

Convolutional LSTM zur Bewegungsvorhersage von Verkehrsteilnehmern

Anwendungen der Künstlichen Intelligenz
Sommersemester 2021

Armin Straller

14. Juli 2021

Zusammenfassung

Um vorausschauendes Fahren für Autonome Fahrzeuge zu ermöglichen, ist es notwendig die Bewegungen anderer Verkehrsteilnehmer vorherzusagen. Da das Verhalten von Fußgängern, Radfahrern und Autofahrern oft auf Interaktion basiert oder von ortspezifischen Mustern abhängt, bietet es sich an ein Netzwerk mit Informationen über das Verhalten von Objekten im Straßenverkehr aufzubauen. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem solchen Netzwerk zur Bewegungsvorhersage von Verkehrsteilnehmern. Als Datengrundlage wurde der im Frühjahr 2021 veröffentlichte Waymo Open Motion Datensatz verwendet. Das entwickelte Netzwerk verwendet bildbasierte Eingangsdaten, welche eine gerasterte Darstellung der unterschiedlichen Szenarien implementiert. Ein LSTM bietet dann die Möglichkeit Daten eines vergangenen Zeitraums in Kontext zu bringen und eine bildliche Repräsentation eines zukünftigen Zustands auszugeben. Das aus der Arbeit resultierende Netzwerk ermöglicht grundlegende Vorhersagen der Bewegungsrichtung ist aber zum aktuellen Entwicklungsstand nicht für den produktiven Einsatz geeignet.

1 Problemstellung

Die Problemstellung für die entwickelte künstliche Intelligenz ist aus der Waymo Motion Prediction Challenge abgeleitet. Hierbei soll auf Basis der Verkehrsdaten aus einer vergangenen Sekunde, eine Prediktion für die folgenden acht Sekunden erfolgen. Der dafür bereitgestellte Datensatz ist das Waymo Open Motion Dataset [1]. Dieses umfasst 574 Stunden und 1750 km an Verkehrsinformation und bietet somit genug Eingangsdaten für das Training eines neuronalen Netzwerks.

1.1 Datengrundlage

Im Datensatz von Waymo sind verschiedene Informationen über die aktuelle Verkehrssituation enthalten. Diese können im Detail der `scenario.proto` Datei aus den Github Repository von Waymo Research entnommen werden. Teil des Szenarios ist auch eine Karte deren Details in der `map.proto` Datei definiert sind. [2]

Auf die für diese Arbeit wichtigen Inhalte der Szenarien wird im Kapitel über die Vorverarbeitung der Daten eingegangen.

2 Related Work und Entstehung der Projektidee

Es haben sich bereits andere Arbeiten mit der Vorhersage von Bewegungen im Straßenverkehr beschäftigt. Aufgrund der Aktualität des Waymo Datensatzes sind zu diesem allerdings noch keine Veröffentlichungen bekannt. Ein Datensatz mit ähnlichem Inhalt wurde für die Prediktion von anderen Fahrzeugen in der Arbeit von Jeong, Yonghwan verwendet. Hierbei kam ein LSTM-RNN Netzwerk zum Einsatz. [3]

Auch die Arbeit von Wu, Jingyuan beschäftigt sich mit der Bewegungsvorhersage. In diesem Fall geht es um Fußgänger und eine Karten- beziehungsweise Modellbasierte Methodik zur Vorhersage. Diese verwendet ein Raster welches die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Fußgänger darstellt. [4]

2.1 Convolutional LSTM basierte Bewegungsvorhersage

Auf Basis der aufgeführten Arbeiten und der verfügbaren Daten ist die grundlegende Idee für diese Arbeit entstanden.

Die Verkehrsinformationen werden in ein Raster eingetragen und in Bildform als Eingangsdaten für das Convolutional LSTM verwendet. Hierdurch können die Karten- und Positionsdaten der Verkehrsteilnehmer in Relation gebracht werden. Die Historie der Bewegung wird dann durch die Eingangsbreite des LSTMs dargestellt. Das Keras Beispiel “Next-Frame Video Prediction with Convolutional LSTMs“ [5] dient als Grundlage für die Umsetzung. Da das Raster nur mit begrenzter Auflösung arbeitet kann es theoretisch vorkommen, dass das autonome Fahrzeug im Szenario das Raster verlässt. Um dies zu umgehen wird ein Ansatz eine Transformation des Szenarios in die Ego-Perspektive des autonomen Fahrzeugs beinhalten. Im Folgenden wird daher von einer statischen oder dynamischen Darstellung gesprochen, wobei die dynamische Darstellung die Transformation in die Ego-Perspektive beinhaltet. Um eine Prediktion von bis zu 8 Sekunden zu ermöglichen, soll das Modell erneute Prediktionen auf Basis der bereits predizierten Bilder erstellen. Dies wird wiederholt bis der benötigte Zeithorizont abgedeckt ist. Im Folgenden wird der Begriff Convolutional LSTM durch ConvLSTM abgekürzt.

3 Vorverarbeitung der Daten

Um die Informationen aus dem Waymo Open Motion Dataset in die Darstellungsform des Rasters zu bringen sind einige Schritte notwendig. Diese werden im Folgenden erläutert.

3.1 Einlesen des Protobuf

Zunächst muss das Szenario aus dem scenario.proto Format eingelesen werden. Hierfür werden Auszüge aus dem Waymo Open Dataset Motion Tutorial [6] verwendet. Dabei werden allerdings nur die Einträge geladen die für die Rasterisierung der Objekte notwendig sind. Es werden immer alle Zeitschritte geladen und anschließend konvertiert. Dies beinhaltet die vergangenen, den aktuellen und die zukünftigen Elemente des Protobufs.

3.2 Konvertierung der Karte

Die Karteninformation ist Teil des scenario.proto und wird in Form des map.proto in jedem Szenario bereitgestellt. Ein Auszug aus der map.proto Definition der in Listing 1

dargestellt wird, zeigt die Liste und die Definition der Punkte. Hierbei ist zu beachten, dass die Punkte in Metern zu einem beliebigen Ursprung gegeben sind. Die “polyline“ definiert dann ein Feature des Straßennetzwerks (im Beispiel für den Feature Typ “LaneCenter“). Diese ist eine Liste von “MapPoints“ welche Segemente zwischen aufeinanderfolgenden Punkten definiert. Da die Auflösung der Punkte groß genug ist, werden diese direkt in das Raster übertragen. Sobald ein “MapPoint“ innerhalb eines Rasterelements liegt wird dieses entsprechend des Linientypen eingefärbt.

```

1      message LaneCenter {
2          // ...
3          repeated MapPoint polyline = 2;
4      }
5      message MapPoint {
6          optional double x = 1;
7          optional double y = 2;
8          optional double z = 3;
9      }
10

```

Listing 1: Auszug aus map.proto

Im Abbildung 1 wird die Karte aus dem Szenario 38 des Validierungsdatensatzes dargestellt. Die statische Repräsentation des Szenarios erfordert eine einmalige Konvertierung der Karte. Diese bleibt dann für den gesamten Zeitraum des Szenarios konstant.

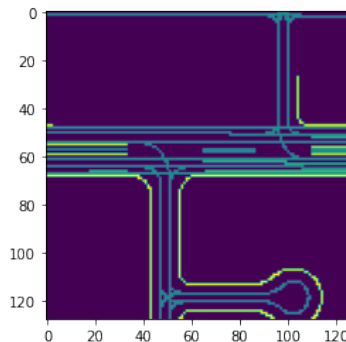


Abbildung 1: Beispiel einer in das Raster übertragenen Karte

Dynamische Darstellungsform der Karte Für den Fall der dynamischen Darstellung der Karte muss diese bei jeder Bewegung des autonomen Fahrzeugs in dessen Ego-Perspektive transformiert werden. Dadurch ergibt sich zum Beispiel bei einer Kurvenfahrt eine Rotation und Translation der Karte. Dies wird in Abbildung 2 veranschaulicht. Hier wird die Karte für die Zeitschritte -1 s also dem Start der Aufzeichnung, 0 s entsprechend dem gegenwärtigen Zeitschritt, sowie den zukünftigen Zeitschritten +1 s und +2 s dargestellt. Datengrundlage ist das zweite Szenario des Validierungsdatensatzes.

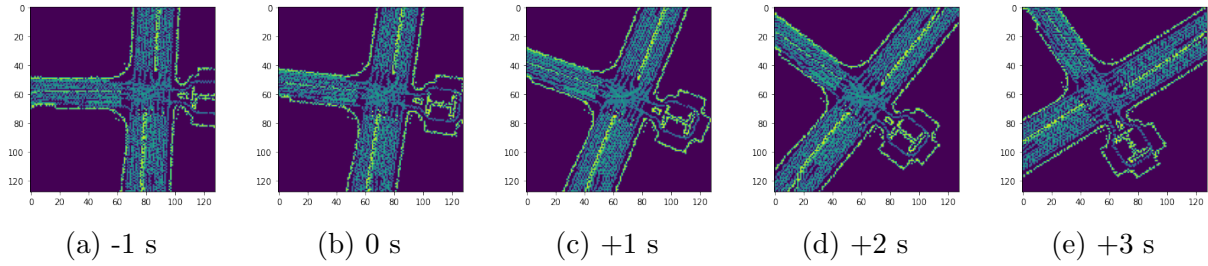


Abbildung 2: Beispiel für eine dynamische gerasterte Karte

3.3 Konvertierung der Objekte

Der Protobuf enthält Informationen über die Größe, globale Position und Orientierung der Objekte. Dadurch können die vier 2D-Eckkoordinaten der Objekte berechnet werden. Um diese in das 2D-Raster zu übertragen wird die Grundfläche der Box entlang der Diagonale in zwei Dreiecke aufgeteilt und anschließend in das Raster übertragen. Wenn Objekte kleiner als ein Rasterelement sind, werden sie auf ein ganzes Rasterelement übertragen. So kann sichergestellt werden, dass alle Objekte in der Darstellung repräsentiert werden. Die Definition der Objekte im Protobuf wird in Listing 2 aufgeführt. Das “valid“ Flag gibt an ob der aktuelle Zustand verwertbar ist. Ist dieses für einen Zeitschritt nicht wahr, wird das Objekt für den zugehörigen Schritt nicht in das Raster übertragen.

```

1      message ObjectState {
2          optional double center_x = 2;
3          optional double center_y = 3;
4          optional double center_z = 4;
5
6          optional float length = 5;
7          optional float width = 6;
8          optional float height = 7;
9
10         optional float heading = 8;
11
12         optional bool valid = 11;
13     }
14

```

Listing 2: Auszug aus scenario.proto

Im Abbildung 3 werden Ausschnitte aus dem gesamten Szenario 38 des Validierungsdatensatzes dargestellt. Die Objekte werden entsprechend ihrer globalen Position dem Raster hinzugefügt. Da bei der Erstellung der Bilder für die Einfärbung eine farbige Heatmap verwendet wird, werden stets die höchsten Werte in der hellsten Farbe dargestellt. Der Wert eines jeden Pixels wird durch eine Skalar abgebildet. Deshalb ist die Karte in Abbildung 1 auch deutlich heller eingezeichnet als in Abbildung 3.

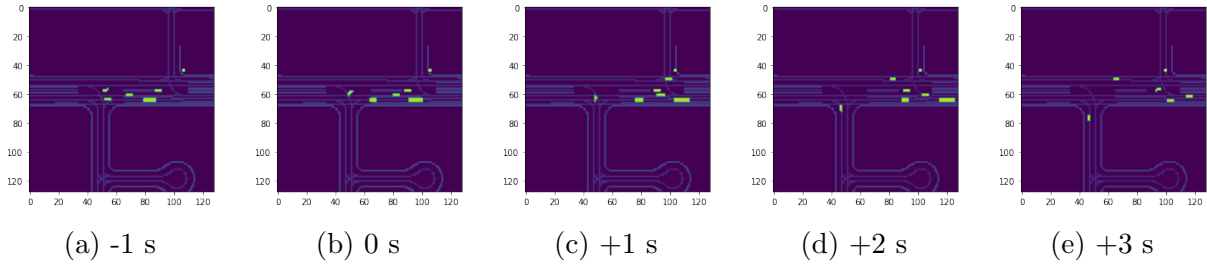


Abbildung 3: Beispiel für Objekte auf statischer Karte

Dynamische Darstellungsform für Objekte Bei der dynamischen Darstellungsform, müssen alle Objekte auf Basis der aktuellen Position des autonomen Fahrzeugs in dessen lokales Koordinatensystem transformiert werden. Die Information darüber welches Fahrzeug das autonom agierende ist, kann ebenfalls dem Protobuf entnommen werden. Die dynamische Darstellung der Objekte wird in Abbildung 4 anhand des zweiten Szenarios aus dem Validierungsdatensatz gezeigt.

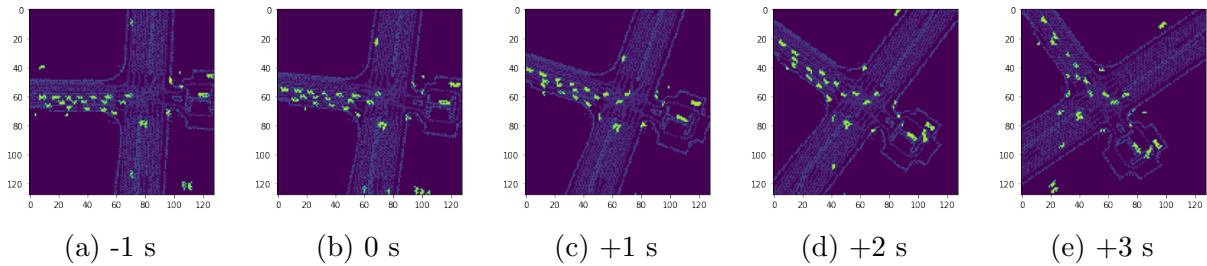


Abbildung 4: Beispiel für Objekte in dynamischer Darstellungsform

3.4 Speicherung der Trainings- und Validierungsdaten

Die konvertierten Daten werden für das Training des ConvLSTM Netzwerks in einer Ordnerstruktur abgelegt. Diese beinhaltet einen Ordner für jedes Szenario. Ordner bei denen die statische Darstellungsform verwendet wurde tragen den prefix “static“.

3.5 Probleme bei der Datengenerierung

Fehler durch Rasterisierung Die Rasterisierung führt dazu, dass Objekte nur mit der Rasterauflösung von 0.5 m positioniert sein können. Deshalb kann es vorkommen, dass Objekte von einem Zeitschritt zum nächsten um die Rasterauflösung springen. Dies führt bei einer nur geringen Bewegung, die allerdings die Grenze zum nächsten Feld des Rasters überschreitet, zu großen Fehlern. Ein weiterer Fehler bei der Rasterisierung tritt bei der Übertragung der Objekte in das Raster auf. Durch die effiziente Betrachtung als Dreiecke, kommt es vor, dass Objekte unscharfe Kanten oder Löcher erhalten.

Konvertierungszeit Durch die große Datenmenge der Protobufs und die ineffiziente Programmierung des Konvertierungsalgorithmus, benötigt dieser zwischen 150 s und 200 s für die Konvertierung eines Szenarios.

4 ConvLSTM für Bewegungsvorhersage

Das ConvLSTM bietet die Möglichkeit die Informationen auf Bildebene miteinander zu assoziieren und in einen Zeitlichen Kontext zu bringen. Aufgrund dieser Eigenschaften bietet es eine gute Grundlage für den Anwendungsfall.

4.1 Modell

Für die Erstellung des Modells wurden Tensorflow und Keras eingesetzt. Diese Bibliotheken bieten die Möglichkeit mit einfachen Interfaces komplexe Funktionalitäten umzusetzen.

4.1.1 Architektur

Das Netzwerk folgt der Architektur die in Listing 3 dargestellt ist. Es besteht aus mehreren ConvLSTM Layern die über eine jeweils kleiner werdende Fenstergröße verfügen. Um die Generalisierung des Netzwerks zu verbessern und geringere Trainingszeiten zu erreichen werden Normalisierungs Layers eingefügt. Die Netzwerkarchitektur wurde Aufgrund der guten Ergebnisse, die im Beispiel von Keras [5] erzielt wurden, gewählt.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv_lstm2d (ConvLSTM2D)	(None, 10, 128, 128, 128)	1651712
batch_normalization (Batch Normalization)	(None, 10, 128, 128, 128)	512
conv_lstm2d_1 (ConvLSTM2D)	(None, 10, 128, 128, 128)	1180160
batch_normalization_1 (Batch Normalization)	(None, 10, 128, 128, 128)	512
conv_lstm2d_2 (ConvLSTM2D)	(None, 10, 128, 128, 128)	131584
batch_normalization_2 (Batch Normalization)	(None, 10, 128, 128, 128)	512
conv3d (Conv3D)	(None, 10, 128, 128, 1)	3457
Total params: 2,968,449		
Trainable params: 2,967,681		
Non-trainable params: 768		

Listing 3: Ausgabe des model.summary() Aufrufs

Insgesamt beinhaltet das Modell 2967681 trainierbare Parameter. Auf dem System welches zum Training verwendet werden soll werden diese Parameter durch float32 repräsentiert welcher 4 Byte im Speicher benötigt. Dies führt auf Basis der Berechnung in Formel 1 zu einem Speicherbedarf von 11.87 GB.

$$2967681 \cdot 4 \text{ Bytes} = 11.87 \text{ GB} \quad (1)$$

4.2 Training

Beim Training wurde zunächst die dynamische Darstellungsform der Szenarien verwendet. Diese lieferte allerdings transformierte und rotierte Bilder bei denen für eine erneute Prediktion die Transformation und Rotation bestimmt werden musste. Um diesen Prozess zu vereinfachen, wurde das Training auf die statische Darstellungsform umgestellt. Das Modell das für die Prediktion der Ergebnisse in Kapitel 5 eingesetzt wurde ausschließlich mit 1000 Ausschnitten am Anfang der Szenarien trainiert. Auch hierbei kam es schon zu einer gesamten Trainingszeit von einem Tag und 17 Stunden.

4.2.1 Spezifische Loss-Funktion

Da die Trainingsbilddaten viele Bereiche enthalten die für die Performance des Netzwerks nicht relevant sind, wurde eine für das Netzwerk zugeschnittene Loss funktion implementiert. Diese analysiert den Mean-Squared Error in verschiedenen Bereichen des predizierten Bildes.

Zukünftige Aufenthaltsorte von Objekten Hier wird der Mean-Squared Error für die Pixel in denen sich das Objekt aufhalten sollte berechnet. Dieser wird mit einem Verhältnis von 80 % gewichtet.

Hintergrund und Karte Über den Rest des Bildes wird ebenfalls ein Mean-Squared Error Wert berechnet. Dies ist notwendig, da das Netzwerk sonst das gesamte Bild in Objektfarbe einfärben würde und dadurch eine hohe Genauigkeit erreicht. Der Wert wird dann mit 20 % gewichtet.

4.2.2 Generierung der Trainingsdaten zur Laufzeit

Um das Training mit der gesamten Menge der Szenariodaten auf einer Plattform mit beschränkten Ressourcen zu ermöglichen wurde ein Generator für Trainingsdaten implementiert. Dieser verwendet eine Datenstruktur die auf Dateipfaden basiert. Deren Inhalte werden dann immer erst zur Laufzeit in den Arbeitsspeicher geladen.

4.2.3 Gradient Accumulation

Zudem wurde das Prinzip der Gradient Accumulation eingesetzt um den auf der Grafikkarte benötigten Speicherplatz zu reduzieren. Hierbei werden die Batches die zum Training verwendet werden aufgeteilt. Diese werden dann nacheinander zum Training verwendet. Der resultierende Gradient wird dann im Anschluss akkumuliert. Dadurch entsteht beim Training der gleiche Effekt wie bei größeren Batch Größen. Der Speicherbedarf bleibt jedoch konstant klein. [7]

5 Ergebnisse

Der Ansatz ein ConvLSTM für die Bewegungsvorhersage einzusetzen zeigt erste vielversprechende Ergebnisse. Alle Prediktionen von Abbildung 5 bis Abbildung 7 dienen der Veranschaulichung der Performance des ConvLSTMs. Besser sichtbar sind diese jedoch in Form von Animationen. Diese können im beigefügten Jupyter Notebook `inference.ipynb` erzeugt werden. Hierbei wird die Datenkonvertierung und das Training nicht mehr durchgeführt. Das Trainierte Modell wird aus einem alten Trainingsstand geladen.

Für die Erstellung der Prediktionen wurde das Trainierte ConvLSTM verwendet. Für Prediktionen die über 100 ms hinaus gehen, wurde das Ergebnis als jeweils 10tes Bild wieder in das Netzwerk eingespeist.

Auf den folgenden Seiten werden einzelne Szenarien dargestellt und die Ergebnisse erläutert.

5.1 Szenario mit geringer Dichte an Objekten

In Szenarien mit geringer Fahrzeugdichte passen die Ausgaben des Modells grundlegend zu den Referenzdaten des Validierungsdatensatzes. Dies ist im folgenden Beispiel erkennbar. Besonders in Abbildung 5 bei +1 s ist gut zu sehen wie die Bewegung der drei größeren Objekte weiter prediziert wurde.

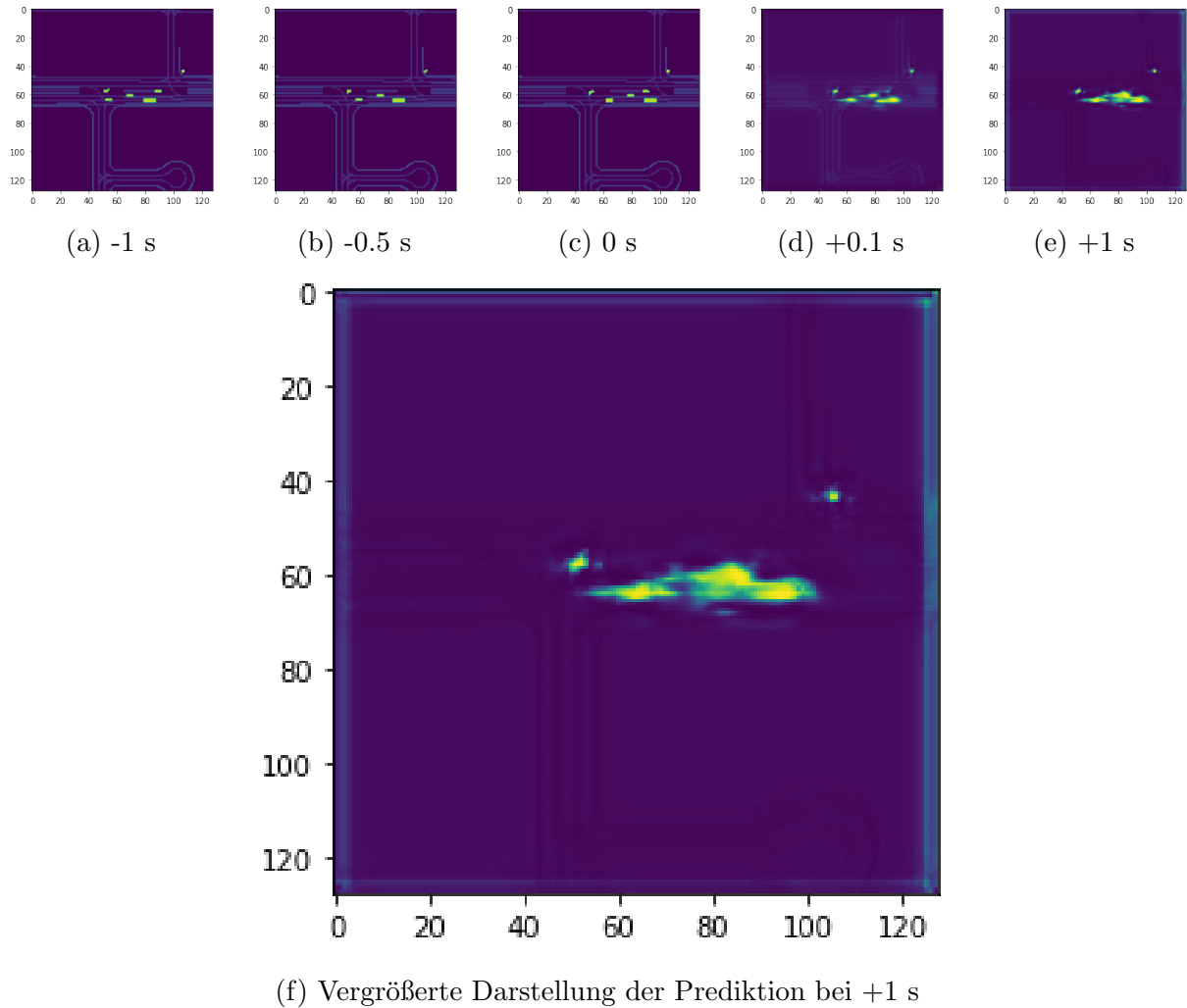


Abbildung 5: Beispiel für Szenario mit geringer Objektdichte

5.2 Komplexes Szenario mit unterschiedlichen Bewegungsrichtungen

Für den Fall eines komplexeren Szenarios mit vielen Objekten, unterschiedlichen Fahrtrichtungen und komplexeren Kartensituationen, liefert das Modell unzuverlässige Ergebnisse. In der Abbildung 6 werden alle Objekte in die gleiche Richtung prediziert. Dies ist für die in der Abbildung oben liegende Fahrspur falsch.

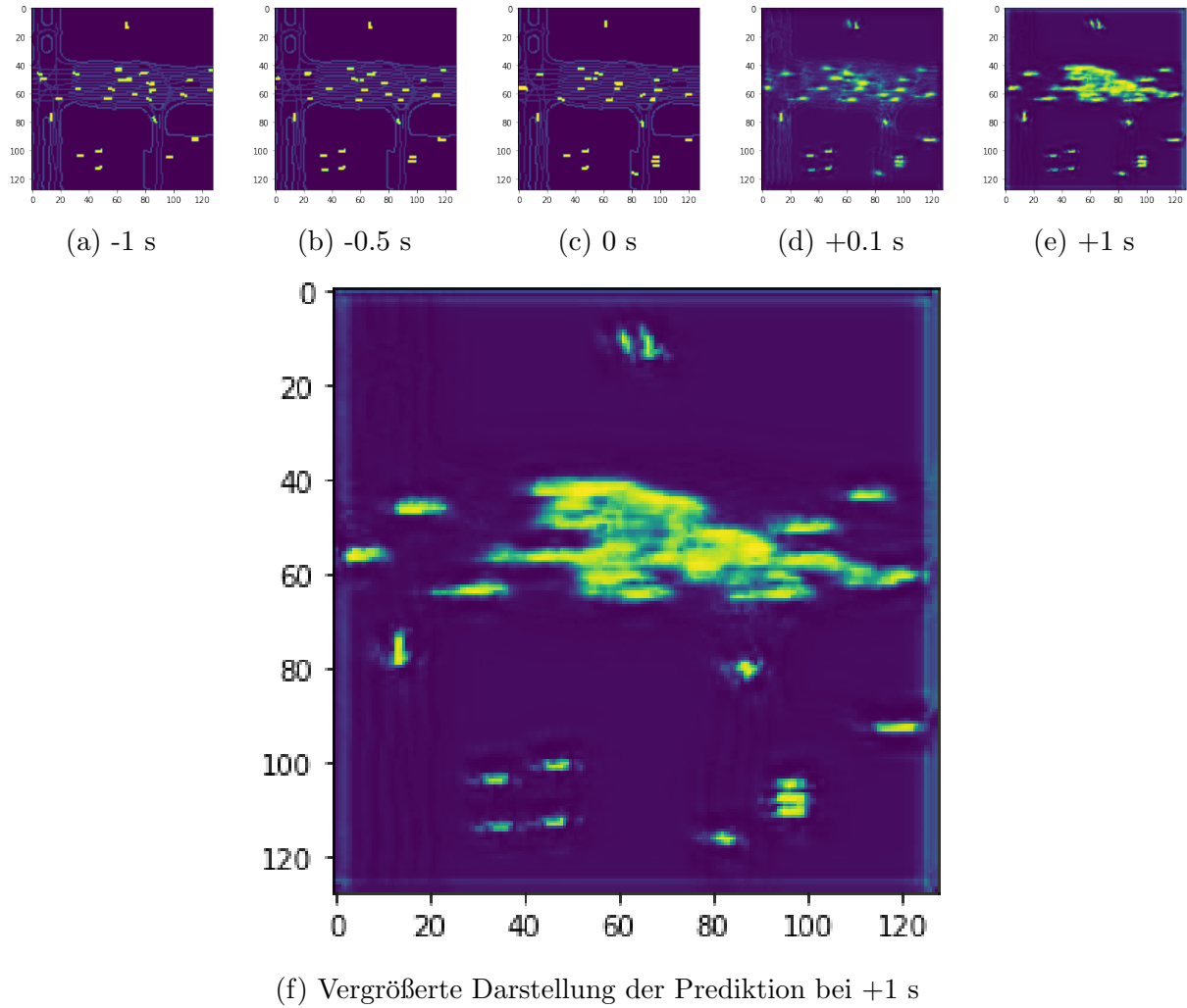


Abbildung 6: Beispiel für komplexes Szenario mit Gegenverkehr

5.3 Szenario mit statischem Hindernis am Straßenrand

Ein Beispiel bei dem bessere Ergebnisse erzielt wurden ist das folgende Szenario bei dem die Fahrzeuge für ein statisches Hindernis am Straßenrand verzögern müssen. Hier liegen die Prediktionen relativ nah an den Referenzdaten. In Abbildung 7 wird zudem ersichtlich, dass die predizierte Positionsänderung der Objekte nicht für das gesamte Ausgangsbild gleich ist. Objekte die zu Beginn des Szenarios schneller sind, bewegen sich weiter als Objekte die bereits langsam starten und innerhalb des predizierten Zeitraumes zum Stillstand kommen.

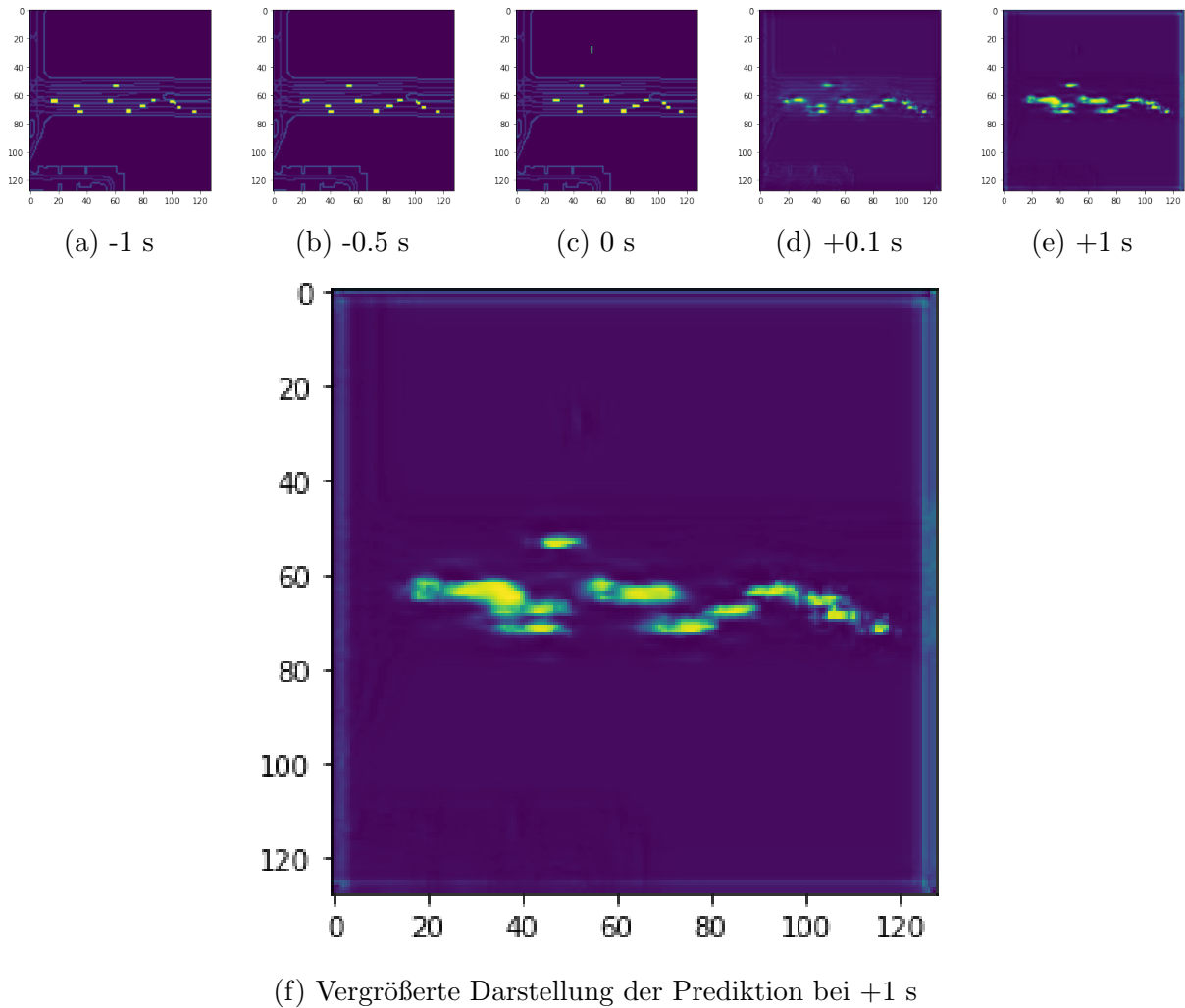


Abbildung 7: Beispiel für Szenario mit Geschwindigkeitsdifferenz

5.4 Beobachtete Probleme bei der Prediktion

Folgende Probleme wurden bei der Prediktion in Kombination mit der Datenaufbereitung festgestellt.

Probleme durch nichtlineare Einfärbung bei Rasterisierung Da bei der Datenverarbeitung eine nichtlineare Funktion zum Einfärben der Objekte und Kartendaten verwendet wurde, unterscheiden sich die Trainingsdaten zum Teil stark in der Intensität. Dies führt dazu, dass das Decoding der Bildinformationen in Positionsdaten auf Basis von klassischer Bildverarbeitung nur aufwändig möglich ist. Daher kann im Rahmen des Projekts keine aussagekräftige Auswertung über die Genauigkeit der Prediktionen erfolgen.

Durch inkonsequente Einfärbung der Trainingsdaten ist es zudem nicht möglich die Daten aufzubereiten und mehrfache Prediktionen durchzuführen. Hierdurch sollte ursprünglich eine gesamte Vorausschau von 8 Sekunden erreicht werden.

Verbesserungsmöglichkeiten bei der spezifischen Loss-Funktion Die Kartendaten hinterlassen Fragmente bei der Vorhersage. Diese können vermutlich durch die Bearbeitung der Loss-Funktion beeinflusst und reduziert werden.

Training mit längeren Zeitabschnitten Aufgrund der limitierten Hardwareleistung wurden nur beim Training mit dem ersten Zeitschritt der 1000 Szenarios verwertbare Ergebnisse erzielt. Bei einem Training mit allen Zeitschritten der 1000 Szenarios ist zu erwarten, dass bessere Ergebnisse erzielt werden können.

5.5 Lessons Learned und Future Work

- Gradient Accumulation ermöglicht den Speicherbedarf für Zwischenergebnisse auf der GPU zu verringern.
- Der Rechenaufwand für die Rasterisierung der Daten, sowie der benötigte Speicherbedarf für ConvLSTMs sollte nicht unterschätzt werden.
- Die Inference Zeit ist deutlich schlechter als bei einer Bild-Klassifikation. Dies liegt an der Größe des Netzwerks und der Menge der Eingangsdaten. Dies sollte für die praktische Verwendbarkeit des ConvLSTM und Rasterisierungs Ansatzes berücksichtigt werden.
- Durch geringer Objektdichte könnten Objekte besser unterschieden und unabhängig voneinander prediziert werden. Daher sollte die Performance auch bei einer höheren Auflösung des Rasters besser werden. Dies führt allerdings zu einer geringeren betrachtbaren Kartengröße oder zu einem größeren und langsameren Netzwerk.

Literatur

- [1] S. Ettinger, S. Cheng, B. Caine, C. Liu, H. Zhao, S. Pradhan, Y. Chai, B. Sapp, C. Qi, Y. Zhou, Z. Yang, A. Chouard, P. Sun, J. Ngiam, V. Vasudevan, A. McCauley, J. Shlens, and D. Anguelov, “Large scale interactive motion forecasting for autonomous driving : The waymo open motion dataset,” 2021.
- [2] Waymo-Research, “Waymo-open-dataset/protos.” https://github.com/waymo-research/waymo-open-dataset/tree/master/waymo_open_dataset/protos [2021-07-13], 2021.
- [3] Y. Jeong, S. Kim, and K. Yi, “Surround vehicle motion prediction using lstm-rnn for motion planning of autonomous vehicles at multi-lane turn intersections,” *IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems*, vol. 1, pp. 2–14, 2020.
- [4] J. Wu, J. Ruenz, and M. Althoff, “Probabilistic map-based pedestrian motion prediction taking traffic participants into consideration,” in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1285–1292, 2018.
- [5] A. Joshi, “Next-frame video prediction with convolutional lstms.” https://keras.io/examples/vision/conv_lstm/ [2021-07-13], 2021.
- [6] Waymo-Research, “Waymo open dataset motion tutorial.” https://github.com/waymo-research/waymo-open-dataset/blob/master/tutorial/tutorial_motion.ipynb [2021-07-13], 2021.
- [7] R. Haleva, “What is gradient accumulation in deep learning?.” <https://towardsdatascience.com/what-is-gradient-accumulation-in-deep-learning-ec034122cfa> [2021-07-13], 2021.