

Grundlagen KI Projekt Gruppen Report

Alina Saskia Simon, Jannes Bikker, Julian Schöpe, Malte Elvers und Marvin Stier

Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld 38678, Deutschland

Zusammenfassung. Dieser Bericht entstand im Rahmen der Einführung in die Künstliche Intelligenz Vorlesung an der Technischen Universität Clausthal und untersucht die Entwicklung eines Modells zur automatisierten Erkennung von Verkehrsschildern. In einem ersten Schritt wurde ein Datensatz mit gelabeltem Obst analysiert, der sich jedoch als ungeeignet erwies – die Gründe hierfür werden im ersten Teil des Berichts erläutert. Im zweiten Teil wurde ein neuer Datensatz mit Straßenbildern und Verkehrsschildern verwendet. Dazu wurde ein zweistufiges System entworfen und entwickelt: Ein Modell lokalisiert die Verkehrsschilder im Bild, während ein anderes Modell Schilder klassifiziert. Diese beiden Komponenten wurden in einer Pipeline kombiniert, sodass alle Verkehrsschilder in einem Bild erkannt und klassifiziert werden. Abschließend wurden die Ergebnisse analysiert, wobei sowohl die Stärken als auch die Schwächen des Systems herausgearbeitet wurden.

1 Einleitung

Viele moderne Autos können Verkehrsschilder erkennen. Zum einen wird angezeigt, welches Verkehrszeichen gilt, zum anderen können neue Assistenten die Informationen hinter einem Verkehrsschild verarbeiten und warnen beispielsweise bei der Übertretung der ausgelesenen Geschwindigkeit. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Verkehrsschilderkennung entwickelt.

Ursprünglich wählten wir einen ganz anderen Datensatz, der sich nach ersten Experimenten als unbrauchbar oder zumindest unvorteilhaft für erste Erfahrungen mit künstlicher Intelligenz herausgestellt hat, ist der folgende Bericht in zwei Teile aufgeteilt. Im ersten Teil werden die Ansätze und Erkenntnisse mit erwähntem verworfenen Datensatz erläutert und im zweiten Teil dann die Arbeit mit dem finalen Datensatz (German Traffic Sign Detection Benchmark). Der gewählte Ansatz besteht aus zwei Komponenten: Ein Modell lokalisiert die Verkehrsschilder in einem Bild, und ein weiteres klassifiziert die erkannten Schilder. Diese Modelle wurden in einer Pipeline zusammengeführt, um eine vollständige Erkennung und Klassifizierung von Verkehrsschildern zu ermöglichen. Zum Abschluss evaluieren wir die Leistungsfähigkeit des Systems und diskutieren dessen Stärken und Schwächen.

1.1 Verworfener Datensatz

Der zuerst ausgewählte Datensatz, Fruit Quality Dataset [2], beinhaltet Bilder mit Labeln nach einem Schema, welches typischerweise für YOLO [6] verwendet wird.

Preprocessing Ausgehend von stichprobenartiger Begutachtung der ersten Bild-Label-Paare wurde die erste Zahl in der korrespondierenden Label-Datei als Label verwendet. Später stellte sich heraus, dass es durchaus mehrere Label pro Datei gibt, die auch den folgenden Ansatz unwirksam machen. Die Klassenverteilung war relativ ausgeglichen mit einigen Ausreißern, aber durchaus brauchbar.

Training Es wurde ein CNN trainiert mit einem Input von Bildern der Größe 128x128 mit 3 Farbkanälen. Als Ausgang für erste Experimente diente dabei eine Pipeline für Bildklassifikation, welche in einer zurückliegenden Vorlesung als Abschlussprojekt geschrieben wurde. Ein Schritt dabei war die Normalisierung der Farbdaten von $[0, 255]$ auf $[0, 1]$. In einer ersten Iteration wurde diese Normalisierung aber nur vor dem Training und nicht vor dem Testen mit unbekannten Bildern vorgenommen, weshalb die Ausgabe fehlerhaft war.

Nachdem Flüchtigkeitsfehler berichtigt wurden waren die Ergebnisse jedoch eher unzufriedenstellend mit einer Accuracy von etwa 72% auf den Trainings- und einer Accuracy von etwa 56% auf den Testdaten. Grund dafür könnten die später als fehlerhaft herausgestellten Labels sein.

Auswertung Neben der Accuracy auf Testdaten wurde auch überprüft, wie sich das Modell auf realen Daten, in diesem Fall selbst aufgenommenen Bildern von Früchten, schlägt. Jedoch scheint die Vorhersage eher zufällig zwischen zwei Klassen (Apfel und Banane) zu wählen, welche auch zwei der am häufigsten auftretenden Klassen sind. An dieser Stelle sei gesagt, dass sich das Ergebnis sicherlich noch verbessern ließe, wenn der Prozess und das Modell auf mehrere Klassen pro Bild angepasst werden würden, jedoch wurden weitere Experimente an dieser Stelle abgebrochen, weil sich der Datensatz als teils fehlerhaft herausstellte.

Fehlerhafter Datensatz Bei einer späteren stichprobenartigen Kontrolle der Daten stellte sich heraus, dass viele der Labels falsche Daten beinhalten, so wurden Abbildung 1 korrekterweise zwei Instanzen von "good_pomegrenate"ugeschrieben, jedoch fälschlicherweise ebenfalls eine Instanz von "good_lime".



Abb. 1: Beispielbild aus dem Fruit Quality Dataset mit fehlerhaften Labels.

Der grüne Hintergrund lässt demnach auf ungründliches Labeling durch einen Menschen oder möglicherweise bereits eine künstliche Intelligenz schließen. Die Labels konnten demnach nicht für garantiert genommen werden, weshalb ein anderer Datensatz mit sicher korrekten Labels ausgewählt wurde.

Persönliche Learnings Datensätze sollten nicht nur für das Verständnis der Form der Daten vor der Verwendung analysiert werden - der Datensatz enthielt pro Bild durchaus mehr als ein Label, wurde aber behandelt als enthielte er nur eins. Sondern es sollte auch die Richtigkeit der Labels und die generelle Qualität der Daten untersucht werden, bevor aufwändiges Training gestartet wird. Zudem sollte vorsichtig mit altem Code umgegangen werden, dessen genaue Funktionalität eventuell schon nicht mehr vollständig bewusst ist, ein möglicher Weg dies zu vermeiden ist die umfassende Dokumentation des Codes.

2 Zweiter Datensatz: GTSDB

Der German Traffic Sign Detection Benchmark Datensatz wurde als logische Folgerung aus einer vorherigen Projektarbeit gewählt, in der einige Teammitglieder bereits mit dem German Traffic Sign Recognition Benchmark gearbeitet haben, der Unterschied liegt darin, dass dort bereits auf Schilder ausgeschnittene Bilder für das Training eines CNNs genutzt wurden. Die neue Aufgabe bestand also darin, herauszufinden, wo auf einem Bild Schilder zu erkennen sind, wobei es im ersten Schritt unerheblich ist, um welches Schild es sich genau handelt.

2.1 Ansätze

Da ein Modell zur Klassifizierung bereits existierte, wurde ein Ansatz gewählt, in welchem ein entworfenes und trainiertes Modell lediglich Bounding Boxes

der Schilder ergeben soll. Dafür würde zum einen HOG (Histogram of Oriented Graphs) mit einer SVM (Support Vector Machine) verwendet werden für einen "klassischeren Machine Learning Approach mithilfe der "dlibBibliothek. Zum anderen würde auch ein auf Lokalisation ausgerichtetes CNN (Convolutional Neural Network) probiert werden. Die Klassifikation würde in beiden Fällen ein nachgelagertes CNN übernehmen.

2.2 HOG und SVM

In diesem ersten Ansatz wird `dlib.simple_object_detector` aus der Bibliothek `dlib` verwendet, was eine Pipeline für einen Histogram of Oriented Gradients (HOG) basierter Sliding Window Object Detector darstellt [1], welcher eine Vorhersage mithilfe einer Support Vector Machine (SVM) macht.

Histogram of Oriented Graphs HOG ist eine Art des Preprocessings, beziehungsweise der Featureextraktion. Dabei wird ein Bild mithilfe von zwei Kernels, die ein Bild falten und somit den Informationsgehalt auf Kanten reduzieren können, und dem zusammenfassen in Bins (daher Histogram).

$$H = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

(a) Kernel für horizontale Kanten

$$V = (-1 \ 0 \ 1)$$

(b) Kernel für vertikale Kanten

Abb. 2: Einfache Kernels für die Kantenerkennung

Bei diesen Kernels lässt sich schnell erkennen, dass 2a für einen betrachteten Pixel den darüber negativ und den darunter positiv addiert, wenn also keine Kante sondern eine einfache Farbfläche vorhanden ist, ergibt sich in der Summe 0, beziehungsweise ein kleiner Wert. Wenn aber die Farbwerte stark unterschiedlich ist, ergo an dieser Stelle eine Kante existiert, so ergibt sich ein hoher Wert. Analog dazu ist der Kernel 2b für vertikale Kanten zuständig.

Zudem werden noch einige Normalisierungen vorgenommen, die hier aber der Einfachheit halber nicht weiter diskutiert werden sollen. In der Abbildung 3 sind das Ursprungsbild und das Ergebnis nach Anwenden der Kernels zu sehen.



Abb.3: Ein Bild vor und nach Anwendung der Kantenkernels (3b wurde für bessere Lesbarkeit invertiert).

Es ist gut erkennbar, dass der Informationsgehalt auf Kanten reduziert wurde. Für HOG werden die beiden Kernels separat angewendet und jeweils pro Pixel ein Vektor errechnet, der die Kanten beschreibt. Die Längen dieser Vektoren werden in einem Gitternetz über das gesamte Bild in kleineren Gruppen ihrer Richtung nach in Bins aufgeteilt. Danach werden wiederum mehrere beieinanderliegende Gruppen genommen und Stück für Stück normalisiert, um die Werte Resistenter gegen unterschiedliche Beleuchtungen zu machen [3].

Support Vector Machine Indem ein Erkennungsfenster Stück für Stück über das Bild geschoben wird, welches die minimale Größe der zu erkennenden Objekten festlegt, kann jeweils ein Ausschnitt des berechneten HOG an eine SVM gegeben werden, um zu sagen ob sich dort ein Objekt befindet oder nicht. Diese Art der Objekterkennung eignet sich für unseren Anwendungsfall, weil sämtliche Verkehrschilder auf Formen basieren. In diesem Teilschritt der Verkehrszeichenerkennung wird jedoch nicht zwischen allen verschiedenen Verkehrsschildern unterschieden, sondern sie werden aus genau diesem Grund in formähnliche Gruppen aufgeteilt. Dabei ist nicht die physische Form, sondern die optische Form relevant, ein Einbahnstraßenverbot zum Beispiel, obwohl es ebenfalls rund ist, in einer anderen Gruppe als Tempo 30".

Preprocessing Die Bilddaten liegen im .ppm Format vor, welches nicht von gängigen Multimediaprogrammen, sowie der verwendeten Bibliothek erkannt wird. Folglich wurden die Daten ins .jpg Format konvertiert.

In einer ersten Iteration wurden alle Bilder mit zugehörigen Labels in einer von der Bibliothek erkannten XML-Datei gespeichert. Nach späteren Erkenntnissen war es zudem sinnvoll, nach ähnlichen Schilderformen zu gruppieren, zum Beispiel ein Dreieck mit Spitze nach oben, Raute oder Kreis. Für jede dieser Dateien wurde zudem nur ein Teil der Daten ausgewählt, um neben einer Datei für das Training auch eine Datei für Tests zu generieren. Eine maßgebliche Limitierung des HOG+SVM Ansatzes ist zudem die Mindestgröße von Objekten.

Je nach der Anzahl von Verdopplungen der Bildgröße durch Upsampling variiert diese Größe und gültige Boxen müssen dementsprechend aus den Labels gefiltert werden.

Training Im ersten Durchlauf des Trainings wurden zufällige 80% aller Bilder des Datensatzes benutzt. Das Ergebnis lies sich sehen mit einer Precision von etwa 87%. Jedoch fiel die Performance bei weniger stark im Datensatz vertretenen Klassen deutlich schlechter mit bis zu 0% Precision aus.

In einem nächsten Durchlauf wurden die nach Formen getrennten Trainings- und Testdateien verwendet und deutlich bessere Ergebnisse in den meisten Kategorien erzielt. In Kategorien mit sehr wenig Trainingsdaten blieb die Precision jedoch bei 0%, da insgesamt aber nur zwei oder 14 passende Bilder für das Training (und dementsprechend noch weniger für Tests) verfügbar sind, sind diese Ergebnisse nicht vollständig unerwartet.

Um die Erkennung von kleineren Objekten zu verbessern, kann das Bild hochskaliert werden, jedoch stark auf Kosten des verwendeten Arbeitsspeichers. Die verwendete Bibliothek ist auf eine Weise implementiert, sodass der gesamte Trainingsdatensatz vollständig in den Arbeitsspeicher geladen und hochskaliert wird. Verwendete Hardware limitierte daher auf maximal einfache Verdopplung der Auflösung.

Validierung und Limitierungen Um die Ergebnisse manuell auf Anwendbarkeit zu überprüfen wurde eine einfache Anwendung entworfen, welche zufällige Bilder des Datensatzes lädt und alle verfügbaren Modelle anwendet. Ergebnisse mit einer Confidence über einem gesetzten Threshold werden dann mit einer Box und dem zugehörigen Label angezeigt, wie in Abbildung 4 zu sehen.



Abb. 4: Verkehrsschildlokalisierung mit HOG und SVM.

Die größte Einschränkung dieses Ansatzes ist die Geschwindigkeit des Modells. Auf durchschnittlicher Laptop-Hardware dauert eine Ausführung etwa 1,7 Sekunden - im Kontext Verkehrsschilderkennung insbesondere auf der Autobahn wäre dies kein akzeptabler Wert. Zudem haben die Modelle mit kleinen Objekten Probleme, da die Erkennungsfenster eine minimale Größe haben.

3 Lokalisierung mittels Convolutional Neural Network (CNN)

3.1 Bounding-Box-Regression

Als weiterer Ansatz für die Lokalisierung der Verkehrsschilder sollte ein CNN verwendet werden, um sämtliche Schilder effizient aus einem Bild zu extrahieren. Der erste Versuch setzte auf eine einfache Bounding-Box-Regression, bei der das Modell direkt die Koordinaten der Box vorhergesagt hat. Allerdings lernte das Netz dabei, die Box immer in die Bildmitte zu setzen, da es keine explizite Methode zur Lokalisierung hatte. Statt tatsächlich Schilder zu finden, minimierte es den durchschnittlichen Fehler, was dazu führte, dass es eine zentrale Position bevorzugte.

Dieser Effekt tritt auf, weil das Modell versucht, die Fehler über alle Trainingsbilder hinweg zu minimieren. Wenn sich Schilder an vielen verschiedenen Positionen befinden, aber keine klare Methode zur Bestimmung der genauen Position existiert, wählt das Modell eine Durchschnittsposition für seine Vorhersagen. Die Bildmitte ist oft die statistisch sicherste Wahl, weil sie den kleinsten mittleren

Fehler zu allen tatsächlichen Positionen liefert und das Modell mit dem Wert des mittleren Fehlers bestimmt wie "gut" eine Vorhersage im Training ist. Anstatt dynamisch die richtige Position für jedes Bild zu berechnen, erkennt das Modell fälschlicherweise ein Muster: Es kann den Fehler über viele Bilder hinweg reduzieren, indem es einfach immer eine Box mittig platziert, da das Training darauf abzielt, die durchschnittliche Abweichung zu minimieren. Ohne eine Möglichkeit, lokale Merkmale effektiv mit einer bestimmten Position zu verknüpfen, bleibt das Modell in diesem Muster gefangen.

3.2 Weiterer Ansatz

Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Modell basierend auf einem Faster R-CNN eingesetzt. Dieses Modell kombiniert ein klassisches CNN mit einem Mechanismus zur Objekterkennung. Anstatt direkt eine Bounding Box vorherzusagen, sucht es zunächst nach wahrscheinlichen Objektregionen und bewertet, ob dort ein Verkehrsschild vorhanden ist. Dies ermöglicht eine dynamische und adaptive Erkennung, anstatt starr eine feste Position zu wählen.

Ein wichtiger Bestandteil dieses Modells ist das Backbone, ein CNN, in unserem Fall ResNet-50, das als Feature-Extractor dient. Das Backbone verarbeitet das Bild und extrahiert wichtige Merkmale, wie Kanten und Formen, die für die Objekterkennung relevant sind. Diese abstrahierten Informationen helfen dem nachfolgenden Region Proposal Network (RPN), gezielt Bereiche zu identifizieren, in denen sich wahrscheinlich Schilder befinden.

Um diesen Ansatz umzusetzen, wurde ein Trainingsmodell mit PyTorch erstellt. Zunächst wurde ein Datensatzloader erstellt, der die Trainingsbilder aus einem Ordner lädt und die zugehörigen Bounding-Box-Koordinaten aus der Annotationsdatei einliest. Das Modell benötigt standardisierte Eingaben, daher werden alle Bilder auf eine feste Größe skaliert und die Bounding-Box-Koordinaten ebenfalls entsprechend angepasst.

Für das Modell selbst wurde ein Faster R-CNN mit ResNet-50 als Backbone genutzt und dessen Head angepasst, um die Erkennung von Verkehrsschildern als einzig relevante Klasse zu ermöglichen. Das Modell klassifiziert nur in zwei Klassen: Hintergrund und Verkehrsschild. Das Training wurde mit einer Stochastic Gradient Descent (SGD)-Optimierung durchgeführt, wodurch die Modellparameter iterativ basierend auf den Gradienten der Verlustfunktion angepasst werden. Dabei kam Mixed Precision Training zum Einsatz, um GPU-Berechnungen effizienter zu gestalten und Speicher zu sparen. Dies passiert durch den Einsatz von 16-bit und 32-bit-Floating-Point-Werten, wobei kritische Berechnungen in höherer Genauigkeit durchgeführt werden [7]. Das Training wurde über mehrere Epochen hinweg durchgeführt, wobei das Modell die Fehler reduzierte und bessere Vorhersagen lieferte. Mit 10 Epochen konnte das Modell schon zuverlässig Verkehrsschilder lokalisieren, 20 Epochen haben die Genauigkeit allerdings nur marginal verbessert.

Nach Abschluss des Trainings wurde das trainierte Modell gespeichert und kann verwendet werden, um mehrere Verkehrsschilder in einem Bild zu erkennen. Das

Modell gibt für jedes gefundene Schild eine Bounding Box mit einer Wahrscheinlichkeit aus.

4 Recognition mittels Convolutional Neural Network (CNN)

Zur Erkennung der Bildklassen/Straßenschilder wurde ein Convolutional Neural Network (CNN) implementiert. Die Architektur des Modells wurde durch eine Kombination aus grundlegendem theoretischem Verständnis der einzelnen Schichten und Trial-and-Error entwickelt. Während grundlegende Konzepte wie Faltungsschichten (Convolutional Layers), Aktivierungsfunktionen und Batch-Normalisierung bekannt waren, wurde die genaue Anordnung und Anzahl der Schichten durch einfaches Testen bestimmt. Zum trainieren, validieren und teste des Modells wurde der German Traffic Sign Recognition Benchmark (GTSRB) Datensatz genutzt, der im Vergleich zum GTSDb Datensatz schon lokalisierte Schilder enthält.

4.1 Modellarchitektur

Die Modellarchitektur wurde durch einen stumpfen Trial-and-Error Prozess entwickelt. Zwar bestand ein grundlegendes Verständnis für die einzelnen Schichten und ihre Funktion, jedoch wurde die endgültige Struktur experimentell bestimmt. Erst nachdem ein gut funktionierendes Modell gefunden war, wurde die genaue Zusammenarbeit der Schichten angeschaut und nachvollzogen. Das finale Modell besteht aus mehreren Convolutional Layers (Conv2D) mit ReLU-Aktivierung und Kernel-Regularisierung zur Merkmalsextraktion. Batch-Normalisierung stabilisiert den Trainingsprozess, während Max-Pooling-Schichten die räumlichen Dimensionen reduzieren und Overfitting entgegenwirken. Zusätzlich sorgen Dropout-Schichten für eine bessere Generalisierung. Abschließend übernimmt eine vollständig verbundene (Dense) Schicht mit Softmax-Aktivierung die Klassifikation der Eingabedaten.

4.2 Training des Modells

Die Trainingsbilder wurden zufällig um einen Winkel zwischen -10 und $+10$ Grad rotiert (`layers.RandomRotation(0.1)`). Dies soll das Modell robuster gegen leichte Drehungen und Orientationsänderungen der Verkehrsschilder machen, die in realen Szenarien auftreten können. Ein Beispiel hierfür ist in 5 zu sehen. Das Modell wurde mit der Adam-Optimierungsmethode trainiert, wobei eine Lernrate von 0.001 verwendet wurde. Zudem wurde ein Learning Rate Scheduler eingesetzt (`ReduceLROnPlateau`), um die Lernrate bei Stagnation automatisch zu reduzieren.



Abb. 5: Beispiel für zufällige Rotation der Trainingsdaten.

Die Loss-Funktion ist die kategoriale Kreuzentropie, da es sich um ein Mehrklassen-Klassifikationsproblem handelt. Um Overfitting zu vermeiden, wurden Early Stopping und Model Checkpoints verwendet. Diese hatten außerdem den Vorteil, dass das bei Bedarf bestimmte Versionen des Modells gespeichert und im Nachhinein genutzt werden konnten.

4.3 Modellbewertung

Das Modell wurde nach dem Training mit einem separaten Testdatensatz evaluiert. Dabei wurden die Genauigkeit sowie die mittlere Konfidenz der Vorhersagen betrachtet. Fehlklassifizierungen wurden ausgegeben, um mögliche Schwachstellen zu identifizieren. Neben der Gesamtperformance des Modells wurde jede Schildklasse einzeln betrachtet, um die Performance des Modells für jede Klasse bewerten zu können.

Durch die Schildklassen betrachtung zeigte sich, dass insbesondere die Kategorie der Verbotsschilder mit der markanten roten Diagonalen eine Herausforderung für das Modell darstellten. Diese Schwierigkeit ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Diagonale zwar ein starkes Unterscheidungsmerkmal darstellt, jedoch bei vielen verschiedenen Verbotsschildern vorhanden ist.

4.4 Nutzung des trainierten Modells

Das trainierte Modell wurde im .h5-Format gespeichert, einem von Keras verwendeten Format, das die Serialisierung der Modellarchitektur und der Gewichte ermöglicht. Konkret bedeutet dies, dass das .h5-File mittels `tf.keras.models.load_model()` geladen werden kann. Anschließend können Verkehrsschildbilder dem Modell zur Klassifizierung übergeben werden und das Modell gibt die vorhergesagte Klasse zurück.

4.5 Teil Fazit CNN

Die Entwicklung der CNN-Architektur folgte keinem strikt vorgegebenen Schema, sondern entstand durch schrittweises Experimentieren. Durch Anpassungen und Tests wurde eine Modellstruktur gefunden, die das gewünschte Ergebnis liefert. Die Klassifizierung des Finalen Modells war sowohl auf dem Testdatensatz als auch auf dem Output des Lokalisierungsmodells sehr gut.

5 Pipeline

5.1 Motivation

Um einen konkreten Nutzen aus den bereits erstellten Modelle ziehen zu können, soll nun eine pipeline erstellt werden, die den Prozess der Verkehrsschilderkennung abbildet.

5.2 Umsetzung

Für die Umsetzung der Pipeline mussten mithilfe des 2.2 Localization Modelles die Verkehrsschilder zuerst geortet werden. Danach wurden sie aus dem Foto ausgeschnitten und dann mit dem 4 jeweils erkannt.

5.3 Ergebnis

Die Pipeline ist nun in der Lage, mithilfe der Modelle aus einem Foto die Schilder zu erkennen. Das ergebnis wird in 6 an einem Beispiel dargestellt

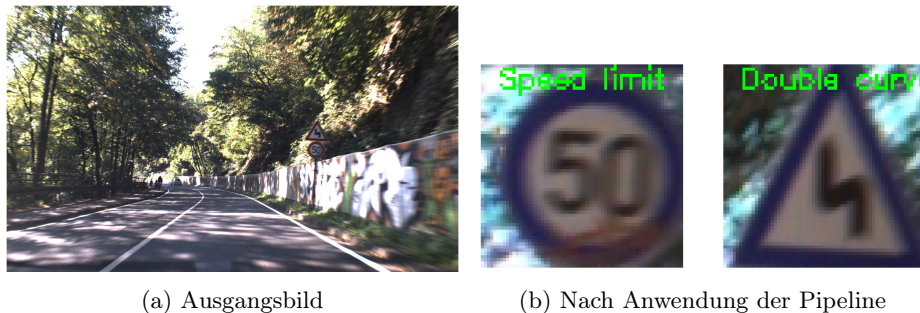


Abb. 6: Ein Ausgangsbild und die daraus erkannten Verkehrsschilder mit Label

Literatur

1. dlib Python Dokumentation, <https://dlib.net/python/index.html>, letzter Zugriff 16.02.2025

2. Fruit Quality Dataset auf Kaggle, <https://www.kaggle.com/datasets/abrar2/fruit-quality-classification-and-detection>, letzter Zugriff 15.02.2025
3. Histogram of Oriented Gradients explained using OpenCV, <https://learnopencv.com/histogram-of-oriented-gradients/>, letzter Zugriff 16.02.2025
4. A Gentle Introduction Into The Histogram Of Oriented Gradients, <https://medium.com/analytics-vidhya/a-gentle-introduction-into-the-histogram-of-oriented-gradients-fdee9ed8f2aa>, letzter Zugriff 16.02.2025
5. Marton, S.: Grundlagen der KI Foliensatz (2025)
6. YOLO Framework, <https://zenodo.org/records/7347926>, letzter Zugriff 15.02.2025
7. Mixed Precision Training, <https://docs.nvidia.com/deeplearning/performance/mixed-precision-training/index.html>, letzter Zugriff 16.02.2025