

Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder

Gefördert durch die AXA Stiftung für Prävention

Projektpartner:



AGU Zürich




Smartridr



TCS – Touring Club Schweiz

Seiten: 1 - 36

Datum: Zürich, 21.01.2019


	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder			Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	2	von	36

Autoren: Jakob Gross, Markus Muser, Daniel Schläpfer

Projektleiter: Dr. Markus Muser, Geschäftsleiter der AGU Zürich (muser@agu.ch)

Verantwortlicher SmartRidr: Daniel Schläpfer, Co-Founder von SmartRidr
(Daniel.Schlaepfer@smartridr.com)

Verantwortlicher TCS: Anton Keller, Leiter der Bereiche Mobilitätsberatung und Verkehrssicherheit (Anton.Keller@tcs.ch)

	Titel: Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum: 21.01.2019	
	Autoren: AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:	Seite: 3	von 36

INHALTSVERZEICHNIS

1. Zusammenfassung	4
2. Einleitung	5
3. Projektübersicht.....	7
4. Entwicklung von Reflektor-Mustern.....	7
4.1. Erste Funktionsmuster.....	8
5. Laborversuche.....	9
5.1. Messeinrichtung	10
5.2. Theoretische Überlegungen	11
5.3. Testobjekte.....	12
5.4. Resultate	12
5.5. Diskussion.....	13
5.6. Radarecho unter Berücksichtigung der Einfallswinkel.....	13
6. Fahrversuche	16
6.1. Methodik.....	16
6.2. Resultate	19
6.3. Diskussion Fahrversuche	23
7. Produktentwicklung	25
7.1. Produktebeschreibung.....	25
7.2. Kundengruppen und Zielmärkte	30
8. Fazit des Projektes und Aussichten.....	32
Literatur.....	33
Anhang.....	34




1. Zusammenfassung

Strassenfahrzeuge werden immer häufiger mit Fahrerassistenzsystemen (FAS) ausgestattet, die dabei helfen sollen die Sicherheit im Strassenverkehr zu verbessern. Einige der Systeme, wie der automatische Abstandshalteautomat (ACC) oder der Notbremsassistent (AEB), verwenden Radartechnologie um die Umgebung zu scannen. Ein Pilotprojekt der AGU von 2017 zeigte jedoch, dass Zweiräder von diesen Systemen nicht immer zuverlässig erkannt werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde in Labor- und Fahrversuchen untersucht, ob die Radar-Sichtbarkeit von Zweirädern durch einen Reflektor verbessert werden kann. Ziel dieses Projektes war es, einen einfachen und kostengünstigen Reflektor als Präventionsprodukt für Zweiradfahrer zu entwickeln.

Es wurde definiert, dass der primäre Anwendungsbereich der Reflektoren im innerstädtischen Bereich liegen soll. Erste Funktionsmuster wurden entwickelt und in Laborversuchen vermessen. Die Messungen mit der Radareinheit zeigten, dass einige der Muster den Radarquerschnitt von Zweirädern verbessern können. Der Einfluss dieser Reflektoren auf das ACC und AEB verschiedener Autos wurde auf der Teststrecke des Touring Club Schweiz untersucht. Aus den Versuchen ging hervor, dass die FAS je nach Auto unterschiedlich auf die Zweiräder bzw. die Reflektoren reagieren. Velos mit Reflektor wurden in Kurvenfahrten teilweise länger von den Systemen erkannt.

Das Projekt wurde mit der Entwicklung einer konkreten Produktidee abgeschlossen; es wurden Prototypen für einen Radarreflektor mit integrierter Rückleuchte wurden entworfen.

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	5	von 36

2. Einleitung


Strassenfahrzeuge sind immer häufiger mit Fahrerassistenzsystemen (FAS) ausgestattet, die den Fahrer dabei unterstützen sollen, die Fahraufgabe zu bewältigen. Sie sind zum einen darauf ausgerichtet die Verkehrssicherheit zu erhöhen, zum anderen den Komfort beim Fahren zu steigern. Bei den FAS handelt es sich meist um aktive Sicherheitssysteme, die durch selbstständiges Eingreifen in das Verkehrsgeschehen das Unfallrisiko verringern können. Sie können je nach Interventionstiefe in folgende Systeme unterteilt werden:

- Systeme, die in gewissen Situationen automatisch eingreifen (z.B. adaptiver Abstandsregeltempomat)
- Systeme, die in Gefahrensituationen Informationen an den Fahrer abgeben
- Systeme, die ausschliesslich in Notsituationen eingreifen (z.B. Notbremsassistent)
- Systeme, die vor allem den Komfort erhöhen (z.B. Parkassistent)

Unabhängig von der Interventionstiefe der Systeme ist zum jetzigen Zeitpunkt nach Art. 8 Abs. 5 des Übereinkommens des Strassenverkehrs festgelegt, dass „der Führer dauernd sein Fahrzeug beherrschen können“ muss, der Fahrer muss also die FAS in jeder Situation und zu jedem Zeitpunkt übersteuern können. Frühere Studien haben allerdings gezeigt, dass ein Vertrauen in die Technologien zu einer vermehrten Ausübung von Nebentätigkeiten führt (Kessler et. al, 2012). Das System wird von abgelenkten Fahrern weniger hinterfragt bzw. Warnungen des Systems nur verzögert interpretiert und wahrgenommen. Problematisch ist dies, wenn die FAS nicht ordnungsgemäss funktionieren oder Situationen fehlinterpretieren.

Einige dieser Systeme arbeiten mit Radartechnologie. Mit Hilfe einer an der Front des Autos angebrachten Radareinheit wird ein Ausschnitt der Umgebung gescannt. Die Einheit sendet ein Radarsignal in einer bestimmten Frequenz aus und detektiert die Signale, die von Objekten reflektiert werden. Aus der Laufzeit des Radarsignals, d.h. der Zeitdifferenz zwischen Sende- und Empfangspuls, kann auf die Distanz des Objektes zum Radargerät geschlossen werden. Eine Software interpretiert und verarbeitet die empfangenen Informationen und entscheidet mit Hilfe eines komplexen Algorithmus, welche Informationen aus der Umgebung eine Reaktion des Fahrzeugs fordern. Die vermutlich relevantesten FAS für die Verkehrssicherheit, die auf einer Radartechnologie basieren, sind der Abstandsregeltempomat (ACC, Adaptive Cruise Control) und der Notbremsassistent (AEB, autonomous emergency braking).

Das ACC übernimmt die Geschwindigkeits- und Abstandsregelung des Fahrzeugs. Es erfasst vorausfahrende Fahrzeuge und regelt die Geschwindigkeit so, dass ein konstanter Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gewährleistet wird. Frühere Versionen des ACC wurden primär für Fahrten auf der Autobahn empfohlen; das System funktionierte nur für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich. Durch den Fortschritt heutiger Technologien kann das ACC aber auch für langsame Geschwindigkeiten bis hin zum Stillstand verwendet werden. In einer Situation in der ein vorausfahrendes Auto anhalten muss, übernimmt das ACC des eigenen Fahrzeugs das Bremsen und auch wieder das Anfahren. Dadurch eignet sich das System prinzipiell auch für den innerstädtischen Verkehr. Die Technologie funktioniert jedoch nicht immer zuverlässig, da der Radarstrahl nur einen begrenzten Bereich des Umfelds scannen kann. Zusätzlich werden Radarsignale nicht von allen Objekten gleich gut reflektiert. Besonders


	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	6	von 36

Zweiräder und Fussgänger erzeugen bisweilen ein schwaches Radar-Echo und werden von den Systemen oftmals übersehen. In einem Forschungsbericht der AGU aus dem Jahr 2017 wurde die Radar-Sichtbarkeit von Zweirädern im Längsverkehr untersucht, mit dem Ergebnis, dass Zweiräder unterschiedlich zuverlässig (abhängig vom Automobilhersteller) erkannt werden. In einigen Situationen musste der Fahrzeuglenker eingreifen um eine Kollision zu vermeiden. Insbesondere in Situationen in der die Zweiräder in eine Kurve fuhren, hatten die Systeme Schwierigkeiten die Velos zu detektieren.

Notbremsassistenten (AEB) sollen eine automatische Bremsung einleiten, wenn eine Kollision droht. Wird ein Hindernis auf der Fahrbahn erkannt, bestimmt das System eine Kollisionswahrscheinlichkeit aufgrund der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit und der durch die Lenkwinkel begrenzten Ausweichmöglichkeiten. Sofern eine Kollision unvermeidbar erscheint, wird das Auto mit maximalem Bremsdruck abgebremst, auch wenn ein vollständiges Vermeiden der Kollision nicht mehr möglich ist. Klassische Systeme sind hauptsächlich auf die Vermeidung von Auffahrunfällen mit anderen PW begrenzt, während aktuellere Systeme auch Fussgänger und Zweiradfahrer erkennen sollen. Für eine zuverlässige Funktionsweise ist eine korrekte Detektion der Zweiradfahrer Voraussetzung. Die Systeme verwenden daher zusätzlich zur Radartechnologie oft Kamerasysteme zum Erfassen der Umgebung. Aktuelle Versuche des deutschen Automobil-Clubs ADAC zeigten jedoch, dass derzeitige Systeme nicht immer zuverlässig funktionieren (ADAC, 2016). In den Versuchen wurden vor allem langsam fahrende Radfahrer schlecht von den Systemen erkannt. Im Vorprojekt der AGU konnten die Systemgrenzen des AEB in Bezug auf die Detektion von Zweirädern deutlich aufgezeigt werden. Offensichtlich haben die Systeme noch grosse Schwierigkeiten stehende Zweiräder zu erkennen.

Die Gefahr als Zweiradfahrer in einen Unfall verwickelt zu werden und dabei schwere Verletzungen zu erleiden ist deutlich höher als bei anderen Verkehrsteilnehmern. Dies gilt sowohl für Motorradlenker wie auch Velofahrer (einschliesslich E-Bike) (bfu, 2016). Es ist bemerkenswert, dass die Anzahl schwer verletzter Zweiradfahrer die Anzahl der schwer verletzten PW-Insassen übertrifft. Zweiradfahrer sind den Kräften, die bei einer Kollision entstehen können, fast schutzlos ausgesetzt. Umso wichtiger ist es die Sicherheit für Zweiradfahrer zu erhöhen und Kollisionen zu vermeiden. ACC und AEB sind potentiell gute Innovationen um die Sicherheit zu verbessern; leider funktionieren sie in der Praxis nicht immer zuverlässig.

Um das Auftreten kritischen Situationen zwischen Fahrzeug und Zweirad zu reduzieren, sollte man einerseits die fahrzeugseitigen FAS verbessern, man könnte andererseits aber auch versuchen die Radar-Sichtbarkeit von Velos zu verbessern. Dies kann mit einem Radarreflektor erfolgen. Radarreflektoren sind aus anderen Anwendungsbereichen (z.B. Seefahrt) bekannt; sie optimieren die Reflexion von Radarstrahlen und stellen damit sicher, dass Objekte (z.B. kleine Schiffe) wahrgenommen werden. Grundsätzlich wurde in wissenschaftlichen Arbeiten bereits gezeigt, dass Radarreflektoren auch im Strassenverkehr nützlich sein können (z.B. Vijayaraghavan et al., 2008, Watari et al., 2012, Hallbjörner et al., 2013). Insbesondere Hallbjörner et al. konnten zeigen, dass Radarreflektoren in Schutzjacken von Strassenarbeitern sowie in Leitbaken im Baustellenbereich die Erkennbarkeit solcher (eher statischer) Objekte verbessern. Auch für Velos findet sich im Internet bereits die Idee von Radarreflektoren; ein entsprechendes Produkt ist derzeit jedoch noch nicht verfügbar. Verkauft wird hingegen ein

	Titel: Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum: 21.01.2019	
	Autoren: AGU, SmartRidr, TCS		Vis.:	Seite: 7 von 36

System (Garmin® Varia Radar), bei welchem eine Radarquelle rückseitig am Velo angebracht wird und den Velofahrer vor zu dicht auffahrenden Fahrzeugen warnen kann. Hierbei handelt es sich somit um ein System, das dem Velofahrer Informationen liefert, aber nicht mit den Systemen anderer Fahrzeuge interagiert.

Das übergeordnete Ziel des Projekts besteht darin, eine gute Radar-Sichtbarkeit von Zweirädern zu gewährleisten. Es wurde daher untersucht, ob es möglich ist, einen einfachen, kostengünstigen Reflektor für Velos zu entwickeln, der die Radar-Sichtbarkeit sicherstellt bzw. verbessert. Das Projekt baut auf erste Pilotversuche mit Radarreflektoren (AGU, 2017) auf und soll die Idee weiterführen und Anforderungen an einen geeigneten Radarreflektor definieren. Mittels Radarmessungen im Labor und Fahrversuchen auf der Teststrecke des Touring Club Schweiz (TCS) soll eruiert werden, ob ein Radarreflektor ein zweckmässiges Hilfsmittel zur Prävention darstellt.

3. Projektübersicht

Im Rahmen dieses Projekts soll ein Radarreflektor zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Zweirädern entwickelt werden. Es sollen Anforderungen an das Design definiert werden und die Funktionalität in Labor- als auch in Fahrversuchen evaluiert werden.

Arbeitspakete, Zeitplan

Für die Bearbeitung dieses Forschungsprojektes wurden folgende Arbeitspakete definiert:


- AP1: Definition der technischen Anforderungen (März – Mai 2018)
- AP2: Mustererstellung und Laborversuche (Mai – Juni 2018)
- AP3: Erprobung in Fahrversuchen (Juli – September 2018)
- AP4: Produktspezifikationen (September – November 2018)
- AP5: Projektleitung, Berichterstattung, Administration, Kommunikation (März – Dezember 2018)

Das Forschungsprojekt wurde wie geplant im März 2018 gestartet.

4. Entwicklung von Reflektor-Mustern

Anwendungsbereich

Es wurde festgelegt, dass die primäre Anwendung des Reflektors im innerstädtischen Umfeld liegt, als Referenz gilt eine Geschwindigkeit von 50 km/h (bzw. der entsprechende Anhalteweg) eines Fahrzeugs. Andere Situationen (z.B. Renn-Velo ausserorts) wurden mitgedacht, stehen aber nicht im Fokus. Die Anwendung soll sich nicht nur auf Konstellationen der Erkennbarkeit von Velos im Längsverkehr beschränken, auch abbiegende Fahrzeuge (Kreuzung) sind zu beachten. Der Reflektor soll daher eine «Rundum-Funktion» aufweisen, oder es sollen mehrere Reflektoren (vorne/hinten) mit gewisser seitlicher Ausprägung eingesetzt werden.

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	8	von 36

Bauformen und Design

Das Prinzip der Radarreflektoren ist grundsätzlich bekannt; Reflektoren werden unter anderem in der Schifffahrt verwendet um eine bessere Radarsichtbarkeit zu gewährleisten.

Es handelt sich in der Regel um passive Reflektoren, die darauf abzielen einen möglichst grossen Anteil des empfangenen Signals an den Sender zurückzustrahlen. Eine Möglichkeit dies zu schaffen, ist über das Prinzip des Tripelspiegels. Drei gleichschenklige rechtwinklige Dreiecke werden aneinandergelagert, so dass die Ebenen orthogonal aufeinander stehen. Jeder einfallende Strahl wird dadurch in die Richtung zurückgeworfen, aus der er eingetroffen ist. Es wurde am Prinzip dieser Konstruktion festgehalten. Für die Winkelreflektoren ist zu beachten, dass die Stärke des Radarechos mit der Kantenlänge des Reflektors und folglich mit der Gesamtgrösse des Reflektors zusammenhängt. Die minimale Kantenlänge, die ein funktionierender Reflektor haben muss, hängt wiederum mit der Frequenz des Radarsignals zusammen.

Nach diversen Abklärungen (u.a. mit Fahrzeugimporteuren) wurde entschieden, dass sich dieses Projekt auf Radarsysteme mit einer Frequenz von 77 GHz konzentriert. Solche Systeme werden in der Zukunft hauptsächlich verbaut werden.

Neben den Winkelreflektoren wurden als alternative Ideen auch Konstruktionen aus zerknüllter Aluminiumfolie oder beschichteten Helmen vorgeschlagen.

Der Reflektor alleine erscheint als Produkt weniger attraktiv. Eine Kombination mit einer weiteren Funktion wurde angestrebt. Es kommen in erster Linie Produkte in Frage, die fest an ein Velo montiert werden (z.B. Lampe, Lichtreflektor); dadurch kann am ehesten eine zweckmässige Ausrichtung des Reflektors erzielt werden. Als Alternative könnte der Reflektor in Form eines Anhängers (zur Befestigung an einem Rucksack), zur Integration in einen Helm oder einer Satteltasche realisiert werden.

Markt und Vertrieb

Das Produkt soll in der Schweiz lanciert werden und gezielt in Europa verkauft werden. Der Vertrieb soll online erfolgen. Es ist ausserdem denkbar, die Reflektoren als Werbematerial für Firmen anzubieten; das Produkt soll daher die Möglichkeit eines einfachen Brandings ausweisen (z.B. eine geeignete, bedruckbare Fläche).

4.1. Erste Funktionsmuster

In Labortests wurde die Funktionalität der ersten Muster (Bild 1) untersucht. Die Reflektoren aus Aluminium-Folie gaben kein messbares Echo an die Radarstation zurück und wurden daher auch nicht weiter untersucht. Auch verschiedene Anordnungen der Winkelreflektoren konnten in den ersten Tests ausgeschlossen werden, da sie trotz aufwändigerer Konstruktion kein stärkeres Echo zurückwarfen.



Bild 1: Erste Funktionsmuster verschiedener Radarreflektoren

Die drei Muster mit dem stärksten Radar-Echo wurden für weitere Versuche in einer hochwertigen Variante aus Stahlblech gefertigt.

Der Reflektor 1 (R1) besteht aus einem einfachen Prisma (bzw. Dreieckspyramide), welches unter allen Mustern die grösste Kantenlänge hat. Der Reflektor soll so montiert werden, dass die Hauptachse parallel zur Fahrbahn und der Fahrtrichtung ausgerichtet ist. Die Reflektoren 2 (R2) und 3 (R3) wurden aus zwei Prismen gefertigt. Sie sind so konstruiert, dass der Steg, der die beiden Prismen verbindet, um eine Leuchteinheit erweitert werden kann. Der Reflektor soll so an das Fahrrad montiert werden, dass der Steg senkrecht zur Fahrtrichtung und der Fahrbahn ausgerichtet ist. Die Reflektoren R2 und R3 unterscheiden sich in der Kantenlänge der Prismen.

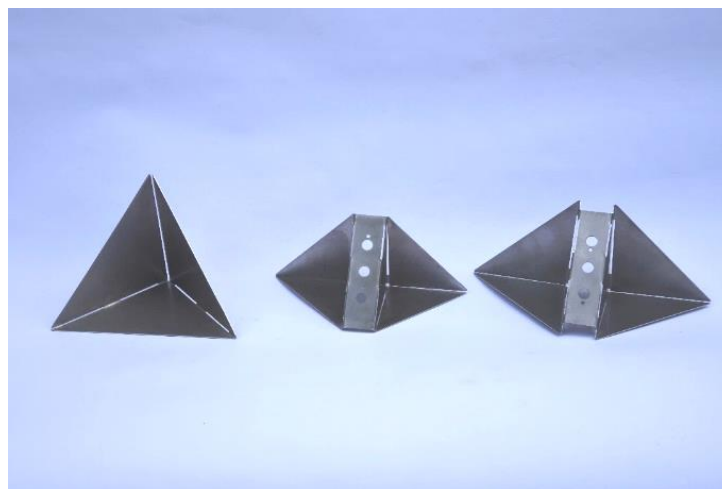


Bild 2: Reflektor-Muster die für die Fahrversuche ausgewählt wurden. Von links: R1, R2, R3

5. Laborversuche

Um Anhaltspunkte für die Grösse der zu entwickelnden Reflektoren zu erhalten, wurden verschiedene Reflektoren in den im Automobilbereich verwendeten Frequenzbereichen 24 - 26 GHz und 77 - 81 GHz getestet.

5.1. Messeinrichtung

5.1.1. Messungen 24-26 GHz

Die Messung wird mit Hilfe eines VNA (Vector Network Analyzer, HP-Agilent 8510C / 8513A) durchgeführt. An den Sende-Port des VNA wird ein Verstärker ($G=19\text{dB}$) und eine Horn-Antenne (OmniSpectra 2000-6256-00) als Sender angeschlossen. Am zweiten Port wird eine identische Horn-Antenne ebenfalls über einen Verstärker (Hittite HMC 263, $G=18\text{-}23.5\text{ dB}$) als Empfangseinheit angeschlossen. Die Sendefrequenz wird im CW-Modus (d.h. nicht gepulst) von 24 GHz bis 26 GHz durchgestimmt; durch entsprechende Analyse des empfangenen Signals kann daraus ein Plot der Empfangsleistung in Funktion der Distanz zum Sender erstellt werden. Dieses Funktionsprinzip wird, soweit bekannt, auch in den in Autos verbauten Radar-Anlagen verwendet. Das verwendete Frequenzband entspricht ebenfalls den in Autos eingesetzten Anlagen, wobei ein zweites oft verwendetes Band (77 GHz) mit dem von uns verwendeten Messaufbau nicht gemessen werden konnte, da der VNA nur bis etwas mehr als 26 GHz senden kann.



Bild 3: Messeinrichtung, links: VNA, rechts: Sende- (links) und Empfangs- (rechts) Antenne.

Die Antennen wurden auf einer Höhe von ca. 1 m aufgestellt.

Der VNA und die Antennen bzw. deren Ausrichtung wurden anhand eines quadratischen Alu-Blechs mit 100 x 100 mm Kantenlänge kalibriert.

Insgesamt entspricht dieser Aufbau vom Prinzip her demjenigen in einem Fahrzeug. In Fahrzeugen werden allerdings aus Platz- und Kostengründen meist sog. Patch-Antennen eingesetzt. Teilweise werden mehrere Empfangsantennen verwendet, um eine steuerbare Richtungs-Sensitivität zu erreichen.

5.1.2. Messungen 77-81GHz

Da der oben diskutierte Aufbau nur bis 26 GHz einsetzbar ist, wurde für die Messungen im höheren Frequenzband ein "Evaluation Board" der Firma Texas Instruments (AWR1443 Evaluation Module AWR1443BOOST) eingesetzt. Das Modul dient zur Erprobung des mm-Wellen-Radarsystems AWR1443, welches im Automobilbereich eingesetzt wird. Hierbei sind auf einem Chip die Sende-, Empfangs-, und Auswerteelektronik (FFT) integriert. Es können bis

zu vier Sende- und drei Empfangs-Antennen phasengesteuert betrieben werden. Dadurch kann das System den Bereich vor der Antenne scannen, ohne dass bewegliche Teile erforderlich sind.

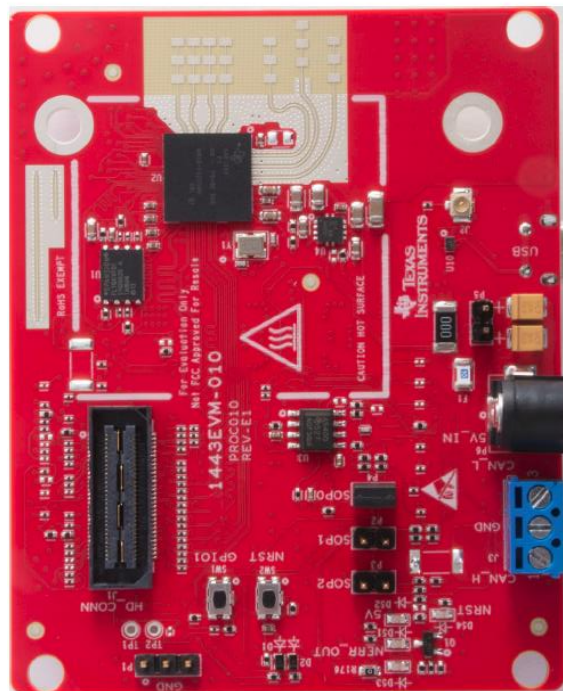


Bild 4: AWR1443BOOST System. Oben im Bild der 1443-Chip und die 4x3-Patch-Sendeantennen (links) sowie die 3x3-Patch-Empfangsantennen (rechts). Durch die versetzte Anordnung der Empfangsantennen kann zusätzlich eine Steuerung in vertikaler Richtung erreicht werden, so dass (grob) ein 3D-Scan vorgenommen werden kann.

5.2. Theoretische Überlegungen

Radarreflektoren arbeiten im Prinzip ähnlich wie optische Spiegel. Will man mit einer reflektierenden Fläche ein möglichst grosses Echo erzeugen, muss man diese Fläche sehr genau normal zur Antenne ausrichten. Ein solcher Reflektor würde folglich in unserer Anwendung nur funktionieren, wenn sich das Fahrzeug genau hinter dem Fahrrad befindet. Deshalb werden z.B. in der Seefahrt oft so genannte "Corner-Reflektoren" verwendet.

Als Mass für die Stärke der Reflexion wird normalerweise der sogenannte Radarquerschnitt verwendet. Ein Radarquerschnitt von 1 m² entspricht dem Echo, das eine Kugel mit einer Querschnittsfläche von einem Quadratmeter erzeugen würde. Da auf der Kugeloberfläche (theoretisch) nur ein Punkt genau der Quelle zugewandt ist, erzeugt z.B. eine genau ausgerichtete ebene Platte mit 1 m² Fläche ein viel grösseres Echo als die erwähnte Kugel.

Die Berechnung des Radarquerschnitts ist sehr komplex, es existieren aber Näherungsformeln z.B. für ebene Platten oder die erwähnten Winkelreflektoren:

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot A^2}{\lambda^2} : \text{ ebene Platte, } A = \text{ Fläche, } \lambda = \text{ Wellenlänge}$$

$$\sigma = \frac{4\pi \cdot a^4}{3 \cdot \lambda^2} : \text{Winkelreflektor aus drei rechtwinkligen Dreiecken, } a = \text{Kathete, } \lambda = \text{Wellenlänge}$$

Die Formeln gelten insbesondere nur, wenn die Dimensionen des Reflektors gross gegenüber der Wellenlänge sind. Da andererseits die theoretische Querschnittsfläche von der Wellenlänge abhängig ist, dürfen die berechneten Querschnittsflächen jeweils nur mit bei derselben Frequenz gemessenen Daten direkt verglichen werden.

Die gemessenen Signale werden in Dezibel angegeben. Es ist zu beachten, dass es sich bei dieser Einheit um eine logarithmische Einheit handelt, d.h. die Zusammenhänge sind nicht linear. Eine Steigerung von 3 dB entspricht einer doppelt so grossen Energie; eine Steigerung von 10 dB entspricht in einer linearen Skala dem Faktor 10.

5.3. Testobjekte

Als Testobjekte wurden mehrere verschieden grosse Winkelreflektoren aus mit Aluminium beschichtetem Karton gebaut. Zur Referenz wurde, wie bereits bei den 2017 durchgeführten Messungen an Fahrrädern, eine 10 x 10 cm grosse, möglichst genau ausgerichtete Alu-Platte mitgemessen.

Es wurden insgesamt fünf verschieden grosse Reflektoren hergestellt und vermessen.

Reflektor Nr	a [mm]	sigma (24GHz) [m*2]	sigma(77GHz) [m*2]	rel 10x10 [dB]
1	92	5.74	59.11	-1.5
2	71	2.01	20.70	-6.0
3	49	0.48	4.97	-12.2
4	42	0.26	2.68	-14.9
5	35	0.13	1.29	-18.1

Tabelle 1: Kantenlänge der Kathete (a), theoretischer Radarquerschnitt (sigma) bei 24 GHz und 77 GHz, sowie theoretisches Verhältnis der Stärke der Reflexion zur 10 x 10 cm grossen Platte.

5.4. Resultate

In Tabelle 2 sind die gemessenen Werte für die beiden Frequenzbänder dargestellt. Grün hinterlegt sind die Werte in Referenz zur 10 x 10 cm grossen Alu-Platte dargestellt (die Werte sind in dB, also 10*log (Messwert Velo/Messwert Platte) angegeben). Lesebeispiel: Reflektor 1 erzeugte ein um 7.6 bzw. 3.8 dB kleineres Echo als die Referenzplatte.

Reflektor Nr.	24-26Ghz		77-81Ghz	
	dB	ref. 10x10	dB	ref. 10x10
1	-27.9	-7.6	83.2	-3.8
2	-31.0	-10.7	79.2	-7.8
3	-36.6	-16.3	72.6	-14.4
4	-39.2	-18.9	69.1	-17.9
5	-41.1	-20.8	66.7	-20.3

Tabelle 2: Vergleich der reflektierten Signale bei beiden Frequenzbändern für die verschiedenen Reflektoren. Die grün hinterlegten Kolonnen zeigen die Stärke des Echos bezogen auf ein Referenzobjekt an, welches aus einer 10 x 10 cm grossen Aluplatte besteht.

Zum Vergleich sind in Tabelle 3 die 2017 mit verschiedenen Velos gemessenen Daten aufgeführt. Um einen Bezug zur aktuellen Mess-Serie herzustellen, sind in der Tabelle rechts die Werte zur Referenzplatte (analog zu Tabelle 2) dargestellt.

	24-26 GHz, ohne Fahrer	
	Peak dB	ref. 10x10 [dB]
E-Bike mit Korb	-38.2	0.6
E-Bike ohne Korb	-58.8	-20.0
Villiger	-49.7	-10.9
Renner	-57.9	-19.1
Karbon	-56.9	-18.1

Tabelle 3: Vergleich der reflektierten Signale aus der Messung 2017. Die grün hinterlegte Kolonne rechts zeigt die Stärke des Echos bezogen auf ein Referenzobjekt an, welches aus einer 10 x10 cm grossen Aluplatte besteht. Demnach erzeugte nur das E-Bike mit Korb ein grösseres Echo als das Referenzobjekt.

Reflektor	24 GHz	77 GHz
1	-6.18	-2.30
2	-4.69	-1.79
3	-4.07	-2.22
4	-4.04	-3.00
5	-2.77	-2.24

Tabelle 4: Vergleich der Reflexion in Bezug auf die Referenzplatte mit den theoretischen Werten aus Tabelle 1. Lesebeispiel: Reflektor 3 erzeugte bei 24 GHz ein um rund 4 dB schlechteres Echo als theoretisch erwartet.

5.5. Diskussion

Durch den Bezug auf die Referenz-Platte kann geschlossen werden, dass beispielsweise ein Reflektor mit einer Katheten-Länge von 71 mm (Reflektor 2) genügen würde, um bei 24 GHz ein gleich grosses Echo zu erzeugen wie das Villiger-Velo (10.7 <> 10.9 dB). Bei 77 GHz wäre das Echo sogar noch rund 3 dB besser (ungefähr doppelt so hoch). Um ein gleich grosses Echo wie das E-Bike mit Korb zu erzeugen, würde der grösste Reflektor allerdings nicht ausreichen.

Dass die Reflektoren generell ein schlechteres Echo erzeugten als theoretisch erwartet (Tabelle 4) ist nicht weiter erstaunlich, da z.B. die Flächen nicht sehr genau orthogonal zueinanderstehen. Ebenso war zu erwarten, dass die Reflektoren bei 24 GHz jeweils eine grössere Differenz zur Berechnung aufweisen, weil das Verhältnis der Kantenlänge zur Wellenlänge schlechter ist (die Kantenlänge muss "gross" sein gegenüber der Wellenlänge).

5.6. Radarecho unter Berücksichtigung der Einfallswinkel

Die oben beschriebenen Labormessungen zeigen das Echo der Reflektoren, wenn sie in einem idealen Winkel zur Radarquelle stehen. In der Praxis werden die Reflektoren, wie auch die Zweiräder, jedoch nicht immer optimal bestrahlt. In der Kurvenfahrt ist das Velo beispielsweise quer zur Fahrtrichtung des Autos verschoben, wodurch sich der Einfallswinkel des Radarstrahls verändert. Die Winkelreflektoren werfen in der Theorie das stärkste Echo zurück, wenn sie orthogonal zum Mittelpunkt bestrahlt werden und reflektieren schlechter, je grösser der Winkel zur Hauptachse wird.

Um einen Überblick über die abgedeckten Bereiche der Reflektoren zu bekommen, wurde das Radarecho in Abhängigkeit des Einfallswinkels gemessen.

5.6.1. Prüfaufbau / Muster

Die Reflektoren wurden mit der oben beschriebenen 77-81 GHz Messeinheit vermessen. Das reflektierte Echo wurde in Dezibel für verschiedene Winkel von 0° bis 60° in 5°-Schritten gemessen.

Getestet wurden die drei Reflektoren aus Bild 2. Zusätzlich wurden die Muster R2 und R3 unterschiedlich weit aufgebogen. In der ersten Variante sind diese um 45° aufgebogen; in der zweiten um 22°. In Bild 5 ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten dargestellt.



Bild 5: links: Reflektor um 23° gebogen; rechts: Reflektor um 45° gebogen

5.6.2. Resultate

Die Ergebnisse der Reflektoren unterscheiden sich zum einen durch die Stärke des reflektierten Signals, zum anderen durch die maximalen Winkel für die ein Signal vom Gerät erkannt wird. Aus Symmetriegründen reflektiert der Reflektor das gleiche Echo auch für die negativen Winkel, d.h. der vom Reflektor abgedeckte Bereich ist doppelt so gross.

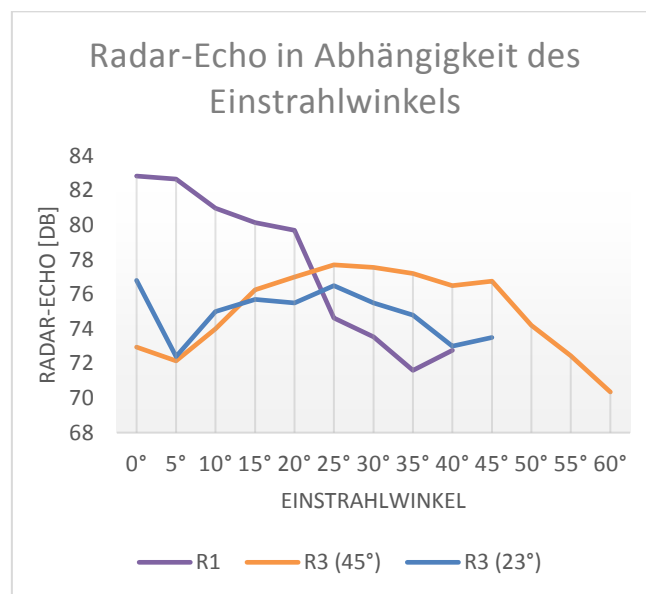


Bild 6: Radarecho in dB für die Reflektoren 1 und 3 in Bezug auf die Einfallswinkel in °

In Bild 6 sind die Echos der Reflektoren 1 und 3 in einem Diagramm dargestellt.

Reflektor 1 hat die grösste Fläche und wirft für kleinere Winkel von 0°-20° das stärkste Echo zurück. Für die Messungen in diesen Bereich beträgt das stärkste Echo 83 dB. Im Vergleich dazu zeigen die beiden Varianten des Reflektors 3 nur ein maximales Echo von 77 dB, d.h. ein um etwa 6dB geringeres Echo. Das Echo des Reflektors 1 wird für Winkel über 20° rapide kleiner und ist für Winkel grösser 40° nicht mehr messbar. Beide Versionen des Reflektors 3 erzeugen ab einem Einstrahlwinkel von 25° ein grösseres Echo als Reflektor 1.

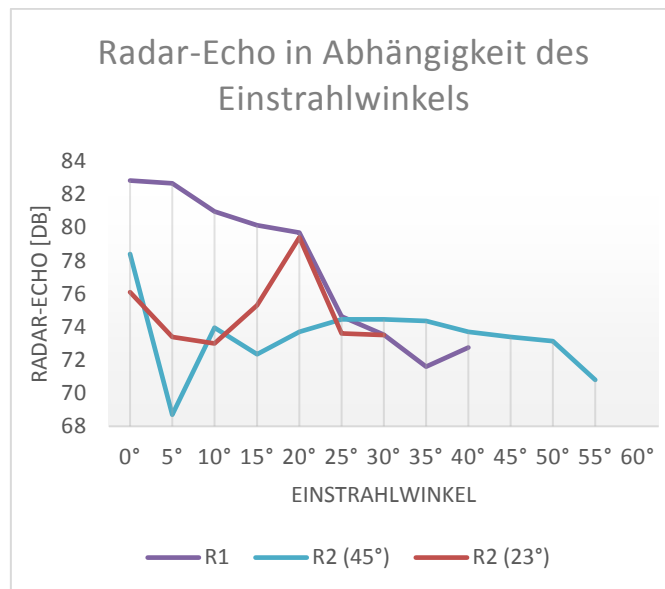


Bild 7: Radarecho in dB für die Reflektoren 1 und 2 in Bezug auf die Einfallswinkel in °


Bild 7 zeigt die Echos für die Reflektoren 1 und beide Versionen des Reflektors 2. Auch hier sind die Echos für die Winkel 0-20° bei Reflektor 1 am grössten. Die 23°-Variante liefert ab 30° kein messbares Echo und deckt damit den kleinsten Bereich ab. Die Reflektoren 2 und 3 zeigen für die Einfallswinkel von 0° eine Signalspitze. Diese lässt sich durch die Form der Reflektoren erklären; zwischen den beiden Prismen befindet sich eine kleine Fläche, diese sendet bei einem Einfallswinkel orthogonal zur Ebene das Signal zurück zum Empfänger.

5.6.3. Diskussion

Die Ergebnisse der Labortests gaben Auskunft über den Einfluss der Konstruktion der Reflektoren auf den abgedeckten Bereich des reflektierten Radarechos. Die Versuche zeigen deutlich die Unterschiede zwischen den verschiedenen Reflektor-Mustern, welche sich durch die Grösse als auch den Aufbau unterscheiden.

Die Reflektoren 3 in der um 45° gebogenen Variante deckten in diesen Versuchen den grössten Bereich ab. Die Varianten mit 23° gebogenen Reflektoren zeigten in diesen Versuchen keine bedeutenden Vorteile gegenüber der anderen Variante oder Reflektor 1. Das Echo das von diesen Reflektoren abgestrahlt wurde, war nur für sehr wenige Winkel höher als das der anderen Modelle. Es wurde daher beschlossen, diese Variante für weitere Versuche auszuschliessen.

Der Reflektor 1 besteht aus nur einem Winkelreflektor. Er hat die grösste Kantenlänge und wirft für kleine Einstrahlwinkel das grösste Echo zurück. Folglich sollten in Fahrversuchen die Zweiräder mit diesem Reflektor auf der geraden Strecke am besten erkannt werden.

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder	Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:	Seite:	16	von 36

6. Fahrversuche

In den Fahrversuchen wurde in zwei Messreihen der Einfluss der Reflektoren auf die radarbasierten Fahrerassistenzsysteme im Längsverkehr untersucht, um daraus die Spezifikationen des Endprodukts zu definieren.

In der ersten Messreihe wurden Versuche mit den drei Reflektoren aus den Laborversuchen und zwei Automodellen durchgeführt. In der Versuchsreihe 2 sollten die Szenarien wiederholt werden, für die die Reflektoren einen Vorteil zeigen konnten.

6.1. Methodik

Prüfaufbau / Fahrzeuge / Prüfstrecke

Bei den Testfahrzeugen handelte es sich um einen Mercedes-Benz CLA und einen Audi A3. In beiden Fahrzeugen ist eine Abstandshalteautomatik und ein Notbremsassistent verbaut, welche eine Radarfrequenz von 77 GHz verwenden.

Der Touring Club Schweiz (TCS) stellte für die Fahrexperimente eine Teststrecke zur Verfügung, auf der Versuche auf gerader Strecke sowie in Kurven durchgeführt werden konnten.

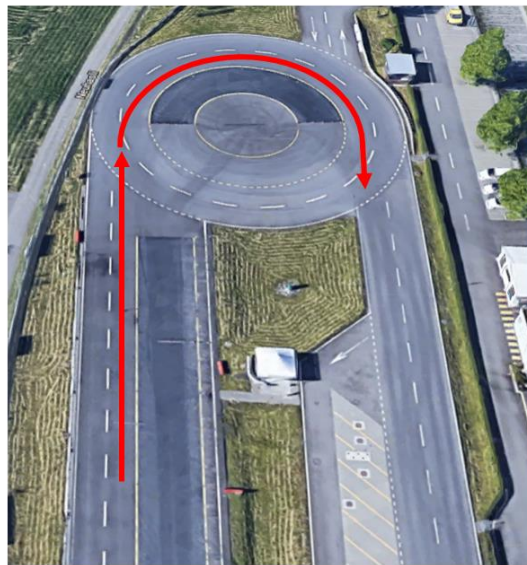


Bild 8: Aufnahme der Teststrecke in Emmen. Der Verlauf der abgefahrenen Strecke in den Versuchen ist rot eingezeichnet.

Test des ACC

Zum Test der Einflussnahme der Reflektoren auf das ACC der Autos, wurde die in Bild 8 dargestellte Prüfstrecke abgefahren. In den Versuchen fuhr das Zweirad mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h auf der Geraden der Teststrecke und bog anschliessend bei gleicher Geschwindigkeit in die Rechtskurve ein. Das Auto näherte sich dem Zweirad mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 km/h auf der Geraden und folgte dem Zweirad so lange, bis das System das Zweirad verlor. Sowohl das Auto als auch das Velo wurden in jedem Versuch von denselben Personen gefahren. Der Fahrer des Autos befuhr die Teststrecke mit eingeschaltetem Abstandstempomat. Er beschleunigte und bremste das Auto nur, wenn eine

Kollision zwischen Velo und Auto vermieden werden musste; ansonsten regelte das Auto die Geschwindigkeit selbstständig. Die Position des Zweirads auf der Strasse wurde in den Versuchen variiert, um möglichst viele Szenarien aus dem Strassenverkehr zu berücksichtigen. Für jeden Reflektor und für beide Fahrzeugtypen fuhr das Velo jeweils mittig, links und rechts auf der Fahrbahn.

Es wurden die drei Reflektor-Modelle verwendet, die in den zuvor durchgeführten Labortests die besten Ergebnisse erzielten. Sie wurden auf der Höhe des Radarsenders des Autos am Zweirad montiert und senkrecht zu Fahrbahn ausgerichtet (Bild 9). Zur Referenz wurden die Velos für jedes Szenario sowohl mit als auch ohne Reflektoren geprüft.




Bild 9: Montage des Radarreflektors am Schutzblech des Velos

Für die zweite Versuchsreihe wurde der Prüfaufbau für eine bessere Reproduzierbarkeit vereinfacht. Die Tests wurden nur noch mit Reflektor R3, dem E-Bike und dem Mercedes-Benz durchgeführt.

Test Nr.	Reflektor montiert	v Velo [km/h]	Position Velo	v Auto [km/h]
1-10	Nein	20	Mittig	40
11-21	Ja	20	Mittig	40
22-29	Ja	15	Mittig	50
30-39	Nein	15	Mittig	50
40-42	Nein	15	Mittig	50
43-47	Nein	20	Rechts	40
48-52	Nein	20	Links	40
53-57	Nein	20	Mitte	50
58-62	Ja	20	Mitte	20

Tabelle 5: Geschwindigkeiten der Fahrzeuge für die unterschiedlichen Versuche

	Titel: Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum: 21.01.2019	
	Autoren: AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:	Seite:	18 von 36

Die Prüfstrecke war dieselbe, wurde aber um einige Markierungen erweitert. Ausserdem wurden die Geschwindigkeiten von Velo und Auto, wie in Tabelle 5 dargestellt, variiert.

Als Erweiterung der Versuche mit fahrendem Auto wurde getestet, wie lange die Zweiräder erkannt werden, wenn diese vor dem stehenden Auto wegfahren. Das Auto stand in diesem Versuch auf der Fahrbahn mit eingelegtem Gang und aktivierten ACC und das Velo fuhr sowohl in der Geraden als auch in der Kurve die Fahrbahn entlang, bis das ACC das Velo verlor.

Abschliessend wurden Versuche durchgeführt, in denen das Velo neben der Fahrbahn fuhr und erst kurz vor dem fahrenden Auto in die Fahrbahn einscherte. Das Auto fuhr zu diesem Zeitpunkt etwa 50 km/h und das Velo 15 km/h.

Test des AEB

Das Vorprojekt aus dem Frühjahr 2018 zeigte deutlich, dass die Notbremsassistenten stehende Velos sehr schlecht oder gar nicht erkennen. Ob die Reflektoren das AEB der Autos beeinflussen können wurde in folgenden Szenarien getestet:

- Zweirad mit und ohne Reflektor steht auf der Fahrbahn
- Zwei Zweiräder mit Reflektor stehen auf der Fahrbahn
- Reflektor steht auf einem Pylon auf der Fahrbahn
- Ein Auto steht auf der Fahrbahn

In allen Tests fuhr das Auto mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf die stehenden Hindernisse zu. Idealerweise sollte das Auto von alleine abbremsen und vor dem Hindernis zum Stillstand kommen. Der Fahrer übernahm die Kontrolle über das Auto, wenn er glaubte, dass eine Kollision nicht mehr vermieden werden könne.

Auswertung / Messtechnik

Für die Auswertung der Fahrversuche wurden folgende Eigenschaften untersucht:

- Welcher Abstand besteht zwischen Auto und Velo, wenn das Velo detektiert wird?
- Wie lange wird das Velo in der Kurvenfahrt erkannt?
- Wie zuverlässig werden die Velos erkannt; gibt es Situationen in denen das Auto nicht reagiert?

Zur Auswertung der Versuche wurden die Autos mit einem Kamera- und GPS-System ausgestattet. Eine Kamera wurde auf der Motorhaube montiert und filmte die Fahrbahn. Eine zweite Kamera war im Cockpit angebracht und zeichnete die Signale der FAS auf. Das GPS und beide Kameras konnten über eine Steuereinheit synchron gestartet und gestoppt werden. Auf diese Weise war es möglich, die Distanzen zwischen Velo und Auto zum Zeitpunkt des Erkennens zu ermitteln.

Zur Bestimmung der Distanzen mit dem Videomaterial wurde eine durch die AGU entwickelte Software verwendet. Durch angebrachte Bodenmarkierungen auf der Strasse, konnte mit Hilfe der Software die perspektivische Verzerrung korrigiert werden. Es ist an dieser Stelle zu beachten, dass die Messungen der Distanzen mit den Videoaufnahmen durch die Auflösung des Bildes mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Distanzen im Bereich nahe der Kamera

lassen sich mit grösserer Genauigkeit bestimmen; Distanzen in grösserer Entfernung sind entsprechend ungenauer. Mit der hier verwendeten Kamera betrug der Fehler in nahen Distanzen (ca. 5 m) zwischen 0.1 und 0.3 m; bei grösseren Distanzen (ca. 20 m) zwischen 2 und 3 m.

Für die Ergebnisse aus Messreihe 2 wurden zusätzlich der Abstand zwischen Velo und Fahrbahnrand, sowie der Abstand zwischen Velo und Auto zum Zeitpunkt des Verlustes gemessen. In Bild 10 ist die gemessene Distanz abgebildet. Das grüne Trapez zeigt die theoretische, momentane Fahrbahn an; es ist durch die Markierungen, die vor den Versuchen auf der Strasse platziert wurden, definiert. Die Vermutungen, dass das Velo in den Kurven aus dem Radarbereich fährt und dass bestimmte Reflektoren in der Kurve besser erkannt werden, können dadurch besser überprüft werden.

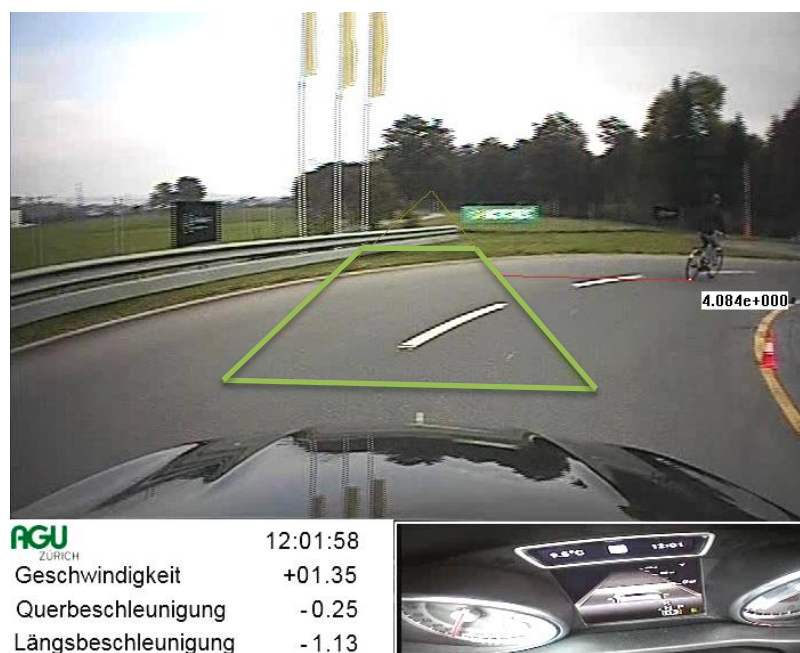


Bild 10: Der Abstand des Velos zur theoretischen, momentanen Fahrbahn des Autos

6.2. Resultate

Für alle Versuche wurden die oben beschriebenen Kriterien ausführlich ausgewertet und dokumentiert. Im Anhang sind alle Messdaten in Tabellen dargestellt.

6.2.1. Versuchsreihe 1

Fahrten auf gerader Strecke

In den Versuchen auf gerader Strecke wurde das Verhalten des ACC auf die fahrenden Zweiräder mit unterschiedlichen Reflektoren untersucht. Grundsätzlich wurden die Zweiräder von der Abstandsautomatik erkannt und das Auto passte die Geschwindigkeit selbstständig an die des Zweirads an. Nur in zwei Situationen wurde das Zweirad ohne Reflektor nicht von dem Auto erkannt bzw. die Geschwindigkeit wurde nicht reduziert. Unterschiede gab es bei den Zeitpunkten des Verlustes. Während in einigen Situationen die Velos bis weit in der Kurve detektiert wurden, gingen einige Velos bereits auf der Geraden verloren. Am häufigsten geschah dies bei den Zweirädern ohne Reflektoren. Diese wurden in 7 von 20 Situationen noch vor der Kurveneinfahrt von dem ACC verloren; für den Reflektor 2 waren es vier von 20 Mal und

für Reflektor 1 war es eine von sechs Situationen. Der Reflektor 3 wurde in allen sechs Situationen bis in der Kurve erkannt. Wenn die Velos mittig der Fahrbahn fuhren, wurden sie bis auf eine Situation bis in die Kurve erkannt, d.h. die Situationen mit frühzeitigem Verlust traten auf, wenn das Velo auf den äusseren Bereichen der Fahrbahn fuhr. In den Versuchen mit dem Audi wurden alle Zweiräder bis in die Kurve zuverlässig erkannt.

Test Nr.	Auto	Reflektor	Reaktion des Autos
1-7	Mercedes	Ohne R.	ACC reagiert teilweise; Verlust des Velos vor der Kurve in 6 von 8 Fällen
8-14	Mercedes	R2	ACC reagiert; Verlust des Velos vor der Kurve in 4 von 7 Fällen
15-20	Mercedes	R3	ACC reagiert; Kein frühzeitiger Verlust
21-26	Mercedes	R1	ACC reagiert; Verlust des Velos vor der Kurve in 1 von 6 Fällen
27-32	Mercedes	R2	ACC reagiert; Kein frühzeitiger Verlust
33-38	Mercedes	Ohne R.	ACC reagiert; Verlust des Velos vor der Kurve in 1 von 6 Fällen
1-6	Audi	Ohne R.	ACC reagiert; Kein frühzeitiger Verlust
7-12	Audi	R2	ACC reagiert; Kein frühzeitiger Verlust

Tabelle 6: Zeitpunkte für die die Zweiräder von dem ACC verloren gehen

Für die Distanzen zwischen Auto und Velo beim ersten Erkennen des Systems lässt sich kein Trend erkennen. Zwar sind die Distanzen für die verschiedenen Reflektoren unterschiedlich, doch ein Zusammenhang zur Stärke des Radar-Echos lässt sich nicht bestimmen. So ist beispielsweise für den Reflektor 1 die Distanz geringer als bei den Velos ohne Reflektor oder mit R3, obwohl R1 nach unseren Laborversuchen das stärkste Echo erzeugen sollte.

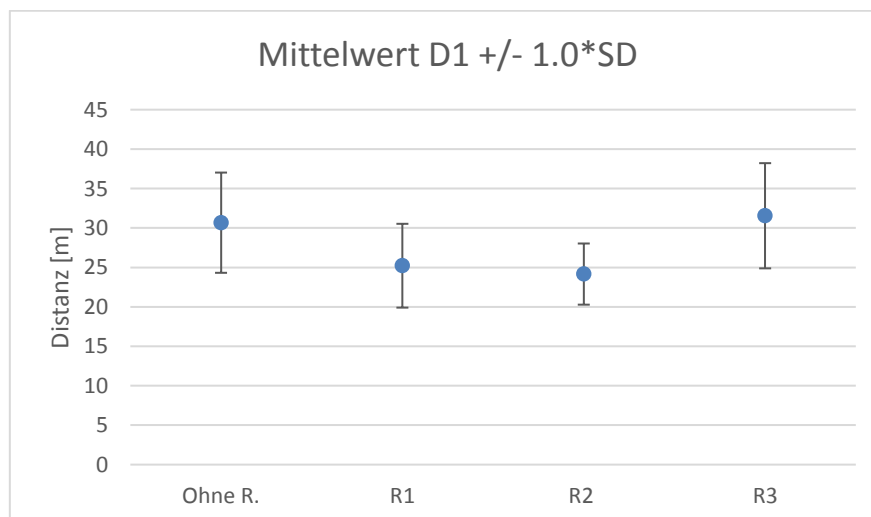


Bild 11: Distanzen zum Zeitpunkt des Erkennens für alle Reflektoren. In Blau sind die Mittelwerte aus den Versuchen dargestellt. Die „Whiskers“ zeigen die Standardabweichung.

Kurvenfahrt

In Bild 12 sind die Zeiten abgebildet während der die Velos mit unterschiedlichen Reflektoren ab Kurveneinfahrt vom Auto erkannt werden. Es sind auch hier die Mittelwerte der Fahrten mit E-Bike und Mercedes plus/minus der Standardabweichung dargestellt. In einigen Versuchen wurden die Velos bereits so weit vor der Kurveneinfahrt verloren, dass nicht bestimmt werden konnte, wann das Velo die Markierung der Kurveneinfahrt erreichte. Diese Versuche sind in dieser Darstellung nicht mit einbezogen. Dies war bei 4 von 8 Versuchen mit Velo ohne Reflektor der Fall. Bei den Velos mit Reflektor konnten bis auf zwei Messwerte bei R2 alle Messungen ausgewertet werden.

Reflektor 3 schneidet in diesen Versuchen am besten ab, er wird im Mittel 3.5 Sekunden länger erkannt als die Velos ohne Reflektor.

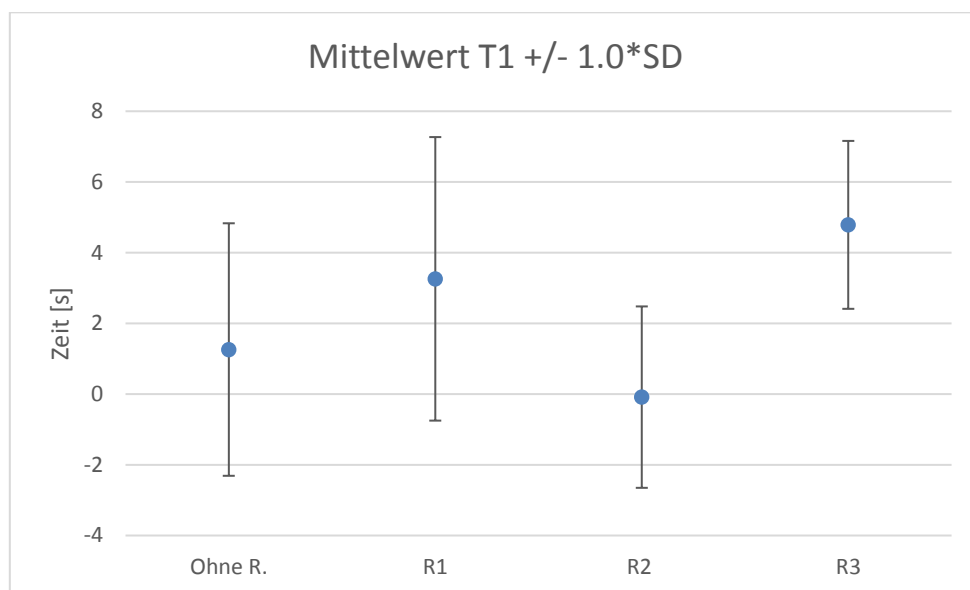


Bild 12: Zeiten die für die das Velo in der Kurvenfahrt erkannt wird. In Blau sind die Mittelwerte aus den Versuchen dargestellt. Die „Whiskers“ zeigen die Standardabweichung.

Notbremsungen

Das AEB reagierte weder bei den Versuchen mit stehendem Zweirad noch bei denen mit stehendem Hindernis. Aus Sicherheitsgründen wich der Fahrer jeweils einige Meter vor den Hindernissen aus. Es ist also möglich, dass das Auto auf einige Objekte noch reagiert hätte. Jedoch wäre davon auszugehen, dass eine Kollision, wenn überhaupt, nur sehr knapp verhindert worden wäre, dass also nur die Aufprallenergie verringert worden wäre. Im Versuch, in dem ein Reflektor auf einem Pylon montiert wurde, fuhr der Fahrer ohne einzugreifen auf das Hindernis zu. Das Auto kollidierte mit dem Reflektor, ohne vorher abzubremsen oder ein Warnsignal an den Fahrer auszusenden.

6.2.2. Versuchsreihe 2

In dieser Versuchsreihe wurden die Zweiräder – im Gegensatz zur ersten Versuchsreihe – bis auf wenige Ausnahmen zuverlässig auf der geraden Strecke erkannt. Selbst wenn das Velo im linken bzw. rechten Bereich der Fahrbahn fuhr, wurde es durch das ACC erfasst. Erst im Verlauf der Kurve wurde das Velo nicht mehr erkannt.

Je höher die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugen war, desto kleiner war der Abstand vor der Kurveneinfahrt, obwohl der eingestellte Abstand des ACC in allen Versuchen derselbe war. Der Reflektor beeinflusste die Abstände beim Erkennen, vor der Kurve und beim Verlust nicht. Auch in der Kurvenfahrt waren die Abstände mit und ohne Reflektor etwa gleich gross; beide gingen bei etwa gleicher Distanz zur Fahrbahn und zum Auto verloren. Für alle Versuche gingen die Velos nach etwa 4 Sekunden Kurvenfahrt verloren. Einzig bei den Versuchen aus Tabelle 8 wurden die Velos mit Reflektor länger erkannt. Unter Berücksichtigung der Distanzen des Velos beim Verlust, ist zu erkennen, dass die Velos (mit und ohne Reflektor) etwa gleich weit seitlich zum Auto versetzt waren. Die Auswertung des Videomaterials zeigte, dass in den Versuchen mit Reflektor das Velo näher am linken Rand der Fahrbahn fuhr.

v1=40 km/h; v2=20 km/h	mit Reflektor	ohne Reflektor	Differenz
Versuch Nr.	11-21	1-10	
Distanz beim Erkennen [m]	31.3	34.2	-2.9
Distanz vor der Kurveneinfahrt [m]	13.9	14.1	-0.1
Distanz beim Verlust [m]	13.5	13.4	0.1
Distanz Velo zur Fahrbahn [m]	3.9	4.1	-0.2
Zeit in Kurve [s]	4.0	3.9	0.1

Tabelle 7: Ergebnisse der Versuche 1-21 für die Velos mit und ohne Reflektor; mit Geschwindigkeiten von 40 km/h für das Auto und 20 km/h für das Velo.

v1=50 km/h; v2=15 km/h	mit Reflektor	ohne Reflektor	Differenz
Versuch Nr.	22-29	30-39	
Distanz beim Erkennen [m]	32.3	31.7	0.7
Distanz vor der Kurveneinfahrt [m]	6.3	6.1	0.2
Distanz beim Verlust [m]	8.0	7.8	0.2
Distanz Velo zur Fahrbahn [m]	1.8	1.6	0.2
Zeit in Kurve [s]	6.1	4.5	1.6

Tabelle 8: Ergebnisse der Versuche 22-39 für die Velos mit und ohne Reflektor; mit Geschwindigkeiten von 50 km/h für das Auto und 15 km/h für das Velo.

v1=50 km/h; v2=20 km/h	mit Reflektor	ohne Reflektor	Differenz
Versuch Nr.	58-62	53-57	
Distanz beim Erkennen [m]	39.9	39.1	0.9
Distanz vor der Kurveneinfahrt [m]	8.8	9.4	-0.6
Distanz beim Verlust [m]	9.2	9.4	-0.1
Distanz Velo zur Fahrbahn [m]	2.0	2.3	-0.3
Zeit in Kurve [s]	4.2	3.9	0.4

Tabelle 9: Ergebnisse der Versuche 53-57 für die Velos mit und ohne Reflektor; mit Geschwindigkeiten von 50 km/h für das Auto und 20 km/h für das Velo.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Versuche mit stehendem Auto dargestellt. Beim Prüfaufbau in der Kurve wurden die Velos mit und ohne Reflektor bei einer fast identischen Entfernung zum Auto verloren und auch der Abstand vom Velo zum Fahrbahn ist für beide bis auf wenige Zentimeter gleich. Auf der Geraden waren die Velos ohne Reflektor durchschnittlich fast 7 m weiter entfernt. Auffällig bei diesen Versuchen war, dass die Velos in vielen Situationen erst erkannt wurden, wenn der Fahrer sich bewegte oder das Velo beschleunigte.

Reflektor montiert	Position	Distanz bei Verlust [m]	Abstand Velo zu Fahrbahnrand [m]	
ja	Gerade	27.6		
ja	Gerade	26.4		
Mittelwert		27.0		
Standardabweichung		0.6		
nein	Gerade	33.8		
nein	Gerade	33.7		
Mittelwert		33.8		
Standardabweichung		0.0		
nein	Kurve	13.3	1.2	
nein	Kurve	13.8	1.5	
nein	Kurve	13.5	1.5	
Mittelwert		13.5	1.4	
Standardabweichung		0.2	0.1	
ja	Kurve	12.5	0.8	
ja	Kurve	13.5	1.4	
ja	Kurve	13.5	1.4	
Mittelwert		13.2	1.2	
Standardabweichung		0.5	0.3	


Tabelle 10: Ergebnisse aus den Versuchen mit stehendem Mercedes. Angegeben sind die Distanzen zwischen Auto und Velo zum Zeitpunkt des Verlusts. In den Kurvenfahrten ist zusätzlich der Abstand zur Fahrbahn analog zu Bild 10 angegeben.

In dem letzten Prüfaufbau scherte das Zweirad in einem Abstand von ca. 20 m vor dem fahrenden Auto ein. In keinem der drei Versuche zeigten die FAS eine Reaktion, sodass der Fahrer gezwungen war einzugreifen. Zwischen Einscheren des Velos und dem Ausweichmanöver des Fahrers blieb den Systemen eine Reaktionszeit von etwa zwei Sekunden. Auch das Anbringen von zwei Reflektoren am Velo führte nicht zu einer Reaktion der Systeme.

6.3. Diskussion Fahrversuche

In knapp 120 Fahrversuchen wurde die Reaktion der Fahrerassistenzsysteme ACC und AEB auf Zweiräder mit Radarreflektoren untersucht.

Für die Szenarien in den Versuchen wurden Situationen gewählt, wie sie typischerweise im innerstädtischen Verkehr zu erwarten sind. Eine Position der Zweiräder relativ zur Fahrbahn ist sowohl links (z.B. beim Abbiegen), mittig (z.B. im Kreisverkehr) und rechts als häufig anzutreffende Situation anzunehmen. Ein ebenfalls übliches Szenario ist das Einscheren eines Velos in die Fahrbahn, z.B. wenn eine Velospur auf eine Strasse mündet. Auch die Geschwindigkeiten der Autos von 40 - 50 km/h sind in den meisten Verkehrsbereichen der Stadt zu erwarten. Anzumerken ist, dass alle Versuche auf einer abgesperrten Teststrecke durchgeführt wurden. Die Versuche wurden also ohne entsprechende Umgebung oder andere Verkehrsteilnehmer durchgeführt. Man kann daher davon ausgehen, dass es sich für die Systeme um eher einfach zu verarbeitende Situationen gehandelt haben muss, da sie nicht durch Störsignale beeinflusst wurden.

	Titel: Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum: 21.01.2019	
	Autoren: AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:	Seite: 24	von 36


In der ersten Versuchsreihe gab es einige Situationen in denen der Mercedes Probleme hatte die Velos auf gerader Strecke konsequent zu erkennen; die Velos wurden noch vor der Einfahrt in die Kurve vom ACC verloren. Dies trat häufiger auf wenn das Zweirad ohne Reflektor fuhr. In weiteren Versuchen wurde daher untersucht ob sich diese Ergebnisse reproduzieren lassen. Es ergab sich in dieser Messreihe keine Situationen, in denen die Velos frühzeitig vom System verloren wurden. Eine Erklärung für das zuverlässigere Erkennen könnte sein, dass der Mercedes zwischen den beiden Versuchsreihen in der Werkstatt war, um das Verschlussystem des Gurtes auszutauschen. Im sogenannten Presafe-System von Mercedes hängen die Verschlusseinheit und das ACC zusammen. Es ist also möglich, dass ein neues Softwareupdate installiert wurde oder die Radareinheit neu kalibriert wurde. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass das ACC von der Reparatur unbeeinflusst geblieben ist. Eine unterschiedliche Software der Systeme reagiert gegebenenfalls anders auf einen Radarreflektor. Das Pilotprojekt der AGU (2017) zeigte, dass es zwischen den FAS verschiedener Hersteller Unterschiede gibt, auch wenn diese oftmals die gleiche Hardware verwenden.

Als problematisch erwiesen sich die Szenarien, in denen die Zweiräder in die Fahrbahn einscherten. Die Velos wurden weder mit noch ohne Reflektor erkannt, so dass die Reaktion der FAS ausblieb und der Fahrer die Situation durch Ausweichen entschärfen musste. In nachträglichen Tests wurde das Szenario mit einem Ford Focus wiederholt. Dieser erkannte die Velos problemlos. Daraus lässt sich ebenfalls schliessen, dass die Hersteller zum Detektieren der Umgebung unterschiedliche Software verwenden.

Anders als im Pilotprojekt wurden die Velos nicht früher von dem ACC erkannt wenn sie mit einem Reflektor ausgestattet waren. In den knapp 120 Versuchen zeichnete sich kein klarer Einfluss der Reflektoren ab. Im Laufe der Versuche konnte die Reproduzierbarkeit der Versuche deutlich verbessert werden. Durch eine Reduktion der Parameter im Versuchsaufbau und eine genauere Auswertung, wurden geringere Streuungen in den Ergebnissen erzielt. Die Ergebnisse sind also als zuverlässig zu bewerten.

Die Tests des AEB zeigten deutlich, dass die FAS ihre Umgebung nicht immer richtig interpretieren. Das Radar-Echo scheint nicht der entscheidende Faktor für die Entscheidung des Systems zu sein. In den Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass das Radar-Echo mit Reflektor besser ist, trotzdem reagierte keines der Autos auf ein stehendes Zweirad. Der Algorithmus hinter der Entscheidung wird von den Herstellern geheim gehalten und kann von uns daher nur als Blackbox betrachtet werden. Durch die Laborversuche konnte gezeigt werden, welchen Input das System ungefähr bekommt; über die Verarbeitung des Inputs können nur Vermutungen aufgestellt werden. Es ist denkbar, dass die Positionierung der Velos auf der Fahrbahn eine Rolle spielt. Wenn z.B. ein Zweirad nahe am Fahrbahnrand fährt, wird dies möglicherweise als Situation interpretiert, in der das Auto problemlos am Hindernis vorbeifahren könnte. Auch ist es möglich, dass sich ein Objekt für eine eindeutige Zuordnung bewegen muss. Deutlich wurde das bei den Versuchen, in denen das Zweirad vor dem stehenden Auto losfuhr. Das Velo wurde oft erst vom System erkannt, wenn der Fahrer in die Pedale trat oder seine Arme bewegte.

In den Kurvenfahrten scheint es auf den ersten Blick als würden die Velos aus dem Kegel des Radargerätes fahren. Im Verlauf der Kurve bewegt sich das Velo immer weiter von der

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	25	von 36

momentanen Fahrtrichtung des Autos weg, bis es an einem bestimmten Punkt verloren geht. Aussergewöhnlich ist, dass dieser Punkt für die einzelnen Versuche unterschiedlich weit aussen liegt. Um zu garantieren, dass die Objekte in der Kurve nicht aus dem Radarkegel fahren, sollten die Autohersteller den Radarbereich vergrössern. Denkbar wäre auch, dass das ACC Fahrbahnmarkierungen berücksichtigt, wie das auch Spurhalteassistenten tun. So könnte besser entschieden werden, welche Hindernisse sich wirklich auf der Fahrbahn befinden und welche problemlos passiert werden können.

Generell lässt sich festhalten:

- In den Fahrversuchen wurden Velos mit Reflektor teilweise besser erkannt.
- Die Software der ACC variiert unter den Herstellern, die Signale werden also abhängig vom Fahrzeugtyp unterschiedlich interpretiert.
- Die Entfernung von Auto zu Velo beim Erkennen wurde in diesen Versuchen durch die Reflektoren nicht beeinflusst.
- Der im Laborversuch gezeigte Effekt eines Radarreflektors hatte im Feldversuch keinen vergleichbaren Effekt. Es konnten nur wenige Szenarien getestet werden, und es entstand der Eindruck, dass ohne genauere Kenntnis der Algorithmen die "kritischen" Szenarien nicht genauer analysiert werden können.

7. Produktentwicklung

Die Labormessungen zeigten, dass die Radar-Sichtbarkeit von Zweirädern durch einen Reflektor verbessert werden kann. Auch wenn nicht für jedes Auto und jede von uns getestete Verkehrssituation die FAS durch die Reflektoren Zweiräder besser erkannten, scheint ein Radarreflektor ein potentiell gutes Präventionsprodukt, denn jede Verbesserung der Erkennbarkeit kann einen positiven Effekt auf die Sicherheit im Strassenverkehr haben. Zusätzlich könnte ein Reflektor bzw. eine bessere Radar-Sichtbarkeit bei der Weiterentwicklung zuverlässiger Entscheidungssoftware helfen.

In diesem Kapitel werden daher konkrete Vorschläge für einen Radarreflektor mit integrierter Rückleuchte erarbeitet.

7.1. Produktebeschreibung

7.1.1. Konzept / Produkteigenschaften

Für die Entwicklung eines verkaufsreifen Produktes eignet sich der Reflektor mit zwei Prismen, da dieser für einen grossen Bereich das Radarecho der Zweiräder verstärken kann. Um dem Nutzer ein attraktives Produkt liefern zu können, darf der Reflektor nicht zu gross sein, zur Verbesserung des Echos darf die Kantenlänge aber auch nicht zu klein sein. Bei einer Kantenlänge (Kathete) im Bereich von 4 cm kann das Echo für die meisten Zweiräder noch verbessert werden und die Grösse würde derjenigen ähnlicher Rücklichter entsprechen. Mit dieser Reflektorgrösse würden sich Dimensionen des Produktes von ca. Länge 11 cm / Höhe 6.5 cm / Dicke 3.5 cm ergeben.

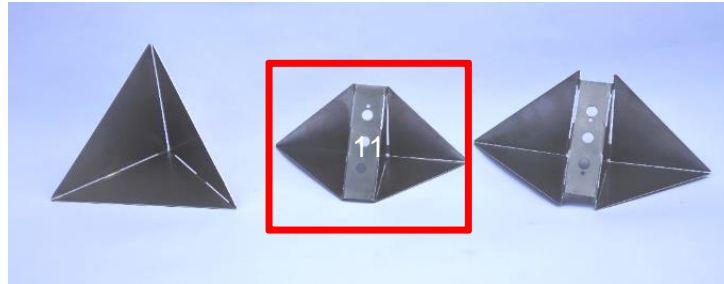


Bild 13: Reflektor-Muster R2 dient als Grundlage der Konzeptentwicklung

Um den Reflektor für die Velofahrer attraktiv zu gestalten, soll zusätzlich ein LED Licht eingebaut sein. Der Reflektor soll nicht zusätzlich zu bereits montierten Lichtern angebracht werden müssen. Des Weiteren sind für die Kundenakzeptanz und Anwendbarkeit folgende Eigenschaften wichtig:

- Grösse muss handlich sein
- in Kombination mit LED Rücklicht
- Lichtfarbe Rot, Helligkeit und Beleuchtungsart einstellbar (bspw. schnell blinkend)
- evtl. Bremslichtfunktion
- ansprechendes modernes Design, welches die Radarthematik aufgreift
- Gehäuse/Hülle in «weichem» Kunststoff für angenehme Haptik
- Radareinheit aus leitendem Material
- wasserdicht
- einfache und vielseitige Montage am Velo
- Batterie oder USB-Nachladefunktion
- Möglichkeit für fixe oder portable Montage
- Produkt muss Mehrwert in Sicherheit bringen (Für Kunden verständlich sein)
- attraktiver Preis

Beispiele Rücklichter mit ähnlichen Dimensionen:



Busch + Müller Toplight Flat Senso Batterie-Rücklicht. Preis ca. CHF 20.--
Masse: L 11.7cm / H 5cm / D 2 cm



Busch + Müller Toplight Line Batterie-Rücklicht Permanent 50mm. Preis ca. CHF 26.--



Littecco G-Ray Rücklicht mit Bremslichtfunktion. Preis ca. CHF 40.90.--
Masse: L 5.8cm / H 3.9cm / D 2.3cm

7.1.2. Design-Vorschläge

Für die Reflektoren wurden verschiedene Gehäuse aus Kunststoff entwickelt, durch die der eigentliche Winkelreflektor aus Metall (Bild 13: Reflektor-Muster R2 dient als Grundlage der Konzeptentwicklung) umfasst wird. Da die Radarsignale den Kunststoff problemlos durchdringen können und nur von den metallischen Teilen der Konstruktion reflektiert werden, kann die Hülle auch in einer anderen Form wie der Winkelreflektor gestaltet werden.

Die Kunststoffhülle kann mit einem Branding an der Vorderseite des Reflektors bedruckt werden und eignet sich daher gut als Werbeprodukt.



Bild 14: Design-Konzepte in Anlehnung an die Radarthematik (bspw. Tarnkappentechnik)

Durch ein ansprechendes Design soll das Produkt einer möglichst breiten Masse an Kunden zusagen. Die Rückseite des Reflektors könnte bspw. in einem minimalistischen Design ähnlich wie in Bild 15 entworfen werden.

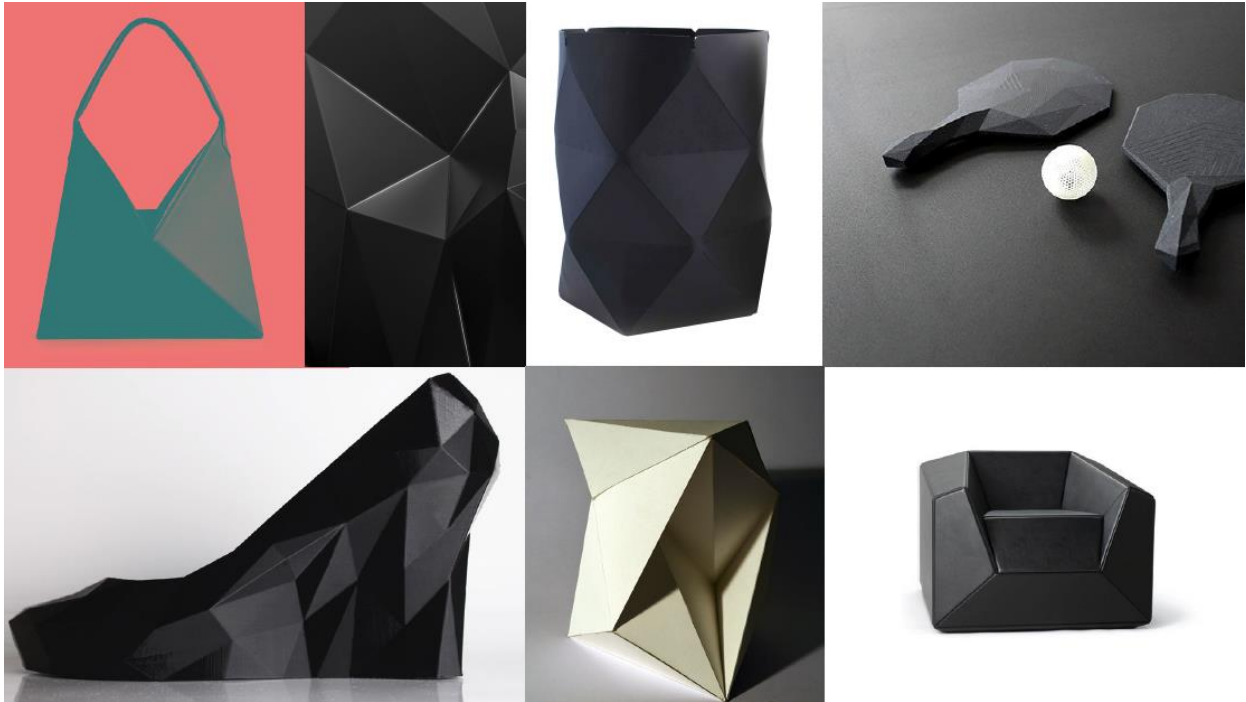


Bild 15: Moods und Referenzen für die Reflektor-Rückseite

7.1.3. Anwendungsbeispiele



Bild 16: Einsatz in der Stadt mit trendigem Velo ohne Schutzbleche



Bild 17: Einsatz im Sportbereich mit Rennrad



Bild 18: Einsatz in der Freizeit bei gelegentlichen Veloausflügen



Bild 19: Einsatz in der Freizeit mit Velo-Anhänger

7.2. Kundengruppen und Zielmärkte


Der Reflektor bietet dem Velofahrer zusätzliche Erkennbarkeit im Strassenverkehr. Die Chance durch Fahrassistenzsysteme (Distanz- und Geschwindigkeitsregler) besser (frühzeitig) erkannt zu werden, kann die Gefahr von Kollisionen reduzieren. Entsprechend bietet sich der Reflektor auch für den Vertrieb durch B2B Partnern an. Im Rahmen von Präventionskampagnen kann dieser bspw. gratis oder zu reduziertem Preis verteilt resp. angeboten werden.

Als Märkte kommen vorwiegend urbane, städtische Gebiete in entwickelten Ländern in Frage, da dort das notwendige Bewusstsein sowie die Kaufkraft vorhanden ist. Zum Start eignet sich der digitale Verkaufskanal. Parallel dazu sollte der B2B Vertrieb etabliert werden.

Die primäre Kundengruppe, an die sich das Produkt richtet, sind alle Fahrer eines herkömmlichen Velos ohne integriertem Rücklicht. Aber auch Nutzer von Velozubehör (z.B. Anhänger) werden mit diesem Produkt adressiert. E-Bikes scheiden als potenzielle Kunden aus, da die Velos meist von Werk aus schon ein Rücklicht verbaut haben.

7.2.1. Verkaufspreis und Produktkosten

Preislich darf der Reflektor nicht zu billig platziert werden, da die Vermittlung von Sicherheit und Qualität stark mit dem Preis in Verbindung gebracht wird. Um möglichst viele Reflektoren an Velofahrer verkaufen zu können, darf der Preis jedoch nicht über CHF 45.00 angesetzt sein.

	Titel: Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum: 21.01.2019	
	Autoren: AGU, SmartRidr, TCS		Vis.:	Seite: 31 von 36

Generell sollte bei Produkten welche als Massenware verkauft werden eine Marge von mind. 70% erreicht werden. Für die Produktion des Reflektors kann mit vier Kostenblöcken kalkuliert werden:


1. Block: Reflektoren (Prismen und Gehäuse für LED)
2. Block: LED Technologie (grösste Unterschiede, abhängig von Funktionalität wie USB Ladefunktion, Lichtstärke, etc.)
3. Block: Gehäuse/Hülle sowie Halterung (Kunststoff, wasserdicht)
4. Block: Verpackung und Anleitung

Je nach Materialisierung und Art der LED Technologie soll mit Preisen zwischen CHF 25.-- und CHF 45.-- kalkuliert werden. Für die genaue Kalkulation sind in einem weiteren Schritt die genauen Ausführungen und Margenziele zu definieren. Es gilt zu beachten, dass für die Produktion mit initialen Werkzeugkosten für den Reflektor sowie das Produktgehäuse (ca. CHF 25'000.--) zu rechnen ist. Diese Kosten sind mit grossen Stückzahlen jedoch gerechtfertigt und schnell amortisierbar.

7.2.2. Patent und Schutz

Für die Weiterentwicklung sowie erfolgreiche Marktlancierung soll der Reflektor patentiert werden. Dabei bietet sich das PCT Verfahren (Patent Cooperation Treaty) an. Mit diesem Verfahren kann eine Produkte- oder Anwendungs idee von Beginn in aktuell 152 Staaten gemäss dem Prinzip der Prioritätsanmeldung für 30 Monate geschützt werden. In dieser Zeit wird dann entschieden, in welchen Ländern ein expliziter Patentschutz beantragt wird.

Neben dem Schutz der Innovation dient das Patent möglichen Investoren als Sicherheit und bei Markterfolg erhöht es den Wert des Produktes resp. der Unternehmung.

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	32	von 36


8. Fazit des Projektes und Aussichten

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Prototyp für einen Reflektor für Zweiräder zur Verbesserung der Radar-Sichtbarkeit entwickelt.

In Laborversuchen wurde das Radar-Echo von verschiedenen Reflektoren-Mustern und Zweirädern mit einer 24 GHz bzw. 77 GHz Radareinheiten gemessen. Die Versuche zeigen, dass das Echo von einigen Reflektoren deutlich grösser ist als das der Velos. Die Ergebnisse der Fahrversuche zeigen die Einflussnahme der Reflektoren auf das ACC und AEB verschiedener Autos in typischen Fahrsituationen des städtischen Verkehrs. Die Systemgrenzen des AEB konnten deutlich aufgezeigt werden. Stehende Zweiräder und teilweise auch stehende Autos konnten von dem System nicht erkannt werden. Für das ACC konnte in gewissen Situationen ein Vorteil durch die Reflektoren gezeigt werden, so wurden die Velos in den Kurvenfahrten teilweise länger von dem System erkannt. Dieser Effekt konnte allerdings nicht reproduziert werden.

Auch wenn die Funktion und das Schutzpotenzial eines Radarreflektors nicht eindeutig verifiziert bzw. quantifiziert werden kann, scheint ein Reflektor ein potenziell gutes Produkt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit zu sein. Durch eine zusätzliche Sichtbarkeit im Strassenverkehr ist durchaus zu erwarten, dass in Situationen, die hier nicht getestet werden konnten (z.B. Einflüsse der Umgebung, grössere Auswahl an Autos), die Sicherheit für Zweiradfahrer mit einem Reflektor verbessert werden könnte. Das Forschungsprojekt wurde mit der Entwicklung verschiedener Prototypen, bestehenden aus einer Kombination aus Reflektor und Rückleuchte abgeschlossen. Technische Anforderungen an das Produkt wurden definiert und konkrete Vorschläge für das Design erarbeitet. Damit wurde das Projekt wie vorgesehen abgeschlossen.

Der nächste Schritt wäre die Umsetzung als Produkt auf Basis der hier geleisteten Arbeiten möglich. Durch den Projektpartner smartridr könnte ein Business Case erstellt werden und die Vertriebskanäle evaluiert sowie die genaue Produktplatzierung definiert werden (z.B. als Marketing-Artikel und/oder als Fahrradzubehör). Sollte die Idee umgesetzt werden, verfügt smartridr über Kontakte zu möglichen Produzenten.

	Titel:	Entwicklung eines Radarreflektors für Zweiräder		Version / Datum:	21.01.2019		
	Autoren:	AGU, SmartRidr, TCS	Vis.:		Seite:	33	von 36

Literatur

- ADAC Testbericht (2016): Notbremsassistenten mit Fussgänger- und Radfahrer-Erkennung, URL: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/assistenzsysteme/default.aspx>
- bfu Status Report (2016), URL: www.bfu.ch
- AGU Zürich, TCS (2017): Untersuchung der Radar-Sichtbarkeit von Zweirädern, URL: <http://agu.ch/1.0/pdf/FVS-Radar-Velo.pdf>
- Hallbjörner P, Cheng S (2013): Improvement in 77-GHz Radar Cross Section of Road Work Jacket and Side Screen by Use of Planar Flexible Retrodirective Reflectors, IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, 12:1085-1088
- Kessler C, Etemad A, Alessandretti G, Heinig K, Selpi et al. (2012): EuroFOT Final Report
- PCT – Das internationale Patentverfahren, URL: <https://www.wipo.int/pct/de/>
- Watari K, Shoda T, Tsudaka K, Wada T, Mitsuura K, Okada H (2012): Vehicle Recognition Method Using Reflectors for Automotive Infrared Laser Radar, Proc. IEEE 12th Int. Conf. on ITS Telecommunications, 424-428
- Vijayaraghavan K, Kossett A, Rajamani R (2008): A study of roadside passive reflectors for improvement in the radar reliability on curves and at intersections, Proc. IMechE Vol. 222 Part D: J. Automobile Engineering, 1573-1586

Anhang

Versuche mit Audi A3; ACC auf kurze Distanz eingestellt; Toterwinkel 0.72m; Viereck: 3mx12.4m Diagonale: 12.8m									
Art des Reflektors	Versuchsnummer	Versuchsaufbau	Position des Zweirads	Geschwindigkeit des Zweirads	Reaktion des Autos Gerade	Reaktion des Autos Kurve	Eingreifen des Fahrers nötig?	Distanz beim Erkennen [m]	Zeit von Makierung bis Verlust [s]
ohne Reflektor (E-Bike)	1	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca <45°	nein	24.1	2.48
	2	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca <45°	nein	34.9	2.24
	3	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca >45°	nein	37.6	3.76
	4	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca 45°	nein	37.9	4.2
	5	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	35.2	2.28
	6	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	38.1	2.52
doppelter Reflektor, klein R2(E-Bike)	7	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca >45°	nein	25.5	4.12
	8	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca >45°	nein	32.6	3.84
	9	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca >45°	nein	32.6	3.84
	10	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren bei ca >45°	nein	30.4	4.24
	11	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	32.8	2.32
	12	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	30.6	0.4
einfacher Reflektor, gross R1	13	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	27	2.12
	14	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	Verloren kurz nach einfahrt	ja	38.1	2.48
	15	Velo steht mittig	mittig	0 km/h	Keine Reaktion	-	ja		
	16	Velo steht mittig	mittig	0 km/h	Keine Reaktion	-	ja		
	17	Auto steht	mittig	0 km/h	AEB erkennt- Eingreifen nötig	-	ja		
	18	Auto steht	mittig	0 km/h	AEB erkennt- Eingreifen nötig	-	ja		
	19	2 einzelne Reflektoren (gross) auf Pylonen		0 km/h	Keine Reaktion				

Tabelle 11: Messdaten der Versuche vom 25.7 (Messreihe 1) mit dem Audi A3

Versuche mit Mercedes C-Klasse; ACC auf kurze Distanz eingestellt; Toterwinkel 0.76m; Viereck: 3mx12.4m Diagonale: 12.8m									
Art des Reflektors	Versuchsnummer	Versuchsaufbau	Position des Zweirads	Geschwindigkeit des Zweirads	Reaktion des Autos Gerade	Reaktion des Autos Kurve	Eingreifen des Fahrers nötig?	Distanz beim Erkennen	Zeit von Makierung bis Verlust [ms]
Ohne Reflektor (E-Bike)	1	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	ACC erkennt - reagiert aber nicht	vorher abgebrochen	ja	35.4	-
	2	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	verloren wenn Velo bei ca. 90°	nein	38.5	4.08
	3	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	verloren nach ca. 90°	nein	24.1	4.6
	4	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	in Kurveneinfahrt verloren	ja	27.5	-2.12
	5	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC reagiert nicht	vorher abgebrochen	ja	-	-
	6	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt - reagiert aber nicht	vorher abgebrochen	ja	21.5	-
	7	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	vorher abgebrochen kurz vor Kurveneinfahrt verloren	ja	29.3	-
doppelter Reflektor, klein (E-Bike) R2	8	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	verloren nach < 90°	nein	30.5	3.16
	9	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	verloren nach ca. 90°	nein	25.6	2.84
	10	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	kurz vor Kurveneinfahrt verloren	ja	22.2	-2
	11	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	kurz vor Kurveneinfahrt verloren	ja	28.1	-4.16
	12	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	vorher abgebrochen	ja	18.7	-
	13	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	ACC erkennt und reagiert	kurz vor Kurveneinfahrt verloren	ja	20.5	0.08
	14	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	kurz vor Kurveneinfahrt verloren	ja	23.5	-
Doppelter Reflektor, gross (E-Bike) R3	15	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren nach mehr als 90°	nein	38.5	5.6
	16	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren nach mehr als 90°	nein	30	5.12
	17	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren nach mehr als 90°	nein	30.1	6.6
	18	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren nach mehr als 90°	nein	19.4	7.56
	19	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 45°	nein	39.7	1.96
	20	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 45°	nein	31.6	1.88
Einfacher Reflektor (E-Bike) R1	21	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 90°	nein	32.8	4.28
	22	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei über 90°	nein	22.6	5.72
	23	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	ACC erkennt - verliert nach kurzer Zeit wieder	vorher abgebrochen	ja	20.5	-3.32
	24	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt, verliert kurz, erkennt wieder	verloren nach mehr als 90°	nein	24.4	8.52
	25	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren kurz nach Kurveneinfahrt	ja	31.9	2.12
	26	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren kurz nach Kurveneinfahrt	nein	19.1	2.24
Doppelter Reflektor, klein (Renntad) R2	27	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca. 90°	nein	30.8	5.04
	28	Velo fährt von Gerade in Kurve	Mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca. 90°	nein	31.6	4.52
	29	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca. 90°	nein	27.3	5.6
	30	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei über 90°	nein	33	5.56
	31	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren kurz nach Kurveneinfahrt	nein	32.1	1.6
	32	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren kurz nach Kurveneinfahrt	nein	28.2	2.04
Ohne Reflektor (Renntad)	33	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 90°	nein	31.4	4.88
	34	Velo fährt von Gerade in Kurve	mittig	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 90°	nein	25.7	4.12
	35	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc reagiert, verliert nach kurzer Zeit wieder	vorher abgebrochen	ja	24	-3.44
	36	Velo fährt von Gerade in Kurve	links	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 90°	nein	20.5	5.76
	37	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc reagiert, verliert nach kurzer Zeit wieder	vorher abgebrochen	ja	38.6	1.12
	38	Velo fährt von Gerade in Kurve	rechts	20 km/h	Acc erkennt und reagiert	verloren bei ca 90°	nein	34.8	3.92
	39	Velo steht	mittig	0 km/h	ACC reagiert nicht	-	ja		
	40	2 Velos stehen nebeneinander		0 km/h	ACC reagiert nicht	-	ja		
	41	Citroen steht		0 km/h	ACC reagiert nicht	-	ja		

Tabelle 12: Messdaten der Versuche vom 25.7 (Messreihe 1) mit dem Mercedes-Benz CLA

Versuchsnr.	Reflektor montiert	Position des Velos auf der Fahrbahn	Geschwindigkeit [km/h]	Geschwindigkeit Auto [km/h]	Mittelwert D1: Distanz bei Erkennen [m]	D2: Distanz vor Kurveneinfahrt [m] *	D3: Distanz bei Verlust [m]	D4: Abstand Velo zu Fahrbahnrand [m]**	Kurvenabschnitt bei Verlust [°](Velo)	T1: Zeit in Kurvenabschnitt [s]
1	nein	Mitte	20	40	31.1	12.8	14.2	2.3	45.0	2.8
2	nein	Mitte	20	40	33.6	14.3	11.7	4.1	45-90	4.1
3	nein	Mitte	20	40	33.6	13.2	11.9	3.8	45-90	4.6
4	nein	Mitte	20	40	32.5	14.2	12.9	4.7	45-90	4.2
5	nein	Mitte	20	40	36.8	15.2	12.6	4.7	45-90	4.3
6	nein	Mitte	20	40	35.7	14.2	12.3	4.4	45-90	4.7
7	nein	Mitte	20	40	31.9	13.9	12.3	4.6	45-90	4.3
8	nein	Mitte	20	40	36.8	14.4	14.4	4.3	45-90	3.6
9	nein	Mitte	20	40	35.6	14.2	16.0	4.2	45.0	3.3
10	nein	Mitte	20	40	33.8	14.1	15.5	3.5	45.0	3.3
Mittelwert					34.2	14.1	13.4	4.1		3.9
Standardabweichung					1.9	0.6	1.5	0.7		0.6
11	ja	Mitte	20	40	30.1	14.2	15.5	3.2	45.0	3.1
12	ja	Mitte	20	40	31.3	14.3	15.5	3.2	45.0	2.9
13	ja	Mitte	20	40	29.1	13.7	12.0	4.1	45-90	4.5
14	ja	Mitte	20	40	31.0	13.1	11.7	4.0	45-90	4.5
15	ja	Mitte	20	40	27.8	14.5	12.5	4.9	90.0	4.6
16	ja	Mitte	20	40	34.8	13.4	14.5	3.9	45-90	3.2
17	ja	Mitte	20	40	31.5	13.9	11.9	4.0	45-90	4.5
18	ja	Mitte	20	40	33.9	14.4	16.2	3.8	45.0	3.0
19	ja	Mitte	20	40	31.2	13.7	15.3	4.0	45.0	3.2
20	ja	Mitte	20	40	31.0	15.9	13.6	5.3	45-90	4.5
21	ja	Mitte	20	40	32.1	11.6	9.7	2.3	45-90	5.8
Mittelwert					31.3	13.9	13.5	3.9		4.0
Standardabweichung					1.9	1.0	2.0	0.8		0.9
22	ja	Mitte	15	50	34.93	5.63	8.73	2.2	45-90	6.5
23	ja	Mitte	15	50	27.03	6.13	7.63	1.4	45-90	5.8
24	ja	Mitte	15	50	31.83	6.33	8.03	1.8	90	6.4
25	ja	Mitte	15	50	32.23	6.73	8.43	2.3	45-90	6.3
26	ja	Mitte	15	50	28.83	6.13	7.13	1.5	90	6.5
27	ja	Mitte	15	50	32.13	5.63	8.43	2.1	45-90	5.7
28	ja	Mitte	15	50	41.33	7.43	7.93	1.8	45-90	6.2
29	ja	Mitte	15	50	30.33	6.63	7.63	1.6	45-90	5.3
Mittelwert					32.3	6.3	8.0	1.8		6.1
Standardabweichung					4.1	0.6	0.5	0.3		0.4
30	nein	Mitte	15	50	29.5	5.9	7.6	1.3	45.0	3.7
31	nein	Mitte	15	50	33.6	5.7	8.8	2.1	45-90	4.4
32	nein	Mitte	15	50	32.3	5.7	7.1	1.4	45-90	4.9
33	nein	Mitte	15	50	29.8	6.3	7.5	1.5	45-90	4.8
34	nein	Mitte	15	50	32.4	6.0	7.6	1.5	45-90	5.0
35	nein	Mitte	15	50	29.9	6.3	7.7	1.6	45-90	4.5
36	nein	Mitte	15	50	33.8	6.1	7.3	1.8	45-90	4.8
37	nein	Mitte	15	50	30.7	6.5	7.8	1.5	45-90	4.4
38	nein	Mitte	15	50	30.9	6.1	7.5	1.7	45-90	4.1
39	nein	Mitte	15	50	33.5	6.0	8.4	2.0	45-90	4.6
Mittelwert					31.7	6.1	7.8	1.6		4.5
Standardabweichung					1.6	0.2	0.5	0.2		0.4
40	nein	Mitte	15	50	20.0	5.8	7.3	2.2	45-90	4.8
41	nein	Mitte	15	50	19.4	4.8	6.4	2.0	45-90	4.7
42	nein	Mitte	15	50	21.1	4.4	5.0	1.1	45-90	4.5
43	nein	Rechts	20	40	40.4	9.8	11.8	2.3	0-45	2.9
44	nein	Rechts	20	40	40.1	12.5	14.1	3.2	45.0	2.7
45	nein	Rechts	20	40	35.9	13.0	14.6	2.9	0-45	2.6
46	nein	Rechts	20	40	39.6	14.3	10.0	3.8	45-90	3.9
47	nein	Rechts	20	40	37.6	15.0	14.7	3.6	45.0	2.7
Mittelwert					38.7	12.9	13.1	3.1		3.0
Standardabweichung					1.7	1.8	1.8	0.5		0.5
48	nein	Links	20	40	34.2	13.1	9.7	3.5	45-90	4.1
49	nein	Links	20	40	32.3	10.4	11.6	1.4	0-45	2.3
50	nein	Links	20	40	37.3	14.0	14.5	3.2	45.0	2.8
51	nein	Links	20	40	30.1	10.7	12.5	0.9	0-45	2.0
52	nein	Links	20	40	43.2	14.6	13.5	3.9	45-90	3.2
Mittelwert					35.4	12.6	12.4	2.6		2.9
Standardabweichung					4.6	1.7	1.6	1.2		0.7

Tabelle 13: Messdaten der Versuche vom 4.10 (Messreihe 2) mit dem Mercedes-Benz CLA