

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Thema der Dissertation: Überprüfung von Entwurfsparametern für Kreisverkehre
mit empirisch ermittelten Schleppkurven

Verfasser: Rüdiger Sobotta

Promotionsausschuss:

- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Fürmetz
- 1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wirth
- 2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Klaus Wichmann

Tag der Prüfung: 11. Mai 2006

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 26. Juli 2006

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1. Einleitung	5
2. Begriffsdefinitionen	11
3. Kreisverkehre – Analyse internationaler Entwurfsregelwerke	13
3.1 Bundesrepublik Deutschland	13
3.2 Schweiz	22
3.3 Österreich	25
3.4 Großbritannien	25
3.5 Frankreich	26
3.6 USA	26
3.7 Niederlande	30
3.8 Norwegen	30
3.9 Polen.....	31
3.10 Zusammenfassung	31
3.10.1 Außendurchmesser der Kreisfahrbahn.....	32
3.10.2 Fahrbahnbreite der Kreisfahrbahn.....	34
3.10.3 Ausrundungsradien in den Knotenpunktz- und -ausfahrten	35
4. Schleppkurven.....	39
4.1 Grundlagen	39
4.2 Ermittlung von Schleppkurven	42
4.2.1 Theoretische Verfahren.....	43
4.2.1.1 Graphische und graphisch-analytische Verfahren.....	44
4.2.1.2 Numerische / analytische Verfahren.....	45
4.2.1.3 EDV-Programme	46
4.2.2 Modellversuche	49
4.2.3 Praktische Fahrversuche.....	51
5. Schleppkurvenermittlung mit Hilfe von GPS	55
5.1 Grundlagen der Ortung mit Satelliten	55
5.2 Das Satelliten-Navigationssystem GPS	62
5.3 Ermittlung von Schleppkurven mit GPS – Verfahrensentwicklung.....	69
6. Versuchsprogramm	75
6.1 Testgelände bzw. Teststrecke	75

6.2 Testfahrzeuge	77
6.3 Testfahrer	79
6.4 Messaufbau und -verfahren	80
6.5 Versuchsprogramm.....	84
7. Auswertung.....	95
7.1 Verfahren	95
7.2 Ergebnisse.....	102
7.2.1 Breite der Kreisfahrbahn	102
7.2.1.1 Vergleich zwischen ermitteltem Breitenbedarf und der Breite gem. FGSV- Merkblatt [FGSV 1998].....	102
7.2.1.2 Erforderliche Fahrbahnbreite - Planungshilfe	104
7.2.2 Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt	118
7.2.3 Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt	124
7.2.4 Bemessungsdiagramm.....	126
8. Zusammenfassung.....	131
Quellenverzeichnis.....	137
Anlagenverzeichnis.....	143
Abbildungsverzeichnis	145
Anlagenteil	149

1. Einleitung

Kreisverkehre, speziell die sog. Kleinen Kreisverkehre mit einem äußeren Durchmesser der Kreisfahrbahn (kurz: „Außendurchmesser“) zwischen 26 m und 45 m, stellen für Verkehrs- und Stadtplaner oftmals eine sinnvolle Alternative zu sonst üblichen Knotenpunktformen (Einmündungen, Kreuzungen) dar.

Bei der Fahrt durch Kleine Kreisverkehre verringert sich wegen der engen Kurven die Fahrgeschwindigkeit der Kfz zwangsläufig. Dadurch können kleinere Zeitlücken zur Einfahrt in den Kreisverkehrsplatz genutzt werden, was die allgemein hohe Leistungsfähigkeit/Kapazität von Kreisverkehren erklärt.

Daneben gilt als wesentlicher Vorteil, dass durch die geringeren Fahrgeschwindigkeiten und durch die (im Vergleich zu Kreuzungen) geringere Anzahl an Konfliktpunkten (vgl. Anlage 1) das Unfallrisiko nachweisbar herabgesetzt ist. Dass Kreisverkehrsplätze, insbesondere deren Mittelinseln, hinsichtlich städtebaulicher Aspekte einen wesentlich größeren Gestaltungsspielraum bieten als andere Kreuzungsformen mit ihren entsprechend großen Fahrbahnverknüpfungsf lächen, sei hier nur am Rande erwähnt.

Dies mögen die wichtigsten Entscheidungskriterien zugunsten von Kreisverkehren sein, die in Deutschland in den vergangenen Jahren deutlich häufiger gebaut werden, als dies noch vor gut einem Jahrzehnt der Fall war.

Erste detaillierte Entwurfsempfehlungen für Kleine Kreisverkehrsplätze wurden in Deutschland 1993 vom Ministerium für Stadtentwicklung Nordrhein-Westfalen veröffentlicht. Die grundlegende Planungsrichtlinie für den Entwurf von Kleinen Kreisverkehrsplätzen in Deutschland ist heute das von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) im Jahr 1998 herausgegebene „Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehren“ [FGSV 1998], welches sich derzeit in Überarbeitung durch den Arbeitskreis 2.23.1 der FGSV befindet.

Als wesentliches Entwurfsprinzip bei der Planung von Kreisverkehrsplätzen gilt – wie bei allen Straßenverkehrsanlagen – die „Einheit von Bau und Betrieb“.

Kreisverkehrsplätze müssen rechtzeitig erkennbar, übersichtlich, begreifbar und befahrbar sein. Für die Befahrbarkeit ist dabei das größte zum Straßenverkehr zugelassene Fahrzeug gemäß § 32 StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung; vgl. Anlage 2) oder ein im Einzelfall örtlich anzusetzendes Bemessungsfahrzeug (z. B. ein spezielles Militärfahrzeug) ausschlaggebend. Dabei muss der Kreisverkehr vom jeweiligen Bemessungsfahrzeug mindestens mit der sich aus der Kurvenfahrt ergebenden Fahrgeschwindigkeit befahren werden können. Im Rahmen der Planung müssen deshalb grundsätzlich sowohl die Ein- als auch die Ausfahrgeometrie mit Hilfe sog. „Schleppkurven“ überprüft werden.

Schleppkurven (auch „Fahrkurven“) beschreiben die von einem Fahrzeug (bei Kurvenfahrt) überstrichene Fläche in der Grundrissprojektion und stellen somit den Flächenbedarf eines Fahrzeugs für einen bestimmten Bewegungsablauf (Fahrtverlauf) dar. In der Planungspraxis stehen Schleppkurven für ausgewählte Fahrzeuge und bestimmte Winkeländerungen als analoge, auf Papier gedruckte, „Schablonen“ in verschiedenen Maßstäben sowie digital für die Verwendung innerhalb von EDV-Konstruktions-Programmen zur Verfügung. Die Kontrolle bzw. Überprüfung des Planungsentwurfs ist für eine Fahrt durch den Kreisverkehr mit derartigen (statischen) Schleppkurven nur innerhalb grober Sprünge möglich, weil jeweils nur eine Richtungsänderung bestimmter, vorgegebener Winkeländerungen („FGSV-Schleppkurven 2001“: 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 gon; 1 gon = 0,9°) berücksichtigt werden kann. Das im Kreisverkehr meistens erforderliche Durchfahren von Gegenkrümmungen aus der Bewegung Einfahren-Kreisfahrt-Ausfahren kann mit solchen „starrten“ Schleppkurven nur näherungsweise überprüft werden.

Moderne CAD-Straßenentwurfsprogramme bieten dem Straßenplaner dagegen die Möglichkeit, spezielle Schleppkurven am konkreten Planungsbeispiel EDV-technisch fiktiv zu erzeugen, ohne den Einschränkungen der o. g. starren Schleppkurven unterworfen zu sein. Grundlage für solche EDV-technischen (dynamischen) Schleppkurven sind mathematisch-geometrische Verfahren, wie sie z. B. von HALTER, GUHLMANN oder MÜHLHOFF [MESCHIK 1992] beschrieben werden. Unter der Voraussetzung, dass die Fahrzeuggeometrie (Breite, Länge, überstehende Fahrzeugteile usw.) bekannt ist, können mit den genannten Verfahren schrittweise die Trajektorien (Bewegungslinien) einzelner Fahrzeugpunkte berechnet werden, die

sich aus dem zeitlichen Verlauf einer vorab festgelegten Fahrtgeometrie (z. B. durch einen Kreisverkehr) ergeben. Mit den Möglichkeiten moderner EDV-Technik sind derartige Berechnungen schnell und mit hoher (Rechen-)Genauigkeit möglich. Eine solche Fahrkurve ist jedoch nur dann mathematisch eindeutig zu berechnen, wenn die sog. „Leitkurve“ bekannt ist, an der entlang das Fahrzeug – genauer ein bestimmter Punkt des Fahrzeuges (z. B. die linke vordere Fahrzeugecke) – geführt wird. Die Leitlinie wird vom Anwender des verwendeten EDV-Konstruktions-Programms vorab festgelegt und beschreibt den Verlauf der zu untersuchenden Fahrt. Die mathematisch-geometrischen Herleitungen sind allerdings ausschließlich auf die Betrachtung von Kurvengeometrien und Fahrzeugmerkmalen beschränkt. Andere Einflüsse wie z. B. das fahrerische Können des Fahrzeuglenkers (Geschicklichkeit, Routine), seine „Fahrphilosophie“ (gelassener Fahrstil, aggressiver Fahrstil) oder ggf. der Einfluss von Straßenrandeinfassung, Straßenmöblierung, Beleuchtung usw. bleiben unberücksichtigt.

Es ist außerdem nicht geklärt, wie wahrscheinlich es ist, dass der Planer mit der von ihm am Bildschirm konstruierten Leitkurve aus der Vielzahl der theoretischen Möglichkeiten gerade diejenige Führungslinie trifft, die einer realen Fahrt vor Ort entsprechen würde oder ihr wenigstens mit hinreichender Genauigkeit nahe kommt.

An bestehenden, sich in Betrieb befindlichen Kreisverkehrsanlagen sind vielfach Fahrspuren im Straßenbegleitgrün, ausgebrochene Randbefestigungen oder nachträglich eingebaute Rasengitterpflaster in den Ausrundungsradien der Knotenpunktz- und -ausfahrten zu beobachten. Derartiges weist darauf hin, dass entweder die praktische Fahrt im Kreisverkehr von den Planungsvorgaben signifikant abweicht, oder dass – bei stimmigen Planungsvorgaben – zu kleine Bemessungsfahrzeuge angenommen wurden.

Mit der vorliegenden Arbeit soll anhand real durchgeführter Testfahrten überprüft werden, inwiefern die standardisierten, theoretischen Vorgaben der derzeit gültigen Richtlinien für Kleine Kreisverkehre den Erfordernissen ausgewählter Fahrzeuge genügen und ggf. welche Anpassungen erforderlich sind, um die Befahrbarkeit Kleiner Kreisverkehrsplätze sicherzustellen. Bei vorgegebener fiktiver Kreisfahrbahn-Geometrie sollen mit den Ergebnissen der Testfahrten die erforderlichen

Inselabmessungen und Ausrundungsradien mit den technischen Vorgaben des deutschen Entwurfsregelwerkes verglichen werden.



Abbildung 1: Beispiel für Fahrspuren neben der Fahrbahn; hier nachträgliche Fahrbahnverbreiterung mit Rasengittersteinen

Die unter Versuchsbedingungen erhaltenen Ergebnisse sollen dann am real ausgeführten Kreisverkehrsplatz verifiziert werden. Ziel ist es, konkrete Bemessungswerte für den Außendurchmesser der Kreisfahrbahn, die Breite der Kreisfahrbahn sowie für die Ausrundungsradien der Knotenpunktzu- und -ausfahrten zu erhalten, die – im Gegensatz zu den Angaben aus dem „Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehren“ – die gegenseitigen Abhängigkeiten (z. B. „Geringere Breite der Kreisfahrbahn erfordert größere Ausrundungshalbmesser in Zu- und Ausfahrt“) berücksichtigen.

Dazu wurden auf dem ehemaligen Flugplatz Neubiberg, dessen Flächen als Versuchsgelände zur Verfügung standen, die kurveninneren Fahrbahnbegrenzungen fiktiver Kreisverkehrsplätze unterschiedlicher Größe aufmarkiert. Die kurvenäußere Begrenzung ging als Versuchsergebnis aus der jeweiligen Fahrkurve der einzelnen Testfahrten hervor.

Als Versuchsfahrzeuge standen je ein Omnibus und ein Sattelzugfahrzeug der neuesten Fahrzeuggeneration zur Verfügung. Von unterschiedlichen Testfahrern wurden die imaginären Kreisverkehre auf dem Versuchsfeld mehrfach in den beiden Richtungen „Geradeaus-Durchfahrt“ („Halbkreis“) und „Linksabbiege-Durchfahrt“ („Dreiviertelkreis“) passiert.

Die Einzelfahrten wurden mit einer Standardabweichung der Lage von 1 – 4 mm aufgenommen (Koordinaten der GPS-Empfänger) und in ein CAD-Programm übertragen, wobei die Unsicherheit der Fahrzeugeckpunkte mit 2 – 5 cm abzuschätzen ist [STERNBERG 2000]. Damit standen digital erfasste Fahrkurven zur Verfügung, die als CAD-Zeichnung weiterverarbeitet werden konnten. Aus dem Flächenbedarf dieser Fahrkurven wurden dann – unter Zugrundelegung sinnvoll gewählter Auswertekriterien (z. B. Festlegung des Ein- und Ausfahrtbereiches) – Außendurchmesser, Kreisfahrbahnbreite und Ausrundungsradien in den Zu- und Ausfahrten ermittelt.

Folgende Zusammenhänge wurden ausgewertet:

- Einfahrradius/Breite d. Kreisfahrbahn und
- Ausfahrradius/Breite d. Kreisfahrbahn,

jeweils für vorgegebene Querschnitte in der Zufahrt bzw. in der Ausfahrt.

Als Endergebnis konnten die ermittelten Zusammenhänge in ein anwenderfreundliches Bemessungsdiagramm überführt werden.

2. Begriffsdefinitionen

Außendurchmesser:

Äußerer Durchmesser der („kreisrund“ angelegten oder als Kreisring angenäherten) Kreisfahrbahn.

Befahrbarkeitsindex:

Der Befahrbarkeitsindex in Prozent ist ein Quantilwert und drückt aus, welcher Personenanteil eines durchschnittlichen Fahrerkollektivs (dessen Fahreroutine vom erfahrenen Berufskraftfahrer bis zum Gelegenheitsfahrer repräsentativ gestaffelt ist) nach Wahrscheinlichkeit einen Kreisverkehr mit einer bestimmten, vorgegebenen Geometrie (insbesondere Kreisinseldurchmesser, Kreisfahrbahnbreite, Einfahrts- und Ausfahrtsausrundungsradien) problemlos befahren kann, d. h. ohne „hängen zu bleiben“. Große Quantilwerte werden sich also bei einer großzügigen, kleine bei einer knapp bemessenen Kreisverkehrsgeometrie ergeben.

Bemessungsfahrzeug:

Fahrzeug mit festgelegten technischen Daten, das der entwurfstechnischen Bemessung von Verkehrsanlagen zugrunde gelegt wird. [FGSV 2000-2]

Deichselmaß:

Längenabstand von der Fahrzeugfront bis zur Hinterachse eines Fahrzeuges.

Ersatzdeichselmaß:

Bei mehrgliedrigen Fahrzeugen das Deichselmaß eines Ersatzfahrzeuges, welches als Einzelfahrzeug die selbe Fahrbahnverbreiterung erfordert wie das Gliederfahrzeug.

Fahrlinie:

Siehe Leitlinie.

Fahrkurve:

Siehe Schleppkurve (straßenbauliche Definition).

Führungspunkt: Der für eine Fahrt festgelegte, unveränderliche Punkt eines Fahrzeugs, an dem das Fahrzeug zur Ermittlung der Schleppkurve an einer Leitlinie entlang geführt wird.
[MESCHIK 1992]

Geradeausdurchfahrt (durch den Kreisverkehr):

Der Kreisverkehr wird etwa zur Hälfte durchfahren, ohne dass ein Abbiegevorgang stattfindet; die ursprüngliche Fahrtrichtung wird beibehalten.

Kreisfahrbahn: Die (in der Regel „kreisrund“ angelegte) ringförmige Fahrbahn des Kreisverkehrsplatzes.

Kreisverkehr: Siehe Kreisverkehrsplatz.

Kreisverkehrsplatz: Plangleicher Knotenpunkt mit Verbindung der Knotenpunktarme über eine ringförmige Fahrbahn, die entgegen dem Uhrzeigersinn durchfahren wird. [FGSV 2000-2]

Leitlinie: Auch Leitkurve oder Fahrlinie. Eine vorgegebene Kurve, an der ein Fahrzeug während einer Fahrt entlang geführt wird.
[MESCHIK 1992].

Linksabbiegedurchfahrt (durch den Kreisverkehr):

Der Kreisverkehr wird zu etwa drei Viertel durchfahren (entspricht dem Linksabbiegen bei Einmündungen und Kreuzungen).

Motographie: Aufzeichnung (Festhalten) von Bewegungen (und Bewegungsabläufen) z. B. durch Fotografieren oder sonstige Aufzeichnungsmethoden.

Position: Beschreibung eines Ortes anhand von Koordinaten.

Schleppkurve (straßenbauliche Definition):

Auch Fahrkurve. Die bei Kurvenfahrt von der Lageplanprojektion eines definierten Fahrzeugs überstrichene Fläche.

3. Kreisverkehre – Analyse internationaler Entwurfsregelwerke

Ausgehend von der Bundesrepublik Deutschland (BRD) und ihren Nachbarländern Schweiz, Österreich und Frankreich, soll nachfolgend jeweils das entsprechende Entwurfsregelwerk für die geometrische Bemessung (nicht zur Berechnung der Leistungsfähigkeit) von Kreisverkehren bezüglich der Hauptabmessungen (Außendurchmesser, Fahrbahnbreite, Ausrundungsradien) dargestellt werden. Daneben wird ein Überblick über das Entwurfsregelwerk in weiteren Ländern wie Großbritannien und USA gegeben. Mit Angaben für die Niederlande, Norwegen und Polen wird die Auswahl ergänzt und abgerundet.

3.1 Bundesrepublik Deutschland

Deutsche Entwurfsrichtlinien für die Planung und Ausführung von Kreisverkehren sind:

- die **RAS-K-1** (Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Knotenpunkte, Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte; 1988) [FGSV 1988],
- die **EAHV 93** (Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen) [FGSV 1993],
- das **Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen** (1998) [FGSV 1998],
- **Zweistreifig befahrbare Kreisverkehre** (FGSV-Arbeitspapier Nr. 51, 2000) [FGSV 2000-1].

Die **RAS-K-1** kennen insgesamt 7 Grundformen (römisch beziffert von I bis VII) plangleicher Knotenpunkte (z. B. Einmündungen oder Kreuzungen mit und ohne Lichtsignalanlage, teilplanfreie Kreuzungen, Versatz, aufgeweitete Einmündung, Kreisverkehrsplatz), wobei Kreisverkehrsplätze (in der Regel ohne Lichtsignalanlage) der Grundform VII zugeordnet sind. Als Voraussetzung für die Ausführung von Knotenpunkten nach Grundform VII wird eine Beschränkung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf max. 70 km/h angegeben. Kleine Kreisverkehrsplätze sind gem. RAS-K-1 durch Mittelinseln mit 10 m bis 30 m Durchmesser definiert.

Während für Straßen außerhalb bebauter Gebiete und für anbaufreie Straßen innerhalb bebauter Gebiete fahrdynamische Anforderungen zu berücksichtigen sind, gilt für angebaute oder anbaufähige Straßen innerhalb bebauter Gebiete in der Regel eine fahrgeometrische Betrachtung als ausreichend. Aufgrund der geringen Geschwindigkeiten in Kleinen Kreisverkehren ist für diese deshalb eine fahrgeometrische Bemessung ausreichend.

Etwas detaillierter als in den RAS-K-1 werden die Entwurfselemente von Kreisverkehren in den **Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen (EAHV 93)** [FGSV 1993] angegeben. Kleine Kreisverkehre sind darin mit Außendurchmessern der Kreisfahrbahn zwischen 25 m und 40 m definiert; als Große Kreisverkehre gelten Anlagen mit einem Außendurchmesser von mehr als 40 m. Die Breite der Knotenpunktzufahrten liegt gem. den EAHV 93 zwischen 3,00 m und 3,50 m. Ihre Ausrundungsradien sollen zwischen 8,00 m und 10,00 m liegen. Explizite Festlegungen bezüglich Knotenpunktausfahrten werden in den EAHV 93 nicht getroffen.

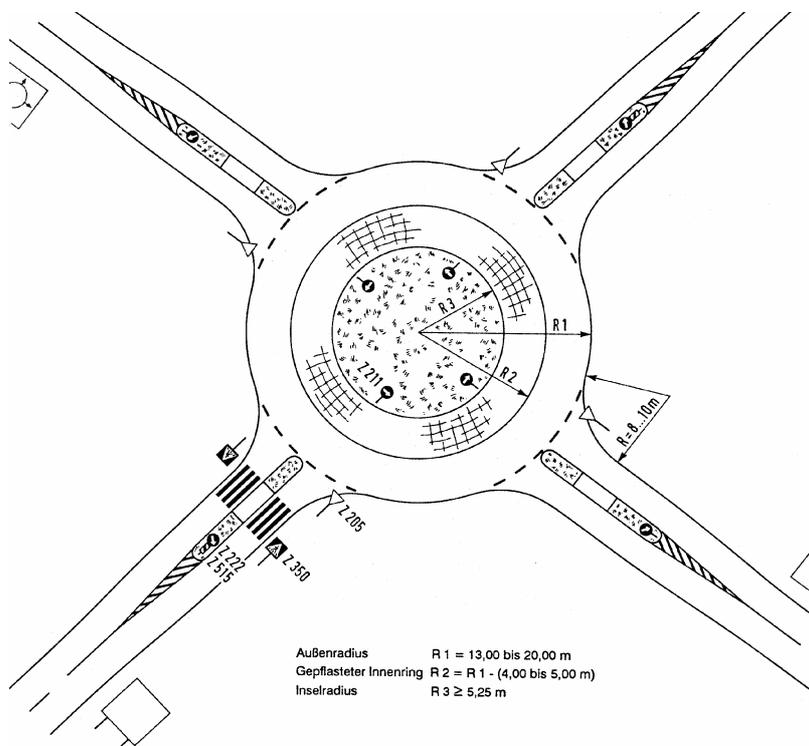


Abbildung 2: Kleiner Kreisverkehr gem. EAHV 93 [FGSV 1993]

Der Zusammenhang zwischen der Kreisfahrbahnbreite und dem Außenradius ist in den EAHV 93 in einem Diagramm dargestellt (**Abbildung 3**).

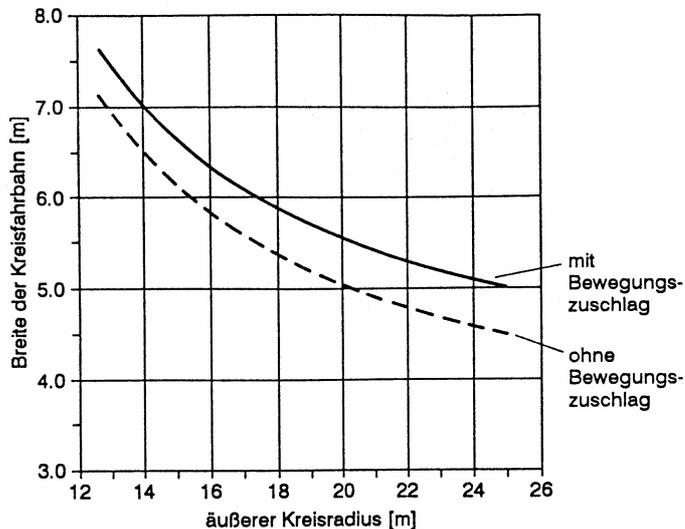


Abbildung 3: Breite der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit vom äußeren Kreisradius [FGSV 1993]

Eine umfassende Planungsunterlage stellt das **Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen** [FGSV 1998] dar. Dieses wurde 1998 vom Bundesministerium für Verkehr eingeführt und versteht sich als Ergänzung zu den bis dahin bereits bestehenden RAS-K-1 und EAHV 93.

Abweichend von den EAHV 93 werden in [FGSV 1998] Kleine Kreisverkehre mit Außendurchmessern von 26 m bis 45 m (im Gegensatz zur EAHV 93: 25 m bis 40 m) definiert. Die größeren Außendurchmesser ab 35 m sollen den Kreisverkehrsanlagen außerhalb bebauter Gebiete vorbehalten bleiben. Im Übergangsbereich bebaut/unbebaut sollen Außendurchmesser von 30 m nicht unterschritten werden.

In den EAHV 93 wird explizit ausgeführt, dass Kreisverkehrsinseln nicht zwingend kreisrund ausgeführt werden müssen, woraus zu schließen ist, dass auch die Kreisfahrbahn als solche nicht kreisrund angelegt sein muss. In [FGSV 1998] wird demgegenüber festgelegt, dass die Kreisfahrbahn (aus Gründen der Verkehrssicherheit) kreisrund anzulegen ist (geometrisch exakt: die Straßenachse der Kreisfahrbahn sei ein Kreis).

Die mögliche bzw. erforderliche Breite der Kreisfahrbahn wird in Abhängigkeit vom Außendurchmesser tabellarisch aufgelistet [FGSV 1998]. **Abbildung 4** stellt diesen Zusammenhang grafisch dar.

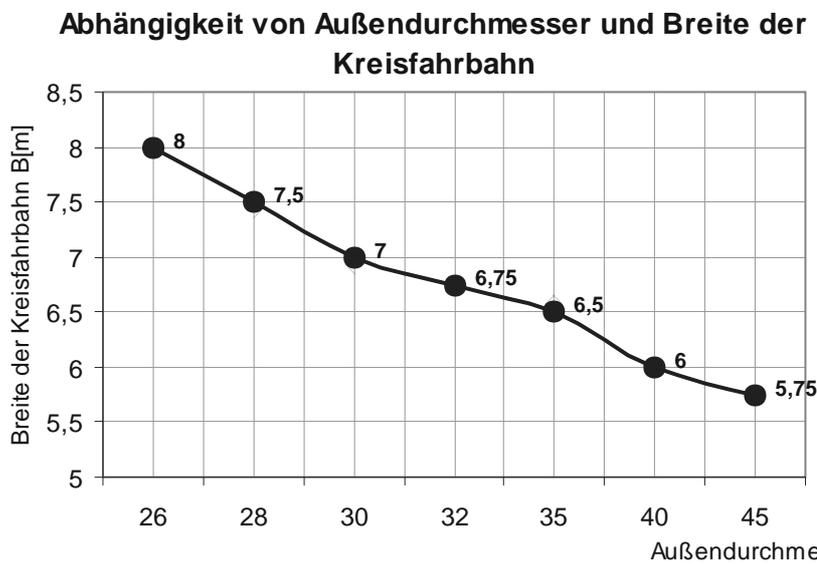


Abbildung 4: Fahrbahnbreite und Außendurchmesser Kleiner Kreisverkehre (nach: [FGSV 1998], Tab. 3)

Ein Planungsziel ist es, eine deutliche Geschwindigkeitsreduzierung im Kreisverkehr zu erreichen. Mit Hilfe der Mittelinsel soll deshalb für geradeaus fahrende Kfz eine ausreichende Ablenkung von der Verbindungsgeraden zwischen zulaufender und auslaufender Fahrstreifenachse erzwungen werden. Der Querversatz soll mindestens die 2-fache Fahrstreifenbreite der Knotenpunktzufahrt betragen (**Abbildung 5**).

Lkw benötigen gegenüber einem Pkw – besonders bei Kurvenfahrt – einerseits erheblich mehr Platz, andererseits soll die Fahrgeschwindigkeit der Kfz durch die oben beschriebene Ablenkung reduziert werden, um somit eine Verbesserung der Verkehrssicherheit sowie auch eine Steigerung der Kapazität zu erreichen. Konkurrierendes Ziel dazu ist jedoch die Sicherstellung der Befahrbarkeit für Großfahrzeuge, dem eine ausgeprägte Ablenkung der Fahrlinie entgegenläuft. Deshalb wird empfohlen, innerhalb bebauter Gebiete die Kreisfahrbahn mit jeweils einem asphaltierten Außenring und einem gepflasterten (exklusiv für Großfahrzeuge gedachten) Innenring im Breitenverhältnis von etwa 2,5:1 zu gliedern. Damit soll, bei

gleichzeitig ausreichendem Platz für Lkw, verhindert werden, dass Pkw-Lenker die Kurven „schneiden“.

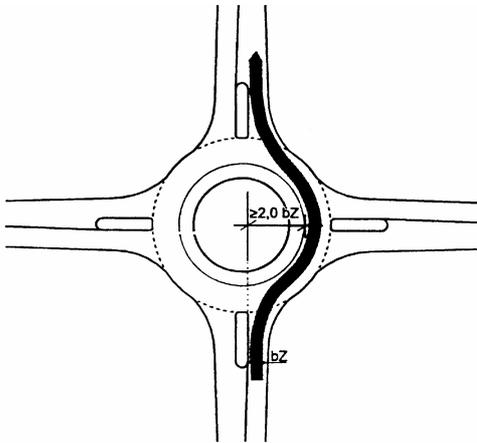


Abbildung 5: Ablenkung geradeaus fahrender Kfz durch die Kreisinsel und ggf. zusätzlich durch einen gepflasterten Innenring [FGSV 1998]

Die Knotenpunktzu- und -ausfahrten sind einstreifig anzulegen und im Lageplan möglichst senkrecht auf die Kreisfahrbahn zuzuführen; tangentielle Zu- und Ausfahrten sollen aus Gründen der Verkehrssicherheit vermieden werden. Die empfohlenen Fahrstreifenbreiten der Zu- und Ausfahrten und die Radien ihrer Eckausrundungen sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Tabelle 1: Fahrstreifenbreiten und Eckausrundungen der Knotenpunktzu- und -ausfahrten (nach [FGSV 1998])

	Knotenpunktzufahrt	Knotenpunktausfahrt
Breite		
innerhalb bebauter Gebiete	3,25 m bis 3,50 m	3,50 m bis 3,75 m
außerhalb bebauter Gebiete	3,50 m bis 4,00 m	3,50 m bis 4,25 m
Ausrundungsradien		
innerhalb bebauter Gebiete	10 m bis 12 m	12 m bis 14 m
außerhalb bebauter Gebiete	10 m bis 14 m	12 m bis 16 m

In [FGSV 1998] ist angemerkt, dass zusätzliche befestigte Flächen zur Sicherstellung der Befahrbarkeit außerhalb der Kreisfahrbahn zwischen Knotenpunktarmen, die einen spitzen Winkel bilden, notwendig werden können. Diese Flächen am Rand der Kreisfahrbahn oder der Fahrbahnteiler sollen dann als Pflasterflächen angelegt

werden. Ist lediglich ein geringer Schwerlastverkehrsanteil zu erwarten, soll stattdessen die Alternative des indirekten Abbiegens in Betracht gezogen werden (der Kreisverkehr wird von den betroffenen Großfahrzeugen vor dem Abbiegen einmal komplett durchfahren).

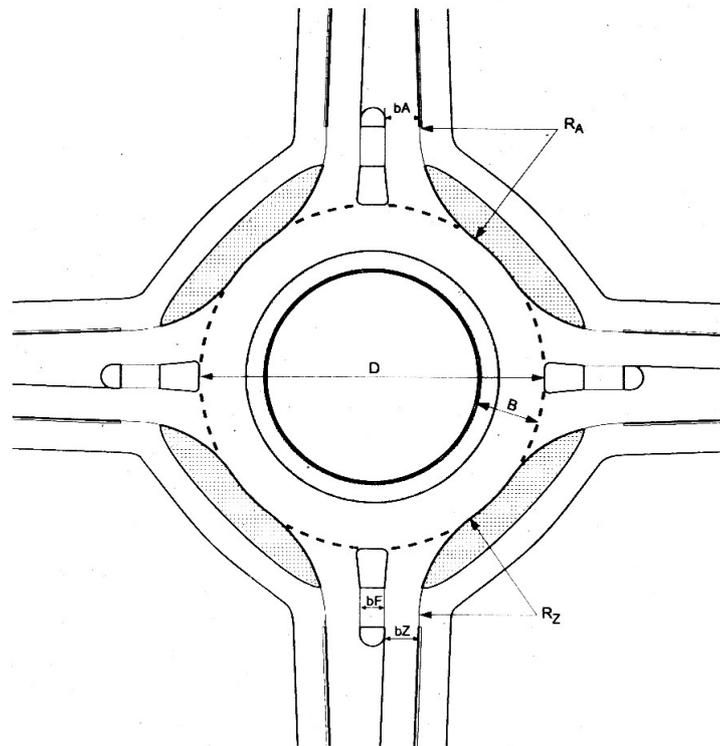
Für überbreite oder überlange Schwertransportfahrzeuge (auch militärische Fahrzeuge) soll im Einzelfall geprüft werden, ob zusätzliche gepflasterte Flächen erforderlich sind. Bypass-Lösungen, bei denen die Rechtsabbieger eigene Abbiegefahrbahnen außerhalb des Kreisverkehrsplatzes erhalten (direkte Führung), können ein geeignetes Instrument sein, die Befahrbarkeit eines Kreisverkehrs zu gewährleisten, hauptsächlich soll damit aber die Leistungsfähigkeit des Kreisverkehrs erhöht werden. Die Entwurfselemente für kleine Kreisverkehre sind in **Abbildung 6** zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 7 zeigt die kleinsten gem. [FGSV 1998] zulässigen Abmessungen im Kreisverkehr (Minimalwerte aller Entwurfselemente nach Merkblatt). Im Vergleich dazu ist in der Abbildung auch die größte zulässige Ringfläche abgebildet, die von einem Kraftfahrzeug nach § 3 d StVZO bei einer Kreisfahrt von 360° (Vollkreis) überstrichen werden darf („BO-Kraftkreis“).

In den genannten Richtlinien wird eine Überprüfung der Befahrbarkeit mit Hilfe von Schleppkurven gefordert. Diese Schleppkurven dienen als Hilfsmittel zur Überprüfung der notwendigen Fahrzeugbewegungsflächen in der Planung.

Die RAS-K-1 [FGSV 1988] stellen derartige Kurven in gedruckter Form für eine repräsentative Auswahl von Bemessungsfahrzeugen und für verschiedene Richtungsänderungen zur Verfügung. Diese RAS-K-1-„Papierschleppkurven“ wurden zwischenzeitlich durch neuere, den veränderten zulässigen Fahrzeugabmessungen gem. StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungsordnung) angepasste Schleppkurven ersetzt [FGSV 2001]. Den gedruckten Fahrkurven haften die üblichen reproduktions- und drucktechnisch bedingten Ungenauigkeiten an.

3.2.5 Zusammenfassende Darstellung der Entwurfselemente



Kreisverkehrsplätze innerhalb bebauter Gebiete	
Außendurchmesser (D) Kreisfahrbahnbreite (B) Verhältnis Außenring : Innenring	26 m – 35 m 8,00 m – 6,50 m ca. 2,5 : 1
Fahrstreifenbreite – Knotenpunktzufahrt (bZ) – Knotenpunktausfahrt (bA)	3,25 m – 3,50 m 3,50 m – 3,75 m
Ausrundungsradius – Knotenpunktzufahrt (R _Z) – Knotenpunktausfahrt (R _A)	10 m – 12 m 12 m – 14 m
Querneigung der Kreisfahrbahn (Außenring und Innenring)	– 2,5 %
Schrägneigung der Knotenpunktfläche	≤ 6 %
Breite der Fahrbahnteiler (bF) – mit Überquerungsmöglichkeiten für Fußgänger – mit Überquerungsmöglichkeiten für Radfahrer	≥ 2,00 m 2,50 m

Bild 4: Entwurfselemente für Kreisverkehrsplätze innerhalb bebauter Gebiete. Die Befahrbarkeit ist grundsätzlich mit Schleppkurven zu überprüfen

Abbildung 6: Zusammenfassung der Entwurfselemente für Kleine Kreisverkehrsplätze [FGSV 1998]

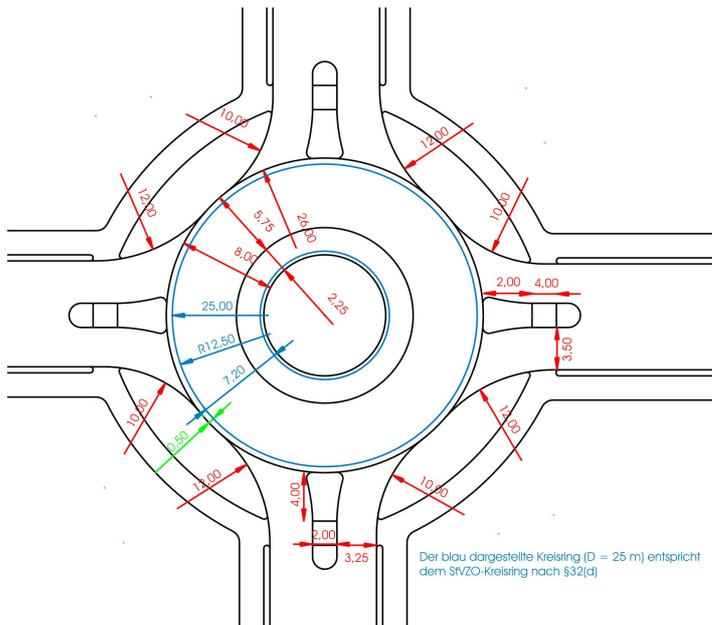


Abbildung 7: Minimalwerte für die Entwurfsэлеmente eines Kleinen Kreisverkehrs gem. [FGSV 1998] und zulässige überfahrene Kreisringfläche nach StVZO

Bei der mathematisch-geometrischen Entwicklung der (RAS-K-1-) Schleppkurven werden drei Fahrweisen (**Tabelle 2**) unterschieden.

Tabelle 2: Fahrkurven und zugehörige Fahrweisen gem. RAS-K-1 [FGS 1988]

<p>Fahrkurve 1</p>	<p>Der Kraftfahrer fährt zügig mit stetig zunehmendem Lenkradeinschlag in den Bogen ein und verlässt ihn mit ebenso schnell abnehmendem Lenkradeinschlag.</p>
<p>Fahrkurve 2 (für Fahrkurve 2 stehen keine Schleppkurvenschablonen zur Verfügung)</p>	<p>Der Kraftfahrer fährt langsam mit schnell zunehmendem Lenkradeinschlag in den Bogen ein und verlässt ihn mit ebenso schnell abnehmendem Lenkradeinschlag.</p>
<p>Fahrkurve 3</p>	<p>Der Kraftfahrer fährt sehr langsam mit sehr schnell zunehmendem Lenkradeinschlag in den Bogen ein und verlässt ihn mit ebenso schnell abnehmendem Lenkradeinschlag. Diese Fahrkurve entspricht bei Schwerlastfahrzeugen und Bussen näherungsweise auch einer Fahrweise mit frei zurückdrehendem Lenkrad.</p>

Für zweistreifig befahrbare Kreisverkehre (die im Weiteren nicht näher betrachtet werden) hat die FGSV im Jahr 2000 das **Arbeitspapier Nr. 51** [FGSV 2000-1] herausgegeben. Zweistreifig befahrbare Kreisverkehre werden als Möglichkeit angesehen, die Leistungsfähigkeit Kleiner Kreisverkehre zu steigern. Merkmal ist eine breite Fahrbahn ohne Fahrstreifenmarkierung, so dass zwei Pkw nebeneinander fahren können, ein Überholen von Lkw jedoch nicht möglich ist. Der Einsatz dieser zweistreifig befahrbaren Kreisverkehre soll sorgfältig geprüft werden, da die Verkehrssicherheit geringer als bei einstreifig befahrbaren Kreisverkehren ist. Für die geometrische Gestaltung der zweistreifig befahrbaren Kreisverkehre gelten die Entwurfsgrundsätze für Kleine Kreisverkehre mit einstreifiger Kreisfahrbahn in Verbindung mit den in **Tabelle 3** zusammengefassten Ergänzungen.

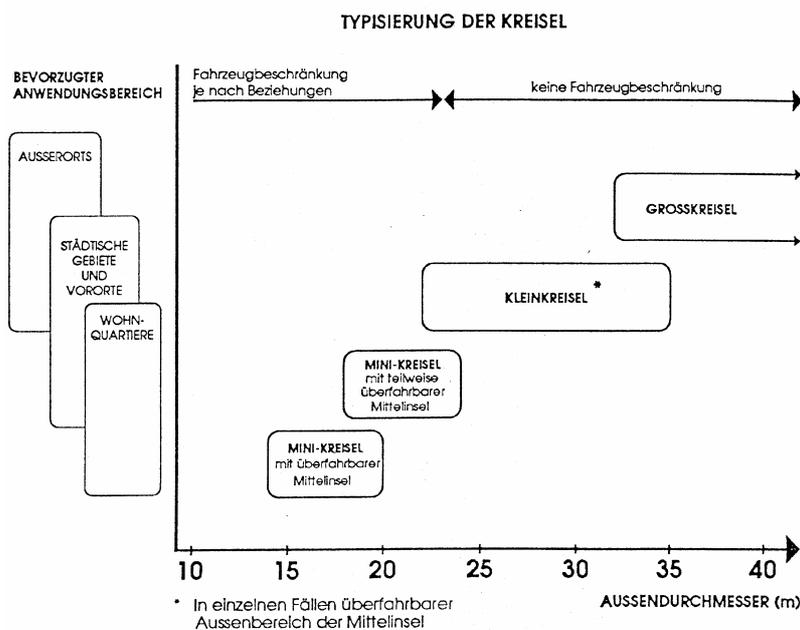
Tabelle 3: Entwurfsgrundsätze für zweistreifig befahrbare Kreisverkehrsplätze (nach [FGSV 2000-1])

Kreisfahrbahn	
Außendurchmesser	40 m bis 60 m
Geometrie	kreisrund
Regelbreite	ca. 8 m
Gepflasterter Innenring	ohne
Fahrstreifenmarkierung	ohne
Knotenpunktzu- und -ausfahrten	
Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrten	12 m bis 14 m
Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrten	14 m bis 16 m
Fahrbahnteiler	in den Knotenpunktzufahrten erforderlich
Fahrstreifenbreite der Knotenpunktzufahrten	3,50 m
Fahrstreifenbreite der Knotenpunktausfahrten	3,50 m
Zweistreifige Knotenpunktzufahrten	möglich, Querungsstellen sind dann ca. 5 m abzurücken
Zweistreifige Knotenpunktausfahrten	aus Sicherheitsgründen zu vermeiden

3.2 Schweiz

Im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Straßenbau ist das **Schweizerische Kreisellhandbuch** entwickelt worden [BOVY 1991]. Die Forschungsarbeiten dazu wurden durch das *Institut des Transports et de Planification* der EPF Lausanne (L'Ecole Polytechnique Fédérale des Lausanne) unter der Leitung von Prof. Ph. H. BOVY durchgeführt. In diesem Handbuch werden vor allem die in der Schweiz als „Kleinkreisel“ bezeichneten Kreisverkehre mit Außendurchmessern zwischen 22 m und 35 m behandelt.

Als Kleinkreisel sind gemäß der Schweizer Norm SN 640 263 [VSS 1999] Kreisverkehre mit Außendurchmessern von 26 m bis 40 m definiert, wobei für Straßen innerhalb besiedelter Gebiete Außendurchmesser von 26 m bis 35 m und für Straßen außerhalb besiedelter Gebiete Durchmesser von 30 m bis 40 m empfohlen werden. Größere Außendurchmesser sind demgemäß nur bei mehrstreifiger Verkehrsführung zu verwenden. Kreisverkehre mit Außendurchmessern zwischen 14 m und 22 m werden als Minikreisel bezeichnet. Eine Typisierung nach schweizerischem Modell wird in den **Abbildungen 8** und **9** wiedergegeben.



Typisierung der Kreisel, Anwendungsbereiche.

Abbildung 8: Typisierung und Anwendungsbereiche der Kreisel [BOVY 1991]

MINIKREISEL Überfahrbare Mittelinsel $14 < D < 20 \text{ m}$		Legende : ● Mittelinsel Kreismarkierung oder überfahrbare Mittelbereich, überfahrbare ● Mittelinsel nicht überfahrbare ● Mittelinsel mit überfahrbarem Außenbereich D Ausendurch- messer (m)
MINIKREISEL Teilweise überfahrbare Mittelinsel $18 < D < 24 \text{ m}$		
KLEINKREISEL $22 < D < 35 \text{ m}$	 Einstreifige Kreisfahrbahn	 Zweistreifige Kreisfahrbahn
GROSSKREISEL $D > 32/40 \text{ m}$		

Typisierung der Kreisel, allgemeine Merkmale.

Abbildung 9: Typisierung und allgemeine Merkmale der Kreisel [BOVY 1991]

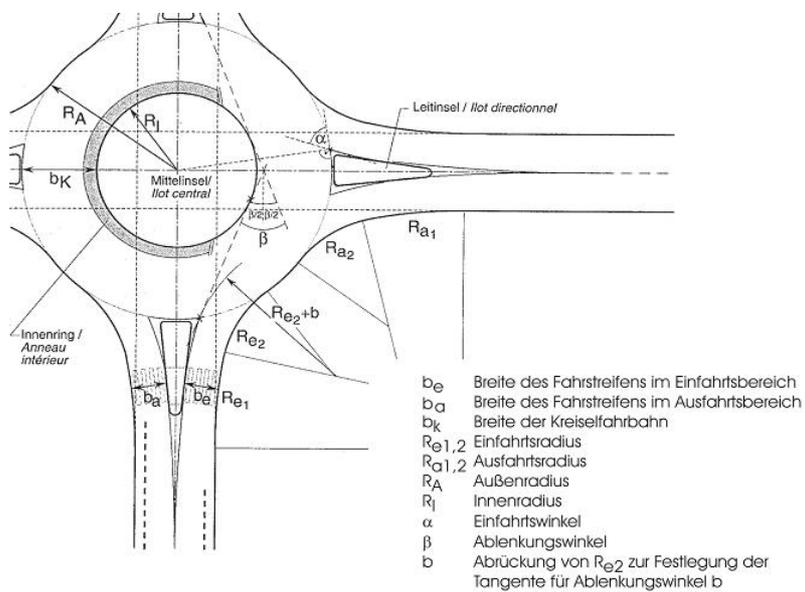
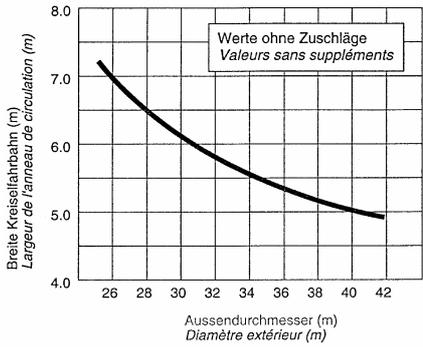


Abbildung 10: Projektierungselemente am Kreisel [BOVY 1991]

Die Schweizer Norm SN 640 263 [VSS 1999] gilt für sog. „verkehrsorientierte Straßen“ (vergleichbar mit den deutschen Hauptverkehrsstraßen); für Kreisel im Zuge sog. siedlungsorientierter Straßen (in Deutschland: Erschließungsstraßen) werden lediglich vorläufige Empfehlungen gegeben. Eine Zusammenfassung der Elemente eines Kreisels gem. SN 640 263 gibt **Tabelle 4** wieder.

Tabelle 4: Fahrstreifenbreiten, Fahrbahnbreiten und Radien gem. SN 640 263 [VSS 1999]

Fahrstreifenbreite im Einfahrtsbereich	b_e	günstig: 3,00 m bis 3,50 m
Fahrstreifenbreite im Ausfahrtsbereich	b_a	günstig: 3,50 m bis 4,50 m
Breite der Kreiselfahrbahn	b_k	abhängig vom Außendurchmesser und der maßgeblichen Fahrzeugart; Mindestbreite nach SN 640 263 [VSS 1999], Abb. 4: 
Einfahrtsradius	$R_{e1,2}$	in der Regel als zweiteiliger Korbbogen mit $R_{e2} = \text{ca. } 10,00 \text{ m}$ (in besiedelten Gebieten) bzw. $R_{e2} = \text{ca. } 12,00 \text{ m}$ (außerhalb besiedelter Gebiete). R_{e1} soll ca. mit 5 R_{e2} gewählt werden.
Ausfahrtsradius	$R_{a1,2}$	in der Regel als zweiteiliger Korbbogen mit $R_{a2} = \text{ca. } 12,00 \text{ m}$ (in besiedelten Gebieten) bzw. $R_{a2} = 14,00 \text{ m}$ (außerhalb besiedelter Gebiete). R_{a1} soll ca. mit 4 R_{a2} gewählt werden.

3.3 Österreich

Das in Österreich erschienene Handbuch „Der Kreisverkehr: Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung“ [NÖS 1996] gibt Außendurchmesser von 25 m bis 35 m für Innerorts-Kreisverkehre und 35 m bis 40 m für Außerorts-Kreisverkehre an. Für einstreifige Kreisfahrbahnen wird eine Breite von 4,50 m bis 7,50 m angegeben. Die Fahrstreifenbreite des zuführenden Querschnittes soll an der engsten Stelle nicht geringer als 3,50 m sein. Für die Einfahr- und Ausfahradien werden keine konkreten Werte angegeben. Stattdessen wird eine „schleppkurvengerechte Ausführung“ des unmittelbaren Einmündungs- bzw. Ausfahrtsbereiches verlangt.

3.4 Großbritannien

Die britische Richtlinie „Geometric Design of Roundabouts“ [HIA 1993] kennt drei Typen von Kreisverkehren: den „normal“ (roundabout), den „mini“ und den „double“ (vgl. Anlage 3), wobei der „double“ eine Sonderform zweier verknüpfter Kreisel darstellt, die in dieser Form in Europa ansonsten nicht üblich ist. Die Abmessungen sind (ungeachtet der Tatsache, dass es sich um eine britische Richtlinie handelt) im metrischen System angegeben. Die Außendurchmesser der Kreisfahrbahn betragen 28 m bis 36 m. Die Breite der Kreisfahrbahn ist auf den 1,0 - 1,2-fachen Wert der Breite im Einfahrquerschnitt festgelegt, wobei (bei zweistreifigen Querschnitten) eine Breite von 15 m nicht überschritten werden soll. Die Fahrstreifenbreite der Kreisverkehrszufahrt liegt zwischen 3 m und 10,50 m für einstreifige Fahrbahnquerschnitte. Die Breite der Kreisverkehrsausfahrt beträgt 7 m bis 7,50 m. Die englischen Parameter für die Elemente der Ein- und Ausfahrquerschnitte sind mit den deutschen Vorgaben (auch mit den österreichischen und den schweizerischen) nicht unmittelbar vergleichbar, weil die Geometrie der Kreiselzu- und -ausfahrt anderen Definitionen unterliegen (beispielsweise wird die Breite des Einfahrquerschnittes am „Kopf“ des Fahrbahnteilers gemessen, während sich diese Angabe in Deutschland auf den „Fuß“ des Fahrbahnteilers bezieht). Im Gegensatz zum deutschen Regelwerk sind auch für die Radien der Knotenpunktzufahrt und der -ausfahrt großzügige Auslegungstoleranzen zulässig. Angegeben werden Radien von mindestens 6 m, empfohlen wird jedoch ein Einfahrradius von 20 m.

3.5 Frankreich

In Frankreich gelten für Kreisverkehrsplätze innerhalb und außerhalb bebauter Gebiete zwei unterschiedliche Richtlinien. Für Kreisverkehrsplätze außerorts ist die Richtlinie des *Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes* [SETRA 1998] „Amenagement des Carrefours Interurbains sur les Routes Principales“ anzuwenden. Für Innerorts-Kreisel wird der "Guide Carrefours Urbains " des *centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme, et les constructions publiques* [CERTU 1999] verwendet. Die Außendurchmesser betragen demzufolge 30 m bis 50 m, wobei auch Durchmesser ab 24 m nicht ausgeschlossen werden. Die Breite der Kreisfahrbahn wird mit 9 m (für Außendurchmesser von 30 m bis 35 m) und 8,50 m (für Außendurchmesser von 40 m bis 50 m) angegeben, wobei der asphaltierte Außenring mit 7 m Breite fixiert ist und der (gepflasterte) Innenring eine Breite von 1,50 m bzw. 2 m einnehmen soll (vgl. Anlage 4).

Die Knotenpunktzufahrt soll zwischen 3 m und 4 m breit sein, die Knotenpunktausfahrt zwischen 4 m und 5 m. Die Ausrundungsradien im Einfahrbereich liegen zwischen 8 m und 15 m, sollen jedoch kleiner sein als der Außenradius der Kreisfahrbahn. Der Radius der Knotenpunktausfahrt soll mindestens 15 m betragen und gleichzeitig größer sein, als der Radius der Mittelinsel.

3.6 USA

Im Leitfaden „Roundabouts: an informational Guide“ [DOT 2000] der US-amerikanischen Behörden (U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-RD-00-067) wurden internationale Richtlinien, Vorschriften und Fachbeiträge für die Anlage von Kreisverkehrsplätzen zusammengetragen und unter Berücksichtigung spezifischer amerikanischer Besonderheiten (z. B. Fahrzeugabmessungen) zu einem umfangreichen Nachschlagewerk zusammengefasst; die Bemessungsangaben sind sowohl in der amerikanischen Maßeinheit „feet“ als auch im metrischen System vorhanden.

Die Kreisverkehrsplätze (roundabouts) werden darin in sechs Basis-Kategorien von den „mini-roundabouts“ (Außendurchmesser bis 25 m) bis hin zu „rural double-lane roundabouts“ (Außendurchmesser 40 m bis 60 m) eingeteilt (vgl. Anlage 5).

Kreisverkehre mit mehr als zwei Spuren in der Kreisfahrbahn sind möglich, jedoch nicht Bestandteil des Leitfadens.

Mit den in Deutschland bekannten Kleinen Kreisverkehren sind aufgrund ihrer Abmessungen und der Leistungsfähigkeit folgende US-Kreisverkehrstypen vergleichbar:

- „Urban compact“ (Außendurchmesser 25 m bis 30 m; 15.000 Kfz/Tag)
- „Urban single lane“ (Außendurchmesser 30 m bis 40 m; 20.000 Kfz/Tag)
- „Rural single lane“ (Außendurchmesser 35 m bis 40 m; 20.000 Kfz/Tag).

Die Zu- und Ausfahrten der Kreisverkehre sollen senkrecht auf die Mittelinsel gerichtet sein. Eine Achsverschiebung in Richtung der Ausfahrten wird akzeptiert, nicht jedoch in Richtung der Zufahrt (vgl. **Abbildung 11**).

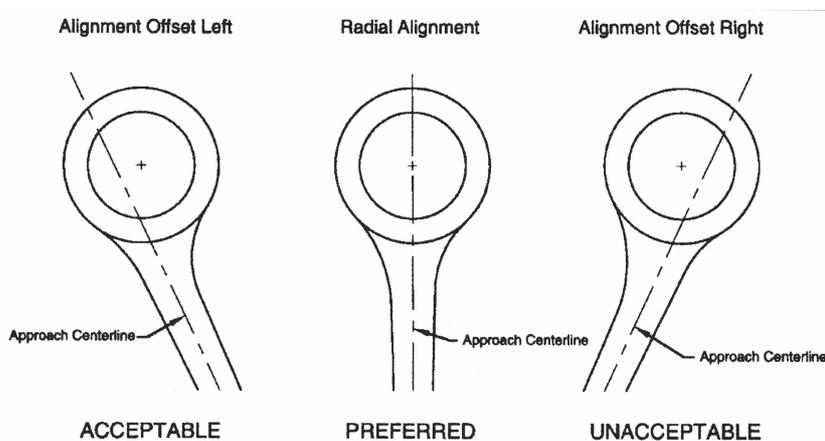


Abbildung 11: Ausrichtung der Knotenpunktzu- und Ausfahrten [DOT 2000]

Die gewählten Radien im Kreisverkehr werden je nach Fahrbeziehung mit Hilfe der in **Abbildung 12** dargestellten Fahrkurven überprüft. Dabei müssen 5 maßgebliche Radien R1 bis R5 in die gewählte Kreisverkehrsgeometrie passen.

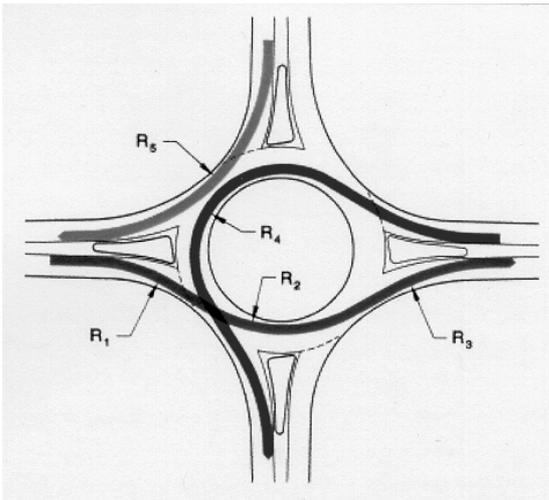


Abbildung 12: Maßgebliche Radien zur fahrdynamischen Überprüfung innerhalb des Kreisverkehrs [DOT 2000]

Diese Radien werden mittels eines fiktiven, 2 m breiten „Norm-Fahrzeugs“ ermittelt. Der gedachte Mittelpunkt des Fahrzeuges wird auf einer Linie geführt, welche jeweils um 0,50 m von der tatsächlichen Mittelachse der jeweiligen Fahrspur abgerückt ist. Bei korrekter Bemessung des Kreisverkehrsplatzes verbleiben dann noch 1,5 m Platz zum inneren und zum äußeren Fahrbahnrand bzw. 1,0 m zu Fahrbahnmarkierungen (vgl. **Abbildung 13**).

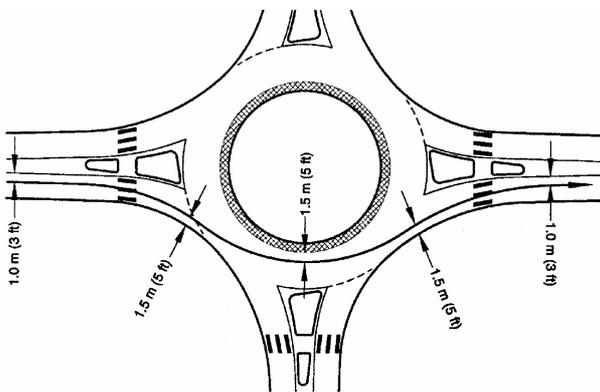
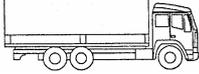
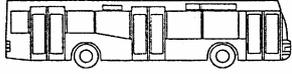
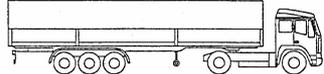


Abbildung 13: Führungslinie für die fahrdynamische Bemessung [DOT 2000]

Die *fahrgeometrische* Bemessung wird im Gegensatz zur oben beschriebenen fahrdynamischen Bemessung mit den „design vehicle“ (Bemessungsfahrzeugen) durchgeführt. Diese sind in der „vehicle library“ der AASHTO [AASHTO 1994] katalogisiert. Zu unterscheiden sind diese Bemessungsfahrzeuge von dem oben genannten „Normfahrzeug“ zur *fahrdynamischen* Überprüfung, da es sich hierbei nicht um fiktive Fahrzeuge, sondern um ausgewählte reale Fahrzeuge handelt.

Als typische Bemessungsfahrzeuge werden in [DOT 2000] der „single-unit truck“ (Lkw), der „single-unit bus“ (Linienbus), der „large semi-trailer“ und der „interstate semi-trailer“ (Sattelzug) aufgeführt (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: „Design Vehicle“ gem. US-Regelwerk

US-amerikanische Bezeichnung	Kürzel nach AASHTO	Analogfahrzeug nach RAS-K (D)	Skizze	Länge	Breite
<i>single-unit truck</i>	SU	Lkw		9,10 m	2,60 m
<i>single-unit bus</i>	BUS	Linienbus		12,10 m	
<i>large semi-trailer</i>	WB-15	Sattelzug		16,70 m	
<i>interstate semi-trailer</i>	WB-20			22,50 m	

Eine weitere ausführliche US-Planungsunterlage ist das **Design Manual** (Nr.: M22-01) des *Washington State Department of Transportation* [WSD 2004]. Der Ersatz von Kreuzungen durch einen Kreisverkehr (roundabout) soll demnach u. a. bei folgenden Situationen in Betracht gezogen werden:

- bei hohem Aufkommen an Linksabbiegern,
- bei mehr als vier Knotenpunktarmen,
- wenn an vorhandenen Kreuzungen hohe Unfallraten vorhanden sind,
- als Wendemöglichkeit,
- wenn ein großes Wachstum des Verkehrsaufkommens erwartet wird und zukünftige Entwicklungen nicht sicher vorhersehbar sind,
- wenn es nicht erwünscht ist, einem Knotenpunktarm Vorrang zu gewähren.

Einige Nachteile von Kreisverkehren sollten jedoch bedacht werden. Erstens ist es nicht möglich, einer Straße den Vorrang zu gewähren, weil im Kreisverkehr alle Knotenpunktarme gleichberechtigt sind. Zweitens wird die Geschwindigkeit im

Kreisverkehrsplatz zwangsweise reduziert, weshalb Kreisverkehre dort ungeeignet sind, wo höhere Geschwindigkeiten gefahren werden sollen. Wo Verkehrsströme ungleich verteilt sind, oder wo eine Hauptverkehrsstraße eine Sammelstraße oder eine innerörtliche Straße kreuzt, sind Kreisverkehre aus oben genannten Gründen ebenfalls unzumutbar.

3.7 Niederlande

Die Gestaltung von Kreisverkehrsplätzen ist in den Niederlanden durch die C.R.O.W-Veröffentlichung „Eenheid in rotondes“ geregelt [CROW 1998] (C.R.O.W ist das nationale Informations- und Technologiezentrum für Transport und Infrastruktur der Niederlande mit Sitz in Ede).

Die Außendurchmesser der Kreisfahrbahn werden mit 24 m bis 40 m angegeben. Die Fahrbahnbreite beträgt 5,50 m bis 6,00 m. Der Ausrundungsradius der Zufahrten soll 9 m betragen (sind Fahrbahnteiler vorhanden, soll der Radius 10 m bis 12 m betragen). Für die Ausfahrten werden Ausrundungsradien zwischen 12 m und 15 m empfohlen.

3.8 Norwegen

Norwegische Kreisverkehrsplätze sind wie folgt kategorisiert:

Tabelle 6: Abmessungen norwegischer Kreisverkehre (nach [HELLELAND 1994])

	Durchmesser der Mittelinsel D_M	Außendurchmesser D_A
Minikreisel	1,5 m bis 4 m	< 25 m
Kleinkreisel	> 5 m	26 m bis 30 m
Mittelkreisel	> 10 m	31 m bis 45 m
Großkreisel	> 25 m	nicht beschränkt

Die Fahrbahnbreite im Kreisverkehr ergibt sich demnach zu mindestens 10,50 m.

3.9 Polen

In Polen wurden Kreisverkehrsplätze bis in die frühen 1990er Jahre nicht zugelassen, weil der Verkehrsfluss nicht unterbrochen werden sollte. Als verkehrssichere Knotenpunktform haben sie sich heute aber auch dort durchgesetzt. Die Kreisverkehre werden wie folgt untergliedert:

Tabelle 7: Abmessungen polnischer Kreisverkehre
(nach [MICHALSKI u. a. 2000])

	Durchmesser der Mittelinsel D_M	Außendurchmesser D_A
Minikreisel	3 m bis 5 m	< 22 m
Kleinkreisel	10 m bis 28 m	26 m bis 40 m
Mittelkreisel	28 m bis 50 m	41 m bis 65 m
Großkreisel	> 50 m	> 65 m

Die minimale Breite der Kreisfahrbahn errechnet sich demnach zu 6,50 m (Mittelkreisel). Die Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt soll 10 m bis 12 m betragen, die der Knotenpunktausfahrt 10 m bis 17,50 m.

3.10 Zusammenfassung

Die Befahrbarkeit durch große Fahrzeuge (Schwerverkehrsfahrzeuge, Busse usw.) wird im Wesentlichen durch folgende Kreisverkehrselemente bzw. -parameter charakterisiert:

- Außendurchmesser der Kreisfahrbahn (die „Größe“ des Kreisverkehrs),
- Breite der Kreisfahrbahn,
- Ausrundungsradien in den Knotenpunktzufahrten,
- Ausrundungsradien in den Knotenpunktausfahrten.

Daneben spielen für die Befahrbarkeit die Fahrbahnbreite in den Knotenpunktzu- und -ausläufen sowie die Form der Zuführung im Allgemeinen eine Rolle.

Die Fahrstreifenbreiten der Knotenpunktzufahrten liegen in der Regel zwischen 3,25 m (Deutschland) und 4,90 m (USA). Eine unmittelbare Vergleichbarkeit ist allerdings nicht gegeben, da die Breite an unterschiedlichen Stellen ermittelt wird. So wird die Fahrstreifenbreite der Kreisverkehrszufahrten in Deutschland neben dem Fahrbahnteiler an dessen Fuß gemessen, während sie in England an der Inself Spitze – also unmittelbar an der Übergangslinie zwischen Knotenpunktzufahrt und Kreisfahrbahn – ermittelt wird (vgl. **Abbildung 14**).

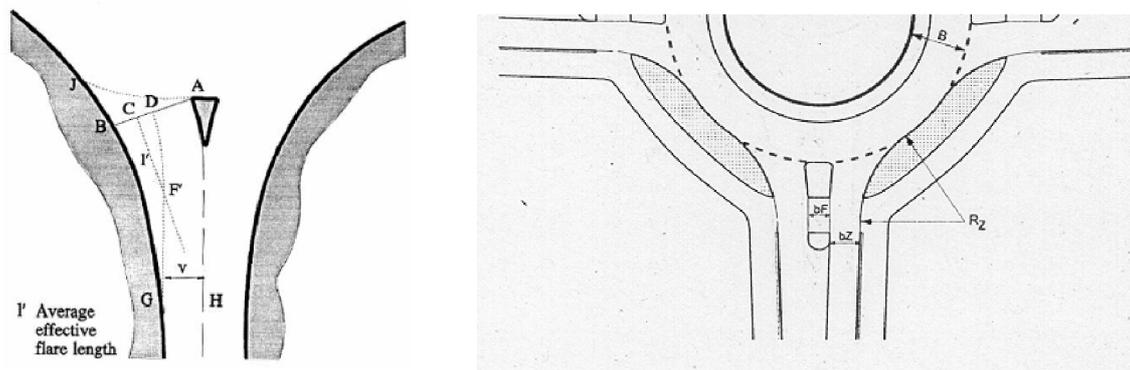


Abbildung 14: Definition der Fahrbahnbreite in der Knotenpunktzufahrt. Links: England (Strecke AB; beachte Linksverkehr); rechts: Deutschland (bZ) [DOT 2000, FGSV 1998]

Die britischen Richtlinien weisen im Vergleich zu den deutschen Richtlinien auch die größte Bandbreite bei den Querschnittsbreiten der Knotenpunktzufahrten auf, nämlich von 3,00 m bis max. 10,50 m bei einstreifigen Querschnitten. Ein Vergleich ist wegen dieser unterschiedlichen Maßdefinitionen und der verschiedenartigen Zuführungen auf die Kreisfahrbahn nicht möglich. Eine vollständige Übersicht über die geometrischen Festlegungen in den untersuchten Richtlinien ist in Anlage 6 zu finden.

3.10.1 Außendurchmesser der Kreisfahrbahn

Über den Außendurchmesser wird der Kreisverkehrstyp bzw. seine Größe definiert. Beschreibende Begriffe sind z. B. Mikrokreis, Mittelkreis, Großkreis (bzw. die analogen englischen Begriffe). In den meisten der in die Untersuchung einbezogenen Länder wird zudem zwischen Kreisverkehren außerorts und innerorts unterschieden.

Die Spannweite des empfohlenen Außendurchmessers für Kreisverkehre, die dem sog. Kleinen Kreisverkehrsplatz gem. [FGSV 1998] annähernd entsprechen, reicht von 24 m (Niederlande) bis 50 m (Frankreich). Im Einzelnen sind folgende Festlegungen in den jeweiligen Richtlinien zu finden:

Tabelle 8: Außendurchmesser der Kreisfahrbahn (für Kleine Kreisverkehre, innerorts) nach internationalen Standards

Nation	D von [m]	bis D [m]
Deutschland	26,00	35,00
Schweiz	26,00	35,00
Österreich	25,00	35,00
Großbritannien	28,00	36,00
Frankreich	30,00	50,00
USA	25,00	30,00
Niederlande	24,00	40,00
Norwegen	26,00	30,00
Polen	26,00	40,00

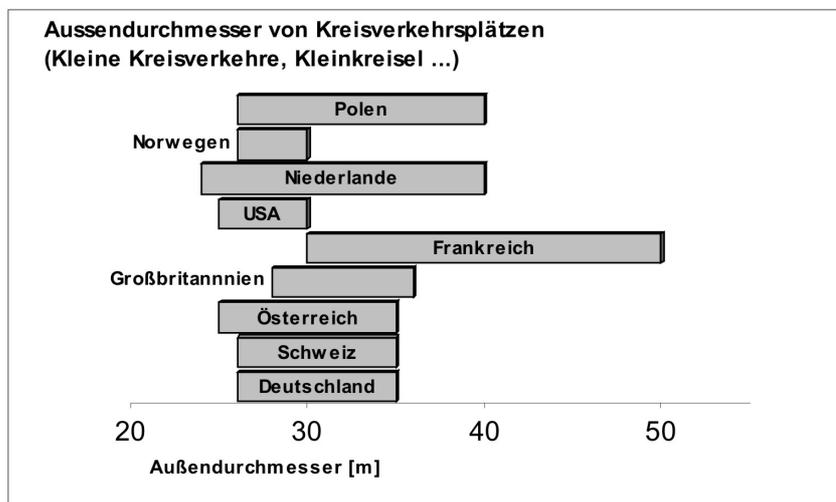


Abbildung 15: Außendurchmesser der Kreisfahrbahn (Kleine Kreisverkehre, innerorts) – Vergleich internationaler Standards

Die Außendurchmesser in Deutschland, der Schweiz, Österreich und in Großbritannien liegen größtmäßig sehr nahe zusammen. In Norwegen und in den USA wurden deutlich engere Grenzen festgelegt, während in Polen, den Niederlanden und in Frankreich relativ große Spannweiten der Außendurchmesser zulässig sind (vgl. **Abbildung 15**).

3.10.2 Fahrbahnbreite der Kreisfahrbahn

Außendurchmesser und Breite der Kreisfahrbahn (bzw. Außendurchmesser und Durchmesser der Mittelinsel) definieren den Grad der Ablenkung (in der Schweiz als Ablenkungswinkel bezeichnet). Die Fahrbahnbreiten sind in der Regel in Abhängigkeit vom Außendurchmesser (umso kleiner der Außendurchmesser, desto breiter die Fahrbahn – was sich logisch aus der „Kfz-Kurvegeometrie“ ergibt) festgelegt oder es wird eine generelle Befahrbarkeitsüberprüfung anhand des Bemessungsfahrzeugs mittels Schleppkurven gefordert (Beispiel USA). Die Fahrbahnbreiten liegen zwischen 3,00 m (Großbritannien) und 12,60 m (Großbritannien, einstreifige Querschnitte), wie in **Tabelle 9** aufgelistet.

Tabelle 9: Fahrbahnbreiten der Kreisfahrbahn (Kleine Kreisverkehre, innerorts) nach internationalen Standards

Nation	von [m]	bis [m]	Variationsbreite [m]
Deutschland	6,50 (Außendurchmesser 35 m)	8,00 (Außendurchmesser 26 m)	1,50
Schweiz	ca. 5,50 (Ableseung aus Diagramm, Außendurchmesser 35 m)	ca. 7,00 (Ableseung aus Diagramm, Außendurchmesser 26 m)	1,50
Österreich	4,50	7,50	3,00
Großbritannien	3,00	12,60 (für einstreifige Querschnitte)	9,60
Frankreich	8,50	9,00	0,50
USA	mit Schleppkurven nachzuweisen		-
Niederlande	5,50	6,00	0,50
Norwegen	10,50	nicht beschränkt	-
Polen	6,50	8,50	2,00

Die Mehrheit der Fahrbahnbreiten liegt innerhalb eines Bereiches zwischen 4,50 m (Österreich) und 9,00 m (Frankreich), wobei Norwegen eine Ausnahme darstellt, weil dort die Fahrbahnbreite erst ab 10,50 m beginnt und nach oben unbegrenzt ist. Auch in Großbritannien wird diesbezüglich abgewichen; hier sind Fahrbahnbreiten bis maximal 12,60 m zulässig.

3.10.3 Ausrundungsradien in den Knotenpunktzu- und -ausfahrten

Die Eckausrundungen im Einfahrtsbereich sind mit den in **Tabelle 10** zusammengefassten Richtwerten angegeben.

Tabelle 10: Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrten (Kleine Kreisverkehre, innerorts) nach internationalen Standards

Nation	von [m]	bis [m]
Deutschland	10,00	12,00
Schweiz	10,00 (zweiteiliger Korbbogen; der einleitende Radius soll dem 5-fachen des inneren Einfahrradius betragen; vgl. Abbildung 16)	
Österreich	nachzuweisen durch Schleppkurven	
Großbritannien	6,00	20,00
Frankreich	8,00	15,00
USA	10,00	30,00
Niederlande	10,75	12,75
Norwegen	(keine Angaben)	
Polen	10,00	12,00

Die unteren Grenzwerte der Eckausrundungen liegen in den meisten Ländern bei etwa 10 m (Ausnahmen sind Frankreich mit 8,00 m und Großbritannien mit 6,00 m). Die oberen Grenzwerte schwanken zum Teil stark. In Deutschland, den Niederlanden und in Polen liegen diese mit rd. 12 m in der gleichen Größenordnung, während in Frankreich mit 15,00 m, Großbritannien mit 20,00 m und in den USA mit 30,00 m deutlich größere Eckausrundungen gefordert werden.

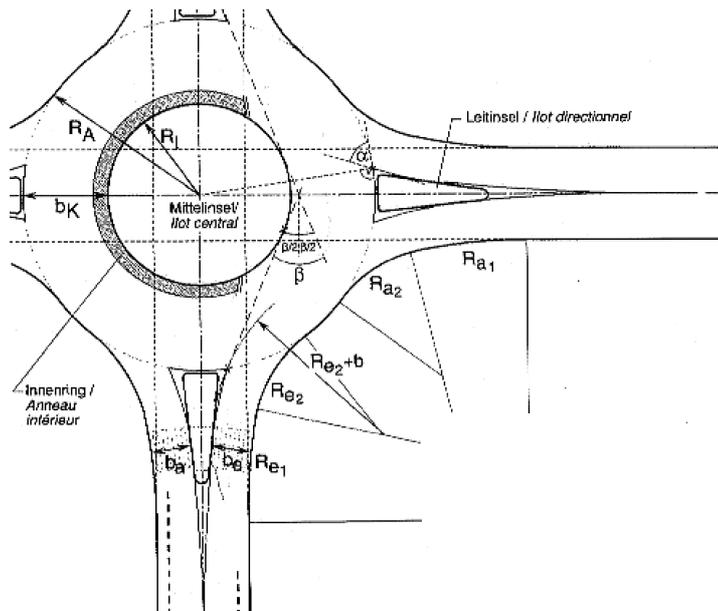


Abbildung 16: Schweizerische Definition der Ausrundungen in den Ein- und Ausfahrten am Kreisverkehr [BOVY 1991]

Die Radien der Knotenpunktausfahrten sind in **Tabelle 11** zusammengefasst.

Tabelle 11: Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrten (Kleine Kreisverkehre, innerorts) nach internationalen Standards

Nation	von [m]	bis [m]
Deutschland	12,00	14,00
Schweiz	12,00 (zweiteiliger Korbbogen; der ausleitende Radius soll dem 4-fachen des inneren Ausfahrradius betragen; vgl. Abbildung 16)	
Österreich	nachzuweisen durch Schleppkurven	
Großbritannien	40,00	100,00
Frankreich	15,00	-
USA	15,00	-
Niederlande	16,00	18,00
Norwegen	(keine Angaben)	
Polen	10,00	17,50

Die Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrten reichen von 10,00 m (Polen) bis zu 100,00 m (Großbritannien), wobei die großen Ausrundungen der britischen Vorschriften darauf basieren, dass traditionell auf einen zügigen Verkehrsablauf Wert gelegt wird, während in den übrigen Ländern die Verkehrssicherheit (durch Geschwindigkeitsbegrenzung) im Vordergrund steht. Die großen Ausrundungsradien

in Großbritannien (Ausfahrt) und in den USA (Einfahrt) bedingen allerdings schon geometrisch auch eine bestimmte Größe des Kreisverkehr-Außendurchmessers. In Frankreich und in den USA wurden die Ausrundungsradien zu mindestens 15,00 m festgelegt, im Gegensatz zu Deutschland, wo der Ausrundungsradius max. 14,00 m betragen soll. Dies ist ein Indiz dafür, wie schwierig es ist, einen Kompromiss zwischen den beiden Zielen Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit (bzw. zügiges Befahren) zu finden.

4. Schleppkurven

4.1 Grundlagen

Im mathematischen Gebrauch ist die *Schleppkurve* gleichzusetzen mit der Traktrix (aus dem Lateinischen *trahere*, zu deutsch: schleifen, schleppen). Diese wird auch als Zieh- oder Treidelkurve bezeichnet und ist eine spezielle ebene Kurve. Die Traktrix im engeren Sinn ist eine Kurve, bei der für jede Tangente der Abschnitt zwischen dem Berührungspunkt und der x-Achse konstant ist. Anders ausgedrückt: Die Traktrix entsteht als Bahn eines Punktes P, der in konstantem Abstand d hinter einem Punkt A hergezogen wird, der auf einer Geraden g verschoben wird [REINHARDT 1987] (vgl. **Abbildung 17**).

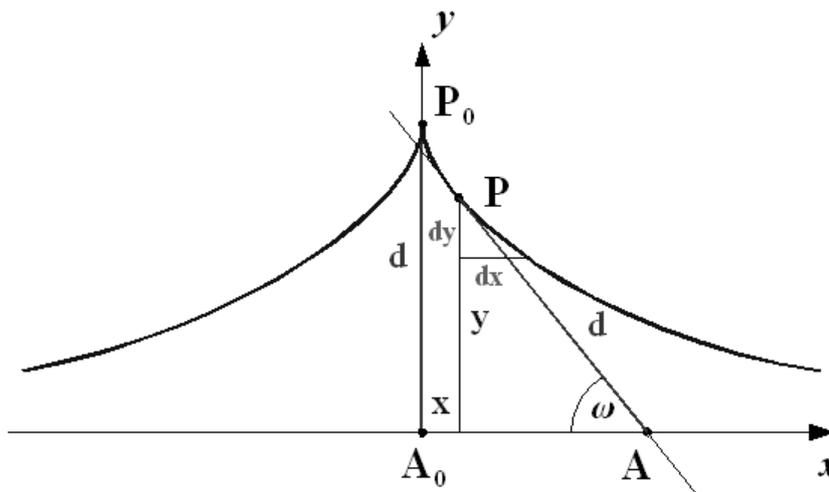


Abbildung 17: Traktrix, auch als Huygens-Traktrix bezeichnet [Bild: Wikipedia Internet-Enzyklopädie 2005]

Diese Kurve wird nach dem Naturwissenschaftler Cristiaan HUYGENS (1629 – 1695), der das grundlegende Problem beschrieb, auch *Huygens-Traktrix* genannt.

Wird oben definierter Punkt A nicht entlang einer Gerade g verschoben, sondern entlang einer allgemeinen Kurve k (Leitkurve), so erhält man die allgemeiner definierte Traktrix der Kurve k . Die Traktrix ist also eine allgemeine Riodrome („Leitstrahlkurve“ aus dem Lateinischen *radius* „Strahl“ und dem Griechischen

dromos „Lauf, Rennen“), vgl. **Abbildung 18**. [Quelle: Wikipedia Internet-Enzyklopädie 2005]

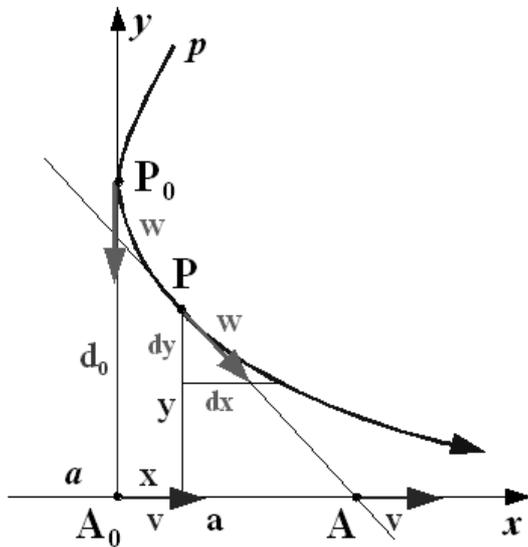


Abbildung 18: Verallgemeinerte Traktrix: allgemeine Radiodrome [Bild: Wikipedia Internet-Enzyklopädie 2005]

In der Straßenplanung wird, wie bereits erwähnt, unter einer Schleppkurve oder Fahrkurve allgemein die bei Kurvenfahrt von einem definierten Fahrzeug – genauer seiner Lageplanprojektion – überstrichene Fläche verstanden [WIRTH 2001-2] (im Gegensatz zur Traktrix, die keine flächenmäßige Ausdehnung aufweist). Eine Verbindung zwischen der Schleppkurve nach mathematischer Definition und der Schleppkurve nach straßenplanerischer Definition besteht insofern, als die Innenkurve einer gleichsinnig gekrümmten Fahrkurve als allgemeine Radiodrome an die Leitlinie gedeutet werden kann. Für eine von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) festgelegte Auswahl von Fahrzeugen stehen Schleppkurven in Form analoger Papierausdrucke zur Verfügung (vgl. **Abbildung 19**).

Schleppkurven sind ein unverzichtbares Hilfsmittel der Straßenplanung. Mit ihnen wird die Befahrbarkeit von Straßen insbesondere für Großfahrzeuge wie z. B. Lkw, Bus, Sattelzug usw. überprüft.

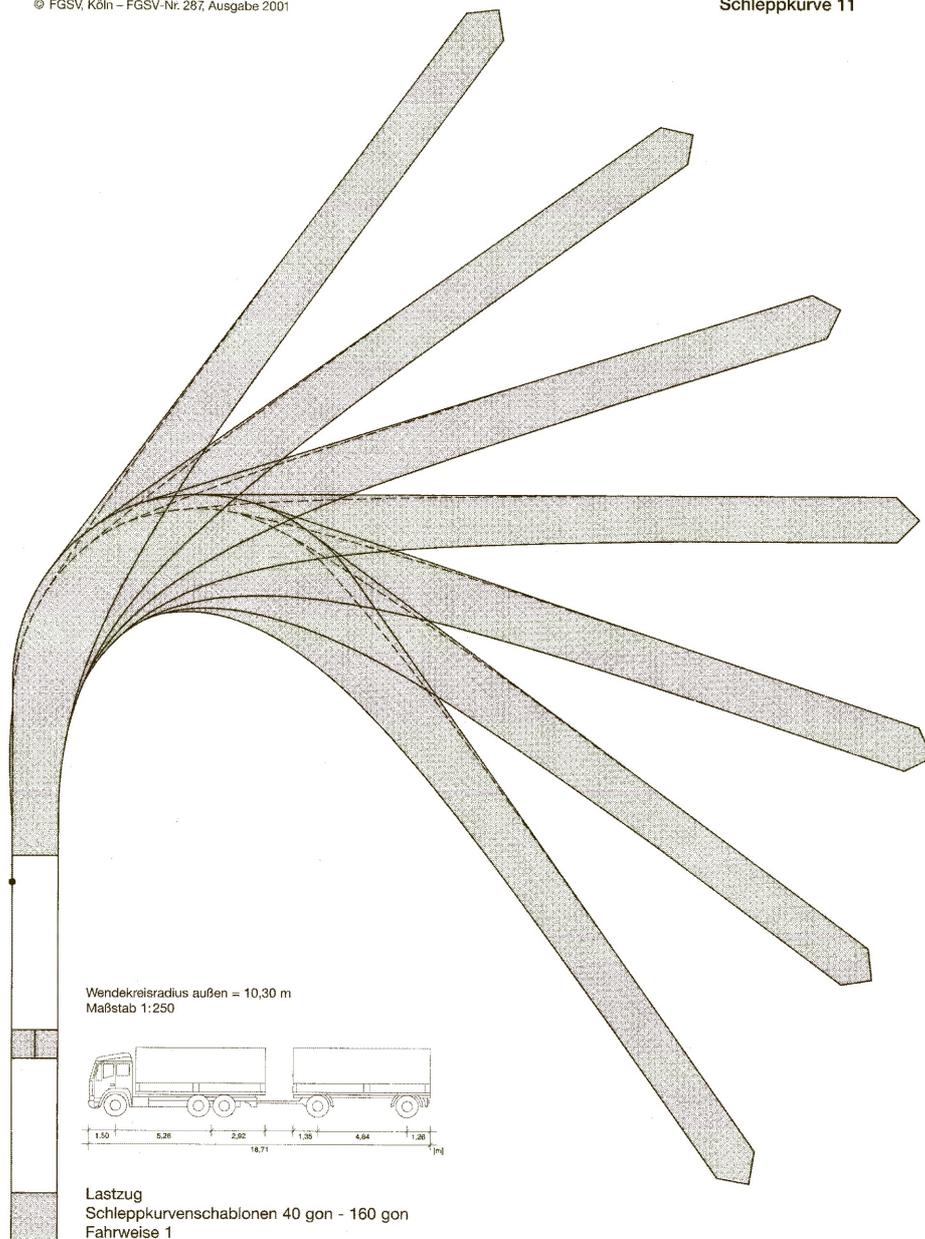


Abbildung 19: Beispiel gedruckter Schleppkurven [FGSV 2001]

Einige EDV-Programme für den Straßenentwurf beinhalten diese FGSV-Schleppkurven in digitalisierter Form, so dass diese damit zur Verwendung innerhalb einer CAD-gestützten Planung verfügbar sind. Da die FGSV ihre Schleppkurven aber neben der gedruckten Form nicht gleichzeitig auch in digitaler Form ausgibt, haften den in der Straßenentwurfs-Software vorgehaltenen digitalisierten FGSV-Schleppkurven sowohl die reproduktions- und drucktechnischen als auch die

Ungenauigkeiten aus dem Vorgang des Scannens an. Aufwändigere Computerprogramme beinhalten Module, mit denen Schleppkurven (nach Eingabe der für die Berechnung notwendigen Eingangswerte und der Leitlinie) für jede mögliche (und unmögliche) Kurvenfahrt rechnerisch-analytisch erzeugt und im EDV-Programm optisch und maßstäblich dargestellt werden können.

4.2 Ermittlung von Schleppkurven

Die Ermittlung von Schleppkurven ist keineswegs trivial. Form und Größe der Schleppkurven unterliegen zahlreichen Einflüssen wie z. B.: Kurvenführung, Fahrbahnbreite, Fahrzeuggeometrie (Länge, Breite, Überstände), Fahrzeugeigenschaften (Radstand, Lenkung). Erfahrung, Versiertheit, Fahrcharakter des Fahrzeugführers usw. beeinflussen ebenfalls die jeweilige real gefahrene Schleppkurve.

Bei der Schleppkurvenermittlung muss zwischen folgenden 4 Fragenstellungen unterschieden werden:

- a) Wie lässt sich eine real gefahrene Schleppkurve ermitteln bzw. wie wird sie messtechnisch aufgenommen?
- b) Wie wird eine Schleppkurve bei gegebener Leitkurve und bei gegebenen Fahrzeugparametern simuliert?
- c) Wie real sind die theoretisch festgelegten Leitkurven?
- d) Wie können die individuell verschiedenen Fahr- bzw. Leitkurven durch eine einzige, grundlegende, standardisierte ersetzt werden?

Die Fragen a) und b) können auf der Grundlage exakt definierbarer (deterministischer) Modelle beantwortet werden, während bei der Lösung der Fragestellungen c) und d) auch individuelle (psychologische) Einflüsse zu berücksichtigen sind.

Bekannte Möglichkeiten zur Schleppkurvenermittlung sind Modellversuche, graphische, numerische und analytische Verfahren. Praktische Fahrversuche besitzen demgegenüber den Vorteil, dass alle Einflüsse auf die zu prüfenden

Kurvenfahrten implizit erfasst werden, also z. B. auch Fahrereigenschaften, Randbebauung, Bordsteinführung usw. Der zeitliche und finanzielle Aufwand hingegen, der für praktische Fahrversuche betrieben werden muss, ist für gängige Fragestellungen oft nicht gerechtfertigt.

Die geläufigen Verfahren zur Ermittlung von Schleppkurven können klassifiziert werden in:

- theoretische Verfahren (Fragestellung a), siehe oben),
- Modellversuche (Fragestellungen a) und b), siehe oben),
- praktische Fahrversuche (Fragestellungen a), b), c) und d), siehe oben).

Diese drei Verfahrensgruppen werden nachfolgend kurz beschrieben.

4.2.1 Theoretische Verfahren

Zu den theoretischen Verfahren der Schleppkurvenermittlung zählen graphische, numerische und analytische Verfahren. Vor Einzug des Computers in die Arbeitswelt der Planer dienten graphische Näherungslösungen als gängige Entwurfshilfsmittel. Moderne EDV-Programme stützen sich auf numerische und/oder analytische Verfahren, wobei allen zueigen ist, dass eine Leitlinie notwendig ist, an der entlang das Bemessungsfahrzeug (an einem Fahrzeugpunkt wie an einer Schiene geführt) gezogen wird. Oftmals wird die Leitlinie vereinfachend an einer Folge von Geraden und Kreisbögen, z. B. beim Rechtseinbiegen in eine Einmündung, aus der Folge Gerade-Kreisbogen-Gerade, zusammengesetzt. Genau genommen entspricht diese Vereinfachung nicht der Fahrwerksgeometrie und dem Einlenkverhalten eines Kraftfahrzeugs mit Achsschenkelenkung, das eine enge Kurve ohne Halt durchfährt. Die Verwendung der Elementfolge Gerade-Kreisbogen-Gerade als Leitlinie führt also immer zu einer Schleppkurvenfläche für eine idealisierte Kurvenfahrt.

Die bekanntesten Leitlinien sind diejenigen, mit der die Schleppkurvenschablonen für eine Auswahl bestimmter Fahrzeugtypen von der FGSV entwickelt wurden. Diese Leitkurven beschreiben eine Bogenfahrt zwischen 2 Tangenten, die verschiedene Winkel von 40 gon bis 160 gon (vgl. **Abbildung 19**) einschließen. Der Radius der äußeren Fahrbahnbegrenzung dieser Kurvenfahrten orientiert sich dabei am

Wendekreisradius des jeweiligen Fahrzeugs bzw. der jeweiligen Fahrzeugkombination.

4.2.1.1 Graphische und graphisch-analytische Verfahren

Der Vorteil graphischer Näherungsverfahren zur Bestimmung von Schleppkurven liegt in der Anschaulichkeit ihrer Entwicklung. In der Praxis spielen sie heute aber nur noch eine untergeordnete Rolle, weil das exakte Zeichnen mit Papier und Stift nur noch selten angewandt und in der Regel von geeigneten EDV-Programmen in Verbindung mit leistungsfähigen Plottern übernommen wird.

Ein zweispuriges Fahrzeug wird dabei häufig auf eine Spur in Fahrzeuginnenachse reduziert, wobei die Räder einer Achse zu einem Rad in der Mitte des Fahrzeuges zusammengefasst werden. Die vorab konstruierte Leitlinie wird, abhängig vom angewendeten Verfahren, in Abschnitte unterteilt, an denen jeweils das vordere Ende der Deichsel des Bemessungsfahrzeugs gelegt wird. Schrittweise können so die Fahrzeug-Standpunkte je Leitlinien-Abschnitt konstruiert werden. Aus der Abfolge der so entworfenen Einzelfahrzeuge ergibt sich die Schleppkurve als Polygonzug. Je kleiner die Unterteilung der Leitkurve gewählt wird, desto eher nähert sich der Schleppkurven-Polygonzug – bei entsprechend höherem Konstruktionsaufwand – der wahren Kurve an. Würde die Schrittweite differentiell klein gewählt und der Grenzübergang der Schrittweite gegen 0 gebracht, so ergäbe sich bei einigen Verfahren eine exakte Schleppkurvenkonstruktion.

Eines der bekanntesten Verfahren zur Schleppkurvenermittlung, das Verfahren nach GUHLMANN (1959) ist in **Abbildung 20** exemplarisch dargestellt. Das Verfahren nach GUHLMANN [GUHLMANN 1959] gilt als sehr genaues graphisches Verfahren. Die Konstruktion der Schleppkurve erfolgt, ausgehend von einer Parallelen zum Spurrand, mit der halben Fahrzeugbreite.

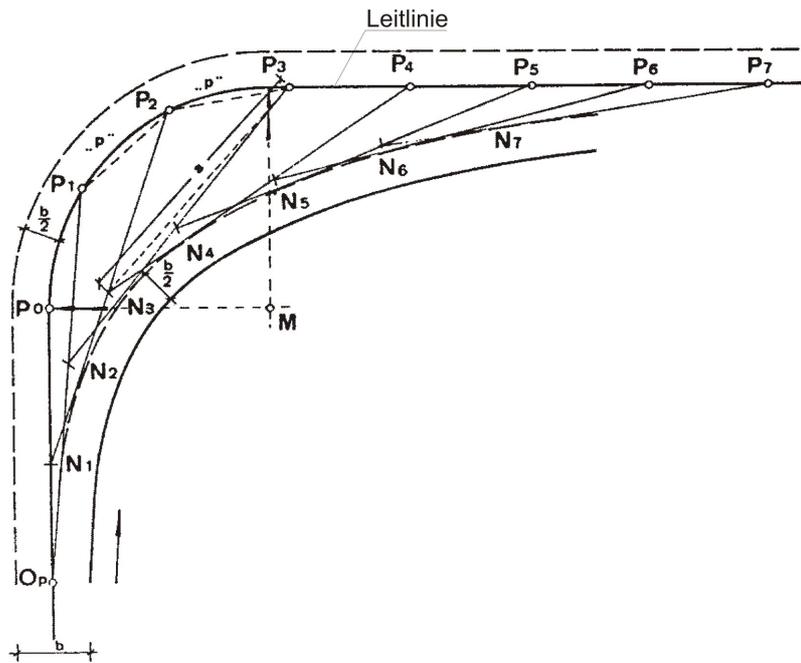


Abbildung 20: Verfahren nach GUHLMANN [MESCHIK 1992]

Die Leitkurve, an der entlang der Mittelpunkt der Vorderachse geführt wird, wird in Abschnitte unterteilt, welche nicht größer als der halbe Achsabstand sein sollten. Vom Beginn der Kurve P_0 wird der Achsabstand gegen die Fahrtrichtung abgetragen (es ergibt sich Punkt O_P). Der auf P_0 folgende Abschnittspunkt P_1 und O_P werden verbunden und von P_1 aus der Achsabstand auf P_1O_P abgetragen. Der so erhaltene Punkt N_1 wird mit P_2 verbunden, von dem aus wiederum der Achsabstand a abgetragen wird und so N_2 erzeugt. Jeweils senkrecht auf den erzeugten Hilfsgeraden wird die halbe Fahrzeugbreite abgetragen. [MESCHIK 1992]

Bekannt sind auch die Verfahren nach HALTER [HALTER 1932], SCHNEIDER [SCHNEIDER 1963], TENNER [TENNER 1966], MARX [MARX 1975], SCHOUTEN [SCHOUTEN 1984], HAMMER [HAMMER 1986] und OSTERLOH [OSTERLOH 1988], auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen wird.

4.2.1.2 Numerische / analytische Verfahren

Unter den numerischen Methoden ist das von HAUSKA 1938 entwickelte Verfahren zur Schleppkurvenermittlung von Ein- und Ausfahrten bekannt [MESCHIK 1992]. SCHAAR [SCHAAR 1938], GAUSS/RAUTENSTRAUSS [GAUSS 1956],

EVERLING/SCHOSS [EVERLING 1966], LITZKA [LITZKA 1790] und LENTZ/BUCK [LENTZ 1989] entwickelten Näherungslösungen für den maximalen Breitenbedarf in einer Schleppkurve in Abhängigkeit vom Winkel der Richtungsänderung.

Exakte numerische Verfahren weisen komplizierte mathematische Ansätze mit dem damit verbundenen großen Rechenaufwand auf.

4.2.1.3 EDV-Programme

Wie MESCHIK (1992) beschreibt, entwickelten EVERLING/SCHOSS 1966 ein EDV-Programm, mit dem auf der Basis einer Koordinatenberechnung der Straßenachse die Spurverbreiterung von Einzelfahrzeugen berechnet werden kann. Alternativ erfolgt die Ausgabe von Absteckkoordinaten oder von (im Textformat beschriebenen) Querprofilen. Dieses Programm wurde für Großrechenanlagen geschrieben. LITZKA entwickelte diese Algorithmen um das Jahr 1970 weiter [MESCHIK 1992].

Das von JESCHKE [JESCHKE 1972] beschriebene Programm verwendet die Methode von HALTER, um iterativ die Schleppkurven einzelner Fahrzeuge – oder genauer: einzelner Fahrzeugstandorte – zu berechnen. Auch die Ergebnisse dieses EDV-Programms wurden in Form von Absteckdaten ausgegeben.

SCHNÜLL/HALLER [SCHNÜLL 1981] setzen für die Fragestellung umfeldorientierter Kriterien in den Entwurfsrichtlinien für Knotenpunkte das Verfahren nach MARX [MARX 1975] DV-technisch um.

SCHULT/HOLZWARTH [SCHULT 1988] berichten 1988 von einem neuentwickelten EDV-Programm, welches sich gegenüber den vorangegangenen Programmen durch flexiblere Anwendungsmöglichkeiten auszeichnet. Beispielsweise ist es möglich, verschiedene Fahrzeuge entlang beliebiger Leitkurven zu führen.

Parallel dazu entwickelte OSTERLOH [OSTERLOH 1988] ein Programm. Hier liegt die Besonderheit in der Anwendung der Programmiersprache Basic. Dadurch war es, im Gegensatz zu der anderen Schleppkurven-Software im deutschsprachigen Raum, auf einem PC lauffähig. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte auch hier als Text in Form von Absteckkoordinaten.

MESCHIK beschreibt 1992 das von ihm entwickelte Programm SISKURV (**S**imulation von **S**chlepp**k**urven), mit dem es erstmals möglich ist, auch Einflüsse aus der Fahrzeugtechnik (z. B. gelenkte Nachläuferachsen) in die Berechnung von Schleppkurven einzubeziehen. Kern dieses in der Programmiersprache Turbo Pascal 5.0 verfassten Programms ist wiederum das von EVERLING/SCHOSS entwickelte Verfahren.

Die moderne Computertechnologie ermöglicht es, aufwändige numerische Berechnungen mit geringem (und aufgrund der fortschreitenden Entwicklung immer geringer werdendem) Zeitaufwand durchzuführen, wobei die dazu erforderliche Hardware immer kompakter wird. Dieser Umstand sowie die fortschreitende Entwicklung der Programmiersprachen haben dazu geführt, dass der planende Ingenieur heute mit interaktiven CAD-Programmen arbeiten kann. Die wesentlichen Vorteile dieser Programme sind in der grafischen Darstellung sowohl der Eingabewerte als auch der Ergebnisse zu sehen; die Ausgabe von Absteckpunkten als Punktliste (Textformat) erfolgt – wenn überhaupt – nur noch für die tatsächlich erforderliche Absteckung vor Ort.

Mit den CAD-Programmen kann das fiktive Abbild eines Fahrzeuges maßstabsgerecht an meist frei konstruierbaren Leitlinien entlang geführt werden, um so die imaginäre Schleppkurve für den jeweiligen individuellen Planungsfall zu ermitteln. In der Praxis wird zunächst die maßgebende Geometrie einer konkreten Planungssituation maßstäblich gezeichnet (Fahrbahnbreite, Einfahrradien, Ausfahrradien, Außendurchmesser der Kreisverkehrsfahrbahn, Fahrspuren, angrenzende Bebauung, schützenswerter Bewuchs usw.). Anschließend muss der Planer in diese Grundgeometrie die Leitlinie zur Ermittlung der Schleppkurve hineinkonstruieren. Es fehlen aber konkrete Vorgaben für diese Leitlinienkonstruktion; der Planungsingenieur muss sich auf seine Erfahrung und sein Gespür für die mögliche Fahrzeugbewegung verlassen und wird in der Regel mehrere denkbare Leitlinien durchkonstruieren. Nach Eingabe der für die Berechnungen erforderlichen Eingangsdaten (Abmessungen, Achsabstand, max. Lenkradeinschlag, Fahrgeschwindigkeit usw.) wird die spezifische Schleppkurve durch das Computerprogramm ermittelt.

Derzeit marktübliche Programmsysteme wie STRATIS oder CARD1 verwenden als Rechenkern das Verfahren nach EVERLING/SCHOSS (wie auch das oben genannte Programm SISKURV). Das Programm VERBUND baut auf dem Verfahren OSTERLOH auf. Das Programm AutoTURN arbeitet mit der „constant pursuit method“. Für die Programme CADdy und AutoWIBU konnte die Rechengrundlage nicht in Erfahrung gebracht werden.

Tabelle 12 fasst die gängigen EDV-Programme, deren Rechengrundlagen und die Bearbeitungsmöglichkeiten für Schleppkurven zusammen.

Tabelle 12: Übersicht der Grundlagen und Möglichkeiten marktüblicher EDV-Programme

Programm	Verfahren	Führungspunkt	Leitlinie	Knick	Rückwärtsfahrt	Maussteuerung	Lenkradeinschlag
STRATIS	EVERLING / SCHOSS	keine Angabe	keine Angabe	bedingt möglich	nicht möglich	keine Angabe	berücksichtigt
CARD1		Mitte der Vorderachse	Gerade, Kreisbogen, Klothoide	möglich			nicht berücksichtigt
SISKURV		OSTERLOH	frei wählbar	frei definierbar	keine Angabe		möglich
VERBUND	Gerade, Kreisbogen, Klothoide			möglich			
AutoWIBU / STRATBAU	keine Angabe			keine Angabe	nicht möglich	möglich	
CADdy				nicht möglich			nicht möglich
AutoTurn	„the constant pursuit method“ (oder auch „incremental analysis“) Nähere Angaben waren nicht zu erhalten	Mitte der Vorderachse	frei definierbar	möglich	möglich		

4.2.2 Modellversuche

Eine frühe Möglichkeit, Schleppkurven durch Modelle darzustellen, beschreibt SCHAAR („Traktoriograph“) [SCHAAR 1938]. Weitere Modellversuche wurden z. B. von GUHLMANN [GUHLMANN 1959], PETROVIC [PETROVIC 1967] oder MARX [MARX 1975] durchgeführt. Die verwendeten Fahrzeugmodelle im verkleinerten Maßstab müssen dabei die Fahreigenschaften des Originalfahrzeuges möglichst originalgetreu widerspiegeln. Wie bei allen Simulationsverfahren ist es besonders wichtig, dass der Lenkradeinschlagwinkel (und damit die tatsächliche Beweglichkeit des Modells) bei den Modellfahrzeugen nicht größer ist als die des abzubildenden Originals. Dazu wird ein Modell des Fahrzeugs angefertigt (z. B. im Maßstab 1:50 oder 1:25), mit dem die vorgegebene Leitkurve abgefahren werden soll. Schreibstifte am Modell zeichnen während der Versuchsfahrt dann die Schleppkurve auf. Die so gewonnenen Ergebnisse müssen dann in einem weiteren Schritt in einen planungsüblichen Maßstab (1:500/1:1000) übertragen werden [MESCHIK 1992]. Seitliche Sicherheitsabstände werden nachträglich an die ermittelte Schleppkurve angetragen.

Für MARX dienen die Modellversuche lediglich zur Kontrolle der nach seiner grafischen Methode entwickelten Schleppkurven. Er wählt dazu ein Fahrzeugmodell im Maßstab 1:50, das an einem Fahrstift entlang der Leitkurve geführt wird, während der Schreibstift die Schleppkurve aufzeichnet [MARX 1975] (vgl. **Abbildung 21**). Die so entstehende Schleppkurve wird anschließend in die gängigen Planungsmaßstäbe auf Transparentpapier übertragen. Das in **Abbildung 21** dargestellte Modellfahrzeug reduziert offensichtlich einen Gliederzug (Zugfahrzeug mit Anhänger) auf 3 Achsen, der Fahrstift soll augenscheinlich die Mitte der Vorderachse repräsentieren. Ein weiteres Beispiel sind die Versuche von RETZKO [RETZKO 1972], der Modelle in den Maßstäben 1:10 (Pkw) und 1:20 (Lkw) verwendet (vgl. **Abbildung 22**).

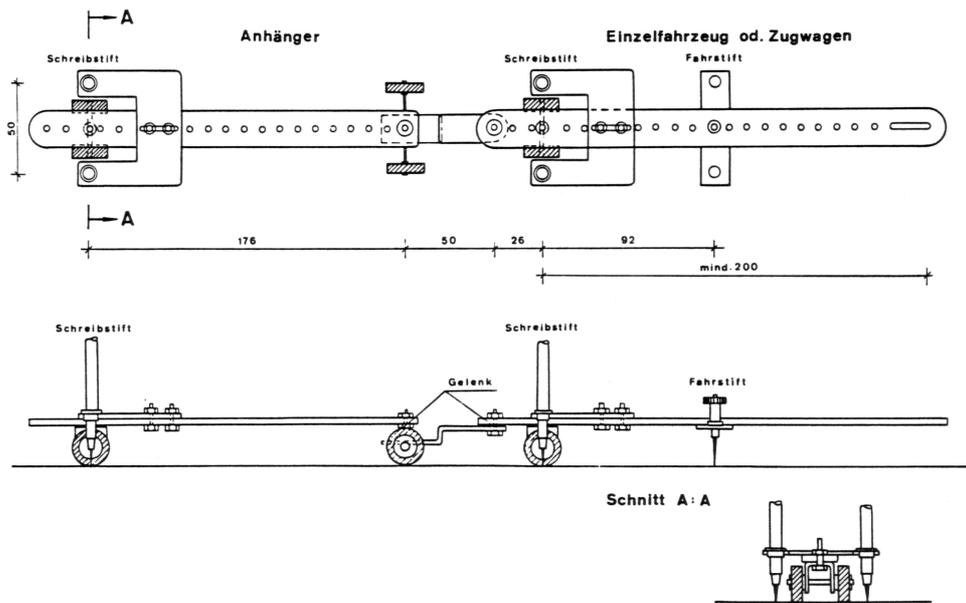


Abbildung 21: Modellfahrzeug nach MARX [MARX 1975]

An den Fahrzeugeckpunkten und an den Fahrzeugbegrenzungen auf Höhe der Hinterachse werden Schreibstifte angebracht, die den Verlauf der Versuchsfahrt aufzeichnen. Auf transparentem Millimeterpapier lässt sich danach die vom Modellfahrzeug überstrichene Fläche ermitteln.

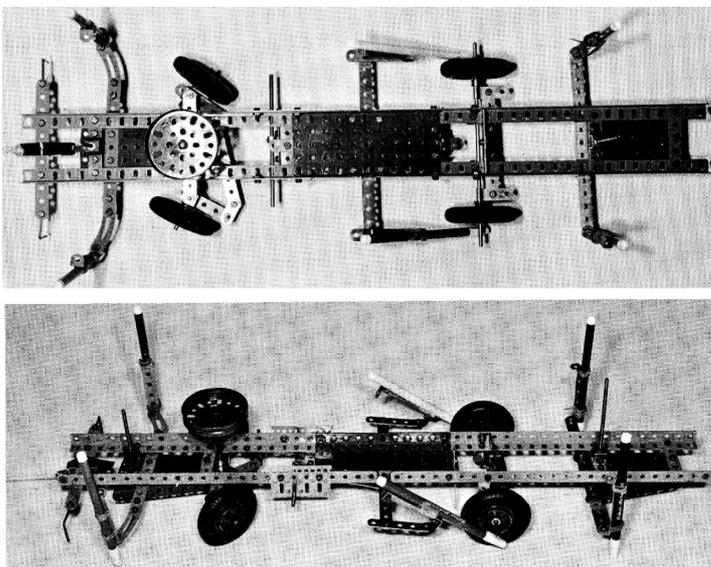


Abbildung 22: Modellfahrzeug nach RETZKO [RETZKO 1972]

4.2.3 Praktische Fahrversuche

Praktische Fahrversuche sind aufgrund der dazu erforderlichen Fahrzeuge und des notwendigen Platzbedarfes aufwändig und kostspielig. Nur mit dieser Methode können aber Einflüsse wie das Fahrverhalten des Fahrzeugführers („Erfahrung“) oder aus Reifenschlupf, Fahrzeugfederung und -stoßdämpfung erfasst werden. Auch konnten Schleppkurven von Fahrzeugen mit gelenkten Nachlaufachsen lange Zeit nur mit praktischen Versuchsfahrten ermittelt werden [MESCHIK 1992]. Noch heute sind nicht alle theoretisch denkbaren Fälle komplizierter Lenkachskonstellationen in Gelenkzügen exakt analytisch gelöst.

Ein Problem der praktischen Fahrversuche lag bisher in der Aufzeichnung der überfahrenen Flächen. Eine Methode bestand z. B. darin, das Fahrzeug in kurzen Abständen anzuhalten, um dann mit klassischen Vermessungsmethoden (Theodolit) die Lage charakteristischer Fahrzeugpunkte zu vermessen. Derartige Verfahrensweisen sind jedoch mit einem enormen Vermessungsaufwand verbunden, zumal bei Testreihen zur Schleppkurvenermittlung eine Vielzahl von Fahrten, oft mit unterschiedlichen Fahrzeugen, mit wechselnden Fahrzeugführern und unter Vorgabe verschiedener Leitlinien durchzuführen ist. Außerdem besteht bei dieser Methode die Gefahr, dass die Ergebnisse durch das ständige Anhalten des Fahrzeuges verfälscht werden, weil die Kontinuität der Bewegung fehlt.

Eine andere Möglichkeit, Aufzeichnungen von Fahrzeugbewegungen zu erhalten, besteht darin, entsprechende Spuren auf der Fahrbahnoberfläche zu erzeugen. OEHM/SCHREINER [OEHM 1956] führten Fahrversuche auf der Startbahn des Flughafens Essen-Mühlheim durch. Die Ein- und Ausfahrquerschnitte der vorgegebenen Winkeländerungen und die Fläche zwischen den Winkelschenkeln wurden mit Pflastersand abgestreut. Anschließend wurden die so gewonnenen Fahrspuren im Sand in einen Handriss übertragen.

Eine weitere Möglichkeit ist das Anbringen von Düsen am Fahrzeug, aus denen Markierungsmittel wie Sand, Wasser oder flüssige Farbe auf dem Boden läuft (vgl. **Abbildung 23**).

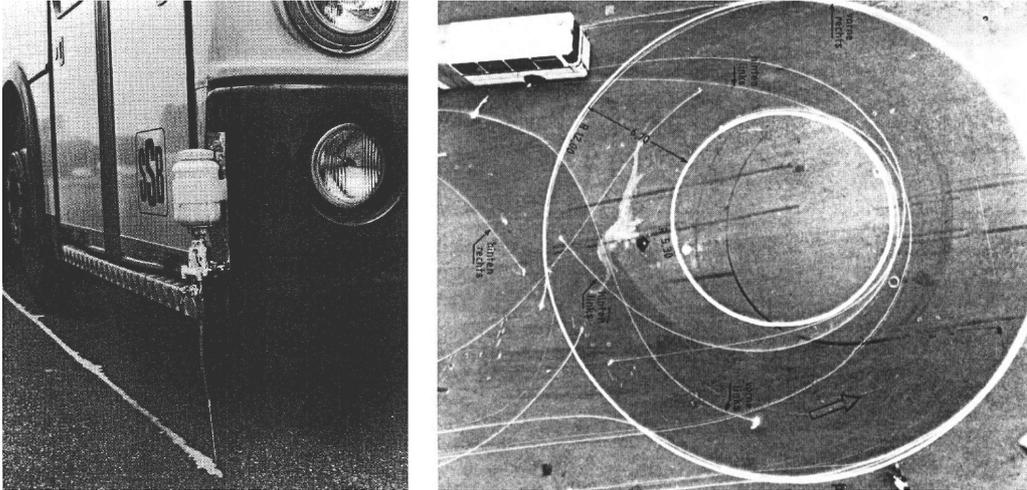


Abbildung 23: Markierung durch auslaufende Farbe. Links: Befestigung des Farbbehälters an der rechten vorderen Fahrzeugecke. Rechts: Ergebnisdarstellung auf dem Untergrund (weiße Linien) [BONZ, SCHMID 1980]

Ein weiteres (jedoch relativ ungenaues) Verfahren besteht darin, neben dem fahrenden Fahrzeug herzulaufen und in der fortlaufenden Bewegung Markierungen (z. B. Leitkegel) zu setzen, die den Weg des Versuchsfahrzeuges beschreiben. Dieses Vorgehen hat neben den mit der manuellen Markierungsarbeit verbundenen Ungenauigkeiten den Nachteil, dass es aufwändige Vermessungsarbeiten nach sich zieht, weil die einzelnen Fahrzeugpositionen erst nachträglich eingemessen und aufgezeichnet werden können.

Sogenannte motographische Messungen mit anschließender photogrammetrischer Auswertung eignen sich demgegenüber sehr gut für eine große Anzahl von Messungen. Unter Motographie wird die Erfassung von Bewegungen signalisierter Punkte mit Hilfe von Lichtspuren verstanden. Dazu werden an charakteristischen Punkten des Fahrzeugs (z. B. Fahrzeugecken und seitliche Fahrzeugbegrenzung) Leuchten befestigt, deren Leuchtkegel möglichst nur nach oben abstrahlen und deren Schaltung unter Einsatz eines auf die Fahrgeschwindigkeit abgestimmten Impulsgenerators gesteuert wird. Um auswertbare Ergebnisse zu erhalten, sollten bei der motographischen Schleppkurvenermittlung auch Orientierungspunkte der Kurve oder der Leitlinie zusätzlich mit derartigen Leuchtkörpern ausgestattet sein.

Testfahrten dieser Art werden bei Dunkelheit durchgeführt und aus großer Höhe von einem Festpunkt aus mit terrestrischen Weitwinkelkameras aufgenommen, wobei mit

langen Belichtungszeiten gearbeitet wird. Die blinkenden Leuchten auf den Fahrzeugen bilden auf dem Fotonegativ einen unterbrochenen Linienzug ab. So ist auf einem einzigen Bild der gesamte Bewegungsablauf des Fahrzeugs erkennbar (**Abbildung 24**).

Eine weitere Möglichkeit der praktischen Schleppkurvenermittlung stellt die Methode der Videoaufzeichnung dar. SCHNÜLL [SCHNÜLL 2001] wählte dieses Vorgehen zur Ermittlung von Bewegungsräumen rückwärts fahrender Kfz. Als Orientierungshilfe bei der nachträglichen photogrammetrischen Auswertung der Videobilder wurden an den Fahrzeugeckpunkten Markierungsplatten befestigt. Die Kamera selbst wurde auf einem Teleskoparm in 38 m Höhe montiert (vgl. **Abbildung 25**).

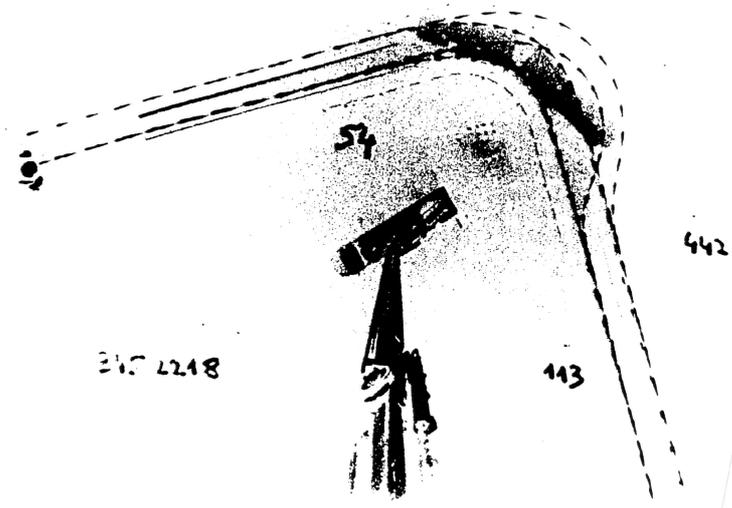


Abbildung 24: Motographische Messung aus der Kanzel eines Hubsteigers (Dauerbelichtung, Negativ) [MARX, MESCHIK 1990]

Zur Kalibrierung der Videobilder wurde ein 2 x 2 m Raster vermessen und markiert. Die Auswertung der Fahrversuche erfolgte dann mit Hilfe eines Bildverarbeitungssystems. Die der Kamera abgewandten Fahrzeugpunkte wurden rechnerisch über die bekannte Fahrzeuggeometrie ermittelt. Dieses Verfahren birgt – wie die Methode der motographischen Messung auch – ein Genauigkeitsproblem, weil außerhalb der optischen Achse keine echten Senkrechtaufnahmen möglich sind und somit Verzerrungen entstehen, die vor der eigentlichen Auswertung der Schleppkurven mit geeigneten Verfahren zu eliminieren sind.

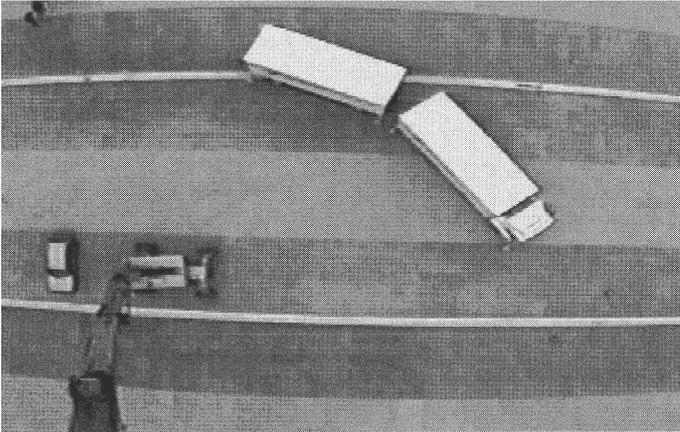


Abbildung 25: Versuchsfahrt mit Videoerfassung aus Kamerasicht [SCHNÜLL 2001]

An der Professur für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen der Universität der Bundeswehr München wird seit 1998 erprobt, wie Fahrzeugbewegungen mit Hilfe von Geosatelliten (GPS–Methode; **G**lobal **P**ositioning **S**ystem) vermessungstechnisch aufgenommen werden können (vgl. **Abbildung 26**). Diese Methode hat gegenüber den vorgenannten Verfahren den Vorteil, dass die gewonnenen Daten unmittelbar, also ohne nachträgliche terrestrische Vermessung, Berechnung oder Entzerrung, erfasst und ausgewertet werden können. Diese Methode wurde für die Ermittlung der Schleppkurven in der vorliegenden Arbeit angewandt; sie wird aus diesem Grunde in einem eigenen Kapitel ausführlicher beschrieben.



Abbildung 26: GPS-Empfänger auf dem Dach eines Versuchsfahrzeuges mit statischem Referenzempfänger (im Vordergrund) [Foto: HOERPEL, UniBwM]

5. Schleppkurvenermittlung mit Hilfe von GPS

5.1 Grundlagen der Ortung mit Satelliten

Unter Ortung wird die Bestimmung des momentanen Objektstandortes, welcher sich in Ruhe oder in Bewegung befinden kann, verstanden. Ergebnis sind die Koordinaten des Objektstandortes. Das grundsätzlich dreidimensionale Problem der Ortung (3 Koordinaten: geographische Länge, geographische Breite, Höhe) wird in Fachkreisen als *positioning* bezeichnet und kann vielfach auf ein 2-dimensionales Problem reduziert werden (Koordinaten ohne Berücksichtigung der Höhe; *location*). Es wird zwischen Eigenortung (Ortung wird vom Objekt durchgeführt) und Fremdortung (Ortung außerhalb des Objektes) sowie zwischen autonomen und kooperativen Ortungsverfahren unterschieden; die Arten der Ortung sind in **Abbildung 27** beschrieben. [MANSFELD 2004]

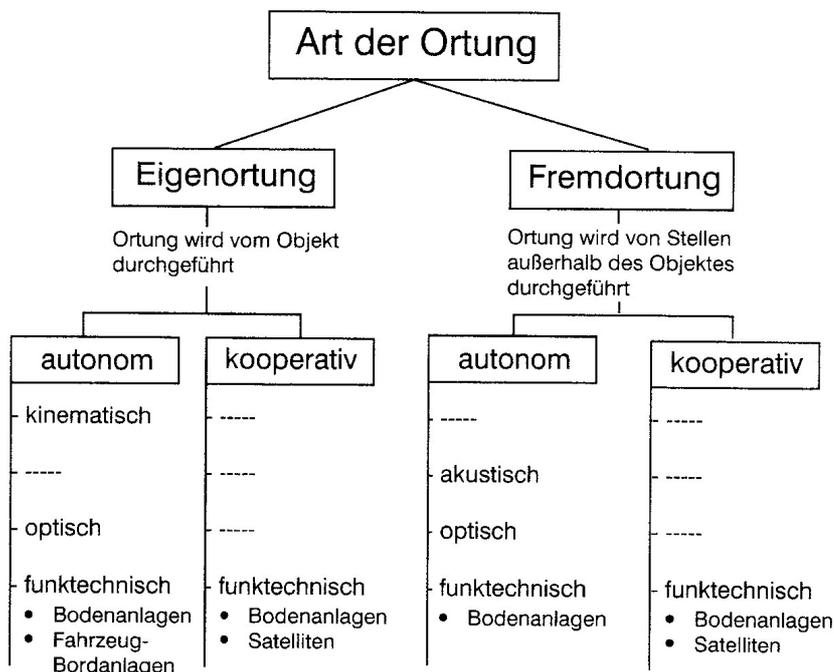


Abbildung 27: Arten der Ortung [MANSFELD 2004]

Die praktische Anwendung der Ortung liegt in der Positionsbestimmung (Bestimmung der momentanen Position eines Objektes) oder der Navigation (Führung eines beweglichen Objektes von einem Ausgangspunkt zu einem Zielort).

Die Objektkoordinaten können mit nachfolgenden Methoden ermittelt werden:

- Messung des Winkels in einer Ebene

Basierend auf der Richtwirkung von Antennen. Dabei wird unterschieden zwischen Richtempfangsverfahren (richtungsempfindliche Empfangsantenne misst den Winkel zu einem Sender) und Richtsendeverfahren (die Sendeantenne sendet mit der elektromagnetischen Welle eine Richtungsinformation).

- Messung der Entfernung

Für eine Ortung im Raum sind 3 Satelliten erforderlich. Das Funktionsprinzip lässt sich am einfachsten an einem Beispiel beschreiben: Ein GPS-Empfänger errechnet die Entfernung R_1 zu einem Satelliten A. Damit wird der Raum für die gesuchte Position P eingegrenzt; der Empfänger befindet sich irgendwo auf der Oberfläche einer imaginären Kugel mit Radius R_1 um den Kugelmittelpunkt (Satellit) A. Wird synchron die Entfernung zu einem zweiten Satelliten B ermittelt, so liegt die gesuchte Position auf demjenigen Kreis, welcher durch den Oberflächenschnitt der beiden Kugeln um die Satelliten A und B beschrieben wird. Steht die Entfernung zu einem dritten Satelliten C fest, gibt es nur noch 2 mögliche Schnittpunkte. Sie liegen genau dort, wo der Schnittkreis um A und B die imaginäre Kugel um C durchstößt. Einer der beiden Schnittpunkte kann normalerweise mittels Plausibilitätskontrolle eliminiert werden. [TÜV 1997]

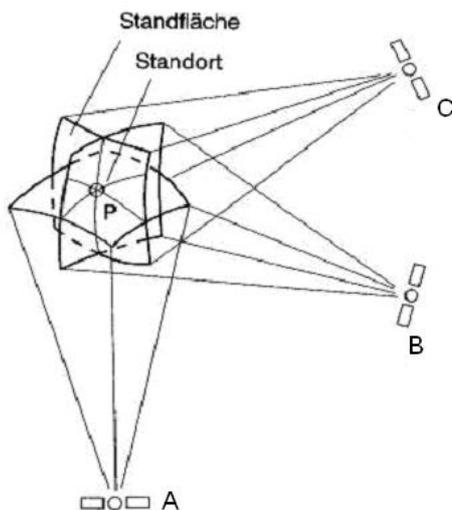
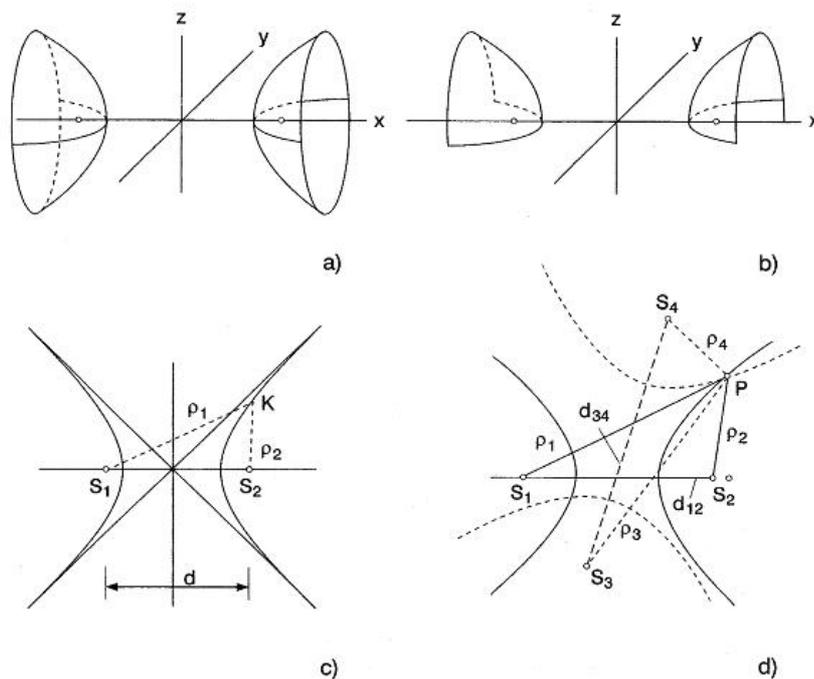


Abbildung 28: Standortbestimmung im Raum mit Hilfe von 3 Satelliten
[MANSFELD 2004]

Die Entfernungsmessung als solche beruht entweder auf der Messung der Laufzeit impulsförmiger Signale oder auf der Messung der Phasenwinkeldifferenz kontinuierlicher Schwingungen.

- Messung der Entfernungsdifferenz

Diesem Verfahren liegt folgendes zugrunde: Alle Punkte im Raum, deren Entfernungsdifferenz zu zwei Bezugspunkten S_1 und S_2 den gleichen Betrag aufweisen, liegen auf der Oberfläche eines zweischaligen Rotationshyperboloiden dann, wenn die Bezugspunkte S_1 und S_2 die Brennpunkte des zweischaligen Rotationshyperboloiden bilden. Die Messung der Entfernungsdifferenz erfolgt mit den gleichen Verfahren wie die bei der Entfernungsmessung. Der Nachteil der Ermittlung der Entfernungsdifferenz besteht darin, dass für eine Standortbestimmung im Raum 6 Satelliten notwendig sind. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt jedoch darin, dass die technischen Anforderungen geringer sind (keine Abhängigkeiten der Uhrzeiten von Sender und Empfänger bzw. keine Bedingungen an Frequenz und Phase der Trägerschwingung).



Orten durch Messung der Entfernungsdifferenz
a) Standflächen im Raum: zweischaliges Rotationshyperboloid
b) Standflächen oberhalb der Erdoberfläche (x-y-Ebene): halbes Rotationshyperboloidpaar
c) Standlinien zu b): Hyperbeln
d) Schnittpunkt von zwei Hyperbeln ergibt den Standort P

Abbildung 29: Orten durch Messung der Entfernungsdifferenz [MANSFELD 2004]

- Messung der Entfernungsänderung

Die Ermittlung der Entfernungsänderung gleicht der Messung der Entfernungsdifferenz. Der Unterschied zwischen beiden Verfahren liegt darin, dass die Entfernungsdifferenz zu zwei Bezugspunkten mit einer einzigen Messung erfasst wird, während bei Ermittlung der Entfernungsänderung die Entfernung zu einem sich bewegenden Satelliten zweimal nacheinander erfolgt.

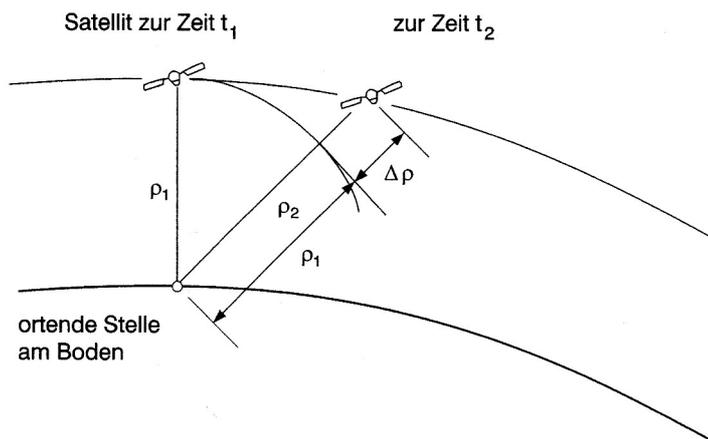


Abbildung 30: Bestimmung der Entfernungsänderung in der Zeit (t_1-t_2)
[MANSFELD 2004]

In **Abbildung 31** sind mögliche Konstellationen von Satellitenortungssystemen zusammengestellt. Die einzelnen Systeme sind durch die Parameter Satellitenanzahl, Satellitenbahnen (geostationär, also auf äquatorialen Bahnen synchron mit der rotierenden Erde bewegend oder umlaufend, also in polaren oder gegenüber dem Äquator geneigten Bahnen um die Erde bewegend), Konstellation der Satelliten, Ortungsverfahren (z. B. funktechnische Wellen, akustische Wellen), Ortungsart (Eigen- oder Fremddortung), und Art der Standflächen gekennzeichnet. Standflächen sind als diejenigen Orte definiert, an denen messbare Größen wie z. B. Amplituden von Spannungen, Frequenzen, Phasenwinkel usw. den gleichen Betrag aufweisen. [MANSFELD 2004]

lfd Nr.	Sat.	Konstellation	Messungen	Art der Ortung
1	1 sta.		2 Winkel α, β Messungen gleichzeitig	zwei-dimensionale Fremdortung Standflächen: 2 Ebenen
2	1 uml.		2 Winkel α, β Messungen nacheinander	zwei-dimensionale Eigenortung Standflächen: 2 Ebenen
3	1 sta. oder uml.		2 Winkel α, β 1 Entfernung Messungen gleichzeitig	drei-dimensionale Fremdortung Standflächen: 1 Kugeloberfläche 2 Ebenen
4	1 uml.		2 Entfernungen ρ_1, ρ_2 Messungen nacheinander	zwei-dimensionale Fremdortung Standflächen: 2 Kugeloberflächen

Abbildung 31-1: Konzeption von Satellitenortungssystemen
(sta. = geostationärer Satellit, uml. = umlaufender Satellit)
[MANSFELD 2004]

5	1 uml.		3 Entfernungen ρ_1, ρ_2, ρ_3 Messungen nacheinander	drei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 3 Kugel- oberflächen
6	1 uml.		2 Entfernungsdifferenzen Dopplermessung im Zeitintervall	zwei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 2 Hyperboloid- oberflächen
7	2 sta. oder uml.		2 Entfernungen ρ_1, ρ_2 Messungen nacheinander	zwei- dimensionale Fremdortung Stand- flächen: 2 Kugel- oberflächen
8	2 sta.		2 Entfernungen ρ_1, ρ_2 Messungen gleichzeitig	zwei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 2 Kugel- oberflächen

Abbildung 31-2: Konzeption von Satellitenortungssystemen
(sta. = geostationärer Satellit, uml. = umlaufender Satellit)
[MANSFELD 2004]

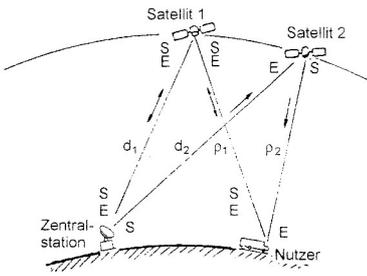
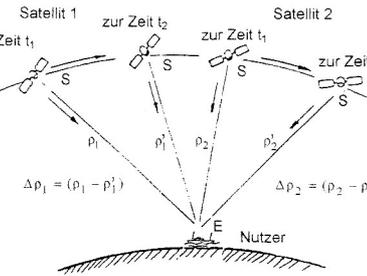
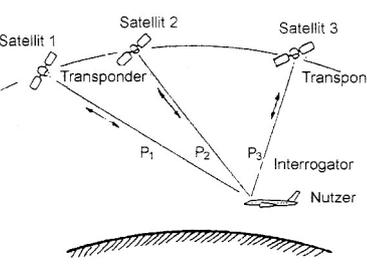
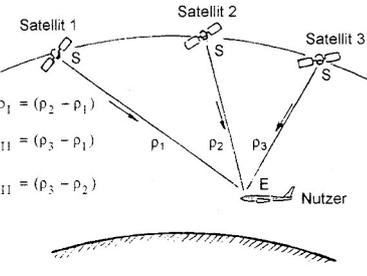
9	2 sta.		1 Entfernung 1 Entfernungsdifferenz Messungen gleichzeitig	zwei- dimensionale Fremdortung Stand- flächen: 1 Kugel- oberfläche 1 Hyper- boloid- oberfläche
10	2 uml.		2 Entfernungsdifferenzen $\rho_1 - \rho_1'$, $\rho_2 - \rho_2'$	zwei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 2 Hyperboloid- oberflächen
11	3 uml. oder sta.		3 Entfernung- gen ρ_1, ρ_2, ρ_3 (Zweiwege- Methode)	drei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 3 Kugel- oberflächen
12	3 uml. oder sta.		3 Entfernungsdifferenzen $\rho_2 - \rho_1$, $\rho_3 - \rho_1$, $\rho_3 - \rho_2$	drei- dimensionale Eigenortung Stand- flächen: 3 Hyper- boloid- oberflächen

Abbildung 31-3: Konzeption von Satellitenortungssystemen
(sta. = geostationärer Satellit, uml. = umlaufender Satellit)
[MANSFELD 2004]

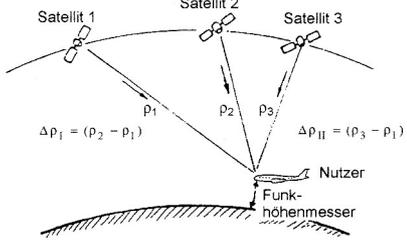
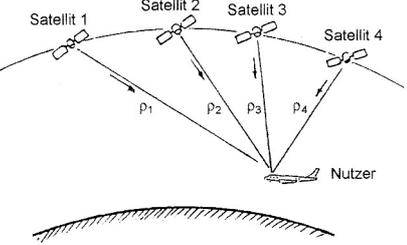
13	3 uml.		2 Entfernungs- differenzen $\rho_2 - \rho_1$, $\rho_3 - \rho_1$ Messungen gleichzeitig	zwei- dimensionale Fremdortung Stand- flächen: 1 Kugel- oberfläche 1 Hyper- boloid- oberfläche
14	4 uml. oder sta.		4 Entfernun- gen $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ (Einweg- Methode)	drei- dimensionale Eigenortung Geschwindig- keit, Uhrzeit Stand- flächen: 4 Kugel- oberflächen

Abbildung 31-4: Konzeption von Satellitenortungssystemen
(sta. = geostationärer Satellit, uml. = umlaufender Satellit)
[MANSFELD 2004]

Von den in **Abbildung 31** dargestellten Konzeptionen sind nur einige realisiert worden, andere sind auf Teilentwicklungen beschränkt oder bestehen nur als Entwurf.

5.2 Das Satelliten-Navigationssystem GPS

1978 startete das US-Verteidigungsministerium den ersten GPS-Satelliten. GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) ist das Nachfolgesystem für „Transit“, dem Satellitennavigationssystem aus den 1960er Jahren [TÜV 1997] und wurde zunächst für militärische Zwecke entwickelt. Die US-Streitkräfte sollten in der Lage sein, ihren aktuellen Standort jederzeit und überall präzise bestimmen zu können [ROTACHER 2004].

In der Entwicklungsphase wurden folgende Forderungen an das GPS-System gestellt:

- Ortung von ruhenden und bewegten Objekten in Echtzeit
- Bestimmung der Geschwindigkeit bewegter Objekte

- Lieferung von Zeitinformationen
- unbegrenzte Anzahl gleichzeitiger Nutzer
- Unabhängigkeit von meteorologischen Verhältnissen
- geringe Störanfälligkeit
- hohe Genauigkeit der Positionsbestimmung (mittlerer quadratischer Fehler von 30 m), der Geschwindigkeitsbestimmung (mittlerer quadratischer Fehler 0,3 m/s) und der Zeitinformation (mittlerer quadratischer Fehler 10 ns)
- Zeitbedarf für die erstmalige Positionsbestimmung einige Minuten.
[MANSFELD 2004]

Gegenüber dem konkurrierenden russischen Satellitennavigationssystem GLONASS (**Global Navigation Satellite System**) weist das (amerikanische) GPS damit erhebliche Vorteile bezüglich Genauigkeit und Störanfälligkeit auf.

Für das Militär ist ein besonders wichtiger Faktor, dass das System passiv arbeitet. Das heißt, dass der Nutzer (die eigene Truppe) keine Signale absenden muss, die dem potenziellen Gegner eine Ortung der eigenen Kräfte ermöglichen könnte. Zivile Anwendungen wurden ab 1984 durch den sog. C/A-Code (**C**oarse **A**cquisition) ermöglicht. Die allgemeine Genauigkeit der Ortsbestimmung für zivile Anwendungen wurde jedoch im Gegensatz zu den militärischen Möglichkeiten etwa um den Faktor 2 reduziert [ROTACHER 2004]. Beispiele ziviler Anwendungsmöglichkeiten, die im Lauf der Zeit erschlossen wurden, sind Fahrzeugortung und -navigation (beispielsweise in der Schifffahrt oder im Speditionsgeschäft), Vermessungsanwendungen (z. B. Kartierung, Absteckung) oder – als Spezialgebiet – die Automation und Steuerung von Maschinen. [TÜV 1997]

Eine GPS-Konfiguration besteht aus 3 Komponenten: dem Raumsegment, dem Kontrollsegment und dem Nutzersegment. Das Raumsegment besteht aus 24 GPS-Satelliten (zuzüglich einiger Reservesatelliten), die in einer Höhe von ca. 20.200 km die Erde mit einer Umlaufzeit von nahezu 12 Stunden umkreisen. Ihre Umlaufbahnen sind so gewählt, dass von jedem Punkt auf der Erdoberfläche zu jeder Zeit eine Quasi-Sichtverbindung zu mind. 4 Satelliten besteht. Damit sind die Voraussetzungen für die Ortung und Navigation nach dem Prinzip einer

trigonometrischen Netzlegung geschaffen, also der gleichzeitigen Entfernungsbestimmung zu 3 Satelliten. Das Funktionsprinzip ist in *5.1 Grundlagen der Ortung mit Satelliten*, Unterpunkt *Messung der Entfernung* beschrieben. Der vierte „sichtbare“ Satellit dient der Überprüfung der Signalzeit, da die Entfernungsmessung prinzipiell über die Laufzeit der Satellitensignale erfolgt.

Das Kontrollsegment besteht aus der sog. Master Control Station (MCS) in Colorado Springs und fünf weiteren Stationen, den sog. Monitorstationen (ebenfalls Colorado Springs, Hawaii, Ascension Islands im Atlantik, Diego Garcia im indischen Ozean, Kwajalein im Pazifik; vgl. Anlage 9). Die Monitorstationen sind nichts anderes als GPS-Empfänger, die alle im Sichtbereich befindlichen Satelliten verfolgen und die so gewonnene Messdaten an die Master Control Station zur weiteren Verarbeitung weiterleiten. Das Kontrollsegment hat neben der Gesamtkontrolle über das System die Aufgabe, die GPS-Systemzeit zu bestimmen. Es werden Satellitenbahndaten und Satellitenzeit vorausberechnet und die Bahn- und Zeitinformationen in die Satelliten eingespeist. Alle genannten Stationen unterliegen der Kontrolle des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums (US Department of Defense; DoD).

Unter dem Nutzersegment werden anwendungsbezogene Empfängereinheiten (z. B. einfache Codeempfänger für die Fahrzeugnavigation, geodätische Empfänger für die Vermessung), bestehend aus Antenne, Verarbeitungseinheit, Steuer- und Anzeigeeinheit, verstanden.

Jeweils 4 GPS-Satelliten kreisen auf 6 Bahnebenen in gleichen Abständen um die Erde. Sie werden als NAVSTAR-Satelliten (**NAV**igation **S**ystem for **T**iming **A**nd **R**anging) bezeichnet. Die oben bereits erwähnte „Sichtbarkeit“ von mindestens 4 Satelliten ist für einen Elevationswinkel (Erhebungswinkel über dem Horizont) von mindestens 15° gewährleistet.

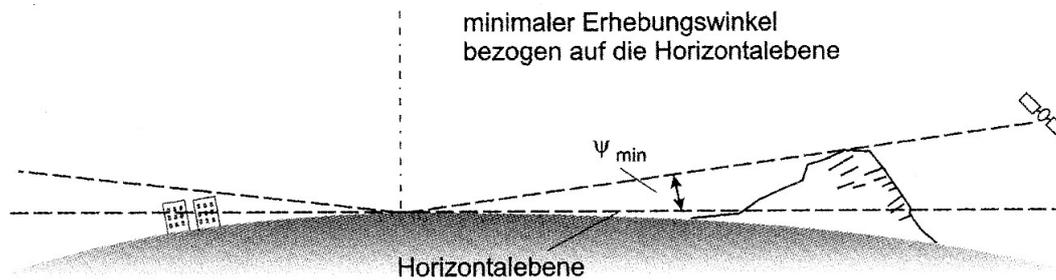


Abbildung 32: Erhebungswinkel [MANSFELD 2004]

Die Satelliten senden 2 Trägersignale im Mikrowellenbereich aus, die als L1- und L2-Code bezeichnet werden. Die Bezeichnung L weist auf die im sog. L-Band liegende Frequenz von 1 – 2 GHz hin. Bei Frequenzen von mehr als 2 GHz würden Richtantennen in den Empfangseinheiten notwendig. Sehr tiefe Frequenzen (weniger als 100 MHz) besitzen dagegen eine hohe Empfindlichkeit bezüglich der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen und gegen ionosphärische Störungen (Störungen, die in einer Höhe von 50 – 1.500 km durch die hohe Elektronenkonzentration in der Ionosphäre hervorgerufen werden). Die L1-Frequenz trägt den sog. C/A-Code (Coarse Acquisition). Die L2-Frequenz trägt den sog. P-Code für höhere Genauigkeiten. Der C/A-Code ist die Basis für alle zivilen GPS-Empfänger; er enthält Almanachdaten, astronomische Tabellen (Ephemeriden), Zeitangaben und eine Identifikation.

Als Messgröße dient die Signallaufzeit zwischen Satelliten und Empfängerantenne, die sog. Pseudostrecke. Die Positionsbestimmung erfolgt durch die Auswertung der von den Satelliten ausgesendeten und eindeutigen Codesignale, z.B. dem C/A – Code der Frequenz L1. Ohne zusätzliche Korrekturdaten zum C/A-Signal kann eine Genauigkeit von ca. 50 m erzielt werden. Sie ist aber von der geometrischen Konfiguration der zu empfangenden Satelliten abhängig und wird durch den sog. DOP-Wert (**D**ilution **o**f **p**recision) ausgedrückt. Man unterscheidet GDOP (Gesamtgenauigkeit), PDOP (Positionsgenauigkeit), HDOP (Horizontalgenauigkeit), VDOP (Vertikalgenauigkeit) und TDOP (Zeitgenauigkeit). Je kleiner der jeweilige DOP-Wert ist, desto günstiger ist die geometrische Verteilung der sichtbaren

Satelliten für eine genaue Positionsbestimmung. Ein Wert unter 6 wird als sehr gut angesehen, ein Wert bis 8 gilt als ausreichend. [SEEBER, SCHMITZ 1996]

Eine höhere Genauigkeit der GPS-Messung lässt sich erzielen, wenn Referenzstationen eingesetzt werden, deren exakte Position bekannt ist. Die Abweichung der von den Satelliten empfangenen Daten zu den bekannten Standorten der Referenzstationen wird dabei als Korrektur an die übrigen GPS-Empfänger weitergegeben. Dieses Verfahren wird als Differential GPS (DGPS) bezeichnet. Damit können Genauigkeiten von wenigen Metern erreicht werden.

Noch höhere Genauigkeiten (im cm-Bereich) sind zu erreichen, wenn das DGPS durch geeignete mathematische Verfahren zur Eliminierung von Mehrdeutigkeitsunbekannten unterstützt wird. In Echtzeit (also ohne nachträgliche Bearbeitung der Daten, dem sog. „postprocessing“) war dies bis vor wenigen Jahren nur für feststehende Punkte möglich (sog. statische Initialisierung). Mit Hilfe neuerer Algorithmen sind die dazu notwendigen mathematischen Operationen in ausreichend kurzer Zeit durchführbar, so dass eine derartige Präzision in Echtzeit auch mit einem bewegten Empfänger möglich geworden ist (sog. „fliegende Initialisierung“, englisch „on-the-fly“). Für dieses Verfahren hat sich der Begriff **Real-Time-Kinematik (RTK)** durchgesetzt.

Die geringe Empfangsstärke der von den GPS-Satelliten ausgesendeten Signale erfordert eine quasioptische Sicht zwischen GPS-Empfänger, Referenzstation und den Satelliten. Enge Straßenschluchten mit hoher Bebauung oder großwüchsige Vegetation haben zur Folge, dass nicht genügend Satelliten unter einem ausreichend großen Elevationswinkel zur Verfügung stehen, was bei kinematischen Messungen zu Empfangslücken führt.

Darüber hinaus existiert eine Reihe anderer möglicher Fehlereinflüsse wie z. B. satelliten- und/oder empfängerabhängige Fehler, Uhrfehler, Abweichungen in den Parametern der Satellitenbahn, beobachtungsabhängige Fehler, Mehrwegeeffekte usw.

Insbesondere bei kinematischen Messungen (darunter wird die Aufnahme sich bewegener Objekte – z. B. Fahrzeuge – verstanden; die Positionsdaten werden in bestimmten Zeitabständen ermittelt) wirken sich Mehrwegeeffekte negativ auf die Qualität einer Positionsbestimmung aus [STERNBERG, NUSSRAINER 2001]. Unter Mehrwegeausbreitung werden Reflexionen verstanden, die an glatten Oberflächen entstehen und als Störsignal in den Messungen auftreten (vgl. **Abbildung 33**), die – je nach Qualität der eingesetzten Geräte im Nutzersegment – Positionsfehler von mehr als 100 m verursachen können.

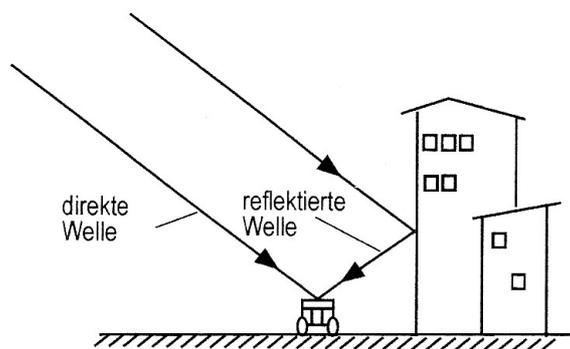
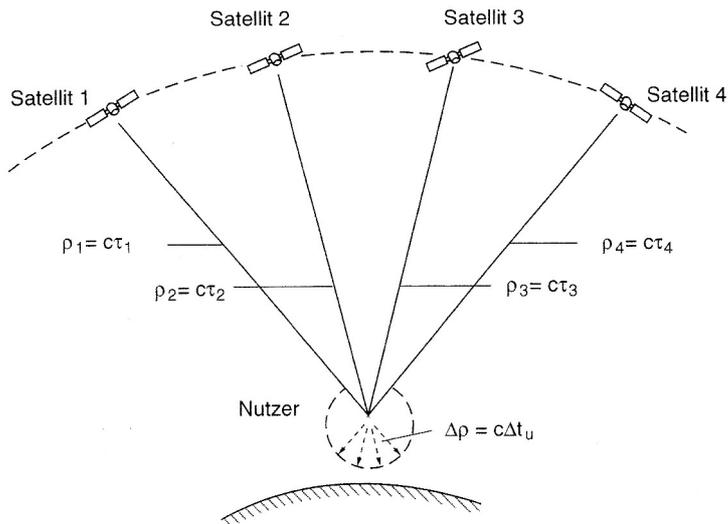


Abbildung 33: Direkte und reflektierte Welle [MANSFELD 2004]

In **Abbildung 34** ist das Ortungsprinzip und die Grundkonzeption des GPS-Systems zusammenfassend dargestellt.



Vorgabe	Konzeption
Aufgabe	Positionsbestimmung (Ortung) Geschwindigkeitsbestimmung Zeitinformationsgewinnung
Ortungsverfahren	Entfernungsmessverfahren
Ortungsumfang	dreidimensional
Satelliten Art Anzahl (Standard) Bahnhöhe	umlaufend 24 20 230 km
Sendefrequenzen der Satelliten Träger L1 Träger L2	1575,42 MHz 1227,60 MHz
Ortungssignal	codierte Impulsfolge
Navigationsmitteilung	binäre Daten
Messgrößen	Entfernung durch Messen von – Signallaufzeiten (Impulslaufzeitverfahren) – Trägerphasendifferenz (kontinuierliche Schwingungen, CW-Verfahren)
Genauigkeit der Positionsbestimmung – bei Messung der Signallaufzeit – bei Messung der Trägerphasendifferenz	Positionsfehler bei Wahrscheinlichkeit $W = 95\%$ je nach Signalverarbeitung 30 ... 100 m 3 ... 30 cm
Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung	Geschwindigkeitsfehler: 3 m/s
Genauigkeit der Zeitinformation	Zeitfehler: 100 ns

Abbildung 34: Ortungsprinzip und Grundkonzeption von GPS [MANSFELD 2004]

5.3 Ermittlung von Schleppkurven mit GPS – Verfahrensentwicklung

Im Rahmen einer Vorstudie wurde 1998 an der Professur für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen der Universität der Bundeswehr München die grundsätzliche Eignung der GPS-Messeinrichtung zur empirischen Ermittlung von Fahrkurven nachgewiesen.

Zur Erprobung im Zuge einer Reihe von Testfahrten wurde seinerzeit ein bei der Bundeswehr vorhandenes Lkw-Gespann gewählt, welches annähernd den Abmessungen des 18-m-Lastzuges aus der (heute noch aktuellen) „Knotenpunkt-Richtlinie“ RAS-K-1 entsprach. Je 2 GPS-Empfänger wurden auf dem Schleppfahrzeug (Typ Mercedes 1017; Planenaufbau) und dem Anhänger (Kastenaufbau) montiert.

Insgesamt wurden bei der damaligen Versuchsreihe 20 Testfahrten auf dem Versuchsfeld (Gelände der UniBw-München) durchgeführt. Die einzelnen Positionen des Fahrzeugs (genauer der GPS-Empfänger) während der Fahrten wurden mit einer Frequenz von 2 Hz gemessen, d. h. alle 0,5 Sekunden erfolgte eine Positionsbestimmung der am Fahrzeug befestigten GPS-Empfänger während der Bewegung. Mit trigonometrischen Berechnungen wurden die GPS-Punkte in die Eckpunkte des Versuchsfahrzeuges transformiert. Das Resultat war eine Folge von Messpunkten für eine Einzelfahrt bzw. – aus einer Überlagerung mehrerer Fahrten resultierend – eine Punktwolke, womit die Bewegungskurven von 8 Fahrzeugeckpunkten wiedergegeben wurde. Somit konnte die Eignung des Messsystems zur Darstellung von Fahrzeugbewegungen nachgewiesen werden. [KLINGBERG 1998]

Im Juli 2000 wurden dann Versuchsfahrten mit einem Niederflur-Gelenklinienbus (MAN, Modell NG 313) durchgeführt. Ziel dieser neueren Versuchsfahrten war es, den Versuchsaufbau zu optimieren und konkrete Auswertungen bezüglich des Flächenbedarfs bei Kurvenfahrt für dieses (zum damaligen Zeitpunkt) auf dem neuesten Stand der Technik befindlichen Fahrzeugs zu erhalten. Die Ergebnisse sollten mit den Schleppkurven der RAS-K-1 [FGSV 1988] verglichen werden.

Auf dem Messfeld wurden dazu die Leitlinien für die gewünschten Richtungsänderungen analog den damals gültigen Schleppkurvenschablonen der FGSV im Winkel von 100 gon (90°) und 160 gon (144°) aufgezeichnet. Der Ausrundungsradius der Start- und Endgeraden wurde jeweils mit 11,80 m und mit 12,50 m durchfahren. Die damit vorgegebenen Bewegungsabläufe Gerade-Kreis-Gerade dienten zwei verschiedenen Fahrzeuglenkern beim „Durchfahren“ der Kurven zur Orientierung. Der Gelenklinienbus sollte entlang dem vorgegebenen Außenradius mit der linken vorderen Fahrzeugecke gem. Fahrkurve 1 der RAS-K-1 gesteuert werden (vgl. **Abbildung 36**). Zusätzlich wurden die Eckausrundungen für eine rechtwinklige Einmündungssituation mit Kreisbogenradien von 4 m und 6 m überprüft (Testprogramm vgl. **Abbildung 35**).

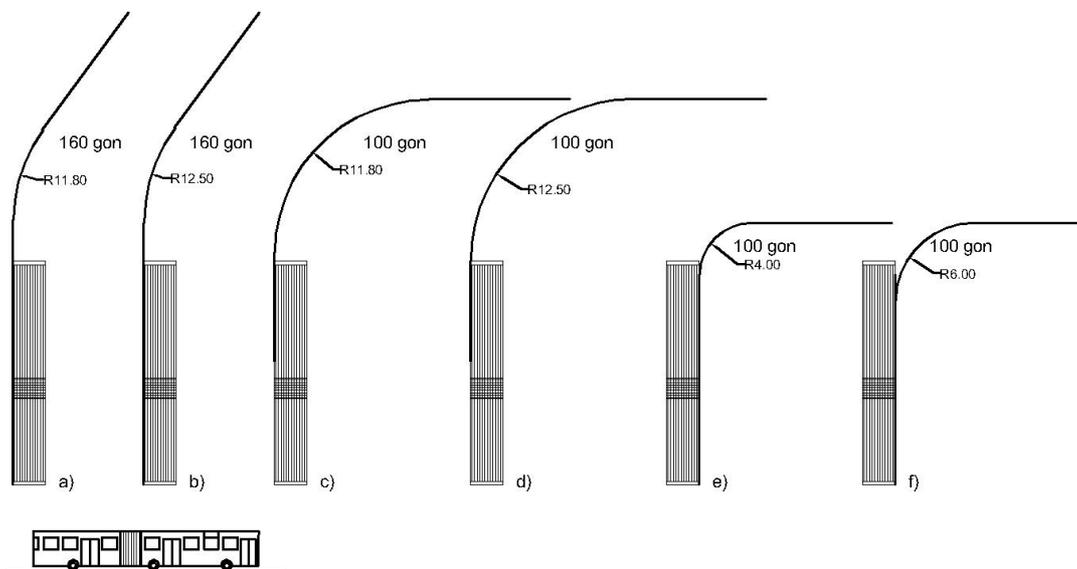


Abbildung 35: Testprogramm der Versuchsfahrten im Jahr 2000: zusätzlich zu den FGSV-Schleppkurven (Darstellungen a) bis d)) wurde je eine rechtwinklige Einmündungssituation mit den Ausrundungsradien 4 m und 6 m überprüft (Darstellungen e) und f))



Abbildung 36: Versuchsfahrten mit Niederflur-Gelenkbus im Jahr 2000
[Quelle: UniBw-München – Professur für Verkehrswesen und
Straßenverkehrsanlagen, 2000]

Die Berechnung der Koordinaten erfolgte im sog. „WGS 84“, dem GPS-Koordinatensystem. Diese wurden anschließend in ein lokales Koordinatensystem umgerechnet und zur weiteren Verarbeitung im ASCII-Format übergeben (vgl. Beispiel: Anlage 8). In ein Zeichenprogramm überführt, resultiert aus der Transformation der GPS-Empfänger-Koordinaten in die maßgeblichen Eckkoordinaten der Fahrzeuge die Darstellung der einzelnen Wagenkästen (z. B. Zugfahrzeug und Nachläufer bei einem Gelenkbus) zum jeweiligen Messzeitpunkt über die gesamte Dauer der Fahrt. Die Schleppkurve wird durch die Darstellung aller einzelnen Wagenkastenstandorte (überlagerte Darstellung der Fahrzeuge; vgl. **Abbildung 37**) charakterisiert. Die tatsächliche Schleppkurve ergibt sich aus der inneren und der äußeren Einhüllenden dieser Darstellung.

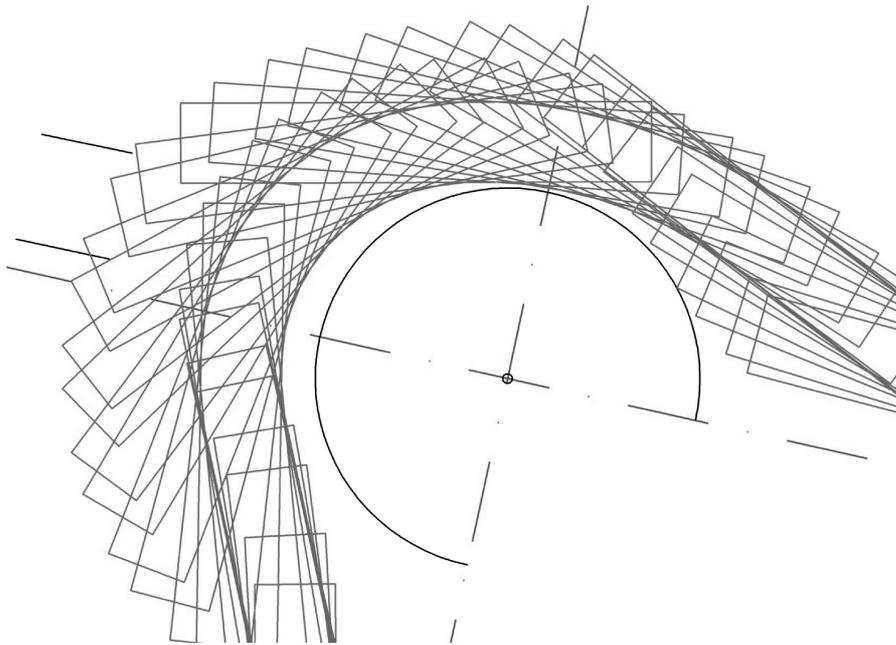


Abbildung 37: Darstellung der Grundrissprojektion aller Fahrzeugstandorte zu den jeweiligen Messzeitpunkten

Eine weitere Station der Erprobung war das Schleppkurven-Symposium vom 26. Juni 2001, welches von der Professur für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen an der Universität der Bundeswehr München durchgeführt wurde. Neben theoretischen Vorträgen zu Modellen der Schleppkurvensimulation, zur kinematischen Positionsbestimmung mit differentielltem GPS und zur Vermessung realer Fahrkurven mit dem GPS-Verfahren, wurden im Rahmen dieses Symposiums auch praktische Vorführungen des Messsystems dargeboten. Als Weiterentwicklung zu den Versuchsfahrten im Jahr 2000 konnte dabei erstmalig eine Visualisierung der aufgenommenen Daten in Echtzeit demonstriert werden (vgl. **Abbildung 38**). Neben der entsprechenden Messtechnik war dazu ein spezielles EDV-Programm erforderlich, mit dem die Transformation der gemessenen und kontinuierlich eingehenden GPS-Koordinaten auf die Fahrzeugeckpunkte und die Darstellung der Wagenkästen erfolgt [UniBw-München; NUSSRAINER, SOBOTTA 2001].

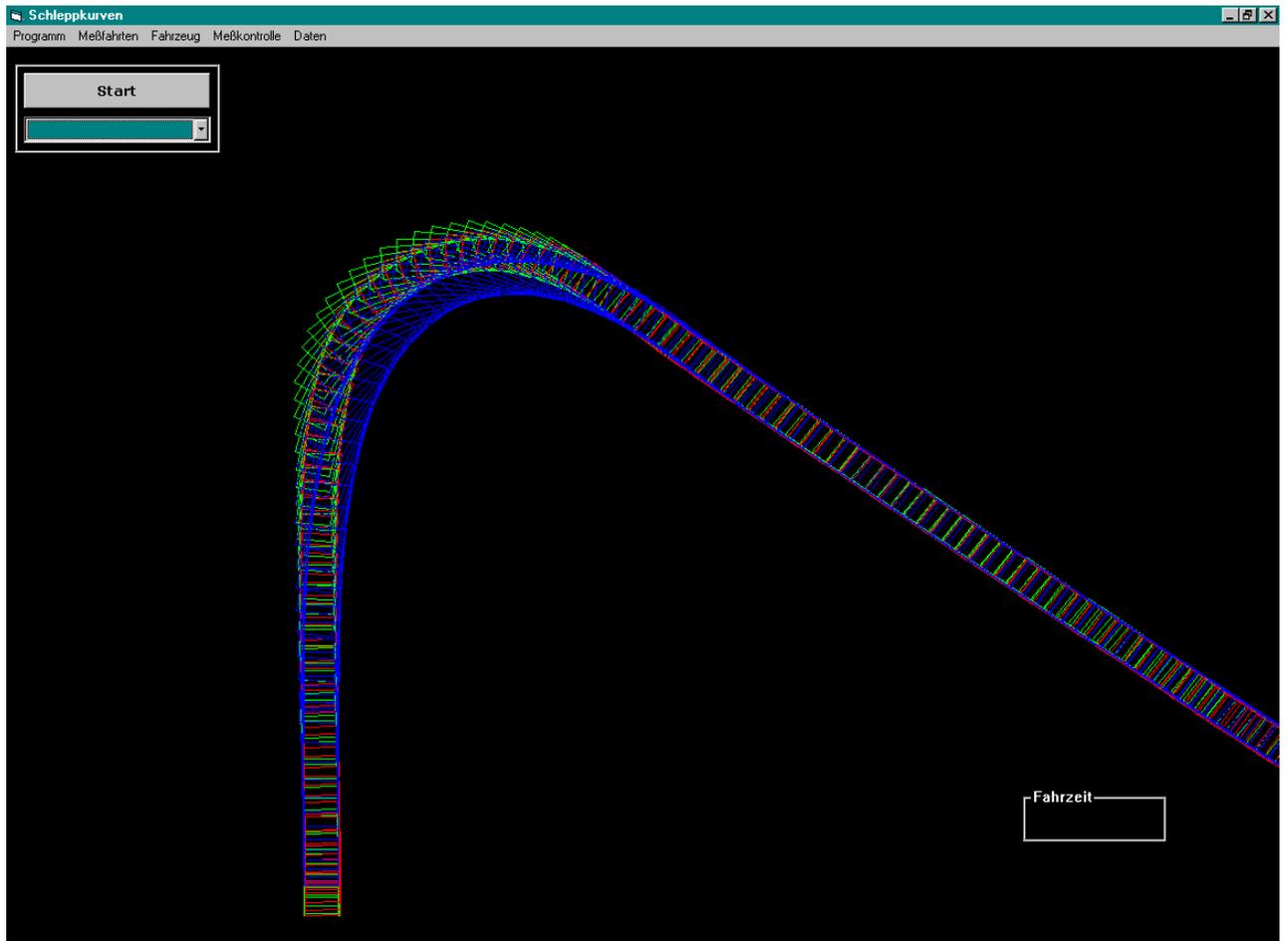


Abbildung 38: Echtzeit-Darstellung einer Messfahrt mit einem Gelenkornibus
[Quelle: Programm DRIVE, UniBw-München, 2001]

6. Versuchsprogramm

6.1 Testgelände bzw. Teststrecke

In den Monaten März und April 2001 wurde die eigentliche Testreihe von Versuchsfahrten durchgeführt, mit denen auf der Basis von GPS-Vermessung in Echtzeit (OTF; **O**n **T**he **F**ly) real gefahrene Schleppkurven aufgezeichnet wurden.

Ein Teil der Versuchsfahrten fand wiederum auf dem ehemaligen Militärflugplatz in Neubiberg statt (vgl. **Abbildung 39**). Nach der militärischen Nutzung der Flugbetriebsflächen und der Folgenutzung als Sportfluggelände wurde der Flugbetrieb Ende der 1990er Jahre vollständig eingestellt. Das weitläufige Gelände ist zum Teil an die benachbarten Gemeinden veräußert worden; die verbliebene Bundeswehrliegenschaft Neubiberg wird durch die Universität der Bundeswehr München genutzt. Die zur Verfügung stehenden Flächen bieten für Versuchsfahrten mit Fahrzeugen aller Art ein ideales Platzangebot. Die großen Flächen auf dem Vorfeld des ehemaligen Flugplatzes mit der entsprechend sehr geringen Bebauung erwiesen sich für die Durchführung von GPS-Messungen als sehr vorteilhaft, weil der Datenfluss zwischen Satelliten, Referenzstation und GPS-Empfänger nicht durch Abschattungen von Gebäuden, Bepflanzung oder dergl. gestört werden konnte.

Der zweite Teil der Testfahrten wurde an einem realen, in Betrieb befindlichem Kreisverkehr im Verlauf der B 471 durchgeführt (vgl. **Abbildung 40** und **Abbildung 41**). Dieser Kreisverkehrsplatz befindet sich am nördlichen Ortsrand von Aschheim in der Nähe der Autobahnanschlussstelle Aschheim Ismaning (BAB A 99).



Abbildung 39: Luftbild des Universitätsgeländes der UniBw-München mit Darstellung der Testfläche



Abbildung 40: Lage des Kreisverkehrsplatzes nördlich von Aschheim



Abbildung 41: Luftbildaufnahme des Kreisverkehrsplatzes bei Aschheim

6.2 Testfahrzeuge

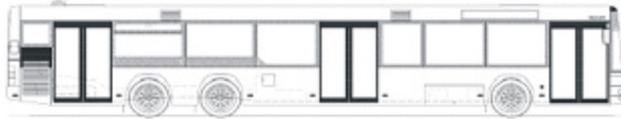
Ziel war es, Fahrzeuge einzusetzen, welche nach der gültigen StVZO die größten zulässigen Abmessungen bzw. den größten Schleppkurvenbedarf aufweisen sollten. Durch die von Fa. MAN Nutzfahrzeuge AG, Werk München, dankenswerter Weise zur Verfügung gestellten Fahrzeuge wurde diese Versuchsvorgabe erreicht.

Folgende Fahrzeuge wurden für die Versuchsfahrten verwendet:

- Niederflur-Linienbus NL-15 (Typ A26); Länge 15 m (**Abbildung 42**),
- Sattelzug mit einer Zugmaschine MAN TGA 18.410 FLS und einem Sattelaufleger der Fa. Schmitz SPR 24/L – 13.7; Länge 16,50 m (**Abbildung 43**).

Bus

Niederflur-Linienbus MAN NL-15 (Typ A26)

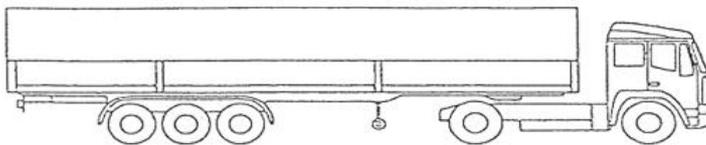


- Länge: 14,68 m
- Breite: 2,50 m
- Radstand
Achse 1-2: 6,90 m
Achse 2-3: 1,70 m
- Überhang
vorn: 2,70 m
hinten: 3,38 m

Abbildung 42: Testfahrzeug „15-m-Bus“

Sattelzug

Zugmaschine MAN TG-A 18.410 FLS
Sattelaufleger Schmitz SPR 24/L-13.7



- Länge: 16,50 m
- Breite
Zugmaschine: 2,50 m
Sattelaufleger: 2,55 m
- Radstand
Achse 1-2: 3,60 m
Achse 2-3: 7,02 m
- Lage Königszapfen
Königszapfen–Achse 2
0,58 m
- Überhang
vorn: 1,74 m
hinten (Achse 3): 4,42 m

Abbildung 43: Testfahrzeug „Sattelzug“

Diese beiden Fahrzeuge repräsentierten zum Zeitpunkt der Testfahrten den aktuellen Stand der Technik sowie die zulässigen Maximalabmessungen, die gem. § 32 StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungsordnung) für die beiden Fahrzeugtypen „Kraftomnibus“ und „Sattelzug“ folgende Werte annehmen dürfen:

- Breite, allgemein 2,55 m
- Länge von Kraftomnibussen mit mehr als zwei Achsen 15,00 m
- Länge von Sattelkraftfahrzeugen
(Zugmaschine und Sattelanhänger) 16,50 m.

Die höchstzulässige Länge wird von beiden Versuchsfahrzeugen erreicht. Das Sattelzugfahrzeug erreicht auch die maximale Breite, der 15-m-Bus liegt mit einer Breite von 2,50 m nur geringfügig unter dem zugelassenen Maximalwert; die Differenz um je 2,5 cm zu beiden Seiten des Wagenkastens ist für das Ergebnis der Untersuchung vernachlässigbar. Damit wurden für die Versuchsfahrten die gem. StVZO jeweils größtzulässigen Fahrzeuge verwendet.

Bekanntlich ist der Breitenbedarf eines Einzel- oder Gliederfahrzeuges bei stationärer Kurvenfahrt desto größer, je länger das Deichsel- bzw. Ersatzdeichselmaß ist [KÖPPEL 1979]. Der Sattelzug und der 15-m-Bus wurden ausgewählt, weil sie im Vergleich zu anderen Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen die größte Deichsellänge aufweisen. Der Sattelzug hat ein Ersatzdeichselmaß von 10,55 m, der 15-m-Bus ein Deichselmaß von 7,75 m (bezogen auf die Mitte zwischen beiden Hinterachsen).

6.3 Testfahrer

Als Testfahrer standen 5 Fahrzeuglenker mit unterschiedlicher Fahrpraxis zur Verfügung:

- ein „Profi“ mit langjähriger Berufserfahrung sowohl als Lkw-Fahrer, als auch als Busfahrer,
- zwei „Semiprofis“, die aufgrund Ihrer regelmäßigen Nebentätigkeit auf eine umfangreiche Fahrpraxis als Busfahrer zurückgreifen können,
- zwei „Laien“ mit der entsprechenden Fahrerlaubnis (CE bzw. Klasse 2 nach alter Erlaubnisklasse), jedoch mit nur geringer Fahrpraxis.

Mit dieser „gemischten“ Auswahl der Fahrzeuglenker wurde versucht, das Fahrerkollektiv des realen Schwerlastverkehrs im täglichen Straßenbetrieb bezüglich Routine und Erfahrung möglichst realistisch zu repräsentieren. Ebenso sollten statistische Verfälschungen durch eine überdurchschnittlich vertretene oder – im Gegensatz dazu – durch eine unterrepräsentierte Routine der Fahrer ausgeschlossen werden. Dabei ist es weniger darauf angekommen, dass die tatsächliche statistische Gesamtheit aller Fahrzeuglenkertypen auf den deutschen

Straßen vertreten ist. Vielmehr sollten möglichst die Extremwerte des theoretischen und dennoch realistischen fahrerischen Könnens beim Durchfahren eines Kreisverkehrs erfasst werden, wobei es aus Termingründen dem Zufall überlassen werden musste, welche Fahrmanöver durch die einzelnen Fahrertypen durchgeführt wurden.

6.4 Messaufbau und -verfahren

Die technische Ausstattung, das Equipment, für die Messung der Schleppkurven mittels GPS bestand aus einem Referenzempfänger des Typs Novatel ProPak II RT-2 sowie 4 GPS-Empfängern vom Typ Leica GPS System SR 530 auf den Fahrzeugen. Sowohl der Referenzempfänger als auch die beweglichen GPS-Empfänger auf den Fahrzeugen sind Zweifrequenzempfänger mit einer Datenerfassungsrate von 2 Hz, d.h. die Position jedes Empfängers wird je Sekunde 2-mal gemessen. Die GPS-Empfänger wurden auf den Wagenkästen der Versuchsfahrzeuge mittels bereits in Vorversuchen bewährter, handelsüblicher Saugnäpfe (ausgerüstet mit Gewindebolzen) befestigt. Diese waren auf dem Bus und dem Sattelzugfahrzeug, sowie auf Rahmenteilen des Sattelaufhängers einfach und stabil zu montieren. Zur Erfassung der Sattelzugfahrten wurden 4 GPS-Empfänger eingesetzt (2 gelenkig miteinander verbundene Wagenkästen). Für die Busfahrten waren 2 GPS-Empfänger notwendig (1 starrer Wagenkasten).

Da es bei kinematischen Vermessungen, bei denen die zu erfassenden Objekte in Bewegung sind, nicht immer zu vermeiden ist, dass der Kontakt zu den Satelliten abreißt (z. B. durch Abschattungen aus Bäumen, Häusern usw.), oder dass Phasensprünge auftreten, muss bei der kontinuierlichen kinematischen Messung und bei der zusätzlich gewünschten Genauigkeit im cm-Bereich die Bestimmung von Mehrdeutigkeiten der Phasenmessung während der Fortbewegung des GPS-Empfängers erfolgen. Die Verfahren dazu werden, wie bereits beschrieben, als OTF (**O**n **T**he **F**ly) oder OTW (**O**n **T**he **W**ay) bezeichnet. Voraussetzung dafür ist, dass der Beobachtungszeitraum von mindestens 5 Satelliten ausreichend lang ist (abhängig von der Anzahl der gemeinsam empfangenen Satellitensignale und der Entfernung zur Referenzstation).

In der Umgebung des Kreisverkehrs Aschheim Nord waren diese Voraussetzungen nicht immer gegeben. Während die Referenzstation noch in exponierter Lage auf einer kleinen Anhöhe in einer Entfernung von einigen hundert Metern positioniert werden konnte, mussten für die Fahrzeug-Empfänger aufgrund des Bewuchses in der Kreisverkehrs-Umgebung Beeinträchtigungen aus Abschattungen in Kauf genommen werden. Dadurch war es später notwendig, einige Messfahrten von der Auswertung auszuschließen; die Aufnahmen der Fahrten waren teilweise schon bei visueller Betrachtung als untauglich zu erkennen. Der überwiegende Anteil (ca. 95%) der aufgenommenen Daten konnte jedoch den gestellten Ansprüchen gerecht werden und diente als Grundlage zur weiteren Bearbeitung.

Die Schleppkurven aus der Fahrzeugbewegung werden durch die Darstellung der zeitlichen Abfolge der Standorte während einer Fahrt für die einzelnen Wagenkästen eines Fahrzeuges beschrieben. Um die Wagenkästen z. B. in einem CAD-Programm darstellen zu können, müssen die (rechteckigen) Grundrisse der Fahrzeuge in der entsprechend richtigen Position und mit dem zugehörigen jeweiligen Lagewinkel bekannt sein. Dazu ist es erforderlich, die aus der GPS-Aufnahme ermittelten Koordinaten der Messpunkte (= Lage der GPS-Empfänger) zunächst auf die Fahrzeugeckpunkte umzurechnen. Aus der Lage der beiden (günstigerweise an diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten auf den Testfahrzeugen montierten) GPS-Empfänger und aus der Kenntnis der Fahrzeuggeometrie können dann die korrespondierenden Fahrzeugecken berechnet werden. Die so ermittelten 4 Fahrzeugecken werden dann jeweils im CAD-Programm z. B. mit geraden Linienzügen zu Wagenkästen verbunden. Dieses Verbinden einzelner Eckpunkte zu einem Rechteck (dem Grundriss des Fahrzeuges) kann automatisiert geschehen. Dazu wurde mit Hilfe der Programmiersprache „LISP“, die in AutoCAD implementiert ist, ein kurzes Computerprogramm verfasst (Programm „Fahren“, vgl. Anlage 7), mit welchem das automatische Einlesen der Fahrzeugeck-Koordinaten und das anschließende Zeichnen der Wagenkästen durchgeführt wurde.

Zur Berechnung der für die Grundrissdarstellung maßgebenden Koordinaten x , y der Fahrzeugeckpunkte müssen die Fahrzeugabmessungen (Länge und Breite) bekannt sein. Als Bedingung müssen je Wagenkasten mindestens 2 GPS-Antennen im fahrzeugfesten System x' , y' eingemessen sein, d. h., der Versatz zwischen GPS-

Empfänger und Fahrzeugecken muss in alle Richtungen bestimmt sein. Der exakte Rechengang wird nachfolgend exemplarisch für ein eingliedriges Fahrzeug beschrieben.

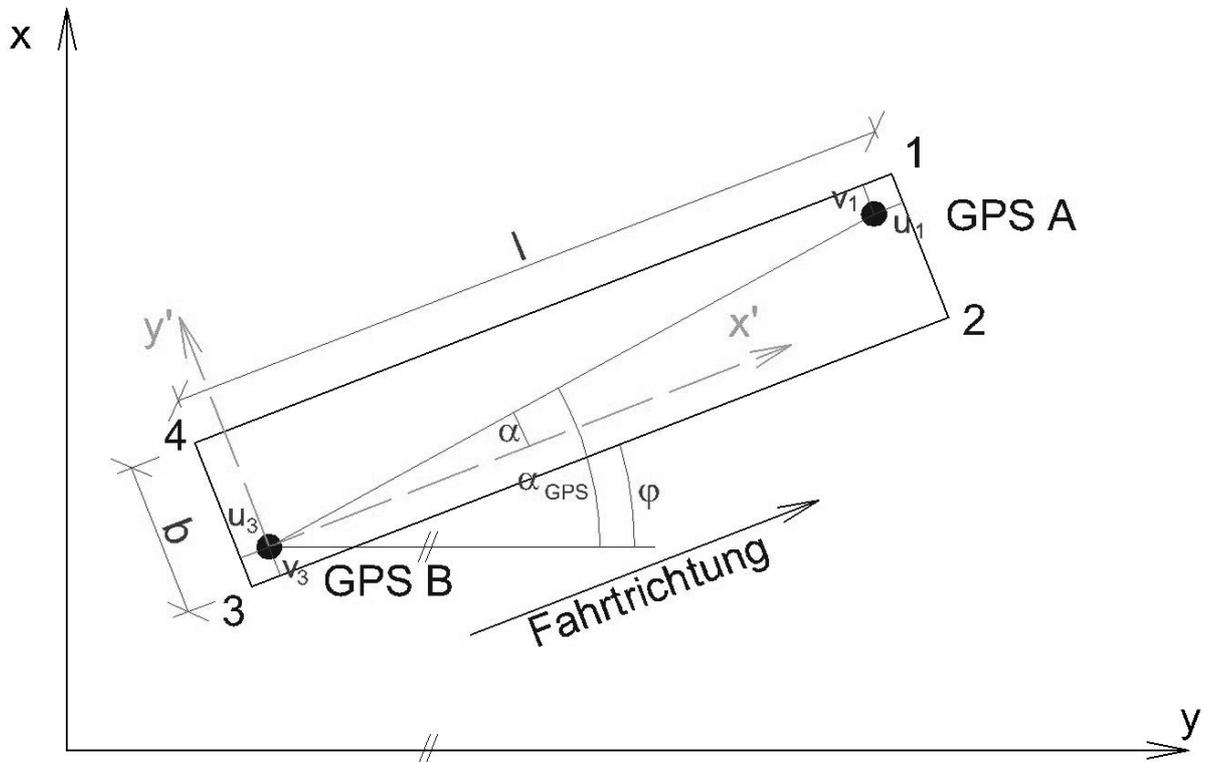


Abbildung 44: Systemskizze für die Berechnung der Fahrzeug-Eckkoordinaten aus GPS-Empfängerkoordinaten

LEGENDE zu Abbildung 44:

1, 2, 3, 4	Fahrzeugeckpunkte
x, y	Globales Koordinatensystem
x', y'	Lokales Koordinatensystem
l	Länge des Fahrzeuges
b	Breite des Fahrzeuges
GPS A, GPS B	Lage der GPS-Antennen auf dem Fahrzeug
v_1, v_3	Versatz der GPS-Antennen zu den seitlichen Fahrzeugkanten
u_1, u_3	Versatz der GPS-Antennen zu den front- und rückseitigen Fahrzeugkante
α	Winkel der Verbindungslinie der GPS-Empfänger auf dem Fahrzeug im lokalen Koordinatensystem
α_{GPS}	Winkel der Verbindungslinie der GPS-Empfänger auf dem Fahrzeug im globalen Koordinatensystem
φ	Winkel des Fahrzeuges im globalen Koordinatensystem

Mit den Eingangsdaten kann der Winkel α ermittelt werden (vgl. [STERNBERG 2000]):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{l - u_3 - u_1}{b - v_3 - v_1}\right) = \arctan\left(\frac{dy'}{dx'}\right) \quad (6.4-1)$$

Falls $dy = 0$, dann gilt

$$\alpha_{GPS} = \frac{\pi}{2} \quad (6.4-2)$$

ansonsten

$$\alpha_{GPS} = \arctan\left(\frac{x_{GPSB} - x_{GPSA}}{y_{GPSB} - y_{GPSA}}\right) = \arctan\left(\frac{dx}{dy}\right) \quad (6.4-3)$$

Die Verdrehungen φ des lokalen (fahrzeugfesten) Koordinatensystems x', y' gegenüber dem globalen (Landes-) Koordinatensystem x, y ergibt sich zu:

$$\varphi = \alpha - \alpha_{GPS} \quad (6.4-4)$$

Die zur Berechnung der Fahrzeugeckpunkte erforderlichen Werte im fahrzeugfesten Koordinatensystem y', x' ergeben sich zu:

$$x_1' = l - u_3 \quad (6.4-5)$$

$$y_1' = b - v_3 \quad (6.4-6)$$

$$x_2' = x_1' \quad (6.4-7)$$

$$y_2' = -v_3 \quad (6.4-8)$$

$$x_3' = -u_3 \quad (6.4-9)$$

$$y_3' = y_2' \quad (6.4-10)$$

$$x_4' = x_3' \quad (6.4-11)$$

$$y_4' = y_1' \quad (6.4-12)$$

Daraus werden die Fahrzeug-Eckpunkte ermittelt. Exemplarisch gilt für Eckpunkt 1:

$$x_{Eck1} = y_{GPSB} + y_1' \cdot \cos \varphi - x_1' \cdot \sin \varphi \quad (6.4-13)$$

$$y_{Eck1} = x_{GPSB} + y_1' \cdot \sin \varphi + x_1' \cdot \cos \varphi \quad (6.4-14)$$

6.5 Versuchsprogramm

Auf den ehemaligen Flugbetriebsflächen der Bundeswehr in Neubiberg (heutiges Gelände der UniBw-München) wurden insgesamt 51 Fahrten mit dem 15-m-Bus und 52 Fahrten mit dem Sattelzug durchgeführt.

Durchgeführt wurden 2 Gruppen von Testfahrten, die „Geradeausfahrten“ (auch als „180°-Fahrt“ bezeichnet) und die „Linksabbiegefahrten“ (Dreiviertelkreis; „270°-Fahrt“). Einfache „Rechtsabbiegefahrten“ („90°-Fahrt“) wurden aus Aufwandsgründen und wegen des fehlenden bzw. nur gering ausgeprägten Gegenlenkens nicht getestet. Für die Bemessung des Kreisverkehrsplatzes ist das Rechtsabbiegen kaum relevant, da normalerweise dabei das Fahrzeug die Fahrbahnränder nicht berührt. Dazu wurden fiktive, auf dem Versuchsfeld aufmarkierte Kreisverkehre mit verschiedenen Innenradien von 5 m bis 9,25 m durchfahren (vgl. **Tabellen 13 bis 16** sowie auch Kapitel 7 „Auswertung“).

Mit Hilfe der GPS-Vermessung sollte der Flächenbedarf ermittelt werden, der sich aus der jeweiligen Fahrt durch den Kreisverkehr (Radien der Mittelinsel zwischen den beiden Extremwerten 5 m und 9,25 m aus [FGSV 1998] (Zwischenschritte in 1-m-Schritten interpoliert) bei „zügiger Fahrt“ und „enger Orientierung“ an der kurveninneren Fahrbahnbegrenzung ergibt.

Von den am realen Kreisverkehr in Aschheim durchgeführten Testgruppen in verschiedene Richtungen (entsprechend in verschiedenen Winkeln) wurden 27 Busfahrten (zuzüglich einer Vollkreisfahrt für Vergleichszwecke; Wendemanöver „U-Turn“) und 22 Sattelzugfahrten durchgeführt. Damit sollte eine Überprüfung der Ergebnisse aus den Testfahrten auf dem ehemaligen Flugplatzgelände erfolgen.

Die Fahrbahngeometrie (reale oder testweise vorgegebene Fahrbahnränder) wurde ebenfalls mittels GPS aufgemessen.

Tabelle 13: Testfahrten mit dem 15-m-Bus auf dem ehem. Flugplatz Neubiberg.

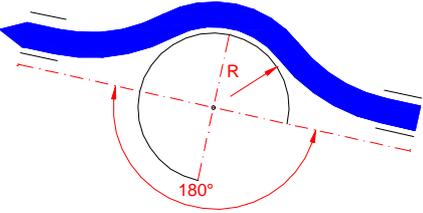
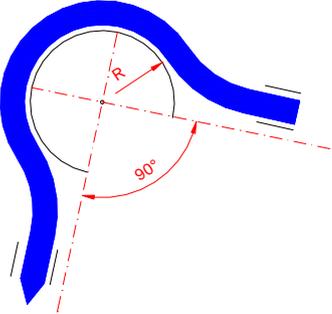
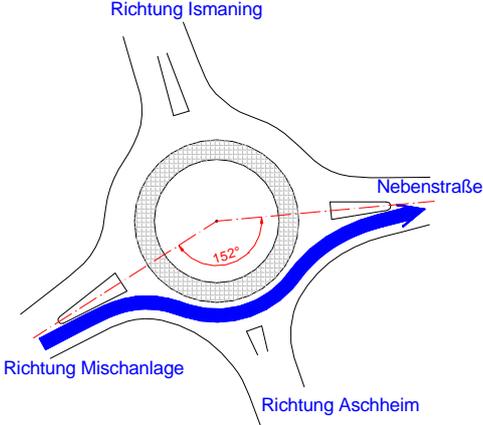
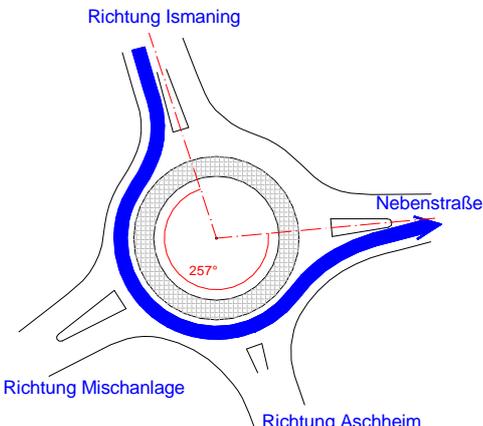
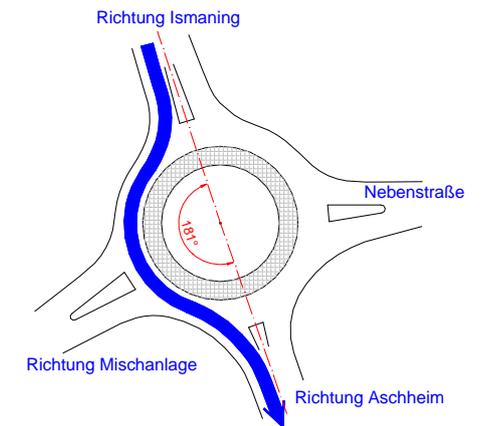
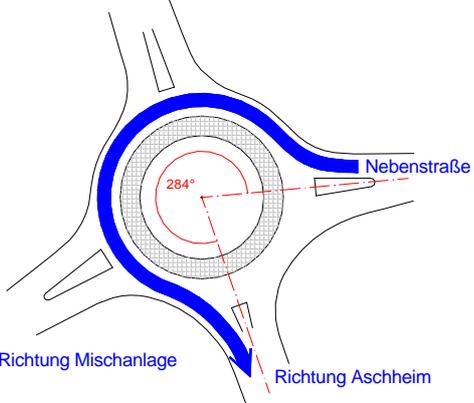
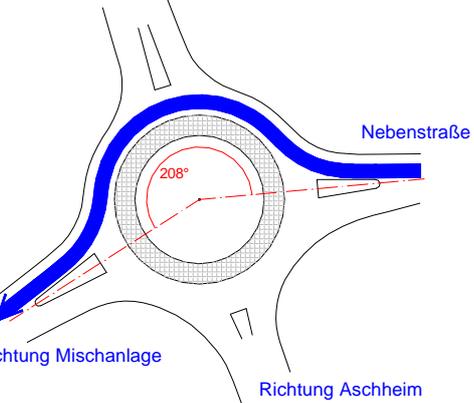
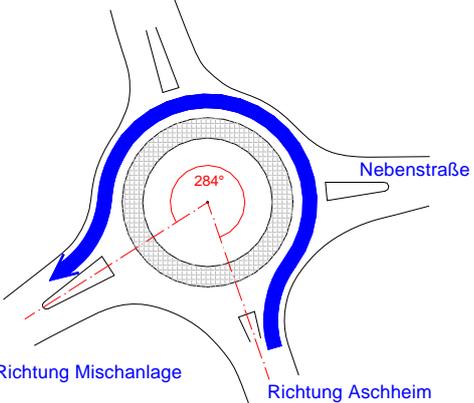
15-m-Bus	
<p>Testgelände auf dem ehem. Flugplatz Neubiberg</p> <p>Fahrer 1: Profi Fahrer 2: Semiprofi Fahrer 3: Laie Fahrer 4: Semiprofi Fahrer 5: Laie</p>	
<p>Fahrten „Geradeaus“ (180°)</p> 	<p>R = 5 m Fahrer 1: 1 Fahrt Fahrer 2: 4 Fahrten</p>
	<p>R = 6 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 2 Fahrten</p>
	<p>R = 7,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 8,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 9,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 4 Fahrten</p>
<p>Fahrten „Linksabbieger“ (270°)</p> 	<p>R = 5 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 6 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 7,25 m Fahrer 2: 4 Fahrten</p>
	<p>R = 8,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 4 Fahrten</p>
	<p>R = 9,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 4 Fahrten</p>

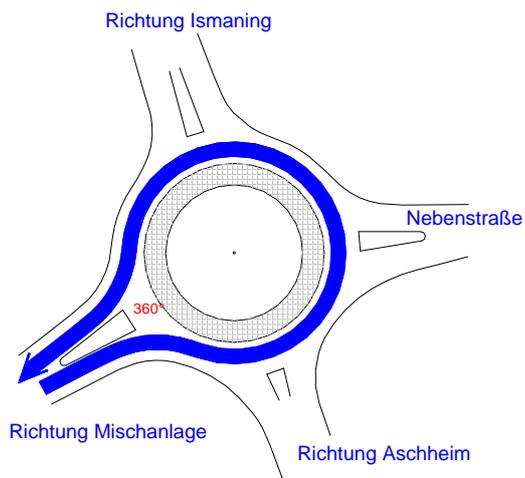
Tabelle 14: Testfahrten mit dem 15-m-Bus am Kreisel „Aschheim Nord“.

15-m-Bus	
<p>Kreisverkehr „Aschheim Nord“</p> <p>Fahrer 1: Profi Fahrer 2: Semiprofi Fahrer 3: Laie Fahrer 4: Semiprofi Fahrer 5: Laie</p>	
<p>Aschheim - Ismaning („Geradeaus“)</p>	<p>Keine brauchbaren Daten erhalten</p>
<p>Asphaltmischanlage/Ismaning („Linksabbieger“)</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt Fahrer 3: 1 Fahrt</p>

<p>Asphaltmischanlage/Nebenstraße („Geradeaus“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>152°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>1 Fahrer: 1 Fahrt</p>
<p>Ismaning/Nebenstraße („Linksabbieger“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>257°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 1 Fahrt Fahrer 2: 3 Fahrten Fahrer 3: 1 Fahrt</p>
<p>Ismaning/Aschheim („Geradeaus“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>181°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt</p>

<p>Nebenstraße/Aschheim („Linksabbieger“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p> <p>Nebenstraße</p> <p>284°</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt Fahrer 3: 1 Fahrt</p>
<p>Nebenstraße/Asphaltmischanlage („Geradeaus“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p> <p>Nebenstraße</p> <p>208°</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt</p>
<p>Aschheim/Asphaltmischanlage („Linksabbieger“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p> <p>Nebenstraße</p> <p>284°</p>	<p>Fahrer 1: 1 Fahrt Fahrer 2: 1 Fahrt Fahrer 3: 1 Fahrt</p>

Wendemanöver „U-Turn“



Fahrer 1: 1 Fahrt

(nur zu Vergleichszwecken)

Tabelle 15: Testfahrten mit dem Sattelzug auf dem ehem. Flugplatz Neubiberg.

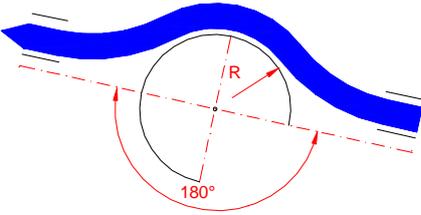
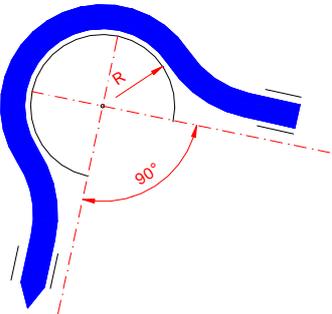
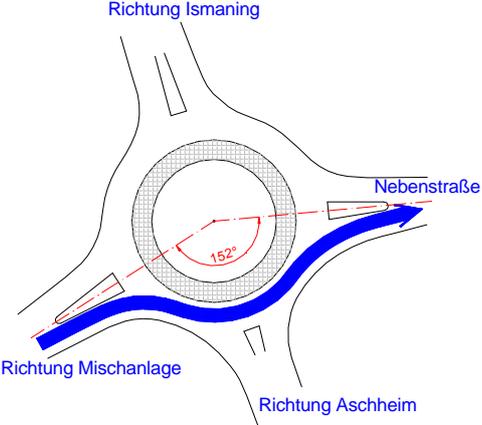
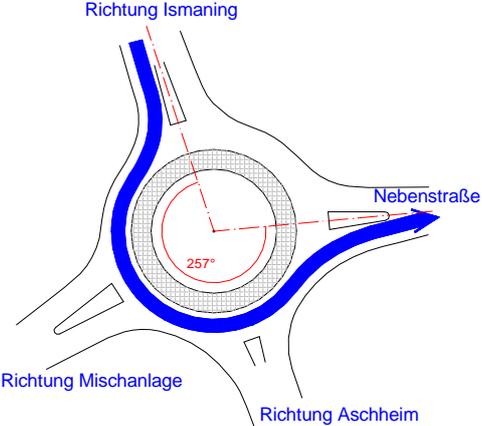
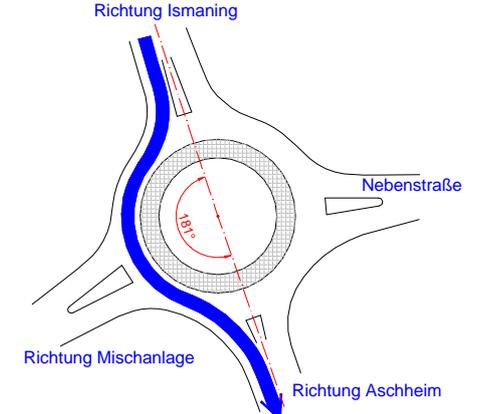
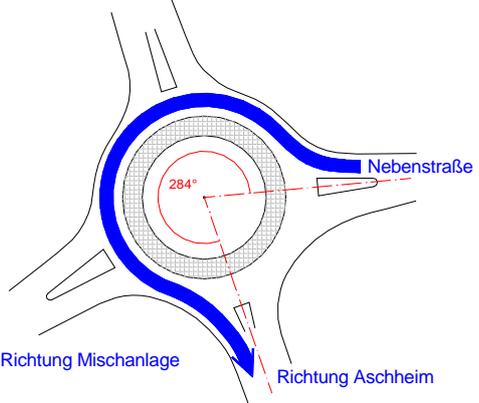
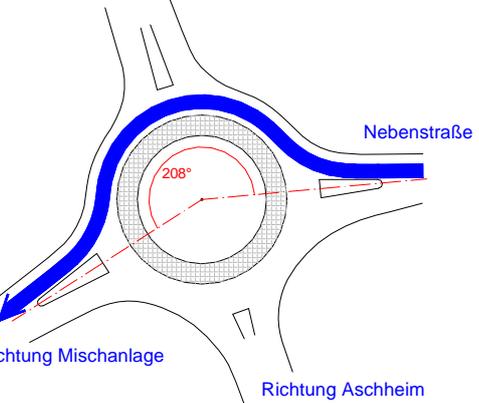
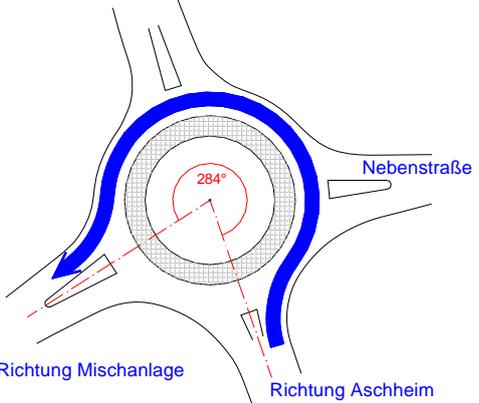
Sattelzug	
<p>Testgelände auf dem ehem. Flugplatz Neubiberg</p> <p>Fahrer 1: Profi Fahrer 2: Semiprofi Fahrer 3: Laie Fahrer 4: Semiprofi Fahrer 5: Laie</p>	
<p>Fahrten „Geradeaus“ (180°)</p> 	<p>R = 5 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 4 Fahrten</p>
	<p>R = 6 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 7,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 8,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 9,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
<p>Fahrten „Linksabbieger“ (270°)</p> 	<p>R = 5 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 4 Fahrten</p>
	<p>R = 6 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 7,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 8,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>
	<p>R = 9,25 m Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 4: 3 Fahrten</p>

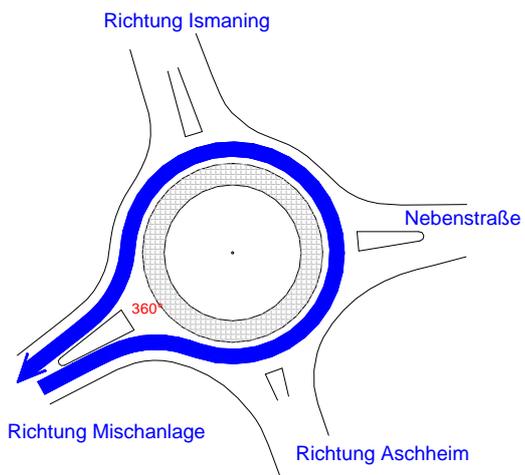
Tabelle 16: Testfahrten mit dem Sattelzug am Kreisverkehr „Aschheim Nord“.

Sattelzug	
<p>Kreisverkehr „Aschheim Nord“</p> <p>Fahrer 1: Profi Fahrer 2: Semiprofi Fahrer 3: Laie Fahrer 4: Semiprofi Fahrer 5: Laie</p>	
<p>Aschheim/Ismaning („Geradeaus“)</p>	<p>Keine brauchbaren Daten erhalten</p>
<p>Asphaltmischanlage/Ismaning („Linksabbieger“)</p>	<p>Mit dem Sattelzug nicht durchgeführt</p>

<p>Asphaltmischanlage/Nebenstraße („Geradeaus“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>152°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Mit dem Sattelzug nicht durchgeführt</p>
<p>Ismaning/Nebenstraße („Linksabbieger“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>257°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt Fahrer 3: 1 Fahrt Fahrer 5: 1 Fahrt</p>
<p>Ismaning/Aschheim („Geradeaus“)</p>  <p>Richtung Ismaning</p> <p>Nebenstraße</p> <p>181°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 2 Fahrten Fahrer 2: 1 Fahrt Fahrer 5: 2 Fahrten</p>

<p>Nebenstraße/Aschheim („Linksabbieger“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Nebenstraße</p> <p>284°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 1 Fahrt</p>
<p>Nebenstraße/Asphaltmischanlage („Geradeaus“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Nebenstraße</p> <p>208°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 2 Fahrten</p> <p>Fahrer 2: 1 Fahrt</p> <p>Fahrer 3: 1 Fahrt</p>
<p>Aschheim/Asphaltmischanlage („Linksabbieger“)</p> <p>Richtung Ismaning</p>  <p>Nebenstraße</p> <p>284°</p> <p>Richtung Mischanlage</p> <p>Richtung Aschheim</p>	<p>Fahrer 1: 3 Fahrten</p> <p>Fahrer 2: 1 Fahrt</p> <p>Fahrer 3: 1 Fahrt</p> <p>Fahrer 5: 1 Fahrt</p>

Wendemanöver „U-Turn“



Mit dem Sattelzug nicht durchgeführt

7. Auswertung

7.1 Verfahren

Die Entwurfselemente eines Kreisverkehrsplatzes:

- Fahrstreifenbreite im Einfahrquerschnitt,
- Fahrstreifenbreite im Ausfahrquerschnitt,
- Ausrundungsradius in der Knotenpunktzufahrt,
- Ausrundungsradius in der Knotenpunktausfahrt,
- Außendurchmesser der Kreisfahrbahn und
- Breite der Kreisfahrbahn

sind unmittelbar voneinander abhängig. Das heißt, dass durch eine Änderung einzelner Entwurfselemente gleichzeitig ein Einfluss auf andere Entwurfselemente ausgeübt wird. Eine geringere Breite der Kreisfahrbahn hat beispielsweise zur Folge, dass – unter sonst gleichen Bedingungen – größere Ausrundungsradien in Zu- und Ausfahrt des Kreisverkehrs erforderlich werden (immer unter der Voraussetzung, dass die Befahrbarkeit für ein bestimmtes Bemessungsfahrzeug erhalten bleiben soll). Umgekehrt sind dagegen bei breiterer Kreisfahrbahn kleinere Ausrundungsradien der Zu- und Ausfahrten ausreichend. In welchen Grenzen diese Variationen durchführbar sind und ggf. welchen Gesetzmäßigkeiten sie in der Praxis folgen, sollte mit den durchgeführten Versuchsfahrten ermittelt werden.

Als Minimalvorgabe zur Durchführung der Testfahrten wurden dazu auf dem ehemaligen Flugplatzgelände in Neubiberg Kreisverkehrssituationen in Form folgender Fahrstreifenbegrenzungen fiktiver Kreisverkehrsdurchfahrten vorgegeben:

- linke und rechte Fahrbahnbegrenzung im Einfahrquerschnitt,
- innere Fahrbahnbegrenzung der Kreisverkehrs-Mittelinsel (gleichbedeutend mit der linken Fahrbahnbegrenzung der Kreisfahrbahn),
- linke und rechte Fahrbahnbegrenzung im Ausfahrquerschnitt.

Die Fahrbahnbegrenzungen wurden mit Markierungsfarbe aufgesprüht. Zur Begrenzung der Mittelinsel dienten zusätzlich Holzklötze (würfelförmig, Kantenlänge ca. 12 cm). Damit sollte eine Randbefestigung wie z. B. ein „Graniteinzeiler“ (Hochbord) simuliert werden (vgl. **Abbildung 45**).



Abbildung 45: Markierungen auf dem Versuchsgelände mit Farbe und Holzklötzen

Die Fahrstreifenbegrenzungen von Kreisringzufahrt und der Ausfahrt wurden radial zum Kreismittelpunkt angelegt (idealisierter Kreisverkehrsplatz mit einem Ein- und Ausfahrtwinkel von jeweils 90°), wobei der linke Fahrbahnrand von der Kreisverkehrsachse um 1 m versetzt ist (2 m Treninselbreite in Ein- und Ausfahrtbereich).

Die Radien des Mittelkreises (innere Radien der Kreisfahrbahn) wurden mit 5 m, 6 m, 7,25 m, 8,25 m und 9,25 m vorgegeben, was den Grenzwerten gem. [FGSV 1998] für Kreisverkehre innerorts entspricht. Der nach [FGSV 1998] kleinste Außendurchmesser von 26 m in Verbindung mit der zugehörigen Fahrbahnbreite von 8 m ergibt einen Innenradius der Mittelinsel von 5 m, der 32-m-Außendurchmesser in Verbindung mit der zugehörigen Fahrbahnbreite von 6,72 m hat einen Innenradius

von 9,25 m zur Folge; Zwischenwerte wurden – ausgehend von den beschriebenen Grenzwerten – in 1-m-Schritten interpoliert (vgl. **Abbildung 46**).

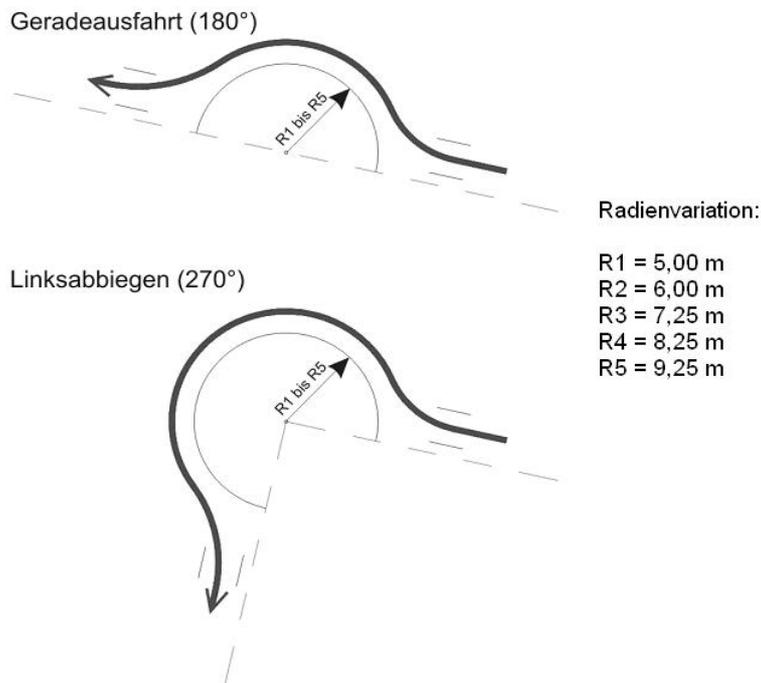


Abbildung 46: Testprogramm „Geradausfahrt“ und „Linksabbiegen“ auf dem Versuchsgelände mit entsprechender Variation der Mittelinselradien

Den insgesamt 5 Fahrzeugführern (vgl. Kap. 6.3) wurde in ausführlicher Instruktion vorgegeben, die aufgezeichneten und mit hölzernen Randsteinattrappen simulierten Kreisverkehrssituationen möglichst platzsparend, dabei aber zügig zu durchfahren. Die Auslegung der Begriffe „platzsparend“ und „zügig“ wurde dabei bewusst den Testfahrern selbst überlassen. Die Fahrer haben die Anweisung „platzsparend“ so verstanden, dass sie die Fahrzeuge möglichst eng an der vorgegebenen Mittelinselbegrenzung entlang steuerten. Zügiges Fahren wurde als Fahren möglichst ohne ruckartige Bewegung und ohne Stillstand des Fahrzeuges, trotzdem aber nicht als schnelle Fahrt interpretiert. Die enge Orientierung der Fahrten entlang der Mittelinsel ist beispielhaft in **Abbildung 47** dargestellt.

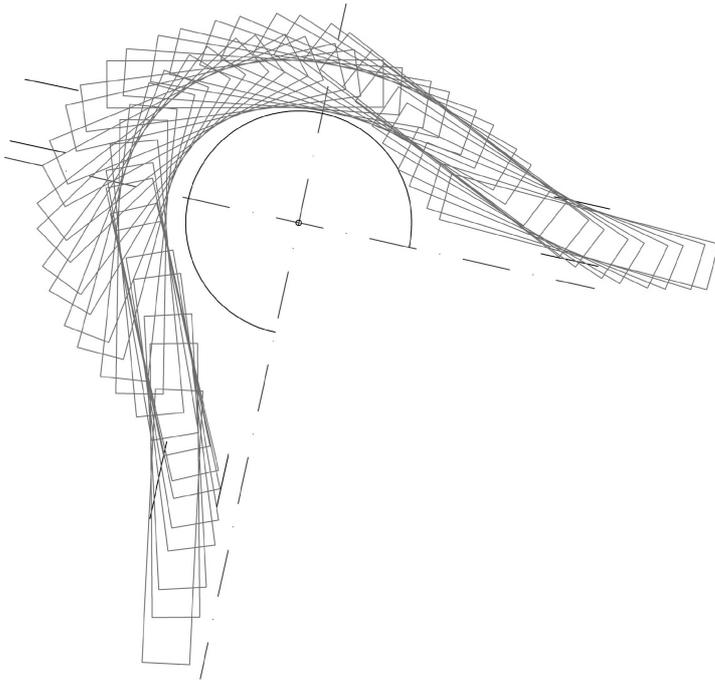


Abbildung 47: Beispiel einer ausgewerteten Testfahrt mit einem Omnibus: deutlich erkennbar ist die enge Orientierung an den inneren Fahrbahnbegrenzungen

Die mit dem GPS-Messverfahren in bestimmten Zeitintervallen ermittelten Antennenpositionen der Testfahrzeuge wurden mit geometrischen Berechnungen in die Eckpunkte der Fahrzeugkästen (4 Ecken beim eingliedrigen Bus, 8 Ecken beim Sattelzug) umgerechnet. Die daraus resultierende Punktliste ermittelter Koordinaten der Fahrzeugeckpunkte konnte anschließend in das CAD-Konstruktionsprogramm eingelesen und durch Darstellung von Verbindungslinien zwischen den einzelnen Fahrzeugeckpunkten als Wagenkasten-Grundrisse dargestellt werden. Jeder einzelnen dargestellte Fahrzeuggrundriss stellt innerhalb des gesamten Bewegungsablaufes eine „Momentaufnahme“ zum jeweiligen Messzeitpunkt dar. Die Abfolge aller einzelnen dargestellten Fahrzeuggrundrisse zeigt den Bewegungsablauf der gesamten gemessenen Fahrt, aufgelöst in Einzelschritte, in der erforderlichen Darstellungsgenauigkeit.

Als Auswertesoftware diente das (gebräuchliche und weitverbreitete) CAD-System AutoCAD der Firma Autodesk. Hilfreich für die Versuchsauswertung ist bei diesem Programmsystem eine eigenständige, integrierte Programmier Ebene (Programmiersprache LISP), mit der sich das Einlesen von Punktkoordinaten sowie die

Fahrzeugdarstellung (also das Verbinden der Einzelpunkte zu Fahrzeugkästen) automatisieren lässt.

Bewegt sich ein Fahrzeug in einer gleichsinnigen Kurvenfahrt ausschließlich z. B. entgegen dem Uhrzeigersinn (Linkskurve), so beschreibt bei eingliedrigen Fahrzeugen (z. B. 15-m-Bus) die vordere rechte Fahrzeugecke die Einhüllende am konvexen Schleppkurvenrand; allgemeiner formuliert ergibt sich die Außenkurve der Schleppkurvenfläche als Einhüllende der Trajektorien (Bewegungslinien) aller auf der Kurvenaußenseite liegenden Fahrzeugeckpunkte [WIRTH 2001-1]. Die Einhüllende am konkaven Rand wird dagegen durch ihre Tangenten – d. h. durch die Momentanbilder der Fahrzeugkanten – beschrieben.

Bei mehrgliedrigen Fahrzeugen (z. B. bei einem Sattelzugfahrzeug oder einem Lkw-Zug) ist die Form der Schleppkurve auch noch von der Geometrie der nachgeschleppten bzw. gezogenen Fahrzeugteile (beispielsweise der Nachläufer beim Gelenkbus, der Auflieger beim Sattelzug, oder der Anhänger beim Lkw-Zug) abhängig.

Die im CAD-Programm dargestellten Fahrzeug-Grundrisse jeder Momentanposition des Fahrzeugs in der durch Messfrequenz und Fahrgeschwindigkeit vorgegebenen Dichte bilden die Grundlage für weitere Auswerteschritte, bei denen die erforderlichen Maße für den Außendurchmesser der Kreisfahrbahn sowie für die Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt und der Knotenpunktausfahrt abgeleitet werden (vgl. **Abbildung 47**).

Zur Ermittlung des Ringfahrbahn-Außendurchmessers wurde zunächst ein Kreis um den (bekannten) Kreisverkehrsmittelpunkt geschlagen, dessen Radius durch den Abstand Mittelpunkt – maßgebender Fahrzeugeckpunkt festgelegt ist. Der maßgebende Fahrzeugeckpunkt ist dabei derjenige Punkt, der während der Kreisfahrt die größte Entfernung zum Kreismittelpunkt aufweist. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass eine echte Kreisfahrt (also eine Fahrt mit konstantem Radius um den Kreisverkehrsmittelpunkt) in der Realität nicht oder nur auf einem sehr kurzen Teilstück der gesamten Fahrt auf der Ringfahrbahn stattfindet. Für eine eindeutige

Unterteilung der Fahrt in die Abschnitte Einfahrt – Kreisfahrt - Ausfahrt ist es deshalb erforderlich, die genannten Abschnitte per Definition festzulegen.

Die Test-Kreisverkehre auf dem Versuchsfeld Neubiberg wurden entsprechend einem 4-armigen Kreisverkehr mit einem Kreuzungswinkel von 90° angelegt, weil dies den üblichen Praxisfall darstellt. Damit kann mit einer für baupraktische Zwecke hinreichenden Ergebnisgenauigkeit angenommen werden, dass sich der Bereich der stationären Kreisfahrt innerhalb zweier Hilfsstrahlen befindet, die durch einen Winkel von 45° nach der Knotenpunktzufahrt und 45° vor der Knotenpunktausfahrt (jeweils bezogen auf die Fahrbahnachse) definiert sind (vgl. **Abbildung 48**).

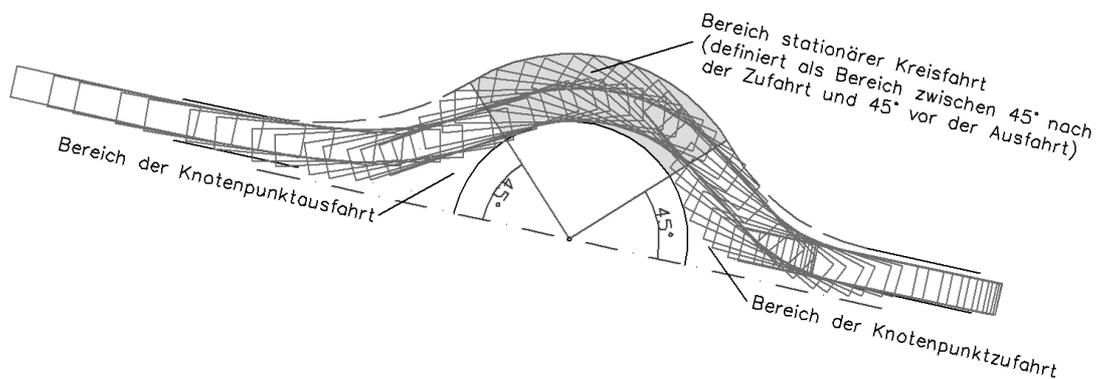


Abbildung 48: Bereich der Kreisfahrt per Definition zur Bestimmung der erforderlichen Kreisfahrbahnbreite am Beispiel „Geradeausdurchfahrt“

Die Ausrundungsradien von Knotenpunktzufahrt und Knotenpunktausfahrt wurden anschließend über eine im CAD-Programm vorhandene Ausrundungsfunktion konstruiert (im Programm AutoCAD die Funktion „Abrunden“, mit der 2 Zeichenobjekte - z. B. Geraden - durch einen Kreisbogen mit festgelegtem Radius dergestalt verbunden werden, dass diese tangential an den Kreisbogen anschließen). Dazu wurde im Einfahrtquerschnitt bzw. im Ausfahrtquerschnitt der rechte Fahrbahnrand als Parallele zum (auf dem Testgelände vorgegebenen) inneren Rand der Fahrbahn konstruiert. Die Abstände der Parallelen wurden nach den Vorgaben aus [FGSV 1998] (Breite der Knotenpunktzufahrt 3,25 m – 3,50 m; Breite der Knotenpunktausfahrt 3,50 m – 3,75 m; für Kreisverkehrsplätze innerhalb bebauter Gebiete) gewählt.

Auf der Basis der so ermittelten (gefahrenen) Außendurchmesser der Kreisfahrbahn wurden anschließend die Ausrundungsradien von Zu- und Ausfahrt iterativ dem Minimum so angenähert, dass sich die Fahrzeugbegrenzungen noch innerhalb der konstruierten Fahrbahnränder befanden (vgl. **Abbildung 49**). Entsprechend den handelsüblichen Radien für Randeinfassungen (Bordsteine) wurden Iterationsschritte von jeweils 1 m gewählt.

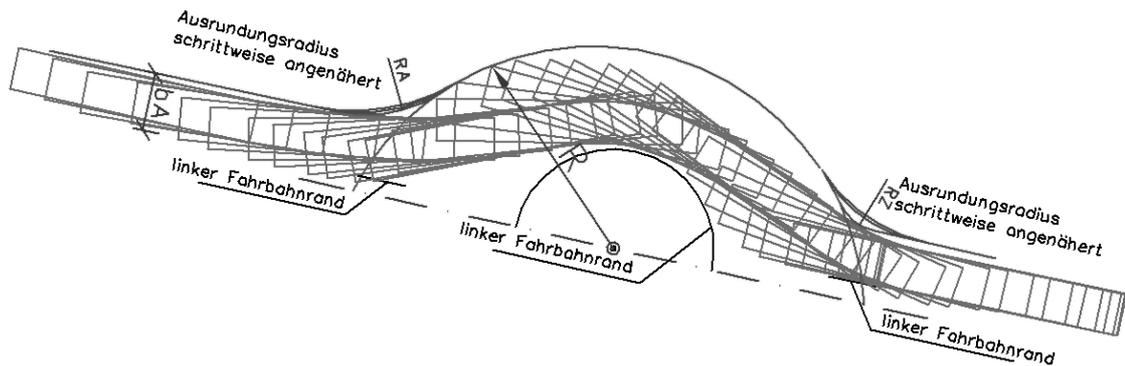


Abbildung 49: Ermittlung der Kreisverkehrselemente (Außendurchmesser der Kreisfahrbahn, Ausrundungsradien in Knotenpunktzu- und -ausfahrt)

Die so ermittelten einzelnen Entwurfselemente

- Ausrundungsradius in der Knotenpunktzufahrt bei einer Fahrstreifenbreite des Einfahrquerschnittes von 3,25 m,
- Ausrundungsradius in der Knotenpunktzufahrt bei einer Fahrstreifenbreite des Einfahrquerschnittes von 3,50 m,
- Außendurchmesser der Kreisfahrbahn (und der daraus errechneten Fahrbahnbreite),
- Ausrundungsradius in der Knotenpunktausfahrt bei einer Fahrstreifenbreite des Ausfahrquerschnittes von 3,50 m und
- Ausrundungsradius in der Knotenpunktausfahrt bei einer Fahrstreifenbreite des Ausfahrquerschnittes von 3,75 m

konnten abschließend

- für alle, im Zuge der Testfahrten durchfahrenen Mittelinselradien,
- für alle Fahrzeugführer,

- für die beiden Testfahrzeuge Bus und Sattelzug sowie
- für die im Kreisverkehr durchfahrenen Winkel (180° „Geradeausfahrt“, 270° „Linksabbiegen“)

tabellarisch zusammengefasst und bewertet werden (vgl. **Abbildung 50** und Anlage 10).

	Innenradius	Breite d. Kreisfahrbahn B		Rz (bz=3,25m)		Rz (bz=3,50m)		RA (bA=3,50m)		RA (bA=3,75m)		
		Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	
durchfahrener Winkel	7,25m	180°	6,15	6,42	7,00	10,00	6,00	9,00	19,00	11,00	18,00	8,00
			5,92	6,13	10,00	11,00	9,00	10,00	12,00	14,00	8,00	10,00
			5,55	5,87	27,00	14,00	26,00	12,00	11,00	15,00	7,00	12,00
			5,71	6,03	17,00	9,00	15,00	8,00	13,00	16,00	9,00	12,00
			5,38	6,44	26,00	8,00	24,00	6,00	16,00	20,00	14,00	15,00
	270°	7,03	7,65	5,00	6,00	4,00	4,00	8,00	11,00	5,00	8,00	
		6,87	6,52	6,00	10,00	4,00	8,00	8,00	17,00	5,00	16,00	
		7,24	7,21	5,00	7,00	1,00	5,00	8,00	12,00	5,00	9,00	
		6,68	7,11	5,00	6,00	4,00	5,00	9,00	13,00	6,00	11,00	
		-	7,42	-	5,00	-	3,00	-	7,00	-	5,00	

Abbildung 50: Auswerteergebnisse für Testfahrten mit Bus und Sattelzug durch einen Kreisverkehr mit Innenradius 7,25 m (Beispiel)

7.2 Ergebnisse

7.2.1 Breite der Kreisfahrbahn

7.2.1.1 Vergleich zwischen ermitteltem Breitenbedarf und der Breite gem. FGSV-Merkblatt [FGSV 1998]

Mit lediglich einer Ausnahme (Innenradius 10 m) benötigte der Sattelzug in sämtlichen Kreisdurchfahrten eine größere Kreisfahrbahnbreite als der Bus. Damit kann der Sattelzug auch empirisch als das maßgebende Bemessungsfahrzeug im direkten Vergleich mit dem getesteten Bus betrachtet werden, was von den Testfahrern im Vorfeld der Untersuchungen nach subjektiver Einschätzung bereits erwartet wurde.

Für die Breite der Kreisfahrbahn ist die 270°-Kreisdurchfahrt („Linksabbiegen“) maßgebend; für die 180°-Fahrt (Geradeausfahrt) genügen kleinere Fahrbahnbreiten (vgl. Beispiel in **Abbildung 50**). Die Auswertungen hatten außerdem zum Ergebnis,

dass - je nach Testreihe - zu einem Anteil von etwa 20 - 40 % der durchgeführten Testfahrten größere Fahrbahnbreiten im Kreisel in Anspruch genommen werden mussten, als diese im Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] vorgesehen sind (siehe **Tabelle 17**).

Tabelle 17: Anteil der Testfahrten, für welche die gem. [FGSV 1998] vorgegebenen Breiten ausreichend waren (270°, Bus und Sattelzug)

1	2	3	4	5	6
Außendurchmesser (Werte in Klammern sind aus Mittelinsel und Kreisfahrbahn errechnet, aber nicht Bestandteil des FGSV-Merkblatts für Kleine Kreisverkehre)	Breite der Kreisfahrbahn (nach Vorgabe aus dem FGSV- Merkblatt; Werte in Klammern sind interpoliert und aufgerundet)	Radius der Mittelinsel gem. FGSV-Merkblatt (rechnerisch aus Spalten 1 und 2 ermittelt)	Radius der Mittelinsel (auf dem Versuchsfeld vorgegeben)	BUS Anteil der Testfahrten (in Prozent), für welche die Vorgaben nach Merkblatt FGSV 242 ausreichend waren	SATTELZUG Anteil der Testfahrten (in Prozent), für welche die Vorgaben nach Merkblatt ausreichend waren
26 m	8,00 m	5,00 m	5,00 m	60 %	67 %
(27,5 m)	(8,00 m)	5,75 m	6,00 m	83 %	60 %
28 m	7,50 m	6,50 m	6,50 m	keine Testfahrten durchgeführt	
(29 m)	(7,25 m)	7,25 m	7,25 m	100 %	80 %
30 m	7,00 m	8,00 m	8,00 m	keine Testfahrten durchgeführt	
(30,5 m)	(7,00 m)	8,25 m	8,25 m	100 %	80 %
32 m	6,75 m	9,25 m	9,25 m	100 %	60 %
fett gedruckt: maßgeblicher Anteil der jeweiligen Testreihe					

In der ersten Spalte der **Tabelle 17** sind die Außendurchmesser gem. [FGSV 1998] angegeben, in Spalte 2 befinden sich die zugehörigen Breiten der Kreisfahrbahn (Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998], Tab. 1). In Spalte 4 sind die daraus errechneten Radien der Mittelinsel angegeben, die auf dem Versuchsfeld (mit 2 Ausnahmen) aufgezeichnet und gefahren wurden. Zwischenwerte, welche in [FGSV 1998] nicht enthalten sind, aber Bestandteil der Testfahrten waren, wurden linear interpoliert und auf volle 0,25 m aufgerundet. Für den 15-m-Bus ist festzustellen, dass die Fahrbahnbreiten gem. [FGSV 1998] bei Innenradien von 7,25 m und größer, für alle Versuchsfahrten dieser Testreihen ausreichend sind (also bei einem rechnerischen Außendurchmesser ab 29 m).

Bei den Sattelzugfahrten konnten dagegen bei keiner der vorgegebenen Mittelinsel-Größen sämtliche Testfahrten innerhalb der Merkblatt-Werte abgewickelt werden (d. h., eine 100-%-Deckung wurde nicht erreicht). Maximal für 80 % der durchgeführten Testfahrten waren die Breiten gem. Merkblatt [FGSV 1998] ausreichend. Bei den kleineren Kreisverkehrsplätzen mit einem Außendurchmesser von 26 m bzw. 28 m sind die Merkblatt-Angaben für beide Testfahrzeuge (Bus und Sattelzug) unzureichend; bei einem Innenradius von 6 m kommen 83 % der Busfahrten und 60 % der Sattelzugfahrten mit der „Merkblatt-Geometrie“ aus. Der (nach Merkblatt [FGSV 1998]) kleinste Kreisverkehr mit einem Außendurchmesser von 26 m (Breite der Kreisfahrbahn: 8 m) gewährleistet bei beiden Fahrzeugen nur in etwa 2/3 der Fälle eine uneingeschränkte Befahrbarkeit (Bus 60 %, Sattelzug 67 %).

Als Ergebnis ist festzuhalten: Die im Rahmen der Testfahrten ermittelten Werte ergaben, dass für mindestens ein Fünftel aller Sattelzugfahrten größere Fahrbahnbreiten benötigt werden, als sie gem. Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] vorgesehen sind. Die kleineren Kreisverkehre mit Außendurchmessern von 26 m und 28 m sind demnach für nahezu die Hälfte der Fahrten unzureichend bemessen. Wie nach dem o. g. Ergebnis nicht anders zu erwarten, liefern die Testfahrten mit dem 15-m-Bus gegenüber dem Sattelzug etwas günstigere Werte. Aus **Tabelle 17** ist ersichtlich, dass die Breite der Kreisfahrbahn gem. [FGSV 1998] nicht ausreicht, um die Befahrbarkeit für beide Testfahrzeuge zu 100 % sicherzustellen.

7.2.1.2 Erforderliche Fahrbahnbreite - Planungshilfe

In einem weiteren Auswertungsschritt wurde untersucht, welche Fahrbahnbreiten – abhängig von der Größe der Mittelinsel – notwendig sind, um einem gewünschten, vorab bestimmten Anteil der Versuchsfahrten zu genügen. Dem Ansatz liegt die Überlegung zugrunde, dass es nicht möglich ist, die Grundrisselemente in der Straßenplanung (hier speziell diejenigen des Kreisverkehrs) so auszulegen, dass die Geometrie des Straßenraumes allen potenziell möglichen Fahrweisen genügt. Dem planenden Ingenieur, dem Straßenbaulastträger, den politischen Entscheidungsträgern, kurz den an der Straßenplanung und dem Straßenbau

Beteiligten, kann aber mit den damit gewonnenen Erkenntnissen eine Entscheidungshilfe an die Hand gegeben werden.

Im Gegensatz zu 7.2.1.1, wo untersucht wurde, inwiefern die Angaben aus dem Merkblatt [FGSV 1998] den empirischen Fahrten der Testreihe genügen (statistischer „Befahrbarkeitsanteil“), soll an dieser Stelle der umgekehrte Weg eingeschlagen werden.

Das heißt, es wird der statistische Anteil derjenigen Fahrten festgelegt, für den eine Kreisverkehrsfahrt problemlos gegeben sein soll. Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse wird also die für eine ausreichende Befahrbarkeit erforderliche Fahrbahnbreite ermittelt, wobei der Begriff „ausreichend“ in dem Fall durch eine statistische Aussage (z. B.: „Die Befahrbarkeit soll für 90% aller Fahrten gewährleistet sein“) konkretisiert wird.

Aus den Fahrversuchen ist bekannt, für welchen Anteil die jeweilige Fahrbahnbreite gem. Merkblatt [FGSV 1998] ausreichend ist. Diese Größe wird im Folgenden als Befahrbarkeitsindex bezeichnet. Sie kann als Entscheidungsgrundlage dafür herangezogen werden, ob mit einer gewählten Kreisfahrbahn-Breite ein bestimmter Fahrkomfort für Großfahrzeuge (problemlose Befahrbarkeit) erreicht werden kann.

An dieser Stelle sei ein Querverweis auf die in den Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen EAE 85/95 [FGSV 1995] enthaltene Überprüfung bzw. Festlegung des maßgeblichen Begegnungsfalles angemerkt, wo ebenfalls eine Abwägung zwischen einer hinnehmbaren Behinderung und einer festzulegenden Fahrbahn- bzw. Fahrgassenbreite im Straßenquerschnitt stattfindet. Beim Kreisverkehr ist die Situation aber kritischer als beim Begegnungsfall in Erschließungsstraßen gem. EAE, weil bei 1-streifigen Kreisfahrbahnen ein Gegenverkehrsfahstreifen als Ausweichmöglichkeit nicht zur Verfügung steht. Es bleibt dann nur noch das Ausweichen auf Bankett, Geh- oder Radweg oder auf die Mittelinsel.

Ein Beispiel: Aus ökonomischen Gründen oder aufgrund örtlicher, nicht veränderbarer Randbedingungen kann eine hundertprozentige Befahrbarkeit für alle

möglichen Kreisverkehrsdurchfahrten des Schwerlastverkehrs nicht erreicht werden. Verkehrspolitischer Wille ist jedoch, auf der Grundlage einer gegebenen Verkehrsbelastung sicherzustellen, dass die gewählte Fahrbahnbreite für mind. 85 % aller Linksabbiegefahrten von Schwerverkehrsfahrzeugen ausreichen soll („Geradeaus-Durchfahrten“ benötigen den Testergebnissen nach geringere Fahrbahnbreiten). Für die nach der Theorie verbleibenden 15 % der Fahrten werden langsamere Fahrvorgänge, z. B. in Schrittgeschwindigkeit akzeptiert.

Um eine derartige Fragestellung beantworten zu können, muss eine Betrachtung dahingehend angestellt werden, welche Fahrbahnbreite (und welcher dazu korrespondierende Innenradius) erforderlich ist, um einen bestimmten Befahrbarkeitsindex zu erreichen. Diejenige Fahrbahnbreite, die als größte notwendige Fahrbahnbreite innerhalb einer Testreihe ermittelt wurde, wird dazu als 100-%-Wert angesetzt. Im Sinne der Planungspraxis wird diese ermittelte Breite auf ganzzahlige Vielfache von 0,50 m aufgerundet. Für diese Maximalbreite und für alle Breiten darunter (in 0,50-m-Schritten) werden die zugehörigen Befahrbarkeitsindizes ermittelt.

Als unterer Grenzwert wurde ein Befahrbarkeitsindex von 50 % zugrundegelegt. Eine geringere Qualität ist in der Praxis nicht akzeptabel, weil dann die gewählten Kreisverkehrsabmessungen den verkehrlichen Anforderungen nicht genügen. Die Einzelergebnisse dieser Untersuchung sind **Tabelle 18** zu entnehmen.

Wie sich zeigt, sind bei einem Innenradius von 5 m die Busfahrten maßgebend. Für Innenradien von 6 m und darüber ist der Sattelzug das maßgebende Bemessungsfahrzeug. Mit einem Innenradius von 5 m und einer Breite von 9,00 m kann gem. den Testergebnissen ein Index von 100-% angesetzt werden, was jedoch nicht zu der Annahme führen soll, dass es keine „Ausreißer“ (z. B. bedingt durch Fahrfehler) geben kann.

Die nächstkleinere, im Halbmeterschritt ermittelte Breite von 8,50 m (bei einem Innenradius von 5 m) ist für 80 % der Busfahrten und für 100 % der Fahrten mit dem Sattelzug ausreichend. Die in **Tabelle 18** dargestellten Ergebnisse lassen erwarten, dass ein mit den Fahrbahnbreiten 9,00 m (Innenradius $R_i = 5$ m), 8,50 m ($R_i = 6$ m),

8,00 m ($R_i = 7,25$ m) und 7,50 m ($R_i = 8,25$ m und $R_i = 9,25$ m) realisierter Kleiner Kreisverkehr dem Schleppkurven-Flächenbedarf derzeitiger Lkw-Typen genügt.

Tabelle 18: Breiten der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit der zugehörigen Anteile durchgeführter Testfahrten

	Innenradien (Mittelinsel)									
	BUS					SATTELZUG				
	5m	6m	7,25m	8,25m	9,25m	5m	6m	7,25m	8,25m	9,25m
50%	8,00	8,00	7,00	6,50	6,50	8,00	8,00	7,50	7,00	7,00
60%			7,50	7,00						7,00
70%	8,50		7,00	7,00	7,00	8,50	8,50	8,00		7,50
80%										
90%	9,00	8,50	7,50	7,00	7,00	8,50	8,50	8,00	7,50	7,50
100%										

Unter der Voraussetzung, dass mind. 90 % aller Fahrten durch Kreisverkehre mit Schwerverkehrsfahrzeugen ohne Probleme stattfinden sollen, würden die in **Tabelle 18** dargestellten Ergebnisse bedeuten, dass die Breitenangaben für die Kreisfahrbahn nach Tabelle 1 des Merkblattes für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] um bis zu 1 m (bei einem Außendurchmesser von 26 m) angehoben werden müssten. In **Tabelle 19** ist dieses Ergebnis im Einzelnen aufgezeigt.

Tabelle 19: Vergleich der Kreisverkehrselemente gem. Merkblatt [FGSV 1998] und gem. der Ergebnisse aus den Testfahrten

Außendurchmesser D [m] gem. [FGSV 1998]	26	(27)	28	(29)	30	(31)	32
errechneter bzw. gefahrener Radius der Mittelinsel [m]	5,00	6,00	6,50	7,25	8,00	8,25	9,25
Breite der Kreisfahrbahn B [m] gem. [FGSV 1998]	8,00	(7,75)	7,50	(7,25)	7,00	(6,88)	6,75
Breitenbedarf gemäß Versuch [m]	9,00	8,50	(8,25)	8,00	(7,75)	7,50	7,50
Zuschlag zu den Breiten nach [FGSV 1998]	+ 1,00	(+ 0,75)	(+ 0,75)	(+ 0,75)	(+ 0,75)	(+ 0,62)	+ 0,75
Fett gedruckt: Werte nach Merkblatt. (Klammerwerte): interpoliert							

Verfahren zur Überprüfung der Gleichförmigkeit aller Testfahrten

Die gewonnenen Versuchsergebnisse können auf andere, nicht getestete, Kreisverkehre dann mit Recht übertragen werden, wenn sich der (geometrische) Verlauf der Fahrten (die „Form“ der Fahrten) im realen Kreisverkehr analog zu den Testfahrten im fiktiven Kreisverkehr verhält. Die Annahme der Übertragbarkeit wird bestätigt, indem die Gleichförmigkeit der Versuchsfahrten insgesamt (auf den praktischen und fiktiven Kreisverkehren) nachgewiesen wird. Ein Verfahren zur Überprüfung der Gleichförmigkeit der Testfahrten wird nachfolgend beschrieben.

Eine der möglichen Leitlinien einer Kurvenfahrt wird durch die an der Kurvenaußenseite gelegene vordere Fahrzeugecke beschrieben. Es soll aufgezeigt werden, dass die Schar aller (durch die Testfahrten erzeugten) Leitlinien einen vergleichbaren Verlauf aufweist („Schar von Kurven ähnlicher Form“). Die Kartierung im Lageplan ist für diesen Zweck schlecht geeignet. Die Unterschiede einzelner Fahrten sind besser zu verdeutlichen, wenn die Leitlinie (genauer: die Stützpunkte der Leitlinie) in Polarkoordinaten dargestellt wird.

Alle befahrenen Kreisverkehrsvarianten besitzen (unabhängig von Durchmesser, Ein- und Ausfahrradien und sonstigen geometrischen Kenngrößen) einen eindeutigen festen Punkt, den Mittelpunkt der kreisförmigen Mittelinsel bzw. der

Kreisfahrbahn M. Für die Koordinatentransformation wird dieser Punkt M als Ursprung des Polarkoordinatensystems definiert. Die Verbindungslinie zwischen dem Kreismittelpunkt M und dem Mittelpunkt P_0 des Einfahrquerschnittes wird als Grundlinie $\overline{MP_0}$ (Winkel $\varphi_0 = 0$; Länge l_0) für die Polarkoordinatendarstellung festgelegt. Die Verbindungslinie $\overline{MP_i}$ (Länge l_i) zwischen dem Kreismittelpunkt M und den (ermittelten) Fahrzeugeckpunkten P_i (zum jeweiligen Zeitpunkt t_i) schließt mit der Grundlinie $\overline{MP_0}$ den Winkel $\varphi_i = \varphi(t_i)$ ein (vgl. **Abbildung 51**).

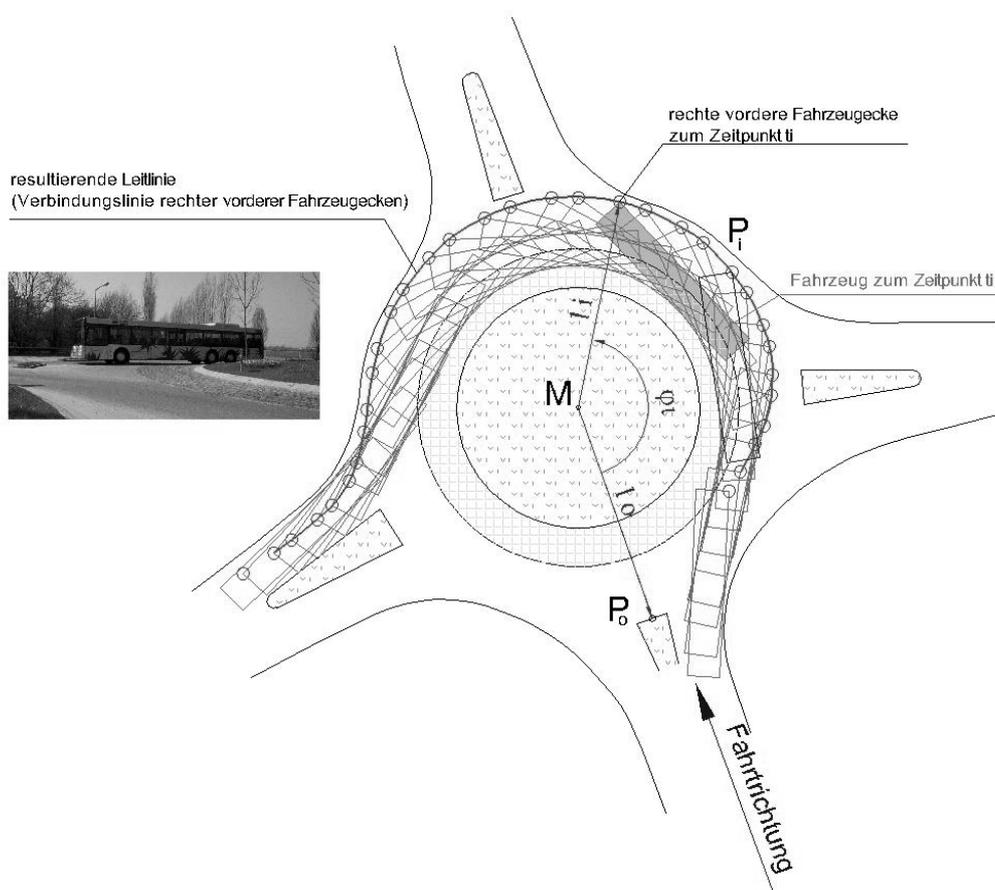


Abbildung 51: Definition bestimmender Punkte, Linien und Winkel für die Transformation der Leitlinie in das Polarkoordinatensystem

Es ist bekannt, dass die Fahrzeug-Trajektorien stetig sind (Unstetigkeiten sind aufgrund des kontinuierlichen Fahrtverlaufes auszuschließen; ein Fahrzeug „springt“ nicht).

Somit gilt

$$l = l(\varphi) \quad (7.2-1)$$

mit

$$\varphi = \varphi(t) \quad (7.2-2).$$

Alle gemessenen Punkte (z. B. die Stützpunkte der Leitlinie und die Hauptpunkte des Kreisverkehrs) liegen in Form von Gauss-Krüger-Koordinaten vor. Die Abstände l_i und die zugehörigen Winkel φ_i der Verbindungsstrecken $\overline{MP_i}$ werden durch Vektorrechnung ermittelt.

Die geodätisch aufgenommenen Punktkoordinaten von M, P₀ und P_i werden als Spaltenvektoren mit den Koordinaten

$$M = \begin{pmatrix} x_M \\ y_M \end{pmatrix}, \quad P_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}, \quad P_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

betrachtet.

Daraus folgt

$$\overrightarrow{P_0M} = \begin{pmatrix} x_M - x_0 \\ y_M - y_0 \end{pmatrix} \quad (7.2-3)$$

und

$$\overrightarrow{P_iM} = \begin{pmatrix} x_M - x_i \\ y_M - y_i \end{pmatrix} \quad (7.2-4)$$

Für die Länge der Vektoren gilt:

$$l_0 = \sqrt{(x_M - x_0)^2 + (y_M - y_0)^2} \quad (7.2-5)$$

und

$$l_i = \sqrt{(x_M - x_i)^2 + (y_M - y_i)^2} \quad (7.2-6)$$

Mit

$$\cos \varphi_i = \frac{(x_M - x_0)(x_M - x_i) + (y_M - y_0)(y_M - y_i)}{l_0 l_i} \quad (7.2-7)$$

wird der Winkel φ_i ermittelt:

$$\varphi_i = \arccos(\cos \varphi_i) \quad \text{für} \quad 0 \leq \varphi_i \leq \pi \quad (7.2-8)$$

$$\varphi_i = 2\pi - \arccos(\cos \varphi_i) \quad \text{für} \quad \pi < \varphi_i < 2\pi \quad (7.2-9)$$

Mit den so berechneten Werten lässt sich allerdings keine Aussage treffen, ob es sich bei φ_i um einen spitzen ($0 \leq \varphi_i \leq \pi$) oder stumpfen Winkel ($\pi < \varphi_i < 2\pi$) handelt. Die Unterscheidung ist aber für eine kontinuierliche Diagrammdarstellung mit φ_i auf der Abszisse und l_i auf der Ordinate wichtig.

Deutet man die ebenen Vektoren $\overrightarrow{P_0M}$ und $\overrightarrow{P_iM}$ als Vektoren im Raum, so liefert

$$\begin{pmatrix} x_M - x_0 \\ y_M - y_0 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_M - x_i \\ y_M - y_i \\ 0 \end{pmatrix} = (x_M - x_0)(y_M - y_i) - (x_M - x_i)(y_M - y_0) \quad (7.2-10)$$

Das Vorzeichen des Ergebnisses aus Gleichung (7.2-10) gibt die Richtung eines senkrecht auf $\overrightarrow{P_0M}$ und $\overrightarrow{P_iM}$ stehenden Vektors an (**Abbildung 52**). Da das kartesische Koordinatensystem ein Rechtssystem bildet („Rechte-Hand-Regel“), liegt damit fest, ob φ_i spitz- oder stumpfwinkelig ist.

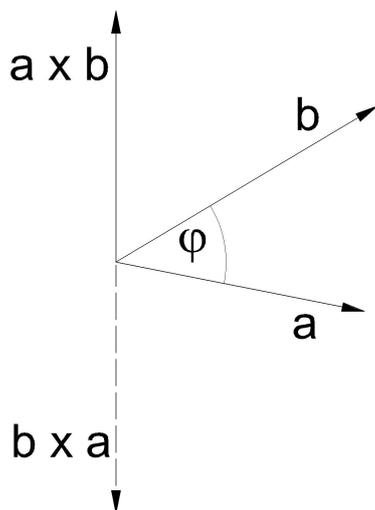


Abbildung 52: Vektorprodukt

Einige ausgewählte Leitlinien in Polarkoordinatendarstellung sind beispielhaft in **Abbildung 53** abgebildet.

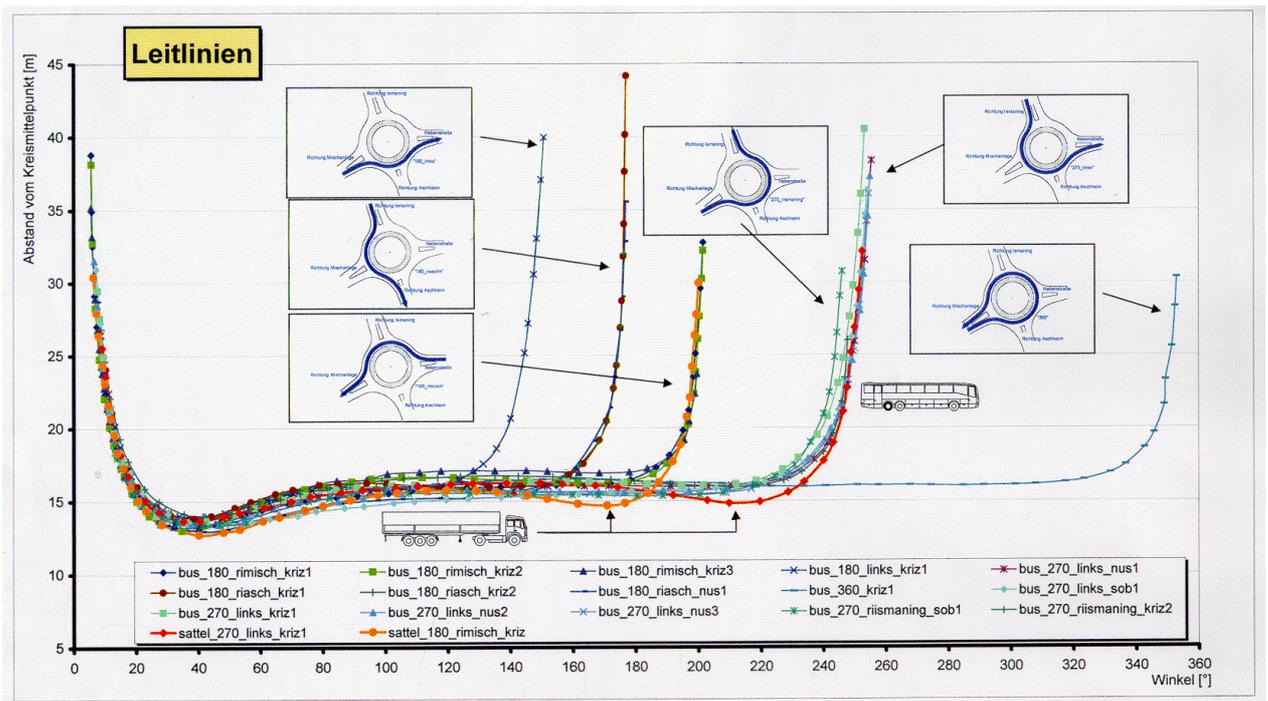


Abbildung 53: Darstellung von Leitlinien im Polarkoordinatensystem (Auswahl)

Es ist erkennbar, wie sich die Fahrzeuge beim Einfahren dem Kreisverkehrsmittelpunkt (und damit der Fahrbahnbegrenzung der Mittelinsel) annähern. Nach dem Einfahrtvorgang vergrößert sich die Entfernung vom Mittelpunkt zunehmend bis mit einem sichtbaren Gegenlenken der Ausfahrtvorgang eingeleitet wird. Dieser beginnt mit einem mehr oder weniger deutlichen Ausholen (stärkeres Ausholen des Sattelzuges im Gegensatz zum Bus) bis zum neuerlichen Gegenlenken. Die Länge der stationären Kreisfahrt wird vom innerhalb der Kreisfahrbahn durchfahrenen Winkel bestimmt und ist für Geradeaus-Durchfahrten und für Linksabbiegefahrten kaum erkennbar. Deutlich sichtbar ist die stationäre Kreisfahrt bei der als Vergleichsfahrt durchgeführten Kehre durch den Kreisverkehr (U-Turn).

Es ist zu erkennen, dass die Kurvenmerkmale

- Krümmung im Einfahrtbereich,
- Krümmung der Kreisfahrt,
- Krümmung im Ausfahrtbereich

ähnlich sind. Die Darstellung zeigt eine Schar von Kurven, die in ihrer Form ähnlich sind. Dies wird auch dadurch untermauert, dass sich die Wendepunkte der einzelnen Fahrten nahezu an gleicher Stelle befinden.

Die Kreisfahrt als solche weist – bis auf ihre Länge (bedingt durch die unterschiedlichen Durchfahr-Winkel) – ebenfalls die gleiche Form auf.

Im Unterschied zu den dargestellten Busfahrten ist für die Fahrten mit dem Sattelzug zu erkennen, dass vor dem Ausfahren deutlich mehr ausgeholt werden muss. Jedoch sind auch diese Kurven von ähnlicher Form.

Als Ergebnis ist festzuhalten: Die Testfahrten weisen bezüglich ihres Verlaufs eine qualitative Übereinstimmung auf; die Fahrten verlaufen ähnlich. Damit können die Ergebnisse auf andere – nicht gefahrene – Kreisverkehre übertragen werden.

Extrapolation der gewonnenen Erkenntnisse auf nicht gefahrene Kreisverkehre

Mit den aus den Testfahrten gewonnenen Erkenntnissen wird nun versucht, die Ergebnisse auf diejenigen Kreisverkehre zu übertragen, die mit den Testfahrten nicht erfasst wurden. Die Annahme der grundsätzlichen Zulässigkeit für eine derartige Übertragung wurde oben abgeleitet.

Zum Zwecke der Extrapolation werden die Wertepaare B/D (mit B = Breite der Kreisfahrbahn; D = Außendurchmesser der Kreisfahrbahn) des Merkblattes für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] und die der Versuchsergebnisse mit mathematischen Funktionen (Regressionsgleichungen) angenähert und miteinander verglichen, um darauf eine Aussage für die Kreisfahrbahnbreite von Kreisverkehrsplätzen bis 45 m zu gründen.

Die Funktion der zugeordneten Werte $B_{\text{Merkblatt}}/D_{\text{Merkblatt}}$ lässt sich beschreiben mit der folgenden empirischen Beziehung.

Eine gute Näherung bringt die quadratische Regression

$$B_{\text{Merkblatt}} = 0,0057 \cdot D^2 - 0,5142 \cdot D + 17,462 \quad (7.2-11)$$

mit B Breite der Kreisfahrbahn [m]
 D Außendurchmesser der Kreisfahrbahn [m].

Der Zusammenhang zwischen den jeweils korrespondierenden Größen $B_{\text{Versuch}}/D_{\text{Versuch}}$ aus der Auswertung der Versuchsfahrten kann näherungsweise mit einer Potenzfunktion beschrieben werden:

$$B_{\text{Versuch}} = 177 \cdot D_{\text{Versuch}}^{-0,919} \quad (7.2-12).$$

Die Beziehung (7.2-12) liefert für Kreisverkehre mit Außendurchmessern zwischen 32 m und 45 m die in **Tabelle 20** aufgeführten Wertepaare.

Abbildung 54 zeigt eine Gegenüberstellung der Fahrbahnbreiten gem. Merkblatt [FGSV 1998], aus den Fahrversuchen (gerundete Werte) und aus der Extrapolation (Näherungsfunktion). Der Unterschied zwischen den Versuchswerten und den Merkblatt-Daten wird mit zunehmendem Außendurchmesser kleiner.

Tabelle 20: Rechenwerte zur Fahrbahnbreite im Kreisverkehr

D [m]	B [m]	D [m]	B [m]
25	9,47	36	6,77
26	9,14	37	6,60
27	8,83	38	6,44
28	8,54	39	6,29
29	8,26	40	6,15
30	8,01	41	6,01
31	7,77	42	5,88
32	7,55	43	5,75
33	7,34	44	5,63
34	7,14	45	5,52
35	6,95		

Fett gedruckte Werte D sind auch im Merkblatt für die Anlage Kleiner Kreisverkehre [FGSV 1998] tabelliert.

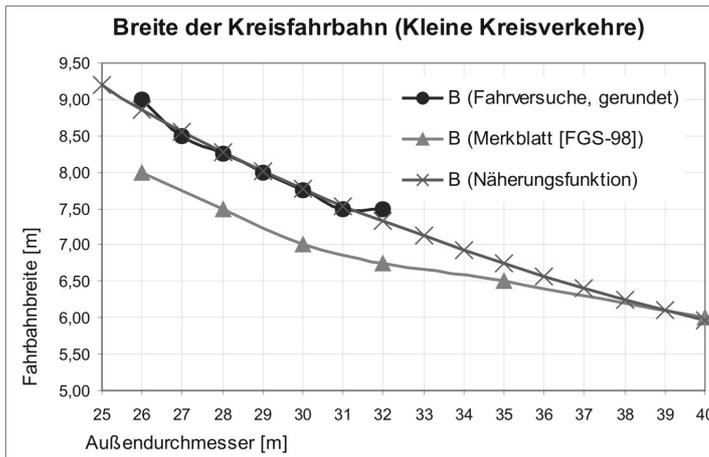


Abbildung 54: Breite der Kreisfahrbahn gem. Merkblatt [FGSV 1998], aus den Fahrversuchen (gerundete Werte) und aus der Näherungsfunktion (Gleichung 7.2-12)

Zur Überprüfung der auf dem Flugfeld gewonnenen Testergebnisse werden die Versuchsfahrten am realen Kreisverkehrsplatz in Aschheim herangezogen. Der am nördlichen Ortsrand von Aschheim gelegene Kreisverkehr ist mit einem Außendurchmesser von 34 m und einer Breite der Kreisfahrbahn von 7,50 m (einschl. aufgepflastertem Innenring) hergestellt (vgl. **Abbildung 55**).

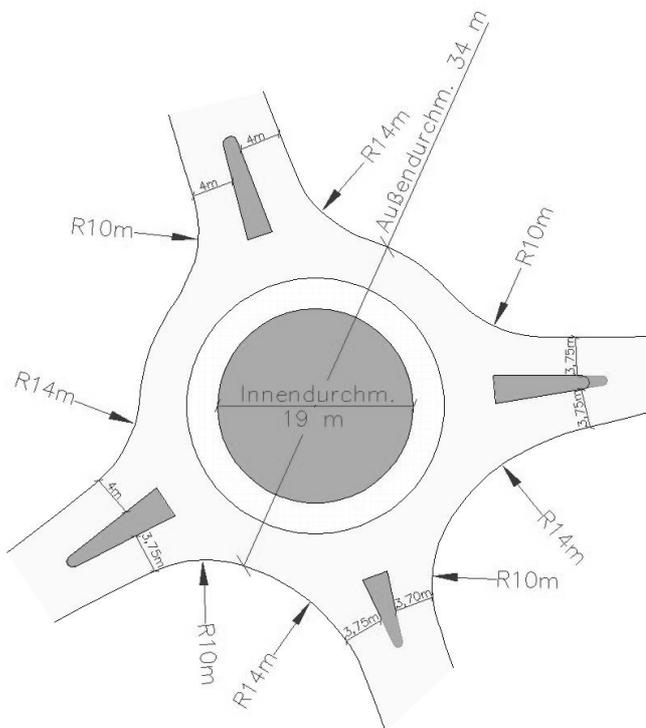


Abbildung 55: Abmessungen des Kreisverkehrs nördlich von Aschheim

Das FGSV-Merkblatt [FGSV 1998] gibt bei einem Außendurchmesser von 35 m eine Fahrbahnbreite von 6,50 m an; der Kreisverkehr in Aschheim wurde somit mit einem deutlichen Zuschlag von ca. 1 m gegenüber dem Merkblattwert [FGSV 1998] gebaut (bei linearer Interpolation der Merkblattwerte ergäbe ein 34-m-Außendurchmesser eine Fahrbahnbreite von 6,6 m). Diese Reserve der Fahrbahnbreite wirkt sich erkennbar auf die Fahrten des Schwerlastverkehrs aus (der untersuchte Kreisverkehr liegt im Verlauf der B 471, einer wichtigen Verkehrsachse im Münchner Osten mit einem hohen Schwerverkehrsanteil).

Der Vergleich der Versuchsergebnisse Realkreis Aschheim/Fiktivkreis Neubiberg bringt zunächst ein unerwartetes Ergebnis zutage. Beansprucht bei den Versuchsfahrten auf dem Testgelände der Universität eindeutig das Sattelzugfahrzeug eine größere Fahrbahnbreite als der Bus, so stellt sich das Ergebnis beim Realkreis nicht in dieser Eindeutigkeit dar. Im Vergleich Bus/Sattelzug liegen die Werte für die tatsächlich gefahrene Breite der Kreisfahrbahn insgesamt näher zusammen. Die real beanspruchten Fahrbahnbreiten von Bus und Sattelzug weichen voneinander nicht wesentlich ab; trotzdem ist als Tendenz erkennbar, dass im Realfall der Bus die größere Breite benötigt.

Auch im realen Kreisverkehr Aschheim werden Fahrten mit einem Breitenbedarf gemessen, welcher die vorhandene Breite der Kreisfahrbahn von 7,50 m überschreitet, was zunächst als nicht möglich erscheint. Das liegt aber daran, dass die Wagenkästen der Fahrzeuge (also die äußeren Fahrzeugecken) und nicht die Bewegungsflächen etwa der Räder eingemessen wurden. Da aufgrund der Höhe der Fahrzeugaufbauten über dem Gelände die vordere rechte Fahrzeugecke die Fahrbahnbegrenzung überstreichen kann, kommt bei einigen Fahrten ein Ergebnis zustande, bei dem der ermittelte Bedarf an Fahrbahnbreite die tatsächlich vorhandene Fahrbahn (Straßenfläche zwischen den Randbegrenzungen) übersteigt. Allerdings wurde dies bei insgesamt 30 durchgeführten Testfahrten mit dem Bus lediglich 2-mal festgestellt (39 cm und 6 cm Überschreitung; bei der gegebenen Kreisverkehrsgeometrie und dem vorhandenen Überhang wäre eine theoretische Überschreitung um mehr als 2 m möglich).

Bei den durchgeführten 23 Fahrten mit dem Sattelzug war keine Überschreitung der Fahrbahnbreite feststellbar. Das Ergebnis liegt innerhalb des nach EAE 85/95 [FGSV 1995] ausgewiesenen anbaufreien Verkehrsraums von 50 cm.

Wie bei den Fahrten auf dem Testgelände zeigt sich auch am realen Kreisverkehr, dass die Linksabbiegefahrten („Dreiviertel-Kreisdurchfahrten“) gegenüber den Geradeausdurchfahrten eine größere Breite beanspruchen. Der 95%-Wert der Kreisfahrbahnbreite am realen Kreisverkehr beträgt 7,45 m. Die Empfehlung gem. **Tabelle 19** gibt eine Breite von 7,50 m (für Außendurchmesser ab 31 m) an und kann somit für die überprüfbare Größe des Kreisverkehrsplatzes als bestätigt gelten.

7.2.2 Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt

Das Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] sieht für die Knotenpunktzufahrten Ausrundungsradien zwischen 10 m und 12 m vor – dies unabhängig von den Querschnitten in der Zufahrt und in der Kreisfahrbahn. Die Versuchsfahrten bestätigen den aus den RAS-K-1 [FGSV 1988] bekannten Sachverhalt, dass die Ausrundungsradien von Knotenpunktzufahrten in Zusammenhang mit der Breite des Ein- und Ausfahrquerschnittes (Breite der Knotenpunktzufahrt und der Kreisfahrbahn) stehen. Dieser Zusammenhang kann mit den gewonnenen Testergebnissen quantitativ mit Hilfe von Regressionskurven aus den Wertepaaren Ausrundungsradius/Kreisfahrbahnbreite beschrieben werden. Dabei scheiden polynomische, potenzielle und die exponentielle Regressionskurven aus, weil sie das nicht plausible Ergebnis hätten, dass bei Kreisfahrbahnbreiten von theoretisch ca. 4 – 5 m die größere Breite im Ein- bzw. Ausfahrquerschnitt auch größere Ausrundungsradien zur Folge hat.

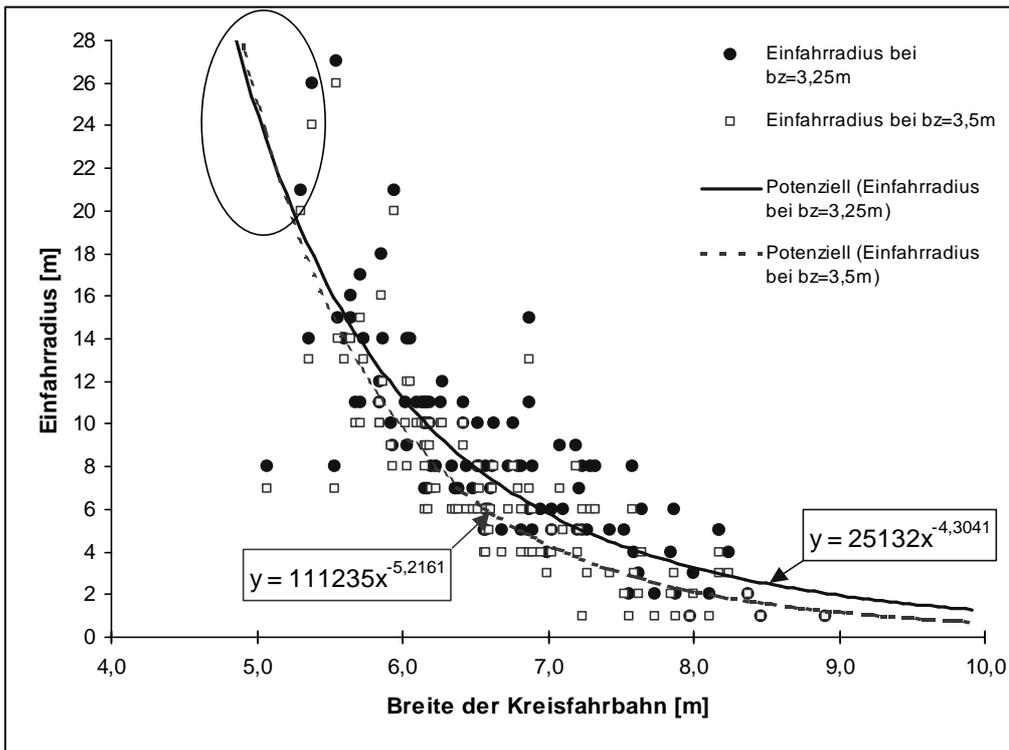


Abbildung 56: Potenzielle Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb des markierten Bereiches kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um

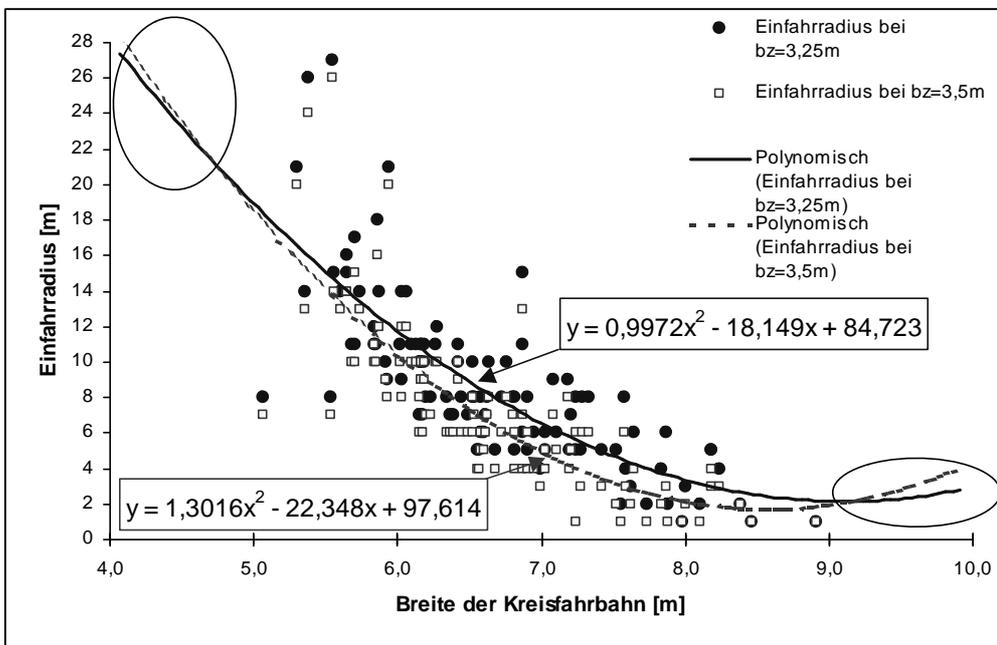


Abbildung 57: Polynomische Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb der markierten Bereiche kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um

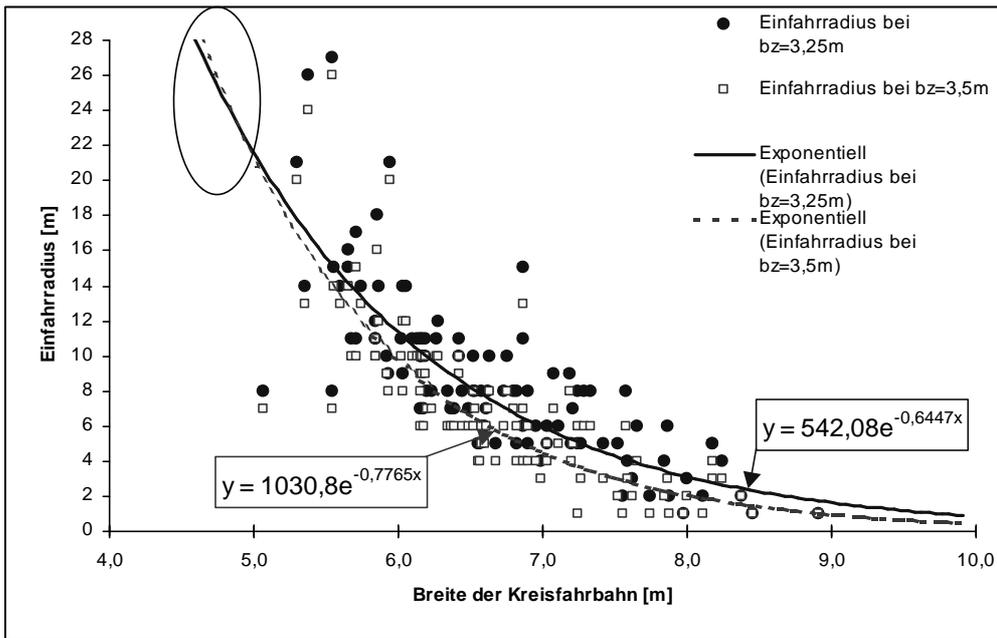


Abbildung 58: Exponentielle Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb der markierten Bereiche kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um

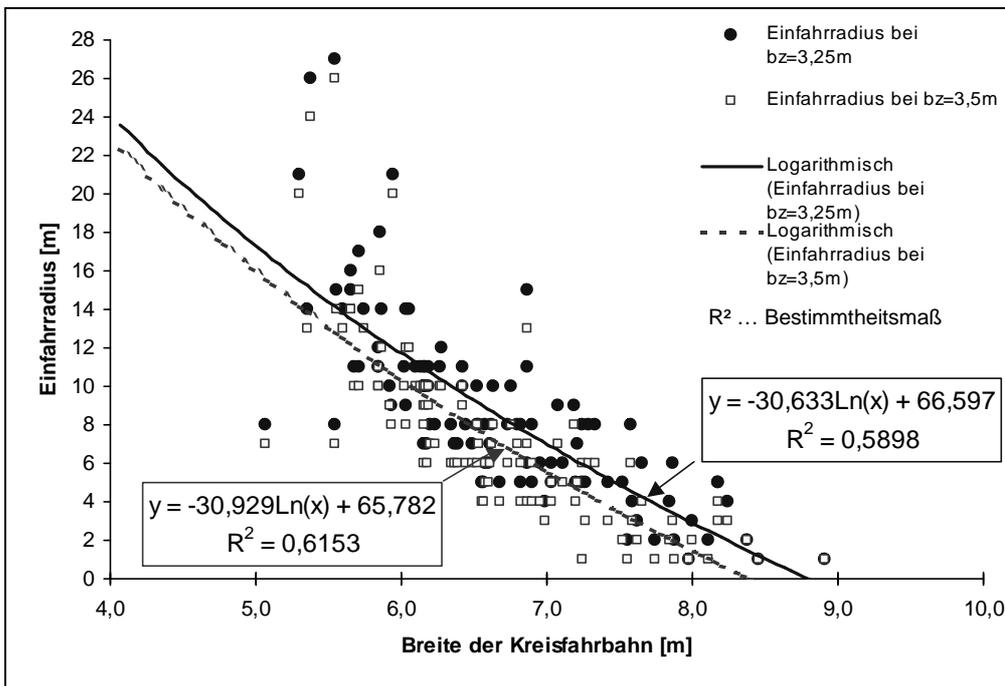


Abbildung 59: Logarithmische Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt

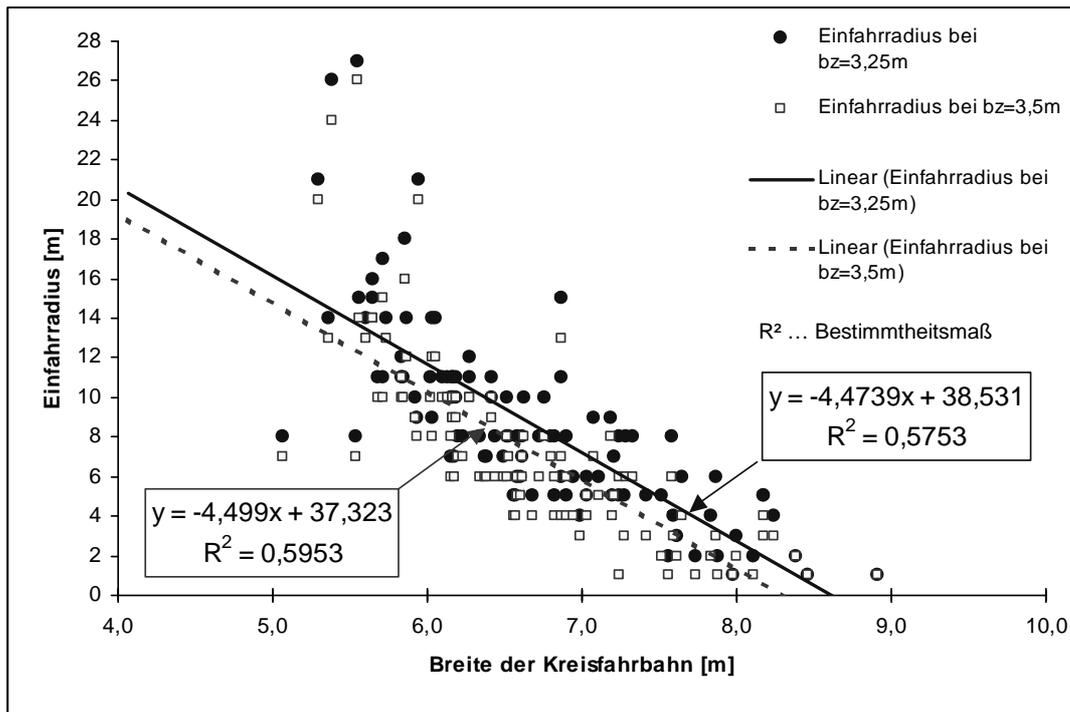


Abbildung 60: Lineare Regression am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt

Die logarithmische Regressionskurve ist von solch gestreckter Form, dass sie sich mit der Regressionsgeraden nahezu deckt. Ein Vergleich des Bestimmtheitsmaßes zeigt außerdem, dass die erzielte höhere Genauigkeit einer logarithmischen Regressionskurve gegenüber der Geraden marginal ist (vgl. **Abbildungen 52** und **53**). Deshalb wird für die weiteren Betrachtungen die lineare Regression gewählt.

Betrachtet man 95 % der durchgeführten Versuchsfahrten, so gilt, dass bei gegebenem Einfahrquerschnitt von 3,50 m Ausrundungsradien von 12 m dann ausreichend sind, wenn gleichzeitig die Fahrbahnbreite im Kreisverkehr mindestens 7,10 m beträgt. Bei einer Breite im Einfahrquerschnitt von 3,25 m ist eine Fahrbahnbreite von mind. 7,20 m erforderlich.

Die Bestimmungsgeraden für die Radien der Knotenpunktzufahrten mit einem Befahrbarkeitsindex von 95 % können mit den nachfolgend aufgeführten Geradengleichungen beschrieben werden (Werte mit hinreichender Genauigkeit gerundet).

$$R_{Z;95\%;3,25} = -4,5 \cdot B_K + 44 \quad (\text{für } B_{\text{Knotenpunktzufahrt}} = 3,25 \text{ m}) \quad (7.2-13)$$

$$R_{Z;95\%;3,50} = -4,5 \cdot B_K + 43 \quad (\text{für } B_{\text{Knotenpunktzufahrt}} = 3,50 \text{ m}) \quad (7.2-14)$$

(mit B_K = Breite der Kreisfahrbahn).

In **Abbildung 61** wie in **Abbildung 62** sind die Ergebnisse unverzerrt aufgetragen, wobei die Abszisse um den Faktor 10 vergrößert dargestellt ist. Damit besteht eine Abwägungsmöglichkeit zwischen notwendigem (bzw. zu wählendem) Ausrundungsradius (und damit dem Flächenbedarf im Einfahrtbereich) und der damit verbundenen Wahrscheinlichkeit der Befahrbarkeit für Schwerverkehrsfahrzeuge (im Sinne zügigen Durchfahrens, was Vorgabe bei der Durchführung der Testfahrten war).

Möglicherweise wird (als verkehrspolitische Entscheidung) im konkreten Fall bei geringem Schwerverkehrsanteil (DTV_{SV}) ein niedrigerer Befahrbarkeitsindex (und infolge dessen mehrere Fahrten im Schritttempo, kein zügiges Fahren) akzeptiert, weil für den Bau eines größeren Kreisverkehrs kein Platz ist. Bei hohen Schwerverkehrsanteilen wird dagegen ein derartiger Kompromiss nicht in Frage kommen und es werden Realisierungsmöglichkeiten gesucht, die bei gegebenen einschränkenden Randbedingungen eine optimale Befahrbarkeit des Kreisverkehrs zulassen. Den am Straßenbau beteiligten Entscheidungsträgern (Planer, Verwaltung, politische Gremien) wird damit ein Instrument an die Hand gegeben, realisierbare Alternativen hinsichtlich Platzbedarf und Befahrbarkeit in Relation zueinander abzuwägen.

Am realen Kreisverkehr in Aschheim wurden Einfahrquerschnitte mit Breiten von 3,70 m, 3,75 m und 4,00 m ausgeführt. Die Breite der Kreisfahrbahn beträgt 7,50 m. Aus dem entsprechenden Diagramm (**Abbildung 62**) ergäbe sich mit den Eingangsgrößen Einfahrbreite 3,50 m und Kreisfahrbahnbreite 7,50 m ein Ausrundungsradius von 10,10 m, an der „95%-Gerade“ abgelesen. Tatsächlich ausgeführt wurde in Aschheim ein Einfahrradius von 10 m, der nach dem Diagramm ausreichend bemessen ist und den Beobachtungen zufolge bei keiner der durchgeführten Testfahrten überfahren wurde.

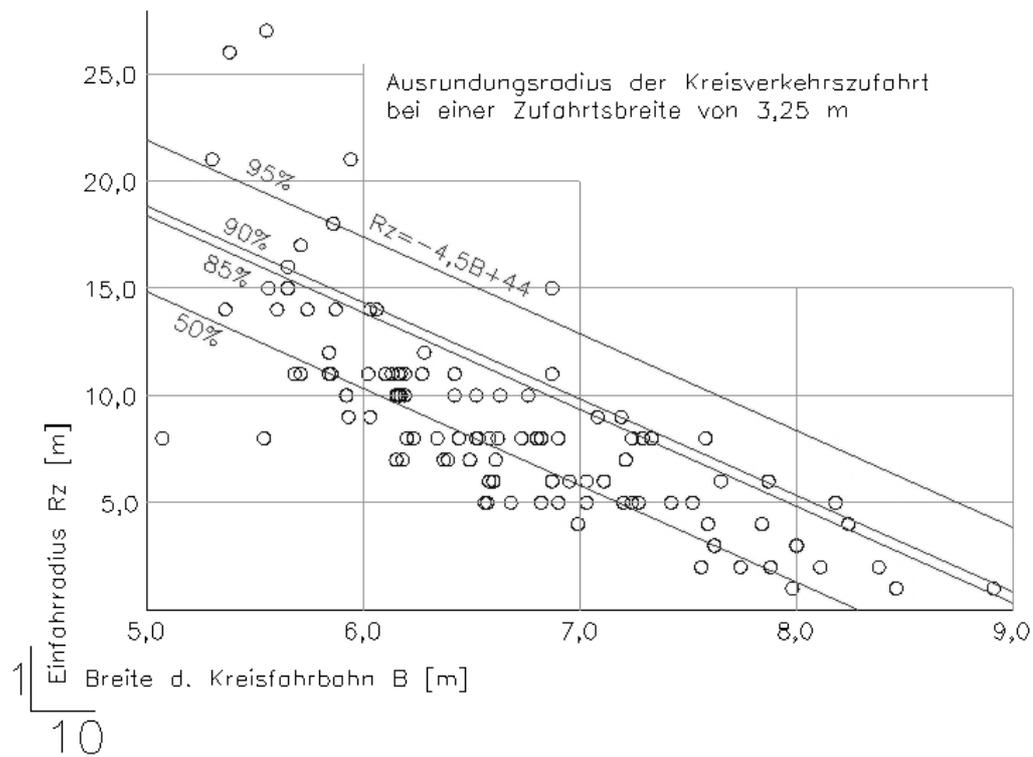


Abbildung 61: Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt bei einer Einfahrtbreite von 3,25 m (unverzerrtes Diagramm)

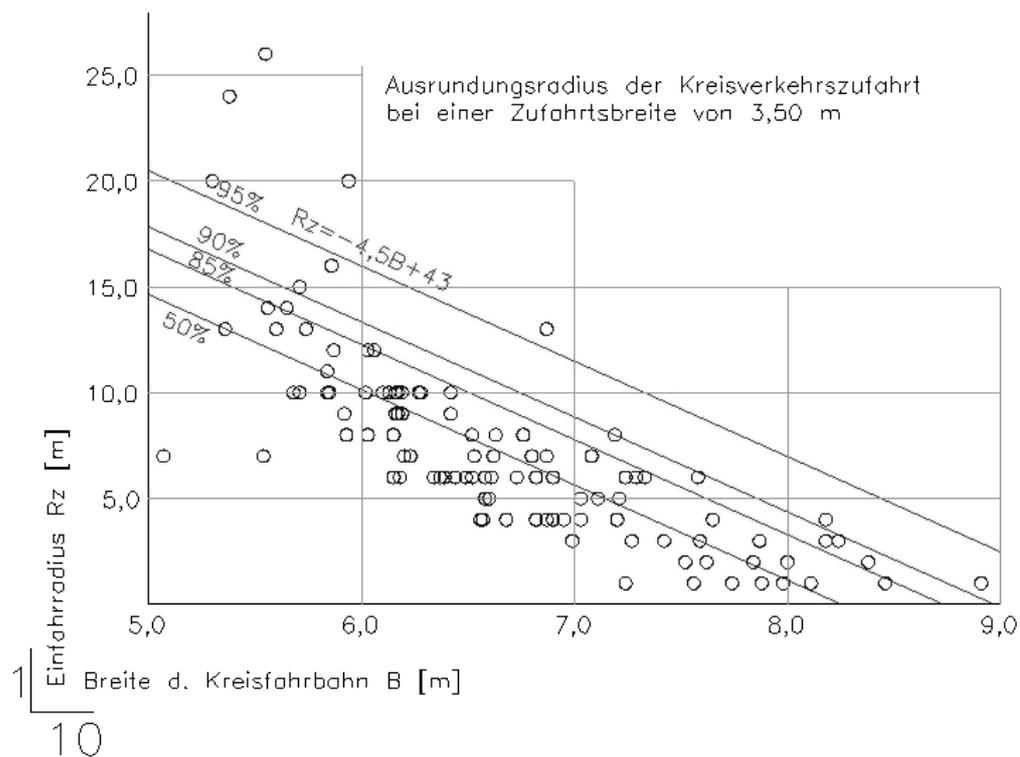


Abbildung 62: Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt bei einer Einfahrtbreite von 3,50 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)

7.2.3 Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt

Die Radien der Knotenpunktausfahrt werden im Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] mit 12 m bis 14 m angegeben. Wenn der Kreisverkehr für 95 % der Schwerverkehrsfahrzeuge problemlos befahrbar sein soll (Befahrbarkeitsindex 95 %), kann gemäß den Untersuchungsergebnissen ein 14-m-Radius erst dann als ausreichend bezeichnet werden, wenn gleichzeitig eine Kreisfahrbahnbreite von 7,75 m (3,50-m-Ausfahrtbreite) bzw. 7,90 m (3,75-m-Ausfahrtbreite) erreicht wird. Der vorhandene Radius von 10 m setzt jedoch eine Fahrbahnbreite in der Kreisfahrbahn von 8,10 m (3,50-m-Ausfahrtbreite) bzw. 8,60 m (3,75-m-Ausfahrtbreite) voraus.

Die Bestimmungsgeraden für die Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt können – analog zu Kapitel 7.2.2 – wie folgt angegeben werden:

$$R_{A;95\%;3,50} = -2,5 \cdot B_K + 36 \quad (\text{für } B_{\text{Knotenpunktausfahrt}} = 3,50 \text{ m}) \quad (7.2.-15)$$

$$R_{A;95\%;3,50} = -2,5 \cdot B_K + 33,5 \quad (\text{für } B_{\text{Knotenpunktausfahrt}} = 3,75 \text{ m}) \quad (7.2-16)$$

(mit B_K = Breite der Kreisfahrbahn).

Die bestehenden Fahrbahnbreiten in den Ausfahrquerschnitten des Kreisverkehrs in Aschheim betragen 3,75 m und 4,00 m. Der Ablesewert für den Ausrundungsradius aus **Abbildung 65** ergibt mit der vorhandenen Kreisfahrbahnbreite von 7,50 m bei einem Ausfahrquerschnitt von 3,75 m einen Wert von 14,60 m. Dieser übersteigt die tatsächlich ausgeführten Radien der Knotenpunktausfahrten um 60 cm.

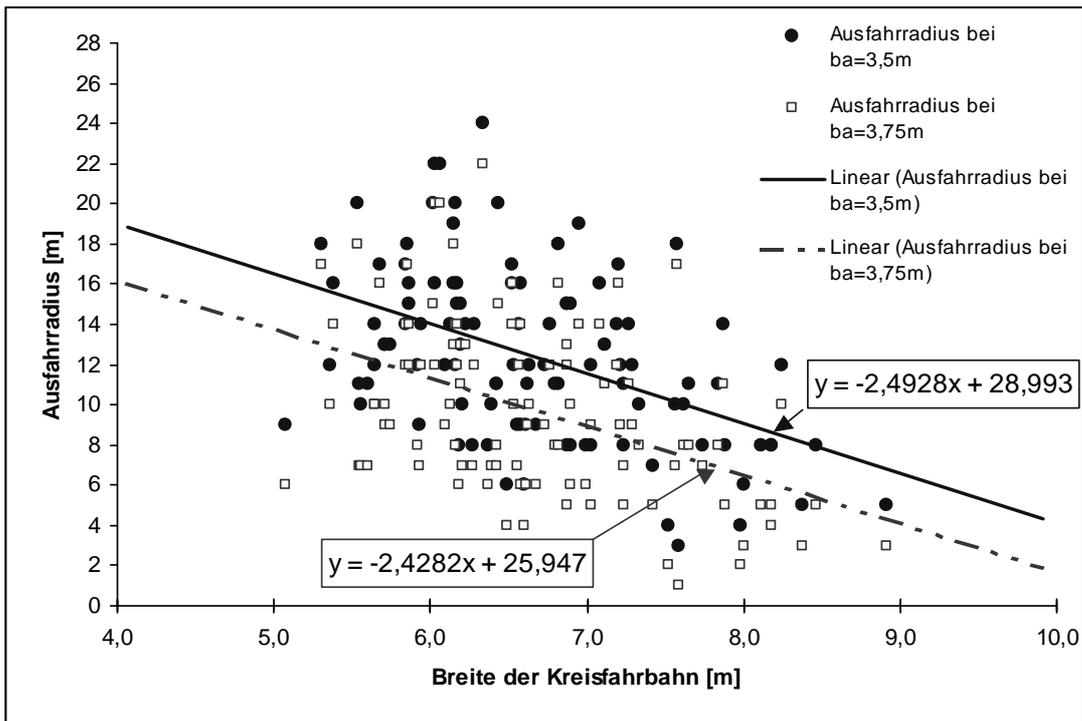


Abbildung 63: Ausfahradius/Breite der Kreisfahrbahn (für $b_A = 3,50\text{ m}$ und $b_A = 3,75\text{ m}$) mit Darstellung der zugehörigen Regressionsgeraden

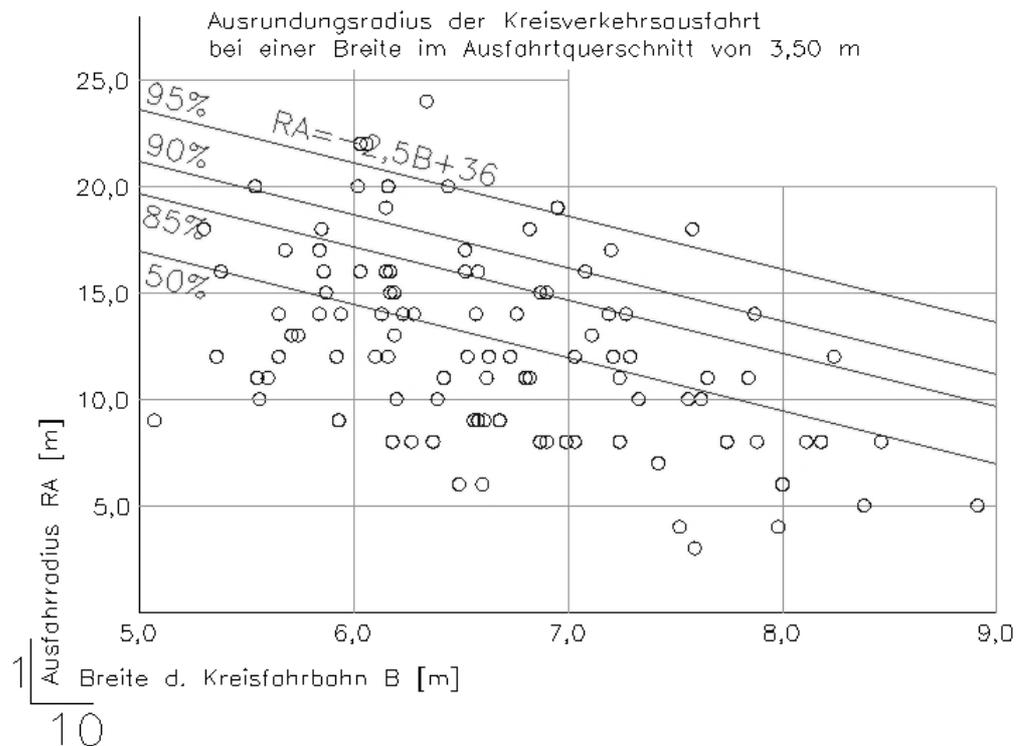


Abbildung 64: Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt bei einer Breite des Ausfahrtquerschnittes von 3,50 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)

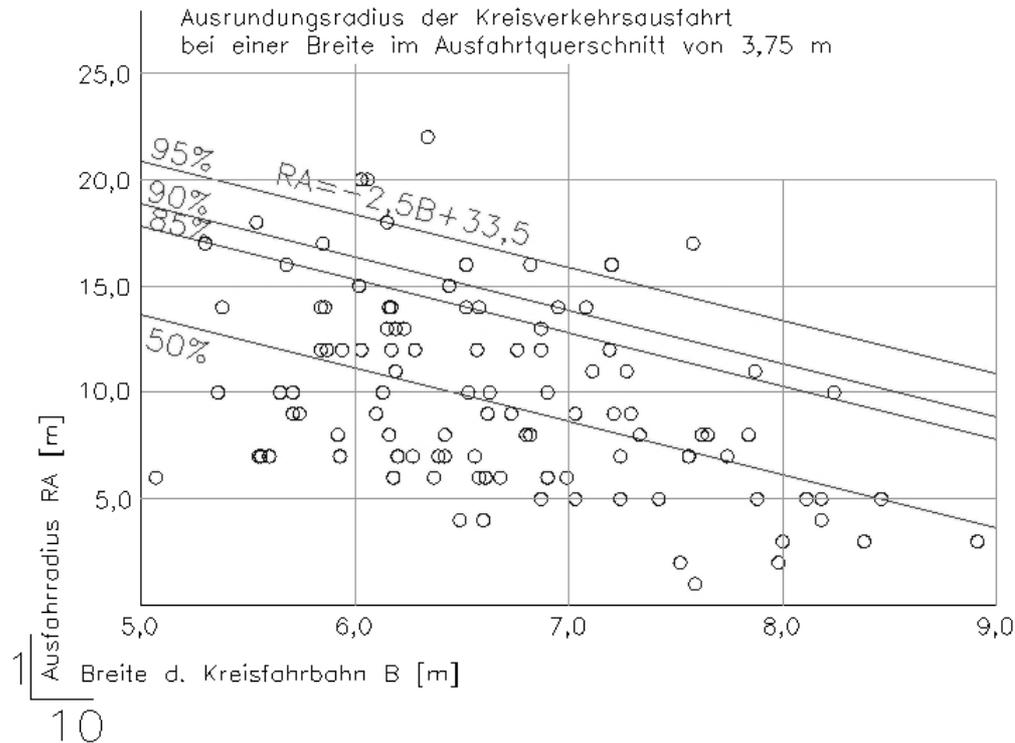


Abbildung 65: Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt bei einer Breite des Ausfahrtquerschnittes von 3,75 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)

7.2.4 Bemessungsdiagramm

Die oben beschriebenen Zusammenhänge lassen sich in ein zusammenfassendes Diagramm überführen. Zu diesem Zweck werden zunächst die Resultate zur Ermittlung der Ausrundungsradien für alle Varianten der Knotenpunktzufahrt (Breite im Einfahrquerschnitt 3,25 m und 3,50 m; Häufigkeitslinien für einen Befahrbarkeitsindex von 95 %, 90 %, 85 % und 50 %) und der Knotenpunktausfahrt (analog zu den Einfahrten) abgetragen. Die in den Abbildungen 53 bis 58 dargestellten Zusammenhänge werden somit zu einem Diagramm zusammengefasst.

Mit der dadurch erhaltenen Linienschar kann beispielsweise die erforderliche Breite der Kreisfahrbahn bei gegebenem (gewähltem oder unveränderlichem) Radius der Zufahrt bzw. der Ausfahrt ermittelt werden oder es können – umgekehrt – aus der gegebenen Fahrbahnbreite die erforderlichen Ausrundungsradien abgelesen werden.

Aus dem in den Versuchen ermittelten Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Außendurchmesser der Kreisfahrbahn lässt sich in demselben Diagramm zusätzlich die nach Gleichung (7.2-12) ermittelte Kurve abtragen.

Die auf diese Weise zusammengeführten Versuchsergebnisse ergeben ein Bemessungsdiagramm (vgl. **Abbildung 67**; Anlage 13), mit dem universell alle Hauptabmessungen von Kleinen Kreisverkehren ermittelt werden können. Die einzelnen Variablen (Ausrundungsradius für eine bestimmte Konfiguration, Breite der Kreisfahrbahn, Außendurchmesser des Kreisverkehrs, Befahrbarkeitsindex“) können dabei – je nach Fallbeispiel – Eingangswert oder Ableseergebnis sein.

Das Bemessungsdiagramm liefert für große Fahrbahnbreiten ab ca. 8 m zum Teil nicht plausibel erscheinende kleine Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt. Theoretisch könnte sich ein Schnittpunkt zweier sehr großer Kreisbögen benachbarter Kreisverkehrszu- und -ausfahrten ergeben, der außerhalb der eigentlichen Kreisfahrbahn liegt (vgl. **Abbildung 66**). Die geometrisch-konstruktive Überprüfung mit den Extremalwerten aus dem Bemessungsdiagramm erbrachte jedoch keinen derartigen Sonderfall.

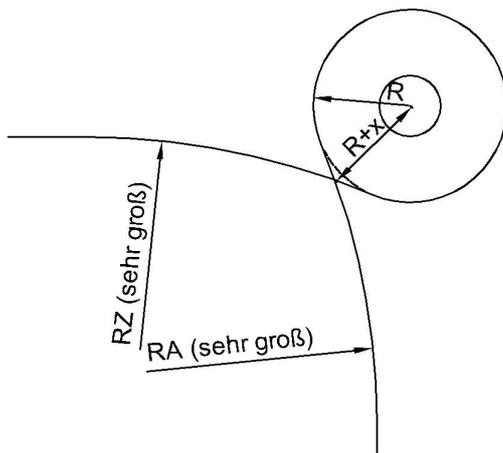


Abbildung 66: Theoretische Mehrbreite der Kreisfahrbahn wegen sehr großer Ausrundungsradien zweier benachbarter Kreisverkehrszu- bzw. Ausfahrten (Prinzipiskizze; übertriebene Darstellung)

Trotzdem sind Ausrundungsradien von weniger als 4 – 5 m für die praktische Anwendung nicht brauchbar. Während der Testfahrten, wo die Fahrzeugführer ihr

Fahrzeug entlang der, in Fahrtrichtung gesehen, linken Fahrbahnrandbegrenzung führten, blieb die rechte Randbegrenzung fahrtechnisch unberücksichtigt. Extrem kleine Ausrundungsradien der rechten Fahrbahnrandbegrenzung werden jedoch in der Praxis dazu führen, dass die Fahrer deutlich ausholen, womit sich andere Fahrkurven ergäben, als die Ergebnisse der Fahrversuche dies aufzeigen. Die aus der Entwicklung des Bemessungsdiagramms (Darstellung der Fahrkurven realer Fahrten, nachträglich „heran-“konstruierte Randbegrenzungen) nachvollziehbaren Werte sind deshalb innerhalb eines für die Anwendungspraxis brauchbaren Bereiches einzugrenzen. Eine Hilfestellung hierzu bieten die EAE 85/95 [FGSV 1995]. Tabelle 12 der EAE 85/95 liefert für einen Linienbus bei einer Einfahrbreite von 3,25 m und einer verfügbaren Fahrbahnbreite im Einfahrquerschnitt (im Fall Kreisverkehr die Breite der Kreisfahrbahn) von 8,20 m einen notwendigen Kreisbogenradius von 4 m, für den Lastzug ergibt sich bei einem Einfahrquerschnitt von 8,60 m Breite ein Kreisbogenradius von 6 m. Aus den Werten der EAE 85/95 können demnach in guter Näherung als Anhaltswerte Ausrundungsradien von mindestens 5 m empfohlen werden.

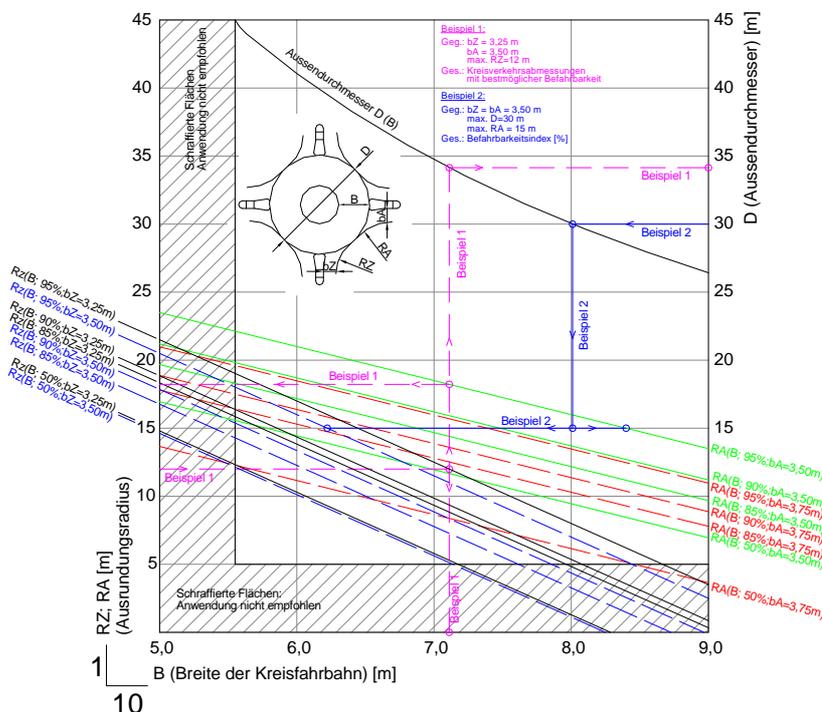


Abbildung 67: Bemessungsdiagramm für Kreisverkehrs-Hauptabmessungen

Anwendungsbeispiele hierzu:

Beispiel 1

- Gegeben: Breite des Einfahrquerschnitts 3,25 m
Breite des Ausfahrquerschnitts: jeweils 3,50 m.
Max. möglicher Ausrundungsradius in der Einfahrt: 12 m.
- Ziel: Es soll die bestmögliche Befahrbarkeit ermöglicht werden.
- Lösung: 1. Eingangswert $R_z = 12$ m (bei 3,50 m Breite).
2. Schnittpunkt auf der 95%-Linie (für die Einfahrt).
3. Ablesewert der Breite der Kreisfahrbahn: ca. 7,1 m.
4. Senkrecht vom Schnittpunkt aus Schritt 1 liefert den Schnittpunkt auf der 95%-Linie der Ausfahrt, von dort horizontal abgelesen ergibt einen Ausrundungsradius für die Ausfahrt von ca. 18,5 m.
5. Senkrechte zum Schnittpunkt der Kurve D (B) liefert einen Außendurchmesser von ca. 34 m.
- Ergebnis: Ausrundungsradius im Einfahrquerschnitt : 12 m (Eingangswert).
Ausrundungsradius im Ausfahrquerschnitt: 18,5 m.
Breite der Kreisfahrbahn: 7,1 m
Außendurchmesser des Kreisverkehrs: 34 m.

Beispiel 2

- Gegeben: Breite des Ein- und Ausfahrquerschnitts: jeweils 3,50 m.
Max. Außendurchmesser: 30 m
Max. Ausrundungsradius im Ausfahrquerschnitt: 15 m.
- Ziel: Es soll der bestmögliche Befahrbarkeitsindex ermittelt werden.
- Lösung: 1. Eingangswert $D = 30$ m liefert $B = 8$ m.
2. Schnittpunkt der Senkrechte aus Schritt 1 mit der 15-m-Linie liegt zwischen der 95%-Linie und der 90%-Linie für die Ausfahrt (bei einer Breite von 3,50 m).
3. $B = 8$ m liefert für die 95%-Linie der Einfahrt einen Ausrundungsradius von 8 m; für die 90%-Linie der Einfahrt ca. 4 m.
- Ergebnis: Außendurchmesser: 30 m (Eingangswert).
Ausrundungsradius im Ausfahrquerschnitt: 15 m (Eingangswert).
Breite der Kreisfahrbahn: 8 m.
Ausrundungshalbmesse im Einfahrquerschnitt: 8 m.
Mit diesen Abmessungen lässt sich ein Befahrbarkeitsindex von 95 % erzielen.

8. Zusammenfassung

Kleine Kreisverkehre haben sich zu einer beliebten Knotenpunktform entwickelt, die immer häufiger realisiert wird. Mit dem Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998], welches sich derzeit in Überarbeitung befindet und voraussichtlich durch das *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren* [FGSV 2005] (derzeit liegt die Entwurfsfassung 01/05 vor) ersetzt wird, existiert in Deutschland eine brauchbare und in der Praxis durchaus auch bewährte Planungsgrundlage.

Trotzdem sind im täglichen Betrieb regelmäßig Fahrspuren im Straßenbegleitgrün, ausgebrochene Randbefestigungen oder – als Abhilfemaßnahme dagegen – nachträglich neben dem Fahrbahnrand gesetzte Rasengittersteine in den Eckausrundungen der Zu- und Ausfahrten zu beobachten.

Offensichtlich ist dies ein Hinweis darauf, dass der Flächenbedarf einzelner Fahrzeuge (oder Fahrzeugtypen) während der Kurvenfahrt und das vorhandene Flächenangebot aus der Kreisverkehrsgeometrie (Außendurchmesser, Durchmesser der Mittelinsel, Ausrundungsradien der Zu- und Ausfahrt) nicht in jedem Fall ausreichend aufeinander abgestimmt sind.

Ganz allgemein sind die Schleppkurven eines Bemessungsfahrzeugs ein adäquates Mittel zur Überprüfung von Straßenverkehrsanlagen. Diese stellen den Flächenbedarf eines Fahrzeuges bei Kurvenfahrt in der Grundrissprojektion dar. Für die theoretische Herleitung einer Schleppkurve müssen Eingangswerte wie Fahrzeugabmessungen und Fahreigenschaften des Fahrzeugs (z. B. aus dem Radeinschlagwinkel, der Deichselstellung bei Zügen und dergl.) bekannt sein. Ferner muss die sog. Leitlinie bekannt sein, an der entlang das (fiktive) Fahrzeug (genauer: ein bestimmter Punkt des Fahrzeuges) gezogen oder geschoben wird. Ohne diese Leitlinie ist eine theoretische Ermittlung von Schleppkurven nicht möglich.

Da ein Fahrzeug von seinem Lenker in der Praxis aber nicht entlang einer Leitlinie geführt wird (die in der Realität auch nicht vorhanden sind, mit Ausnahme der auf größeren Luftverkehrsanlagen vorhandenen Führungslinien für die

Bodenbewegungen von Flugzeugen), sondern den aktiven Lenkmaßnahmen des Fahrzeugführers folgend im vorgegebenen Straßenraum bewegt wird, muss die Übereinstimmung zwischen theoretisch ermittelten Schleppkurven und realem Platzanspruch eines Fahrzeugs bei Kurvenfahrt zwangsläufig einer gewissen Zufälligkeit und Ungenauigkeit unterliegen.

Neben den allgemeinen Angaben zu Abmessungen gem. dem Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] sind es aber die (theoretischen) Schleppkurven, die zur geometrischen Bemessung von Kreisverkehren herangezogen werden – sei es in Form von „statischen“ (unveränderlichen) Kurven (z. B. auf Papier gedruckte Schleppkurven) oder als „dynamische“ Schleppkurven, die mit Hilfe entsprechender EDV-Programme im Computer schrittweise rechnerisch erzeugt werden, wobei es dem Anwender überlassen bleibt, die richtige Leitlinie gemäß der zu bearbeitenden planerischen Fragestellung vorzugeben.

Eine Möglichkeit, empirisch ermittelte Schleppkurven zu erhalten, besteht darin, reale Fahrten in technisch geeigneter Weise aufzumessen und abzubilden bzw. anderweitig weiterzuverarbeiten. Die für diesen Zweck bisher angewandten Methoden (z. B. motographische Aufnahmen aus größeren Höhen) hatten zusätzlich zu dem Umstand, dass mehr oder weniger aufwändige Versuchsaufbauten notwendig waren, allesamt den Nachteil, dass die ermittelten Schleppkurven mehr oder weniger umständlich nachträglich vermessen werden mussten.

An der Universität der Bundeswehr in München wurde im Gegensatz dazu ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe Bewegungskurven von Fahrzeugen aufgemessen und (auch in Echtzeit) in der zeitlichen Abfolge einzelner Wagenkasten-Grundrisse maßstabsgerecht als digitale Computergrafik dargestellt werden können. Dieses Verfahren basiert auf einer geodätischen Vermessung mit Hilfe von GPS (Global Positioning System).

GPS basiert auf insgesamt 24 Satelliten, welche die Erde auf vorgegebenen Umlaufbahnen umkreisen und in kurzen Zeitabständen ein Hochfrequenzsignal absenden, das Sendezeit und Satellitenposition als Information enthält. Die

Positionsbestimmung auf der Erde beruht auf einer Laufzeitmessung der Satellitensignale zu den GPS-Empfängern. Aus dem Kugelschnitt von mindestens 3 Satelliten ist die Position des Empfängers zu bestimmen.

Physikalisch und technisch bedingte Erschwernisse, wie z. B. die präzise Übereinstimmung der systeminternen Uhren oder atmosphärisch bedingte Signalverfälschungen, konnten seit dem Start des GPS-Systems bis heute soweit behoben werden, dass (bei Einsatz eines zusätzlichen, statischen Referenzempfängers, dessen Koordinaten bekannt sind) eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern erreicht werden kann.

Damit können mit auf Fahrzeugen montierten GPS-Empfängern Bewegungsabläufe aufgezeichnet und visualisiert werden. Dieses Verfahren, bei dem sich das zu vermessende Objekt in Bewegung befindet, wird als kinematisches GPS bezeichnet.

Damit erhält man einzelne Punkte der in zeitlicher Abfolge der Bewegung gemessenen Koordinaten von GPS-Empfängern. Die tatsächliche Schleppkurve ergibt sich aus der inneren und der äußeren Einhüllenden der dargestellten Wagenkasten-Positionen.

Wie bei den bekannten theoretischen Verfahren, werden auch bei der GPS-Schleppkurvenermittlung die in der Bewegung aufeinander folgenden Fahrzeugumrisse erzeugt. Diese ermöglichen (bei ausreichender Anzahl; bei GPS-Messung in hinreichend schneller zeitlicher Abfolge) ein Abbild der Schleppkurve für das konkrete Fahrzeug.

Eine theoretische Ermittlung von Schleppkurven für Fahrten durch Kreisverkehre ist wegen der Bewegungsabfolge Einfahren-Kreisfahrt-Ausfahren (Rechtskurve-Linkskurve-Rechtskurve) mit den unterschiedlichen (vorgegebenen) Randbedingungen (Ausrundungsradien in Zu- und Ausfahrt; Radius und Breite der Kreisfahrbahn) und der (für die theoretische Ermittlung) erforderlichen und „richtigen“ Leitlinienvorgabe schwierig und nur näherungsweise möglich. Mit der praktischen Ermittlung anhand der GPS-Methode dagegen wird nicht nur die Problematik der Leitlinienvorgabe umgangen, sondern es werden implizit auch die Einflüsse z. B. aus

der Fahreroutine erfasst, welche sich mit keiner theoretischen Methode ermitteln lassen.

Anhand einer Versuchsreihe mit zwei ausgewählten Fahrzeugen – einem Sattelzug und einem Omnibus – sowie mit einer Auswahl unterschiedlicher Fahrer (vom „Profi“ bis zum „Gelegenheitsfahrer“), konnten die im Regelwerk vorgegebenen Entwurfsparameter für Kleine Kreisverkehre empirisch überprüft werden.

Dazu wurde auf dem ehemaligen Flugplatz Neubiberg eine Serie fiktiver Kreisverkehre unterschiedlicher Größen mit Markierungsfarbe und behelfsmäßigen Randeinfassungen aus Holz angelegt. Diese wurden mit Richtungsänderungen von 180° (Geradeausfahrt durch den Kleinen Kreisverkehr) und 270° (Linksabbiegen über den Kleinen Kreisverkehr) durchfahren. Vorgegeben waren dabei jeweils die Start- und die Zielquerschnitte sowie der Rand der Mittelinsel mit verschiedenen Durchmessern als innere Fahrbahnbegrenzung der Kreisfahrbahn. Als Resultat konnten die Ausrundungsradien in der Zu- und Ausfahrt, die erforderliche Kreisfahrbahnbreite und darauf folgend der erforderliche Außendurchmesser der Kreisfahrbahn ermittelt werden.

Wegen der gegenseitigen Abhängigkeiten der geometrischen Parameter (Einfahrquerschnitt, Einfahrradius, Kreisfahrbahnbreite, Ausfahrbreite, Ausfahrquerschnitt) mussten für die Auswertung der Testfahrten die Querschnittsbreiten der Zufahrt und der Ausfahrt vorab festgelegt werden. Diese wurden für die Einfahrt zu 3,25 m bzw. 3,50 m und für die Ausfahrt zu 3,50 m bzw. 3,75 m gemäß dem Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen [FGSV 1998] gestaffelt. Damit wird eine statistische Betrachtung der problemlosen Befahrbarkeit ermöglicht, deren Ergebnis in Form von Diagrammen mit Häufigkeitsfunktionen für die Hauptabmessungen dargestellt wird. Mit diesen Häufigkeitsdiagrammen ist es auf der Basis der Eingangswerte Einfahrbreite und Ausfahrbreite möglich, die Hauptelemente des Kreisverkehrsplatzes (Einfahr- oder Ausfahrradius, Breite der Kreisfahrbahn) einer statistischen „Befahrbarkeitswahrscheinlichkeit“, ausgedrückt durch einen Befahrbarkeitsindex [%] zuzuordnen. Der Befahrbarkeitsindex drückt aus, welcher Anteil eines durchschnittlichen Fahrerkollektivs nach Wahrscheinlichkeit einen Kleinen

Kreisverkehr mit einer bestimmten vorgegebenen Geometrie (insbesondere Kreisinseldurchmesser, Kreisfahrbahnbreite, Einfahrts- und Ausfahrtsausrundungsradien) problemlos, d. h. ohne „hängen zu bleiben“, befahren kann.

In der Praxis kann damit ein Abwägungsprozess bei der Festlegung der Kreisverkehrsgeometrie erfolgen, in dem begleitende Randbedingungen wie die Querschnitte zuführender und abführender Richtungsfahrbahnen, das Platzangebot, Zwangspunkte (z. B. aus unveränderlicher Bebauung) usw. mit einfließen können.

Die so erhaltenen Diagramme lassen sich zu einem allgemeinen Bemessungsdiagramm (Anlage 13) zusammenführen, in dem Abhängigkeiten von Befahrbarkeitsindex, Ausrundungsradius in Zu- und Ausfahrt, Außendurchmesser des Kreisverkehrs und die Breite der Kreisfahrbahn zusammenfassend dargestellt sind. Referenzelement ist dabei die Kreisfahrbahnbreite.

Anders als in [FGSV 1998] (wie auch im Entwurf der Überarbeitung), wo die geometrischen Abmessungen weitgehend unabhängig voneinander angegeben werden, ist es mit dem Bemessungsdiagramm möglich, alle Hauptabmessungen eines Kreisverkehrs unmittelbar abzulesen.

Eine konkrete Anwendung der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methodik könnte in der Ermittlung von Schleppkurven für die in einigen Teilen Europas, z. B. in Skandinavien, eingesetzten neuen Großfahrzeug-Formen (sog. Gigaliner) liegen. Es handelt sich dabei um Fahrzeuge mit einem größeren Transportvolumen, beispielsweise Sattelzüge mit einem an den Sattelaufleger angekoppelten Anhänger oder Lastzüge mit mehreren Anhängern. Für derartige Fahrzeuge sind bisher keine Schleppkurven vorhanden. Zur Überprüfung von Kreisverkehrsplanungen sind jedoch zwingend stimmige Schleppkurven erforderlich. Mit der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methode könnten auch Schleppkurven für Gigaliner ermittelt und ein Bemessungsdiagramm für Kleine Kreisverkehre abgeleitet werden.

Quellenverzeichnis

[AASHTO 1994]

AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials): *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington D. C. (USA). 1994.

[BONZ, SCHMID 1980]

BONZ, M.; SCHMID, CH.: *Untersuchung des Flächenbedarfs von Bussen in der Kurvenfahrt an Haltestellen*. In: *Straßenverkehrstechnik*. (6/1980), S. 197 – 201.

[BOVY 1991]

BOVY, PHILIPPE H.: *Zusammenfassung des schweizerischen Kreisellhandbuches*. In: *Straße und Verkehr*. (März 1991), S. 129 – 139.

[BRILON, STUWE 1991]

BRILON, W.; STUWE, B.: *Kreisverkehrsplätze – Leistungsfähigkeit, Sicherheit und verkehrstechnische Gestaltung*. In: *Straßenverkehrstechnik* (6/1991), S. 296 – 304.

[CERTU1999]

CERTU (Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme, et les Constructions Publiques): *Guide carrefours urbains*. Lyon (Frankreich) : 1999.

[CROW 1998]

C.R.O.W: *Eenheid in rotondes*. Publicatie No. 126. Ede (Niederlande) : 1998.

[DOT 2000]

U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration: *Roundabouts – An Informational Guide*. Publication No. FHWA-RD-00-067. Washington DC (USA) : 2000.

[EVERLING 1966]

EVERLING, W.; SCHOSS, W.: *Die elektronische Berechnung von Fahrbahnverbreiterungen nach der Schleppkurve*. In: *Brücke und Straße*. (1966), H. 6, S. 245 – 248.

[FGSV 1988]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: *Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Knotenpunkte, Abschnitt 1: Plangleiche Knotenpunkte (RAS-K-1)*. Köln: FGSV-Verlag, 1988.

[FGSV 1993]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: *Empfehlungen für die Anlage von Hauptverkehrsstraßen* (EAHV 93). Köln: FGSV-Verlag, 1993.

[FGSV 1995]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Ad-hoc-Gruppe FGSV/BM Bau: *Empfehlungen für die Anlage von Erschließungsstraßen* (EAE 85/95). Köln: FGSV-Verlag, 1995.

[FGSV 1998]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: *Merkblatt für die Anlage von Kleinen Kreisverkehrsplätzen*. Köln: FGSV-Verlag, 1998.

[FGSV 2000-1]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitskreis „Kreisverkehre“: *Zweistreifig befahrbare Kreisverkehre*. FGSV-Arbeitspapier Nr. 51. Köln: FGSV-Verlag, 2000.

[FGSV 2000-2]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: *Begriffsbestimmungen, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. Köln: FGSV-Verlag, 2000.

[FGSV 2001]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: *Bemessungsfahrzeuge und Schleppkurven zur Überprüfung der Befahrbarkeit von Verkehrsflächen*. Köln: FGSV-Verlag, 2001.

[FGSV 2005]

Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: *Merkblatt für die Anlage von Kreisverkehren*. Entwurf 01/05. Ausgabe 2005, unveröffentlicht.

[GAUSS 1956]

GAUSS, F.; RAUTENSTRAUSS, W.: *Die Fahrbahnbreite für den Schwerlastverkehr*. In: VDI-Zeitschrift. (1956), Bd. 98, S. 1849 – 1952.

[GUHLMANN 1959]

GUHLMANN, E.: *Die Anwendung der Schleppkurve bei der Projektierung von Straßen*. In: Straßentechnik. (1959), 7. Jg. Nummer 9, S. 100 – 103.

[HALTER 1932]

HALTER, G.: *Die Ausgestaltung scharfer Bogen in Landstraßen*. In: Verkehrstechnik. (1932), Nr. 23, S. 667 – 670.

[HAMMER 1986]

HAMMER, R.: *Die Konstruktion von S-Bögen mit der Hüllkurvenschablone*. In: *Verkehr und Technik*. (1986), H. 5, S. 197 – 202.

[HELLELAND 1994]

HELLELAND, N.: *Hilfreiche Kreise – Kreisverkehr in Norwegen*. In: *Deutsche Bauzeitung* db. (03/94).

[HIA 1993]

The Highways Agency, the Scottish office development department, the Welsh office, the department of the environment for Northern Ireland: *Geometric Design of Roundabouts*. (GB): 1993.

[JESCHKE 1972]

JESCHKE, J.: *Iterationsverfahren zur Berechnung und Absteckung von Schleppkurven*. Dissertation. TU Wien (1972).

[KLINGBERG 1998]

KLINGBERG, K.: *Ermittlung von Schleppkurven mit Hilfe von GPS*. Studienarbeit. Universität der Bundeswehr München, Lehrstuhl für Verkehrswesen und Straßenverkehrsanlagen. München: 1998. Unveröffentlicht.

[KÖPPEL 1979]

KÖPPEL, G.: *Linienführung und geometrische Bemessung*. In: WEHNER, SIEDEK, SCHULZE: *Handbuch des Straßenbaus*. Berlin, Heidelberg, New York: 1979. Bd. 1

[LENTZ 1989]

LENTZ, D., BUCK, M.: *Fahrgeometrische Grundlagen beim Entwurf von Anlagen für den ruhenden Verkehr*. Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Heft 4, S. 79 – 97. Stuttgart: 1989.

[LITZKA 1970]

LITZKA, J.: *Die Ausbildung von Kehren. sche Grundlagen beim Entwurf von Anlagen für den ruhenden Verkehr*. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien (1970).

[MANSFELD 2004]

MANSFELD, W.: *Satellitenortung und Navigation; Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2004.

[MARX 1975]

MARX, E.: *Konstruktion von Schleppkurven*. In: *Schriftenreihe Straßenforschung*. Bundesministerium für Bauten und Technik, Heft 48. Wien: 1975.

[MARX, MESCHIK 1990]

MARX, E; MESCHIK, M.: *Schleppkurven städtischer Fahrzeuge*. In: Schriftenreihe der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen, Heft 93. Wien: 1990.

[MESCHIK 1992]

MESCHIK, M.: *Simulation von Schleppkurven verschiedener Fahrzeuge*. In: Mitteilungen des Institutes für Verkehrswesen, Universität für Bodenkultur Wien (Hrsg.). Wien: 1992.

[MESCHIK 2001]

MESCHIK, M.: *Schleppkurven-Symposium 2001*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung, H. 45. Universität der Bundeswehr München. München: 2001.

[MICHALSKI U. A. 2000]

MICHALSKI, L.; JAMROZ, K; KRZYSTEK, R.: *Geometric Design of Roundabouts in Poland – Recent Year's Experience*. In: 2nd International Symposium on Highway Geometric Design, TRB / FGSV – Symposium vom 14. bis 17. Juni 2000 in Mainz. Köln: FGSV-Verlag, 2000.

[NÖS 1996]

Niederösterreichischer Strassendienst, Kuratorium für Verkehrssicherheit: *Der Kreisverkehr: Empfehlungen zum Einsatz und zur Gestaltung*. Wien: Amt der NÖ Landesregierung (Hrsg.), 1996.

[OEHM 1956]

OEHM, E.; SCHREINER, H.: *Fahrspurenkunde als Grundlage für die Ermittlung von Konstruktionselementen im Straßenbau*. In: Straße und Autobahn. (1956), H. 11, S. 388 - 393.

[OSTERLOH 1988]

OSTERLOH, H.: *Die Schleppkurve – Berechnung und Darstellung der überstrichenen Fläche zweiachsiger Fahrzeuge*. In: Vermessungswesen und Raumordnung (VR). (1988), H. 50/7 + 8, S. 400 -406.

[PETROVIC 1967]

PETROVIC, P.: *Die Kehre im Gebirgsstraßenbau. Neue Gesichtspunkte und Methoden zu ihrer Konstruktion*. Springer Verlag, Wien: 1967.

[REINHARDT 1987]

REINHARDT, F.; SOEDER, H.: dtv-Atlas zur Mathematik. Band 1; Grundlagen Algebra und Geometrie. 7. Auflage, München, Deutscher Taschenbuch Verlag, 1987, S.182.

[RETZKO 1972]

RETZKO, H. G.: *Entwicklung geeigneter Formen von Wendeanlagen*. In: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 87. Kirschbaum Verlag. Bonn-Bad Godesberg: 1972.

[ROTACHER 2004]

ROTHACHER, M.: *Satellitengeodäsie 1 (Einführung in GPS)*. Vorlesungsskriptum. Technische Universität München, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie. München: 2004.

[SCHAAR 1938]

SCHAAR, W.: *Das Spuren der Anhängerfahrzeuge*. In: Automobiltechnische Zeitschrift. (1938) H. 23, S. 599 – 606.

[SCHNEIDER 1963]

SCHNEIDER, R.: *Untersuchung über die Bordsteinführung bei der Einmündung städtischer Straßen*. In: Straße und Autobahn. (1963) H. 6, S. 205 - 210.

[SCHNÜLL 2001]

SCHNÜLL, R.: *Grundlagen für die Bemessung von fahrgeometrischen Bewegungsräumen für Nutzfahrzeuge mit mehr als 3,5t zulässigem Gesamtgewicht*. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. (2001) H. 827.

[SCHNÜLL 1981]

SCHNÜLL, R.; HALLER, W.: *Ansätze zur Berücksichtigung Umfeldorientierter Kriterien in den Entwurfsrichtlinien für Knotenpunkte*. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. (1981) H. 328.

[SCHOUTEN 1984]

SCHOUTEN, C. A. M.: *Graphische constructie van rijcurven*. In: Verkeerskunde. (1984) H. 35, S. 292 ff.

[SCHULT 1988]

SCHULT, R.; HOLZWARTH, J.: *Der Flächenbedarf repräsentativer Lastzug- und Sattelzugkombinationen im Straßenverkehr*. In: Straßenverkehrstechnik. (1988) H. 1.

[SEEBER, SCHMITZ 1996]

SEEBER, G.; SCHMITZ, M.: *Methodik der GPS- und DGPS-Messung*. Universität Hannover, Institut für Erdmessung. Hannover: 1996. Internet 2005-03-18 (http://gio.uni-muenster.de/beiträge/ausg96_1/schmitz_meth_gps/iwu-pap3.htm)

[SETRA 1998]

SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes): *Amenagement des Carrefours Interurbains sur les Routes Principales*. Frankreich, 1999.

[STERNBERG 2000]

STERNBERG, H: *Messung von Schleppkurven eines Niederflur-Gelenkbusses mit kinematischem GPS*. Bericht. Universität der Bundeswehr München, Institut für Geodäsie. München: 2000. Unveröffentlicht.

[STERNBERG, NUSSRAINER 2001]

STERNBERG, H; NUSSRAINER, C.: *Global Positioning System (GPS) in der Verkehrsplanung*. In: *tis* (Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau). (12/2001), S. 28 – 34.

[STVZO 2004]

Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2004.

[SCHULT 1988]

SCHULT, R.; HOLZWARTH, J.: *Der Flächenbedarf repräsentativer Lastzug- und Sattelzugkombinationen im Straßenverkehr*. In: *Straßenverkehrstechnik*. (1988) H. 1.

[TENNER 1966]

TENNER, J. E.: *Die graphische Ermittlung der Fahrspurbreite in Kehren mittels Schleppkurven*. In: *Österreichische Ingenieur-Zeitschrift*. (1966) H. 2, S. 69 – 71.

[TÜV 1997]

TÜV Rheinland: *Wegweiser Satellitennavigation*. Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1997.

[VSS 1999]

Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute VSS (Hrsg.): *Schweizer Norm, SN 640 263. Knoten mit Kreisverkehr*. Zürich: 1999.

[WIRTH 2001-1]

WIRTH, W.; u. a.: *Schleppkurven-Symposium 2001*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen und Raumplanung an der Universität der Bundeswehr München. Heft 4. München: 2001.

[WIRTH 2001-2]

WIRTH, W.: *Warum viele Kreisverkehre für Großfahrzeuge zu eng sind*. In: *Tiefbau*. (2001), H 12, S. 844.

[WSD 2004]

Washington State Department of Transportation (WSDOT): *Design Manual (M22-01)*. Internet 2005-03-18
(<http://www.wsdot.wa.gov/fasc/EngineeringPublications/Manuals/DesignManual.pdf>).

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1: Vergleich Konfliktpunkte plangleiche Kreuzung / Kreisverkehrsplatz [Quelle: BOVY, Philippe H., 1991].
- Anlage 2: StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungsordnung), Auszug aus § 32 (Abmessungen von Fahrzeugen und Zügen).
- Anlage 3: Kreisverkehrstypen nach der britischen Vorschrift „Geometric Design of Roundabouts“ [Quelle: HA, 1993].
- Anlage 4: Kreisverkehrsabmessungen nach französischem „Guide Carrefours urbains“ [Quelle: CERTU, 1999].
- Anlage 5: Kreisverkehrstypen nach dem US-Leitfaden „Roundabouts – an informational Guide“ [nach: U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 2000].
- Anlage 6: Zusammenstellung internationaler Festlegungen zu den Entwurfselementen von Kreisverkehrsplätzen.
- Anlage 7: LISP-Programm „Fahren“ zur Darstellung der Fahrzeuggrundrisse im CAD-Programm AutoCAD aus den berechneten Fahrzeug-Eckkoordinaten [Quelle: NAVRATIL 2000].
- Anlage 8: Berechnete Fahrzeug-Eckkoordinaten und GPS-Rohkoordinaten im ASCII-Format.
- Anlage 9: GPS-Kontrollsegment (Master Control Station, Monitorstations) [Quelle: <http://uni-siegen.de/dept/fb10/verm/gps.html>].
- Anlage 10: Auswertergebnisse – Kreisfahrbahnbreite und Breiten von Kreisverkehrszu- und ausfahrt für die jeweiligen Testfahrten.
- Anlage 11: Ergebniszusammenstellung; Breite der Kreisfahrbahn/Einfahrradius (für $b_z = 3,25$ m und $b_z = 3,50$ m).
- Anlage 12: Ergebniszusammenstellung; Breite der Kreisfahrbahn/Ausfahrradius (für $b_A = 3,50$ m und $b_A = 3,75$ m).
- Anlage 13: Bemessungsdiagramm.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Beispiel für Fahrspuren neben der Fahrbahn; hier nachträgliche Fahrbahnverbreiterung mit Rasengittersteinen	8
Abbildung 2:	Kleiner Kreisverkehr gem. EAHV 93 [FGSV 1993]	14
Abbildung 3:	Breite der Kreisfahrbahn in Abhängigkeit vom äußeren Kreisradius [FGSV 1993]	15
Abbildung 4:	Fahrbahnbreite und Außendurchmesser Kleiner Kreisverkehre (nach: [FGSV 1998], Tab. 3)	16
Abbildung 5:	Ablenkung geradeaus fahrender Kfz durch die Kreisinsel und ggf. zusätzlich durch einen gepflasterten Innenring [FGSV 1998]	17
Abbildung 6:	Zusammenfassung der Entwurfselemente für Kleine Kreisverkehrsplätze [FGSV 1998]	19
Abbildung 7:	Minimalwerte für die Entwurfselemente eines Kleinen Kreisverkehrs gem. [FGSV 1998] und zulässige überfahrene Kreisringfläche nach StVZO	20
Abbildung 8:	Typisierung und Anwendungsbereiche der Kreisel [BOVY 1991]	22
Abbildung 9:	Typisierung und allgemeine Merkmale der Kreisel [BOVY 1991].....	23
Abbildung 10:	Projektierungselemente am Kreisel [BOVY 1991]	23
Abbildung 11:	Ausrichtung der Knotenpunktzu- und Ausfahrten [DOT 2000]	27
Abbildung 12:	Maßgebliche Radien zur fahrdynamischen Überprüfung innerhalb des Kreisverkehrs [DOT 2000].....	28
Abbildung 13:	Führungslinie für die fahrdynamische Bemessung [DOT 2000].....	28
Abbildung 14:	Definition der Fahrbahnbreite in der Knotenpunktzufahrt. Links: England (Strecke AB; beachte Linksverkehr); rechts: Deutschland (bZ) [DOT 2000, FGSV 1998]	32
Abbildung 15:	Außendurchmesser der Kreisfahrbahn (Kleine Kreisverkehre, innerorts) – Vergleich internationaler Standards	33
Abbildung 16:	Schweizerische Definition der Ausrundungen in den Ein- und Ausfahrten am Kreisverkehr [BOVY 1991].....	36
Abbildung 17:	Traktrix, auch als Huygens-Traktrix bezeichnet [Bild: Wikipedia Internet-Enzyklopädie 2005]	39
Abbildung 18:	Verallgemeinerte Traktrix: allgemeine Radiodrome [Bild: Wikipedia Internet-Enzyklopädie 2005]	40

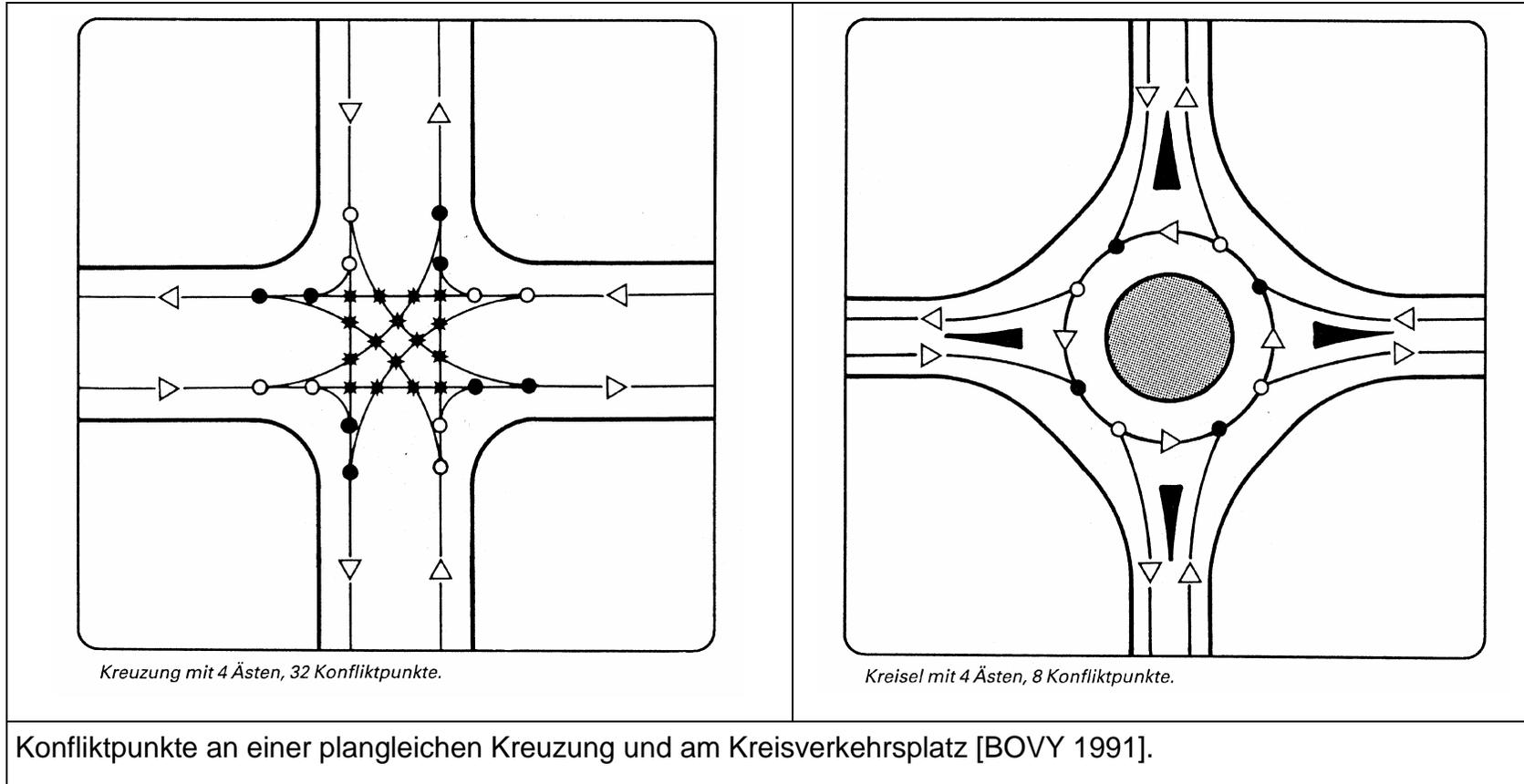
Abbildung 19: Beispiel gedruckter Schleppkurven [FGSV 2001]	41
Abbildung 20: Verfahren nach GUHLMANN [MESCHIK 1992].....	45
Abbildung 21: Modellfahrzeug nach MARX [MARX 1975]	50
Abbildung 22: Modellfahrzeug nach RETZKO [RETZKO 1972].....	50
Abbildung 23: Markierung durch auslaufende Farbe. Links: Befestigung des Farbbehälters an der rechten vorderen Fahrzeugecke. Rechts: Ergebnisdarstellung auf dem Untergrund (weiße Linien) [BONZ, SCHMID 1980].....	52
Abbildung 24: Motographische Messung aus der Kanzel eines Hubsteigers (Dauerbelichtung, Negativ) [MARX, MESCHIK 1990].....	53
Abbildung 25: Versuchsfahrt mit Videoerfassung aus Kamerasicht [SCHNÜLL 2001]	54
Abbildung 26: GPS-Empfänger auf dem Dach eines Versuchsfahrzeuges mit statischem Referenzempfänger (im Vordergrund) [Foto: HOERPEL, UniBwM].....	54
Abbildung 27: Arten der Ortung [MANSFELD 2004].....	55
Abbildung 28: Standortbestimmung im Raum mit Hilfe von 3 Satelliten [MANSFELD 2004].....	56
Abbildung 29: Orten durch Messung der Entfernungsdifferenz [MANSFELD 2004]	57
Abbildung 30: Bestimmung der Entfernungsänderung in der Zeit (t_1-t_2) [MANSFELD 2004].....	58
Abbildung 31: Konzeption von Satellitenortungssystemen	59
Abbildung 32: Erhebungswinkel [MANSFELD 2004]	65
Abbildung 33: Direkte und reflektierte Welle [MANSFELD 2004].....	67
Abbildung 34: Ortungsprinzip und Grundkonzeption von GPS [MANSFELD 2004]	68
Abbildung 35: Testprogramm der Versuchsfahrten im Jahr 2000: zusätzlich zu den FGSV-Schleppkurven (Darstellungen a) bis d)) wurde je eine rechtwinkelige Einmündungssituation mit den Ausrundungsradien 4 m und 6 m überprüft (Darstellungen e) und f))	70
Abbildung 36: Versuchsfahrten mit Niederflur-Gelenkbus im Jahr 2000.....	71
Abbildung 37: Darstellung der Grundrissprojektion aller Fahrzeugstandorte zu den jeweiligen Messzeitpunkten	72
Abbildung 38: Echtzeit-Darstellung einer Messfahrt mit einem Gelenkbus [Quelle: Programm DRIVE, UniBw-München, 2001].....	73

Abbildung 39: Luftbild des Universitätsgeländes der UniBw-München mit Darstellung der Testfläche	76
Abbildung 40: Lage des Kreisverkehrsplatzes nördlich von Aschheim	76
Abbildung 41: Luftbildaufnahme des Kreisverkehrsplatzes bei Aschheim	77
Abbildung 42: Testfahrzeug „15-m-Bus“	78
Abbildung 43: Testfahrzeug „Sattelzug“	78
Abbildung 44: Systemskizze für die Berechnung der Fahrzeug-Eckkoordinaten aus GPS-Empfängerkoordinaten	82
Abbildung 45: Markierungen auf dem Versuchsgelände mit Farbe und Holzklötzen	96
Abbildung 46: Testprogramm „Geradeausfahrt“ und „Linksabbiegen“ auf dem Versuchsgelände mit entsprechender Variation der Mittelinselradien	97
Abbildung 47: Beispiel einer ausgewerteten Testfahrt mit einem Omnibus: deutlich erkennbar ist die enge Orientierung an den inneren Fahrbahngrenzungen	98
Abbildung 48: Bereich der Kreisfahrt per Definition zur Bestimmung der erforderlichen Kreisfahrbahnbreite am Beispiel „Geradeausdurchfahrt“	100
Abbildung 49: Ermittlung der Kreisverkehrselemente (Außendurchmesser der Kreisfahrbahn, Ausrundungsradien in Knotenpunktz- und -ausfahrt)	101
Abbildung 50: Auswertergebnisse für Testfahrten mit Bus und Sattelzug durch einen Kreisverkehr mit Innenradius 7,25 m (Beispiel)	102
Abbildung 51: Definition bestimmender Punkte, Linien und Winkel für die Transformation der Leitlinie in das Polarkoordinatensystem	109
Abbildung 52: Vektorprodukt	112
Abbildung 53: Darstellung von Leitlinien im Polarkoordinatensystem (Auswahl) ..	113
Abbildung 54: Breite der Kreisfahrbahn gem. Merkblatt [FGSV 1998], aus den Fahrversuchen (gerundete Werte) und aus der Näherungsfunktion (Gleichung 7.2-12)	116
Abbildung 55: Abmessungen des Kreisverkehrs nördlich von Aschheim.....	116

Abbildung 56: Potenzielle Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb des markierten Bereiches kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um	119
Abbildung 57: Polynomische Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb der markierten Bereiche kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um	119
Abbildung 58: Exponentielle Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt. Innerhalb der markierten Bereiche kehrt sich bei diesem Regressionstyp der Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Ausrundungsradius um	120
Abbildung 59: Logarithmische Regressionskurven am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt	120
Abbildung 60: Lineare Regression am Beispiel der Kreisverkehrszufahrt.....	121
Abbildung 61: Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt bei einer Einfahrtbreite von 3,25 m (unverzerrtes Diagramm).....	123
Abbildung 62: Ausrundungsradien der Knotenpunktzufahrt bei einer Einfahrtbreite von 3,50 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)	123
Abbildung 63: Ausfahradius/Breite der Kreisfahrbahn (für $b_A = 3,50$ m und $b_A = 3,75$ m) mit Darstellung der zugehörigen Regressionsgeraden	125
Abbildung 64: Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt bei einer Breite des Ausfahrtquerschnittes von 3,50 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)	125
Abbildung 65: Ausrundungsradien der Knotenpunktausfahrt bei einer Breite des Ausfahrtquerschnittes von 3,75 m in Abhängigkeit von der Breite der Kreisfahrbahn (unverzerrtes Diagramm)	126
Abbildung 66: Theoretische Mehrbreite der Kreisfahrbahn wegen sehr großer Ausrundungsradien zweier benachbarter Kreisverkehrszu- bzw. Ausfahrten (Prinzipiskizze; übertriebene Darstellung)	127
Abbildung 67: Bemessungsdiagramm für Kreisverkehrs-Hauptabmessungen.....	128

Anlagenteil

Anlage 1: Vergleich Konfliktpunkte plangleiche Kreuzung / Kreisverkehrsplatz



Anlage 2: StVZO (Straßenverkehrs-Zulassungsordnung), Auszug aus § 32

[Quelle: <http://bundesrecht.juris.de/>]

StVZO § 32 Abmessungen von Fahrzeugen und Zügen

(1) Bei Kraftfahrzeugen und Anhängern einschließlich mitgeführter austauschbarer Ladungsträger (§ 42 Abs. 3) darf die höchstzulässige Breite über alles - ausgenommen bei Schneeräumgeräten und Winterdienstfahrzeugen - folgende Maße nicht überschreiten:

1. allgemein 2,55 m,

2. bei land- oder forstwirtschaftlichen Arbeitsgeräten und bei Zugmaschinen und Sonderfahrzeugen mit auswechselbaren land- oder forstwirtschaftlichen Anbaugeräten sowie bei Fahrzeugen mit angebauten Geräten für die Straßenunterhaltung 3,00 m,
3. bei Anhängern hinter Krafträdern 1,00 m,
4. bei festen oder abnehmbaren Aufbauten von klimatisierten Fahrzeugen, die für die Beförderung von Gütern in temperaturgeführtem Zustand ausgerüstet sind und deren Seitenwände einschließlich Wärmedämmung mindestens 45 mm dick sind 2,60 m,
5. bei Personenkraftwagen 2,50 m.
Die Fahrzeugbreite ist nach der ISO-Norm 612-1978, Definition Nummer 6.2 zu ermitteln. Abweichend von dieser Norm sind bei der Messung der Fahrzeugbreite die folgenden Einrichtungen nicht zu berücksichtigen:
 - Befestigungs- und Schutzeinrichtungen für Zollplomben,
 - Einrichtungen zur Sicherung der Plane und Schutzvorrichtungen hierfür,
 - vorstehende flexible Teile eines Spritzschutzsystems im Sinne der Richtlinie 91/226/EWG des Rates vom 27. März 1991 (ABl. EG Nr. L 103 S. 5),
 - lichttechnische Einrichtungen,
 - Ladebrücken in Fahrtstellung, Hubladebühnen und vergleichbare Einrichtungen in Fahrtstellung, sofern sie nicht mehr als 10 mm seitlich über das Fahrzeug hinausragen und die nach vorne oder nach hinten liegenden Ecken der Ladebrücken mit einem Radius von mindestens 5 mm abgerundet sind; die Kanten sind mit einem Radius von mindestens 2,5 mm abzurunden,
 - Spiegel und andere Systeme für indirekte Sicht,
 - Reifenschadensanzeiger
 - Reifendruckanzeiger,
 - ausziehbare oder ausklappbare Stufen in Fahrtstellung und
 - die über dem Aufstandspunkt befindliche Ausbauchung der Reifenwände.Gemessen wird bei geschlossenen Türen und Fenstern und bei Geradeausstellung der Räder.

(2) Bei Kraftfahrzeugen und Anhängern einschließlich mitgeführter austauschbarer Ladungsträger (§ 42 Abs. 3) darf die höchstzulässige Höhe über alles folgendes Maß nicht überschreiten: 4,00 m. Die Fahrzeughöhe ist nach der ISO-Norm 612-1978, Definition Nummer 6.3 zu ermitteln. Abweichend von dieser Norm sind bei der Messung der Fahrzeughöhe die folgenden Einrichtungen nicht zu berücksichtigen:

- nachgiebige Antennen und

- Scheren- oder Stangenstromabnehmer in gehobener Stellung.

Bei Fahrzeugen mit Achshubeinrichtung ist die Auswirkung dieser Einrichtung zu berücksichtigen.

(3) Bei Kraftfahrzeugen und Anhängern einschließlich mitgeführter austauschbarer Ladungsträger und aller im Betrieb mitgeführter Ausrüstungsteile (§ 42 Abs. 3) darf die höchstzulässige Länge über alles folgende Maße nicht überschreiten:

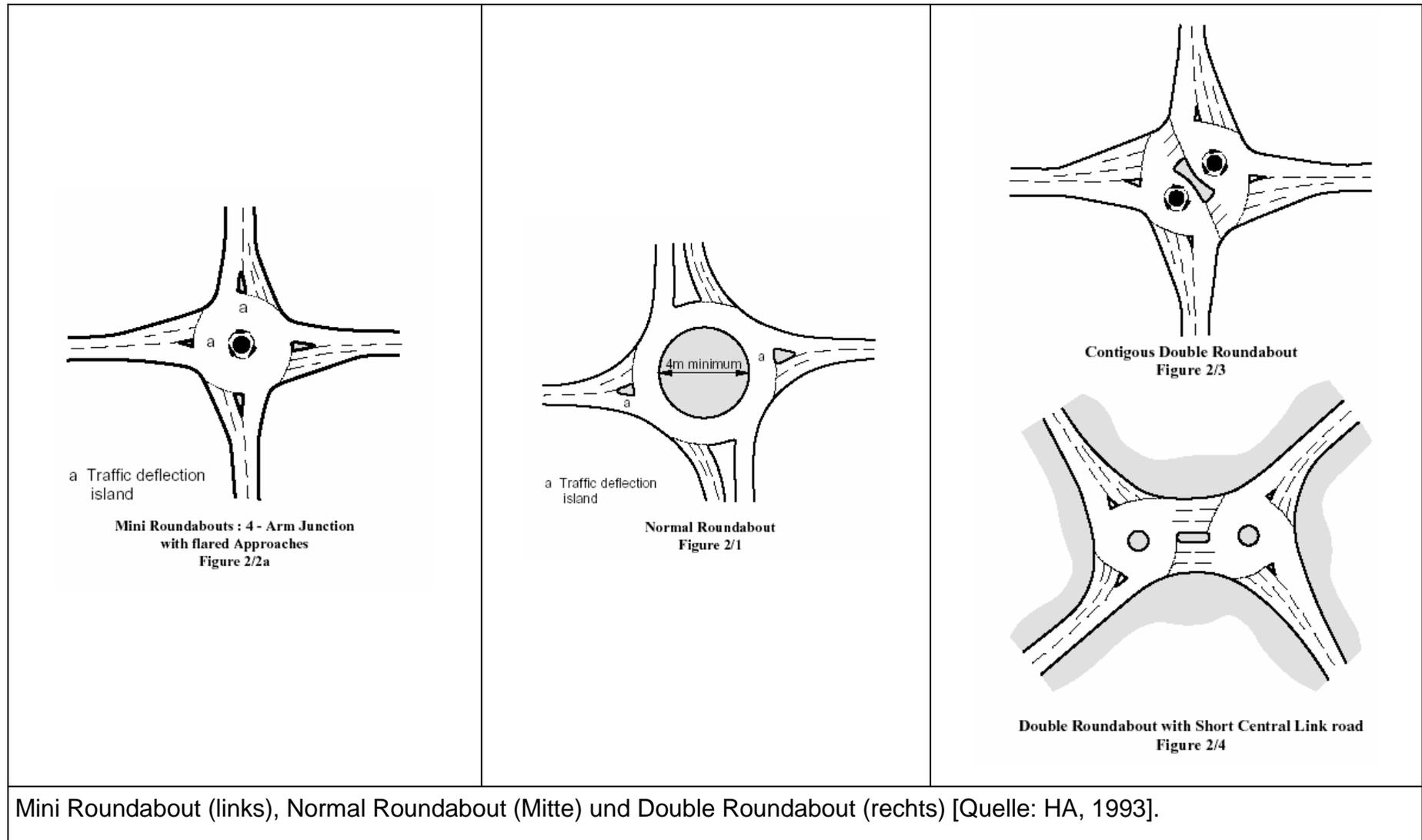
1. bei Kraftfahrzeugen und Anhängern
 - ausgenommen Kraftomnibusse und Sattelanhänger - 12,00 m,
2. bei zweiachsigen Kraftomnibussen
 - einschließlich abnehmbarer Zubeihörteile - 13,50 m,
3. bei Kraftomnibussen mit mehr als zwei Achsen
 - einschließlich abnehmbarer Zubeihörteile - 15,00 m,
4. bei Kraftomnibussen, die als Gelenkfahrzeug ausgebildet sind (Kraftfahrzeuge, deren Nutzfläche durch ein Gelenk unterteilt ist, bei denen der angelenkte Teil jedoch kein selbstständiges Fahrzeug darstellt) 18,75 m.

(4) Bei Fahrzeugkombinationen einschließlich mitgeführter austauschbarer Ladungsträger und aller im Betrieb mitgeführter Ausrüstungsteile (§ 42 Abs. 3) darf die höchstzulässige Länge, unter Beachtung der Vorschriften in Absatz 3 Nr. 1, folgende Maße nicht überschreiten:

1. bei Sattelkraftfahrzeugen (Sattelzugmaschine und Sattelanhänger) und Fahrzeugkombinationen (Zügen) nach Art eines Sattelkraftfahrzeugs ausgenommen Sattelkraftfahrzeuge nach Nummer 2 - 15,50 m,
2. bei Sattelkraftfahrzeugen (Sattelzugmaschine und Sattelanhänger), wenn die höchstzulässigen Teillängen des Sattelanhängers
 - a) Achse Zugsattelzapfen bis zur hinteren Begrenzung 12,00 m und
 - b) vorderer Überhangradius 2,04 mnicht überschritten werden, 16,50 m,
3. bei Zügen (Kraftfahrzeuge mit einem oder zwei Anhängern) - ausgenommen Züge nach Nummer 4 - 18,00 m,
4. bei Zügen, die aus einem Lastkraftwagen und einem Anhänger zur Güterbeförderung bestehen, 18,75 m. Dabei dürfen die höchstzulässigen Teillängen folgende Maße nicht überschreiten:
 - a) größter Abstand zwischen dem vordersten äußeren Punkt der Ladefläche hinter dem Führerhaus des Lastkraftwagens und dem hintersten äußeren Punkt der Ladefläche des Anhängers der Fahrzeugkombination, abzüglich des Abstands zwischen der hinteren Begrenzung des Kraftfahrzeugs und der vorderen Begrenzung des Anhängers 15,65 m und

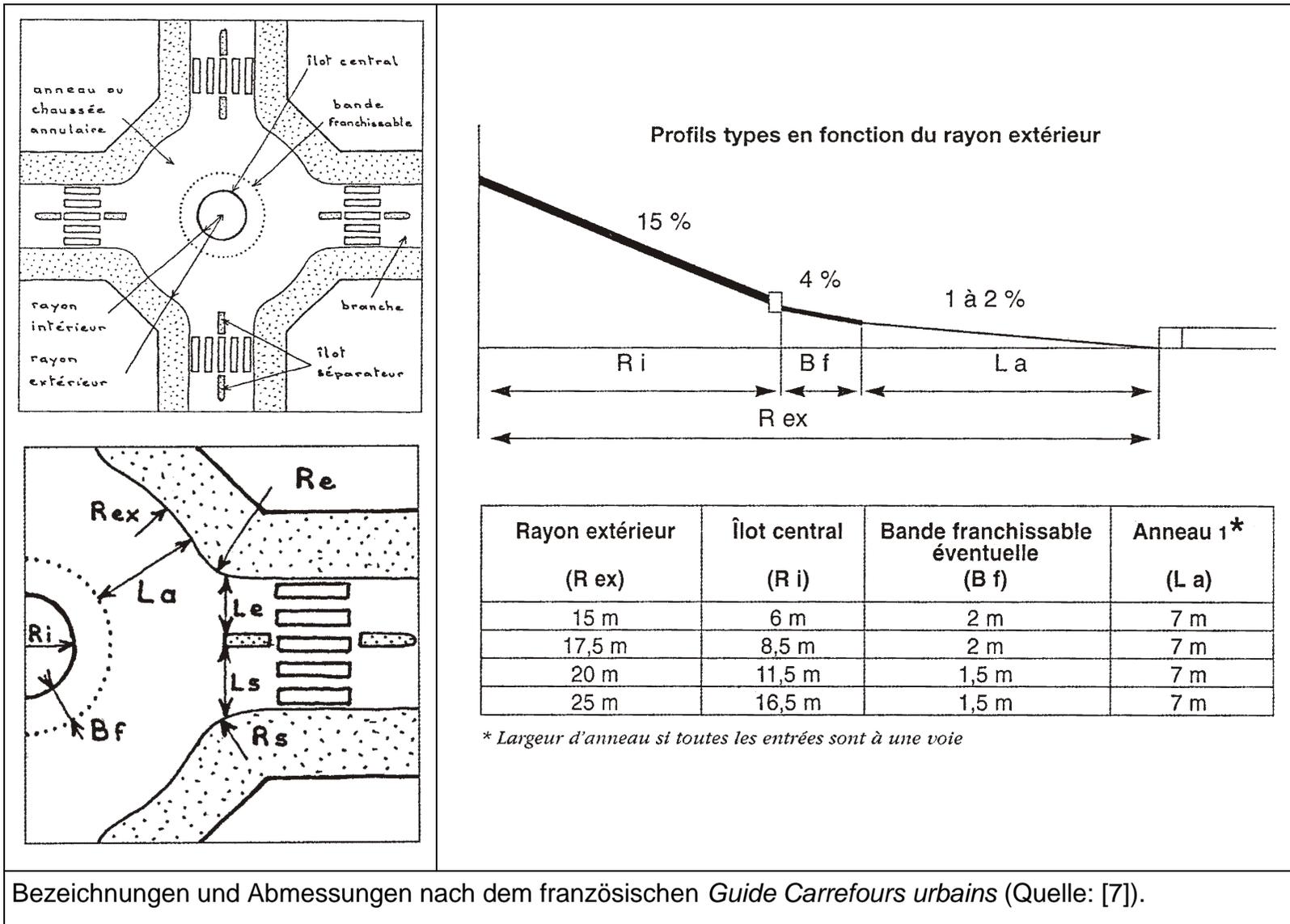
...

Anlage 3: Kreisverkehrstypen nach britischer Vorschrift „Geometric Design of Roundabouts“



Mini Roundabout (links), Normal Roundabout (Mitte) und Double Roundabout (rechts) [Quelle: HA, 1993].

Anlage 4: Kreisverkehrsabmessungen nach französischem „Guide Carrefours urbains“



**Anlage 5: Kreisverkehrstypen nach dem US-Leitfaden
„Roundabouts – an informational Guide“**

		Max. Anzahl der Fahrspuren in den Zufahrten	empfohlene Maximaleschwindigkeit in den Zufahrten	typische Außendurchmesser	typische Verkehrsbelastung [veh/day]
Mini-Roundabout		1	25 km/h	13 m bis 25 m	10.000
Urban Compact		1	25 km/h	25 m bis 30 m	15.000
Urban Single-Lane		1	35 km/h	30 m bis 40 m	20.000
Urban Double-Lane		2	40 km/h	45 m bis 55 m	-
Rural Single-Lane		1	40 km/h	35 m bis 40 m	20.000
Rural Double-Lane		2	50 km/h	55 m bis 60 m	-

Kreisverkehrstypen in den USA (nach: [DOT 2000]).

Anlage 6: Internationale Festlegungen zu den Entwurfs-elementen von Kreisverkehren (kleiner Kreisverkehrsplatz; innerorts) - Zusammenstellung

Land	Außendurchmesser der Kreisfahrbahn [m]		Breite der Kreisfahrbahn [m]		Fahrtstreifenbreite in der Knotenpunktzufahrt [m]		Fahrtstreifenbreite in der Knotenpunktausfahrt [m]		Ausrundungshalbmesser in der Knotenpunktzufahrt [m]		Ausrundungshalbmesser in der Knotenpunktausfahrt [m]	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
Deutschland	26,00	35,00	6,50 ¹⁾	8,00	3,25	3,50	3,50	3,75	10,00	12,00	12,00	14,00
Schweiz	26,00	35,00	5,50	7,00	3,00	3,50	3,50	4,50	10,00	-	12,00	-
Österreich	25,00	35,00	4,50	7,50	-	-	-	-	3)	3)	3)	3)
Großbritannien	28,00	36,00	2)	15,00	3,00	10,50	7,00	7,50	6,00	20,00	40,00	100,00
Frankreich	30,00	50,00	8,50	9,00	3,00	4,00	4,00	5,00	8,00	15,00	15,00	-
USA	25,00	30,00	3)	3)	4,30	4,90	-	-	10,00	30,00	15,00	-
Niederlande	24,00	40,00	5,50	6,00	4,00	-	4,50	-	10,50	12,75	16,00	18,00
Norwegen	26,00	30,00	10,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polen	26,00	40,00	6,50	8,50	3,25	3,75	4,00	4,50	10,00	12,00	10,00	17,50

Alle Angaben für "kleine Kreisverkehre", innerorts

1) Ableitung aus Diagramm; Außendurchmesser 35 m

2) mind. Breite der Knotenpunktzufahrt und nachzuweisen durch Schleppkurven

3) mit Schleppkurven nachzuweisen

**Anlage 7: LISP-Programm „Fahren“ zur Darstellung der Fahrzeuggrundrisse
im CAD-Programm AutoCAD aus den berechneten Fahrzeug-
Eckkoordinaten**

[Quelle: NAVRATIL, 2000]

```
.*****  
,  
:** Programm FAHREN.LSP  
:** Plotten zum Einlesen und Darstellen von Koordinaten  
.*****  
,  
:** Autor: NAVRATIL Heinz  
:** Stand: 17.11.2000  
:** Ver.: 1.0 -- AutoCAD 2000  
:** mail.: hnavratil@kgh.kaba.com  
.*****  
,
```

```
:** Funktion C:FAHREN  
:** stellt die eingelesenen Punkt dar  
(defun C:fahren ( / pl step cmde p1 p2 p3 p4 p5 p6 p7 p8 cl)  
  (if (setq pl (lies_punkte))  
    (progn  
      (chklay "vorn")  
      (chklay "hinten")  
      (chklay "balg")  
      (setq step 1)  
      (setq cmde (getvar "CMDECHO"))  
      (setq cl (getvar "CLAYER"))  
      (setvar "CMDECHO" 0)  
      (while (and (setq p1 (nth (- (* step 8) 8) pl))  
                  (setq p2 (nth (- (* step 8) 7) pl))  
                  (setq p3 (nth (- (* step 8) 6) pl))  
                  (setq p4 (nth (- (* step 8) 5) pl))  
                  (setq p5 (nth (- (* step 8) 4) pl))  
                  (setq p6 (nth (- (* step 8) 3) pl))  
                  (setq p7 (nth (- (* step 8) 2) pl))  
                  (setq p8 (nth (- (* step 8) 1) pl))  
                )  
      (princ (strcat "Zeichne Schritt " (itoa step) "\n"))  
      (setvar "CLAYER" "hinten")
```

```

(command "_PLINE" (cdr p1) (cdr p2) (cdr p3) (cdr p4) (cdr p1) "")
  (setvar "CLAYER" "vorn")
  (command "_PLINE" (cdr p5) (cdr p6) (cdr p7) (cdr p8) (cdr p5) "")
  (setvar "CLAYER" "balg")
  (command "_PLINE" (cdr p5) (cdr p3) (cdr p4)(cdr p6) (cdr p5) "")
  (setq step (1+ step))
)
(setvar "CMDECHO" cmde)
(setvar "CLAYER" cl)
)
)
'DANKE
)

```

```

;** Funktion LIES_PUNKTE
;** liest die Punkteliste aus einer zu wählenden Datei
;** und gibt eine Liste mit den Punkten zurück
(defun lies_punkte( / m datei pl)
  (if (setq datei (getfiled "Punktdatei einlesen" "C:/" "" 0))
    (progn
      (setq m (open datei "r"))
      (setq pl nil i 0)
      (while (setq z (read-line m))
        (setq pl (cons (split_pkt z) pl))
      )
      (close m)
    )
  )
  pl
)

```

```

;** Funktion SPLIT_PKT
;** filtert die Punktnummer und die X-Y Koordinaten aus der
;** eingelesenen Textzeile
(defun split_pkt(z / pnr x y subl)
  (setq z (triml z))
  (setq pnr "" x "" y "")
  (while (and (/= (substr z 1 1) "")
    (/= (substr z 1 1) " "))
  )

```

```

)
(setq pnr (strcat pnr (substr z 1 1)))
(setq z (substr z 2))
)
(setq z (triml z))
(while (and (/= (substr z 1 1) "")
            (/= (substr z 1 1) " "))
)
(setq x (strcat x (substr z 1 1)))
(setq z (substr z 2))
)
(setq z (triml z))
(while (and (/= (substr z 1 1) "")
            (/= (substr z 1 1) " "))
)
(setq y (strcat y (substr z 1 1)))
(setq z (substr z 2))
)
(setq subl (list (atof x) (atof y)))
(setq subl (cons (atoi pnr) subl))
)

```

```

; ** Funtkion TRIML

```

```

; ** entfernt führende Leerzeichen

```

```

(defun triml(str /)
  (while (and (/= (substr str 1 1) "")
              (= (substr str 1 1) " "))
)
  (setq str (substr str 2))
)
)

```

```

; ** -----
; ** Layer überprüfen und setzen
; ** -----

```

```

(defun CHKLAY(LAY /)
  (setq lay (strcase lay))
  (setq layerlist '(("VORN" 1 "CONTINUOUS")
                  ("HINTEN" 2 "CONTINUOUS")

```

```

        ("BALG" 3 "CONTINUOUS")
    )
)

;* Wenn Layer noch nicht definiert ist
(if (not (tblsearch "LAYER" LAY))
    (progn
        ;* Dann neuen Layer mit zugeordneter Farbe und Linientyp erzeugen
        (command "_LAYER" "_MAKE" LAY "_COLOR" (cadr (assoc LAY layerlist)) LAY "")
        (print (caddr (assoc LAY layerlist)))
        (command "_LAYER" "_LT" (caddr (assoc LAY layerlist)) LAY "")
    )
    (progn
        ;* Wenn die Farbe des Layers nicht stimmt dann Farbe ändern
        (if (/= (cdr (assoc 62 (tblsearch "LAYER" LAY))) (cadr (assoc LAY layerlist)))
            (command "_LAYER" "_COLOR" (cadr (assoc LAY layerlist)) LAY "")
        )
        ;* Wenn der Linientyp des Layers nicht stimmt dann Linientyp ändern
        (if (/= (cdr (assoc 6 (tblsearch "LAYER" LAY))) (caddr (assoc LAY layerlist)))
            (command "_LAYER" "_LT" (caddr (assoc LAY layerlist)) LAY "")
        )
    )
)
)
;* Wenn angeforderter Layer nicht der aktuelle Layer ist
(if (/= (getvar "CLAYER") LAY)
    ;* Dann Layer setzen
    (setvar "CLAYER" LAY)
)
)

```

**Anlage 8: Berechnete Fahrzeug-Eckkoordinaten und GPS-Rohkoordinaten im ASCII-Format
(Beispiel: Auszug aus einer Fahrt mit dem 15-m-Bus)**

07:39:16.80, 4473176,887 , 5327164,615 , 4473177,381 , 5327167,091 , 4473191,772 , 5327164,219 , 4473191,278 , 5327161,743
,GPS-Roh: 5327164,768 , 4473177,579 , 5327164,044 , 4473191,268 ,

07:39:16.80, 4473176,887 , 5327164,615 , 4473177,381 , 5327167,091 , 4473191,772 , 5327164,219 , 4473191,278 , 5327161,743
,GPS-Roh: 5327164,768 , 4473177,579 , 5327164,044 , 4473191,268 ,

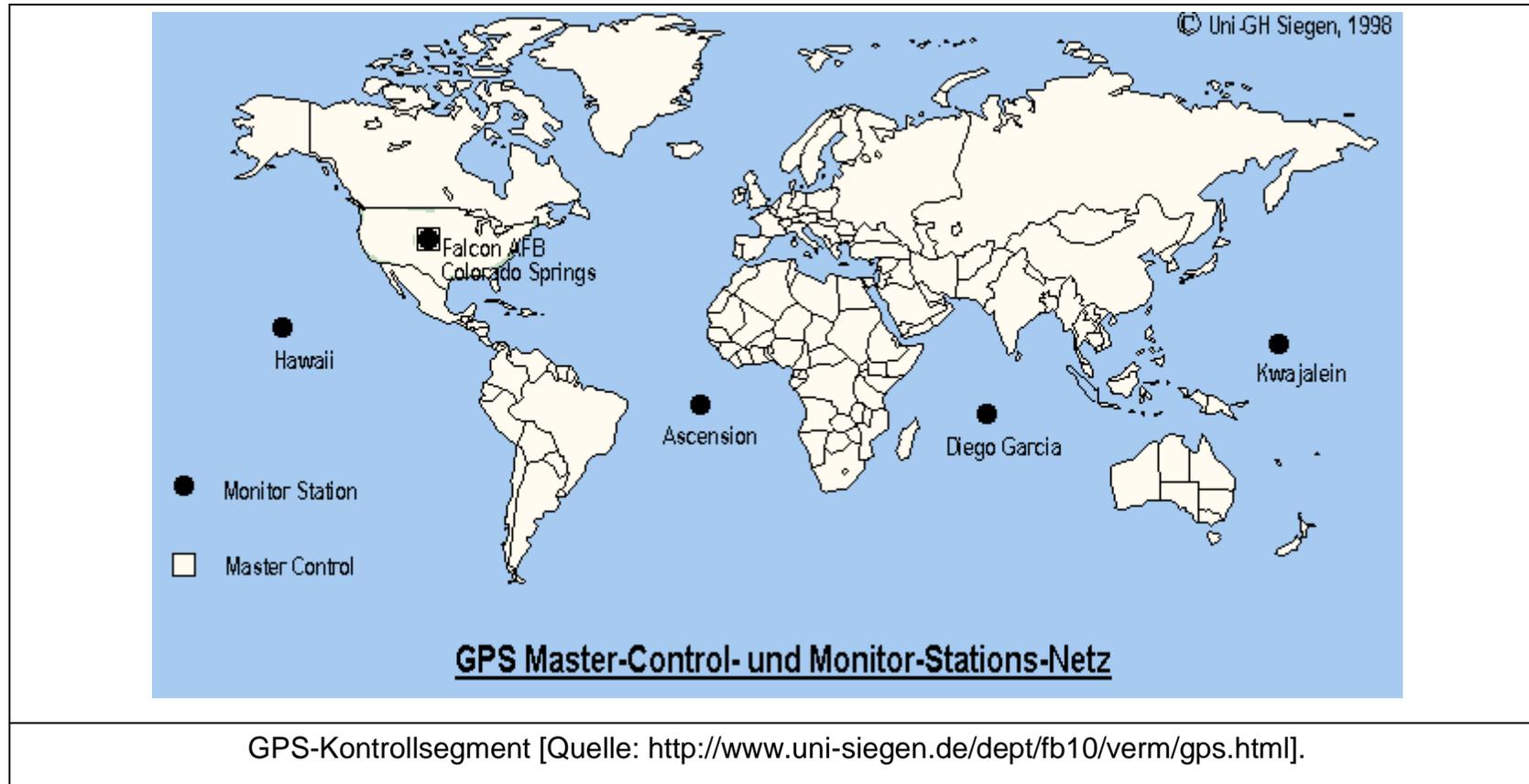
07:39:16.80, 4473176,887 , 5327164,615 , 4473177,381 , 5327167,091 , 4473191,772 , 5327164,219 , 4473191,278 , 5327161,743
,GPS-Roh: 5327164,768 , 4473177,579 , 5327164,044 , 4473191,268 ,

07:39:16.80, 4473176,887 , 5327164,615 , 4473177,381 , 5327167,091 , 4473191,772 , 5327164,219 , 4473191,278 , 5327161,743
,GPS-Roh: 5327164,768 , 4473177,579 , 5327164,044 , 4473191,268 ,

07:39:17.20, 4473176,886 , 5327164,612 , 4473177,38 , 5327167,088 , 4473191,771 , 5327164,217 , 4473191,277 , 5327161,741
,GPS-Roh: 5327164,765 , 4473177,579 , 5327164,042 , 4473191,267 ,

07:39:17.20, 4473176,886 , 5327164,612 , 4473177,38 , 5327167,088 , 4473191,771 , 5327164,217 , 4473191,277 , 5327161,741
,GPS-Roh: 5327164,765 , 4473177,579 , 5327164,042 , 4473191,267 ,

Anlage 9: GPS-Kontrollsegment (Master Control Station, Monitorstations)



Anlage 10: Auswertergebnisse – Kreisfahrbahnbreite und Breiten von Kreisverkehrszu- und ausfahrt für die jeweiligen Testfahrten

	Innenradius	Breite der Kreisfahrbahn		Rz (bz=3,25m)		Rz (bz=3,50m)		RA (bA=3,50m)		RA (bA=3,75m)	
		Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel
		5m									
durchfahrener Winkel	180°	5,86	5,94	18,00	21,00	16,00	20,00	16,00	14,00	14,00	12,00
		6,06	6,76	14,00	10,00	12,00	8,00	22,00	14,00	20,00	12,00
		6,03	7,24	14,00	8,00	12,00	6,00	22,00	11,00	20,00	7,00
		6,34	6,80	8,00	8,00	6,00	7,00	24,00	11,00	22,00	8,00
		6,58	7,27	6,00	5,00	5,00	3,00	16,00	14,00	14,00	11,00
	-	6,61	-	7,00	-	6,00	-	9,00	-	-	6,00
	270°	8,46	7,19	1,00	9,00	1,00	8,00	8,00	14,00	5,00	12,00
		8,91	7,58	1,00	8,00	1,00	6,00	5,00	18,00	3,00	17,00
		7,56	7,08	2,00	9,00	1,00	7,00	10,00	16,00	7,00	14,00
		7,74	8,24	2,00	4,00	1,00	3,00	8,00	12,00	7,00	10,00
7,62		8,00	3,00	3,00	2,00	-	10,00	-	8,00	3,00	
-	8,38	-	2,00	-	2,00	-	5,00	-	-	3,00	

	Innenradius	Breite d. Kreisfahrbahn B		Rz (bz=3,25m)		Rz (bz=3,50m)		RA (bA=3,50m)		RA (bA=3,75m)	
		Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel
		6m									
durchfahrener Winkel	180°	6,23	6,42	8,00	11,00	7,00	10,00	14,00	11,00	13,00	7,00
		6,57	6,19	5,00	11,00	4,00	10,00	14,00	13,00	12,00	11,00
		7,20	6,82	5,00	8,00	4,00	6,00	17,00	11,00	16,00	8,00
		6,27	6,95	11,00	6,00	10,00	4,00	8,00	19,00	7,00	14,00
		-	6,52	-	8,00	-	6,00	-	16,00	-	-
	270°	7,88	8,18	2,00	5,00	1,00	3,00	8,00	8,00	5,00	5,00
		8,11	8,18	2,00	5,00	1,00	4,00	8,00	8,00	5,00	4,00
		7,52	6,87	5,00	11,00	2,00	7,00	4,00	15,00	2,00	13,00
		6,82	7,84	5,00	4,00	4,00	2,00	18,00	11,00	16,00	8,00
		7,98	7,87	1,00	6,00	1,00	3,00	4,00	14,00	2,00	11,00
7,59	-	4,00	-	3,00	-	3,00	-	1,00	-		

	Innenradius	Breite d. Kreisfahrbahn B		Rz (bz=3,25m)		Rz (bz=3,50m)		RA (bA=3,50m)		RA (bA=3,75m)	
		Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel
		7,25m									
durchfahrener Winkel	180°	6,15	6,42	7,00	10,00	6,00	9,00	19,00	11,00	18,00	8,00
		5,92	6,13	10,00	11,00	9,00	10,00	12,00	14,00	8,00	10,00
		5,55	5,87	27,00	14,00	26,00	12,00	11,00	15,00	7,00	12,00
		5,71	6,03	17,00	9,00	15,00	8,00	13,00	16,00	9,00	12,00
		5,38	6,44	26,00	8,00	24,00	6,00	16,00	20,00	14,00	15,00
	270°	7,03	7,65	5,00	6,00	4,00	4,00	8,00	11,00	5,00	8,00
		6,87	6,52	6,00	10,00	4,00	8,00	8,00	17,00	5,00	16,00
		7,24	7,21	5,00	7,00	1,00	5,00	8,00	12,00	5,00	9,00
		6,68	7,11	5,00	6,00	4,00	5,00	9,00	13,00	6,00	11,00
		-	7,42	-	5,00	-	3,00	-	7,00	-	-

	Innenradius	Breite d. Kreisfahrbahn B		Rz (bz=3,25m)		Rz (bz=3,50m)		RA (bA=3,50m)		RA (bA=3,75m)	
		Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel	Bus	Sattel
		9,25m									
durchfahrener Winkel	180°	5,54	6,10	8,00	11,00	7,00	10,00	20,00	12,00	18,00	9,00
		5,30	6,02	21,00	11,00	20,00	10,00	18,00	20,00	17,00	15,00
		6,20	5,84	8,00	12,00	7,00	11,00	10,00	14,00	7,00	12,00
		5,65	6,87	16,00	15,00	14,00	13,00	14,00	15,00	10,00	12,00
		5,36	6,90	14,00	8,00	13,00	6,00	12,00	15,00	10,00	10,00
	5,56	-	15,00	-	14,00	-	10,00	-	7,00	-	
	270°	6,18	6,17	7,00	11,00	6,00	10,00	8,00	15,00	6,00	12,00
		6,56	6,17	5,00	10,00	4,00	9,00	9,00	16,00	7,00	14,00
		6,39	6,28	7,00	12,00	6,00	10,00	10,00	14,00	7,00	12,00
		5,93	7,33	9,00	8,00	8,00	6,00	9,00	10,00	7,00	8,00
6,60		7,29	6,00	8,00	5,00	6,00	6,00	12,00	4,00	9,00	
6,37	-	7,00	-	6,00	-	8,00	-	6,00	-		

Anlage 11: Ergebniszusammenstellung

Breite der Kreisfahrbahn/Einfahrradius (für $b_z = 3,25$ m und $b_z = 3,50$ m)

Fahrtbezeichnung	„Fahrtrichtung“	Innenradius [m]	Aussenradius [m]	Aussendurchmesser [m]	Breite der Kreisfahrbahn [m]	Einfahrradius [m] für $b_z=3,25$ m	Einfahrradius [m] für $b_z=3,5$ m
	(Vorgabe)	(Ergebnis)					
bus_kreisel_5m_180_kriz2	„Geradeaus“	5	10,86	21,72	5,86	18	16
bus_kreisel_5m_180_nus1		5	11,06	22,12	6,06	14	12
bus_kreisel_5m_180_nus2		5	11,03	22,06	6,03	14	12
bus_kreisel_5m_180_nus3		5	11,34	22,68	6,34	8	6
bus_kreisel_5m_180_nus4		5	11,58	23,16	6,58	6	5
bus_kreisel_5m_270_kriz1	„Linksabbieger“	5	13,46	26,92	8,46	1	1
bus_kreisel_5m_270_kriz2		5	13,91	27,82	8,91	1	1
bus_kreisel_5m_270_nus1		5	12,56	25,12	7,56	2	1
bus_kreisel_5m_270_nus3		5	12,74	25,48	7,74	2	1
bus_kreisel_5m_270_nus4		5	12,62	25,24	7,62	3	2
bus_kreisel_6m_180_kriz1	„Geradeaus“	6	12,23	24,46	6,23	8	7
bus_kreisel_6m_180_kriz2		6	12,57	25,14	6,57	5	4
bus_kreisel_6m_180_nus1		6	13,2	26,4	7,2	5	4
bus_kreisel_6m_180_nus4		6	12,27	24,54	6,27	11	10
bus_kreisel_6m_270_kriz1	„Linksabbieger“	6	13,88	27,76	7,88	2	1
bus_kreisel_6m_270_kriz2		6	14,11	28,22	8,11	2	1
bus_kreisel_6m_270_nus1		6	13,52	27,04	7,52	5	2
bus_kreisel_6m_270_nus2		6	12,82	25,64	6,82	5	4

bus_kreisel_6m_270_nus3		6	13,98	27,96	7,98	1	1
bus_kreisel_6m_270_nus4		6	13,59	27,18	7,59	4	3
bus_kreisel_7m_180_kriz1	„Geradeaus“	7,25	13,4	26,8	6,15	7	6
bus_kreisel_7m_180_kriz2		7,25	13,17	26,34	5,92	10	9
bus_kreisel_7m_180_nus1		7,25	12,8	25,6	5,55	27	26
bus_kreisel_7m_180_nus2		7,25	12,96	25,92	5,71	17	15
bus_kreisel_7m_180_nus3		7,25	12,63	25,26	5,38	26	24
bus_kreisel_7m_270_nus1		„Linksabbieger“	7,25	14,28	28,56	7,03	5
bus_kreisel_7m_270_nus2	7,25		14,12	28,24	6,87	6	4
bus_kreisel_7m_270_nus3	7,25		14,49	28,98	7,24	5	1
bus_kreisel_7m_270_nus4	7,25		13,93	27,86	6,68	5	4
bus_kreisel_8m_180_kriz1	„Geradeaus“	8,25	13,93	27,86	5,68	11	10
bus_kreisel_8m_180_kriz2		8,25	13,96	27,92	5,71	11	10
bus_kreisel_8m_180_nus1		8,25	13,9	27,8	5,65	15	14
bus_kreisel_8m_180_nus2		8,25	13,99	27,98	5,74	14	13
bus_kreisel_8m_180_nus4		8,25	13,85	27,7	5,6	14	13
bus_kreisel_8m_270_kriz1	„Linksabbieger“	8,25	15,15	30,3	6,9	5	4
bus_kreisel_8m_270_kriz2		8,25	15,24	30,48	6,99	4	3
bus_kreisel_8m_270_nus1		8,25	14,41	28,82	6,16	10	9
bus_kreisel_8m_270_nus2		8,25	13,32	26,64	5,07	8	7
bus_kreisel_8m_270_nus3		8,25	14,74	29,48	6,49	7	6
bus_kreisel_8m_270_nus4		8,25	14,83	29,66	6,58	8	6
bus_kreisel_9m_180_kriz1	„Geradeaus“	9,25	14,79	29,58	5,54	8	7
bus_kreisel_9m_180_kriz2		9,25	14,55	29,1	5,3	21	20
bus_kreisel_9m_180_nus1		9,25	15,45	30,9	6,2	8	7

bus_kreisel_9m_180_nus2		9,25	14,9	29,8	5,65	16	14
bus_kreisel_9m_180_nus3		9,25	14,61	29,22	5,36	14	13
bus_kreisel_9m_180_nus4		9,25	14,81	29,62	5,56	15	14
bus_kreisel_9m_270_kriz1	„Linksabbieger“	9,25	15,43	30,86	6,18	7	6
bus_kreisel_9m_270_kriz2		9,25	15,81	31,62	6,56	5	4
bus_kreisel_9m_270_nus1		9,25	15,64	31,28	6,39	7	6
bus_kreisel_9m_270_nus2		9,25	15,18	30,36	5,93	9	8
bus_kreisel_9m_270_nus3		9,25	15,85	31,7	6,6	6	5
bus_kreisel_9m_270_nus4		9,25	15,62	31,24	6,37	7	6

Anlage 12: Ergebniszusammenstellung

Breite der Kreisfahrbahn/Ausfahrradius (für $b_A = 3,50$ m und $b_a = 3,75$ m)

Fahrtbezeichnung	„Fahrtrichtung“	Innenradius [m]	Aussenradius [m]	Aussendurchmesser [m]	Breite der Kreisfahrbahn [m]	Ausfahrradius [m] für $b_A=3,50$ m	Ausfahrradius [m] für $b_a=3,75$ m
	(Vorgabe)	(Ergebnis)					
sattel_kreisel_5m_180_pla	„Geradeaus“	5	10,94	21,88	5,94	14	12
sattel_kreisel_5m_180_pla1		5	11,76	23,52	6,76	14	12
sattel_kreisel_5m_180_pla2		5	12,24	24,48	7,24	11	7
sattel_kreisel_5m_180_pla3		5	11,8	23,6	6,8	11	8
sattel_kreisel_5m_180_kriz1		5	12,27	24,54	7,27	14	11
sattel_kreisel_5m_180_kriz2		5	11,61	23,22	6,61	9	6
sattel_kreisel_5m_270_pla0	„Linksabbieger“	5	12,19	24,38	7,19	14	12
sattel_kreisel_5m_270_pla1		5	12,58	25,16	7,58	18	17
sattel_kreisel_5m_270_pla2		5	12,08	24,16	7,08	16	14
sattel_kreisel_5m_270_pla3		5	13,24	26,48	8,24	12	10
sattel_kreisel_5m_270_kriz1		5	13	26	8	6	3
sattel_kreisel_5m_270_kriz2		5	13,38	26,76	8,38	5	3
sattel_kreisel_6m_180_pla1	„Geradeaus“	6	12,42	24,84	6,42	11	7
sattel_kreisel_6m_180_pla2		6	12,19	24,38	6,19	13	11
sattel_kreisel_6m_180_pla3		6	12,82	25,64	6,82	11	8
sattel_kreisel_6m_180_kriz1		6	12,95	25,9	6,95	19	14
sattel_kreisel_6m_180_kriz2		6	12,52	25,04	6,52	16	14
sattel_kreisel_6m_270_pla1	„Linksabbieger“	6	14,18	28,36	8,18	8	5

sattel_kreisel_6m_270_pla2		6	14,18	28,36	8,18	8	4
sattel_kreisel_6m_270_pla3		6	12,87	25,74	6,87	15	13
sattel_kreisel_6m_270_kriz1	„Linksabbieger“	6	13,84	27,68	7,84	11	8
sattel_kreisel_6m_270_kriz2		6	13,87	27,74	7,87	14	11
sattel_kreisel_7m_180_pla1	„Geradeaus“	7,25	13,67	27,34	6,42	11	8
sattel_kreisel_7m_180_pla2		7,25	13,38	26,76	6,13	14	10
sattel_kreisel_7m_180_pla3		7,25	13,12	26,24	5,87	15	12
sattel_kreisel_7m_180_kriz1		7,25	13,28	26,56	6,03	16	12
sattel_kreisel_7m_180_kriz2		7,25	13,69	27,38	6,44	20	15
sattel_kreisel_7m_270_pla1	„Linksabbieger“	7,25	14,9	29,8	7,65	11	8
sattel_kreisel_7m_270_pla2		7,25	13,77	27,54	6,52	17	16
sattel_kreisel_7m_270_pla3		7,25	14,46	28,92	7,21	12	9
sattel_kreisel_7m_270_kriz1		7,25	14,36	28,72	7,11	13	11
sattel_kreisel_7m_270_kriz2		7,25	14,67	29,34	7,42	7	5
sattel_kreisel_8m_180_pla1	„Geradeaus“	8,25	14,44	28,88	6,19	15	13
sattel_kreisel_8m_180_pla2		8,25	14,41	28,82	6,16	20	14
sattel_kreisel_8m_180_pla3		8,25	14,1	28,2	5,85	18	17
sattel_kreisel_8m_180_kriz1		8,25	14,09	28,18	5,84	17	14
sattel_kreisel_8m_180_kriz2		8,25	14,4	28,8	6,15	16	13
sattel_kreisel_8m_270_pla1	„Linksabbieger“	8,25	14,78	29,56	6,53	12	10
sattel_kreisel_8m_270_pla2		8,25	15,28	30,56	7,03	12	9
sattel_kreisel_8m_270_pla3		8,25	14,88	29,76	6,63	12	10
sattel_kreisel_8m_270_kriz1		8,25	14,98	29,96	6,73	12	9
sattel_kreisel_8m_270_kriz2		8,25	14,87	29,74	6,62	11	9
sattel_kreisel_9m_180_pla1	„Geradeaus“	9,25	15,35	30,7	6,1	12	9

sattel_kreisel_9m_180_pla2		9,25	15,27	30,54	6,02	20	15
sattel_kreisel_9m_180_pla3		9,25	15,09	30,18	5,84	14	12
sattel_kreisel_9m_180_kriz1		9,25	16,12	32,24	6,87	15	12
sattel_kreisel_9m_180_kriz2	„Geradeaus“	9,25	16,15	32,3	6,9	15	10
sattel_kreisel_9m_270_pla1		9,25	15,42	30,84	6,17	15	12
sattel_kreisel_9m_270_pla2		9,25	15,42	30,84	6,17	16	14
sattel_kreisel_9m_270_pla3	„Linksabbieger“	9,25	15,53	31,06	6,28	14	12
sattel_kreisel_9m_270_kriz1		9,25	16,58	33,16	7,33	10	8
sattel_kreisel_9m_270_kriz2		9,25	16,54	33,08	7,29	12	9

Anlage 13: Bemessungsdiagramm

