentlichen Angaben kompakt auf der entsprechenden Webseite zusammengefasst und dargestellt.

Auf der Basis dieser Angaben haben wir zwei Confidence Scores für die Berechnung der Genauigkeit von Kunsthistorikern bei Werken von Rembrandt und dessen Schülern entwickelt. Der Base Score kann als Untergrenze für die Genauigkeit der Zuordnung von Rembrandts Werken sowie Gemälden seiner Schüler betrachtet werden, der Literatur Score als Obergrenze. Die wesentlichen Parameter für die Berechnung sind dabei:

1. „Current attribution“, also der (oder in seltenen Fällen die) Maler, denen ein Werk derzeit zugeschrieben wird.
2. „Rejected attribution“, eine Liste sämtlicher Künstler, denen ein Werk in der Vergangenheit zugeschrieben war oder von einzelnen Kunsthistorikern noch heute zugeschrieben wird, wobei diese Zuschreibung von den meisten Experten abgelehnt wird.
3. „Literatur“, eine Liste von Quellen, meist Werkverzeichnissen, die eine Zuschreibung beinhalten.

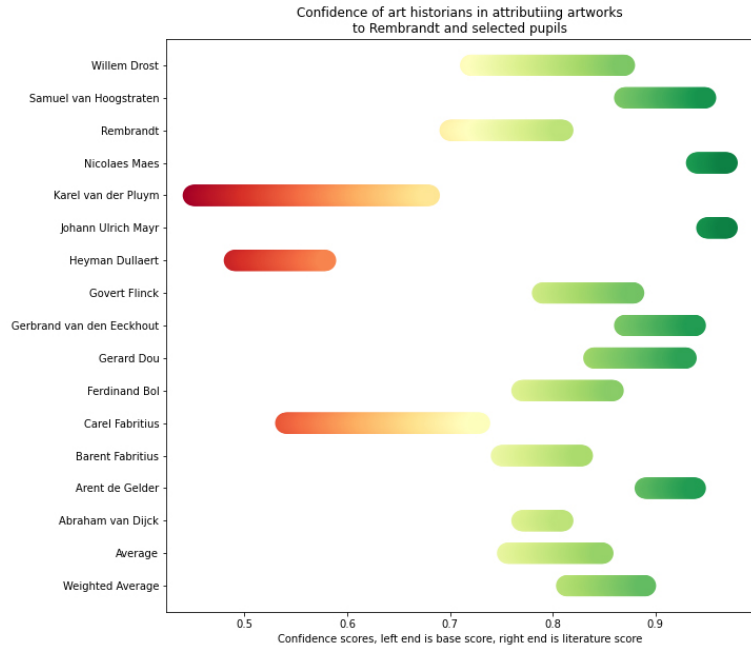
Beide Scores werden im Folgenden im Detail erörtert und diskutiert. Der Base Score wird wie folgt berechnet:

$$\text{Base Score} = 1 / (n_{\text{current}} + n_{\text{rejected}})$$

wobei  $n_{\text{current}}$  die Anzahl der aktuellen Zuschreibungen (meist ist es nur eine) beinhaltet und  $n_{\text{rejected}}$  die Anzahl der früheren oder abgelehnten Zuschreibungen. Die Logik hinter dem Base Score ist, dass jede Zuschreibung gleich gewichtet ist, unabhängig davon, wie viele Kunsthistoriker die Zuschreibung unterstützen oder wie bedeutend die Kunsthistoriker sind. Der entsprechende Wert ist deshalb definitiv zu klein.

Rembrandts Werk *Bust of a youth* mit dem früheren Titel *Portrait of Titus, the artists son* (Abb. 3) ist Rembrandt zugeschrieben, weist jedoch eine abgelehnte Zuschreibung zu „Follower of Rembrandt“ auf,  $n_{\text{current}}$  ist also 1,  $n_{\text{rejected}}$  ist ebenfalls 1. Dieses Gemälde würde mit einem Base Score von 0,5 ( $= 1 / (1+1)$ ) in die Berechnung eingehen.

4 Bandbreiten der Genauigkeit von Kunsthistorikern bei der Zuordnung von Gemälden der Rembrandt Schule



Die Gewichtung erfolgt im Literatur Score, und zwar so, dass dieser Score eine Obergrenze für die Genauigkeit der Experten darstellt. Die Formel dafür lautet:

$$\text{Literatur Score} = 1 / n_{\text{current}} - n_{\text{rejected}} / (n_{\text{literature}} + n_{\text{rejected}})$$

wobei  $n_{\text{literature}}$  die Anzahl der Literaturquellen zu dem jeweiligen Werk ist. Die Logik dieser Berechnung führt zu einer Gewichtung. Rembrandts Werk *Bust of a youth* weist 24 Quellen auf,  $n_{\text{literature}}$  ist also 24. Der Literatur Score beträgt 0,96 (=  $1 / 1 - 1/25$ ). Er steht damit trotz der turbulenten Zu- und Abschreibungshistorie (s. Bildtext zu Abb. 3)<sup>11</sup> für eine sehr hohe Sicherheit dieser Zuschreibung.

Dies ist gewollt, denn der Literatur Score soll zu einer Obergrenze bei der Berechnung der Genauigkeit oder Sicherheit der Kunstexperten in der Zuschreibung führen. In der Formel wird deshalb implizit angenommen, dass sämtliche Literaturquellen die aktuelle Zuschreibung unterstützen, was meist nicht der Realität entspricht. Des Weiteren wird implizit angenommen, dass jede abgelehnte Zuschreibung nur auf dem Urteil eines einzigen Kunsthistorikers beruht, was für die meisten Kunstwerke ebenfalls nicht zutrifft. Jede weitere Zuschreibung zu einem abgelehnten Urheber eines Werkes würde den Literatur Score verringern. Beide Annahmen führen deshalb zu einer zu hohen Bewertung der Sicherheit bei der Zuschreibung.

Für den Fall, dass keine Literatur-Quelle angegeben ist, wird  $n_{\text{literature}}$  durch  $n_{\text{literature\_avg}}$  ersetzt, die durchschnittliche Anzahl von Literaturquellen für den jeweiligen Maler. Dies ist jedoch selten der Fall, im Schnitt weist jedes Werk in dem Datensatz mehr als sieben Literaturquellen auf. Mit der Methode lässt sich die Genauigkeit der Kunstexperten bei der Zuschreibung von Gemälden Rembrandts und dessen Schüler zwar nicht exakt bestimmen, jedoch liegt der tatsächliche Wert mit Sicherheit irgendwo zwischen dem Base Score und dem Literatur Score.

Die Ergebnisse für Rembrandt und 14 seiner Schüler sind in Abbildung 4 visualisiert und in Tabelle 1 explizit aufgelistet. Auffällig ist hierbei, dass insbesondere Werke von Karel van der Pluym,

Painter Name	Base Score	Lit Score	Nr. Images	Average Nr. References
Abraham van Dijck	0.770	0.810	27	0.889
Arent de Gelder	0.890	0.940	123	4.504
Barent Fabritius	0.750	0.830	64	3.062
Carel Fabritius	0.540	0.730	31	7.903
Ferdinand Bol	0.770	0.860	206	4.053
Gerard Dou	0.840	0.930	200	4.355
Gerbrand van den Eeckhout	0.870	0.940	130	1.854
Govert Flinck	0.790	0.880	182	3.747
Heyman Dullaert	0.490	0.580	8	0.875
Johann Ulrich Mayr	0.950	0.970	41	2.463
Karel van der Pluym	0.450	0.680	12	15.917
Nicolaes Maes	0.940	0.970	594	1.086
Rembrandt	0.700	0.810	625	26.078
Samuel van Hoogstraten	0.870	0.950	97	3.351
Willem Drost	0.720	0.870	37	12.270
Average	0.756	0.850	158.467	9.117
Weighted Average	0.813	0.891	158.467	9.117

Tab. 1 Base und Literatur Score für Gemälde von Rembrandt und 14 ausgewählte Schüler sowie Anzahl der Bilder und Literaturquellen

Heyman Dullaert aber auch von Carel Fabritius sehr schlecht zugeordnet werden. Ein möglicher Grund liegt dabei in der Anzahl der Bilder – bei diesen drei Malern liegen wenige Werke vor, wie aus Tabelle 1 ersichtlich ist. Allerdings trifft dies beispielsweise auch auf Johann Ulrich Mayr zu, bei dessen Werken Kunsthistoriker wenig Zweifel haben.

Anzumerken ist darüber hinaus, dass die Genauigkeit für die Zuschreibungen zu Nicolaes Maes ausgesprochen hoch ist. Dies steht zwar im Einklang mit der Anzahl der Werke (insgesamt 594) für diesen Künstler, allerdings hat Maes nur kurz in Rembrandts Atelier gearbeitet und sich später insbesondere flämischen Malern zugewandt, wie etwa Anthonis van Dyck. Im Vergleich zu anderen Rembrandt Schülern ist die Unterscheidung der meisten Werke von Maes relativ einfach – dennoch wurden für die Berechnung der Scores nicht nur die frühen, im Stil Rembrandts entstandenen Werke herangezogen.

Wir wollen hier jedoch nicht weiter die Genauigkeit der Kunsthistoriker untersuchen, sondern lediglich einen Ansatz aufzeigen, wie sie gemessen werden kann, wobei wir offen für Kritik und Anregungen sind. Hauptziel dieser Studie ist es zu untersuchen, ob Künstliche Intelligenz bei der Zuordnung von Werken, beispielsweise bei Werkstattmalern, hilfreich sein kann. Im Folgenden werden wir die Vorgehensweise erläutern und vorstellen sowie mithilfe von Künstlicher Intelligenz einige bezüglich der Urheberschaft umstrittenen Werke von Rembrandt und dessen Schülern einzeln analysieren.

## Die Genauigkeit von Künstlicher Intelligenz bei der Zuordnung von Kunstwerken aus dem Umfeld Rembrandts

Die Genauigkeit von Algorithmen des Maschinellen Lernens hängt weniger von der Architektur der entsprechenden Neuronalen Netze ab als von der Qualität der Daten, auf denen sie trainiert werden. Und natürlich von den Labels, in diesem Fall also den Malern, denen die entsprechenden Werke zugeschrieben werden. Und hier ist, wie oben gezeigt, von einer hohen Unsicherheit unter den jeweiligen Experten auszugehen.

Diese Problematik sogenannter falscher Labels tritt allerdings nicht nur bei der Erkennung von Malstilen auf, sondern beispielsweise auch im medizinischen Bereich, etwa bei der Erkennung von diabetischer Retinopathie (Blindheit) anhand von Bildern des Augapfels, bei der sich die beurteilenden Experten notorisch uneinig sind über die (Rest-)Sehfähigkeit des jeweiligen Patienten. Dennoch erreichen Algorithmen des Maschinellen Lernens hier sehr gute Ergebnisse. Verschiedene Autoren haben zudem gezeigt, dass Neuronale Netze, die mit einer überschaubaren Anzahl falsche Labels trainiert werden, sehr robust sein können. Exemplarisch wird hier vor allem auf eine aktuelle Studie der Alexander Thamm GmbH und der LMU München mit synthetisch generierten Daten verwiesen.<sup>12</sup>

Zum Zwecke dieser Studie haben wir 2.258 Werke von Rembrandt und den genannten Schülern von den entsprechenden Webseiten des RKD heruntergeladen. Dieser Datensatz ist bezüglich der aktuellen Zuschreibungen der Gemälde oder Zeichnungen weitgehend vollständig – es fehlen lediglich etwa zwei Dutzend Werke, die beim RKD online nicht verfügbar sind. Allerdings ist die längere Seite dieser Abbildungen auf 650 Pixel beschränkt, die Auflösung ist also nicht sonderlich gut, für die Analyse jedoch ausreichend.

Zudem haben wir lediglich Werke genommen, die beim RKD eindeutig zugeschrieben sind. Interessanterweise ist dies bei der weit überwiegenden Zahl der Urteile des Rembrandt Research Project nicht der Fall – was einen unvoreingenommenen Test dieser Gemälde ermöglicht. Eine Verzerrung bezüglich der Sichtweise dieses Forscherteams ist dadurch ebenfalls weitgehend ausgeschlossen.

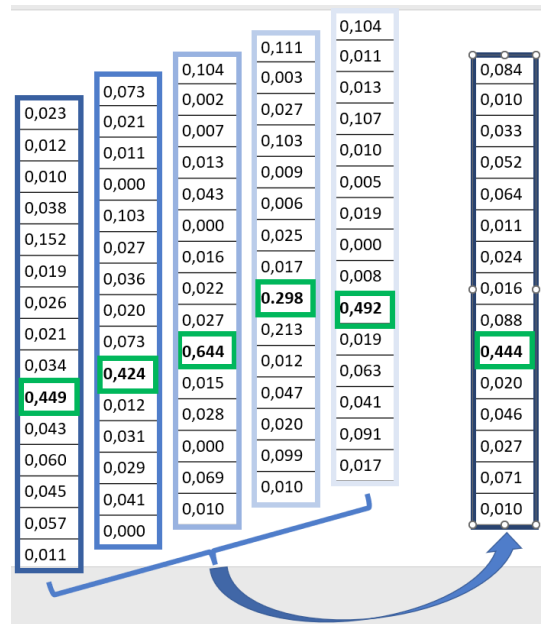
Der Datensatz wurde im Verhältnis 85:15 in ein Trainings- und Test-Set aufgeteilt. Anschließend wurden jeweils fünf Neuronale Netze mit einem kreuzvalidierten Ansatz trainiert. Das heißt: Von den Trainingsdaten, also von 85 Prozent der Bilder, haben wir jeweils 80 Prozent für das eigentliche Training verwendet, die restlichen 20 Prozent dienten zur Validation und Optimierung des jeweiligen Neuronalen Netzes. Die Aufteilung der Daten innerhalb des Trainings-Sets wurde so vorgenommen, dass jedes Gemälde zumindest einmal im Validations-Set vorkommt. Sämtliche der fünf Netze sind also auf leicht unterschiedlichen Daten trainiert worden (vgl. Abb. 5).



5 Schematische Darstellung des kreuzvalidierten Ansatzes beim Training der einzelnen Neuronalen Netze, Trainingsdaten in blau, Validationsdaten in grün

Van Dijck	0,010	0,040	0,020	0,023
De Gelder	0,003	0,010	0,025	0,012
B. Fabritius	0,020	0,003	0,007	0,010
C. Fabritius	0,002	0,105	0,008	0,038
Bol	0,102	0,000	0,350	0,152
Dou	0,000	0,000	0,056	0,019
Eeckhout	0,015	0,021	0,043	0,026
Flinck	0,007	0,009	0,047	0,021
Dullaert	0,000	0,102	0,001	0,034
Mayr	0,567	0,444	0,335	0,449
v. d. Pluym	0,040	0,000	0,090	0,043
Maes	0,008	0,170	0,003	0,060
Rembrandt	0,120	0,001	0,013	0,045
Hoogstraten	0,106	0,063	0,002	0,057
Drost	0,000	0,032	0,000	0,011

SoftMax-Output für Ausschnitte eines Werkes, gemittelte Werte rechts (blau)



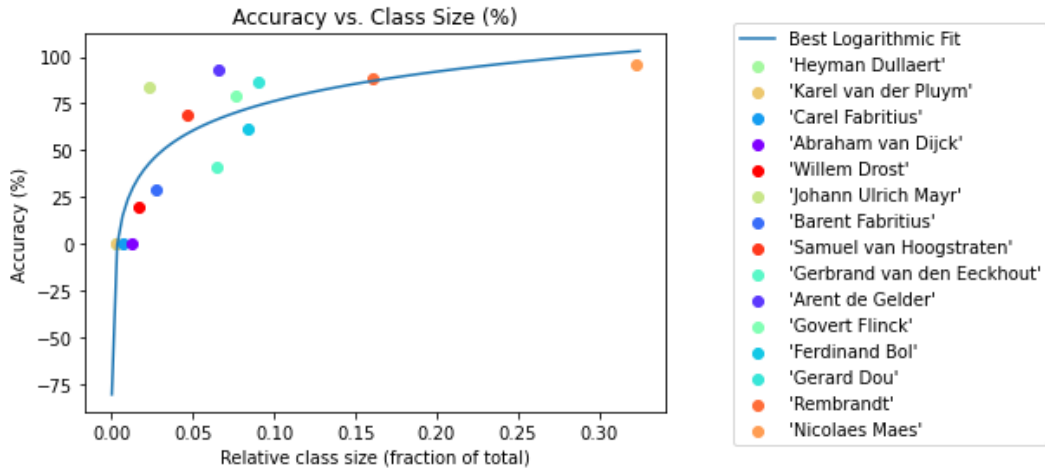
6a/b Evaluation der Ergebnisse des Ensembles aus fünf CNNs, schematisch für ein Werk: Zunächst wird der SoftMax Output über die einzelnen Bildausschnitte gemittelt (6a). Die rot umrandeten Werte stellen jeweils den maximalen SoftMax Output innerhalb eines Bildausschnittes dar. Der grün umrandete Wert rechts ist der maximale Wert der Durchschnittswerte aller Einträge für die verschiedenen Maler. In diesem Fall also der Durchschnittswert aus 0,567, 0,444 und 0,335. Dies geschieht in jedem der Neuronalen Netze separat. Anschließend werden die gemittelten Ergebnisse jedes einzelnen CNNs für jeden einzelnen Maler erneut gemittelt (6b). Der so generierte Vektor wird als finales Ergebnis verwendet. Die Vorhersage des Malers basiert auf dem höchsten SoftMax Output, hier also 0,444 – dem Durchschnittswert aus 0,449, 0,424, 0,644, 0,213 und 0,492

Die einzelnen Konvolutionalen Neuronalen Netze (Convolutional Neural Networks, CNNs) wurden auf dem Test-Set evaluiert. Hierbei ist festzuhalten, dass die Werke im Test-Set während des Trainings mit keinem der Netze in Berührung kamen. Um die finale Genauigkeit des Ensembles aus CNNs zu verstehen, muss der sogenannte SoftMax Output eines Neuronalen Netzes betrachtet werden. Es handelt sich dabei für jedes einzelne Bild um einen Vektor mit Einträgen für jeden der Maler im Datensatz. Diese Einträge summieren sich für jedes einzelne Werk auf 1. Sie werden von vielen KI-Experten als Wahrscheinlichkeiten dafür interpretiert, dass ein Gemälde von dem jeweiligen Maler stammt. Allerdings ist diese Betrachtung mathematisch falsch und obendrein problematisch, wie wir weiter unten in diesem Kapitel zeigen werden.

Tatsächlich sind die Netze jedoch nicht mit den gesamten Abbildungen trainiert worden – sondern mit mehreren zufällig ausgewählten Bildausschnitten aus jedem der einzelnen Werke. Der SoftMax Output wurde zunächst über alle Ausschnitte eines Werkes gemittelt – und anschließend über die verschiedenen Neuronalen Netze. Schematisch ist diese Vorgehensweise in Abbildung 6a/b dargestellt.

Das Verständnis des Outputs der einzelnen Netze ist jedoch gerade bei diesem Anwendungsfall sehr wichtig und wird im Folgenden ausführlich erklärt. Denn die Betrachtung der einzelnen SoftMax Output-Werte liefert Hinweise darauf, wie sicher sich das Ensemble bei der Zuschreibung zu einem bestimmten Künstler ist. Hierzu können sogenannte Confidence-Scores berechnet werden, die Kunst-





7 Genauigkeit des Ensembles von fünf CNNs bei der Erkennung von Rembrandt und 14 seiner Schüler in Abhängigkeit vom prozentualen Anteil der Gemälde des jeweiligen Künstlers im Datensatz. Die Neuronalen Netze wurden auf dem RKD-Datensatz (der geparteten Bilder) trainiert

historikern bei der Beurteilung helfen können, wie ernst ein Votum des Ensembles Neuronaler Netze zu nehmen ist.

Zunächst werden wir jedoch die Ergebnisse der KI-Analyse für alle Bilder vorstellen, evaluieren und diskutieren. Auf dem RKD-Datensatz erreicht das Ensemble aus fünf CNNs eine Genauigkeit von 79,3 Prozent, wobei nur eindeutig zugeschriebene Werke verwendet wurden. Allerdings variiert die Erkennung für die einzelnen Maler sehr stark. Hier ist eine logarithmische Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder im Datensatz zu erkennen (vgl. Abb. 7).

So werden vier Rembrandt Schüler gar nicht erkannt, für sie gibt es zu wenige Gemälde mit eindeutiger Zuschreibung. Es handelt sich dabei um Abraham van Dijck (21 Werke), Carel Fabritius (12 Werke), Heyman Dullaert (4 Werke) und Karel van der Pluym (4 Werke). Die Anzahl der Werke der betreffenden Maler bezieht sich jeweils auf den gesamten Datensatz, also auf Trainings- und Test-Daten. Von den vier eindeutig zugeschriebenen Werken von Heyman Dullaert und Karel van der Pluym befinden sich jeweils drei im Trainings-Datensatz und lediglich eines im Test-Datensatz. Andere Künstler dagegen werden sehr gut von dem Ensemble erkannt. Von Arendt de Gelder, Gerard Dou, Johann Ulrich Mary, Nicolaes Maes und Rembrandt selbst werden jeweils weit über 80 Prozent der Werke richtig klassifiziert. Eine genaue Aufstellung ist in Tabelle 2 zu finden.

Mathematisch betrachtet sind die Genauigkeiten der Vorhersagen des Ensembles nicht gleichzusetzen mit den berechneten Scores der Kunsthistoriker. Für eine echte ‚human level performance‘ bräuchte man die Vorhersagen von Kunsthistorikern, also einen Test, wie gut die Experten bestimmte Bilder dem aktuell vermuteten Künstler zuordnen. Intuitiv aber sind die Werte durchaus vergleichbar.

Eine nähere Betrachtung zeigt, dass Kunsthistoriker (oft deutlich) sicherer sind bei der Zuschreibung zu bestimmten Schülern, bei Rembrandt selbst jedoch verhält es sich umgekehrt. Hier liegt die Genauigkeit des Ensembles deutlich über der Bandbreite der Scores der menschlichen Experten.

Vor dem Hintergrund der hohen Unsicherheit bei der Zuschreibung zahlreicher Werke macht ein plumper Vergleich nach dem Motto ‚Wer ist besser in der Zuordnung von Malstilen – die menschliche oder die Künstliche Intelligenz?‘ aus unserer Sicht keinerlei Sinn. Die Frage ist vielmehr: Kann Künst-

Painter	Precision	Recall	F1-Score	Train Size (in %)
Abraham van Dijck	0	0	0	1.244
Arent de Gelder	0.929	0.929	0.929	6.584
Barent Fabritius	0.667	0.286	0.400	2.707
Carel Fabritius	0	0	0	0.732
Ferdinand Bol	0.684	0.619	0.650	8.339
Gerard Dou	0.909	0.870	0.889	8.998
Gerbrand van den Eeckhout	0.636	0.412	0.500	6.437
Govert Flinck	0.600	0.789	0.682	7.608
Heyman Dullaert	0	0	0	0.219
Johann Ulrich Mayr	0.455	0.833	0.588	2.341
Karel van der Pluym	0	0	0	0.219
Nicolaes Maes	0.854	0.962	0.905	32.260
Rembrandt	0.760	0.884	0.817	16.094
Samuel van Hoogstraten	1	0.692	0.818	4.609
Willem Drost	1	0.200	0.333	1.609
Overall (weighted) wrt Train Set	0.775	0.793	0.770	100
Overall (unweighted) wrt Train Set	0.566	0.498	0.501	100

Tab. 2 Genauigkeit (Recall) und Präzision (Precision) des auf dem RKD-Datensatz trainierten Ensembles aus fünf CNNs für einzelne Maler sowie deren prozentualer Anteil von Gemälden im Trainingsdatensatz

liche Intelligenz neben naturwissenschaftlichen und kunsthistorischen Expertisen als zusätzliche Indikation bei der Zuschreibung von Werken zu Künstlern der Rembrandt Schule hilfreich sein? Und wenn ja: Wie? Um diese Fragen zu beantworten, müssen wir uns noch intensiver mit dem Output des Modells befassen.

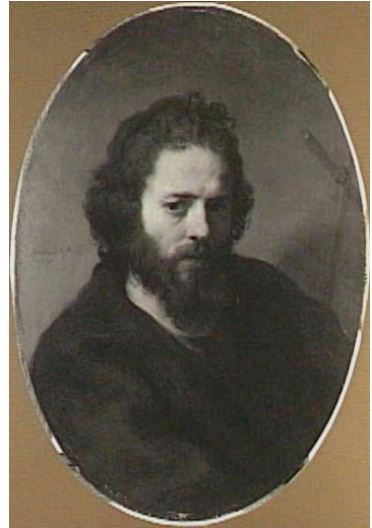
### Kritische Diskussion der Modell-Ergebnisse

Zu diesem Zweck wollen wir zwei – zugegebenermaßen extreme – Beispiele aus dem Datensatz näher betrachten. Es handelt sich um die Gemälde *Isaac lying in bed blesses Jacob who, disguised in Esau's clothes, brings food to his father* von Gerbrand van den Eeckhout (Abb. 8a) und das Portrait *Johannes de Doper* von Gerard Flinck (Abb. 8b), von dem nur eine schwarz-weiße Aufnahme verfügbar ist. Das Gemälde von Gerbrand van den Eeckhout wird von dem Modell nicht korrekt erkannt, das Portrait von Govaert Flinck schon. Betrachten wir jedoch den SoftMax Output für die beiden Werke (Abb. 9a/b), kommen unwillkürlich Fragen auf.

Für das Werk von Gerbrand van den Eeckhout beträgt der maximale SoftMax Output 0,1989. Er bezieht sich auf Govaert Flinck, weswegen das Bild falsch klassifiziert wird. Die SoftMax Output-Werte für acht weitere Künstler, nämlich Arent de Gelder, Barent und Carel Fabritius, Ferdinand Bol, Gerard Dou, Gerbrand van den Eeckhout, Nicolaes Maes und Rembrandt liegen zwischen 0,05 und 0,15, also vergleichsweise nahe an dem maximalen Wert.

Ganz ähnlich ist die Situation bei dem Portrait von Govaert Flinck. Der SoftMax Output für diesen Künstler ist mit 0,2473 zwar maximal, weswegen dieses Werk korrekt vorhergesagt wird. Allerdings ist der Unterschied zu Arent de Gelder (0,2191), Gerbrand van den Eeckhout (0,2147) und Rembrandt (0,1836) ausgesprochen gering.

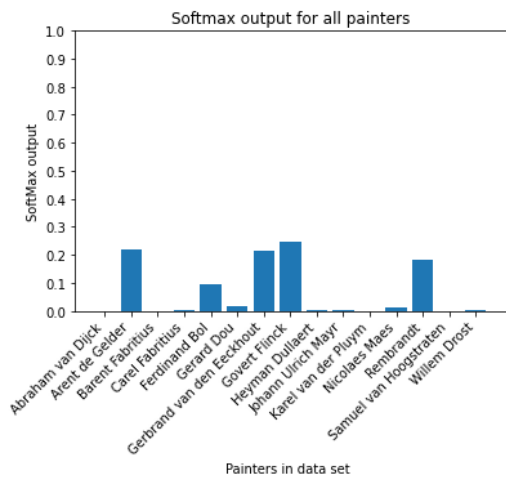
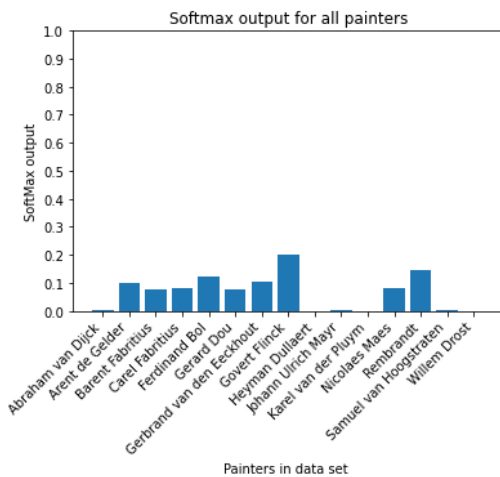
Wenn wir für einen Moment die – mathematisch inkorrekte – Interpretation des SoftMax Outputs als Wahrscheinlichkeit annehmen, so sagt das Modell über das Portrait von *Johannes de Doper*: Mit



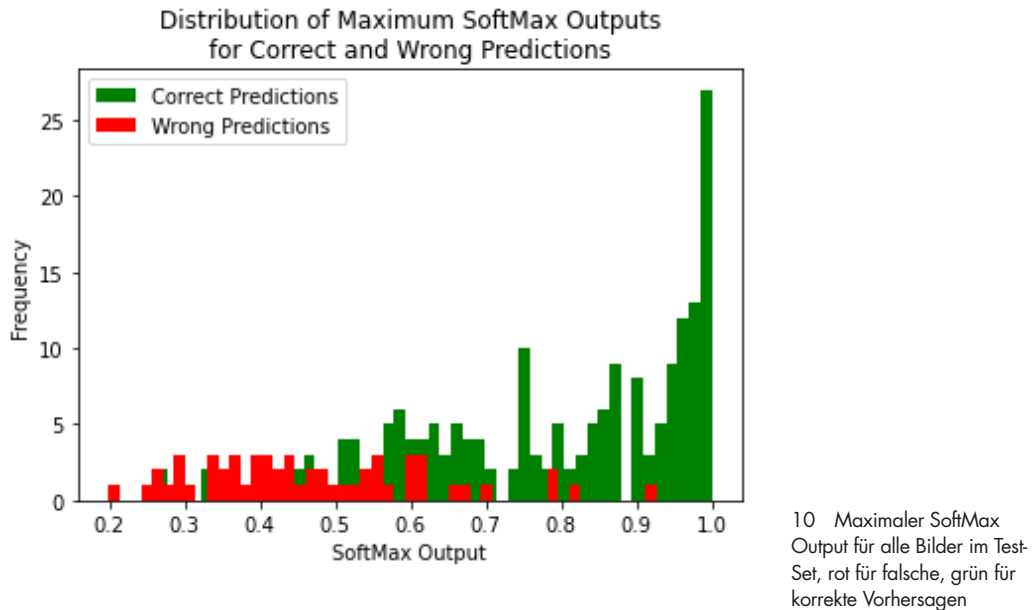
8a/b Gerbrand van den Eeckhout, *Isaac lying in bed blesses Jacob who, disguised in Esau's clothes, brings food to his father*, New York, Metropolitan Museum of Art (8a) und Govaert Flinck, *Johannes de Doper*, Los Angeles, Los Angeles County Museum of Art (8b)

einer Wahrscheinlichkeit von 24 Prozent stammt es von Govaert Flinck, mit einer Wahrscheinlichkeit von knapp 22 Prozent von Arent de Gelder oder auch von Gerbrand van den Eeckhout und mit einer Wahrscheinlichkeit von 18,36 Prozent von Rembrandt. Was sollen wir mit dieser Aussage anfangen?

Die ehrliche Antwort ist: So eine Aussage ist für eine Zu- oder Abschreibung völlig wertlos. Das Ensemble aus CNNs weiß nicht, wer dieses Bild gemalt hat, es ist sich – wie Kunsthistoriker bei zahlreichen anderen Werken – völlig un schlüssig. Folglich wäre eine Zuschreibung zu dem Künstler mit dem höchsten SoftMax Output auf Grund der hohen Unsicherheit des Modells schlichtweg verantwortungslos. Anders ausgedrückt: Die Zuordnung eines Bildes zu dem Maler mit dem höchsten Soft-



9a/b SoftMax Output für die in Abbildung 8a/b gezeigten Werke von Gerbrand van den Eeckhout und Govaert Flinck



Max Output ist für eine erste, oberflächlich Evaluation des Modells als Ganzes zwar legitim und richtig. Für die Beurteilung einzelner Werke aber ist diese Vorgehensweise nur bedingt anwendbar.

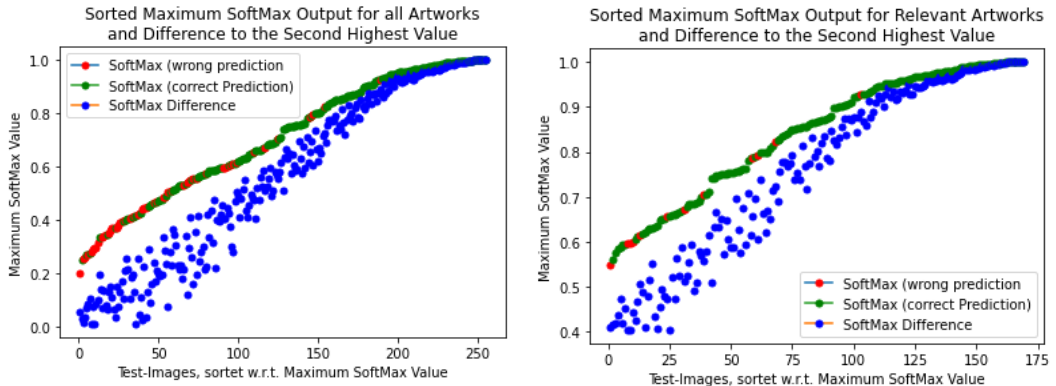
Die gute Nachricht allerdings ist: Wir können intuitiv sehen, wie sicher sich das Modell bei der Zuordnung eines Bildes zu einem Maler ist – und dies im Folgenden auch mathematisch formulieren. Das wiederum ist ausgesprochen hilfreich. Das Modell sagt uns nämlich, wann wir seine Vorhersagen ernst nehmen sollten und wann nicht.

Die Situation ist möglicherweise vergleichbar mit der Aussage eines Kunsthistorikers, der gefragt wird: „Was glauben Sie, ist dieses Gemälde von Rembrandt oder von Gerard Dou?“ Und dessen Antwort lautet: „Die Farbgebung spricht für Gerard Dou, aber der Pinselstrich passt eher zu Rembrandt. Von daher muss ich hier passen.“ Wir wissen nicht, ob sich Kunsthistoriker (gelegentlich) so äußern und wollen an dieser Stelle noch einmal betonen, dass diese Studie nicht der Frage nachgeht, ob Künstliche Intelligenz Kunst besser beurteilen kann als menschliche Intelligenz und Expertenwissen. Wir wollen die Frage erörtern, ob Künstliche Intelligenz bei der Zuschreibung von umstrittenen Gemälden hilfreich sein kann – und wenn ja, wie?

Eine erste Erkenntnis lautet: Es gibt Bilder, darunter die beiden extremen Beispiele (vgl. Abb. 8a/b), bei denen eine Klassifizierung mithilfe eines Ensembles aus CNNs nicht weiterhilft, was uns das Modell auch mitteilt. Was aber ist mit den anderen Fällen?

Um nicht nur intuitiv zu beurteilen, wann wir eine Vorhersage des Modells ernst nehmen sollten, betrachten wir die Verteilung des SoftMax Outputs getrennt – einmal für die korrekt vorhergesagten, aber auch für die falsch klassifizierten Bilder. Die entsprechenden Histogramme sind in Abbildung 10 zusammengefasst.

Dabei wird deutlich, dass der SoftMax Output bei den korrekten Vorhersagen generell *deutlicher* ist als bei den inkorrekten Vorhersagen. Allerdings gibt es Ausnahmen für beide Kategorien. Einige korrekte Vorhersagen haben einen sehr geringen SoftMax Output, wie beispielsweise das bereits er-



11a/b Maximaler SoftMax Output für alle Bilder im Test-Set, rot für falsche, grün für korrekte Vorhersagen sowie die Differenz zum zweithöchsten SoftMax-Wert (11a). Gleiche Darstellung für alle Bilder mit einer Differenz zwischen dem höchsten und dem zweithöchsten SoftMax-Wert von mehr als 0,4 (11b). Die Bilder sind der Übersichtlichkeit halber nach ihrem höchsten SoftMax-Wert sortiert

wählte Portrait *Johannes de Doper* von Govaert Flinck. In einigen sehr seltenen Fällen ist sich das Modell auch bei falschen Vorhersagen sehr sicher. Aber was ist eigentlich mit einer deutlichen Vorhersage gemeint?

Um einer Vorhersage zu vertrauen, wollen wir einerseits, dass der SoftMax Output für die Vorhersage möglichst hoch ist – und andererseits, dass er sich für den vorhergesagten Maler deutlich von den übrigen Künstlern im Datensatz abhebt. Der SoftMax Output für den vorhergesagten Maler muss also deutlich höher sein als die Werte für die übrigen Maler. Und dies ist immer genau dann der Fall, wenn er deutlich höher ist, als der SoftMax Output des Malers mit dem zweithöchsten Wert – denn die Werte aller weiteren Künstler liegen darunter. Die Distanz zum Maler mit dem zweithöchsten SoftMax Output ist also ein Minimalwert.

Wir haben deshalb für jedes Beispiel im Test-Set die Differenz zwischen dem höchsten und dem zweithöchsten SoftMax Output berechnet. Diese Differenzen sind, zusammen mit dem jeweils höchsten SoftMax Output, in Abbildung 11a zu sehen. Darüber hinaus haben wir einen Schwellenwert von 0,4 festgelegt. Wenn also der maximale SoftMax Output einer Vorhersage zudem um mindestens 0,4 höher ist als der zweithöchste Wert, nehmen wir die Vorhersage ernst und glauben sie, ansonsten lehnen wir sie ab.

Mathematisch betrachtet hat dieser Schwellenwert zur Folge, dass der geringstmögliche SoftMax Output für eine ernst zu nehmende Zuschreibung bei 0,44 liegt. Da sich der SoftMax Output über alle Maler hinweg immer zu 1 summiert müssten dazu jedoch alle anderen Werte genau 0,04 betragen, was höchst unwahrscheinlich ist. Tatsächlich liegt der geringste SoftMax Output im Test-Set, der dieses Kriterium erfüllt, bei 0,549.

Der Schwellenwert hat auch zur Folge, dass jeder SoftMax Output-Wert, der höher ist als 0,7, zu einer ernst zu nehmenden Zuschreibung führt. Die Rechnung ist ganz einfach. Wenn der SoftMax Output für einen Maler 0,7 beträgt, kann er maximal für einen weiteren Künstler 0,3 betragen, vorausgesetzt er ist für alle übrigen Maler 0. Damit aber ist das Differenzkriterium erfüllt.

Warum so kompliziert? Wir könnten eine zu akzeptierende Vorhersage doch auch einfach am absoluten SoftMax Output-Wert festmachen, also beispielsweise jede Vorhersage als korrekt annehmen,

Painter	Precision	Recall	F1-Score	Train Size (in %)
Abraham van Dijck	0	0	0	1.244
Arent de Gelder	1	1	1	6.584
Barent Fabritius	1	1	1	2.707
Ferdinand Bol	1	0.600	0.750	8.339
Gerard Dou	0.947	1	0.973	8.998
Gerbrand van den Eeckhout	1	0.833	0.909	6.437
Govert Flinck	0.818	1	0.900	7.608
Heyman Dullaert	0	0	0	0.219
Johann Ulrich Mayr	0.600	1	0.750	2.341
Karel van der Pluym	0	0	0	0.219
Nicolaes Maes	0.947	0.986	0.966	32.260
Rembrandt	0.912	0.939	0.925	16.094
Samuel van Hoogstraten	1	0.800	0.889	4.609
Overall (weighted) wrt Train Set	0.900	0.892	0.889	97.659
Overall (unweighted) wrt Train Set	0.710	0.705	0.697	97.659

Tab. 3 Präzision (Precision) des auf dem RKD-Datensatz trainierten Ensembles aus fünf CNNs für einzelne Maler, sowie deren prozentualer Anteil von Gemälden im Trainingsdatensatz. Die Recall-Werte beziehen sich dabei – anders als die Präzisionswerte – lediglich auf Fälle, in denen das Modell eine Vorhersage trifft

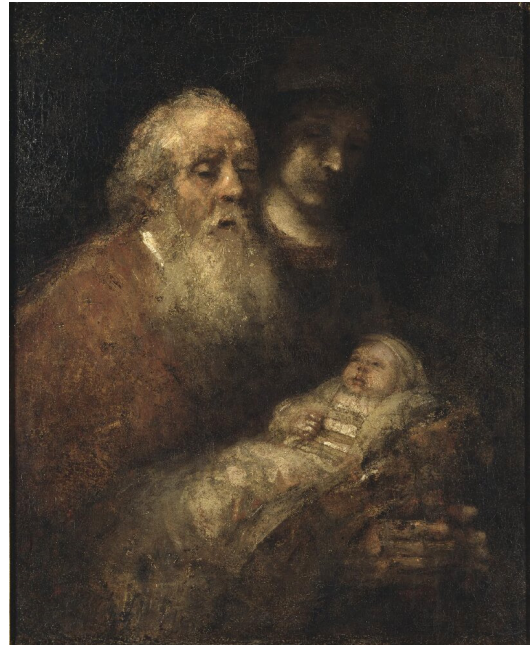
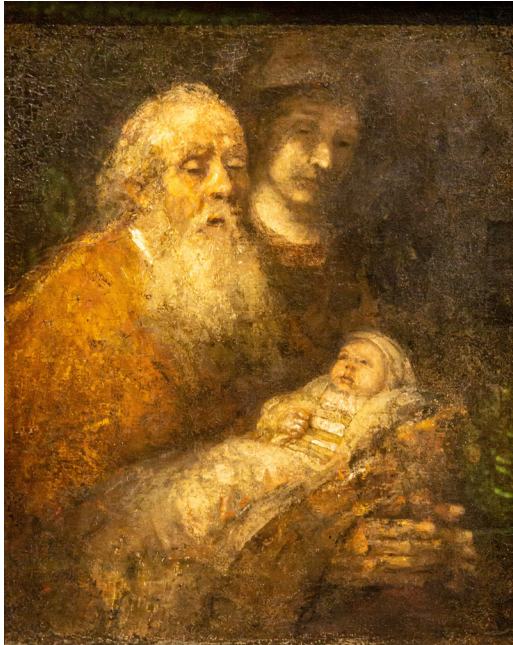
wenn der Schwellenwert über 0,5 liegt. Damit muss eine sichere Zuschreibung erfolgen, schließlich kann so kein anderer Wert mehr über 0,5 liegen.

Tatsächlich kalibrieren zahlreiche KI-Experten ihre Modelle mit einem absoluten Schwellenwert. Allerdings hätte dies in unserem Fall zur Folge, dass wir ein Bild, dessen SoftMax Output für Rembrandt 0,51 beträgt, für Carel Fabritius 0,49 und für alle anderen Künstler 0, Rembrandt zuschreiben müssten, was uns widerstrebt. Unsere Interpretation dieses hypothetischen Beispiels wäre, dass sich das Modell nicht sicher ist, ob es sich um ein Werk von Rembrandt oder Fabritius handelt, weswegen wir eine Zuschreibung zu Rembrandt ablehnen.

Der Vollständigkeit halber müssen wir das Modell mit der SoftMax-Differenz-Regel neu evaluieren. Die Genauigkeit sinkt dabei auf 62,4 Prozent. Das heißt: Von allen Werken werden nicht mehr 79,3 Prozent richtig erkannt, sondern nur noch 62,4 Prozent – was einleuchtend ist, denn wir haben ja einige Werke, wie beispielsweise Govaert Flincks Portrait *Johannes de Doper* als falsch klassifiziert, weil uns das Ergebnis des Modells zu unsicher erschien. Allerdings ist die Genauigkeit nicht die Metrik, die uns interessiert. Mathematisch ausgedrückt stellt sie die Wahrscheinlichkeit dar, dass das Modell eine richtige Aussage trifft, also beispielsweise Govaert Flinck vorhersagt – und zwar unter der Bedingung, dass das betreffende Bild tatsächlich von Govaert Flinck stammt.

Wenn wir jedoch Gemälde testen, von denen wir den Maler nicht kennen, brauchen wir die umgekehrten Wahrscheinlichkeiten. Wir müssen wissen: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bild von Govaert Flinck gemalt wurde – und zwar unter der Bedingung, dass das Modell Govaert Flinck vorhersagt. Die entsprechende Metrik heißt Präzision und sie steigt mit der SoftMax-Differenz-Regel von 77,5 Prozent auf 90,0 Prozent.

Anders ausgedrückt: Wenn das Modell einen Maler mit dieser strengeren Regel vorhersagt, ist das Bild mit einer im Schnitt 90-prozentigen Wahrscheinlichkeit tatsächlich von diesem Künstler. Die Werte schwanken zwar, wie aus Tabelle 3 hervorgeht. Nach wie vor werden Abraham van Dijck, Heyman Dullaert und Karel van der Pluym gar nicht erkannt, bei den übrigen Schülern jedoch steigt die Präzision teilweise deutlich an. Für Rembrandt liegt sie bei 91,2 Prozent.



12a/b Rembrandt, *Simeon's Song of Praise*, 12a ist eine hochauflösende Darstellung aus Wikipedia Commons, 12b eine Aufnahme des Nationalmuseums Stockholm

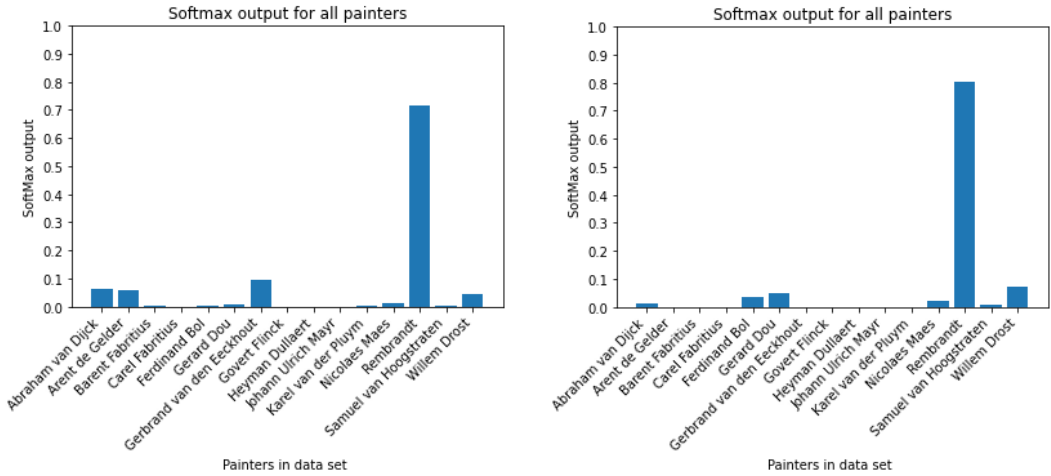
Zusammenfassend lässt sich sagen: Wir haben das Modell mit einer strengeren Vorhersage-Regel rekali­briert. Das hat zur Folge, dass dieses Modell für 33 Prozent der Bilder im Testdatensatz keine Aussage liefert, was wir für diesen Anwendungsfall jedoch in Kauf nehmen. Für die restlichen zwei Drittel der Fälle können wir der Modellvorhersage dafür deutlich stärker vertrauen.

In der folgenden Detailanalyse werden wir 15 umstrittene Gemälde untersuchen, die allesamt weder im Trainings- noch im Testdatensatz vorhanden sind. Das Modell hat diese Bilder also nicht ‚gelernt‘ – und kann sie folglich unbefangenen beurteilen. Der Fokus liegt vor allem darauf, ob diese Werke Rembrandt-Originale sind. Im Abschnitt *Weiterführende Analysen* werden wir aufzeigen, wie Künstliche Intelligenz Kunst­historikern mit einer Vielzahl weiterer Methoden assistieren kann. Insbesondere dann, wenn dieses erste Modell auf Grund der strengeren Vorhersagekriterien keine Aussage über die Urheberschaft eines Werkes macht.

### Detailanalyse umstrittener Werke

Zweifelsfrei teilweise von Rembrandt stammt das Gemälde *Simeon's Song of Praise* (ca. 1669). Die beiden Maler Allaert and Cornelis van Everdingen bezeugten, dass sie Rembrandt in den Monaten vor seinem Tod 1669 an dem Werk arbeiten sahen. Allerdings hat der Künstler dieses Werk nicht mehr vollendet. Die Frau im Hintergrund, oft als Hanna oder Maria identifiziert, wurde laut Bredius<sup>13</sup> und Bauch<sup>14</sup> vermutlich später eingefügt.

Wir haben zunächst das gesamte Bild getestet – und zwar in zwei unterschiedlichen, öffentlich verfügbaren Varianten (Abb. 12a/b). Beide Varianten werden dabei eindeutig als Rembrandt identifiziert. Die Verteilung des SoftMax Output ist in Abbildung 13a/b dargestellt. Bleibt jedoch die Frage, ob

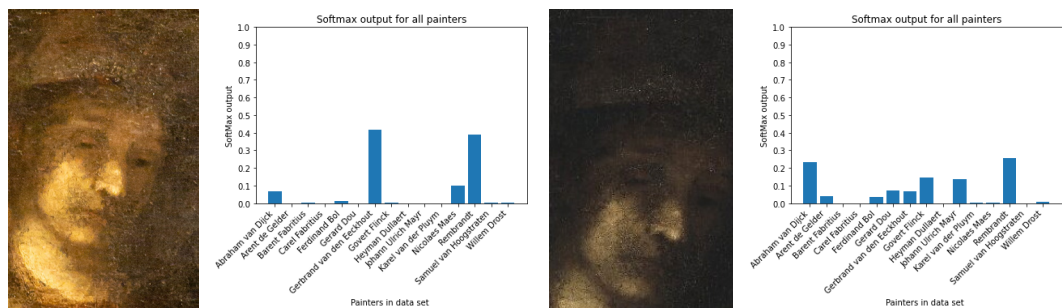


13a/b SoftMax Output für die beiden in Abbildung 12a/b gezeigten Varianten des Rembrandt-Gemäldes *Simeon's Song of Praise*

Rembrandt tatsächlich auch die Frau im Hintergrund gemalt hat, oder ob das Werk von einem Schüler vollendet wurde. Und wenn ja: Von wem?

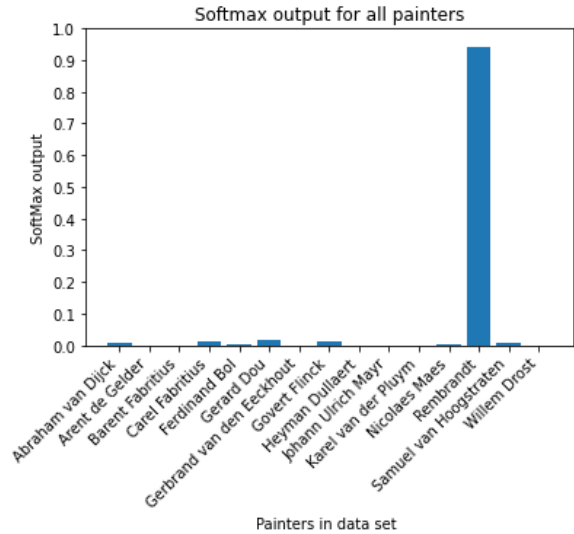
Zu diesem Zweck wurde die Figur aus den beiden Bildern ausgeschnitten und jeweils separat getestet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14a-d dargestellt. Keiner der beiden Ausschnitte wird als Original von Rembrandt erkannt. Das Ensemble vermutet bei dem linken Ausschnitt Gerbrand van den Eeckhout als Urheber, beim rechten ist der SoftMax Output relativ gleichmäßig über acht verschiedene Künstler verteilt. Dies ist eine typische Distribution, wenn der tatsächliche Maler nicht im Datensatz vorhanden ist. Die beiden Gesamtbilder wurden erneut getestet, wobei die Bildausschnitte aus Abbildung 13 geschwärzt wurden. Dies führte in beiden Fällen zu einem noch höheren SoftMax Output für Rembrandt als in Abbildung 13 dargestellt.

Als Fazit lässt sich sagen, dass die Annahme von Bredius und Bauch als sehr plausibel betrachtet werden kann. Die weibliche Figur im Hintergrund ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht von Rembrandt gemalt worden. Valide Hinweise auf den Künstler, der das Gemälde vollendet hat, gibt das Ensemble aus CNNs jedoch nicht.



14a-d Extrahierte weibliche Figur aus den in Abbildung 12a/b gezeigten Varianten des Rembrandt-Gemäldes *Simeon's Song of Praise* (14a/c) samt zugehörigem SoftMax Output (14b/d)

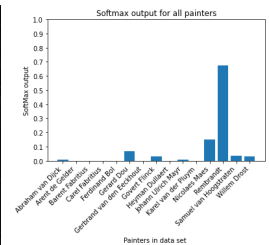
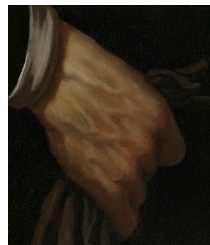
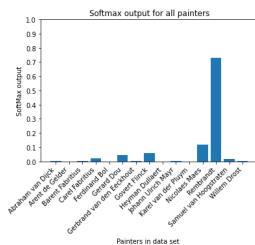
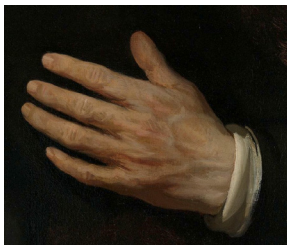




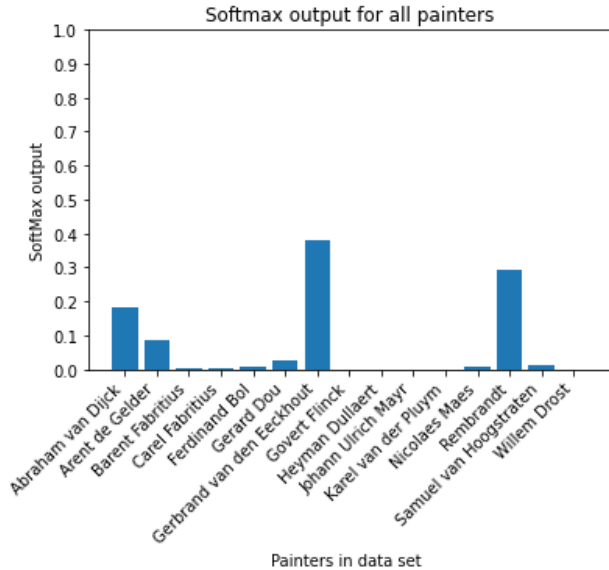
15a/b Rembrandts Gemälde *Portrait of Johannes Wittenbogaert* samt zugehörigem SoftMax Output

Eine ähnliche Situation findet sich in dem Gemälde *Portrait of Johannes Wittenbogaert* (1633). Das Rembrandt Research Project (RRP) hatte zunächst Zweifel an der Signatur des Gemäldes, lies die jedoch nach einer Restauration des Gemäldes 1992 wieder fallen. Van de Wetering<sup>15</sup> vermutete aber, dass die Hände des Portraitierten von einem Assistenten des Meisters ausgeführt wurden. Um die Hände in passabler Auflösung ausschneiden und testen zu können, wurde auch hier eine Abbildung von Wikimedia Commons (4818 × 5992 Pixel) für den Test verwendet. Das Gesamtbild wird dabei erneut eindeutig und zweifelsfrei als Original von Rembrandt erkannt, wie übrigens auch die beim RKD abgebildete, niedrig aufgelöste Variante des Bildes. Der SoftMax Output liegt jeweils bei über 0,94 (Abb. 15a/b).

Die Ausschnitte der Hände fallen zwar im SoftMax Output von dem Gesamtbild ab (vgl. Abb. 16a–d). Sie werden aber mit Werten von 0,739 und 0,645 immer noch als Original von Rembrandt klassifiziert, und zwar auch unter der strengeren SoftMax-Differenz-Regel. Der Abstand zum nächsthöchsten SoftMax-Wert ist in beiden Fällen größer als 0,4. Der Rückgang ist zwar auffällig, dass die Hände jedoch gänzlich von einem anderen Künstler gemalt wurden, ist eher unwahrscheinlich.



16a–d Extrahierte Hände aus dem Rembrandt-Gemälde *Portrait of Johannes Wittenbogaert* (16a/c) samt zugehörigem SoftMax Output (16b/c)



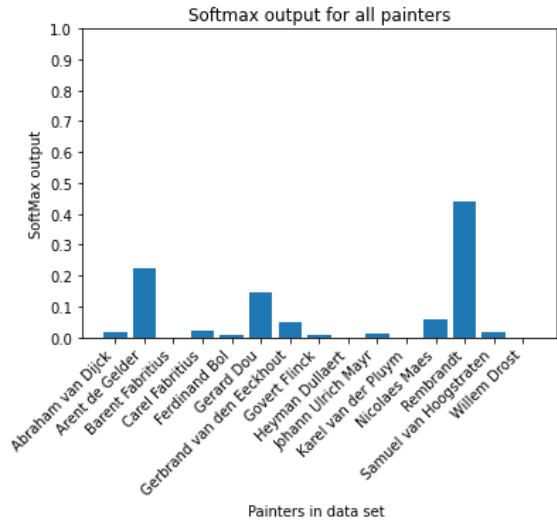
17a/b *The Slaughtered Ox*, ehemals Rembrandt-Original, heute Werkstattbild samt zugehörigem SoftMax Output

Eine der weniger überraschenden Abschreibungen des RRP war das Gemälde *The Slaughtered Ox* (ca. 1640). Laut RKD hatten zahlreiche Kunsthistoriker Zweifel an der Authentizität des Werkes, dennoch galt es gemeinhin als Original des Meisters und war als solches in verschiedenen Werkverzeichnissen aufgeführt<sup>16</sup> – bis das RRP das Werk 1989 abschrieb und als Werkstattbild („Studio of Rembrandt“) deklarierte, wobei sie Carel Fabritius als möglichen Urheber explizit erwähnen. Das Werk ist in Abbildung 17a/b dargestellt, zusammen mit dem SoftMax Output des Ensembles aus CNNs. Obwohl der Stil Rembrandts von dem Ensemble in dem Gemälde ausgemacht wird (was bei einem Werkstattbild nicht weiter verwunderlich ist), wird das Werk weder von dem Modell als Ganzem noch von keinem einzigen der einzelnen CNNs als Original des Meisters gesehen (Tab. 4).

Stattdessen ist sowohl der Stil von Abraham van Dijck wie auch von Gerbrand van den Eeckhout dominant. Allerdings darf dieses Ergebnis nicht überinterpretiert werden, zum einen, weil die Verteilung der Werte kein eindeutiges Bild liefert und die SoftMax-Differenz-Regel verletzt ist, zum anderen, weil der tatsächliche Maler möglicherweise gar nicht in dem Datensatz vorhanden ist. Auch kann die mögliche Zuschreibung zu Carel Fabritius trotz des sehr niedrigen SoftMax-Wertes für diesen wohl ta-

Modell	SoftMax Rembrandt	Predicted	SoftMax Predicted
CNN1	0.31733	Abraham van Dijck	0.34047
CNN2	0.39493	Abraham van Dijck	0.41836
CNN3	0.21116	G. van den Eeckhout	0.49480
CNN4	0.26749	G. van den Eeckhout	0.65851
CNN5	0.26196	G. van den Eeckhout	0.39202
Ensemble	0.29057	G. van den Eeckhout	0.37824

Tab. 4 SoftMax-Ergebnisse und vorhergesagte Maler der einzelnen CNNs sowie des Ensembles als Ganzem für das Rembrandt Werkstattbild *The Slaughtered Ox*



18a/b Ehemals Rembrandt und heute laut RKD „möglicherweise Carel Fabritius“ zugeschriebenes Gemälde *Girl with a Broom* samt zugehörigem SoftMax Output

lentiertesten Schüler Rembrandts auf Grund der vorliegenden Daten nicht zurückgewiesen werden. Von Fabritius, der 32-jährig bei der Explosion des Delfter Pulverturmes verstarb, in dem sich auch sein Atelier befand, sind zu wenige Bilder überliefert. Die Neuronalen Netze können den Stil dieses Malers deshalb nicht erlernen.

Als Fazit bleibt jedoch, dass die Abschreibung des Gemäldes durch das RRP von einem Original zum Werkstattbild sicherlich gerechtfertigt – und angesichts des schon lange vorherrschenden Zweifels unter Kunsthistorikern wohl auch überfällig war.

Umstritten ist auch das in Abbildung 18a dargestellte Gemälde *Girl with a Broom* (zwischen 1646 und 1651). Nachdem Horst Gerson 1969 Zweifel an der Authentizität des Werkes als Rembrandt-Original (als das es bis dato galt) anmeldete,<sup>17</sup> häuften sich die Vorschläge von Kunsthistorikern bezüglich der Urheberschaft. Werner Sumowski vermutete Samuel van Hoogstraten als Schöpfer,<sup>18</sup> Görel Cavalli-Björkmann sah Carel Fabritius und die Werkstatt Rembrandts als Urheber,<sup>19</sup> Arthur K. Wheelock stimmte mit Sumowski darin überein, dass das Gemälde von einem Schüler Rembrandts gemalt wurde, allerdings vermutete er, dass es höchstwahrscheinlich von Carel Fabritius stammt.<sup>20</sup>

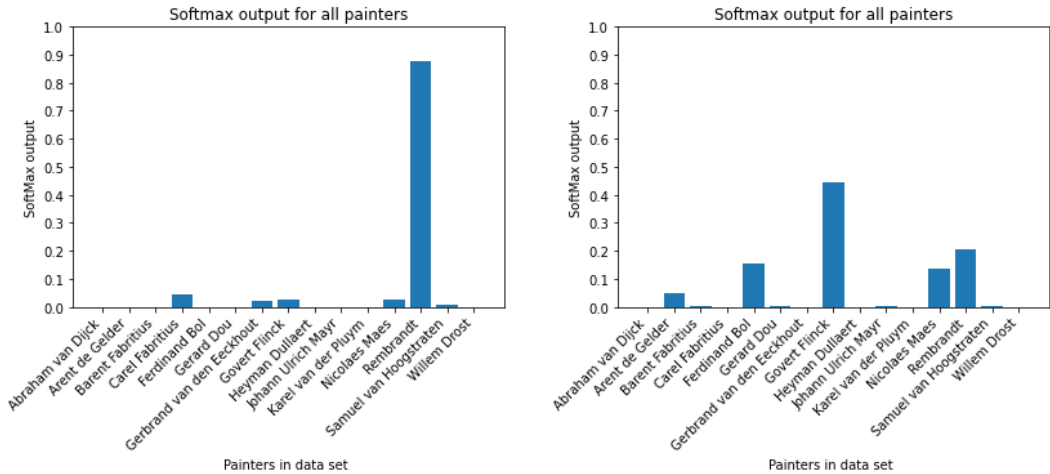
Das Ensemble aus CNNs erkennt in dem Werk zwar vor allem den Stil von Rembrandt (Abb. 18b), allerdings ist der SoftMax Output mit 0,438 zum einen gering – vor allem aber ist die SoftMax-Differenz-Regel verletzt. Der Abstand zu Arent de Gelder (0,224) beträgt 0,214, der zu Gerard Dou (0,148) immer noch 0,29. Auch bezüglich des SoftMax Outputs von Nicolaes Maes (0,058) und Gerbrand van den Eeckhout (0,051) ist die Differenz-Regel, wenn auch knapp, verletzt. Aus diesem Grund erscheint die Abschreibung gerechtfertigt, auch wenn die Situation nicht ganz so klar ist, wie bei dem Gemälde *The Slaughtered Ox*. Allerdings ist der SoftMax Output über alle Künstler hinweg zu diffus, um eine Aussage bezüglich des Schülers zu machen, der das Bild gemalt hat.



19a/b Unzweifelhaftes Rembrandt-Original *Portrait of a Man, Seated* sowie das von einigen Autoren bezweifelte Pendant *Portrait of a Woman, Seated*, beide Kunsthistorisches Museum Wien

Interessant sind auch die als komplementäre Pendants angelegten Gemälde (19a/b). Beide Werke sind auf Walnussholz gemalt, einem eher ungewöhnlichen Untergrund. Die Körperhaltungen der beiden Figuren entsprechen sich spiegelbildlich. Bei dem Portrait des Mannes (Abb. 19a) gibt es unter Kunsthistorikern keinerlei Zweifel an der Authentizität als Rembrandt-Original und auch das Portrait der Frau (Abb. 19b) galt über Jahrhunderte als echter Rembrandt. 1986 jedoch bezweifelte Tümpel die Urheberschaft Rembrandt für das Portrait der Frau,<sup>21</sup> eine Meinung, die die Autoren des Werkverzeichnisses *A Corpus of Rembrandt Paintings* teilten.<sup>22</sup> Dort heißt es: „Obwohl es bereits im 18. Jahrhundert zusammen mit dem Gegenstück als Werk Rembrandts angesehen und in der modernen Literatur immer als solches akzeptiert wurde, kann dieses Frauenportrait aufgrund der unterschiedlichen Formgebung und Ausführung nicht als sein Werk angesehen werden. Es war sicherlich als Pendant zu ‚Portrait of a Man, Seated‘ gedacht, was an der Verwendung der gleichen, ungewöhnlichen Holzart - Nussbaum - und an den zueinander komplementären Posen der Dargestellten deutlich wird. Der Handhabung der Farbe nach zu urteilen, wurde das Werk vermutlich in Rembrandts Werkstatt von einem bereits anderswo ausgebildeten Gehilfen ausgeführt“.

Das Ensemble aus CNNs kann die Einschätzung von Tümpel und den Autoren von *A Corpus of Rembrandt Paintings* nur unterstreichen. Der SoftMax Output für das Frauenportrait ist eindeutig (Abb. 20b). Das Gemälde wird noch nicht einmal als Original von Rembrandt erkannt, stattdessen weist Govaert Flinck den höchsten SoftMax Output auf. Im Gegensatz dazu wird das Portrait des Mannes eindeutig als Rembrandt-Original erkannt (Abb. 20a). Allerdings ist der SoftMax Output hier nicht repräsentativ, das Werk befindet sich, anders als das Portrait der Frau, auf Grund der eindeutigen Zuschreibung zu Rembrandt im Trainingsdatensatz des Modells.



20a/b SoftMax Output für Rembrandts Original *Portrait of a Man, Seated* (20a) und für das bezweifelte Pendant *Portrait of a Woman, Seated* (20b)

Die Präsenz des Pendants im Trainingsdatensatz aber macht die Abschreibung des Portraits der Frau noch plausibler. Wenn ein Gemälde, das einem Testbild sehr ähnlich ist, im Trainingsdatensatz vorhanden ist, sollte das Testbild eigentlich besser erkannt werden. Bei einer zu großen Ähnlichkeit spricht man von ‚Data Leakage‘, also einem Datenleck, das den Algorithmus besser erscheinen lässt, als er tatsächlich ist. Dieser Effekt tritt hier aber gerade nicht auf. Obwohl die Neuronalen Netze den Stil des Portraits des Mannes unmittelbar gelernt haben, wird das Pendant nicht als Rembrandt-Original erkannt.

Der SoftMax Output für Govaert Flinck beträgt 0,445, der für Rembrandt lediglich 0,205. Damit ist die Differenz-Regel verletzt, eine Zuschreibung zu Flinck kann auf Grund der Modellergebnisse nicht gerechtfertigt, aber auch nicht abgelehnt werden. Das Modell macht dazu keine Aussage.

Allerdings ist der Abstand relativ groß, insbesondere da sich der höchste SoftMax-Wert auf einen Schüler bezieht, die generell von dem Modell schlechter erkannt werden. Das Modellergebnis könnte deshalb von Kunsthistorikern als Anreiz verstanden werden, das Portrait der Frau auf den Stil von Govaert Flinck zu überprüfen, insbesondere weil die historischen Eckdaten passen. Flinck arbeitete ab 1632 als Schüler in Rembrandts Werkstatt und war zudem zuvor bereits (seit 1629) bei Lambert Jacobsz in Leeuwarden ausgebildet worden.

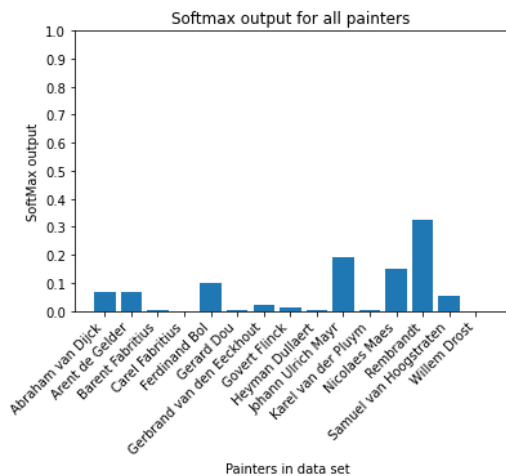
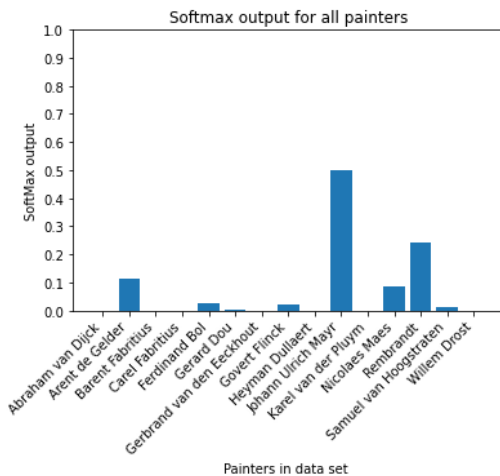
Auch die beiden Gemälde *Half Length Figure of an Old Man with Beret* (1654) und *Half Length Figure of an Old Woman* (1654) werden von den meisten Kunsthistorikern als komplementäre Portraits gesehen.<sup>23</sup> Leonhard J. Slatkes lehnte diese Betrachtung jedoch ab, er hielt die Werke nicht für Pendants.<sup>24</sup> Beide Portraits galten zudem bis 1986 als unumstrittene Originale von Rembrandt. Nachdem Tümpel die Authentizität bezweifelte,<sup>25</sup> folgten andere Kunsthistoriker. Die beiden Werke (Abb. 21a/b) werden vom Rembrandt Research Project dem Umfeld Rembrandts zugeschrieben. In die letzte Ausgabe des *Corpus of Rembrandt Paintings*<sup>26</sup> wurden sie nicht als Original des Meisters aufgenommen. Die Abschreibungen sind weitgehend akzeptiert. Das Pushkin Museum allerdings betrachtet die Werke nach wie vor als Originale von Rembrandt.



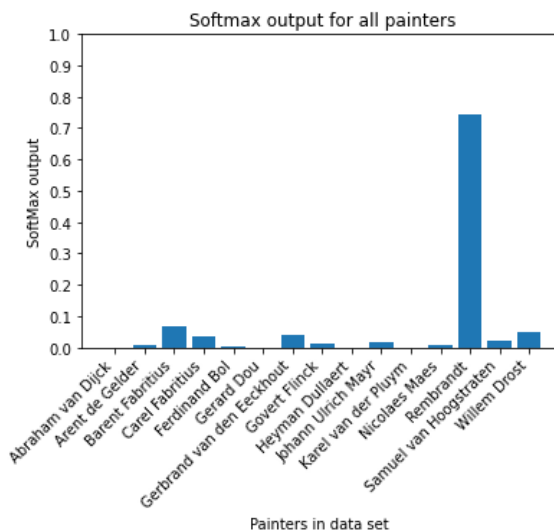
21a/b Mögliche Pendants *Half Figure of an Old Man with Beret* und *Half Figure of an Old Woman*, beide im Pushkin Museum in Moskau. Die Werke galten bis in die 1980er Jahre als Originale des Künstlers, heute werden sie dem Umfeld des Meisters zugeschrieben

Ob es sich bei den beiden Portraits um Pendants handelt, lässt sich mit der hier eingesetzten Architektur des Ensembles aus CNNs nicht feststellen. Die Authentizität als Rembrandt-Originale jedoch wird zurecht in Frage gestellt, wie aus Abbildung 22a/b ersichtlich ist.

Das Portrait des Mannes (Abb. 21a), das möglicherweise Rembrandts Bruder Adriaen darstellt, wird von dem Modell nicht als Rembrandt erkannt, sondern als ein Werk von Johann Ulrich Mayr, einem Augsburger Rembrandt Schüler. Der Abstand des SoftMax Outputs für Mayr (0,501) zu Rembrandt (0,240) beträgt 0,261 – nach der zugegebenermaßen strengen Differenz-Regel kann auf Grund



22a/b SoftMax Output für *Half Figure of an Old Man with Beret* (22a) und *Half Figure of an Old Woman*



23a/b Rembrandt-Original *Half Figure of a Woman with a White Wrap*, übereinstimmend als Darstellung von Hendrickje Stoffels identifiziert, samt zugehörigem SoftMax Output

dieses Ergebnisses keine Zuschreibung zu Mayr erfolgen. Die dennoch hohe Differenz könnte von Kunsthistorikern jedoch als Hinweis für eine mögliche Urheberschaft Mayrs dienen und weitere stilistische Untersuchungen rechtfertigen.

Das Portrait der Frau (Abb. 21b) dagegen wird zwar als Rembrandt erkannt, allerdings ist der SoftMax Output mit 0,326 zum einen sehr niedrig, zudem ist die Differenz zu mehreren Malern ausgesprochen gering, insbesondere auch zu Johann Ulrich Mayr, der mit einem Wert von 0,192 an zweiter Stelle rangiert. Eine Zuschreibung zu Rembrandt auf Grund dieses diffusen Ergebnisbildes wäre aus unserer Sicht verantwortungslos. Das Ergebnis kann aber sehr wohl als Bestätigung dafür gesehen werden, dass die beiden Werke vom RRP zu Recht abgeschrieben wurden.

Auch bei einem anderen Portrait Rembrandts divergieren die Meinungen der Kunsthistoriker und des Museums, das es besitzt. Es handelt sich um das in Abbildung 23a dargestellte Gemälde *Half Figure of a Woman with a White Wrap* (1654–1656). Rembrandt hat die Figur auf dem Bild nicht benannt, sie wird jedoch übereinstimmend als Hendrickje Stoffels identifiziert, Rembrandts Hausangestellte und spätere Geliebte, mit der er 1654 eine Tochter zeugte. In der Beschreibung der National Gallery in London heißt es, die Dargestellte: „hat eine fast königliche Haltung. Sie blickt aus geringer Höhe auf uns herab, ihre rechte Hand ruht auf einer Armlehne, die wie ein Zepter wirkt. Sie trägt teure Perlenohrringe, Schmuck und etwas, das wie ein Pelzmantel aussieht. All dies mag auf die Insignien des Königshauses hindeuten, doch ist dies auch ein intimes – sogar erotisch aufgeladenes – Porträt. Ihr Kleid scheint offen zu sein und der Mantel fällt leicht offen, wodurch viel mehr von ihrer Brust preisgegeben wird, als in einem formellen Porträt der Zeit akzeptabel gewesen wäre.“<sup>27</sup>

Menschliche Intelligenz oder Intuition würde vielleicht in Frage stellen, dass ein damals schon berühmter Maler seine Geliebte so von einem Schüler malen ließ. Das Bild galt jedenfalls stets als Original Rembrandts, bis es Tümpel 1986 einem unbekanntem Maler aus dem Umkreis des Meisters zuschrieb.<sup>28</sup> Allerdings folgten die meisten Kunsthistoriker dieser Einschätzung nicht und beharrten auf



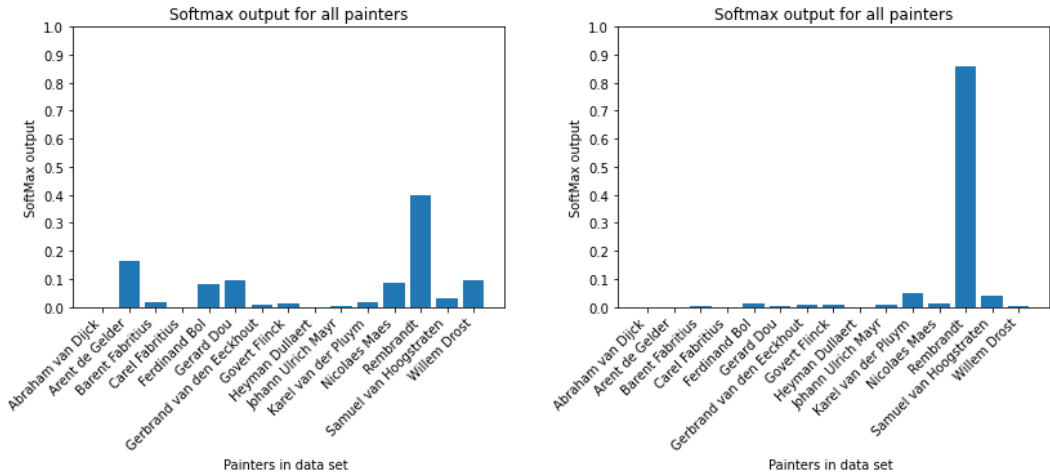
24a/b Abgeschriebenes Rembrandt-Gemälde *Pallas Athene*, Lissabon, Museo Calouste Gulbenkian (24a) und kürzlich laut Zeitungsberichten als Rembrandt-Original anerkanntes Werk *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene* aus einer europäischen Privatsammlung (24b)

einer Zuschreibung zu Rembrandt, oder zumindest zu dessen Werkstatt.<sup>29</sup> Ein Test mit dem Ensemble aus CNNs bestätigt die Zuschreibung zu Rembrandt (vgl. Abb. 23b). Das Werk wird mit einem Soft-Max Output von 0,742 eindeutig als Rembrandt identifiziert, die Werte für alle weiteren Künstler betragen weniger als 0,1. Als Fazit lässt sich sagen, dass die National Gallery das Bild auf ihrer Webseite bis heute völlig zu Recht als Original Rembrandts einstuft.<sup>30</sup>

Ein weiteres Bildnis der Hendrickje Stoffels hat jüngst für Furore gesorgt (Abb. 24b). Es handelt sich um die Darstellung von Rembrandts späterer Lebensgefährtin als Pallas Athene, das jüngst in verschiedenen Ausstellungen, unter anderem in Aalen und Augsburg sowie im Museo Nacional De Arte Munal in Mexico City,<sup>31</sup> gezeigt wurde. Laut der Wochenzeitung *Kontext* tauchte das Werk 1678 im Nachlass von Herman Becker auf, einem Rembrandt Bewunderer.<sup>32</sup> Der Kunsthistoriker Werner Sumowski entdeckte das Gemälde in den späten 1950er Jahren in schlechtem Zustand im Kunsthandel und ließ es restaurieren. 1962 veröffentlichte er in *Pantheon* einen Artikel über das Werk, in dem er eine Darstellung der Pallas Athene, gemalt von Rembrandt, vermutete.<sup>33</sup>

Allerdings war zum einen die Restaurierung missglückt, laut *Dietrich Heißenbüttel*<sup>34</sup> wurde das Gesicht so übermalt, dass das Werk wie ein Gemälde aus dem 19. Jahrhundert aussah, zum anderen war in Sumowskis Artikel nur eine kleine schwarz-weiße Aufnahme der mythologischen Darstellung zu sehen. Von anderen Kunsthistorikern wurde Sumowskis Zuschreibung nicht anerkannt. Bei einer erneuten Restaurierung wurden die Übermalungen aus den 1950er Jahren entfernt. Danach hat das Institut für Technologie der Malerei der Stuttgarter Kunstakademie das Gemälde untersucht und insbesondere Grundierung und Pigmentschichten analysiert. Prof. Dr. Christoph Krekel kam dabei zu dem Schluss: „Alle auf dem Gemälde gefundenen Pigmente und Füllstoffe waren zur angegebenen





25a/b SoftMax Output für *Pallas Athene*, Lissabon, Museo Calouste Gulbenkian (25a) und *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene*, europäische Privatsammlung

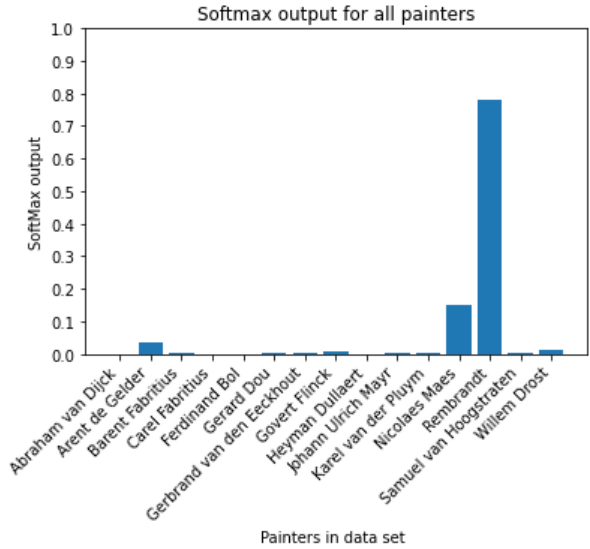
Entstehungszeit erhältlich. Als typisch für Rembrandt kann der Aufbau der Grundierung angesehen werden<sup>35</sup>.

In verschiedenen Zeitungsartikeln sowie Museumsveröffentlichungen wird das Werk deshalb als „kürzlich Rembrandt zugeschrieben“ oder „kürzlich als Original anerkannt“ bezeichnet,<sup>36</sup> was jedoch eine Überinterpretation des Gutachtens darstellt. Krekel betonte auf Anfrage, dass er keine stilistische Untersuchung des Gemäldes vorgenommen hat.<sup>37</sup>

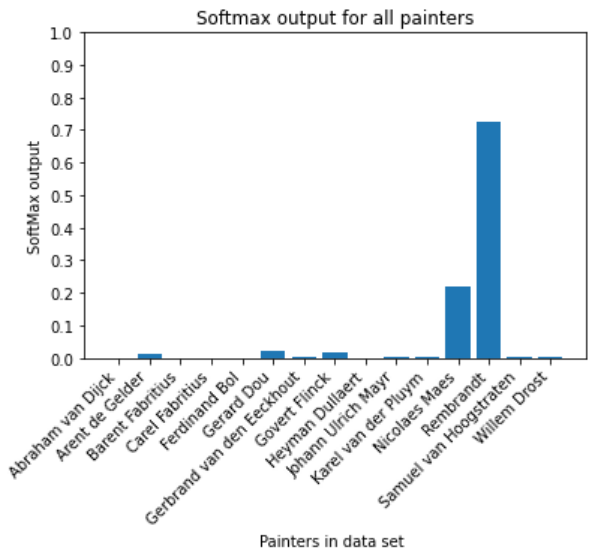
Das Bild ist im Online-Archiv des RKD nicht verfügbar, wohl aber eine andere Darstellung der *Pallas Athene*, die vom Rembrandt Research Project abgeschrieben wurde (Abb. 24a). Das Gemälde in Lissabon galt lange Zeit als Rembrandt-Original, wobei die Figur auch als Minerva, Mars, Alexander der Große oder schlichtweg als Krieger interpretiert wurde. Christopher Brown schrieb es 1991 einem anonymen Schüler aus Rembrandts Werkstatt zu.<sup>38</sup> Jeroen Giltaij folgte 1999 mit Zweifeln an der Authentizität<sup>39</sup> und van de Wetering klassifizierte das Werk 2006 als von Rembrandt mithilfe eines Mitarbeiters seiner Werkstatt gemalt.<sup>40</sup> Diese Sichtweise ist im Einklang mit der Einschätzung des RRP und heute vorherrschend.<sup>41</sup> Sie wird auch von dem Ensemble aus CNNs gedeckt. Der SoftMax Output des Werkes (Abb. 25a) in Lissabon beträgt für Rembrandt 0,400 – er ist damit zwar der höchste unter allen Künstlern in dem Datensatz, aber eben nicht eindeutig, da die Differenz-Regel verletzt ist. Insbesondere der Stil von Arent de Gelder ist mit einem SoftMax Output von 0,164 auch prominent vertreten.

Ganz anders sieht die Situation bei der Darstellung *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene* aus (Abb. 25b). Dieses Gemälde wird mit einem SoftMax Output von 0,859 eindeutig als Original von Rembrandt klassifiziert. Die entsprechenden Werte für die übrigen Künstler liegen allesamt unter 0,05.

Als Fazit lässt sich sagen: Der SoftMax Output für das Bild aus Lissabon lässt zwar auf Grund der Differenz-Regel keine eindeutige Aussage zu, deckt sich aber mit der Einschätzung van de Weterings und des RRP, dass Rembrandt das Bild zusammen mit einem Schüler gemalt hat. Die Abschreibung als Original des Meisters ist gerechtfertigt, wie insbesondere auch die Zuschreibung der Darstellung *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene*.

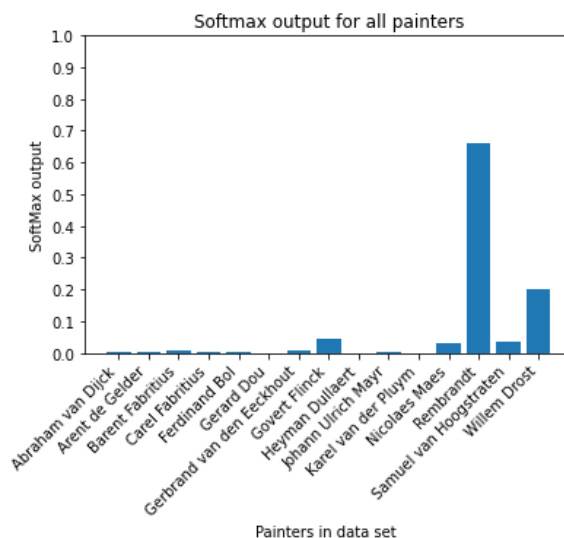


26a/b Abgeschriebenes Rembrandt-Gemälde *The Man with the Golden Helmet*, Gemäldegalerie Berlin, samt zugehörigem SoftMax Output



27a/b Abgeschriebenes Rembrandt-Gemälde *The Man with the Golden Helmet*, hier die hochauflöste Variante von der Webseite der Staatlichen Gemäldegalerie Berlin, samt zugehörigem SoftMax Output

Vom Rembrandt Research Project beschrieben wurde auch ein von Farbgebung und Motiv dem Lissaboner Werk sehr ähnliches Gemälde, das stets als Original des Künstlers galt (Abb. 26a). Es handelt sich dabei um *The Man with the Golden Helmet* (ca. 1650 bis 1660). Als erster zweifelte Benjamin A. Rifkin die Authentizität im Jahre 1969 an.<sup>42</sup> In den Jahren darauf folgten Keith Roberts,<sup>43</sup> Christopher Brown<sup>44</sup> und Claus Grimm<sup>45</sup> bis die Staatliche Gemäldegalerie die Abschreibungen akzeptierte.<sup>46</sup>



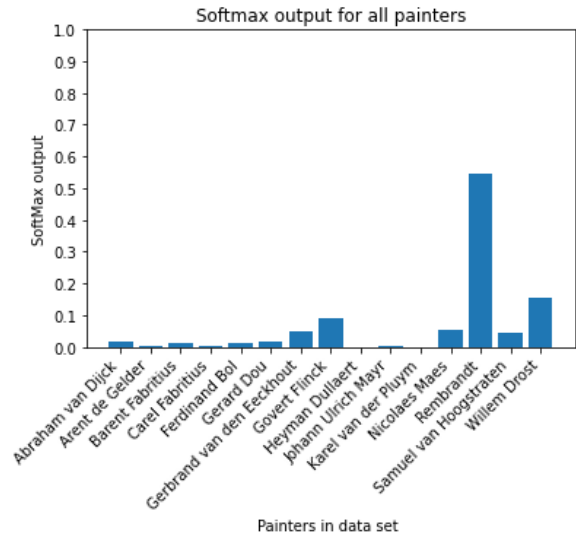
28a/b Abgeschriebenes Rembrandt-Gemälde *Old Woman Cutting her Nails*, New York, Metropolitan Museum, samt zugehörigem SoftMax Output

Hennig Bock, seinerzeit Direktor der Gemäldegalerie, schrieb darin zusammenfassend: „Das Ergebnis aller Bemühungen ist zwar eine wohl endgültige Bestätigung, dass der ‚Mann mit dem Goldhelm‘ nicht von Rembrandt selbst gemalt sein kann“, der künstlerische Wert des Werkes aber bleibe ungeschmälert. Das RRP schrieb das Gemälde schließlich dem Umfeld Rembrandts zu.<sup>47</sup> In diesem Fall jedoch scheint die Abschreibung nicht gerechtfertigt zu sein. Das Modell (Abb. 26b) erkennt den Stil von Rembrandt mit einem SoftMax Output von 0,780, der Maler mit dem zweithöchsten Wert ist Nicolaes Maes (0,149). Das Ergebnis erfüllt das Differenz-Kriterium bei weitem.

Um sicher zu gehen, wurde das Bild noch einmal getestet, diesmal in einer von der Webseite der Gemäldegalerie Berlin heruntergeladenen, hochaufgelösten Variante (2982 × 4000 Pixel; Abb. 27a). Das Ergebnis wurde dabei bestätigt. Der SoftMax Output (Abb. 27b) beträgt zwar nur noch 0,723, doch das Differenz-Kriterium ist nach wie vor erfüllt. Der zweithöchste SoftMax-Wert tritt wieder bei Nicolaes Maes auf und beträgt 0,217.

Als Fazit lässt sich sagen, dass dieses Werk mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein Original von Rembrandt ist. Weitergehende stilistische und technische Untersuchungen von Kunsthistorikern und Wissenschaftlern sind in diesem Fall definitiv angebracht.

Eine ähnlich, wenn auch nicht ganz so deutliche Situation ergibt sich bei dem Bild *Old Woman Cutting her Nails* (1650er Jahre). Das Gemälde hat eine der turbulentesten Zu- und Abschreibungs-odysseen hinter sich, die sich in den 89 Literatur-Referenzen auf der Webseite des Metropolitan Museums widerspiegelt.<sup>48</sup> Das Werk galt lange Zeit als Rembrandt, bevor es in Frage gestellt wurde. Laut RKD kann die Provenienz bis 1764 zurückverfolgt werden. Dem Metropolitan Museum zu Folge galten, beziehungsweise gelten vor allem Abraham van Dijck und Nicolaes Maes als Kandidaten für die Urheberschaft, Sumowski<sup>49</sup> schrieb es Karel van der Pluym zu. Beim RKD wird es heute unter „Nachfolger von Rembrandt“ geführt, das Metropolitan Museum beschränkt sich auf die Bezeichnung „Im



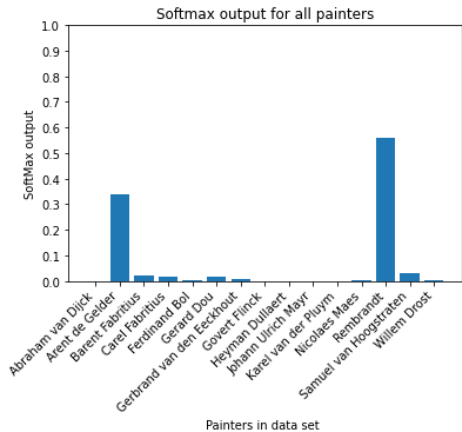
29a/b Abgeschriebenes Rembrandt-Gemälde *Old Woman Cutting her Nails*, New York, Metropolitan Museum, hier in der höher aufgelösten Variante samt zugehörigem SoftMax Output

Stil von Rembrandt“, was als elegante Umschreibung dafür gewertet werden kann, dass niemand wirklich weiß, wer der Schöpfer ist. Weiter heißt es auf der Webseite des Museums: „Das monumentale Werk ist sicherlich von Rembrandt inspiriert“. Oder ist es doch von Rembrandt gemalt?

Das Ensemble aus CNNs liefert dafür zumindest veritable Hinweise. Das Gemälde, samt zugehörigem SoftMax Output, ist in Abbildung 28a/b gezeigt. Der SoftMax Output für Rembrandt ist mit 0,660 nicht nur der höchste, auch das Differenz-Kriterium ist erfüllt. Der zweithöchste SoftMax-Wert, für Willem Drost, liegt bei 0,199 und die Differenz damit über dem Wert von 0,4. Allerdings wurde auch dieses Bild, um sicher zu gehen, in der höher aufgelösten Variante der Webseite des Metropolitan Museums (974 × 1200 Pixel) heruntergeladen und getestet (Abb. 29a). In dieser Version beträgt der SoftMax Output (Abb. 29b) für Rembrandt 0,547, der für Willem Drost 0,155. Das Differenz-Kriterium ist hier, wenn auch nur knapp, verletzt.

Obwohl das Modell, aufgrund des strengen Differenz-Kriteriums, bei der höher aufgelösten Variante des Gemäldes keine Festlegung trifft, sollten die beiden Ergebnisse zusammen betrachtet werden. Eine weitere stilistische Untersuchung des Gemäldes, zusammen mit naturwissenschaftlichen Analysen, ist hier sicherlich ebenfalls angebracht.

Wie schwierig die Klassifizierung von Gemälden als Originale von Rembrandt, Werke von Schülern oder auch als frühe Kopien eines Meisterwerkes sind, zeigt sich an vier Beispielen, bei denen sich das Rembrandt Research Project im Lauf der Zeit selbst korrigiert hat. Das erste der im folgenden betrachteten Werke ist die mythologische Darstellung *Jupiter and Mercury visiting Philemon and Baucis* (ca. 1658). Das Werk wurde laut Arthur K. Wheelock auf ein geripptes, horizontal gemasertes Stück Holz transferiert, wobei das ursprüngliche Trägermedium vermutlich auch Holz war. Es weist keine Grundierung auf, sie wurde vermutlich beim Übertragen des Gemäldes entfernt. Stattdessen sind das Holz und die Malschichten nun mit Mull voneinander getrennt.<sup>50</sup> Diese Information ist relevant, weil



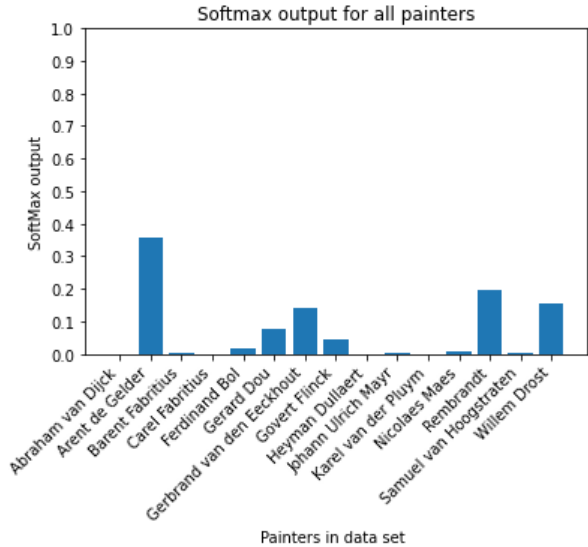
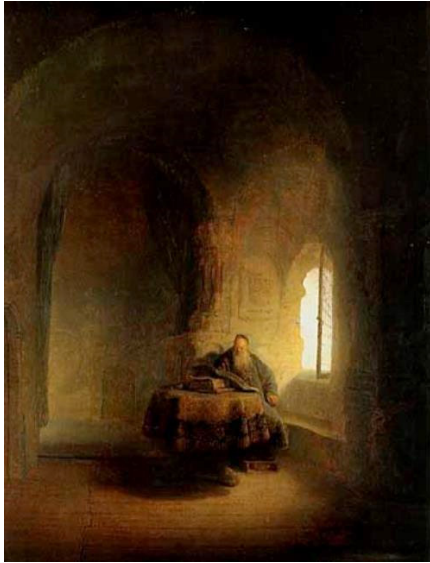
30a/b Umstrittenes Rembrandt-Gemälde *Jupiter and Mercury visiting Philemon and Baucis*, Washington, National Gallery, samt zugehörigem SoftMax Output

der Grundierungsaufbau von etwa 150 Rembrandt Werken im Rahmen des Rembrandt Research Projektes untersucht und dokumentiert wurde.<sup>51</sup> Die Grundierung kann deshalb in vielen Fällen wichtige Hinweise auf die Urheberschaft eines Werkes geben, insbesondere dann, wenn sie untypisch für Rembrandt und dessen Werkstatt ist. Aber eben nicht in diesem Fall.

Das Gemälde galt stets als Original Rembrandts, bis es 1986 von Tümpel angezweifelt wurde.<sup>52</sup> Van de Wetering hielt die Signatur für fragwürdig.<sup>53</sup> Das Rembrandt Research Project klassifizierte das Werk zunächst als „von Rembrandt oder einem seiner Schüler“<sup>54</sup> geschaffen, korrigierte diese Ansicht jedoch später und hält es seitdem für ein „Original von Rembrandt“<sup>55</sup>. Das Bild ist in Abbildung 30 dargestellt, zusammen mit dem SoftMax Output des Ensembles aus CNNs. Wie dort zu sehen ist, wird das Werk zwar mit einem SoftMax Output von 0,560 als Rembrandt identifiziert, allerdings ist der Abstand zu Arent de Gelder (0,339) mit 0,161 zu gering, um das Differenz-Kriterium zu erfüllen. Nach den hier angewandten strengen Regeln für eine Zuschreibung trifft das Modell keine Entscheidung.

Dennoch ist der starke Fokus bei der Erkennung der Malstile von Rembrandt und seinen letzten Schüler auffällig. Dies muss nicht unbedingt bedeutend sein, könnte aber weitere stilistische Untersuchungen rechtfertigen. Falls de Gelder einige Passagen des Bildes ausgeführt hat, würde dies implizieren, dass die Datierung des Gemäldes auf „ca. 1658“ nicht ganz korrekt ist, da de Gelder erst ab 1661 für Rembrandt arbeitete.

Ein weiteres Gemälde, bei dem sich das Rembrandt Research Project unschlüssig war und sich selbst korrigierte, ist das das Werk *An old Scholar in a Vaulted Room* (1631). Erste Zweifel an der Authentizität als Rembrandt-Original gehen zurück auf das Jahr 1882. Alfred von Wurzbach bezeichnete das Werk damals als eine frühe Fälschung, die „ungefähr zwischen 1631 und 1650 entstanden sein“ muss. Er argumentiert zum einen stilistisch, findet das Gemälde „in einem lichten, charakterlosem und langweiligen Tone gehalten“, der stark mit „dem tiefen, geheimnisvollen Helldunkel kontrastiert, in welchem die ‚Darstellung im Tempel‘, im Haag (gemeint ist das Königliche Gemäldekabinett in Den Haag) und die beiden (in Wurzbachs Originaltext) vorerwähnten Philosophen im Louvre ge-



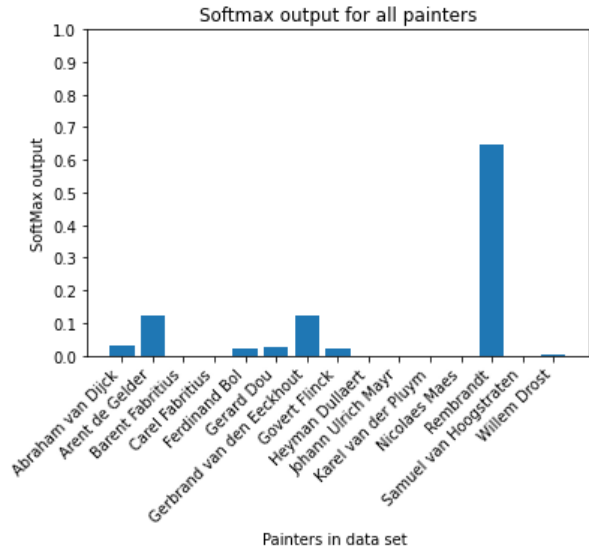
31a/b Umstrittenes Rembrandt-Gemälde *An old Scholar in a Vaulted Room*, Stockholm, Nationalmuseum, samt zugehörigem SoftMax Output

malt sind“. Sein Hauptargument aber ist technischer Natur. Rembrandt hätte eine Figur aus dem dritten Zustand einer Radierung, in dem Wurzbach eine Person als identisch mit dem auf dem Gemälde dargestellten Gelehrten ausmacht, spiegelverkehrt und gleichzeitig exakt nachahmen müssen. Er hätte sich damit, so Wurzbach, „geistlos und sklavisch selbst kopiert“.<sup>56</sup>

Das Rembrandt Research Project klassifizierte das Werk 100 Jahre später als „alte Kopie“ eines verloren gegangenen Werkes von Rembrandt,<sup>57</sup> ohne einen Urheber zu nennen, schrieb es jedoch 2015 wieder zu,<sup>58</sup> seither gilt es als Rembrandt-Original. Ein wichtiges Indiz für die Abschreibung durch das RRP im Jahr 1982 war die Signatur. Das Gemälde ist in dem Brief oder der Tafel links neben dem Fenster mit „Rembrandt fc. 1631“ unterschrieben. Allerdings hat Rembrandt erst ab 1632 mit seinem Vornamen signiert, was auch Wurzbach erwähnt.<sup>59</sup> 1631 nutzte er noch das Monogramm „RHL“ Es gibt jedoch eine Ausnahme, nämlich das Gemälde *Self Portrait in Oriental Costume with Poodle* im Musée du Petit Palais, Paris, das zwischen 1631 und 1633 entstanden ist. Das RRP kam zu dem Schluss, dass Rembrandt das Bild vordatierte – und sie übernahmen diese Sichtweise (später) auch für das hier betrachtete Werk, das mit dem zugehörigen SoftMax Output in Abbildung 31a/b dargestellt ist.

Weder wird das Bild als Rembrandt erkannt, noch kann es entsprechend dem Differenz-Kriterium einem Schüler aus dem Datensatz zugeordnet werden. Etwaige Spekulationen bezüglich des vergleichsweise hohen SoftMax-Wertes für Arent de Gelder verbieten sich aus unserer Sicht, jedenfalls wenn die Datierung des Werkes auf das Jahr 1631 korrekt ist. De Gelder wurde erst 1645 geboren. Das Holz, auf dem das Werk gemalt ist, stammt laut einer dendrochronologischen Untersuchung durch das Nationalmuseum Stockholm aus dem Jahr 1624, wurde aber vermutlich erst nach 1630 bemalt.<sup>60</sup>

Der Wert muss deshalb als Artefakt interpretiert werden, weil der tatsächliche Schöpfer des Werkes mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht im Datensatz vorhanden ist. Görel Cavalli-Björkman, damals Leiterin der Forschungsabteilung des Nationalmuseums Stockholm, stufte das Werk 2005 als von einem „Nachfolger Rembrandts“ stammend ein.<sup>61</sup> Heute führt das Museum dieses Werk als Original.<sup>62</sup> Und möglicherweise ja zu Recht.

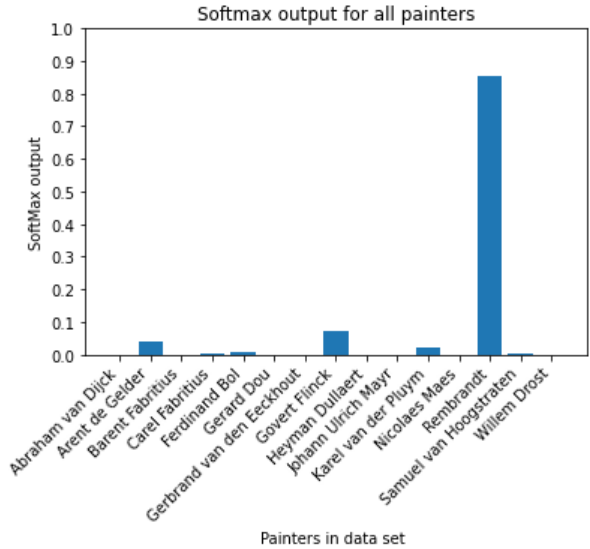


32a/b Umstrittenes Rembrandt-Gemälde *An old Scholar in a Vaulted Room*, Stockholm, Nationalmuseum, hier in der höher aufgelösten Variante samt zugehörigem SoftMax Output

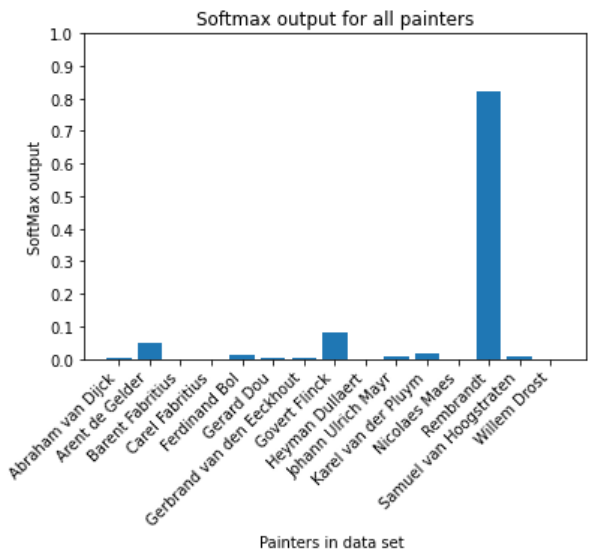
Wir haben das Bild, wie jedes andere mit einem vom Urteil des RRP abweichenden Ergebnis, in einer höheren Auflösung getestet. Dazu haben wir in aller Regel und auch in diesem Fall die Variante des jeweiligen Museums heruntergeladen. Allerdings weicht in diesem Fall die Farbgebung des online verfügbaren Bildes aus dem Nationalmuseum Stockholm (700 × 1000 Pixel) extrem von der beim RKD hinterlegten Variante ab. Das Bild ist in Abbildung 32a/b zusammen mit dem zugehörigen SoftMax Output gezeigt. In dieser eher grünlich anmutenden Abbildung mit schwächeren Kontrasten wird das Gemälde mit einem SoftMax Output von 0,648 als Rembrandt erkannt. Zudem ist das Differenz-Kriterium erfüllt, der Abstand zu Gerbrand van den Eeckhout, dem Maler mit dem zweithöchsten Wert, beträgt 0,524. Wir zeigen dieses Beispiel explizit, um auf die Unsicherheiten, ja möglicherweise Unzulänglichkeiten einer Analyse mit CNNs hinzuweisen. Im Abschnitt *Weiterführende Analysen* werden wir Möglichkeiten aufzeigen, mit derartigen Unsicherheiten umzugehen.

Als Fazit bleibt, dass sich das Modell hier selbst widerspricht, wie allerdings auch die Mitglieder des Rembrandt Research Projects und andere Kunsthistoriker. Das Ergebnis ist ohne weitere Analysen nicht zu verwerten, insbesondere weil wir nicht wissen, welche der beiden online verfügbaren Varianten dem Original eher entspricht. Allerdings ist dies der einzige Fall, in dem sich die Modellergebnisse für zwei Varianten ein und desselben Werkes dramatisch unterscheiden.

Auch bei den nächsten beiden Bildern, die wir hier diskutieren, hat sich das Rembrandt Research Project selbst korrigiert. Es handelt sich zunächst um das Werk *Bust of a Man in Oriental Dress* (1635). Bis 1989 galt das Werk (Abb. 33a) als Original von Rembrandt. In der dritten Ausgabe des *Corpus of Rembrandt Paintings* stufte das RRP dieses Gemälde als Werkstattprodukt ein,<sup>63</sup> während es in der letzten Ausgabe erneut als Original Rembrandts geführt wird.<sup>64</sup> Dazwischen hielten es einige Mitglieder des RRP und Experten, insbesondere Norbert Middelkoop, entweder für ein Original oder für das Werk eines Schülers.<sup>65</sup> Werner Sumowski schrieb es Govaert Flinck zu,<sup>66</sup> konnte sich jedoch mit dieser



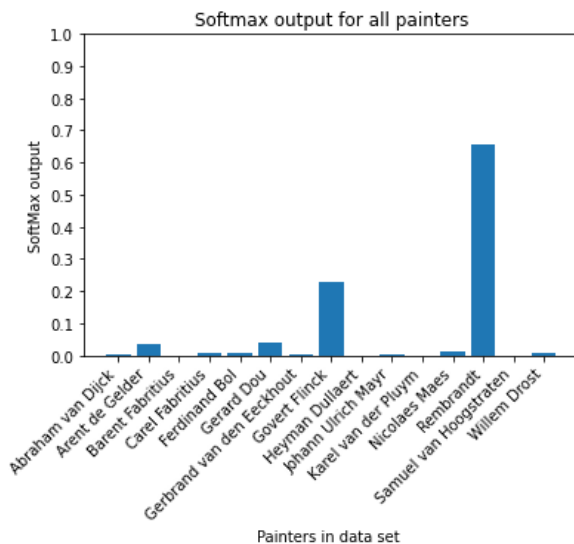
33a/b Gilt heute wieder als Original von Rembrandt. Das Gemälde *Bust of a Man in Oriental Dress*, Amsterdam, Rijksmuseum, samt zugehörigem SoftMax Output



34a/b Das Gemälde *Bust of a Man in Oriental Dress*, Amsterdam, Rijksmuseum, in der hochaufgelösten Variante samt zugehörigem SoftMax Output

Ansicht nicht durchsetzen. Das Gemälde wird mit einem SoftMax Output (Abb. 33b) von 0,85 eindeutig als Rembrandt erkannt, die Werte für alle anderen Maler im Datensatz liegen unter 0,05. Die hochaufgelöste Abbildung auf der Webseite des Rijksmuseum (4282 × 5690 Pixel) wurde ebenfalls getestet (Abb. 34a/b). In diesem Fall beträgt der SoftMax Output 0,820 und bis auf Govaert Flinck (0,080) liegen die Werte für alle Maler unter 0,05. Als Fazit bleibt in diesem Fall, dass das Modell die





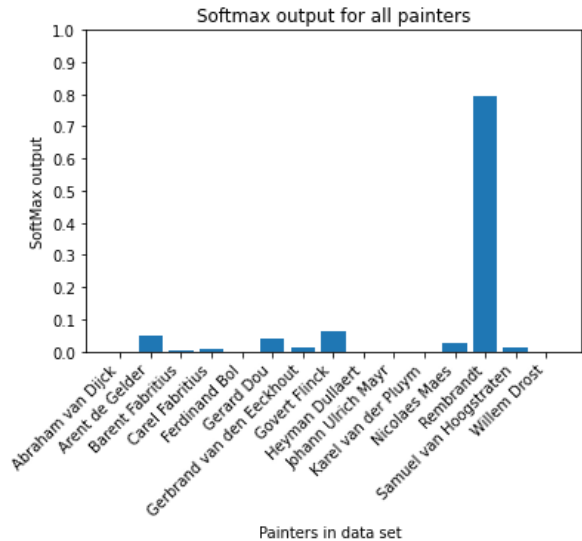
35a/b Das Gemälde *Self-Portrait in a Black Cap*, London, Wallace Collection, samt zugehörigem SoftMax Output

ursprüngliche Ablehnung des Gemäldes durch das Rembrandt Research Project als Original widerlegt, die spätere erneute Zuschreibung jedoch bestätigt.

Für die erneute Zuschreibung hat ein dendrochronologisches Gutachten eine wesentliche Rolle gespielt, in dem nachgewiesen wird, dass das Holz, auf dem die *Büste des Mannes im Orientalen Gewand* gemalt ist, von dem gleichen Baum stammt, wie das Holz das für drei weitere Gemälde des Meisters als Untergrund diente.<sup>67</sup> Zwei dieser Werke, nämlich *Landscape with a Thunderstorm* (1638–1640) im Herzog Anton Ulrich-Museum, Braunschweig, und *Self-Portrait with a Velvet Baret* (1634) in der Gemäldegalerie Berlin, sind als Originale nie angezweifelt worden. Sie befinden sich im Trainingsdatensatz des Modells.

Das dritte Bild jedoch, *Self-Portrait in a Black Cap* (ca. 1637), galt zwar stets als Original, wurde jedoch 1968 zunächst von Gerson angezweifelt.<sup>68</sup> Tümpel kategorisierte es 1986 als Werkstattbild,<sup>69</sup> eine Einschätzung, die das Rembrandt Research Project zunächst übernahm,<sup>70</sup> 2005 jedoch widerrief<sup>71</sup> und es seither als Original betrachtet. Das RKD listet dieses Werk nach wie vor als „attributed to Rembrandt or Studio of Rembrandt“ und auf Grund dieser uneindeutigen Zuschreibung befindet sich dieses Bild nicht im Datensatz und konnte getestet werden. Das Gemälde ist, zusammen mit dem zugehörigen SoftMax Output, in Abbildung 35a/b dargestellt. Es wird mit einem SoftMax Output von 0,658 eindeutig als Original von Rembrandt erkannt. Der zweithöchste SoftMax-Wert, für Govaert Flinck, beträgt 0,230, das Differenz Kriterium ist also erfüllt.

Dies gilt auch für die höher aufgelöste Variante von der Webseite (Abb. 36a) der Wallace Collection (1491 × 1960 Pixel). Der SoftMax Output (Abb. 36b) für Rembrandt ist hier mit 0,7936 sogar noch höher, der von Govaert Flinck, nach wie vor der Maler mit dem zweithöchsten Wert, dagegen niedriger (0,062). Auch hier kann das Modell die finale Zuschreibung durch das Rembrandt Research Project bestätigen.



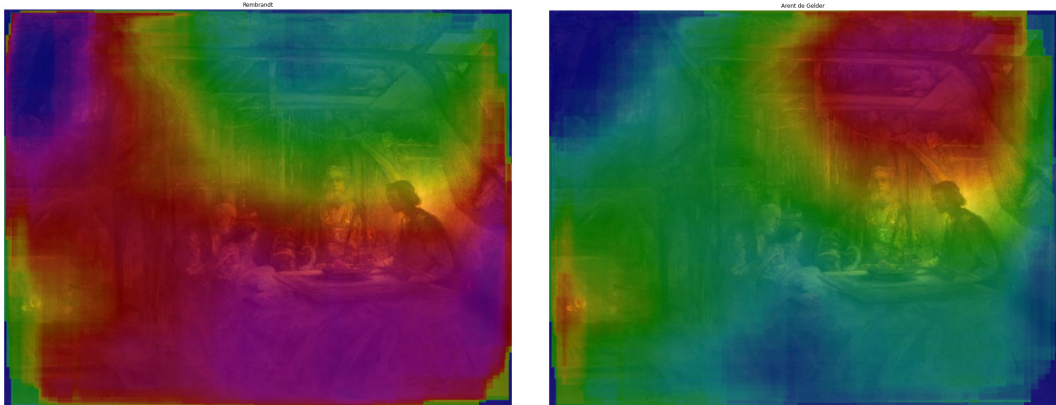
36a/b Das Gemälde *Self-Portrait in a Black Cap*, London, Wallace Collection, hier in der hochaufgelösten Variante samt zugehörigem SoftMax Output

## Weiterführende Analysen

Eine hilfreiche Methode zur Analyse von Gemälden sind sogenannte Class Activation Maps (CAMs). Sie zeigen auf, in welchen Partien des Werkes ein Neuronales Netz den Stil eines bestimmten Malers ausmacht.

Ein Beispiel für eine derartige Visualisierung ist in Abbildung 37 für das Gemälde *Jupiter and Mercury visiting Philemon and Baucis* der National Gallery in Washington zu sehen. Die Analyse des Gemäldes (vgl. Abb. 30b) hat mit dem Ensemble aus CNNs zwar kein Ergebnis gebracht, weil das SoftMax-Differenz-Kriterium verletzt war. Ohne die strenge Differenz-Regel wird das Werk jedoch als Rembrandt erkannt, wobei auch der Stil von Arent de Gelder prominent vertreten ist. Die Visualisierung mit CNNs zeigt nun, dass der Stil von Rembrandt vor allem in den zentralen Bildpartien vertreten ist, während der von de Gelder insbesondere rechts oben erkannt wird. Dies ist ein typisches Muster. Künstler aus allen Epochen haben stets mehr Zeit und Aufwand auf zentrale Bildpartien verwendet, die Ränder ihrer Werke sind oftmals nur rudimentär ausgeführt. Das Gleiche gilt für Werkstattmaler, die Hintergründe oder Randpartien oft Schülern überlassen haben. Wir werden das Urteil des Modells, das in diesem Fall zu keinem Ergebnis geführt hat, auf Grund dieser Visualisierung nicht revidieren. Es geht uns lediglich darum, zu zeigen, dass eine Analyse mit Class Activation Maps Kunsthistorikern weitere Hinweise geben kann, die möglicherweise bei der Beurteilung und Zuschreibung eines Werkes zu einem bestimmten Künstler hilfreich sein mögen. Eine Zuschreibung zu Rembrandt erscheint nun jedenfalls plausibler als ohne dieses Ergebnis.

Bezüglich der Mitwirkung von Arent de Gelder helfen auch die CAMs nicht wesentlich weiter, vor allem weil nicht alle Schüler Rembrandts in dem Datensatz vertreten sind. Allerdings liefert die CAM-Analyse möglicherweise auch hier Hinweise für Kunsthistoriker, welche Bildpartien sie möglicherweise stilistisch auf einen bestimmten (oder auch mehrere in Frage kommende) Künstler unter-

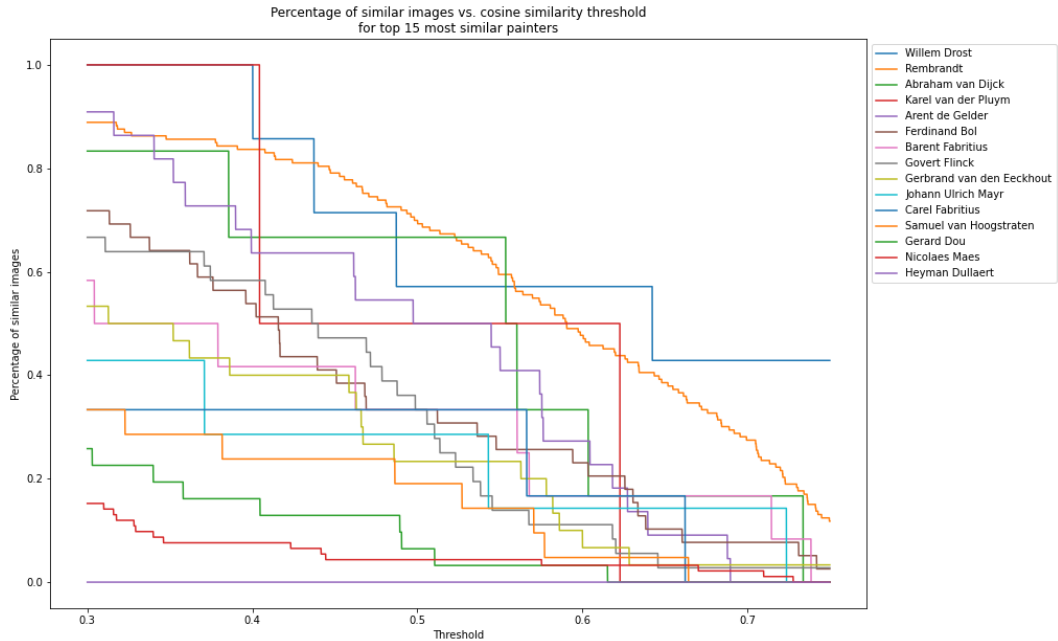


37a/b Das Gemälde *Jupiter and Mercury visiting Philemon and Baucis*, überlagert mit einem Class Activation Map für den Malstil von Rembrandt (37a) und Arent de Gelder (37b). Je mehr die Farben ins rötliche Gehen, desto stärker wird der betreffende Maler erkannt

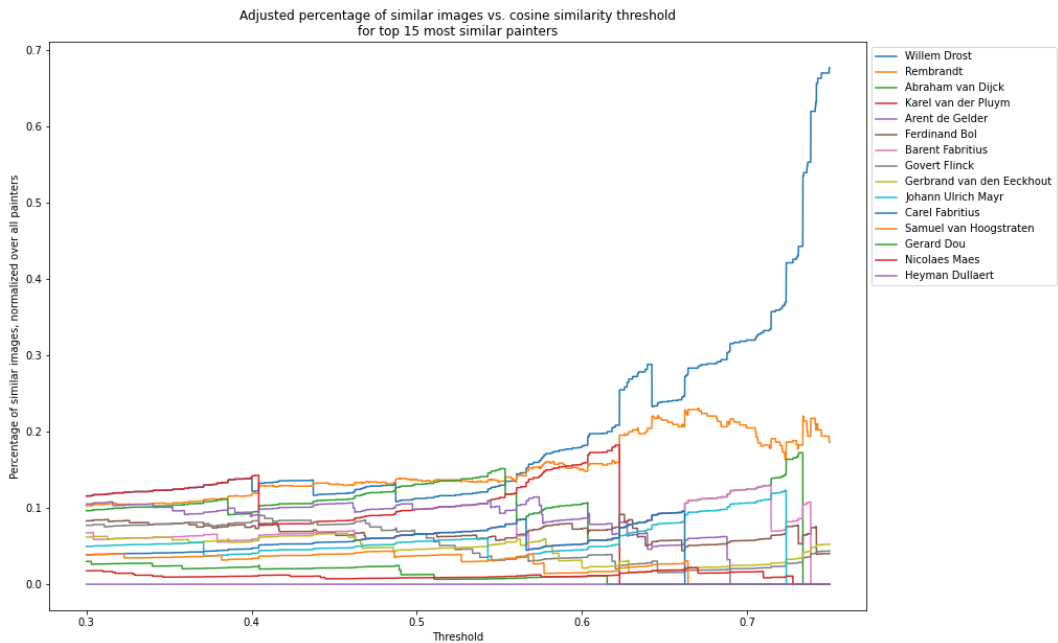
suchen sollten. Aus unserer Sicht können CAMs ein weiteres wertvolles Analyse Verfahren sein, das Kunstexperten bei ihrer Arbeit unterstützt.

Bei der Vorstellung und Evaluation des Ensembles aus CNNs haben wir auch gesehen, dass diese Modellarchitektur zwar sehr gut bei der Erkennung von Rembrandt (und auch Nicolaes Maes) ist – bei einigen anderen Schülern jedoch völlig oder zumindest weitgehend versagt. Dies hat in erster Linie mit der sehr geringen Anzahl gesicherter Werke dieser Künstler zu tun. Siamesische Netzwerke dagegen sind weitgehend robust gegenüber sogenannten Klassenunterschieden, also einer stark abweichenden Anzahl von Datenpunkten pro Klasse, hier also von Gemälden pro Maler. Sie werden häufig in der Gesichtserkennung, aber auch für die Verifikation von Unterschriften eingesetzt. Der wesentliche Unterschied zu klassischen CNNs ist, dass diese Netzwerke nicht den Stil der jeweiligen Maler im Datensatz lernen – sondern lediglich, ob sich zwei Bilder ähnlich sind oder nicht. Wir haben mit dem Datensatz aus unstrittigen Gemälden von Rembrandt und den 14 ausgewählten Schülern ein Siamesisches Netz trainiert. Der gewichtete Durchschnitt der Genauigkeit über alle Maler hinweg liegt bei 59 Prozent. Die Schwierigkeit in der Handhabung von Siamesischen Netzwerken ist die Evaluation der Ähnlichkeit. Hierzu wird normalerweise ein Schwellenwert kalibriert. Liegt das Maß für die Ähnlichkeit über dem Schwellenwert, werden die Bilder der jeweiligen Klasse zugeordnet, im Fall der Ähnlichkeit zweier Gesichter also der betreffenden Person und im vorliegenden Fall dem betreffenden Maler. Das Problem dabei ist, dass die Wahl des Schwellenwertes willkürlich sein kann und keineswegs eindeutig sein muss.

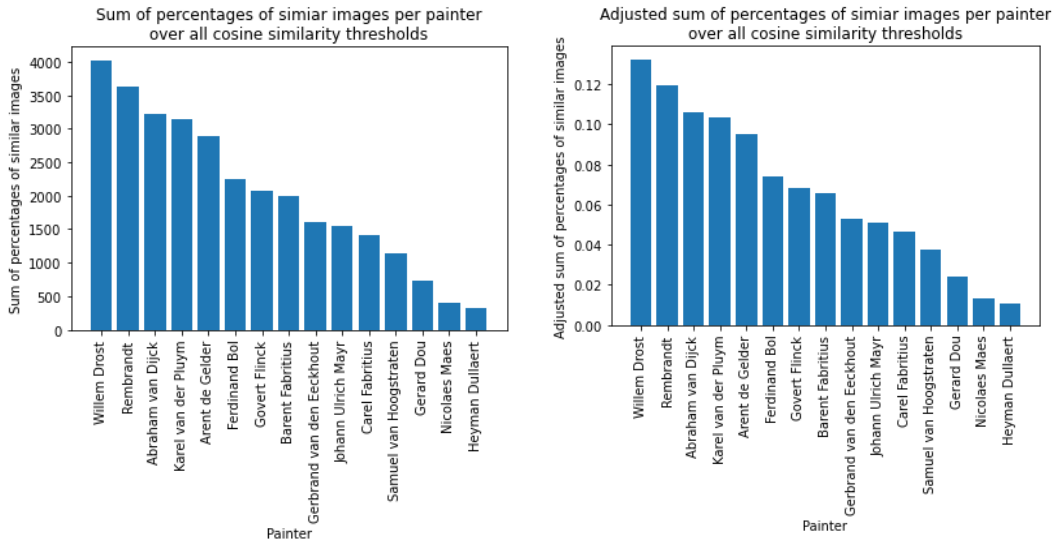
Wir haben uns deshalb für ein leicht abgewandeltes Vorgehen entschieden. Hierbei wird eine gesamte Reihe von Schwellenwerten im Abstand von jeweils 0,0001 betrachtet. Für jeden Schwellenwert wird dann die prozentuale Anzahl der Bilder ermittelt, die bei dem betreffenden Schwellenwert dem zu testenden Bild, hier *Girl with a Broom* (Abb. 18a), ähneln. Das Ergebnis ist in Abbildung 38 dargestellt. Dabei ist klar ersichtlich, dass die Zahl der ähnlichen Bilder sinkt, je höher der Schwellenwert ist. Aber auch die Ambiguität dieser Metrik wird deutlich. So werden beispielsweise für fast alle Schwellenwerte prozentual die meisten ähnlichen Bilder bei Willem Drost erkannt – für die Schwellenwerte in der (sehr kleinen) Spanne von 0,4003 bis 0,4043 jedoch bei Karel van der Pluym, in den



38 Prozentualer Anteil der dem zu testenden Bild *Girl with a Broom* ähnlichen Werke für verschiedene Maler und Schwellenwerte



39 Prozentualer Anteil der dem zu testenden Bild *Girl with a Broom* ähnlichen Werke für verschiedene Maler und Schwellenwerte. In dieser Grafik sind die prozentualen Werte über die verschiedenen Maler normiert



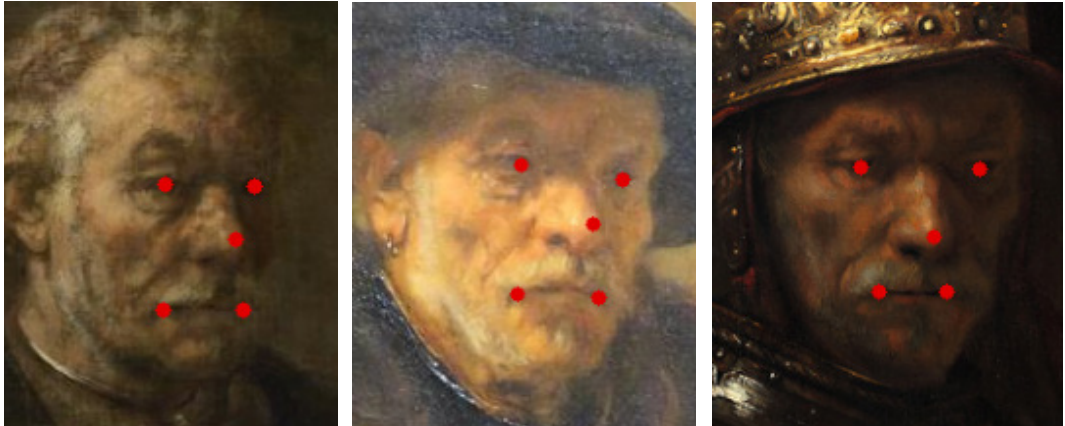
40a/b Summe der prozentualen Anteile der dem zu testenden Bild ähnlichen Werke für verschiedene Maler über alle Schwellenwerte, in absoluten Werten (40a), angepasst bzw. normiert auf den Wert 1 (40b)

Spannen von 0,4374 bis 0,5226 und 0,5534 und 0,5588 von Rembrandt und zwischen 0,5227 und 0,5533 bei Abraham van Dijk.

Noch offensichtlicher wird die Ähnlichkeit des Bildes zu Willem Drost, wenn die Prozentzahlen so normiert werden, dass sie in der Summe stets 1 ergeben (Abb. 39). Hier zeigt sich deutlich, dass der prozentuale Anteil, der dem Testbild ähnlichen Bilder von Willem Drost, relativ zu anderen Malern stärker ansteigt, je höher der Schwellenwert ist. Unseres Wissens gibt es keine Zuschreibung zu Willem Drost für dieses Werk. In Jonathan Bickers Standard Werkverzeichnis für diesen Rembrandt Schüler wird es nicht erwähnt,<sup>72</sup> auch nicht als zurückgewiesene Zuschreibung. Allerdings würden die Rahmendaten passen, Die angenommen Entstehungszeit des Gemäldes ist laut RKD zwischen 1646 und 1651, Drost arbeitete von 1648 bis 1654 als Schüler in Rembrandts Werkstatt.

Um die oft willkürliche Kalibration eines Schwellenwertes zu vermeiden, haben wir die prozentualen Ähnlichkeiten für alle Maler über alle Schwellenwerte gemittelt. Der entsprechende Wert für jeden Maler entspricht dem Integral unter der Linie des betreffenden Malers (Abb. 40a/b). Im rechten Teil der Grafik sind die Werte auf 1 normiert – und damit, obwohl anders berechnet, intuitiv dem SoftMax Output aus den vorhergehenden beiden Ansätzen vergleichbar. Es ermöglicht nun – ohne einen bestimmten Schwellenwert zu kalibrieren – die Zuordnung zu einem Maler über die Auswahl des maximalen Wertes.

Für das vorliegende Gemälde *Girl with a Broom* ist Willem Drost der ähnlichste Maler, dicht gefolgt von Rembrandt. Für das Siamesische Netz haben wir kein Differenz-Kriterium definiert und evaluiert, allerdings ist der Abstand der hier verwendeten Metrik zwischen Willem Drost und Rembrandt sowie den beiden nächstähnlichen Künstlern, also Abraham van Dijk und Karel van der Pluym, intuitiv zu gering, als dass wir auf der Basis dieses Ergebnisses eine Zuschreibung zu Drost vorschlagen würden. In jedem Fall aber könnte dieses Ergebnis als Hinweis für weitere stilistische Untersuchungen



41a–c Extrahierte Gesichter und identifizierte biometrische Punkte für *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair* (41a) aus dem Mauritshuis in Den Haag, *Half Length Figure of an Old Man with Beret* (41b) aus dem Pushkin Museum und *The Man with the Golden Helmet* (41c) aus der Gemäldegalerie Berlin. Das linke und das mittlere Bild stellen nach Ansicht vieler Experten Rembrandts Bruder Adriaen dar, Wilhelm Bode vermutete ihn auch als Modell für das rechte Bild

bezüglich einer Urheberschaft oder zumindest Mitwirkung der genannten Maler und insbesondere von Willem Drost aufgenommen werden.

Ein weiteres, oft hilfreiches Indiz bei der Zuschreibung von Gemälden ist die Identität der jeweils portraitierten Person. So hat Wilhelm Bode die Person in *The Man with the Golden Helmet* (Abb. 26a) als Rembrandts Bruder Adriaen identifiziert,<sup>73</sup> basierend auf dem Gemälde *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair* (1650) mit dem früheren Titel *Adriaen Harmensz. van Rijn, Brother of the Painter*. Die darauf dargestellte Person wird von den meisten Experten als Adriaen, also Rembrandts Bruder, identifiziert, einige hielten sie jedoch auch für Rembrandts Vater. Adriaen Harmensz. van Rijn wird auch in *Half Length Figure of an Old Man with Beret* (Abb. 21) im Pushkin Museum, mit dem früheren Titel *Portrait of an Old Man, Rembrandts Brother Adriaen* vermutet. Bodes Identifikation wurde jedoch wenige Jahre später abgelehnt. *The Man with the Golden Helmet* ist, wie auch das Gemälde im Pushkin Museum, 1654 entstanden, Rembrandts Bruder verstarb jedoch schon 1652.<sup>74</sup>

Wir haben den sogenannten Mtcnn-Gesichtserkennungsalgorithmus auf die fraglichen Gemälde angewendet (Abb. 41a–c) – sowie auf 369 weitere extrahierte Gesichter aus Rembrandt-Gemälden. Dieses Modell erkennt fünf biometrische Punkte in den Gesichtern: die beiden Pupillen, die Nasenspitze und die Mundwinkel. Allerdings ist dieser Algorithmus mit Fotografien von Menschen trainiert. Da die Ausdrücke und auch die Positionen von Gesichtern in Gemälden oft extremer sind und stärker variieren als auf Fotografien, wurden einzelne Punkte manuell korrigiert.

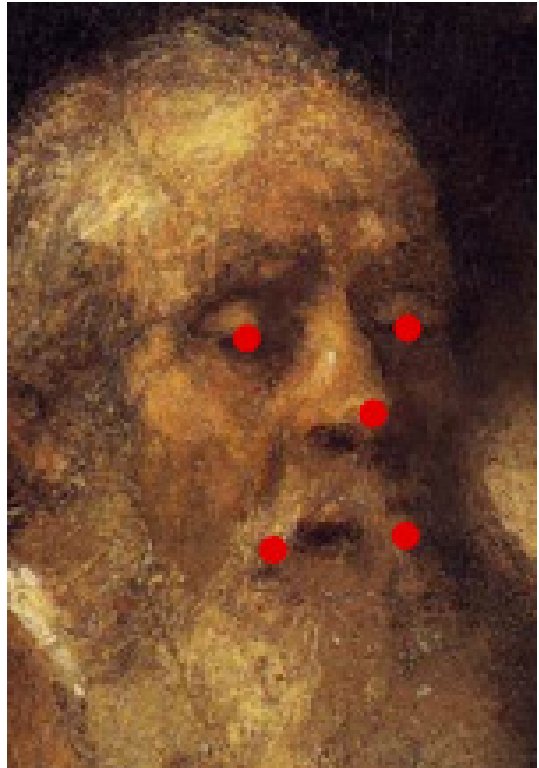
Die eigentliche Ähnlichkeitsbestimmung dagegen nutzt keinerlei Methoden des Maschinellen Lernens, sie wird auf der Basis der sogenannten Prokrustes-Distanz gemessen, einer Metrik also, mit der Formen unabhängig von ihrem Rotationswinkel und ihrer Größe verglichen werden. Je kleiner die Prokrustes-Distanz, desto ähnlicher sind sich die Formen. Die Prokrustes-Distanz für die Gesichtspunkte von *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair* aus dem Mauritshuis und *Half Length Figure of an Old Man with Beret* aus dem Pushkin Museum beträgt 0,00422964. Unter den 369 extrahierten Gesichtern gibt es nur eines, was eine geringere Prokrustes-Distanz zu den beiden Gesichtern aufweist (Abb. 42). Es ist das Gesicht des in Abbildung 12 gezeigten Mannes.

Dagegen beträgt die Prokrustes-Distanz zwischen dem Gesicht auf dem Portrait *The Man with a Golden Helmet* und dem von *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair* 0,03384419. Das bedeutet, dass 194 Gesichter in dem Datensatz dem Gesicht aus der Gemäldegalerie Berlin ähnlicher sind als das (vermutliche) Portrait von Rembrandts Bruder Adriaen aus dem Mauritshuis. Zu dem Gesicht aus dem Pushkin Museum beträgt die Prokrustes-Distanz 0,02707823. Damit sind dem Gesicht aus der Gemäldegalerie Berlin 160 Gesichter aus dem Datensatz ähnlicher als dieses.

Während der Arbeiten an dieser Studie sind wir auf ein weiteres Portrait einer Person gestoßen, dass auf den ersten Blick dem Gesicht aus der Gemäldegalerie Berlin ähnelt (Abb. 43a/b). Es handelt sich dabei um Ferdinand Bols *Portrait of a Man as Mars* (ca. 1657). Die Prokrustes-Distanzen zu den Bildern aus der Gemäldegalerie Berlin, dem Pushkin Museum und dem Mauritshuis betragen 0,03527768, 0,06847077 und 0,07925262. Damit sind 105 Bilder aus dem Datensatz dem Gesicht aus der Gemäldegalerie Berlin ähnlicher als das Gesicht aus Bols Gemälde. Für das Gesicht aus dem Pushkin Museum sind es 295 und für das Gesicht aus dem Mauritshuis 312.

Wir werden an dieser Stelle nicht in die exakten Evaluationsmetriken für Ähnlichkeitsvergleiche einsteigen – allerdings haben wir in verschiedenen Tests gezeigt, dass selbst modernere Künstler, die Personen und Gesichter stärker verfremden als die Maler des Barock, biometrische Merkmale intuitiv richtig wiedergeben. So werden von dem Algorithmus beispielsweise die beiden Portraits der Adele Bloch-Bauer von Gustav Klimt als identische Person erkannt. Dies gilt auch für die Person auf Raffaels Skizze der Mona Lisa, die er während der Wochen, in denen er in Leonardo da Vincis Werkstatt arbeitete, angefertigt hat und da Vincis Gemälde der Portraitierten im Louvre selbst – wie auch die Darstellung des Chirurgen Dr. Tulp von Rembrandt, der auch von Nicolaes Eliaszoon Pickenoy gemalt wurde. Selbst bei Picasso, dem vermutlich abstrahierendsten Maler was die originalgetreue Wiedergabe von Gesichtszügen angeht, werden immerhin drei der Darstellungen seiner letzten Muse, Sylvette David, als identische Person klassifiziert.<sup>75</sup>

Zusammenfassend lässt sich für die Analyse der Ähnlichkeiten der hier betrachteten Gesichter sagen: Die beiden Gemälde aus dem Pushkin Museum und dem Mauritshuis stellen mit hoher Wahrscheinlichkeit dieselbe Person dar. Ob es sich dabei um Rembrandts Bruder Adriaen handelt, vermögen wir auf Grund der nicht völlig sicheren Identifikation der Person aus dem Mauritshuis und der



42 Einziges den Gesichtern aus den Portraits *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair* aus dem Mauritshuis in Den Haag und *Half Length Figure of an Old Man with Beret* aus dem Pushkin Museum ähnlicheres Bild aus dem Datensatz von 369 extrahierten Gesichtern



43a/b Ferdinand Bols *Portrait of a Man as Mars*, Warschau, Museum Narodowe w Warszawie, (43a) und extrahiertes Gesicht mit biometrischen Punkten aus diesem Werk (43b)

bereits erwähnten Widersprüchlichkeit bezüglich des Entstehungsjahrs des Werks aus dem Pushkin Museum und Adriaens Todesjahr nicht zu beurteilen.

Wilhelm Bodes Vermutung dagegen, dass *The Man with the Golden Helmet* die gleiche Person darstellt, wie das Gemälde aus dem Mauritshuis, muss auf Grund dieser Ergebnisse klar zurückgewiesen werden. Auch die Person auf Ferdinand Bols Darstellung eines Mannes als Mars ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit weder identisch mit dem Modell aus der Gemäldegalerie Berlin noch mit den höchstwahrscheinlich identischen Personen auf den Gemälden im Pushkin Museum und im Mauritshuis.

### Weitere Analyse-Möglichkeiten

Wir haben hier einige Beispiele für weiterführende Analysen gegeben, die Möglichkeiten des Maschinellen Lernens und der Statistik sind damit aber noch lange nicht ausgeschöpft. So können beispielsweise sogenannte Multilayer Perceptrons für die Zu- oder Abschreibung von Gemälden eingesetzt werden.

Multilayer Perceptrons sind Neuronale Netze, die jedoch im Gegensatz zu den hier verwendeten Konvolutionalen Neuronalen Netzen (Convolutional Neural Networks, CNNs) nicht mit den Rohdaten aus Bildern arbeiten, also den einzelnen Pixeln – sondern mit extrahierten Features aus den Gemälden. Dazu gehören beispielsweise statistische Parameter der Farbverteilung, der Kontraste, der Luminanz (Helligkeit), und so weiter. Wir haben gezeigt, dass beispielsweise die Verteilung der Winkel der Farbgradienten sehr charakteristisch für die Stile einzelner Maler sind.<sup>76</sup>

Darüber hinaus können mit Fourier-Analysen die Farbfrequenzen und -spektren von Kunstwerken untersucht werden. Fourier-Transformierte Abbildungen von Gemälden können zudem als Inputbilder für diverse Algorithmen des Maschinellen Lernens verwendet werden.



Mithilfe von Clustering Algorithmen lassen sich Bilder auf wenige Farbtöne reduzieren, was wiederum mittels Graph- oder Netzwerk-Algorithmen eine quantitative Analyse der Flächigkeit oder auch Granularität eines Malstils erlaubt. So sind Bilder von Claude Monet deutlich feingranularer als beispielsweise Picasso-Gemälde.

Dies sind nur einige Beispiele aus einer Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Wichtig ist jedoch auch hier, dass sich die Wahl der Analyse-Methode oder des eingesetzten Verfahrens nach der jeweiligen Fragestellung der Kunsthistoriker richten muss. Die Methoden der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens sind sehr wirkungsvoll, allerdings wird es immer menschliche Intelligenz benötigen, um die richtigen Ansätze und Verfahren für eine bestimmte Problemstellung auszuwählen und die Ergebnisse korrekt zu interpretieren.

### **Künftige Arbeiten**

Wir haben in dieser Studie exemplarisch gezeigt, wie Verfahren der Künstlichen Intelligenz und des Maschinellen Lernens in der Kunstgeschichte eingesetzt werden können. Die Ergebnisse sind aus unserer Sicht vielversprechend und ein kompletter Review der Gemälde der Rembrandt Schule mit diesen Methoden und Ansätzen und der Expertise von Kunsthistorikern würde großen Sinn ergeben.

Die Datengrundlage des RKD ist dazu sicherlich geeignet, auch oder vor allem, weil sie es sehr leicht ermöglicht, umstrittene Bilder aus dem Datensatz zu entfernen beziehungsweise erst gar nicht aufzunehmen. Damit wird eine Verzerrung des Datenbasis in Bezug auf die Sichtweise einzelner Kunsthistoriker oder einer bestimmten Gruppe von Experten vermieden.

Allerdings sollten möglichst alle namentlich bekannten Schüler Rembrandts in dem Datensatz vorhanden sein, darüber hinaus wäre es sinnvoll und wünschenswert, mit höher aufgelösten Bildern zu arbeiten. Falls von verschiedenen Gemälden stark abweichende Varianten vorhanden sind, wie etwa im Beispiel des Gemäldes *An old Scholar in a Vaulted Room* aus dem Nationalmuseum Stockholm, sollten sämtliche dieser Varianten in den Datensatz aufgenommen werden – wobei strikt darauf zu achten ist, dass alle Varianten stets entweder im Trainings- oder im Testdatensatz verwendet werden. Andernfalls wäre es auf Grund des sogenannten Datenlecks sehr wahrscheinlich, dass die Modelle scheinbar bessere Resultate liefern, als es tatsächlich der Fall ist.

### **Zusammenfassung**

Wir haben, basierend auf dem online verfügbaren Datenbestand des RKD, ein Ensemble aus Konvolutionalen Neuronalen Netzen mit unstrittigen Werken von Rembrandt und 14 ausgewählten Schülern des holländischen Künstlers trainiert. Dieses Modell erkennt zwar einige der Schüler gar nicht, was an der geringen Zahl unstrittiger überlieferter Werke dieser Künstler liegt. Originale von Rembrandt werden dagegen sehr gut erkannt.

Zusätzlich haben wir für die Evaluation ein strenges SoftMax Differenz-Kriterium eingeführt. Es führt dazu, dass Werke nur dann als Originale von Rembrandt klassifiziert werden, wenn das Ergebnis eindeutig ist. Dazu muss der SoftMax Output für den vorhergesagten Maler um 0,4 oder mehr über dem des Künstlers mit dem zweihöchsten Wert liegen. Mit diesem zusätzlichen Kriterium erreicht das Modell im Schnitt und über alle Maler hinweg eine Präzision von 90,0 Prozent, für Rembrandt liegt sie bei 91,2 Prozent. In anderen Worten: Wenn ein Gemälde mit diesem zusätzlichen Kriterium als Rembrandt klassifiziert ist, dann ist es mit 91,2-prozentiger Wahrscheinlichkeit tatsächlich ein Original des Meisters.

Mit diesem Modell haben wir 15 Werke getestet, bei denen die Urheberschaft unter Kunsthistorikern und teilweise auch unter den Mitgliedern des Rembrandt Research Projects umstritten ist. In den allermeisten Fällen konnten wir das finale Urteil des Rembrandt Research Projects, seien es Zu- oder Abschreibungen, bestätigen.

Lediglich bei zwei Werken liefert das Modell sehr deutliche Hinweise, dass die jeweiligen Abschreibungen falsch sind. Dabei handelt es sich insbesondere um *The Man with the Golden Helmet* (Abb. 26a), das mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein Original von Rembrandt ist. Das Gleiche gilt, etwas weniger deutlich, für *Old Woman Cutting her Nails* (Abb. 28a). Beide Werke wurden, wie auch zahlreiche andere Gemälde, in unterschiedlichen Bild-Varianten und Auflösungen getestet.

Für das Werk *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene* aus einer europäischen Privatsammlung konnten wir sehr deutliche Anzeichen für die Authentizität nachweisen. Sie sind, neben einer naturwissenschaftlichen Untersuchung, als weiteres, klares Indiz zu werten und rechtfertigen ebenfalls ganz sicher zusätzliche stilistische Expertisen und Analysen von Kunsthistorikern, zumal dieses Werk unseres Wissens nicht vom Rembrandt Research Project untersucht wurde und im Online-Archiv des RKD nicht erwähnt ist.

In anderen Fällen sind die Modell-Ergebnisse, anders als bei den bereits erwähnten Werken aus der Gemäldegalerie Berlin, dem Metropolitan Museum in New York und der *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene* (Abb. 24b), zwar nicht eindeutig – aber doch deutlich genug, dass aus unserer Sicht ebenso weitere stilistische und/oder andere Verfahren zur Überprüfung der Ergebnisse angezeigt sind. Exemplarisch sei hier Govaert Flinck als möglicher Urheber des Gemäldes *Portrait of a Woman, Seated* (Abb. 19b) im Kunsthistorischen Museum Wien genannt.

Das vorgestellte Modell ist zusammen mit der Restriktion bezüglich der Eindeutigkeit einer Zuschreibung, für eine erste Analyse eines Gemäldes sehr hilfreich und aussagekräftig. Allerdings nehmen wir dabei in Kauf, dass dieses Ensemble aus CNNs in knapp einem Drittel der Fälle keine Aussage trifft, was wir als Ablehnung des vorhergesagten Malers beziehungsweise der jeweiligen Hypothese werten.

Analyseergebnisse, die keine eindeutigen Rückschlüsse erlauben, sind jedoch nichts Ungewöhnliches. Sie treten auch bei naturwissenschaftlichen Verfahren häufig auf. Falls beispielsweise eine chemische Analyse eines Gemäldes ergibt, dass die Pigmente zur angenommenen Entstehungszeit des Werkes handelsüblich und gebräuchlich waren, erlaubt dieses Ergebnis keinerlei Rückschlüsse auf den tatsächlichen Urheber oder die Echtheit des Gemäldes. Zwar ist es damit wahrscheinlicher, dass das untersuchte Werk aus der angenommenen Zeit stammt, aber selbst eine moderne Fälschung ist nicht ausgeschlossen. Möglicherweise hat ein geschickter Fälscher penibel darauf geachtet, nur Materialien zu verwenden, die ebenfalls aus der angenommenen Zeit stammen. Um dies auszuschließen, müsste in einer weitergehenden Analyse untersucht werden, ob der Alterungsprozess des Werkes künstlich beschleunigt wurde.

Ganz ähnlich ist es bei dem vorliegenden Verfahren. Wir haben gezeigt, dass das Modell in einer Vielzahl von Fällen, in denen es keine Entscheidung trifft, dennoch Hinweise liefert, auch bezüglich der Mitwirkung bestimmter Schüler. Sie könnten und sollten in einigen Fällen Anlass sein für weitere stilistische oder auch naturwissenschaftlichen Untersuchungen.

Zudem haben wir exemplarisch einige weiterführende Analysemöglichkeiten aufgezeigt. Auch hier liefern diese Verfahren nicht in allen Fällen eindeutige Ergebnisse, aber dennoch weitere Hin-

weise, die von Kunsthistorikern erwogen oder auch verworfen werden können. Exemplarisch sei hier Willem Drost als möglicher (Mit-)Schöpfer des Gemäldes *Girl with a Broom* (Abb. 18a) genannt.

Insgesamt haben wir gezeigt, dass Künstliche Intelligenz und Verfahren des Maschinellen Lernens sehr wirkungsmächtige Methoden sind, die Kunsthistoriker unterstützen können – solange sie mit Augenmaß und einer gesunden Portion Skepsis eingesetzt sowie korrekt interpretiert werden. Sie sind als zusätzliches Verfahren bei der Zu- und Abschreibung von Gemälden sowie in anderen kunsthistorisch relevanten Fragestellungen, wie etwa der Identifikation von Personen auf Gemälden, sehr wertvoll.

## Anmerkungen

- 1 Rudjer Josip Bošković, *Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium*, Wien 1758 [Rep. in Englisch 2011].
- 2 In dieser Formulierung gilt diese Aussage streng genommen nur für Algorithmen und Verfahren des sogenannten Überwachten Lernens, bei dem zu jedem Datenpunkt ein tatsächlicher Wert, der Fachausdruck dafür ist „Label“, vorliegt. Im vorliegenden Fall also zu jedem Gemälde ein zugeordneter Künstler.  
Tatsächlich basieren aber auch die Methoden und Verfahren des sogenannten Unüberwachten Lernens auf der Minimierung einer Kostenfunktion. Beim Unüberwachten Lernen sind die Daten nicht gelabelt. In der vorliegenden Anwendung wäre dies eine Ansammlung von Gemälden ohne die jeweils zugeordneten Künstler. Clustering-Algorithmen beispielsweise ordnen in zwei iterativen Schritten stets zunächst jeden Datenpunkt dem jeweils nächstgelegenen Cluster-Zentrum zu, anschließend wird das Cluster-Zentrum so verschoben, dass die Abstände aller Punkte innerhalb eines Clusters zum jeweiligen Zentrum minimiert werden.  
Konkret könnte das im vorliegenden Fall so aussehen: Aus der Ansammlung von Bildern werden für jedes einzelne Gemälde bestimmte Merkmale extrahiert, beispielsweise bezüglich der Farbverteilung und der Kontraste. Danach ist jedem Gemälde ein Vektor zugeordnet, der diese Merkmale enthält. Jetzt wird die Anzahl der Cluster festgelegt, also die Anzahl der Gruppen, in die die Bilder aufgeteilt werden sollen. Anschließend werden die Cluster Zentren zufällig initialisiert. Dabei handelt es sich um Vektoren, deren Dimension den Gemälde-Vektoren entspricht. Für jeden Gemälde-Vektor wird nun der Abstand zu allen Cluster-Zentren gemessen. Anschließend wird das Gemälde dem Cluster-Zentrum mit dem geringsten Abstand zugeordnet. Auch hier liegt also die Minimierung eines Abstandes vor. Wenn alle Gemälde-Vektoren korrekt zugeordnet sind, wird im zweiten Schritt das Zentrum innerhalb jedes Clusters so verschoben, dass der Abstand zu den Gemälden innerhalb des Clusters minimiert wird, was ebenfalls die Minimierung einer Abstands- oder Fehlerfunktion entspricht. Nach Dutzenden oder Hunderten von Iterationen finden sich in den jeweiligen Clustern ähnliche Bilder, sei es in Bezug auf Malstile, Genres, Techniken – oder andere Eigenschaften.
- 3 O.A., „Künstliche Intelligenz schlägt Hautärzte bei Krebsdiagnose“, in: *Ärzte-Zeitung*, 11.04.2019, online abrufbar unter: <https://www.aerztezeitung.de/Medizin/Kuenstliche-Intelligenz-schlaegt-Hautaerzte-bei-Krebsdiagnose-256254.html> (31.01.2023); Ming-De Li u.a., „Performance and comparison of artificial intelligence and human experts in the detection and classification of colonic polyps“, in: *BMC Gastroenterol* 22 (2022), online abrufbar unter: <https://doi.org/10.1186/s12876-022-02605-2> (31.01.2023).
- 4 Douglas Heaven, „Google’s medical AI was super accurate in a lab. Real Life was a different story“, in: *MIT Technology Review*, 27.4.2020, online abrufbar unter: <https://www.technologyreview.com/2020/04/27/1000658/google-medical-ai-accurate-lab-real-life-clinic-covid-diabetes-retina-disease/> (31.01.2023).

- 5 H. James Wilson und Paul R. Daugherty, „Collaborative Intelligence: Humans and AI are joining forces“, in: *Harvard Business Manager* July–August (2018), online abrufbar unter: <https://hbr.org/2018/07/collaborative-intelligence-humans-and-ai-are-joining-forces> (31.01.2013).
- 6 Wir werden im weiteren Text dieser Studie das „sogenannte“ vor der Bezeichnung „Künstliche Intelligenz“ weglassen. Der Leser mag es sich jedoch in jedem einzelnen Fall dazu denken.
- 7 Paul Wember, *Heinrich Campendonk. Krefeld 1889–1957 Amsterdam*, Krefeld 1960.
- 8 Andrea Firmenich, *Heinrich Campendonk 1889–1957. Leben und expressionistisches Werk*, Recklinghausen 1989.
- 9 Isabell Fechter, „Der Jawlensky-Skandal, Rückblicke“, in: *Weltkunst*, 15.03.1998, S. 560f.; „Das Auge des Richters war blind“, in: *Die Welt*, 04.02.1998, abrufbar unter: <https://www.welt.de/print-welt/article599017/Das-Auge-des-Richters-war-blind.html> (07.02.2023).
- 10 Vgl. Die Angaben in: *RKD – Netherlands Institute for Art History*, abrufbar unter: <https://rkd.nl/nl/explore/images/208260> (03.02.2023).
- 11 Leonard J. Slatkes, *Rembrandt. Catalogo Completo Die Dipinti*, Florenz, 1992, Nr. 304; Albert Blankert und Marleen Blokhuis, *Rembrandt. A Genius and his Impact*, Ausst.-Kat. National Galerie of Victoria Melbourne, Zwolle 1997, Nr. 18.
- 12 Daniel Czwanilla, „The Effect of Corrupt Labels on Computer Vision Performance“, abrufbar unter: <https://www.alexanderthamm.com/en/blog/the-effect-of-corrupt-labels-on-computer-vision-performance/> (31.01.2023); *Künstliche Intelligenz und Data Science in Theorie und Praxis*, hrsg. von Andreas Gillhuber, Göran Kauermann und Wolfgang Hauner, Berlin 2023 (im Erscheinen), Kapitel 3.5.
- 13 Abraham Bredius, *Rembrandt. Schilderijen*, Utrecht 1935, Nr. 600.
- 14 Kurt Bauch, *Rembrandt*, Berlin 1966, Nr. 95.
- 15 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 90.
- 16 Vgl. Kurt Bauch, *Rembrandt*, Berlin 1966, Nr. 561; Horst Gerson, *Rembrandt Paintings*, New York 1968, Nr. 290; Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. 125.
- 17 Abraham Bredius und Horst Gerson, *Rembrandt – The Complete Edition of the Paintings*, London 1969, Nr. 378.
- 18 Werner Sumowski, *Gemälde der Rembrandt Schüler*, Landau/Pfalz 1983–1994, Bd. 6 (erschienen 1994), S. 3714, Nr. 2298b.
- 19 Görel Cavalli-Björkman, „Rembrandt and his Pupils“, Papers given at a Symposium in Nationalmuseum Stockholm, 2.–3. Oktober 1992, Stockholm 1993.
- 20 Arthur K. Wheelock, *Dutch Paintings of the 17<sup>th</sup> Century: The Collection of the National Gallery of Art*, Samml.-Kat. National Gallery of Art Washington DC, New York u.a. 1995, S. 287–296.
- 21 Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. 233.
- 22 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a., 1982–, Bd. 2: *1631–1964* (erschienen 1986), Nr. C80.
- 23 Cornelius Hofstede de Groot, *Beschreibendes und kritisches Verzeichnis der Werke der hervorragendsten holländischen Maler des XVII. Jahrhunderts, nach dem Muster von John Smith's catalogue raisonné*, Esslingen am Neckar 1907–1928, Bd. 6 (erschienen 1915), Nr. 507; Kurt Bauch, *Rembrandt*, Berlin 1966, Nr. 275; Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. A61.
- 24 Leonard J. Slatkes, *Rembrandt. Catalogo Completo Die Dipinti*, Florenz, 1992, Nr. 206.
- 25 Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. A61.
- 26 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015).
- 27 Übersetzung des Autors der Beschreibung des Werkes auf der Website der National Gallery, London, „Portrait of Hendrickje Stoffels“, online abrufbar unter: <https://www.nationalgallery.org.uk/paintings/rembrandt-portrait-of-hendrickje-stoffels> (19.12.2022): „The sitter – whom Rembrandt did not name – has an almost regal poise. She looks down on us from a slight height, her right hand resting on what must be part of the arm of a chair, but which has the air of a sceptre. She wears expensive pearl earrings and jewellery and what seems to be a fur mantle. All these might hint at the trappings of royalty, yet this is also an intimate – even erotically charged – portrait. Her dress seems to be unfastened and the mantle falls slightly open, revealing much more of her breast than would have been acceptable in a formal portrait of the time.“
- 28 Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. A77.
- 29 Leonard J. Slatkes, *Rembrandt. Catalogo Completo Die Dipinti*, Florenz, 1992, Nr. 296; Neil MacLaren und Christopher Brown, *The Dutch School 1600-1900*, London 1991, S. 364–367; Julia Lloyd-Williams und Dudok van Heel, *Rembrandts Women*, München 2001, Nr. 125; Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 223.
- 30 National Gallery, London, „Portrait of Hendrickje Stoffels“, online abrufbar unter: <https://www.nationalgallery.org.uk/paintings/rembrandt-portrait-of-hendrickje-stoffels> (19.12.2022).
- 31 Adam Busiakiewicz, „Rembrandt in Mexico“, in: *Art History News*, 25.02.2022, online abrufbar unter: [https://www.arthistorynews.com/articles/7081\\_Rembrandt\\_in\\_Mexico](https://www.arthistorynews.com/articles/7081_Rembrandt_in_Mexico) (10.02.2023).
- 32 Dietrich Heißenbüttel, „Ein Rembrandt aus Sumos Erbe“, in: *Kontext*, 09.10.2019, online abrufbar unter: <https://www.kontextwochenzeitung.de/kultur/445/ein-rembrandt-aus-sumos-erbe-6228.html> (31.01.2023).

- 33 Werner Sumowski, „Hendrickje Stoffels als Pallas Athene“, in: *Pantheon. Internationale Jahreszeitung für Kunst* 20 (1962), S. 314–320.
- 34 Dietrich Heißenbüttel, „Ein Rembrandt aus Sumos Erbe“, in: *Kontext*, 09.10.2019, online abrufbar unter: <https://www.kontextwochenzeitung.de/kultur/445/ein-rembrandt-aus-sumos-erbe-6228.html> (31.01.2023).
- 35 Christoph Krekel, „Gutachten zu Katalognummer 23“, in: *Lehrer Rembrandt – Lehrer Sumowski*, hrsg. von Achim Riether Ausst.-Kat. Kunstverein Aalen, Berlin 2019, S. 130f, hier S. 131.
- 36 Helmut Gier, „Ausstellung: Lehrer Rembrandt – Der große Maler im Spiegel seiner Schüler“, in: *Augsburger Allgemeine Zeitung*, 15.12.2022, online abrufbar unter: <https://www.daz-augsburg.de/86778-2/> (31.01.2023); Kunstsammlungen und Museen Augsburg, online abrufbar unter: <https://kunstsammlungen-museen.augsburg.de/rembrandt> (31.01.2023); Hans-Jörg Berghammer, „Durch die Augen seiner Schüler“, in: *kunstmarkt.com*, 24.12.2021, online abrufbar unter: [http://www.kunstmarkt.com/pagesmag/kunst/\\_id456367-/ausstellungen\\_berichtdetail.html?q=%20](http://www.kunstmarkt.com/pagesmag/kunst/_id456367-/ausstellungen_berichtdetail.html?q=%20) (31.01.2023).
- 37 Telefonat mit Prof. Dr. Christoph Krekel am 20.12.2022.
- 38 Christopher Brown, *Rembrandt: de meester & zijn werkplaats*, Amsterdam 1991, S. 260f.
- 39 Jeroen Giltaij, *Ruffo en Rembrandt: over een Siziliaanse verzamelaar in de zeventiende eeuw die drie schilderijen bij Rembrandt bestelde*, Zutphen 1999, S. 62.
- 40 Jan Kelch und Ernst van de Wetering, *Rembrandt. Genie auf der Suche*, Köln 2006, S. 43.
- 41 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 253.
- 42 Benjamin A. Rifkin, „Rembrandt and his Circle, part 1“ [Rezension von Horst Gerson, *Rembrandt Paintings*, New York 1968], in: *The Art News* 68 (1969), S. 26f., hier S. 27.
- 43 Keith Roberts, „Art in seventeenth century Holland at the National Gallery“, in: *The Burlington Magazine* 118 (1976), S. 783f.
- 44 Christopher Brown, *Rembrandt (Classici dell'Arte Rizzoli)*, Mailand 1979, Angabe entnommen von RDK, dort keine Seitenangabe, online abrufbar unter: <https://rkd.nl/en/explore/images/202398> (10.02.2023).
- 45 Claus Grimm, „Handschrift, schildertechnik en beeldstructuur: Bijdrage tot het onderzoek naar toeschrijvingen. I. De helmen van Rembrandt“, in: *Tableau. Fine Arts Magazine* 5.3 (1982/1983), S. 242–250, hier S. 250.
- 46 *Der Mann mit dem Goldhelm. Eine Dokumentation der Gemäldegalerie in Zusammenarbeit mit dem Rathgen-Forschungslabor SMPK und dem Hahn-Meitner-Institut Berlin*, hrsg. von Jan Kelch, Berlin 1986, S. 9.
- 47 Jan Kelch und Ernst van de Wetering, *Rembrandt. Genie auf der Suche*, Köln 2006; Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 58.
- 48 Metropolitan Museum, „Old Woman Cutting her Nails“, online abrufbar unter: <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/437412> (20.12.2022).
- 49 Werner Sumowski, *Gemälde der Rembrandt Schüler*, Landau/Pfalz 1983–1994, Bd. 6 (erschienen 1994), Nr. 1595.
- 50 Arthur K. Wheelock, „Rembrandt van Rijn, Philemon and Baucis, 1658“, in: *National Gallery of Art. Online Editions, Dutch Paintings 17<sup>th</sup> Century, Technical Summary*, online abrufbar unter: <https://www.nga.gov/collection/art-object-page.1204.htm#technical> (31.01.2023).
- 51 Christoph Krekel, „Gutachten zu Katalognummer 23“, in: *Lehrer Rembrandt – Lehrer Sumowski*, hrsg. von Achim Riether Ausst.-Kat. Kunstverein Aalen, Berlin 2019, S. 130f, hier S. 131.
- 52 Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. A26.
- 53 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 5: *The Small-Scale History Paintings* (erschienen 2010), Nr. 27.
- 54 Ebd., Nr. V27.
- 55 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 265.
- 56 Alfred von Wurzbach, „Der heilige Anastasius von Rembrandt“, in: *Zeitschrift für Bildende Kunst* 7 (1882), S. 58–60, hier S. 59.
- 57 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 1: *1625–1631* (erschienen 1982), Nr. C17.
- 58 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 85.
- 59 Alfred von Wurzbach, „Der heilige Anastasius von Rembrandt“, in: *Zeitschrift für Bildende Kunst* 7 (1882), S. 58–60, hier S. 58.
- 60 Görel Cavalli-Björkman und Carina Fryklund, *Dutch and Flemish Paintings II: Dutch Paintings c. 1600–c. 1800*, Samml.-Kat. Nationalmuseum Stockholm, Stockholm 2005, Nr. 423.
- 61 Ebd.
- 62 Nationalmuseum Stockholm, „Old Scholar in a Vaulted Chamber (,St. Anastasius‘)“, online abrufbar unter: <http://emp-web-84.zetcom.ch/eMP/eMuseumPlus?service=ExternalInterface&module=collection&objectId=17582&viewType=detailView> (21.12.2022).
- 63 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 3: *1635–1642* (erschienen 1989), Nr. C101.
- 64 Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandts Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 141.

- 65 Norbert Middelkoop, *The Golden Age of Dutch art. Seventeenth-Century Paintings from the Rijksmuseum and Australian Collections*, Ausst.-Kat. Art Gallery of Western Australia, o.O. 1997, Nr. 28; Norbert Middelkoop, „Hollandse meesters vor Australie: onderzoek naar zeven schilderijen voor de tentoonstelling The Golden Age of Dutch art“, in: *Bulletin van het Rijksmuseum* 47.2/3 (1999), S. 177.
- 66 Werner Sumowski, *Gemälde der Rembrandt Schüler*, Landau/Pfalz 1983–1994, Bd. 6 (erschienen 1994), Nr. 2280.
- 67 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 3: 1635–1642 (erschienen 1989), Nr. C101; Ernst van de Wetering, *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 6: *Rembrandt's Paintings Revisited* (erschienen 2015), Nr. 141.
- 68 Horst Gerson, *Rembrandt Paintings*, New York 1968, Nr. 237.
- 69 Christian Tümpel, *Rembrandt*, Amsterdam 1986, Nr. A68.
- 70 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 3: 1635–1642 (erschienen 1989), Nr. C96.
- 71 Josua Bruyn u.a., *A Corpus of Rembrandt Paintings*, Den Haag u.a. 1982–, Bd. 4: *The Self-portraits (1625–1669)* (erschienen 2005), S. 238–242.
- 72 Jonathan Bikker, *Willem Drost. A Rembrandt Pupil in Amsterdam and Venice*, Yale 2005.
- 73 Wilhelm Bode, *Das Bildnis von Rembrandt's Bruder Adriaen Harmensz. van Rijn im Mauritshuis. Mit einem Stich von Albert Krüger*, Amsterdam 1891, S. 4.
- 74 Cornelius Hofstede de Groot, *Beschreibendes und kritisches Verzeichnis der Werke der hervorragendsten holländischen Maler des XVII. Jahrhunderts, nach dem Muster von John Smith's catalogue raisonné*, Esslingen am Neckar 1907–1928, Nr. 261.
- 75 Wolfgang Reuter, „Wieviel Biometrie steckt in der Kunst?“ [Arbeitstitel], in: *Focus* 2023 (im Erscheinen).
- 76 Wolfgang Reuter, „A Painters Fingerprint“, Vortragsreihe am *Museum der Phantasie*, Bernried, April bis Juni 2019.

## Bildnachweise

- Abb. 1a: R. Edge Pine, Portrait Rudjer Josip Bošković, 1760: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rudjer\\_Boskovic.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rudjer_Boskovic.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 1b: Titelseite von Rudjer Josip Bošković, *Theoria philosophiae naturalis redacta ad unicam legem virium in natura existentium*, Wien 1759: Antiquariat Inlibris, Gilhofer Nfg. GmbH, Wien
- Abb. 2: School of Rembrandt, *Old man contemplating in a study*, 1640er Jahre, Öl auf Leinwand, 96,5 × 82 cm, Oslo, National Museum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt\\_-\\_A\\_Scholar\\_in\\_his\\_Study\\_-\\_NG.M.01365.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt_-_A_Scholar_in_his_Study_-_NG.M.01365.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 3: Rembrandt, *Bust of a youth/Portrait of Titus, the artists' son*, ca. 1660, Öl auf Leinwand, 81,5 × 78,5 cm, Baltimore Museum of Art: Public domain, [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Rembrandt\\_-\\_Titus,\\_the\\_Artist%27s\\_Son,\\_1660\\_%28Baltimore\\_Museum\\_of\\_Art%29.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Rembrandt_-_Titus,_the_Artist%27s_Son,_1660_%28Baltimore_Museum_of_Art%29.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 4–7, 9a–11b, 13a/b, 14b, 14d, 15b, 16b, 16d, 17b, 18b, 20a/b, 22a/b, 23b, 25a/b, 26b, 27b, 28b, 29b, 30b, 31b, 32b, 33b, 34b, 35b, 36b–40b: Art Intelligence GmbH
- Abb. 8a: Gerbrand van den Eeckhout, *Isaac lying in bed blesses Jacob who, disguised in Esau's clothes, brings food to his father*, 1642, Öl auf Leinwand, 100,6 × 128,3 cm, New York, Metropolitan Museum of Art: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isaac\\_Blessing\\_Jacob\\_MET\\_DP145918.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isaac_Blessing_Jacob_MET_DP145918.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 8b: Govaert Flinck, *Johannes de Doper*, 1632, Öl auf Holz, 64,8 × 48,3 cm, Los Angeles, Los Angeles County Museum of Art: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (50356), <https://rkd.nl/explore/images/50356> (03.02.2023)
- Abb. 12a: Rembrandt, *Simeon's Song of Praise*, ca. 1669, Öl auf Leinwand, 98,5 × 79,5 cm, Stockholm, Nationalmuseum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt\\_Simeon%E2%80%99s\\_Song\\_of\\_Praise.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt_Simeon%E2%80%99s_Song_of_Praise.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 12b: Rembrandt, *Simeon in the Temple*, ca. 1669, Öl auf Leinwand, 98,5 × 79,5 cm, Stockholm, Nationalmuseum: Foto: Erik Cornelius / Nationalmuseum Stockholm, CC BY-SA 4.0
- Abb. 14a: Rembrandt, *Simeon's Song of Praise*, ca. 1669, Öl auf Leinwand, 98,5 × 79,5 cm, Stockholm, Nationalmuseum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt\\_Simeon%E2%80%99s\\_Song\\_of\\_Praise.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rembrandt_Simeon%E2%80%99s_Song_of_Praise.jpg) (Ausschnitt; 03.02.2023)
- Abb. 14c: Rembrandt, *Simeon in the Temple*, ca. 1669, Öl auf Leinwand, 98,5 × 79,5 cm, Stockholm, Nationalmuseum: Foto: Erik Cornelius / Nationalmuseum Stockholm (Ausschnitt), CC BY-SA 4.0

- Abb. 15a: Rembrandt, *Portrait of Johannes Wittenbogaert*, 1633, Öl auf Leinwand, 103,5 × 104,5 cm, Amsterdam, Rijksmuseum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Portrait\\_of\\_Johannes\\_Wtenbogaert\\_\(Rembrandt\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Portrait_of_Johannes_Wtenbogaert_(Rembrandt)) (03.02.2023)
- Abb. 16a/c: Rembrandt, *Portrait of Johannes Wittenbogaert*, 1633, Öl auf Leinwand, 103,5 × 104,5 cm, Amsterdam, Rijksmuseum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Portrait\\_of\\_Johannes\\_Wtenbogaert\\_\(Rembrandt\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Portrait_of_Johannes_Wtenbogaert_(Rembrandt)) (Ausschnitt; 03.02.2023)
- Abb. 17a: *The Slaughtered Ox*, 1655, Öl auf Holz, 95,5 × 68,8 cm, Glasgow, Kelvingrove Art Gallery and Museum: Public domain, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El\\_cad%C3%A1ver\\_de\\_un\\_buey\\_atribuido\\_a\\_Rembrandt.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:El_cad%C3%A1ver_de_un_buey_atribuido_a_Rembrandt.jpg) (03.02.2023)
- Abb. 18a: *Girl with a Broom*, 1651, Öl auf Leinwand, 107,3 × 91,4 cm, Washington, National Gallery of Art: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (208170), <https://rkd.nl/explore/images/208170> (03.02.2023)
- Abb. 19a: Rembrandt, *Portrait of a Man, Seated*, ca. 1632, Öl auf Holz, 90,8 × 68,5 cm, Wien, Kunsthistorisches Museum: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (232222), <https://rkd.nl/en/explore/images/232222> (03.02.2023)
- Abb. 19b: *Portrait of a Woman, Seated*, ca. 1632, Öl auf Holz, 90 × 67,5 cm, Wien, Kunsthistorisches Museum: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (232223), <https://rkd.nl/en/explore/images/232223> (03.02.2023)
- Abb. 21a: *Half Figure of an Old Man with Beret*, 1654, Öl auf Leinwand, 74 × 63 cm, Moskau, Pushkin Museum: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (39465), <https://rkd.nl/en/explore/images/39465> (03.02.2023)
- Abb. 21b: *Half Figure of an Old Woman*, 1654, Öl auf Leinwand, 74 × 63 cm, Moskau, Pushkin Museum: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (39471), <https://rkd.nl/en/explore/images/39471> (03.02.2023)
- Abb. 23a: Rembrandt, *Half Figure of a Woman with a White Wrap*, 1654–1656, Öl auf Leinwand, 101,9 × 83,7 cm, London, National Gallery: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (41279), <https://rkd.nl/en/explore/images/41279> (03.02.2023)
- Abb. 24a: *Pallas Athene*, ca. 1655, Öl auf Leinwand, 118 × 91 cm, Lissabon, Museo Calouste Gulbenkian: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (54618), <https://rkd.nl/en/explore/images/54618> (03.02.2023)
- Abb. 24b: Rembrandt, *Hendrickje Stoffels als Pallas Athene*, 1653/1654, Privatbesitz: Mit Genehmigung des Eigentümers
- Abb. 26a: *The Man with the Golden Helmet*, ca. 1650–1660, Öl auf Leinwand, 67,5 × 50,7 cm, Berlin, Gemäldegalerie: Staatliche Museen zu Berlin, Gemäldegalerie (Eigentum Kaiser Friedrich Museumsverein) / Christoph Schmidt
- Abb. 27a: *The Man with the Golden Helmet*, ca. 1650–1660, Öl auf Leinwand, 67,5 × 50,7 cm, Berlin, Gemäldegalerie: Staatliche Museen zu Berlin, Gemäldegalerie (Eigentum Kaiser Friedrich Museumsverein) / Christoph Schmidt
- Abb. 28a: *Old Woman Cutting her Nails*, 1650er, Öl auf Leinwand, 126,1 × 101,9 cm, New York, Metropolitan Museum of Art: Public domain, Metropolitan Museum of Art, <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/437412> (03.02.2023)
- Abb. 29a: *Old Woman Cutting her Nails*, 1650er, Öl auf Leinwand, 126,1 × 101,9 cm, New York, Metropolitan Museum of Art: Public domain, Metropolitan Museum of Art, <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/437412> (03.02.2023)
- Abb. 30a: *Jupiter and Mercury visiting Philemon and Baucis*, ca. 1658, Öl auf Holz, 54,5 × 68,5 cm, Washington, National Gallery: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (54379), <https://rkd.nl/en/explore/images/54379> (03.02.2023)
- Abb. 31a: *An old Scholar in a Vaulted Room*, 1631, Öl auf Holz, 60 × 48 cm, Stockholm, Nationalmuseum: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (206145), <https://rkd.nl/en/explore/images/206145> (03.02.2023)
- Abb. 32a: *An old Scholar in a Vaulted Room*, 1631, Öl auf Holz, 60 × 48 cm, Stockholm, Nationalmuseum: Public domain, Nationalmuseum Stockholm, <https://collection.nationalmuseum.se:443/eMP/eMuseumPlus?service=ExternalInterface&module=collection&objectId=17582&viewType=detailView> (03.02.2023)
- Abb. 33a: *Bust of a Man in Oriental Dress*, 1635, Öl auf Leinwand, 72 × 54,5 cm, Amsterdam, Rijksmuseum: Public domain, Rijksmuseum Amsterdam, <https://www.rijksmuseum.nl/en/collection/SK-A-3340> (03.02.2023)
- Abb. 34a: *Bust of a Man in Oriental Dress*, 1635, Öl auf Leinwand, 72 × 54,5 cm, Amsterdam, Rijksmuseum: Public domain, Rijksmuseum Amsterdam, <https://www.rijksmuseum.nl/en/collection/SK-A-3340> (03.02.2023)
- Abb. 35a: *Self Portrait in a Black Cap*, ca. 1637, Öl auf Holz, 63 × 50,7 cm, London, Wallace Collection: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (30284), <https://rkd.nl/en/explore/images/30284> (03.02.2023)
- Abb. 36a: *Self Portrait in a Black Cap*, ca. 1637, Öl auf Holz, 63 × 50,7 cm, London, Wallace Collection: Wallace Collection, CC-BY-NC-ND 4.0, <https://wallacelive.wallacecollection.org/eMP/eMuseumPlus?service=ExternalInterface&module=collection&objectId=63454&viewType=detailView> (03.02.2023)
- Abb. 41a: *Half Figure of a Man with Gray Curly Hair*, 1654, Öl auf Leinwand, 80,5 × 66,5 cm, Den Haag, Mauritshuis: Public domain, Mauritshuis, The Hague und Art Intelligence GmbH

- Abb. 41b: *Half Figure of an Old Man with Beret*, 1654, Öl auf Leinwand, 74 × 63 cm, Moskau, Pushkin Museum: Public domain, RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (39465), <https://rkd.nl/en/explore/images/39465> (Ausschnitt; 03.02.2023) und Art Intelligence GmbH
- Abb. 41c: *The Man with the Golden Helmet*, ca. 1650–1660, Öl auf Leinwand, 67,5 × 50,7 cm, Berlin, Gemäldegalerie: Staatliche Museen zu Berlin, Gemäldegalerie (Eigentum Kaiser Friedrich Museumsverein) / Christoph Schmidt und Art Intelligence GmbH
- Abb. 42: Rembrandt, *Simeon's Song of Praise*, ca. 1669, Öl auf Leinwand, 98,5 × 79,5 cm, Stockholm, Nationalmuseum: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (51422), <https://rkd.nl/en/explore/images/51422> (Ausschnitt; 03.02.2023) und Art Intelligence GmbH
- Abb. 43a: Ferdinand Bol, *Portrait of a Man as Mars*, ca. 1657, Öl auf Leinwand, 72,5 × 62,5 cm, Warschau, Museum Narodowe w Warszawie: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (59613), <https://rkd.nl/en/explore/images/59613> (03.02.2023)
- Abb. 43b: Ferdinand Bol, *Portrait of a Man as Mars*, ca. 1657, Öl auf Leinwand, 72,5 × 62,5 cm, Warschau, Museum Narodowe w Warszawie: RKD – Netherlands Institute for Art History, RKDimages (59613), <https://rkd.nl/en/explore/images/59613> (Ausschnitt; 03.02.2023) und Art Intelligence GmbH
- Tab. 1–4: Art Intelligence GmbH

Wolfgang Reuter ist Gründer der Art Intelligence GmbH, einem Start-Up, das sich mit der Analyse von Kunstwerken beschäftigt und vom Bundesministerium für Forschung und Entwicklung als Forschungsprojekt anerkannt ist.

Dieser Beitrag ist auch unter folgender Internetadresse abrufbar:  
<https://www.kunstgeschichte-ejournal.net/600/>