

WHITEPAPER

DER BELTRACCHI CODE

Der digitale Fingerabdruck von
Kunstfälschern

[at]

alexanderthamm

Wolfgang Beltracchi: „Gebäude im Wald“ im Stil von Raoul Dufy

Das Bild wurde von menschlichen Experten nicht als Fälschung erkannt, künstliche Intelligenz dagegen konnte es seinem wahren Schöpfer zuordnen. Was der Algorithmus beispielhaft in diesem Ausschnitt erkennt: auf Seite 79



Der Beltracchi-Code

Maler schaffen ihre Werke in einem unverwechselbaren Stil, den **künstliche Intelligenz** entschlüsseln kann. Der Algorithmus enttarnt auch den digitalen Fingerabdruck von Kunstfälschern

TEXT VON **MARKUS KRISCHER**



**Wolfgang Beltracchi:
„Hafenbild“ im
Stil von August
Macke**

Das Bild wird in 100 zufällige Ausschnitte von 224 × 224 Pixeln zerlegt, mit denen das neuronale Netz mehr als 27 Millionen Parameter bestimmt. Das Gemälde war bereits vor Jahren einer Macke-Expertin als Fälschung aufgefallen

Ein weißes Gebäude, umringt von Palmen. Die Konturen verschwimmen im geheimnisvollen Blau. Es sind die Farben, die der Szenerie etwas Mystisches verleihen. Der französische Maler Raoul Dufy (1877–1953) soll das 65 Zentimeter breite und 54 Zentimeter hohe Bild, Öl auf Leinwand, gemalt haben.

Am 6. Juli 2007 schrieb ein gewisser Wolfgang Fischer aus Freiburg wegen des Gemäldes an die Dufy-Expertin Fanny Guillon-Laffaille in Paris. Um die Echtheit des Kunstwerks zu beweisen, legte Fischer dem Brief das vergilbte Foto einer Frau bei, auf dem ein Teil des Bildes zu sehen ist. Fischer bat um eine Expertise. Am 25.9.2007 nahm Guillon-Laffaille das Gemälde ins Werkverzeichnis des Malers auf. Das Bild war damit als echter Dufy beglaubigt.

Die Expertin ließ sich täuschen: Fischer ist der Geburtsname des 2011 wegen Betrugs zu sechs Jahren Haft verurteilten „Jahrhundert-Fälschers“ Wolfgang Beltracchi. Und das nur auf alt getrimmte Foto zeigt Beltracchis Ehefrau Helene.

Das gefälschte Dufy-Gemälde, längst enttarnt, ist im Archiv des Landeskriminalamts Berlin abgelegt. René Allonge, im LKA zuständig für das Dezernat Kunstdelikte, hat das Bild jetzt noch einmal prüfen lassen. Nicht von einem Menschen, von einer Maschine. Ein Algorithmus durchleuchtete den angeblichen Dufy. Was die Gutachterin nicht schaffte, gelang der künstlichen Intelligenz auf Anhieb: Sie ordnete das Bild seinem wahren Schöpfer Beltracchi zu.

Den Algorithmus, spezialisiert auf das Erkennen von Malern, hat Wolfgang Reuter geschrieben. Der 54-Jährige arbeitete früher als Journalist („Spiegel“, „Han-



den müssen – oder um die automatisierte Schätzung von Schäden nach Naturkatastrophen anhand von Luftaufnahmen.

Dabei tüfteln KI-Forscher seit Längerem an Programmen, die Maler erkennen können. Vor knapp zehn Jahren gelang es künstlichen neuronalen

Netzen erstmals, bestimmte Objekte auf Bildern mit hoher Genauigkeit zu entschlüsseln. Damals glaubten viele KI-Experten, die Identifizierung bestimmter Maler sei deutlich schwieriger. Weil sich deren individuelle Stile in höchst unterschiedlichen Techniken ausdrücken – und sich im Lauf ihres Lebens teilweise sehr stark ändern.

Für KI ist Beltracchi ein Glücksfall

Inzwischen aber zeigten einige Forscher, dass sogenannte Konvolutionale Neuronale Netze durchaus die Handschrift eines Malers lesen können – Nitin Viswanathan etwa, ein Absolvent der Stanford-Universität, der heute Produktmanager bei Google ist, oder Tara Balakrishnan, Sarah Rosston und Emily Tang, die dazu ebenfalls in Stanford geforscht haben.

„Die gängige Meinung war, dass Computer den Menschen bei der Erkennung von Malerstilen nicht schlagen können“, sagt Reuter. Doch das Gegenteil ist der Fall: Als spielerische Anwendung war sein Algorithmus im vergangenen Jahr im Museum Buchheim am Starnberger See ausgestellt. Das Projekt hatte die appliedAI Initiative von UnternehmerTUM angestoßen, der Start-up-Inkubator der BMW-Großaktionärin Susanne Klatten. Die Besucher konnten gegen das Ensemble aus neuronalen Netzen antreten. Sie mussten zufällig ausgewählte Bilder von

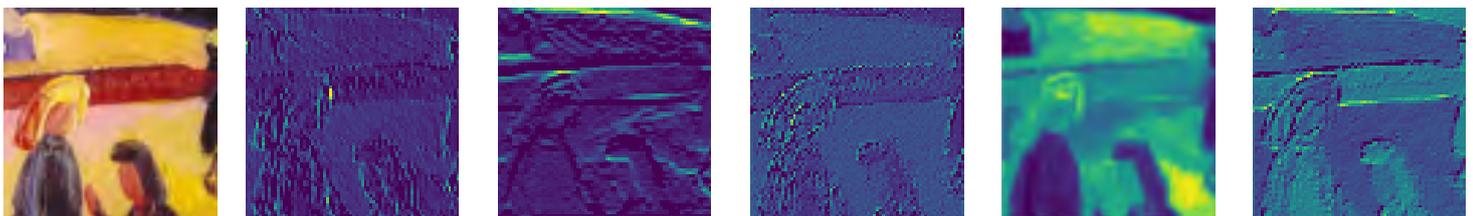
Foto: dpa

»
**Der beste Schutz
 gegen Fälschungen
 wären wirklich
 interessensfreie
 Experten**
 «

Wolfgang Beltracchi,
 Kunstfälscher

delsblatt“) und war von 2015 bis 2017 stellvertretender Chefredakteur beim FOCUS. Der Experte für künstliche Intelligenz (KI) ist inzwischen bei der Alexander Thamm GmbH tätig, einer auf Data-Science spezialisierten Firma. Er und seine Kollegen schreiben KI-Algorithmen für andere Unternehmen, darunter zahlreiche Dax-Konzerne. Allerdings geht es dabei in der Regel nicht um große Kunst, sondern um ganz praktische Dinge – etwa um die Vorhersage, wann bestimmte Verschleißteile in Maschinen ausgewechselt wer-

Wie das neuronale Netz Bilder digital zerlegt



„Hafenbild“ (von Beltracchi gefälschter Macke) In der ersten von 50 Schichten erkennt der Algorithmus Kontraste, Umrisse und bestimmte Farbkombinationen. Er nutzt dazu Filter, mit denen der 224 x 224 Pixel große Bildausschnitt abgetastet wird. Mathematisch gesehen, sind diese Filter Matrizen, deren Einträge das Netz während des Trainings lernt

insgesamt 20 Künstlern dem jeweils richtigen Schöpfer zuzuordnen. Die Trefferquote des Computers lag bei 93 Prozent, die der Besucher im Schnitt bei 60 Prozent. Selbst der Museumsdirektor schaffte es nicht, den Algorithmus zu schlagen.

Die Idee mit Beltracchi kam Reuter wegen Picasso. Der Kubist hatte während seiner fast 80-jährigen Schaffenszeit in völlig unterschiedlichen Stilen gearbeitet, von realistisch anmutenden Kunstwerken wie etwa dem Werk „Wissenschaft und Barmherzigkeit“ über die blaue und rosa Periode bis hin zum Kubismus. „Ich war verblüfft“, sagt Reuter, „dass der Algorithmus Picasso-Bilder dennoch mit einer Genauigkeit von 84 Prozent vorhersagt. Warum also soll künstliche Intelligenz nicht auch einen Fälscher, der ständig andere Maler kopiert, erkennen?“

Für die Kunstwelt mag Wolfgang Beltracchi, der in seiner kriminellen Zeit 250 bis 300 Gemälde fälschte, eine Katastrophe gewesen sein – für die künstliche Intelligenz ist er, laut Reuter, ein Glücksfall. Denn nach seiner Haft malte der Fälscher weiter fleißig Bilder „im Stil von“ anderen Künstlern. Nur hat er sie nicht mehr mit deren Namen signiert.

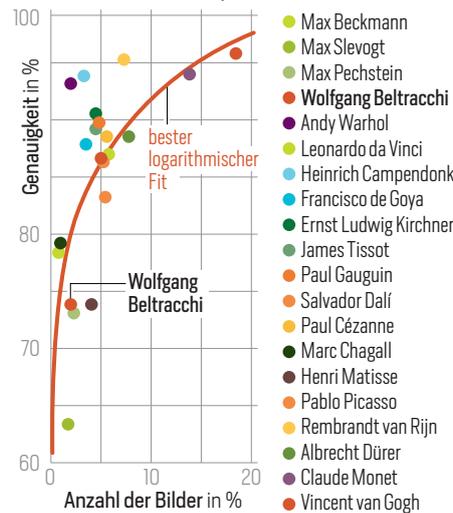
Reuter wandte sich an das LKA Berlin, das im Fall Beltracchi ermittelt hatte, und bat um Fotos von „möglichst vielen“ Fälschungen aus der Hand des prominenten Betrügers. Die Ermittler unterstützten das Projekt, und so kam er zu 58 Beltracchis aus dessen krimineller Zeit.

Knapp 100 weitere Werke des Fälschers besorgte er sich aus öffentlich zugänglichen Quellen. Und dann trainierte er den Algorithmus mit den gesammelten Beltracchi-Werken.

Das Ergebnis ist überraschend: 73 Prozent der Beltracchis werden von dem neuronalen Netz korrekt erkannt – eben als

Viele Bilder, hohe Trefferquote

Genauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder pro Maler



Je mehr Beispiele dem Algorithmus für den Stil eines Malers beim Training zur Verfügung stehen, desto besser kann er andere Bilder des Malers erkennen. Dabei besteht ein logarithmischer Zusammenhang

Werke von Wolfgang Beltracchi. Auf den ersten Blick mag das Ergebnis etwas schlechter erscheinen als das für anderer Maler. Tatsächlich aber hängt die Genauigkeit, mit der künstliche Intelligenz Maler erkennt, vor allem von der Anzahl der Bilder ab, mit denen der Algorithmus trainiert wird.

Beltracchi ist nur mit 148 Bildern in dem Datensatz vertreten – Vincent van Gogh und Claude Monet dagegen kommen mit 1878 und 1277 Werken auf eine Genauigkeit von 96 und 94 Pro-

zent. „Die Genauigkeit bei Beltracchi ist völlig vergleichbar mit anderen Malern, von denen nur wenige Bilder in dem Datensatz sind“, sagt der KI-Experte (siehe Grafik links). Für Reuter ist klar: „Jeder Maler hat einen digitalen Fingerabdruck, den wir Menschen nicht erkennen können.“

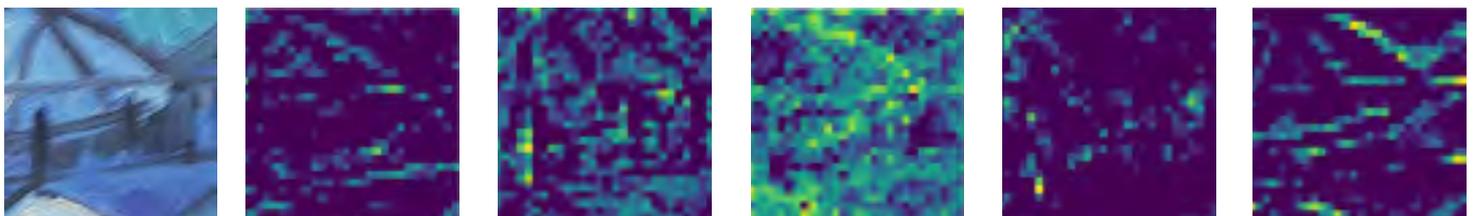
Wie auch? Ein Konvolutionales Neuronales Netz etwa „tastet“ jedes einzelne Bild mit Filtern ab, Pixel für Pixel, wobei das Wort „tasten“ hier nichts Zärtliches beschreibt – sondern die kühle, sterile Berechnung von mehr als 27 Millionen Parametern nach mathematischen Formeln, die den Stil eines Malers erkunden. Die Berechnungen sind zwar wegen ihrer schieren Menge kaum nachvollziehbar, doch lassen sich die Lernfortschritte visualisieren (siehe Bilderleisten unten).

Wenn Bilder digital seziiert werden

Emotionen, wie sie Menschen und auch Kunstexperten beim Betrachten eines Kunstwerks empfinden, spielen keine Rolle. Der Algorithmus ist unbestechlich, neutral – und ohne eigene Interessen. Was die künstliche Intelligenz macht, „ist in gewisser Weise die Obduktion des Lebenswerkes eines Künstlers“, sagt Reuter.

Mit aufschlussreichen Ergebnissen. Denn Reuter untersuchte die gelernten Parameter: „Die Winkel der Farbgradienten sind sehr charakteristisch für die Stile von Malern“, sagt er, also die Richtung, in der sich Farben ändern. Aber auch die Verteilung der Flächen gleicher oder ähnlicher Farben.

Der Algorithmus kann, mit leichten Modifikationen, auch Fälschungen erkennen, bei denen – anders als im Fall Beltracchi – der wirkliche Maler nicht bekannt ist. Was ja der Normalfall ist. Dazu muss man verstehen, dass ein ▶



„Gebäude im Wald“ (von Beltracchi gefälschter Dufy) In der zehnten Schicht sind die erkannten Zusammenhänge deutlich komplexer. Das Motiv des Bildausschnitts lässt sich bestenfalls erahnen. Die von der KI gelernten Strukturen in späteren Schichten sind abstrakt. Neuronale Netze werden deshalb oft als Black Boxes bezeichnet

Aus der digitalen Asservatenkammer des LKA Berlin



Die vier Beckmann-Imitationen wurden von dem KI-Algorithmus als Fälschung erkannt. Die Zeichnung ganz rechts stammt aus einer Fälscherwerkstatt in Italien, ihr Schöpfer ist nicht bekannt

Maler-Klassifizierungs-Algorithmus keine „exakte“ Vorhersage trifft. Stattdessen gibt er für jeden der infrage kommenden Maler eine Wahrscheinlichkeit aus. Ein Bild könnte also mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,05 Prozent von Andy Warhol sein, mit 1,3 Prozent von Albrecht Dürer und mit 73 Prozent von Vincent van Gogh. Für die exakte Vorhersage wird dann der Maler genommen, der am wahrscheinlichsten ist.

Um ein Bild als Fälschung oder, wie Reuter es formuliert, als „auffällig“ zu klassifizieren, muss für jeden Maler ein Schwellenwert bestimmt werden, etwa eine Wahrscheinlichkeit von 0,15 Prozent. Liegt die Wahrscheinlichkeit darunter, gilt ein zu testendes Bild als auffällig, andernfalls als unauffällig.

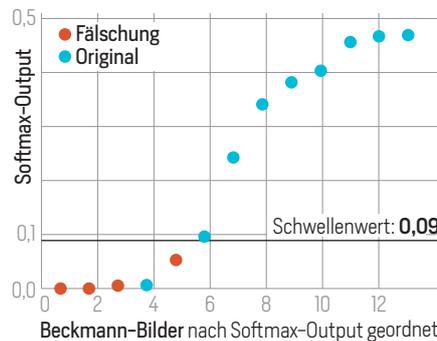
Kunsthändler haben Angst vor der KI

Das LKA Berlin unterstützte auch diese Versuchsreihe und stellte Reuter weitere Fälschungen von unterschiedlichen, oft unbekanntem Fälschern zur Verfügung. Das Ergebnis: Von zehn Heinrich-Campendonk-Fälschungen etwa erkennt der Algorithmus neun als auffällig – allerdings würde er auch 15 Prozent der echten Campendonks als auffällig einschätzen.

Die einzige Fälschung, die dem Ensemble von neuronalen Netzen durchgerutscht wäre, stammt laut den Berliner LKA-Ermittlern übrigens nicht von Beltracchi.

Bei Max Pechstein ist die Bilanz etwas schlechter. Von 14 Fälschungen des Expressionisten erkennt der Algorithmus 64 Prozent als auffällig, zudem würde er 13 Prozent der tatsächlichen Pechsteins als auffällig klassifizieren. Vier Beckmann- und drei Kirchner-Fälschungen erkennt das Modell dagegen problemlos – und es würde jeweils auch

Softmax-Output für Bilder von: Max Beckmann



Die Wahrscheinlichkeiten, dass vier vermeintliche und neun originale Werke von Beckmann echt sind: Je höher der Schwellenwert, desto mehr Fälschungen werden erkannt – doch auch die Zahl der „auffälligen“ Originale steigt

Quelle: Wolfgang Reuter

nur rund zehn Prozent der Originale als auffällig einstufen.

Der professionelle Kunstmarkt hat bislang, mit wenigen Ausnahmen wie beispielsweise der Galerie Michael Werner, kaum Interesse an der Fälschungserkennung. Der Bundesverband Deutscher Kunstversteigerer jedenfalls war nicht bereit, Reuter mit Fotos von Fälschungen zu unterstützen.

Dabei ist für Reuter klar: „Künstliche Intelligenz wird niemals in der Lage sein, einen Fälscher gerichtsfest zu überführen.“ Aber die Technik könne Indizien liefern – und „im Zusammenspiel mit anderen Untersuchungsmethoden mithelfen, zu einer genaueren Einschätzung zu kommen“.

Dennoch zeigten sich Inhaber oder Manager einzelner Auktionshäuser zunächst stets interessiert – doch irgendwann, so Reuter, kam immer die Frage: „Und was ist, wenn der Algorithmus eines meiner Bilder als auffällig erkennt?“

Da-Vinci-Fake?

KI liefert Indizien dafür, dass der „Salvator Mundi“ kein echter Leonardo da Vinci ist

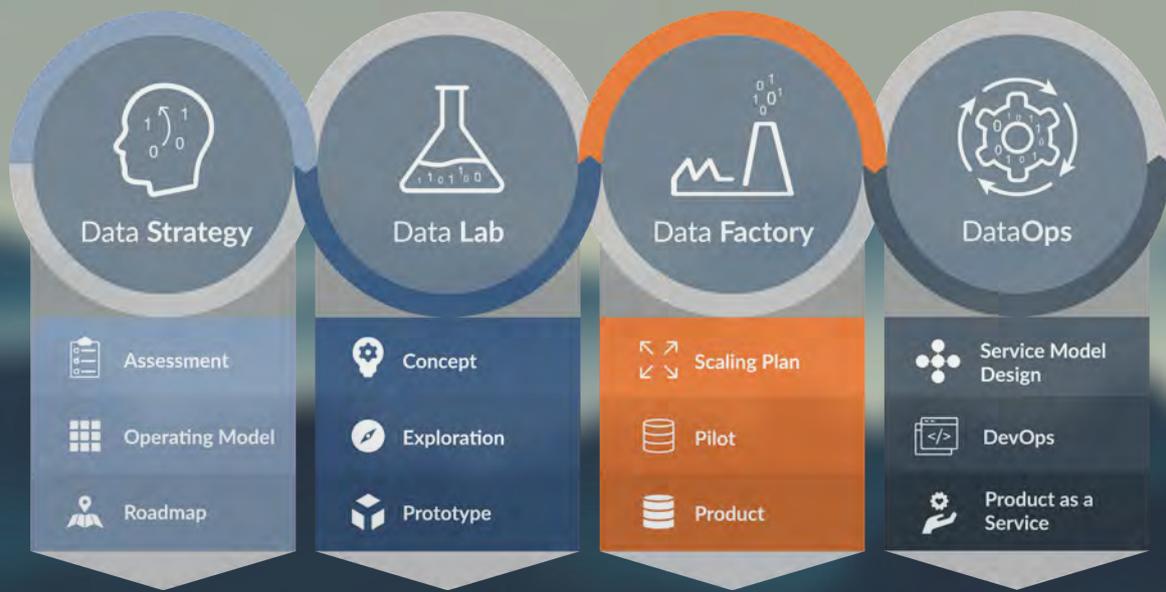
Es ist das teuerste je versteigerte Bild: „Salvator Mundi“, angeblich von Leonardo da Vinci. 2017 erlöste es bei Christie's in New York 450 Millionen Dollar. Der Käufer soll Saudi-Arabiens Kronprinz Mohammed bin Salman sein. Dabei hatte Christie's das Werk schon 2004 zur Begutachtung. Damals lehnten es die Kunstexperten ab, das Gemälde zu versteigern, offenbar hielten sie es nicht für einen Leonardo. Kein Wunder: Jahrhundertlang wurde es einem Schüler da Vincis zugeordnet. Zudem ist die Provenienz über viele Jahrzehnte ungeklärt, auch und gerade in jüngerer Zeit. Wolfgang Reuter hat das Werk mit seinem KI-Algorithmus analysiert. Das Ensemble aus neuronalen Netzen stuft es als Fälschung ein – allerdings würden auch 17 Prozent der originalen Gemälde und Skizzen Leonardo da Vincis als auffällig klassifiziert.



Wirklich vom Meister? Die Authentizität des Bildes ist unklar. Einige Experten halten es für echt, andere vermuten, es sei in den vergangenen Jahren zum Leonardo restauriert worden

Fotos: LKA, dpa

Die [at] Data Journey



Unsere Erfahrung aus über 1000 Projekten haben wir genutzt, um ein ganzheitliches System für Data & KI Projekte zu entwickeln – unsere Data Journey.

Eine durchgängige **Data Strategy** bildet die Basis und den Rahmen, um aus Daten echten Mehrwert zu generieren – wir nennen es Data2Value.

Im **DataLab** geht es um Geschwindigkeit! Ziel ist es, möglichst schnell Use Cases zu testen – vom Konzept zum Prototypen mit Echtdateien.

In der **Data Factory** werden Use Cases zum fertigen Produkt industrialisiert. Absoluter Fokus ist die Skalierung und nachhaltige Generierung von Mehrwerten – daher steht auch hier der Nutzer im Fokus.

In unserer **Data Ops** betreiben und warten wir Ihre Plattformen und Machine Learning Algorithmen.

Über [at]

Die Alexander Thamm GmbH ist einer der führenden Anbieter von Data Science und Künstlicher Intelligenz im deutschsprachigen Raum. Wir generieren für und mit unseren Kunden aus Daten echte Mehrwerte, damit diese auch in Zukunft wettbewerbsfähig sind. Dazu entwickeln und implementieren wir datengetriebene Innovationen sowie Geschäftsmodelle. Das Leistungsportfolio umfasst die gesamte Data Journey – von der Datenstrategie über die Entwicklung von Algorithmen und den Aufbau von IT-Architekturen bis hin zu Wartung und Betrieb.

Kontaktieren Sie Andreas Gillhuber oder Simon Decker für einen kostenfreien Beratungstermin.

Ihre Ansprechpartner



Andreas Gillhuber
Co-CEO
Tel: +49 160 530 242 0



Simon Decker
Head of New Business
Tel: +49 173 244 726 8

oder per E-Mail:
contact@alexanderthamm.com