

Auswertungsbericht

Projekt 1

Kreuzungswarner

FSB4

Florian Alles: 777715

Severin Amann: 777251

Gabriel Panic: 771601

Fabian Wenz: 777500

Betreuer Professor:

Prof. Dr. Rer. Nat. Gunther Schaaf

Projektzeitraum:
Sommersemester 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Abbildungsverzeichnis	3
2	Tabellenverzeichnis	3
3	Einleitung	4
4	Aufbau	5
4.1	Aufbau der Simulationsumgebung in Simulink	5
4.1.1	Fahrzeugdaten des EGO-Fahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer	5
4.1.2	Sensor A	5
4.1.3	Sensor B	5
4.1.4	Sensor Data Fusion	6
4.1.5	Fahrerassistenzfunktion (FAF)	6
4.1.6	Aktor-Bremse	6
4.1.7	Fahrdynamik	6
4.1.8	Digitale Karteninformationen	6
4.1.9	Daten des Wetters	6
4.1.10	Visualisierung	6
4.2	Logik-Aufbau der Fahrerassistenzfunktion	7
4.3	Aufbau der Visualisierung	8
4.3.1	Kreuzungssituation	8
4.3.2	Human-Machine Interface (HMI)	9
4.4	Einstellen von Parametern	10
4.4.1	Parameterskript	10
4.4.2	Graphical User Interface (GUI)	10
5	Auswertung	12
5.1	Auswertung Kreuzungsreihenfolge	13
5.1.1	Diagramme	13
5.1.2	Interpretation	15
5.2	Auswertung trockene Fahrbahn:	16
5.2.1	Diagramme	16
5.2.2	Interpretation	18
5.3	Vergleich mit nasser Fahrbahn	19
5.3.1	Diagramme	19
5.3.2	Interpretation	21
5.4	Auswertung einer reale Kamera	22
6	Fazit	23
7	Erweiterungsmöglichkeiten	25
8	Quellenverzeichnis	25

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Blockschaltbild des Projekts	5
Abbildung 2 - Visualisierung der Simulationsumgebung (FZGs und Kreuzung)	8
Abbildung 3 - Visualisierung des HMI mit jeder Art von Meldung	9
Abbildung 4 – Simulations-GUI	10
Abbildung 5 - Auswertungs - GUI	11
Abbildung 6 - Auswertung Vorsprung Fzg, 50 kmh, trocken	13
Abbildung 7 - Auswertung Vorsprung EGO, 50 kmh, trocken	14
Abbildung 8 - Auswertung 50 kmh, trocken	14
Abbildung 9 - Auswertung 30 km/h, trocken	16
Abbildung 10 - Auswertung 50 km/h, trocken	16
Abbildung 11 - Auswertung 70 km/h, trocken	17
Abbildung 12 - Auswertung 100 km/h, trocken	17
Abbildung 13 - Auswertung 30 km/h, nass	19
Abbildung 14 - Auswertung 50 km/h, nass	19
Abbildung 15 - Auswertung 70 km/h, nass	20
Abbildung 16 - Auswertung 100 km/h, nass	20

2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Startpositionen der Auswertung Kreuzungsreihenfolge	13
Tabelle 2 – Auswertung der verschiedenen Startpositionen	15
Tabelle 3 - Auswertungsdaten, trocken	18
Tabelle 4 - Auswertungsdaten, trocken	21
Tabelle 5 - Auswertungsdaten, nass	21
Tabelle 6 - Auswertungsdaten, 100 Grad, alle Geschwindigkeiten	22

3 Einleitung

Die zunehmende Automatisierung von Fahrerassistenzsystemen spielt eine entscheidende Rolle in der Verbesserung der Verkehrssicherheit, insbesondere in komplexen Verkehrssituationen wie Kreuzungen. Hier treten häufig unübersichtliche Verkehrslagen, unklare Vorfahrtsverhältnisse und menschliches Fehlverhalten auf, die zu schwerwiegenden Unfällen führen können.

Im Rahmen eines semesterbegleitenden Projekts im vierten Semester des Bachelorstudiengangs Fahrzeugsysteme an der Hochschule Esslingen, haben wir ein Kreuzungsassistenzsystem mit einer Simulationsumgebung in MATLAB/Simulink entwickelt. Ziel dieses Projekts war es, das Verkehrsgeschehen an Kreuzungen zu simulieren und auf dieser Grundlage eine Funktion zu entwickeln, die Fahrer in solchen Verkehrssituationen unterstützt und somit Kollisionen vermeidet.

Das entwickelte System erkennt potenzielle Gefahren frühzeitig und reagiert mit einer abgestuften Eingriffsstrategie. Es warnt den Fahrer bei drohender Gefahr, leitet bei Bedarf automatische Bremsmanöver und bei Kollisionsgefahr passive/aktive Sicherheitsmaßnahmen ein.

Die Implementierung erfolgte vollständig in MATLAB/Simulink, wobei der Fokus auf der Entwicklung einer allgemeinen Kreuzungswarnfunktion lag, die von der Hochschule weiterverwendet werden kann. Zusätzlich wurde das Systemverhalten in verschiedenen kritischen Szenarien simuliert und anschließend ausgewertet.

In der nachfolgenden Auswertung wird der erforderliche Öffnungswinkel von Sensoren untersucht, die es dem Kreuzungsassistenten ermöglichen, rechtzeitig in verschiedene Szenarien einzutreten und Kollisionen zu verhindern.

4 Aufbau

4.1 Aufbau der Simulationsumgebung in Simulink

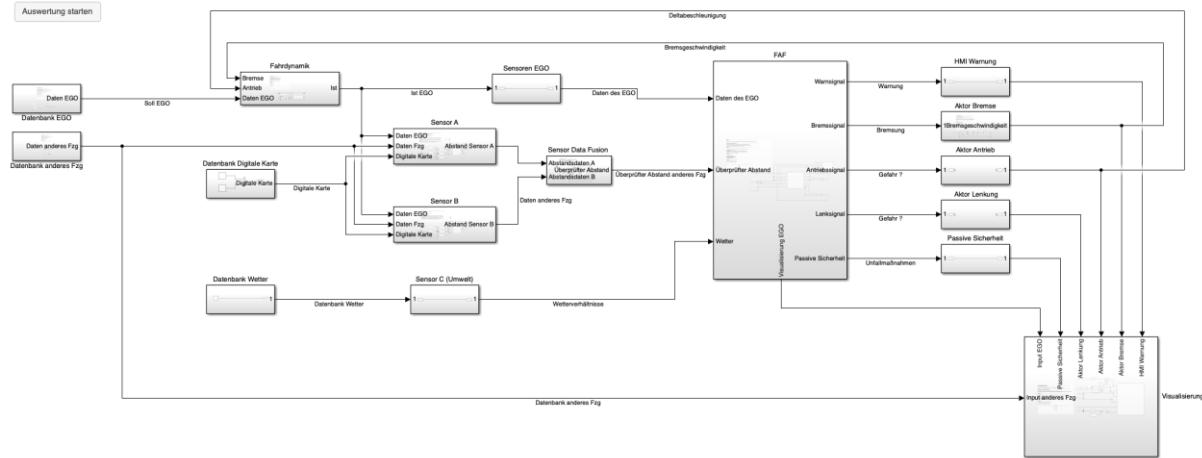


Abbildung 1 - Blockschaltbild des Projekts

Abbildung 1 zeigt das Blockschaltbild des Gesamtsystems. Die Struktur des Projekts basiert auf einer modularen Architektur, bestehend aus mehreren Subsystemen, die jeweils spezifische Funktionen übernehmen. Mit diesen Subsystemen werden unter anderem die folgenden Funktionen realisiert:

4.1.1 Fahrzeugdaten des EGO-Fahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer

In diesen Subsystemen werden die beiden am Verkehrsgeschehen beteiligten Fahrzeuge durch relevante fahrzeugspezifische Parameter beschrieben. Dazu zählen die Antriebsleistung, die Fahrzeuggmasse sowie die Vorgabegeschwindigkeit. Diese Kenngrößen dienen als Grundlage für die realitätsnahe Abbildung des Fahrverhaltens innerhalb der Simulationsumgebung und können individuell bearbeitet werden.

4.1.2 Sensor A

Für Sensor A stehen drei unterschiedliche Konfigurationsoptionen zur Verfügung, die jeweils verschiedene Sensormodelle repräsentieren:

God-Sensor: Ein idealisierter Sensortyp mit vollständiger Umfelderkennung, die sämtlichen relevanten Informationen ohne Einschränkungen bereitstellt.

C2X-Sensor: Ein Sensor mit großem, kreisförmigem Erfassungsbereich, basierend auf Car-to-X-Kommunikation. Aufgrund der umfassenden Reichweite ist bei Verwendung dieses Sensors davon auszugehen, dass Kollisionen zuverlässig verhindert werden können.

Keine Sensorik: In dieser Einstellung ist Sensor A deaktiviert. Dies ermöglicht eine isolierte Betrachtung von Sensor B, um dessen Wirkung unabhängig von Sensor A zu analysieren.

4.1.3 Sensor B

Für Sensor B stehen ebenfalls drei unterschiedliche Konfigurationsoptionen zur Verfügung, die jeweils verschiedene Sensormodelle repräsentieren:

Radar-Sensor: Dieser Sensor verfügt über ein kegelförmiges Sichtfeld, welches durch einen Öffnungswinkel und eine definierte Reichweite beschrieben wird. In der späteren Auswertung

ist insbesondere von Interesse, wie sich diese Parameter auf das Verhindern von Kollisionen auswirken.

Kamera: Die Kamera basiert auf dem gleichen Funktionsprinzip wie der Radar-Sensor und wird ebenfalls über einen Öffnungswinkel und eine Reichweite definiert. Auch hier steht im Fokus, wie sich diese Parameter auf das Verhindern von Kollisionen auswirken.

Keine Sensorik: In dieser Einstellung ist Sensor B deaktiviert. Dies ermöglicht eine isolierte Betrachtung von Sensor A, um dessen Wirkung unabhängig von Sensor B zu analysieren.

4.1.4 Sensor Data Fusion

Im Subsystem Sensor Data Fusion erfolgt die Verarbeitung und logische Verknüpfung der Sensordaten von Sensor A und Sensor B. Dabei werden insbesondere die Parameter Distanz und Relevanz beider Sensoren zusammengeführt. Das Ziel dieser Datenfusion ist es, eine verlässliche, überprüfte Distanzinformation zu generieren, die auf der Kombination beider Eingangssignale sowie deren Relevanzeinschätzung basiert.

4.1.5 Fahrerassistenzfunktion (FAF)

Das Subsystem Fahrerassistenzfunktion (FAF) bildet das zentrale Entscheidungselement des Kreuzungsassistenzsystems. Basierend auf verschiedenen Eingangsdaten (zum Beispiel der überprüften Distanz aus der Sensorfusion) berechnet es geeignete Reaktionen des EGO-Fahrzeugs (Siehe 4.2).

4.1.6 Aktor-Bremse

Wird ein Bremssignal übermittelt, berechnet man hier eine negative Bremsgeschwindigkeit, welche dann mit einer realistischen Totzeit erweitert und daraufhin weitergegeben wird.

4.1.7 Fahrdynamik

Dieses Subsystem verrechnet die Vorgabegeschwindigkeit aus den EGO-Fahrzeugdaten und die negative Bremsgeschwindigkeit aus dem Aktor-Bremse-Subsystem. Nach erfolgreichem Bremsen berechnet dieses Subsystem nun auch die Anfahrbeschleunigung.

4.1.8 Digitale Karteninformationen

Dieses Subsystem stellt dem EGO-Fahrzeug die relevanten Koordinaten der Kreuzung zur Verfügung, auf die es aktuell zufährt. Diese Positionsdaten sind essenziell für die Relevanzprüfung der Sensorik. Anhand der Kreuzungskoordinaten kann überprüft werden, ob eine potenzielle Kollisionsgefahr besteht. Zum Beispiel, ob sich beide Fahrzeuge überhaupt innerhalb des relevanten Kreuzungsbereichs befinden oder ein Fahrzeug die Kreuzung bereits vollständig passiert hat.

4.1.9 Daten des Wetters

Die Daten des Wetters sind wichtig für die Berechnung des Bremswegs innerhalb der Fahrerassistenzfunktion, da sich der Reibwert μ mit dem Wetter ändert. In unserer Simulation gibt es drei Situationen: es ist trocken, es regnet oder es schneit.

4.1.10 Visualisierung

In der Visualisierung werden die wichtigen Daten der Simulation grafisch über zwei Figures dargestellt.

4.2 Logik-Aufbau der Fahrerassistenzfunktion

In der Logik der Fahrerassistenzfunktion werden je nach Gefährdungsgrad abgestuft Maßnahmen ergriffen.

Gefährdungsgrade:

1. Warnsignal:

$$0 \geq Abstand - 3 \cdot Bremsweg$$

bei Geschw. unter 8 m/s (ca. 30 km/h)

$$0 \geq Abstand - 6 \cdot Bremsweg$$

2. Bremssignal:

$$0 \geq Abstand - 2 \cdot Bremsweg$$

bei Geschw. unter 8 m/s (ca. 30 km/h)

$$0 \geq Abstand - 4 \cdot Bremsweg$$

3. Passivesicherheit:

$$Auslösezeit \geq \frac{Abstand}{Geschwindigkeit}$$

4. Airbag:

$$Airbagzeit \geq \frac{Abstand}{Geschwindigkeit}$$

4.3 Aufbau der Visualisierung

In dem Subsystem Visualisierung werden zwei Figures erzeugt: Die Kreuzungssituation und ein Human-Machine Interface (HMI).

4.3.1 Kreuzungssituation

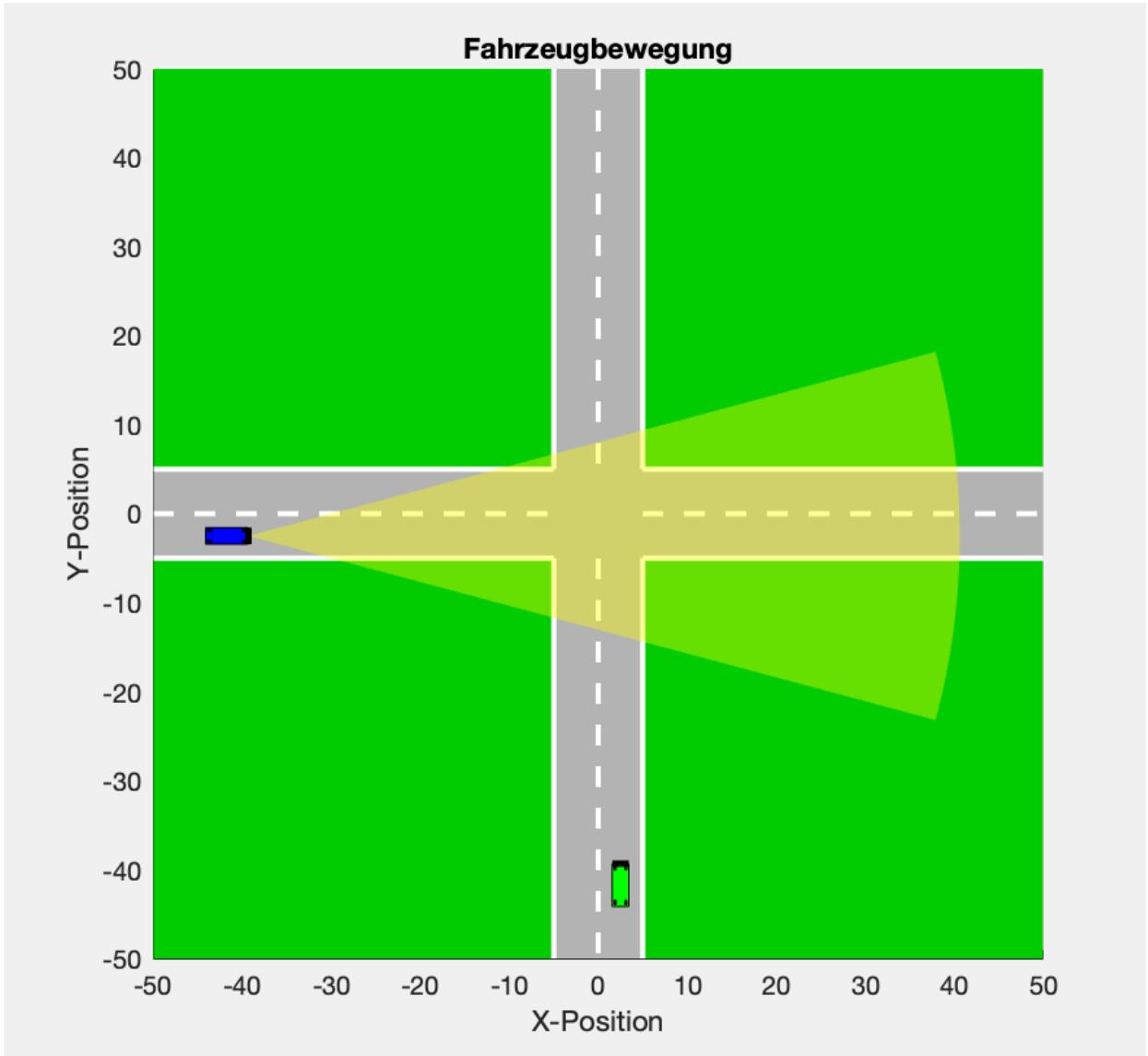


Abbildung 2 - Visualisierung der Simulationsumgebung (FZGs und Kreuzung)

Abbildung 2 zeigt die Figure 1 der Visualisierung, die simulierte Kreuzungssituation. In der Darstellung sind zwei Fahrzeuge enthalten. Das EGO-Fahrzeug, das mit dem Kreuzungsassistenten ausgestattet ist, nähert sich der Kreuzung von links. Das zweite (grüne) Fahrzeug, das am Verkehrsgeschehen beteiligt ist, bewegt sich von unten auf die Kreuzung zu. Der gelbe Kegel, der vom EGO-Fahrzeug ausgeht, repräsentiert das Sichtfeld von Sensor B (Radar/Kamera). Das Sichtfeld von Sensor A (God Sensor/C2X) wird in der Visualisierung nicht dargestellt, da es die gesamte Ansicht überdecken würde. Es kann jedoch bei Bedarf im Visualisierungs-Subsystem aktiviert werden.

4.3.2 Human-Machine Interface (HMI)

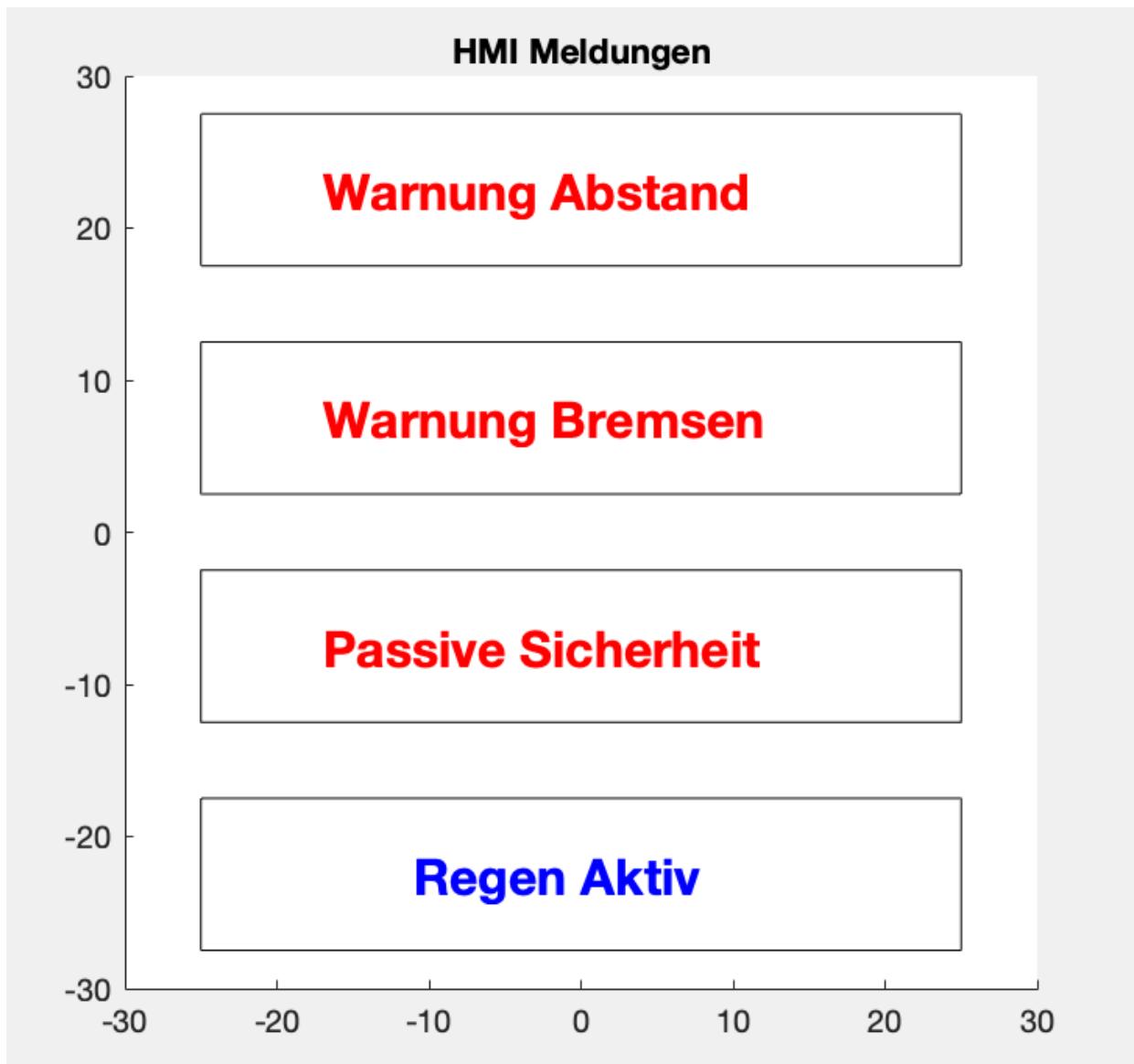


Abbildung 3 - Visualisierung des HMI mit jeder Art von Meldung

Abbildung 3 zeigt Figure 2 der Visualisierung, HMI. In dieser Darstellung werden einerseits die für die Simulation eingestellten Wetterbedingungen angezeigt, andererseits die vom Fahrerassistenzsystem berechneten Reaktionen des Fahrzeugs.

4.4 Einstellen von Parametern

4.4.1 Parameterskript

Um einem „single-source“ Anspruch gerecht zu werden, wird vor dem Start der Simulation ein zentrales Parameter-Skript aufgerufen. In diesem Skript sind die Werte für Variablen hinterlegt, die in mehreren Subsystemen verwendet werden. Dadurch können Änderungen zentral vorgenommen werden, ohne dass eine manuelle Anpassung in jedem einzelnen Subsystem erforderlich ist.

4.4.2 Graphical User Interface (GUI)

Zusätzlich gibt es zwei GUIs. Eine Simualtions- und eine Auswertungs-GUI. In der Simulations-GUI kann man folgende Einstellungen vornehmen und anschließend eine einmalige Simulation starten:

- Simulations Daten
- Sensor-Daten
- Wetterbedingungen
- Auswahl eines Szenarios
- Fzg-Daten einstellen

The screenshot displays the 'Allgemeine Simulation' (General Simulation) interface. It consists of several sections for setting parameters:

- Allgemeine Simulation:** Contains fields for Startposition EGO [m] (-50), Startposition Fzg [m] (-50), Sample Time [s] (0.03), and Stop Time [s] (8).
- Szenarienauswahl:** Shows a dropdown menu set to 'Trocken, 30 km/h (beide Fzg)'.
- Fahrzeugdaten EGO:** Includes fields for Masse [kg] (1500), Leistung [kW] (100), and Startgeschwindigkeit [km/h] (30).
- Fahrzeugdaten anderes Fzg:** Includes fields for Masse [kg] (1500), Leistung [kW] (110), and Startgeschwindigkeit [km/h] (30).
- Sensorparameter:** Lists Sensor A Typ (C2X), Sensor B Typ (Radar), Öffnungswinkel A [deg] (360), Öffnungswinkel B [deg] (30), Reichweite A [m] (500), and Reichweite B [m] (80).
- Wetterbedingungen:** Shows a dropdown menu set to 'Trocken'.

A large button at the bottom center reads 'Parameter setzen und Simulation starten' (Set parameters and start simulation).

Abbildung 4 – Simulations-GUI

In der Auswertungs-GUI kann man folgende Einstellungen vornehmen. Anschließend wird die Simulation mit der eingestellten Schrittweite durchgegangen. Der Startwinkel liegt bei 10° und der Endwinkel bei 90° . Folgende Einstellungen kann man tätigen:

- Simulations Daten
- Sensor-Daten
- Wetterbedingungen
- Schrittweite
- Auswahl eines Szenarios
- Fzg-Daten einstellen

The screenshot displays the Evaluation GUI interface with several configuration sections:

- Allgemeine Simulation** (General Simulation):
 - Startposition EGO [m]: -50
 - Startposition Fzg [m]: -50
 - Sample Time [s]: 0.03
 - Stop Time [s]: 8
- Auswertung** (Evaluation):
 - Schrittweite des Winkels [°]: 80
- Szenarienauswahl** (Scenario Selection):
 - Szenarien: Trocken, 30 km/h (beide Fzg) (selected)
- Sensorparameter** (Sensor Parameters):
 - Sensor A Typ: C2X
 - Sensor B Typ: Radar
 - Öffnungswinkel A [deg]: 360
 - Öffnungswinkel B [deg]: 30
 - Reichweite A [m]: 500
 - Reichweite B [m]: 80
- Fahrzeugdaten EGO** (Vehicle Data EGO):
 - Masse [kg]: 1500
 - Leistung [kW]: 100
 - Startgeschwindigkeit [km/h]: 30
- Fahrzeugdaten anderes Fzg** (Vehicle Data other vehicle):
 - Masse [kg]: 1500
 - Leistung [kW]: 110
 - Startgeschwindigkeit [km/h]: 30
- Wetterbedingungen** (Weather Conditions):
 - Wetter: Trocken (selected)

Auswertung starten

Abbildung 5 - Auswertungs - GUI

5 Auswertung

Im Rahmen der Auswertung wird das Zusammenspiel zwischen dem Öffnungswinkel eines Sensors und dessen Fähigkeit zur Vermeidung von Kreuzungskollisionen analysiert. Dabei kommt ausschließlich Sensor B (Radar/Kamera) zum Einsatz, da Sensor A (God Sensor/C2X) aufgrund seines umfassenden, kreisförmigen Sichtfelds dem EGO-Fahrzeug stets eine frühzeitige Bremsung ermöglicht und somit keine Kollisionen auftreten.

Die Simulationen werden unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Beide Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von **30 km/h**
- Beide Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von **50 km/h**
- Beide Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von **70 km/h**
- Beide Fahrzeuge mit einer Geschwindigkeit von **100 km/h**

Für jede Geschwindigkeitssituation werden zwei Fahrbahnzustände betrachtet: **trockene** und **nasse** Fahrbahn, wodurch sich unterschiedliche Bremswege ergeben.

Der Öffnungswinkel des Sensors wird dabei systematisch von **10° bis 90°** in 1°-Schritten variiert.

Die Fahrzeuge starten beide in einem Abstand von 50 Metern zu dem Kreuzungsmittelpunkt. Dies haben wir so gewählt, sodass das EGO-Fahrzeug in das querende Fahrzeug hineinfährt, wenn der Kreuzungswarner nicht eingreift und man so eine sinnvolle Gefährdungssituation für das EGO schafft. In der ersten Auswertung schauen wir uns jedoch an, wie andere Startpunkte die Wirksamkeit des Sensors beeinflussen.

Aus den Simulationen werden folgende Kenngrößen extrahiert und in einer Grafik dargestellt, um das Kollisionsverhalten zu bewerten:

- **Erkennungszeitpunkt:** Zeitpunkt der ersten Erkennung des querenden Fahrzeugs durch Sensor B.
- **Puffer Warnung:** Zeitspanne zwischen dem Erkennungszeitpunkt und dem Warnzeitpunkt.
- **Puffer Bremsung:** Zeitspanne zwischen dem Erkennungszeitpunkt und dem Bremszeitpunkt.
- **Puffer Abstand:** Minimaler Abstand zwischen dem EGO-Fahrzeug und dem querenden Fahrzeug.
- **Aktuelle Geschwindigkeit bei Kollision:** Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs im Moment der Kollision, falls eine Kollision nicht verhindert werden konnte.
- **Time to Collision (TTC):** Zeitspanne zwischen dem Erkennungszeitpunkt und dem tatsächlichen Kollisionszeitpunkt.

Diese Auswertung ermöglicht eine detaillierte Bewertung der Wirksamkeit des Sensorsystems in Abhängigkeit vom Sichtfeld und den Umgebungsbedingungen.

5.1 Auswertung Kreuzungsreihenfolge

In dieser Auswertung werden die Startpositionen der Fahrzeuge so angepasst, dass unterschiedliche Verkehrssituationen abgebildet werden. Dabei fährt das Querverkehrsfahrzeug in einem Szenario mit größerem Abstand vor dem EGO-Fahrzeug über die Kreuzung, in einem anderen erst nach dem EGO-Fahrzeug. Zusätzlich wird ein Fall betrachtet, in dem beide Fahrzeuge (entsprechend den Parametern der nachfolgenden Analysen) mit einem identischen Anfangsabstand von 50 Metern zur Kreuzung starten.

	Abstand EGO zu Kreuzung	Abstand Fzg zu Kreuzung
1.	50	45
2.	45	50
3.	50	50

Tabelle 1 - Startpositionen der Auswertung Kreuzungsreihenfolge

5.1.1 Diagramme

1. Vorsprung Fzg

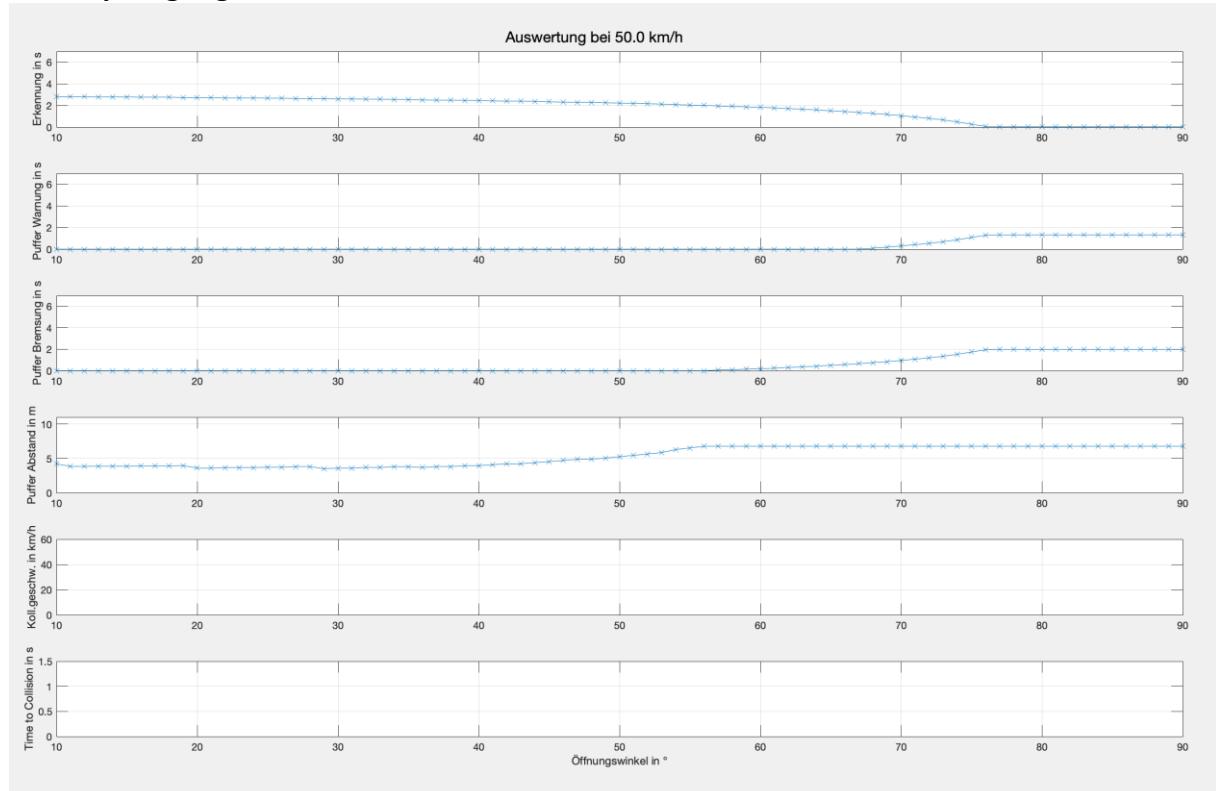


Abbildung 6 - Auswertung Vorsprung Fzg, 50 kmh, trocken

2. Vorsprung EGO

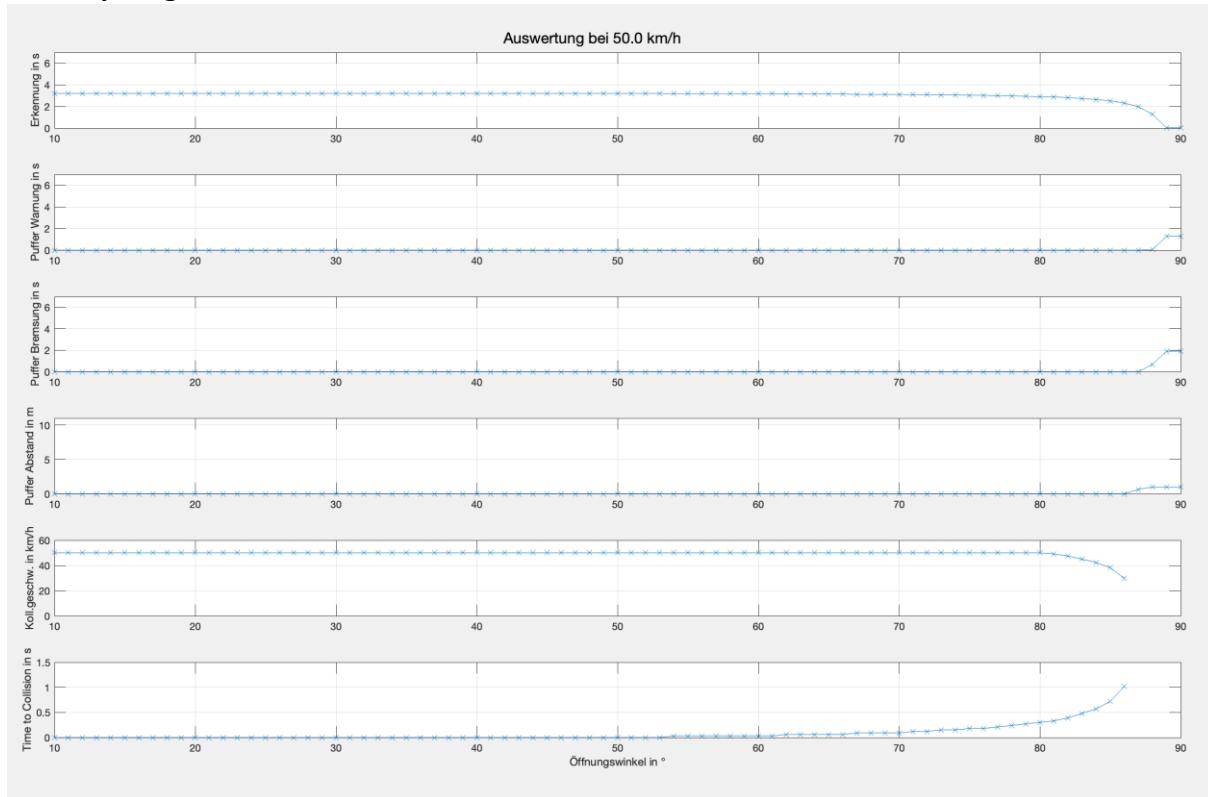


Abbildung 7 - Auswertung Vorsprung EGO, 50 kmh, trocken

3. Gleicher Abstand

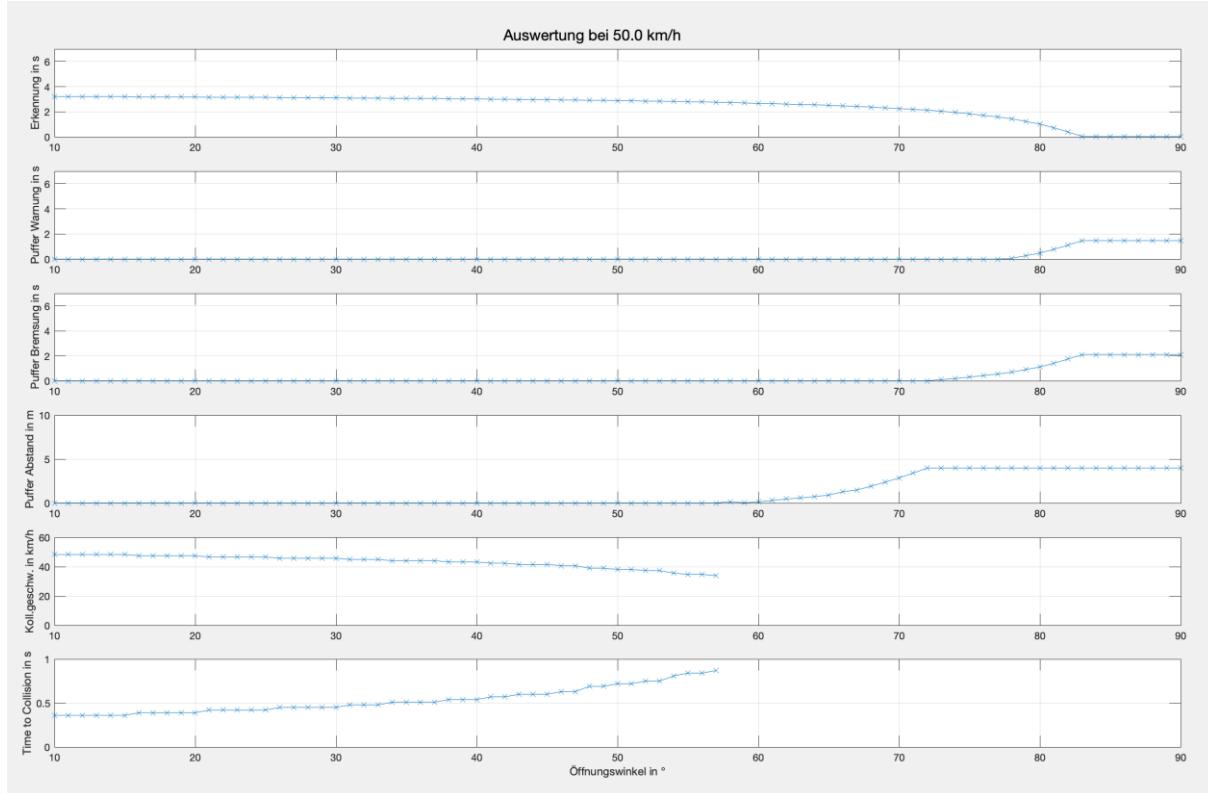


Abbildung 8 - Auswertung 50 kmh, trocken

5.1.2 Interpretation

Startpositionen	Keine Kollision ab	Puffer Warnung ab	Puffer Bremsung ab	Puffer Abstand konstant ab
1.	10°	68°	57°	56°
2.	87°	88°	87°	87°
3.	58°	78°	73°	72°

Tabelle 2 – Auswertung der verschiedenen Startpositionen

Die in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass die gewählte Startposition der Fahrzeuge einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten des Kreuzungsassistenzsystems hat.

In Startposition 1, bei der das Querverkehrsfahrzeug deutlich vor dem EGO-Fahrzeug in die Kreuzung einfährt, tritt selbst bei einer minimalen Sensorempfindlichkeit von lediglich 10° keine Kollision auf. Dies zeigt, dass in dieser Konstellation eine Gefährdung des EGO-Fahrzeugs faktisch ausgeschlossen ist (selbst ohne aktives Eingreifen des Systems). Entsprechend treten auch bereits ab niedrigen Öffnungswinkeln alle Pufferzustände ein.

Im Gegensatz dazu stellt Startposition 2 eine für das System besonders herausfordernde Konstellation dar: Das EGO-Fahrzeug fährt zuerst in die Kreuzung ein, während das querende Fahrzeug seitlich in das EGO-Fahrzeug hineinfährt. Da der Sensor primär nach vorne ausgerichtet ist, wird das querende Fahrzeug seitlich nur mit sehr großem Öffnungswinkel detektiert (in der Simulation erst ab 87°). Dies bedeutet, dass eine Reaktion des Systems erst bei nahezu maximalem Sichtfeld erfolgen kann, da die verbleibende Time to Collision (TTC) beim Erkennen sehr gering ist. Damit fehlt es sowohl an Reaktionszeit als auch an Sicherheitsreserven für Warnung oder Bremsung.

Da diese beiden Extrempositionen für die weitere Analyse wenig Aussagekraft bieten, wurde zusätzlich Startposition 3 untersucht. In dieser Konstellation starten beide Fahrzeuge mit gleichem Abstand (50 m) zur Kreuzung. Die Auswertung dieser Position liefert anschauliche Ergebnisse über alle betrachteten Parameter hinweg. Diese Startposition wird deshalb für alle weiteren Analysen verwendet.

5.2 Auswertung trockene Fahrbahn:

5.2.1 Diagramme

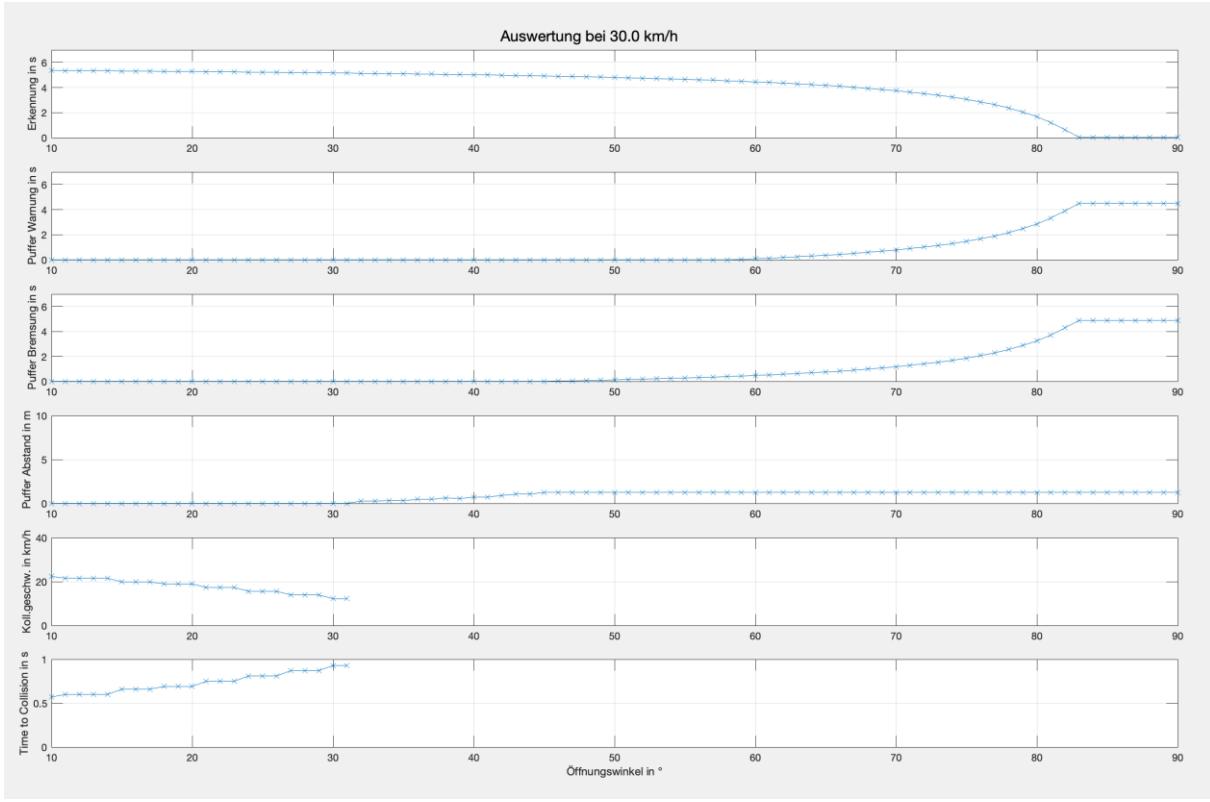


Abbildung 9 - Auswertung 30 km/h, trocken

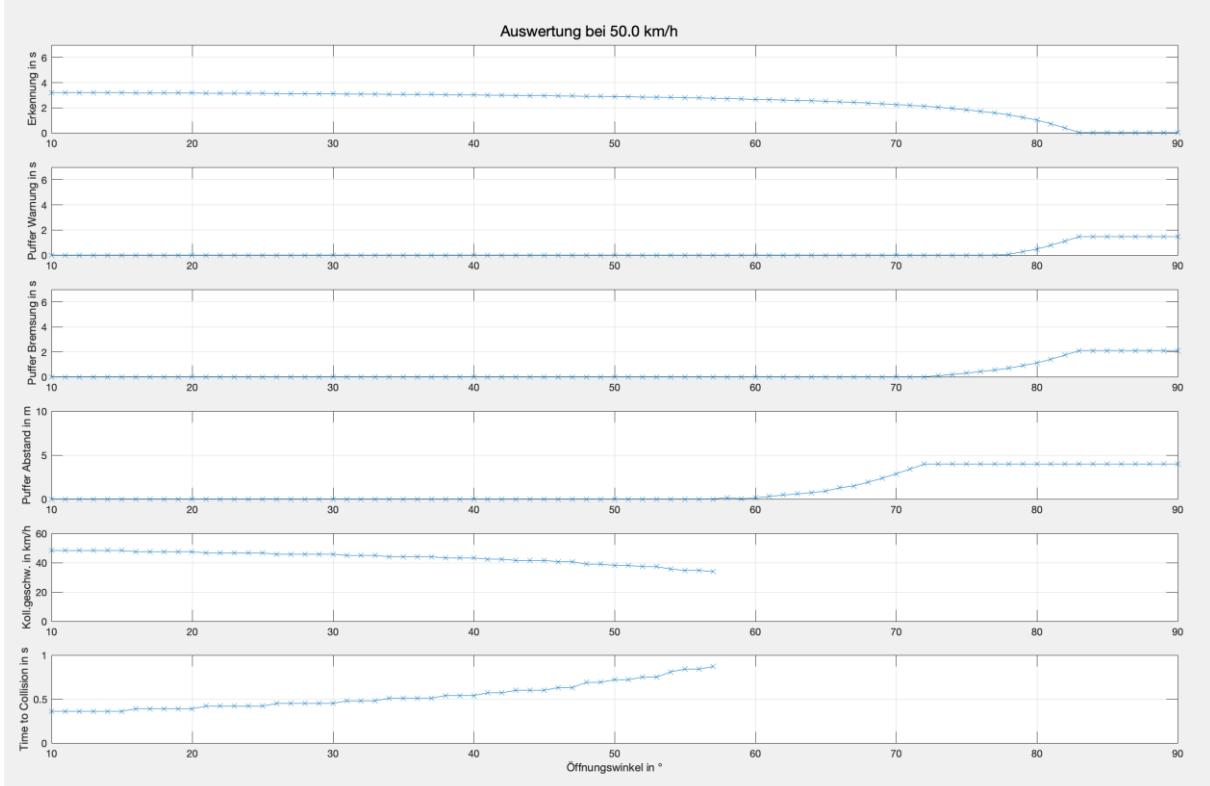


Abbildung 10 - Auswertung 50 km/h, trocken

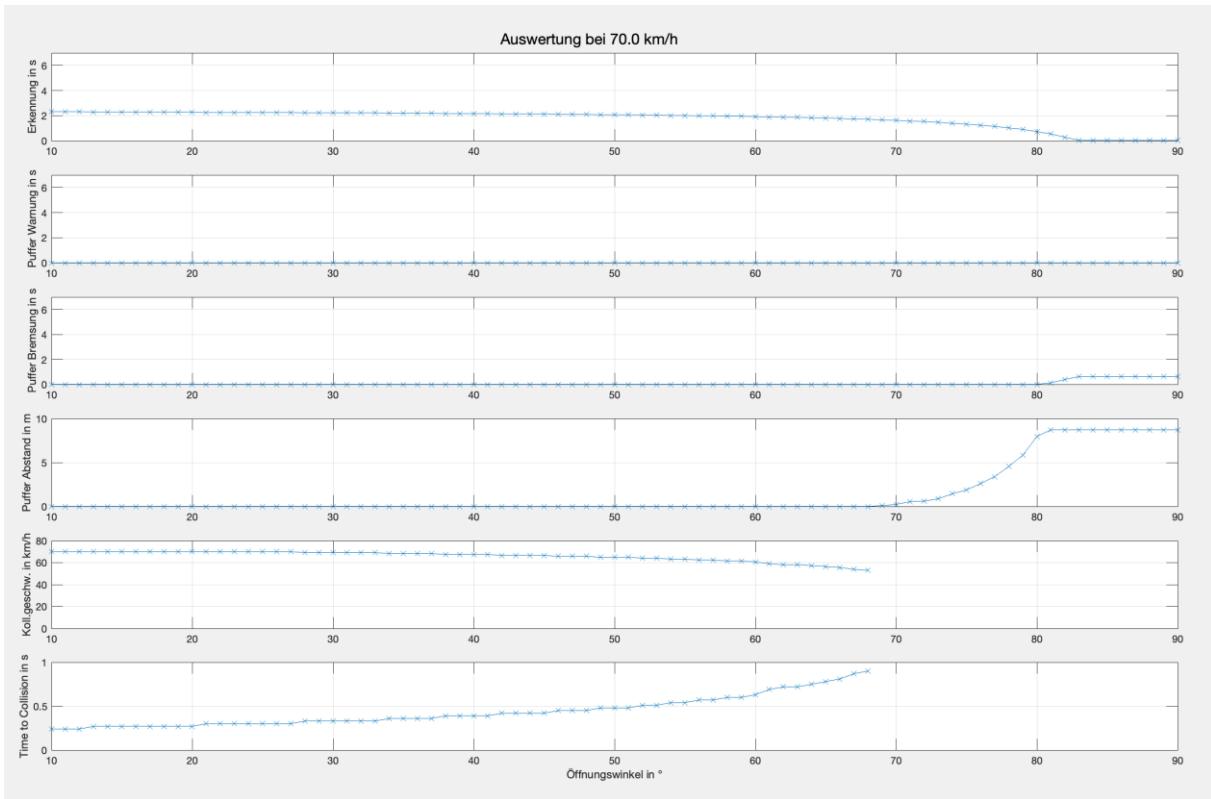


Abbildung 11 - Auswertung 70 km/h, trocken

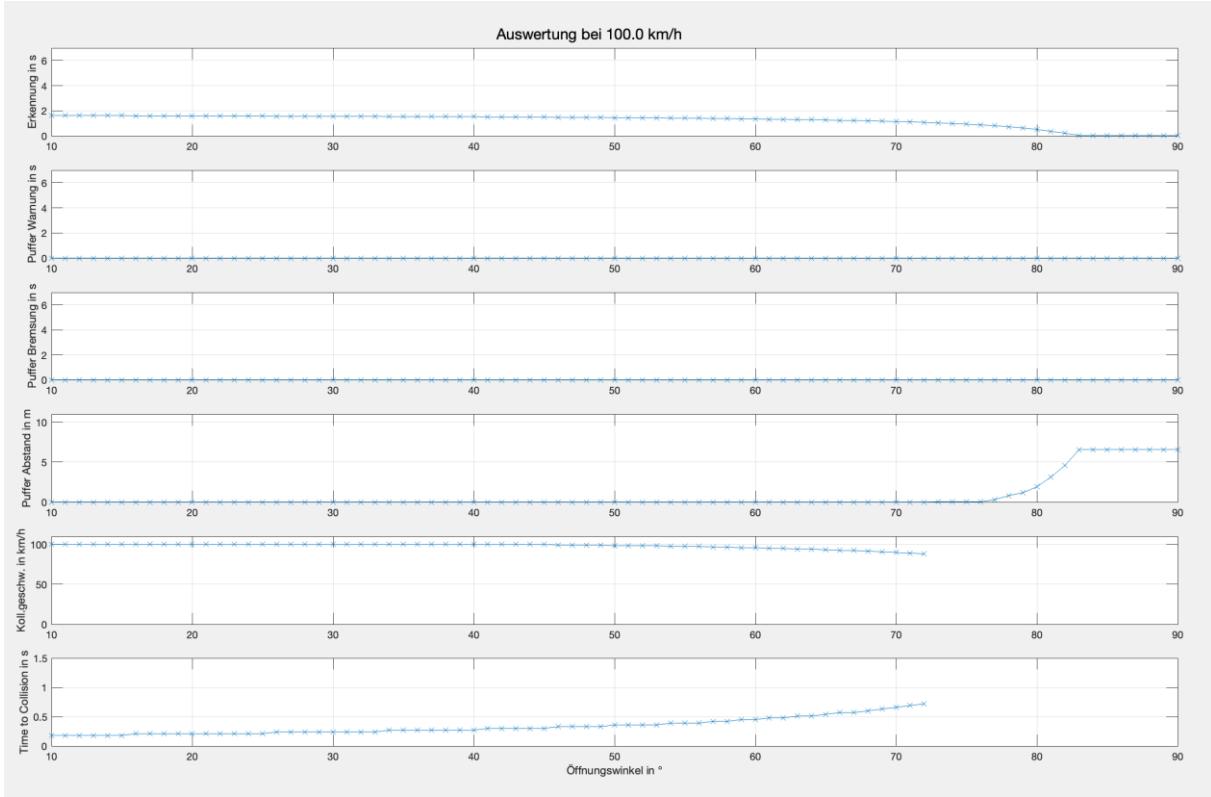


Abbildung 12 - Auswertung 100 km/h, trocken

5.2.2 Interpretation

Geschwindigkeit in km/h	Keine Kollision ab	Puffer Warnung ab	Puffer Bremsung ab	Puffer Abstand konstant ab
30	32°	59°	46°	45°
50	58°	78°	73°	72°
70	69°	Nie	81°	81°
100	73°	Nie	Nie	83°

Tabelle 3 - Auswertungsdaten, trocken

Die Auswertung der Simulationen zeigt deutlich, dass ein größerer Öffnungswinkel des Sensor B einen entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit der Kreuzungserkennung hat. Ab **73°** kann das querende Fahrzeug konstant bei allen Geschwindigkeiten und in einer ausreichend frühen Phase erfasst werden, sodass es zu keiner Kollision kommt.

Bei hohen Geschwindigkeiten (70 und 100 km/h) wird das querende Fahrzeug nie rechtzeitig erkannt um eine **Pufferzeit** für die **Warnung** zu haben. Die Warnung muss hier umgehend nach Erkennung angezeigt werden. Bei 100 km/h hat man zudem niemals einen **Puffer** bei der **Bremsung**. Man muss sofort mit der Erkennung anfangen zu Bremsen.

Der **Puffer Abstand** entwickelt sich in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel. Bei kleinen Winkeln nähert sich das EGO-Fahrzeug dem Kreuzungspunkt an, ohne das querende Fahrzeug rechtzeitig wahrzunehmen, was zu einem minimalen Abstand oder einer Kollision führt. Erst ab hohen Öffnungswinkeln (hier 83°) kann bei allen Geschwindigkeiten rechtzeitig eingegriffen werden, sodass der Puffer Abstand konstant ist.

Die **Kollisionsgeschwindigkeit** sinkt ebenfalls mit wachsendem Öffnungswinkel. Bei einem kleinen Öffnungswinkel erfolgt die Reaktion zu spät oder gar nicht, wodurch das EGO-Fahrzeug mit hoher Geschwindigkeit kollidiert. Je größer der Winkel, desto früher kann das Fahrzeug vor dem Erreichen des Gefahrenpunkts abbremsen, was zu geringeren Aufprallgeschwindigkeiten führt.

Entsprechend steigt auch die **Time to Collision (TTC)** mit zunehmendem Öffnungswinkel. Eine frühzeitige Erkennung durch ein breiteres Sichtfeld sorgt für eine längere verbleibende Zeit bis zum möglichen Zusammenstoß, was dem System oder Fahrer mehr Handlungsspielraum bietet. Bei engen Öffnungswinkeln hingegen ist die TTC oft so kurz, dass keine effektive Reaktion mehr möglich ist.

5.3 Vergleich mit nasser Fahrbahn

5.3.1 Diagramme

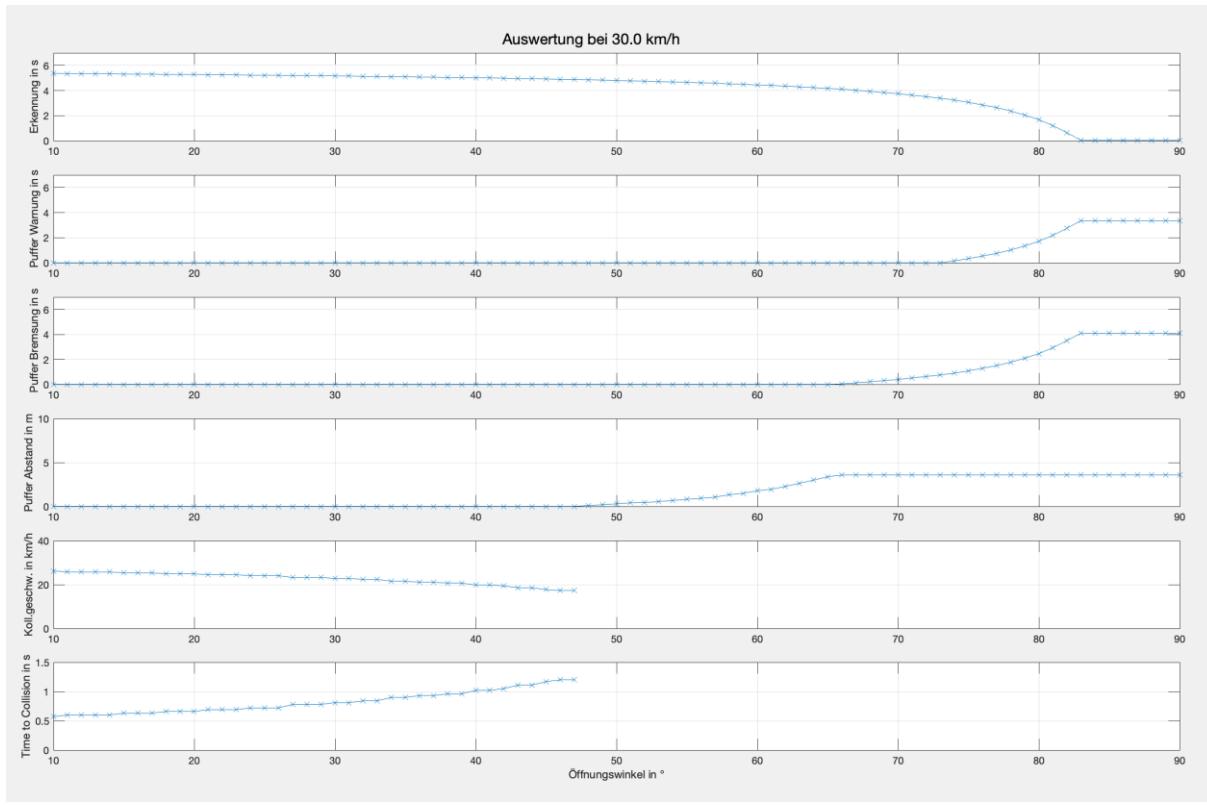


Abbildung 13 - Auswertung 30 km/h, nass

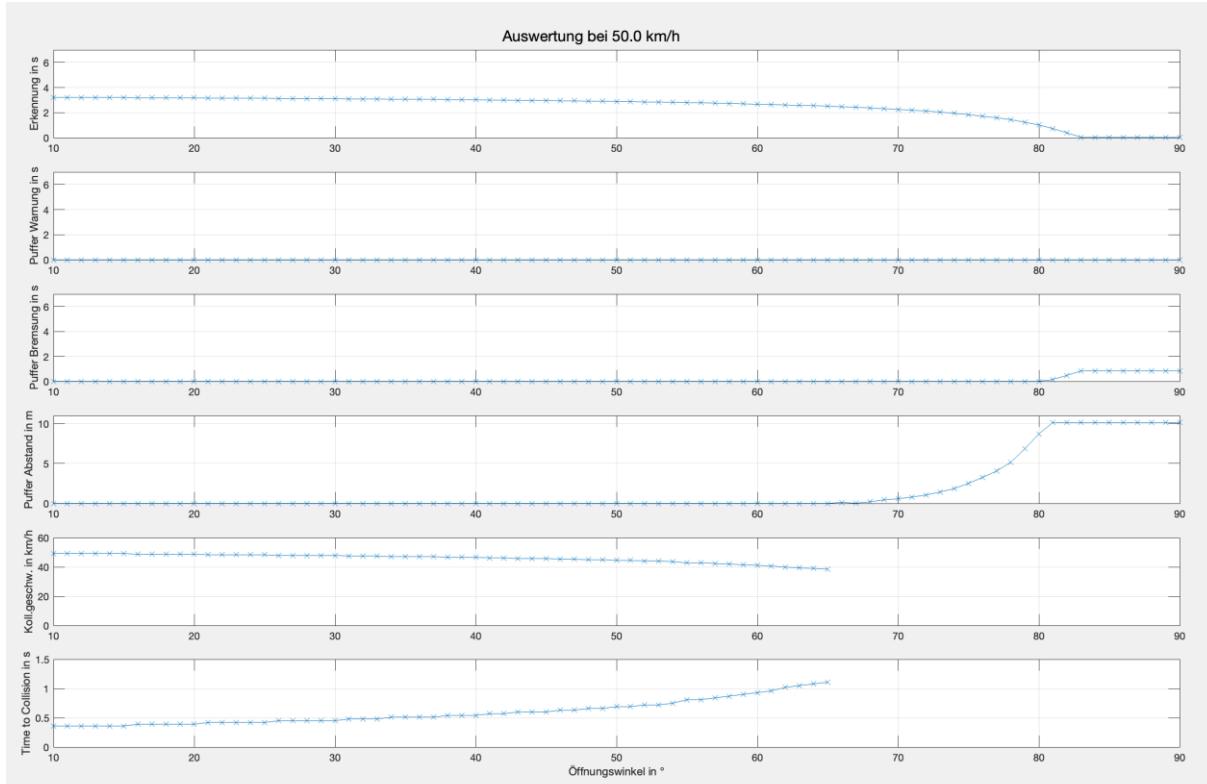


Abbildung 14 - Auswertung 50 km/h, nass

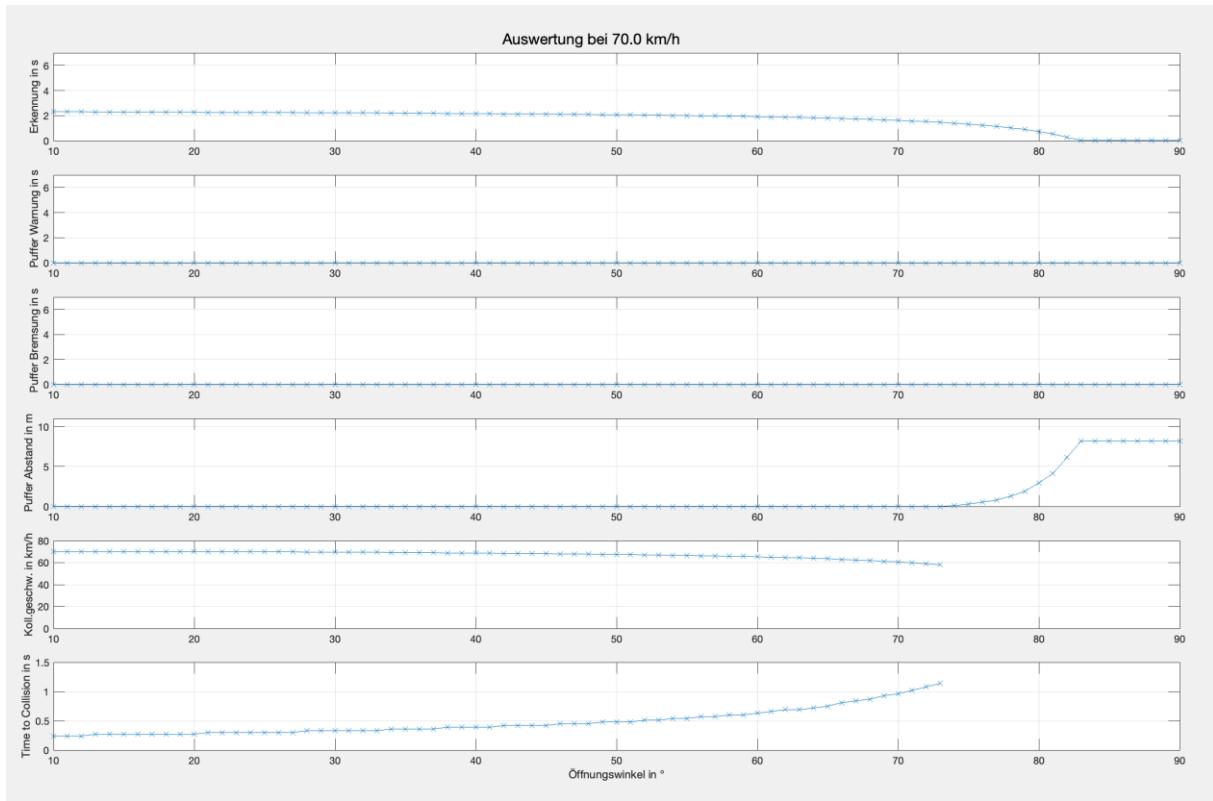


Abbildung 15 - Auswertung 70 km/h, nass

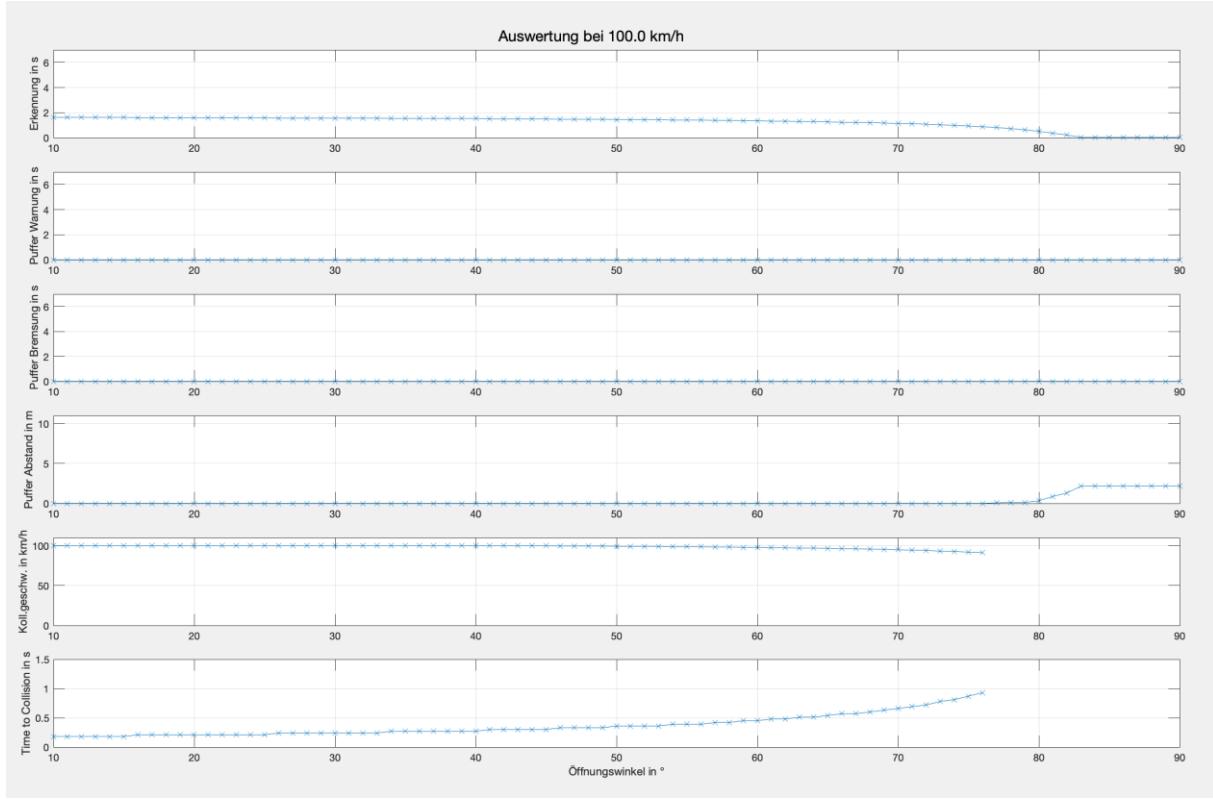


Abbildung 16 - Auswertung 100 km/h, nass

5.3.2 Interpretation

Geschwindigkeit in km/h	Keine Kollision ab	Puffer Warnung ab	Puffer Bremsung ab	Puffer Abstand konstant ab
30	32°	59°	46°	45°
50	58°	78°	73°	72°
70	69°	Nie	81°	81°
100	73°	Nie	Nie	83°

Tabelle 4 - Auswertungsdaten, trocken

Geschwindigkeit in km/h	Keine Kollision ab	Puffer Warnung ab	Puffer Bremsung ab	Puffer Abstand konstant ab
30	48°	73°	66°	66°
50	66°	Nie	81°	81°
70	74°	Nie	Nie	83°
100	77°	Nie	Nie	83°

Tabelle 5 - Auswertungsdaten, nass

Die Auswertung der Simulationen zeigt, dass sich unter nassen Fahrbahnbedingungen sämtliche, für eine effektive Reaktion des Sensorsystems relevanten, Schwellenwerte zu höheren Öffnungswinkeln hin verschieben. In vielen Fällen reicht selbst eine sofortige Erkennung des Objekts (ab einem Öffnungswinkel von 83°) nicht aus, sodass ohne jeglichen Puffer reagiert werden muss.

Im Mittel liegt der Öffnungswinkel, ab dem eine Kollision vermieden werden kann, bei nasser Fahrbahn etwa 8 Grad höher als bei trockener. Dieser Unterschied ist insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich ausgeprägt. Bei 30 km/h beträgt die Differenz 16°, während sie mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt.

Die Möglichkeit, eine frühzeitige Warnung mit einem zeitlichen Puffer auszugeben, ist unter nassen Bedingungen stark eingeschränkt. Während bei trockener Fahrbahn bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h noch ein Warnpuffer realisierbar war, tritt dieser Effekt unter Nässe nur noch bei 30 km/h auf – und auch dort erst ab einem Öffnungswinkel von 73°, im Vergleich zu 59° auf trockener Straße. Bei höheren Geschwindigkeiten ist unter den betrachteten Bedingungen nur verspätet eine Warnung möglich.

Auch der stabile Puffer Abstand (der Punkt, ab dem der minimale Abstand zwischen den Fahrzeugen nach der Reaktion konstant bleibt) verschiebt sich bei Nässe im Durchschnitt um etwa 8 Grad. Besonders bei geringen Geschwindigkeiten ist dieser Effekt stark ausgeprägt und erreicht bei 30 km/h eine maximale Differenz von 21°. Bei höheren Geschwindigkeiten verringert sich dieser Unterschied. Mitunter, da das vorausfahrende Fahrzeug bei einem Öffnungswinkel von 83° bereits zu Beginn der Simulation detektiert wird.

Zudem führen die verlängerten Bremswege auf nasser Fahrbahn zu höheren Kollisionsgeschwindigkeiten, was das Risiko und die Schwere eines potenziellen Unfalls zusätzlich erhöht.

5.4 Auswertung einer realen Kamera

In der folgenden Auswertung haben wir die Effektivität einer realen Kamera, die für Fahrassistenzfunktionen genutzt wird, in unserer Simulation getestet. Dabei haben wir einen Öffnungswinkel von 100° und eine Reichweite von 150m verwendet, welche den Spezifikationen der Bosch-Multifunktionskamera entspricht (siehe [Quellenverzeichnis](#)). Anschließend haben wir diese Einstellungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten simuliert.

Szenario	Erkennungszeitpunkt	Puffer Warnung	Puffer Bremsung	Puffer Abstand	Kollisionsgeschwindigkeit	Time To Collision
30 km/h trocken	0,03 s	4,50 s	4,89 s	1,27 m	---	---
50 km/h trocken	0,03 s	1,47 s	2,10 s	3,98 m	---	---
70 km/h trocken	0,03 s	0,00 s	0,63 s	8,73 m	---	---
100 km/h trocken	0,03 s	0,00 s	0,00 s	6,57 m	---	---
100 km/h nass	0,03 s	0,00 s	0,00 s	2,18 m	---	---

Tabelle 6 - Auswertungsdaten, 100 Grad, alle Geschwindigkeiten

In Tabelle 6 lässt sich an den Erkennungszeitpunkten gut ablesen, dass in unserer Simulation das querende Fahrzeug bei einer Entfernung von 50 Metern bereits von Anfang an erfasst wird. Die Relevanz-Prüfung unserer Sensoren benötigt zwei Abstandswerte um zu erkennen, dass das Fahrzeug auf die Kreuzung zufährt. Erst dann wird das Fahrzeug als relevant eingestuft und erkannt. Der Erkennungszeitpunkt kann somit nicht kleiner als 0,03s sein, da dies die Zeitdauer eines Simulationsschritts unseres Systems ist.

Bei trockener Fahrbahn und Geschwindigkeiten von 30 und 50 km/h bleibt ausreichend Zeit, sodass vor der Warnung und der Bremsung noch ein Puffer vorhanden ist. Bei 70 km/h hat nur noch die Bremsung einen Puffer und bei 100 km/h muss sofort eingegriffen werden, da kein Puffer mehr vorhanden ist.

Bei allen Geschwindigkeiten bleibt ein ausreichender Abstand zum querenden Fahrzeug, wodurch eine Kollision vermieden werden kann. Bei 100 km/h ist der Pufferabstand jedoch geringer als bei 50 km/h, da hier eine Bremsung ohne zusätzlichen Puffer erforderlich ist.

Selbst im kritischsten Test-Szenario mit 100 km/h und nasser Fahrbahn kommt das EGO-Fahrzeug rechtzeitig zum Stehen und vermeidet eine Kollision, allerdings nur mit etwa einem Drittel des Pufferabstands im Vergleich zur trockenen Fahrbahn.

6 Fazit

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass der Öffnungswinkel des Sensor B (Radar/Kamera), einen maßgeblichen Einfluss auf die Effektivität des Kreuzungsassistenzsystems hat. Während Sensor A (God-Sensor/C2X) aufgrund seines vollständigen Rundumblicks in allen untersuchten Szenarien eine Kollision zuverlässig verhindern konnte, erlaubt die begrenzte horizontale Abdeckung von Sensor B eine differenzierte Analyse des Einflusses des Sichtfelds auf die Kollisionsvermeidung.

Die Ergebnisse der Szenarien mit variierenden Startpositionen der Fahrzeuge verdeutlichen, dass die geometrische Ausgangssituation einen erheblichen Einfluss auf die Erfassbarkeit des Querverkehrs und somit auf die Leistungsfähigkeit des Systems hat. Besonders kritisch erweist sich die Konstellation, in der das EGO-Fahrzeug vor dem Querverkehr in die Kreuzung einfährt. In diesem Fall ist eine Detektion des Querverkehrsfahrzeugs nur bei sehr großen Öffnungswinkeln möglich, da es erst spät in das begrenzte Sichtfeld des Sensors gelangt. Dies führt zu einer geringen verbleibenden Time to Collision und erschwert eine rechtzeitige Reaktion. Die Konfiguration mit identischen Startabständen beider Fahrzeuge hat sich im Vergleich als am besten geeignet erwiesen, um die Leistungsgrenzen des Systems systematisch zu analysieren.

Die Auswertungen bei trockener Fahrbahn zeigen, dass ab einem Sensoröffnungswinkel von 77° eine zuverlässige Vermeidung von Kollisionen möglich ist. Unterhalb dieser Schwelle sinken sowohl die Warn- als auch die Bremspuffer deutlich ab, was in vielen Fällen zu einem kritischen Mindestabstand oder einer Kollision führt. Dieser Zusammenhang verstärkt sich mit zunehmender Geschwindigkeit des Fahrzeugs.

Unter nassen Fahrbahnbedingungen verschieben sich alle relevanten Schwellenwerte zu höheren Öffnungswinkeln. Die verlängerten Bremswege führen dazu, dass Reaktionen selbst bei früher Erkennung oft nicht ausreichen, um eine Kollision sicher zu verhindern. Im Durchschnitt erhöht sich der notwendige Öffnungswinkel zur Kollisionsvermeidung bei Nässe um etwa 8° im Vergleich zur trockenen Fahrbahn.

Zudem haben wir die Simulation mit den Einstellungen einer realen Kamera durchgeführt. Diese Kamera hatte mit einem Öffnungswinkel von 100 Grad nochmal 10 Grad mehr, als die maximale Sensoreinstellung in unserer vorherigen Auswertung und hat dementsprechend bei allen Test-Szenarien erfolgreich eine Kollision vermeiden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Der Öffnungswinkel des Sensors ist eine zentrale Einflussgröße auf die Leistungsfähigkeit des Kreuzungsassistenzsystems (umso größer, desto besser).
- Die Detektion und Reaktionsfähigkeit sind stark von der geometrischen Ausgangslage der beteiligten Fahrzeuge abhängig.
- Ein größerer Öffnungswinkel verbessert die Erkennbarkeit des Querverkehrs und erhöht damit die verfügbaren Pufferzeiten für Warnung und Bremsung.
- Fahrbahnbedingungen wirken sich signifikant auf die notwendigen Erkennungswinkel aus. Bei nasser Fahrbahn sind höhere Winkel erforderlich, um vergleichbare Sicherheit zu gewährleisten.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer ausreichenden Sensorabdeckung, insbesondere auch in seitlicher Richtung sowie die Notwendigkeit, umgebungsbedingte Einflüsse bei der Auslegung von Fahrerassistenzsystemen angemessen zu berücksichtigen.

7 Erweiterungsmöglichkeiten

Im Anschluss an die durchgeführte Analyse lassen sich mehrere Ansatzpunkte identifizieren, um die Simulation weiter zu verfeinern und die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen. Ziel solcher Erweiterungen wäre es, das Verhalten des Kreuzungsassistenzsystems unter realitätsnäheren Bedingungen zu untersuchen und dessen Leistungsfähigkeit in komplexeren Verkehrssituationen zu bewerten.

Mögliche Erweiterungen umfassen insbesondere:

- **Erweiterte Sensorik und Relevanzbewertung:** Die Integration mehrerer Verkehrsteilnehmer in das Simulationsszenario erfordert eine Weiterentwicklung der Sensorik Modelle und Relevanzbewertung. Es muss sichergestellt werden, dass das System in jeder Situation auf das jeweils kritischste Objekt fokussiert.
- **Erweiterte Reaktionsstrategien:** Neben der bisher betrachteten Bremsreaktion könnten weitere Handlungsoptionen wie Beschleunigen oder kontrolliertes Ausweichen berücksichtigt werden. Dies würde es ermöglichen, adaptivere und kontextabhängige Strategien zur Kollisionsvermeidung zu simulieren.
- **Berücksichtigung von Infrastruktur und Umgebungsfaktoren:** Elemente wie Bebauung, parkende Fahrzeuge oder Vegetation könnten als Hindernisse modelliert werden, die das Sichtfeld einschränken und damit die Erfassbarkeit querender Verkehrsteilnehmer beeinflussen.
- **Diversität im Fahrverhalten:** Die Einführung komplexerer Verkehrsverläufe, etwa mit abbiegenden Fahrzeugen oder Fahrzeugen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungsprofilen, würde die Simulation realistischer gestalten und die Leistungsgrenzen des Systems weiter ausloten.

8 Quellenverzeichnis

<https://www.bosch-mobility.com/de/loesungen/kamera/multifunktionskamera>